

МЕТОДИКА ФОТОГРАМЕТРИЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ ЛЮФТІВ ТА ПРУЖНИХ ПОДАТЛИВОСТЕЙ В ШАРНІРНИХ ВУЗЛАХ ТРАНСПОРТНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ ТА ШТАНГ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

*1 Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара,
пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна; e-mail: beitsun98@gmail.com
2 Інститут транспортних систем і технологій НАН України,
вул. Писаржевського, 5, 49000, Дніпро, Україна; e-mail: tsv.transmag@gmail.com*

Експериментальне дослідження багатоланкових конструкцій та їх елементів є надзвичайно актуальним і важливим для сучасної науки та техніки. Ці конструкції широко застосовуються в багатьох галузях, зокрема в аерокосмічній, автомобільній, робототехніці та будівництві. Наявність великої кількості з'єднань між собою складових робить їх поведінку складною і нелінійною. Точність і надійність таких систем залежить від їхніх динамічних характеристик, які важко передбачити теоретично через численні фактори, такі як податливість матеріалів, люфти в шарнірах та взаємодія між елементами.

У даній роботі представлено розроблену та апробовану методику експериментального визначення люфтів та пружних податливостей в шарнірних вузлах транспортних маніпуляторів і штанг космічних апаратів, що базується на фотограмметричному методі. Проаналізовано універсальність методу у застосуванні до різних типів механічних експериментів. Встановлено, що отримана точність вимірювань та застосовність до різноманітних конструкцій за неоднорідних умов робить методику в значній мірі універсальною.

При відпрацюванні розробленої методики використовувався розроблений та виготовлений дволанковий фрагмент транспортного маніпулятора. За допомогою побудованої розрахункової схеми для визначення впливу люфту у шарнірному з'єднанні були отримані траєкторії розворотів секції маніпулятора з урахуваннями різних величин зазорів. Виявлено, що за допомогою фотограмметрії можна визначати траєкторії кожного з контрольних маркерів на шарнірі у процесі всього робочого часу вузла. Це дає змогу уточнювати розрахункові схеми з обчисленими величинами люфтів.

Запропоновану методику можна легко адаптувати для дослідження пружних податливостей елементів багатоланкових конструкцій у зонах локального зниження жорсткості, таких як фланцеві з'єднання та місця кріплення допоміжного обладнання на ланках.

Показано, що розроблену методику вимірювання можна застосовувати при дослідженні динаміки багатоланкових та наддовгих конструкцій, синхронізувавши декілька цифрових камер. Можна реалізовувати моніторинг рухомих конструкцій у космосі дистанційно.

Ключові слова: експериментальне моделювання, люфт у шарнірі, маніпулятор, методи візуального стеження, фотограмметрія.

The experimental study on multi-link structures and their components is of extreme relevance and importance to modern science and technology. These structures are widely used in various fields, including the aerospace and the automotive industry, robotics, and construction. The presence of numerous interconnected components makes their behavior complex and nonlinear. The accuracy and reliability of such systems depend on their dynamic characteristics, which are difficult to predict theoretically due to numerous factors, such as the material compliance, hinge backlashes, and intercomponent interaction.

This study presents the authors' verified methodology for experimentally determining backlashes and elastic compliances in hinges of transport manipulators and spacecraft booms, which is based on the photogrammetric method. The versatility of the method as applied to different types of mechanical experiments was analyzed. The obtained measurement accuracy and applicability to various structures under heterogeneous conditions make the methodology substantially universal.

The methodology was tried out using a two-link fragment of a transport manipulator designed by the authors. A computational scheme was constructed to determine the effect of a hinge backlash. The scheme was used to obtain rotation trajectories of the manipulator section for different backlash values. It was found that photogrammetry can be used to determine the trajectories of each control marker on the hinge throughout its operational time. This allows one to refine computational schemes with calculated backlash values.

The proposed methodology can easily be adapted to studying the elastic compliance of multi-link structure components in local stiffness reduction zones, such as flange connections and auxiliaries-to-link attachment points.

The measurement methodology may be used in studying the dynamics of multi-link and ultralong structures by synchronizing several digital cameras. This enables remote monitoring of moving structures in space.

Keywords: experimental modeling, hinge backlash, manipulator, visual tracking methods, photogrammetry.

Вступ. Достовірність результатів імітаційного моделювання динаміки робочих режимів пружних багатоланкових просторово розвинутих механічних систем визначається точністю завдання жорсткісних параметрів їх елементів

© В. С. Бейцун, С. В. Тарасов, 2024

і нелінійностей у шарнірних з'єднаннях. Великим підкласом таких систем є транспортні маніпулятори та штанги космічних апаратів, що служать для переміщення і фіксації корисного навантаження відносно апарата та розміщення периферійного обладнання. Основним фактором, що впливає на точність роботи таких механізмів, є континуальна пружна податливість елементів конструкції, місця локальних знижень жорсткості у фланцевих з'єднаннях, а також податливість і люфти в шарнірах механізму. З наведених вище факторів люфти і податливість шарнірних вузлів найважче піддаються розрахунку і, як правило, визначаються експериментально.

Вивченню люфтів у шарнірних вузлах різноманітних механізмів присвячено велику кількість робіт. Саме впливи люфтів вносять до рівнянь руху і алгоритмів керування складові нелінійного характеру. Вони ускладнюють, а інколи і унеможливають, обчислення та точне моделювання робочих процесів даних конструкцій. Так, у [34] авторами Tian Q., Flores P., Lankarani H. M. було розглянуто 500 різноманітних джерел, які описували найбільш актуальні аналітичні, чисельні та експериментальні підходи для кінематичного та динамічного аналізу багатотільних механічних систем з люфтами у шарнірних з'єднаннях. Автори зазначають, що більшість робіт присвячена моделюванню та чисельним алгоритмам для простих механізмів із зазорами у з'єднаннях. Однак, багато складних механізмів з великою кількістю зазорних з'єднань, таких як розгортальні конструкції у космосі, системи з підшипниками, біомеханічні та магнітні з'єднання потребують більш детального вивчення як на етапі проектування, так і на етапах експериментального моделювання чи у процесах складання. Оскільки, виготовлення та складання шарнірних вузлів без люфтів неможливо, тому саме для таких задач необхідні нові методи, підходи для моделювання, стеження, контролю зазорів у багатоелементних конструкціях.

В даній статті для експериментального визначення люфтів і податливостей шарнірних вузлів бортових транспортних маніпуляторів і штанг запропоновано використовувати метод фотограмметрії, який використовує серію зображень, зафіксованих камерами, лазерними трекарами, теодолітами тощо [16] для визначення координат точок, границь об'єктів чи їх зміни з часом [15].

Використання фотограмметрії для вивчення якісних і кількісних характеристик об'єктів має свої переваги: точність результатів забезпечується використанням прецизійних фотокамер і строгих методів обробки знімків; продуктивність забезпечується використанням для вимірювань зображень об'єктів, а не безпосереднім вимірюванням з використанням систем фізичних датчиків; інформація є об'єктивною та достовірною, є можливість повторення вимірювань; можливість отримання великого обсягу інформації про стан об'єкта або його частин у короткий термін; безпека виконання робіт завдяки безконтактному методу знімання об'єкта; можливість вивчення швидкоплинних процесів [1].

Метод фотограмметрії можна класифікувати на основі типу цілей (досліджуваних маркерів), які використовуються для відстеження точок, кореляції цифрових зображень або підходів без цілей. Алгоритм відстеження точок використовує фотограмметричні камери для визначення координат окремих маркерів, встановлених на досліджуваних об'єктах. Для цього методу серія оптичних мішеней (як правило, висококонтрастних круглих точок або світловідбиваючих маркерів) встановлюється на досліджувану конструкцію [26,

32, 39]. Центри оптичних цілей визначаються за допомогою алгоритму пошуку еліпса, а координати точок у тривимірному просторі визначаються за допомогою техніки тріангуляції. Тривимірне відстеження точок визначає переміщення цілей шляхом відстеження оптичних цілей на різних часових етапах і порівняння їх координат з еталонною або початковою стадією. Для другої категорії цифрова кореляція зображень (ЦКЗ) — це метод оптичного вимірювання, який працює на основі варіацій безперервних шаблонів у градаціях сірого. Перед вимірюванням необхідно підготувати ділянку тестової конструкції. Підготовка поверхні зазвичай виконується шляхом нанесення високонтрастного стохастичного малюнка на структуру (зазвичай чорнобілого). Відповідний розмір точок у цьому методі зазвичай менший, ніж розмір оптичних цілей, які використовуються в тривимірному відстеженні точок. Після підготовки поверхні робиться серія знімків за допомогою камер. Метод кореляції зображень працює шляхом створення фасетів (або підмножин), що перекриваються, на загальній області дослідження [8, 35, 36, 37]. Оскільки стохастичний візерунок створюється випадковим чином, кожна грань має унікальне значення інтенсивності світла, і програмне забезпечення може розпізнавати рух кожного унікального фасетного візерунка на різних етапах. Зсув і деформація по всій досліджуваній області обчислюються шляхом порівняння кожної грані з відповідною фасеткою в початковому або еталонному етапах. В останньому типі, у безцільовому підході, немає оптичної цілі або шаблону для визначення деформації конструкції. Автори використовували внутрішні елементи або краї структури, щоб ідентифікувати об'єкт або ділянки об'єкта, які потрібно відстежувати [5, 6, 10]. Цей підхід може бути не таким точним, як тривимірне відстеження точок або кореляція цифрових зображень, але він має свої переваги: коли немає можливості встановити оптичні цілі на структуру або нанести на поверхню візерунок.

Серед трьох перерахованих вище методик 3D точкове відстеження є найбільш зручним і практичним для широкомасштабного обстеження конструкцій, які зазнають статичних механічних навантажень. Насправді метод ЦКЗ забезпечує вимірювання деформації об'єктів всієї області, але він обмежений полем огляду камер і може вимірювати відбиття лише на тих частинах конструкції, що розпізнаються камерами. Таким чином, цей метод не можна використовувати для вимірювання зміщення великих і складних конструкцій [15].

Мета даної роботи полягає в розробці методики застосування методу фотограмметрії для дослідження та аналізу впливу люфтів і пружної податливості шарнірних вузлів на динаміку робочих процесів транспортних маніпуляторів та розкладних штанг для периферійного обладнання, встановлених на космічних апаратах. У першому розділі проведено огляд можливостей фотограмметрії на прикладах її застосування у багатьох галузях. У другому розділі наведено базові аналітичні відомості, які є основою для цифрової фотограмметрії. Алгоритм проведення фотограмметричного експерименту з моделлю маніпулятора та його результати наведено у третьому розділі. Також у цій частині наведено отримані траєкторії розвороту з урахуванням різних величин люфта у шарнірному вузлі. В кінці статті викладено висновки та плани майбутньої роботи з фотограмметричними дослідженнями. Дослідження, пов'язані з розробкою методичних підходів, проводилися на базі розробленого та виготовленого дволанкового фрагмента маніпулятора.

1. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Однією з галузей, де використовують фотограмметрію, є вітроенергетика. За допомогою безконтактних вимірювань визначають величину деформацій лопатей, траверс та інших елементів конструкцій вітряних турбін. Наприклад, у роботі [27] було визначено три форми коливань лопатей турбіни, діаметр яких 2,56 м, за різних режимів роботи. Дані вдалося одержати за допомогою фотограмметрії. Аналіз та фільтрація даних відбувалися за допомогою скрипта, написаного у Matlab.

Також проводяться дослідження полів деформацій лопаті турбіни: на наявність тріщин та моніторинг їх зростання; вплив вібрацій та температурних змін. Так, у статті [29] проводилися вібротести лопатей вітряної турбіни Windspot потужністю 3,5 кВт. Розглянута лопать була випробувана в різних температурних режимах від -15°C до $+40^{\circ}\text{C}$ з кроком 5°C з метою контролю температурно залежних властивостей матеріалу як у низькому, так і у високому режимах. Також враховувалася вологість. Проводилися два типи вібротестів тривалістю по 120 с для сигналу білого шуму з ефективною смугою частот від 0 до 400 Гц та для синусоїдального сигналу із частотами від 1 Гц до 300 Гц. Всі експерименти фіксувалися камерами, що дало змогу отримати результати переміщень контрольних точок.

Основним критерієм для фотограмметричних експериментів є точність вимірювань, яка безпосередньо залежить від багатьох факторів (параметри камери, освітленість, наявність маркерів, температура та вологість навколишнього середовища тощо). Власне використання методу ЦКЗ у порівнянні з розрахованими комп'ютерними моделями має досить високу точність [36]. Метод цифрової кореляції зображень сходиться із запрограмованим більш ніж на 95 %. Похибка для різних експериментів – не більше 2 мм для відхилень кінчиків лопатей.

Велику кількість робіт присвячено дослідженню коливальних процесів конструкцій за допомогою фотограмметрії [18, 21, 38, 40]. Розробляються або вдосконалюються методи експериментального модального аналізу на основі фотограмметрії, в якому цифрова камера використовується для вимірювання переміщень мішеней зображення, пов'язаних із лазерними плямами на об'єкті контролю. Чисельно показано, що розрахункові піксельні координати центру ваги цільового зображення добре співвідносяться з фактичними координатами при застосуванні методу стеження за точкою. Таким чином, універсальність методу дозволяє відстежувати коливання та їх форми як для тестових балок, так і для великогабаритних конструкцій, наприклад, мостів.

Дослідження полів деформацій у конструкціях, викликаних впливом температур [17], гравітаційним [31], крутильним або повздовжнім навантаженнями [41] може бути реалізовано за допомогою фотограмметричних експериментів. У поєднанні з методом скінчених елементів, обчисленні результати мають низьку похибку вимірювань. Наприклад, результати експерименту з навантаження опори для лінії електропередач показують, що запропонований метод може забезпечити точність 0,1 мм/м, що є досить точним для такого роду конструкцій [39].

В ракетно-космічній галузі фотограмметрія застосовується завдяки можливості досягнення високої точності вимірювань, що є вкрай важливим при дослідженні/тестуванні таких конструкцій: антен, сонячних панелей, виносних маніпуляторів та інших об'єктів, що трансформуються [19, 22–24, 28].

Налаштування та калібрування багатoelementних конструкцій з високою точністю – важка та трудомістка задача. Щоб перевірити працездатність нової антени, що розгортається, був розроблений, виготовлений і випробуваний прототип діаметром 5,0 м в наземному експерименті [33]. Результат тестового розгортання показав, що антену може бути успішно розкладено. У той же час була виготовлена відбиваюча поверхня антени, точність якої 0,65 мм була досягнута за рахунок фотограмметрії, і налаштування профілю, що забезпечило штатну роботу антени.

Фотограмметрія дозволяє проводити моніторинг конструкцій не тільки в лабораторних умовах, а й у реальних – наприклад, у космосі. Roll-Out Solar Array (ROSA) – це інноваційна, легка сонячна батарея з гнучкою підкладкою, яка використовує накопичену енергію деформації у своїх складових конструктивних елементах, щоб забезпечити розгортання без використання двигунів, зберігаючи при цьому ефективну упаковку [9]. Розкриття сонячної панелі становить 3 хв. 21 с. На батарею нанесені мітки, динаміка яких за допомогою фотограмметрії досліджується на коливання. Проведено порівняльний аналіз математичних моделей у Abaqus, Ansys із реальним експериментом в космосі.

У статті [14] описано метод вимірювання деформацій великої розкладної сітчастої мікрохвильової антени на основі фотограмметрії. Досліджується масив точок, розташованих у вузлах комірок антени. Обчислюються всі координати даних вузлів. За допомогою методу найменших квадратів розрахована найкраща параболічна поверхня антени.

Окрім цього, широкий клас задач імітаційного та натурального моделювання становлять дослідження динаміки бортових маніпуляторів, штанг космічних апаратів або їх прототипів. Вивчається рух як окремих вузлів, наприклад, шарнірних з'єднань [25], так і цілих систем: тросових чи захвату [12, 13]. Налаштування маніпуляторів для виконання заданих рухів потребує калібрування органів стеження (камери встановлюють безпосередньо на останній елемент конструкції або на нерухомі штативи таким чином, аби вони повністю охоплювали робоче поле маніпулятора). Так, у [7] розроблено нову систему калібрування шестиступеневого робота, що базується на відстеженні положення та орієнтації його схвату. На схваті представлено маркери нового типу ArUco. Для вивчення ефективності системи калібрування на реальному устаткуванні було проведено експерименти в реальних умовах. У цих експериментах помилки абсолютного положення та орієнтації сходилися до 2,5 мм та $0,2^\circ$ відповідно.

Інтегрований алгоритм фотограмметрії для розпізнавання маркерів, координати яких відслідковуються, може бути відкоригований за допомогою адаптивного розширеного методу Калмана [11]. Наприклад, у [30] був розроблений розширений фільтр Калмана для оцінки динаміки об'єктів у площині зображення. Даний алгоритм відпрацьовувався на стенді для наземного моделювання орбітальної діяльності космічного маніпулятора. Ця оцінка використовується як підвищення точності визначення стану кінематики об'єкта. У цій роботі також показано, що визначити пружну поведінку системи маніпулятора можна завдяки аналізу зображення, отриманого під час руху конструкції.

Отже, отримані координати маркерів, що порівняні з початковими або еталонними значеннями, можуть бути використані при дослідженні коливань або у розрахунках за допомогою метода скінченних елементів. Таким чином,

можна отримати поля напружень, деформацій та переміщень конструкцій або їх вузлів. Яскравим прикладом цього можуть бути експериментальні дослідження за допомогою фотограмметрії для надувного маніпулятора, що складається з надувних тканинних трубок з покриттям і з'єднаннями сильфонного типу [25]. У цій роботі були проведені випробування на двосторонній розтяг, зсув для оцінки пружних констант мембран з полієфірної тканини та ПВХ-покриттям надувної конструкції. Прогнозування механічної поведінки конструкції надувного маніпулятора було проведено за допомогою методу скінченних елементів. Був оцінений вплив кількості, ширини і глибини складок на «надувній руці». Для експериментального дослідження поведінки розкладання був розроблений прототип надувної руки. За допомогою фотограмметрії ближньої дії було виміряно деформації та кут повороту маніпулятора. В результаті фотограмметричного експерименту були отримані координати контрольних точок, за якими було обчислено поля деформацій надувної руки, де результати моделювання збігаються з експериментальними.

2. Принципи і методологія вимірювання. Основу фотограмметрії складають векторна алгебра і аналітична геометрія. Основними концепціями аналітичної фотограмметрії є умова колінеарності та умова компланарності векторів, які є важливими для розвитку цифрової фотограмметрії.

Нехай маємо прямокутну праву систему координат $OXYZ$, в якій точка O_1 має координати X, Y, Z ; та іншу просторову систему координат $SX'Y'Z'$, де точка O_1 має координати X', Y', Z' . S - центр проєкції або центр об'єктива фотокамери. В загальному вигляді, як викладено у [3], аналітичне перетворення координат точок знімка із просторової системи $Sxyz$ у фотограмметричну систему координат $SX'Y'Z'$ реалізується за допомогою рівняння перетворення координат (1). Спочатку проводиться трансформування координат, що зображено на рис. 1, – паралельне перенесення початку координат з точки O_1 в точку S , а також «повороту простору» за допомогою кутів Ейлера α, ω, κ та направляючих косинусів.

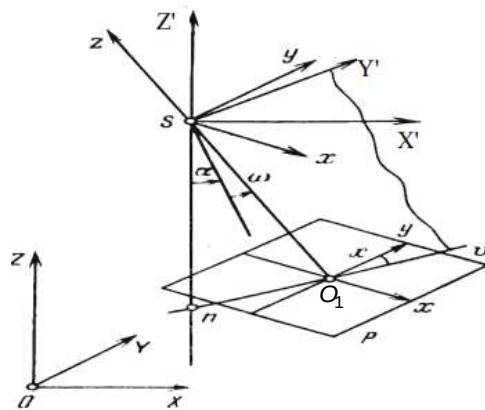


Рис. 1 – Просторові системи координат для визначення положення точок знімка [4]

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}, \text{ або } \begin{cases} X' = a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3 f \\ Y' = b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3 f \\ Z' = c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3 f \end{cases} \quad (1)$$

де A – матриця направляючих косинусів; f – фокусна відстань камери; a_i, b_i, c_i – направляючі косинуси кутів між осями X', Y', Z' та осями X, Y, Z відповідно, $i=1,2,3$; x_0, y_0 – координати головної точки O_1 на площині P обраного знімку. На рис. 1 n – точка надиру, утворена перпендикуляром від центру об'єктива до площини фотознімку; nv – луч, що утворює головну вертикаль знімка.

Обчислення просторових координат нахилених знімків можна виразити у формі наступних формул [2]:

$$\begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{a_1(X - x_0) + a_2(Y - y_0) + a_3f}{c_1(X - x_0) + c_2(Y - y_0) + c_3f}, \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{b_1(X - x_0) + b_2(Y - y_0) + b_3f}{c_1(X - x_0) + c_2(Y - y_0) + c_3f}. \end{aligned} \quad (2)$$

Якщо ж необхідно, навпаки, отримати координати точок знімку за допомогою відомих координат відповідних точок об'єкта, використовують зворотні залежності:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \\ y - y_0 &= f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}. \end{aligned} \quad (3)$$

У формулах (2), (3) X_s, Y_s, Z_s – координати центра проєкції (передньої вузлової точки об'єктива в момент знімання).

Таким чином, координати кодованих мішеней обчислюються на всіх фотознімках, на яких вони з'являються. Кожна мітка повинна бути видимою, чіткою і не розмитою на двох або трьох фотографіях з мінімальним кутом огляду, щоб забезпечити її виявлення та підтвердження з високим рівнем достовірності. З усіх ракурсів має бути розпізнано мінімум по 8–10 чітких міток без значних змін у перспективі зйомки. Вже після розпізнавання усіх мішеней можна вводити до фотосету еталонну міру/и, відстань до якої відомо і яку можна використовувати як масштаб для проведення необхідних вимірювань.

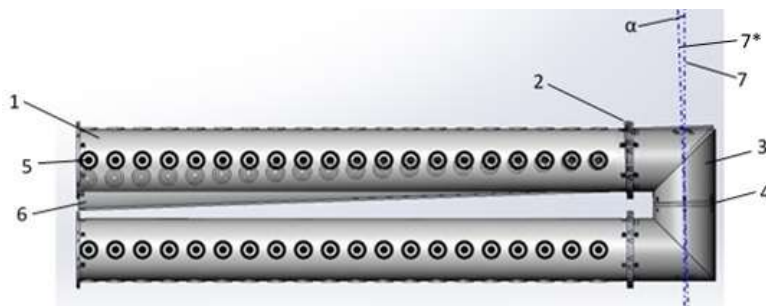
Методика фотограмметричного підходу. Методика відпрацьовувалася в лабораторних умовах на базі виготовленого дволанкового фрагменту маніпулятора. Фотограмметричний метод був реалізований з використанням кодованих мішеней. Експерименти включали налаштування системи зневаження моделі маніпулятора та дослідження впливу кута повороту маніпулятора на точність вимірювань.

В якості досліджуваного об'єкту використовувався дволанковий маніпулятор, який було встановлено на макет зневаження, що імітує умови невагомості для верхньої секції. Модель маніпулятора (рис. 2) складалася з двох алюмінієвих труб та колін, зварених під кутом 45° , марки АДЗ1Т5 та фланців з алюмінієвого сплаву Д16Т. Діаметр, товщина стінки та довжина труб склали 85 мм, 2,5 мм, 750 мм відповідно. Поворотний механізм був розташований в середині конструкції.

Для зменшення тертя рухомих частин, між ними використовувався фторопластовий сепаратор марки Ф-4.

Зйомка проводилася за допомогою однієї цифрової камери Nikon D5100 з фокусною відстанню $f = 35$ мм. Фотограмметричне дослідження складалося з таких етапів:

- підготовка досліджуваного об'єкта до фотограмметричного експерименту (друк кодованих мішеней, їх розподіл та фіксація безпосередньо на маніпуляторі, області навколо нього). Міжцентрова відстань для маркерів, розташованих безпосередньо на маніпуляторі, складала 37 мм, а для інших – 76 мм та 82,5 мм по горизонталі та вертикалі відповідно;
- калібрування камери за допомогою спеціальної калібрувальної сітки. Для високоточного калібрування необхідно розпізнати більше, ніж 80 зі 100 наявних точок;
- проведення аналітичних вимірювань у місцях з'єднань масивів кодованих маркерів та їх розташувань за допомогою цифрового штангенциркуля ШЦЦ-150, похибка якого, за технічними характеристиками, не перевищує 0,1 мм;
- налаштування джерел світла та їх кількості;
- фотозйомка об'єкта з різних ракурсів, під різними кутами нахилу/повороту камери, встановленої на штатив. Відстань від об'єктиву камери до найвіддаленішого маркеру становила близько 2,5 м;
- обробка фотозображень, розпізнавання маркерів (контрольних точок);
- додаткова фотозйомка тих ракурсів маніпулятора, де не були розпізнані маркери (за необхідністю);
- обчислення координат маркерів та розрахунок похибки вимірювань.



1 – труба, 2 – з'єднувальні фланці, 3 – перехідне коліно, 4 – сепаратор, 5 – кодована мішень, 6 – труба маніпулятора, нахилена у площині зображення на кут α через люфт, 7 – вісь обертання шарнірного вузла маніпулятора, 7* – вісь обертання шарнірного вузла маніпулятора, відхилена на кут α

Рис. 2 – Модель дволанкового маніпулятора

Також існує можливість синхронізації зображень з декількох камер [20]. Для цього всі камери повинні мати однакові параметри (фокусна відстань, світлочутливість тощо) та бути відкалібровані за однакових умов. В процесі зйомки камери повинні перетинати зони видимості одна одної. Такий варіант використання камер дає змогу проводити вимірювання довгих елементів системи тіл та великих робочих просторів.

Під час зборки експериментальної моделі маніпулятора на стенді зневаження було виявлено неспіввісність дотичних елементів у поворотному вузлі конструкції. Відхилення від осі обертання шарніру відбувалося у площині, ортогональній до виду, зображеного на рис. 2. Відповідно, дана похибка не дозволяла утворити спільну площину, утворену торцями секцій маніпулятора. Що унеможливило отримання достовірних результатів та реалізації штатного розкриття маніпулятора. Для усунення даного нахилу за допомогою фотограмметрії було знайдено відстань між контрольними маркерами на верхній та нижній ланках досліджуваного об'єкта. Результати були порівняні

з розмірами у комп'ютерній 3D-моделі та приведені до запроєктованих. Оскільки кут α був значно малим, то зведення його до нуля вимагало доволі точного інструменту, за допомогою якого можливо було б виконати налаштування конструкції.

Також досліджувалась точність вимірювань геометрії системи в залежності від різних положень розкриття маніпулятора: 0° (рис. 3, а)), 90° (рис. 3, б)), 180° (рис. 3, в)).

У початковому положенні моделі маніпулятора спостерігається найвища кількість розпізнаних маркерів, тобто координати положення яких були знайдені, – 96 % від загальної кількості мішеней, які потрапили до фотознімку. Для випадків з проміжним – 90° та кінцевим – 180° положеннями, кількість розпізнаних маркерів становила 87 % та 83 % відповідно. Інші мітки були прив'язані в ручному режимі розпізнання маркерів.

Результати фотограмметричних експериментів показали, що за допомогою цифрової, правильно відкаліброваної камери та, при дотриманні усіх правил проведення фотограмметричного дослідження, вдалося досягти точності вимірювань у (0,1– 0,15) мм на відстані 700,5 мм. У табл. 1 показано результати вимірювань одного з масивів маркерів (контрольної відстані на верхній, рухомій ланці) та похибок його вимірювання в залежності від положень маніпулятора. Похибка вимірювань обчислювалась як різниця між еталонним та обчисленими за допомогою фотограмметрії відстанями. Відхилення може бути зменшено за умови використання більш точного устаткування для зйомки (камера, освітлювальні прилади тощо).

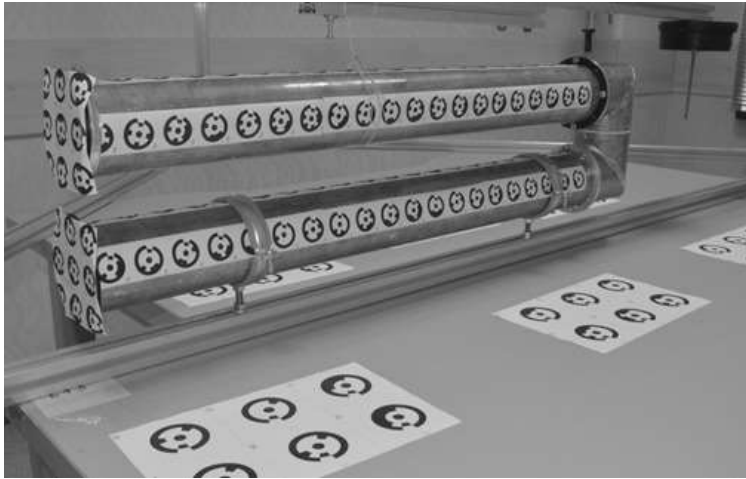
Табл. 1 – Значення похибок вимірювання при різних положеннях маніпулятора

Положення розкриття маніпулятора	Еталонне значення, мм	Вимірювання за допомогою фотограмметрії, мм	Похибка вимірювань, мм
0°	700,5	700,586	0,086
90°	700,5	700,354	-0,146
180°	700,5	700,621	0,121

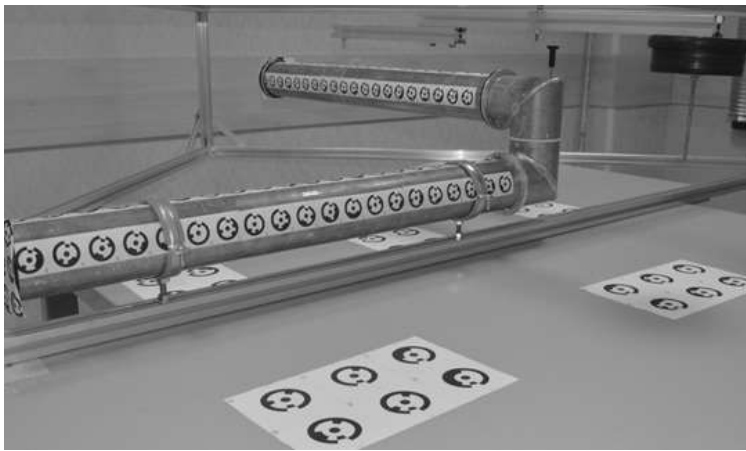
Після калібрування фотограмметричного обладнання методика визначення люфту реалізується таким чином.

На рухомій та нерухомій частинах шарніру вибираються місця розташування маркерів. Вони повинні бути розташовані так, щоб при наявності люфту їх взаємостановище змінювалося (бажано суттєво).

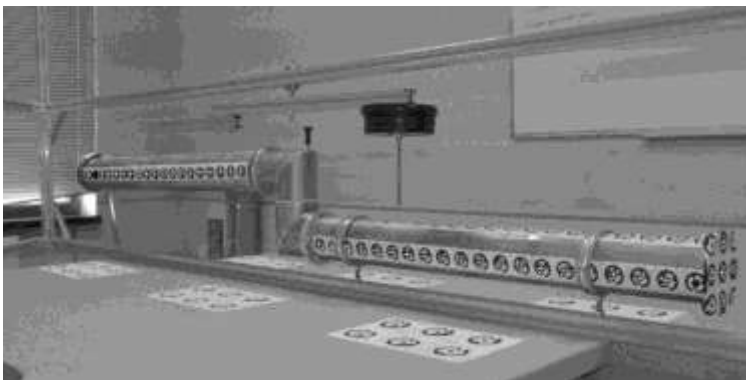
В цьому дослідженні контрольний маркер встановлювався у центрі торця нерухомого штифта, через який проходить вісь обертання шарніру. Відносно цієї точки проводиться моніторинг траєкторії іншого маркера, встановленого на рухомій частині шарніру. Далі при розгортанні натурної моделі маніпулятора (рис. 3 а), б), в)) фотограмметричним способом визначається траєкторія контрольного маркера при реальному фізичному люфті, наявному в шарнірі натурної моделі.



а)



б)



в)

а) 0° ; б) 90° ; в) 180°

Рис. 3 – Дослідження точності вимірювання геометрії дволанкового маніпулятора у різних положеннях

На наступному етапі використовується математична модель динаміки досліджуваного маніпулятора, що враховує в якості окремого параметра люфт в шарнірному з'єднанні. Геометричні та масово-інерційні параметри моделі задаються тими ж, що і в натурній моделі. З використанням математичної моделі проводиться імітаційне моделювання процесу розгортання маніпулятора при різних значеннях люфтів в шарнірі. Розраховується траєкторія руху точок моделі з координатами контрольних маркерів. Значення люфту, як параметра математичної моделі, для якого траєкторії контрольних маркерів, отриманих за допомогою натурної та математичної моделей, співпадають з необхідною точністю, вважаються шуканими.

Знайдене значення люфту далі використовується для розрахунків програмних рухів маніпулятора та при дослідженні стійкості його нелінійної системи керування.

Експериментальна та математична апробація методики проводилася при відстані 4,5 мм між маркерами, що знаходяться в одній площині. Діаметр торця штифта змінювався в залежності від величини люфту: 9 мм, 8,95 мм, 8,9 мм, 8,85 мм, 8,8 мм для варіантів траєкторій без зазору, з зазорами 0,025 мм, 0,05 мм, 0,075 мм, 0,1 мм відповідно. На рисунках 4, 5 наведено траєкторії контрольного маркера, розраховані шляхом імітаційного моделювання за допомогою математичної моделі та отримані фотограмметричним способом на натурній моделі.

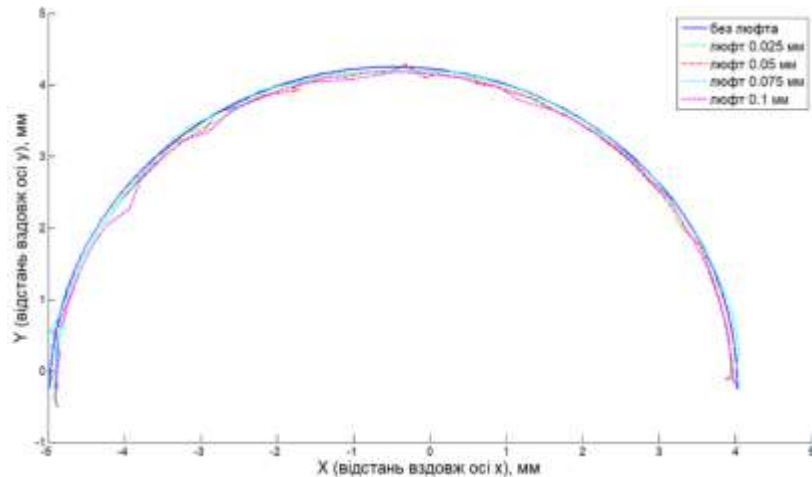


Рис. 4 – Розраховані траєкторії контрольного маркера в залежності від величини люфту у шарнірі

Як видно з рисунку 5, отримана величина люфту складає близько (0,1–0,15) мм. Даний зазор виникає між дотичними поверхнями кулькового підшипника та штифта, неспіввісності рухомих і нерухомих поверхонь.

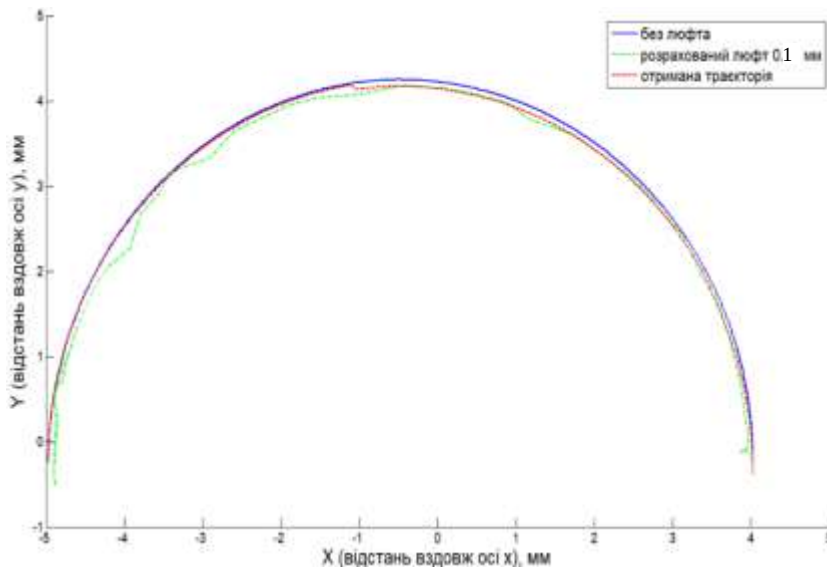


Рис. 5 – Отримана за допомогою фотограмметрії траєкторія контрольного маркера

Запропонована методика без значних змін адаптується для дослідження пружних податливостей елементів конструкції багатоланкових систем в місцях її локального зниження, наприклад у фланцевих з'єднаннях та місць кріплення на ланках допоміжного обладнання.

Висновки. Розроблено та апробовано методику експериментального визначення люфтів та пружних податливостей в шарнірних вузлах транспортних маніпуляторів і штанг космічних апаратів, що базується на фотограмметричному методі. Проаналізовано універсальність методу у застосуванні до різних типів механічних експериментів. З огляду на різногалузеві натурні моделювання, де використовуються методи фотограмметрії, можна зробити висновок, що отримана точність вимірювань та застосовність до різноманітних конструкцій за неоднорідних умов, робить даний метод майже універсальним.

При відпрацюванні запропонованої методики використовувався розроблений та виготовлений дволанковий фрагмент транспортного маніпулятора. Фотограмметричний експеримент, який був проведений на основі відстеження кодованих маркерів, показав високу точність вимірювання геометрії маніпулятора та застосовність для дослідження динаміки трансформованих конструкцій. Реалізовано моніторинг процесу розкладання-складання маніпулятора, що дало змогу виявити неточність зборки та налаштувати систему зневаження стенда.

За допомогою побудованої розрахункової схеми для визначення впливу люфту у шарнірному з'єднанні були отримані траєкторії розворотів секції маніпулятора з урахуваннями різних величин зазорів. Виявлено, що за допомогою фотограмметрії можна визначати траєкторії кожного з контрольних маркерів на шарнірі у процесі всього робочого часу вузла. Це дає змогу уточнювати розрахункові схеми з обчисленими величинами люфтів.

Даний метод вимірювання можна застосовувати при дослідженні динаміки багатогільних чи наддовгих конструкцій, синхронізувавши декілька ци-

фрових камер. В той час, як традиційні вимірювальні прилади мають обмежені зони вимірювання в місцях їх розташування, фотограмметричне обладнання обмежено лише зонами покриття застосованих камер, які є досить великими. Таким чином, можна реалізовувати моніторинг рухомих конструкцій у космосі дистанційно.

У майбутній роботі планується використовувати розроблену фотограмметричну методику як інструмент для дослідження динаміки реальних просторово розвинених багатоелементних конструкцій, таких як роботи-маніпулятори та сітчасті антени космічного призначення, моніторингу їх штатної роботи та усунення неточностей. Окремим напрямком використання методики планується її застосування для дослідження процесів деформування великогабаритних лопатей вітряних турбін.

1. Білоус В. В. Фотограмметрія. Навчальний посібник. К.: КНУ ім. Т. Г. Шевченка, 2021. 137 с.
2. Дорожінський О. Л. Основи фотограмметрії: Підручник. Л.: Вид-во НУ «ЛП», 2003. 214 с.
3. Дорожінський О. Л., Тукай Р. Фотограмметрія: Підручник. Л.: Вид-во НУ «ЛП», 2008. 332 с.
4. Пенков В. О. Фотограмметрія: конспект лекцій для бакалаврів спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій. Х.: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 100 с.
5. Al-Ruzouq R., Dabous S. A., Junaid M. T., Hosny F. Nondestructive deformation measurements and crack assessment of concrete structure using close-range photogrammetry. *Results in Engineering*. 2023. No. 18. Pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101058>
6. Alemdar Z. F., Browning J., Olafsen J. Photogrammetric measurements of RC bridge column deformations. *Engineering Structures*. 2011. No. 33(8). Pp. 2407–2415. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.015>
7. Balanji H. M., Turgut A. E., Tunc L. T. A novel vision-based calibration framework for industrial robotic manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. No. 73. Pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102248>
8. Carmo R. N. F., Valença J., Bencardino F., Cristofaro S., Chiera D. Assessment of plastic rotation and applied load in reinforced concrete, steel and timber beams using image-based analysis. *Engineering Structures*. 2019. No. 198. Pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109519>
9. Chamberlain M. K., Kiefer S. H., LaPointe M., LaCorte P. On-orbit flight testing of the Roll-Out Solar Array. *Acta Astronautica*. 2021. No. 179. Pp. 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.10.024>
10. Dabous S. A., Al-Ruzouq R., Llort D. Three-dimensional modeling and defect quantification of existing concrete bridges based on photogrammetry and computer aided design. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. No. 14(12). Pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102231>
11. Dong G., Zhu Z. H. Autonomous robotic capture of non-cooperative target by adaptive extended Kalman filter based visual servo. *Acta Astronautica*. 2016. No. 122. Pp. 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.02.003>
12. Dong G., Zhu Z. H. Position-based visual servo control of autonomous robotic manipulators. *Acta Astronautica*. 2015. No. 115. Pp. 291–302. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.05.036>
13. Dong G., Zhu Z. H. Vision-based Pose and Motion Estimation of Non-cooperative Target for Space Robotic Manipulators. *AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition*. (San Diego, CA, 2014). San Diego, 2014. Pp. 1–9. <https://doi.org/10.2514/6.2014-4263>
14. Dong M. L., Deng W. Y., Sun Y. N., Wang Y. Q. Photogrammetric Measurement of Deformation of Large Deployable Mesh Microwave Antenna. *Key Engineering Materials*. 2008. No. 381. Pp. 309–312. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.381-382.309>
15. Goda I., L'Hostis G., Guerlain P. In-situ non-contact 3D optical deformation measurement of large capacity composite tank based on close-range photogrammetry. *Optics and Lasers in Engineering*. 2019. No. 119. Pp. 37–55. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.02.006>
16. Guan X., Xu Y., Xing C. A Method for Rapid Measurement of the Deformation and Spatial Attitude of Large Radar Antennas Inside Radomes. *IEEE Access*. 2016. No. 4. Pp. 1–10.
17. Guo X., Yuan Y., Suo T., Su X., Liu Y., Ge Z. A novel temperature-strain synchronous measurement method. *Optics and Lasers in Engineering*. 2021. No. 147. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106723>
18. Gwashavanhu B., Oberholster A. J., Heyns P. S. Rotating blade vibration analysis using photogrammetry and tracking laser Doppler vibrometry. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. No. 76. Pp. 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.02.019>
19. Iwasa T., Ota K., Harada T., Muramatsu R. High-resolution surface shape measurement of parabola antenna reflector by using grating projection method with virtual targets. *Acta Astronautica*. 2018. No. 153. Pp. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.09.031>
20. Koehl M., Delacourt T., Boutry C. Image capture with synchronized multiple-cameras for extraction of accurate geometries. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2016. Vol. XLI-B1. Pp. 653–660. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-653-2016
21. Lee H., Rhee H. 3-D measurement of structural vibration using digital close-range photogrammetry. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013. No. 196. Pp. 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.03.010>

22. Li Y., Zhang J., Han J., Cai Z., Wang Y., Li Y. Research on Flatness Rapid Measurement Technology of Large Deployable Antenna. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 816. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/816/1/012022>
23. Lin G. C., Bai X. H., Tan H. F., Wan Z. M. Surface Accuracy Measurement of a Novel Inflatable Antenna by Photogrammetry. Advanced Materials Research. 2011. Vol. 301-303. Pp. 713–718. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.301-303.713>
24. Liu T., Burner A. W., Jones T. W., Barrows D. A. Photogrammetric techniques for aerospace applications. Progress in Aerospace Sciences. 2012. No. 54. Pp. 1–58. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.03.002>
25. Liu Y., Zhang D., Hu J., Chen W., Gao C., Qiu Z. Design and structural analysis of an inflatable coated fabric manipulation arm. Thin-Walled Structures. 2019. No. 139. Pp. 310–320. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.020>
26. Luhmann T. Close range photogrammetry for industrial applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2010. Vol. 65(6). Pp. 558–569. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003>
27. Lundstrom T., Baqersad J., Niezrecki C., Avitabile P. Using High-Speed Stereophotogrammetry Techniques to Extract Shape Information from Wind Turbine/Rotor Operating Data. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. 2012. Vol. 6(26). Pp. 269–275. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2419-2_26
28. Ma X., Song Q., Jia Q., Fang H., Chen G. Design and experiment for a high precision reflector. IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). 2017. Pp. 42–47. <https://doi.org/10.1109/ICCIS.2017.8274746>
29. Ou Y., Tatsis K. E., Dertimanis V. K., Spiridonakos M. D., Chatzi, E. N. Vibration-based monitoring of a small-scale wind turbine blade under varying climate conditions. Part I: An experimental benchmark. Struct. Control. Health Monit. 2021. Vol. 28(6). Pp. 1–18. <https://doi.org/10.1002/stc.2734>
30. Sabatini M., Monti R., Gasbarri P., Palmerini G. Deployable space manipulator commanded by means of visual-based guidance and navigation. Acta Astronautica. 2013. No. 83. Pp. 27–43. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.10.015>
31. Shankar N. U., Duraichelvan R., Ateequlla C. M. and etc. Photogrammetric Measurements of a 12-meter Preloaded Parabolic Dish Antenna. National Workshop on the Design of Antenna & Radar Systems (DARS), (Bangalore, 13-14 February 2009). Bangalore, 2009. Pp. 1–7.
32. Shen J., Wheeler C., O'Shea J., Ilic D. Investigation of the dynamic deflection of conveyor belts via experimental and modelling methods. Measurement. 2018. No. 127. Pp. 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.091>
33. Sun Z., Zhang Y., Yang D. Structural design, analysis, and experimental verification of an H-style deployable mechanism for large space-borne mesh antennas. Acta Astronautica. 2021. No. 178. Pp. 481–498. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.09.032>
34. Tian Q., Flores P., Lankarani H. M. A comprehensive survey of the analytical, numerical and experimental methodologies for dynamics of multibody mechanical systems with clearance or imperfect joints. Mechanism and Machine Theory. 2018. No. 122. Pp. 1–57. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.002>
35. Uheida K., Deng Y., Zhang H., Galuppi L., Gao J., Xie L., Mohamed A. Determining equivalent-sectional shear modulus in torsion tests for laminated glass beams using photogrammetry method. Composite Structures. 2021. No. 276. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114572>
36. Winthroth J., Schoen L., Ernst B., Seume J. R. Wind turbine rotor blade monitoring using digital image correlation: a comparison to aeroelastic simulations of a multi-megawatt wind turbine. Journal of Physics: Conference Series. 2014. Ser. 524. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012064>
37. Winthroth J., Seume J.R. Wind turbine rotor blade monitoring using digital image correlation: 3d simulation of the experimental setup. Journal of Physics: Conference Series. 2014. Ser. 524. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012064>
38. Wu T., Tang L., Du P., Liu N., Zhou Z., Qi X. Non-contact measurement method of beam vibration with laser stripe tracking based on tilt photography. Measurement. 2022. No. 187. Pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110314>
39. Xiao Z., Liang J., Yu D., Asundi A. Large field-of-view deformation measurement for transmission tower based on close-range photogrammetry. Measurement. 2011. No. 44. Pp. 1705–1712. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.009>
40. Xu Y., Guan F. Structure design and mechanical measurement of inflatable antenna. Acta Astronautica. 2012. No. 76. Pp. 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.02.005>
41. Yang J., Peng H., Zhou W., Zhang J., Wu Z. A modular approach for dynamic modeling of multi-segment continuum robots. Mechanism and Machine Theory. 2021. No. 165. Pp. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104429>

Отримано 18.06.2024,
в остаточному варіанті 26.09.2024