УДК 623.746.-519

К. О. Споришев **В. М. Самойленко**

ТАКСОНОМІЧНИЙ МЕТОД ВИБОРУ СПОСОБУ ВЕКТОРИЗАЦІЇ ПОТОЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ ДЛЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

У статті розроблено таксономічний метод вибору способу векторизації поточних зображень для оптико-електронного модуля безпілотного літального апарата, спрямований на оптимізацію навігаційних систем.

Встановлено, що таксономічний підхід дозволяє систематизувати й оцінити різні методи векторизації на основі їхньої швидкості обробки, точності та обсягу збереження даних, що забезпечує вибір найбільш ефективного методу для конкретних умов експлуатації безпілотного літального апарата.

К л ю ч о в і с л о в а : *безпілотні літальні апарати, навігаційні системи,* оптико-електронний модуль, способи векторизації, таксономія.

Постановка проблеми. Одним зі способів позиціонування безпілотного літального апарата (БпЛА) є використання сигналів глобальної супутникової системи навігації. У ситуаціях, коли перешкоди або цілеспрямоване заглушення сигналів переривають доступ до глобальної супутникової системи навігації, стає критично складним точно визначити місцеположення БпЛА. Така втрата навігаційного сигналу впливає на здатність БпЛА рухатись заданим маршрутом з високою точністю [1]. Відомим альтернативним способом навігації в умовах обмеженої доступності або повної відсутності супутникових сигналів є оптична навігація.

В даний час оптичні навігаційні системи поділяються на два типи:

– кореляційно-екстремальні;

– системи одночасної локації та побудови карти (SLAM-системи).

Кореляційно-екстремальна навігація заснована на порівнянні зображення з камери із заздалегідь завантаженим еталонним. Визначення розташування апарата обчислюється за величиною неузгодженості між ними. Недоліки цього очевидні:

– знімки місцевості потрібно отримати заздалегідь;

– знімки місцевості необхідно підтримувати у актуальному стані;

– необхідно зберігати великий обсяг даних і забезпечувати швидкий та безперебійний доступ до них.

Отриманні знімки місцевості (еталони) зберігаються на борту БпЛА у растровому форматі. Середній розмір растрового зображення може складати від декількох Мб до десятків Мб. Крім цього, методи обробки растрових зображень мають велику обчислювальну складність, порівнюючи з іншими форматами даних, що в умовах швидкоплинної зміни маршруту БпЛА (маневр) може призвести до втрати його місцеположення.

Пропонується дослідити можливості використання векторного формату зображень у оптичній системі навігації. Використання такого формату зображень дозволить мати більшу кількість еталонів на борту БпЛА завдяки меншому розміру векторного файлу, порівнюючи з растровим. Залишається відкритим питання: скільки часу необхідно для перетворення растрового файлу, отриманого з оптичної системи БпЛА, у векторний файл. Зображення повинні оброблятись на борту БпЛА в режимі реального часу. Потрібно заздалегідь вибрати такий спосіб векторизації, який перетворює растровий файл у векторний без значущої втрати якості за мінімальний час.

© К. О. Споришев, В. М. Самойленко, 2024

БпЛА належить одне з перших місць за кількістю застосування на полі бою. Вони виконують десятки різноманітних завдань – від розвідки до враження противника. Задача удосконалення ТТХ БпЛА є актуальною в сучасних умовах. Таким чином, удосконалення оптичної системи навігації БпЛА шляхом використання векторного формату зображень на сьогодні є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [2] розглядається метод вибору еталонних зображень для навігації БпЛА з кореляційно-екстремальною системою. Цей метод дозволяє значно зменшити обчислювальну складність за високої швидкості польоту та інтенсивного маневрування без втрати точності визначення просторового розташування. Ефективність методу продемонстрована на конкретному прикладі зниженням обчислювальної складності у 210 разів. Однак застосування методу в умовах розвиненої інфраструктури та різноманітності сенсорів потребує додаткових досліджень через вплив тіней, освітленості та різницю в роздільній здатності.

У праці [3] наведені результати розроблення покращених методів векторизації, які включають визначення контурних ліній, їх апроксимацію прямими та кривими Безьє, а також розпізнавання об’єктів. Удосконалення в триангуляції та апроксимація кривими Безьє забезпечують вищу точність і гладкість векторних моделей. Основним їх недоліком є складності класифікації на межі між площадними та лінійними елементами, що потребує додаткової перевірки та коригування.

У статті [4] пропонується метод векторизації супутникових знімків, що ґрунтується на аналізі топологічних особливостей об’єктів. Використовуються бінарні зображення для ідентифікації контурів об’єктів та їх подальшого перетворення у векторну форму. Метод включає сегментацію, класифікацію та апроксимацію областей інтересу на зображенні. Такий підхід дає вищу точність автоматичної векторизації, порівнюючи з напівавтоматичними методами, особливо при роботі з великими обсягами даних, але можуть виникнути труднощі при роботі з дуже складними або деталізованими зображеннями через потребу в додатковому обробленні з метою досягнення високої точності.

Результати дослідження [5]: алгоритм Potrace ефективно перетворює висококонтрастні растрові зображення у векторний формат, створюючи гладкі контури з кривих Безьє. Такий алгоритм особливо ефективний завдяки своїй адаптивності до складності вхідного зображення та здатності працювати в режимі реального часу, зменшуючи загальний час обробки, особливо для масової обробки великої кількості даних.

Таким чином, можна дійти висновку, що у зазначених дослідженнях приділяється увага методам векторизації бінарних зображень, але не зрозуміло, який саме метод векторизації є найшвидшим, та за яких умов його можна використовувати для задач оптичної навігації.

Мета статті: розробити метод вибору способу векторизації бінарних зображень для оптико-електронного модуля системи навігації БпЛА на основі таксономії.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження з борту БпЛА були отримані бінарні зображення різного розміру з однаковими умовами зйомки. Результати обчислень отримані при таких обчислювальних потужностях: Intel(R) Core(TM) i3-3110MCPU @ 2.40GHz, графічний процесор nVidia GeForce 610M, 1 GB DDR3, 64-bit, оперативна пам’ять 4GB. Задачею дослідження є вибір з сукупності відомих способів векторизації такого способу, який би мав найменший час роботи без суттєвої втрати якості для файлів великих розмірів. Застосування бінарних зображень спрощує процес обробки та аналізу, що робить його менш витратним з погляду на обчислювальні ресурси.

Першим етапом дослідження є отримання значень результатів роботи способів векторизації. Як ознаки (критерії) вибрані: час роботи способу векторизації, якість отриманого векторного зображення та ступінь стиснення векторного файлу, порівнюючи з його растровим аналогом. На рисунку 1 подані результати векторизації поточного бінарного зображення розміром 12Мб відомими методами за критерієм часу.

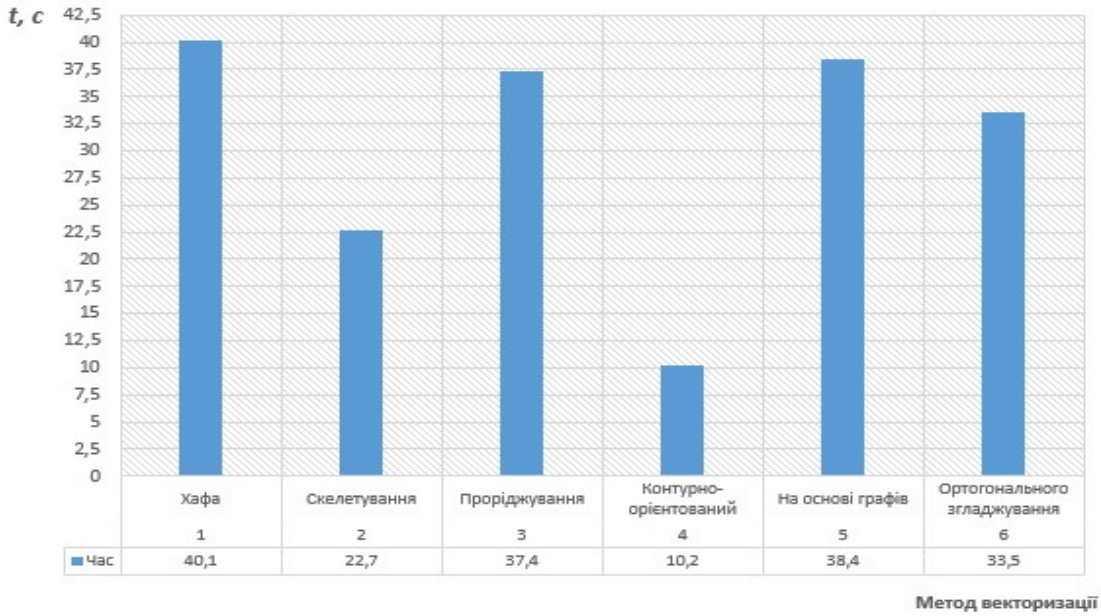

Рисунок 1 – Результат векторизації поточного зображення відомими методами за критерієм часу

У таблиці 1 наведені отримані результати роботи способів векторизації за вибраними ознаками. Для кожного способу векторизації отриманий кортеж ознак. Час роботи способу векторизації та ступінь стискування зображення є дестимуляторами, а якість зображення – стимулятором.

Таблиця 1 – Характеристика способів векторизації, (матриця *X*)

№ з/п	Способи векторизації поточного зображення	Номер, назва ознак, одиниці вимірювання		
		1	2	3
		час роботи, с	якість, %	% від розміру вхідного файлу
1	Хафа	40,1	0,85	5
2	Скелетування	22,7	0,75	3,5
3	Проріджування	37,4	0,8	3
4	Контурно-орієнтований	10,2	0,8	3
5	На основі графів	38	0,7	4
6	Ортогонального згладжування	33,5	0,85	4,6
Тип ознаки		-	+	-
$M[x_j]$		112,95805	0,002847	0,579166
δ_j		10,62817	0,053359	0,761030

Етапом роботи методу таксономії є стандартизація ознак шляхом переходу до нормованих безрозмірних значень Z_{ij}. Для кожного способу векторизації отримаємо нормоване безрозмірне значення Z_{ij} [6]:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{\delta_j};\ i=1,\ldots, m;\ j=1,\ldots, n, \qquad (1)$$

де m – кількість одиниць (точок n-мірного простору), що дорівнює кількості рядків матриці;

n – кількість ознак кожної статистичної одиниці (одна кількість стовпців матриці), один стовпець містить значення однієї ознаки;

x_{ij} – значення ознаки номер j для одиниці номер i;

$m_j = x_j$ – оцінка математичного сподівання значення ознаки;

$$x_j = m_j = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_{ij}\ ; j=1,\ldots, n; \tag{2}$$

δ_j – оцінка середньоквадратичного відхилення ознаки X_j [6];

$$\delta_j = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(x_{ij} - m_j)^2}\ ; j=1,\ldots, n, \tag{3}$$

Для кожної ознаки знайдемо оцінку математичного сподівання (2), середньо- квадратичного відхилення (3), які розташовані внизу стовпців цих ознак (табл. 1), та нормованого значення кожної ознаки (1). Результати розрахунків подані у формі матриці Z (табл. 2). Для подальшого аналізу знайдемо координати z_{0j} ідеальної багатомірної одиниці (точки Z_0), обираючи «кращі» з існуючих значень ознак.

$$z_{0j} = \begin{cases} \max\limits_i z_{ij} & \text{якщо } j \in I_{\text{с}}\,(\text{стимулятор}); \\ \min\limits_i z_{ij} & \text{якщо } j \in I_{\text{д}}\ (\text{дестимулятор}). \end{cases} \tag{4}$$

Таким чином, проведений відбір багатомірної одиниці, з погляду на мету аналізу є «еталоном розвитку». Проведемо розрахунок відстані кожної точки до еталона розвитку.

$$c_{i0} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(z_{ij} - z_{0i})^2}\ ; i=1,\ldots, m. \tag{5}$$

Чим ближче одиниця X_j сукупності знаходиться до точки еталона розвитку, тим меншим буде значення c_{i0}. Конкретне значення відстані не дає однозначної характеристики ступеня віддаленості одиниці сукупності від ідеальної точки. Більш інформативним є відношення відстані c_{i0} до максимально можливої відстані c_0 в сукупності, що досліджується, багатомірних одиниць ($d_i^* = c_{i0}/c_0$). Таке співвідношення знаходиться в межах $d_i^* \in [0;1]$ та автоматично відображає ступінь близькості i-ї одиниці – точки сукупності, яка досліджується, до точки еталона розвитку. Для переходу до показника d_i^* потрібно знайти статистичну оцінку величини c_0.

З цією метою спочатку визначаються середнє для всіх одиниць значення відстані до ідеальної точки (оцінювання математичного сподівання) [6]

$$M[c_{i0}] = \overline{c_0} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} c_{i0} \tag{6}$$

та оцінка середньоквадратичного відхилення цієї відстані

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(c_{i0} - c_0)^2}\ . \tag{7}$$

Величина c_0 є оцінкою максимальної відстані та може бути знайдена з урахуванням «правила трьох сигм» [5]:

$$c_0 = \overline{c_0} + 3\cdot\delta_0\ . \tag{8}$$

Потім для кожної *i*-ї одиниці (X_i) сукупності знаходять значення проміжного показника рівня розвитку. Прикінцева формула для показника рівня розвитку має такий вигляд [6]:

$$d_i = 1 - \frac{c_{i0}}{c_0}. \quad (9)$$

Інтерпретація даного показника така: *i*-та одиниця (X_i) має більший рівень розвитку, чим ближче до одиниці знаходиться значення показника рівня її розвитку. Результати обчислень за формулами (5) – (9) подані в таблиці 2.

Таблиця 2 – Нормовані значення z_{ij} ознак способів векторизації (матриця *Z*)

№ з/п	Ознаки, використані для аналізу			Віддалення від точки Z_0			Ранг
	1	2	3	C_{i0}	d_i^*	d_i	
1	0,920509	1,093216	1,51111	3,8498	0,64901	0,35098	**5**
2	-0,71665	-0,78087	-0,4599	2,3080	0,38909	0,61090	**2**
3	0,666468	0,156174	-1,11691	2,7253	0,45945	0,54054	**3**
4	-1,89277	0,156174	-1,11691	0,9370	0,15797	0,84203	**1**
5	0,722921	-1,71791	0,197101	4,0584	0,68418	0,31581	**6**
6	0,299518	1,093216	0,985506	3,0374	0,51206	0,48793	**4**
Тип озн.	-	+	-	2,81936	δ_0=1,037472		
Z_{0j}	-1,89277	1,093216	-1,11691	C_0	5,931781		

За отриманими даними (табл. 2) визначений ранг кожного способу векторизації. Результати ранжування наведені на рисунку 2.

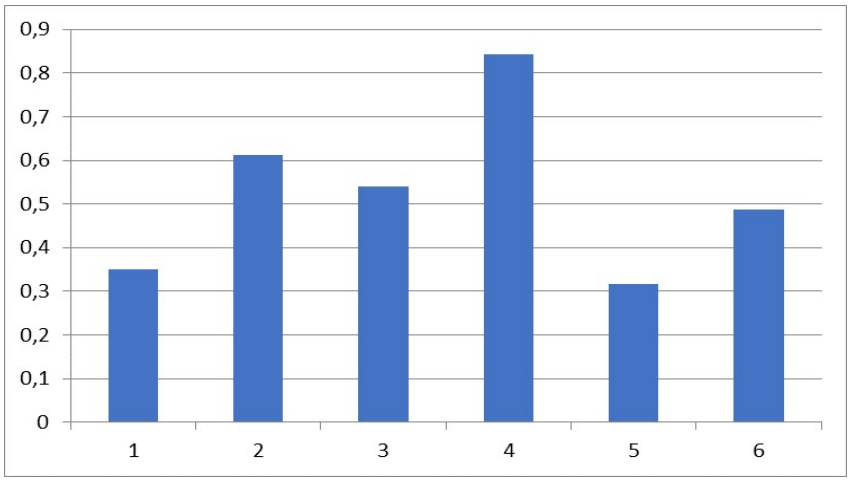

Рисунок 2 – Таксономічний показник розташування способів векторизації за перевагою у швидкодії, якості та ступенем стискування

Найбільшу перевагу серед способів векторизації має контурно-орієнтований спосіб векторизації, що включає виявлення та візуалізацію контурів, дозволяє зменшити кількість зайвої інформації, спрощуючи растрові дані до геометричних примітивів, таких як лінії та криві. Це не тільки полегшує зберігання та передавання даних, а й підвищує ефективність аналізу зображень та виконання на них обчислень. Застосування таких алгоритмів може скоротити час обробки зображення вдвічі, порівняно з традиційними методами, які застосовують обробку полігонів. Векторизовані дані значно легші та забезпечують більшу гнучкість під час зміни масштабу або внесення змін, не погіршуючи при цьому якості чи точності. Результат роботи контурно-орієнтованого способу векторизації наведено на рисунку 3.

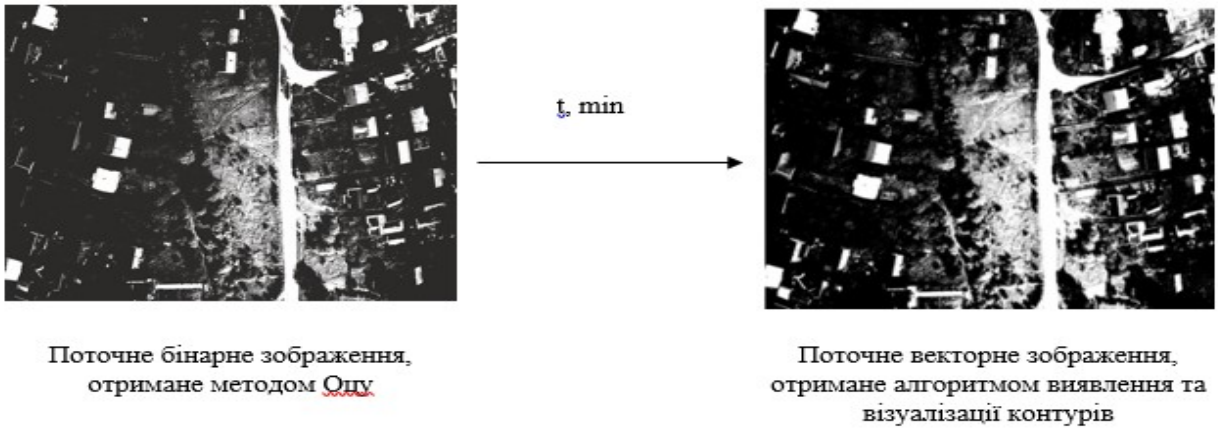

Рисунок 3 – Результат векторизації поточного зображення контурно-орієнтованим способом

На рисунку 4 подана схема розробленого методу вибору способу векторизації на основі таксономії.

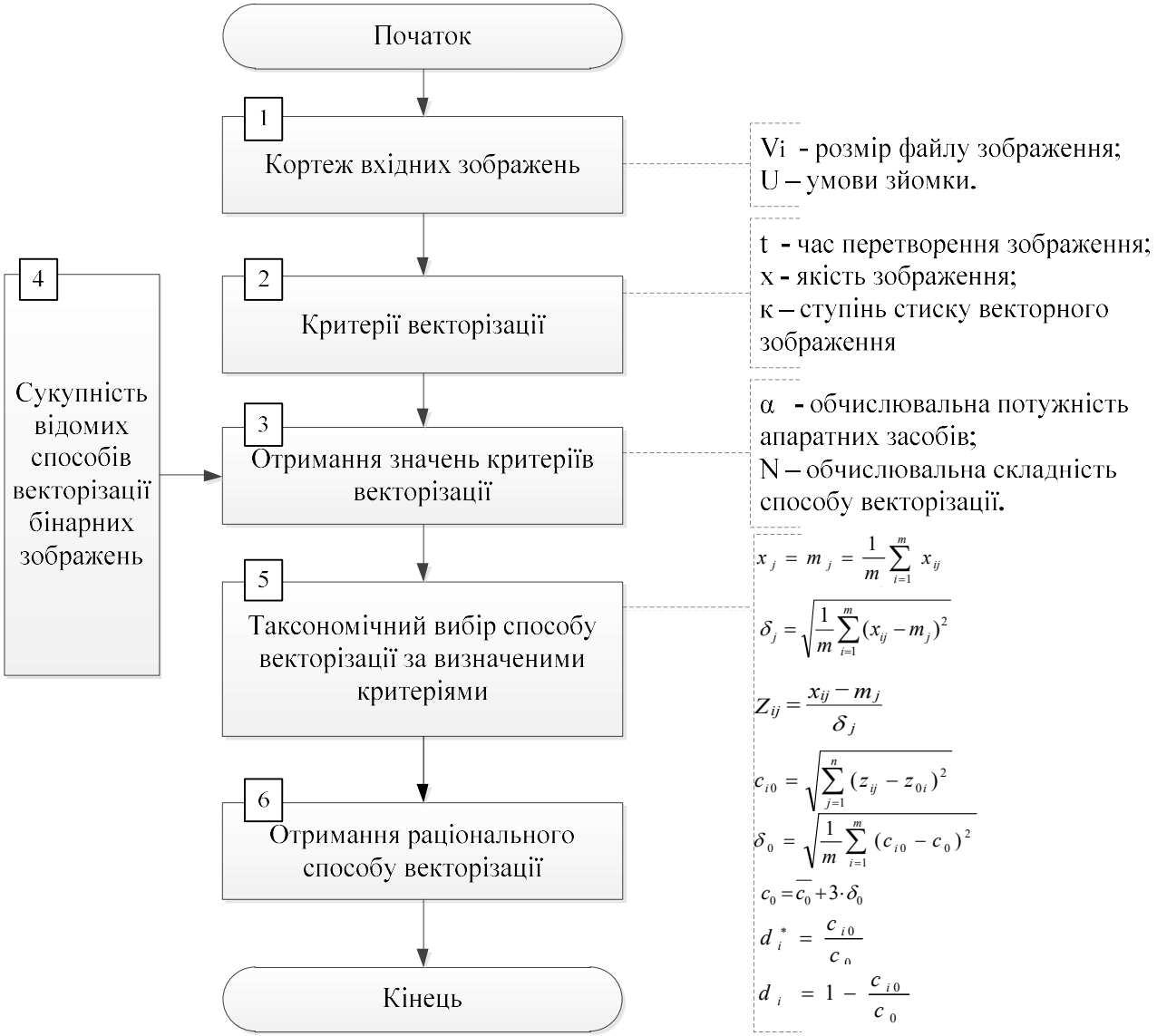

Рисунок 4 – Схема методу вибору способу векторизації на основі таксономії

Опис методу. Отримані бінарні зображення, розміри яких 5 Мб, 12 Мб, 20 Мб, 45 Мб, мають однакову композицію, тобто на спосіб векторизації кількість об'єктів на зображенні не впливає. Вхідна якість для всіх зображень – 100 пкс/см.

Наступним кроком, блок 2, є визначення критеріїв векторизації (критичні для оптико-електронного модуля системи навігації БпЛА характеристики перетворень растрового формату у векторний). Такими критеріями є: час на перетворення з формату в формат, візуальна якість отриманого векторного зображення, ступінь стискування векторного файлу, порівнюючи з растровим.

Значення визначених критеріїв отримуються на наступному етапі методу, блок 3. Важливими характеристиками на цьому етапі є: обчислювальна потужність апаратних засобів та обчислювальна складність способу векторизації. Для кожного способу векторизації розраховуються значення критеріїв. У блоці 5 отримані значення порівнюються за методом таксономії та вибирається той спосіб, значення якого знаходяться на найменшій відстані від ідеальної точки. У такий спосіб отримується раціональний спосіб векторизації, який можна використовувати для перетворення растрових зображень на борту БПЛА в системі оптичної навігації в реальному часі.

Висновки

Розроблено метод вибору способу векторизації бінарного зображення на основі таксономії для оптико-електронного модуля системи навігації БпЛА. Метод дозволяє вибрати раціональний спосіб векторизації для вхідних умов, а саме – контурно-орієнтований спосіб.

Отримані критерії векторизації: час на перетворення із формату в формат, візуальна якість отриманого векторного зображення, ступінь стискування векторного файлу, порівнюючи з растровим.

Метод може використовуватись під час вибору способу векторизації за різних умов зйомки та за наявності оптичних перешкод. Перетворення з растрового формату у векторний проводиться в реальному часі, що дозволяє підвищити точність місця визначення БпЛА завдяки частішому порівнянню з еталонами.

У подальших дослідженнях планується вдосконалення методу порівняння векторних файлів. Особлива увага буде приділена мінімізації часу обробки. Такий підхід має на меті значне підвищення точності та забезпечення більшої автономії БпЛА, що відповідає сучасним вимогам до швидкодії навігаційних систем. Розроблення цього методу дозволить зменшити часові затримки реагування системи на зміни у навколишньому середовищі, що є критично важливим для ефективного реагування БпЛА в динамічних та непередбачуваних умовах польоту.

Перелік джерел посилання

1. Самойленко В. М. Обґрунтування застосування автономних безпілотних літальних апаратів, що оснащені оптико-електронною системою навігації, для виконання завдань підрозділами Національної гвардії України. *Честь і закон*. 2023. № 4 (87). С. 83–91.

2. Сотніков О. М., Таршин В. А., Опенько П. В. Проблеми та напрямки розвитку кореляційно-екстремальних систем наведення керованих літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2013. № 3 (18). С. 93–96.

3. Chinu, A. Chhabra. Overview and comparative analysis of edge detectiontechniques in digital image processing. *International Journal of Information & Computation Technology*. 2014. Vol. 4. Issue 10. Pp. 973–980.

4. Шипулін В. Д. Основні принципи геоінформаційних систем : навч. посіб. Харків : ХНАМГ, 2010. 313 с.

5. Bettouche Z., Fischer A. Improving Image Tracing with Convolutional Autoencoders by High-Pass Filter Preprocessing. *Deggendorf Institute of Technology,* Web. 15 Jun. 2023. URL:http://arxiv.org/abs/2306.09039v1 (дата звернення:01.04.2024).

6. Споришев К. О., Дем'янишин В. М., Яковлев О. В. Таксономічний метод визначення порядку евакуації пошкоджених у ході бойових дій зразків озброєння та військової техніки. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2022. Вип. 2 (40). С. 71–76.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2024 р.

UDC 623.746.-519

K. Sporyshev, V. Samoilenko

TAXONOMIC METHOD FOR CHOOSING THE VECTORIZATION APPROACH OF CURRENT IMAGES IN THE OPTO-ELECTRONIC MODULE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

In the article, a taxonomic method for selecting the optimal vectorization approach for processing current images in the optical-electronic module of unmanned aerial vehicles (UAVs) was developed. The primary goal of this method is to optimize UAV navigation systems, which is particularly relevant due to the need to improve data processing efficiency in conditions of limited access to satellite navigation systems. This is critically important for ensuring high autonomy and accuracy of UAVs during the performance of various tasks. The need for such a method arose from the specific challenges faced by UAVs when operating in complex and unpredictable conditions. Analysis has shown that the use of vector images can significantly reduce the time required for information processing. This is possible due to the smaller volume of data that needs to be processed compared to traditional raster images. Reducing information processing time is critically important for the operational capability of UAVs to respond to dynamic changes in the operational environment, especially in critical situations. The taxonomic approach applied in the study allows for systematic classification and evaluation of different vectorization methods in terms of their processing speed, accuracy of results, and data retention efficiency. This enables the identification of the most suitable method for the specific operational conditions in which the UAV is used, thereby optimizing the overall system performance. Furthermore, the results of this research are significant not only in the scientific field but also in practical applications. By improving autonomous navigation systems for UAVs, the study directly contributes to enhancing their effectiveness in complex and unpredictable conditions. This is particularly relevant for missions that require a high level of precision and reliability, such as those performed by military UAVs and emergency response. Enhanced navigation capabilities allow these UAVs to perform complex maneuvers and make real-time decisions based on processed vectorized images, thereby reducing the risk of errors and increasing mission success rates. An improved vectorization method could lead to significant enhancements in UAV navigation systems, making them more resistant to failures and capable of operating in less structured environments without heavy reliance on satellite signals. This enhancement is vitally important for both military and civilian UAV applications, where operational flexibility and reliability are extremely important.

K e y w o r d s : unmanned aerial vehicles, navigation systems, opto-electronic module, vectorization methods, taxonomy.

Споришев Костянтин Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, докторант Національної академії Національної гвардії України.
https://orcid.org/0000-0003-4737-9698

Самойленко Валерій Миколайович – ад'юнкт Національної академії Національної гвардії України.
https://orcid.org/0000-0002-0352-3953