

УДК 004.93'1, 004.932.2

С.В. Мельничук, В.М. Шевченко

РОБОТА СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ ПО ЕЛЕМЕНТАХ ПОВЕРХНІ КОСМІЧНОГО АПАРАТА В УМОВАХ ЇЇ НЕПОВНОЇ ВИДИМОСТІ

Мельничук Сергій Вікторович

Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України,
sergvik@ukr.net

Шевченко Володимир Миколайович

Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України,
vovan_16@ukr.net

Вирішується задача відстеження переміщення реперних об'єктів на зображеннях, що отримуються системою технічного зору, призначеною для вимірювання відносного положення і орієнтації некооперованих космічних апаратів на малих відстанях у складі системи забезпечення автоматичного стикування. Дана задача виникає при формуванні вихідних даних для так званої задачі PnP, в якій положення та орієнтація тіла у просторі визначаються за зображеннями контрольних точок поверхні цього тіла, отриманими камерою перспективної проєкції. При цьому положення контрольних точок відносно системи координат цільового тіла мають бути відомими. Оскільки цільовим тілом виступає абстрактний некооперований космічний апарат, для визначення контрольних точок можуть використовуватися лише наявні видимі неоднорідності його поверхні. Тому виникає запитання, як вибирати контрольні точки, щоб вони були прив'язані до поверхні тіла і могли бути знайдені з високою точністю на зображеннях за різних зовнішніх умов зйомки. Одним із варіантів вирішення є використання для прив'язки дрібно розмірних конструктивних елементів некооперованого космічного апарата, які з великою ймовірністю будуть присутні на його поверхні. Тоді прив'язка контрольної точки здійснюється до відомої форми поверхні відповідного елемента, а визначення її положення на зображенні виконується через розпізнавання відповідного образу. У даній статті розглядається випадок використання системи технічного зору з монокулярною камерою. Розглядається етап роботи на близьких відстанях, коли в полі зору камери знаходиться ділянка поверхні стикування з розміщеними на ній елементами, що використовуються як реперні. Запропоновано метод знаходження на зображеннях положення точок прив'язки окремого класу реперних об'єктів при виконанні періодичної зйомки.

Ключові слова: система технічного зору, некооперований космічний апарат, автоматичне зближення, визначення положення і орієнтації, обробка зображень.

Вступ

Впродовж останнього десятиріччя у світі активно ведуться дослідження, пов'язані з розробкою автоматичних систем зближення і стикування космічних апаратів. Інтерес до цього напрямку мотивується перспективами вирішення широкого спектра нових робототехнічних задач: обслуговування космічних апаратів на орбіті, боротьба з космічним сміттям та інших. Серед задач, що на даний час найбільш актуальні, — зближення з некооперованими космічними апаратами (НКА), тобто з такими штучними космічними об'єктами, які не підтримують можливості стикування з ними [1–6].

© С.В. МЕЛЬНИЧУК, В.М. ШЕВЧЕНКО, 2022

Міжнародний науково-технічний журнал

«Проблеми керування та інформатики», 2022, № 2

Необхідною складовою системи керування зближенням є вимірювання відносного положення і руху апаратів. На останніх етапах зближення для цього використовуються оптичні прилади, що потенційно можуть забезпечити достатньо високу точність вимірювання на малих відстанях. Одним з небагатьох типів таких приладів є системи технічного зору (СТЗ), що в якості датчиків використовують одну або декілька камер. Функція такої СТЗ полягає в періодичному вимірюванні параметрів відносного положення і орієнтації НКА на основі отримуваних цифрових фотографій.

Для знаходження відносного положення і орієнтації використовується метод розв'язку за точками прив'язки, що знаходяться по зображенням реперних елементів поверхні НКА. При великій розмірності цифрових зображень пошук і розпізнання реперних об'єктів на кожному кадрі вимагає значних обчислювальних ресурсів. Спростити задачу можна при повторному використанні результатів обчислень, зроблених на основі раніше отриманих зображень. Для цього необхідно відстежувати переміщення знайдених реперних елементів від одного кадру до іншого.

При кратному зменшенні відстані до НКА в процесі зближення характер отримуваних камерами зображень істотно змінюється. Так, на дальніх відстанях у поле зору СТЗ потрапляє весь НКА, а надійно розпізнаними можуть бути лише великомасштабні елементи конструкції. На близьких відстанях у поле зору камери потрапляє лише частина поверхні НКА, зате на ній можуть бути розпізнані й відстежені більш дрібні елементи або неоднорідності поверхні.

У даній роботі розглядається задача відстеження покадрового переміщення зображень окремих локалізованих особливих елементів поверхні, що використовуються для прив'язки систем координат НКА і СТЗ при роботі на близьких відстанях. При цьому робиться ряд припущень щодо властивостей видимої ділянки поверхні НКА і вигляду реперних елементів, виправданий з точки зору практичної направленості роботи. Постановка задачі та її розв'язок розглядаються не в загальному випадку, а в розрізі практичної задачі, що виникає на кінцевому етапі зближення космічних апаратів.

Для випадку, коли видима СТЗ частина поверхні НКА є монотонною площиною, запропоновано підхід до визначення координат точок прив'язки реперних об'єктів за їхніми спостережуваними зовнішніми контурами. При цьому для знаходження контурів застосовується не розпізнавання образів реперних об'єктів, що можуть мати складну геометрію поверхні, а аналіз оточуючого фону.

Постановка задачі

Розглядається кінцевий етап зближення активного космічного апарата (АКА) з цільовим НКА, що не обертається або має дуже малу швидкість обертального руху. На даному етапі АКА вже завершив основні маневри і вийшов на пряму траєкторію зближення з НКА. Поверхня НКА зі сторони, з якої здійснюється підхід АКА, представлена площиною стикування (ПС), на якій розміщені дрібні конструктивні елементи.

Вимірювання відносного положення і орієнтації НКА і АКА виконується бортовою СТЗ з однією камерою, що нерухомо закріплена в корпусі АКА. Цільова траєкторія зближення співпадає з нормаллю до ПС. Цільова відносна орієнтація визначається співпадінням оптичної вісі камери СТЗ з нормаллю до ПС. Відхилення від цільової відносної орієнтації НКА і АКА визначається кутами тангажу ϑ і курсу ψ , значення яких на даному етапі зближення підтримуються близькими до нуля.

У полі зору камери знаходиться фрагмент ПС, що має монотонне забарвлення, а також розміщені на ПС «об'єкти плоскої форми», що будуть використовувати

тись як реперні. Об'єктами плоскої форми будемо називати такі плоскі або об'ємні конструктивні елементи, висота яких над рівнем ПС є достатньо малою відносно розмірів їхньої проєкції на ПС. При освітленні Сонцем «об'єкти плоскої форми» відкидають на ПС тіні відносно малого розміру.

Камера СТЗ виконує періодичну зйомку і в кожний момент часу t_k захоплює кадр I_k . Необхідно реалізувати супроводження реперних об'єктів НКА, тобто побудувати алгоритм визначення положення реперних об'єктів на поточному кадрі, використовуючи оцінки їхнього положення на попередньому.

У задачі використовуються три системи координат (СК). Перша СК — СК НКА, жорстко зв'язана з корпусом НКА. У цій СК задана геометрія поверхні всього НКА, у тому числі положення реперних об'єктів. Напрями координатних осей СК НКА обрані таким чином, щоб ПС, до якої буде підходити АКА, була перпендикулярна до першої з них. Друга СК — СК СТЗ, жорстко зв'язана з корпусом камери СТЗ. У цій СК мають визначатись положення та орієнтація НКА. Третя СК вводить на площині зображення (ПЗ), що отримується камерою. Положення і орієнтацію СК НКА відносно СК СТЗ будемо визначати вектором параметрів p , що об'єднує в собі координати відносного положення і набір параметрів, що однозначно визначає поворот у просторі.

Розглянемо реперний об'єкт A , що є об'єктом плоскої форми. Геометрія поверхні A відома, визначена в СК НКА і може бути дуже складною. Для загальності представлення будемо використовувати її ортогональну проєкцію на ПС, яку позначимо як σ_A . Положення реперного об'єкта A в СК НКА визначатимемо точкою прив'язки, яку розмістимо в центрі мас σ_A і позначимо вектором c_A . Також для реперного об'єкта A задано таку область Ω_A на ПС, що охоплює σ_A разом з деяким її околком і не містить інших реперних об'єктів.

Позначимо вектором p_k положення і орієнтацію СК НКА відносно СК СТЗ на момент часу t_k , вектором $\hat{p}_{k|k-1}$ — прогнозоване значення на момент t_k , обчислене в момент t_{k-1} , а вектором \hat{p}_{k-1} — апостеріорну оцінку на момент t_{k-1} . Будемо позначати величини, отримані переходом від СК НКА до СК СТЗ, верхнім індексом C , вказуючи у дужках вектор параметрів, що задає цей перехід. Тоді $\sigma_A^C(\hat{p}_{k|k-1})$ — прогнозоване розміщення області σ_A відносно камери в момент t_k ; $\Omega_A^C(\hat{p}_{k|k-1})$ — прогнозоване розміщення області Ω_A відносно камери в момент t_k .

Камера СТЗ вважається відкаліброваною, тому відомим є перетворення перспективного проєктування, що переводить точку в просторі, визначену в СК СТЗ, у точку на площині зображення, визначену в СК ПЗ. Позначимо цей оператор проєктування $\text{Im}[\cdot]$. Тоді $\text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]$ — прогнозована область на кадрі I_k , що співпадає з зображенням Ω_A ; $\text{Im}[\sigma_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]$ — прогнозована область на кадрі I_k , що співпадає з зображенням σ_A .

Передбачається, що точність прогнозу $\hat{p}_{k|k-1}$ і розміри області Ω_A гарантують знаходження об'єкта A в прогнозованій області зображення Ω_A , тобто виконується умова

$$\text{Im}[\sigma_A^C(p_k)] \subset \text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k|k-1})].$$

Необхідно на основі заданих областей σ_A і Ω_A , відомого оператора перспективного проектування камери $\text{Im}[\cdot]$, зображень I_{k-1} і I_k , а також оцінок положення і орієнтації \hat{p}_{k-1} і $\hat{p}_{k|k-1}$ знайти на зображенні I_k положення точки прив'язки реперного об'єкта A , що є центром мас області σ_A .

Підхід до розв'язання задачі

Розглянемо, як на зображеннях можуть виглядати реперні об'єкти плоскої форми, розміщені на ПС. На рис. 1 представлено фрагмент фотографії космічного корабля «Союз», зробленої під час його наближення до МКС. На ньому виділені зображення окремих елементів конструкції, розміщені на плоских ділянках поверхні, та вигляд потенційних реперних об'єктів ПС.

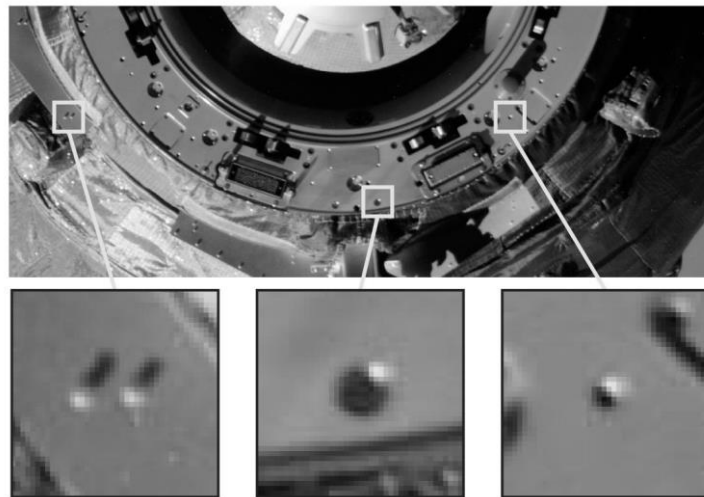


Рис. 1

Реперні об'єкти поділимо на два типи по розташуванню їхньої поверхні відносно ПС. До першого віднесемо виступаючі об'єкти, які відкидають тінь на ПС. До другого типу віднесемо западаючі об'єкти — отвори або виїмки, які на ПС тіні не відкидають.

Зображення області Ω_A виступаючого об'єкта A розіб'ємо на три частини, які умовно позначимо областями «О» (object, реперний об'єкт), «S» (shadow, тінь) та «Р» (plane, площина). Ці області характеризуються наступними властивостями.

«О» — зображення об'єкта A . Форма задана проекцією області σ_A , а колір визначається геометрією поверхні та ефектами освітлення — тіннями і відблисками. Оскільки форма поверхні A може бути доволі складною, а прояв ефектів освітлення залежить від невідомого напрямку падіння променів, яскравість пікселів цієї області в загальному випадку будемо вважати випадковою.

«S» — зображення ПС, на яку падає тінь від об'єкта A . Форма визначається геометрією поверхні об'єкта A і невідомим напрямком освітлення. Колір цієї області має бути практично однаковим.

«Р» — зображення ПС, що не знаходиться в тіні об'єкта A . Колір області також має бути практично однаковим.

Для западаючого реперного об'єкта A зображення області Ω_A є більш простим — воно складається тільки з областей «О» та «Р», оскільки тіней на ПС такий об'єкт A не відкидає. На рис. 2 показано розбиття зображення на області для двох прикладів з рис. 1.

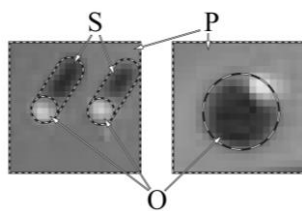


Рис. 2

Межі областей показано пунктирними лініями. Зліва наведено зображення виступаючих об'єктів (двох циліндрів), а справа — западаючого (отвір з різьбою).

Як було визначено, для знаходження точки прив'язки реперного об'єкта A достатньо знайти зображення області σ_A . Оскільки у вихідних даних інформація про об'єкт A надається лише у вигляді області σ_A , то знаходження положення на зображенні може бути виконане лише через співставлення форм — σ_A і області зображення «O».

Для знаходження області «O» можна скористатися тим, що зображення області Ω_A є об'єднанням областей «O», «S» і «P» (для виступаючого об'єкта A) або «O» і «P» (для западаючого об'єкта A). Знаходження форми «O» є тотожним знаходженню форм областей «S» і «P», а ті, в свою чергу, можуть бути знайденими з монотонності кольору.

Таким чином, вирішення поставленої задачі зводиться до послідовності наступних операцій.

1. Знайти на зображенні Ω_A області «S» та «P» за монотонністю кольору.
2. Знайти область «O» як доповнення до областей «S» та «P».
3. Співставити форму знайденої області «O» з формою σ_A .
4. Знайти положення центра мас.

З перелічених операцій нетривіальними є тільки операції 1 і 3, саме вони будуть розглянуті далі. У випадку, якщо розділити області «O» та «S» неможливо, на кроці 3 необхідно співставляти форму σ_A з формою об'єднання областей «O» та «S».

Знаходження зображення реперного об'єкта

Ідея методу знаходження реперного об'єкта на зображенні полягає у заміні задачі розпізнання реперного об'єкта задачею розпізнання оточуючого фону. Мотивація цього проста — зображення реального реперного об'єкта може бути складним внаслідок складної геометрії та ефектів освітлення (тіней, відблисків і т.д.), тоді як зображення фону, що відповідає монотонному зображенню ПС, є більш простим.

На рис. 3 показано гістограми яскравості пікселів зображення, що відповідають істинному положенню западаючого реперного об'єкта (отвір з різьбою; зверху) і пікселів зображення ПС навколо нього (знизу).

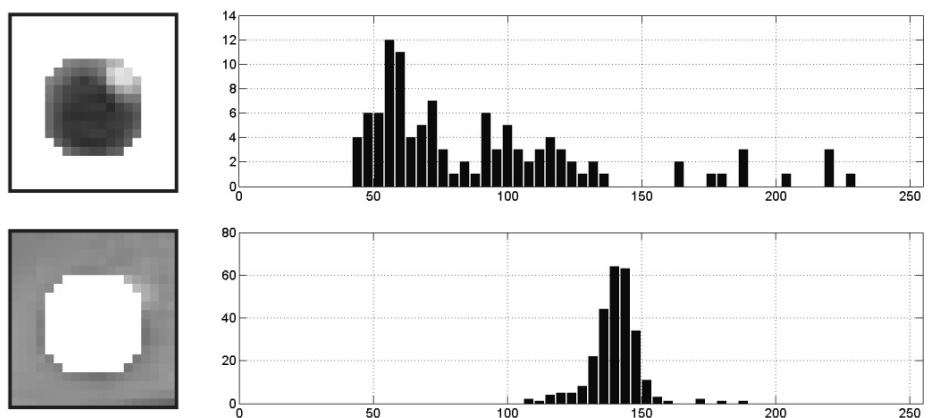


Рис. 3

На рис. 3 яскравість пікселів зображення реперного об'єкта сильно варіюється, а на графіку розподілу яскравості немає чітко вираженого максимуму. Навпаки, яскравість оточуючого фону (зображення ПС) варіюється значно менше і характеризується розподілом, схожим на нормальний. Виходячи з цього, визначимо умови приналежності пікселів до неспотвореного тінями зображення ПС в околі реперного об'єкта, яку будемо використовувати на першому кроці алгоритму для знаходження області «Р».

У випадку западаючого реперного об'єкта A , коли зображення області Ω_A на кадрі I_k не містить області затінення ПС, тобто виконується

$$\text{Im}[\Omega_A^C(p_k)] = O_{A,k} \cup P_{A,k}, \quad (1)$$

де $O_{A,k} = \text{Im}[\sigma_A^C(p_k)]$ — область зображення об'єкта A , а $P_{A,k}$ — область зображення ПС, що не лежить у тіні A , для знаходження множини $P_{A,k}$ можна використати характеристики яскравості незатіненої ПС, обчислені на основі попереднього кадру I_{k-1} .

Твердження 1. При великій частоті зйомки розподіли яскравості пікселів зображення незатіненої ПС на кадрах I_{k-1} та I_k будуть близькими.

За вказаних вище умов, при яких зближення АКА з НКА відбувається практично вздовж нормалі до ПС, справедливості цього твердження очевидна. Яскравість зображення ПС визначається кутами між напрямком освітлення Сонцем, нормаллю до ПС НКА і оптичною віссю камери СТЗ, які за час періоду зйомки змінюються дуже мало.

На основі твердження 1 можна визначити перший загальний принцип знаходження області $P_{A,k}$ для випадку западаючого реперного об'єкта A : на зображенні I_k в області $\text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]$ необхідно знайти таку зв'язну множину пікселів, розподіл яскравості по якій є таким самим, що і для області $\hat{P}_{A,k-1} = \text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k-1})] \setminus \text{Im}[\sigma_A^C(\hat{p}_{k-1})]$ на зображенні I_{k-1} .

Для перевірки того, чи є два емпіричні розподіли (гістограми яскравості) однаковими, необхідно перевірити гіпотезу про те, що обидві виборки взяті з одного розподілу ймовірності. Для цього використовуються статистичні критерії однорідності [7]: непараметричні, що не передбачають будь-якої апріорної інформації про закон розподілу, або параметричні, що базуються на додаткових припущеннях.

Замість порівняння розподілів яскравості можна використати спрощені характеристики, наприклад інтервальну оцінку, що охоплює певну долю пікселів області $\hat{P}_{A,k-1}$. Визначимо

$$(x, y) \in P_A \Rightarrow I(x, y) \in \Lambda_A, \quad (2)$$

де (x, y) — піксель зображення, $P_A \subset \text{Im}[\Omega_A^C(p)]$ — область зображення ПС в околі реперного об'єкта A , що не лежить у його тіні, $I(x, y)$ — яскравість пікселя, $\Lambda_A = [\lambda_A^{\min}, \lambda_A^{\max}]$ — діапазон яскравості зображення незатіненої ПС. Для знаходження оцінки Λ_A необхідно визначити величину хвостів розподілу, що будуть відкидатися.

Окрім розподілу кольору, для виконання розбиття (1) можна використати розміри областей σ_A і Ω_A , які є відомими. Це виявляється можливим завдяки тому, що форма поверхні НКА в околі реперного об'єкта представлена площиною.

Твердження 2. Для камери перспективної проекції відношення площ зображень σ_A та Ω_A дорівнює відношенню площ σ_A та Ω_A , тобто виконується

$$\frac{\|\text{Im}[\sigma_A^C(p)]\|}{\|\text{Im}[\Omega_A^C(p)]\|} = \frac{\|\sigma_A\|}{\|\Omega_A\|}, \quad (3)$$

де знак норми $\|\cdot\|$ позначає площу області.

Справедливість твердження очевидна, оскільки σ_A і Ω_A лежать в одній площині. Внаслідок дискретності цифрових зображень твердження 2 буде виконуватись приблизно.

На основі твердження 2 можна визначити додаткову умову знаходження області P_A для випадку западаючого реперного об'єкта A . Згідно з (3) площа області P_A має визначатися виразом

$$\|P_A\| = \left(1 - \frac{\|\sigma_A\|}{\|\Omega_A\|}\right) \|\text{Im}[\Omega_A^C(p)]\|. \quad (4)$$

Користуючись наведеними міркуваннями, запропонуємо алгоритм знаходження оцінки області $\hat{P}_{A,k}$ для западаючого реперного об'єкта A .

Виконуємо побудову області $\hat{P}_{A,k}$ попіксельно. Включаємо до $\hat{P}_{A,k}$ всі крайові пікселі прогнозованої області $\text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]$ зображення I_k .

Проходимо всі пікселі області $\text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]$ зображення I_k , що межують із вже включеними до $\hat{P}_{A,k}$ пікселями. Для кожного з них перевіряємо, наскільки розподіл яскравості пікселів області $\hat{P}_{A,k}$ разом із цим пікселем відрізняється від розподілу яскравості пікселів області $\hat{P}_{A,k-1}$. Піксель, що забезпечує найбільшу близькість цих розподілів, включається в $\hat{P}_{A,k}$.

Повторюємо пункт 2 доти, доки площа $\hat{P}_{A,k}$ не досягне величини, визначеної виразом (4).

У спрощеному варіанті алгоритму в пункті 2 замість перевірки гіпотези про однаковість розподілів використаємо перевірку на приналежність до інтервалу яскравості $\Lambda_{A,k-1}$ (2), що будемо визначати за областю $\hat{P}_{A,k-1} = \text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k-1})] \setminus \text{Im}[\sigma_A^C(\hat{p}_{k-1})]$ на попередньому кадрі I_{k-1} . Межі цього інтервалу отримуються відкиданням хвостів гістограми яскравості, що означає, що до нього будуть належати не всі пікселі області $\hat{P}_{A,k-1}$. Відповідно, умова приналежності до інтервалу яскравості $\Lambda_{A,k-1}$ буде визначати таку оцінку області «P», яка за площею буде меншою, ніж визначено в (4). Тому для побудови $\hat{P}_{A,k}$ необхідної площі потрібно включити в неї додаткові пікселі, розширюючи, відповідно, інтервал приналежності. Критерієм включення додаткових пікселів до множини $\hat{P}_{A,k}$ можна обрати, наприклад, мінімальність відхилення від середньої яскравості області $\hat{P}_{A,k-1}$, що визначається як

$$e_{A,k-1} = \frac{\int \hat{P}_{A,k-1}(x, y)}{\|\hat{P}_{A,k-1}\|}, \quad (5)$$

або мінімальність відхилення від середньої яскравості поточної множини пікселів області $\hat{P}_{A,k}$.

Запропонований метод попіксельної побудови області $\hat{P}_{A,k}$ не виключає випадку отримання всередині $\hat{P}_{A,k}$ виколотих пікселів, що насправді належать незатіненому зображенню ПС і мають бути включені до $\hat{P}_{A,k}$. Для виправлення цього недоліку необхідно передбачити перевірку на виникнення областей всередині $\hat{P}_{A,k}$, які не відносяться до зображення реперного об'єкта. Цю перевірку необхідно здійснювати при додаванні кожного нового пікселя до $\hat{P}_{A,k}$, після чого включити знайдені області до $\hat{P}_{A,k}$.

На рис. 4 показано етапи побудови області $\hat{P}_{A,k}$ для випадку $I_{k-1} = I_k$. Зліва представлено зображення області $\Omega_{A,k-1}$, на якому задано розбиття на області $\hat{P}_{A,k-1}$ і $\hat{O}_{A,k-1}$. З розподілу яскравості в $\hat{P}_{A,k-1}$ побудовано інтервал $\Lambda_{A,k-1} = [e_{A,k-1} - \delta, e_{A,k-1} + \delta]$, де δ обрано рівним середньоквадратичному відхиленню яскравості пікселів $\hat{P}_{A,k-1}$. Середнє зображення на рис. 4 відповідає включенню в $\hat{P}_{A,k}$ пікселів, що належать $\Lambda_{A,k-1}$. Праве зображення відповідає кінцевому результату, що отримується при досягненні заданої площі $\hat{P}_{A,k}$. Сірим кольором позначено пікселі, що не віднесені до $\hat{P}_{A,k}$.

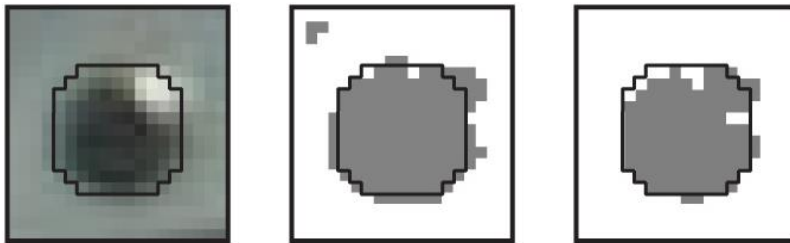


Рис. 4

На рис. 4 показано, що вихідне і отримане розбиття на зображення реперного об'єкта і зображення ПС не співпадають. Це означає, що знайдена за таким алгоритмом область $\hat{O}_{A,k}$ сама по собі не може забезпечити високоточної прив'язки реперного об'єкта, що є зрозумілим з огляду на використання при її побудові лише інтегральних характеристик зображень.

Для оцінювання точки прив'язки реперного об'єкта необхідно доповнити вихідні дані такими, що несуть у собі просторову інформацію. Такі дані є доступними — це форма прогнозованого зображення реперного об'єкта на момент зйомки останнього кадру $\text{Im}[\sigma_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]$. Проблема співставлення знайденої області $\hat{O}_{A,k}$ з прогнозованою формою зображення реперного об'єкта розглядається у наступному розділі.

Розглянемо тепер випадок, коли реперний об'єкт A є виступаючим. У цьому випадку маємо

$$\text{Im}[\Omega_A^C(p_k)] = O_{A,k} \cup S_{A,k} \cup P_{A,k}, \quad (6)$$

де $O_{A,k}$ — область зображення реперного об'єкта, $S_{A,k}$ — область зображення затіненої частини ПС, $P_{A,k}$ — область зображення незатіненої частини ПС. Розглянемо розподіли яскравості пікселів цих областей на прикладі зображення виступаючого реперного об'єкта, наведеного на рис. 2. Гістограми яскравості пікселів по цим областям наведено на рис. 5.

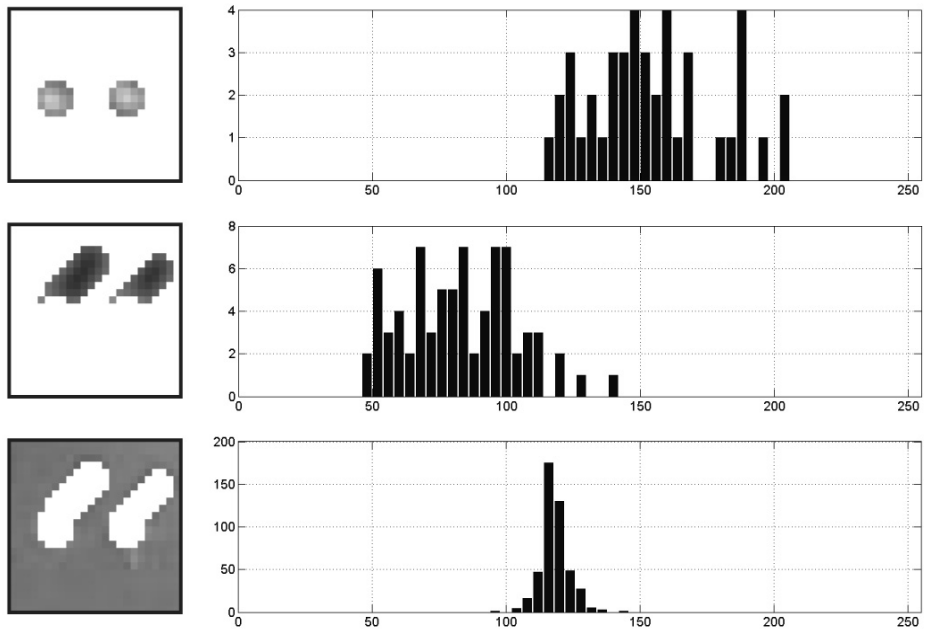


Рис. 5

Як і для западаючого реперного об'єкта, з розподілу яскравості більш-менш точно можна виділити зображення незатіненої ПС — області $\hat{P}_{A,k}$. Згідно з (6) доповнення до неї визначає оцінку множини, що є об'єднанням зображень реперного об'єкта і тіні від нього.

Інтегральні характеристики кольору, що не містять інформації про просторовий розподіл, в загальному випадку недостатні для відокремлення зображення реперного об'єкта від зображення затіненої ПС. На рис. 6 наведено приклад, у якому більш темний колір виступаючого реперного об'єкта практично співпадає з кольором тіні на більш світлій ПС.



Рис. 6

Таким чином, для виступаючого реперного об'єкта A запропонований вище алгоритм побудови $\hat{P}_{A,k}$ зможе забезпечити лише знаходження оцінки $O_{A,k} \cup S_{A,k}$. Знаходження точки прив'язки для виступаючого реперного об'єкта, так само як і для западаючого, буде проводитись з використанням інформації про форму області $\text{Im}[\sigma_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]$, але вже у більш складному варіанті.

При застосуванні запропонованого алгоритму попіксельної побудови множини $\hat{P}_{A,k}$ для виступаючого реперного об'єкта A цільова площа $\hat{P}_{A,k}$ не може визначитися рівнянням (4), оскільки невідомою є площа тіні $\hat{S}_{A,k}$ — вона залежить від положення Сонця відносно ПС НКА і може змінюватися у часі. Але у разі повільного власного обертального руху НКА, що є необхідною умовою для забезпечення можливості стикування з ним, площа тіні від реперного об'єкта на ПС також змінюється повільно. Тому для останову алгоритму побудови $\hat{P}_{A,k}$ можна використати умову рівності площ множин $\hat{P}_{A,k}$ і $\hat{P}_{A,k-1}$. У такому випадку для компенсації розбіжності між площею області P_A та площею оцінки $\hat{P}_{A,k}$, що накопичується від одного кадру до іншого, необхідно час від часу проводити переоцінку області $\hat{P}_{A,k}$, наприклад, на основі апостеріорної оцінки області зображення реперного об'єкта $\text{Im}[\sigma_A^C(\hat{p}_k)]$.

На рис. 7 показано результат побудови області $\hat{P}_{A,k}$ для виступаючого реперного об'єкта у випадку $I_{k-1} = I_k$. Зліва приведено зображення області $\Omega_{A,k-1}$, на якому задано розбиття на множини $\hat{O}_{A,k-1} \cup \hat{S}_{A,k-1}$ та $\hat{P}_{A,k-1}$. По центру приведено проміжний результат попіксельної побудови $\hat{P}_{A,k}$, що включає всі пікселі, яскравість яких лежить в інтервалі $\Lambda_{A,k-1} = [e_{A,k-1} - \delta, e_{A,k-1} + \delta]$, де $e_{A,k-1}$ — середня яскравість (5), а δ — середньоквадратичне відхилення яскравості в області $\hat{P}_{A,k-1}$. Справа наведено кінцевий результат, що відповідає збереженню площі $\hat{P}_{A,k}$.

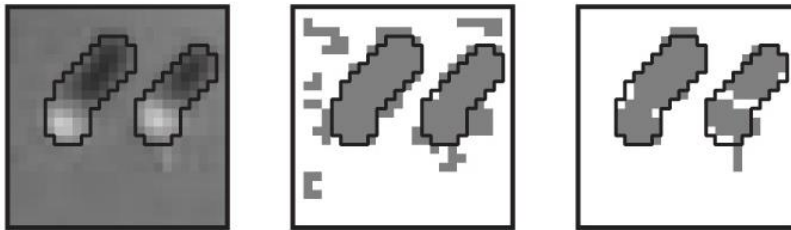


Рис. 7

Як показано на рис. 7, запропонований алгоритм дає майже такий самий результат, як і у випадку западаючого об'єкта.

Знаходження точки прив'язки реперного об'єкта

При вирішенні задачі розпізнання пікселів незатіненого зображення ПС вдалося обмежитися використанням тільки статистичних характеристик яскравості пікселів, що дозволило побудувати дуже простий алгоритм знаходження множини $\hat{P}_{A,k}$. Ці статистичні характеристики не несуть у собі інформації про просторовий

розподіл яскравості пікселів, і, відповідно, інформація щодо форми області $\hat{P}_{A,k}$ виявилася незадіяною. У даному розділі розглядається можливість її використання для знаходження координат точок прив'язки реперних об'єктів.

У випадку западаючого реперного об'єкта знаходження області $\hat{P}_{A,k}$ означає також автоматичне знаходження області $\hat{O}_{A,k}$ — розпізнаної області зображення реперного об'єкта. Як було показано вище, область $\hat{O}_{A,k}$ може не співпадати з областю $\text{Im}[\sigma_A^C(p_k)]$, що відповідає істинному зображенню реперного об'єкта. У такому випадку знаходження точки прив'язки реперного об'єкта на зображенні I_k як центру мас $\hat{O}_{A,k}$ буде давати оцінку з похибкою.

Виходячи з алгоритму побудови області $\hat{P}_{A,k}$ можна очікувати, що області $\hat{O}_{A,k}$ та $\text{Im}[\sigma_A^C(p_k)]$ будуть розрізнятися лише у окремих пікселях, розташованих біля границь $\hat{O}_{A,k}$, як показано на рис. 4. Тоді для уточнення області $\hat{O}_{A,k}$ необхідно провести корекцію її форми, приводячи її до форми області $\text{Im}[\sigma_A^C(p_k)]$.

Оскільки вектор істинного відносного положення й орієнтації p_k є невідомим, область $\text{Im}[\sigma_A^C(p_k)]$ також є невідомою. Однак за постановкою задачі відомою є прогнозована оцінка $\hat{p}_{k|k-1}$, що визначає прогнозовану область зображення реперного об'єкта $\text{Im}[\sigma_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]$. Виходячи з близькості оцінки $\hat{p}_{k|k-1}$ до істинного p_k можна вважати, що область $\text{Im}[\sigma_A^C(p_k)]$ практично співпадає по формі з областю $\text{Im}[\sigma_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]$ і отримується з неї плоским переносом, поворотом на малий кут і масштабуванням з коефіцієнтом, близьким до 1.

Зовнішній контур області будемо представляти у вигляді об'єднання всіх граничних пікселів, впорядкованих у напрямку обходу, наприклад, за годинниковою стрілкою:

$$\bigcup_{i=1}^N a_i,$$

де a_i — координати n -го пікселя контуру, N — довжина контуру. Позначимо операцію взяття зовнішнього контуру області функцією Γ . Визначимо контур прогнозованого положення зображення реперного об'єкта A

$$\hat{C}_A = \Gamma(\text{Im}[\sigma_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]) \quad (7)$$

і зовнішній контур розпізнаного зображення западаючого реперного об'єкта A

$$\tilde{C}_A = \Gamma(\hat{O}_{A,k}). \quad (8)$$

Щоб знайти положення точки прив'язки реперного об'єкта на зображенні, необхідно визначити величини переміщення, масштабування та повороту прогнозованого контуру \hat{C}_A (7) для суміщення його з отриманим контуром \tilde{C}_A (8), а потім знайти положення його центру мас.

У випадку виступаючого реперного об'єкта область $\hat{P}_{A,k}$ визначає об'єднання областей зображення реперного об'єкта та тіні від нього. У такому випадку границя цієї області буде визначена як

$$\tilde{C}_A = \Gamma(\text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k|k-1})] \setminus \hat{P}_{A,k}). \quad (9)$$

Оскільки єдиним джерелом освітлення поверхні НКА є Сонце, тінь від виступаючого реперного об'єкта буде знаходитись з однієї сторони від зображення об'єкта. З протилежної від тіні сторони границя області $\text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k|k-1})] \setminus \hat{P}_{A,k}$ буде співпадати з границею області $\hat{O}_{A,k}$ — зображенням реперного об'єкта. Тоді для знаходження точки прив'язки реперного об'єкта можна використати аналогічну операцію — співставлення ділянки масштабованого і повернутого контуру \hat{C}_A з ділянкою контуру \tilde{C}_A (9).

На рис. 8 схематично показано ідеалізовані вихідні дані задачі. Пунктиром показано прогнозований контур круглого реперного об'єкта A , а неперервною лінією — знайдений контур. На лівому зображенні показано випадок западаючого реперного об'єкта, на правому — виступаючого реперного об'єкта (з тінню). Точне значення центру реперного об'єкта позначено хрестиком.

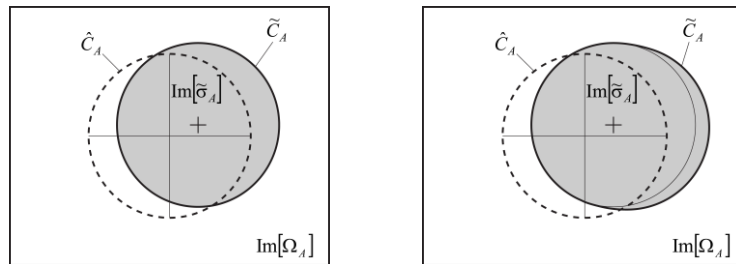


Рис. 8

Для западаючого реперного об'єкта форми контурів \tilde{C}_A і \hat{C}_A будуть схожими між собою, тому для порівняння контурів недоцільно використовувати методи Ну чи розкладання в ряд Фур'є [8].

Також, оскільки контур \tilde{C}_A може бути спотворений (відносно істинного \hat{C}_A) в окремих пікселях або навіть у значній своїй частині (у випадку наявності тіні від виступаючого реперного об'єкта), для встановлення міри його співпадіння з контуром \hat{C}_A будемо використовувати такий критерій, що не вимагає близькості для всіх точок контуру \tilde{C}_A .

У загальному випадку для співставлення контуру \hat{C}_A з \tilde{C}_A будемо зміщувати, повертати та масштабувати \hat{C}_A на площині зображення так, щоб максимізувати кількість пікселів контуру \tilde{C}_A , що лежать у $\Delta\hat{C}_A$ — деякому околі контуру \hat{C}_A . Таким чином, задача співставлення контурів зводиться до співставлення фактичного контуру \tilde{C}_A з розширенням прогнозованого контуру \hat{C}_A , що дозволяє:

- нівелювати викиди, що отримуються при знаходженні області $\hat{P}_{A,k}$;
- для деяких форм реперного об'єкта, наприклад близьких до круглих, відмовитись від необхідності масштабування, оскільки розширення буде включати в себе вихідний контур, масштабований у певному діапазоні значень;
- регулювати точність співставлення контурів по величині розширення.

На рис. 9 показано результат розширення контуру \hat{C}_A на один піксель.

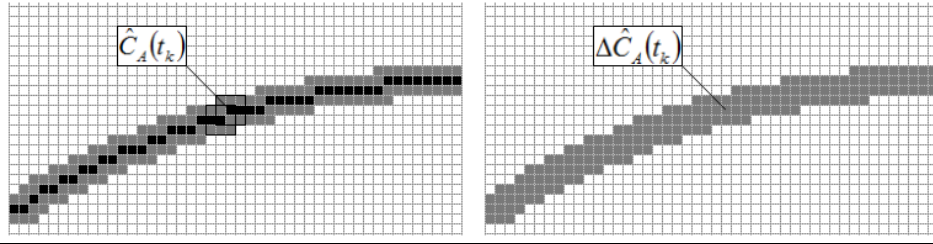


Рис. 9

Розглянемо функцію

$$F(x, y, \alpha, \beta, \delta) = \sum_{i=1}^N I_X(a_i), X = \Delta \hat{C}_{A,\delta}(x, y, \alpha, \beta), \quad (10)$$

де $I_X(\cdot)$ — індикаторна функція, $\Delta \hat{C}_{A,\delta}(x, y, \alpha, \beta)$ — множина пікселів δ -околу контуру \hat{C}_A , зміщеного на вектор $(x, y)^T$, повернутого на кут α і збільшеного у β разів, a_i — точки контуру \tilde{C}_A , N — довжина контуру \tilde{C}_A . Координати пікселів контуру, що отримуються при повороті, масштабуванні і переміщенні контуру \hat{C}_A , будуть визначатись як

$$\tilde{a}'_i = \begin{pmatrix} \beta & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_i - \bar{x} \\ \hat{y}_i - \bar{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix},$$

де $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)^T$ — координати i -го пікселя контуру \hat{C}_A , а $(\bar{x}, \bar{y})^T$ — центр мас прогнозованої області зображення реперного об'єкта. Позначимо як $M(\cdot)$ операцію знаходження центру мас. Тоді

$$(\bar{x}, \bar{y})^T = M(\text{Im}[\Omega_A^C(\hat{p}_{k|k-1})]).$$

Співставлення розпізнаного контуру \tilde{C}_A та прогнозного контуру \hat{C}_A буде відповідати максимуму функції (10)

$$F(x, y, \alpha, \beta, \delta) \xrightarrow{x, y, \alpha, \beta} \max \quad (11)$$

при фіксованому значенні величини розширення δ . Знаходження з критерію (11) оптимальних значень x^* та y^* дає оцінку положення точки прив'язки реперного об'єкта на зображенні:

$$(\bar{x} + x^*, \bar{y} + y^*)^T. \quad (12)$$

Оскільки камера СТЗ є відкаліброваною, знайдене значення (12) визначає промінь у просторі, на якому лежить точка прив'язки реперного об'єкта A . Із групи рівнянь променів, обчислених для всіх видимих реперних об'єктів, для деяких із методів розв'язку задачі PnP [9, 10] знаходяться відносно положення й орієнтація СК НКА відносно СК СТЗ, що дає апостеріорну оцінку вектора параметрів \hat{p}_k . На основі цієї й попередніх апостеріорних оцінок положення й орієнтації, з використанням моделі динаміки взаємного руху пари тіл у просторі, отримується прогноз на наступний такт $\hat{p}_{k+1|k}$.

Слід зазначити, що критерій (11) може давати більше одного розв'язку. Наприклад, у випадку виступаючого реперного об'єкта критерій не розрізняє між собою границю з областю зображення об'єкта і границю з областю тіні. Це може привести до появи пари розв'язків: один буде побудовано по границі зображення реперного об'єкта, а інший — по границі тіні реперного об'єкта на ПС. Приклад отримання двох розв'язків (11) представлено на рис. 10.

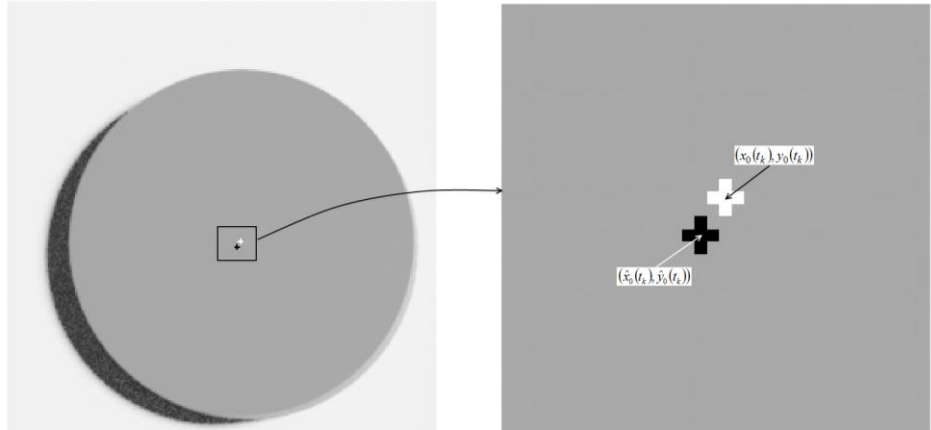


Рис. 10

Для розпізнавання фіктивних розв'язків можуть бути застосовані додаткові критерії відбору, наприклад за відстанню до прогнозованого положення зображення реперного об'єкта або за сумісністю отримуваної задачі PnP.

Висновок

Запропонований у роботі підхід до вирішення задачі супроводження елементів поверхні НКА системою технічного зору на кінцевому етапі зближення дозволяє використовувати в якості реперних елементів невеликі за розміром плоскі або об'ємні елементи конструкції, що розміщуються на плоских однорідних ділянках поверхонь. Для такого класу реперних об'єктів знаходження точкових оцінок положення реалізовано в два етапи, що дозволяє використати окремо інформацію, що міститься в кольорі зображення (інформативні характеристики на основі інтегрального розподілу яскравості), і інформацію, що міститься у геометрії поверхні (форма зображення реперного об'єкта). Таке розбиття дозволило побудувати обґрунтований алгоритм вирішення задачі на базі доволі простих операцій і процедур.

S. Melnychuk, V. Shevchenko

OPERATION OF THE COMPUTER VISION SYSTEM ON THE SPACECRAFT SURFACE ELEMENTS WITH ITS PARTIAL VISIBILITY

Serhii Melnychuk

Institute of Space Research of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine,
sergvik@ukr.net

Volodymyr Shevchenko

Institute of Space Research of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine,
vovan_16@ukr.net

The problem of tracking reference objects by a computer vision system designed to estimate the relative position and attitude of uncooperative spacecraft at short distances is considered. This vision system is an integral part of the onboard control sys-

tem for autonomous rendezvous and docking in space. The problem under consideration arises when determining the initial data for the well-known PnP problem, in which the position and orientation of a body in space is determined by the images of control points, obtained by a perspective projection camera. The position of the control points relative to the coordinate system of the target body must be known. Since the target body is an abstract uncooperative spacecraft, only obvious visible inhomogeneities of its surface can be used to determine the control points. Therefore, the problem arises — how to choose control points so that they are tied to the surface of the body, and could be found with high accuracy in images under different external shooting conditions. One of the possible solutions is to use for binding small-sized structural elements of an uncooperative spacecraft, which are most likely present on its surface. Then the control point is bound to the known shape of the surface of the corresponding element, and its position on the image is determined through pattern recognition. This article discusses the case of using computer vision with a monocular camera. We consider operation at close distances, when only a part of the docking side of the target spacecraft is in the camera's field of view. Elements placed on its surface are used as reference objects. A method is proposed for finding the positions of control points on images for a certain class of reference objects during periodic shooting.

Keywords: computer vision system, uncooperative spacecraft, autonomous rendezvous, pose determination, image processing.

1. Shi J.-F., Ulrich S., Ruel S., Anctil M. Uncooperative spacecraft pose estimation using an infrared camera during proximity operations. *AIAA Space 2015 Conference and Exposition*. Issue AIAA 2015-4429. 17 p. DOI: 10.2514/6.2015-4429.
2. Shijie Z., Fenghua L., Xibin C., Liang H. Monocular vision-based two-stage iterative algorithm for relative position and attitude estimation of docking spacecraft. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2010. **23**, I. 2. P. 204–210. DOI: 10.1016/S1000-9361(09)60206-5.
3. Gubarev V.F., Vasylyev V.V., Volosov V.V., Maksymyuk L.V., Melnychuk S.V., Salnikov N.N., Shevchenko V.N., Godunok L.A., Derkach S.V. Computer vision system for spacecraft relative pose determination during rendezvous and docking. *Space Research in Ukraine*. Report to CO-SPAR. 2018–2020 / Ed. O. Fedorov. Kyiv : Akadempriodyka, 2021. P. 127–132.
4. Gubarev V.F., Volosov V.V., Salnikov N.N., Shevchenko V.N., Melnychuk S.V., Maksymyuk L.V. Computer Vision system for spacecraft relative pose determination during rendezvous and docking. *Science and innovations*. 2021. **17**, N 2. P. 50–63.
5. Губарев В.Ф., Боюн В.П., Мельничук С.В., Сальников Н.Н. Использование систем технического зрения для определения параметров относительного движения космических аппаратов. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2016. № 6. С. 103–119.
6. Gubarev V.F., Salnikov N.N., Melnychuk S.V. Ellipsoidal pose estimation of an uncooperative spacecraft from video image data. *Control Systems: Theory and Applications*. River Publishers Series in Automation, Control and Robotics, 2018. P. 169–195.
7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
8. Казбеков А.В., Максимов Н.А. Методы сравнения контуров в задачах распознавания образов. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2012. № 185. С. 37–42.
9. Youyang F., Qing W., Yuan Y., Chao Y. Robust improvement solution to perspective-n-point problem. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. **16**, N 6. DOI: 10.1177/1729881419885700.
10. Terzakis G., Lourakis M. A consistently fast and globally optimal solution to the perspective-n-point problem. In: Vedaldi, A., Bischof, H., Brox, T., Frahm, JM. (eds). *Computer Vision — ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science*. **12346**. P. 478–494. DOI: 10.1007/978-3-030-58452-8_28.

Отримано 31.05.2022