УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2024.03.035

О. А. ФОКОВ

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТА ОРБІТАЛЬНОГО СЕРВІСУ З НЕВІДОМОЮ ФОРМОЮ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, м. Дніпро, 49005, Україна; e-mail: oafokov@ukr.net

Розроблено метод визначення просторового положення об'єкта орбітального сервісу (цілі) з невідомою формою поверхні, оснований на обробці хмар точок поверхні цілі. Припускається, що хмара точок отримана за допомогою встановленого на сервісному космічному апараті датчика у вигляді системи на основі лідар. Алгоритм реалізації методу оперує зі спрощеним описом хмари, використовує тільки координати точок хмари без виявлення ознак поверхні. Ідея методу вирішення задачі визначення просторового положення пояснюється наступним. Зі всіх точок хмари, отриманих на певний момент часу, обираються точки, що певною мірою близькі до заданої сукупністю площин, розташованих у просторі певним чином. З хмари точок, що відповідає наступному моменту часу, обираються точки, що– близькі до тієї ж сукупності площин, але відомим чином переміщеної у просторі. Розташування проєкцій відібраних точок хмар на задані площини умовно назвемо картиною перетину хмар точок з площинами. Змінюючи переміщення сукупності площин намагаємось досягти найбільшого збігу картин перетину першої та другої хмар точок. Міра збігу картин перетину характеризується запропонованою цільовою функцією, аргументи якої є параметрами зміни просторового положення цілі. Параметри переміщення цілі визначаються як аргументи цільової функції, що надають їй максимальне можливе значення. Запропоновано варіант формулювання цільової функції. Розглянуто тестовий приклад застосування запропонованого методу. Для пошуку аргументів цільової функції був використаний метод глобальної оптимізації, відомий як метод прямого пошуку. Проведені тестові розрахунки підтвердили працездатність алгоритму та виявили межі його застосування. Питання оцінювання обчислювальних витрат не розглядалося, перевірялася працездатність запропонованого методу визначення просторового положення у принципі. Перевагою методу є його здатність визначати зміну просторового положення об'єкта зі заздалегідь невідомою формою поверхні. Запропонований метод визначення параметрів зміни відносного просторового положення цілі може розглядатися як постачальник даних спостереження для процедури фільтрації при оцінюванні параметрів відносного руху цілі з невідомою формою поверхні.

Ключові слова: *визначення відносного просторового положення, орбітальний сервіс, об'єкт сервісу з невідомою формою, хмари точок, цільова функція.*

This paper presents a method for determining the pose of an on-orbit service object (target) with an unknown surface shape based on processing target surface point clouds. It is assumed that a point cloud is obtained using a sensor in the form of a lidar-based system onboard the service spacecraft. The algorithm of the method operates with a simplified description of the cloud; it uses only the coordinates of the cloud points without identifying any surface features. The idea of the method is as follows. From all cloud points obtained at a certain time instant, select points that are close to a certain degree to a given set of planes arranged in space in a certain way. From the point cloud corresponding to the next time instant, select points that are close to the same set of planes, but moved in space in a known way. By convention, let the arrangement of the projections of the selected cloud points onto the given planes be called a pattern of the intersection of the point clouds with the planes. By varying the displacement of the set of planes, maximize the coincidence of the intersection patterns of the first and second clouds of points. The degree of coincidence of the intersection patterns is characterized by a specified objective function whose arguments are target pose parameters. The target displacement parameters are found as the arguments of the objective function that maximize it. A variant of the objective function is proposed. A test example of the application of the proposed method is considered. A global optimization method known as the direct search method was used to find the arguments of the objective function. Test calculations were performed, and they confirmed the workability of the algorithm and determined its scope of applicability. The computational burden was not considered: the goal was to verify the workability of the method in principle. The advantage of the proposed method is its ability to determine a change in the pose of an object with an unknown surface shape. The proposed method may be considered as a source of observation data for a filtering procedure when estimating the parameters of the relative motion of a target with an unknown surface shape.

Keywords: *relative pose determination, on-orbit service, service object with an unknown shape, point clouds, objective function.*

Вступ. Аналіз стану дослідження проблеми визначення просторового положення об'єкта орбітального сервісу (цілі) відносно сервісного космічного апарата підтверджує висновок [1], що класичним підходом залишається підхід на основі моно- та стереобачення завдяки перевагам малої ваги та низького споживання енергії. Детальний огляд надійності та застосовності побудованих на основі монокуляра сучасних систем оцінки просторового положення некооперативної цілі надано в роботі [2]. Найпоширеніші методи визначення просторового положення, які реалізовані на основі цього підходу, спираються на виділення ознак поверхні цілі на основі її зображень та на подальшому встановленні відповідності виділених ознак і ознак моделі відомої форми поверхні цілі. У якості ознак можуть виступати такі особливості геометрії поверхні, як кути, характерні лінії, плоскі грані, контур цілі тощо.

Ще одним основним підходом згідно з [1] є навігація на основі датчиків лідар. Стосовно цього підходу поширеними також є методи розпізнавання та встановлення відповідності ознак на основі отриманих лідаром хмар точок поверхні цілі. Тут у якості ознак використовують такі поняття як сусідство, щільність, кривизна хмари точок, зміна кута нормалі поверхні [3]. Також як ознаки використовують відому геометрію елементів конструкції цілі. Наприклад у статті [4] передбачається наявність на цілі сопел двигуна (зріз сопла – коло) та прямокутного корпусу цілі. Як альтернативу алгоритмам визначення відносного просторового положення некооперативної цілі на основі моделі, заснованим на виявленні та зіставленні ознак, в [5] запропонована процедура обробки тривимірних хмар точок, яка не містить трудомістких етапів виділення ознак. Джерелом хмар точок поверхні цілі можуть бути системи на основі лідар або системи стереобачення. Перевага віддається системам на основі лідар завдяки їх надійності при змінних умовах освітлення, характерних для космічного середовища.

Стосовно придатності методів, що основані на використанні відомої моделі цілі, на випадок відсутності моделі, можна створювати її під час виконання сервісної місії шляхом зйомки серії зображень цілі, потім застосовувати «модельні» методи. Але, як зазначено у [6], 3D природа даних хмари точок лідара є сприятливою для оцінки положення цілі без наявності її моделі. В цьому контексті для отримання хмари точок доцільно розглядати застосування таких лідарів, що за технологією побудови відносяться до групи датчиків на основі використання матриць детекторів, на зображення яких нема помітного розмиття від руху цілі [7].

У даній статті запропоновано статичний, за категорією підходів щодо визначення просторового положення цілі [8], метод визначення зміни просторового положення цілі зі заздалегідь невідомою формою на основі обробки хмари точок поверхні цілі, який реалізує сприятливість 3D природи даних хмари точок лідара для оцінки положення цілі без наявності її моделі. Метод не використовує ознак поверхні цілі. Запропонований метод може розглядатися як постачальник даних для процедури оцінювання параметрів просторового руху цілі.

Постановка задачі. Вважаємо, що нам надано хмари точок поверхні цілі. Кожна хмара відповідає певному часу вимірювань, які виконуються датчиком у вигляді системи на основі лідар – постачальником даних хмари точок. Тобто маємо координати точок поверхні цілі в системі координат датчика, незмінної та/або відомим образом розташованої, відносно сервісного космічного апарата. Форма поверхні об’єкта сервісного обслуговування (цілі) є невідомою. Задача полягає у визначенні зміни відносного просторового положення (розташування та орієнтації) цілі за час, визначений суміжними моментами вимірювання. Мета вирішення задачі полягає у подальшій побудові фільтру, що оцінює параметри відносного руху цілі з невідомою формою, а визначені параметри зміни відносного просторового положення цілі розглядатимуться як дані спостереження для процедури фільтрації. Дані обробки хмар точок можуть бути використані для визначення форми цілі, але тут це питання не розглядається.

При вирішенні задачі припускаються прийнятними наступні припущення:

– форма цілі не має сферичної симетрії. Це обмеження є суттєвим, але завжди виконується на практиці, оскільки об'єкти сервісного обслуговування зазвичай мають периферійні елементи, розташування яких призводить до порушення симетрії об'єкта в цілому;

– під час вимірювань ціль повністю, або принаймні, більшою частиною знаходиться в полі зору датчика;

– за час між суміжними вимірюваннями ціль не змінює радикально своє просторове положення. Мається на увазі, що ціль не повертається більш ніж на кут, при якому суттєво змінюється зображення частини поверхні цілі, що попадає у поле зору датчика. Значення цього кута може бути визначено в процесі застосування процедури визначення просторового положення цілі;

– за час вимірювань не враховується орбітальний рух. Це обмеження може бути суттєвим при побудові фільтру з оцінювання параметрів відносного руху цілі, але на етапі вирішення поставленої задачі цілком прийнятне.

Ідея методу вирішення задачі пояснюється таким. Введемо у розгляд деяку сукупність площин певним чином розташованих у просторі відносного космічного апарата.

Якби в результаті вимірювань була отримана форма поверхні цілі у вигляді рівняння поверхні, було б можливим визначити лінії перетину поверхні цілі введеними площинами, і далі оперувати зміною цих ліній відповідно до зміни розташування цілі. В даному разі в результаті вимірювань отримують форму поверхні цілі апроксимовану хмарою точок. Враховуючи дискретність хмари точок, замість ліній перетину будемо оперувати сукупністю точок хмари певною мірою близьких до заданих площин. Розташування проєкцій близьких до площин точок хмари на ці площини умовно назвемо картиною перетину хмари точок з площинами. А площини будемо називати площинами перетину.

Тоді алгоритм визначення зміни відносного просторового положення цілі опишемо таким чином:

1. Зі всіх точок хмари, отриманих на певний момент часу, назвемо його попереднім, обираються точки, що за певною мірою близькі до площин перетину. Визначаємо картини перетинів хмар точок з цими площинами. З заданою сукупністю площин перетину пов'яжемо систему координат, яку позначимо як СКп.

2. Отримуємо нову хмару точок, що відповідає поточному моменту часу, поточному просторовому положенню цілі. Вводимо систему координат СКv, розташування якої відомим чином змінено відносно СКп.

3. Вводимо сукупність площин, що розташована відносно заданої сукупності площин таким же чином, як і система координат СКv відносно СКп. Нова сукупність площин пов'язана з системою СКv так само, як задана сукупність пов'язана з системою СКп. Нову сукупність площин можна розглядати як задану сукупність площин, але зі зміненим розташуванням.

4. З нової хмари точок обираються точки, що певною мірою близькі до площин перетину, пов'язаних з системою СКv. Визначаємо картини перетинів нової хмари точок з цими площинами.

5. Якщо «картинки» перетинів попередньої хмари з пов'язаними с СКn площинами та перетинів поточної хмари з пов'язаними с СКv площинами за певним критерієм близькі одна до одної, фіксуємо розташування СКv і переходимо до пункту 7.

6. Змінюємо розташування системи координат СКv і відповідно пов'язаних з нею площин перетину, переходимо до пункту 4.

7. Відносне положення систем координат СКv і СКn відповідає зміні положення цілі відносно космічного апарата.

Введемо такі системи координат та позначення:

– система координат $O_c x_c y_c z_c$ камери датчика (СКс). Вважаємо, що СКс жорстко пов'язана з сервісним апаратом, початок системи та її осі певним чином прив'язані до датчика;

– $g_i = (x_i\ y_i\ z_i)^T$ – вектор координат *i*-тої точки попередньої хмари у системі $O_c x_c y_c z_c$, $i = 1..N$, N – кількість точок хмари;

– система координат $O_t x_t y_t z_t$ цілі;

– система координат $O_n x_n y_n z_n$ (СКn) пов'язана з заданою сукупністю площин перетину. Варіант завдання розташування СКn та площин перетину описаний нижче;

– система координат $O_\nu x_\nu y_\nu z_\nu$ (СКv) пов'язана з новою сукупністю площин перетину;

– G_n^c, G_ν^n, G_ν^c, – матриці переходу від СКn до СКс, від СКv до СКn, від СКv до СКс відповідно;

– $t_{cn}, t_{n\nu}, t_{c\nu}$ – вектори між початками систем координат O_c і O_n, O_n і O_ν, O_c і O_ν відповідно.

Якщо вважати, що деяка точка, у якості якої будемо розглядати початок O_n системи СКn, жорстко пов'язана с ціллю, тоді просторове положення цілі на даний момент можна описати вектором $t_{\text{cn}} = r_{\text{On}}$, де r_{On} – радіус-вектор положення цієї точки в $O_c x_c y_c z_c$, та матрицею G_n^c переходу від системи координат $O_n x_n y_n z_n$ до системи координат $O_c x_c y_c z_c$. Для знаходження нового розташування цілі, що описується матрицею переходу $G_{\nu*}^c$ та вектором переміщення $t_{c\nu*}$, необхідно знайти матрицю $G_{\nu*}^n$ переходу від СКv* до СКn і вектор $t_{n\nu*}^n$ переміщення:

$$G_{\nu*}^{\text{c}} = G_{\text{n}}^{\text{c}} \cdot G_{\nu*}^{\text{n}}, \quad t_{\text{c}\nu*}^{\text{c}} = G_{\text{n}}^{\text{c}} \cdot t_{\text{n}\nu*}^{\text{n}} + r_{\text{On}}^{c},$$

де індекс v* відповідає шуканому розташуванню СКv, а верхній індекс векторів-стовпців відповідає системі координат, в якій вони визначені.

Поворот системи СКv відносно системи СКn будемо описувати трьома кутами Тейта–Брайтона – тангажа ϑ (вісь y), крену φ (вісь x), рискання ψ (вісь z). Компоненти вектора переміщення $t_{n\nu}^n$ позначимо x, y, z. Тоді

$$G_{\nu}^{n}=\begin{bmatrix}\sin\vartheta\sin\varphi\sin\psi+\cos\vartheta\cos\psi & \sin\vartheta\sin\varphi\cos\psi-\cos\vartheta\sin\psi & \sin\vartheta\cos\varphi\\ \cos\varphi\sin\psi & \cos\varphi\cos\psi & -\sin\varphi\\ \cos\vartheta\sin\varphi\sin\psi-\sin\vartheta\cos\psi & \cos\vartheta\sin\varphi\cos\psi+\sin\vartheta\sin\psi & \cos\vartheta\cos\varphi\end{bmatrix},$$

$t_{n\nu}^{n}=(x\;y\;z)^{T}$.

Будемо шукати значення $\vartheta^*,\varphi^*,\psi^*,x^*,y^*,z^*$ величин $\vartheta,\varphi,\psi,x,y,z$, розглядаючи останні як аргументи деякої цільової функції f , які надають максимуму цій функції, коли картини перетину попередньої хмари заданою сукупністю площин максимально наближені до картин перетину нової хмари поверненою та переміщеною сукупністю площин, тобто

$$\{\vartheta^*,\varphi^*,\psi^*,x^*,y^*,z^*\}=\operatorname{argmax} f(\vartheta,\varphi,\psi,x,y,z).$$

Побудова площин перетину. Сукупність площин перетину, згаданих у наведеному вище алгоритму визначення зміни відносного просторового положення цілі, може бути задана деяким певним чином. Для визначеності будемо розглядати три площини, що утворюються парами координатних осей системи СКn: площини $O_n y_n z_n$, $O_n z_n x_n$, $O_n x_n y_n$. Відповідно, будемо розглядати три 2D системи координат площин. Для вибору розташування системи СКn, скористуємось таким міркуванням. Якщо розглядати координати радіус-векторів точок хмари як багатовимірну випадкову величину, то для опису розкиду точок хмари навколо їх геометричного центра можна скористатися поняттям матриці коваріації (для нашого випадку – аналогом матриці інерції системи точок, за умови, що точкам хмари приписані однакові маси). Врахуємо, що напрямок максимальної дисперсії збігається з власним вектором матриці коваріації, який відповідає максимальному власному значенню. Тоді доцільно скористатися сингулярним розкладом матриці інерції хмари точок. Геометричний центр $g_c=(x_c\;y_c\;z_c)^T$ хмари точок у системі $O_c x_c y_c z_c$ визначається як

$$g_c=\sum g_i/N .$$

Матриця інерції

$$J=\begin{bmatrix}J_{xx} & J_{xy} & J_{xz}\\ J_{yx} & J_{yy} & J_{yz}\\ J_{zx} & J_{yz} & J_{zz}\end{bmatrix},\quad J_{\alpha\alpha}=\sum_i(\beta_i-\beta_c)^2+(\gamma_i-\gamma_c)^2 ,$$

$$J_{\alpha\beta}=J_{\beta\alpha}=-\sum_i(\alpha_i-\alpha_c)\cdot(\beta_i-\beta_c),$$

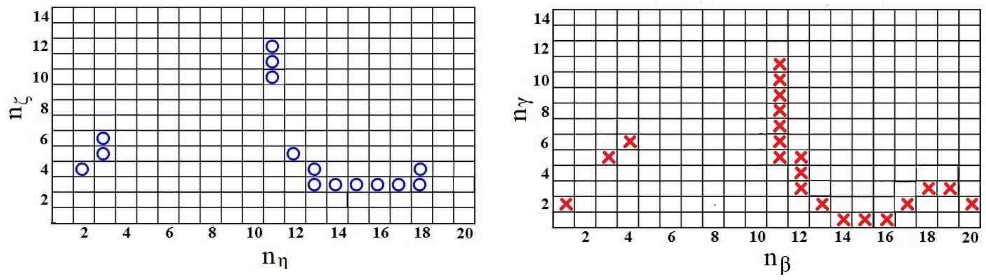
де α,β,γ – можливі парні перестановки символів x,y,z .

Виконаємо сингулярний розклад матриці $J=U\cdot D\cdot U^T$, де U – унітарна матриця, D – матриця з діагональними елементами, розташованими у порядку спадання. Розташуємо точку O_n початку СКn у геометричному центрі $r_{On}^{c}=g_c$ точок хмари, будемо вважати, що координатні осі СКn задаються векторами нормалей $\mathbf{n}_1,\mathbf{n}_2,\mathbf{n}_3$, що відповідають стовпцям матриці U , $G_{\mathrm{n}}^{\mathrm{c}}=[\mathbf{n}_1\quad \mathbf{n}_2\quad \mathbf{n}_3]$.

Відбір точок хмари та побудова «картинок» перетину. Враховуючи дискретність хмари точок, визначаються точки певною мірою близькі до заданих площин. Міра близькості d залежить від параметрів датчика і визначається похибками вимірювання координат точок хмари. Площинам $O_n y_n z_n$, $O_n z_n x_n$, $O_n x_n y_n$ можна поставити у відповідність три 2D системи координат площин. Для подальшого викладення зручніше позначити ці системи координат як $O_n \eta_j \zeta_j$, де j – номер площини ($j = 1,2,3$). Отже відповідно до j-тої площини з нормаллю n_j відбираються точки хмари, які задовольняють нерівностям $\left|(n_j)^T \cdot (g_i - g_c)\right| < d$.

Під картиною перетину певної площини розуміємо сукупність проєкцій відібраних точок на цю площину, тобто сукупність пар 2D координат у системі координат площини. Вважаємо, що для j-тої площини відібрані точки хмари та відповідні їм пари координат η_{lk_l} та ζ_{lk_l}, $\mathrm{k}_j = 1,2,\ldots,\mathrm{K}_j$, k_j – номер точки, K_j – кількість відібраних точок. Для спрощення викладу далі за можливістю не будемо показувати нижні індекси j, що позначають номер площини. Враховуючи дискретність матриці детекторів датчика й похибки вимірювання, та з метою зменшення кількості подальших обчислень пропонується дискретизувати значення величин η_k та величин ζ_k. Дискретність d_η та d_ζ значень, відповідно по осям η та ζ, як і міра близькості d точок хмари до заданих площин, залежить від параметрів датчика і визначається похибками вимірювання координат точок хмари. Кількість m_η та m_ζ дискретних значень визначається відповідно як $m_\eta = \mathrm{round}((\max(\eta_k) - \min(\eta_k))/d_\eta)$, $m_\zeta = \mathrm{round}((\max(\zeta_k) - \min(\zeta_k))/d_\zeta)$.

Якщо графічно представити можливі дискретні значення η та ζ, вони будуть знаходитись посередині $m_\eta \times m_\zeta$ комірок розміром $d_\eta \times d_\zeta$. Координати відібраних точок щодо перетину тієї ж площини новою хмарою точок по осям η та ζ можуть вийти за межі визначених дискретних значень. Тому кількість можливих дискретизованих значень η та ζ розширимо зверху і знизу, наприклад на величини $m_{d\eta} = 0{,}2 \cdot m_\eta$ та $m_{d\zeta} = 0{,}2 \cdot m_\zeta$. Для дискретизації відібраних точок перебираємо всі отримані пари значень η_k та ζ_k, якщо вони відповідають певній комірці помічаємо цю комірку, як заповнену. Таким чином формуємо масив заповнених комірок. Завдяки тому, що деякі пари значень η_k та ζ_k попадуть в одну і ту ж комірку, число заповнених комірок буде не більшим за кількість відібраних точок. На рис. 1, а) проілюстровано розташування заповнених комірок для деякої попередньої хмари для однієї з площин перетину. По осі абсцис відкладено порядковий номер n_η дискретизованого значення η, по осі ординат – порядковий номер n_ζ дискретизованого значення ζ. Для наочності задані невеликі значення $m_\eta = 14$, $m_\zeta = 10$. Заповнені комірки позначено кружечками.



а) б)

Рис. 1 – Картини перетинів площинами $O_n\eta\zeta$ і $O_\nu\beta\gamma$

Так само будуємо сітку комірок для поточної хмари. Але тепер у якості площин перетину розглядаємо площини $O_\nu y_\nu z_\nu$, $O_\nu z_\nu x_\nu$, $O_\nu x_\nu y_\nu$ системи координат СКν, розташування якої, згідно до алгоритму визначення зміни відносного просторового положення цілі, певним відомим нам чином змінено відносно розташування системи координат СКn. Цим площинам перетину відповідають три 2D системи координат. Позначимо ці системи координат як $O_\nu\beta_j\gamma_j$, де j – номер площини ($j = 1, 2, 3$). Для побудови сітки комірок використовуємо ті самі, що і попередньо, параметри, тобто максимальні і мінімальні значення відповідних координат, кількість комірок, дискретність. Таким же чином, як і раніше, формуємо масив заповнених комірок. На рис. 1, б) проілюстровано розташування заповнених комірок для деякої поточної хмари й для відповідної площини перетину. По осі абсцис відкладено порядковий номер n_β дискретизованого значення β, по осі ординат – порядковий номер n_γ дискретизованого значення γ. Заповнені комірки позначено хрестиками.

Для порівняння картинок перетину попередньої хмари площиною $O_n\eta\zeta$ та поточної хмари відповідною площиною $O_\nu\beta\gamma$ ці картинки можна сумістити, як показано на рис. 2. В ідеальному випадку, коли картини перетинів однакові, заповнені комірки для двох площин, що розглядаються, мають співпадати. Звісно, це може бути за умови, що точки двох хмар відображають одні й ті ж фізичні точки поверхні цілі.

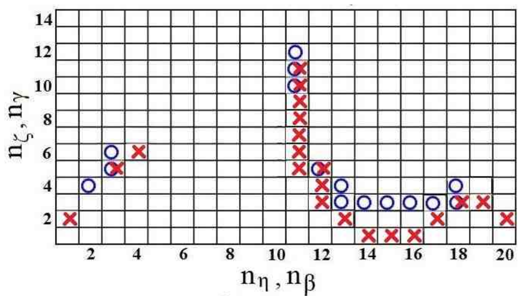


Рис. 2 – Суміщення картин перетину

Цільова функція. Побудуємо цільову функцію, що описує близькість картин перетинів. Будемо враховувати кількість точок хмари у комірці, також врахуємо їх віддаленість від початку системи координат площини перетину, а саме дамо перевагу більш віддаленим від геометричного центра точкам хмари.

Будемо порівнювати картинки перетину попередньої хмари площиною $O_n\eta\zeta$, яка має k_n заповнених комірок, та поточної хмари площиною $O_\nu\beta\gamma$, яка має k_ν заповнених комірок. Кожній заповненій комірці припишемо вагу, в залежності від кількості $k_{\eta\zeta}$ та $k_{\beta\gamma}$ відібраних точок у цій комірці та від відстані $r_{\eta\zeta}$ та $r_{\beta\gamma}$ комірки від початку систем координат O_n та O_ν відповідно до площин.

$$s_{\eta\zeta} = \left(\max_{\beta\gamma \in Q} \left(\exp(-d_{\eta\zeta \to \beta\gamma}) \right) \right) \cdot k_{\eta\zeta} \cdot r_{\eta\zeta} . \quad (1)$$

Для кожної заповненої комірки картини перетину попередньої хмари на сумісній сітці комірок в певній області Q сусідніх комірок картини перетину поточної хмари визначається наявність заповнених комірок і знаходиться значення величини, що характеризує зважену відстань $d_{\eta\zeta \to \beta\gamma}$ комірки до найближчої в області Q заповненої комірки поточної хмари. Якщо в області Q відсутні непусті комірки поточної хмари, тоді $s_{\eta\zeta} = 0$. Індекси $\eta\zeta$ позначають тут величини, що відносяться до заповненої комірки з координатами η та ζ у системі координат $O_n\eta\zeta$. Індекси $\beta\gamma$ позначатимуть величини, що відносяться до заповненої комірки з координатами β та γ у системі координат $O_\nu\beta\gamma$.

Користуючись ілюстративним прикладом суміщення картин перетину, приведеному на рис. 2, наведене вище визначення величини $s_{\eta\zeta}$ можна описати таким чином. Для кожної заповненої комірки картини перетину попередньої хмари (на рис. 2 такі комірки позначені кружечком) визначається наявність заповнених комірок картини перетину поточної хмари (на рис. 2 такі заповнені комірки позначені хрестиком). Наявність комірки з хрестиком визначається у певній області Q навколо комірки з кружечком. Наприклад на відстані не більше однієї комірки від даної комірки з кружечком. Якщо в області Q є одна чи декілька комірок з хрестиком, тоді визначаються відстані $d_{\eta\zeta \to \beta\gamma}$ від центра даної комірки до центрів комірок з хрестиком. Далі до уваги береться найменша з цих відстаней і за формулою (1) визначається величина $s_{\eta\zeta}$, яка тим більша, чим менша відстань $d_{\eta\zeta \to \beta\gamma}$. Крім того ця величина пропорційна кількості $k_{\eta\zeta}$ точок перетину у цій комірці та відстані $r_{\eta\zeta}$ від комірки до початку системи координат O_n. Якщо в області Q відсутні комірки з хрестиком, тоді приймається, що $s_{\eta\zeta} = 0$. Величини $s_{\eta\zeta}$ характеризують певним чином кожну заповнену комірку картини перетину попередньої хмари.

Близькість картин перетину попередньої хмари в цілому до картини перетину поточної хмари будемо характеризувати величиною

$$s_{j,n \to \nu} = \left(\sum_{\eta\zeta} s_{\eta\zeta} \right) / \sum_{\eta\zeta} k_{\eta\zeta} \cdot r_{\eta\zeta} ,$$

де j позначає порядковий номер відповідних площин, а індекси $\eta\zeta$ під знаком суми означають підсумовування по всім заповненим коміркам попередньої хмари.

Таким же чином поступаємо щодо кожної заповненої комірки поточної хмари, знаходимо величину

$$s_{\beta\gamma} = \left(\max_{\eta\zeta \in Q} \left(\exp(-d_{\beta\gamma \to \eta\zeta}) \right) \right) \cdot k_{\beta\gamma} \cdot r_{\beta\gamma} ,$$

що характеризує зважену відстань $d_{\beta\gamma\to\eta\zeta}$ комірки до найближчої в області Q заповненої комірки попередньої хмари, і обчислюємо величину, що характеризує близькість картин перетину поточної хмари в цілому до картини перетину попередньої хмари

$$s_{j,\nu\to n} = (\sum_{\beta\gamma} s_{\beta\gamma}) / \sum_{\beta\gamma} k_{\beta\gamma} \cdot r_{\beta\gamma} ,$$

де індекси $\beta\gamma$ під знаком суми означають підсумовування по всім заповненим коміркам поточної хмари.

Взаємну близькість картин перетинів хмар для площин $O_n\eta\zeta$ та $O_\nu\beta\gamma$ визначимо як

$$s_{j,\nu n} = (s_{j,n\to\nu} + s_{j,\nu\to n}) / 2.$$

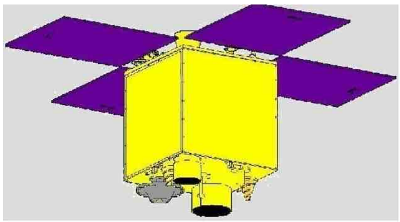
Оскільки ми розглядаємо три пари відповідних площин перетину, та враховуючи, що взаємне положення площин перетину $O_n\eta\zeta$ та $O_\nu\beta\gamma$ залежить від параметрів $\vartheta, \varphi, \psi, x, y, z$, остаточно визначимо цільову функцію у вигляді

$$\mathrm{f}(\vartheta, \varphi, \psi, x, y, z) = (s_{1,\nu n} + s_{2,\nu n} + s_{3,\nu n}) /3 . \qquad (2)$$

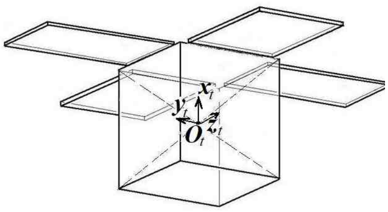
Задана таким чином цільова функція, що описує близькість картин перетинів, може приймати значення в діапазоні від 0 до 1.

Отже задачу визначення зміни відносного просторового положення (розташування та орієнтації) зведено до пошуку аргументів цільової функції (2), що надають їй максимальне значення.

Тестовий приклад застосування методу. Запропонований метод визначення просторового положення цілі припускає, що форма її поверхні є невідомою. Для проведення тестових розрахунків було задано конкретну форму поверхні цілі. У якості форми цілі було прийнято спрощену форму та розміри, що відповідають параметрам КА «Січ-2-1». Ця форма представляє собою паралелепіпед $0{,}940\text{м} \times 0{,}840\text{м} \times 0{,}740\text{м}$. Чотири сонячні панелі також було представлено у вигляді паралелепіпедів $0{,}696\text{м} \times 0{,}570\text{м} \times 0{,}016\text{м}$. Зовнішній вид цілі у вигляді КА «Січ-2-1» та її спрощена форма представлено на рисунках 3, а), 3, б), відповідно. Цю спрощену форму поверхні позначимо як форма N5 (тобто п’ять паралелепіпедів). Для порівняння також розглянемо ще більш простішу форму N1 (тобто один паралелепіпед, без сонячних панелей).



а)



б)

Рис. 3 – КА «Січ-2-1» та його спрощена форма

Для проведення розрахунків було обрано параметри датчика відповідно до характеристик датчика PhotonICs®PMD 41k-S (204 x 204), що встановлений у відеокамері PMD[vision]®CamCube 2.0 [9]. Датчик має поле зору $40° \times 40°$ та містить 204×204 пікселів (мікродатчиків) розміром

$40\,\text{мкм} \times 40\,\text{мкм}$. Кожен мікродатчик забезпечує вимірювання дальності до відповідної точки поверхні цілі, від якої відбивається випромінюване світло, довжина хвилі $740\,\text{нм}$. Фокусна відстань камери прийнята рівній $12{,}8\,\text{мм}$. Робочий діапазон вимірювань складає від $0{,}3\,\text{м}$ до $7\,\text{м}$. Датчик на виході надає 3D координати точок поверхні, від яких відбивне світло попадає до мікродатчиків, тобто надає хмару точок поверхні цілі.

Моделювання отримання хмари точок поверхні цілі. Виходячи з обраних параметрів датчика та форми поверхні цілі було проведено моделювання отримання координат точок хмари. Для заданого розташування цілі (заданої спрощеної форми цілі) відносно системи координат камери $O_c x_c y_c z_c$, що задається стовпцем $t_{ct}^{c} = (x_{ct}\ y_{ct}\ z_{ct})^T$ вектора, що пов'язує O_c з початком O_t прив'язаної до цілі системи координат $O_t x_t y_t z_t$, та матрицею переходу $G_t^c(\vartheta_t, \varphi_t, \psi_t)$. Прийнято, що точка O_t знаходиться у геометричному центрі паралелепіпеду, як показано на рисунку 3, б). Для пікселю датчика визначається, чи є перетин прямої, що проходить від пікселю через центр об'єктиву камери з поверхнею цілі, якщо так, то визначається видимість цієї точки перетину та її координати в системі $O_c x_c y_c z_c$.Виконавши такі обчислення для кожного пікселю датчика, в результаті буде змодельована хмара точок, яку надає на виході датчик. Тобто буде надано множину 3D координат точок поверхні цілі у системі $O_c x_c y_c z_c$ та визначено їх кількість. На рис. 4 у різних ракурсах проілюстровано розташування цілі, що відповідає значенням $\vartheta_t = 23{,}5°$, $\varphi_t = 23{,}5°$, $\psi_t = 1°$, $x_{ct} = 0\,\text{м}$, $y_{ct} = 0\,\text{м}$, $z_{ct} = 5{,}5\,\text{м}$. Рис. 4, а) відповідає виду на ціль вздовж осі об'єктиву камери (вісь z_c). На рис. 4, б) наведено для наочності вид на ціль з іншого ракурсу. Блідим відтінком (на кольоровому зображенні – синім кольором) позначено точки хмари, їх кількість – 4219.

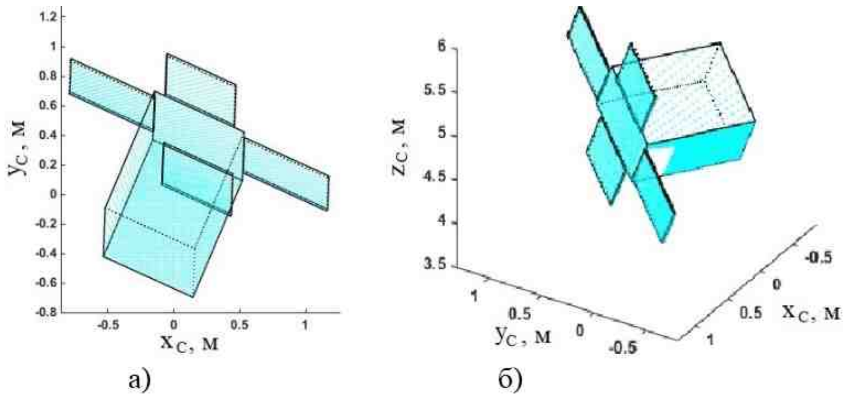


Рис. 4 — Розрахункове розташування цілі

Для моделювання процесу визначення просторового положення цілі у якості попередньої хмари точок було обрано хмару, що відповідає приведеному вище розташуванню цілі. У якості поточної хмари розглядалися хмари, що відповідають двом варіантам просторового положення цілі, для варіанта 1: $\vartheta_t = 24{,}5°$, $\varphi_t = 24{,}5°$, $\psi_t = 2°$; для варіанта 2: $\vartheta_t = 33{,}5°$, $\varphi_t = 33{,}5°$, $\psi_t = 11°$. Значення x_{ct}, y_{ct}, z_{ct} залишаємо незмінними у порівнянні з попереднім положенням. Наведені нижче рисунки стосуються варіанту 2 зміни ($\vartheta_t = 23{,}5° \to 33{,}5°$, …) просторового положення цілі.

Згідно до алгоритму, описаному вище, було проведено визначення точок хмари, близьких до площин перетину, що проілюстровано на рисунках 5, а), 5, б), відповідно стосовно варіанту форми N1 без периферійних елементів та варіанту форми N5 з периферійними елементами.

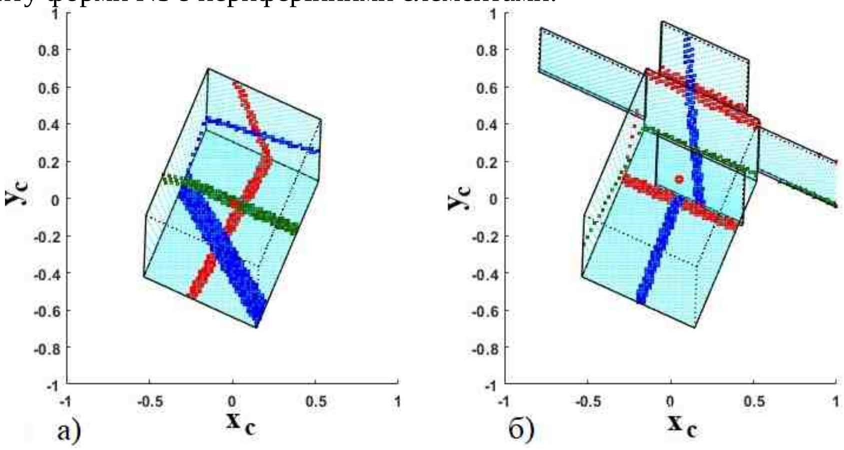
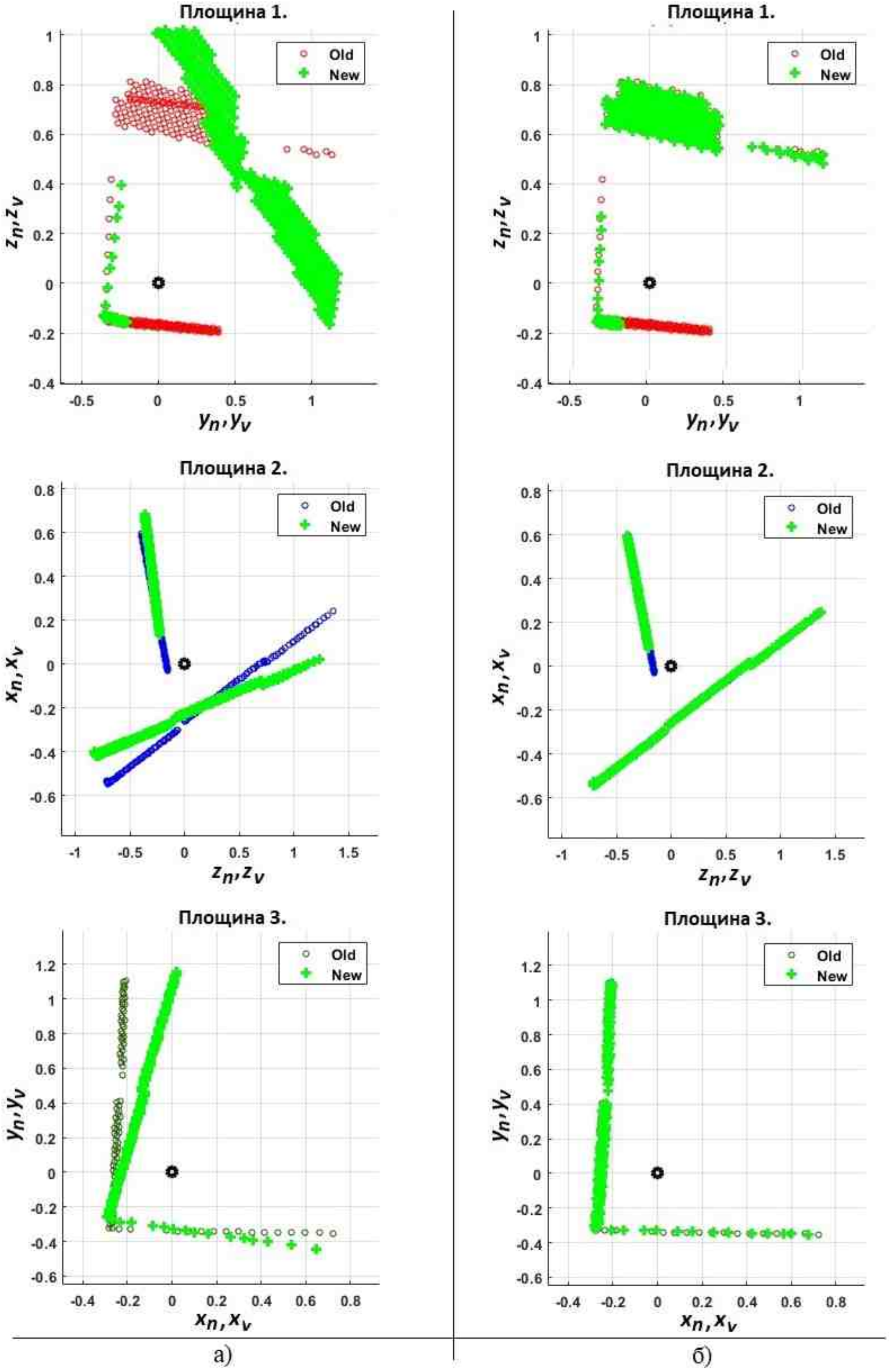


Рис. 5 – Перетин хмари точок заданими площинами

Блідим відтінком на рисунках, як і раніше, позначено точки хмари. Більш насиченим відтінком – точки перетину різними площинами (на кольоровому зображенні точки перетину різними площинами позначено різними кольорами). Геометричні центри відповідних хмар точок позначено кружечками.

За міру близькості точок хмари до площин було прийнято значення $d = 0{,}026$ м, яке можна охарактеризувати як похибку вимірювання координат точок, виходячи з дискретності розташування мікродатчиків та заявленій точності вимірювання відстані датчиком. Кількість точок картин перетину складає для попередньої хмари (форма N5) відповідно до площин 273, 239 та 85. При подальшій побудові сітки комірок на картинах перетину, кількість комірок була визначена виходячи з розміру комірки $d \times d$. Кількість заповнених комірок склала відповідно 169, 116 та 64. На рис. 6, а) приведено картини перетинів попередньої та поточної хмар заданими площинами. У вигляді кружечків показано заповнені комірки, що відповідають картинам перетину попередньої хмари. У вигляді плюсиків – картинам перетину поточної хмари тими ж заданими площинами (тобто при $\vartheta, \varphi, \psi = 0$). При розрахунку близькості заповнених комірок була врахована область Q на відстані однієї комірки від даної. Близькість приведених картин перетину характеризується значенням цільової функції $\mathrm{f} = 0{,}17$.

У результаті пошуку значень аргументів, що надають максимуму цільовій функції, були знайдені аргументи $\vartheta, \varphi, \psi, x, y, z$, що надають функції f значення $0{,}85$. Ідеальне значення f для цього випадку становить $0{,}87$. Результати пошуку у вигляді картин перетину приведено на рис. 6, б). Початки O_n і O_v відповідно системи координат заданих площин та системи координат їх зміненого (у загальному випадку) розташування на діаграмах рис. 6, а) і рис. 6, б) суміщені між собою та показані чорним кружечком. Для пошуку аргументів цільової функції був використаний метод глобальної оптимізації, що реалізований у середовищі MATLAB, а саме метод Direct Search. Зауважимо, що для зменшення навантаження на процедуру пошуку обсяг поточної хмари для форми N5, який містить 4694 точки, був зменшений до 3007 точок, виходячи з припущення, що оптимальне розташування суміщених площин перетину буде знаходитись в певній області розташування попередніх площин.



а) попередньої (old) та поточної (new) хмар заданими площинами, f=0,17:
б) попередньої (old) хмари заданими площинами та поточної (new) хмари зміщеними площинами, f=0,85

Рис. 6 – Картини перетинів

Результати тестового прикладу застосування методу можуть бути проілюстровані такими таблицями. У табл. 1 і табл. 2 наведено значення параметрів $\vartheta, \varphi, \psi, x, y, z$, що характеризують просторове положення цілі у системі координат $O_c x_c y_c z_c$ камери датчика (СКс) та у системі координат $O_n x_n y_n z_n$ заданих площин (СКn) для різних розглянутих варіантів форми поверхні цілі. Також наведено значення параметрів положення у СКn, знайдені за допомогою розробленого методу, та значення помилок Δ знаходження параметрів. Таблиця 1 відповідає зміні просторового положення цілі від попереднього до поточного (варіант 1), таблиця 2 – до поточного (варіант 2).

Табл. 1 – Результати застосування методу при зміні параметрів просторового положення від попереднього до поточного (варіант 1, $\vartheta_t = 23{,}5° \to 24{,}5°$, …)

Форма	Положення цілі	ϑ,°	φ,°	ψ,°	x, см	y, см	z, см
	Попереднє в СКс	23,5	23,5	1	0	0	5,5
	Поточне в СКс	24,5	24,5	2	0	0	5,5
	Попереднє в СКn	0	0	0	0	0	0
N1	Поточне в СКn	1,28	-0,44	0,59	-0,03	-0,47	-0,14
	Знайдене поточне в СКn	-0,01	-0,34	0,00	0,02	0,00	0,00
	Δ (помилка визначення)	-1,29	0,10	-0,59	0,34	0,38	-0,02
N5	Поточне в СКn	1,28	-0,44	0,59	-0,03	-0,47	-0,14
	Знайдене поточне в СКn	1,46	-0,45	0,45	-0,01	-0,20	-0,01
	Δ (помилка визначення)	0,17	-0,01	-0,14	0,02	0,27	0,13

Табл. 2 – Результати застосування методу при зміні параметрів просторового положення від попереднього до поточного (варіант 2, $\vartheta_t = 23{,}5° \to 33{,}5°$, …)

Форма	Положення цілі	ϑ,°	φ,°	ψ,°	x, см	y, см	z, см
	Попереднє в СКс	23,5	23,5	1	0	0	5,5
	Поточне в СКс	33,5	33,5	11	0	0	5,5
	Попереднє в СКn	0	0	0	0	0	0
N1	Поточне в СКn	12,83	-3,53	4,80	-2,77	-3,05	0,41
	Знайдене поточне в СКn	14,00	-3,47	5,25	-3,13	-3,13	0,42
	Δ (помилка визначення)	1,17	0,06	0,45	-0,36	-0,08	0,01
N5	Поточне в СКn	12,83	-3,53	4,80	0,05	-4,30	-1,01
	Знайдене поточне в СКn	13,21	-3,58	4,47	0,00	-4,30	-0,78
	Δ (помилка визначення)	0,38	-0,05	-0,33	-0,05	0,00	0,23

Табл. 3 – Оцінка відносної помилки визначення параметрів положення

Зміна положення цілі	Форма	$\Delta\alpha_{сер}$, %	Δr, %
Від попереднього до поточного (варіант 1)	N1	74	100
	N5	13	60
Від попереднього до поточного (варіант 2)	N1	7	9
	N5	4	5

У табл. 3 наведено оцінки відносної помилки визначення параметрів просторового положення. Величина $\Delta\alpha_{сер}$ визначена як середнє арифметичне модулів відносних помилок знаходження кутових параметрів, величина Δr визначена як відношення модуля вектора помилок знаходження лінійних параметрів до модуля вектора лінійних параметрів просторового положення цілі.

Як випливає з наведених результатів тестування, при зміні просторового положення цілі на малі кути повороту (див. табл. 1) метод не працює, що пояснюється зміною точок поверхні цілі на величину, що знаходиться в межах похибки вимірювання координат точок хмари. При зміні просторового положення цілі на більші кути повороту (див. табл. 2) застосування методу прийнятне. Зауважимо, що наявність периферійних елементів, у даному разі – сонячних панелей, покращує (див. табл. 3) показники визначення просторового положення цілі.

Висновки. Розроблено метод визначення зміни відносного просторового положення об'єкта орбітального сервісу (цілі) з невідомою формою на основі отриманих датчиком хмар точок поверхні цілі. Алгоритм реалізації методу оперує зі спрощеним описом хмари, використовує тільки координати точок хмари, без виявлення будь яких ознак поверхні. Параметри переміщення цілі визначаються як аргументи цільової функції, що надають цій функції максимальне можливе значення. Запропоновано варіант формулювання цільової функції. Перевагою запропонованого методу є його здатність визначати зміну просторового положення об'єкта із заздалегідь невідомою формою. Питання оцінювання обчислювальних витрат не розглядалося, перевірялася працездатність методу у принципі. Запропонований метод визначення параметрів зміни відносного просторового положення цілі може розглядатися як постачальник даних спостереження для процедури фільтрації при оцінюванні параметрів відносного руху цілі з невідомою формою.

1. *Zhu W., She Y., Hu J., Wang B., Mu J., Li S.* A hybrid relative navigation algorithm for a large–scale free tumbling non–cooperative target. 2022. Vol. 194. Pp. 114–125. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.01.028
2. *Pasqualetto Cassinis L., Fonod R., Gill E.* Review of the robustness and applicability of monocular pose estimation systems for relative navigation with an uncooperative spacecraft. Progress in Aerospace Sciences. 2019. Vol. 110. 100548. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.05.008
3. *He Y, Liang B., Li S*. Non-cooperative spacecraft pose tracking based on point cloud feature. Acta Astronautica. 2017. V. 139. Pp. 213–221. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.06.021
4 *Hu J., Li S., Xin M*. Real-time Pose Determination of Ultra-Close Non-Cooperative Satellite based on Time-of-Flight Camera. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. January. 2024. Pp. 1–20. https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3424428
5. *Opromolla R., Fasano G., Rufino G., Grassi M.* Pose Estimation for Spacecraft Relative Navigation Using Model-Based Algorithms. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2017. Vol. 53, No. 1. Pp. 431–447. https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2650785
6. *Lim T. W., Oestreich C. E.* Model-free pose estimation using point cloud data. Acta Astronautica. 2019. V. 165. Pp. 298–311. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.007
7. *Opromolla R., Fasano G., Rufino G., Grassi M.* A review of cooperative and uncooperative spacecraft pose determination techniques for close-proximity operations. Progress in Aerospace Sciences. 2017. Vol. 93. Pp. 53–72. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.07.001
8. *Markley F. L., Crassidis J. L.* Fundamentals of spacecraft attitude determination and control. New York: Springer Science + Business Media, 2014. 486 pp. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0802-8
9. Відеокамера PMD[vision]®CamCube 2.0. [Електронний ресурс]. URL: https://dokumen.tips/documents/datasheet-camcube.html?page=2 (дата звернення: 06.11.2023).

Отримано 19.08.2024,
в остаточному варіанті 03.10.2024