https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.043
УДК 004.932:629.7.05

М.М. КОМАР, канд. техн. наук, старш. дослідник,
провідн. наук. співроб., заст. директора з наук. та орг. роботи.
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
https://orcid.org/0000-0001-9194-2850
nickkomar08@gmail.com
В.М. СІМАХІН, д-р філос. (комп'ютерн. науки), в.о. зав. лаб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
https://orcid.org/0000-0003-4497-0925
thevladsima@gmail.com
І.В. ПОПОВ, аспірант, наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
https://orcid.org/0009-0009-7961-9431
popigor7@gmail.com

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОФЛАЙН ОБРОБЛЕННЯ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ЗОБРАЖЕНЬ З БОРТОВОЇ КАМЕРИ

У статті розв'язано актуальне науково-практичне завдання з підвищення точності та надійності відновлення траєкторії польоту літальних апаратів (ЛА) за даними бортового відеознімання в умовах складного рельєфу та завад. Обґрунтовано та реалізовано концепцію візуально-аналітичного відтворення польотної інформації у формі стаціонарного програмно-апаратного комплексу офлайн-оброблення даних. Запропоновано синтезований метод, який базується на конвеєрному поєднанні трьох алгоритмічних компонентів: алгоритму аналізу та селекції кадрів для автоматичного вилучення сотворених зображень, методу топографічної кластеризації послідовностей зображень на основі концепції топографічної спорідненості, а також методу крос-кореляційної кластеризації віртуальних особливих точок. Останній забезпечує суміщення кадрів за відсутності природних маркерів над текстурно однорідними ландшафтами завдяки використанню шаблонів піксельної кореляції та геометричного зіставлення трикутних конфігурацій за кутами нахилу й співвідношенням довжин векторів. Побудовано математичну модель визначення вектора зсуву зображення для розрахунку реальної подола-

Цитування: Комар М.М., Сімахін В.М., Попов І.В. Аналіз методів та засобів офлайн оброблення послідовностей зображень з бортової камери. *Information Technologies and Systems*, Київ, 2026, Том 4 (10), 43–53. https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.043

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

ної відстані та просторово-часової динаміки руху (зсув, поворот, масштаб, висота). Забезпечено автоматичне формування структурованих наборів даних (форматів CSV та JSON) для застосування в оборонній аналітиці, розвідці, наукових дослідженнях та оцінці дій операторів ЛА.

***Ключові слова**: послідовності зображень, офлайн-оброблення зображень, комп'ютерний зір, топографічна кластеризація, віртуальні особливі точки, крос-кореляційний аналіз, реконструкція траєкторії.*

Вступ

В умовах інтенсивного використання різноманітних літальних апаратів (ЛА) виникає потреба не лише у реалізації алгоритмів автономної навігації в реальному часі, але й у проведенні глибокого післяпольотного аналізу отриманих візуальних даних в режимі офлайн.

На відміну від систем реального часу, які обмежені в обчислювальних ресурсах бортових комп'ютерів та вимогами до мінімальної затримки, офлайн-оброблення має кардинально інші цілі та можливості. Відбувається зміна базових завдань, і метою стає не оперативне виявлення перешкод чи коригування курсу, а високоточна реконструкція траєкторій польоту, створення ортофотопланів, формування якісних датасетів для навчання нейромереж, а також аналітика та детальний аудит дій оператора.

Обчислення здійснюється на стаціонарних програмно-апаратних комплексах без обмежень щодо енергоспоживання та обчислювальної потужності. Це дозволяє застосовувати складні математичні моделі та ресурсоємні алгоритми комп'ютерного зору до малих обсягів вибіркових або суттєво спотворених даних, отримуючи з них максимум корисного сигналу.

Зображення з бортових камер зазнають специфічних деформацій, як то: високого рівня шуму через низьку освітленість або вібрації носія, оптичних спотворень, різких перспективних зсувів, змазування кадрів при маневрах, а також відсутності чітких текстових або контрастних деталей під час польотів над однорідними ландшафтами (лісові масиви, водойми, снігові покриви чи рівнини). Усунення цих спотворень та відновлення просторово-часової динаміки польоту вимагає розроблення спеціалізованих методологічних підходів до вибіркового та синтетичного аналізу відеопотоку.

Метою статті є аналіз наявних методів та засобів комп'ютерного зору і обґрунтування на їх основі синтезованого методу офлайн-оброблення послідовностей зображень з бортової камери ЛА для автоматизованого відбору якісних кадрів, зіставлення зображень над текстурно однорідними ландшафтами та високоточного відтворення траєкторії польоту.

Огляд літератури

Аналіз сучасних науково-технічних джерел свідчить про стрімкий розвиток методів і засобів комп'ютерного зору для оброблення візуальних даних, отриманих з літальних апаратів [1–3]. Залежно від умов засто-

сування розрізняють системи реального часу, включно з алгоритмами візуальної одометрії та методами одночасної локалізації й побудови карти (*Simultaneous Localization and Mapping, SLAM*) [1–2], та комплекси післяпольотного офлайн-аналізу [4–5].

Серед наявних методів оброблення та зіставлення зображень фундаментальне значення мають алгоритми виявлення та опису особливих точок. Найбільш відомими є класичні детектори, такі як алгоритм масштабоінваріантного перетворення ознак (*Scale-Invariant Feature Transform, SIFT*) [6] та алгоритм прискорених стійких ознак (*Speeded-Up Robust Features, SURF*) [7]. Вони забезпечують високу інваріантність до зміни масштабу, повороту та нерівномірних змін освітленості. Для систем із обмеженими обчислювальними ресурсами широко використовується алгоритм *ORB* (*Oriented FAST and Rotated BRIEF*) [8], що базується на бінарних дескрипторах і працює значно швидше за *SIFT* [6] чи *SURF* [7]. Також для оцінювання міжкадрових переміщень застосовуються диференціальні методи оптичного потоку, зокрема класичний метод Люкаса-Канаде [9].

Проте наведені методи мають низку обмежень. За умов зниження якості вхідного відеопотоку під час польотів ЛА кількість стабільних особливих точок суттєво зменшується [4, 10]. Іншою проблемою є оброблення даних над текстурно однорідними поверхнями (зокрема лісовими масивами, водоймами, степовими ділянками), де класичні алгоритми трекінгу [6–7] зазнають збоїв через відсутність чітких природних маркерів.

Серед засобів оброблення та програмно-апаратних рішень сучасні дослідження охоплюють широкий спектр інструментів — від відносно легких бібліотек комп'ютерного зору до фотограмметричних платформ [3, 5]. Ресурсоємні фотограмметричні комплекси (наприклад, *Pix4D, Agisoft Metashape*) реалізують методи реконструкції тривимірних сцен на основі підходів «структура з руху» (*Structure-from-Motion, SfM*) та багаторакурсного стереооброблення [3, 10]. Водночас такі засоби є чутливими до наявності пропущених або низькоякісних кадрів у послідовності: поява змазаного чи зашумленого кадру часто призводить до розриву траєкторії або суттєвого спотворення всієї геометричної моделі [4, 10].

Таким чином, наявні методи [6–9] та засоби [3, 5] є орієнтованими або на роботу в реальному часі з обмеженою точністю [1–2], або на ідеальні вхідні фотограмметричні дані високої якості [3, 10]. Для умов, коли відеозаписи з бортової камери ЛА містять фрагментарні спотворення, шуми та ділянки з відсутністю характерних фрагментів, виникає потреба у формуванні обґрунтованої послідовності спеціалізованих алгоритмів, об'єднаних в єдиний комплексний метод селекції та аналізу кадрів.

Синтез методу аналізу та селекції кадрів з бортової камери ЛА

Для усунення обмежень класичних підходів та оброблення низькоякісних або слабоструктурованих візуальних даних запропоновано синтезований метод аналізу та селекції кадрів з бортової камери ЛА. В основу методу покладено концепцію поєднання трьох спеціалізованих алгоритмічних компонентів, кожен з яких виконує окрему функцію в загальному контурі офлайн-оброблення.

Першим компонентом є алгоритм відбору якісних зображень, призначений для первинного фільтрування вхідного масиву кадрів. У процесі польоту ЛА значна частина відеопотоку спотворюється через розмиття внаслідок руху, вібрації носія та різких змін освітленості. Запропонований алгоритм оцінює рівень чіткості та міжкадрового перекриття, що дає змогу вилучати неінформативні кадри. Це підвищує підсумкову точність реконструкції та зменшує обчислювальні витрати на наступних етапах.

Для автоматизованої селекції зображень низької якості запропоновано метод оцінювання локального контрасту на основі аналізу розсіювання інтенсивності пікселів. Оцінювання здійснюється у локальних вікнах розміром 9×9 пікселів, рівномірно розподілених площею кадру (для роздільної здатності 1920×1080 кількість таких ділянок становить $m = 40000$).

Для кожного k-го вікна з кількістю пікселів n обчислюється середнє значення інтенсивності сірого кольору $\overline{I}_k$ та дисперсія σ_k^2:

$$\overline{I}_k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_i,\ \sigma_k^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(I_i - \overline{I})^2,$$

де I_i — інтенсивність i-го пікселя.

Локальний контраст вікна визначається як середнє квадратичне (стандартне) відхилення $\sigma_k = \sqrt{\sigma_k^2}$, що має однакову розмірність із вихідною інтенсивністю. Підсумковий показник якості кадру визначається як середнє значення стандартного відхилення по всьому зображенню:

$$\overline{I}_k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_i,\ \sigma_k^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(I_i - \overline{I})^2.$$

Високе значення $\bar{\sigma}$ свідчить про високу чіткість, наявність виражених контурів і текстурних особливостей, тоді як низьке значенні $\bar{\sigma}$ ідентифікує розмиті, змазані або однотонні кадри, які підлягають автоматичному вилученню з подальшого оброблення.

Другим компонентом є метод зіставлення послідовностей зображень, розроблений на основі принципів топографічної кластеризації. Запропонований підхід призначений для підвищення надійності геометричного аналізу візуальних даних за рахунок концепції топографічної спорідненості кадрів. На відміну від стандартного точко-

вого зіставлення, топографічна кластеризація розглядає взаємне просторове положення кадрів як елементів цілісної топологічної структури. Це дозволяє надійно оцінювати параметри просторового руху ЛА (вектори зсуву, кути повороту та масштабні коефіцієнти) навіть за наявності суттєвих спотворень перспективи.

Метод забезпечує обчислення просторового переміщення, зміни висоти польоту та курсового кута ЛА між базовим і поточним кадрами.

На першому та другому етапах здійснюється виявлення особливих областей за допомогою детектора локальних максимумів оператора Лапласа, після чого проводиться їхня двофакторна фільтрація за діаметром і розміром просторового вікна. На третьому етапі виконується перебір комбінацій з трьох особливих зон для формування трикутників $A_1B_1C_1$ та $A_2B_2C_2$, де центр мас $C(C_x, C_y)$ кожного трикутника обчислюється за координатами його вершин:

$$C_x = \frac{a_x + b_x + c_x}{3}, C_y = \frac{a_y + b_y + c_y}{3}.$$

Для векторів a, b, c спрямованих від центра мас C до точок a, b, c розраховуються їхні довжини та кути відносно опорного вертикального перпендикуляра h. Кут α у радіанах обчислюється як:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{h \cdot a}{\|h\|\,\|a\|}\right).$$

Для точок, що лежать ліворуч від центра мас, кут коригується для забезпечення діапазону $[0^o, 360^o]$:

$$\alpha_{full} = 2\pi - \alpha.$$

Подібність трикутників встановлюється за двома критеріями:

• кутова відповідність: різниці кутів $\Delta\alpha_i = \alpha_{2,i} - \alpha_{1,i}$ для відповідних векторів повинні бути приблизно однаковими та не перевищувати порогове значення:

$$\left|\Delta\alpha_a - \Delta\alpha_b\right| \le \varepsilon_\alpha, \left|\Delta\alpha_b - \Delta\alpha_c\right| \le \varepsilon_\alpha,$$

• масштабна відповідність: відношення довжин векторів $R_{V,i} = \frac{L_{2,i}}{L_{1,i}}$ (де $i \in \{a, b, c\}$), перевіряються на відхилення від середнього:

$$\Delta R_V = \left|R_{V,i} - R_{V,j}\right| \le \varepsilon_R.$$

На четвертому етапі конфігурація верифікується додаванням четвертої особливої зони d, утворюючи чотирикутник із центром мас $C'(C'_x, C'_y)$:

$$C'_x = \frac{a_x + b_x + c_x + d_x}{4}, C'_y = \frac{a_y + b_y + c_y + d_y}{4}.$$

На п'ятому етапі розраховуються підсумкові параметри руху:

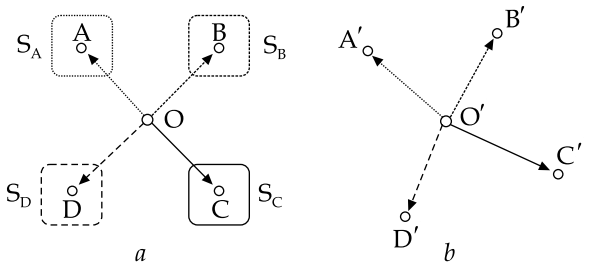


Рис. 1. Схема процесу формування векторів зіставлених віртуальних точок еталонного (*a*) і поточного (*b*) зображень

Кут повороту (Δθ): середнє значення кутових різниць $\Delta\theta = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4}\Delta\alpha_i$.

Зміна висоти: визначається через середня значення масштабу $\Delta R_V = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} R_{V,i}$, де зміна висоти є обернено пропорційною до R_V.

Вектор зсуву (A_s): побудований на поточному кадрі вектор A_2 (від C_2' до центра кадру C_{z2}) повертається на кут $-\Delta\theta$ за допомогою матриці повороту:

$$\begin{pmatrix} A_{tx} \\ A_{ty} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\Delta\theta) & -\sin(-\Delta\theta) \\ \sin(-\Delta\theta) & \cos(-\Delta\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{2x} \\ A_{2y} \end{pmatrix}.$$

Після масштабування $A_{mt,x} = \frac{A_{tx}}{R_V}$, $A_{mt,y} = \frac{A_{ty}}{R_V}$ та перенесення точки на базовий кадр $A_{Ax} = C_{1x}' + A_{mt,x}$, $A_{Ay} = C_{1x}' + A_{mt,y}$, вектор зсуву A_s утворюється між центром базового кадру C_{z1} та точкою A_A:

$$A_s = (A_{Ax} - C_{Z1,x}\ A_{Ay} - C_{Z1,y}).$$

Модуль вектора зсуву $L_s = \|A_c\| = \sqrt{(A_{Ax} - C_{Z1,x})^2 + (A_{Ay} - C_{Z1,y})^2}$ визначає підсумкову відстань, подолану ЛА між кадрами в координатах зображення.

Третьою складовою є метод кроскореляційної кластеризації віртуальних особливих точок. Необхідність його застосування обумовлена суттєвим зниженням ефективності класичних підходів на однорідних ділянках місцевості (водні поверхні, щільні лісові масиви, снігові покриви, сільськогосподарські поля тощо), де практично відсутні чітко виражені природні контрастні маркери.

Запропонований метод формує сітку віртуальних особливих точок на основі шаблонів піксельної кореляції та здійснює геометричне зіставлення їх трикутних конфігурацій з урахуванням кутів нахилу й співвідношення довжин векторів. Це дає змогу надійно розв'язувати задачі візуальної одометрії та геопросторового аналізу навіть за умов повної відсутності характерних фрагментів рельєфу.

Процес формування векторів зіставлених віртуальних точок еталонного та поточного зображень показано на рис. 1. На початку процесу на еталонному кадрі задають віртуальні точки *A*, *B*, *C*, *D* та від-

повідні шаблони пошуку S_A, S_B, S_C, S_D. За допомогою двовимірної кроскореляції всередині поточного зображення знаходять координати центрів цих шаблонів, які утворюють відповідні віртуальні точки поточного кадру A', B', C', D'. Далі обчислюють центри мас для віртуальних точок еталонного (O) та поточного (O') зображень. Зіставлені віртуальні точки спільно з центрами мас визначають конфігурацію зірок кластеризації з векторами променів OA, OB, OC, OD для еталонного кадру та $O'A'$, $O'B'$, $O'C'$, $O'D'$ для поточного.

Синтез описаних алгоритмів у єдиний метод аналізу та селекції послідовностей зображень реалізовано як триетапний обчислювальний конвеєр. На першому етапі вхідний відеопотік проходить автоматичну селекцію для формування оптимізованого масиву інформативних кадрів. На другому етапі до сформованої вибірки застосовується метод топографічної кластеризації, а в разі виявлення текстурно однорідних ділянок додатково задіюється кроскореляційний аналіз віртуальних особливих точок. На завершальному етапі отримані геометричні параметри та вектори зсуву інтегруються в єдину математичну модель, що забезпечує відновлення траєкторії польоту ЛА у просторі координат та формування структурованих результуючих датасетів.

Математична реалізація об'єднаної моделі розпочинається з адаптивного формування множини опорних точок $\mathrm{P} = \{p_i\}_{i=1}^{M}$. На текстурованих ділянках місцевості точки виявляються як максимуми оператора Лапласа:

$$p_i = \arg\max_x \left|\Delta I_1(x)\right|.$$

На однорідних поверхнях за дефіциту природних контрастів на базовому кадрі задаються піксельні шаблони S_i, а відповідні їм віртуальні точки $p_{2,i}$ на поточному кадрі знаходять шляхом максимізації нормованої взаємної кореляції:

$$p_{2,i} = \arg\max_x NCC(I_2(x), S_i).$$

Отримані чотири зіставлені точки використовуються для побудови геометричних зірок кластеризації. Спочатку обчислюються координати центрів мас O_1 та O_2 для базового і поточного кадрів:

$$O_k = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} p_{k,i},\ k \in \{1,2\}.$$

Далі формуються вектори променів $v_{k,i} = p_{k,i} - O_k$, для яких визначаються їхні довжини $L_{k,i} = \left\|v_{k,i}\right\|$ та кути $a_{k,i}$ Î [0°, 360°] відносно опорної вертикальної осі.

На завершальному етапі проводиться розрахунок параметрів руху ЛА та просторового зсуву зображень. Кут повороту відносно курсу оцінюється як середнє значення кутових різниць відповідних променів:

$$\Delta\theta = \frac{1}{M}(\alpha_{2,i} - \alpha_{1,i}).$$

Зміна висоти польоту ЛА є обернено пропорційною до середнього масштабного коефіцієнта R_V:

$$R_V = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\frac{L_{2,i}}{L_{1,i}}.$$

Для визначення пройденої відстані вектор $A_2 = C_{Z2} - O_2$, побудований від центра мас до центра поточного кадру C_{Z2}, повертається на кут $-\Delta\theta$ за допомогою матриці повороту R та масштабується коефіцієнтом $1/R_V$:

$$A_{mt} = \frac{1}{R_V}R(-\Delta\theta)A_2.$$

Після перенесення отриманого вектора на базовий кадр відносно його центра мас $A_A = O_1 - A_{mt}$, підсумковий вектор зсуву зображення визначається відносно центра базового кадру C_{Z1}:

$$A_A = A_A - C_{Z1}.$$

Його модуль задає пройдену відстань між кадрами в піксельному просторі:

$$L_s = \|A_S\| = \sqrt{(A_{Ax} - C_{Z1,x})^2 + (A_{Ay} - C_{Z1,y})^2}.$$

Запропонований синтезований метод дає змогу вирішити ключову задачу офлайн-оброблення відеопотоку бортової камери — автоматично відсіювати некоректні кадри та формувати структуровані просторово-прив'язані датасети у форматах *CSV* та *JSON* для подальшого аналізу.

Обговорення результатів

Запропонований синтезований метод демонструє високу стійкість до специфічних завад бортової відеофіксації, таких як високочастотні вібрації, різкі зміни освітленості та локальні геометричні спотворення. Основна перевага розробленого підходу полягає в здатності надійно відновлювати траєкторію польоту за умов, коли класичні фотограмметричні підходи (зокрема алгоритми на основі *SIFT*, *SURF* або *ORB*) втрачають працездатність через дефіцит або деградацію трекінгу натуральних еталонних точок.

Завдяки впровадженню концепції віртуальних особливих точок і кроскореляційної кластеризації досягнуто стабільності обробки послідовностей кадрів над текстурно однорідними ландшафтами (водні поверхні, сніговий покрив, сільськогосподарські поля, щільні лісові масиви тощо). Порівняно з наявними рішеннями візуальної одометрії, геометрична фільтрація трикутних конфігурацій за кутами нахилу та співвідношенням довжин векторів забезпечує високу стійкість до перспективних спотворень без необхідності виконання складних ітераційних процедур на кожному кадрі.

Впровадження модуля попередньої селекції дає змогу скоротити загальні обчислювальні витрати на 30–40% за рахунок автоматичного вилучення кадрів із динамічним розмиттям та недостатнім міжкадровим перекриттям. Це оптимізує роботу офлайн-конвеєра без втрати точнісних характеристик підсумкової 3*D*-реконструкції траєкторії.

Формування структурованих вихідних датасетів у форматах *CSV* та *JSON* забезпечує повну сумісність отриманих даних із зовнішнім програмним забезпеченням. Це спрощує кросплатформну інтеграцію розробленого комплексу з наявними геоінформаційними системами, аналітичними платформами післяпольотного контролю та тренажерними комплексами підготовки операторів ЛА.

Висновки

Як результат проведеного дослідження розв'язано актуальне науково-практичне завдання з підвищення точності та надійності відновлення траєкторії польоту ЛА за даними бортового відеознімання в умовах складного рельєфу та завад. На відміну від систем автономної навігації реального часу, розроблену технологію реалізовано як стаціонарний програмно-апаратний комплекс. Вона працює з ідентичним відеопотоком бортових оптичних систем ЛА, проте здійснює його оброблення в режимі офлайн, що дає змогу застосовувати ресурсоємні методи комп'ютерного зору та складні математичні моделі, які забезпечують підвищену точність аналізу й деталізацію реконструкції траєкторій.

Наукова концепція розробки базується на принципі візуально-аналітичного відтворення польотної інформації. В її основу покладено метод топографічної кластеризації послідовностей зображень для виявлення характерних ознак місцевості, метод кроскореляційної кластеризації віртуальних особливих точок для суміщення кадрів за відсутності чітких природних маркерів над однорідними ландшафтами, а також метод аналізу та селекції кадрів для автоматичного вилучення неінформативних або спотворених зображень. Інтеграція цих методів дала змогу сформувати універсальну технологію, яка забезпечує автоматичне розпізнавання й зіставлення кадрів бортового відеозапису, оцінювання взаємного зсуву, масштабу, повороту й висоти, а також відновлення траєкторії польоту в тривимірному просторі координат. Результати обчислень та метадані експортуються у структуровані датасети форматів *CSV* та *JSON* для подальшої аналітики або навчання.

Розроблений аналітичний комплекс не втручається в процес керування ЛА, а здійснює поглиблену післяпольотну обробку даних. Це забезпечує отримання вичерпної інформації про просторово-часову динаміку польоту та створює підґрунтя для застосування технології в оборонній аналітиці, розвідці, оцінці дій операторів та науково-технічних дослідженнях.

У результаті проведених теоретичних і прикладних досліджень обґрунтовано концепцію топографічної спорідненості зображень

для обчислення параметрів просторового руху. Розроблено алгоритм геометричного зіставлення трикутних конфігурацій особливих областей із використанням кутів нахилу та співвідношення довжин векторів, що забезпечує стійкість до спотворень перспективи. Побудовано математичну модель визначення вектора зсуву зображення між базовим і поточним кадрами для обчислення реальної подоланої відстані. Створено модель формування віртуальних особливих точок на основі шаблонів піксельної кореляції за умов текстурної однорідності ландшафту, а також реалізовано прототип інформаційної технології, здатної аналізувати великі обсяги візуальних даних із високою точністю та стійкістю до завад.

ПОВІДОМЛЕННЯ

Внесок авторів. *М.М. Комар сформулював наукові концепції, написання розділу «Вступ», розробив теоретичні основи топографічної спорідненості зображень та математичних моделей. В.М. Сімахін виконав синтез узагальненого методу аналізу і селекції послідовностей зображень (розділ «Синтез методу аналізу й селекції кадрів з бортової камери ЛА»). Адаптував алгоритми геометричного співставлення та структурування даних. І.В. Попов провів аналіз науково-технічної літератури (розділ «Огляд літератури»), а також систематизацію та порівняльний аналіз існуючих засобів комп'ютерного зору.*

Конфлікт інтересів. *Автори заявляють про відсутність у них відомих конкуруючих фінансових інтересів чи особистих зв'язків, які могли б вплинути на роботу, представлену в цій статті.*

Застосування ШІ. *Автори заявляють що не застосовували ШІ під час підготовки статті, окрім простої корекції мови, редагування та форматування.*

Фінансування. *Це дослідження виконано за грантової підтримки Національного фонду досліджень України у межах проєкту за реєстраційним номером 2025.06/0066 у конкурсі «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».*

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry: Part I — The first 30 years and the basics. *IEEE Robotics and Automation Magazine,* 2011, Vol. 18 (4), 80–92. https://doi.org/10.1109/MRA.2011.943233
2. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Ya., Scaramuzza D., Neira J., et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust perception age . *IEEE Transactions on Robotics,* 2016, Vol. 32 (6_, 1309–1332. https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754
3. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications.* Springer, 2022, 2nd ed., 1162 p.
4. Huang X, Wan X, Peng D. Robust Feature Matching with Spatial Smoothness Constraints. *Remote Sensing,* 2020, Vol. 12 (19), Article 3158. https://doi.org/10.3390/rs12193158
5. Torres-Sánchez J., López-Granados F., De Castro A.I., Peña-Barragán J.M. Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management. *PLoS ONE,* 2013, Vol. 8 (3), Article e58210. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058210
6. Lowe D. G. Distinctive image features from scale invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision,* 2004, Vol. 60 (2), 91–110. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94
7. Speeded up robust features (SURF) / H. Bay et al. *Computer Vision and Image Understanding,* 2008, Vol. 110 (3), 346–359. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014
8. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. *2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV),* Barcelona, Spain, 2011, 2564–2571. https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544

9. Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence,* Vancouver, Canada, 1981, Vol. 2, 674–679.
10. Hartley R., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2004, 655 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511811685

Отримано/Received 21.06.2026
Прийнято/Accepted 04.09.2026
Опубліковано/Published 23.10.2026

M.M. KOMAR, PhD (Engineering), Senior Researcher,
Deputy Director for Scientific and Organizational Work,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-9194-2850
nickkomar08@gmail.com
V.M. SIMAKHIN, PhD (Computer Sciences), Acting Head of the Research Laboratory,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-4497-0925
thevladsima@gmail.com
I.V. POPOV, PhD Student, Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
https://orcid.org/0009-0009-7961-9431,
popigor7@gmail.com

ANALYSIS OF METHODS AND MEANS FOR OFFLINE
PROCESSING OF AIRBORNE CAMERA IMAGE SEQUENCES

Introduction. The paper addresses the relevant scientific and practical problem of improving the accuracy and reliability of aircraft flight trajectory reconstruction based on onboard video recording under conditions of complex terrain and visual interference. Onboard optical navigation systems operating in real time face significant limitations when processing blurred images or textureless landscapes, necessitating the development of advanced offline visual data processing systems.

The purpose of the paper is to analyze existing computer vision methods and tools, and based on this analysis, to substantiate a synthesized method for offline processing of airborne aircraft image sequences to enable automated selection of high-quality frames, reliable image matching over textureless landscapes, and high-precision flight trajectory reconstruction.

Results. Conceptually structured as an offline stationary software and hardware complex, the developed technology implements a visual-analytical flight data reconstruction concept consisting of three pipelined components: automatic selection to eliminate degraded frames, topographic clustering based on image affinity, and cross-correlation clustering of virtual keypoints for markerless regions (e.g., bodies of water, dense forests). The mathematical models incorporate pixel correlation templates, geometric matching of triangular configurations using tilt angles and vector length ratios, and shift vector calculations for robust spatial dynamic evaluation (translation, rotation, scale, and altitude). Computation metadata and spatial-temporal dynamics are automatically exported into structured CSV and JSON datasets.

Conclusions. The proposed approach provides high-precision trajectory reconstruction and spatial dynamic analysis without interfering with aircraft flight control systems. Eliminating corrupted frames and utilizing virtual keypoints guarantees stable processing across homogenous terrains and reduces computational load. The created analytical complex creates a reliable technological foundation for applications in defense analytics, reconnaissance, scientific research, and aircraft operator training assessment.

Keywords: *image sequences, offline image processing, computer vision, topographic clustering, virtual keypoints, cross-correlation analysis, trajectory reconstruction.*