

УДК 629.7

А.В. Даниленко, Л.Ю. Павленко, студенти гр. ПГ-81, к.т.н. Сапегін О.М.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТОЧНИХ АЛГОРИТМІВ ОРІЄНТАЦІЇ

Анотація. У роботі розглядаються шляхи для впровадження високоточних методів визначення кінематичних параметрів безплатформною інерціальною системою орієнтації. Пропонуються побудова система на недорогих чутливих елементах та мікроконтролерах, що дає змогу швидко розробити повний пакет програмного забезпечення та провести усі необхідні випробування. Описано набір процедур для реалізації методів чисельного інтегрування різної кроковості та порядку точності для кінематичних рівнянь Борца та Пуассона.

Ключові слова: чисельне інтегрування, мікромеханічний гіроскоп, БІСО, БІНС

ВСТУП

Сфера застосування безплатформних систем орієнтації та навігації постійно розширюються. Виникає нагальна потреба у алгоритмічних засобах, що можуть з необхідною точністю визначати кінематичні параметри орієнтації та автономно розраховувати місцезнаходження об'єкту. Використання різноманітних за точністю чутливих елементів, а також сучасних потужних бортових обчислювачів робить необхідним перегляд класичних підходів інерціальної навігації. Стає можливим використання методів набагато вищої точності при синтезі алгоритмів чисельного інтегрування кінематичних рівнянь орієнтації.

Разом із тим, не завжди можна отримати доступ до високоточних чутливих елементів. Проте, необхідність імплементації алгоритмічних наробок високоточних засобів у вигляді програмного забезпечення є дуже актуальною. Одним зі шляхів роботи у цьому напрямі є створення і відпрацювання високоточних алгоритмів, проте на дешевих чутливих елементах. Очевидно, що грубість датчиків не дозволить у повній мірі розкрити потенціал алгоритму, проте це дозволить отримати продукт, на якому вже можна проводити тестування, оцінку швидкодії і оптимізацію.

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ РУХОМОГО ОБ'ЄКТУ

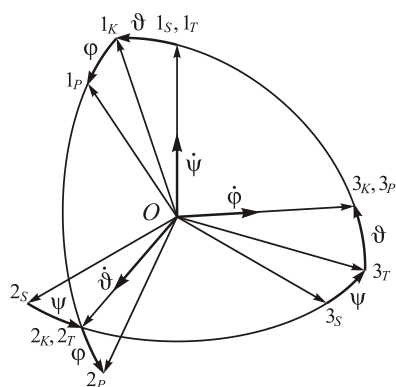


Рис. 1 Послідовність поворотів
Ейлера–Крилова

Під визначенням орієнтації розуміється задача отримання поточної інформації про кутове положення об'єкту у просторі. По суті необхідно визначити нахил зв'язаної з об'єктом системи координат (СК) $1_P 2_P 3_P$ відносно деякої опорної. Нехай у якості такої опорної СК використаємо географічну $1_S 2_S 3_S$ як показано на Рис 1.

З рис.1, що зв'язана СК $1_P 2_P 3_P$ нахилена відносно $1_S 2_S 3_S$ на кути ψ, θ, ϕ що і визначають орієнтацію об'єкта [1].

З кінця 50-х років XX століття були запропоновані методи визначення кінематики рухомого об'єкту [2]. Вони ґрунтувалися на чисельному інтегруванні кінематичного рівняння орієнтації. У якості таких параметрів орієнтації використовують три види:

- 1) кути нахилу ψ, ϑ, ϕ (як правило кути Ейлера–Крилова);
- 2) матриця напрямних косинусів (МНК);
- 3) параметри вектору Ейлера, або кватерніони.

Використовуючи ці параметри можна сформулювати кінематичні рівняння відповідно:

$$1. \text{ Кінематичне рівняння Ейлера } \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi}{dt} = (\omega_{1P}^{PS} \cdot \cos \phi - \omega_{2P}^{PS} \cdot \sin \phi) / \cos \vartheta; \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \omega_{2P}^{PS} \cdot \cos \phi + \omega_{1P}^{PS} \cdot \sin \phi; \\ \frac{d\phi}{dt} = \omega_{3P}^{PS} - \operatorname{tg} \vartheta \cdot (\omega_{1P}^{PS} \cdot \cos \phi - \omega_{2P}^{PS} \cdot \sin \phi). \end{array} \right.$$

$$2. \text{ Матричне рівняння Пуассона } \frac{d\mathbf{C}^{SP}}{dt} = \mathbf{C}^{SP} \cdot (\boldsymbol{\omega}_P^{PS} \times).$$

$$3. \text{ Рівняння Борца } \frac{d\boldsymbol{\phi}}{dt} = \boldsymbol{\omega}_P^{PS} + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\phi} \times) \boldsymbol{\omega}_P^{PS} \quad [3] \text{ та кватерніонне рівняння}$$

$$\text{орієнтації } \frac{d\mathbf{Q}^{SP}}{dt} = \frac{1}{2} \mathbf{Q}^{SP} \circ \boldsymbol{\Omega}_P^{PS};$$

тут позначено $\mathbf{C}^{SP}$ – МНК між базовою СК S та зв'язаною з об'єктом P ; $\boldsymbol{\omega}_P^{PS}$ – вектор з проєкцій кутової швидкості, що вимірюють гіроскопи; $(\boldsymbol{\omega}_P^{PS} \times)$ – косиметрична матриця з проєкцій кутових швидкостей; $\boldsymbol{\phi}$ – вектор Ейлера; δ – кут Ейлера; $\mathbf{Q}^{SP}$ – кватерніон повороту від СК S до зв'язаної P ; $\boldsymbol{\Omega}_P^{PS}$ – вектор-кватерніон, скалярна частина якого дорівнює нулю, а векторна складається з проєкцій $\boldsymbol{\omega}_P^{PS}$.

Інтегруючи ці кінематичні рівняння ми можемо отримувати інформацію про поточну орієнтацію об'єкта. Алгоритми цього чисельного інтегрування суттєво впливають на точність готової системи. На практиці, для задач невисокої точності з недорогими чутливими елементами використовуються найпростіші методи першого порядку, наприклад, прямокутників. Для побудови високоточних систем методи інтегрування будуються на алгоритмі послідовних наближень Пікара. При чому, кількість цих наближень визначає порядок точності методу.

АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

Було реалізовано алгоритми визначення кінематичних параметрів системою, що будувалися на інтегруванні рівнянь Пуассона, Борца та кватерніонів методами прямокутників та різноманітними методами Пікара четвертого порядку точності.

Наведемо загальний вигляд використаних методів Пікара для рівняння Борца четвертого порядку:

$$1. \text{ Трикроковий } \boldsymbol{\phi}(3h) = \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3 + \frac{57}{80} \mathbf{q}_1 \times \mathbf{q}_2 + \frac{33}{80} \mathbf{q}_1 \times \mathbf{q}_3 + \frac{57}{80} \mathbf{q}_2 \times \mathbf{q}_3;$$

$$2. \text{ Чотирикроковий } \varphi(4h) = \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3 + \mathbf{q}_4 + \frac{736}{945}(\mathbf{q}_1 \times) \mathbf{q}_2 + \frac{334}{945}(\mathbf{q}_1 \times) \mathbf{q}_3 + \\ + \frac{526}{945}(\mathbf{q}_1 \times) \mathbf{q}_4 + \frac{218}{315}(\mathbf{q}_2 \times) \mathbf{q}_3 + \frac{334}{945}(\mathbf{q}_2 \times) \mathbf{q}_4 + \frac{736}{945}(\mathbf{q}_3 \times) \mathbf{q}_4.$$

Коефіцієнти $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{q}_4$ детально показані у роботі [1].

Для рівняння Пуассона були взяті методи четвертого порядку виду:

$$1. \text{ Трикроковий } P_{(4)}(3h) = P_{(1)}(3h) + h^2 \sum_{i=2}^8 3^i \mathbf{K}_{2i} + h^3 \sum_{j=3}^{12} 3^j \mathbf{K}_{3j} + h^4 \sum_{k=4}^{16} 3^k \mathbf{K}_{4k};$$

$$2. \text{ Чотирикроковий } P_{(4)}(4h) = P_{(1)}(4h) + h^2 \sum_{i=2}^{10} 4^i \mathbf{K}_{2i} + h^3 \sum_{j=3}^{15} 4^j \mathbf{K}_{3j} + h^4 \sum_{k=4}^{20} 4^k \mathbf{K}_{4k}.$$

Коефіцієнти $\mathbf{K}_{2i}, \mathbf{K}_{3j}, \mathbf{K}_{4k}$ також взяті з роботи [1].

РОЗРОБКА МАКЕТУ БЕЗПЛАТФОРМНОЇ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ

Задля перевірки роботоспроможності методів визначення орієнтації та відпрацювання програмного забезпечення, було створено макет системи, що складається з мікроелектромеханічного інерціального вимірювального модуля MPU6050 та мікроконтролера Arduino. Схема підключення показана на рис.2. Калібрування акселерометрів та гіроскопів проводилося на оптичній ділильній головці та поворотному стенді за методиками, представленими у роботі [4]. Подальші дослідження також проводилися на поворотному стенді – інерціальний вимірювальний модуль обертався з постійною кутовою швидкістю навколо визначеної осі, після чого оцінювався кут повороту стенду та розрахований кут повороту макету.

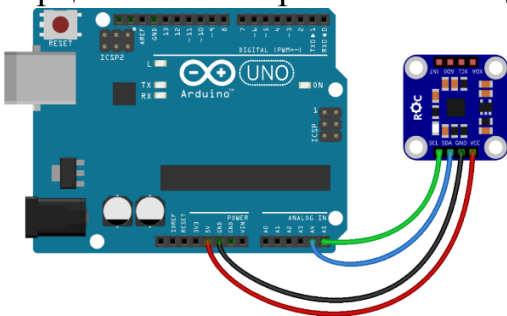


Рис.2 Схема підключення макету

При розробці програмного забезпечення системи були створені ряд процедур-функцій: **calibr**, що здійснює поточне калібрування вихідних сигналів чутливих елементів; **mnk2ug** для перетворення матриці напрямних косинусів у кути ψ, ϑ, φ ;

euler2mnk для перетворення параметрів вектору Ейлера на МНК. Окремих процедур для правих частин кінематичних рівнянь не створювалось для підвищення швидкодії. Методи інтегрування реалізовувалися у вигляді циклів. Крок інтегрування визначався часовою функцією на початку циклу отримання даних з чутливих елементів та у кінці циклу.

Стендові випробування показали повну адекватність розробленого макету та програмного забезпечення. Нажаль, датчики низької точності не дають змоги побачити різницю між цими методами, проте результати дуже схожі. Наведемо на рис.3 графік зміни кута повороту стенду при його обертанні зі швидкістю $\omega_z = 89,967^\circ / \text{с}$. За час 1 с стенд повертається на $89,967^\circ$.

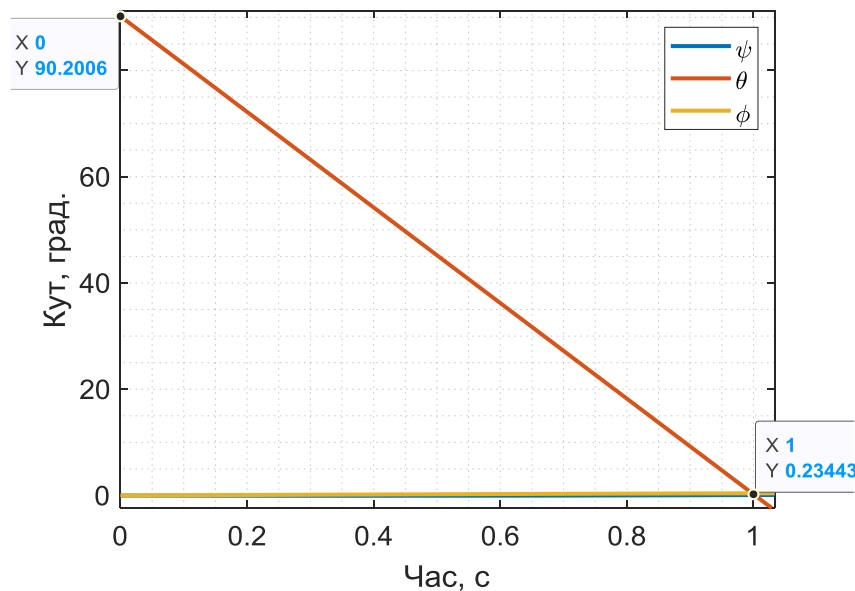


Рис. 3 Поворот стенду навколо осі Z

З рис.3 видно, що система показала відхилення на по куту тангажу $\vartheta = 89,966^\circ$. При цьому похибка склала $0,001^\circ$.

ВИСНОВКИ

Надзвичайна актуальність засобів інерціальної навігації у найширших застосуваннях вимагає використання алгоритмічного забезпечення необхідної точності. Разом із тим, високоточні чутливі елементи не завжди доступні. Запропонований підхід розробки з використанням датчиків низької точності дозволяє досить швидко отримувати адекватне працююче програмне забезпечення, що цілком може використовуватись у подальшому для побудови прецизійних систем.

Отримана система включає в себе усі необхідні компоненти і показала адекватну роботу. Для подальшого використання з високоточними датчиками досить лише задати відповідні калібрувальні коефіцієнти наявного інерціального вимірювального модуля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Ю. Ф. Лазарєв, О. М. Сапегін, Алгоритми безплатформових інерціальних систем орієнтації. Прикладні методи синтезу і аналізу точності: Навчальний посібник. К: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
- [2] P. G. Savage, "Blazing Gyros – The Evolution of Strapdown Inertial Navigation Technology For Aircraft," J. Guid. Control. Dyn., vol. 36, no. 3, pp. 637–655, 2013.
- [3] J. E. Bortz, "A new mathematical formulation for strapdown inertial navigation," IEEE Transations Aerosp. Electron. Syst., vol. 7, no. 1, pp. 61–66, 1971.
- [4] В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко, Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: Навчальний посібник. Кировоград: ПОЛИМЕД Сервис, 2011.

Наук. керівник – к.т.н. Сапегін О.М.