

УДК 004.932.75, 004.4'236, 004.942, 621.317.3

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771392020229021>

Ю. В. Бобков¹, к.т.н., доцент, П. О. Піщела², студент

СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РУХУ ГРУПИ МУЛЬТИКОПТЕРІВ

En

The actual task of controlling a group of multicopters performing coordinated actions and are locating at short distances from each other, cannot be performed with the help of a standard on-board autopilot on GPS or GLONASS signals, which give large errors.

The solution to this problem is possible due to additional equipment that allows you to set the distance between the multicopters and their relative position. To do this, it is proposed to mark each multicopter with an image label in the form of a

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

standard geometric figure or a geometric body of a given color and size, and to use technical vision system and image recognition algorithms.

The structure of the technical vision system for the multicopter was developed and algorithms for image processing and calculation of the change of coordinates of the neighboring multicopter, which are transmitted to the control system to introduce the necessary motion correction, were proposed.

The method to identify the reference object in the image of the scene by its color was used in this work. This method is very effective compared to other methods, because it requires only one pass per pixel, which gives a significant advantage in speed during video stream frame processing. RGB color model with a color depth of 24-bit was chosen based on the analysis. Since the lighting during the flight can change, the color is set by the limits of change of the components R, G, B.

To determine the distance between multicopters, a very simple but effective method of determination the area of the recognition object (labels on the neighboring multicopter) with next comparison it with the actual value is used. Since the reference object is artificial, its area can be specified with high accuracy.

The offset of the center of the object from the center of the frame is used to calculate the other two coordinates.

In the beginning, the specific camera instance is calibrated both for a known value of the area of the object and for its displacement along the axes relative to the center of the frame.

The technical vision system model in the Simulink software environment of the Matlab system was created to test the proposed algorithms. Based on the simulation results in Simulink, you can generate code in the C programming language for further implementation of the system in real time.

A series of studies of the model was conducted using a Logitech C210 webcam with a 0.3 megapixel photo matrix (640x480 resolution). According to the results of the experiment, it was found that the maximum relative error in determining the coordinates of the multicopter did not exceed 6.8 %.

Ru

В работе проанализировано применение системы технического зрения и алгоритмов распознавания образов для управления группой мультикоптеров, которые выполняют согласованные действия и находятся на небольших расстояниях друг от друга. Предложено промаркировать каждый мультикоптер меткой-изображением в виде стандартной геометрической фигуры или геометрического тела заданного цвета и размера.

Разработана структура системы технического зрения для мультикоптера и предложены алгоритмы обработки изображений и расчета изменения координат соседнего мультикоптера, передаваемых в систему управления для ввода необходимой коррекции движения.

Для проверки предложенных алгоритмов была создана и исследована модель в программной среде Simulink системы Matlab. Проведенные эксперименты показали, что относительная погрешность определения координат мультикоптера при применении видеокамеры с разрешением 640x480 не превышала 6,8%.

Вступ

У сучасному світі для вирішення різноманітних задач все більше розповсюдження отримують мультикоптери. Це визначається їх простотою та відносно низькою вартістю за широкого функціонала. Але окремий мультикоптер має обмежені можливості з точки зору своїх габаритних розмірів та технічних характеристик. Це стосується, у першу чергу, обмежень корисного навантаження, висоти польоту, а, відповідно, можливості охоплення значних площ для здійснення тих, чи інших задач. Вказані проблеми у більшості випадків легко вирішуються за рахунок використання необхідної кількості мультикоптерів, що виконують узгоджені дії. Тому виникають питання щодо забезпечення руху групи мультикоптерів.

Питання керування групою безпілотних літальних апаратів є актуальним і розглядається у ряді робіт [1, 2].

Вочевидь, що у найпростішому випадку польот групи безпілотних літальних апаратів може бути забезпечений за допомогою штатного бортового автопілоту за сигналами *GPS* або ГЛОНАСС. Проте у випадку мультикоптерів, що знаходяться один від одного на невеликих відстанях (звичай не більше 10–20 м), цей варіант не є прийнятним, оскільки похибка визначення координат за глобальними навігаційними системами знаходиться на рівні 13 м.

У такому випадку для керування узгодженим рухом групи мультикоптерів необхідно використовувати додаткове обладнання, що дозволяє встановити відстань між ними та відносне положення.

Постановка задачі

Для визначення взаємного розташування, тобто відносних координат мультикоптерів, можна застосовувати різні далекомірні методи: радіолокаційні, ультразвукові, оптичні тощо. Усі вони призводять до значного ускладнення системи керування мультикоптера та збільшують його вартість.

У той же час переважна кількість мультикоптерів комплектується різними фото- та відео камерами. На базі цих фото- і відео камер може бути побудована система технічного зору (СТЗ), що буде визначати взаємне розташування мультикоптерів та формувати необхідні команди для системи керування. Для побудови польоту у групі доцільно застосування методу ведучий-ведений [2].

Метою даного дослідження є розробка системи технічного зору для забезпечення руху групи мультикоптерів та її моделювання у програмному середовищі *Simulink* системи *Matlab*.

Розробка структурної схеми СТЗ

Для побудови СТЗ мультикоптера, як зазначалось вище, у більшості випадків застосовується стандартна фото- і відео камера (далі просто камера). У той же час для вирішення важливих задач, що потребують підвищеної точності, камера може розроблюватись індивідуально по заданих технічних характеристиках. У найбільш загальному випадку структурна схема СТЗ може бути представлена у наступному вигляді (рис. 1).



Рис. 1. Структурна схема СТЗ

На рис. 1 позначено: ОБ – оптичний блок; ФМ – фотоматриця; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; МК1, МК2 – мікроконтролери.

Робота схеми пояснюється наступним чином. Світловий потік Φ_x , що формується об'єктами на вході СТЗ, проходить через систему лінз і дзеркал у ОБ і фокусується на фотоматриці (ФМ) у вигляді перетвореного світлового потоку Φ' , що формує відповідне зображення на поверхні ФМ. Світловий потік може обмежуватися за рахунок діафрагми ОБ. ФМ перетворює світловий потік у напругу U_x , що подається на АЦП. На виході АЦП отримуємо цифровий код N_x . Це значення потрапляє у мікроконтролер МК1, який формує цифрове зображення. У МК2 проводиться необхідна обробка, а саме: обробка вхідного зображення, зокрема виділення об'єкту за кольором, перетворення кольорової палітри, формування границь тощо, та обчислення необхідних інформативних параметрів для системи керування. Інформативними параметрами на виході СТЗ є координати об'єкта, у даному випадку сусіднього мультикоптера.

Вочевидь, що виділення на зображенні сусіднього мультикоптера із його складною та неоднозначною структурою є важкою та неоднозначною задачею. У випадку керування рухом групи мультикоптерів для спрощення та підвищення точності вирішення задачі визначення їх відносних координат, доцільно промаркувати кожний мультикоптер міткою-зображенням у вигляді стандартної геометричної фігури або геометричного тіла заданого кольору та розміру.

Оскільки мультикоптери здійснюють узгоджений політ, тобто за однаковими траєкторіями та з однаковою швидкістю, впливом швидкості переміщення еталонного об'єкта відносно камери можна попередньо знехтувати.

Розробка алгоритму роботи СТЗ

У даній роботі було використано методи виявлення еталонного об'єкту на зображенні сцени за його кольором [3, 4]. Цей метод порівняно із іншими методами дуже ефективний, оскільки потребує лише один прохід по пікселям, що дає суттєву перевагу по швидкості у разі кадрової обробки у потоці відео інформації. Це, у свою чергу, є дуже важливим під час керування польотом групи мульткоптерів, що рухаються на невеликій відстані один від одного.

Колір у цифровому зображенні може відобразитися у різних кольорових моделях, що суттєво впливає на результат розпізнавання. У більшості випадків під час обробки зображення та на різних її етапах відбувається перетворення із однієї моделі у іншу. Розглянемо це більш детально.

Найбільш поширеною кольоровою моделлю є *RGB (Red-Green-Blue)*. Принципом кодування кольору у такій моделі є змішування трьох основних складових кольору – червоний, зелений, синій. У результаті змішування цих кольорів отримуються різні кольори та відтінки. Ця модель лежить у основі роботи фото матриць і є основною у разі отримання кольорового зображення. Кожний конкретний колір представляється у відсоткових співвідношеннях основних кольорів.

Для кольорової моделі *RGB* важливим параметром цифрового зображення також є глибина кольору. Глибина кольору визначається кількістю бітів для кодування відповідного основного кольору у пікселі. Розрізняють 8,15\16,24,30\36\48 – біт глибини кольору.

Недоліком кольорової моделі *RGB* є суттєва зміна відтінків за зміну зовнішнього освітлення.

Кольорову модель *CMYK (Cyan-Magenta-Yellow- Key (Black))* також називають субтрактивною схемою формування кольору. У цій моделі колір залежить від змішування блакитного, пурпурового, жовтого та чорного кольорів. Ця модель є основною для кольорового друку, але для цілей цифрової обробки зображень не застосовується.

Кольорова модель *HSV (Hue-Saturation-Value)* є нелінійним перетворенням моделі *RGB*. *HSV* так як і *RGB* складається із трьох складових, але іншого типу:

- тон (*Hue*) – значення варіюється від 0 до 360 (або від 0 до 100 або від 0 до 1), і кожне із цих значень відповідає окремому кольору;
- насиченість (*Saturation*) – значення варіюється від 0 до 100 або від 0 до 1. Чим більше значення цього параметру тим більш чистим є колір.
- значення (*Value*) – яскравість. Значення варіюється від 0 до 100 або від 0 до 1.

Модель *HSV* вважається найбільш близькою до сприйняття кольору людиною. Вона знайшла широке використання в цифровій обробці зображень. У якості недоліку можна відмітити необхідність додаткового перет-

ворення із моделі *RGB*, що призводить до деякого спотворення початкової інформації та додаткових втрат часу, що часто неприпустимо за високої швидкості зміни вхідної інформації та необхідності швидкої реакції системи на неї. Для ефективної роботи алгоритму обробки на основі кольору слід вибрати правильну модель, що забезпечить найкращі результати його роботи.

Враховуючи проведений аналіз було обрано кольорову модель *RGB* із глибиною кольору *24-bit*, що дозволяє:

- легко формувати та змінювати колір еталонної мітки мультикоптера;
- уникнути додаткових спотворень інформації за рахунок переходу до іншої кольорової моделі (*HSV*);
- забезпечити максимальну швидкість роботи алгоритму, що суттєво у разі малих відстаней між мультикоптерами.

Загальний вигляд розробленого алгоритму роботи СТЗ наведено на рис. 2.

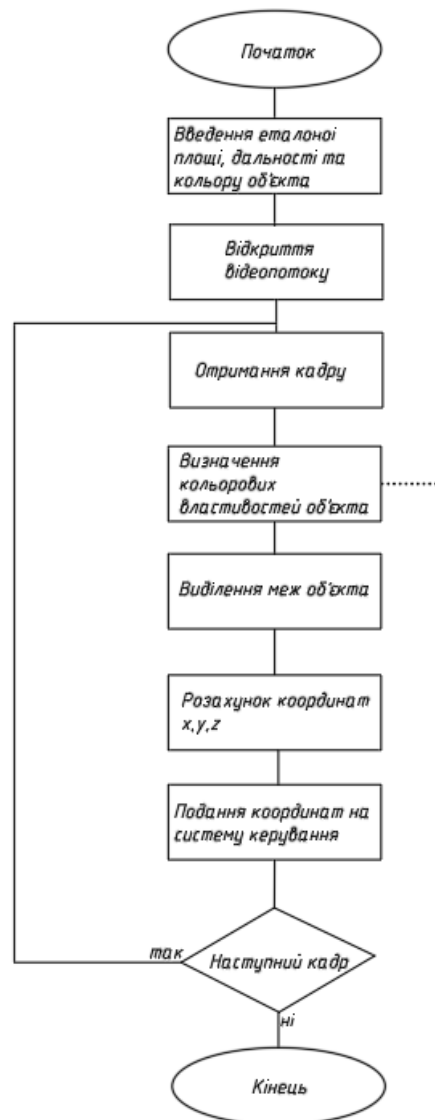


Рис. 2. Алгоритм роботи СТЗ

Алгоритм роботи СТЗ передбачає наступні основні етапи:

- виявлення та розпізнавання еталонного об'єкта (мітки на мультикоптері);
- визначення параметрів зображення виділеного об'єкта на зображенні сцени;
- визначення відстані до сусіднього мультикоптера та координат для передачі у систему керування.

Для визначення відстані між мультикоптерами застосовується дуже простий, але ефективний метод визначення площі об'єкта розпізнавання (мітки на сусідньому мультикоптері) із наступним її порівнянням із дійсним значенням. Оскільки еталонний об'єкт є штучним, то його площа може бути задана із високою точністю.

Для розрахунку двох інших координат, використовується зміщення центру об'єкта від центра кадру.

Попередньо проводиться калібрування конкретного екземпляру камери, як по відомому значенню площі об'єкта, так і для його зміщення по осях відносно центра кадру.

На початку роботи вводиться значення площі S_e еталонного об'єкта та його колір. Оскільки освітлення в процесі польоту може змінюватись, то колір задається межами зміни складових R , G , B . Також необхідно попереднє встановлення камери СТЗ у положення, коли об'єкт (ведучий мультикоптер) розміщується точно по центру кадру, тобто по центру ФМ. Це відповідає заданому положенню об'єктів відносно одне одного.

Обробка відео-потоків виконується покадрово. У кожному кадрі об'єкт виділяється за ознакою колір відповідно заданих меж зміни складових R , G , B . Після цього змінюється кольорова палітра шляхом перетворення у двокольорову чорно-білу, що необхідно для розпізнавання границь об'єкта. За виділеними границями визначається площа об'єкта S .

Далі необхідно розрахувати відхилення об'єкта від заданого положення по трьох координатах.

Для розрахунку відстані до об'єкта – координати Z , використовується розрахована площа S об'єкта. Для цього визначається відношення S/S_e .

Якщо $S/S_e = 1$, то зміщення по осі Z не відбулось і корекція не потрібна. Якщо $S/S_e > 1$, то це означає, що об'єкти зблизились. Якщо $S/S_e < 1$, то це означає, що об'єкти віддаляються.

Зміна відстані між мультикоптерами по координаті Z визначається за формулою:

$$\Delta Z = (S/S_e - 1) * Z,$$

де Z – задана відстань між мультикоптерами, для якої $S/S_e = 1$ (встановлюється відповідно польотного завдання).

Для розрахунку координат X та Y , використовується зміщення центру об'єкта від центра кадру. Для цього перевіряється умова:

$$C(X_1; Y_1) = C(X_0; Y_0),$$

де $C(X_1; Y_1)$ – центр об'єкта з координатами X_1, Y_1 ;

$C(X_0; Y_0)$ – центр кадру із координатами X_0, Y_0 . Їх значення зазвичай приймається рівним нулю.

Якщо умова виконується, то:

$$\Delta X = \Delta Y = 0,$$

якщо не виконується то:

$$\Delta X = X_1, \quad \Delta Y = Y_1.$$

Розраховані зміни координат $\Delta Z, \Delta X, \Delta Y$ передаються на систему керування для корекції руху.

Далі процес обробки кадрів продовжується до закінчення польотного завдання.

Розробка та дослідження моделі СТЗ

Для дослідження розробленої СТЗ та алгоритму її роботи було обрано програмне середовище *Simulink* системи *Matlab*, що є інструментом модельно-орієнтованого програмування складних технічних систем. За результатами моделювання у *Simulink* можна генерувати код на мові програмування *C* для подальшої реалізації системи у режимі реального часу.

У якості камери під час моделювання СТЗ використовувалась звичайна веб-камера, що підключалась до моделі за допомогою стандартного блоку (рис. 3), у якому можна встановити необхідні параметри: вихідний розмір кадру, кольорову палітру, частоту кадрів та тип даних кольору.

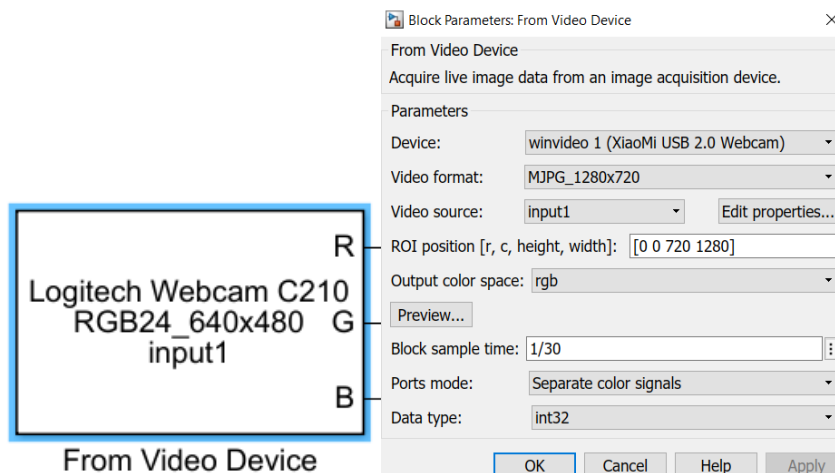


Рис. 3. Блок отримання інформації із відео камери

Для реалізації розробленого алгоритму роботи СТЗ була створена модель, блок-схема якої наведена на рис. 4.

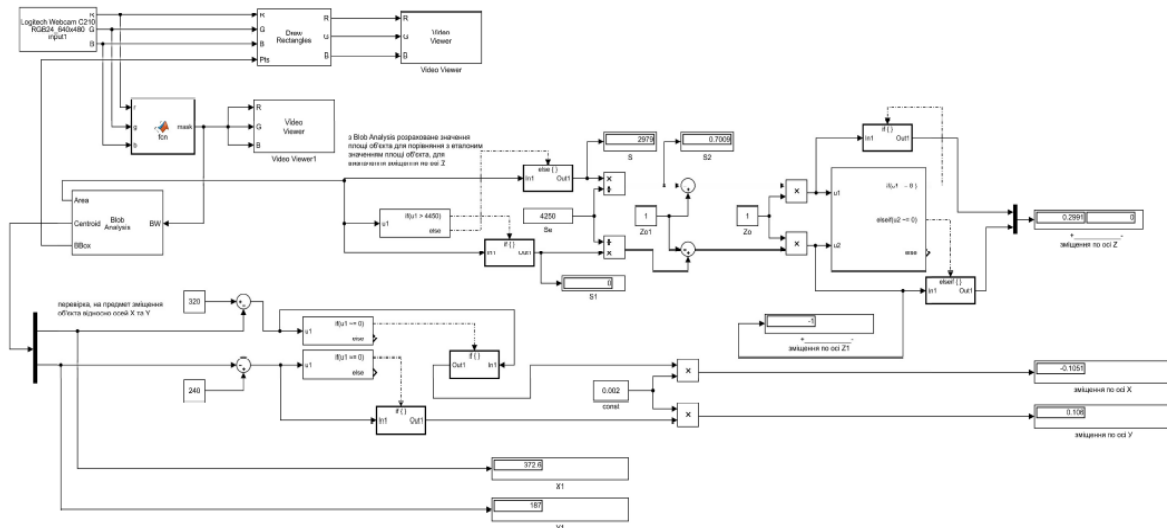


Рис. 4. Блок схема моделі СТЗ у програмному середовищі *Simulink*

Були проведені дослідження створеної моделі СТЗ.

Результати виділення заданого об'єкта за кольором та перетворення зображення з кольорової моделі *RGB* у чорно-білу палітру наведено на рис. 5 (центр кадру відмічений хрестом).

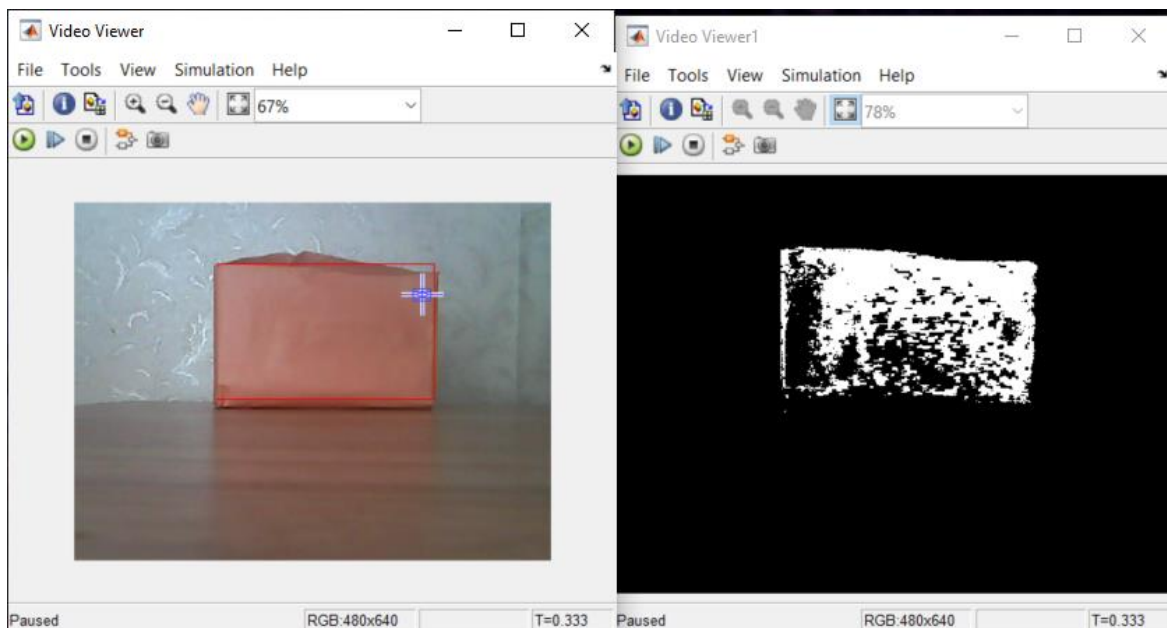


Рис. 5. Результати виділення заданого об'єкта та перетворення зображення у чорно-білу палітру

Була проведена серія досліджень роботи моделі із застосуванням веб-камери *Logitech C210* із фото матрицею 0,3 мегапікселі (роздільна здатність 640x480). На початку експериментів було визначено площу еталонного прямокутного об'єкта та проведено калібрування камери, за яким визначені корегуючі коефіцієнти для площі та по координатах – по двох осях фото матриці відносно її центру. У ході експериментів еталонний об'єкт

зміщувався по всіх трьох осях X , Y і Z . За результатами визначення площі та зміщення зображення відносно центру ФМ були розраховані координати для корекції системи керування.

Приклад визначення зміни координат ΔZ , ΔX , ΔY еталонного об'єкта, що отримані на виході моделі, наведений на рис. 6.



Рис. 6. Результати розрахунку координат для корекції системи керування

За результатами проведених досліджень було встановлено, що відносна похибка визначення зміни координат не перевищувала:

- по осі Z (відстань між мультикоптерами) – 4,9 %;
- по осі X (горизонтальна координата) – 6,8 %;
- по осі Y (вертикальна координата) – 5,6 %.

Слід зазначити, що значення похибки суттєво залежить від параметрів камери. Застосування камери із більшою роздільною здатністю буде майже пропорційно зменшувати похибку визначення координат.

На похибку визначення координат впливає також якість зображення еталонного об'єкта, що залежить від багатьох факторів. Зокрема, вплив зовнішніх чинників (освітлення, швидкість руху), форми еталонного об'єкта, застосування алгоритмів попередньої обробки зображення потребують додаткових досліджень.

Висновки

Актуальна задача керування групою мультикоптерів, що виконують узгоджені дії та знаходяться на невеликих відстанях один від одного, не

може бути виконана за допомогою штатного бортового автопілота за сигналами *GPS* або ГЛОНАСС, що дають великі похибки.

Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок додаткового обладнання, що дозволяє встановити відстань між мультикоптерами та їх відносне положення. Для цього пропонується промаркувати кожний мультикоптер міткою-зображенням у вигляді стандартної геометричної фігури або геометричного тіла заданого кольору й розміру, та використати систему технічного зору і алгоритми розпізнавання образів.

Була розроблена структура системи технічного зору для мультикоптеру і запропоновані алгоритми обробки зображень та розрахунку зміни координат сусіднього мультикоптеру, що передаються до системи керування для введення необхідної корекції руху. Для перевірки запропонованих алгоритмів була створена модель СТЗ у програмному середовищі *Simulink* системи *Matlab*.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили правильність прийнятих рішень. Максимальна відносна похибка визначення координат мультикоптера при застосуванні відео камери із роздільною здатністю 640x480 не перевищувала 6,8 %.

Список використаної літератури

1. *Soleymani T.* Behavior-Based Acceleration Commanded Formation Flight Control / T. Soleymani, F. Saghafi. // International Conference on Control, Automation and Systems 2010 Oct. 27-30, in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea. – 2010. – P. 6.
2. *Пікенін О. О.* Реалізація польоту групи безпілотних літальних апаратів / О. О. Пікенін, О. П. Мариношенко, О. В. Прохорчук. // Механіка гіроскопічних систем. – 2016. – №31. – С. 12–14.
3. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений. / Р. Гонсалес, Р. Вудс – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
4. *Ковалевский В. А.* – Методы оптимальных решений в распознавании изображений. / В. А. Ковалевский. – «Наука», М., 1976, 328 с.

Spysok vykorystanoi literatury

1. *Soleymani T.* Behavior-Based Acceleration Commanded Formation Flight Control / T. Soleymani, F. Saghafi. // International Conference on Control, Automation and Systems 2010 Oct. 27-30, in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea. – 2010. – P. 6.
2. *Pikenin O. O.* Realizatsiia polotu hrupy bezpilotnykh litalnykh aparativ / O. O. Pikenin, O. P. Marynoshenko, O. V. Prokhorchuk. // Mekhanika hiroskopichnykh system. – 2016. – №31. – S. 12–14.

3. *Gonsales R.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. / R. Gonsales, R. Vuds – М.: Tehnosfera, 2005. – 1072 s.
4. *Kovalevskiy V. A.* – Metodyi optimalnyih resheniy v raspoznavanii izobrazheniy. / V. A. Kovalevskiy. – «Nauka», М., 1976, 328 s