

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)-306-316](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-306-316)
 УДК 681.5:629.7.05

Микола Юрійович Суло¹, Володимир Вікторович Казимир²

¹аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
 Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
 E-mail: nikolaysuslo0@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6692-1234> Scopus author ID: 60157989800

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
 Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
 E-mail: vykazymyr@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119> ResearcherID: Q-2925-2016

МЕТОД СТАБІЛІЗАЦІЇ КВАДРОКОПТЕРА В ЗАДАНІЙ ПОЗИЦІЇ З ПРОСТОРОВИМ PID-РЕГУЛЮВАННЯМ ЗА ВІДЕОДАНИМИ БЕЗ GPS

У роботі розглянуто метод стабілізації квадрокоптера в заданій позиції в умовах відсутності глобальної супутникової навігації GPS. Запропоновано двоконтурний підхід до просторового регулювання: контур стабілізації висоти на основі вимірювань барометра у SITL або дальноміра у натурі із застосуванням ЕМА-фільтрації та PID-регулювання; контур стабілізації у горизонтальній площині на основі піксельної похибки (dx , dy), отриманої з відеопотоку камери, спрямованої вниз. Оцінювання (dx , dy) виконується шляхом виділення локальних ознак ORB та оцінювання гомографії між референсними й поточними кадрами з RANSAC-відсівом викидів. Для зменшення шуму застосовано фільтрацію та мертву зону, після чого сигнали (dx , dy) подаються на PID-регулятори, вихід яких перетворюється в корекції крену й тангажу та передається на автопілот через MAVLink. Метод реалізовано в середовищі Gazebo у зв'язці з ArduPilot і верифіковано на реальному зразку. Показано, що в симуляції дрейф пригнічується до діапазону десятків пікселів; у натурі спостерігається зростання похибок через вібрації, неоднорідну текстуру та освітлення, що потребує окремого налаштування PID та ширшої мертвої зони. Додатково наведено результати стабілізації висоти для SITL і натурального експерименту, які підтверджують працездатність Z-контурну та його роль як умови стійкого утримання квадрокоптера у просторі.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; GPS-denied; ORB; візуальна стабілізація; гомографія; піксельна похибка; PID-регулювання; Gazebo; ArduPilot.

Рис.: 7. Табл.: 2. Бібл.: 20.

Актуальність дослідження. Стабілізація квадрокоптера в заданій позиції є базовим завданням для інспекції, пошуку, супроводу та автономної навігації. У реальних умовах можливі режими, коли GPS недоступний або ненадійний (польоти в приміщенні, складна міська забудова, завади). Це унеможлиблює стандартні режими утримання позиції та мотивує застосування візійних методів стабілізації на основі зсувів у просторі зображення та/або оптичного потоку [1], [2]. Окремо важливим є використання напівфізичного моделювання (SITL/NIL) для безпечної та відтворюваної верифікації алгоритмів перед натурними випробуваннями [3]. Для таких експериментів практично застосовуються платформи симуляції та інструменти інтеграції (Gazebo/ROS та екосистеми PX4/ArduPilot) [4], [5].

Ключова практична проблема полягає в тому, що точність візійної оцінки горизонтального дрейфу (dx , dy) залежить від висоти: зміни Z змінюють масштаб сцени та перспективні спотворення, впливаючи на робастність оцінювання гомографії. Тому виділення окремого контуру стабілізації висоти Z є не допоміжною деталлю, а необхідною умовою стійкої роботи візійного керування у площині.

Постановка проблеми. Потрібно забезпечити стабілізацію квадрокоптера в заданій позиції без GPS із використанням відеоданих та окремого контуру стабілізації висоти. Рішення повинно:

- 1) надійно оцінювати піксельний дрейф (dx , dy) між поточним і референсним кадрами;
- 2) застосувати фільтрацію шуму та deadband для ігнорування малих коливань;
- 3) перетворювати (dx , dy) у керуючі команди (roll/pitch PWM) через PID-регулювання;
- 4) стабілізувати висоту Z (throttle PWM) на основі датчика висоти;
- 5) підтвердити працездатність у середовищі Gazebo/ArduPilot (SITL) та на реальному зразку за кількісними метриками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Візійні методи позиціонування і стабілізації в GPS-denied умовах часто спираються на оптичний потік та споріднені оцінки дрейфу, зокрема з використанням стабілізації сенсора або камери [1], [2]. Для реалістичних сценаріїв необхідна валідація в напівфізичних середовищах, де поєднуються симуляційні компоненти та реальні контролери [3]. Середовище Gazebo та інструменти типу XTDrone широко використовуються для експериментів із мультироторами, сценаріями та датчиками [4], а огляди відкритих автопілотів підкреслюють практичні відмінності інтеграції PX4/ArduPilot та типові джерела похибок [5]. Для indoor-сценаріїв також застосовуються камери і трекінг-функціонал для локалізації, що підтверджує доцільність візійних вимірів у замкнених середовищах [6].

У задачах реального часу практично вигідними є локальні ознаки ORB як швидка альтернатива SIFT/SURF [7], а також їхні порівняльні оцінки в задачах зіставлення зображень [8]. Для оцінювання геометричного зв'язку між кадрами застосовується гомографія; систематичні огляди підходів до оцінювання гомографії та їхніх обмежень наведені в [9]. Для керування за відеоданими близьким класом підходів є image-based visual servoing (IBVS), у тому числі homography-based стабілізація VTOL-платформ (X4-flyer) [10], а також варіанти з обмеженнями орієнтації для збереження цілі в полі зору [11]. Обмін телеметрією й командами керування у зв'язці "комп'ютер-автопілот" часто реалізується через MAVLink; огляд протоколу та його використання в UAV-системах наведений у [12], практичні аспекти автопілотування з корекцією маршруту у [13]. З огляду на реальні сценарії, актуальними є також питання безпеки MAVLink-каналу; систематичний огляд загроз і контрзаходів наведений у [14].

Для налаштування PID-контурів мультироторів застосовуються як підходи з опорою на LQR/LQG для MIMO PID-тюнінгу [15], так і оптимізаційні/метаевристичні методи [16]. Альтернативно, сучасні методи керування включають data-driven MPC [17]; для роїових сценаріїв та мультицільового стеження розглядаються підходи на основі глибинного підкріплювального навчання [18]. Також досліджуються хмарні архітектури, що поєднують навігацію, visual servoing та контроль у масштабованих системах [19]. На цьому фоні PID-регулювання є практично доцільним для задач утримання позиції одиночного апарата за умови надійної обробки візійних вимірів та коректної інтеграції контуру висоти розглядаються також у [20].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми.

Недостатньо формалізовано:

- 1) узгоджений опис піксельного конвеєра (оцінка дрейфу, фільтрація, deadband) разом із метричними критеріями якості;
- 2) суворе зіставлення профілів PID параметрів і мертвих зон між симуляцією та натурою;
- 3) вплив текстури й освітлення на якість дрейф-оцінювання;
- 4) роль стабілізації висоти Z як умови стійкої роботи горизонтального візійного керування.

Метою цієї статті є розробити та експериментально перевірити метод стабілізації квадрокоптера без GPS, що спирається на оцінку піксельного дрейфу в горизонтальній площині (X - Y) і двоконтурне PID-регулювання (окремо для Z та для X - Y). Практична цінність полягає в реалізації методу у зв'язці Gazebo/ArduPilot (SITL) та підтвердженні працездатності у натурному експерименті з кількісними метриками.

Виклад основного матеріалу. Загальну концепцію запропонованого підходу та структуру експериментального середовища наведено на рис. 1.

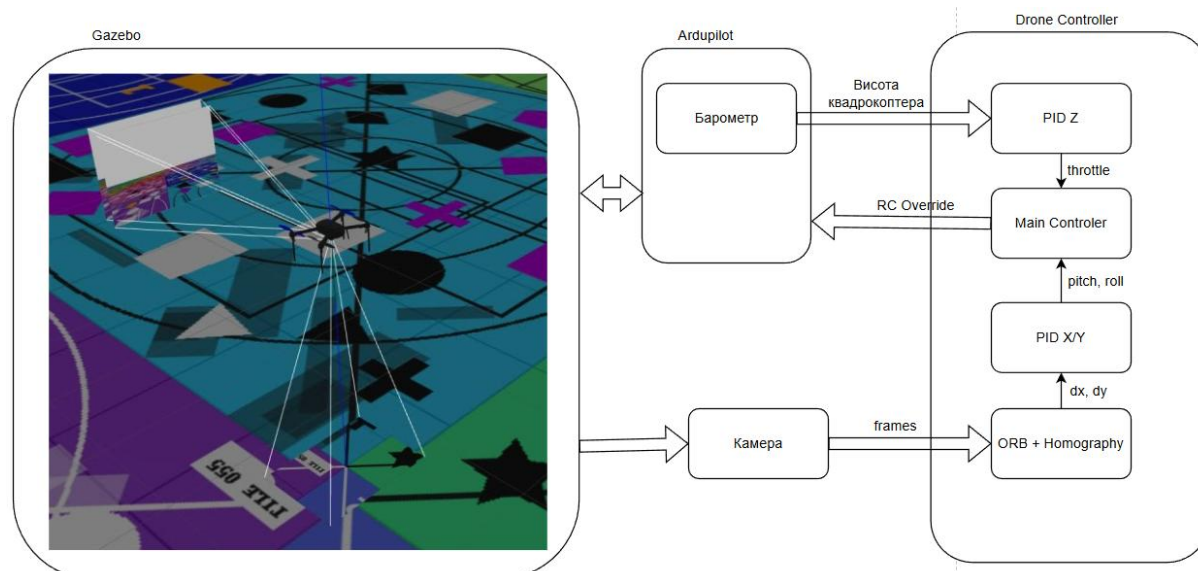


Рис. 1. Концептуальна схема експериментального середовища та стабілізації квадрокоптера за візуальними даними

Джерело: розроблено авторами.

У середовищі Gazebo моделюється квадрокоптер із камерою, спрямованою вниз, та висотним каналом вимірювання. Відеодані використовуються для оцінювання піксельного дрейфу в горизонтальній площині X–Y, тоді як окремий контур Z забезпечує стабілізацію висоти. Сформовані керуючі впливи передаються до автопілота ArduPilot, що забезпечує утримання апарата в заданій позиції без використання супутникової навігації.

Конвеєр оброблення зображень. Для реалізації горизонтального утримання позиції без GPS використано візуальний конвеєр, що працює у піксельному просторі кадру. Завдання - надійно оцінювати миттєвий дрейф (dx, dy) між поточним і референсним зображеннями та перетворювати ці сигнали на стабільні входні дані для контурів PID-регулювання в каналах крена і тангажу (рис. 2).

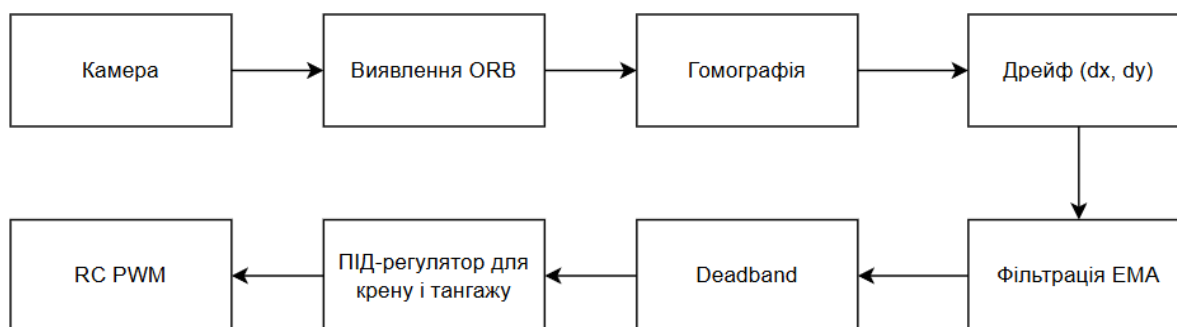


Рис. 2. Структурна схема конвеєра обробки зображень

Джерело: розроблено авторами.

Нижче наведено покроковий опис оброблення від захоплення кадру до подачі очищених (dx-dy) у польотний контролер:

1) Захоплення та підготовка кадру. Камера формує потік 640×480 пікселів з частотою 30 fps. Кадри переводяться у відтінки сірого та нормалізуються для зменшення впливу освітлення. Поточний кадр порівнюється з референсним кадром сцени.

2) Локальні ознаки (ORB) [7], [8]. На обох кадрах автоматично виділяються характерні точки, для яких обчислюються компактні дескриптори. ORB дає достатню швидкодію для бортових застосувань.

3) Пошук відповідностей і первинне очищення. Дескриптори зіставляються; підозрілі пари відсікаються за співвідношенням близькості та взаємною перевіркою. Отримується підмножина надійних відповідностей між кадрами.

4) Оцінювання гомографії та відсів похибки. За надійними відповідностями обчислюється проєктивне перетворення між кадрами з використанням RANSAC [9]. Цей крок автоматично відсіює хибні відповідності.

5) Добування показників дрейфу. Із трансформації визначаються компоненти (dx , dy). Поворот сцени може оцінюватися, але в каналах X–Y в цій роботі не використовується.

6) Контроль якості та оновлення референсу. Якщо кількість або якість відповідностей недостатні наприклад, слабка текстура, різка зміна сцени, система фіксує низьку довіру та оновлює референсний кадр, щоб не накопичувати помилку.

7) Згладжування та відсікання викидів. Значення (dx , dy) фільтруються експоненціальним усередненням (ЕМА), а поодинокі стрибки відсіюються. Це зменшує шум, характерний для реального відео потоку.

8) Мертва зона (deadband). Невеликі відхилення поблизу нуля нівелюються порогом у пікселях, щоб уникати зайвого розхитування платформи.

9) Передача у контури керування. Очищені (dx , dy) подаються на PID-регулятори у каналах крена і тангажу з насиченнями та обмеженням темпу змін; сформовані PWM-корекції передаються в автопілот через MAVLink.

Двоконтурне просторове регулювання X-Y-Z. Після отримання даних із двох незалежних джерел формується двоконтурна система просторової стабілізації (рис. 3). Горизонтальний контур X-Y використовує відеопотік із камери: камера передає кадри (640×480) у X-Y контролер, який оцінює піксельний дрейф (dx , dy) та показник довіри до вимірювання. Вертикальний контур Z працює за даними висотоміра: висотомір передає поточну висоту у Z-контролер, який формує керування по тязі у вигляді throttle PWM. Обидва результати надходять в автопілот, де агрегуються в єдину команду керування RC_OVERRIDE, що містить компоненти (pitch, roll, throttle), і передаються на політний контролер для виконання внутрішніх контурів стабілізації.

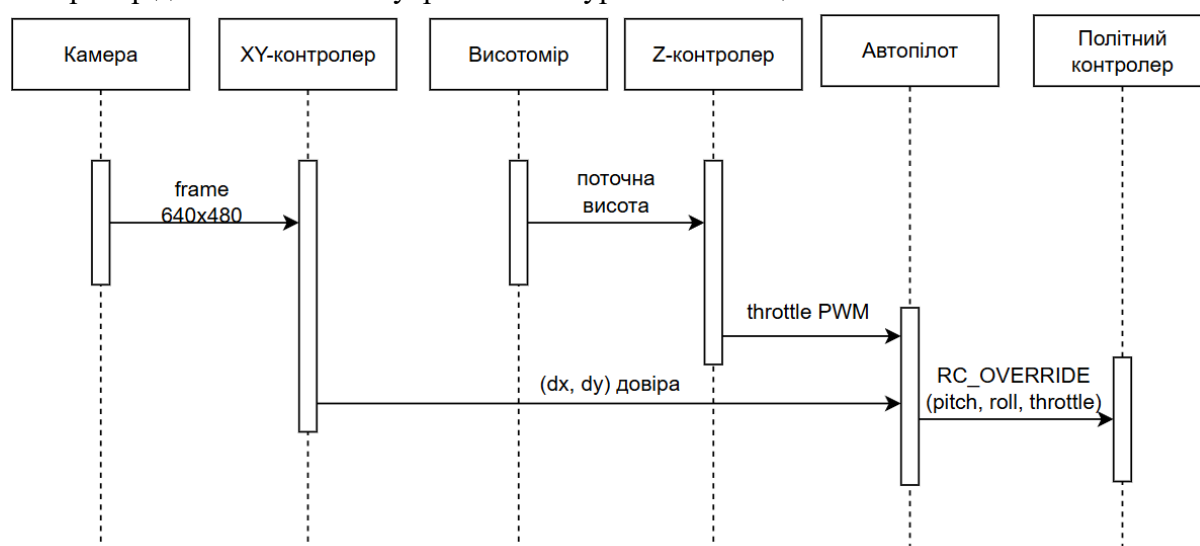


Рис. 3. Діаграма послідовності циклу візуальної стабілізації та керування
Джерело: розроблено авторами

Згідно з рис. 3, контури X-Y і Z працюють паралельно та використовують різні сенсорні канали: (dx , dy) формується з відеоданих, а висота з барометра або лідара. X-Y контролер генерує корекції керування для горизонтального утримання позиції (roll,

pitch), а Z-контролер керування тягою (throttle). На рівні автопілота ці впливи поєднуються та передаються у політний контролер через RC_OVERRIDE, що забезпечує узгоджену стабілізацію квадрокоптера в просторі.

Горизонтальна стабілізація контуру X-Y у просторі зображення. На основі піксельної похибки (dx , dy), що відображає зміщення поточного кадру відносно референсного. Для кожної осі застосовується PID-регулятор:

$$u_x(t) = PID_x(-dx(t)), \quad u_y(t) = PID_y(-dy(t)),$$

де $dx(t)$ і $dy(t)$ - піксельні відхилення поточного кадру відносно референсного, отримані з ORB і гомографії. Виходи $u_x(t)$ та $u_y(t)$ перетворюються у PWM-корекції каналів крена і тангажу. Для забезпечення стійкості використовуються насичення (обмеження амплітуди), обмеження швидкості зміни PWM, а також deadband у піксельному просторі. Постановка належить до класу керування за помилкою у просторі зображення та узгоджується з підходами IBVS, включно з гомографічними варіантами стабілізації VTOL-платформ [10], [11].

Контур стабілізації висоти контуру Z. Окремий контур стабілізації висоти підтримує задане значення h і формує керування по тязі. Висота вимірюється: у SITL за барометричними повідомленнями, у натурі за даними дальноміра (лідара) або іншого висотного датчика. Сигнал висоти згладжується ЕМА-фільтрацією, після чого PID-регулятор формує керування:

$$u_h(t) = PID_z(h - h(t)),$$

де h – задана висота;

$h(t)$ – поточна висота з барометра або дальноміра.

$h-h(t)$ - похибка по висоті,

$u_h(t)$ формує PWM-керування по тязі.

Оскільки горизонтальна стабілізація реалізована в просторі зображення, коливання висоти змінюють масштаб сцени й погіршують робастність оцінювання гомографії. Тому стабілізація висоти розглядається як необхідна умова стійкої роботи візійного контуру в площині X-Y

Узгодження частот і затримка відеоканалу. Візійний контур обмежений FPS камери (30fps) і часом обробки кадрів, тоді як контур керування може працювати з вищою частотою (100Hz). Тому між оновленнями (dx , dy) виконується кілька ітерацій керування. Для запобігання перерегулюванню використовуються насичення керуючих сигналів, обмеження темпу зміни PWM та deadband. Явна компенсація затримки відеоканалу в даній версії методу не реалізована і віднесена до подальших досліджень.

Налаштування й параметри. Розглянуто дві конфігурації:

1) Gazebo/ArduPilot (SITL) — середовище з низьким сенсорним шумом і рівномірною текстурою, тому використано “агресивніші” коефіцієнти PID і вузький deadband;

2) Натура (аудиторія) — реальний шум, мікровібрації, неоднорідні патерни; застосовано пом’якшений тюнінг і ширшу мертву зону.

Такий перехід знижує чутливість до шуму та запобігає автоколиванню – це типова рекомендація для перенесення з SITL на реальний пристрій. Параметри PID і deadband наведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Параметри PID і deadband для Gazebo та реального пристрою

Сценарій	x: Kp	x: Ki	x: Kd	y: Kp	y: Ki	y: Kd	deadband
Gazebo	1,20	0,05	0,80	1,20	0,05	0,80	5 пікселів
Натура (аудиторія)	0,30	0,015	0,30	0,25	0,015	0,30	10 пікселів

Джерело: розроблено авторами.

У табл. 1 використовуються такі позначки:

K_p – пропорційний коефіцієнт PID-регулятора;

K_i – інтегральний коефіцієнт PID-регулятора;

K_d – диференціальний коефіцієнт PID-регулятора;

deadband – ширина мертвої зони, у межах якої керуючий вплив не змінюється;

x, y – канали керування по відповідних осях у площині зображення.

Результати. На рис. 4 показано еволюцію (dx, dy) у Gazebo/SITL: обидва сигнали коливаються навколо нуля з невеликими амплітудами, що свідчить про стабільне пригнічення дрейфу в симуляторі.

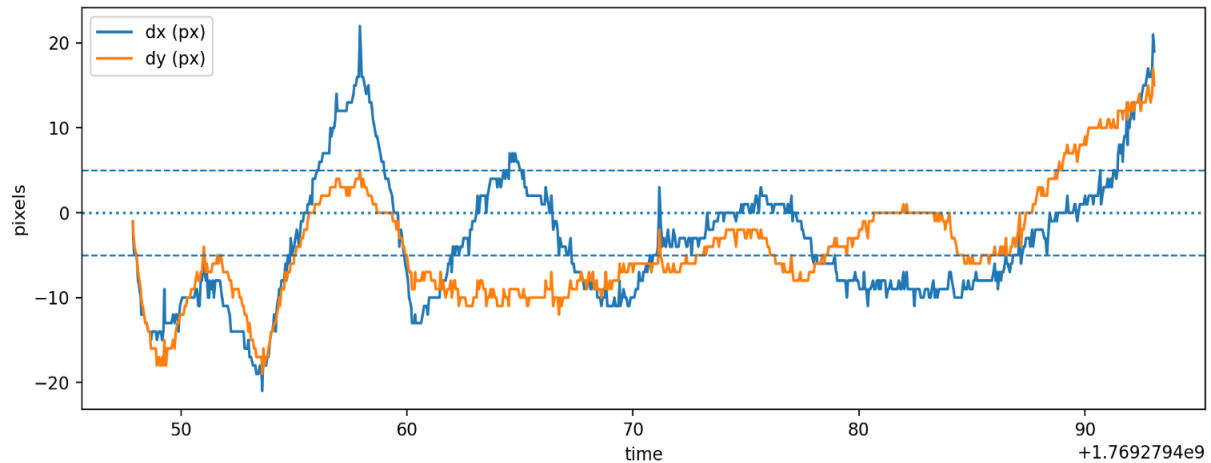


Рис. 4. Gazebo/ArduPilot: часові ряди піксельних відхилень dx, dy

Джерело: розроблено авторами.

Така поведінка зумовлена ідеалізованими умовами симуляції, низьким сенсорним шумом, сталою частотою кадрів, детермінованою динамікою без вітру та вібрацій, рівномірною текстурою поверхні й сталою освітленістю, а також мінімальною затримкою тракту між кадрами і контролером, що разом підсилює точність оцінки (dx, dy) і ефективність PID-пригнічення дрейфу.

На відміну від цього, рис. 5 відображає натурний експеримент у приміщенні: характерна нерівномірність та поодинокі викиди зумовлені текстурою підлоги, мікровібраціями й освітленням. Це потребує пом'якшеного налаштування PID, зниження підсилення та розширеного deadband = 10 px, що узгоджується з очікуваннями для реальної сцени.

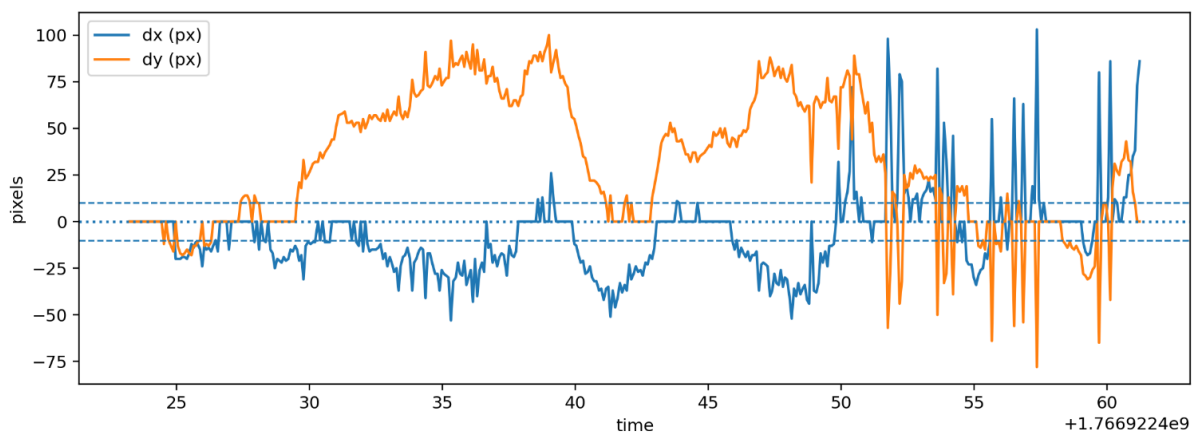


Рис. 5. Натурний експеримент: часові ряди піксельних відхилень dx, dy

Джерело: розроблено авторами.

Зіставлення часових рядів і агрегованих показників підтверджує, що реальні шуми (вібрації, неоднорідна текстура і локальні зміни освітлення) істотно підвищують як середні, так і екстремальні відхилення. Це мотивує зниження підсилення PID та розширення deadband у натурі це підхід, що узгоджується з практиками стабілізації мультироторів і рекомендаціями щодо тюнінгу PID-контурів [15], [16].

Практична валідність pixel-scale стабілізації додатково підтверджується прикладними роботами з оптичним потоком [2]. Для ширшого контексту навігації без GPS перспективним є поєднання з MPC і data-driven методами [17], а також із хмарно-орієнтованими архітектурами для керування, що спрощують масштабування експериментів і розгортання [19].

Доцільно поєднати стабілізацію у піксельному просторі з плануванням і DRL-підходами для колективної навігації та мультицільового стеження [18].

Узагальнення кількісних показників наведено в табл. 2.

Таблиця 2 - Інтегральні метрики для Gazebo та реального пристрою

Сценарій	mean dx	mean dy	RMSE dx	RMSE dy	P95 dx	P95 dy
Gazebo	6,78	6,55	8,21	7,80	15,00	14,00
Натура (аудиторія)	15,60	37,26	23,21	47,68	42,00	85,75

Джерело: розроблено авторами.

У табл. 2 використано такі позначення:

mean dx, mean dy — середні абсолютні відхилення по осях (типовий «середній дрейф»);
 RMSE dx, RMSE dy — середньоквадратичні похибки (чутливі до поодиноких сплесків);
 P95 dx, P95 dy — 95-ті відсотки абсолютної помилки, рівні, які майже ніколи не перевищуються.

Якщо P95 близький до deadband, контролер більшість часу тримає платформу в «мертвій зоні»

Результати стабілізації висоти контуру Z у SITL та натурі. Оскільки горизонтальна стабілізація використовує піксельну похибку, стабільність висоти є критичною для робастності оцінювання (dx, dy).

На рис. 6 наведено результати роботи висотного контуру у Gazebo (SITL) при заданому значенні $h = 5$ м. Відгук висоти має аперіодичний характер і виходить на задану висоту без перерегулювання. За метриками на рисунку середня похибка становить 0,906 м, максимальна – 4,960 м; велике значення максимуму пояснюється фазою зльоту з початковою похибкою, близькою до h .

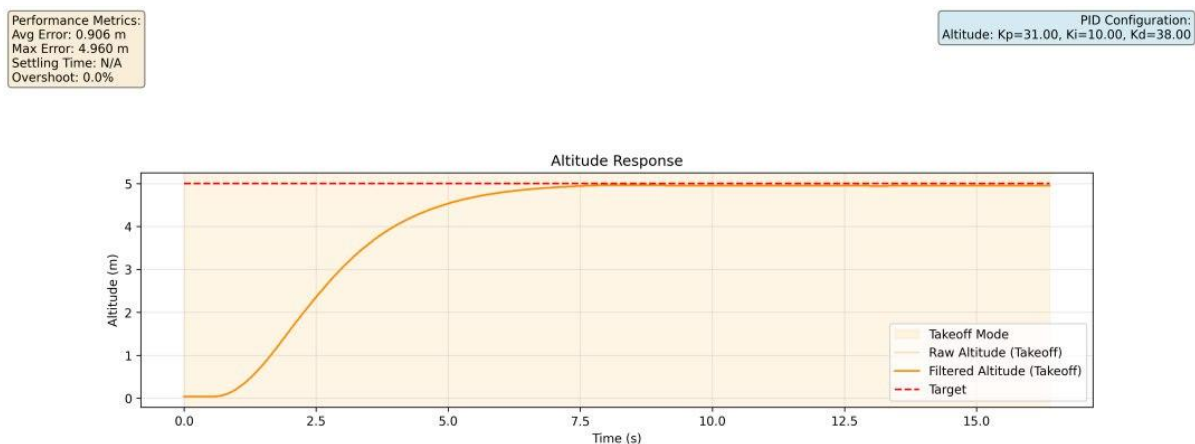


Рис. 6. Результати роботи контуру стабілізації висоти Z у Gazebo

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 7 наведено натурний експеримент у приміщенні при заданій висоті $h = 1,5$ м. У порівнянні з SITL спостерігається більша варіативність сигналів керування, що зумовлено шумом датчика та збуреннями. За метриками на рисунку середня похибка становить 0,096 м, максимальна 1,43 м, перерегулювання 3,3 %. Отримані результати підтверджують працездатність Z-контур та його роль як умови стійкого утримання квадрокоптера у просторі при візійному керуванні в площині.

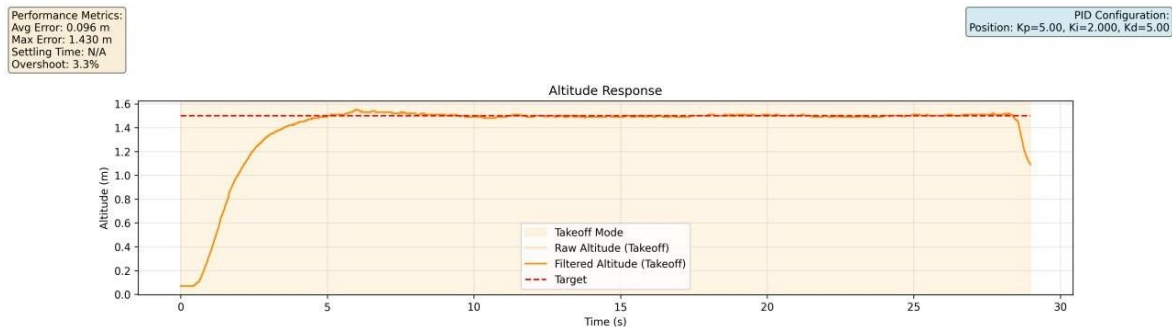


Рис. 7. Результати роботи контуру стабілізації висоти Z у натурному експерименті
Джерело: розроблено авторами

Висновки. Запропоновано та перевірено метод стабілізації квадрокоптера без GPS на основі двоконтурного просторового регулювання: горизонтальна стабілізація X-Y виконується за піксельною похибкою (dx , dy), отриманою з ORB та гомографії, а стабілізація висоти Z – на основі барометра або дальноміра з ЕМА-фільтрацією та PID-регулюванням.

Реалізовано візуальний конвеєр із RANSAC-відсівом викидів, фільтрацією та deadband, що підвищує робастність сигналу дрейфу для PID-регуляторів у каналах roll та pitch.

Показано стабільну поведінку в Gazebo/SITL та працездатність у натурі. Для натурального режиму потрібні менші коефіцієнти PID і ширша мертва зона через вібрації, освітлення та неоднорідну текстуру сцени.

Наведено результати стабілізації висоти для SITL і натурального експерименту, які підтверджують ефективність Z-контур та його роль як умови стійкого утримання квадрокоптера у просторі при візійному позиціонуванні.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на введення механізму довіри до (dx , dy) із керуванням інтегратором PID, компенсацію затримки відеоканалу та перехід до метричної інтерпретації дрейфу з урахуванням висоти та параметрів камери, а також порівняльну оцінку з MPC/data-driven підходами.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT (OpenAI) для мовного редагування окремих фрагментів тексту, покращення стилю викладення та уточнення формулювань. Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Flores, J., Gonzalez-Hernandez, I., Salazar, S., Lozano, R., & Reyes, C. (2024). Improving optical flow sensor using a gimbal for quadrotor navigation in gps-denied environment. *Sensors*, 24(7), 2183. <https://doi.org/10.3390/s24072183>
2. Miller, B., Miller, A., Popov, A., & Stepanyan, K. (2019). UAV landing based on the optical flow videonavigation. *Sensors*, 19(6), 1351. <https://doi.org/10.3390/s19061351>
3. Suslo, M., Kazymyr, V., Oleksienko, P., & Kagitin, D. (2025). *Semi-Physical Modeling of Drone Swarm Control Processes*. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185750>

4. Xiao, K., Tan, S., Wang, G., An, X., Wang, X., & Wang, X. (2020). XTDrone: A customizable multi-rotor uavs simulation platform. In *2020 4th international conference on robotics and automation sciences (ICRAS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icras49812.2020.9134922>
5. Aliane, N. (2024). A survey of open-source UAV autopilots. *Electronics*, *13*(23), 4785. <https://doi.org/10.3390/electronics13234785>
6. Firdaus, A. R., Hutagalung, A., Syahputra, A., & Analia, R. (2023). Indoor localization using positional tracking feature of stereo camera on quadcopter. *Electronics*, *12*(2), 406. <https://doi.org/10.3390/electronics12020406>
7. Sharma, S. K., Jain, K., & Shukla, A. K. (2023). A comparative analysis of feature detectors and descriptors for image stitching. *Applied Sciences*, *13*(10), 6015. <https://doi.org/10.3390/app13106015>
8. Karami, E., Prasad, S., & Shehata, M. (2017). Image matching using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: performance comparison for distorted images. *arXiv preprint arXiv:1710.02726*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.02726>
9. Luo, Y., Wang, X., Liao, Y., Fu, Q., Shu, C., Wu, Y., & He, Y. (2023). A review of homography estimation: Advances and challenges. *Electronics*, *12*(24), 4977. <https://doi.org/10.3390/electronics12244977>
10. Zhong, H., Wang, Y., Miao, Z., Li, L., Fan, S., & Zhang, H. (2022). A homography-based visual servo control approach for an underactuated unmanned aerial vehicles in gps-denied environments. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, *1*. <https://doi.org/10.1109/tiv.2022.3163315>
11. Qian, Z., Dong, Y., Hou, Y., Zhang, H., Fan, S., & Zhong, H. (2024). A geometric approach for homography-based visual servo control of underactuated UAVs. *Measurement and Control*. <https://doi.org/10.1177/00202940241238918>
12. Koubaa, A., Allouch, A., Alajlan, M., Javed, Y., et al. (2019). *Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a nutshell: A survey*. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>
13. Bernevek, I., & Yaremko, O. (2025). Investigation of unmanned aircraft autopiloting methods with real time route correction. *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*, *5*(2), 49–58. <https://doi.org/10.23939/ictee2025.02.049>
14. Hamza, M. A., Mohsin, M., & Khalil, M. (2024). *MAVLink protocol: A survey of security threats and countermeasures*. In *Proceedings of the 4th International Conference on Digital Futures and Transformative Technologies (ICoDT2)*. <https://doi.org/10.1109/ICoDT262145.2024.10740195>
15. Guardedeño, R., López, M. J., & Sánchez, V. M. (2019). MIMO PID controller tuning method for quadrotor based on LQR/LQG theory. *Robotics*, *8*(2), 36. <https://doi.org/10.3390/robotics8020036>
16. Sheta, A., Braik, M., Maddi, D. R., Mahdy, A., Aljahdali, S., & Turabieh, H. (2021). Optimization of PID controller to stabilize quadcopter movements using meta-heuristic search algorithms. *Applied Sciences*, *11*(14), 6492. <https://doi.org/10.3390/app11146492>
17. Torrente, G., Kaufmann, E., Fohn, P., & Scaramuzza, D. (2021). Data-Driven MPC for quadrotors. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *6*(2), 3769–3776. <https://doi.org/10.1109/lra.2021.3061307>
18. Qamar, S., Khan, S. H., Arshad, M. A., Qamar, M., & Khan, A. (2022). *Autonomous drone swarm navigation and multi-target tracking in 3D environments with dynamic obstacles*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2202.06253>.
19. Kadri, M. B. (2025). Enhancing drone autonomy through cloud integration: A comprehensive software architecture for navigation, visual servoing, and control. *PeerJ Computer Science*, *11*, Article e3238. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3238>
20. Kahitin, D., Kazymyr, V., Suslo, M., Yatchenko, Y., et al. (2025). *Drone positioning in a specified location using visual data under GPS-denied conditions*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IDAACS68557.2025.11322385>

References

1. Flores, J., Gonzalez-Hernandez, I., Salazar, S., Lozano, R., & Reyes, C. (2024). Improving optical flow sensor using a gimbal for quadrotor navigation in gps-denied environment. *Sensors*, *24*(7), 2183. <https://doi.org/10.3390/s24072183>
2. Miller, B., Miller, A., Popov, A., & Stepanyan, K. (2019). UAV landing based on the optical flow videonavigation. *Sensors*, *19*(6), 1351. <https://doi.org/10.3390/s19061351>

3. Suslo, M., Kazymyr, V., Oleksienko, P., & Kagitin, D. (2025). *Semi-Physical Modeling of Drone Swarm Control Processes*. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185750>
4. Xiao, K., Tan, S., Wang, G., An, X., Wang, X., & Wang, X. (2020). XTDrone: A customizable multi-rotor uavs simulation platform. In *2020 4th international conference on robotics and automation sciences (ICRAS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icras49812.2020.9134922>
5. Aliane, N. (2024). A survey of open-source UAV autopilots. *Electronics*, *13*(23), 4785. <https://doi.org/10.3390/electronics13234785>
6. Firdaus, A. R., Hutagalung, A., Syahputra, A., & Analia, R. (2023). Indoor localization using positional tracking feature of stereo camera on quadcopter. *Electronics*, *12*(2), 406. <https://doi.org/10.3390/electronics12020406>
7. Sharma, S. K., Jain, K., & Shukla, A. K. (2023). A comparative analysis of feature detectors and descriptors for image stitching. *Applied Sciences*, *13*(10), 6015. <https://doi.org/10.3390/app13106015>
8. Karami, E., Prasad, S., & Shehata, M. (2017). Image matching using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: performance comparison for distorted images. *arXiv preprint arXiv:1710.02726*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.02726>
9. Luo, Y., Wang, X., Liao, Y., Fu, Q., Shu, C., Wu, Y., & He, Y. (2023). A review of homography estimation: Advances and challenges. *Electronics*, *12*(24), 4977. <https://doi.org/10.3390/electronics12244977>
10. Zhong, H., Wang, Y., Miao, Z., Li, L., Fan, S., & Zhang, H. (2022). A homography-based visual servo control approach for an underactuated unmanned aerial vehicles in gps-denied environments. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, *1*. <https://doi.org/10.1109/tiv.2022.3163315>
11. Qian, Z., Dong, Y., Hou, Y., Zhang, H., Fan, S., & Zhong, H. (2024). A geometric approach for homography-based visual servo control of underactuated UAVs. *Measurement and Control*. <https://doi.org/10.1177/00202940241238918>
12. Koubaa, A., Allouch, A., Alajlan, M., Javed, Y., et al. (2019). *Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a nutshell: A survey*. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>
13. Bernevek, I., & Yaremko, O. (2025). Investigation of unmanned aircraft autopiloting methods with real time route correction. *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*, *5*(2), 49–58. <https://doi.org/10.23939/ict2025.02.049>
14. Hamza, M. A., Mohsin, M., & Khalil, M. (2024). *MAVLink protocol: A survey of security threats and countermeasures*. In *Proceedings of the 4th International Conference on Digital Futures and Transformative Technologies (ICoDT2)*. <https://doi.org/10.1109/ICoDT262145.2024.10740195>
15. Guardoño, R., López, M. J., & Sánchez, V. M. (2019). MIMO PID controller tuning method for quadrotor based on LQR/LQG theory. *Robotics*, *8*(2), 36. <https://doi.org/10.3390/robotics8020036>
16. Sheta, A., Braik, M., Maddi, D. R., Mahdy, A., Aljahdali, S., & Turabieh, H. (2021). Optimization of PID controller to stabilize quadcopter movements using meta-heuristic search algorithms. *Applied Sciences*, *11*(14), 6492. <https://doi.org/10.3390/app11146492>
17. Torrente, G., Kaufmann, E., Fohn, P., & Scaramuzza, D. (2021). Data-Driven MPC for quadrotors. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *6*(2), 3769–3776. <https://doi.org/10.1109/lra.2021.3061307>
18. Qamar, S., Khan, S. H., Arshad, M. A., Qamar, M., & Khan, A. (2022). *Autonomous drone swarm navigation and multi-target tracking in 3D environments with dynamic obstacles*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2202.06253>.
19. Kadri, M. B. (2025). Enhancing drone autonomy through cloud integration: A comprehensive software architecture for navigation, visual servoing, and control. *PeerJ Computer Science*, *11*, Article e3238. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3238>
20. Kahitin, D., Kazymyr, V., Suslo, M., Yatchenko, Y., et al. (2025). *Drone positioning in a specified location using visual data under GPS-denied conditions*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IDAACS68557.2025.11322385>

Дата першого надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.03.2026

Mykola Suslo¹, Volodymyr Kazymyr²

¹PhD student of the Department of Information and Computer System
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: nikolaysuslo0@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6692-1234>. Scopus author ID: 60157989800

²Doctor of Sciences, Professor of the Department of Information and Computer System
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vykazymyr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. ResearcherID: Q-2925-2016

METHOD OF STABILIZING A QUADROPTER IN A PREFERRED POSITION WITH SPATIAL PID-ADJUSTMENT BASED ON VIDEO DATA WITHOUT GPS

The paper considers a method for stabilizing a quadcopter at a fixed position under conditions where global satellite navigation (GPS) is unavailable. A two-loop approach to spatial control is proposed: an altitude stabilization loop based on barometer measurements in SITL or rangefinder measurements in real-world experiments, using EMA filtering and PID control; and a horizontal-plane stabilization loop based on pixel error (dx , dy) obtained from the video stream of a downward-facing camera. The estimation of (dx , dy) is performed by extracting local ORB features and estimating the homography between reference and current frames with RANSAC-based outlier rejection. To reduce noise, filtering and a deadband are applied, after which the (dx , dy) signals are fed to PID controllers which outputs are converted into roll and pitch corrections and transmitted to the autopilot via MAVLink. The method was implemented in the Gazebo environment in combination with ArduPilot and verified on a real platform. It is shown that in simulation the drift is suppressed to a range of tens of pixels; in real-world experiments, the error increases due to vibrations, non-uniform texture, and lighting conditions, which requires separate PID tuning and a wider deadband. In addition, the results of altitude stabilization for both SITL and real-world experiments are presented, confirming the operability of the Z-loop and its role as a prerequisite for stable quadcopter position holding in space.

Keywords: unmanned aerial vehicle; GPS-denied; ORB; visual stabilization; homography; pixel error; PID control; Gazebo; ArduPilot.

Fig.: 7. Table: 2. References: 20.