

## ОЦІНЮВАННЯ ПОЛОЖЕННЯ І ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ ІНЕРЦІЙНИХ ДАВАЧІВ

Олексій Пушкарик

Львівський національний університет імені Івана Франка, [oleksii.pushkaryk@gmail.com](mailto:oleksii.pushkaryk@gmail.com)

Оцінювання положення та траєкторії руху людини є актуальним завданням для реалізації пристроїв носимої електроніки. Основним компонентом таких пристроїв є інерційні вимірювальні модулі (IMU) на базі МЕМС-давачів (мікроелектронні і мікро механічні системи). Дані отримані за допомогою акселерометрів і гіроскопів визначені у реальному часі, проте містять шуми та зміщення, через що виникає проблема накопичення похибки з часом при визначенні положення об'єкта. Розробка ефективних алгоритмів корекції даних обумовлена використанням даних з кількох давачів, що забезпечують стійке оцінювання траєкторії за обмежений час.

Розглянемо систему, яка складається з трьох вимірювальних вузлів: двох периферійних модулів, що кріпляться на ногах користувача, та центрального вузла. Кожен периферійний вузол містить шести-осьовий інерційний давач ВМ160 (тривісний акселерометр і тривісний гіроскоп), магнітометр GY-271 та мікроконтролер ESP32-C3, який виконує попередню обробку даних і бездротову передачу. Центральний вузол додатково обладнано барометричним давачем BMP280 та контролером ESP32-S3, що виконує синхронізацію даних з усіх трьох модулів і запускає алгоритми оцінювання. Обмін даними між вузлами реалізовано через протокол ESP-NOW з частотою 100 Гц.

Положення об'єкта у нерухомій системі координат визначається через подвійне інтегрування справжнього прискорення:

$$r(t) = r_0 + v_0 t + \int \int_0^t (R(\tau) a_b(\tau) - g) d\tau d\tau, \quad (1)$$

де  $r_0$ ,  $v_0$  – початкове положення і початкова швидкість відповідно,  $R(\tau)$  – матриця повороту з системи координат давача в інерційну,  $a_b(\tau)$  – вимірювання акселерометра,  $g$  – вектор прискорення вільного падіння.

Орієнтація об'єкта подається кватерніоном  $q$ , еволюція якого описується рівнянням [1]:

**Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2026»,  
27–29 травня 2026 р., Львів**

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{2} q \otimes \omega, \quad (2)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість, яка вимірюється гіроскопом.

Для зменшення накопичувальної похибки передбачено алгоритм Маджвіка [2] для злиття даних акселерометра, гіроскопа та магнітометра з метою стійкого визначення орієнтації. За допомогою техніки ZUPT (Zero-Velocity Update) анулюється накопичувальна похибка інтегрування у моменти контакту стопи людини з поверхнею, які визначаються за низькими значеннями норми кутової швидкості та прискорення на давачах прикріплених на ногах [3]. Далі відбувається комплексування даних барометра центрального вузла для оцінювання вертикальної координати.

Для оцінювання точності системи передбачено серію тестових експериментів. Перед основними вимірюваннями виконується калібрування зміщення нуля акселерометра і гіроскопа в стані спокою, а також калібрування магнітометра з компенсацією hard-iron та soft-iron спотворень. Тестові траєкторії включають: рух по прямій фіксованої довжини, рух по замкненому контуру (для оцінювання помилки замикання) та переміщення між поверхнями (для перевірки барометричного каналу). Як метрики точності використовуються накопичена похибка визначення положення, дрейф кутів орієнтації та похибка замикання траєкторії. Порівнюються результати чистого інерційного обчислення, обчислення з ZUPT-корекцією та повного комплексного розв'язку.

1. *Titterton D. H., Weston J. L.* Strapdown Inertial Navigation Technology. – 2nd ed. – IET, 2004. – 576 p.
2. *Madgwick S. O. H.* An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays // Tech. Report, University of Bristol. – 2010. – 32 p.
3. *Foxlin E.* Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors // IEEE Computer Graphics and Applications. – 2005. – Vol. 25, No. 6. – P. 38–46.

**ESTIMATION OF OBJECT POSITION AND TRAJECTORY  
BASED ON INERTIAL SENSOR DATA**

*A distributed measurement system for human motion tracking is proposed. The system consists of two foot-mounted nodes (BMI160 IMU, GY-271 magnetometer, ESP32-C3) and a central node additionally equipped with a BMP280 barometer and an ESP32-S3 controller. Position and orientation are estimated using the Madgwick filter combined with a Zero-Velocity Update technique applied during foot-ground contact, while barometric data are fused for vertical positioning. The methodology for experimental evaluation of accuracy on test trajectories is described.*