

Алгоритмічно-програмний модуль комплексу стабілізації

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У тезах розглядається архітектура та принципи функціонування алгоритмічного модуля як ключового елементу комплексу стабілізації динамічних об'єктів. Визначаються основні вимоги до обчислювального ядра, методи обробки даних з інерціальних датчиків та підходи до формування керуючих сигналів. Акцентовано увагу на оптимізації обчислювальних процедур з метою мінімізації часових затримок у контурі зворотного зв'язку.

Ключові слова: алгоритмічний модуль, комплекс стабілізації, фільтр Калмана, кватерніонна орієнтація, ПІД-регулятор, інерціальні вимірювання, час латентності.

Abstract

The thesis considers the architecture and principles of functioning of the algorithmic module as a key element of the stabilization complex of dynamic objects. The main requirements for the computational core, methods of processing data from inertial sensors and approaches to the formation of control signals are determined. The emphasis is on optimizing computational procedures in order to minimize time delays in the feedback loop.

Keywords: algorithmic module, stabilization complex, Kalman filter, quaternion orientation, PID controller, inertial measurements, latency time.

Вступ

Сучасні системи стабілізації просторового положення об'єктів, зокрема безпілотних літальних апаратів, роботизованих платформ та оптико-електронних систем наведення, пред'являють підвищені вимоги до швидкодії та точності алгоритмів обробки інформації. Ключовим елементом таких систем є алгоритмічний модуль, який реалізує функції фільтрації вимірювань, оцінювання поточного стану об'єкта та формування керуючого впливу. Ефективність роботи всього комплексу стабілізації безпосередньо залежить від досконалості закладених у модуля математичних моделей та обчислювальних методів.

Розвиток алгоритмічних модулів

Розвиток алгоритмічних модулів стабілізації пройшов шлях від класичних пропорційно-інтегрально-диференційних (ПІД) регуляторів до адаптивних систем з елементами штучного інтелекту. Сучасний підхід базується на використанні простору станів та методів оптимальної фільтрації, таких як розширений фільтр Калмана (ЕКФ) або сигма-точковий фільтр (UKF), що дозволяє інтегрувати дані з мікроелектромеханічних (MEMS) датчиків — гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів. Інтеграція цих компонентів в єдиний обчислювальний модуль потребує вирішення проблеми синхронізації потоків даних та забезпечення детермінованого часу виконання циклу регулювання.

Принцип розрахунків алгоритмічного модулю

Процес розрахунків в алгоритмічному модулі комплексу стабілізації організовано як послідовне виконання трьох взаємопов'язаних етапів, кожен з яких базується на аналітичних співвідношеннях теорії оптимального керування та фільтрації.

На етапі первинної обробки даних виконується компенсація систематичних похибок інерціальних датчиків. Для кожного вимірювання (акселерометри $\mathbf{a}_m$ та гіроскопи $\boldsymbol{\omega}_m$) застосовується модель калібрування:

$$\mathbf{a}_c = \mathbf{S}_a (\mathbf{a}_m - \mathbf{b}_a - \mathbf{v}_a), \quad \boldsymbol{\omega}_c = \mathbf{S}_g (\boldsymbol{\omega}_m - \mathbf{b}_g - \mathbf{v}_g),$$

де S_a, S_g — матриці масштабування та взаємовпливу осей, b_a, b_g — вектори зсуву нуля, v_a, v_g — температурно-залежні складові дрейфу, що апроксимуються поліноміальними моделями.

На етапі оцінювання стану ключову роль відіграє кватерніонне представлення орієнтації. Кінематичне рівняння для кватерніона $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ має вигляд:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \Omega(\omega_c) q, \quad \Omega(\omega_c) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

Оцінка орієнтації реалізується за допомогою дискретного розширеного фільтра Калмана, де вектор стану $x = [q^T, b_g^T]^T$. Предикція виконується на основі моделі кінематики, а корекція — за вектором вимірювань $z = g_m$, що представляє проекцію гравітації, або $z = m_m$ для магнітного поля. Коваріаційна матриця похибок P оновлюється згідно з рівняннями Ріккаті:

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1}, \quad K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

де F_k — якоб'ян матриці переходу стану, H_k — якоб'ян функції спостереження, Q_k та R_k — коваріаційні матриці шумів процесу та вимірювань відповідно. На етапі формування управління обчислюється вектор керуючих зусиль. Для осі стабілізації застосовується закон керування з комбінованим зворотним зв'язком:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \dot{e}(t) + u_{ff}(\dot{\omega}_c, \hat{q}),$$

де $e(t)$ — вектор похибки положення у просторі станів, K_p, K_i, K_d — діагональні матриці коефіцієнтів, а u_{ff} — компонента прямого зв'язку, що компенсує передбачуване збурення на основі оціненої кутової швидкості $\dot{\omega}_c$ та орієнтації $\hat{q}$. Частота дискретизації обирається з умови забезпечення часу повного циклу «вимірювання — обчислення — вплив» (латентності) τ_L , який не перевищує 1–2% від найменшої сталої часу механічної підсистеми T_{min} : $\tau_L \leq 0.02 \cdot T_{min}$.

Взаємодія модулів на основі розрахунків

Функціонування алгоритмічного модуля комплексу стабілізації базується на теоретичній концепції інтегрального сенсорного середовища, в якому мікроконтролер ESP32 виступає центральним обчислювальним ядром, що забезпечує синхронізоване опитування, калібрування та обробку даних від сукупності вимірювальних приладів. Теоретичне обґрунтування такого поєднання ґрунтується на принципах системної інтеграції, узгодження часових характеристик та забезпечення інформаційної надлишковості для підвищення оцінок стійкості.

Основу вимірювального комплексу складають інерціальні датчики — тривісний акселерометр, тривісний гіроскоп та, за необхідності, тривісний магнітометр. Теоретичною передумовою їх поєднання в єдиному модулі (наприклад, MPU-6050, ICM-20948 або BMI160) є можливість застосування методів оптимальної фільтрації для компенсації взаємних недоліків кожного з датчиків: акселерометр забезпечує довгострокову стабільність визначення вектора гравітації, але схильний до впливу лінійних прискорень; гіроскоп має високу точність у динамічних режимах, однак його показання схильні до інтегрального дрейфу; магнітометр дозволяє визначити абсолютний азимут, проте чутливий до зовнішніх магнітних полів.

Для підвищення точності просторового орієнтування до складу приладів можуть бути включені датчики абсолютного тиску (барометри) для стабілізації за вертикальною координатою та оптичні датчики потоку (optical flow) для компенсації горизонтального дрейфу. Теоретичне обґрунтування їх інтеграції полягає у використанні концепції зовнішніх спостережень (aiding observations) у структурі фільтра Калмана, де додаткові вимірювання формують вектор корекції z_{aid} , що дозволяє обмежити накопичення похибок інтегрування кутової швидкості.

Важливим теоретичним аспектом є забезпечення синхронізації часу між усіма компонентами. ESP32 реалізує функцію тактування перетворення даних через апаратний генератор переривань (GPIO interrupt), що дозволяє прив'язати моменти отримання вимірювань до єдиної часової бази. Теоретично це обґрунтовується вимогою до дискретних моделей фільтрації про рівномірність інтервалів дискретизації $\Delta t = \text{const}$, порушення якої призводить до деградації точності оцінок.

Спільне функціонування перелічених приладів в архітектурі ESP32 підпорядковується теорії розподілених систем збору даних, де центральний процесор виступає координатором, а периферійні пристрої — джерелами інформації з різними частотами оновлення та різними рівнями затримок. Вирішення цієї теоретичної проблеми досягається застосуванням багаточастотної (multi-rate) реалізації фільтра Калмана, в якій предикція виконується з максимальною частотою гіроскопа, а корекція — за наявності нових вимірювань від акселерометра, магнітометра або інших допоміжних датчиків, що дозволяє зберегти оптимальність оцінок при неповній синхронності вхідних даних.

Висновок

Розробка алгоритмічного модуля сучасного комплексу стабілізації є комплексною задачею системного аналізу, що вимагає балансу між обчислювальною складністю, точністю оцінювання параметрів та швидкодією. Запропонована структура розрахунків із розділенням етапів калібрування, оптимальної фільтрації на основі кватерніонної кінематики та комбінованого закону управління дозволяє досягти необхідної стійкості до зовнішніх збурень та параметричної невизначеності. Подальший розвиток модуля вбачається у впровадженні методів прогнозуючого моделювання (MPC) та нейромережових підходів для адаптації до змінних умов функціонування.

Список використаної літератури:

1. Titterton D. H., Weston J. L. Strapdown Inertial Navigation Technology: monograph. 2nd ed. Institution of Engineering and Technology, 2004. 582 p.
2. Crassidis J. L., Junkins J. L. Optimal Estimation of Dynamic Systems: textbook. 2nd ed. CRC Press, 2011. 733 p.
3. Franklin G. F., Powell J. D., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems: textbook. 8th ed. Pearson, 2019. 912 p.
4. Simon D. Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches: monograph. John Wiley & Sons, 2006. 552 p.
5. Farrell J. A. Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors: textbook. 2nd ed. McGraw-Hill Education, 2022. 672 p.

Богомолів Сергій Віталійович — к.т.н., доцент каф. ОТ, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: bogomolovsergiy@vntu.edu.ua

Костюхін Ростислав Сергійович — студент групи 1KI-22б факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: kostyuhinrost@gmail.com

Демчук Олександр Олександрович — студент групи 1KI-22б факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: san4ikdemchuk2005@gmail.com

Ганевич Назар Олександрович — студент групи 1KI-22б факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: nazar.ganevych@gmail.com

Bohomolov Serhii — Ph.D., Ph.D., Associate Professor kaf. OT, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bogomolovsergiy@vntu.edu.ua

Kostyukhin Rostyslav Serhiyovych — student of group 1KI-22b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kostyuhinrost@gmail.com

Demchuk Oleksandr Oleksandrovych - student of group 1KI-22b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: san4ikdemchuk2005@gmail.com

Ganevych Nazar Oleksandrovych — student of group 1KI-22b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nazar.ganevych@gmail.com