

УДК 681.518.2

DOI: 10.18372/2073-4751.81.20125

Деркаченко А.О.,
orsid.org/0000-0002-0443-0329,
e-mail: toldk98@gmail.com,

Поливода О.В.,
orsid.org/0000-0002-6323-3739,
e-mail: pov81@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕМЕНТАРНОГО ФІЛЬТРА ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЕЛЕМЕНТІВ СФЕРИЧНОГО ПАРАЛЕЛЬНОГО МЕХАНІЗМА

Херсонський національний технічний університет

Постановка проблеми

Сферичні паралельні механізми (СПМ) – це тип роботизованих механізмів, які складаються з декількох кінематичних пар, об'єднаних в замкнуті контури. Всі рухоми з'єднання цих механізмів розташовані на поверхні однієї сфери. Робота СПМ заснована на взаємодії кінематичних пар, що входять до їх складу. Рух одного елемента механізму викликає відповідний рух інших елементів за заданою траєкторією. Сферичні паралельні механізми характеризуються достатньою точністю позиціонування, завдяки жорсткій конструкції здатні виконувати рухи з високою швидкістю. Жорсткість та компактні розміри таких механізмів дозволяють уникати деформацій під навантаженням та використовувати їх в обмеженому просторі. Вони знаходять широке застосування в різних галузях, таких як робототехніка, автоматизація виробництва, медицина та аерокосмічна промисловість.

Забезпечення високої точності сферичних паралельних механізмів є комплексним завданням, яке вимагає врахування багатьох факторів. Основними серед них є використання високоточних датчиків для вимірювання положення і швидкості виконавчих органів та застосування ефективних методів ідентифікації параметрів руху елементів СПМ та алгоритмів керування, що компенсують похибки механізму.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження – розробка методу ідентифікації параметрів руху елементів сферичного паралельного механізму. Для досягнення мети пропонується застосувати алгоритм комплементарного фільтра, адаптований для впровадження в системи керування СПМ. Впровадження методу забезпечить підвищення точності оцінювання стану системи при наявності шумів в реальних промислових умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження демонструють значний прогрес у використанні фільтрів Махоні [1], Маджвіка, Калмана [2, 3] для ідентифікації параметрів руху елементів сферичного паралельного механізму. Для боротьби зі змінними характеристиками шумів та динаміки СПМ досліджується застосування адаптивних фільтрів [4], які здатні в реальному часі оцінювати та коригувати параметри шуму, що забезпечує кращу якість ідентифікації параметрів руху, особливо при невідомих або змінних зовнішніх впливах. Проте, застосування складних фільтрів, особливо адаптивних, вимагає значних обчислювальних ресурсів, що є обмеженням для систем керування в реальному часі з високою частотою оновлення. Значні труднощі для точної ідентифікації параметрів руху, особливо в широкому діапазоні робочого простору викликає і складна нелінійна кінематика СПМ і залежність точності

ідентифікації параметрів руху безпосередньо від якості та точності використовуваних сенсорів.

Для СПМ комплементарний фільтр [5] має певні переваги, адже є значно простішим в реалізації та потребує менше обчислювальних ресурсів порівняно зі складнішими фільтрами, що може бути важливим для систем керування СПМ в реальному часі з обмеженими апаратними ресурсами. Комплементарні фільтри зазвичай мають менше параметрів для налаштування, що спрощує процес їх застосування та можуть ефективно поєднувати дані з гіроскопа та акселерометра.

Проведений аналіз останніх досліджень доводить, що використання комплементарного фільтра може бути корисним для оцінки орієнтації кінцевого положення рухомої платформи СПМ, особливо в застосуваннях, де важлива обчислювальна ефективність та простота реалізації.

Основна частина

Принцип роботи досліджуваного сферичного паралельного механізму (рис. 1) базується на координованому обертанні трьох приводних ланок, які пов'язані з шестернями *Gear A*, *Gear A2*, *Gear A3*, для досягнення бажаної орієнтації рухомої платформи (*RuhomaPlatforma*). В основі механізму розташовані три приводні ланки.

Кожна з цих ланок приводиться в рух окремим сервомотором або іншим типом обертового приводу, пов'язаним із відповідною шестернею (*Gear A*, *Gear A2*, *Gear A3*). Кожна приводна ланка з'єднана через послідовність шарнірів (*Sharnir B/B2/B3* та *Sharnir C/C2/C3*) з рухомою платформою. Шарніри забезпечують обертальні ступені вільності між ланками. Всі з'єднання розташовані таким чином, що їх рухи відбуваються на уявній сфері, що є характерною ознакою СПМ. Коли приводи обертають приводні ланки, це призводить до зміни кутів у шарнірах відповідних кінематичних ланцюгів. Оскільки три такі ланцюги з'єднані з рухомою платформою у різних точках, їхні скоординовані рухи призводять до зміни орієнтації (кутів нахилу, крену та повороту) платформи (*RuhomaPlatforma*). Ключовою особливістю паралельних механізмів є те, що рухома платформа з'єднана з базою (де розташовані приводи) через кілька незалежних кінематичних ланцюгів, що забезпечує розподіл навантаження між кількома ланками. Для досягнення певної орієнтації платформи, система керування (яка не показана на зображенні) повинна обчислювати необхідні кути обертання для кожного з приводів, що вимагає розв'язання оберненої кінематичної задачі СПМ [6].

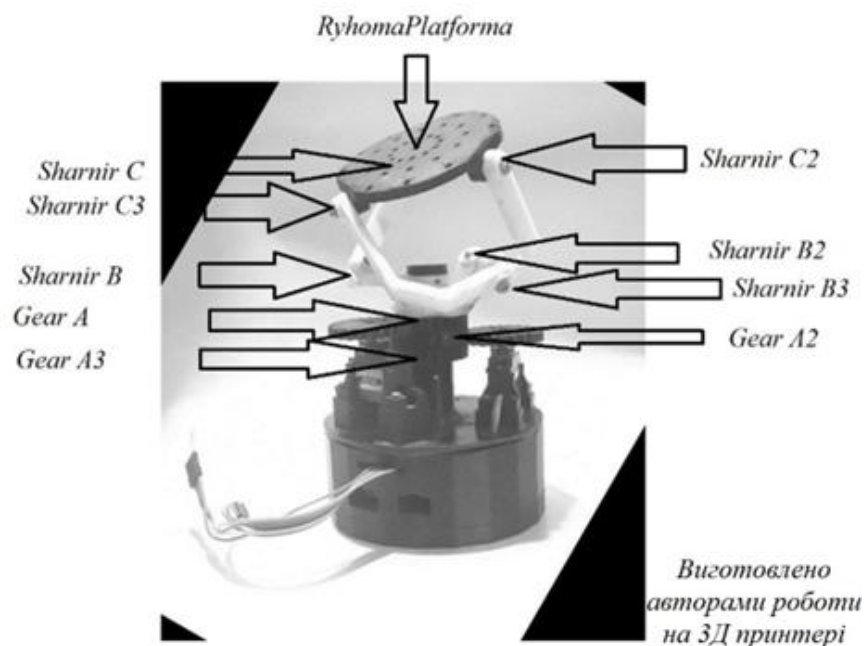


Рис. 1. Дослідний зразок сферичного механізму з позиціонуючою платформою

Важливу роль в структурі системи керування сферичними паралельними механізмами відіграють датчики, що забезпечують отримання точної інформації про орієнтацію та прискорення механізму в просторі. Ця інформація є необхідною для реалізації різних функцій керування, таких як: забезпечення стійкого положення рухомої платформи СПМ (навіть при наявності зовнішніх впливів); визначення точного положення рухомої платформи в просторі для виконання заданих маніпуляцій; забезпечення руху платформи за заданою траєкторією; компенсація впливу вібрацій, ударів та інших зовнішніх факторів на роботу механізму.

Використання універсального мікроелектромеханічного системного модуля (*MEMS*) для відстеження руху в системі керування СПМ дозволяє створювати високоточні та надійні роботизовані системи. Прикладом такого модуля є *MPU9250* – високоінтегрований 9-осьовий пристрій для відстеження руху, який поєднує в собі 3-осьовий гіроскоп, 3-осьовий акселерометр та 3-осьовий компас магнітометр. Гіроскоп вимірює кутову швидкість обертання СПМ навколо трьох осей, акселерометр – лінійне прискорення вздовж цих осей, а магнітометр – магнітне поле для визначення абсолютної орієнтації пристрою.

У разі використання тільки гіроскопа кут нахилу платформи обчислюється за допомогою дискретного інтегрування швидкості обертання. Однак у *MEMS* гіроскопа є недолік, який називається дрейфом нуля. При зупинці обертання гіроскопа він все ще показуватиме значення відмінне від нуля. Крім того недоліком такого рішення є застосування процедури дискретного інтегрування, яка дає неточний результат вимірювань та сприяє поступовому накопиченню помилки обчислення кута через обмежену точність змінних мікроконтролера. За допомогою акселерометра також можна обчислити кути нахилу платформи, проте будь-який зовнішній вплив на датчик вноситиме помилку в обчислення кута нахилу. Частково зняти вплив зовнішніх

сил можна за допомогою ФНЧ, але це приведе до значного зниження швидкодії. Тому для усунення недоліків використання гіроскопа і акселерометра доцільно об'єднати показання цих двох приладів.

Для оцінки орієнтації механізму в просторі отримані показання датчиків пропонується фільтрувати для видалення шуму за допомогою комплементарного фільтра. Задача фільтрації – максимально наблизити виміряне значення величини до дійсного, а отже, мінімізувати величину шуму вимірювань. Вплив шуму враховується наступним чином:

$$z[k] = x[k] + \xi[k], \quad (1)$$

де $z[k]$ – виміряне значення на k кроці, $x[k]$ – дійсне значення на k кроці; $\xi[k]$ – величина шуму вимірювань на k кроці.

Принцип роботи комплементарного фільтра заснований на тому, що на кожному поточному k кроці отримується виміряне значення, на основі якого розраховується прогноз на наступне $k + 1$ вимірювання. Після отримання нового $k + 1$ вимірювання визначається відфільтроване значення $x[k]$ виходячи із виміряного значення та прогнозованого. Ступінь довіри прогнозованим значенням і результатам вимірювання виражається у вагових коефіцієнтах фільтра α та β . Фільтрація дозволяє отримати дійсне значення на даному кроці $x[k]$, швидкість його зміни $\dot{x}[k]$ та прогноз $x^p[k - 1]$, які можуть використовуватись в системі керування для розрахунку необхідних команд для сервоприводів СПМ, що забезпечують досягнення бажаного положення рухомої платформи.

Для роботи фільтра потрібно визначити наступні параметри:

$$x[k] = x^p[k - 1] + \alpha(z[k] - x^p[k - 1]), \quad (2)$$

$$\dot{x}[k] = \dot{x}^p[k - 1] + \frac{\beta}{T}(z[k] - x^p[k - 1]), \quad (3)$$

де $x^p[k - 1]$ – прогнозоване значення на крок k , отримане на $k - 1$ кроці; $\dot{x}[k]$ – відфільтроване значення швидкості зміни параметру на кроці k ; $\dot{x}^p[k - 1]$ –

прогнозоване значення швидкості зміни параметру на крок k , отримане на $k - 1$ кроці; T – часовий інтервал між вимірюваннями.

Для розрахунку прогнозованих значень скористаємось наступними залежностями:

$$\begin{aligned} x^p[k-1] &= x[k-1] + T\dot{x}[k], \\ \dot{x}^p[k-1] &= \dot{x}[k-1]. \end{aligned} \quad (4)$$

Алгоритм комплементарного фільтра може використовуватись не тільки для процедури фільтрації, а також для поєднання показань гіроскопу і акселерометра.

Дані, зчитані з акселерометра та гіроскопа, надходять у вигляді цифрових значень, що безпосередньо не відповідають фізичним величинам, таким як прискорення $[m^2/s]$ або кутова швидкість $[^\circ/s]$. Щоб отримати дані в стандартних одиницях вимірювання, необхідно здійснити попереднє перетворення за допомогою процесу масштабування з врахуванням відповідних коефіцієнтів чутливості датчика і його характеристик.

Позначимо масштабовані показання гіроскопу, виміряні на k кроці, як $z_g[k]$, а акселерометра – $z_a[k]$. Тоді прогнозоване значення кута нахилу платформи на крок k , отримане на $k - 1$ кроці може бути обчислене як:

$$x^p[k-1] = x[k-1] + T \cdot z_g[k]. \quad (5)$$

Замінивши відповідні параметри в рівнянні фільтра (2), з урахуванням прогнозу (5) отримаємо алгоритм розрахунку кута нахилу платформи за допомогою комплементарного фільтра:

$$x[k] = (1 - \alpha)(x[k-1] + T \cdot z_g[k]) + \alpha \cdot z_a[k]. \quad (6)$$

Згідно рівнянню (6) підсумкова величина кута нахилу є сумою інтегрованого значення гіроскопа і миттєвого значення акселерометра. На кожному етапі інтегрування коригується інтеграл кута нахилу за допомогою показань акселерометра. Ступінь корекції визначається коефіцієнтом α , вибір якого залежить від величини дрейфу нуля гіроскопа, від швидкості накопичення помилок обчислення та умов використання СПМ. Описаний алгоритм пояснюється схемою обробки інформації, представленою на рис. 2.

Для забезпечення точної оцінки орієнтації та прискорення необхідна висока частота збору даних з гіроскопа та акселерометра. Перед використанням сенсори необхідно відкалібрувати для компенсації систематичних похибок. Температура може впливати на характеристики сенсорів, тому необхідно передбачити компенсацію температурних змін.

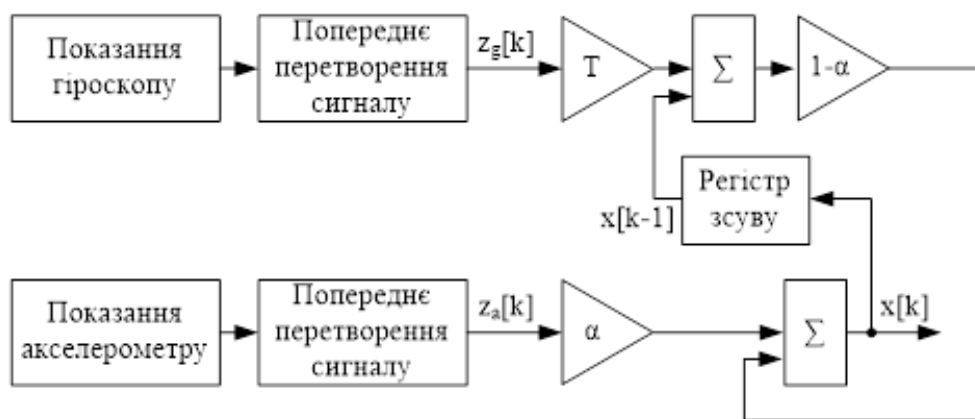


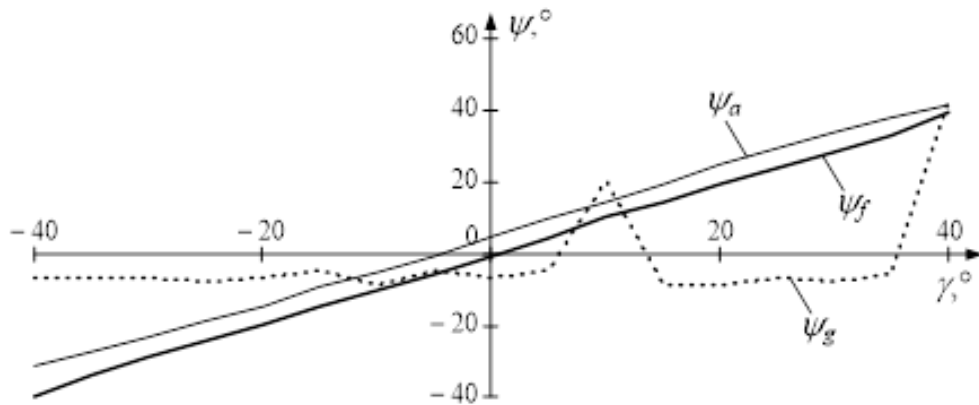
Рис. 2. Схема обробки вимірювальної інформації

У ході експерименту було здійснено поетапну інтеграцію апаратних та програмних компонентів системи з метою дослідження просторового переміщення платформи сферичного паралельного

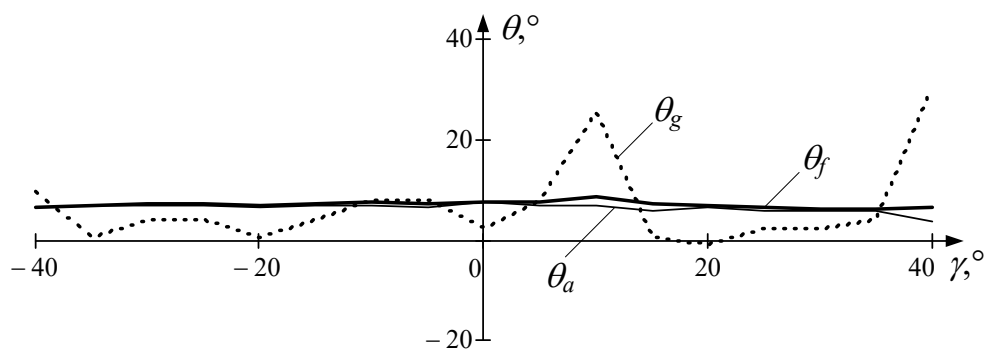
механізму та валідації її фактичного положення за допомогою інерціального модуля. До персонального комп'ютера було підключено два мікроконтролери: *Arduino Uno*, що забезпечує керування

положенням платформи шляхом подачі сигналів на серводвигуни та *Arduino Pro Micro*, призначений для зчитування даних з інерціального модуля *MPU9250*, розміщеного безпосередньо на рухомій частині СПМ. Після налаштування серійного зв'язку з обома пристроями було запущено програмне забезпечення, яке послідовно

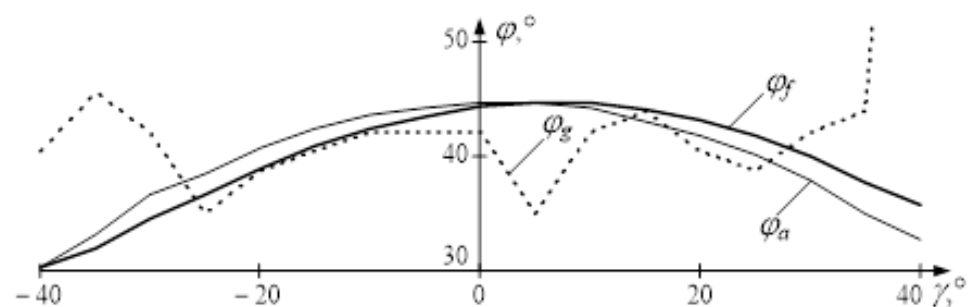
надсило команди *Arduino Uno* для встановлення платформи у визначене кутове положення γ вздовж осі OY , починаючи з -40° та поступово змінюючи його з кроком 5° до $+40^\circ$ включно. Результати експериментальних досліджень наведені на рисунку 3.



а) результати вимірювань кута ψ (акселерометром ψ_a і гіроскопом ψ_g) та застосування фільтра ψ_f



б) результати вимірювань кута θ (акселерометром θ_a і гіроскопом θ_g) та застосування фільтра θ_f



в) результати вимірювань кута ϕ (акселерометром ϕ_a і гіроскопом ϕ_g) та застосування фільтра ϕ_f

Рис. 3. Результати експериментальних досліджень

На кожному з етапів, після стабілізації механізму в заданій позиції, на *Arduino*

Pro Micro надсилався запит на зчитування просторових даних з *MPU9250*. Таким

чином, було забезпечено відповідність між теоретично встановленим кутом і фактично зафіксованими показниками модуля, що дозволяє надалі здійснити порівняльний аналіз і оцінити точність керування рухомою платформою. Експеримент відбувався в контрольованому середовищі з урахуванням мінімізації зовнішніх вібрацій та нестабільності живлення, що є критично важливим для коректного зчитування інерціальних даних. Під час руху СПМ, комплементарний фільтр забезпечив плавне та точне відстеження змін орієнтації рухомої платформи, динамічна похибка (відставання або перевищення фактичного кута) знаходиться в межах $0,8^\circ$. Відносна простота структури комплементарного фільтра полегшує його налаштування та реалізацію на різних апаратних платформах, що робить його зручним для використання в системах керування СПМ для верифікації алгоритмів позиціонування та відтворення траєкторій.

Висновки

У статті запропоновано метод ідентифікації параметрів руху елементів сферичного паралельного механізму на основі використання алгоритму комплементарного фільтра, адаптованого для систем керування СПМ. Комплементарний фільтр потребує мінімальних обчислювальних затрат та є простим у налаштуванні, що важливо для систем керування в реальному часі з обмеженими ресурсами. Розроблений алгоритм поєднує дані з гіроскопа та акселерометра для оцінки кута нахилу рухомої платформи СПМ, зменшуючи вплив дрейфу гіроскопа та шумів акселерометра. Експериментальна перевірка на дослідному зразку СПМ підтвердила працездатність та ефективність запропонованого підходу для ідентифікації кутового положення рухомої платформи. Представлені результати експериментальних досліджень на реальному прототипі СПМ демонструють практичну ефективність запропонованого методу фільтрації для ідентифікації параметрів руху в умовах реального часу. Отримані результати є основою для подальшого вдосконалення

методів керування СПМ та підвищення точності їхнього позиціонування та відтворення траєкторій. Запропонований метод може бути корисним для широкого спектра застосувань СПМ в промисловій автоматизації, де важлива точність, швидкість та надійність роботи.

Література

1. Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.-M. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2008. Vol. 53, no. 5. P. 1203–1218. DOI: 10.1109/TAC.2008.923738.
2. Madgwick S. O. H., Harrison A. J. L., Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics : proceedings, Zurich, Switzerland, 29 June–01 July 2011 / IEEE*. 2011. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICORR.2011.5975346.
3. Шмана К. С. Використання фільтрів Калмана та Маджвіка для обробки показань гіроскопу та акселерометра. *Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : матеріали тез доп. Всеукр. наук.- практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених, Чернігів, Україна, 10–11 Квітня 2019 / ЧНТУ. Чернігів, 2019. С. 85–87.*
4. Gao W. et al. Adaptive Kalman Filtering with Recursive Noise Estimator for Integrated SINS/DVL Systems. *Journal of Navigation*. 2015. Vol. 68(1). P. 142–161. DOI: 10.1017/S0373463314000484.
5. Примушко А. М., Рижков Л. М. Дослідження комплементарного фільтра на МЕМС-вимірювачах. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2019. Вип. 20. С. 47–53.
6. Lebedenko Y. et al. Research of Control Systems for Robotic Spatial Planning Platforms. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) : proceedings, Kremenchuk, Ukraine, 20–23 October 2022 / IEEE*. 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005765.

Деркаченко А.О., Поливода О.В.

ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕМЕНТАРНОГО ФІЛЬТРА ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЕЛЕМЕНТІВ СФЕРИЧНОГО ПАРАЛЕЛЬНОГО МЕХАНІЗМА

В статті пропонується використовувати комплементарний фільтр в системі управління СПМ для обробки даних з акселерометра та гіроскопа. Комплементарний фільтр об'єднує дані з акселерометра, який вимірює лінійне прискорення, що можна використовувати для визначення кута нахилу в статичному положенні та гіроскопа, який вимірює кутову швидкість, що використовується для інтегрування і визначення кута повороту. Фільтр обчислює зважене середнє цих двох вимірювань, причому ваги вибираються таким чином, щоб мінімізувати вплив шумів і дрейфу кожного датчика.

Розроблено алгоритм розрахунку кута нахилу платформи СПМ де підсумкова величина кута нахилу є сумою інтегрованого значення гіроскопа і миттєвого значення акселерометра. На кожному етапі інтегрування коригується інтеграл кута нахилу за допомогою показань акселерометра. Виконано експериментальну перевірку ефективності комплементарного фільтра для ідентифікації параметрів руху елементів сферичного паралельного механізму.

Ключові слова: сферичний паралельний механізм; комплементарний фільтр; акселерометр; гіроскоп; ідентифікація параметрів руху; керування роботизованими об'єктами; оцінка стану; прогнозування; корекція вимірювань; згладжування даних.

Derkachenko A.O., Polyvoda O.V.

USE OF COMPLEMENTARY FILTER FOR IDENTIFICATION OF MOTION PARAMETERS OF ELEMENTS OF SPHERICAL PARALLEL MECHANISM

The article proposes to use a complementary filter in the SPM control system for processing data from the accelerometer and gyroscope. A complementary filter combines data from an accelerometer that measures linear acceleration, which can be used to determine the angle of inclination in a static position, and a gyroscope, which measures angular velocity, which is used to integrate and determine the angle of rotation. The filter calculates a weighted average of these two measurements, with the weights chosen to minimize the effects of noise and drift from each sensor.

An algorithm for calculating the angle of inclination of the SPM platform was developed, where the final value of the angle of inclination is the sum of the integrated value of the gyroscope and the instantaneous value of the accelerometer. At each stage of integration, the integral of the angle of inclination is corrected using the readings of the accelerometer. An experimental verification of the effectiveness of the complementary filter was performed to identify the motion parameters of the elements of the spherical parallel mechanism.

Keywords: spherical parallel mechanism; complementary filter; accelerometer; gyroscope, identification of motion parameters; control of robotic objects; assessment of status; forecasting; correction of measurements; smoothing data.