

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

АРАФФА ХАЛЬДУН ОСМАН

УДК 621.865.8

ДИСЕРТАЦІЯ
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАНУВАННЯ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ
РУХУ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТУ (АКА)

спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Х. О. Араффа

Науковий керівник: **Ткач Михайло Мартинович**, кандидат технічних наук,
доцент

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Араффа Х. О. Автоматизація процесів планування та стабілізації руху антропоморфного крокуючого апарату (АКА). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 13.05.07 «Автоматизація процесів керування» (015 – автоматизація та приладобудування). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Теоретична і практична значущість аналізу і синтезу оптимальних систем стабілізації заданого руху АКА, за відносної складності його математичного та обчислювального апарату, з очевидністю визначають необхідність широкого використання сучасних засобів комп'ютерної техніки та сучасних комп'ютерних технологій для реалізації відповідних методів і обчислювальних алгоритмів. Проте відомі підходи та конкретні універсальні методи оптимального синтезу законів автоматичного керування загалом не орієнтовані на їх широке застосування для вирішення специфічних завдань, що виникають у практиці дослідницького проєктування систем керування АКА. Отже, актуальним є проведення досліджень, спрямованих на розвиток математичних методів планування і стабілізації руху АКА на довільній поверхні.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу планування руху та збільшення запасу стійкості АКА шляхом урахування ефекту запізнювання на отримання та обробку даних про його позиціонування на довільній поверхні.

На підставі аналізу сучасного стану розвитку мобільної робототехніки обрано типовий АКА, для якого проведено аналіз існуючих методів планування і керування в різних умовах функціонування. Показано, що найбільш вразливими під час розроблення антропоморфних крокуючих роботів є планування опорних траєкторій і забезпечення сталого руху АКА уздовж неї.

Для вирішення цього питання розроблено структурно-функціональну схему автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху, яка визначає послідовність і зміст вирішення завдань зі створення автоматичних систем планування опорної траєкторії і стабілізації руху АКА, які забезпечують плавність і стійкість руху АКА уздовж заданої траєкторії.

Для отримання рівнянь кінематичної моделі АКА запропоновано підхід з єдиних системних позицій з використанням представлення Денавіта-Хартенберга. За цього підходу розв'язання прямої задачі кінематики може розглядатися як послідовність однорідних перетворень координат. Розв'язання оберненої задачі для стопи АКА може бути отримано в замкненому вигляді за заданими просторовими координатами кінцевих точок кожної з двох стоп. Для розробленої кінематичної моделі встановлено функціональну залежність положення центру мас АКА та його проєкції на довільну поверхню, яка зумовлена зміною положення ланок АКА під час його руху. Визначено область допустимих кутових відхилень кінематичних пар ланок і напрямки прикладання сили тяжіння до центру мас АКА.

Здійснено формалізацію руху перевернутого маятника в 3D-просторі з метою її використання для автоматичного генерування руху під час ходи АКА. Відтак, реалізовано планування в реальному часі траєкторії стійкого руху АКА на основі ТНМ і 3D-LIPM моделі. Розроблено методику синтезу опорних траєкторій на основі багатофазної структури покрокового переміщення АКА з урахуванням локомоторних синергій взаємодії стоп АКА з довільною опорною поверхнею, що дозволяє уникнути неоднозначності під час розв'язання оберненої задачі кінематики.

Синтезовано систему керування АКА, яка має ієрархічну розподілену архітектуру з використанням складових, побудованих на основі PID-регуляторів. Розроблено алгоритм стабілізації руху АКА в умовах невизначеності рельєфу місцевості на основі MPC-підходу, що дозволяє усунути негативні наслідки ефекту запізнювання в початковій стадії процесу руху АКА при використанні традиційних підходів.

Розроблено програмне забезпечення і проведено імітаційне моделювання із застосовуванням інтегрованої системи інженерних і наукових розрахунків MATLAB. Проведене імітаційне моделювання підтверджує ефективність отриманих у роботі результатів.

Наукова новизна отриманих результатів у дисертаційній роботі полягає у такому:

- розроблено структурно-функціональну схему автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху АКА з поліноміальним згладжуванням опорної траєкторії та оптимальним LQR стабілізуючим регулятором, що забезпечує плавність і стійкість руху АКА уздовж опорної траєкторії;

- розроблено методику синтезу опорних траєкторій на основі багатофазної структури покрокового переміщення АКА з урахуванням локомоторних синергій взаємодії стоп АКА з довільною опорною поверхнею, що дозволяє уникнути неоднозначності під час розв’язання оберненої задачі кінематики;

- розроблено алгоритм стабілізації руху АКА в умовах невизначеності рельєфу місцевості на основі MPC-підходу, що дає можливість усунути негативні наслідки ефекту запізнювання в початковій стадії процесу руху АКА при використанні традиційних підходів.

Практичне значення отриманих результатів

Результати досліджень становлять інтерес як для державних, так і приватних організацій, що займаються проєктуванням і оптимізацією систем керування крокуючими роботами, а також складних мобільних технічних систем.

Результати теоретичних та практичних досліджень використовуються ТОВ «СВІТ САЙТІВ» під час проєктування систем керування крокуючими роботами, використовуються в науково-дослідній роботі студентів наукових груп Інституту новітніх технологій та лідерства НАУ, а також впроваджені в навчальний процес кафедри технічної кібернетики факультету інформатики та

обчислювальної техніки НТУУ «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського» для підготовки лекційних матеріалів та методичних рекомендацій.

Ключові слова: автоматизація процесів керування, антропоморфний крокуючий апарат (АКА), планування опорних траєкторій руху, моделювання механічних складових АКА, оптимальна стабілізація руху.

ANNOTATION

Khaldon Araffa. Automation and controlling the process of motion planning and stabilization of bipedal robot (AKA). – Qualifying scientific work based on the rights of the manuscript.

The thesis for a candidate of technical science degree in speciality 13.05.07 «Automation of control processes» (015 – Automation and instrument making). – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2020.

A modern promising area of robotics is the creation of mobile robots that move autonomously for a relatively long time over unknown terrain. The creation of such robots will make it possible to solve a set of tasks related to protection and protection of the environment, exploration of the area in the interests of various organizations relatively cheaply and without danger to human health. The main difficulties in this case are the creation of algorithmic software that allows you automatically control the movement of robots, using information about its position relative to the inertial coordinate system and terrain conditions

The theoretical and practical significance of the tasks of planning and synthesis of optimal systems of stabilization of the software movement of the AKA, with the relative complexity of its mathematical and computer apparatus, clearly determine the need for widespread use of modern means of computer technology and modern computer technologies for the implementation of appropriate methods and computational algorithms. However, known approaches and specific universal methods for the optimal synthesis of automatic control laws not aimed at their wide

use for solving specific problems arising in the practice of developing research on control systems of AKA. In this regard, it is urgent to carry out research aimed at the development of mathematical methods for optimizing the transitional processes of stabilizing the AKA software movement in different conditions.

Currently, robot control algorithms are improved, using information from force sensors and orientation systems, and software prepared for automatically controlling the robot in dynamic walking mode. The robot's equipment continues to be upgraded, and the issues of improving the dynamics of the electro-hydraulic drive system are being addressed, which have become more acute after the robot's mass and size have increased by almost 2 times. The methods of automated construction of mathematical models of the robot, which not fixed to a fixed base mechanism with tree kinematics, which is superimposed external links, improves.

The aim of the work is to increase the efficiency of the traffic planning process and increase the safety margin of AKA by taking into account the effect of delay on receiving and processing data on its positioning on uneven terrain.

Based on the analysis of the current state of development of mobile robotics, a typical AKA chosen, for which the analysis of existing methods of planning and management in various operating conditions carried out. It shown that the most vulnerable issues in the development of anthropomorphic walking robots are the planning of reference trajectories and ensuring the sustainable movement of AKA along it.

For solve these problems, developed a structural and functional scheme for automating planning processes and optimal stabilization of a given motion. It determines the sequence and content of solving problems for creating automatic systems for planning the reference trajectory and stabilizing the motion of the AKA, which ensure smoothness and stability of the AKA movement along a given trajectory.

To obtain the equations of the AKA kinematic model, an approach proposed from unified system positions using the Denavit-Hartenberg representation. In this approach, the solution of a direct kinematics problem can considered as a sequence of

homogeneous coordinate transformations. The solution of the inverse problem for the AKA limb can be obtained in a closed form using the specified spatial coordinates of the endpoints of each of the two limbs. For the developed kinematic model, the functional dependence of the position of the center of mass of the AKA and its projection on an arbitrary surface is established, which is caused by the change in the position of AKA links during its movement. The area of permissible angular deviations of kinematic pairs of links and the direction of gravity application to the center of mass of the AKA are determined.

The formalization of the movement of an inverted pendulum in 3D space is carried out in order to use it for automatic generation of movement AKA. From here, real-time planning of the AKA steady motion trajectory based on the PZM and 3D-LIPM model is implemented. The method of synthesis of reference trajectories based on the multiphase structure of step-by-step movement of AKA is developed, taking into account the locomotor synergies of interaction of AKA stops with an arbitrary reference surface, which allows avoiding ambiguity in solving the inverse kinematics problem.

A synthesized AKA control system that has a hierarchical distributed architecture using components built on PID controllers. An algorithm for stabilization of AKA movement in conditions of terrain uncertainty has been developed based on the MPC approach, which eliminates the negative consequences of the lag effect in the initial stage of the AKA movement process using traditional approaches.

The scientific novelty of the results is as follows:

1. A structural and functional scheme for automating planning processes and optimal stabilization of a given AKA movement with polynomial smoothing of the reference trajectory and an optimal LQR stabilizing regulator has been developed, which ensures smooth and stable AKA movement along the reference trajectory.

2. The method of synthesis of reference trajectories based on the multiphase structure of step-by-step movement of the AKA is developed, taking into account the locomotive synergies of interaction of the AKA feet with an arbitrary reference surface, which avoids ambiguity in solving the inverse kinematics problem.

3. An algorithm for stabilization of AKA movement in conditions of terrain uncertainty has been developed based on the MPC approach, which allows eliminate the negative consequences of the lag effect in the initial stage of the AKA movement process using traditional approaches.

Practical significance of the results obtained.

The research results are of interest to both public and private organizations involved in the design and optimization of walking robot control systems, as well as complex mobile technical systems.

The results of theoretical and practical research used by LLC “World Sites” during the design of walking robot control systems. Also, it used in the research work of students of scientific groups of the Institute of advanced technologies and leadership of NAU, and are also implemented in the educational process of the Department of technical cybernetics of the Faculty of Informatics and computer engineering of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" for the preparation of lecture materials and methodological recommendations.

Keywords: anthropomorphic walking apparatus (AWA), planning of reference trajectories of movement, modeling of mechanical components of AWA, optimal stabilization of movement.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

За підсумками роботи опубліковані 12 наукових праць, з яких 8 статей у провідних фахових виданнях (з них 1 стаття у іноземному видавництві), які входять до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, WorldCat, Google scholar, і 4 тези за матеріалами науково-практичних конференцій

в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Tkach M., Araffa Kh., Humennyi D. Review The methods and approaches for planning trajectory biped walking biped robot and introduce a new concept for maintaining the highest safety factor on uneven terrain during dynamic walking. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2016. Vol. 2, Issue 29. P. 3–12

(вирішена задача знаходження абсолютного положення стопи двоногого робота з найбільшим запасом стійкості).

2. Araffa Kh. Planning trajectory of anthropomorphic walking robot (biped robot). *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2019. Vol. 24, No. 2. P. 51–55 (запропоновано підхід до генерації траєкторії руху АКА з використанням тривимірного лінійного перевернутого маятника, яка утримує точку нульового моменту).

3. Araffa H., Tkach M. Analytical method of formation of a trajectory of motion of anthropomorphic walking apparatus. *Visnyk of Kherson National Technical University*. 2019. Vol. 69, Issue 2. P. 134–138 (сформовано розрахункову (опорну) траєкторію руху АКА і руху уздовж неї).

4. Araffa Kh., Tkach M., Khlaponin Yu. Applying the forward kinematic of the biped robot with 12 DOF based denavit and hartenberg method. *Сучасний захист інформації*. 2019. Vol. 37, Issue 1. P. 36–47 (сформовано кінематичну модель руху АКА на основі методу Денавіта-Хартенберга).

5. Selyukov A., Araffa Kh., Khlaponin Y., Lialina N. Compensator of trajectory instabilities of aviation radar with aperture synthesis. *Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2019. P. 727–731 (запропоновано спосіб компенсації траєкторії руху з апертурним синтезом).

6. Рудніцька О., Араффа Х. Централізована система управління розподіленими кіберфізичними системами. *Вісник Інженерної академії України*. 2019. Вип. 1. С. 83–88 (розглянуті принципи декомпозиції динамічних компонентів руху кіберфізичних систем).

7. Araffa Kh., Tkach M. Implementation and Simulation A Model Predictive Control for Motion Generation of Biped Robot. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2019. Vol. 2, No. 35. P. 3–12 (синтезовано систему управління для стабілізації траєкторії центру мас і точки нульового моменту за допомогою MPC-підходу).

8. Stenin A., Lisovichenko O., Drozdovych I., Soldatova M., Araffa Kh. Methods of reducing the dimension of technical dynamic systems. *Bulgarian Journal*

for Engineering Design. 2020. No. 42. P. 176–179 (*запропоновано метод агрегації змінних стану динамічних систем*).

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Araffa K. Planning trajectory for the lower limbs of bipedal robot using inverted pendulum: матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій» (м. Тернопіль, 20–21 червня 2019 року). Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. С. 163–164 (*запропоновано метод планування траєкторії руху АКА за допомогою 3D-LIPM моделі*).

10. Araffa K. Controlling Stability Walking of Biped Robot on Uneven Terrain Based On CMP. Наука – майбутнє України: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Вінниця, 24 березня 2017 року). Вінниця, 2017. С. 4–5 (*сформовано опорну траєкторію стійкого руху АКА*).

11. Araffa K. Overview strategy of position controlling of bipedal robot (АКА). Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: Міжнародна наукова інтернет-конференція (м. Тернопіль, 13 вересня 2019 року). Випуск 41, 2019. С. 94–96 (*запропоновано алгоритм управління рухом АКА на нерівній місцевості*).

12. Араффа Х. Задача планирования траектории движения антропоморфного шагающего аппарата. Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: Міжнародна наукова інтернет-конференція (м. Тернопіль, 11 червня 2019 року). Випуск 39, 2019. С. 117–118 (*визначені основні фази руху АКА*).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	14
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ РУХОМ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА	21
1.1 Історія та перспективи розвитку мобільних робототехнічних систем. Антропоморфний крокуючий апарат як об'єкт керування	21
1.2 Аналіз методів і підходів щодо керування сталим рухом антропоморфного крокуючого апарата	29
1.3 Характеристика методів планування опорних траєкторій руху антропоморфного крокуючого апарата	35
1.4 Аналіз проблеми автоматизації керування сталим рухом антропоморфного крокуючого апарата і шляхи її вирішення. Постановка завдань дослідження	48
Висновки до розділу 1	56
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РУХУ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА	58
2.1 Побудова кінематичної моделі руху антропоморфного крокуючого апарата на основі матричного методу послідовної побудови систем координат	58
2.1.1 Пряма задача кінематики руху антропоморфного крокуючого апарата	62
2.1.2 Зворотна задача кінематики для ноги антропоморфного крокуючого апарата	63
2.2 Розподіл кінетичної і потенційної енергій під час руху антропоморфного крокуючого апарата	67

2.2.1	Кінетична енергія антропоморфного крокуючого апарата	67
2.2.2	Потенційна енергія антропоморфного крокуючого апарата	69
2.3	Динамічна векторно-матрична модель руху антропоморфного крокуючого апарата	70
2.4	Критерій збереження положення точки нульового моменту, як умова рівноваги антропоморфного крокуючого апарата під час руху по довільній поверхні	75
Висновки до розділу 2		79
РОЗДІЛ 3 ПЛАНУВАННЯ ОПОРНОЇ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА		80
3.1	Загальні положення планування опорної траєкторії руху антропоморфного крокуючого апарата	80
3.2	Планування в реальному часі траєкторії стійкого руху антропоморфного крокуючого апарата на основі ТНМ і 3D-LIMP моделі	83
3.2.1	Формалізація руху перевернутого маятника в 3D-просторі	83
3.2.2	Траєкторія руху центру мас АКА	89
3.2.3	Траєкторія ноги з маховим рухом	91
3.3	Багатофазна структура переміщення антропоморфного крокуючого апарата по опорній поверхні	97
Висновки до розділу 3		110
РОЗДІЛ 4 КЕРУВАННЯ РУХОМ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА НА ДОВІЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ		111
4.1	Загальна стратегія керування рівновагою	111

	антропоморфного крокуючого апарата	
4.2	Використання МРС підходу для забезпечення сталого руху антропоморфного крокуючого апарата	119
4.3	Синтез траєкторії руху гомілкового суглоба антропоморфного крокуючого апарата	125
4.4	Керування рівновагою антропоморфного крокуючого апарата під час руху на довільній поверхні	127
4.4.1	Керування нахилом тулуба в сагітальній площині	128
4.4.2	Керування положенням стопи АКА	132
4.5	Моделювання стійкового руху антропоморфного крокуючого апарата	136
4.5.1	Хода по прямій лінії	137
4.5.2	Ускладнення ходи зі встановленням на підлогу перешкод	142
	Висновки до розділу 4	146
	ВИСНОВКИ	147
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	149
	ДОДАТКИ	165

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АКА	— антропоморфний крокуючий апарат
БВО	— блок визначення орієнтації
БРОЗК	— блок розв’язання оберненої задачі кінематики
БРПК	— блок реалізації програмного керування
БСЗС	— блок синтезу законів стабілізації
БСК	— бортова система керування
БСП	— бортова система планування
БФПТ	— блок формування програмної траєкторії
ДМ	— динамічна модель
КМ	— кінематична модель
ОРА	— опорно-руховий апарат
РТС	— робототехнічні системи
РЦМ	— рух центру мас
СК	— системи керування
СТЗ	— система технічного зору
ТНМ	— точка нульового моменту
ЦТВА	— центральний генератор впорядкованої активності
ТЦМ	— точка центру мас
ТПЦМ	— точка проєкції центру мас

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасним перспективним напрямом робототехніки є створення мобільних роботів, зокрема, антропоморфних крокуючих апаратів (АКА), які автономно переміщаються відносно тривалий час по відкритій пересіченій місцевості. Створення таких мобільних роботів дозволяє порівняно дешево і без шкоди для здоров'я людей вирішувати комплекс завдань, пов'язаних із захистом і охороною навколишнього середовища, розвідкою місцевості в інтересах різних організацій. Основні труднощі при цьому полягають у створенні алгоритмічного забезпечення, що дозволяє автоматично керувати рухом мобільних роботів, використовуючи інформацію про його положення щодо обраної системи координат і перешкод місцевості.

Зазначені фактори зумовлюють неослабний інтерес до вирішення проблем синтезу алгоритмів роботи систем автоматичного керування автономним рухом мобільних роботів. Різним аспектам цієї проблеми присвячені роботи вітчизняних та закордонних учених, серед яких слід відзначити, в першу чергу, таких як М. Белецький, В. Бербюк, М. Вукобратович, В. Б. Ларін, Д. Є. Охоцимський, Т. Стрижак, S. Aleshinsky, R. Alexander McN, Y. Aoustin, E. Muybridge [151], Maximo A. Roa, T. Mc Geer, Christian Ott, Y. F. Zheng, D. A. Winter, A. Channon, D. B. Dacic, M. Dietrich, J. J. Eng, A. M. Formal'sky, T. Zieli'nska.

Однак за наявності великої кількості публікацій, у яких використовуються як класичні, так і сучасні підходи до синтезу алгоритмів обробки інформації та керування, завдання залишається не вирішеним повною мірою. Особливо це стосується синтезу систем автоматичного керування АКА. Це пов'язано з надмірною спрощеністю його постановки, що зумовлено принциповою неможливістю знання точної математичної моделі АКА через відсутність необхідного обліку можливостей і характеристик реальних датчиків і бажання авторів вирішити проблему керування АКА за наявності великої

кількості різномірної інформації на основі одного, іноді досить складного алгоритму.

Таким чином, актуальність завдання створення алгоритмів роботи системи керування АКА, з одного боку, визначається їх достатньо широким використанням, з іншого – відсутністю працездатних процедур, які дозволяють успішно керувати рухом мобільних роботів по пересіченій місцевості.

Особливо слід відзначити щодо використання в цьому сенсі АКА роботи таких учених як: Б. А. Бордюг, А. Г. Тімошенко, В. В. Величенко, Д. Є. Охоцимський, Н. А. Бернштейн, В. В. Белецький, D. Wollher, A. Frank, J. Hill, R. McGee, J. Furesho, M. Vucobratovic, Ch. Ott, M. A. Roa, G. Hirzinger та ін.

Незважаючи на значну кількість робіт у цьому напрямі, дана область досліджень залишається сферою інтенсивного розроблення дотепер.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в рамках планових науково-дослідних робіт кафедри технічної кібернетики НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», зокрема, держбюджетної НДР «Антропоморфний роботизований транспортний засіб для розвантаження людини в умовах підвищеного ризику та невизначеності рельєфу місцевості» (номер державної реєстрації НДР: 0117U001179).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу планування руху та збільшення запасу стійкості АКА шляхом урахування ефекту запізнювання на отримання та обробку даних про його позиціонування на довільній поверхні.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання:

- на підставі аналізу сучасного стану проблеми автоматизації процесу керування АКА виконати теоретичні дослідження процесів планування опорних траєкторій та дотримання рівноваги за заданого руху АКА по довільній поверхні та визначити шляхи її вирішення;

- для моделювання кінематики і динаміки АКА встановити функціональну залежність положення центру мас АКА та його проєкції на

довільну поверхню, що пов'язано зі зміною положення ланок АКА під час його руху;

- визначити область допустимих кутових відхилень кінематичних пар ланок і напрямки прикладання сили тяжіння до центру мас АКА;
- вдосконалити існуючі критерії стійкості АКА і виконати пошук оптимальних розв'язків задачі збереження рівноваги під час руху АКА в умовах довільної опорної поверхні;
- розробити нові ефективні стратегії планування траєкторій руху ТЦМ і стоп АКА, що забезпечують дотримання і відновлення стійкого руху АКА на довільній опорній поверхні;
- розробити систему стабілізації заданого руху АКА на довільній поверхні, яка забезпечить зміну кутових положень кінематичних пар апарата залежно від його положення і стратегії керування;
- провести імітаційне моделювання для підтвердження ефективності отриманих наукових результатів.

Об'єкт дослідження – процеси планування і стабілізації заданого руху АКА.

Предмет дослідження – моделі та методи побудови системи автоматизації процесів планування і стабілізації заданого руху АКА на довільній опорній поверхні.

Методи дослідження. У дисертаційному дослідженні використано методи теорії матриць, теорії диференціальних рівнянь, теорії системного аналізу, теорії автоматичного керування, теорії класичного варіаційного числення, аналітичної механіки, аналітичного конструювання оптимальних LQR - регуляторів стабілізації, моделювання складних систем. Для розроблення програмного забезпечення і проведення імітаційного моделювання застосовувалася інтегрована система інженерних і наукових розрахунків MATLAB.

Наукова новизна отриманих результатів у дисертаційній роботі полягає у такому:

– розроблено структурно-функціональну схему автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху АКА з поліноміальним згладжуванням опорної траєкторії та оптимальним LQR стабілізуючим регулятором, що забезпечує плавність і стійкість руху АКА уздовж опорної траєкторії;

– розроблено методику синтезу опорних траєкторій на основі багатофазної структури покрокового переміщення АКА з урахуванням локомоторних синергій взаємодії стоп АКА з довільною опорною поверхнею, що дозволяє уникнути неоднозначності під час розв’язання оберненої задачі кінематики;

– розроблено алгоритм стабілізації руху АКА в умовах невизначеності рельєфу місцевості на основі MPC-підходу, що дає можливість усунути негативні наслідки ефекту запізнювання в початковій стадії процесу руху АКА при використанні традиційних підходів.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані в дисертації теоретичні результати дають змогу надати мобільним роботам нові функціональні можливості, істотно підвищити складність подоланого рельєфу місцевості, обґрунтовано вибирати конфігурацію, комплектацію і основні технічні характеристики блоків АКА. Робота становить інтерес як для державних, так і приватних організацій, що займаються проєктуванням систем керування крокуючими роботами.

Результати теоретичних та практичних досліджень використовуються в практичній діяльності ТОВ «СВІТ САЙТІВ» під час проєктування систем керування крокуючими роботами (Додаток А), впроваджені в навчальний процес Національного авіаційного університету для використання в науково-дослідній роботі студентів наукових груп Інституту новітніх технологій та лідерства (Додаток Б), а також впроваджені у навчальний процес кафедри технічної кібернетики НТУУ «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського» для підготовки лекційних матеріалів та методичних рекомендацій

до виконання комп'ютерного практикуму з дисципліни «Оптимальні системи управління» (Додаток В).

Особистий внесок здобувача. Основні підсумки дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У разі використання відомих положень мають місце коректні посилання на авторів і відповідні джерела. Під час проведення досліджень, результати яких опубліковані особисто і в співавторстві, автором дисертації запропоновано підхід до генерації траєкторії руху АКА з використанням тривимірного лінійного перевернутого маятника, формування розрахункової (опорної) траєкторії руху АКА і руху уздовж неї, формування кінематичної моделі руху АКА на основі методу Денавіта-Хартенберга, синтез системи керування для стабілізації траєкторії центру мас і точки нульового моменту за допомогою MPC-підходу.

Апробація матеріалів дисертації. Окремі положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на семінарах ради НТУУ «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського» та були представлені і схвалені на чотирьох наукових конференціях різних рівнів, а також опубліковані у відповідних наукових виданнях, серед яких:

- IV Всеукраїнська науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій» (м. Тернопіль, 20–21 червня 2019 р.);

- VIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Наука – майбутнє України» (м. Вінниця, 24 березня 2017 р.);

- Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (м. Тернопіль, 13 вересня 2019 р.);

- Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти» (м. Тернопіль, 11 червня 2019 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні

іноземної держави), які включені до міжнародних наукометричних баз, і 4 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій (Додаток Г).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, шести додатків, містить три таблиці, 59 рисунків. Загальний обсяг роботи становить 175 сторінок. Список використаних джерел містить 164 найменування, розміщених на 16 сторінках.

Розділ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ РУХОМ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА

1.1. Історія та перспективи розвитку мобільних робототехнічних систем. Антропоморфний крокуючий апарат як об'єкт керування

Упродовж розвитку цивілізації людина прагла до накопичення достатку й підвищення показників якості життя. Як наслідок, з підвищенням соціальних норм постійно зростає потреба збільшення кількісних і якісних характеристик товарів споживання, що своєю чергою, потребує поліпшення інструментів видобутку сировини і виготовлення продукції [1]. Одним із методів збільшення достатку залишається впровадження експлуатаційної і найманої людської праці [1; 2]. Так, базовими властивостями працівників у цьому випадку була їхня здатність виконувати певну роботу під впливом факторів керування, які могли надходити до окремих працівників і їхніх груп. Такі властивості централізованого керування уможливили виконання складних завдань. Можливість централізовано керувати робітниками за допомогою доступних засобів впливу встановила явну перевагу застосування людської праці порівняно з будь-якими іншими її видами.

Використання методів підвищення особистого достатку, заснованих на експлуатації людської праці, залишалося актуальним до часу перевищення граничної межі їх рентабельності [1–3].

Для вирішення проблеми нерентабельності людської праці в умовах примусової або найманої форми впливу були застосовані методи підвищення якісних характеристик виробів і зменшення витратності виробництва. В основу цих методів було покладено постійну модернізацію інструментального забезпечення працівників. У разі застосування незмінної кількості робітників швидкість виготовлення продукції і її якість зростали. Однак, незважаючи на

підвищення продуктивності виробництва, утримання робітників вимагало значних витрат. Для зменшення витратності виробництва на оплату праці або на утримання робітників було сформовано концепцію часткової заміни їх механізмами [4]. Така заміна можлива в тому разі, якщо робітник виконував однотипні операції. Для подальшого зменшення витратності у виробництво вводилися більш складні механічні засоби автоматизації, які виконували технологічні операції, ґрунтуючись на інформації про довкілля, стан системи, передавальної функції операції тощо [4–6]. Так, складність передавальної функції, що описувала процеси автоматизації, зростала відповідно до технологічних потреб та інструментальних можливостей автоматизованого процесу [6]. Заміна людської праці засобами автоматичного керування уможливила мінімізацію витрат для видобутку ресурсів і виробництва споживчих товарів. Однак автоматизація певних операцій потребувала застосування складних математичних обчислень і призвела до підвищення вартості відповідних інструментальних засобів, якими виконувалися ці обчислення. Окрім цього, механічні автоматизовані інструменти заміняли тільки заздалегідь задані технологічні операції. Для виконання не заданих, а тільки подібних операцій, стало необхідним переналаштування або заміна інструментів. Для вирішення цих проблем залучалися комп'ютеризовані системи та гнучкі методи автоматизації [7].

Впровадження комп'ютеризованих систем і гнучких методів автоматизації уможливило застосування концепції програмного керування і засобів цифрової схемотехніки для вирішення широкого спектра завдань господарювання людини. Зокрема, в разі автоматичного виконання технічних операцій, котрі передбачають функціональну взаємодію інструменту з об'єктом в умовах впливу навколишнього середовища (може включати вплив людини), впроваджувалися робототехнічні системи (РТС) [8–10, 15, 16]. Важливою відмінністю РТС порівняно з іншими інструментальними засобами, є використання математично-алгоритмічного програмного забезпечення, яке за допомогою електронно-обчислювальних машин може взаємодіяти з об'єктом,

середовищем експлуатації, людиною і класифікувати, власне, технічний стан [17]. Тому з перелічених причин РТС отримали широкий спектр застосування практично в усіх сферах господарювання людини.

Економічна доцільність упровадження і простота розробки дали поштовх для значного поширення промислових РТС. Такі РТС діляться на спеціалізовані й універсальні, мобільні і стаціонарні. Залежно від поставлених завдань, дані системи додатково характеризуються рівнем гнучкості конструкції і системами керування (СК).

Останнім часом широкого розповсюдження набула тематика розроблення і впровадження автономної й автоматизованої транспортної робототехніки [18; 19]. Крім промислового або транспортного використання, існують й інші сфери застосування РТС. Кожна з них має свій рівень розвитку і впровадження. Однак на сьогодні існують галузі господарювання, які тільки розпочинають упровадження таких засобів, зокрема: медицина, сервіс, торгівля, вантажні перевезення тощо [19–22]. Упровадження РТС у ці галузі дасть змогу істотно підвищити рівень соціального розвитку суспільства.

Використання РТС для вирішення соціальних завдань передбачає взаємодію людини з апаратом для спільного виконання певних дій [23]. Вагомими факторами спрощення взаємодії робота і людини є наявність простих для людини, але спільних з роботом інтерфейсів [24; 25]. Так, для обміну командами і відповідями оптимальним інтерфейсом взаємодії є людська мова [26; 27], яка відтворюється і сприймається голосом. Для здійснення процесу передавання матеріальних предметів найбільш ефективною є багатоланкова консоль з антропоморфним інструментом для маніпуляцій [28–31]. Крім завдань, що вимагають безпосередньої взаємодії людини і робота, до сфери соціального спрямування належать роботи, які доповнюють людину певними якісними характеристиками, зокрема специфічною сенсорною системою [32; 33], підвищеною вантажопідйомністю, прохідністю, стійкістю до механічних, теплових, хімічних впливів тощо [34–37]. Зазначимо, що за останні десятиліття розвиток математичних і апаратно-програмних засобів розпізнавання й синтезу

мови досяг якісно нового рівня [38], а також методи обробки зображення [28; 39], відеосигналу [40], тактильної інформації [32] та інших сенсорних засобів [32; 41]. Такий розвиток стимулював пришвидшення інтеграції РТС у соціальну сферу. Також позитивно на розвиток РТС цього напрямку вплинуло якісне зростання продуктивності, енергоефективності, мініатюризації мікро-ЕОМ [42–46] та іншої електроніки, що застосовується для керування технічними об'єктами.

Перспективною галуззю РТС для застосування в соціальній сфері господарювання залишається мобільна робототехніка [47–51]. Однак інтенсивність її впровадження знаходиться на низькому рівні [52]. Існуючі розробки в цьому напрямі базуються на принципах гусеничного або колісного переміщення [52]. Антропоморфні системи розвинені значно гірше [32, 48, 49, 51, 53]. Так, найуспішнішими системами соціального спрямування, що рухаються за колісним або гусеничним принципом наведені на наступних рисунках

		Rollin'	Justin	(
Рис.	1.1	a),	KATE	rev.1
Рис.	1.1 b)	[54],	Meet Pepper	(рис. 1.1 c), [29].

Вагомий науково-експериментальний внесок у сучасні системи соціальної робототехніки на колісному або гусеничному принципі руху отриманий у роботах [37; 55–57]. Соціальна робототехніка залишається об'єктом пильної уваги науковців усього світу і має головний пріоритет перед іншими напрямками розвитку мобільної робототехніки.

Варто зазначити, що в результаті досліджень, проведених такими авторами, як: Б. А. Бордюг [49], В. Б. Ларін [53], В. В. Величенко [58], Д. Е. Охоцимський [59], Н. А. Бернштейн [48], В. В. Білецький [47; 60], D. Wollher [61], Kopman [62], A. Frank [63], J. Hill [64], R. McGee [65–67], J. Furusho [41], M. Vucobratovic [51], Ch. Ott [54, 68], M. A. Roa, G. Hirzinger [69], спільне завдання побудови роботизованого крокуючого апарата з антропоморфним принципом руху було розмежовано на низку підзадач,

вирішення яких уможливило в перспективі успішне розв'язання первинного завдання з побудови АКА з динамікою, властивою людському організму.

На основі цих досліджень були зроблені успішні проекти побудови крокуючих роботів. Варто відзначити такі проекти: DLR BiPed (рис. 1.2, *a*), Atlas (рис. 1.2, *b*); ASIMO (Рис. 1.2, *c*), REEM-C (рис. 1.2, *d*), HRP 4 («Promet») (рис. 1.2, *e*), Surena (рис. 1.2, *f*). Однак, незважаючи на значний прогрес у побудові АКА, не існує закінченого виробу, здатного забезпечити сучасні потреби [68; 70; 71] в різних сферах народного господарства.



Рис. 1.1. Гусеничні та колісні системи соціальної робототехніки: *a* – Rollin' Justin; *b* – KATE rev.1; *c* – Meet Pepper

*a**b**c**d**e**f*

Рис. 1.2. Найуспішніші крокуючі РТС соціальної сфери Naybil'sh us: *a* – DLR BiPed; *b* – Atlas; *c* – ASIMO; *d* – REEM C; *e* – HRP 4 ; *f* – Surena

Відомо, що модель АКА характеризується типом і методом його представлення [47; 49]. Розрізняють аналітичні та комп'ютерні типи кінематичної й динамічної моделей АКА. Аналітична кінематична модель здебільшого подається в матричній формі й описує лінійне і кутове переміщення ланок АКА, не враховуючи причин, що викликали ці переміщення. Динамічна модель описує дію зовнішніх і внутрішніх сил на

ланки АКА, враховує довжини, маси ланок і час впливу цих величин. Застосування аналітичних методів подання кінематичної і динамічної моделей має низку обмежень у застосуванні. Вони характеризуються складністю, розмірністю і розмірами відповідних математичних виразів.

АКА як об'єкт керування. Слід зазначити, що за останні роки роботи зі створення крокуючих роботів, у тому числі антропоморфних, в усьому світі помітно активізувалися. Провідні університети і відомі в цій сфері фірми вважають це питанням престижу, оскільки створення таких апаратів наочно свідчить про технічні та організаційні можливості дослідницьких центрів. Сучасні, керовані за допомогою комп'ютера крокуючі роботи та інші машини з різною кількістю ніг створюють практично у всіх промислово розвинених країнах світу. Невід'ємними компонентами антропоморфного крокуючого апарата є [72]:

- конструкція виконавчого механізму;
- приводи (найчастіше електрогідролічні);
- джерело живлення з високою питомою потужністю;
- система відчуття, що використовує силомоментні, тактильні, телевізійні, акустичні та інші сенсори;
- система орієнтації та навігації;
- система відображення інформації у формі, зручній для оператора;
- система керування, що складається з апаратури оператора і бортової системи антропоморфного робота;
- алгоритми управління, що забезпечують оборотне дистанційне керування системою приводів з урахуванням динаміки виконавчих механізмів і керуючих властивостей людини, а також реалізують супервізорне і автоматичне керування.

З погляду можливостей при динамічній ходьбі безумовний інтерес становить крокуючий робот Мюнхенського технічного університету – антропоморфний крокуючий робот «Johnnie» (рис. 1.3) [141]. Подібні роботи є також у Берлінському технічному університеті, в університетах у Нью-

Гемпширі, Мічигані, Масачусетсі, а також у Сербії, Австралії та інших країнах. Кінематика і габарити такого робота подібні людським. Він має 18 керованих ступенів рухливості, оснащених електричними сервоприводами. На стопах встановлені шестикомпонентні силомоментні датчики, в суглобах – датчики кутів, є безплатформенна система орієнтації робота з використанням інерціальних датчиків і система технічного зору. Робот здатний рухатися з високою швидкістю в режимі динамічної ходьби по рівній горизонтальній і похилій поверхнях, а також по сходах. Система технічного зору дозволяє виявляти і долати перешкоди (обходити і переступати) [61]. Описаний вище АКА є типовим об'єктом керування, який розглядається в даній роботі. Як вже говорилося вище, одними з найважливіших і найскладніших наукових завдань, які необхідно вирішити при управлінні рухом такого робота, є власне завдання планування опорних траєкторій і управління стійкою ходьбою.

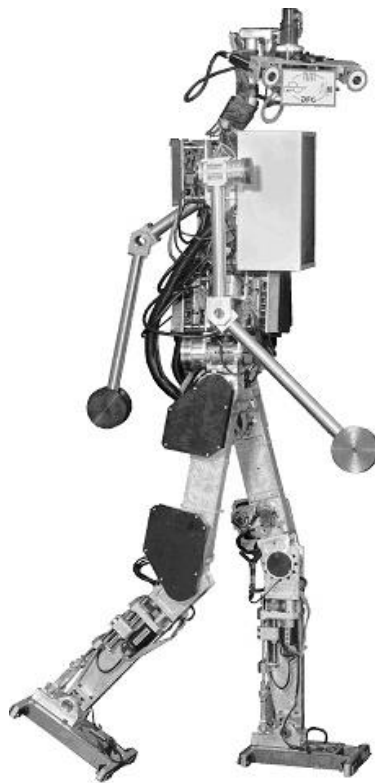


Рис. 1.3. Робот «Johnnie» (Німеччина)

1.2. Аналіз методів і підходів щодо керування сталим рухом антропоморфного крокуючого апарата

Беручи до уваги те, що збереження стійкого руху є одним із найважливіших завдань під час побудови крокуючих апаратів, вагомий внесок у вирішення зробили такі вчені: E. Muybridge, J. Hill, W. Ferrell, R. Johnson, R. McGee, T. McGeer, A. Frank, A. Pai, C. Chow, D. Jacobson, M. Vukobratovic, Chemori, S. Le Flock, S. Krut, E. Dombre, H. Hemami та ін.

Механізм і структура АКА мають велику кількість ступенів свободи, отже, завдання знаходження траєкторій руху суглобів має безліч розв'язків. Складність завдань варіюється від прямолінійних пересувань по гладкій поверхні до керованого руху по нерівній поверхні.

Забезпечення стійкого руху АКА передбачає побудову та опис методів керування сталим рухом АКА, які ґрунтуються на умовах дотримання стійкості й обраної стратегії керування апаратом. Методи керування сталим рухом поділяються на аналітичні та антропоморфні.

В аналітичних методах діє припущення, що, якщо стопи робота переміщуються вперед і тіло робота зберігає рівновагу, то АКА рухається вперед. Таким чином, рух АКА є комбінацією переміщення ніг і стабілізації тулуба. Типовий алгоритм двоногої ходи має такий вигляд:

1. Планування траєкторії руху робота для визначення положень стоп.
2. Розрахунок траєкторії руху центру мас з урахуванням моделі розподілення ваги і критерію збереження рівноваги під час руху.
3. Генерація руху ланок педипуляторів робота, що враховує фазу опори на одну і на дві ноги і забезпечує рух вздовж заданого шляху.

Задля більшої рівноваги при квазістатичному способі ходьби, тобто під час ходьби з малими швидкостями, досить задавати траєкторію руху робота, за якої проекція центру мас лежить у площі опори стоп робота [62]. При русі з великими швидкостями виникають інерційні сили, і відстеження лише центру мас робота стає недостатнім.

Найпоширенішим критерієм ходьби зі збереженням рівноваги є точка нульового моменту (ТНМ) [62]. Способом генерації руху ланок педипуляторів може бути підняття стопи (що належить переміщуваний нозі), рух стопи вперед і постановка стопи назад на поверхню. Моделі розподілу мас найчастіше передбачають, що вся маса зосереджена вище стегна. Тоді траєкторія центру мас, що визначається за допомогою критерію ТНМ, разом з положеннями стоп використовується для знаходження кутів у педипуляторах, що задає рух робота. Варіації вищеописаної процедури включають у себе зміни критерію збереження рівноваги під час ходьби [62; 73], зміни моделі розподілу мас [74] і зміни способу генерації траєкторії ланок педипуляторів АКА [75]. Крім активної ходьби, може бути і пасивна з дефіцитом керуючих впливів. Прикладом може слугувати рух АКА по похилій поверхні без використання приводів, у якій немає динамічної стабілізації робота [75]. У пасивного АКА ходьба виглядає схожою на ходьбу людини, однак, завдання утримання рівноваги сильно ускладнюється. Крім пасивної ходьби, досить цікаві для дослідження також стрибаючі роботи. Зокрема, АКА Raibert's Leg Lab керується на основі ідеї про одноноге перестрибування [76]. Схема керування Райберта є специфічною і не може бути безпосередньо розповсюдженою на інші види руху, такі як, наприклад, ходьба. Для цих випадків руху АКА керування є спрощеним. Іншим прикладом спрощеного керування є система «інтуїтивного керування» Пратта [77]. «Інтуїтивне керування» показує хороший результат для контролю 2D робота на практиці, і для 3D робота в симуляції [78].

Одним з аналітичних підходів є підхід, коли вибираються параметри керування, які зводять до мінімуму функцію вартості переміщення. При цьому як вартість може виступати, наприклад, використана енергія в перерахунку на пройдену відстань. На виході розраховується оптимальна траєкторія як дискретна функція від часу [79]. Тобто, на вихід надходить набір чисел, наприклад, коефіцієнтів поліномів, або сплайнів. Ці коефіцієнти являють одну або кілька функцій однієї незалежної змінної (в даному випадку, часу). Рівновага АКА при русі по заданій траєкторії є різною для різних реалізацій

оптимального рішення. Інакше кажучи, за заданою траєкторією можна отримати різні реалізації стабільного руху АКА залежно від того, чи використовується час або одна з інших динамічних змінних стану як незалежна змінна в поданні функції. У роботі [45] реалізовано оптимальну за вартістю енергії траєкторію для контролю в 2D і 3D симуляції роботів у термінах кута гомілковостопного суглоба (а не часу).

Також є методи, де рівновага АКА забезпечується оптимальним керуванням зворотним зв'язком, яке включає в себе оптимальне управління траєкторією [80].

За оптимального керування зворотним зв'язком оптимальні траєкторії виходять з усіх можливих відправних точок. У кожній стартовій точці існує безліч контрольних значень (наприклад, моментів і струмів). Оптимальне керування зі зворотним зв'язком гарантує зберігання рівноваги під час руху, оскільки забезпечення рівноваги є оптимізаційним критерієм в даній задачі. Крім того, швидкість досягнення мети і стійкість до збурень можуть бути включені як частина функції витрат у задачі оптимізації. Таким чином, за допомогою оптимального управління зі зворотним зв'язком найкращі (оптимальні) траєкторії можуть бути представлені поблизу від наміченої траєкторії, наприклад, за допомогою LQR-регуляторів стабілізації руху АКА [81].

Еволюційні алгоритми управління використовують евристичні алгоритми для досягнення оптимізаційного критерію динамічного балансу, наприклад, досягнення критерію ТНМ, і являють собою функцію відповідності між динамічними станами і контрольними значеннями, які вимагають кінцево-розмірного уявлення, наприклад, використання ваги нейронної мережі. У такому підході використовується один з алгоритмів навчання, і евристичні методи оптимізації можуть бути використані для пошуку ваг і топології для досягнення деякого оптимізаційного критерію [82]. Проблема з фізичної реалізації даних методів полягає в тому, що навчання зазвичай включає в себе падіння, і більшість АКА не здатна витримувати сотні або тисячі падінь. Тим не

менш, малогабаритні роботи RunBot використовують нейронні мережі та їх навчання [83] для надійного контролю двовимірної ходьби. Іншим важливим недоліком нейромережевих алгоритмів, який ускладнює їх практичне використання в системах керування реального часу, є експоненціальне зростання складності алгоритму залежно від кількості вхідних параметрів.

Слід зазначити, що багато тварин мають нейронні ланцюги (рефлекторні дуги), що генерують патерни, які схожі на осмислені сигнали головного мозку і ритмічно подаються опорно-руховому апарату. При цьому такі нейронні ланцюги мають можливість подавати їх навіть за відсутності зворотного зв'язку від кінцівок і інших частин тіла з цільовими м'язами [84]. Такі ланцюги називаються центральними генераторами впорядкованої активності (ЦГВА). Один із поглядів на спосіб пересування АКА, близький за своєю філософією до пасивної динаміки, полягає в тому, що хода – це похідна механіки і рефлекторних дуг, яка якоюсь мірою аналогічна пов'язаним коливанням. Роботи, якими керують за принципом ЦГВА, були перевірені в 2D [13] і 3D [85] симуляції.

Робастне керування – керування, яке оптимізовано для зменшення невизначеності в параметрах моделювання, сенсорних властивостей або дії навколишнього середовища [86]. Безумовно, будь-яка система управління рухом АКА має враховувати невизначеності, незалежно від того, використовуються формальні методи управління, чи ні. Щодо двоногого пересування робастність повинна включати в себе не тільки робастність невідомих параметрів, але також робастність невідомих властивостей моделі (наприклад, тертя всередині моторів) і невідомих ступенів свободи (наприклад, порушені коливання).

Один із способів зменшення ступенів свободи полягає в тому, щоб всі кути зчленувань слідували наперед заданим функціям від кута стопи (в системі 2D)[87]. Успішне застосування такого способу скорочує число ступенів свободи до одного. Даний підхід є чимось протилежним біологічній ідеї про необмежене різноманіття [88], де несуттєві ступені свободи є також частково

контрольованими (а не повністю). З використання даного підходу під час переміщення в тривимірному просторі вибираються два неконтрольованих степені вільності (припускаючи, що відсутнє обертання по вертикальній осі), а за наявності послідовно-еластичних приводів вибирається більше число степенів вільності [89].

У тварин, які біжать, центр маси рухається на кшталт руху центру зворотного маятника з пружиною. Така модель уявлення ходьби іноді називається зворотним пружинним маятником (Spring-Loaded Inverted Pendulum) [66]. Дана модель також може бути застосована до двоногих роботів, оскільки маса тіла робота зазвичай більше, ніж маса ніг.

Серед підходів керування стійким рухом АКА відзначимо роботу Пратта [90], у якій він, використовуючи модель лінійного зворотного маятника, ввів поняття точки захоплення як точки, куди необхідно поставити ногу при кроці з поточного стану, щоб робот зупинився в стані рівноваги після зробленого кроку. Точка захоплення як критерій стабільності є одним зі способів керування роботами PETMAN [91] і Atlas [92].

Антропоморфні методи базуються на застосуванні антропоморфних моделей апарата і структури сенсорної системи. Зокрема, у своїх роботах Ц. Чоу і Д. Якобсон [93] досліджували стійкість опорної фази (пози) із застосуванням методу Ляпунова [16; 30; 94; 95] на прикладі антропоморфного апарата з динамічними властивостями, які притаманні людському опорно-руховому апарату (ОРА). Установлено, що у зв'язку з тим, що на верхню частину людського тіла припадає 70 % загальної маси, для опису АКА може бути застосована спрощена модель.

Робота Дж. Хілла [64] стосується керування позою антропоморфного крокуючого апарата і значно відрізняється від підходу, що застосований у роботі К. Чоу і Д. Якобсона. Так, автор будує рівняння руху механізму, що складається з семи ланок, і являє собою: корпус, стегно, гомілку, стопу, плече, передпліччя і голову. Для кожної з ланок задано масу і момент інерції.

Під час досліджень стійкості пози крокуючих апаратів Р. Мак Гір [65; 96] і Е. Пий [97] ігнорували масу опор. Однак в їхніх роботах розглядалося керування чотириногим крокуючим апаратом, деякі ідеї і методи якого можна використовувати і для двоногих антропоморфних крокуючих апаратів. Крім того, в роботі запропоновано керування стабільним рухом апарата за принципом телекерування, але при цьому закон руху задається людиною, а його виконання покладається на системи апарата. Загальний вигляд запропонованої СК подано на рис. 1.4. При цьому можливості такої системи повинні бути більшими, ніж в автоматичній СК, оскільки завданням ЕОМ залишається тільки обчислення простих завдань планування траєкторій.

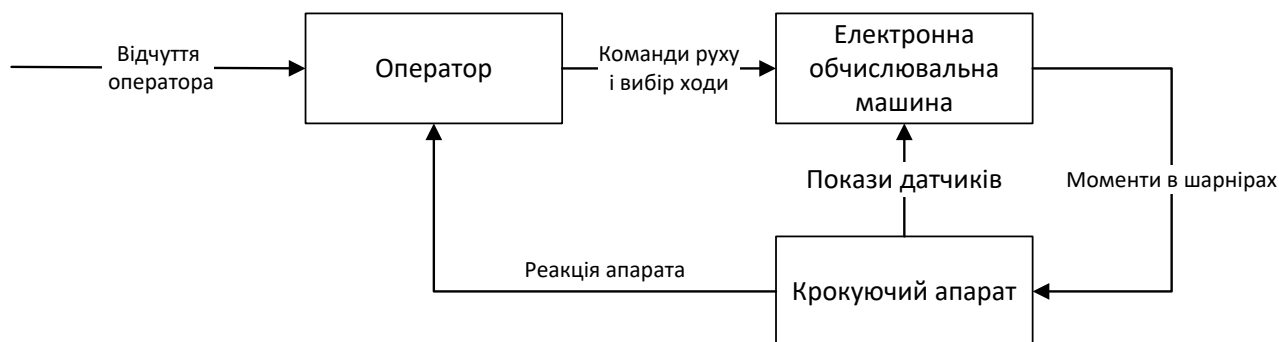


Рис. 1.4. Блок-схема людино-машинної СК зі стійким рухом АКА

Запропоноване керування може бути застосовано для стабілізації стійкої пози двоопорного і чотириколісного апаратів, якщо всі їх опори торкаються поверхні. При цьому контактна поверхня дотику стопи апарата до певної ОП має бути задана у вигляді взаємодії сил в єдиній точці. Таким чином, питання про дотримання стійкого руху апарата зводиться до визначення власних значень системи, а саме: положення ланок і значень сил взаємодії з поверхнею.

Критерії керування сталим рухом відрізняються відповідно до вибору методу, а звідси і стратегії керування апаратом.

Наразі найпоширенішими критеріями керування сталим рухом АКА є:

- відстеження та аналіз стану точки ТЦМ;
- відстеження та аналіз стану ТПЦМ;

- аналіз кутових положень і моментів у шарнірах апарата;
- аналіз зусиль у кінематичних парах;
- відстеження та аналіз кутових прискорень, швидкостей і переміщень точки корпусу АКА щодо точки на його стопі (балістичний критерій);
- відстеження та аналіз переміщення точки на корпусі АКА щодо віддаленого стаціонарного об'єкта (застосування стереометрії, ехолокації тощо).

Водночас, стратегія керування процесом дотримання стійкого стану АКА базується на таких принципах:

- швидке досягнення стійкого стану АКА на опорній поверхні;
- найбільша енергоефективність за збереження стійкого руху;
- збереження сталого руху АКА з урахуванням мінімальних енерговитрат;
- підтримка найбільшого запасу стійкості руху.

Залежно від умов експлуатації, будови АКА, структури сенсорної системи апарата і завдань, які вирішуються, критерії дотримання стійкості і стратегії керування можуть комбінуватися з метою взаємного доповнення.

Незважаючи на значну кількість робіт у цьому напрямку, дана область досліджень залишається сферою інтенсивної розробки і дотепер.

1.3. Характеристика методів планування опорних траєкторій руху антропоморфного крокуючого апарата

Формування розрахункової (опорної) траєкторії руху є важливою складною проблемою, що стоїть перед дослідниками і розробниками методів керування рухом двоногих роботів. Метою планування траєкторії руху є формування опорного руху для систем керування рухом; при цьому мета керування – дати можливість двоногій системі (роботу) слідувати заданою траєкторією під час руху (йти прямо, долати перешкоди, піднімати / опускати

ноги). Аналогічно тому, що відбувається під час ходьби людини, формування траєкторії двоногого робота також передбачає можливість удосконалення шляхом навчання, мінімізації витрат енергії (неефективно використаних), відстеження оптимальної траєкторії. Зазвичай цього досягають, задаючи низку параметрів, які описують необхідну траєкторію. Планування полягає в генеруванні часової послідовності значень, одержуваних за допомогою інтерполюючої функції, необхідної для побудови траєкторії. Основне завдання полягає в тому, щоб сформувати траєкторію руху, яка була б природною і подібною ході людини. Інакше кажучи, необхідний алгоритм формування розрахункової траєкторії руху, який повторював би профілі шарнірних кутів, характерних для рухів людини [98].

Формуючи розрахункову траєкторію руху, необхідно брати до уваги деякі особливості людської ходи з тим, щоб досягти природної ходи робота, а саме:

- кут колінного з'єднання повинен бути обмежений, щоб коліно не згиналося назад під час ходьби;
- рух на двох ногах має бути безперервним (за часом) і стійким;
- сформований профіль повинен відповідати вимогам повторюваності.

Синтез розрахункової траєкторії руху двоногого робота становить труднощі з огляду на те, що необхідне цілковите розуміння і ретельний аналіз характеристик системи.

Зараз досягнуто значний прогрес щодо формування розрахункової траєкторії руху двоногих роботів. Слід відзначити працю [99], де запропоновано модель руху, що складається з декількох фаз (фаза з опорою на одну ногу зі стрибковим рухом (kick) або без нього, зміна опорної ноги, постановка ноги на землю). В ній також наведені відповідні траєкторії шарнірних кутів для дев'ятиланкового планарного робота. Контрольні сигнали обираються, щоб можна було використовувати дію сили тяжіння для посилення кінематичного (кутового) моменту під час фази з опорою на одну ногу; при цьому передбачалося, що тіло завжди знаходиться у вертикальному положенні.

Рух АКА нагадує рух перевернутого маятника [100]. Зазвичай перевернутий маятник лінеаризується за вертикальним положенням для того, щоб генерувати розрахункову траєкторію руху. Але спрощення у вигляді перевернутого маятника не завжди можна застосувати для руху по складній (пересіченій) місцевості або для двоногих систем зі згинанням коліна.

Варто зауважити, що єдиними алгоритмами і параметрами, які задаються для системи формування розрахункової траєкторії, є положення і швидкість центра ваги робота для кожного кроку. Найбільш відомими є такі методи і підходи:

Генерування траєкторії з урахуванням центру тяжіння. В роботі [101] запропоновано підхід до розрахунку опорної траєкторії, що базується на врахуванні центра тяжіння тіла, коли тіло рухається горизонтально, і цей горизонтальний рух виражається простим лінійним диференціальним рівнянням. Крім того, припускається, що тіло двоногого робота з неінерційними ногами рухається по прямій у сагітальній площині і повертається зі сталою кутовою швидкістю. Отже, рух центру мас (ТЦМ) моделюється як лінійний зворотний маятник. Вочевидь, за використання даної моделі хода двоногого робота по пересіченій місцевості стає ідентичною ході по рівній горизонтальній поверхні [102].

Хурмузлу в роботі [103] встановив низку кінематичних зв'язків у формі функцій обмеження на базі фізичних характеристик ходи людини (вертикальна поза, швидкість ходи, траєкторія кінцівки з маховим рухом під час фази з опорою на одну ногу, зміщення опорного коліна, координація руху кінцівок) і розробив методичний підхід за допомогою параметричних формулювань, які пов'язують рівняння обмеження з необхідними профілями шарнірних кутів (кутів у з'єднаннях) для двоногого профілю. Функції обмеження Хурмузлу автоматично генерують «повторювану» ходу [103].

Генерування траєкторії руху у вигляді періодичного режиму (осциляційний підхід). Голлідей і Хемамі запропонували обчислювати розрахункову траєкторію руху у вигляді періодичного режиму (осциляційний

підхід) (генератор незатухаючих коливань – одноланковий маятник), у якому параметри осцилятора виводяться з параметрів тіла людини для лінеаризованої динамічної моделі, а керування здійснюється пристроєм зі зворотним зв'язком за станом робота [118]. Курематсу та інші використовували циклоїдальний профіль для формування траєкторії шарнірів стегна й щиколотки ноги з маховим рухом. Траєкторія описується простою періодичною синусоїдальною функцією, яка показує аналог траєкторії стегна й щиколотки людини при звичайній ходьбі. Поширенням використання цього підходу є метод для генерування заданих траєкторій руху з використанням багатошарової нейронної мережі [100].

Розвитком осциляційного підходу є також використання *методу пов'язаних генераторів* [70; 104]. Певний інтерес в цьому сенсі має робота Джалікса та інших [105], у якій розроблено п'ять пов'язаних генераторів (кожен з яких моделювався на основі осцилятора Ван дер Поля), аналогічних осциляторам, які властиві для людей і коней. Основу згаданих осциляторів становив незалежний головний осцилятор, заданий для тулуба, з яким інші осцилятори, задані для верхніх і нижніх частин ніг, були пов'язані для генерування розрахункової траєкторії шарнірного кута п'ятиланкового планарного двоногого робота. Мета дослідження Джалікса полягала в тому, щоб скомбінувати кісткову і м'язову моделі з генератором послідовності зв'язаних осциляторів і контролером для досягнення адаптивного ритмічного руху [105]. Бенбрахім та інші в роботі [106] розробили центральний генератор впорядкованої активності, який використовує алгоритм нейронної церебральної моделі артикуляції контролера для генерування необхідної розрахункової траєкторії руху для семиланкового двоногого робота з шістьма шарнірами (кінематичними парами). Для церебральної моделі артикуляції системи задаються такі параметри, як час, довжина кроку і тривалість ходи [106].

Курематсу та інші в роботі [107] генерували траєкторію руху двоногого робота, використовуючи генератор впорядкованої активності на базі нейронного осцилятора, який складається з чотирьох нейроклітин, з'єднаних

інгібіторними зв'язками, і який виробляє стаціонарну періодичну осциляцію для певного набору параметрів. Ця періодична осциляція генерує траєкторію для стаціонарної ходи, задаючи змінні стану нейроклітин шарнірним кутам робота [107].

Генерування траєкторії руху за допомогою інтерполяції. Цей метод широко застосовувався для формування розрахункової траєкторії руху двоногих роботів. На ранньому етапі його найчастіше використовували, наприклад, в анімації ключових кадрів синтезом послідовності зображень, яка демонструє безперервну інтерполяцію руху між набором ключових кадрів, зазначених параметрами в декількох тимчасових точках; потім визначалася траєкторія в проміжні моменти часу. Ці проміжні траєкторії генеруються або шляхом інтерполяції кожного з параметрів руху незалежно, чи шляхом мінімізації витрат енергії [108]. Спочатку метод поліноміальної інтерполяції застосовувався для простої конфігурації двоногого робота в планарному горизонтальному русі. Однак, за наявності різних обмежень у вигляді складних умов для ходьби (похила поверхня, сильно пересічена місцевість, наявність перешкод на шляху тощо), при використанні різних типів рухів (біг, повороти тощо), порядок многочлена стає дуже високим, що ускладнює проведення розрахунків.

Сільва та інші характеризували розрахункову траєкторію руху винятково за допомогою п'яти змінних руху: довжини кроку, висоти стегна, максимальних коливань стегна, максимального кліренсу ноги і довжини ланок [109]. Були визначені кінематичні характеристики та ефективність роботи системи під час ходи. Після цього визначалися співвідношення між змінними руху і фізично допустимими траєкторіями; розрахункова траєкторія руху формувалася шляхом присвоєння траєкторії в декартовому просторі для тіла і для нижніх точок ноги. Передбачалося, що траєкторія стегна залишається на фіксованій висоті і має сталу швидкість руху вперед; при цьому опорна нога саморегулюється відповідним чином. У результаті рівняння для верхнього краю ноги з маховим рухом уздовж осі руху розраховується шляхом додавання

лінійної і синусоїдальної функцій. За допомогою алгоритму зворотної кінематики відповідні траєкторії шарнірів (кінематичних пар) генеруються з цих траєкторій стегна і стоп.

Ших в роботі [110] генерував розрахункові траєкторії руху тулуба і ніг двоногого робота як частково задані кубічні многочлени для ходи: по рівній поверхні, похилій поверхні і щаблями сходів для двоногого робота зі змінною довжиною ніг [100]. Крім того, Ших розробив розрахункові траєкторії руху для двоногого робота зі змінною довжиною ніг, що має сім ступенів рухливості, під час ходьби вгору і вниз по щаблях сходів [109]. Багаточлени третього порядку були обрані так, що мінімальний рівень складності можна було вільно задавати положенням і швидкістю на обох кінцях тимчасового інтервалу.

Хуанг в роботах [111; 112] спочатку сформулював обмеження всієї траєкторії ноги, які включають характер поверхні, обмеження щодо динамічної стійкості, залежністю між характером ходи і специфікаціями приводу, а потім генерував розрахункову траєкторію руху, використовуючи сплайн-інтерполяцію третього порядку. Траєкторія стегна генерується за допомогою періодичної сплайн-функції третього порядку для забезпечення високого ступеня стійкості. У праці [112] траєкторія стегна формувалася сплайн-інтерполяцією третього порядку, а потім перевірялася використанням ітераційних обчислень для того, щоб домогтися плавного руху стегна з найбільшим запасом стійкості із задіянням двох параметрів. Хуанг також виконав роботу, в якій генерував розрахункову траєкторію руху, що вимагає невеликого обертового моменту і невеликої швидкості приводів шарнірів (з'єднань).

Танг та інші в роботі [113] запропонували методи планування траєкторії для ходьби і «пробиття штрафних ударів» («penalty kicking») як у декартовому просторі, так і в робочому просторі шарнірів. Траєкторія генерується спочатку формуванням траєкторії стегна й щиколотки, як сплайн-функції третього порядку в декартовому просторі, а потім профілі шарнірних кутів визначаються за допомогою зворотної кінематики. Генерована траєкторія має вторинну

безперервність першого порядку, яка гарантує рівномірність швидкості шарніра, і безперервність другого порядку, що забезпечує рівномірність прискорення або обертового моменту шарніра (з'єднання) [113].

У своїх дослідженнях у роботі [114] Лі генерував розрахункову траєкторію руху для п'ятиланкового двоногого робота, спочатку ділячи рух на фазу з опорою на одну ногу і фазу з опорою на дві ноги, а також роблячи посилення на те, що тулуб завжди має перебувати у вертикальному положенні, а потім отримує траєкторії руху шарнірного кута за допомогою поліноміальної інтерполяції. Коефіцієнти багаточленів отримують шляхом мінімізації квадратичної помилки шарнірного кута [114].

Джуд та інші генерували траєкторії оптимального циклічного руху для двоногого робота без приводного гомілкостопа [25; 50]. Під час кожної фази еволюція змінних кінематичних пар розглядалася у вигляді поліноміальної функції скалярного параметра шляху. Коефіцієнти поліноміальних функцій вибиралися з метою оптимізації критерію обертового моменту і забезпечення циклічного руху двоногого робота.

Генерування траєкторій, що ґрунтується на дослідженнях параметрів ходи. Із розвитком систем технічного зору АКА певний інтерес викликає метод планування траєкторії руху, що ґрунтується на дослідженнях параметрів ходи людини. Зазвичай, для того, щоб провести захоплення зображення переміщення людини, необхідно прикріпити ряд маркерів до кінцівок і шарнірів (кінематичних пар) суб'єкта (тобто людини) і записати рух маркерів за допомогою відеокамер і / або датчиків. У дослідженні Хемамі всі опорні кути вимірювалися за допомогою телевізійної камери / комп'ютерної системи, і цей телевізійний запис кутів і кутових швидкостей всіх п'яти сегментів людини, яка пересувалася звичайною ходою, використовувався як розрахункова траєкторія руху для планарного п'ятиланкового двоногого робота [115].

Генерування траєкторій, що базується на даних вимірювання параметрів руху людини. Дасгупта та інші застосували метод, який базується на даних вимірювання параметрів руху людини (HMCD), до двоногої системи

для досягнення руху, подібного руху людини [116]. Дані вимірювання параметрів руху людини – це дані про переміщення шарнірного кута (кута в з'єднанні) під час руху людини, зареєстровані при русі, до кінцівок і кінематичних пар якої були прикріплені маркери. Дані вимірювання параметрів руху людини не використовувалися безпосередньо для керування роботом через кінематичні і динамічні невідповідності між людиною, чий рух реєструвалися, і рухами двоногого робота, тому що двоногі роботи порівняно з людьми мають меншу кількість приводів, ніж ступенів рухливості. Кінематичні невідповідності регулюються кінематичними корекціями даних; проблема динамічних невідповідностей вирішується шляхом призначення необхідної ТНМ (з точки зору стійкості) на базі даних про рух стопи в режимі НМСД з урахуванням опорної реакції поверхні. Потім корекції періодичних рухів шарніра в обраних з'єднаннях використовуються для апроксимації необхідної траєкторії точки нульового моменту. У цифровому вигляді імітація даного методу проводиться за допомогою моделі двоногого робота з 40 ступенями рухливості.

Генерування траєкторії центра мас з використанням критеріїв запасу стійкості. У зв'язку з тим, що стійкість є важливим критерієм оцінки руху двоногого робота, а також з огляду на те, що двоногі роботи легко втрачають рівновагу, важливо брати стійкість до уваги під час формування розрахункової траєкторії руху. Чженг та інші досліджували *метод генерування траєкторії центру мас з використанням критеріїв запасу стійкості*, які задовольняють вимоги щодо статичної стійкості для двоногого робота з вісьмома ступенями рухливості, що має назву SD-2 [100].

Доволі розповсюджене використання концепції ТНМ для вирішення проблеми стійкості при генеруванні розрахункової траєкторії руху для двоногих роботів. Якщо точка нульового моменту знаходиться в опуклій оболонці всіх контактних точок між стопами і землею, тоді система знаходиться в динамічній рівновазі [7]. Існують кілька способів формування розрахункової траєкторії руху з використанням концепції точки нульового

моменту. Одним із них є спосіб, який полягає в тому, що спочатку задається необхідна траєкторія точки нульового моменту, а потім проводиться розрахунок руху стегна, що забезпечує необхідну траєкторію точки нульового моменту. Хірам та інші генерували розрахункову траєкторію точки нульового моменту і використовували її як початкові дані для комплексного керування гуманоїдним роботом Honda при ходьбі по рівній (горизонтальній) поверхні, ході вгору і вниз по східцях драбини тощо [117]. Ших використовував метод точки нульового моменту для генерування розрахункової траєкторії руху семиланкового двоногого робота з дванадцятьма ступенями рухливості під час фази з опорою на одну ногу [118]. Траєкторія точки нульового моменту на землі повинна перебувати в стійкій області опорної стопи. Розрахункова траєкторія руху задається вісьмома параметрами патерну і виводиться зі зворотної кінематики. Досліджуються також траєкторії точки нульового моменту для різних патернів руху і вплив параметрів патерну на траєкторію точки нульового моменту. Чхоу синтезував рух двоногого робота під час ходьби шляхом розв'язання задачі оптимізації, у якій потрібно дотримуватися необхідної траєкторії точки нульового моменту. Для пристрою синтезування руху застосовувалося стимульоване навчання, за якого багатозначний (багатоелементний) скалярний сигнал використовувався для оцінювання успіху чи неуспіху здійснення руху двоногим роботом з використанням точки нульового моменту [100].

Кун і Міллер запропонували багатоступеневе генерування розрахункової траєкторії руху для двоногого робота з варіюванням швидкості [119]. Генерування пози проводилося із забезпеченням стійкості, використовуючи спрощену модель двоногого робота.

Генерування оптимальної траєкторії руху з обмеженнями параметрів руху. Цей метод передбачає знаходження розрахункових шляхів руху, які задовільняли б певні вимоги щодо обмежень параметрів ходьби (швидкість ходьби, довжина кроку, максимальна / мінімальна висота стегна, максимальна висота верхньої точки ноги з маховим рухом, межі кута повороту, що

встановлюють обмеження для кута між гомілкою і стегном тощо), при мінімізації енергії, що підводиться, або щодо інших робочих параметрів. Формуючи оптимальну траєкторію руху, функція мінімізації, зазвичай, використовується як сума квадратів керуючих моментів для мінімізації витрат енергії.

Шеваллеро в роботі [120] досліджував імпульсно-рухомий обертальний момент на початку і кінці балістичного руху між двома часовими точками, який генерує оптимальний, з погляду витрат енергії, рух для маятника завдяки посиленню на те, що рух, який визначається балістичним рухом і імпульсами, що виникають у ході фази з опорою на дві ноги, веде до економної, з точки зору використання енергії, траєкторії, після чого можуть слідувати максимально високі обертальні моменти. Крім того, Шеваллеро та інші в роботі [121] генерували оптимальні розрахункові траєкторії для ходьби планарного двоногого робота без привідного гомілковостопного зчеплення і чотирьох приводів. Еволюція чотирьох змінних сполучень є номінальною функцією четвертого порядку. Коефіцієнти поліноміальних функцій вибираються так, щоб оптимізувати критерії і забезпечити циклічний рух двоногого робота. Обраними критеріями є: швидкість руху, мінімальний момент обертання і мінімальні витрати енергії.

Генерування оптимальної траєкторії руху з мінімізацією енерговитрат. Шеваллеро та Анст у роботі [122], Ченнон та інші [123] розглянули декартові координати стегна, верхньої точки ноги з маховим рухом і кути нахилу тулуба у вигляді поліноміальної функції часу і зробили оптимізацію з використанням коефіцієнтів багаточлена, що привело до мінімізації витрат енергії. Потім з використанням поліноміальної функції були отримані траєкторії шарнірного кута. Шевеллеро і Аустен генерували оптимальний циклічний рух для двоногого робота без привідних гомілковостопів [122]. Під час кожної фази робилося посилення на те, що еволюція змінних являє собою поліноміальні функції; при цьому коефіцієнти поліноміальних функцій вибиралися так, щоб оптимізувати певний критерій (максимальну

швидкість руху вперед, мінімальний момент обертання і мінімальні витрати енергії) і забезпечити циклічний рух двоногого робота.

Ченнон розробив енергетично оптимальні траєкторії руху для планарного семиланкового двоногого робота з стопами. Рухи стегна і стоп під час звичайного кроку моделювалися з використанням багаточленів третього порядку, коефіцієнти яких були отримані за допомогою цифрової мінімізації функції енергії для конкретних випадків руху по рівній (горизонтальній) поверхні, руху вгору і вниз по схилу і руху з варіюванням корисного навантаження [123]. Ченнон та інші в роботі [100] запропонували метод оптимізації рухів планарного п'ятиланкового двоногого робота під час ходьби. Даний метод починається з нелінійної кінематичної і динамічної моделей як для етапу руху з опорою на одну ногу, так і для етапу зіткнення. Потім використовується варіаційний метод генерування траєкторій з'єднань, що мінімізує просту функцію витрат. Результируюча двоточкова крайова задача розв'язується за допомогою методу скінченних різниць; при цьому початковими умовами є траєкторії, отримані з використанням простої лінеаризованої моделі.

Нагурка, Йен, Кабодевіла і Абба в роботі [100] розв'язали алгебричну нелінійну задачу шляхом апроксимації кожної узагальненої координати (розкладання в ряд Фур'є). Руссел та інші в роботі [124] генерували енергетично оптимальні розрахункові траєкторії шляхом оптимізації, ґрунтуючись на необмежених кусково-постійних траєкторіях у просторі вхідних впливів. Андерсон та інші досліджували можливість використання масово-паралельних суперкомп'ютерів з векторним обробленням даних для вирішення великомасштабних завдань оптимізації для двоногого робота, змодельованого у вигляді механізму з 14 ступенями рухливості, який приводиться сорока шістьма м'язово-сухожильними елементами [100]. Ву і Чан генерували розрахункову траєкторію шарнірів (зчеплень), використовуючи п'ять функцій обмежень для п'ятиланкового двоногого робота, що рухається по горизонтальній поверхні. Згадані функції призначені обмежувати швидкість

ходьби, підтримувати кут зсуву коліна і вертикальне положення верхньої частини тіла, забезпечувати координацію руху ніг і енергетичну ефективність двоногого робота.

Сільва запропонував аналіз енергоспоживання двоногого робота для розуміння стратегій руху під час ходьби і пошуку оптимальних змінних руху, котрі мінімізували б функцію енергетичних витрат. На основі використання набору змінних руху (довжини кроку, висоти стегна, коливань стегна, зміщення стегна, кліренсу ноги і довжин ланок) і вивчення їх впливу на енергетичний потік обговорюються питання ефективності операцій; результати порівнюються з тим, що спостерігається в природі [125].

Ших у роботі [8] запропонував генерувати спочатку ту розрахункову траєкторію, що ґрунтується на центрі тяжіння, а потім – розраховуючи траєкторії шарнірного кута з використанням зворотної кінематики. Робилося посилення на те, що тіло підтримує стійку вертикальну позу під час руху, а обидві ступні залишаються паралельними площині руху. Ших та інші в роботі [126] розглядали питання оптимізації траєкторії ходьби 13-ланкового двоногого робота для того, щоб можна було використовувати її як розрахункову траєкторію для керування. Зворотна кінематика двоногого робота виводилася для зазначених положень тіла і ніг. Мета – оптимізація розташування точки нульового моменту. Ших запропонував генерувати перевернутий маятник для розрахункової траєкторії п'ятиланкового планарного двоногого робота під час руху по рівній поверхні, ставлячи завдання: дотримання умов фрикційних обмежень, забезпечення рівноваги, зниження ефекту зіткнення і зниження витрат енергії [127]. Траєкторія ґрунтується на п'яти базових параметрах: довжині кроку, циклі руху, висоті центра ваги, максимальному кліренсі ноги з маховим рухом і моделі перевернутого маятника.

Ростамі й Бессоннет у роботі [128] запропонували метод формування розрахункової траєкторії руху, заснований на мінімізації енерговитрат.

Оно і Лю описали планування оптимальної траєкторії ходьби для планарного двоногого механізму [148]. Однокроковий рух ділиться на дві фази.

Рух махової (swing leg) і опорної (stance leg) ноги під час першої фази здійснюється плануванням оптимальної траєкторії на базі методу апроксимуючих функцій із мінімізацією квадратичного інтеграла вхідного обертового моменту.

Чеморі й Лоріа займалися генеруванням оптимальних розрахункових траєкторій для планарного двоногого робота [100]. Основною відмінною особливістю запропонованої стратегії є генерування онлайнових оптимальних розрахункових траєкторій для приводних з'єднань із нульовою динамікою.

Генерування оптимальної траєкторії руху, що ґрунтується на керованому інтелекті. Останніми роками використання технологій штучного інтелекту для формування траєкторії руху двоногих роботів стає дуже поширеним.

Чену і Лін у роботі [129] запропонували генерувати розрахункову траєкторію руху двоногого робота, формулюючи її як завдання пошуку за параметром. Генетичний алгоритм застосовувався для того, щоб отримати оптимальну архітектуру [129].

Капі та інші в роботі [121] запропонували метод генерування траєкторії руху двоногого робота з призматичними з'єднаннями; в ньому мінімальні витрати енергії виступали як критерій, завдяки використанню генетичного алгоритму дійсних чисел як інструменту оптимізації.

Чи та інші сформулювали генерування траєкторії руху як багатокритеріальне завдання оптимізації, що має на меті забезпечення стійкості під час ходьби [130]. Траєкторії руху, що ведуть до найбільшої ефективності двоногого робота, генеруються з використанням багатокритеріального еволюційного алгоритму.

Юн та інші запропонували адаптувати генетичний алгоритм для мінімізації витрат енергії шляхом використання генетичних алгоритмів реального кодування (RCGA) для формування траєкторії руху двоногого робота [131]. Траєкторія представлена многочленами четвертого порядку, коефіцієнтами яких є хромосоми. Умова повторюваності для стійкої ходьби

використовується в умовах нерівності для опису кінематичних обмежень для махового руху і точки нульового моменту. Хейс і Хуанг запропонували оптимальний, з точки зору енергозбереження, метод планування траєкторії, що базується на методі апроксимованих функцій для двовимірної моделі руху двоногого робота [132].

Чженг розробив генератор розрахункової траєкторії руху, що являє собою центральний генератор впорядкованої активності, який створює моделі опорних рухів як довільних, так і мимовільних [133]. Якщо рух є довільним, то генерується патерн виконання руху, що спрямовується безпосередньо двоногому роботу. В іншому випадку згаданий патерн скеровується в адаптивну мережу, яка модифікує рефлексні патерни виконання руху відповідно до характеру поверхні.

Аракава і Фукуда досліджували природний рух двоногого робота, який ходить, як людина, різними поверхнями. Генетичний алгоритм застосовується для формування розрахункової траєкторії руху за допомогою оптимізації використання енергії. Ченг і Лін представили розрахункові траєкторії руху у вигляді завдання пошуку за параметрами і застосували генетичний алгоритм з метою створення оптимальної архітектури для ходьби по похилій поверхні, ходьби з великою швидкістю і ходьби із заданою довжиною кроку [134].

1.4. Аналіз проблеми автоматизації керування сталим рухом антропоморфного крокуючого апарата і шляхи її вирішення. Постановка завдань дослідження

Останнім часом у світі проєктування АКА приділяється дедалі більше уваги через їх високу прохідність і кращу пристосованість до умов, створених для людини. Однак під час проєктування АКА виникають деякі складнощі, пов'язані, зокрема, із синтезом керуючих впливів для приводів виконавчих механізмів. Дійсно, для визначення кута, на який слід повернути той чи інший суглоб робота, необхідно знати, куди поставити ногу, тобто виділити на

траєкторії руху певні точки. За даними про розташування цих точок необхідно визначити значення узагальнених координат, тобто розв'язати обернену задачу кінематики. Розв'язок оберненої задачі кінематики може бути багатоваріантним, тому доведеться додатково відкидати розв'язки, непридатні для керування роботом (наприклад, застосування деякого розв'язку неможливе внаслідок конструктивних обмежень у зчленуваннях виконавчого механізму АКА). Зворотна задача кінематики також може і не мати розв'язків.

У процесі руху АКА обернену задачу кінематики необхідно розв'язувати для кожної ноги робота. У разі збільшення кількості ніг зросте число зчленувань, число узагальнених координат, розмірність рівнянь динаміки. Звідси, посиляться навантаження на бортову обчислювальну систему АКА.

Нині існує безліч способів вирішення зазначених проблем, але жоден із них не заперечує необхідності розв'язання оберненої задачі кінематики. Наприклад, у роботі [59] оборотна задача кінематики для двоногого АКА розв'язується ітераційно за допомогою матриці Якобі. При цьому для обчислення вектора помилки на кожному кроці використовуються результати розв'язання прямої задачі кінематики.

У даній роботі замість терміна «хода» використовується термін «багатофазна структура крокового переміщення АКА», оскільки він характеризує не тільки послідовність зміни ніг при русі, але й описує рух ноги під час кроку. Тим більш, що крокуючий робот може переміщатися різною ходою, і кожній ході відповідає певна схема зміни опорних ніг.

Для опису схеми зміни опорних ніг можна застосовувати різні способи. Так, у роботі [49; 53] наведено методику опису ходи функціями стану, які відповідають фазі опори ноги і фазі перенесення, але функції стану в явному вигляді відсутні. Будь-який крок у фазі перенесення ноги складається з трьох необхідних стадій [135]:

- 1) розрив зв'язку з опорною поверхнею;
- 2) перенесення ноги;
- 3) опускання ноги на опорну поверхню в новій точці.

Для фази опори також можна виокремити кілька стадій залежно від числа ступенів рухливості ноги. У такому випадку обмежимося стадією перенесення корпусу АКА щодо опорної поверхні приводом стегна (інші приводи вважатимемо блокованими, тобто нога являє собою жорстку конструкцію). Вочевидь, що хода – це сукупність схеми зміни опорних ніг і стадій кроку ноги.

Слід зазначити, що під час розв’язування оберненої задачі кінематики актуальність отриманих розв’язків може бути втрачена через з непередбачуваність зовнішніх умов.

Наведемо основні операції пропонованого в роботі підходу.

1. Вибір схеми зміни фаз переміщення опорних ніг і стадій кроку для кожної ноги на основі багатофазної структури крокового переміщення АКА.
2. Призначення обмежень зміни узагальнених координат.
3. Призначення часу одного кроку виходячи з необхідної швидкості руху АКА.
- 4 Розбиття часу на певне число часових проміжків n (число ітерацій).
5. Вибір прирощень узагальнених координат на кожній ітерації руху.
6. Варіювання значень узагальнених координат у циклі до отримання ними необхідних або граничних значень. Однозначність розв’язку досягається коректним вибором стадій кроку і порядком їх проходження.

Зазначимо, що у фазі перенесення виконуються всі три стадії кроку. При цьому на кожній стадії різні зчленування працюють нерівномірно. Наприклад, під час ходьби людина переставляє ногу здебільшого з використанням приводів стегна, а в разі розриву зв’язку з опорною поверхнею працює ще й привід колінного суглоба [135].

Крокуючі роботи мають різноманітні типи конструкцій і системи керування, які зумовлені специфікою режиму руху АКА. Зокрема, той факт, що робот набуває і втрачає контакт з опорною поверхнею, робить проблему планування руху важко вирішуваною.

Загальний підхід до її вирішення в даній роботі полягає в розбитті на підзавдання, такі як генерування послідовності кроків, генерування траєкторії

центру мас, розв'язання оберненої задачі кінематики. Таке розбиття дозволяє частково вирішити проблему керування при ходьбі по нерівній місцевості, подолання сходинок та ін. [136; 137]. Слід зазначити, що згадані окремі підзадачі не тривіальні, а є предметом досліджень у даній роботі.

Крокуючі роботи часто проєктуються у вигляді послідовностей незамкнутих кінематичних ланцюгів, що робить їх схожими на маніпулятори. Це означає, що методи керування, розроблені й успішно впроваджені для маніпуляторів, можуть використовуватися і для крокуючих роботів. Однак специфічні проблеми, пов'язані з крокуючими роботами, зумовлені тим, що об'єкт керування являє собою механічну систему з односторонніми механічними обмеженнями у вигляді конусів тертя [136].

Явні механічні обмеження потребують модифікації методів керування, призначених для систем тільки з неявними обмеженнями. Прикладом такої модифікації є лінійний квадратичний регулятор (LQR) для систем з механічними обмеженнями, запропонований у праці [136]. Один із широко використовуваних підходів до розроблення регулятора для крокуючих роботів полягає у формулюванні завдання керування як завдання квадратичного програмування. Це дозволяє в явному вигляді використовувати обмеження у вигляді нерівностей, зумовлені обмеженнями крутного моменту і конусів тертя під час керування. Такий підхід потребує істотних обчислювальних потужностей, але може бути реалізований на бортових комп'ютерах двоногих крокуючих роботів [136].

Довести стійкість і оптимальність регуляторів, призначених для систем з явними механічними обмеженнями, складно. На практиці такі системи схильні до випадкових збурень, мають пружні ланки, люфт у шарнірах, також для них характерні невизначеність параметрів моделі і шуми в датчиках. Зважаючи на це аналіз таких систем часто виконується чисельно або за допомогою експериментальних досліджень. У роботі [136] розглянуто три регулятори для двоногих крокуючих роботів, побудовані на різних підходах до керування: регулятор на основі лінійного квадратичного регулятора з обмеженнями –

CLQR-регулятор (Constrained Linear Quadratic Regulator) [136; 138], CTC-регулятор (Computed Torque Controller) і регулятор на основі квадратичного програмування NQPC-регулятор (від англ. Nested Quadratic Programming based Controller). Для розроблення регулятора завдання керування роботом сформульоване як завдання квадратичного програмування, що дає змогу враховувати односторонні механічні зв'язки у вигляді нерівностей, зумовлені так званими конусами тертя й обмеженнями крутних моментів приводів [136].

Особливу увагу при розробці системи управління АКА слід приділити впливу похибок сенсорної системи на якість роботи системи управління. Для компенсації похибок датчиків може використовуватися динамічний спостерігач. Також необхідно враховувати випадки, коли накладаються обмеження на значення крутного моменту в шарнірах робота.

Моделюванням можна визначити область параметрів датчиків, у якій якість роботи досліджуваних робастних регуляторів стосовно до малих змін нелінійних властивостей датчиків, причому такі області параметрів характерні для систем без спостерігача і за його наявності, а також для систем з обмеженнями на значення крутного моменту і без них.

Для автоматичного керування стійким рухом апарата на ОП необхідно формалізувати метод керування рухом АКА, що залежить від його динамічної моделі, моделі середовища, структури сенсорної системи і можливостей виконавчої системи, що, в комплексі з траєкторією переміщення точки центра мас АКА, формують закон руху [11; 59; 83–88]. Отже, потрібно попередньо вирішити такі завдання:

- моніторинг інформації про взаємодію АКА з навколишнім середовищем;
- моніторинг поточного стану і просторової орієнтації АКА;
- планування траєкторії руху ТЦМ АКА;
- побудова заданого руху як циклу кроків АКА;
- стабілізація стійкого заданого руху АКА.

Для керування АКА у нестандартних умовах потрібно вирішити низку додаткових завдань, серед яких є такі, що вимагають побудови моделі апарата, здатної враховувати додаткові керуючі впливи на АКА. Такі випадки можуть бути пов'язані з урахуванням:

- динаміки руху ланок АКА, які не входять до складу опорно-рухового апарата;
- застосування альтернативної кінематичної схеми АКА;
- застосування альтернативних критеріїв, засобів і методів керування стійким рухом АКА;
- забезпечення стійкого руху апарата на довільній ОП;
- виконання апаратом операцій, що передбачають взаємодію з іншими об'єктами;
- стохастичної зміни динамічної поведінки крокуючого апарата.

Аналіз існуючих методів керування процесом стійкого руху по довільній ОП свідчить про гостру актуальність вирішення цього завдання. Так, у проаналізованих публікаціях трапляється розв'язок задачі керування стійким рухом АКА на різних заданих типах поверхонь. Однак задача керування стійким рухом на довільній ОП не має завершеного розв'язку. У даній роботі завдання забезпечення стабілізації заданого руху АКА на ОП вирішується на підставі даних про кутові відхилення його ТЦМ від області стійкості переміщення апарата.

Головною перешкодою успішного застосування існуючих методів керування стійким рухом АКА є значне запізнювання формування керуючих впливів після порушення умови стійкого руху апарата), яке виникає внаслідок зміни типу інформації зворотного зв'язку і точності відповідних сенсорів. Крім того, збереження опорної фази руху класифікуються різними завданнями процесу керування АКА і потребує дослідження фундаментальних принципів забезпечення стійкого руху АКА по довільній ОП. Проблема автоматичного планування заданої (програмної траєкторії) і стабілізації програмного руху АКА може бути вирішена на основі наведеної на Рис.1.5. структурно-

функціональній схемі автоматизації процесів планування і стабілізації стійкого руху АКА за наявності відповідного навігаційного і комп'ютерного обладнання.

Розроблена структурно-функціональна схема автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху визначає послідовність і зміст вирішення завдань зі створення автоматичних систем планування опорної траєкторії і стабілізації руху АКА, які забезпечують плавність і стійкість руху АКА уздовж заданої траєкторії.

Згідно з цією схемою процес реалізації автоматичного планування і стабілізації стійкого руху АКА здійснюється так.

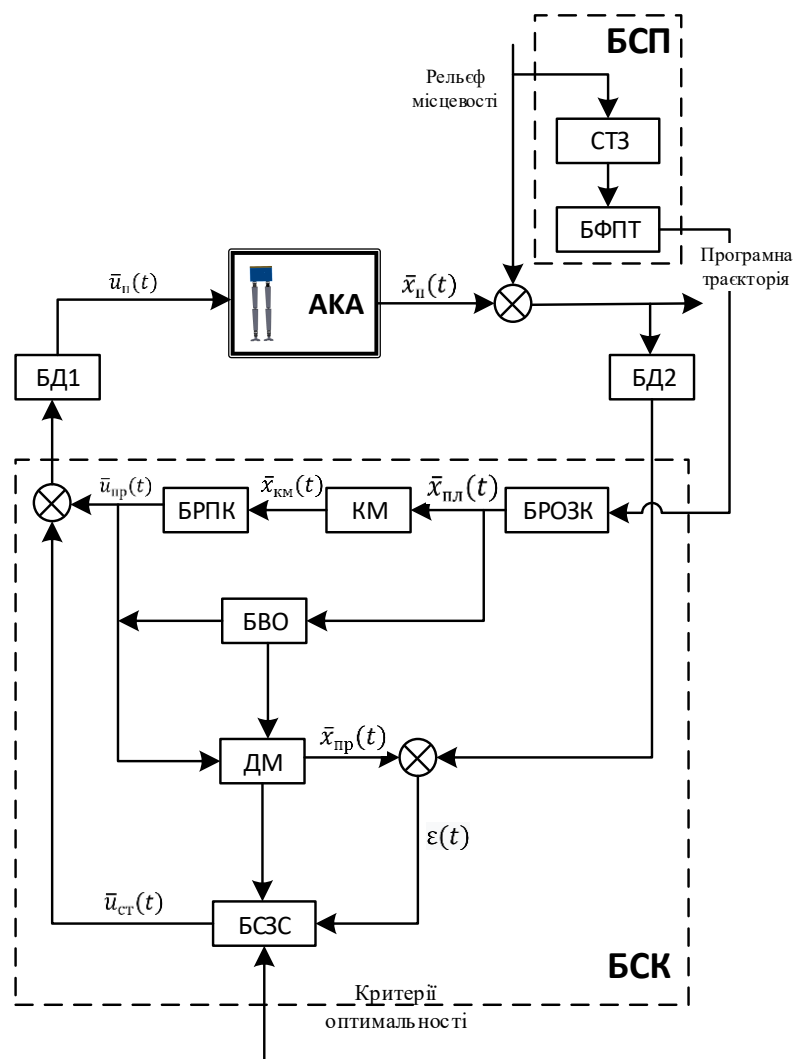


Рис.1.5. Структурно-функціональна схема автоматизації процесів планування і стабілізації стійкого руху АКА

Задана програмна траєкторія формується в бортовій системі планування (БСП). Система технічного зору (СТЗ) видає формалізовану модель опису рельєфу місцевості, що складається з типових ділянок рельєфу в блок формування програмної траєкторії (БФПТ) або покроково в реальному часі (якщо рельєф місцевості заздалегідь невідомий), або усе зображення рельєфу місцевості одразу (якщо рельєф місцевості заздалегідь відомий). Для типових ділянок у БФПТ існують готові функції зміни положення стопи АКА. Ці функції надходять у блок розв'язання оберненої задачі кінематики (БРОЗК) АКА, який розраховує функції кутового положення шарнірів ніг і тулуба АКА. Через кінематичну модель (КМ) АКА блок реалізації програмного керування (БРПК) синтезує керуючі програмні впливи $u_i(t)$ на i -і серводвигуни АКА. Таким чином, у першому контурі бортової системи керування (БСК) автоматично формуються програмна траєкторія і програмне керування для її реалізації. Оптимальна стабілізація сталого руху АКА уздовж програмної траєкторії здійснюється в автоматичному режимі в реальному часі в другому контурі БСК.

Для цього від блока визначення орієнтації (БВО) АКА надходять програмні значення сталого положення точок ТНМ, ТЦМ і ТПЦМ. На виході динамічної моделі (ДМ) АКА визначаються програмні значення координат стану моделі АКА і порівнюється з поточним станом АКА. Їх різниця використовується в блоці синтезу законів стабілізації (БСЗС) згідно з обраними критеріями оптимізації для формування стабілізуючого впливу $u_{cmi}(t)$ на відповідні виконавчі механізми АКА. Слід також зауважити, що при апріорі відомій інформації про рельєф місцевості в другому контурі БСК (контурі стабілізації) використовується LQR- регулятор, а якщо рельєф апріорі невідомий, застосовується MPC (model predictive control) – підхід [100; 104].

Отже, метою даної роботи є розроблення автоматизованої системи планування і оптимальної стабілізації заданого руху наведеного вище АКА, яка значно розширює можливості його автономного переміщення по відкритій пересіченій місцевості.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі:

- на основі аналізу сучасного стану проблеми автоматизації процесу керування АКА виконати теоретичні дослідження процесів планування опорних траєкторій та дотримання рівноваги за заданого руху АКА по довільній поверхні та визначити шляхи її вирішення;
- розробити структурно-функціональну схему автоматизації процесів планування і стабілізації стійкого руху АКА;
- для моделювання кінематики і динаміки АКА встановити функціональну залежність положення центру мас АКА та його проєкції на довільну поверхню, що пов'язано зі зміною положення ланок АКА під час його руху;
- визначити область допустимих кутових відхилень кінематичних пар ланок і напрямки прикладання сили тяжіння до центру мас АКА;
- вдосконалити існуючі критерії стійкості АКА і виконати пошук оптимальних розв'язків задачі збереження рівноваги під час руху АКА в умовах довільної опорної поверхні;
- розробити нові ефективні стратегії планування траєкторій руху ТЦМ і ніг АКА, що забезпечують дотримання і відновлення стійкого руху АКА на довільній опорній поверхні;
- розробити систему стабілізації заданого руху АКА на довільній поверхні, яка забезпечить зміну кутових положень кінематичних пар апарата залежно від його положення і стратегії керування;
- провести імітаційне моделювання для підтвердження ефективності отриманих наукових результатів.

Висновки до розділу 1

1. На основі аналізу сучасного стану розвитку мобільної робототехніки обраний типовий АКА, для якого проведений аналіз існуючих методів планування і керування в різних умовах функціонування. Показано, що

найбільш вразливими при розробці антропоморфних крокуючих роботів є питання планування опорних траєкторій і забезпечення сталого руху АКА уздовж неї.

2. Розроблена структурно-функціональна схема автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху, яка визначає послідовність і зміст вирішення завдань по створенню автоматичних систем планування опорної траєкторії і стабілізації руху АКА, які забезпечують плавність і стійкість руху АКА уздовж заданої траєкторії.

3. Для сформульованої мети роботи позначені основні завдання дослідження.

Основні результати розділу були опубліковані в [153,154].

Список використаних джерел до розділу 1:[1]-[138].

Розділ 2

МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РУХУ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА

2.1. Побудова кінематичної моделі руху антропоморфного крокуючого апарата на основі матричного методу послідовної побудови систем координат

Для опису обертальних і поступальних відносних рухів ланок маніпуляторів у роботі [63] запропоновано матричний метод послідовної побудови систем координат, пов'язаних з кожною ланкою кінематичного ланцюга, так званий метод представлення Денавіта-Хартенберга (ДХ-представлення) [139]. Цей метод полягає у формуванні однорідної матриці перетворення розмірністю 4×4 і описуванні стану системи координат кожної ланки щодо системи координат попередньої ланки. Це дає можливість послідовно перетворити координати вихідної ланки маніпулятора з системи відліку, пов'язаної з цією ланкою, в систему координат, пов'язану з початковою ланкою механізму. Крім базової системи координат для кожної ланки на осі його з'єднання визначається ортонормована декартова система координат (x_i, y_i, z_i) , де $i = 1, 2, \dots, n$, а n дорівнює числу ступенів свободи маніпулятора. Оскільки обертальне з'єднання має тільки один ступінь свободи, кожна система координат (x_i, y_i, z_i) відповідає $i + 1$ -му з'єднанню і пов'язана з ланкою i . При цьому кожна система координат формується на основі таких трьох правил:

1. Вісь z_{i-1} спрямована по осі з'єднання i .
2. Вісь x_i перпендикулярна осі z_{i-1} і спрямована від неї. —
3. Вісь y_i доповнює пару осей x_i, z_i до правої декартової системи координат.

Ці правила залишають свободу вибору 0-ї системи координат за умови, що вісь Z_0 спрямована уздовж осі з'єднання. Остання система координат також може бути обрана в довільній точці ланки n за умови, що вісь x_n перпендикулярна осі Z_{n-1} .

ДХ-представлення твердотілих ланок залежить від чотирьох геометричних параметрів, відповідних кожній ланці. Ці чотири параметри повністю описують довільний поступальний або обертальний рух і визначаються так:

- θ_i – приєднаний кут – це кут, на який необхідно повернути вісь x_{i-1} навколо осі Z_{i-1} , щоб вона стала співнапрямленою з віссю x_i (знак визначається згідно з правилом правої руки);
- d_i – відстань між перетином осі Z_{i-1} з віссю x_i і початком системи координат $(i-1)$, що відраховується вздовж осі Z_{i-1} ;
- a_i – лінійне зміщення – це відстань між перетином осі Z_{i-1} з віссю x_i і початком i -ї системи координат, що відраховується вздовж осі x_i , тобто найкоротша відстань між осями Z_{i-1} і Z_i ;
- α_i – кутове зміщення – це кут, на який необхідно повернути вісь Z_{i-1} навколо осі x_i , щоб вона стала співнапрямленою з віссю Z_i (знак визначається відповідно до правила правої руки).

Для обертальних відносних рухів, характерних для кінематичної схеми АКА, параметри d_i , a_i , α_i є константами. Одночасно, параметр θ_i є змінної, що характеризує відносний рух у даному з'єднанні.

Вибір систем координат для лівої ноги АКА, відповідно до алгоритму ДХ, показано на кінематичній схемі (рис. 2.1), а значення ДХ-параметрів для з'єднань, наведені в табл. 2.1.

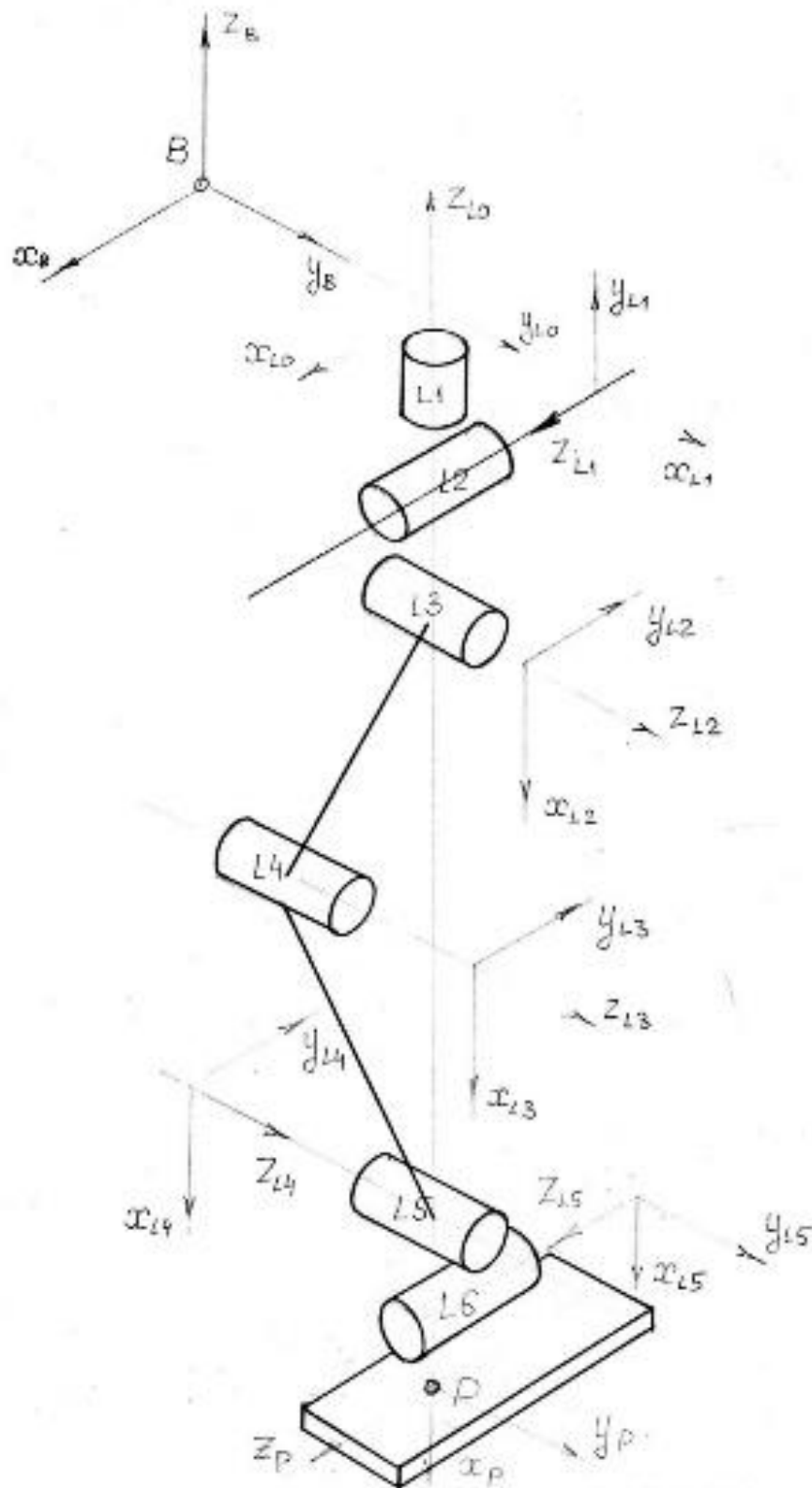


Рис. 2.1. Кінематична схема АКА і вибір систем координат за Денавітом-Хартенбергом

Завдяки стандартизації вибору пов'язаних систем координат, однорідні матриці перетворення для всіх кінематичних пар записуються згідно з таким

Таблиця 2.1

Параметри ДХ для з'єднань ноги АКА

СК	θ_i	α_i	a_i	d_i
0	$\theta_1 + \pi/2$	0	0	0
1	$\theta_2 - \pi/2$	$-\pi/2$	0	0
2	θ_3	0	l_{L3}	0
3	θ_i	α_i	a_i	d_i
4	θ_4	0	l_{L4}	0
5	θ_5	$+\pi/2$	0	0
6	θ_6	0	0	l_{L5}

стандартним шаблоном:

$${}^{(i-1)}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Згідно з наведеними вище значеннями параметрів і шаблоном, отримаємо такі матриці перетворення для ноги АКА (Додаток Е):

$$\begin{aligned} {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} -S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^0T_1 = \begin{bmatrix} S_2 & 0 & C_2 & 0 \\ -C_2 & 0 & S_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & l_{L3}C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & l_{L3}S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^3T_4 = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & l_{L4}C_4 \\ S_4 & C_4 & 0 & l_{L4}S_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (2.2)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^5T_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де прийняті позначення: $C_i = \cos \theta_i$; $S_i = \sin \theta_i$; ($i = 1, \dots, 6$).

2.1.1. Пряма задача кінематики руху антропоморфного крокуючого апарата

Розглядаючи ногу АКА як маніпулятор, що виконує операції взаємодії з опорною поверхнею, логічно як «захват» маніпулятора розглядати стопу. За такого підходу пряму задачу кінематики для ноги АКА можна сформулювати так: за заданими узагальненими координатами з'єднань θ_i визначити координати точки P гомілковостопного з'єднання щодо базової точки корпусу АКА [140].

Положення точки S тазостегнового з'єднання відносно базової точки B корпусу визначається двома зміщеннями l_{L1} , l_{L2} , що призводить до формування такої матриці однорідного перетворення:

$${}^B T_0 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & \pm l_{L1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_{L2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

де знак «+» при l_{L1} використовується для лівої ноги, а «-» – для правої.

Повне перетворення від базової точки корпусу АКА до базової точки P однією зі стоп визначається матричним перетворенням:

$${}^B T_P = {}^B T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4, \quad (2.4)$$

Поєднання $L5$ і $L6$ («гомілковостопний суглоб») визначає поточну орієнтацію стопи, утворюючи ще одне перетворення:

$${}^P T_F = {}^4 T_5 {}^5 T_6. \quad (2.5)$$

Рівняння (2.4), (2.5), з урахуванням зазначених матриць, дають повний розв'язок прямої задачі кінематики для ноги АКА.

2.1.2. Зворотна задача кінематики для ноги антропоморфного крокуючого апарата

Зворотна задача кінематики для ноги АКА полягає в знаходженні узагальнених координат $\theta_1, \dots, \theta_6$ за заданими координатами контактної точки F ноги щодо базової точки P корпусу.

Зауважимо, що осі з'єднань L_1, \dots, L_3 перетинаються в одній точці, функціонально утворюючи триосьове тазостегнове кінематичне з'єднання. Далі, основне кінематичне значення колінного з'єднання L_4 полягає в тому, що зміна відповідного кута дозволяє змінювати відстань $|SP|$, тобто змінювати довжину ноги. З урахуванням цих чинників, нижню кінцівку можна уявити як маніпулятор, який працює у сферичній системі координат. Водночас, конфігурація кінематичного ланцюга $S \rightarrow K \rightarrow P$ залежить від чотирьох узагальнених координат $\theta_1, \dots, \theta_4$ на противагу трьох сферичних координат. Тобто в даному ланцюзі наявний надлишок ступенів свободи. Для спрощення розв'язання задачі доцільно ввести допоміжну сферичну систему координат, записавши рівняння кінематичного ланцюга у вигляді [141]:

$${}^{L0}T_{L6} = {}^{L0}T_W {}^WT_P {}^PT_{L6}. \quad (2.6)$$

З іншого боку, після множення матриць відповідно до (2.4), (2.5) результуюче перетворення може бути подано у вигляді:

$${}^{L0}T_{L6} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{s} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

де \mathbf{n} , \mathbf{s} , \mathbf{a} , \mathbf{p} – ковзні вектори, що визначають поточний стан ноги щодо корпусу АКА. Виходячи з їх геометричного змісту, для цих векторів запропоновані такі назви [140]:

\mathbf{n} – вектор нормалі (normal vector);

s – вектор ковзання (sliding vector);

a – вектор приведення (approach vector);

p – вектор позиції стопи (foot position vector).

Під час розв'язання оберненої задачі кінематики кінематичний ланцюг ноги розглядається у зворотному порядку, від $L6$ до $L0$:

$$\left({}^{L0}T_{L6}\right)' = \begin{bmatrix} \mathbf{n}' & \mathbf{s}' & \mathbf{a}' & \mathbf{p}' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^{L6}T_{L0} \quad (2.8)$$

Прирівнюючи вирази для трьох елементів вектору p у (2.8), отримаємо замкнену систему рівнянь для визначення узагальнених координат $\theta_4, \theta_5, \theta_6$:

$$\begin{aligned} -C_6(l_{L3}C_{45} + l_{L4}C_5) &= p_x' + l_{L5}; \\ S_6(l_{L3}C_{45} + l_{L4}C_5) &= p_y'; \\ -l_{L3}S_{45} - l_{L4}S_5 &= p_z'. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Ці рівняння можуть бути розв'язані аналітично. А саме, підносячи до квадрата і додаючи всі три рівняння, визначимо C_4 , потім, за відомим C_4 знаходимо S_4 і, нарешті, – відповідно, кут θ_5 :

$$C_4 = \frac{(p_x' + l_{L5})^2 + p_y'^2 + p_z'^2 - l_{L3}^2 - l_{L4}^2}{2l_{L3}l_{L4}}, \quad (2.10)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \frac{\pm \sqrt{1 - C_4^2}}{C_4}. \quad (2.11)$$

Виходячи з умови антропоморфності ходи, потрібно в чисельнику виразу (2.11) обрати знак «+», що відповідає конфігурації кінцівки «коліном уперед».

Далі, додаючи перші два рівняння в (2.9), попередньо піднесені до квадрата, отримаємо:

$$C_5(C_4l_{L3} + l_{L4}) - S_5(S_4l_{L3}) = \pm \sqrt{(p_x' + l_{L5})^2 + p_y'^2}. \quad (2.12)$$

А із третього рівняння (2.9) дістанемо:

$$S_5(C_4l_{L3} + l_{L4}) + C_5(S_4l_{L3}) = -p_z'. \quad (2.13)$$

Введемо, як було сказано вище, допоміжні сферичні координати ρ, ψ :

$$\begin{aligned}\rho &= \pm \sqrt{(p'_x + l_{L5})^2 + p_y'^2 + p_z'^2}; \\ \psi &= \tan^{-1} \frac{S_4 l_{L3}}{C_4 l_{L3} + l_{L4}}.\end{aligned}\quad (2.14)$$

Для радіальної координати ρ у цьому виразі обираємо знак «+», що відповідає верхній півсфері системи координат. Тобто, очевидно, кінцівка розташовується вище поверхні опори.

Маємо:

$$\begin{aligned}\rho C_{5\psi} &= \pm \sqrt{(p'_x + l_{L5})^2 + p_y'^2}; \\ \psi S_{5\psi} &= -p_z' .\end{aligned}\quad (2.15)$$

Звідки отримуємо:

$$\theta_5 + \psi = \tan^{-1} \frac{-p_z'}{\pm \sqrt{(p'_x + l_{L5})^2 + p_y'^2}}, \quad (2.16)$$

що, з урахуванням відомого виразу для ρ, ψ , дає змогу знайти значення кута θ_5 .

На відміну від попередніх обчислень, у цьому виразі складно визначитися з вибором альтернативного знака. Отже, умовам антропоморфності відповідають обидві альтернативи. У випадку $\theta_5 > 0$ відбувається поворот стопи апарата назовні («пронація»), у протилежному випадку стопа повертається всередину («супінація»). Кінцевий вибір потрібно робити, виходячи з допустимих діапазонів зміни кута θ_5 і функціональних переваг під час ходьби.

Для знаходження кута θ_6 розділимо друге рівняння (2.9) на перше:

$$\theta_6 = \tan^{-1} \frac{-p_y'}{-p'_x - l_{L5}}. \quad (2.17)$$

Формально у випадку $C_{45} l_{L3} + C_5 l_{L4} < 0$ потрібно взяти додаткове значення кута: $\theta_6^* = \pi - \theta_6$. Геометрично це відповідає згинанню стопи більше,

ніж на 90° . Втім, така конфігурація, хоча і може допускатися конструкцією гомілковостопного з'єднання, однак малоймовірно буде реалізовуватися при реальній ходьбі.

Перейдемо до визначення параметрів тазостегнового з'єднання, тобто кутів $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. З одного боку, маємо:

$${}^{L5}T_{L0} = \begin{bmatrix} C_6 n'_x - S_6 n'_y & C_6 s'_x - S_6 s'_y & C_6 a'_x - S_6 a'_y & C_6 (p'_x + l_{L5}) - S_6 p'_y \\ S_6 n'_x + C_6 n'_y & S_6 s'_x + C_6 s'_y & S_6 a'_x + C_6 a'_y & S_6 (p'_x + l_{L5}) + C_6 p'_y \\ n'_z & s'_z & a'_z & p'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

З іншого боку,

$${}^{L5}T_{L0} = {}^{L5}T_{L4} {}^{L4}T_{L3} {}^{L3}T_{L2} {}^{L2}T_{L1} {}^{L1}T_{L0};$$

$${}^{L5}T_{L0} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & -l_{L3}C_{45} - l_{L4}C_5 \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & 0 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & -l_{L3}S_{45} - l_{L4}S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Елементи останньої матриці, що не виписані явно, не становлять інтересу для складання рівнянь.

Прирівнюючи однойменні елементи матриць (2.18), (2.19), отримаємо такі рівняння:

$$S_2 = S_6 a'_x + C_6 a'_y;$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{S_2}{\sqrt{1 - S_2^2}}. \quad (2.20)$$

Далі, для знаходження θ_1 маємо:

$$\begin{aligned}
C_2 S_1 &= S_6 s'_x + C_6 s'_y; \\
C_2 S_1 &= S_6 n'_x + C_6 n'_y; \\
\theta_1 &= \tan^{-1} \frac{S_6 s'_x + C_6 s'_y}{S_6 n'_x + C_6 n'_y}.
\end{aligned}
\tag{2.21}$$

Якщо $C_2 < 0$, то відповідає куту відведення кінцівки більше, ніж на 90° , отже, слід було б взяти додаткове значення кута θ_1 . Однак у процесі антропоморфної ходьби такі кути відведення не реалізуються.

Таким чином, у замкненому вигляді отримано розв'язок оберненої задачі кінематики для кінцівки АКА, що дозволяє за заданими координатами стопи щодо корпуса визначити значення узагальнених координат $\theta_1, \dots, \theta_6$. Неоднозначність визначення кутів, яка формально виникає під час розв'язування рівнянь, допустима, виходячи з умов антропоморфності ходи АКА.

2.2. Розподіл кінетичної і потенціальної енергій під час руху антропоморфного крокуючого апарата

2.2.1. Кінетична енергія антропоморфного крокуючого апарата

Кінетична енергія АКА може бути обчислена як сума кінетичних енергій його ланок. Нехай T_i – кінетична енергія ланки i ($i = 1, 2, \dots, n$). Позначимо через dT_i кінетичну енергію елемента маси даної ланки. Тоді

$$dT_i = \frac{1}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) dm = \frac{1}{2} \text{Tr}(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T).$$

Тут замість скалярного добутку використовується оператор Tr (слід матриці), що надалі дозволить автоматично виділити матрицю інерції відповідної ланки. Підставляючи в цей вираз значення швидкості, отримаємо таке рівняння для елемента маси dm :

$$dT_i = \frac{1}{2} \text{Tr} \left[\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} \left({}^i \mathbf{r}_i dm {}^i \mathbf{r}_i^T \right) U_{ir}^T \dot{\theta}_p \dot{\theta}_r \right] \quad (2.22)$$

Матриця U_{ij} характеризує зміну положення точки ланки щодо базової системи координат, зумовлене зміною координати θ_j . Дана матриця однакова для всіх точок ланки і не залежить від розподілу маси в цій ланці. Не залежать від розподілу маси також і величини $\dot{\theta}_i$. Таким чином, можна записати

$$T_i = \int dT_i = \frac{1}{2} \text{Tr} \left[\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} \left(\int {}^i \mathbf{r}_i {}^i \mathbf{r}_i^T dm \right) U_{ir}^T \dot{\theta}_p \dot{\theta}_r \right] \quad (2.23)$$

Інтеграл у дужках являє собою матрицю інерції \mathbf{J}_i ланки i

$$\mathbf{J}_i = \int {}^i \mathbf{r}_i {}^i \mathbf{r}_i^T dm = \begin{bmatrix} \int x_i^2 dm & \int x_i y_i dm & \int x_i z_i dm & \int x_i dm \\ \int x_i y_i dm & \int y_i^2 dm & \int y_i z_i dm & \int y_i dm \\ \int x_i z_i dm & \int y_i z_i dm & \int z_i^2 dm & \int z_i dm \\ \int x_i dm & \int y_i dm & \int z_i dm & \int dm \end{bmatrix}.$$

Як можна бачити з виразів елементів даної матриці, вони легко виражаються через традиційні характеристики інерції твердого тіла: елементи тензора інерції і локальні координати центра мас ланки:

$$\mathbf{J}_i = \int {}^i \mathbf{r}_i {}^i \mathbf{r}_i^T dm = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}) & I_{xy} & I_{xz} & m_i x_{ci} \\ I_{xy} & \frac{1}{2}(I_{xx} - I_{yy} + I_{zz}) & I_{yz} & m_i y_{ci} \\ I_{xz} & I_{yz} & \frac{1}{2}(I_{xx} + I_{yy} - I_{zz}) & m_i z_{ci} \\ m_i x_{ci} & m_i y_{ci} & m_i z_{ci} & m_i \end{bmatrix}$$

Таким чином, повна кінетична енергія АКА може бути представлена у вигляді такого виразу:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i \text{Tr} \left[\left(U_{ip} \mathbf{J}_i U_{ir}^T \right) \dot{\theta}_p \dot{\theta}_r \right] \quad (2.24)$$

Зазначимо, що величини \mathbf{J}_i ($i = 1, 2, \dots, n$) залежать тільки від розподілу маси ланки i в системі координат, пов'язаній з цією ланкою, і не залежать ні від положення, ні від швидкості ланок. Тобто за припущення абсолютної жорсткості ланок ці матриці є константами. Матриці U_{ij} залежать від поточної конфігурації АКА, тобто від значень узагальнених координат, але не залежать від узагальнених швидкостей. Нарешті, $\dot{\theta}_i$ є, власне, узагальненими швидкостями системи. Така структура виразу для кінетичної енергії спрощує обчислення частинних похідних, що входять у рівняння Лагранжа (2.1).

2.2.2. Потенціальна енергія антропоморфного крокуючого апарата

Позначимо Π_i потенціальну енергію ланки i КА. Тоді

$$\Pi_i = -m_i \mathbf{g}^0 \mathbf{r}_i = -m_i \mathbf{g}^0 ({}^0T_i^i \mathbf{r}_i), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Виконавши додавання всіх ланок, отримаємо:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i = \sum_{i=1}^n -m_i \mathbf{g}^0 ({}^0T_i^i \mathbf{r}_i) \quad (2.25)$$

Тут $\mathbf{g} = (g_x, g_y, g_z, 0)$ – вектор-рядок, що описує прискорення вільного падіння в базовій системі координат. Якщо як базова використовується «нормальна» земна система координат, маємо $\mathbf{g} = (0, 0, -|g|, 0)$, де g – абсолютна величина прискорення вільного падіння в даному місці.

У виразі (2.25) тільки матриці однорідних перетворень залежать від узагальнених координат системи, тому передбачають обчислення частинних похідних від цього виразу, тобто потребують розрахунку частинних похідних від ${}^0T_i^i$.

2.3. Динамічна векторно-матрична модель руху антропоморфного крокуючого апарата

Завдання побудови динамічної моделі АКА можна коротко охарактеризувати, як математичний опис його руху в зв'язку з діючими силами і моментами. Такі рівняння необхідні для комп'ютерного моделювання руху АКА та оцінювання якості обраної кінематичної схеми при виборі законів керування.

Динамічна модель маніпулятора може бути побудована на основі відомих базових рівнянь ньютонівської або лагранжевої механіки. Ці базові рівняння в робототехніці отримали назви рівнянь Лагранжа–Ейлера, Ньютона–Ейлера, Ейлера–Даламбера [63; 142; 143]. У даному розділі використовуватимемо рівняння Лагранжа-Ейлера, оскільки дані рівняння відрізняються простотою й універсальністю, а результуюча модель подається у формі замкнутої системи рівнянь щодо мінімального набору змінних, що зручно для подальшої побудови й аналізу законів керування.

Повний опис динаміки АКА можна отримати, застосовуючи рівняння Лагранжа II роду для голономних механічних систем [63; 144]. Описавши кінематику АКА за допомогою матричного представлення Денавіта–Хартенберга, можна, користуючись лагранжевим формалізмом, побудувати динамічну модель АКА у формі замкнутої системи рівнянь щодо мінімального набору узагальнених координат. Таке спільне використання Д-Х-представлення і методу Лагранжа приводить до компактної векторно-матричної форми рівнянь руху, зручної для аналітичного дослідження і допускає пряме її використання в обчислювальних алгоритмах.

Загалом система рівнянь Лагранжа II роду для голономних механічних систем може бути подана у такому вигляді [63]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + Q_i; \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.26)$$

де T – кінетична енергія системи; Π – потенціальна енергія системи; q_i – узагальнені координати; Q_i – непотенціальні узагальнені сили; n – число степенів вільності системи.

Узагальнені координати є набором змінних, що однозначно встановлюють поточну конфігурацію системи. Вибір змінних як узагальнених координат неоднозначний. Однак, оскільки кути повороту в кінематичних парах безпосередньо доступні вимірюванню, природно саме їх включити у вектор узагальнених координат. У цьому випадку узагальнені координати збігаються з приєднаними змінними АКА: $\theta_i = q_i$. Крім приєднаних змінних, у вектор узагальнених координат входять змінні, що характеризують поточний стан корпусу АКА в нерухомому просторі.

Відповідно до загальної форми рівняння (2.26) обчислимо похідні від виразу для кінетичної енергії АКА (2.24):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_i} = \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \text{Tr}(U_{jk} \mathbf{J}_j U_{ji}^T) \ddot{\theta}_k + \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j \text{Tr}(U_{jkm} \mathbf{J}_j U_{ji}^T) \dot{\theta}_k \dot{\theta}_m,$$

де $U_{jkm} = \partial^2({}^0T_j) / \partial \theta_k \partial \theta_m$.

Для потенціальної енергії (2.25) знаходимо:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \theta_i} = - \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{g} U_{ij}^j \mathbf{r}_j$$

У результаті рівняння руху набудуть вигляду:

$$\sum_{k=1}^n D_{ik} \ddot{\theta}_k + \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m + G_i = Q_i; \quad i = 1, \dots, n \quad (2.27)$$

Тут

$$D_{ik} = D_{ki} = \sum_{j=\max(i,k)}^n \text{Tr}(U_{jk} \mathbf{J}_j U_{ji}^T), \quad i, k = 1, 2, \dots, n; \quad (2.28)$$

$$h_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n \text{Tr}(U_{jkm} \mathbf{J}_j U_{ji}^T); \quad i, k, m = 1, 2, \dots, n. \quad (2.29)$$

$$G_i = -\sum_{j=i}^n m_j \mathbf{g} U_{ij}^j \mathbf{r}_j; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.30)$$

Конкретизуємо вид параметрів D_{ik} для ноги АКА, конфігурація якої задається шістьма приєднаними змінними $(\theta_1, \dots, \theta_6)$:

$$D_{11} = \text{Tr}(U_{11} \mathbf{J}_1 U_{11}^T) + \text{Tr}(U_{21} \mathbf{J}_2 U_{21}^T) + \text{Tr}(U_{31} \mathbf{J}_3 U_{31}^T) + \text{Tr}(U_{41} \mathbf{J}_4 U_{41}^T) + \\ + \text{Tr}(U_{51} \mathbf{J}_5 U_{51}^T) + \text{Tr}(U_{61} \mathbf{J}_6 U_{61}^T);$$

$$D_{12} = D_{21} = \text{Tr}(U_{22} \mathbf{J}_2 U_{21}^T) + \text{Tr}(U_{32} \mathbf{J}_3 U_{31}^T) + \text{Tr}(U_{42} \mathbf{J}_4 U_{41}^T) + \\ + \text{Tr}(U_{52} \mathbf{J}_5 U_{51}^T) + \text{Tr}(U_{62} \mathbf{J}_6 U_{61}^T);$$

$$D_{13} = D_{31} = \text{Tr}(U_{33} \mathbf{J}_3 U_{31}^T) + \text{Tr}(U_{43} \mathbf{J}_4 U_{41}^T) + \text{Tr}(U_{53} \mathbf{J}_5 U_{51}^T) + \\ + \text{Tr}(U_{63} \mathbf{J}_6 U_{61}^T);$$

$$D_{14} = D_{41} = \text{Tr}(U_{44} \mathbf{J}_4 U_{41}^T) + \text{Tr}(U_{54} \mathbf{J}_5 U_{51}^T) + \text{Tr}(U_{64} \mathbf{J}_6 U_{61}^T);$$

$$D_{15} = D_{51} = \text{Tr}(U_{55} \mathbf{J}_5 U_{51}^T) + \text{Tr}(U_{65} \mathbf{J}_6 U_{61}^T);$$

$$D_{16} = D_{61} = \text{Tr}(U_{66} \mathbf{J}_6 U_{61}^T);$$

$$D_{22} = \text{Tr}(U_{22} \mathbf{J}_2 U_{22}^T) + \text{Tr}(U_{32} \mathbf{J}_3 U_{32}^T) + \text{Tr}(U_{42} \mathbf{J}_4 U_{42}^T) + \text{Tr}(U_{52} \mathbf{J}_5 U_{52}^T) + \\ + \text{Tr}(U_{62} \mathbf{J}_6 U_{62}^T);$$

$$D_{23} = D_{32} = \text{Tr}(U_{33} \mathbf{J}_3 U_{32}^T) + \text{Tr}(U_{43} \mathbf{J}_4 U_{42}^T) + \text{Tr}(U_{53} \mathbf{J}_5 U_{52}^T) + \\ + \text{Tr}(U_{63} \mathbf{J}_6 U_{62}^T);$$

$$D_{24} = D_{42} = \text{Tr}(U_{44} \mathbf{J}_4 U_{42}^T) + \text{Tr}(U_{54} \mathbf{J}_5 U_{52}^T) + \text{Tr}(U_{64} \mathbf{J}_6 U_{62}^T);$$

$$D_{25} = D_{52} = \text{Tr}(U_{55} \mathbf{J}_5 U_{52}^T) + \text{Tr}(U_{65} \mathbf{J}_6 U_{62}^T);$$

$$D_{26} = D_{62} = \text{Tr}(U_{66} \mathbf{J}_6 U_{62}^T);$$

$$D_{33} = \text{Tr}(U_{33} \mathbf{J}_3 U_{33}^T) + \text{Tr}(U_{43} \mathbf{J}_4 U_{43}^T) + \text{Tr}(U_{53} \mathbf{J}_5 U_{53}^T) + \text{Tr}(U_{63} \mathbf{J}_6 U_{63}^T);$$

$$D_{34} = D_{43} = \text{Tr}(U_{44}\mathbf{J}_4U_{43}^T) + \text{Tr}(U_{54}\mathbf{J}_5U_{53}^T) + \text{Tr}(U_{64}\mathbf{J}_6U_{63}^T);$$

$$D_{35} = D_{53} = \text{Tr}(U_{55}\mathbf{J}_5U_{53}^T) + \text{Tr}(U_{65}\mathbf{J}_6U_{63}^T);$$

$$D_{36} = D_{63} = \text{Tr}(U_{66}\mathbf{J}_6U_{63}^T);$$

$$D_{44} = \text{Tr}(U_{44}\mathbf{J}_4U_{44}^T) + \text{Tr}(U_{54}\mathbf{J}_5U_{54}^T) + \text{Tr}(U_{64}\mathbf{J}_6U_{64}^T);$$

$$D_{45} = D_{54} = \text{Tr}(U_{55}\mathbf{J}_5U_{54}^T) + \text{Tr}(U_{65}\mathbf{J}_6U_{64}^T);$$

$$D_{46} = D_{64} = \text{Tr}(U_{66}\mathbf{J}_6U_{64}^T);$$

$$D_{55} = \text{Tr}(U_{55}\mathbf{J}_5U_{55}^T) + \text{Tr}(U_{65}\mathbf{J}_6U_{65}^T);$$

$$D_{56} = D_{65} = \text{Tr}(U_{65}\mathbf{J}_6U_{65}^T);$$

$$D_{66} = \text{Tr}(U_{66}\mathbf{J}_6U_{66}^T).$$

Коефіцієнти (2.29) визначають узагальнені відцентрові і коріолісові сили інерції, що діють на ланки АКА. Вирази для відповідних сил можна записати у вигляді:

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{\theta}_k \dot{\theta}_m; \quad i=1,2,\dots,n. \quad (2.31)$$

Нарешті, елементи вектора узагальнених сил тяжіння (2.30) для даної системи в явному вигляді мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} G_1 &= -(m_1\mathbf{g}U_{11}^1\mathbf{r}_1 + m_2\mathbf{g}U_{21}^2\mathbf{r}_2 + m_3\mathbf{g}U_{31}^3\mathbf{r}_3 + m_4\mathbf{g}U_{41}^4\mathbf{r}_4 + m_5\mathbf{g}U_{51}^5\mathbf{r}_5 + m_6\mathbf{g}U_{61}^6\mathbf{r}_6); \\ G_2 &= -(m_2\mathbf{g}U_{22}^2\mathbf{r}_2 + m_3\mathbf{g}U_{32}^3\mathbf{r}_3 + m_4\mathbf{g}U_{42}^4\mathbf{r}_4 + m_5\mathbf{g}U_{52}^5\mathbf{r}_5 + m_6\mathbf{g}U_{62}^6\mathbf{r}_6); \\ G_3 &= -(m_3\mathbf{g}U_{33}^3\mathbf{r}_3 + m_4\mathbf{g}U_{43}^4\mathbf{r}_4 + m_5\mathbf{g}U_{53}^5\mathbf{r}_5 + m_6\mathbf{g}U_{63}^6\mathbf{r}_6); \\ G_4 &= -(m_4\mathbf{g}U_{44}^4\mathbf{r}_4 + m_5\mathbf{g}U_{54}^5\mathbf{r}_5 + m_6\mathbf{g}U_{64}^6\mathbf{r}_6); \\ G_5 &= -(m_5\mathbf{g}U_{55}^5\mathbf{r}_5 + m_6\mathbf{g}U_{65}^6\mathbf{r}_6); \\ G_6 &= -m_6\mathbf{g}U_{61}^6\mathbf{r}_6. \end{aligned}$$

Коефіцієнти G_i , D_{ik} , h_{ikm} динамічних рівнянь є функціями як приєднаних змінних, так і динамічних параметрів АКА. Фізичний зміст цих параметрів можна зрозуміти зі структури рівнянь.

Складові G_i визначаються рівністю (2.30), є узагальненими силами тяжіння, тобто описують вплив усіх сил тяжіння на зміну даної узагальненої координати (приєднаної змінної). Коефіцієнти D_{ik} визначаються рівністю (2.28), встановлюють зв'язок діючих у кінетичних парах сил і моментів з узагальненими прискореннями. Зокрема, при $i = k$ коефіцієнт D_{ii} є власним моментом інерції відповідної ланки, а при $k \neq i$ коефіцієнт D_{ik} являє собою так званий перехресний момент інерції.

Оскільки для довільної матриці $\text{Tr}(A) = \text{Tr}(A^T)$, матриця D_{ik} є симетричною, коефіцієнти h_{ikm} , що визначаються співвідношенням (2.29), встановлюють зв'язок діючих у кінематичних парах сил і моментів зі швидкостями зміни приєднаних змінних. Зокрема, при $k = m$ коефіцієнт h_{ikk} пов'язує кутову швидкість у кінематичному з'єднанні k з відцентровою силою, в з'єднанні i . У разі $k \neq m$ даний коефіцієнт визначає узагальнену коріолісову силу, що зумовлюється спільним рухом у зв'язках k, m у кінематичній парі i .

Важливо зазначити, що за певних умов деякі з розглянутих коефіцієнтів можуть перетворюватися в нуль, що означає інваріантність однієї зі змінних до змін іншої. Це може відбуватися за однією з таких причин:

1. Конкретна кінематична схема може виключати динамічний взаємовплив рухів для деяких пар степенів вільності (коефіцієнти D_{ik} , h_{ikm}).

2. Деякі з коефіцієнтів h_{ikm} вказані в рівняннях лише фіктивно, будучи завжди рівними нулю. Так, наприклад, h_{iii} завжди дорівнює нулю. Тобто відцентрова сила, породжена рухом у з'єднанні i , на рух у самому цьому з'єднанні не впливає.

3. Деякі з динамічних коефіцієнтів можуть набувати нульових значень в окремі моменти часу за певних конфігурацій системи або значень узагальнених швидкостей.

2.4. Критерій збереження положення точки нульового моменту, як умова рівноваги антропоморфного крокуючого апарата під час руху по довірльній поверхні

Критерій динамічної стабільності руху АКА завжди був важливою частиною теоретичних робіт вчених у цьому напрямі. Найпопулярніший і найбільш розповсюджений критерій – точка нульового моменту – був запропонований Вукобратовічем і його колегами в 1970 році [145; 146]. Хоча критерій ТНМ і довів свою спроможність під час роботи з різними роботами, вченими було запропоновано низку інших критеріїв. Госвами в 1990 запропонував використовувати індикатор повороту стопи (Foot Rotation Indicator FRI), який розширює поняття ТНМ у тому сенсі, що для руху з високою швидкістю не обов'язково знаходження ТНМ строго в межах площі опори [147]. У 2006 році Хірукава і його колеги з японського Національного інституту передової промислової науки і технології запропонували більш надійний критерій збереження рівноваги – конус контактних моментів (Contact Wrench Cone), який може успішно застосовуватись для руху по нерівній поверхні [148]. Ідея критерію полягає в тому, що якщо сума гравітаційних і інерційних моментів сил, прикладених до центру мас робота, знаходиться всередині поліедрального опуклого конуса, утвореного моментами сил контакту між стопами робота і навколишнім середовищем, то рівновага руху зберігається. За допомогою двох останніх критеріїв були досягнуті цікаві результати.

У моделюванні руху АКА [149–151] реальний ефект вони дають при більших швидкостях руху, коли інерційні складові роблять вагомий внесок у положення рівноваги. Тому, наше дослідження ґрунтується на критерії ТНМ,

який може бути надалі модифікований до конуса контактних моментів [152]. Розглянемо критерій ТНМ докладніше.

Незалежно від структури і кількості степенів вільності, однією з основних властивостей АКА є можливість обертання системи навколо краю стопи, тобто перекидання під впливом сильних збурень, що еквівалентно наявності в місці контакту стопи з поверхнею некерованого пасивного степеня вільності. Положення і орієнтація стопи щодо поверхні руху не можуть контролюватися безпосередньо, а лише опосередковано, шляхом забезпечення потрібної динаміки системи, що знаходиться вище стопи. Для досягнення рівноваги ходи необхідно, щоб відбувався цілковитий дотик стоп робота з поверхнею. На

рис. 2.2, *a* показано фазу руху з опорою на одну стопу, коли стопа повністю стикається з поверхнею. Зазначимо, що розглядаємо загальний тривимірний випадок, тому далі вектори сил, моментів і координат відповідають векторам у тривимірному просторі. Для аналізу замінимо частину робота вище стопи дією сили A_A і моменту M_A у точці A (

рис. 2.2, *b*). Сила тяжіння стопи прикладена в точці G . На стопу також діє реакція опори P , що підтримує всю систему в рівновазі. Загалом сила реакції складається з трьох компонент сили $R = [R_x R_y R_z]^T$ і трьох компонент моментів сил $R = [M_x M_y M_z]^T$. Горизонтальні компоненти R відповідають за силу тертя і, при спочиває стопі, врівноважуються горизонтальними компонентами F_A , так само як вертикальна складова моменту M_z врівноважується вертикальною складовою M_A (

рис. 2.2, *c*). Тому, якщо припустити відсутність просковзування між стопою і поверхнею, то цими компонентами сили можна знехтувати. Вертикальна компонента сили R_z представляє сили реакції опори, що діють строго вертикально. Це означає, що в стані спокою стопи можна так вибрати точку прикладання сили реакції опори P , що горизонтальні моменти M_A будуть врівноважуватися.

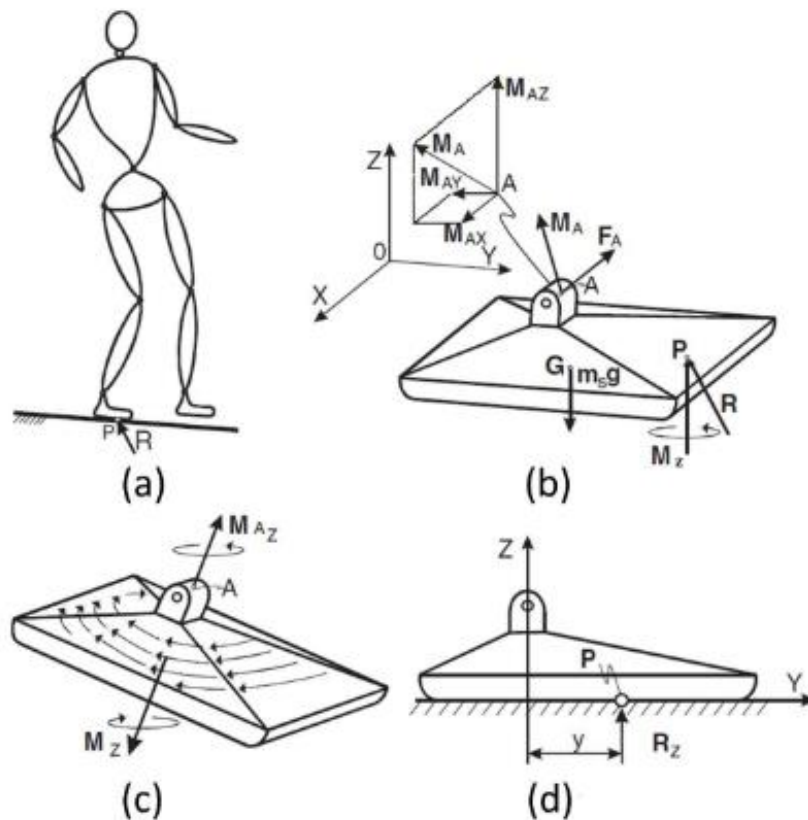


Рис. 2.2. Сили, що діють на стопу двоногого робота

Для простоти розуміння на

рис. 2.2, *d* показано плоский випадок, на якому горизонтальний момент M врівноважується шляхом зсуву точки прикладання сили R_z . Тому, якщо можна вибрати таку точку P , у якій вертикальна сила R_z компенсує горизонтальні моменти M_A , то горизонтальні моменти M_x , M_y у цій точці дорівнюють нулю і залишається тільки вертикальна компонента M_z , як показано на рис. 2.2, *b*.

Однак, якщо площа стопи недостатня для існування такої точки P , то сила R буде діяти на межі стопи, а некомпенсована частина моменту M_A обертатиме стопу. Отже, необхідною і достатньою умовою рівноваги стопи є рівність $M_x = 0$, $M_y = 0$ у точці дії сили реакції опори P . Звідси впливає назва критерію: точка нульового моментам. Це точка, в якій дія опорної поверхні можна уявити силою R і моментом M_z .

Запишемо рівняння балансу стопи (

рис. 2.2, b):

$$\mathbf{R} + \mathbf{F}_A + m_s \times \mathbf{g} = 0, \quad (2.32)$$

$$\overline{OP} \times \mathbf{R} + \overline{OG} \times m_s \times \mathbf{g} + M_A + M_z + \overline{OA} \times \mathbf{F}_A = 0, \quad (2.33)$$

де m_s – маса стопи; \overline{OP} \overline{OG} \overline{OA} – радіус-вектори точок P , G і A в глобальній системі координат з початком у точці O ; \mathbf{g} – вектор прискорення вільного падіння. Проектуючи (2.33) на горизонтальну площину XY , отримаємо:

$$(\overline{OP} \times \mathbf{R})^{XY} + \overline{OG} \times m_s \times \mathbf{g} + M_A^{XY} + (\overline{OA} \times \mathbf{F}_A)^{XY} = 0, \quad (2.34)$$

де верхній індекс XY означає проєкцію вектору на площину XY . Положення точки P , за якого гарантується рівновага стопи, знаходиться з рівняння (2.34). Таким чином, якщо розрахована за допомогою рівняння ТНМ лежить у площі опори стопи, то рівновага при такому русі зберігається. У разі, коли обидві стопи робота знаходяться в контакті з поверхнею, то розглядатиметься опукла оболонка точок контакту (рис. 2.3). Зазначимо, що значення M_A і F_A встановлюються динамікою руху робота.

Отже, підсумовуючи ще раз дамо визначення ходи зі збереженням рівноваги з точки зору критерію ТНМ:

«Якщо ТНМ під час руху робота залишається в межах опуклої оболонки точок контакту робота з поверхнею, то рівновага робота за такого руху зберігатиметься».

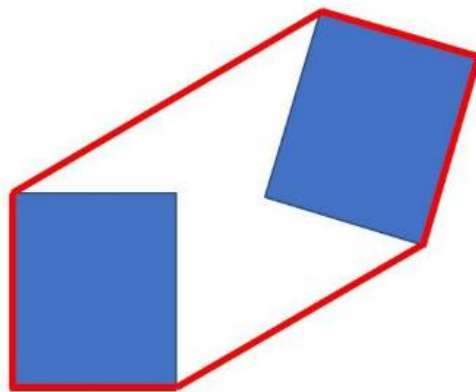


Рис. 2.3. Червоний полігон – це опукла оболонка точок контакту стоп робота з поверхнею, сині прямокутники – положення стоп робота

Висновки до розділу 2

1. Проведено формалізацію математичної моделі АКА як багатомасової механічної системи шарнірно-зв'язаних твердих тіл із 18 степенями вільності: 6 степенів вільності, відповідних руху АКА у тривимірному просторі як вільної механічної системи, і 6 степенів вільності, відповідних відносним рухам ланок у шарнірах кожної з двох кінцівок.

2. Для отримання рівнянь кінематичної моделі АКА запропоновано підхід з єдиних системних позицій з використанням представлення Денавіта – Хартенберга. За такого підходу розв'язання прямої задачі кінематики може розглядатися як послідовність однорідних перетворень координат. Розв'язання оберненої задачі для ноги АКА може бути отримано в замкненому вигляді за заданими просторовими координатами кінцевих точок кожної з двох кінцівок.

3. Оскільки з обчислювальної точки зору рівняння руху у формі Лагранжа – Ейлера надзвичайно неефективні, то основною сферою застосування розглянутих рівнянь є не пряме їх інтегрування, а оцінювання величин коефіцієнтів динамічного впливу, що важливо під час розроблення та аналізу у системи керування АКА.

Основні результати розділу були опубліковані в [139],[154],[164].

Список використаних джерел до розділу 2: [63],[139–152].

Розділ 3

ПЛАНУВАННЯ ОПОРНОЇ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА

3.1. Загальні положення планування опорної траєкторії руху антропоморфного крокуючого апарата

Метою планування траєкторії є генерування опорного руху для систем керування рухом, наприклад, двоногих роботів [153]. Зазвичай, це роблять, задаючи низку параметрів, що описують необхідну траєкторію. Планування полягає в генеруванні часової послідовності значень, одержуваних за допомогою функції, яка інтерполює необхідну траєкторію. В даному розділі описано методи генерування траєкторії руху двоногих крокуючих роботів пересіченою місцевістю [154]. У такому блоці планування (або генерування) траєкторії початкова і цільова точки (переміщення з точки в точку) в робочому просторі задаються і зв'язуються різними інтерполюючими функціями. Інакше кажучи, рух кінцевого ефектора в робочому просторі описується такою функцією.

Через те, що метою є забезпечення можливості переміщення двоногого робота («ходи на двох ногах») на базі тривимірної лінійної моделі перевернутого маятника (3D-LIPM), задаються два різних кінцевих ефектори. Перший кінцевий ефектор – це положення центру мас (ТЦМ чи ТПЦМ) навколо тулуба робота. Так як центр мас знаходиться близько від тулуба, як і в людини, орієнтація тулуба замінює «орієнтацію» центру мас. Другий кінцевий ефектор – це нога з маховим рухом (swing foot). Залежно від того, яка нога робить рух (крок), це ліва або права нога. У цьому розділі наведено блок планування траєкторії для центру мас і ноги з маховим рухом. Також розроблено простий метод для генерування бажаної траєкторії для P та R . З попередньо обчислених траєкторій для розрахунку кутів з'єднання використовуються рівняння для зворотної кінематики гуманоїда, алгоритм

зворотної кінематики (див. розділ 2) перетворює необхідне переміщення кінцевих ефекторів в траєкторії руху шарнірів (повзунів) робота. Також у цьому розділі запропоновано й описано новий алгоритм циклу ходи (фази траєкторії), який являє собою простий спосіб зміни схеми ходи при змінах поверхні, який впливає на рух або балансування робота.

Щоб згенерувати траєкторії ТЦМ і ноги з маховим рухом, потрібно знати два вихідних значення. Вихідне значення ноги з маховим рухом f^{ref} і вихідне значення нульового моменту f^{foot_ref} однакові, але мають незначну різницю, щоб забезпечити більшу гнучкість у роботі з регулятором. Спершу за вихідним значенням ноги з маховим рухом визначається положення гомілковостопного суглоба і межа руху. Опірний багатокутник можна визначити з вихідного значення ноги. Вихідне значення нульового моменту – це бажане положення нульового моменту. Вихідне значення нульового моменту не визначає опірний багатокутник, за винятком, коли вихідне значення нульового моменту має бути згенероване з урахуванням, що нульовий момент повинен бути всередині опірного багатокутника. Визначимо послідовність m кроків $S = [S_0, S_1, \dots, S_{m-1}, S_m]$, де S_0 – період ініціалізації; S_1 – перший крок, а S_m – останній крок; S_0 – подвійна опорна фаза, яка рухає масу тулуба до першої опорної ноги, якою обрали ліву, а $S_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$. Також зміщення вихідного значення нульового моменту δ додається до вихідного значення нульового моменту, щоб можна було рухати вихідне значення нульового моменту до зовнішнього боку ноги або всередину ноги. Щоб додати це зміщення до вихідного значення нульового моменту, потрібно знати, яка нога опорна, отже, потрібно визначити функцію, яка бере крок як вхідне значення і повертає у вигляді -1 або $+1$ на основі опорної ноги. Для кроку i^{th} функція опорної ноги буде така:

$$stance_{LEG(S_i)} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } stance_{Leg} == \text{право} \\ 0, & \text{якщо } stance_{Leg} == \text{ліво} \end{cases} \quad (3.1)$$

Щоб чіткіше сформулювати математичний метод оновлення вихідних значень, на рис.3.1 показані вектори вихідного значення. Визначити вихідне значення після періоду ініціалізації, а також розв'язати наведені нижче рівняння можна, використовуючи рис. 3.1 і просте додавання векторів.

$$f_i^{foot_ref} = -(f_{i-1}^{foot_ref} + S_i^{ref}); \quad (3.2)$$

$$P_i^{ZMP_ref} = P_{i-1}^{ZMP_ref} - f_i^{foot_ref}. \quad (3.3)$$

Якщо $i > 1$, то початкові значення потрібно встановити для вихідних значень, а саме: $f_1^{foot_ref} = [0 \ -s_w \ 0]^T$; $f_0^{foot_ref} = [0 \ -\frac{1}{2}s_w \ 0]^T$, де s_w . – опорна ширина.

Враховуючи вихідні значення в умовах ініціалізації і додаючи зміщення вихідного значення нульового моменту, дві задані траєкторії набувають такого вигляду:

$$f_i^{foot_ref} = \begin{cases} f_1^{foot_ref}; & i = 0; \\ f_i^{foot_ref}; & i > 0, \end{cases} \quad (3.4)$$

$$P_i^{ZMP_ref} = \begin{cases} 0 & i = 0; \\ P_i^{ZMP_ref} + (stance_{LEG(S_i)}\delta)\hat{J} & i > 0. \end{cases} \quad (3.5)$$

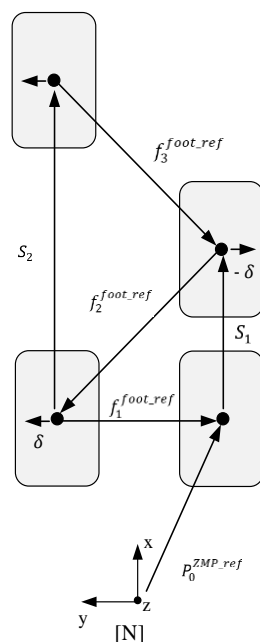


Рис. 3.1. Вектори визначення місця стопи та ТНМ на кожному кроці

Оскільки ініціалізація не має єдиної опорної фази, вихідне значення ноги таке саме, як і вихідне значення ноги під час першого кроку. Інакше кажучи, опорна нога не змінилася. Для вихідного значення нульового моменту оновлення рівняння (3.3) дає змогу міняти ліву і праву опорні ноги, але нульовий момент повинен початися посередині між двома ногами, якщо робот стоїть прямо обома ногами на поверхні. Оскільки межа N спочатку визначається як середина між двома ногами, вихідне значення нульового моменту виникає протягом періоду ініціалізації. Маючи лише одну послідовність кроків і передбачений період ініціалізації, вихідні значення ноги і нульового моменту можна обчислити за формулами (3.4) і (3.5). Ці вихідні значення використовуються у формулах, щоб обчислити траєкторію ТЦМ і ноги з маховим рухом. За таких траєкторій можна розвинути зворотну кінематику у внутрішніх межах руху ноги F , щоб визначити кути.

3.2. Планування в реальному часі траєкторії стійкого руху антропоморфного крокуючого апарата на основі ТНМ і 3D-LIPM моделі

3.2.1. Формалізація руху перевернутого маятника в 3D-просторі

Модель перевернутого маятника є однією з найпростіших моделей для імітації ходи людини. Кадзіта [155] зі співавторами впровадив метод контролю, який можна застосовувати для створення траєкторії центру моменту двоногих роботів. Вони назвали його моделлю 3D лінійного перевернутого маятника (3D Linear Inverted Pendulum Model - 3D-LIPM) [156]. Модель 3D-LIPM базується на динаміці довільного перевернутого маятника (рис. 3.2). Маятник складається з матеріальної точки, яку зазвичай вважають центром моменту двоногого робота, який закріплений на безінерційному телескопічному стояку – опорній нозі, що фіксується відносно початку координат, який сконцентровано на поверхні землі. Положення матеріальної точки $p = (x, y, z)$ характеризується

набором змінних стану $q = (\theta_r, \theta_p, r)$. Обертовий момент та сили, що впливають на матеріальну точку, співвідносяться зі змінними стану та задаються: (τ_r, τ_p, f) .

Рух перевернутого маятника в 3D-просторі, як зображено на Рис. 3.3, математично описано в області значень, де виконується умова:

$$|\theta_r + \theta_p| < 0,5\pi.$$

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = (J^T)^{-1} \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_p \\ f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix}. \quad (3.6)$$

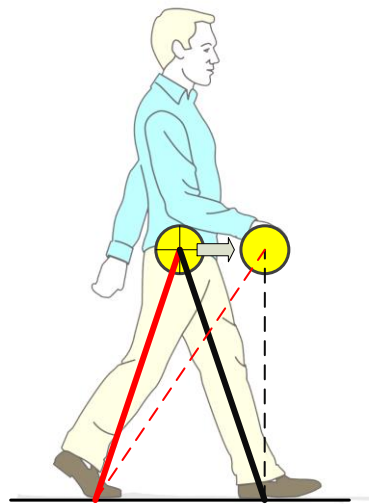


Рис. 3.2. Лінійний перевернутий маятник двоногого робота

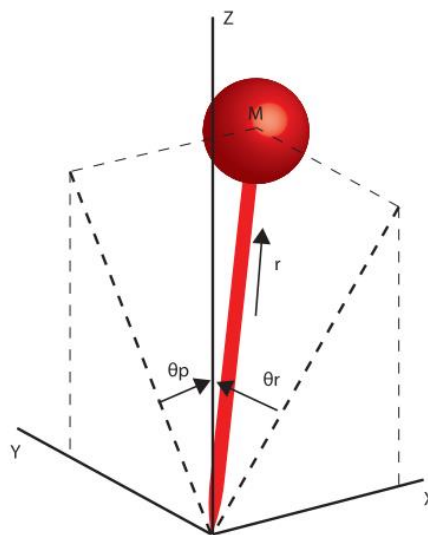


Рис. 3.3. 3D перевернутий маятник

де M – матеріальна точка маятника, а g – прискорення сили тяжіння.

Якобіан J перетворює змінні стану в обертові моменти та сили, що орієнтовані на декартові координати, та дорівнює

$$J = \frac{\partial p}{\partial q} = \begin{pmatrix} 0 & rC_p & S_p \\ -rC_r & 0 & -S_r \\ -rC_rS_r/D & -rC_pS_p/D & D \end{pmatrix}, \quad (3.7)$$

$$C_r \equiv \cos \theta_r, C_p \equiv \cos \theta_p, \quad (3.8)$$

$$S_r \equiv \sin \theta_r, S_p \equiv \sin \theta_p, \quad (3.9)$$

$$D \equiv \sqrt{1 - S_r^2 - S_p^2}. \quad (3.10)$$

Підставивши кінематичні зв'язки: $x = r \sin \theta_p$, $y = -r \sin \theta_r$ та $z = rD$, отримаємо рівняння, що характеризують динаміку вздовж осей x , y і z відповідно:

$$m(-z\ddot{y} - y\ddot{z}) = \frac{D}{C_r}\tau_r - mgy, \quad (3.11)$$

$$m(z\ddot{x} - x\ddot{z}) = \frac{D}{C_p}\tau_p + mgx, \quad (3.12)$$

$$m(x\ddot{x} + y\ddot{y} + z\ddot{z}) = rf - mgz. \quad (3.13)$$

Динамічні характеристики перевернутого маятника не є лінійними і занадто складними щодо їх використання для автоматичного генерування руху під час ходу. З цих причин застосовується обмеження, яке стримує рух маятника і робить його придатним для перетворювання рухів ходу. Обмеження стримує рух центру моменту в площині з вектором нормалі $(k_x k_y, -1)$:

$$z = k_x x + k_y y + z_c, \quad (3.14)$$

де z_c – позитивна константа, яка вказує на висоту площини. З цього обмеження стає очевидним, що друга похідна задовольняє

$$\ddot{z} = k_x \ddot{x} + k_y \ddot{y}. \quad (3.15)$$

Підставивши це обмеження і його другу похідну в рівняння (3.6), (3.7) і (3.8), отримаємо динамічні рівняння лінійного перевернутого маятника. Рух, який описується цими рівняннями, може бути використано для пошуку відповідних траєкторій пересування:

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_c}x - \frac{k_y}{z_c}(x\ddot{y} - \ddot{x}y) + \frac{1}{mz_c}u_p, \quad (3.16)$$

$$\ddot{y} = \frac{g}{z_c}y - \frac{k_x}{z_c}(x\ddot{y} - \ddot{x}y) - \frac{1}{mz_c}u_r, \quad (3.17)$$

$$\ddot{z} = k_x\ddot{x} + k_y\ddot{y}. \quad (3.18)$$

де u_r та u_p – віртуальні входи, які встановлюються, щоб компенсувати вхідні нелінійності:

$$u_r = \frac{D}{C_r}\tau_r, \quad (3.19)$$

$$u_p = \frac{D}{C_p}\tau_p. \quad (3.20)$$

Для подальшого спрощення руху лінійного перевернутого маятника і для знаходження незалежної множини лінійних динамічних рівнянь припустимо, що двоногий робот ходить по рівній поверхні, тому можна задати горизонтальну площину обмеження ($k_x = 0$ і $k_y = 0$). Кадзіта зі співавторами [155] називали цю модель тривимірним режимом лінійного перевернутого маятника (3D-LIPM):

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_c}x + \frac{1}{mz_c}u_p, \quad (3.21)$$

$$\ddot{y} = \frac{g}{z_c}y - \frac{1}{mz_c}u_r. \quad (3.22)$$

$$\ddot{z} = 0. \quad (3.23)$$

Рівняння (3.16), (3.17) і (3.18) є лінійними рівняннями, що характеризують динаміку 3D перевернутого маятника за умови обмеження горизонтальної площини на висоті z_c . Положення ТНМ, що широко використовується в дослідженні двоногих роботів, задане

$$zmp_x = -\frac{\tau_y}{mg}, \quad (3.24)$$

$$zmp_y = -\frac{\tau_x}{mg}. \quad (3.25)$$

Замінюючи вирази (3.20) і (3.19) на (3.17) і (3.16), отримаємо рівняння часто використовуваної моделі «візок – стіл».

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_c}(x - zmp_x), \quad (3.26)$$

$$\ddot{y} = \frac{g}{z_c} (y - zmp_y). \quad (3.27)$$

Модель «візок – стіл» складається з рухливого візка на безінерційному столі (рис. 3.4). Вона має таку саму динаміку руху, як і модель перевернутого маятника, але також прямий зв'язок між ТНМ і рухом.

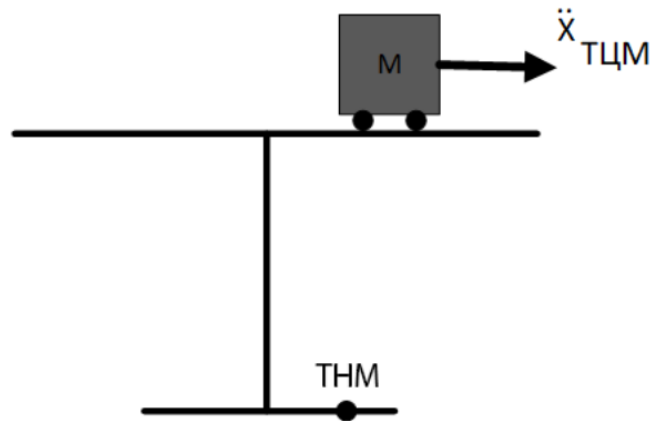


Рис. 3.4. Модель «візок – стіл»: M – маса апарата на осі x ; ТЦМ – точка центру мас; ТНМ – точка нульового моменту

За допомогою динамічних рівнянь 3D-LIPM (3.17), (3.16) і (3.18) можна сконструювати перетворювач траєкторії в реальному часі для пересування двоногого робота. Оскільки бажано досягти природного руху, можна припустити, що вхідні обмеження (3.14) і (3.15) дорівнюють нулю. За такого припущення у центрі моменту виникає роз'єднана динаміка поперечного (латерального) $(y - z)$ і поздовжнього (сагітального) $(x - z)$ руху. Положення точки нульового моменту не визначено, але відоме положення центру тяжіння, а саме, в точці обертання маятника на початку координат. Оскільки це єдина точка контакту маятника з основою, вважатимемо, що $(zmp_x, zmp_y) = (0, 0)$. Інакше кажучи, прямого зв'язку між моделлю звичайного перевернутого маятника і положенням точки нульового моменту не існує [157]:

$$\ddot{x} - \frac{g}{z_c} x = 0, \quad (3.28)$$

$$\ddot{y} - \frac{g}{z_c} y = 0. \quad (3.29)$$

Отже, ці лінійні диференціальні рівняння описують траєкторію центру моменту для заданого початкового стану (x_{i0}, \dot{x}_{i0}) і (y_{i0}, \dot{y}_{i0}) в певний час t (t_i) так, що точка нульового моменту залишається в опорному багатокутнику.

Загальний розв'язок (3.23) такий:

$$x(t) = x_0 \cosh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) + T_c \dot{x}_0 \sinh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right), \quad (3.30)$$

$$\dot{x}(t) = \frac{x_0}{T_c} \sinh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) + \dot{x}_0 \cosh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right). \quad (3.31)$$

а для поперечного руху

$$y(t) = y_0 \cosh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) + T_c \dot{y}_0 \sinh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right), \quad (3.32)$$

$$\dot{y}(t) = \frac{y_0}{T_c} \sinh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) + \dot{y}_0 \cosh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right), \quad (3.33)$$

де

$$T_c \equiv \sqrt{\frac{z_c}{g}}. \quad (3.34)$$

Модель 3D-LIPM, розглянута вище, дозволяє припустити, що зміна положення опорної ноги відбувається миттєво, і між кінцем фази опори і початком нової фази швидкість центру моменту не втрачається. Таким чином, $y(t_{final}) = y(0)$ зберігається. Взявши до уваги це припущення, початкову швидкість нової фази можна обчислити, використовуючи рівняння (3.30) і (3.31), замінені на (3.26) і (3.28). Вихідне положення (координата) $x(0), y(0)$ залежить від типу робота, і буде розглянуто пізніше.

$$\dot{x}_0 = \frac{x_0 - x_0 \cosh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right)}{\sinh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) T_c}, \quad (3.35)$$

$$\dot{y}_0 = \frac{y_0 - y_0 \cosh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right)}{\sinh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) T_c}. \quad (3.36)$$

3.2.2. Траєкторія руху центру мас АКА

Якщо перенести модель «візок – стіл» у 3D систему, траєкторію ЦМ можна обчислити у площині xy , використовуючи лінеаризовану систему. Лінеаризацію моделі «візок – стіл» (рис. 3.4), а результат показаний на Рис. 3.5

— це візок, який може рухатись по рівному столі із заданою висотою z_c . Нехай положення центру мас буде $\mathbf{c} = [x \ y \ z]^T$, а положення нульового моменту — $\mathbf{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$. Координата z у положенні нульового моменту має нульове значення, оскільки він повинен відбуватися на поверхні.

Цю систему можна помістити у фазовий простір із положенням нульового моменту в площині xy як результат. Щоб контролювати нульовий момент, стрибок центру мас вибрали як вхідне значення, оскільки умови прискорення повинні виникати як стан, для визначення положення нульового моменту. З такими вхідними і вихідними даними система фазового простору набуде вигляду:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{z_c}{g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\frac{z_c}{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x & \dot{x} & \ddot{x} & y & \dot{y} & \ddot{y} \end{bmatrix}^T. \quad (3.38)$$

Динаміка у двох вимірах повністю роз'єднана між собою і є ідентичною, отже, той самий алгоритм контролю можна створити для u_x і u_y . Мета такого контролера — змусити нульовий момент слідувати за початковим вхідним значенням, що безпосередньо належить до положення опорної ноги. Без умови прямого зв'язку в алгоритмі контролю, який враховується для майбутніх вихідних значень, наявний нульовий момент не досягає вихідного значення достатньо швидко. Під час ходи, робот уже на крок попереду, а його тулуб наздоганяє.

Зважаючи на це, розглянемо перший тип сервосистеми, описаний Огата [6] із алгоритмом контролю:

$$u = K_I e - K_x \dot{x}, \quad (3.39)$$

де $u_x = u$ для $x = [x \ \dot{x} \ \ddot{x}]^T$ і $e = e_x$ і $u_y = u$ для $y = [y \ \dot{y} \ \ddot{y}]^T$ і $e = e_y$. Матриця посилення K – це матриця 1×3 , що змінює стан. Похибка фактичного ТНМ щодо опорного значення ТНМ визначається як

$$e = p^{ref} - p. \quad (3.40)$$

Коефіцієнт посилення $K_I = 40$ і $K_x = [50 \ 41]^T$ було обрано шляхом спроб і помилок у змодельованій ситуації, а вихідні значення p_x^{ref} і p_y^{ref} – згенеровані. У розділі 3.1 докладно пояснено, як згенерувати вихідні значення. Результати моделювання за допомогою стола – візка і контролера показані на Рис. 3.5. Під час моделювання значення нульового моменту намагається відслідкувати вихідне значення, використовуючи інтегральний коефіцієнт посилення і зворотний зв'язок за станом, але він не може реагувати достатньо швидко на зміни вихідного значення. Для напрямку 0у дійсний нульовий момент досягає вихідного значення, як тільки вихідне значення міняється. Таким чином, цього контролера недостатньо, щоб змусити нульовий момент слідувати за певним вихідним значенням через таке перенесення фази. Алгоритм контролю повинен мати деякі умови, які включають майбутні вихідні значення.

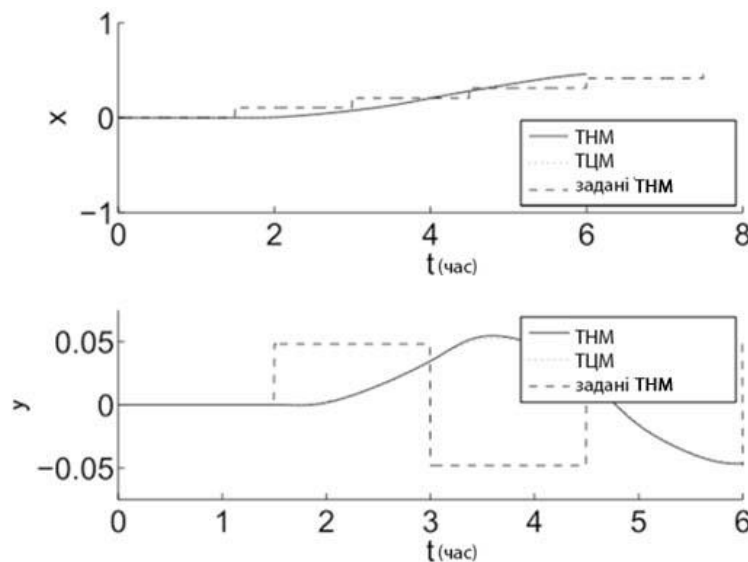


Рис. 3.5. Зміна параметрів моделі «візок – стіл» з використанням контролера попереднього перегляду

3.2.3. Траєкторія ноги з маховим рухом

Опорна нога використовує траєкторію ЦМ та інші залежності для визначення кутів з'єднання, але потрібно встановити траєкторію для ноги з маховим рухом, щоб знайти її кути. Ця траєкторія P^{Swing} відслідковує положення ноги з маховим рухом у внутрішніх межах руху ноги F . Межа F стає рівень із межею N , але вони розташовані біля з'єднань опорної ноги, як показано на рис. 3..

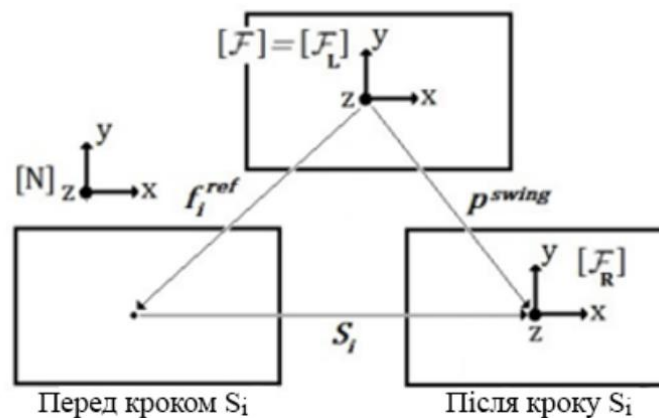


Рис. 3.6. Кроки робота з його координатами

Написи L і R позначають межі руху лівої і правої ніг відповідно. Межа F переключасться між FL і FR залежно від опорної ноги. За умови, що гуманоїд не перекиляється і нога не ковзає, межа F є внутрішнім вихідним значенням межі. Траєкторія ноги з маховим рухом визначається відносно поточної межі F . Постійне оновлення положення межі F після кожного кроку потребує знаходження ще двох векторів. Маховий вектор для кроку i^{th} , S_i переносить ногу з маховим рухом із її положення прямо перед початковим махом та прямо після кінцевого маху. Координати S_i x та y є маховою довжиною і маховою шириною відповідно. Вихідний вектор ноги i^{th} кроку, f_i^{ref} розміщує ногу з маховим рухом перед початковою маховою фазою. Необхідно встановити

проміжні точки впродовж траєкторії ноги з маховим рухом, отже, дається таке визначення:

$$\mathbf{p}^{swing} = \mathbf{s}_i, \quad (3.41)$$

де \mathbf{s}_i – вектор шляху ноги, який займає деякий шлях і починається в f_i^{ref} та закінчується в $f_i^{ref} + \mathbf{s}_i$. Необхідно визначити функцію шляху ноги, яка обчислює значення \mathbf{s}_i у різний час. Вихідне значення ноги – це поступальний рух, отже, функція шляху ноги має ту саму форму, що і графік на рис.3.7.

Траєкторія ноги з маховим рухом повинна виконувати два різних завдання:

1. Залишатися на землі протягом подвійної опорної фази перед махом.
2. Встановлювати траєкторію для ноги з маховим рухом, яка досягає певної махової довжини S_x і ширини S_y в межах певного одинарного опорного періоду TSS .

Разом із завданнями, траєкторія ноги з маховим рухом поділяється на подвійну і одинарну опорні фази. Подвійна опорна фаза змушує ногу з маховим рухом залишатися на поверхні, там де вона зупинилася, з чого виходить, що $\mathbf{p}^{Swing} = \mathbf{p}_i^{ref}$. Одинарна опорна фаза далі ділиться на три різні частини: початковий мах, середній мах і кінцевий мах. Час, витрачений на початковий і кінцевий махи, – це відсоток від тривалості кроку, – αTSS , а інший час витрачається на середній мах. Остання залежність траєкторії ноги з маховим рухом така, що нога з маховим рухом повинна досягти певної висоти над поверхнею, яка називається висотою над поверхнею c_g . Одна із можливих траєкторій ноги з маховим рухом показана на Рис. 3.7., щоб продемонструвати бажану форму кривої. Графік, зображений вище, показує вигляд збоку, а графік, поданий нижче – вигляд зверху траєкторії ноги з маховим рухом протягом одинарної опорної фази враховуючи, що маховий вектор $\mathbf{S} = [0.104 \ 0.01]^T$.

Початковий мах виникає одразу після закінчення подвійної опорної фази і триває αT_{SS} секунд. Щоб створити еліптичну форму, функція шляху ноги початкового маху відмічена параметризацією,

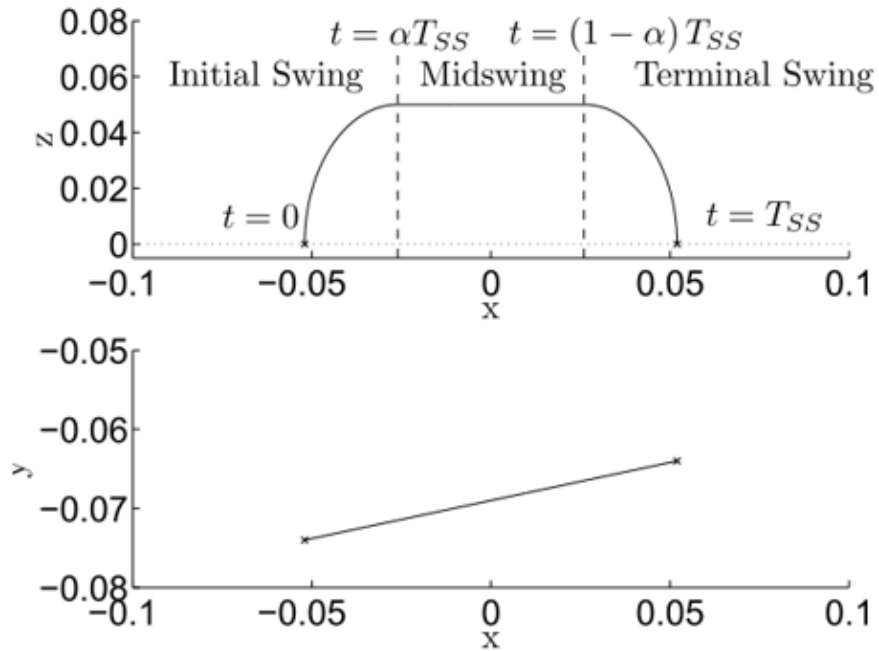


Рис. 3.7. Можлива траєкторія ноги з маховим рухом, P^{swing}

З огляду на значення параметру x_t , можна згенерувати таку функцію шляху ноги:

$$s_x(x_t) = -r \cos(x_t) + f_{i,x}^{ref} \quad (3.42)$$

$$s_y(s_x) = \eta \left(s_x - f_{i,x}^{ref} \right) + f_{i,y}^{ref} \quad (3.43)$$

$$s_z(x_t) = c_g \sin(x_t), \quad (3.44)$$

де $0 \leq x_t < \frac{\pi}{2}$ і

$$r = \alpha S_{i,x}. \quad (3.45)$$

Значення r – це довжина однієї з осей еліпса. Це створює еліпс, який зсувається вихідним значенням ноги у площині xz і лінійно наближається до махової ширини у площині xy . Значення для η можна розрахувати за допомогою простої формули кутового коефіцієнта:

$$\eta = \frac{S_{i,y}}{S_{i,x}}. \quad (3.46)$$

Використання часу, як параметра, дає результат, який легше ввести у площину xz :

$$s_x(t) = -r \cos\left(\frac{\pi}{2\alpha T_{SS}}t\right) + f_{i,x}^{ref} \quad (3.47)$$

$$s_y(s_x) = \eta(s_x - f_{i,x}^{ref}) + f_{i,y}^{ref} \quad (3.48)$$

$$s_z(t) = c_g \sin\left(\frac{\pi}{2\alpha T_{SS}}t\right), \quad (3.49)$$

де $0 \leq t < \alpha T_{SS}$. Це визначає початкову фазу маху, яка відриває ногу від поверхні, поки не досягне висоти над поверхнею c_g .

Середній мах починається після початкового маху і триває до $(1 - \alpha) T_{SS}$ секунд. Протягом цієї фази нога залишається на постійній висоті над поверхнею, рухаючись уперед у часі. Ширина кроку розраховується так само чином через лінійну інтерполяцію. Щоб наочно показати відношення між часом t і довжиною поточного кроку s_x , постійна конверсія визначається як $b = \frac{s_{i,x}}{T_{CC}}$.

Для середнього маху функція шляху ноги визначається як:

$$s_x(t) = bt + f_{i,x}^{ref} \quad (3.50)$$

$$s_y(s_x) = \eta(s_x - f_{i,x}^{ref}) + f_{i,y}^{ref} \quad (3.51)$$

$$s_z(t) = c_g, \quad (3.52)$$

де $\alpha T_{SS} \leq t < (1 - \alpha) T_{SS}$.

Кінцевий мах виникає після середнього маху і готує ногу до контакту з поверхнею. Він має форму дуже схожу з початковим махом, окрім того, що функція починається з ноги біля висоти над поверхнею і переносить ногу на

поверхню. Знову-таки, бажана форма кривої у площині xz – еліпс. Одна головна відмінність – початкова точка довжини кроку s_x повинна переноситися константою, оскільки кінцевий мах починається при $s_x(0) = f_{i,x}^{ref} + (1 - \alpha)S_{i,x}$. Починаючи з тієї самої параметризованої змінної x_t , функція шляху ноги для кінцевого маху буде такою:

$$s_x(x_t) = r \sin(x_t) + f_{i,x}^{ref} + (1 - \alpha)S_{i,x} \quad (3.53)$$

$$s_y(s_x) = \eta(s_x - f_{i,x}^{ref}) + f_{i,y}^{ref} \quad (3.54)$$

$$s_z(x_t) = c_g \cos(x_t), \quad (3.55)$$

де $x \leq x_t < \frac{\pi}{2}$ і $r = \alpha(S_{i,x} - f_{i,x}^{ref})$. Наприкінці періоду $x_t = \frac{\pi}{2}$ функція пішохідної доріжки повинна повернути остаточне значення

$$s_x = S_{i,x} + f_{i,x}^{ref} \quad (3.56)$$

$$s_y = S_{i,y} + f_{i,y}^{ref} \quad (3.57)$$

$$s_z = 0. \quad (3.58)$$

Беручи до уваги попередні рівняння, що описують функцію шляху ноги протягом кінцевого маху, всі вони дають потрібні кінцеві значення. Конвертація в час дає:

$$s_x(t) = r \sin\left(\frac{\pi}{2\alpha T}(t - \phi)\right) + f_{i,x}^{ref} + (1 - \alpha)bT_{SS} \quad (3.59)$$

$$s_y(s_x) = \eta(s_x - f_{i,x}^{ref}) + f_{i,y}^{ref} \quad (3.60)$$

$$s_z(t) = c_g \cos\left(\frac{\pi}{2\alpha T}(t - \phi)\right), \quad (3.61)$$

де $\phi = (1 - \alpha)T_{SS}$, а $\phi \leq t < T_{SS}$. За допомогою функцій шляху ноги з початкового, середнього і кінцевого махів визначено траєкторію ноги з маховим рухом, тож можемо використовувати її для обчислення кутів ноги з маховим рухом. Для застосування потрібно створити зворотну кінематику, щоб власне розрахувати ці кути.

Траєкторії центру мас і ноги з маховим рухом описуються генератором траєкторії руху з однієї точки в іншу. У зв'язку з тим, що рух АКА ділиться на кілька фаз (рис. 3.8), інтерполюючі функції, що зв'язують ці точки, також

різняться. Розроблений на основі тривимірної лінійної моделі перевернутого маятника (3D-LIPM) генератор траєкторії руху для АКА використовує різні інтерполюючі функції для опису рухів.

Першою з них є косинусний профіль швидкості, що являє собою ефективний блок планування траєкторії руху з однієї точки в іншу:

$$\dot{x}_{cvp}(t) = \lambda (1 - \cos \omega t), \quad (3.62)$$

де $\lambda = \frac{x_f - x_0}{t_f}$, а $\omega = \frac{2\pi}{t_f}$. Зрозуміло, це веде до (3.33) - (3.34) для положення і прискорення, тобто

$$x_{cvp}(t) = \lambda t - \frac{\lambda}{\omega^2} \sin \omega t + x_0 \quad (3.63)$$

$$\ddot{x}_{cvp}(t) = \lambda \omega \sin \omega t \quad (3.64)$$

тут x_0 – вихідне положення початку руху; x_f – необхідне цільове положення, а t_f – необхідна тривалість фази.

Косинусний профіль швидкості часто використовується в генераторах траєкторії руху, оскільки це гладка (безперервно диференційована), але одночасно з тим проста інтерполююча функція.

Другою інтерполюючою функцією є кубічний багаточлен. У зв'язку з тим, що функція на основі кубічного багаточлена має чотири коефіцієнти, можна задавати, крім початкового і цільового положень (x_0 і x_f відповідно), також початкову і кінцеву швидкість (\dot{x}_0 і \dot{x}_f відповідно). Це корисно для досягнення певної швидкості при роботі блоку планування траєкторії руху:

$$x = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (3.65)$$

$$\dot{x} = 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1 \quad (3.66)$$

де згадані коефіцієнти можуть бути розраховані так:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & t & t^2 & t^3 \\ 0 & 1 & t & t^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_0 \\ \dot{x}_0 \\ x_f \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Третьою інтерполюючою функцією для останнього руху при з'єднання двох точок є тривимірна лінійна модель перевернутого маятника (3D-LIPM), детально описана в додатку.

$$x(t) = x_0 \cosh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) + T_c \dot{x}_0 \sinh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) \quad (3.68)$$

$$y(t) = y_0 \cosh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) + T_c \dot{y}_0 \sinh\left(\frac{t-t_i}{T_c}\right) \quad (3.69)$$

$$T_c \equiv \sqrt{\frac{z_c}{g}} \quad (3.70)$$

3.3. Багатофазна структура переміщення антропоморфного крокуючого апарата по опорній поверхні

У цій роботі алгоритм виконання послідовності фаз траєкторії руху АКА по горизонтальній поверхні ділиться на дев'ять різних фаз, кожна з яких має свої власні функції і / або рух (рис.3.8).

Згідно з наведеним на рис.3.8 алгоритмом дев'ять різних фаз мають свої власні функції, які визначають параметри руху і дистанції переміщення. Нижче наведені часові діаграми зміни положення центру мас і стоп АКА, які відповідають цьому алгоритму.

На рис. 3.9 показано бажану траєкторію центру мас, де застосовується рівняння тривимірної лінійної моделі перевернутого маятника (3D-LIPM), коли двоногий робот робить кроки. На рис. 3.10 зображено необхідну траєкторію руху ноги з маховим рухом. Тривалість кожної фази становить одну секунду.

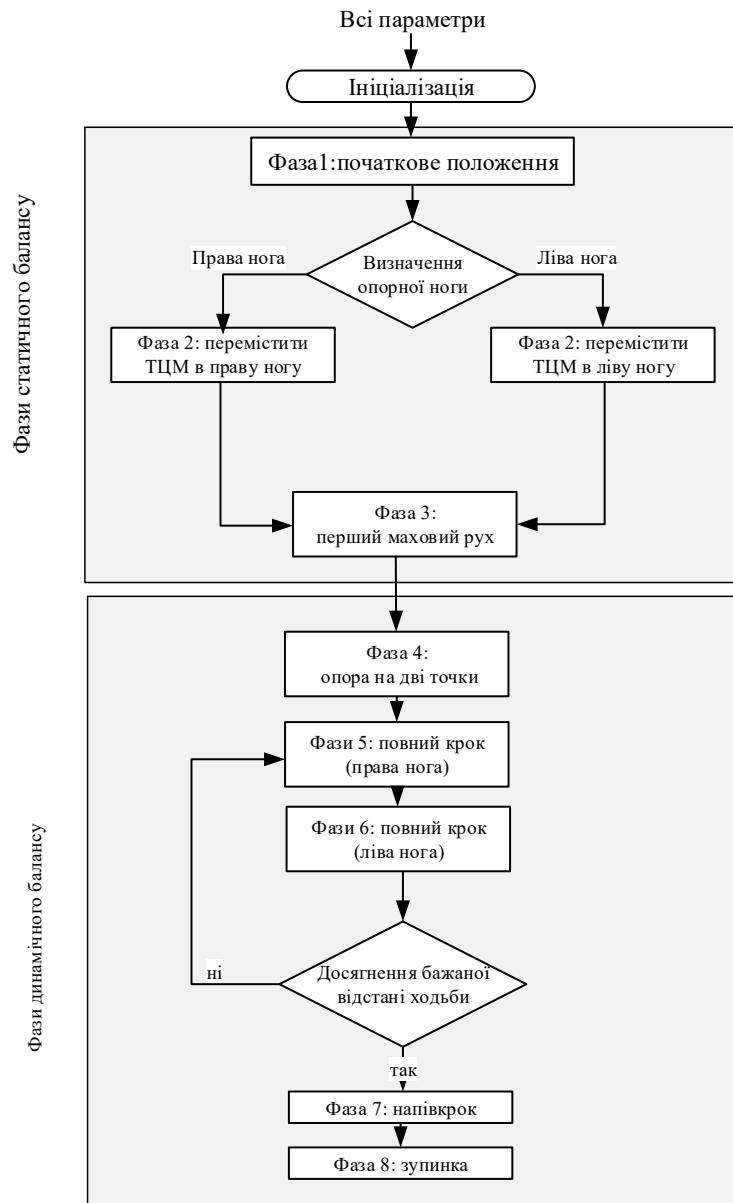


Рис.3.8. Блок-схема алгоритму зміни фаз траєкторії руху АКА

Цю величину було обрано тому, що вона дає «гладкі» результати щодо траєкторії при імітаційному моделюванні. Однак тривалість фаз може бути довільною. Під час фаз 4 і 7 їх тривалості різняться, а саме, вони дорівнюють половині тривалості інших фаз. У нашому випадку ця величина становить 0,5 с. Різні фази цих траєкторій відокремлюються чорною вертикальною пунктирною лінією на обох рисунках; також вказано опорну ногу.

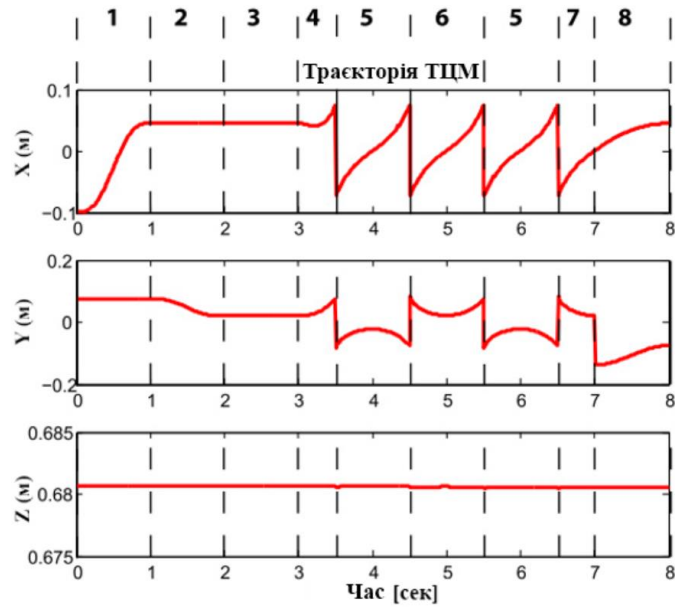


Рис. 3.9. Необхідна траєкторія ТЦМ

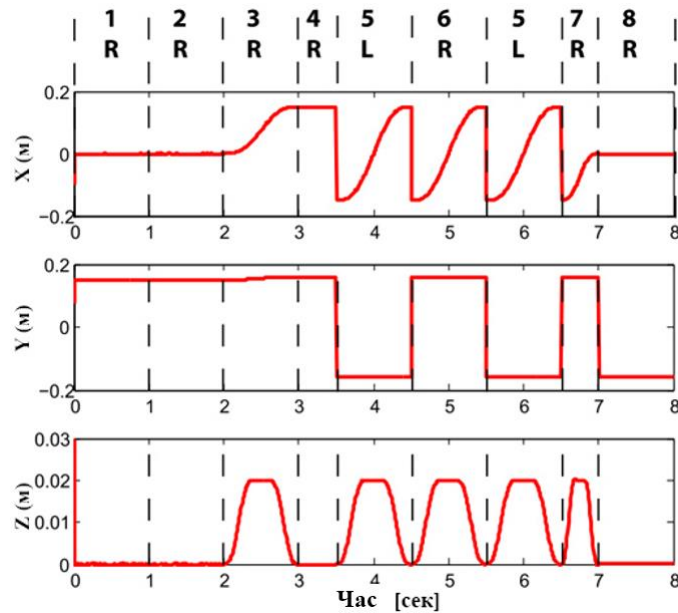


Рис.3.10. Необхідна траєкторія ніг із зазначенням опорної ноги;

R – права нога; *L* – ліва нога

Ініціалізація не є фазою, показаною на рис. 3.9 і 3.10, вона відбувається раніше. Під час ініціалізації визначаються параметри, що використовуються в ході роботи генератора траєкторії руху, а робот АКА встановлюється у своє «нульове положення». Нульове положення – це положення, у якому всі координати обнулені, як показано на рис. 3.10. Параметри, що використовуються упродовж усієї роботи генератора траєкторії, збираються разом на цій фазі, чим полегшується регулювання траєкторії. Деякі параметри

необхідно визначати на початковій стадії. Наприклад, користувач може вирішувати, яку відстань робот АКА повинен пройти з певним кроком. Це дає змогу розрахувати:

- кількість повних періодів ходу;
- додатковий півкрок;
- кількість повних періодів ходьби (кількість повних кроків, які двоногий робот повинен зробити з певною довжиною кроку);
- довжину повного кроку;
- додатковий напівкрок (параметр, який встановлюється на 0,5, якщо додатковий напівкрок необхідний для того, щоб наблизитися до необхідної дистанції, в інших випадках цей параметр встановлюється на 0).

Фаза 1: початкове положення

Блок-схема фази початкового положення наведена на рис.3.11.

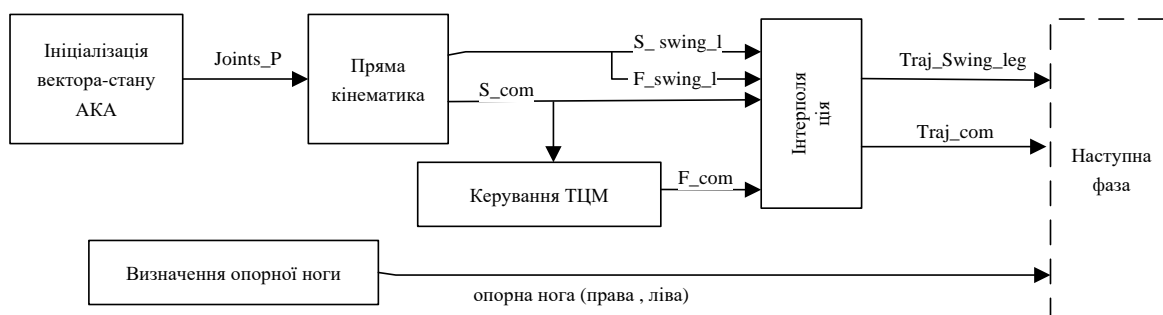


Рис. 3.11. Блок-схема фази початкового положення

Із використанням положення (координат) шарнірів і прямого кінематичного алгоритму положення центру мас і ноги з маховим рухом розраховуються в нульовому положенні. Це положення є початковим положенням центру мас і ноги для даної фази. Положення центру мас і ноги з маховим рухом даються щодо базової деталі робота з відображенням у просторі мінімального типу. Для ідентифікації опорної ноги значення «1» задається у тому разі, якщо нею є права, і «0», якщо опорною ногою є ліва (рис. 3.12).

Зрозуміло, необхідне кінцеве положення задається в тих же координатах, що і для початкового положення. Це робиться упродовж всього часу роботи генератора траєкторії руху. У зв'язку з тим, що це стосується переміщення в

початкове положення, коли робот переходить у статично стійке положення з опорою на дві точки, нога з маховим рухом не рухається, а залишається в тому самому положенні по осі X , що і опорна нога. Інакше кажучи, кінцеве положення ноги з маховим рухом не змінюється щодо початкового положення.

Кінцеве положення центру мас, однак, відрізняється від його початкового положення і орієнтації. Необхідне положення центру мас знаходиться посередині опорного багатокутника, коли АКА знаходиться в його найбільш урівноваженому положенні. Положення і орієнтацію центру мас можна регулювати, використовуючи такі параметри:

z_{com}

Target_com_pos_x

Target_com_pos_y_inclination.

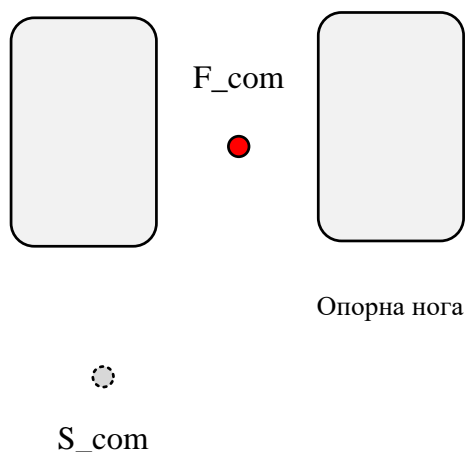


Рис. 3.12. Початкове і кінцеве положення центру мас

Висота центру мас – це максимальна висота до того, як вироджені кінематичні зміни виникають під час переміщення (ходьби). Цей параметр позначається символом z_{com} і оптимізується експериментальним шляхом – методом спроб і помилок.

Параметр Target_com_pos_x переміщує центр мас уперед або назад; шляхом налаштування цим параметром можна регулювати рівновагу двоногого робота на початку процедури.

Параметр $\text{Target_com_pos_y_inclination}$ нахиляє тулуб уперед або назад; зазвичай, це нульове положення, оскільки тулуб людини під час ходьби також знаходиться у вертикальному положенні.

Для того, щоб зробити переміщення з початкового положення в кінцеве, косинусний профіль швидкості використовується як для центру мас, так і для ноги з маховим рухом.

Фаза 2: переміщення центру мас на визначену опорну (стійку) ногу

Блок-схема фази 2 наведена на рис.3.13.

Якщо права нога обрана як опорна (стійка), наступна фаза переміщує центр мас у положення над правою ногою для того, щоб підготувати її до першого кроку. Початкове положення даної фази є кінцевим положенням попередньої фази; воно знову визначається прямим кінематичним алгоритмом. Під час цієї фази тільки центр мас переміщується з серединного положення в положення над правою ногою, і тому кінцеве положення махової ноги знову збігається з початковим положенням. Кінцеве положення центру мас (рис. 3.11) може регулюватися такими параметрами:

Target_com_pos_y

$\text{Target_com_pos_x_inclination}$.

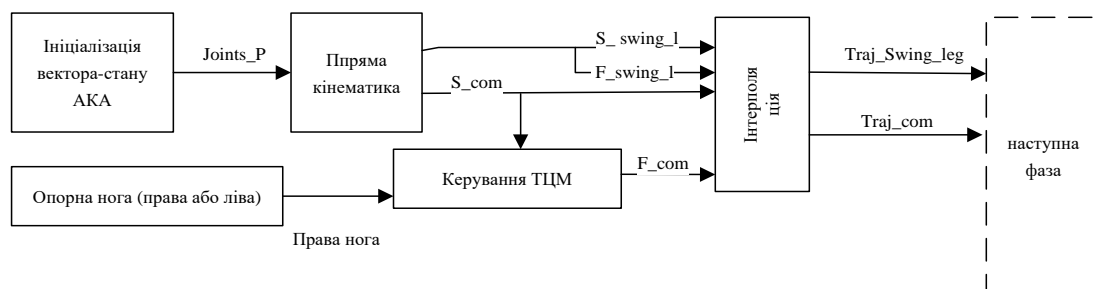


Рис. 3.13. Блок-схема фази 2

Інтерполюючою функцією переміщення як центру мас, так і ноги з маховим рухом знову стає косинусний профіль швидкості.

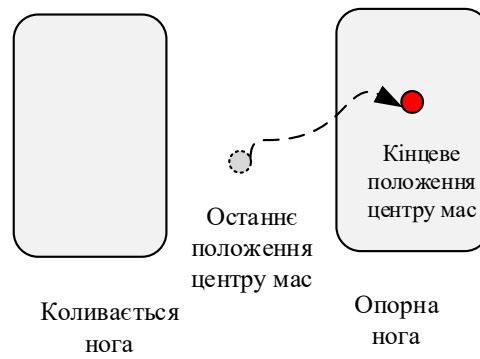


Рис. 3.14. Кінцеве положення центру мас під час фази 2

Фаза 3: перший маховий рух

Блок-схема фази 2 наведена на рис. 3.15.

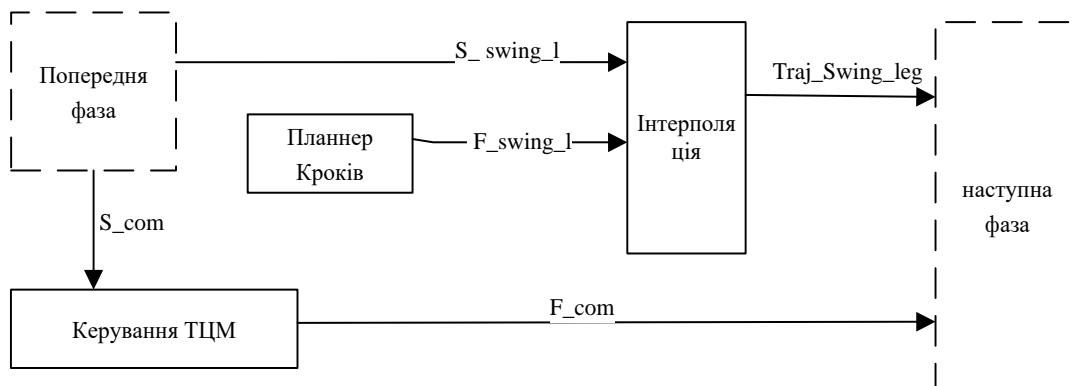


Рис. 3.15. Фаза першого махового руху

Фаза першого махового руху планує стійкий рух ноги для того, щоб зробити перший крок з півкроковою довжиною (рис. 3.16).

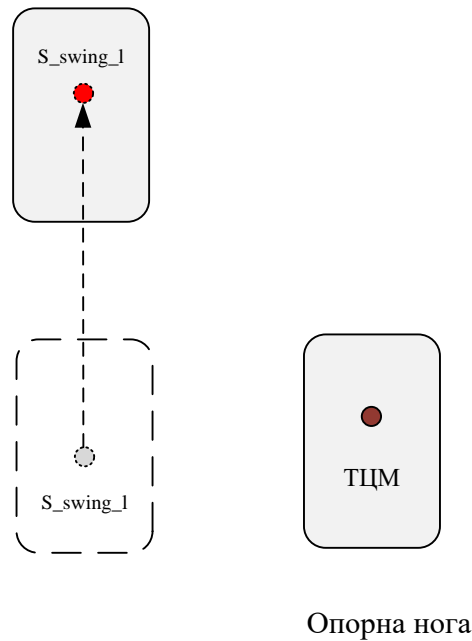


Рис. 3.16. Кінцеве положення ноги з маховим рухом під час фази 3

Рух починається з положення, у якому центр мас знаходиться над правою ногою, і закінчується за півкроку від лівої ноги. Кінцеве положення центру мас все ще знаходиться над правою ногою, але його можна регулювати вздовж осей Y і Z , використовуючи параметри $Target_com_pos_y$ і z_com_lift відповідно. Параметр $Target_com_pos_y$ також показано на рис. 3.17, (b); параметр z_com_lift являє собою різницю у висоті центру мас щодо до його початкового стану. Кінцева орієнтація центру мас не змінюється по осі X ; по осі Y її можна регулювати параметром $Target_com_pos_y_inclination$ (рис. 3.17, (a)), а по осі Z – параметром Z_rot . Графічно параметр Z_rot показано (рис. 3.17, (c)).

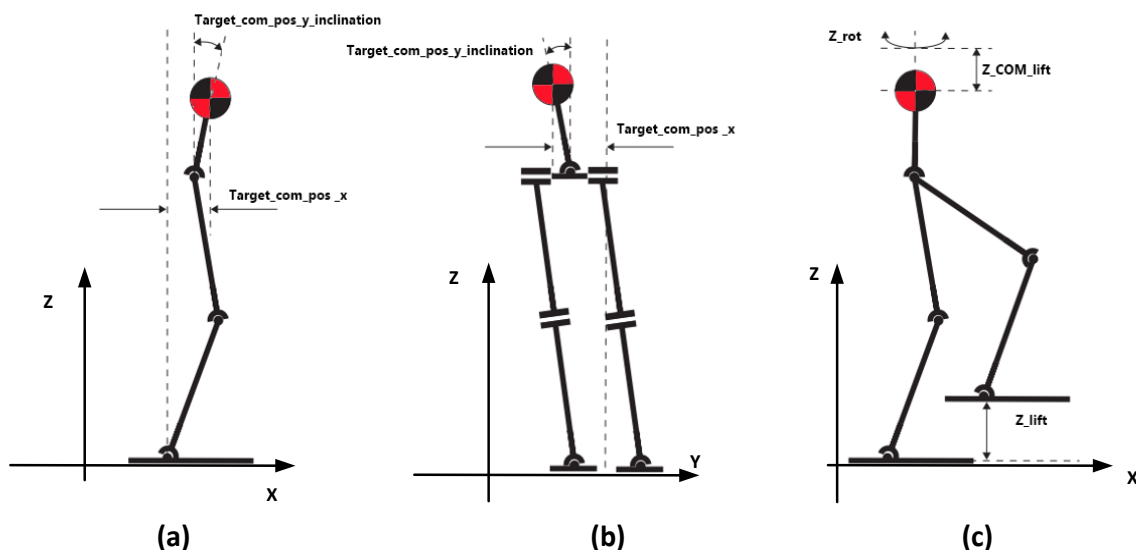


Рис. 3.17. Визначення параметрів для різних фаз ходьби:

a — початкова і кінцева пози; *b* — поза з опорою на дві точки; *c* — поза з опорою на одну точку

Кінцеве положення ноги з маховим рухом знаходиться на відстані півкроку в напрямку зростання по осі X , але залишається незмінним по осі Y . Інакше кажучи, нога переміщується по прямій лінії вперед, використовуючи косинусний профіль швидкості. Кінцеве положення ноги в напрямку зростання по осі Z вказує не на кінцеве положення ноги по осі Z , а на висоту, на яку нога піднята для того, щоб зробити крок.

Дане крокове переміщення в сагітальній площині генерується трьома кубічними кривими Безьє. Це проілюстровано на рис. 3.18. Одна крива призначена для підймання ноги на необхідну висоту, друга — для утримання ноги на необхідній висоті, третя — для опускання ноги на землю. Висота кроку необхідного підймання ноги, зображеного на рис. 3.18, становить 0,02 м. Змінна z_lift вказує висоту; її можна обирати заздалегіть. Тривалість усієї фази становить одну секунду, про що вже згадувалося раніше. Ця тривалість ділиться на три тимчасових інтервали для кожної з кривих Безьє.

На рис. 3.18 перша крива дорівнює за часом 0,2 тривалості фази (в даному випадку 0,2 с). Остання крива є дзеркальним відображенням першої кривої і тому також триває протягом 0,2 часу тривалості фази. Отримане значення часу належить до «кривої» посередині.

Тривалість підймання ноги з наступним опусканням її на землю, тобто перша і третя криві, повинна становити менше 0,5 тривалості фази; в іншому випадку траєкторія стане переривною. Є можливість пришвидшувати підймання знижуючи час підймання. Однак це призведе до підвищення швидкості шарнірів.

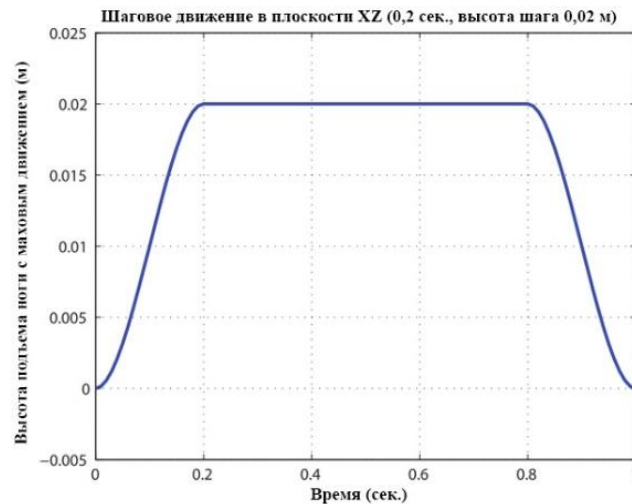


Рис. 3.18. Траєкторія махового руху ноги з висотою кроку 0,02 м і тривалістю підймання 0,2 с

Фаза 4: опора на дві точки

Блок-схема фази опори на дві точки наведена на рис. 3.19.

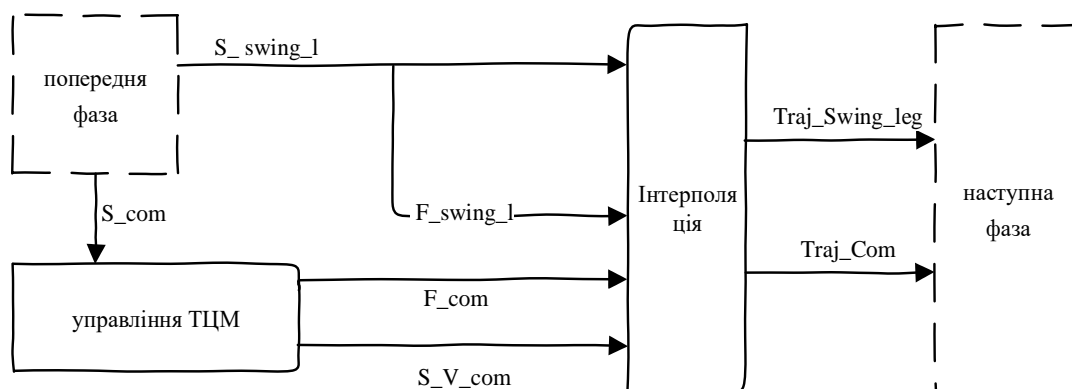


Рис. 3.19. Блок-схема фази опори на дві точки

Після першого махового руху ноги, яка була статично врівноваженою, центр маси перебуває над правою ногою. З цього положення маятниковий хід не може бути ініційований, оскільки центру мас необхідна початкова швидкість

для того, щоб почати рух на базі динамічної моделі перевернутого маятника. Тому необхідна ще одна фаза, яку називають фазою опори на дві точки (рис. 3.20). Ця фаза переміщує центр мас у середню частину опорного багатогранника і задає йому початкову швидкість. Про початкові швидкості йдеться в цьому розділі. На цій фазі нога з маховим рухом не рухається, тому що вона вже знаходиться на відстані півкроку від опорної ноги, що достатньо для маятникового ходу.

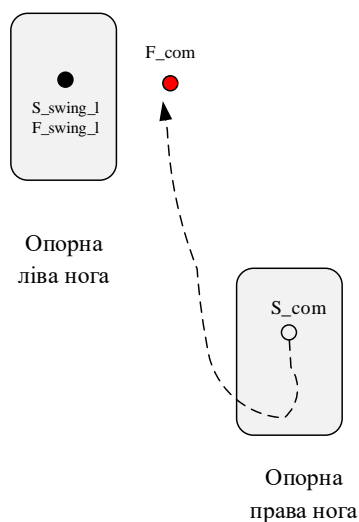


Рис. 3.20. Кінцеве положення центру мас

Кінцеве положення даної фази знаходиться там, де центр мас розташовується за півкроку попереду по осі X у напрямку її зростання і позаду, між двома ногами, по осі Y (рис. 3.21). По осі Y це зміщення розташовано на половину відстані між двома ногами. Крім того, тулуб встановлюється вертикально по осі Y ; нахил по осі X встановлюється на нуль. Однак нога не переміщується; косинусний профіль швидкості використовується для опису положення ноги під час фази. Центр мас, однак, пришвидшується і досягає певної початкової швидкості. Для цього руху використовується інтерполююча функція кубічного багаточлена. З використанням кубічного багаточлена час фази встановлюється на 0,5 с. У іншому випадку багаточлен визначає рух, який спрямовується спочатку назад, потім знову вперед, щоб досягти необхідного

положення і необхідної швидкості. Такий рух надзвичайно незручний, тому що робот АК втрачає рівновагу. Цей ефект мінімізується шляхом встановлення тривалості фази на 0,5 секунди.

Фази 5 і 6: повний крок

Після завершення підготовчих фаз, які виводять робот АК у правильне положення і визначають потрібну швидкість, може починатися ходьба на базі тривимірної лінійної моделі перевернутого маятника (3D-LIPM). Рухи є дзеркальними відображеннями один одного (рис. 3.21). Як зазначається в цьому розділі, «1» задається, якщо права нога є опорною (стійкою), і «0» – якщо опорною (стійкою) ногою є ліва нога.

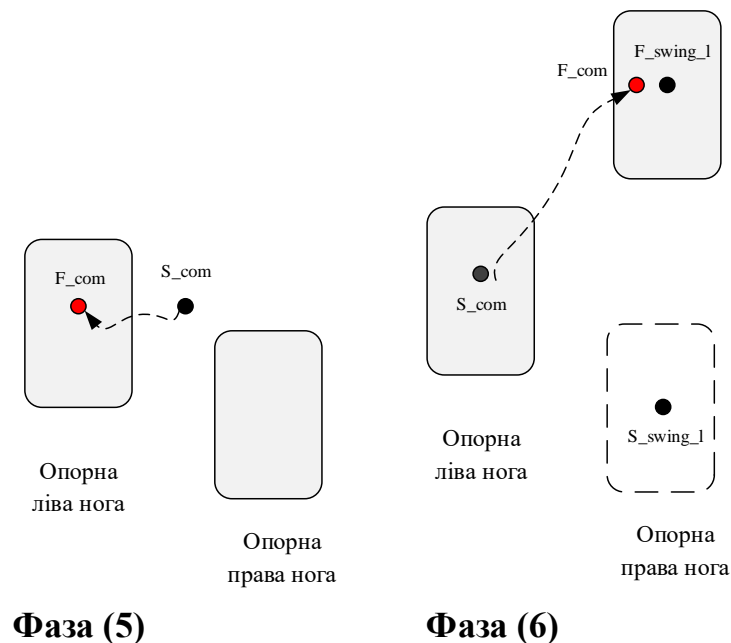


Рис. 3.21. Фаза 5 і фаза 6

Початкове положення центру мас і ноги з маховим рухом є кінцевим положенням фази опори на дві точки. Необхідне кінцеве положення для центру мас знаходиться за півкроку попереду по осі X ; воно позначене як D_{CoM} . По осі Y центр мас переміщається з одного боку на інший під час ходьби. Переміщення центру мас в напрямку X і Y визначаються рівняннями тривимірної

лінійної моделі перевернутого маятника. У напрямку Z він знаходиться на постійній висоті.

Нога з маховим рухом виробляє такий самий рух, що і при першому кроці. Необхідне положення по осі X знаходиться за півкроку попереду; необхідне положення по осі Y не змінюється, а рух по осі Z – перемикається, як проілюстровано на рис. 3.21.

Під час ходьби один повний крок виконується одним повним кроком лівою ногою, за яким слідує крок правою.

Кількість повних кроків, які необхідні для проходження необхідної відстані, визначає, скільки разів описаний цикл буде повторений.

Фаза 7: напівкрок

Для того, щоб налаштувати якнайближче до необхідної дистанції ходьби, заданої при ініціалізації, програмується також і напівкрок. Цей рух аналогічний повному кроку, але тільки з половиною дистанції по осі X і половиною часу фази повного кроку (рис. 3.22).

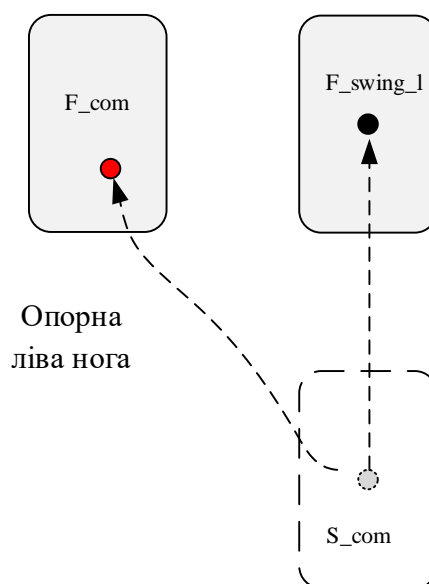


Рис. 3.22. Фаза 7

На рис. 3.22 показано тільки напівкрок лівою ногою. Однак напівкрок може виконуватися з будь-якої ноги.

Фаза 8: зупинка

Остання фаза починається після завершення всіх кроків і досягнення необхідної дистанції ходьби. Вона призначена для повернення в таку саму статично стійку позу, як і в початковому положенні. Для переходу з початкового положення в кінцеве використовується косинусна інтерполяція швидкості.

Висновки до розділу 3

1. Здійснено формалізацію руху перевернутого маятника в 3D-просторі з метою її використання для автоматичного генерування руху під час ходи АКА. Звідси, реалізовано планування в реальному часі траєкторії стійкого руху АКА на основі ТНМ і 3D-LIPM моделі.

2. Розроблено методику синтезу опорних траєкторій на основі багатофазної структури покрокового переміщення АКА з урахуванням локомоторних синергій взаємодії стоп АКА з довільною опорною поверхнею, що дозволяє уникнути неоднозначності під час розв'язання оберненої задачі кінематики.

Основні результати розділу були опубліковані в [153],[154],[156].

Список використаних джерел до розділу 3: [6], [153–157].

Розділ 4

КЕРУВАННЯ РУХОМ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА НА ДОВІЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ

4.1. Загальна стратегія керування рівновагою антропоморфного крокуючого апарата

Метою системи керування є відстеження траєкторії, яка забезпечує статичну збалансовану ходу. Траєкторія здебільшого включає в себе дві частини: одна частина є траєкторією кожної кінематичної пари, котра гарантує, що робот іде вперед, друга – траєкторією точки нульового моменту, яка гарантує, що робот перебуває в рівновазі під час руху. Загальна система керування має дві контрольні мети. Першою є контроль положення робота таким чином, щоб він не відхилявся від траєкторії, іншою – гарантування постійної його рівноваги. Регулювання пози можна спроектувати різними шляхами, одним з яких є використання абсолютного положення робота в системі декартових координат, а потім – регулювання шарнірних кутів робота для отримання необхідного абсолютного положення. Це переваги, що дозволяють забезпечити перманентну правильну позу робота, і тим самим переконатися, що він знаходиться в рівновазі. Іншою стратегією керування положенням є використання кутової траєкторії кожного шарніра, що означає відсутність контролю над абсолютним положенням робота. Такий підхід є більш простим і не потребує спеціального вимірювального обладнання, що робить його придатним для впровадження АКА. Використання лише кутових траєкторій вимагає додаткового зовнішнього контуру регулювання для забезпечення балансу, оскільки відхилення і неточності моделі можуть призвести до порушення рівноваги. Отже, стратегія керування, проілюстрована на Рис. 4.1, буде використовуватися там, де два контури регулювання контролюють положення і рівновагу робота відповідно.

опорна і, наприклад, викликана тертям – швидкість спочатку набуває певного відхилення, а потім досягає опорного значення. Похибка спричиняє постійну помилку в положенні, як показано на рис. 4.2.

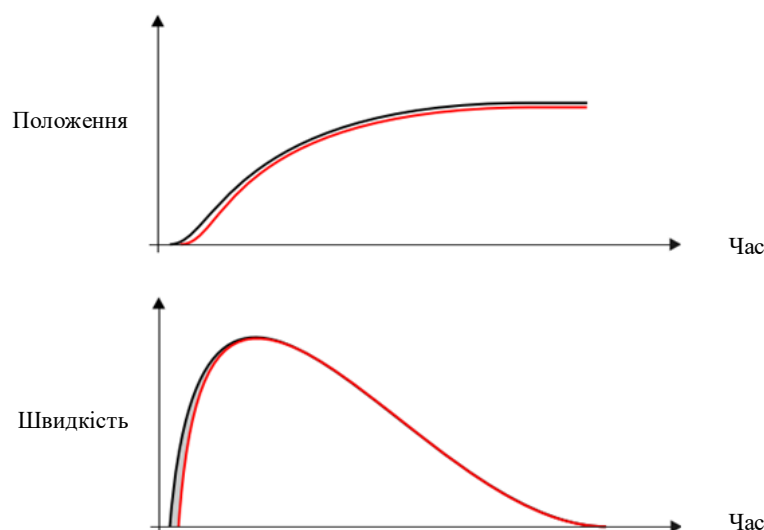


Рис. 4.2. Ілюстрація результатів, коли швидкість використано як опорну (графік чорного кольору ілюструє опорне значення, а червоного – отримане)

Оскільки досить важливо, щоб робот зберігав положення, задане траєкторією під час циклу ходи, кутове положення використовується як опорний сигнал для регулятора пози [153]. Незважаючи на те, що вищевказане не було цілком розглянуто в даній науковій роботі, це може бути корисним для наступних досліджень, щоб вивчати можливість використання положень і швидкості.

На рис. 4.3 подано блок-схему планування траєкторії, керування рухом та стійкістю АКА на нерівній поверхні, кожен наступний модуль аналізується та описується окремо. Прямая і зворотна кінематика, показана на рис. 4.3 (А3), детально розглядалась у розділі 2.

Планувальник кроків забезпечує передавання даних між точкою нульового моменту регулятора ходи та динамікою моделі «візок–стіл», рис. 4.3 (А0). Тут зберігаються всі покрокові дані, а також відомо де саме реалізована черговість кроків. Після завершення поточного кроку, «контролер» кроків започатковує новий крок, використовуючи низку параметрів, таких як відстань

між кроками та їх періодичність. Цей крок додається у кінець черги, але траєкторію ТЦМ для цього кроку не можна обчислити, оскільки перед ним відсутні передбачувані кроки.

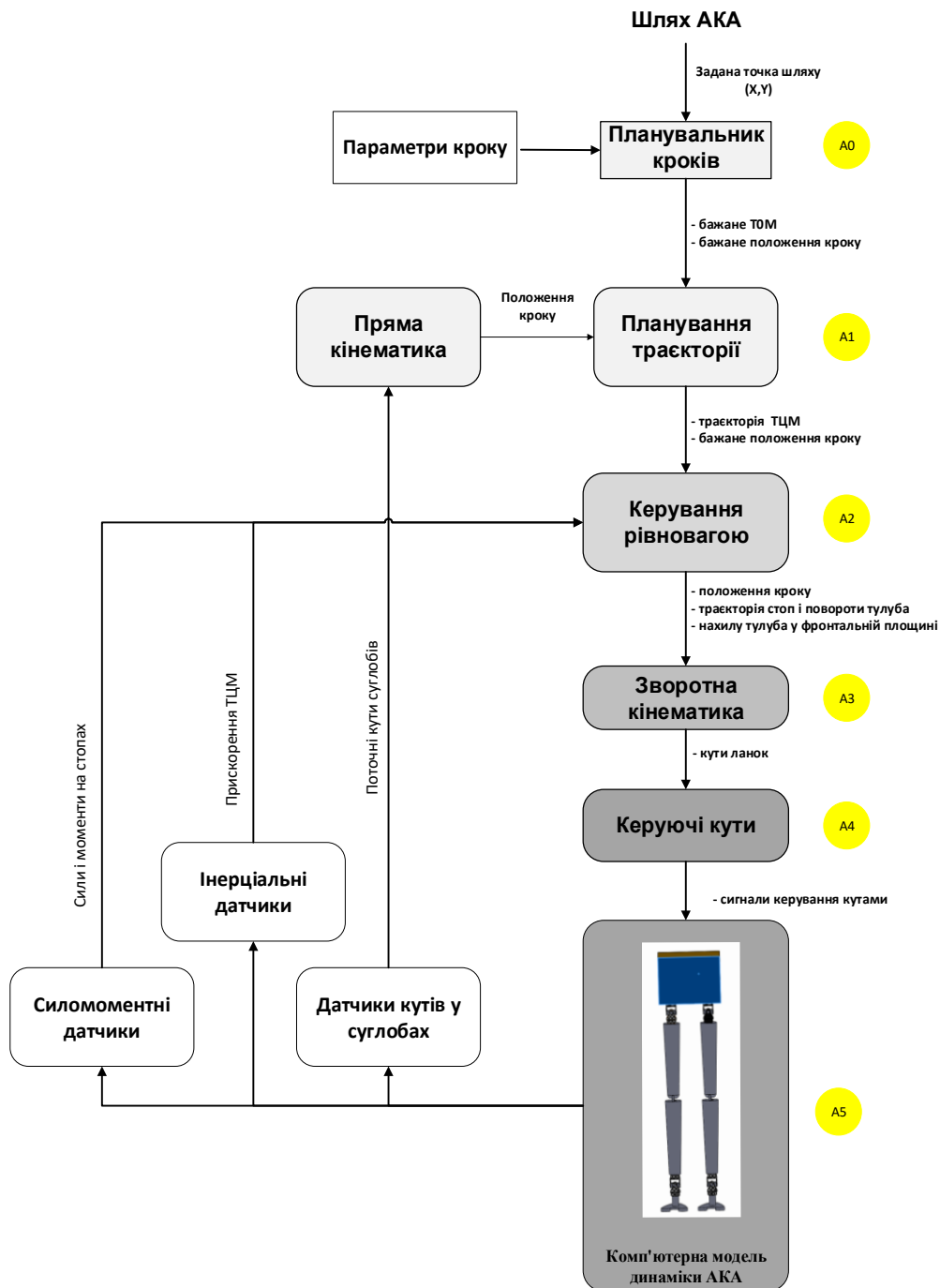


Рис. 4.3. Блок-схема алгоритму керування рухом АКА по нерівній поверхні

У черзі є три показчики, які відображають набір даних для одного кроку, зображений у вигляді рядка на рис. 4.4. Перший показчик, який називається

«поточний», накопичує його даними поточного кроку. Другий показник, «підрахунковий», накопичує його інформацією на наступний крок, для якого потрібно обчислити траєкторію центру моменту. Останній показник, «остаточний», вказує на останній крок у черзі. Усі вони спрацьовують у відповідний час для забезпечення структури даних черги.

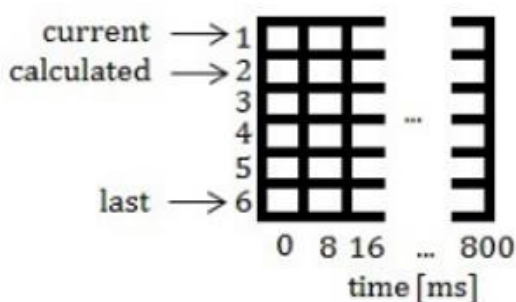


Рис. 4.4. Представлення черги кроків у регуляторі кроків

Динамічний відділ контролера обчислює траєкторію ТЦМ з урахуванням наступного кроку, який потрібно обчислити. Після того, як він обчислений, періодичність кроків повинна коригуватися контролером кроків, щоб визначити, як поділити період кроку на фазу спирання на дві точки TDS та фазу спирання на одну точку TSS. Ідея полягає в тому, що коли ТНМ потрапляє на опорний підніжник, АКА може залишити подвійну фазу опори, а коли Т0Ь покидає багатокутник опорної стопи, починається подвійна фаза опори і закінчується одинична фаза опори. Таким чином, різницю між розташуванням *F*-профілю та ТНМ можна використовувати для визначення місця розташування ТНМ відносно багатокутника опори стопи.

Основне завдання *ТНМ регулятора ходи* – завершити поточний крок. Основними даними, пов'язаними з кроком, є його довжина та ширина, траєкторія центру моменту, траєкторія повороту ступні та період кроку (період спирання на дві чи на одну точку). Ці кроки реалізуються у структурі даних, що виконується як черга. ТНМ регулятора ходи виконує поточний крок, обчислюючи кути за допомогою зворотної кінематики, аж поки крок не

завершиться. Коли крок завершений, регулятор ходи ТНМ посилає запит на наступний крок до контролера кроків. Для забезпечення одного циклу ходи регулятор повинен враховувати різні види фаз, які детально обговорювались у розділі 3.

Дві основні частини регулятора складаються з:

- відстеження траєкторії ТЦМ за допомогою опорної ноги;
- слідування траєкторії розкачування за допомогою поворотної ноги.

Завдяки цим двом траєкторіям та додатковим обмеженням, зворотна кінематика може бути використана для обчислення бажаних кутів. Такими обмеженнями є:

1. Опорна нога і тулуб поводять себе як перевернутий маятник різної довжини.
2. Сполучення тулуба збігається з нормаллю N , або паралельно землі.
3. Поворотна нога також збігається з нормаллю N , або паралельно землі.

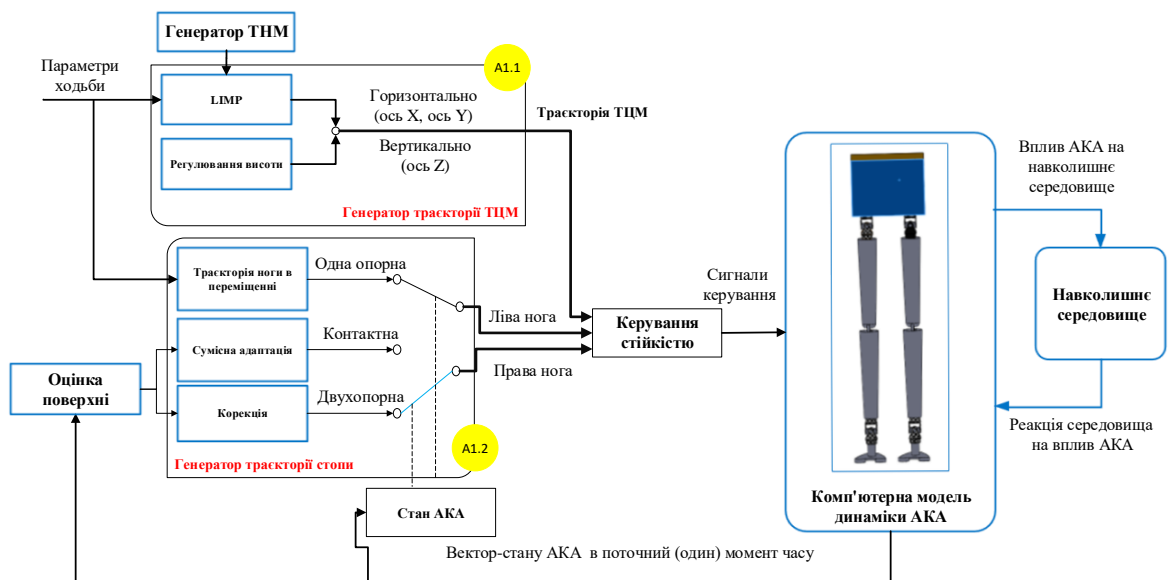


Рис. 4.5. (A1) Схема генерації траєкторії ТЦМ (A1.1) та траєкторії поворотної ноги (A1.2) для регулятора динамічної стабільності

На Рис. 4.5 показано схему керування траєкторією ТЦМ і стопами АКА окремих компонентів регулятора. Є також регулятори згинання коліна та

нахилу тулуба для безпосереднього керування згинанням опорного коліна та нахилом тіла відповідно. Ці регулятори мають вирішальне значення при переході між кроками для забезпечення циклічного режиму. Нехтуючи регуляторами згинання коліна, за допомогою траєкторії ТЦМ та обмеження 1 і 2 можна визначити усі опорні кути як для подвійних опорних, так і для одноопорних фаз. Завдяки цим кутам, траєкторії поворотної стопи та обмеженню 3, кути повороту ноги тепер можна повністю визначити засобами зворотної кінематики.

Як було показано в розділі 3, крокуючий робот може бути представлений як 3D-лінійний перевернутий маятник. Використаємо рівняння для 3D-LIPM і моделі «візок–стіл»:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \frac{g}{z_c} (x - p_x) \\ \ddot{y} &= \frac{g}{z_c} (y - p_y)\end{aligned}\tag{4.1}$$

Перетворимо рівняння, щоб ТНМ стала вихідною:

$$p_x = x - \frac{z_c}{g} \ddot{x}\tag{4.2}$$

$$p_y = y - \frac{z_{CoM}}{g} \ddot{y}\tag{4.3}$$

де g – сила тяжіння, $g = 9,8$ (константа); Z_c – центр маси по висоті (константа) $Z_c = 0,18\text{ m}$. Варто також зазначити, що дискретизації, де Δt – інтервал T_s , $\Delta t = 1\text{e} - 2$

Тепер можна використати підхід, запропонований Каджита [158], для розроблення генератора послідовностей. По-перше, потрібно отримати представлення в просторі станів, де ТНМ – вихід; визначаємо вхід u як часову похідну від горизонтального прискорення ТЦМ:

$$u_x \equiv \frac{d}{dt} \ddot{x}\tag{4.4}$$

Отримуємо таку динамічну систему

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{com} \\ \ddot{x}_{com} \\ \ddot{x}_{com} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{com} \\ \dot{x}_{com} \\ \ddot{x}_{com} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x, \quad \begin{bmatrix} \dot{y}_{com} \\ \ddot{y}_{com} \\ \ddot{y}_{com} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{com} \\ \dot{y}_{com} \\ \ddot{y}_{com} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_y, \quad (4.5)$$

$$x_{zmp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{z_{com}}{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{com} \\ \dot{x}_{com} \\ \ddot{x}_{com} \end{bmatrix}, \quad y_{zmp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{z_{com}}{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{com} \\ \dot{y}_{com} \\ \ddot{y}_{com} \end{bmatrix}.$$

де u_x – стрибок (похідна прискорення за часом). Завдання полягає в побудові системи керування, зображений на Рис. 4.6, яка б формувала траєкторію руху центру мас у такий спосіб, щоб ТНМ системи p_x відслідковувала бажану ТНМ p^{ref} .

Далі розглянемо рух лише в сагітальній площині, маючи на увазі, що для руху у фронтальній площині всі обрахунки аналогічні.

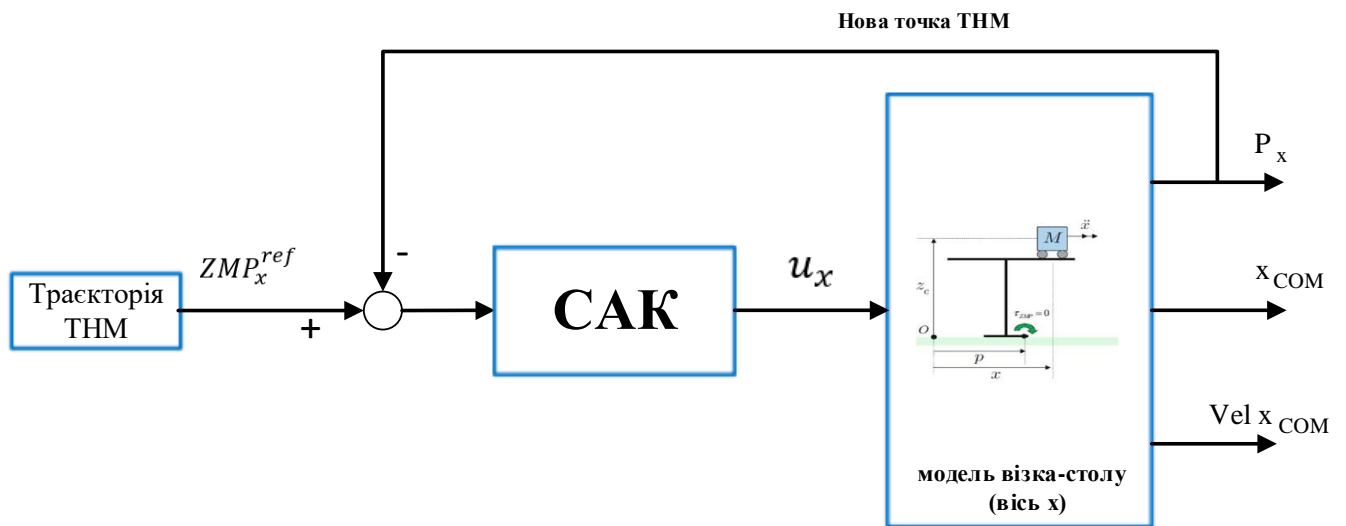


Рис. 4.6. Загальний вигляд системи керування станом ТНМ робота

Однак класичні схеми керування, такі як ПД [103] або лінійно-квадратичний регулятор [103], мають недолік, який можна побачити на Рис. 4.7 ліворуч. Під час крокування, за стрибкоподібною зміни бажаного положення ТНМ p^{ref} з центру однієї стопи в центр іншої, класичний регулятор буде опрацьовувати із запізненням, оскільки центр мас робота x_{com} почне рухатися лише після стрибка p^{ref} . Відповідно, необхідно впровадити такий регулятор,

який би передбачав майбутні значення p^{ref} і розпочинав би рух центру мас раніше, як показано на Рис. 4.7 праворуч.

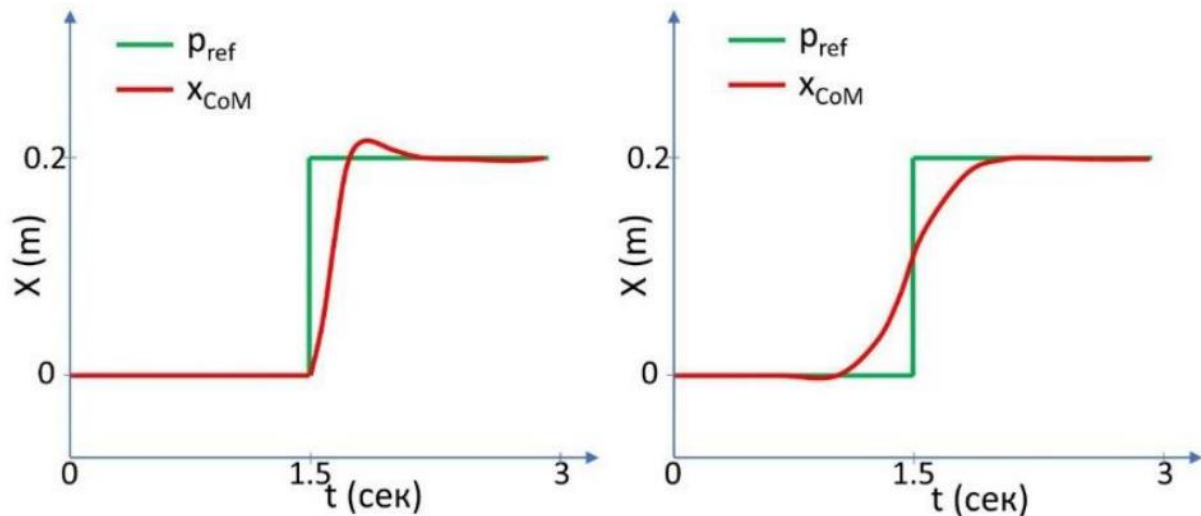


Рис. 4.7. Графік траєкторії центру мас при стрибкоподібному русі бажаного положення ТНМ. Використання класичних регуляторів (ліворуч) і використання регулятора з прогнозуванням (праворуч)

4.2. Використання MPC підходу для забезпечення сталого руху антропоморфного крокуючого апарата

Систему керування, яка використовує майбутні значення заданого сигналу, вперше було запропоновано і отримало назву «Model Predictive Control»-MPC) [100]. У праці [104] ця сама концепція була застосована до лінійно-квадратичного регулятора. Дискретний оптимальний лінійно-квадратичний регулятор з прогнозуванням був запропонований у [159], а в [99] – розширений Катаямою для систем з кількома вхідними та вихідними сигналами.

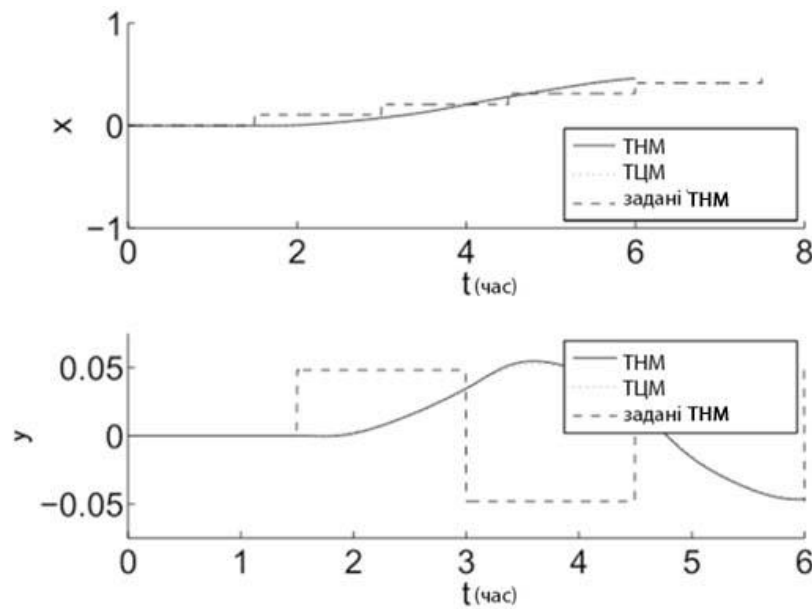


Рис. 4.8. Графік траєкторії ТЦМ і ТМ «візок–стіл» з використанням регулятора MPC

У даній роботі MPC був адаптований для вирішення в аналітичному вигляді центру моменту, яке могло б запобігти розбіжності LIPM [160]. Ривок (перша похідна прискорення) ТЦМ був використаний як вхід. Розрахунок безперервного стану наведено в рівняннях (4.5)

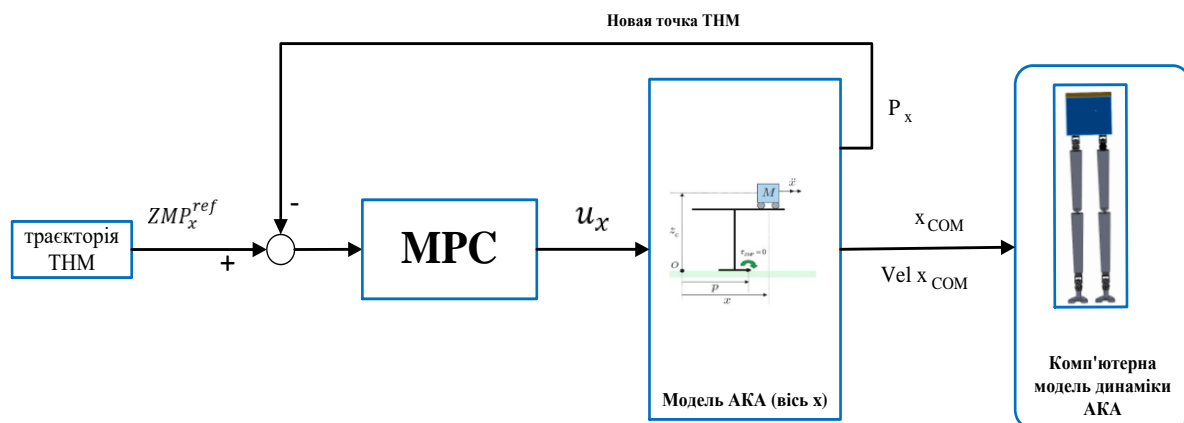


Рис. 4.9. Схема керування роботом з використанням лінійно-квадратичного регулятора з прогнозуванням (MPC) та вимірювання розташування ТМ у петлі зворотного зв'язку

де u_x – ривок x , а вихід p_x – положення ТНМ в x напрямку. Нехай T буде інтервалом дискретизації. Визначаючи $x(t) = x(kT) = x_k$, $\dot{x}(t) = \dot{x}(kT) = \dot{x}_k$, $\ddot{x}(t) = \ddot{x}(kT) = \ddot{x}_k$, отримаємо:

$$\dot{x}_k = \frac{x_{k+1} - x_k}{T} \quad (4.6)$$

$$\ddot{x}_k = \frac{\dot{x}_{k+1} - \dot{x}_k}{T} \quad (4.7)$$

тобто, дискретічне рівняння стану можна записати так

$$\hat{\dot{x}}_{k+1} = A \hat{x}_k + B u_k \quad (4.8)$$

$$p_{x,k} = [1 \ 0 \ -z_c/g] \hat{x}_k \quad (4.9)$$

де $u_k = \ddot{x}_k$, $\hat{x}_k = [x_k \ \dot{x}_k \ \ddot{x}_k]^T$; $p_{x,k}$ – положення ТНМ в інтервалі дискретизації kT

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$B = \begin{bmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix}$$

Задана послідовність опорної траєкторії ТНМ ${}^{ref}P_{x,k+1} = [{}^{ref}P_{x,k+1}, {}^{ref}P_{x,k+2}, \dots, {}^{ref}P_{x,k+N}]^T$. Припустимо, що відповідний вхід $U_k = [\ddot{x}_k, \ddot{x}_{k+1}, \dots, \ddot{x}_{k+N}]^T$.

Через N ітерацію кроку з рівнянь (4.8) та (4.9) утворилося нове рівняння стану як тотожність (4.11)

$$\begin{bmatrix} p_{x,k+1} \\ \vdots \\ p_{x,k+N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} - \frac{z_c}{g} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & NT & \frac{N^2 T^2}{2} - \frac{z_c}{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \\ \ddot{x}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T^3/6 - Tz_c/g & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ (1 + 3N + 3N^2)T^3/6 - Tz_c/g & \dots & T^3/6 - Tz_c/g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_k \\ \vdots \\ \ddot{x}_{k+N-1} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

а рівняння (4.11) подане в компактній формі виразом (4.12)

$$\mathbf{P}_{x,k+1} = M_x \hat{x}_k + M_u U_k \quad (4.12)$$

де

$$\mathbf{P}_{x,k+1} = \begin{bmatrix} p_{x,k+1} \\ \vdots \\ p_{x,k+N} \end{bmatrix}$$

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 - z_c/g \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & NT & N^2 T^2/2 - z_c/g \end{bmatrix}_{N \times 3} \quad (4.13)$$

$$M_u = \begin{bmatrix} T^3/6 - Tz_c/g & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ (1 + 3N + 3N^2)T^3/6 - Tz_c/g & \dots & T^3/6 - Tz_c/g \end{bmatrix}_{N \times N}$$

Довжина $\mathbf{P}_{x,k+1} \in N$ також передбачувана горизонталь.

Для того, щоб представити рівняння (4.12) як квадратичне, задається цільова функція:

$$\min_{U_k} \frac{1}{2} Q (\mathbf{P}_{x,i+1} - {}^{ref}_0 \mathbf{P}_{x,i+1})^2 + \frac{1}{2} R U_k^2 \quad (4.14)$$

за умови рівняння (4.12). R та Q є вагою для похибок опорного відстеження та мінімум \ddot{x}_k відповідно. Згідно з працею [41], оптимальним розв'язком для ривка $x_k \in$

$$\ddot{x}_k = -e^T \left(\left(M_u^T M_u + \frac{R}{Q} I \right)^{-1} M_u^T (M_x \hat{x}_k - {}^{ref}_0 \mathbf{P}_{x,k+1}) \right) \quad (4.15)$$

де $e = [1, 0, \dots, 0]^T_{1 \times N}$. $I \in N$ на N матриці тотожності. Рівняння (4.15) представляє оптимальний вхід \ddot{x}_k при k^{th} інтервалі дискретизації кроку. Цей оптимальний вхід ґрунтується на просторовому стані моделі, що прогнозується для майбутніх N кроків у часі.

Базову траєкторію ТЦМ та ТНМ у сагітальній та фронтальній площинах показано на Рис. 4.10, a та b відповідно. N становить 50, а інтервал дискретизації T 30 мс. $R/Q \in 10^{-6}$. Фаза подвійної опори вважалася миттєвою, тому будь-який момент циклу ходи розглядався лише для однієї опорної ноги. Виходячи з цього припущення, траєкторія ТНМ була спроектована лише під раптовий стрибок попередньої опорної стопи на наступну на стадії переміщення опори. Результат на Рис. 4.10 показав, що створена траєкторія ТЦМ може зберігати ТНМ, дуже добре відслідковуючи базову ТНМ. Планована довжина кроку – 0,3 м, а швидкість ходьби вперед – близько 0,3 м/с. Базова ТНМ була вибрана ідеально в центрі багатокутника стопи. Коли фактична ТНМ знаходилась у межах багатокутника, опорна нога не оберталась, таким чином, могла б повністю контактувати із землею. У рамках цієї наукової роботи, завдання забезпечення стабільної ходьби пов'язане зі збереженням ТНМ в зоні багатогранника стопи.

При детальному аналізі траєкторії центру моменту, побудованої за допомогою відстеження MPC (рис. 4.11), можна побачити, що крива ТЦМ (червоним кольором) повільно рухається до базової кривої ТНМ (синього кольору). Це можна пояснити тим, що контролер намагається зменшити ривок і силу удару під час опускання поворотної стопи і зменшити помилку ТНМ. Як результат, перенесення ваги ТЦМ від опорної стопи на ту стопу, що опускається (нову опорну стопу) у фазі подвійної опори (DSP), є повільним і м'яким. Порівняно з попередньою технікою керування [161], яка утворює симетричну синусоїдальну форму хвилі (зеленим кольором), алгоритм MPC створює зрізану синусоїдальну траєкторію під час опускання поворотної стопи внаслідок її показників «м'якої посадки і швидкого зльоту». Інші переваги

використання моделі АМРС полягають у тому, що процес оптимізації не потребує розв'язання рівняння Ріккати, і вікно оптимізації можна легко налагодити для тонкого налаштування системної реакції. Оскільки АМРС використовує метод рекурсивної ітерації з постійним удосконаленням апаратної та програмної архітектури комп'ютера, це своєю чергою, скорочує час системного оброблення, а отже, надає можливість реалізувати його в режимі реального часу.

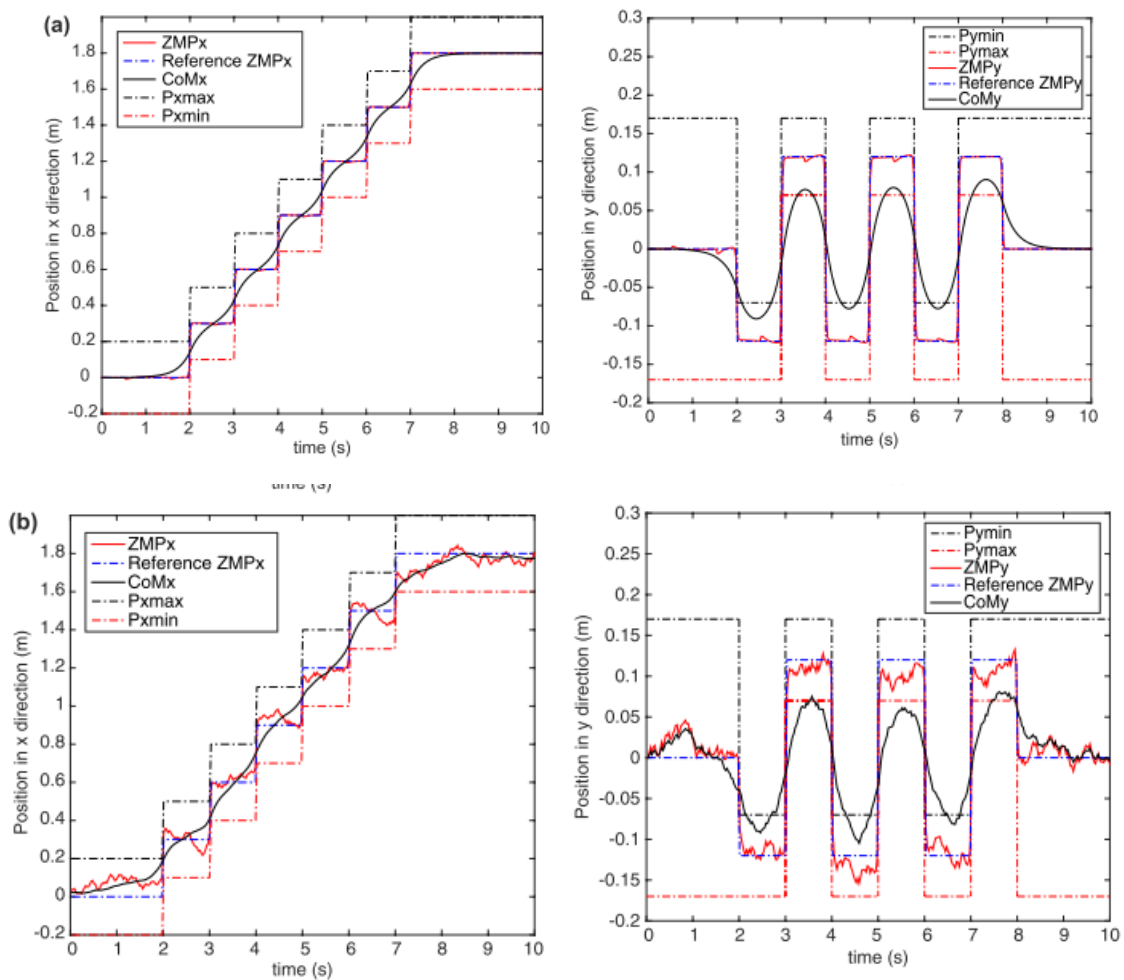


Рис. 4.10. *a* - траєкторія ТЦМ та ТНМ (у напрямку x та y), що створюється через МРС на основі LIPM, не порушуючи центр моменту; *b* – траєкторія ТЦМ та ТНМ (у напрямку x та y), що створюється через МРС на основі LIPM з порушенням центру моменту

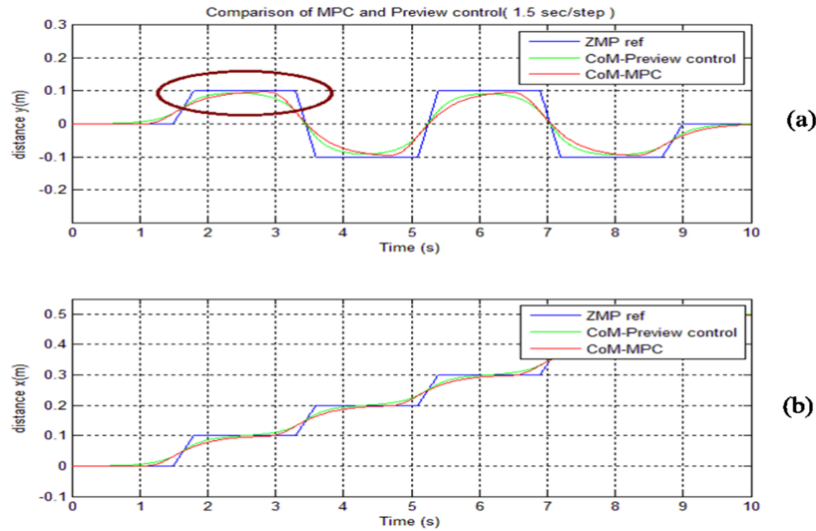


Рис. 4.11. Порівняння MPC і передбачуваного регулятора (a) осі y , (b) осі x

4.3. Синтез траєкторії руху гомілковостопного суглоба антропоморфного крокуючого апарата

Третю криву Безьє було обрано для створення траєкторії щиколотки, у якій є дві контрольні точки для регулювання висоти і довжини її кроку. Перевага кривої Безьє полягає в тому, що за допомогою неї зручно змінювати траєкторію кривої в робочому режимі через коригування координат контрольної точки [162]. Її також легко розкласти на два роз'єднані компоненти по x (горизонтальній) і z (вертикальній) осі, як це показано у рівнянні (4.16).

$$\begin{cases} x_a(t) = \sum_{k=0}^3 b_{xk} \frac{3}{k(3-k)} t^k (1-t)^{3-k} \\ z_a(t) = \sum_{k=0}^3 b_{zk} \frac{3}{k(3-k)} t^k (1-t)^{3-k} \end{cases} \quad t \in [0, 1] \quad (4.16)$$

де b_{xi} і b_{zi} ($i = 0, 1, 2, 3$) – коефіцієнти для багаточлена в x і z осі відповідно. Водночас (b_{xi}, b_{zi}) також є i^{th} точкою керування, де (b_{x0}, b_{z0}) і (b_{x3}, b_{z3}) – початкова і кінцева точки відповідно. (b_{x1}, b_{z1}) і (b_{x2}, b_{z2}) можуть використовуватися як точки керування (Рис. 4.12). Довжиною кроку є $x_a(1) - x_a(0) = b_{x3} - b_{x0}$; t – час. Бажано керувати поворотною ногою, щоб

приземлити її з якомога меншою горизонтальною лінійною швидкістю заради уникнення або зменшення сили удару в цьому напрямку, оскільки вбудовані в стопу датчики зможуть виявляти лише нормальні сили по поверхні стопи.

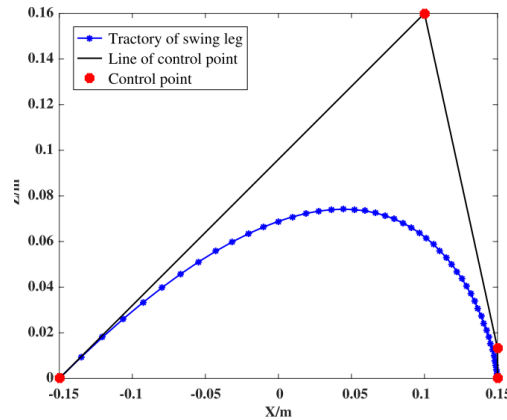


Рис. 4.12. Траєкторія щиколотки на основі кривої Безьє

Якщо двоногий робот часто зазнає горизонтального удару великої сили, важко буде керувати стабільною ходьбою, враховуючи, що наявні зчленування робота спрацьовують на контроль положення, а значить, горизонтальна площина буде відносно великою. Траєкторію ступні по горизонтальній та вертикальній осях можна змінювати окремо. Це дуже зручно для розділення стратегій, призначених для стабільної ходьби сукупно. Горизонтальна траєкторія була відрегульована, щоб допомогти контролювати імпульс вертикальної осі та запобігти під час руху вперед відхиленню від потрібного напрямку [163]. Вертикальна траєкторія щиколотки контролюється на основі узагальненої випадкової функції як зворотного зв'язку для зменшення удару та адаптації до нерівних поверхонь. Модифікація вертикальної траєкторії задається рівнянням (4.17)

$$\Delta z_a = \begin{cases} kF_{vmax}F_v > F_{vmax} \\ kF_vF_{vmax} > F_v > \mu G \end{cases} \quad (4.17)$$

де Δz_a – модифікація вертикальної траєкторії $z_a(t)$; k – коефіцієнт для імпедансного зворотного зв'язку; F_v – вертикальна сила; F_{vmax} – коефіцієнт

насичення для Δza ; G – вага всього робота; μ становить 1,2–1,5 залежно від експериментів.

4.4. Керування рівновагою антропоморфного крокуючого апарата під час руху на довільній поверхні

Щоб отримати збалансовану ходу, робот повинен зберігати точку нульового моменту, задану траєкторією. В ідеалі, збалансована хода досягається тільки шляхом відстеження траєкторії шарнірного кута, оскільки створена траєкторія розрахована на те, щоб у будь-який час підтримувати рівновагу робота. Але внаслідок відхилень, невизначеності моделі та того, що траєкторія не відстежується досконало, регулятор рівноваги (Рис. 4.3 (А4) і Рис. 4.13) повинен бути спроектований для відстеження траєкторії точки нульового моменту. Баланс регулюється завдяки тулубу, оскільки значна частина загальної маси розташована саме в ньому. З'єднання тулуба θ_{16} і θ_{17} використовується для переміщення точки нульового моменту в напрямку y - і x -відповідно. Зміни в двох кутах додаються як корективи рівноваги до траєкторій шарнірного кута, як показано на Рис. 4.13.

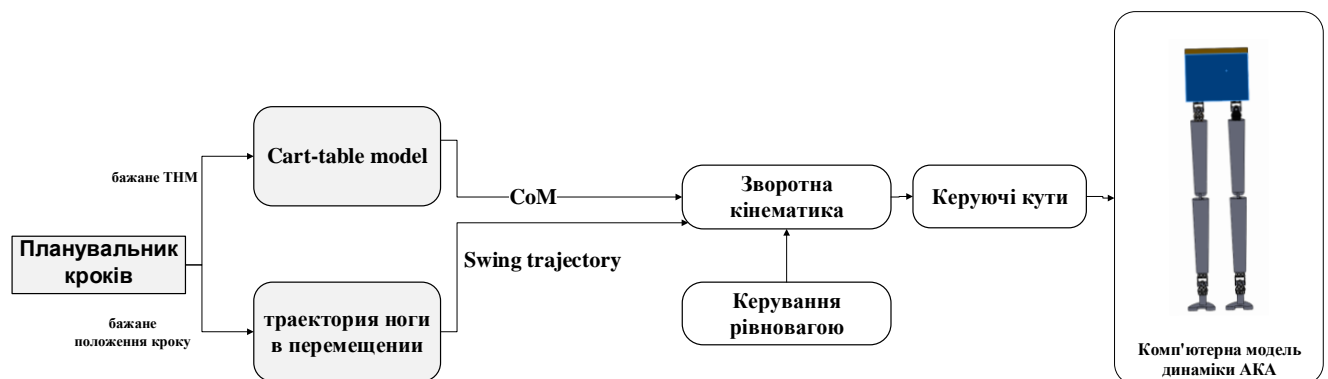


Рис. 4.13. Блок-схема регулятора рівноваги

Важливим кроком у забезпеченні ходи двоногого робота є розроблення зразка ходи, якого має дотримуватися робот. Цей зразок ходи розроблено як траєкторію положення для різних частин робота, що трансформуються в

траєкторії шарнірного кута для всіх з'єднань з використанням зворотної кінематичної моделі. Траєкторія проєктується для врахування фізичних обмежень робота і забезпечення стабільності в ході циклу пересування. Регулятор положення використовує траєкторії шарнірного кута, щоб робот міг відповідати очікуваному зразку ходи, тоді як регулятор балансу для збереження рівноваги застосовує отриману траєкторію точки нульового моменту.

4.4.1. Керування нахилом тулуба в сагітальній площині

Оскільки робот був змодельований як матеріальна маса, імпульс обертання потребує додаткового розгляду. Під час впровадження цієї наукової роботи, верхня частина тіла завжди трималася вертикально, тому, якщо робот нахилився вперед або назад, опорна стопа оберталася навколо переднього або заднього краю, кут між стопою та рівнем землі дорівнював би виходу кута нахилу IMU на таз. У найгіршому випадку, як показано на Рис. 4.14, наприклад, робот нахилиться вперед навколо переднього або заднього краю опорної стопи. Уніфікована динаміка цієї ситуації показана в рівнянні (4.18).

$$-I_p \ddot{\theta}_p = mgr \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{2h}{l_f} \right) + \text{sign}(\theta_p) \cdot \theta_p \right) \quad (4.18)$$

де I_p – інерція обертання тіла навколо переднього або заднього краю; m – матеріальна маса; g – сила тяжіння; θ_p – кут між верхньою частиною тіла та вертикальною віссю; l_f – довжина стопи; h – висота від ТЦМ до стопи; r – відстань між ТЦМ та обертовим краєм.

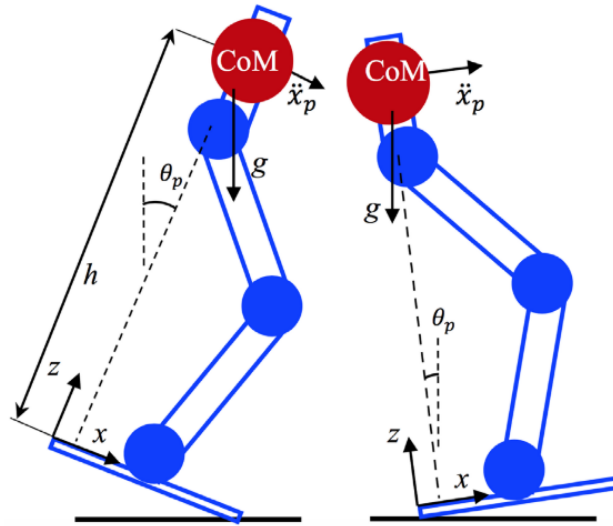


Рис. 4.14. Динаміка поздовжнього імпульсу, коли опорна стопа обертається навколо переднього і заднього краю

Якщо розглядати активний рух ТЦМ у напрямку x , динаміка буде задана рівнянням (4.19)

$$-I\ddot{\theta}_p = -\text{sign}(\theta_p)m\ddot{x}_p h + mgr \cdot \cos \left(\arctan\left(\frac{2h}{l_f}\right) + \text{sign}(\theta_p) \cdot \theta_p \right) \quad (4.19)$$

тут \ddot{x}_p – лінійне прискорення ТЦМ в координатах, зафіксованих на стопі (рис. 4.27). Для керування імпульсом у сагітальній площині так, щоб опорна стопа не оберталася навколо переднього або заднього краю, кут нахилу, внаслідок прискорення вперед або назад верхньої частини тіла, приймався за зворотний зв'язок. Алгоритм керування задається рівнянням (4.20), яке могло б змінити траєкторію ТЦМ на основі імпульсу кута θ_p та зворотної кутової $\dot{\theta}_p$ швидкості від IMU

$$\ddot{x}_p = k_{pd}\dot{\theta}_p + k_{pp}\theta_p \quad (4.20)$$

Зміщення ЦМ, кути нахилу верхньої частини корпусу і крутні моменти, що виникають за інерцією обертання на краю стопи, порівнювались з та без контролю імпульсу кроку (Рис. 4.15). Моделювання показало, що контроль

імпульсу кроку необхідний для стабільності імпульсу під час ходьби. Рис. 4.16 показує, що велике значення K_{pp} та мале значення K_{pd} можуть зменшити похибку кута кроку, а занадто мала K_{pd} впливає на похибки зовсім несуттєво. Контролер імпульсу кроку є доповненням до МРС, що створює стабільну траєкторію ТЦМ. Контролер імпульсу кроку працює, коли МРС виходить із ладу, і вони не оновлюють траєкторію ТЦМ одночасно. Як показано на Рис. 4.17, коли ТНМ виходить за межі багатокутника опорної стопи, МРС зависає і активується регулятор імпульсу кроку, щоб налаштувати ТЦМ та перемістити назад ТНМ на опорний багатокутник стопи.

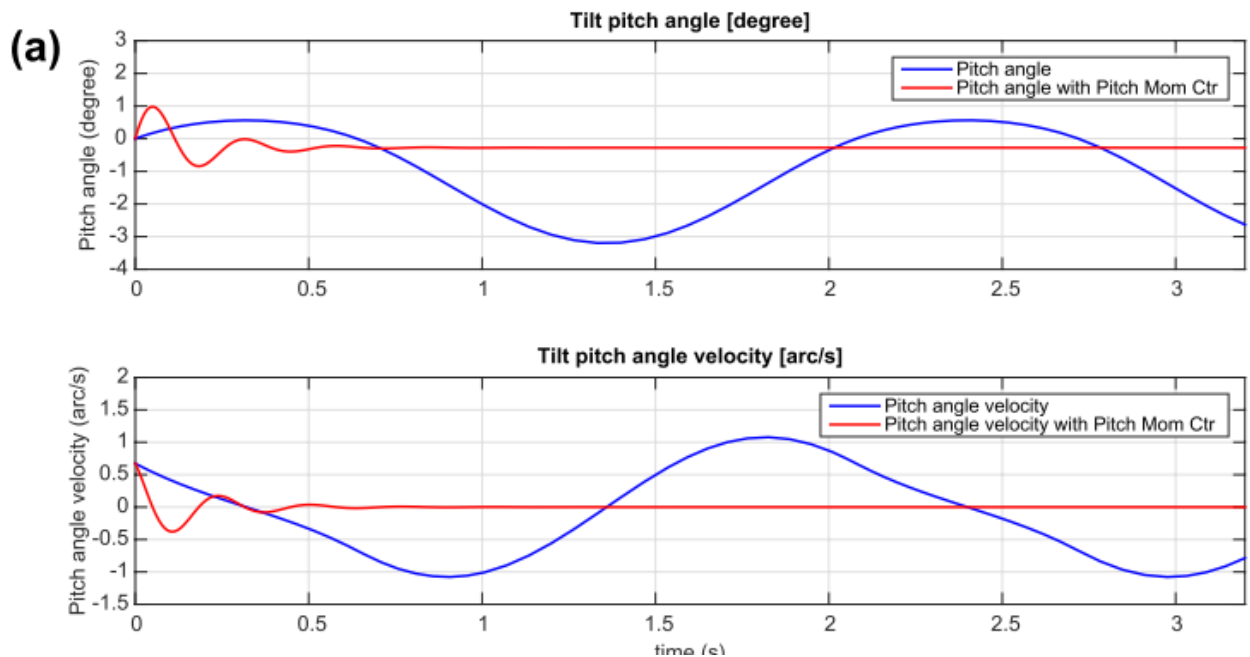


Рис. 4.15. Результати моделювання показали, що порівняно з природною динамікою, рух обертання в сагітальній площині можна стабілізувати за допомогою управління імпульсом кроку

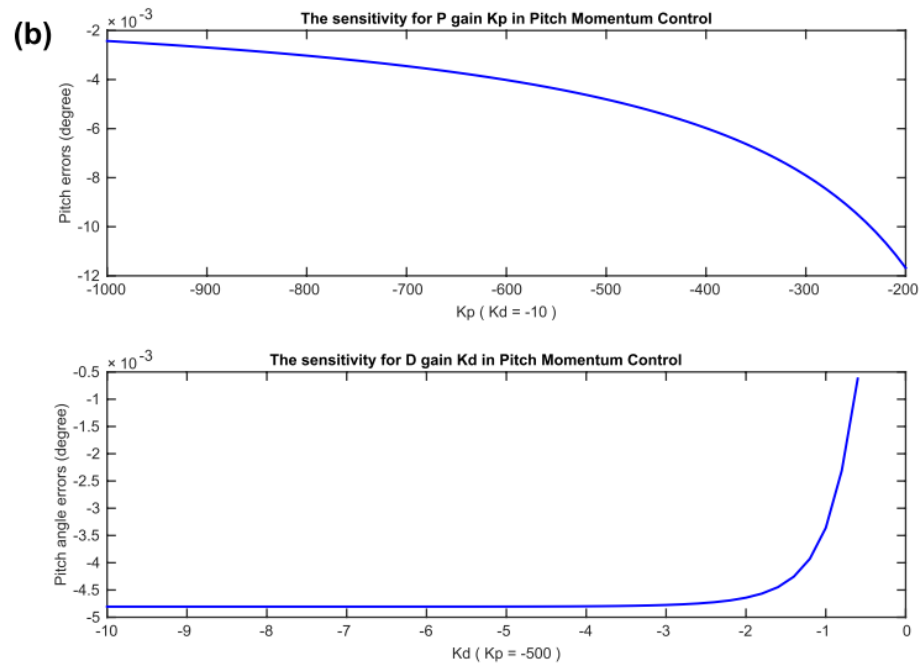


Рис. 4.16. Чутливість k_{pp} і k_{pd} для регулятора імпульсу кроку

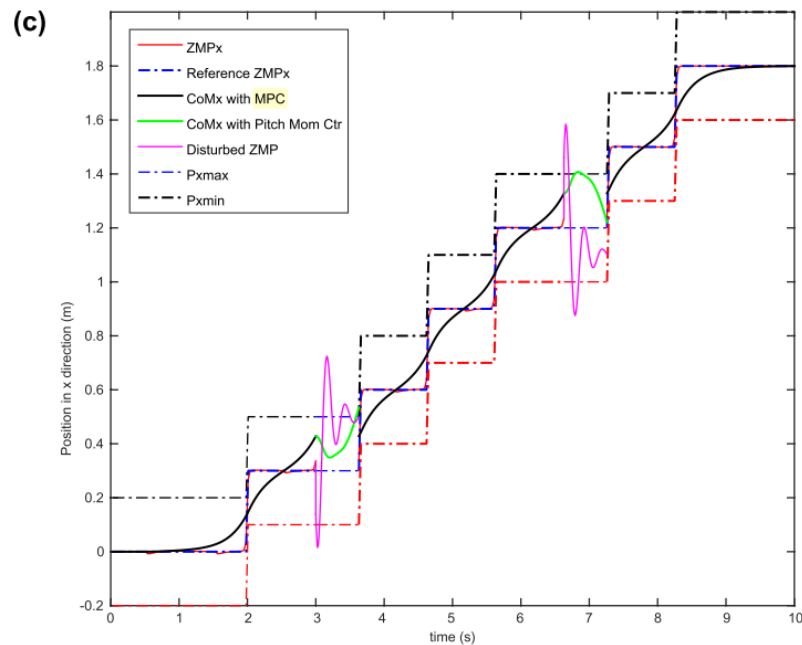


Рис. 4.17. MPC у поєднанні з результатом моделювання контролю імпульсу кроку

Після повернення опорної стопи до стану повного контакту із землею, MPC знову починає працювати. Деякі інші методи, такі як фільтрація динаміки, можуть ефективно підтримувати стабільне положення робота, у випадку, коли багатоцільові завдання суперечать одне одному [42; 43]. Для порівняння,

регулятор ЦМ кроку зберігає стабільність, коли ТНМ виходить за межі опорного багатокутника стопи. Основна увага в цій науковій праці приділяється лише виконанню одного завдання, а саме, – ходити.

4.4.2. Керування положенням стопи антропоморфного крокуючого апарата

Критерій ТНМ успішно застосовується для визначення того, чи буде стопа обертатися навколо її краю. Однак керування ТНМ у багатокутнику стопи не могло запобігти обертовому руху у напрямку нормалі до поверхні стопи. Робот часто не ходить по прямій лінії через низький коефіцієнт тертя між стопою і землею. Вище було сказано, що робота моделювали як просту матеріальну масу без урахування динаміки качання ніг. Коли опорна нога не обертається, динаміка імпульсу вертикальної осі задається рівнянням (4.21):

$$\tau_{static} = \hat{m}_e L \ddot{x}_l \quad (4.21)$$

Коли тіло робота починає обертатись по вертикальній осі, нормаль моменту обертання до опорної стопи зумовлена інерцією поворотної ноги та інерцією обертання верхньої частини тіла (рис. 4.18), а динаміку подано у рівнянні (4.22).

$$\tau_{static} + \Delta\tau = I_y \ddot{\theta}_y + \hat{m}_e L (\ddot{x}_l + \Delta\ddot{x}_l) \quad (4.22)$$

де $\Delta\tau$ – сила тертя поворотного обертання, викликана розподіленими силами взаємодії з землею перпендикулярно до поверхні опорної стопи; $\Delta\ddot{x}_l$ – поступове прискорення поворотної стопи в напрямку x ; x_l – горизонтальне положення поворотної ноги; I_y – інерція маси обертання верхньої частини тіла (ТНМ); $\ddot{\theta}_y$ – кутове прискорення ЦМ; \hat{m}_e – ефективна маса при поворотній стопі; L – імпульс від поверхні поворотної ноги до ТНМ в опорній нозі.

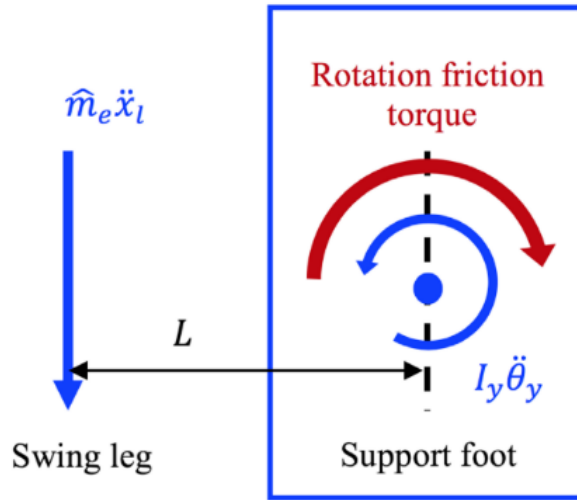


Рис. 4.18. Обертова інерція верхньої частини тіла та інерція поворотної ноги, які врівноважуються сумарним крутним моментом обертання під опорною стопою

Коли крутний момент тертя під час обертання менше максимального статичного моменту тертя, обертання не може розпочатися. В ідеальній ситуації, будь-який крутний момент тертя при обертанні $\Delta\tau$ під опорною ногою не очікується; отже, було запропоновано пропорційно-диференціальне керування, засноване на зворотному зв'язку кута відхилення, щоб спробувати мінімізувати $\Delta\tau$, як показано в рівнянні (4.22):

$$\Delta\ddot{x}_l = k_{yd}\dot{\theta}_y + k_{yp}\theta_y \quad (4.23)$$

де k_{yd} і k_{yp} – пропорційно-диференціальне підсилення. Визначимо ефективну масу в рівнянні (4.24)

$$\hat{m}_e = \frac{m_{th}\ddot{x}_{th} + m_{sh}\ddot{x}_{sh} + m_{foot}\ddot{x}_{foot}}{\ddot{x}_{foot}} \quad (4.24)$$

тут m_{th} , m_{sh} , m_{foot} – маса стегна, гомілки і стопи відповідно; \ddot{x}_{th} , \ddot{x}_{sh} , \ddot{x}_{foot} – прискорення ТЦМ стегна, гомілки і стопи відповідно; $\ddot{x}_{foot} = \ddot{x}_l$. Прискорення кожного сегменту поворотної ноги можна обчислити за допомогою випереджувальної кінематики (розділ 2). Згідно з 9 – від 0,2 до 0,8 с.

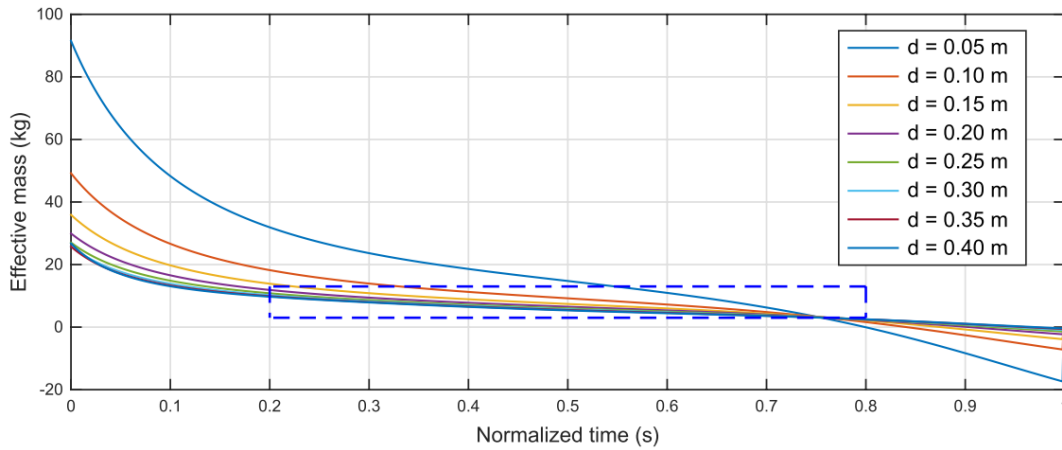


Рис. 4.19. Ефективна маса на час при різній довжині кроку d

Ефективна маса може бути приблизно до 10 кг. Ми використовуємо динаміку качання, щоб регулювати вертикальний імпульс всього тіла лише протягом 0,2–0,8 с.

На основі рівняння (4.16) прискорення $\ddot{x}_x(t)$ визначиться як

$$\ddot{x}_l = \ddot{x}_a(t) = B_1 t + B_2 \quad (4.25)$$

де $B_1 = (b_{x3} + 3b_{x1} - 3b_{x2} - b_{x0})$ і $B_2 = 6(b_{x2} + b_{x0} - 2b_{x1})$. Якщо воно задовольняє умову:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{x0} = -d/2 \\ b_{x1} = \frac{1}{3}(2b_{x2} + b_{x0}) \\ b_{x2} = d/2 \\ b_{x3} = d/2 \end{array} \right. \quad (4.26)$$

тоді B_1 дорівнює нулю, а $B_2 = d$. Звідси, $\ddot{x}_l = d$. Тому алгоритм пропорційно-диференціального керування подається у формі рівняння (4.17):

$$\Delta d = k_{yd} \dot{\theta}_y + k_{yp} \theta_y \quad (4.27)$$

Даний алгоритм керування простий та зручний до застосування на справжніх роботах. Хоча динаміка поворотної ноги не є точною, було виявлено,

що в ході експерименту пропорційно-диференціальний алгоритм добре себе зарекомендував. Порівняно складна динамічна модель поворотної ноги могла б бути обчислена для більш точного оцінювання сили інерції. Проте вищенаведеного достатньо, щоб робот ходив у строго прямому напрямку. Рис.4.20 показує еволюцію кута нахилу, швидкості кута нахилу та відхилення довжини кроку в робочому режимі з $k_{yp} = 0,8$ та $k_{yd} = 0,04$. Можна виявити, що хоча у фазі качання довжина кроку оновлюється в режимі реального часу, однак, коли стопа стає на землю, відхилення майже дорівнює нулю. Тому регулятор імпульсу повороту працює переважно у фазі качання. Це несуттєво впливає на регулятор МРС. Рис. 4.21 показує, що коли k_{yp} приблизно дорівнює 0,8, похибка кута нахилу є найбільшою, а коли k_{yd} приблизно дорівнює 0,04, похибка кута нахилу є найменшою.

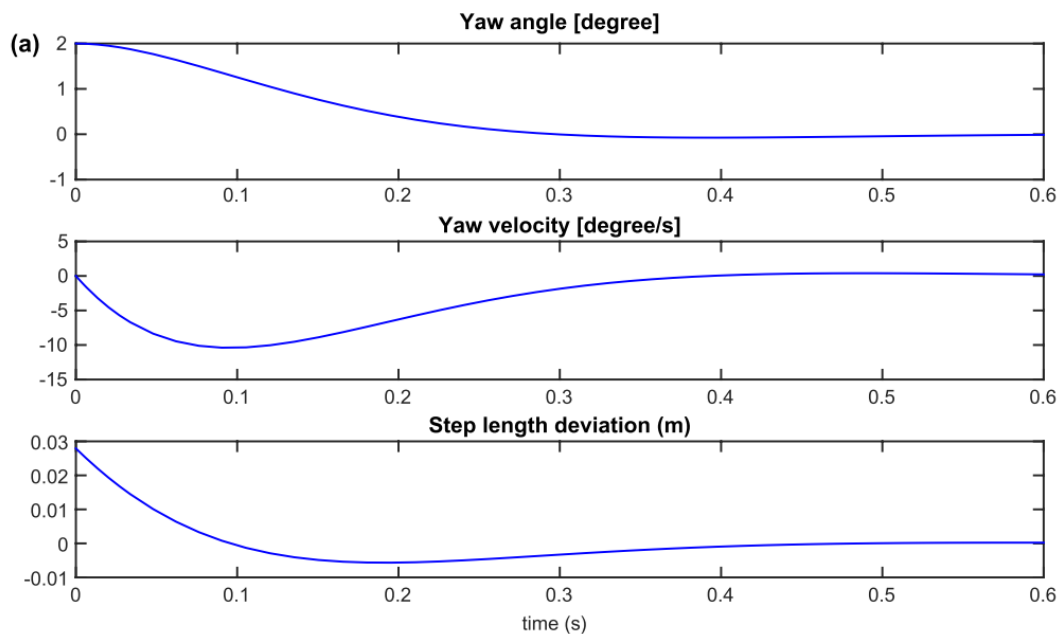


Рис. 4.20. Кут відхилення, швидкість кута відхилення та відхилення довжини кроку в робочому режимі, які стабілізуються за допомогою адаптованого контролера моменту відхилення

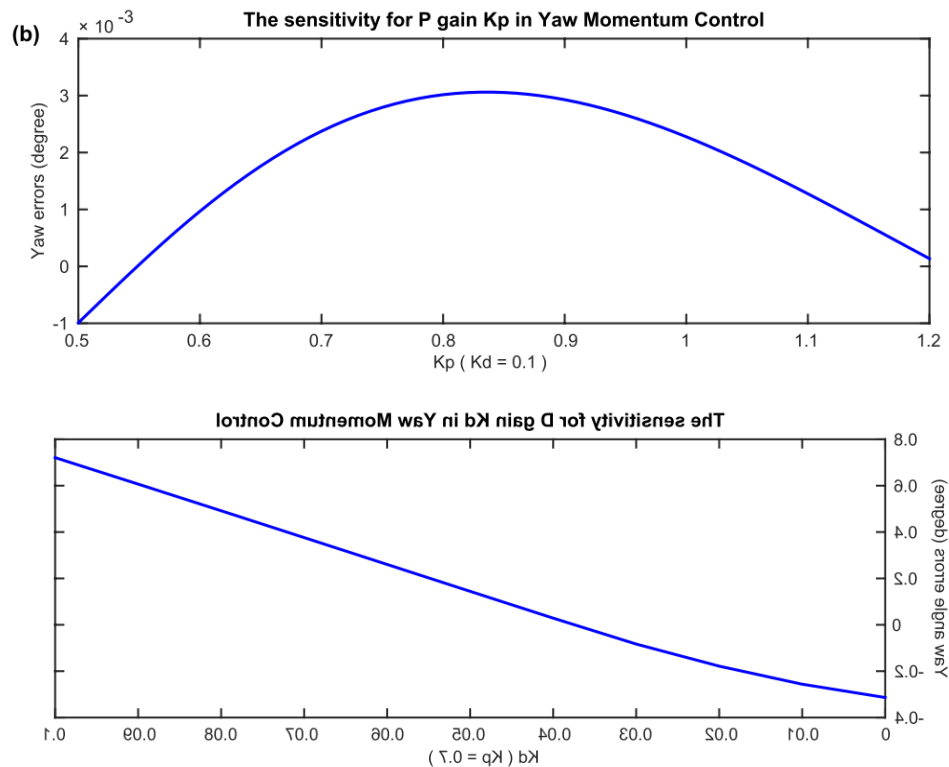
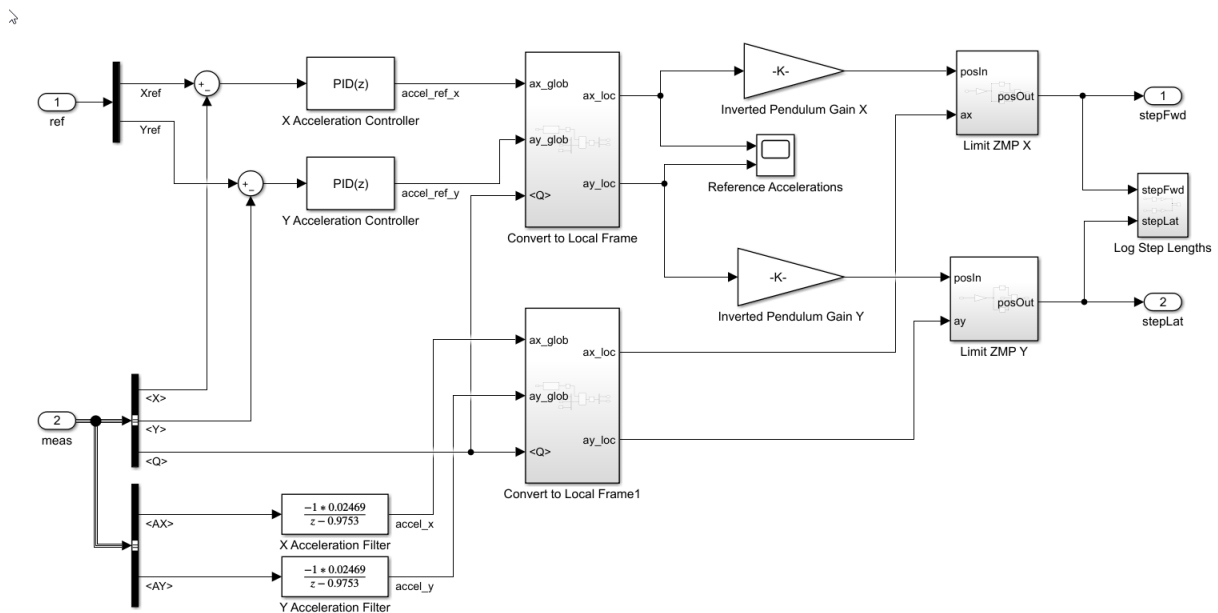


Рис. 4.21. Чутливість k_{yp} і k_{yd} для контролю моменту відхилення

4.5. Моделювання стійкого руху антропоморфного крокуючого апарата

Для моделювання цієї траєкторії задіяно модель АКА. Ідея полягає в тому, щоб відслідковувати заздалегідь розраховану очікувану траєкторію на моделі, яка також враховує контактну модель (Додаток Е). Для того, щоб переконатися, що хода відслідковується якомога ближче до очікуваної, обчислена хода є входом автоматичної системи керування зі зворотним зв'язком, у якій АКА виступає як регульована система. ПД-регулятор (регулятор відхилення автоматичної системи) використовується для мінімізації розбіжності між очікуваною ходою і виміряною ходою системи. Блок-схему моделювання показано на рис. 4.22. Оскільки уставка змінюється в кожний момент, це допускає появу похибки.

Використовуючи цю похибку, регулятори розраховують необхідний первинний момент приводів, який відповідає очікуваній ході.



Ref	Опорний
Meas	Вимірний
Acceleration Controller	Регулятор прискорень
Acceleration Filter	Фільтр прискорень
Convert to Local Frame	Перетворити на локальний базис
Inverted Pendulum Gain	Посилення перевернутого маятника
Reference Accelerations	Опорні прискорення
Limit ZMP	Гранична ТНМ
Log Step Length	Зареєстрована довжина кроку

Рис. 4.22. Блок-схема контуру регулювання зі зворотним зв'язком моделі АКА

4.5.1. Хода по прямій лінії

Рух ходи моделі 3D-LIPM реалізовано на моделі гуманоїдного робота АКА. Як опорну ходу ми дали можливість моделі пройти відстань 1 м з кроком завдовжки 0,38 м. Моделювання проходить з інтервалом часу $\Delta t = 0,01$ с, кожна фаза займає 1с, за винятком фази подвійної опори, яка становить 0,5 с. Інші змінні параметри наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

**Параметри, що використовувались під час імітації для проходження
5 м по прямій**

Target_com_pos _x	0,043 м
Target_com_pos _y	0,02 м
Z_lift	0,02 м
Z_com_lift	0,00 м
Target_com_pos_x_inclination	0°
Target_com_pos_y_inclination	1°
Z_rot	15°
Z_com	0,047 м

За допомогою цих налаштувань для кінематичних пар робота розраховується хода, яка виконує задане проходження 3D-LIPM на відстань 1 м (на рис. 4.23 показано відповідні шарнірні кути). Із цього графіка видно, що всі з'єднання рухаються рівною поверхнею і повторюють ту саму схему для кожного кроку. Найбільший рух здійснюється стегном по осі z під час фази перенесення кінцівки; це вказує на те, що тулуб обертається навколо своєї вертикальної осі під час ходьби. Люди також роблять цей рух, але ми використовуємо руки, щоб коригувати рух, АКА не має такої можливості.

Це моделювання виконується з коефіцієнтом посилення 1000 для П-контролера і 5 для Д-контролера, тому що він того ж порядку в реальному роботі й дає допустиму ефективність відстежування. Результати моделювання наведені на рис. 4.24, на якому продемонстровано похибку між очікуваними шарнірними кутами і виміряними шарнірними кутами системи. На цьому рисунку показано, що похибка завжди менша 0,3, що становить приблизно 3,75 % руху, який виконується шарнірним з'єднанням. Однак на завершальній стадії похибка лівої ноги збільшується, особливо в коліні.

Це відбувається тому, що в цей момент виконується напівкроковий рух, а також це трапляється в період напівфази. Але в цьому напівкроковому русі нога підіймається так само, як і під час повного кроку, тому потрібно пришвидшити рух. Загалом, це достатній результат відстеження.

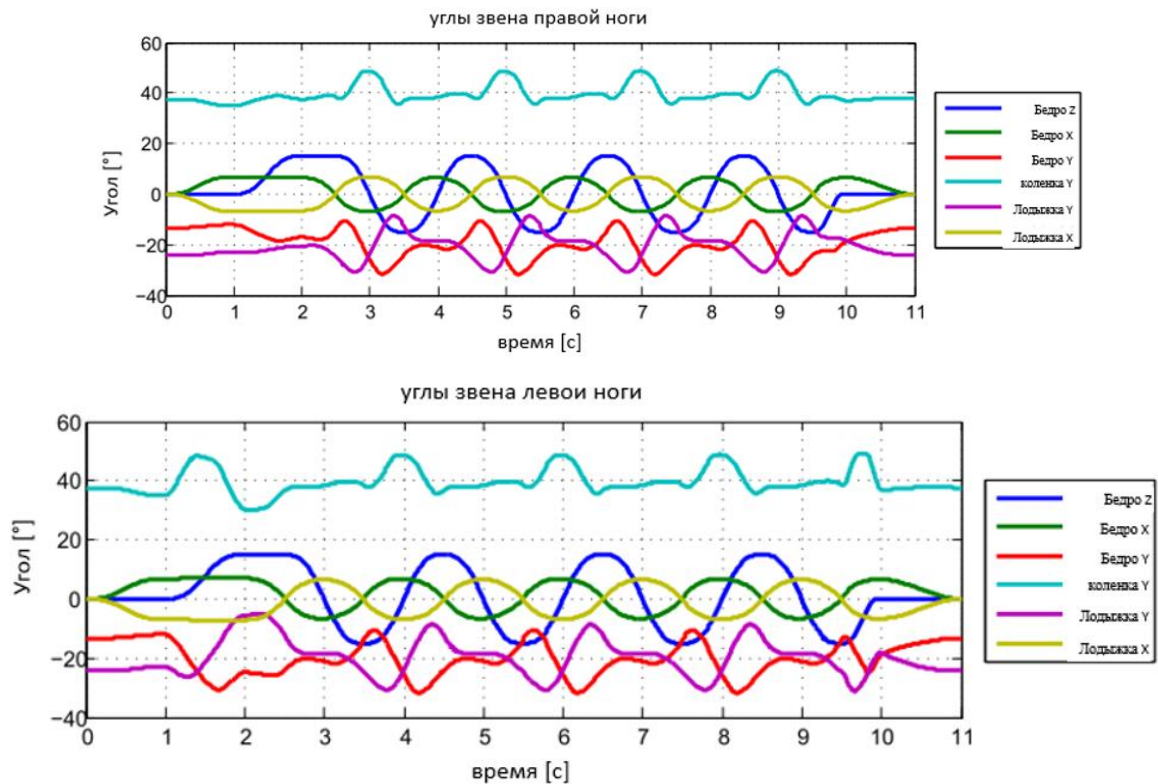


Рисунок 4.23. Шарнірні кути лівої і правої ніг під час проходження 1 м по прямій

Таблиця 4.2

Ланка робота, маса, довжина і положення ТЦМ, використовувані в ході моделювання

№	Ланка	Маса, кг	Довжина [x y z] [m]	Положення ТЦМ [x y z] [m]
0	Тулуб	12,18	[0 0,130,033]	[0 0,065 0,170]
1	Верх правого стегна	0	[0 0 0,170]	[0 0 0,085]
2	Низ правого стегна	0	[0 0 0]	[0 0 0]
3	Верх правої ноги	3,58	[0 0 0,33]	[0 0 0,162]

Продовження таблиці 4.3

№	Ланка	Маса, кг	Довжина [x y z] [m]	Положення ТЦМ [x y z] [m]
4	Низ правої ноги	0,53	[0 0 0,264]	[0 0 0,136]
5	Права щиколодка	0	[0 0 0,013]	[0 0 0,0065]
6	Права стопа	0,72	[0 0 0,04]	[0,869 0 0,2]
7	Верх лівого стегна	0	[0 0 0,170]	[0 0 0,085]
8	Низ лівого стегна	0	[0 0 0]	[0 0 0]
9	Верх лівої ноги	3,58	[0 0 0,33]	[0 0 0,162]
10	Низ лівої ноги	0,53	[0 0 0,264]	[0 0 0,136]
11	Ліва щиколодка	0	[0 0 0,013]	[0 0 0,0065]
12	Ліва стопа	0,72	[0 0 0,04]	[0,0869 0 0,2]

Мета полягає в тому, щоб дати можливість АКА ходити в рівновазі. На рис. 4.25 показано положення ТЦМ стосовно до навколишнього середовища. На графіку відображено рух x , y і z . Із цього графіка можна зробити висновок, що хода АКА збалансована, тому що висота тулуба залишається такою самою і становить близько 0,74 м. X -рух зростає в межах заданого інтервалу. Хвильовий шлях X -руху зумовлений прискоренням і уповільненням, що використовуються під час кроку. Y -рух також виглядає як хвиля. Така хвиля симетрична навколо серединної лінії робота, що проєктується на землю. Це відбувається тому, що ТЦМ перемикається між лівою і правою ногами.

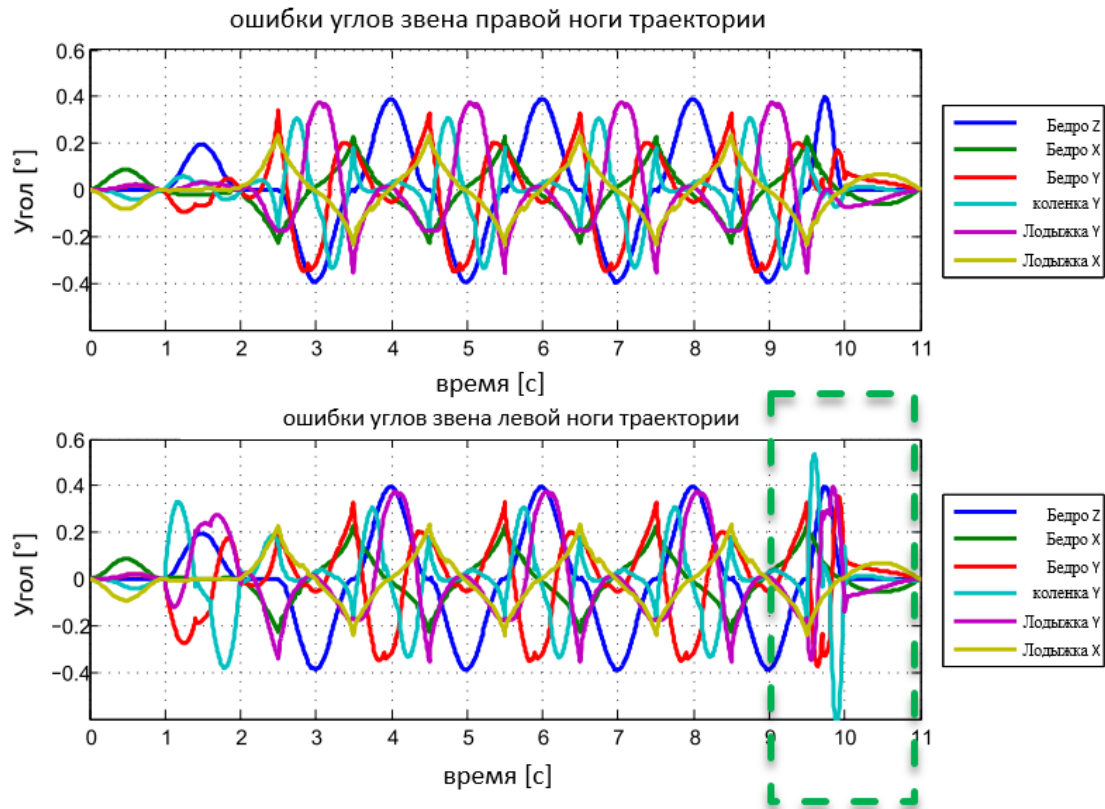


Рис. 4.24. Похибка між очікуваними і виміряними шарнірними кутами лівої і правої ніг під час ходьби по прямій на відстань 1 м

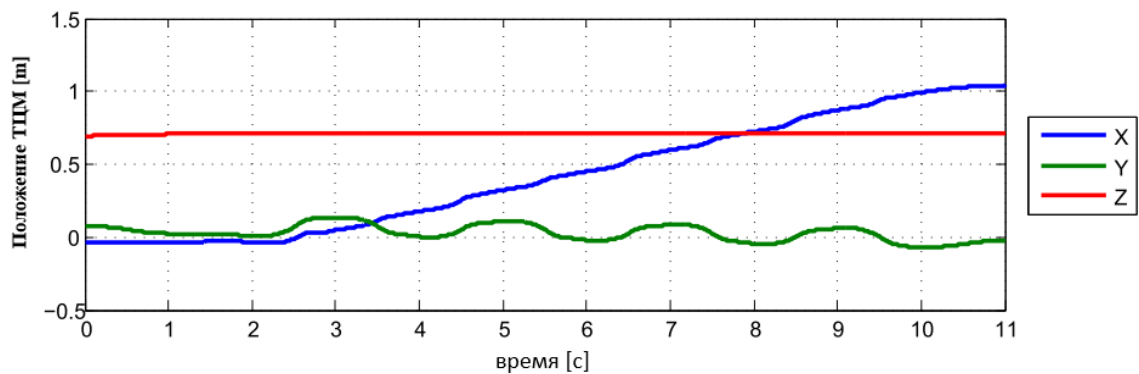


Рис. 4.25. Положення ЦМ під час ходьби по прямій на відстань 1 м

У моделі, яка має контакт із землею поверхнею, моделюються сили, що діють на кути стопи. На рис. 4.26 ці сили визначені для кожної стопи і нанесені на графік. Із цього рисунка можна зробити висновок, що сила удару (сила, коли нога наступає на землю) є значно вищою, ніж тоді, коли робот стоїть на цій нозі. Це можна розглядати як показник динамічної ходи, оскільки модель падає

на свою ногу, замість того, щоб опустити її обережно. Під час повних кроків, між 2,48 і 9,4 с, сила удару однакова на кожному кроці для лівої і правої сторін, і це вказує на симетричність ходи.

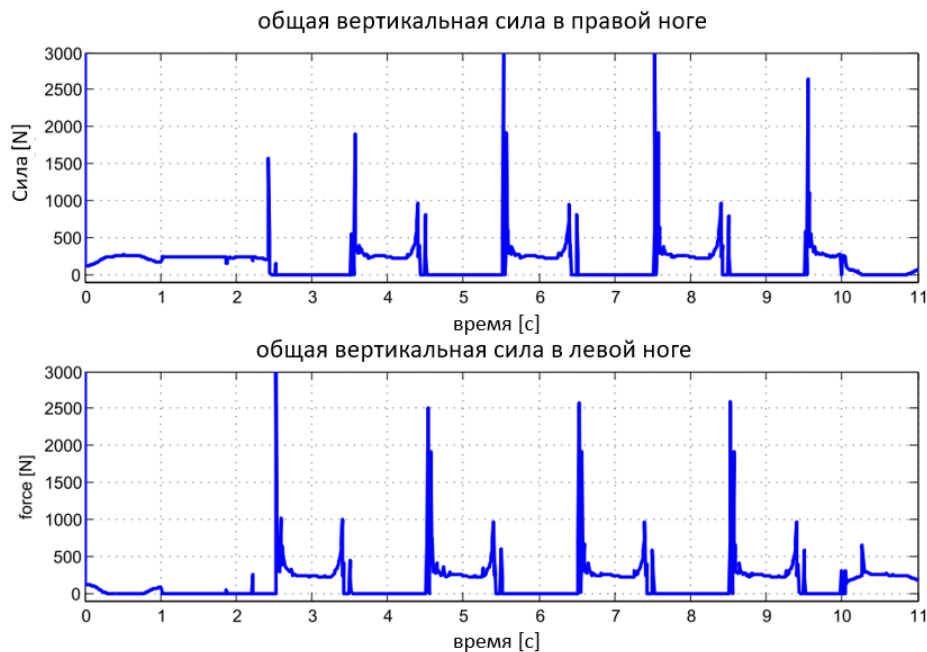


Рис. 4.26. Сили реакції опори (поверхні землі) на праву і ліву стопи під час ходьби по прямій на відстань 1 м

4.5.2. Ускладнення ходи зі встановленням на підлогу перешкод

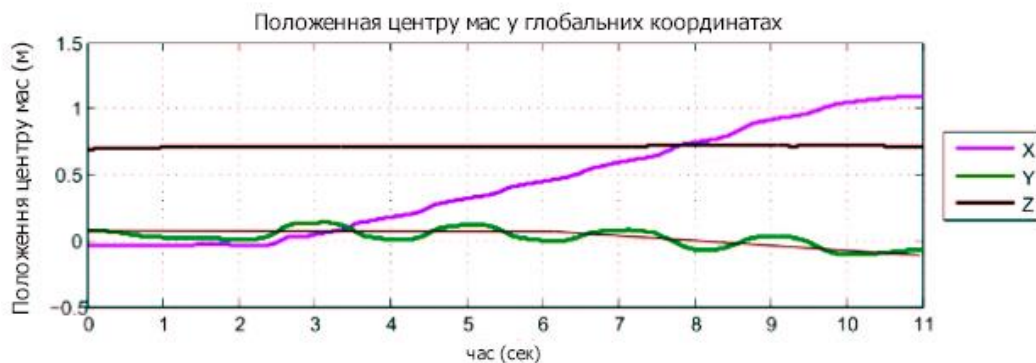
Змінюючи висоту поверхні землі, можна імітувати нерівну поверхню для ходи. Це може статися, наприклад, якщо людина йде по нерівній поверхні або якщо нога наступає на кабель або дверний поріг. Опорна траєкторія, однак, не призначена для ходьби по таких поверхнях, але, здійснюючи моделювання, яке імітує нерівномірну поверхню, перевіряється міцність і рівновага АКА. Знову ж таки, задана хода залишається незмінною, і вона передбачає рівномірний рух, але контактна модель відрегульована, щоб імітувати крок.

Протягом еталонного моделювання та імітації зміни маси передбачається, що рівень поверхні землі був на висоті $z = 0$, і якщо стопа нижче $z = 0$, на неї починає діяти сила. Змінюючи момент, коли сила починає діяти, моделюється нерівномірний крок. Наприклад, якщо моделюється крок + 1 см, то

передбачається, що поверхня землі знаходиться на $z = 0,01\text{м}$. Якщо стопа нижче цього значення, на неї діє та сама сила. Для перевірки стійкості моделі АКА щодо цих вертикальних незручностей під час ходьби було проведено моделювання, яке передбачає крок $+1\text{см}$ після двох повних кроків (рис.4.27), негативний крок -1см після двох повних кроків (рис.4.28) і негативний крок -5см після двох повних кроків (рис.4.29).

Крок -1 см

Оскільки збільшення кроку обмежене висотою кроку, на поверхні був введений негативний (мінусовий) крок. Це може статися, якщо АКА зійде з тротуару або футбольного поля. Перше моделювання буде з тим же кроком, що і в попередньому моделюванні, тобто -1 см . На рис. 4.28 рух ТЦМ нанесено на графік у межах встановленого часу. З цього рисунка можна зробити висновок, що модель АКА залишається у вертикальному положенні, але, як і в ситуації з позитивним кроком, стає хиткою. Нестійкість змінює напрямок ходу АКА праворуч.



Position CoM, m	Положення ТЦМ, м
Position CoM in world Coordinates	Положення ТЦМ в системі координат, що введена в зовнішньому світі (робота)
Time, s	Час, с

Рис. 4.27. Положення ЦМ під час моделювання з кроком $+1\text{ см}$ після 7 с

Рух у напрямку x також показує відхилення порівняно з опорною траєкторією, внаслідок чого відстань перед центром моменту зменшується приблизно на 5 см. Це викликано тим, що спочатку опускається ліва стопа, і протягом цього кроку АКА починає обертатися над контактною точкою на задньому боці п'яти. Під час цього обертання напрямок ходи змінюється вправо. Коли виконується наступний крок (правою ногою), ТЦМ обертається вправо більше, ніж потрібно, і знову повертається навколо контактної точки. Отже, контактна модель недостатньо керована, і АКА може обертатися, поки стоїть на землі. Через те, що зменшення кроку настільки незначне, ЦМ залишається в межах опорного багатокутника, і АКА перебуває у вертикальному положенні.

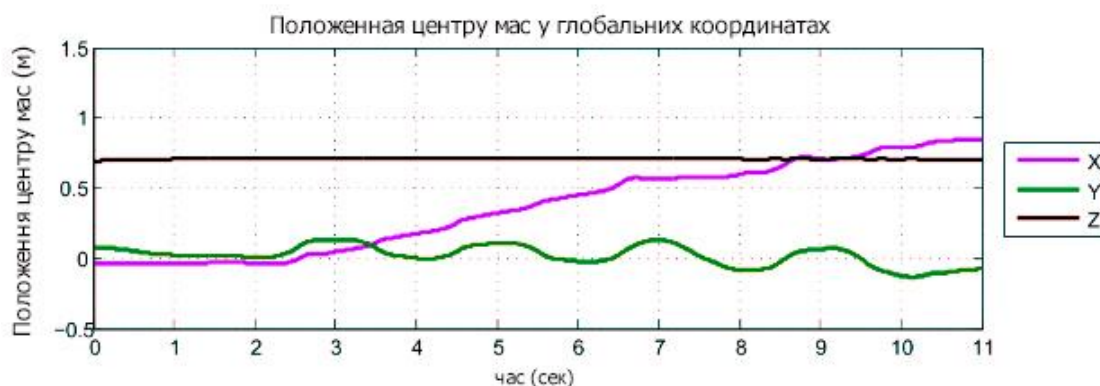


Рис. 4.28. Положення ТЦМ під час моделювання з кроком – 1 см після 7с

Крок – 5 см

У разі скорочення кроку на 1 см АКА стає нестабільним у вертикальному положенні під час імітації, тому було зроблено більш значне зменшення кроку, щоб переконатися, чи впаде АКА. Проводилося моделювання, яке імітує рівень зниження – 5 см. Рух ТЦМ під час цього моделювання показано на рис. 4.29. У момент часу, коли відбувається крок (близько 7 с) АКА стає незбалансованим і починає падати. Розглянувши напрямок y , можна побачити, що АКА падає ліворуч, і це також бік, на який було змодельовано скорочення кроку. Висновок із цього моделювання полягає в тому, що крок – 5 см не створить умов рівноваги для АКА.

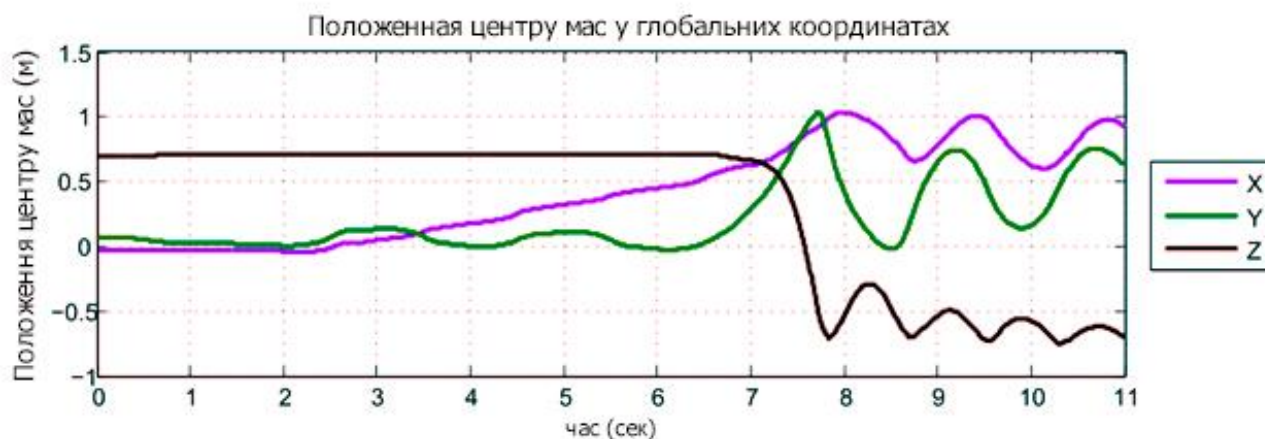


Рис. 4.29. Положення ТЦМ під час моделювання з кроком – 5 см після 7 с

Моделювання показало, що робот здатний ходити по рівній поверхні, оскільки регулятор забезпечує досить точне дотримання потрібної траєкторії з максимальною похибкою 0,3 % у траєкторіях шарнірних з'єднань. Крім того, переміщення ТЦМ є такими, як і очікувалося, висота ТЦМ залишається на одній лінії, відстань уперед – 1 м, а у – зліва направо. Для перевірки надійності траєкторії були проведені випробування на стійкість до виникнення помилок. Під час цих моделювань необхідна траєкторія зберігалася незмінною, але модель АКА мала деякі зміни. Спочатку змінювалася маса тулуба, що впливає на висоту ТЦМ. Якщо ТЦМ був вище, ніж заплановано, АКА могла впоратися з ним до певної міри, але це негативно впливало на очікувану ходьбу. Якщо ТЦМ був нижче, ніж очікувалося, рух ставав більш вільним і менш хитким. Отже, можна зробити висновок, що якщо положення ТЦМ не визначене, то можна припустити, що воно вище, коли траєкторія спланована. Також були проведені імітації, які враховують нерівномірність рельєфу. Моделювання було проведено зі збільшенням кроку на 1 см і зменшенням –1 см і –5 см. Під час моделювання з'ясувалося, що АКА може подолати збільшення і скорочення кроку приблизно на 1 см, але хода стає нестійкою, зменшення кроку на – 5см виявляється занадто значним і спричиняє падіння АКА.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено алгоритм стабілізації руху АКА в умовах невизначеності рельєфу місцевості на основі MPC-підходу, що дозволяє усунути негативні наслідки ефекту запізнювання в початковій стадії процесу руху АКА при використанні традиційних підходів.

2. Синтезовано систему керування АКА, яка має ієрархічну розподілену архітектуру з використанням складових, побудованих на основі PID-регуляторів.

3. Здійснено розподіл сил реакції опорної поверхні (ОП) і АКА, який адаптовано у вигляді складової системи керування. Профіль рельєфу ОП задано окремою моделлю.

4. Розроблено програмне забезпечення і проведено імітаційне моделювання із застосуванням інтегрованої системи інженерних і наукових розрахунків MATLAB. Проведене імітаційне моделювання підтверджує ефективність отриманих у роботі результатів.

Основні результати розділу були опубліковані в [153],[160],[162],[163].

Список використаних джерел до розділу 4: [41-43], [99-104] ,[153], [158-163].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання – розроблення спеціалізованого математичного апарату і алгоритмічного забезпечення розв'язання задачі автоматизації процесів планування та стабілізації руху АКА.

Основні результати і висновки полягають у такому:

1. На основі аналізу сучасного стану розвитку мобільної робототехніки обрано типовий АКА, для якого проведено аналіз існуючих методів планування і керування в різних умовах функціонування. Показано, що найбільш вразливими під час розроблення антропоморфних крокуючих роботів є питання планування опорних траєкторій і забезпечення сталого руху АКА уздовж неї.

2. Розроблено структурно-функціональну схему автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху, яка визначає послідовність і зміст вирішення завдань зі створення автоматичних систем планування опорної траєкторії і стабілізації руху АКА, які забезпечують плавність і стійкість руху АКА уздовж заданої траєкторії.

3. Для отримання рівнянь кінематичної моделі АКА запропоновано підхід з єдиних системних позицій з використанням представлення Денавіта-Хартенберга. За такого підходу розв'язання прямої задачі кінематики може розглядатися як послідовність однорідних перетворень координат. Розв'язання оберненої задачі для кінцівки АКА отримано в замкненому вигляді за заданими просторовими координатами кінцевих точок кожної з двох кінцівок.

4. Здійснено формалізацію руху перевернутого маятника в 3D-просторі з метою її використання для автоматичного генерування руху під час ходи АКА. Звідси, реалізовано планування в реальному часі траєкторії стійкого руху АКА на основі ТНМ і 3D-LIPM моделі.

5. Розроблено методику синтезу опорних траєкторій на основі багатофазної структури покрокового переміщення АКА з урахуванням локомоторних синергій взаємодії стоп АКА з довільною опорною поверхнею,

що дозволяє уникнути неоднозначності під час розв'язання оберненої задачі кінематики.

6. Синтезовано систему керування АКА, яка має ієрархічну розподілену архітектуру з використанням складових, побудованих на основі PID-регуляторів.

7. Розроблено алгоритм стабілізації руху АКА в умовах невизначеності рельєфу місцевості на основі MPC-підходу, що дозволяє усунути негативні наслідки ефекту запізнювання в початковій стадії процесу руху АКА під час використання традиційних підходів.

8. Розроблено програмне забезпечення і проведено імітаційне моделювання із застосовуванням інтегрованої системи інженерних і наукових розрахунків MATLAB. Проведене імітаційне моделювання підтверджує ефективність отриманих у роботі результатів.

9. Результати теоретичних та практичних досліджень використовуються ТОВ «СВІТ САЙТІВ» під час проєктування систем керування крокуючими роботами, використовуються в науково-дослідній роботі студентів наукових груп Інституту новітніх технологій та лідерства НАУ, а також впроваджені в навчальний процес кафедри технічної кібернетики факультету інформатики та обчислювальної техніки НТУУ «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського» для підготовки лекційних матеріалів та методичних рекомендацій.

Результати впровадження підтверджені актами впровадження, наведеними в додатках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rubio, F., Valero, F., Llopis-Albert, C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. Vol. 16, No. 2. C. 172988141983959.
2. Waldron, M. W. Chapter 13: Improving the organization and management of extension: Welcome to the Kate Sharpley Library. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1997.
3. Brenner, R. The Origins of Capitalist Development : a Critique of Neo-Smithian Marxism. *New Left Review*. 1977.
4. Klein, R., Klein, R. The great transformation / 2006. 91–98 p.
5. Глушков, В. Енциклопедія кібернетики: В 2 т.: Інститут кібернетики АН УРСР. Київ: Головне видавництво УРЕ, 1973.
6. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования.: Киев: Выща школа. Головное издательство, 1988. 431с.
7. Блехерман М. Х. Оперативно-производственное планирование гибких производственных систем. - М.: Высш. шк., 1989. - 95 с. .
8. Довбня Н. М., Кондратьев А. Н., Юревич Е. И. Роботизированные технологические комплексы в ГПС. - Л.: Машиностроениеб, 1990. - 303 с. .
9. Иванов, Г. Н., Тимошенко, Ю. Н. Применение ипи-технологий для проектирования многофункциональных гибких производственных систем (гпс).
10. Коровин Б. Г., Прокофьев Г. И., Рассудов Л. Н. Системы программного управления промышленными установками и робототехническими комплексами. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 352 с. .
11. Ткач, М. М., Кушніренко, О. В., Гуменний, Д. О., et al. Оптимізація управління запасами матеріальних ресурсів на підприємстві. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». 2013. Vol. 1, No. 22. С. 88–94.
12. Abba, G., Chaillet, N. Robot Dynamic Modeling Using a Power Flow Approach with Application to Biped Locomotion. *Autonomous Robots*. 1999. Vol. 6,

No. 1. C. 39–52.

13. Taga, G. A model of the neuro-musculo-skeletal system for anticipatory adjustment of human locomotion during obstacle avoidance. *Biological Cybernetics*. 1998. Vol. 78, No. 1. C. 9–17.

14. Aguiar, A. P., Hespanha, J. P., Kokotovic, P. V. Path-following for nonminimum phase systems removes performance limitations. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2005. Vol. 50, No. 2. C. 234–239.

15. Голубничий, Н. И., Зайцев, Г. Ф., Иващенко, М. А., et al. Голубничий Н. И. Беседы по автоматике: *Техніка*. Киев: 1971. 232с.

16. Стрижак, Т. Г. Метод усреднения в задачах механики: К. Донецк: Вища школа, 1984. 254с.

17. Burmeister, H. L. Bainov, D. D.; Simeonov, P. S., *Systems with Impulse Effect. Stability, Theory and Applications*. Chichester, Ellis Horwood Limited/John Wiley & Sons 1989. 255 pp., £ 39.95. ISBN 0-7458-0457-8/0-470-21437-6 (Ellis Horwood Series in Mathematics and its . ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1991. Vol. 71, No. 10. C. 419–419.

18. Arvidson, R. E., Bonitz, R. G., Robinson, M. L., et al. Results from the mars phoenix lander robotic arm experiment. *Journal of Geophysical Research E: Planets*. 2009. Vol. 114, No. 10. C. E00E02.

19. Buehler, M., E. Koditschek, D., J. Kindlmann, P. A Family of Robot Control Strategies for Intermittent Dynamical Environments. *IEEE Control Systems Magazine*. 1990. Vol. 10, No. 2. C. 16–22.

20. Larin, V. B. Problems of control of machines that walk. *International Applied Mechanics*. 1993. Vol. 29, No. 10. C. 868–872.

21. Morecki, A. *Modelling and Simulation of Human and Walking Robot Locomotion: Human and Machine Locomotion*. Vienna, Springer Vienna, 1997.

22. Скворцов Д. В. Клинический анализ движений. Анализ походки. – Иваново : Издательство НППЦ “Стимул”, 1996. – 344 с. .

23. Донской Д. Д. Биомеханика. – Москва : Просвещение, 1975. – 239 с. .

24. Chablat, D., Wenger, P. The Kinematic Analysis of a Symmetrical Three-Degree-of-Freedom Planar Parallel Manipulator. Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Ecole des Mines de Nantes. 2007.
25. Djoudi, D., Chevallereau, C., Aoustin, Y. Optimal Reference Motions for Walking of a Biped Robot: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 05. C. 2002–2007.
26. K., H. The Honda humanoid robot: *IEEE-RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems*, Grenoble, France , 97. C. 499–508.
27. Nubar, Y., Contini, R. A minimal principle in biomechanics. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1961. Vol. 23, No. 4. C. 377–391.
28. Крак Ю. В. Координационный подход к организации движения манипуляционных роботов // Проблемы управления и информатики. – 1995. – № 4. – С. 120–128. .
29. Aldebaran Robotics. Humanoid robotics & programmable robots: URL: <http://www.aldebaran.com/en>.
30. Arnold, V. I. *Mathematical Methods of Classical Mechanics*: Springer-Verlag. New York, NY: Springer New York, 1989. 520с.
31. Buss, M., Glocker, M., Hardt, M., et al. *Nonlinear Hybrid Dynamical Systems: Modeling, Optimal Control, and Applications: Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems*. 2002.
32. Кисленко, Ю. И. Тактильное очувствление шагающего робота. *Техническая кибернетика*. 1991. Vol. 6. C. 62–50.
33. Carlton, R., Bartholet, S. The evolution of the application of mobile robotics to nuclear facility operations and maintenance: *Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Institute of Electrical and Electronics Engineers. C. 720–726.
34. Shih, C.-L., Gruver, W. a., Lee, T.-T. Inverse kinematics and inverse dynamics for control of a biped walking machine. *Journal of Robotic Systems*. 1993. Vol. 10, No. 4. C. 531–555.
35. Shoemake, K. Animating rotation with quaternion curves. *ACM*

SIGGRAPH Computer Graphics. 1985. Vol. 19, No. 3. C. 245–254.

36. Taga, G. A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. *Biological Cybernetics*. 1995. Vol. 73, No. 2. C. 113–121.

37. Volpe, R. Rover functional autonomy development for the mars mobile science laboratory: *2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No.03TH8652)*, IEEE, 03. C. 2_643-2_652.

38. Berbyuk, V. Dynamics and Optimal Control Problems for Biotechnical Systems “Man-Prosthesis”. IUTAM Symposium on Interaction between Dynamics and Control in Advanced Mechanical Systems. 1997. C. 35–42.

39. Крак, Ю. В., Бармак, О. В., Єфімов, Г. М. Інформаційна технологія розпізнавання емоційної міміки на обличчі людини. *Штучний інтелект*. 2008. Vol. 1, No. 7. C. 102–109.

40. Adolfsson, J., Dankowicz, H., Nordmark, A. 3D passive walkers: Finding periodic gaits in the presence of discontinuities. *Nonlinear Dynamics*. 2001. Vol. 24, No. 2. C. 205–229.

41. Furusho, J., Sano, A. Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped. *The International Journal of Robotics Research*. 1990. Vol. 9, No. 2. C. 83–98.

42. Брискин, Е. С., Калинин, Я. В. О минимизации энергозатрат при движении шагающей машины с цикловыми движителями. *Искусственный интеллект (Украина)*. 2008. Vol. 4. C. 522–532.

43. Г. П., Г., Морейнис, И. Ш. Энергетическая оценка ходьбы человека в норме и на протезах бедра: *Биомеханика.*, Рига, 75. C. 228–232.

44. Ames, A. D., Gregg, R. D. Stably Extending Two-Dimensional Bipedal Walking to Three Dimensions: *2007 American Control Conference*, IEEE, Липень.07. C. 2848–2854.

45. Espinoza, C. A., Goodrich, J. A., Kugel, J. F. Characterization of the structure, function, and mechanism of B2 RNA, an ncRNA repressor of RNA polymerase II transcription. *RNA (New York, N.Y.)*. 2007. Vol. 13, No. 4. C. 583–96.

46. Perrin, D. Introduction. *Journal of Pragmatics*. 2003. Vol. 35, No. 6. C.

825–828.

47. Белецкий В. В. Двухногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. – Москва : Наука, 1984. – 228с. .

48. Бернштейн, Н. А. Бернштейн Н. А. О построении движений.: Москва: Медгиз, 1947. 254с.

49. Бордюг, Б. А., Ларин, В. Б., Тимошенко, А. Г. Задачи управления шагающими аппаратами: Киев: Наукова думка, 1985. 264с.

50. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. – Москва : Мир, 1976. – 543 с. .

51. Красовский Н. Н. Теория управления движением. – Москва : Наука, 1968. – 478 с. .

52. Espiau, B. BIP: A joint project for the development of an anthropomorphic biped robot: *International Conference on Advanced Robotics, Proceedings, ICAR*, 97. C. 267–272.

53. Ларин В. Б. Управление шагающими аппаратами. – Киев : Наукова думка, 1980. – 168с. .

54. Travis Deyle. KATE: A New Humanoid Robot from FutureBots Labs [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hizook.com/blog/2012/04/16/kate-new-humanoid-robot-futurebots-labs>. .

55. Volpe, R. 2014 Robotics Activities at JPL. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS). 2014. Vol. 8.

56. Benallegue, M., Laumond, J.-P., Berthoz, A. Contribution of actuated head and trunk to passive walkers stabilization: *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Травень.13. С. 5638–5643.

57. Chesse, S., Bessonnet, G. Optimal dynamics of constrained multibody systems. Application to bipedal walking synthesis: *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, IEEE, 01. С. 2499–2505.

58. Величенко, В. В. Матрично-геометрические методы в механике с приложениями к задачам робототехники: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.

279 с.

59. Охоцимский, Д. Е., Голубев, Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата: Москва: Наука, 1984. 310с.

60. Белецкий В. В., Бербюк В. Е., Самсонов В. А. Параметрическая оптимизация движений двуногого шагающего аппарата // Изв. АН СССР, МТТ. – 1982. – №1. – С. 28–40. .

61. Wollherr, D., Hardt, M., Buss, M., et al. Actuator selection and hardware realization of a small and fast-moving, autonomous humanoid robot: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, IEEE, 02. С. 2491–2496.

62. Koopman, B., Grootenboer, H. J., Jongh, H. J. de. An inverse dynamics model for the analysis, reconstruction and prediction of bipedal walking. *Journal of Biomechanics*. 1995. Vol. 28, No. 11. С. 1369–1376.

63. Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M. Robot Modeling and Control. *IEEE Control Systems*. 2006. Vol. 26, No. 6. С. 113–115.

64. Hill, J., Fahimi, F. Active disturbance rejection for walking bipedal robots using the acceleration of the upper limbs. *Robotica*. 2015. Vol. 33, No. 2. С. 264–281.

65. McGeer, T. Passive walking with knees: *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE Comput. Soc. Press, 90. С. 1640–1645.

66. Vallejos, P., Ruiz-Del-Solar, J., Swett, F. A new methodology for the design of passive biped robots: Determining conditions on the robot's parameters for the existence of stable walking cycles. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. 2011. Vol. 63, No. 3–4. С. 503–523.

67. Fong, M. Mechanical Design of a Simple Bipedal Robot: Massachusetts Institute of Technology. 55с.

68. Ott, C., Dietrich, A., Albu-Schäffer, A. Prioritized multi-task compliance control of redundant manipulators. *Automatica*. 2015. Vol. 53. С. 416–423.

69. Butterfaß, Jörg, Markus Grebenstein, Hong Liu, and Gerd Hirzinger.

«DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand.» In Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on, vol. 1, pp. 109-114. IEEE, 2001. .

70. Zielińska, T. Coupled oscillators utilised as gait rhythm generators of a two-legged walking machine. Biological Cybernetics. 1996.

71. Oort, G. van, Carloni, R., Borgerink, D. J., et al. An energy efficient knee locking mechanism for a dynamically walking robot: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Травень.11. С. 2003–2008.

72. Eadweard, M. Animal locomotion: New York: Da Capo Press, 1969.

73. Goswami, A. Postural Stability of Biped Robots and the Foot-Rotation Indicator (FRI) Point. The International Journal of Robotics Research. 1999. Vol. 18, No. 6. С. 523–533.

74. Al-Shuka, H. F. N., Allmendinger, F., Corves, B., et al. Modeling, stability and walking pattern generators of biped robots: a review. Robotica. 2013. No. December 2013. С. 1–28.

75. Albert, A., Gerth, W. Analytic path planning algorithms for bipedal robots without a trunk. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications. 2003. Vol. 36, No. 2. С. 109–127.

76. Raibert, M. H., Tello, E. R. Legged Robots That Balance. IEEE Expert. 2008. Vol. 1, No. 4. С. 89–89.

77. A. Pratt, G., Pratt, J. Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots: Massachusetts Institute of Technology. 154c.

78. Pratt, J. E., Pratt, G. A. Exploiting natural dynamics in the control of a 3d bipedal walking simulation: *In In Proc. of Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR99)*, 99.

79. Betts, J., Kolmanovsky, I. Practical Methods for Optimal Control using Nonlinear Programming. Applied Mechanics Reviews. 2002. Vol. 55, No. 4. С. B68–B68.

80. Grizzle, J. W., Westervelt, E. R., Canudas-de-Wit, C. Event-based PI

control of an underactuated biped walker: *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No.03CH37475)*, Maui, HI, USA , IEEE, 03. C. 3091–3096.

81. Tedrake, R. LQR-trees: Feedback motion planning on sparse randomized trees: *Robotics: Science and Systems V*, Robotics: Science and Systems Foundation, 28.Червень.09.

82. Zykov, V., Bongard, J., Lipson, H. *Evolving Dynamic Gaits on a Physical Robot*. 2004. Vol. 4.

83. Manoonpong, P., Pasemann, F., Roth, H. Modular Reactive Neurocontrol for Biologically Inspired Walking Machines. *The International Journal of Robotics Research*. 2007. Vol. 26, No. 3. C. 301–331.

84. DIMITRIJEVIC, M. R., GERASIMENKO, Y., PINTER, M. M. Evidence for a Spinal Central Pattern Generator in Humansa. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1998. Vol. 860, No. 1 NEURONAL MECH. C. 360–376.

85. Righetti, L., Auke Jan Ijspeert. Programmable central pattern generators: an application to biped locomotion control: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, IEEE, 06. C. 1585–1590.

86. Hobbelen, D. G. E., Wisse, M. A Disturbance Rejection Measure for Limit Cycle Walkers: The Gait Sensitivity Norm. *IEEE Transactions on Robotics*. 2007. Vol. 23, No. 6. C. 1213–1224.

87. Shih, C.-L., Lee, W.-Y., Wu, C.-P. Planning and Control of Stable Walking for a 3D Bipedal Robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2012. Vol. 9, No. 2. C. 47.

88. Latash, M. L., Scholz, J. P., Schnier, G. Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor Variability. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. 2002. Vol. 30, No. 1. C. 26–31.

89. Sreenath, K., Park, H.-W., Poulakakis, I., et al. A Compliant Hybrid Zero Dynamics Controller for Stable, Efficient and Fast Bipedal Walking on MABEL. *The International Journal of Robotics Research*. 2011. Vol. 30, No. 9. C. 1170–1193.

90. Blickhan, R. The spring-mass model for running and hopping. *Journal of Biomechanics*. 1989. Vol. 22, No. 11–12. C. 1217–1227.
91. Nelson, G., Saunders, A., Neville, N., et al. PETMAN: A Humanoid Robot for Testing Chemical Protective Clothing. *Journal of the Robotics Society of Japan*. 2012. Vol. 30, No. 4. C. 372–377.
92. Kuindersma, S., Deits, R., Fallon, M., et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Autonomous Robots*. 2016. Vol. 40, No. 3. C. 429–455.
93. Chow, C. K., Jacobson, D. H. Studies of human locomotion via optimal programming. *Mathematical Biosciences*. 1971. Vol. 10, No. 3–4. C. 239–306.
94. Алексеев В. М., Тихомиров В. М., Фомин С. В. Оптимальное управление. – Москва : Наука, 1979. – 432 с. .
95. Waldron, K. J. Design of Walking Machines: Human and Machine Locomotion. Vienna, Springer Vienna, 1997.
96. Wisse, M., Linde, R. Q. van der. Passive dynamic walking. *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 2007. Vol. 34. C. 7–24.
97. Altendorfer, R., Koditschek, D. E., Holmes, P. Stability Analysis of Legged Locomotion Models by Symmetry-Factored Return Maps. *The International Journal of Robotics Research*. 2004. Vol. 23, No. 10–11. C. 979–999.
98. Winter, D. A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement: *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
99. Tzafestas, S. G., Krikochoritis, T. E., Tzafestas, C. S. Robust Sliding-mode Control of Nine-link Biped Robot Walking. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. 1997. Vol. 20, No. 2–4. C. 375–402.
100. Yuksel, B., Leblebicioğlu, K. Toward the enhancement of biped locomotion and control techniques: walking pattern classification. *Artificial Life and Robotics*. 2011. Vol. 16, No. 2. C. 208–213.
101. Kajita, S., Tani, K., Kobayashi, A. Dynamic walk control of a biped robot along the potential energy conserving orbit: *IEEE International Workshop on*

Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications, IEEE, 90. C. 789–794.

102. Kajita, S., Tani, K. Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain-theory and basic experiment: *Fifth International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments*, IEEE, 91. C. 741–746 vol1.

103. Hurmuzlu, Y. Dynamics of bipedal gait: Part I-objective functions and the contact event of a planar five-link biped. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*. 1993. Vol. 60, No. 2. C. 331–336.

104. Bay, J. S., Hemami, H. Modeling of a Neural Pattern Generator with Coupled nonlinear Oscillators. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1987. Vol. BME-34, No. 4. C. 297–306.

105. Jalics, L., Hemami, H., Zheng, Y. F. Pattern generation using coupled oscillators for robotic and biorobotic adaptive periodic movement: *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 97. C. 179–184 vol1.

106. Benbrahim, H., Franklin, J. a. Biped dynamic walking using reinforcement learning. *Robotics and Autonomous Systems*. 1997. Vol. 22, No. 3–4. C. 283–302.

107. Kurematsu, Y., Maeda, T., Kitamura, S. Autonomous trajectory generation of a biped locomotive robot using neuro oscillator: *IEEE International Conference on Neural Networks*, IEEE, 93. C. 1961–1966.

108. Brotman, L. S., Netravali, A. N. Motion interpolation by optimal control. *Computer Graphics (ACM)*. 1988. Vol. 22, No. 4. C. 309–315.

109. Silva, F. M., Machado, J. A. T. Kinematic aspects of robotic biped locomotion systems: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 97. C. 266–271.

110. Shih, C. L. Ascending and descending stairs for a biped robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*. 1999. Vol. 29, No. 3. C. 255–268.

111. Qiang Huang, Kajita, S., Koyachi, N., et al. A high stability, smooth walking pattern for a biped robot: *Proceedings 1999 IEEE International Conference*

on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C), IEEE, 99. C. 65–71.

112. Qiang Huang, Yokoi, K., Kajita, S., et al. Planning walking patterns for a biped robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2001. Vol. 17, No. 3. C. 280–289.

113. Ding, D., Pan, Z., Dominic, C., et al. Process Planning Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing Dong-Hong. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2011. Vol. 88.

114. Богданов, В. А. Элементы биомеханики тела человека: Физиология движений. Л.: Наука, 1976.

115. Hemami, H., Farnsworth, R. Postural and gait stability of a planar five link biped by simulation. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1977. Vol. 22, No. 3. C. 452–458.

116. Dasgupta, A., Nakamura, Y. Making feasible walking motion of humanoid robots from human motion capture data. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1999. Vol. 2. C. 1044–1049.

117. Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., et al. The development of Honda humanoid robot. *Robotics and Automation*, 1998. *Proceedings*. 1998 IEEE International Conference on. 1998.

118. Shih, C. L., Li, Y. Z., Churng, S., et al. Trajectory synthesis and physical admissibility for a biped robot during the single-support phase: *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE Comput. Soc. Press, 90. C. 1646–1652.

119. Lum, H. K., Zribi, M., Soh, Y. C. Planning and control of a biped robot. *International Journal of Engineering Science*. 1999. Vol. 37, No. 10. C. 1319–1349.

120. Plestan, F., Grizzle, J. W., Westervelt, E. R., et al. Stable walking of a 7-dof biped robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2003. Vol. 19, No. 4. C. 653–668.

121. Capi, G., Kaneko, S., Mitobe, K., et al. Optimal trajectory generation for a prismatic joint biped robot using genetic algorithms. *Robotics and Autonomous Systems*. 2002. Vol. 38, No. 2. C. 119–128.

122. Chevallereau, C., Aoustin, Y. Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot. *Robotica*. 2001. Vol. 19, No. 5. C. 557–569.
123. Hopkins, S. H., Pham, D. T. Derivation of optimal walking motions for a bipedal walking robot. *Robotica*. 1992. Vol. 10, No. 2. C. 165–172.
124. Vijayachandran, L. S., Viola, C., Garzoni, F., et al. Robots, pipelines, polyproteins: Enabling multiprotein expression in prokaryotic and eukaryotic cells. *Journal of Structural Biology*. 2011. Vol. 175, No. 2. C. 198–208.
125. Silva, F. M., Machado, J. A. T. Towards efficient biped robots: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 98. C. 394–399.
126. Shih, C. L., Zhu, Y., Gruver, W. A. Optimization of the biped robot trajectory: *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 91. C. 899–903.
127. Shih, C. L. Inverted pendulum-like walking pattern of a 5-link biped robot: *International Conference on Advanced Robotics, Proceedings, ICAR*, 97. C. 83–88.
128. Rostami, M., Bessonnet, G. Impactless sagittal gait of a biped robot during the single support phase: *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, IEEE, 98. C. 1385–1391.
129. Cheng, M.-Y., Lin, C.-S. Genetic algorithm for control design of biped locomotion. *Journal of Robotic Systems*. 1997. Vol. 14, No. 5. C. 365–373.
130. Lee, J. Y., Lee, J. J. Optimal walking trajectory generation for a biped robot using multi-objective evolutionary algorithm: *2004 5th Asian Control Conference*, 04. C. 357–364.
131. Jung Han Yoon, Ohung Kwon, Je Sung Yeon, et al. Optimal trajectory generation of serially-linked parallel biped robots: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, IEEE, 06. C. 1610–1615.
132. Hase, T., Huang, Q. Energy-efficient trajectory planning using inequality state constraint for biped walking robot with upper body mass: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 06. C. 5913–5918.

133. Lawton, D. T., Arkin, R. C., Cameron, J. M. Qualitative spatial understanding and reactive control for autonomous robots: *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications*, IEEE, 90. C. 709–714.

134. Nagurka, M. L., Yen, V. Fourier-Based Optimal Control of Nonlinear Dynamic Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 1990. Vol. 112, No. 1. C. 17–26.

135. Каргинов, Л. А. The synthesis of control actions to drive the actuators of walking robots without solving the inverse kinematics task. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. No. 17.

136. Савин, С., Savin, S., Ворочаева, Л., et al. Analysis of control methods and algorithms for walking robots taking into account the nonlinear properties of the robot sensor system. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2019. C. 136–144.

137. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Walking pattern generation method for an exoskeleton moving on uneven terrain: *Human-Centric Robotics*, World scientific, ЖОВТЕНЬ.17. C. 13–20.

138. Jatsun, S., Savin, S., Yatsun, A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP Method for Trajectory Generation: *Proceedings of the 5th International Workshop on Medical and Service Robots MESROB 2016*. 2018.

139. Araffa, K., Tkach, M., Yu., K. Applying the forward kinematic of the biped robot with 12 DOF based denavit and hartenberg method. *Сучасний захист інформації*. 2019. Vol. 1, No. 37. C. 36–47.

140. Ali, M. A., Park, H. A., Lee, C. S. G. Closed-form inverse kinematic joint solution for humanoid robots: *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, ЖОВТЕНЬ.10. C. 704–709.

141. Thavai, R. R., kumar Kadam, S. N. Inverse Kinematics Solution for Biped Robot. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JCME)*. 2015. Vol. 12, No. 1. C. 57–62.

142. Dasgupta, B., Choudhury, P. General strategy based on the Newton-Euler approach for the dynamic formulation of parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*. 1999.

143. Kane, T. R., Levinson, D. A. The Use of Kane's Dynamical Equations in Robotics. *The International Journal of Robotics Research*. 1983.

144. Kane, T. R., Levinson, D. A. The Use of Kanes's Dynamical Equations in Robotics. *The International Journal of Robotics Research*. 1983. Vol. 2. No. 3. C. 3–21.

145. Jia, Y., Luo, X., Han, B., et al. Stability Criterion for Dynamic Gaits of Quadruped Robot. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, No. 12. C. 2381.

146. Ha, T., Choi, C.-H. An effective trajectory generation method for bipedal walking. *Robotics and Autonomous Systems*. 2007. Vol. 55, No. 10. C. 795–810.

147. Красовский, Н. Н. Теория управления движением: Москва: Наука, 1968. 478с.

148. Стоян, В. . Математичне моделювання прямих та обернених задач динаміки систем з розподіленими параметрами: Київ: ВПЦ "Київський університет, 2011. 319с.

149. Bandura, A., McClelland, D. Social Foundations of Thought and Action: A social cognitive theory. *Social Learning Theory*. 1977. No. October. C. 12–29.

150. Hardt, M., Stryk, O. von. Dynamic modeling in the simulation, optimization, and control of bipedal and quadrupedal robots. *ZAMM*. 2003. Vol. 83, No. 10. C. 648–662.

151. Hatze, H. The complete optimization of a human motion. *Mathematical Biosciences*. 1976. Vol. 28, No. 1–2. C. 99–135.

152. Baïnov, D., Simeonov, P. S., Bainov, D., et al. Systems with impulse effect : stability, theory, and applicationsChichester: Ellis Horwood, 89. C. 255.

153. Tkach, M., Araffa, K., Humennyi, D. Review The Methods And Approaches For Planning Trajectory Biped Walking Biped Robot And Introduce A New Concept For Maintaining The Highest Safety Factor On Uneven Terrain During Dynamic Walking. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2016. Vol. 2,

No. 29. C. 3–12.

154. Araffa H.; Tkach M. Analytical Method Of Formation Of A Trajectory Of Motion Of Anthropomorphic Walking Apparatus. VISNYK of Kherson National Technical University. 2019. Vol. 69, No. 69. C. 134–138.

155. Kajita, S., Tani, K. Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain-theory and basic experiment: *Fifth International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments*, IEEE, 02. C. 741–746 vol 1.

156. Araffa, K. Planning Trajectory of Anthropomorphic Walking Robot (Biped Robot). *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2019. Vol. 24, No. 2. C. 51–55.

157. Dalen, S. J. Van. A Linear Inverted Pendulum Walk Implemented on TULip: 84 c.

158. Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., et al. The 3D linear inverted pendulum mode: a simple modeling for a biped walking pattern generation: *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180)*, IEEE, 02. C. 239–246.

159. Berbuyk, V. E., Boström, A. E., Lytwyn, B. A., et al. Optimization of control laws of the bipedal locomotion systems: *In Advances in Computational Multibody Dynamics*, Lisbon, Portugal , 99. C. 703–728.

160. Araffa, Kh., Tkach, M. Implementation and simulation a model predictive control for motion generation of biped robot. Адаптивні системи автоматичного управління. 2019. Vol. 2, No. 35. C. 3–12.

161. James Tsay, T., Lai, C. H. Design and Control of a Humanoid Robot: *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, ЖОВТЕНЬ.06. C. 2002–2007.

162. Selyukov, A., Araffa, K., Khlaponin, Y., et al. Compensator of Trajectory Instabilities of Aviation Radar with Aperture Synthesis: *2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, IEEE, ЖОВТЕНЬ.19. C. 727–731.

163. О.Рудніцька, Араффа, Х. централізована система управління розподіленими кіберфізичними системами. Вісник Інженерної академії України. 2019. Vol. 1. С. 83–88.

164. Stenin A., Lisovichenko O., Drozdovych I., Soldatova M., Araffa Kh. Methods of reducing the dimension of technical dynamic systems. *Bulgarian Journal for Engineering Design*. 2020. No. 42. P. 176–179 (запропоновано метод агрегації змінних стану динамічних систем).

Додаток А

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ТОВ «СВІТ САЙТІВ»

 О. В. Лапань
 2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів науково-дослідної роботи

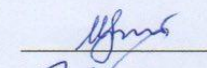
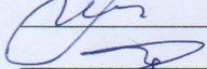

Ми, що нижче підписалися, представники НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» завідувач кафедри технічної кібернетики д.т.н., професор Пархомей І. Р., к.т.н., доцент Ткач М. М., здобувач Араффа Х. О. з однієї сторони

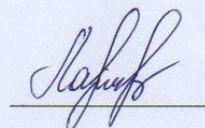
та ТОВ «СВІТ САЙТІВ» 04070, м. Київ, вул. Притисько-Микільська, б. 2, кв. 24 в особі директора Лапань О. В. з іншої сторони

склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Араффи Хальдуна Османа за темою «Автоматизація процесів планування та стабілізації руху антропоморфного крокуючого апарату (АКА)» використовуються під час проектування систем управління крокуючими роботами.

Назва упровадженого результату	Досягнутий фактичний результат	
	Соціальний, технічний, організаційний тощо.	Економічний (грн за рік)
«Автоматизація процесів планування та стабілізації руху антропоморфного крокуючого апарату (АКА)»	Застосовано розроблений алгоритм стабілізації руху АКА в умовах невизначеності рельєфу місцевості на основі МРС-підходу, що дозволяє усунути негативні наслідки ефекту запізнювання в початковій стадії процесу руху АКА при використанні традиційних підходів.	Не розраховувався

Від НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» Від ТОВ «СВІТ САЙТІВ»

 І. Р. Пархомей
 М. М. Ткач
 Х. О. Араффа

 О. В. Лапань

Додаток Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан Факультету інформатики та
обчислювальної техніки НТУУ «КПІ»


С. Ф. Теленик
«29» січня 2020 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

та Директор Інституту новітніх технологій та
лідерства НАУ


ІНСТИТУТ
НОВІТНІХ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ЛІДЕРСТВА
НАУ
«29» січня 2020 р.

К. О. Бабікова

2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, представники НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» завідувач кафедри технічної кібернетики д.т.н., професор Пархомей І. Р., к.т.н., доцент Ткач М. М., здобувач Араффа Х. О. з однієї сторони

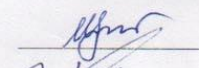
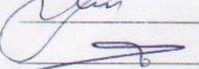

та представники Національного авіаційного університету 03058, м. Київ, пр. Любомира Гузара, 1


директор Інституту новітніх технологій та лідерства, к.с.-г.н., доцент Бабікова К. О., к.т.н. Писанко Я. І., к.г.н. Сплодитель А. О. з іншої сторони

склали цей акт про те, що результати наукової тематики «Антропоморфний роботизований транспортний засіб для розвантаження людини в умовах підвищеного ризику та невизначеності рельєфу місцевості» (державний реєстраційний номер 0117U001179) у вигляді дисертаційної роботи Араффи Хальдуна Османа за темою «Автоматизація процесів планування та стабілізації руху антропоморфного крокуючого апарату (АКА)» використовуються в науково-дослідній роботі студентів наукових груп Інституту новітніх технологій та лідерства НАУ.

Назва упровадженого результату	Досягнутий фактичний результат	
	Соціальний, технічний, організаційний тощо.	Економічний (грн за рік)
«Автоматизація процесів планування та стабілізації руху антропоморфного крокуючого апарату (АКА)»	Результати дисертаційної роботи використовуються в науково-дослідній роботі студентської групи наукового напрямку «Комп'ютерні науки та інформаційні технології»	Не розраховувався

Від НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»

 І. Р. Пархомей
 М. М. Ткач
 Х. О. Араффа

 К. О. Бабікова
 Я. І. Писанко
 А. О. Сплодитель

Додаток В

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан ФІОТ

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»



С. Ф. Теленик

«19» лютого 2020 р.

АКТ

про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи Араффи Хальдуна Османа на тему: «Автоматизація процесів планування та стабілізації руху антропоморфного крокуючого апарату (АКА)»

Комісія у складі:

Голови:

д.т.н., доцент, завідувач кафедри технічної кібернетики Пархомей І. Р.

Членів комісії:

к.т.н., доцент Лісовиченка О. І.

к.т.н., доцент Паська В. П.

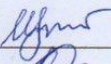
к.т.н., доцент Ткача М. М.

склала цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Араффи Х. О. у навчальний процес кафедри технічної кібернетики НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» для підготовки лекційних матеріалів та методичних вказівок до виконання комп'ютерного практикуму з дисципліни «Оптимальні системи управління».

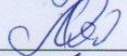
Склад впровадження:

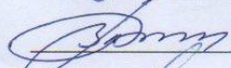
- стратегія управління точки центру мас апарата ефективно застосована для управління кутовою складовою консолі механічного захватного пристрою;
- критерії дотримання усталеного руху апарата враховано при проектуванні кінцевого ефектора механічного захватного пристрою.

Голова комісії

 І. Р. Пархомей

Члени комісії

 О. І. Лісовиченко

 В. П. Пасько

 М. М. Ткач

Додаток Г

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Tkach M., Araffa Kh., Humennyi D. Review The methods and approaches for planning trajectory biped walking biped robot and introduce a new concept for maintaining the highest safety factor on uneven terrain during dynamic walking. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2016. Vol. 2, Issue 29. P. 3–12 (вирішена задача знаходження абсолютного положення стопи двоногого робота з найбільшим запасом стійкості).
2. Araffa Kh. Planning trajectory of anthropomorphic walking robot (biped robot). *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2019. Vol. 24, No. 2. P. 51–55 (запропоновано підхід до генерації траєкторії руху АКА з використанням тривимірного лінійного перевернутого маятника, яка утримує точку нульового моменту).
3. Araffa H., Tkach M. Analytical method of formation of a trajectory of motion of anthropomorphic walking apparatus. *Visnyk of Kherson National Technical University*. 2019. Vol. 69, Issue 2. P. 134–138 (сформовано розрахункову (опорну) траєкторію руху АКА і руху уздовж неї).
4. Araffa Kh., Tkach M., Khlaponin Yu. Applying the forward kinematic of the biped robot with 12 DOF based denavit and hartenberg method. *Сучасний захист інформації*. 2019. Vol. 37, Issue 1. P. 36–47 (сформовано кінематичну модель руху АКА на основі методу Денавіта-Хартенберга).
5. Selyukov A., Araffa Kh., Khlaponin Y., Lialina N. Compensator of trajectory instabilities of aviation radar with aperture synthesis. *Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2019. P. 727–731 (запропоновано спосіб компенсації траєкторії руху з апертурним синтезом).
6. Рудніцька О., Араффа Х. Централізована система управління розподіленими кіберфізичними системами. *Вісник Інженерної академії*

України. 2019. Вип. 1. С. 83–88 (*розглянуті принципи декомпозиції динамічних компонентів руху кіберфізичних систем*).

7. Araffa Kh., Tkach M. Implementation and Simulation A Model Predictive Control for Motion Generation of Biped Robot. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2019. Vol. 2, No. 35. P. 3–12 (*синтезовано систему управління для стабілізації траєкторії центру мас і точки нульового моменту за допомогою MPC-підходу*).

8. Stenin A., Lisovichenko O., Drozdovych I., Soldatova M., Araffa Kh. Methods of reducing the dimension of technical dynamic systems. *Bulgarian Journal for Engineering Design*. 2020. No. 42. P. 176–179 (*запропоновано метод агрегації змінних стану динамічних систем*).

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Araffa Kh. Planning trajectory for the lower limbs of bipedal robot using inverted pendulum: матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій» (м. Тернопіль, 20–21 червня 2019 року). Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. С. 163–164 (*запропоновано метод планування траєкторії руху АКА за допомогою 3D-LIPM моделі*).

10. Araffa Kh. Controlling Stability Walking of Biped Robot on Uneven Terrain Based On CMP. *Наука – майбутнє України: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції* (м. Вінниця, 24 березня 2017 року). Вінниця, 2017. С. 4–5 (*сформовано опорну траєкторію стійкого руху АКА*).

11. Araffa Kh. Overview strategy of position controlling of bipedal robot (АКА). *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: Міжнародна наукова інтернет-конференція* (м. Тернопіль, 13 вересня 2019 року). Випуск 41, 2019. С. 94–96 (*запропоновано алгоритм управління рухом АКА на нерівній місцевості*).

12. Араффа Х. Задача планирования траектории движения антропоморфного шагающего аппарата. *Інформаційне суспільство:*

технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: Міжнародна наукова інтернет-конференція (м. Тернопіль, 11 червня 2019 року). Випуск 39, 2019. С. 117–118. (*визначені основні фази руху АКА*)

Додаток Д

Пряма кінематика

$$\begin{aligned}
 T(1, 1) &= S(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_8)(S(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + \dots q_4 + q_5) S(q_2)) \\
 &\quad + S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) C(q_8)) + C(q_9 + q_{10} + q_{11})(C(q_1 - \dots q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) - S(q_1 - \\
 &\quad q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2))). \\
 T(1, 2) &= C(q_{12})(C(q_8)(S(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + \dots q_5) S(q_2)) - S(q_3 + \\
 &\quad q_4 + q_5) C(q_2) S(q_8)) - S(q_{12})(C(q_9 + q_{10} + \dots q_{11})(S(q_8)(S(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + \\
 &\quad C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2)) + \dots S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) C(q_8)) - S(q_9 + q_{10} + \\
 &\quad q_{11})(C(q_1 - q_7) C(q_3 + \dots q_4 + q_5) - S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2))). \\
 T(1, 3) &= -S(q_{12})(C(q_8)(S(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + \dots q_5) S(q_2)) - S(q_3 + \\
 &\quad q_4 + q_5) C(q_2) S(q_8)) - C(q_{12})(C(q_9 + q_{10} + \dots q_{11})(S(q_8)(S(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + \\
 &\quad C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + \dots q_5) S(q_2)) + S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) C(q_8)) - S(q_9 + q_{10} + \\
 &\quad q_{11})(C(q_1 - \dots q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) - S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2))). \\
 T(1, 4) &= 0 \\
 T(2, 1) &= S(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + \dots q_5) S(q_2) S(q_3))) + S(q_1 - \\
 &\quad q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) - C(q_8)(C(q_3) S(q_2) + \dots C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) S(q_3))) - C(q_9 + \\
 &\quad q_{10} + q_{11})(S(q_1 - \dots q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) - C(q_1 - q_7) S(q_3 + \dots \\
 &\quad q_4 + q_5) S(q_3))). \\
 T(2, 2) &= C(q_{12})(C(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3))) + \dots S(q_1 - q_7) S(q_3 + \\
 &\quad q_4 + q_5) S(q_3)) + S(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + \dots q_4 + q_5) C(q_2) S(q_3))) - S(q_{12})(S(q_9 + q_{10} \\
 &\quad + q_{11})(S(q_1 - \dots q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) - C(q_1 - q_7) S(q_3 + \dots q_4 \\
 &\quad + q_5) S(q_3)) + C(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) \\
 &\quad S(q_3)) + S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) - \dots C(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) \\
 &\quad S(q_3)))). \\
 T(2, 3) &= -S(q_{12})(C(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3))) + \dots S(q_1 - q_7) S(q_3 + \\
 &\quad q_4 + q_5) S(q_3)) + S(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + \dots q_4 + q_5) C(q_2) S(q_3))) - C(q_{12})(S(q_9 + \\
 &\quad q_{10} + q_{11})(S(q_1 - \dots q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) - C(q_1 - q_7) S(q_3 + \dots \\
 &\quad q_4 + q_5) S(q_3)) + C(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - \dots C(q_3 + q_4 + q_5) \\
 &\quad S(q_2) S(q_3)) + S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) - \dots C(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + q_5) \\
 &\quad C(q_2) S(q_3)))). \\
 T(2, 4) &= -S(q_{12})(C(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3))) + \dots S(q_1 - q_7) S(q_3 + \\
 &\quad q_4 + q_5) S(q_3)) + S(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + \dots q_4 + q_5) C(q_2) S(q_3))) - C(q_{12})(S(q_9 + \\
 &\quad q_{10} + q_{11})(S(q_1 - \dots q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) - C(q_1 - q_7) S(q_3 + \dots \\
 &\quad q_4 + q_5) S(q_3)) + C(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - \dots C(q_3 + q_4 + q_5) \\
 &\quad S(q_2) S(q_3)) + S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) - \dots C(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + q_5) \\
 &\quad C(q_2) S(q_3)))). \\
 T(2, 4) &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T(3, 1) &= C(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) + \dots C(q_1 - q_7) \\
&\quad S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) - S(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - \dots q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + \\
&\quad q_5) C(q_3) S(q_2)) - S(q_1 - q_7) S(q_3 + \dots q_4 + q_5) C(q_3)) - C(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + \\
&\quad q_5) C(q_2) C(q_3))). \\
T(3, 2) &= S(q_{12})(S(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + \dots q_5) C(q_3) S(q_2)) + C(q_1 \\
&\quad - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) + C(q_9 + q_{10} + \dots q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + \\
&\quad q_5) C(q_3) S(q_2)) - \dots S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) - C(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + \\
&\quad q_4 + \dots q_5) C(q_2) C(q_3)))) - C(q_{12})(C(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + \dots q_4 + q_5) \\
&\quad C(q_3) S(q_2)) - S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) + \dots S(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) \\
&\quad C(q_2) C(q_3))). \\
T(3, 3) &= S(q_{12})(C(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) - \dots S(q_1 - q_7) S(q_3 + \\
&\quad q_4 + q_5) C(q_3)) + S(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + \dots q_4 + q_5) C(q_2) C(q_3))) + C(q_{12})(S(q_9 + \\
&\quad q_{10} + q_{11})(S(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + \dots C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + \\
&\quad q_4 + q_5) C(q_3)) + C(q_9 + \dots q_{10} + q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + q_5) \\
&\quad C(q_3) S(q_2)) - \dots S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) - C(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + \dots \\
&\quad q_5) C(q_2) C(q_3))). \\
T(3, 4) &= 0 \\
T(4, 1) &= l_9 z(C(q_9)(S(q_8)(S(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + \dots q_5) S(q_2)) + S(q_3 + \\
&\quad q_4 + q_5) C(q_2) C(q_8)) - S(q_9)(C(q_1 - q_7) C(q_3 + \dots q_4 + q_5) - S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) \\
&\quad S(q_2))) - l_3 z S(q_4 + q_5) + \dots l_{12} z(S(q_{12})(C(q_8)(S(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + C(q_1 - q_7) \\
&\quad S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2)) - S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) S(q_8)) + C(q_{12})(C(q_9 + q_{10} + \dots \\
&\quad q_{11})(S(q_8)(S(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2)) + \dots S(q_3 + q_4 + \\
&\quad q_5) C(q_2) C(q_8)) - S(q_9 + q_{10} + q_{11})(C(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + \dots q_5) - S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 \\
&\quad + q_5) S(q_2)))) + l_{11} z(C(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_8)(S(q_1 - \dots q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + C(q_1 - q_7) \\
&\quad S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2)) + S(q_3 + q_4 + \dots q_5) C(q_2) C(q_8)) - S(q_9 + q_{10} + q_{11})(C(q_1 - q_7) \\
&\quad C(q_3 + q_4 + q_5) - S(q_1 - \dots q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2))) - l_4 z S(q_5) + l_{10} z(C(q_9 + \\
&\quad q_{10})(S(q_8)(S(q_1 - \dots q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2)) + S(q_3 + q_4 + \\
&\quad \dots q_5) C(q_2) C(q_8)) - S(q_9 + q_{10})(C(q_1 - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) - S(q_1 - q_7) S(q_3 + \dots q_4 + \\
&\quad q_5) S(q_2))) + 2l_0 y(C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_1) + S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_1) S(q_2)) + \dots l_8 z(S(q_8)(S(q_1 \\
&\quad - q_7) C(q_3 + q_4 + q_5) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2)) + \dots S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) C(q_8)) \\
&\quad - l_2 z S(q_3 + q_4 + q_5) - l_1 z S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) + \dots l_7 z S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2)). \\
T(4, 2) &= l_8 z(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) + S(q_1 - \dots q_7) S(q_3 + q_4 \\
&\quad + q_5) S(q_3)) - C(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) S(q_3))) + \dots 2l_0 y(C(q_1)(C(q_2) \\
&\quad C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) + S(q_3 + q_4 + \dots q_5) S(q_1) S(q_3)) + l_{11} z(S(q_9 + q_{10} + \\
&\quad q_{11})(S(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + \dots q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) - C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) \\
&\quad S(q_3)) + C(q_9 + q_{10} + \dots q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) \\
&\quad + S(q_1 - \dots q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) - C(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) S(q_3))))
\end{aligned}$$

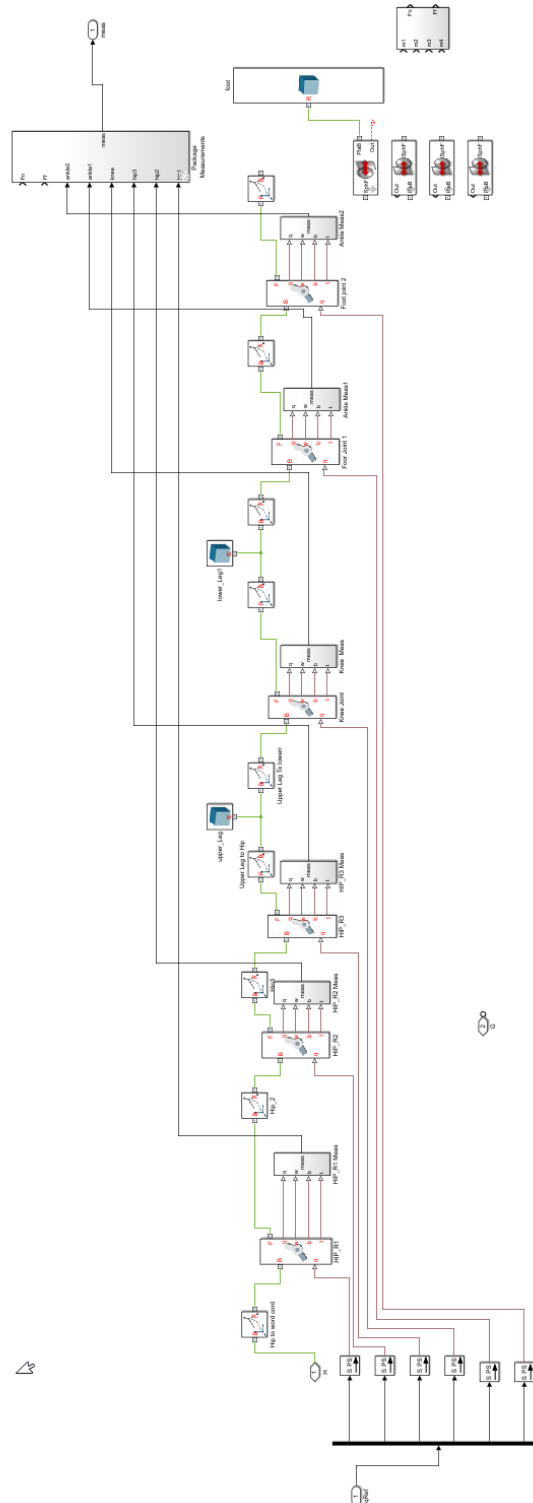
$$\begin{aligned}
& + \dots 11z(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) S(q_3)) - 17z(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + \dots q_5) \\
& C(q_2) S(q_3)) + 110z(C(q_9 + q_{10})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + \dots q_4 + q_5) S(q_2) \\
& S(q_3)) + S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) - C(q_8)(C(q_3) S(q_2) + \dots C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) \\
& S(q_3))) + S(q_9 + q_{10})(S(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - \dots C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) - C(q_1 - \\
& q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3))) + \dots 112z(S(q_{12})(C(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + \\
& q_5) S(q_2) S(q_3)) + \dots S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) + S(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + \dots \\
& \dots q_5) C(q_2) S(q_3))) + C(q_{12})(S(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - \dots C(q_3 + q_4 + \\
& q_5) S(q_2) S(q_3)) - C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) + C(q_9 + q_{10} + \dots q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - \\
& q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) + S(q_1 - \dots q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) - \\
& C(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) S(q_3)))) + \dots 15z(S(q_3) + 19z(S(q_9)(S(q_1 - \\
& q_7)(C(q_2) C(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) - \dots C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3)) + \\
& C(q_9)(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) C(q_3) - \dots C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_2) S(q_3)) + S(q_1 - q_7) S(q_3 + \\
& q_4 + q_5) S(q_3)) - \dots C(q_8)(C(q_3) S(q_2) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) S(q_3)))) + 13z C(q_4 + q_5) \\
& S(q_3) + 14z C(q_5) S(q_3) + 12z C(q_3 + q_4 + q_5) S(q_3).
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T(4, 3) = & 13z - 18z(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) - \dots S(q_1 - q_7) S(q_3 \\
& + q_4 + q_5) C(q_3)) - C(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + \dots \\
& q_5) C(q_2) C(q_3))) - 111z(S(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + \dots C(q_3 + q_4 + q_5) \\
& C(q_3) S(q_2)) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) + C(q_9 + \dots q_{10} + q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - \\
& q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) - \dots S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) - \\
& C(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + \dots q_5) C(q_2) C(q_3)))) - 210y(C(q_1)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + \\
& q_4 + \dots q_5) C(q_3) S(q_2)) - S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_1)) - 112z(S(q_{12})(C(q_8)(C(q_1 - \dots \\
& q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) - S(q_1 - q_7) S(q_3 + \dots q_4 + q_5) C(q_3)) + \\
& S(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) C(q_3))) + \dots C(q_{12})(S(q_9 + q_{10} + q_{11})(S(q_1 - \\
& q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + \dots q_5) C(q_3) S(q_2)) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) + \\
& C(q_9 + q_{10} + \dots q_{11})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) - \dots \\
& S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) - C(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + \dots q_5) C(q_2) C(q_3)))) \\
& - 110z(C(q_9 + q_{10})(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + \dots \\
& C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) - S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) - \dots C(q_8)(S(q_2) S(q_3) - \\
& C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) C(q_3))) + S(q_9 + q_{10})(S(q_1 - \dots q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + q_5) \\
& C(q_3) S(q_2)) + C(q_1 - q_7) S(q_3 + \dots q_4 + q_5) C(q_3))) - 11z(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) \\
& C(q_2) C(q_3)) + \dots 17z(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) C(q_3)) + 15z C(q_3) - \dots \\
& 19z(S(q_9)(S(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) + \dots C(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 \\
& + q_5) C(q_3)) + C(q_9)(S(q_8)(C(q_1 - q_7)(C(q_2) S(q_3) + \dots C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3) S(q_2)) - \\
& S(q_1 - q_7) S(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3)) - \dots C(q_8)(S(q_2) S(q_3) - C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_2) C(q_3)))) \\
& + 13z C(q_4 + \dots q_5) C(q_3) + 14z C(q_5) C(q_3) + 12z C(q_3 + q_4 + q_5) C(q_3).
\end{aligned}$$

$$T(4, 4) = 1$$

Додаток Е

Комп'ютерна модель динамічної взаємодії АКА з ОП



Продовження додатку Е

