

УДК 004.93'11 004.93'12

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380415201680108>

О. О. Пікенин¹, аспірант, О. П. Мариношенко², доцент, к. т. н.,
О. О. Прохорчук³, доцент, к. т. н.

ПРО ПРОБЛЕМИ І МЕТОДИ ЗНАХОДЖЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННЯХ

En

This work is devoted to the development of a new system of search and identification of unmanned vehicle using a machine vision system, namely guidance system. The problem of automatic aerial target recognition based on of the digital filtering streaming video and questions of informative signature formation are considered in the article. Machine vision systems are used for the treatment and recognition of different images obtained from a camera. A vision system is a means of tracking, monitoring and automatic decision-making in certain situations.

This article discusses the design features of guidance system for unmanned aerial vehicle. The guidance system operates in real time. Detection algorithm of small-sized unmanned aerial vehicle is proposed. From the results obtained, control command for the guidance of the unmanned aircraft to target is generated.

The main objective of the search algorithm and identification of air targets is the reference point search of the desired geometric object. To find the particular contour point, it is necessary to carry out digital filters group method for three channels of streaming video. Algorithm of the block guidance using frame difference is introduced and implemented. The proposed algorithm for small objects finding can detect moving objects according to the optical sensor taking into account the changing position of the optical sensor. The work concludes the demonstrating of the proposed algorithm.

Ru

В данной статье рассматриваются особенности проектирования системы наведения беспилотного летательного аппарата, которая работает в режиме реального времени. Для детектирования малоразмерного беспилотного летательного аппарата предложен алгоритм детектирования геометрического центра цели. Из полученных результатов сформированы команды наведения на цель. Проверка эффективности предложенного алгоритма численное моделирование было выполнено для разнообразного положения беспилотного летательного аппарата в кадре.

Вступ

В останні десятиліття комплекси обробки зображень активно застосовуються в складі систем автоматичного супроводу повітряних об'єктів,

¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", факультет авіаційних і космічних систем

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра теоретичної механіки

³ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра приладів та систем керування літальними апаратами

що спостерігаються на тлі ясного або хмарного неба, з метою вирішення завдань їх виявлення та оцінки параметрів. Такими об'єктами можуть виступати літаки, вертольоти, безпілотні літальні апарати та ракети.

Необхідно відзначити, що раніше для цих цілей використовувалися переважно радіолокаційні станції (РЛС). Однак РЛС властиві істотні недоліки, які вимагають пошуку і впровадження нових підходів. Подолати багато проблем можна шляхом використання сучасних оптичних датчиків для отримання зображення об'єкта з подальшою комп'ютерною обробкою і аналізом відеоінформації.

Формування керування польотом кількох безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є важливою частиною багатьох досліджень [1] – [4], з великою кількістю практичних застосувань: розвідки, зв'язку, пошуково-рятувальних робіт.

На даний час є багато запропонованих методів дослідження для реалізації керування групою БПЛА, особливо для утворення формації (групи) БПЛА, такі як слідування за ведучим лідером [1], режим формування групи, що базується на зближенні з ведучим лідером [3], та слідування за віртуальним лідером [4]. У всіх цих методах найбільш важливою частиною є отримання даних щодо поведінки ведучого лідера.

Найбільшою проблемою в керуванні утвореною групою БПЛА є питання в створенні надійного зв'язку та синхронізації дій між сусідніми БПЛА в польотному строю.

На сьогодні добре відомі методи для зв'язку і синхронізації дій всередині групи безпілотних літальних апаратів, є методи, основані на використанні засобів технічного зору [2], а також методи, основані на передачі даних по радіоканалу.

Постановка задачі

Автоматична система контролю польоту групи безпілотних літальних апаратів включає в себе блок наведення БПЛА, який складається з системи технічного зору та алгоритмів розпізнавання образів.

В області цифрової обробки зображень та розпізнавання образів вирішується велика кількість завдань, однією зі складових якої є виявлення і локалізація окремих областей зображення. Існуючі підходи до виявлення областей зображення спрямовані на вирішення завдань розпізнавання. Прикладом таких завдань є виявлення об'єктів заданих класів. Пошук апріорно невідомого об'єкта на зображенні виконується методом порівняння оригіналу із заданим в базі даних пошукової системи еталоном.

Завдання знаходження відповідностей між двома зображеннями сцен або об'єктів є основним для більшості підходів технічного зору. Незважаючи на це, завдання визначення і розпізнавання об'єктів до сих пір повніс-

тю не вирішено. Багато в чому успіх вирішення поставленого завдання визначається правильністю вибору відповідного методу і параметрів.

Задача розпізнавання полягає в ідентифікації координат знайденого об'єкта. Рішенням даної задачі на основі запропонованого методу є знаходження області об'єкта по заданим характеристикам.

Система наведення з використанням системи «технічного зору»

Структурна схема блока наведення

Технічні засоби для здійснення групового польоту повітряного судна, в першу чергу, це ті інструменти та пристрої, які дозволяють визначити параметри відносного руху літального апарату. Вони повинні отримувати необхідні виміри відстані та траєкторних кутів. Такий вимірювальний пристрій може базуватися на різноманітних фізичних принципах: радіо, оптичному та квантово-механічному.

Спрощена структура модуля наведення представлена на рис. 1.

Оптичний датчик розміщується на рухомому опорно-поворотному пристрої. Функція детектування, ідентифікація цілі, також керування ОПП реалізуються на спеціальному ОП.

Нині існує ряд досить ефективних алгоритмів, призначених для порівняння зображень чи пошуку об'єктів на зображеннях. Прикладом такого алгоритму може виступати алгоритм *MOSSE* [5]. *MOSSE* алгоритм і подібні йому алгоритми засновані на ідеї визначення подібності між зображеннями по так званим «особливим точкам». Однак в рамках даної задачі застосування алгоритмів цього типу є неефективним з ряду причин. Насамперед, алгоритми зіставлення по особливих точках найбільш ефективні для порівняння зображень досить великих об'єктів, що мають велику кількість яскравих і темних ділянок, кутів, контурів складної форми.



Рис. 1. Система наведення БПЛА:

ОД – оптичний датчик; ДКП – датчик кутового положення;
 ОП – обчислююча система; ОПП – опорно-поворотний пристрій (корекція положення ОД); КС – керуючий сигнал

В рамках даної задачі нас цікавлять малорозмірні швидкорухомі об'єкти, такі як БПЛА. Сформовані зображення, що містять повітряні об'єкти, представлені на рис. 2.

Їх зображення досить малі і не мають яскраво вираженої текстури. При цьому фон, на якому рухається об'єкт, також є рухомим (через рухливість ОД).

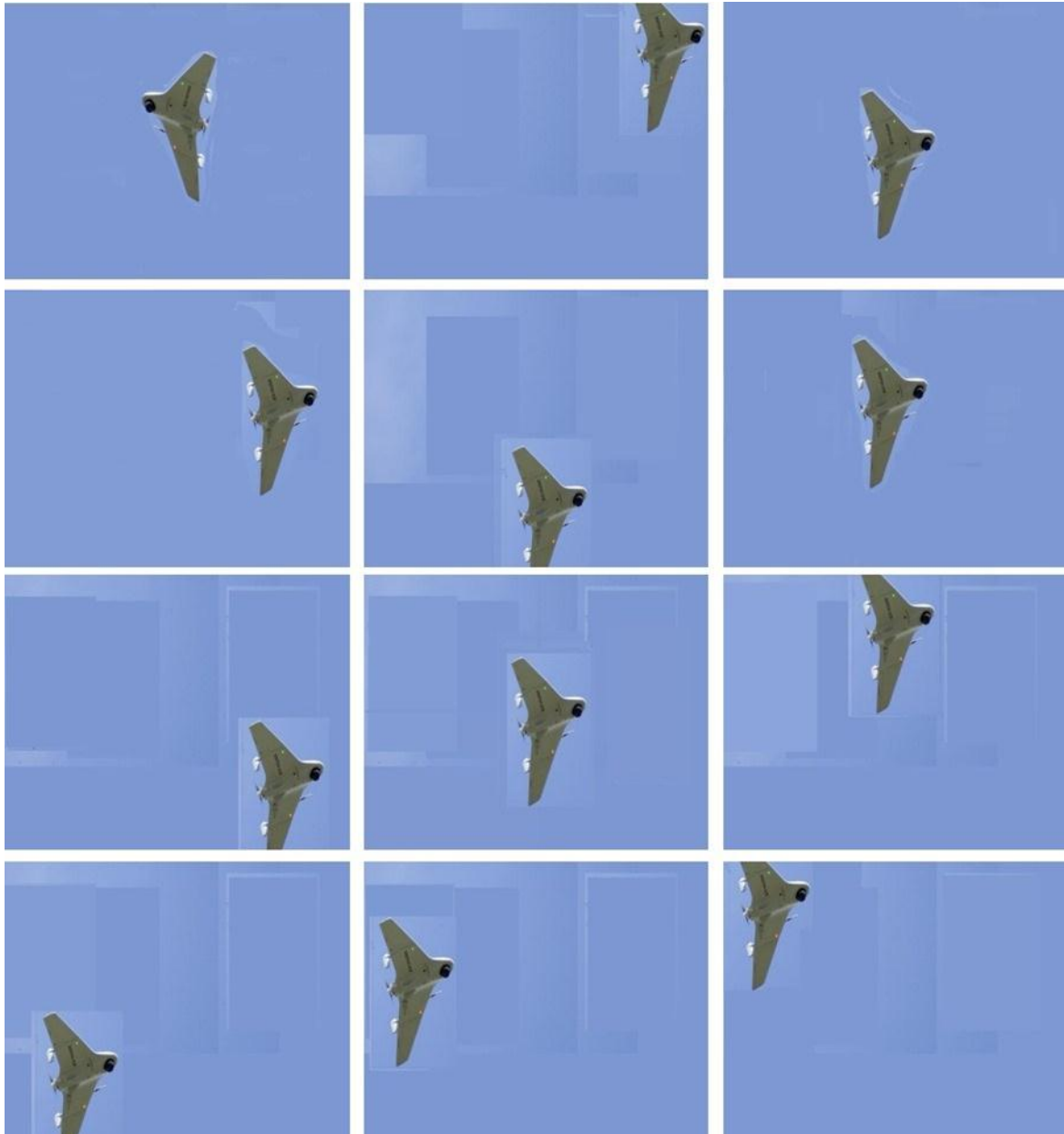


Рис. 2. Положення об'єкта в спостережуваному кадрі (варіації положення об'єкту моделювання для знаходження геометричного центру)

Навігаційні параметри камери

Основними причинами зростаючого інтересу до малої авіації є те, що БПЛА забезпечують недорогу платформу для установки оптичних та інф-

Інформаційні системи, механіка та керування

рачервоних камер. Для вирішення нашого завдання припустимо, що оптична вісь камери збігається з повздовжньою віссю безпілотного літального апарату (вісь OX нерухомої (жорстко) зв'язаної системи координат $OXYZ$; $Oxyz$ - локальна система координат камери).

Припускаємо, що еталон (джерело) опорного кадру і камери розташовані в центрі ваги літака. Управління до цілі (ведучого БПЛА) визначається двома кутами: азимутом цілі Ψ_g та кутом вертикального наведення на ціль Θ_g , де

$$R_{\Psi_g} = \begin{bmatrix} \cos \Psi_g & 0 & -\sin \Psi_g \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Psi_g & 0 & \cos \Psi_g \end{bmatrix} - \text{матриця поворотів азимуту};$$

$$R_{\Theta_g} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_g & \sin \Theta_g & 0 \\ -\sin \Theta_g & \cos \Theta_g & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матриця поворотів вертикального наведення.}$$

Результатом добутку попередніх матриць буде результуюча матриця для наведення на ведучий БПЛА:

$$R_b^g = R_{\Theta_g} R_{\Psi_g} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_g \cos \Psi_g & \sin \Theta_g \cos \Psi_g & -\sin \Psi_g \\ -\sin \Theta_g & \cos \Theta_g & 0 \\ \sin \Psi_g \cos \Theta_g & \sin \Theta_g \sin \Psi_g & \cos \Psi_g \end{bmatrix}.$$

Математична модель камери

Для визначення кількості P метрів в одному пікселі вводимо f - фокусну відстань камери в одиницях пікселів. Припускаємо, що пікселі і масиви пікселів є квадратними. Якщо ширина квадратної матриці пікселів в одиницях пікселів M ; υ – зона обзору камери, то можемо записати:

$$f = M / 2 \operatorname{tg} \left(\frac{\upsilon}{2} \right).$$

Положення проєкції об'єкта виражається в кадрі камери як $(P\varepsilon_x, P\varepsilon_y, P_f)$, де $P\varepsilon_x$ і $P\varepsilon_y$ визначають положення об'єкта в пікселях. Відстань від початку системи координат камери до об'єкта може бути визначена як його положення в пікселях: $F = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + f^2}$.

Визначимо орт (одичний вектор) для напрямку на ведучий БПЛА:

$$\bar{l} = \frac{1}{F} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ f \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + f^2}} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{l}_x \\ \bar{l}_y \\ \bar{l}_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Алгоритм наведення

Опишемо простий алгоритм керування та наведення літального апарату для реалізації польоту у формації. Задаємо траєкторне відхилення ведучого БПЛА, тоді команди для керування відомого літального апарату можна описати у вигляді відповідних рівнянь керування для зміни азимуту та кута нахилу траєкторії:

$$\Psi_g = W_{\Psi_g}^{\delta_{rc}} \delta_{rc}, \quad \Theta_g = W_{\Theta_g}^{\delta_{ec}} \delta_{ec},$$

де δ_{rc} , δ_{ec} - команди керування для керма висоти та керма напрямку (електронів).

Рівняння оптичної осі системи наведення:

$$l = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + f^2}} \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & f \end{bmatrix}^T.$$

Необхідне положення оптичної осі системи наведення: $l_r = R_b^g l$.

Наступним кроком є отримання необхідних кутів азимуту і вертикального наведення для вирівнювання (націлювання) оптичних осей:

$$l_r = \begin{bmatrix} l_{xr} \\ l_{yr} \\ l_{zr} \end{bmatrix} = R_b^{gT} \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix};$$

$$l_r = \begin{bmatrix} l_{xr} \\ l_{yr} \\ l_{zr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_g \cos \Psi_g & \sin \Theta_g \cos \Psi_g & -\sin \Psi_g \\ -\sin \Theta_g & \cos \Theta_g & 0 \\ \sin \Psi_g \cos \Theta_g & \sin \Theta_g \sin \Psi_g & \cos \Psi_g \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix}.$$

Отже, рішення цього рівняння відносно кута азимуту і кута вертикального наведення на ведучий БПЛА дають нам наступні вирази для командних кутів:

$$\Theta_g c = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{l_y}{l_x} \right), \quad \Psi_g c = \sin^{-1}(-l_z); \quad (2)$$

Таким чином сформовані команди для сервоприводів, якими є рівняння:

$$\delta_e = K_e (\Theta_g^c - \Theta_g) = K_e \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{l_y}{l_x} \right) - \Theta_g \right];$$

$$\delta_r = K_r (\Psi_g^c - \Psi_g) = K_r \left[\sin^{-1}(-l_z) - \Psi_g \right].$$
(3)

Алгоритм знаходження малорозмірних об'єктів по даним каналу оптичного датчика

Виявлення об'єктів пропонується здійснювати в два етапи: попередня обробка зображення, виділення об'єкта, визначення положення об'єкта в кадрі, його розміри та розрахунок кутових координат. Таким чином один із можливих алгоритмів представлено на рис. 3.

Зйомка повинна проводитися з якомога коротшою експозицією, що дозволить зменшити зсув і підвищити чіткість об'єкта в кадрі. Одним з класичних способів виділення рухомих об'єктів є знаходження різницевого зображення на основі сусідніх кадрів відеопослідовності. Цей метод стійкий до змін відповідних компонентів природного фону, швидкість яких менше швидкості зйомки (таких, як рух листя дерев, хмар тощо).

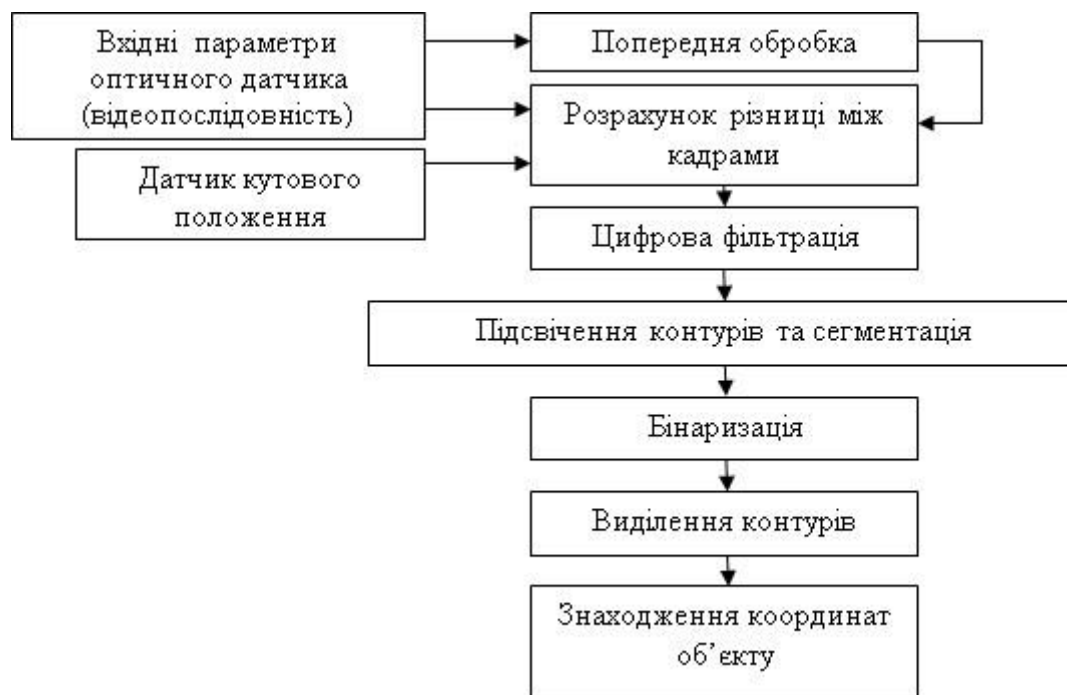


Рис. 3. Структурна схема алгоритму виділення об'єкту

При цьому даний метод досить простий в реалізації і не вимагає великих обчислювальних витрат, що дозволяє застосовувати його в системах з низькою продуктивністю, таких як мобільні пристрої. Таким чином, має сенс адаптувати різницевий метод для використання в слідуючих блоках

наведення на більш високих кадрових частотах (більше 30 кадрів за секунду).

На етапі цифрової фільтрації також може бути корисним використання медіанного фільтра, що дозволить зменшити рівень шуму [6].

В силу рухливості оптичного датчика безпосереднє використання методу різниці кадрів в розглянутій задачі не застосовується. Для успішного вирішення завдання необхідно враховувати рух оптичного датчика. Розглянемо різницю кадрів з урахуванням повороту оптичного датчика (рис. 4).

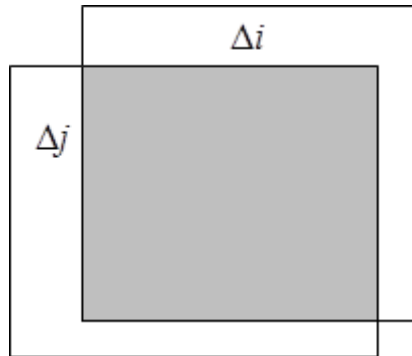


Рис. 4. Зсув зображення

Нехай поточне і попереднє положення візирної осі приладу оцінюються парами кутових показань (ψ_i, θ_i) та $(\psi_{i-1}, \theta_{i-1})$ датчиків.

Практика показує, що поворот оптичного датчика по азимуту та куту вертикалі наведення еквівалентний зсуву фонового зображення на деякий вектор $(\Delta i, \Delta j)$. Його оцінюють наступним чином:

$$\Delta i = \frac{\Delta \psi}{\psi_s}; \Delta j = \frac{\Delta \theta}{\theta_s}; \psi_s = \frac{L_{si}}{f} r, \theta_s = \frac{L_{sj}}{f} r;$$

де $\Delta \psi, \Delta \theta$ - різниця вимірів кутового положення візирної осі лінії об'єктива відповідно по вертикалі і горизонталі; ψ_s, θ_s - роздільна здатність матриці оптичного датчика по вертикалі та горизонталі; f - фокусна відстань камери; L_{si}, L_{sj} - розміри по вертикалі та горизонталі фоточутливих поверхонь оптичного датчика; r - кількість радіан в секунді.

З урахуванням зсуву можна сформулювати різницеве зображення $Frame_d$:

$$Frame_d(i, j) = |Frame_k(i, j) - Frame_{k-1}(i + \Delta i, j + \Delta j)|, \quad (4)$$

де i, j - координати пікселя; $Frame_k$ - зображення з поточного кадру; $Frame_{k-1}$ - зображення з попереднього кадру; $\Delta i, \Delta j$ - зсув зображення.

Після розрахунку зсуву кадру проведемо процедуру сегментації – це процес поділу цифрового зображення на декілька множин пікселів або присвоєння кожному пікселю таких тегів, щоб пікселі з однаковими мітками мали спільні візуальні характеристики [6]. Мета сегментації полягає в

спрощенні представлення зображення аби його було легше аналізувати. В результаті сегментації зазвичай виділяють границі та об'єкти на зображеннях. Пікселі, що належать до одних і тих же сегментів, схожі за деякою обчисленою характеристикою (наприклад: за кольором та яскравістю), а сусідні елементи істотно відрізняються по ній, відповідно до рис. 5.

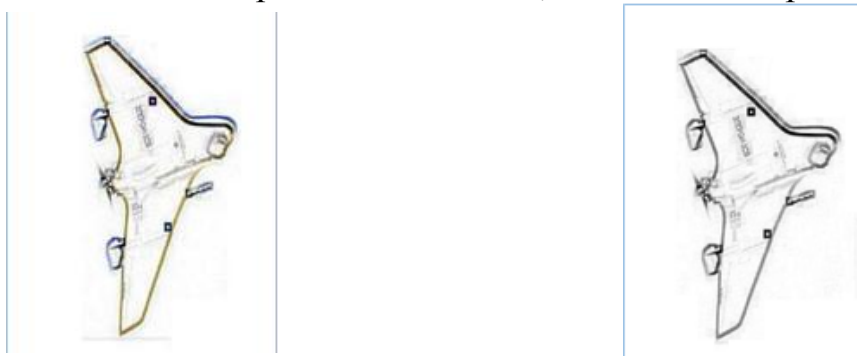


Рис. 5. Сегментація зображення по трьом каналам *RGB* та сегментація поліхромного зображення

По одержаному різницевому зображенню $Frame_d$ після сегментації можна здійснювати власне виділення рухомих об'єктів. Для цього пропонується провести процедуру бінаризації різницевого зображення $Frame_d$, в результаті якої виходить чорно-біле $Frame_{binary}$ зображення (рис. 6). Це дозволить локалізувати об'єкти і відсікти неінформативні коливання яскравості, що залишилися після вирахування кадрів.

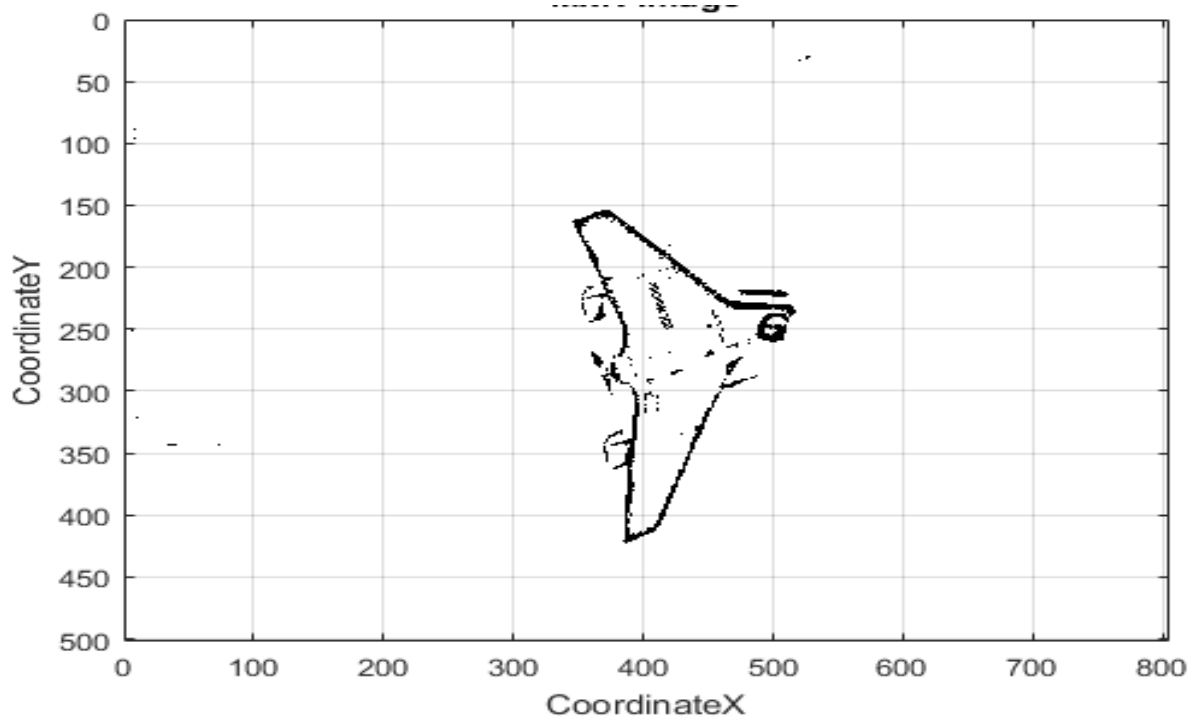


Рис. 6. Бінаризоване зображення знайденого об'єкту

Експерименти показали, що в більшості випадків досить простої бінаризації з глобальним порогом, яка розраховується за формулою:

$$Binary = \frac{(\max(Frame_d(i, j)) - \min(Frame_d(i, j)))}{2},$$

де *Binary* – поріг бінаризації, *Frame_d* – різницеве зображення після сегментації, *max*, *min* - мінімальне та максимальне значення яскравості в кадрі.

Якщо на різницевому зображенні присутні шуми (таке можливо, наприклад, при зйомці в складних погодних умовах), має сенс проводити додаткову обробку зображення і використовувати адаптивні алгоритми бінаризації з локальним порогом. Але розробка методів додаткової обробки зображень, отриманих в складних погодних умовах, виходить за рамки даної статті та представляє собою окрему тему для дослідження.

Найважливішою із характеристик рухомого об'єкту є його форма. В якості характеристики форми об'єкту пропонується використати його контур [8].

Як відомо, основним завданням системи наведення є визначення кутових координат об'єктів, що потрапляють в її поле зору. Для розрахунку кутових координат об'єкту спостереження необхідно знати положення його центру в системі координат датчика зображення. Обчислення координат центра об'єкта можливо здійснювати двома способами, кожен з яких має певні переваги та недоліки.

Координати геометричного центра об'єкта можна рахувати безпосередньо за бінарним зображенням, як середнє арифметичне координат точок, що належать контуру об'єкта на загальному тлі кадру (перший метод) або розбити зображення на кілька секторів і оцінити координати щільності масивів точок, що належать об'єкту, в кожному секторі (другий метод). Це дозволяє істотно скоротити обсяг обчислень, а також оцінити різницю між двома методами, що важливо при роботі в реальному часі. Після проведених досліджень, навіть після цифрової фільтрації та сегментації, залишаються неінформативні зони.

Результати моделювання алгоритму знаходження малорозмірних об'єктів (пошук геометричного центру)

Для пошуку геометричного центру було обрано поєднання двох методів. На основі проходження алгоритму наведення по всьому тлі кадру було знайдено загальну суму пікселів, які включають навіть неінформативні піксельні зони та положення геометричного центру об'єкту на загальному тлі кадру. Використавши значення суми пікселів з першого методу, створюємо оцінку для кожного з секторів для відсіювання неінформативного

Інформаційні системи, механіка та керування

сектору та знаходження геометричного центру об'єкту методом секторів (другим методом).

Бінаризовані зображення цілі для пошуку геометричного центру об'єкту, в залежності від положення в кадрі, зображені на рис. 7.

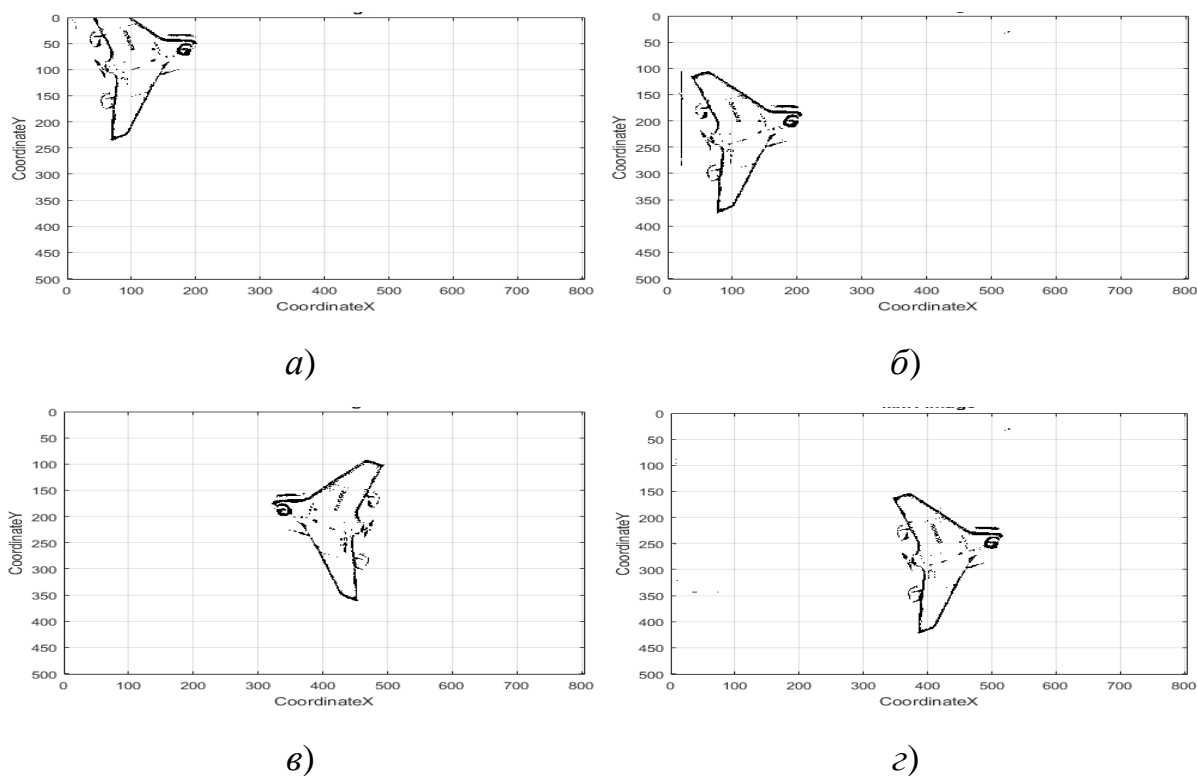
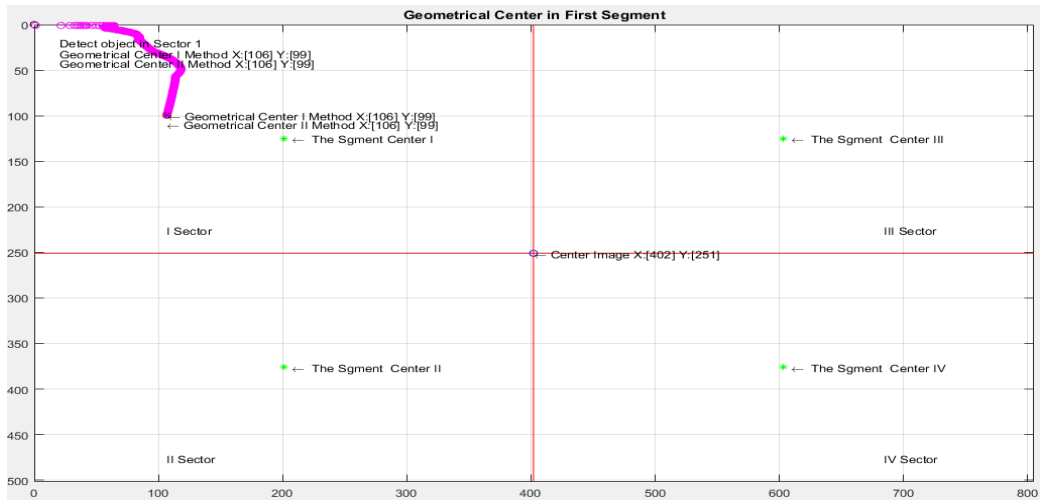


Рис. 7. Бінаризовані зображення положення об'єкту

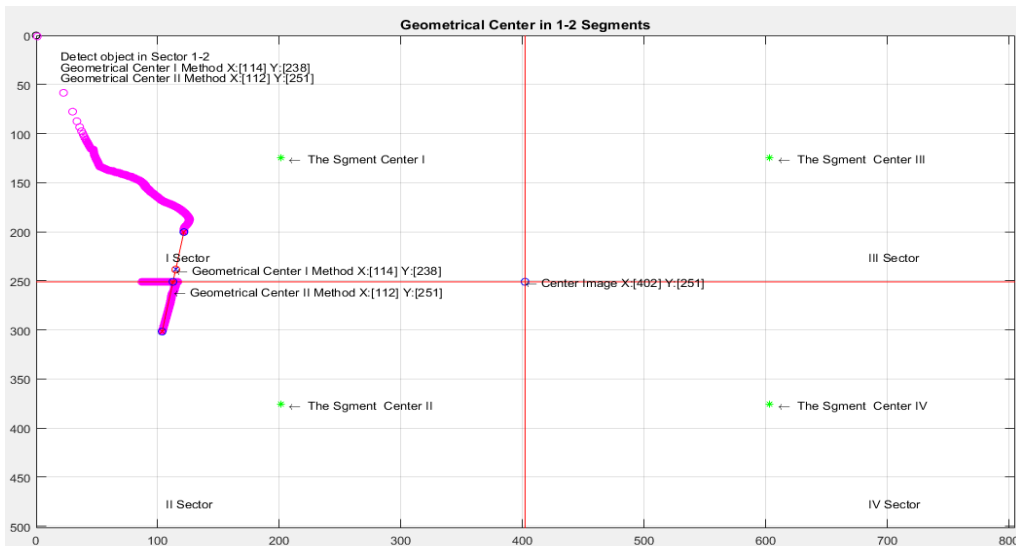
Результат виділення геометричного центру на основі методу різниці кадрів та двох підходів виявлення геометричного центру після бінаризації представлено на рис. 8 для положення в 1 секторі (рис. 8, *a*), перекриття 1-2 секторів (рис. 8, *б*), перекриття трьох секторів 1-3-4 (рис. 8, *в*) та в центрі кадру (рис. 8, *г*).

Проведені експерименти показали, що найкращі результати виходять при обчисленні міжкадрової різниці при використанні поєднання двох методів пошуку геометричного центру. Метод міжкадрової різниці не дає інверсного зображення і в той же час його можна застосувати при довільній яскравості об'єктів.

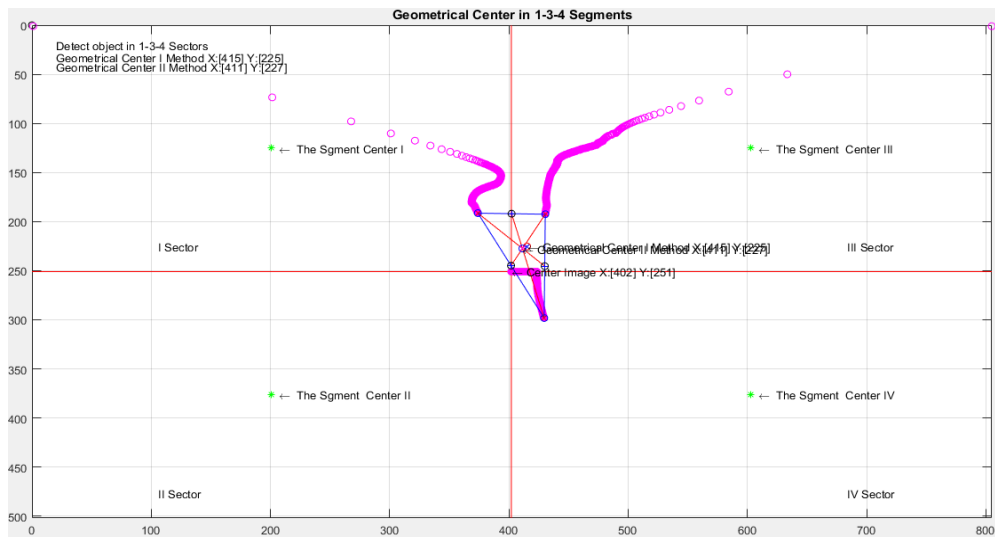
Згідно отриманих результатів по знаходженню геометричного центру об'єкту, знаючи фокусну відстань (f) та точні координати об'єкту в кадрі та підставивши отримані значення в (1), можна створити керуючі сигнали управління до цілі (ведучого БПЛА) (3), які визначаються двома кутами: азимутом цілі Ψ_g та кутом вертикального наведення на ціль Θ_g .



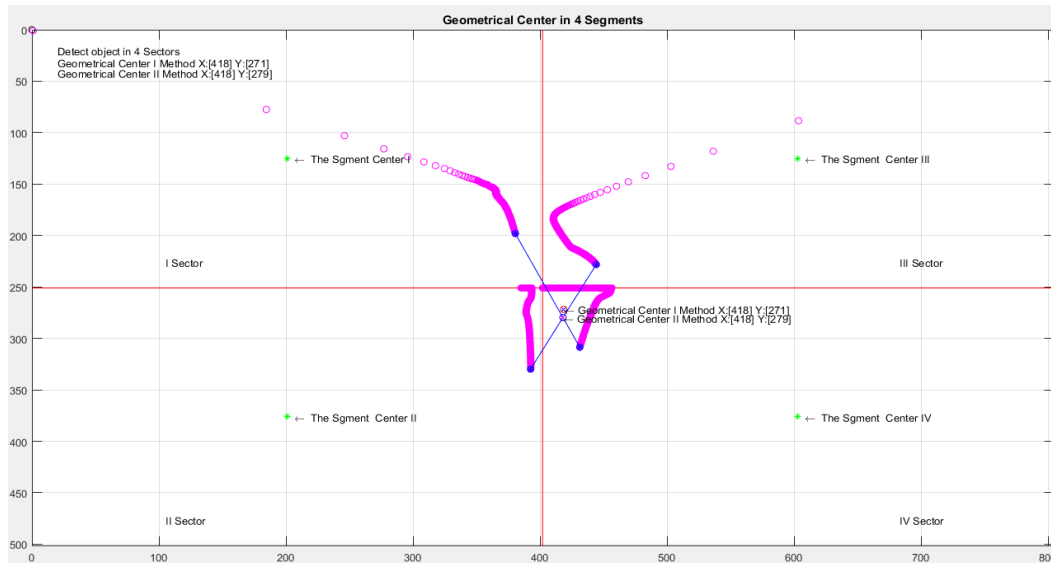
a)



б)



в)



г)

Рис. 8. Положення геометричного центру об'єкту

Висновки

В даній роботі був представлений та реалізований алгоритм блоку наведення БПЛА при використанні методу різниці кадрів. Запропонований алгоритм знаходження малорозмірних об'єктів дозволяє виявляти рухомі об'єкти за інформацією із оптичного датчика з урахуванням зміни положення оптичного датчика.

З отриманих результатів по знаходженню координат геометричного центру та математичної моделі камери сформована математична модель керуючих сигналів для блоку наведення безпілотної літальної апарату. Крім того, приведено підхід до реалізації такої системи наведення, а також алгоритм та принцип роботи системи на основі відповідних отриманих математичних моделей.

Список використаної літератури

1. *T. Soleymani, F. Saghafi* "Behavior-Based Acceleration Commanded Formation Flight Control" International Conference on Control, Automation and Systems 2010 Oct. 27-30, in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea. 2010.
2. *A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, and C. J. Taylor*, "A Vision-Based Formation Control Framework," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 18, No. 5, 2002.
3. *J. Hammer, G. Piper, O. Thorp, and J. Watkins*, "Investigating Virtual Structure Based Control Strategies for Spacecraft Formation Maneuvers," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Providence, Rhode Island, 2004.

4. *Z. Gosiewski, L. Ambroziak, "UAV Autonomous Formation Flight Experiment with Virtual Leader Control Structure", Solid State Phenomena, Vol. 198, pp. 254-259, 2013.*
5. *Варфоломеев А. Ю. Методы та алгоритми автоматичного відслідковування об'єктів на відеопослідовностях: Монографія – 100 с.*
6. *Прэтт, У. Цифровая обработка изображений/ У. Прэтт; пер. с англ. Кн. 2. – М.: Мир, 1982. – 480 с.*
7. *Arbelaez P., Maire M., Fowlkes C., Malik J. Contour, Detection and Hierarchical Image Segmentation // IEEE TPAMI. 2011. Vol. 33(5). p. 898-916.*
8. *Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, Проблемы технического зрения в современных авиационных системах В сб. Трудов научно-технической конференции-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами -2010» Под ред. Р. Р. Назирова. Таруса, 16–18 марта 2010 г. стр. 11-44, ИКИ РАН, 2011 г.*