

Л. О. Савенко¹, бакалавр, Ю. В. Бобков², к.т.н., доцент

СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ КВАДРОКОПТЕРА

Ua

В роботі на основі проведеного аналізу можливих варіантів автономного руху квадрокоптера за заданою траєкторією обґрунтовано комплексування системи технічного зору (СТЗ) і БІНС.

Для вирішення навігаційних задач під час автономного руху за заданим маршрутом з використанням СТЗ обрано політ за системою навігаційних орієнтирів. Відомі різні підходи щодо застосування СТЗ для керування рухом БПЛА в залежності від прийнятої системи орієнтирів та особливостей визначення маршруту слідування. Для попереднього опису та наступного пошуку навігаційних орієнтирів на зображення СТЗ запропоновано використання методів характерних точок, що дозволяє обирати в цій якості об'єкти різної структури, включаючи природні орієнтири.

Розроблена структурна схема системи керування квадрокоптером із застосуванням СТЗ. Також запропонована методика розрахунку основних характеристик блоків СТЗ виходячи із заданих вимог до точності визначення напрямку руху квадрокоптера за навігаційними орієнтирами.

В роботі також запропонований алгоритм керування рухом квадрокоптера за системою візуальних навігаційних орієнтирів, що задають маршрут польоту. Після знаходження на кадрі з СТЗ за обраною системою ознак чергового зображення навігаційного орієнтира, визначається його центр та положення в кадрі відносно напрямку руху квадрокоптера. Отримані дані використовуються для визначення та зміни напрямку руху квадрокоптера шляхом зміни кута ристання, що передається в систему керування.

Запропоновані в роботі рішення можуть бути корисні при вирішенні різноманітних задач використання СТЗ для керування рухом БПЛА.

En

In this paper, based on the analysis of possible options for the autonomous movement of a quadcopter along a predetermined trajectory, the combination of a technical vision system (TVS) and IMU is proposed.

Flying through a system of navigation landmarks was applied to solve navigation tasks during autonomous movement along a predetermined route using TVS. There are several approaches to implementing TVS to control UAV movement, depending on the accepted landmark system and the features of the route definition. For the previous description and further detection of navigation landmarks in the TVS image, the application of feature extraction methods is proposed, as it enables the selection of objects of different structures, including natural landmarks.

A block diagram of a quadcopter control system with the application of TVS is developed. A methodology for calculating the main parameters of the TVS units is proposed, based on the specified requirements for the accuracy of the quadcopter's

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

heading determination by navigation landmarks.

The paper also proposes an algorithm for controlling the movement of a quadcopter using a system of visual navigation landmarks which define the flight route. After finding the image of the next navigation landmark in the TVS frame according to the selected feature system, its center and position in the frame relative to the quadcopter's heading are determined. The obtained data is used to determine and change the direction of the movement of the quadcopter by changing the yaw angle, which is transmitted to the control system.

The suggested approaches may be useful in solving various problems of using TVS for controlling UAV movement.

Вступ

За останні роки безпілотні літальні апарати (БПЛА) набули широкого використання у різних галузях. Найбільш масовим типом БПЛА стали різноманітні мультикоптери, для яких актуальною є задача автономного польоту, в якому вони можуть виконувати завдання і приймати рішення щодо маршруту руху на основі попередньо запрограмованих інструкцій, аналізу даних від бортових датчиків та застосування алгоритмів штучного інтелекту [1].

Інерціальні навігаційні системи (БІНС) не завжди можуть вирішити задачу тривалого автономного польоту [2].

Підвищення точності вирішення навігаційної задачі під час автономного польоту квадрокоптера можливо шляхом використання систем технічного зору (СТЗ) [3, 4].

Відомі різні підходи щодо застосування СТЗ для керування рухом БПЛА у залежності від прийнятої системи орієнтирів та особливостей визначення маршруту слідування: використання еталонних фотографій [5], навігаційних орієнтирів (НО) [6], стереоефекту для польоту за рельєфом [7] та алгоритму *SLAM* [8]. Використання алгоритму *SLAM* потребує значної кількості додаткової інформації та значних обчислювальних потужностей, що не завжди можливо для бортової системи малогабаритного квадрокоптера. Недоліками використання еталонних фотографій є потреба у великому об'ємі інформації для їх зберігання у бортовій системі, значних обчислювальних ресурсів для порівняння еталонних фотографій та отриманих зображень у режимі реального часу. У разі використання НО можливий політ за штучними або природними орієнтирами. Для польоту за штучними навігаційними орієнтирами необхідне створення спеціальної системи орієнтирів та підтримання її у належному стані. При використанні природних орієнтирів у вигляді особливостей ландшафту, або штучних об'єктів загального призначення (будівлі, дороги тощо) недоліком є вплив сезонних і погодних факторів, техногенних впливів.

Політ за попередньо описаною системою НО обмеженої кількості дозволяє зменшити обсяг інформації щодо заданого маршруту і вимоги до бортових інформаційно-обчислювальних ресурсів.

Основна увага у зазначених роботах приділена вирішенню окремих питань застосування СТЗ і обраної системи параметрів для визначення маршруту польоту БПЛА. Однак недостатньо досліджені питання побудови самої СТЗ, визначення її параметрів для вирішення поставленої задачі та програмно-алгоритмічного комплексу для забезпечення задач керування польотом.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка системи технічного зору для керування рухом квадрокоптера у режимі автономного польоту за системою навігаційних орієнтирів та її програмно-алгоритмічного забезпечення.

Розробка структурної схеми СТЗ

У більшості випадків СТЗ квадрокоптера має достатньо стандартну структуру, основними елементами якої є відеокамера та спеціалізований одноплатний мікрокомп'ютер [9, 10]. Основним питанням, що необхідно вирішити, є визначення параметрів СТЗ виходячи із конкретної поставленої задачі та її комплексування із системою керування квадрокоптера.

Оскільки для керування квадрокоптером обрано комбінацію БНС і СТЗ, то розроблена структурна схема має наступний вигляд (рис. 1):

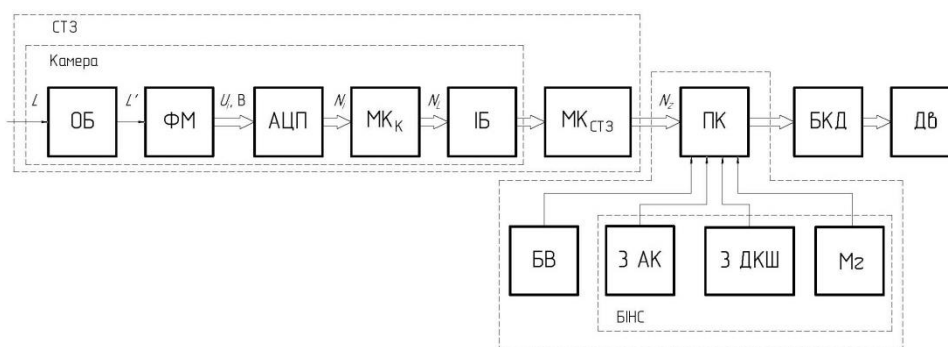


Рис. 1. Структурна схема системи керування квадрокоптером із застосуванням СТЗ

На рис. 1 позначено: L – лінійні параметри об'єктів; ОБ – оптичний блок; ФМ – фотоматриця; L' – відображення лінійних параметрів на фотоматрицю; U_i, V – напруга на вході аналогово-цифрового перетворювача (АЦП); МК_к – мікроконтролер камери; ІБ – інтерфейсний блок; МК_{СТЗ} – мікроконтролер СТЗ; N_i, N_L, N_z – коди на виходах АЦП, мікроконтролера камери та мікроконтролера СТЗ відповідно; ПК – польотний конт-

ролер; БВ – барометричний висотомір; 3 АК – тривісний блок акселерометрів; 3 ДКШ – тривісний блок датчиків кутової швидкості (гіроскопів); Мг – магнітометр; БКД – блок керування двигунами; Дв – двигуни квадрокоптера.

Польотний контролер, здійснюючи обробку вхідних даних, отриманих із датчиків та СТЗ, обчислює необхідну для керування рухом квадрокоптера швидкість для кожного із чотирьох двигунів. Блок керування двигунами (електронні регулятори швидкості (*ESC*)) перетворює ці швидкості на сигнали для двигунів. Оскільки метою роботи є розробка системи технічного зору для керування рухом, ми не будемо детально розглядати БНС і виконавчі пристрої.

СТЗ складається із оптичного блоку (об’єктива), фотоматриці, аналого-цифрового перетворювача, мікроконтролера камери, інтерфейсного блоку та мікроконтролера СТЗ.

Для визначення технічних параметрів СТЗ необхідно визначити основні параметри кожного блоку на основі структурного аналізу із урахуванням похибок.

Канал СТЗ із урахуванням похибок наведено на рис. 2.

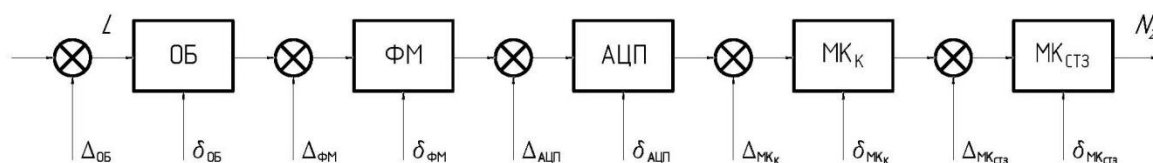


Рис. 2. Канал СТЗ із урахуванням похибок

На рис. 2 позначено: $\Delta_{\text{ОБ}}$ та $\delta_{\text{ОБ}}$ – абсолютна адитивна та відносна мультиплікативна похибки ОБ, відповідно; $\Delta_{\text{ФМ}}$ та $\delta_{\text{ФМ}}$ – абсолютна адитивна та відносна мультиплікативна похибки ФМ, відповідно; $\Delta_{\text{АЦП}}$ та $\delta_{\text{АЦП}}$ – абсолютна адитивна та відносна мультиплікативна похибки АЦП, відповідно; $\Delta_{\text{МКк}}$ та $\delta_{\text{МКк}}$ – абсолютна адитивна та відносна мультиплікативна похибки МКк, відповідно; $\Delta_{\text{МКСТЗ}}$ та $\delta_{\text{МКСТЗ}}$ – абсолютна адитивна та відносна мультиплікативна похибки МКСТЗ, відповідно.

Рівняння перетворення для каналу СТЗ:

$$N_z = L \cdot K_{\text{ОБ}} \cdot K_{\text{ФМ}} \cdot K_{\text{АЦП}} \cdot K_{\text{МКк}} \cdot K_{\text{МКСТЗ}},$$

де $K_{\text{ОБ}}$ – коефіцієнт перетворення оптичного блоку; $K_{\text{ФМ}}$ – коефіцієнт перетворення фотоматриці; $K_{\text{АЦП}}$ – коефіцієнт перетворення АЦП; $K_{\text{МКк}}$ – коефіцієнт перетворення зображення у мікроконтролері камери; $K_{\text{МКСТЗ}}$ – коефіцієнт перетворення інформації у мікроконтролері СТЗ.

Для каналу СТЗ були також отримані рівняння сумарної відносної мультиплікативної складової похибки:

$$\delta_L = \delta_{\text{ОБ}} + \delta_{\text{ФМ}} + \delta_{\text{АЦП}} + \delta_{\text{МКк}} + \delta_{\text{МКСТЗ}},$$

та сумарної приведеної адитивної складової похибки

$$\gamma_L = \gamma_{OB} + \gamma_{ФМ} + \gamma_{АЦП} + \gamma_{МК_K} + \gamma_{МК_{СТЗ}} .$$

Нехай сумарна похибка дорівнює 5 %, а сумарна відносна мультиплікативна похибки та сумарна приведена адитивна похибки однакові, тобто:

$$\delta_L = \gamma_L = 2,5 \% .$$

Розподілимо відповідні складові похибки по окремих блоках, виходячи з апріорних даних про їх можливі значення:

- для оптичного блоку: $\delta_{OB} = 1\%$; $\gamma_{OB} = 1\%$;
- для фотоматриці: $\delta_{ФМ} = 1\%$; $\gamma_{ФМ} = 1\%$;
- для АЦП: $\delta_{АЦП} = \delta_{нл} = 0,1\%$; $\gamma_{АЦП} = \gamma_{кв} = 0,1\%$ ($\delta_{нл}$ – похибка від нелінійності, $\gamma_{кв}$ – похибка від квантування);
- для мікроконтролера камери: $\delta_{МК_K} = 0,2\%$; $\gamma_{МК_K} = 0,2\%$;
- для мікроконтролера СТЗ: $\delta_{МК_{СТЗ}} = 0,2\%$; $\gamma_{МК_{СТЗ}} = 0,2\%$.

На основі проведеного розподілення похибок визначимо параметри основних блоків.

У якості найпростішої моделі ОБ будемо розглядати його як тонку лінзу, для якої можна застосувати формулу з теорії оптики:

$$H = \frac{h}{\frac{d}{f} - 1} ,$$

де H – розмір зображення, відбитого об'єктивом на фотоматрицю;

h – лінійний розмір об'єкта (навігаційного орієнтира);

d – відстань від об'єктива до об'єкта;

f – фокусна відстань об'єктива.

За мінімальної відстані від об'єктива до об'єкта d_{min} зображення об'єкта у кадрі матиме максимальний розмір і навпаки. Припустимо, що для нашого випадку максимальний розмір b зображення об'єкта по вертикалі H_{max} становитиме 50 % від розміру фотоматриці, тобто:

$$b = 2 \cdot H_{max} .$$

За максимальної відстані від об'єктива до об'єкта d_{max} матимемо мінімальний розмір зображення об'єкта по вертикалі H_{min} . Абсолютна похибка визначення розміру цього зображення ΔH_{min} буде визначатися розміром пікселя фотоматриці Δ_{Π} :

$$\Delta_{\Pi} = \Delta H_{min} = \Delta H_{min} \cdot \gamma_{ФМ} .$$

Тоді кількість пікселів по вертикалі визначатиметься як відношення розміру фотоматриці по вертикалі до розміру пікселя:

$$N_B = \frac{b}{\Delta_{\Pi}} = \frac{2d_{max}}{d_{min} \cdot \gamma_{\Phi M}} .$$

Будемо використовувати розміри кадру зі співвідношенням 4:3. Тоді кількість пікселів по горизонталі визначатиметься:

$$N_{\Gamma} = \frac{4}{3} N_B .$$

Загальна кількість пікселів фотоматриці визначатиметься площею кадру:

$$N = N_B \cdot N_{\Gamma} .$$

За умов, що:

$$d_{min} = 100 \text{ м}; \quad d_{max} = 1500 \text{ м}; \quad \gamma_{\Phi M} = 1\%$$

було отримано наступні результати:

$$N_B = 3000; \quad N_{\Gamma} = 4000 .$$

Виходячи із отриманих результатів, для СТЗ підходять камери із фотоматрицею з кількістю пікселів не менше 4000×3000 , що відповідає загальній кількості 12 Мп.

Із урахуванням цих умов оберемо матрицю *Sony IMX 298 1/2.8''* із роздільною здатністю 4656×3496 . Розмір пікселя цієї матриці становить $\Delta_{\Pi} = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Тоді мінімальний розмір зображення об'єкта по вертикалі:

$$H_{min} = \frac{\Delta_{\Pi}}{\gamma_{\Phi M}} = \frac{1,12 \cdot 10^{-6}}{0,01} = 1,12 \cdot 10^{-4} \text{ (м)} .$$

Знаючи мінімальний розмір об'єкта на зображенні, обчислимо необхідну фокусну відстань об'єктива:

$$f_{min} = \frac{d_{max} \cdot H_{min}}{h + H_{min}} = \frac{1500 \cdot 1,12 \cdot 10^{-4}}{5 + 1,12 \cdot 10^{-4}} \approx 33,6 \text{ (мм)} .$$

Обчислимо максимальний розмір об'єкта на зображенні:

$$H_{max} = \frac{N_B}{2} \Delta_{\Pi} = \frac{3496 \cdot 1,12 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,9578 \cdot 10^{-3} \text{ (м)} .$$

Розрахуємо необхідну фокусну відстань об'єктива:

$$f_{max} = \frac{d_{min} \cdot H_{max}}{h + H_{max}} = \frac{100 \cdot 1,9578 \cdot 10^{-3}}{5 + 1,9578 \cdot 10^{-3}} \approx 39,2 \text{ (мм)} .$$

Враховуючи всі проведені обчислення та вимоги щодо кута огляду 120° , обираємо камеру *ELP-USB16MP01-MFV*, що має фотоматрицю *Sony IMX 298*, кут огляду 120° та змінну фокусну відстань від 5 до 50 мм.

Розробка загального алгоритму керування рухом квадрокоптера

Для запропонованої структурної схема (рис. 1) був розроблений загальний алгоритм керування рухом квадрокоптера із застосуванням СТЗ, блок-схема якого наведена на рис. 3.

На етапі допольотної підготовки у пам'ять бортової системи вносяться всі основні дані щодо польотного завдання, а саме: мета польоту (політ у задану точку із виконанням в ньому певного завдання та наступних дій), траєкторія руху, висота польоту тощо.

Також у пам'ять заноситься опис всіх НО за маршрутом слідування. Для опису НО використовується певна наперед обрана система ознак. На цьому етапі часто використовують різні алгоритми машинного навчання. У цій роботі для попереднього опису та наступного виділення навігаційного орієнтира на зображенні з камери СТЗ пропонується застосування методів характерних точок, наприклад, за алгоритмами *SURF* або *ORB*.

Після зльоту квадрокоптера та набору висоти відбувається рух у заданому початковому напрямку. Під час руху положення квадрокоптера за кутами крену і тангажу визначається за сигналами БНС. Кут рискання визначається за напрямом руху квадрокоптера.

У процесі польоту на кожній ділянці маршруту в якості напрямку руху квадрокоптера обирається рух у напрямку найближчого НО. Коли черговий НО виходить за межі кадру, СТЗ відшукує наступний НО та коригує напрям руху квадрокоптера за його розташуванням.

Після знаходження за обраною системою ознак чергового зображення НО на кадрі із СТЗ, визначається центр НО, або як центр мас, або як геометричний центр. На наступному етапі визначається положення НО у кадрі відносно напрямку руху квадрокоптера.

За координатами зображення НО у кадрі визначається напрям зміни курсу квадрокоптера шляхом обчислення кута між поточним напрямком руху та напрямом на НО за отриманими достатньо простими тригонометричними співвідношеннями. Визначений кут передається у систему керування для зміни напрямку руху – кута рискання. Після розпізнавання останнього навігаційного орієнтира квадрокоптер переходить до виконання кінцевої мети польотного завдання, наприклад, приземлення у задану точку, скидання вантажу тощо.

Висновки

У системі керування рухом квадрокоптера із використанням СТЗ запропоновано застосовувати методи характерних точок для попереднього опису та наступного пошуку навігаційних орієнтирів на зображенні, що дозволяє обирати у цій якості об'єкти різної структури, включаючи природні орієнтири.

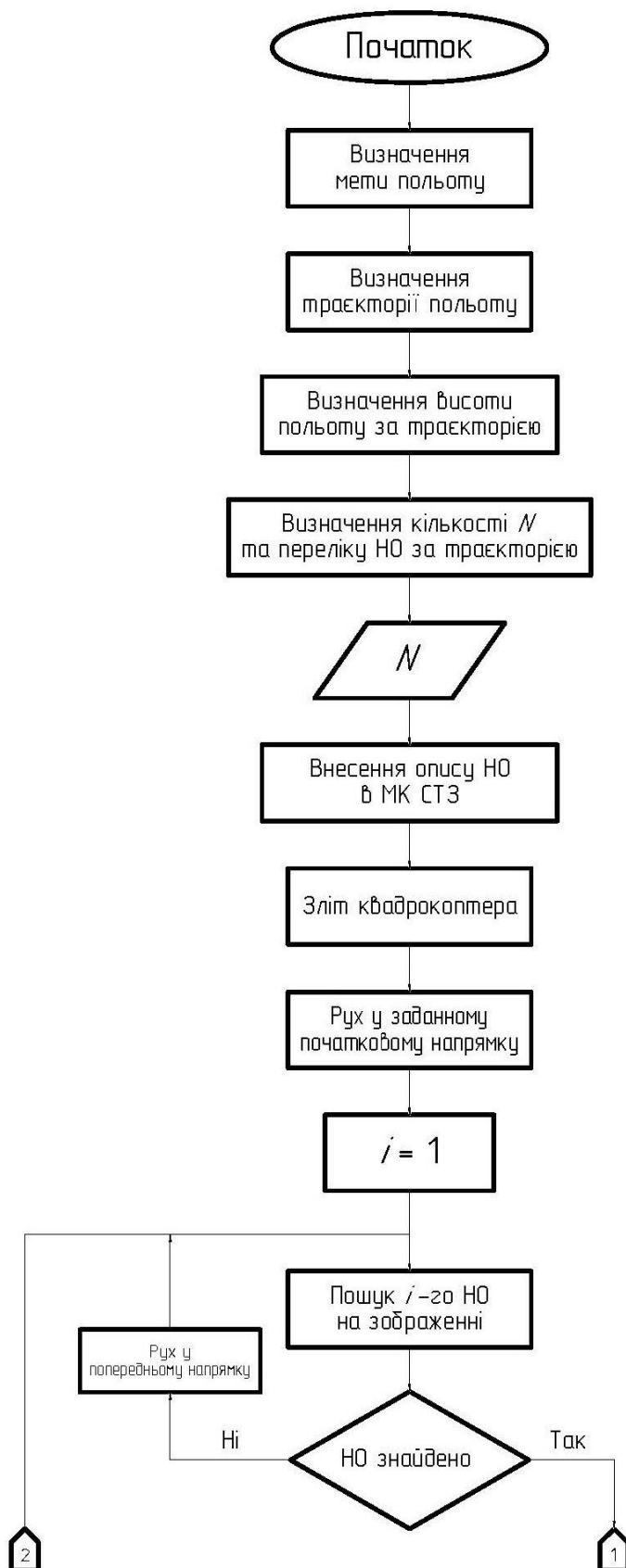
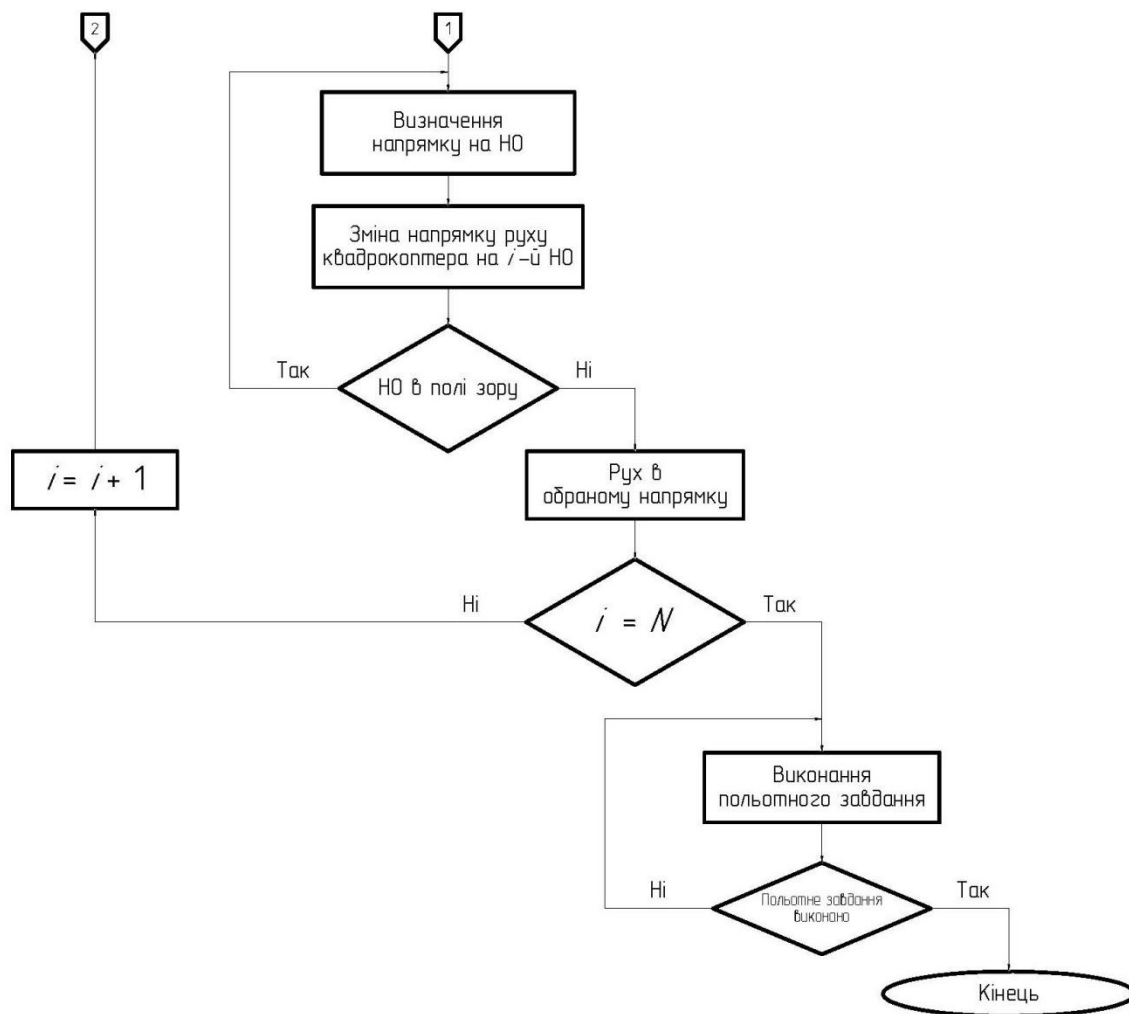


Рис. 3. Загальний алгоритм керування рухом квадрокоптера



Продовження рис. 3. Загальний алгоритм керування рухом квадрокоптера

Запропоновані методика розрахунку основних характеристик блоків СТЗ, виходячи із заданих вимог до точності визначення напрямку руху квадрокоптера, та алгоритм керування його рухом за навігаційними орієнтирами, які можуть бути корисні під час вирішення різноманітних задач керування рухом БПЛА.

Список використаних джерел

1. *Elmokadem, T., & Savkin, A. V.* Towards Fully Autonomous UAVs: A Survey. *Sensors*. 2021. No. 18. 6223 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21186223>.
2. *Zhang, Y., & Gao, Y.* A method to improve the alignment performance for GPS-IMU System. *GPS Solutions*. 2007. 11, No. 2 pp. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-006-0046-4>.

3. *Lidia María Belmonte, Rafael Morales, Antonio Fernández-Caballero.* Computer Vision in Autonomous Unmanned Aerial Vehicles - A Systematic Mapping Study // *Applied Sciences*. – № 9 (3196), 2019. – 34 p.
4. *Збруцький О. В.* Метод визначення координат рухомого об'єкту з використанням системи технічного зору. / Р. С. Котвицький., Г. В. Сарибоба, О. В. Збруцький // *Інформаційні системи, механіка та керування*. - 2017. – № 16. С. 71-78.
DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804162017114363> .
5. *G. Conte, P. Doherty.* An Integrated UAV Navigation System Based on Aerial Image Matching. Aerospace Conference, Montana, USA, 1–8 March 2008. 10p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/AERO.2008.4526556> .
6. *T. Zhang, Y. Wang, M. Achtelik, K. Kühnlenz, M. Buss.* Autonomous Hovering of a Vision-IMU Guided Quadrotor. Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 9–12 August 2009. 6 p.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMA.2009.5246422> .
7. *K. V. Stefanik, J. C. Gassaway, K. Kochersberger, A. L. Abbott.* UAV-Based Stereo Vision for Rapid Aerial Terrain Mapping. *GIScience & Remote Sensing*. 2011. 48, No.1 pp. 24–49.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2747/1548-1603.48.1.24> .
8. *R. Munguía, S. Urzua, Y. Bolea, A. Grau.* Vision-Based SLAM System for Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*. 2016. No.16 (3). 372p.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s16030372> .
9. *Бобков Ю. В.* Система технічного зору для забезпечення руху групи мультикоптерів / Ю. В. Бобков, П. О. Піщела // *Механіка гіроскопічних систем*. – 2020. – № 39. – С. 13-24.
DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771392020229021> .
10. *Бобков Ю. В.* Система технічного зору квадрокоптера для точного землеробства. / Ю. В. Бобков, А. А. Шевчук // *Механіка гіроскопічних систем*. – 2021. – № 42. С. 89-101. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771422021268468> .