

О.О. Добржанський, к.т.н., доц.
В.А. Кирилович, д.т.н., проф.
А.Р. Кравчук, доктор філософії, ст. викл.
Є.С. Пуховський, д.т.н., проф.
О.В. Підтиченко, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Елементи програмування та 3D-моделювання при автоматизованій атестації метрики промислових роботів

Особливості програмування та 3D-моделювання при автоматизованій атестації метрики ланок маніпуляційних систем практично всіх сучасних моделей одноруких та односхватних промислових роботів (ПР) з використанням відомого програмного середовища CoppeliaSim є змістом цієї роботи. Представлено результати аналізу та перелік існуючих методів та підходів до автоматизованої атестації метрики. Змістовна сутність терміна «атестація метрики», функціональні можливості та доступність щодо вільного використання CoppeliaSim визначило вибір останньої як програмного інструментарію для автоматизації процесу атестації. Це дало можливість виконати просторове 3D-моделювання з повнорозмірними віртуальними моделями кожної із ланок та маніпуляційної системи загалом аналізованих сучасних промислових роботів, що є необхідною складовою процесу атестації. Вказане дозволяє забезпечити надійність та точність при подальшому синтезі необхідних елементів роботизованих технологій, як-то оптимізація розміщення обладнання в робочій зоні ПР, формування оптимальної траєкторії переміщення ланок маніпуляційної системи промислових роботів з робочим інструментом або із захватом при його технологічній взаємодії з об'єктами маніпулювання тощо. Виконано аналіз засобів та інструментів, які дозволяють врахувати вплив насамперед просторових факторів на метрику ПР, таких як геометричні параметри конструкції ПР, інструментів, захвату, можливі обмеження, що зумовлені конструктивно-технологічними особливостями технологічного обладнання. Надані рекомендації щодо формування комплексу моделюючих засобів та використання автоматизованої атестації для підтримки прийняття рішень у реальних умовах проектування / синтезу роботизованих механоскладальних технологій. Це робить процес атестації практично значущим щодо його інженерного використання. Матеріали цього дослідження орієнтовані на їх використання дослідниками, інженерами, студентами та аспірантами, які займаються проблемами та практичними задачами промислової робототехніки в частині їх автоматизованого моделювання та аналізу з подальшим їх використанням під час технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв.

Ключові слова: метрика; моделювання; атестація; автоматизація; робот; технологія.

Актуальність теми. Ефективний сучасний інструментарій для автоматизованої атестації метрики промислових роботів при проектуванні сучасного виробничого середовища на сьогодні передбачає використання **технологій віртуалізації** [1–4]. Такий підхід дозволяє забезпечити **унаочнення** отриманих результатів та й самого процесу моделювання, уможливлення **багатоваріантності початкових даних, автоматизованого виконання** процесу атестації і є на сьогодні загальноприйнятною вимогою при виборі засобів проектування / синтезу роботизованих механоскладальних технологій.

Процес атестації метрики ПР можливо було б виконати у фізичній формі – **фізичне моделювання**, що передбачає вимірювання та контроль певних робочих параметрів, серед яких точність рухів, зміна позиції, відтворюваність траєкторій тощо. У цьому випадку необхідно було б задіяти значний масив різноманітних сенсорів та обладнання. Це можуть бути енкодери, акселерометри, датчики сили, положення тощо [5, 6]. Водночас цей масив сенсорних приладів потребував би використання таких ресурсно затратних процедур, як налаштування та калібрування. Фізична реалізація уможливила б збір реальних даних, але безпосередня обробка та аналіз у будь-якому випадку передбачатиме застосування автоматизованої комп'ютерної обробки. Реалізація багатоваріантності початкових даних при фізичному моделюванні взагалі потребувала б спеціального підходу, наприклад, виготовлення повнорозмірних або масштабованих фізичних моделей технологічного обладнання під час розв'язання задачі атестації метрики.

Актуальність удосконалення процесу атестації метрики ПР також пояснюється цінністю отримуваних результатів для наступних стадій аналізу, які можуть складатися з виявлення аномалій, порівняння зі стандартами, статистичного аналізу тощо. Підсистема автоматичної атестації метрики ПР може бути інтегрована із системою керування ПР. Атестаційні дані можуть бути використані для забезпечення **ефективного управління** ПР безпосередньо під час виконання ним (ПР) технологічних

операцій [7]. Це може враховувати автоматичне коригування параметрів ПР на основі отриманих даних. При автоматизованій атестації метрики ПР можуть також вирішуватися питання *безпеки та надійності* всієї роботизованої технологічної системи загалом. Наприклад, якщо метрика вказує на відхилення від норми, це може вказувати на ймовірну несправність ПР, яка може призвести до аварійної ситуації.

Таким чином, на сьогодні практично безальтернативною є необхідність розвитку систем автоматизованої атестації метрики ПР на базі *технологій віртуалізації та комп'ютерних обчислень*.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. У дослідженнях [1–4] наведено багато прикладів експериментів, проведених у віртуальному просторі, в результаті яких вдається отримати дані про параметри роботи ПР, які можуть бути прийняті як атестаційні і формувати певним чином метрику ПР.

Дослідження [7] показує важливість питання формування метрики з урахуванням просторових параметрів точності можливих переміщень ПР, які використовуються як альтернатива стандартним технологіям обробки деталей за допомогою комплексу верстатів. Розглянуту метрику можливо доповнити елементами, що враховуватимуть робочі зони ПР.

У дослідженні [8, 9] розглядаються стандарти ISO щодо можливості застосування їх для формування метрики точності позиціонування під час використання ПР. Для виконання атестації пропонується отримувати всі дані в ході фізичного експерименту. При цьому дещо ігнорується питання віртуалізації експерименту. Так само не згадується про важливість просторових параметрів робочих зон ПР.

Аналіз матеріалів, що демонструють результати експериментів, які проведені за допомогою спеціалізованих віртуальних середовищ, свідчить, що досить поширеним є середовище моделювання роботизованих комплексів RoboDK [11–17]. Варто зауважити, що RoboDK – це досить багатозадачне середовище з API (application programming interface). Це дозволяє організувати обмін даними між RoboDK та прикладними програмами, написаними з використанням найпоширеніших мов програмування [15]. RoboDK також може бути інтегроване з таким поширеним програмним продуктом для математичного аналізу, як MATLAB [16].

У матеріалах [17] обґрунтовується ідея використання програмного середовища RoboDK для безпосереднього виконання автоматизованої атестації метрики та подаються обов'язкові етапи цього процесу: 1) створення та підготовка 3D-моделі аналізованого ПР (наприклад, із залученням ще одного програмного середовища Solidworks); 2) завантаження 3D-моделі ПР у програмне середовище RoboDK (що вимагає поелементного завантаження окремих ланок ПР, додаткових процедур масштабування, фіксації з'єднань тощо); 3) призначення функціоналу кожній завантаженій ланці 3D-моделі ПР; 4) вибір кінцевого елемента ПР (що може бути крайньою точкою захвату, крайньою точкою захвату з оброблювальною заготовкою, або крайньою точкою інструмента на кінцевому фланці ПР); 5) безпосереднє виконання процедури атестації; 6) візуалізація та узагальнення результатів, розробка рекомендацій щодо практичного застосування ПР.

Дослідження [17, 18] демонструють певну обмеженість щодо свободи застосування саме комплексного аналізу просторових елементів ПР, особливо коли є необхідність складання довільного алгоритму атестації ПР. Потрібно також зазначити, що RoboDK є комерційним продуктом з визначеними ліцензованими умовами застосування. Таким чином, для більш широкого застосування є необхідність пошуку open-source програмних продуктів.

CoppeliaSim [19, 20] – програмний продукт, що знімає певні обмеження щодо ліцензованого використання з дослідницькою метою та є повноцінним середовищем комп'ютерного моделювання роботизованих операцій. Програмне середовище CoppeliaSim, остання версія якого 4.5.1 – rev.1.0., створене та підтримується компанією «Coppelia Robotics AG 2006-2024» (www.coppeliarobotics.com), згідно з документацією [19], власне, і призначене для віртуалізації та моделювання роботи роботизованих пристроїв, розробки алгоритмів управління, прототипізації, верифікації та симуляції функціонування різноманітних пристроїв на базі цифрових двійників (моделей).

Система редактора віртуальних моделей CoppeliaSim має вбудований інтерпретатор мови Lua, яка може бути використана для створення скриптів керування ланками аналізованої моделі ПР, скриптів збору та реєстрації даних результатів моделювання. Наявність вбудованого інтерпретатора Lua дає можливість завжди вносити оперативні зміни у скрипт та запускати його без попередньої компіляції у машинний код. Такий підхід дозволяє використовувати скрипт як елемент дослідження і навіть вносити зміни у початкові дані текстово – без застосування додаткового графічного інтерфейсу користувача – GUI (graphic user interface), хоча можливість створення останнього також закладена в CoppeliaSim. Мова Lua є однією з відомих та розвинутих на цей час мов програмування високого рівня, і за поширеністю та швидкодією її можна порівняти з такими мовами програмування, як C++, C#, Java.

Не менш важливою є роль програмних алгоритмів, закладених у самому редакторі віртуальних моделей CoppeliaSim. Ці алгоритми мають можливість досить повно відтворювати взаємний рух віртуалізованих механічних елементів – ланок ПР, з урахуванням того, що вони поєднані між собою

рухомими з'єднаннями. При цьому зберігається повна відповідність між рухом реального ПР та його віртуальної моделі.

Таким чином, враховуючи спеціалізацію, багатозадачність, відповідність описаним вище критеріям щодо спеціалізованих віртуальних середовищ, саме програмне середовище CoppeliaSim було обране для подальших досліджень за напрямом створення алгоритмів автоматизованого виконання операцій атестації метрики ПР.

Метою статті є висвітлення особливостей програмування та моделювання під час виконання автоматизованої атестації метрики маніпуляційних систем одноруких та односхватних стаціонарних промислових роботів з використанням як інструментарію програмного середовища CoppeliaSim

Викладення основного матеріалу. Фактичним завданням під час проведення досліджень за вказаною тематикою було обрано виконання експерименту, етапи якого можливо зазначити у такому переліку:

- завантаження та розміщення моделі ПР для дослідження у віртуальному середовищі CoppeliaSim;
- створення засобу для задавання початкових даних під час проведення експерименту з побудови робочої зони з урахуванням додаткових умов, наприклад, фіксованого кутового положення захвату (інструменту) ПР;
- складання програми, яка забезпечує виконання алгоритму процесу моделювання, наприклад, переміщення ланок ПР у певному порядку, реєстрацію кутових положень та крайніх точок, уникнення колізій між рухомими частинами та зіткнень зі сторонніми поверхнями тощо;
- перетворення хмари робочих точок на 3D-поверхню робочої зони ПР та збереження цієї поверхні у загальноприйнятому форматі, який застосовується для об'ємних фігур, наприклад, у форматі stl;
- безпосереднє проведення експерименту, тобто виконання програмного алгоритму для розміщеної віртуальної моделі ПР та відображення результатів експерименту.

Завантаження та розміщення моделі аналізованого ПР. Цілком можливою є розробка власної моделі ПР, як це описано в [17]. Для уникнення розробки віртуальної моделі ПР ми використали цифровий двійник ПР ABB IRB 140 robot - CAD – модель ПР (рис. 1), спеціально розроблена компанією «ABB Robotics» [21] для застосування в середовищі CoppeliaSim та подібних. Щодо характеристик моделі ABB IRB 140 ПР, то вони подаються виробником як такі: точність позиціонування – 0,03 mm; кількість осей – 6; максимальна досяжна точка ланкою осі 5 – 0,810 m; вантажопідйомність – 6 kg; додаткове навантаження на підйомних ланках – 1 kg; додаткове навантаження на ланці зап'ястя – 0,5 kg. Віртуальна модель ABB IRB 140 має координати, розмірність яких подано в метрах і цілком відповідає розмірам реального ПР. Це також справедливо для координат самого середовища CoppeliaSim.

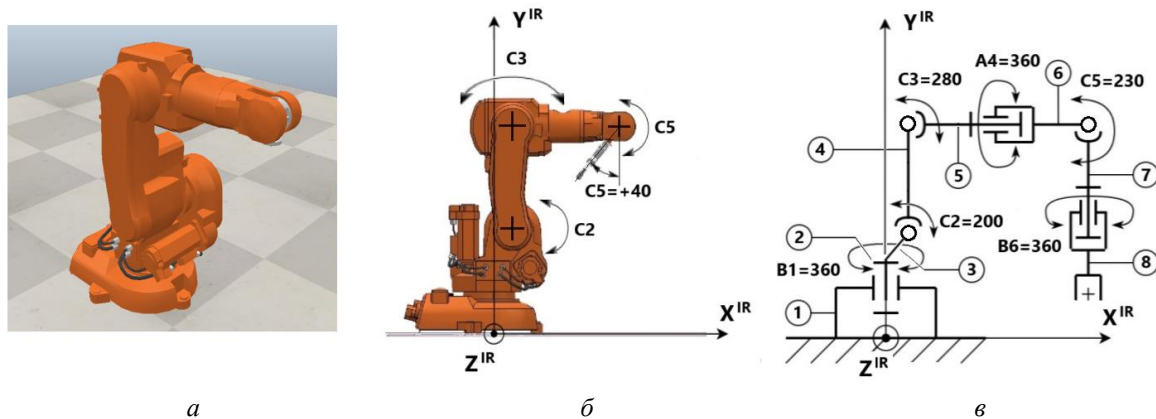


Рис. 1. Віртуальна модель ПР ABB IRB 140: а) загальний вигляд; б) бічна проекція та система координат з урахуванням приєднаного захвату (інструменту); в) фреймова (ниткова) модель кінематичної структури аналізованого ПР

Ця віртуальна модель постачається без конкретного механізму захвату. Тому цифрова модель ПР ABB IRB 140 була доукомплектована авторами віртуальною моделлю роботизованого захвату RG 2 (рис. 2), наданого компанією «On Robot manufacturer» [22].

Перевірено, що подальше застосування моделі захвату в експерименті щодо побудови робочої зони з урахуванням колізій виявляє недолік моделі: можливо обмежити реальні кути повороту ланок ПР, під час їх переміщення, шляхом алгоритму, але неможливо контролювати колізії поверхні захвату з іншими елементами ПР або сторонніми об'єктами, оскільки захват складається з окремих ланок, які вже

вступають у колізії у результаті його збирання. Відтак система колізій CoppeliaSim буде завжди активована. Пропонується подолати це шляхом оточення захвату наблизеними до нього площинами контролю (рис. 2, а).

Якщо у захваті ПР знаходиться деталь, яка за габаритами визначатиме зовнішні границі захвату, то можливо не застосовувати оточуючі захвати площини. Джерелом колізій буде сама деталь, яка має не входити в колізію із захватом, але входити в колізію з усіма іншими елементами моделі. Це можна забезпечити зняттям налаштування контролю колізій для накладок на кінцях пальців захвату.

ПР ABB IRB 140, доповнений захватом RG 2, ми розмістили у центрі віртуальної сцени так, щоб центр системи координат першого поворотного з'єднання В1 збігався з глобальним центром системи координат сцени. Це зроблено для того, щоб координати робочих зон, отримані та оброблені далі відповідно до методики, можливо було повторно розмістити на сцені в тому ж координатному просторі з метою додаткової візуальної верифікації і як кінцевий результат моделювання.

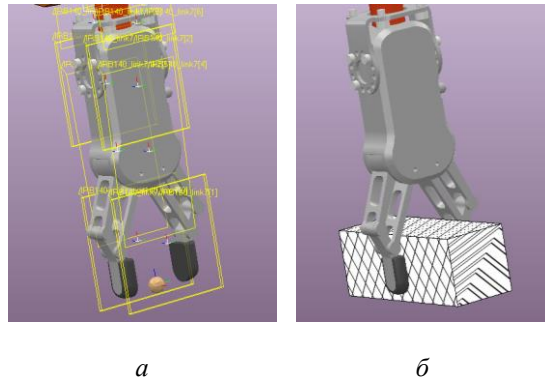


Рис. 2. Віртуальна модель захвату моделі RG 2 ПР: а) загальний вигляд з урахуванням масиву площин контролю колізій; б) загальний вигляд з урахуванням розташування заготовки у захваті

Початкове налаштування моделі ПР. Методика передбачає виконання моделювання для певного, наперед заданого, кутового розміщення захвату у площині повороту головних «ліктьових» поворотних шарнірних з'єднань ПР. Поворот захвату здійснюється за рахунок передостаннього поворотного з'єднання ПР C5 (рис. 1, б, в), яке на практиці саме для цього і призначене.

Методика також передбачає початкове задання користувачем та підтримку програмної стабільності кутового положення захвату відносно глобальної системи координат упродовж всього процесу моделювання. З цією метою на віртуальній сцені було розроблено окремий елемент – задавач кутового положення захвату (рис. 3, а).

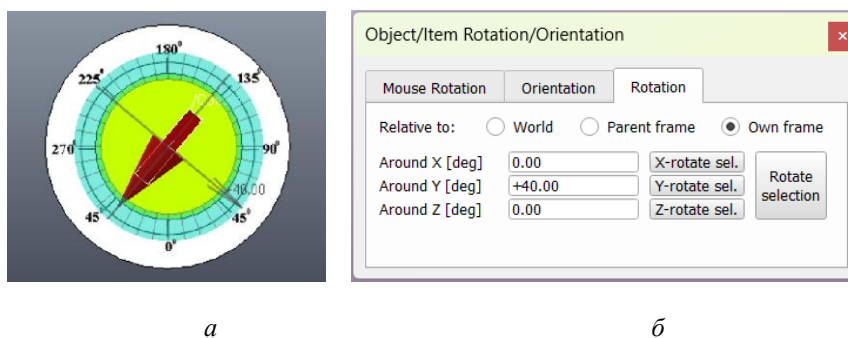


Рис. 3. Задавач кутового положення (орієнтації) зхвату ПР: а) безпосередньо віртуальний об'єкт-задавач; б) параметри числового режиму задавання за кутами навколо осей координат

Це забезпечує певну зручність як для користувача, так і при подальшому функціонуванні моделі. Завдяки цьому вдається уникнути зайвої рутинної взаємодії користувача з віртуальним простором моделі під час задавання кутового положення захвату, а також безпосередньої взаємодії користувача з елементами конструкції ПР із захватом та, як результат, помилкових зміщень інших елементів моделі. Отже, окремий задавач відіграє роль елемента інтерфейсної частини.

Користувач взаємодіє із задавачем, переміщуючи його стрілку на певний кут по круговій шкалі за допомогою протягуючого руху вказівника мишки. Проте мінімальна дискретність такого задавання становить 1 градус.

Користувач також може виконати поворот вказівника на круговій шкалі, скориставшись спеціальним вікном для задачі кутових положень віртуальних елементів, що передбачено у самому середовищі CoppeliaSim. У такому випадку мінімальна дискретність задавання становить 0,001 градуса (рис. 3, б).

Перед початком моделювання також здійснюється задавання кількості дискретних кроків при відтворенні фіксованих кутових положень у межах від 0 до 180 градусів для кожного поворотного з'єднання ПР окремо. Це виконується одним рядком безпосередньо у скрипті: `steps = {0,90,90,0,90,0}`. Деякі позиції задані як 0, оскільки стосуються поворотних з'єднань, які забезпечують повороти ланок ПР в інших площинах від площини повороту головних поворотних з'єднань ПР: B1, A4, B6 (рис. 1, в).

Якщо робоча зона ПР є симетричною, то достатньо отримати напівпростір 0–180 градусів робочої зони. При цьому буде досить чітко на віртуальній сцені унаочнений переріз робочої зони для оцінки його форми.

По закінченню етапу підготовки запускається процес моделювання, яке виконується під керуванням скрипта програми.

Складання скрипта програми на мові Lua. Задачами Lua-скрипта є керування основними етапами експерименту моделювання, які передбачають його виконання в автоматичному режимі.

Нижче стисло наведено визначальні фрагменти розробленого скрипта для кожного з етапів.

1. Виконання скриптом моделювання всіх можливих комбінацій кутів повороту ланок ПР. На початковому етапі потрібно отримати граничні кути взаємного кутового переміщення ланок у поворотних з'єднаннях. Ліміти кутів можливо попередньо задати або за допомогою віконної форми, або програмно у скрипті Lua. Наприклад, масив `jointInit[]` для задавання початкових кутів, а масив `jointRange[]` для задавання меж кутового переміщення відносно початкового положення.

Далі можливо виконувати почергове задавання у автоматичному режимі зміщень відносно початкового кута і у межах кутового переміщення для кожного поворотного з'єднання. Для цього варто використати структуру з вкладених циклів `for-do`, які почергово звертатимуться до елементів масиву з'єднань `jointHandles[]` для задавання поточного кутового зміщення за допомогою команди `sim.setJointPosition()`.


2. Витримка за допомогою команд скрипта фіксованого кутового положення захвату (інструменту) відносно системи координат аналізованого ПР. Під час задання комбінацій перебору кутових положень окремих ланок ПР скрипт одночасно відстежує сталість кутового положення захвату, закріпленого на інструментальному фланці останньої ланки маніпуляційної системи ПР. Для цього за допомогою команд типу `sim.getObjectHandle()` отримується вказівник на об'єкт ПР та на об'єкт задавача кутового положення захвату. Далі за допомогою команди `sim.getObjectMatrix()` потрібно зчитати матрицю кутів задавача в системі координат ПР, командою `sim.getEulerAnglesFromMatrix()` отримати кути Ейлера з матриці задавача і командою `setObjectOrientation()` виконати задавання кутів захвату по кутам задавача.

3. Під час задання комбінацій перебору кутових положень окремих елементів скрипт одночасно уникає виходу за лімітовані кути повороту ланок, контролює колізію між ланками та захватом (інструментом) або перешкодами (у нашому випадку також з площиною встановлення ПР). Для цього застосовуються функції отримання вказівника на блок колізій `sim.getCollisionHandle()` та функція перевірки можливих колізій `sim.readCollision()`.

4. Хмара (множина) точок безколізійної зони досяжності записується у файл для подальшої цільової обробки та аналізу. Тут можливо застосувати команди роботи з файловим потоком `io.open()` та `io.output()` і, виконуючи зчитування безколізійної позиції кінцевого елемента ПР командою `sim.getObjectPosition()`, паралельно виконувати її запис у файловий потік командою `io.write()`.

Одночасно скрипт формує хмару точок робочої зони ПР у вигляді точок досяжності центру захвату навколо ПР з урахуванням відсутності механічних колізій та сталості кутового положення захвату ПР за допомогою команди `sim.getObjectMatrix()`, яка забезпечує отримання матриці положення, та команд формування й відображення віртуального зображення 3D-фігури робочої зони: `sim.getQHull()` та `sim.createShape()`.

5. Коли сформовано 3D-фігуру робочої зони, можливо створити стандартний `.stl` файл, тобто експортувати віртуальну просторову модель робочої зони у файл стандартизованої форми для подальшої обробки в інших застосунках або для зберігання командою `sim.exportShape()`.

Безпосереднє виконання моделювання. Моделювання запускається кнопкою запуску головного скрипта . На завершальному етапі моделювання 3D-фігури робочих зон досяжності захвату ПР, що отримані після обробки хмари робочих точок командами алгоритму та представлені у вигляді `.stl` файлів, завантажуються на віртуальну сцену і поєднуються з 3D-моделлю ПР (рис. 5).

На рисунку 5 різні конструктивно-геометричні елементи подано різними кольорами, а саме: фіолетовим – зона максимальної досяжності центру захвату без урахування фіксованого кутового положення захвату ПР; зеленим – робоча зона з урахуванням безколізійної досяжності центру захвату та

фіксованого кутового положення захвату ПР; сірим – робоча зона з урахуванням безколізійного просторового розміщення об'єкта маніпулювання (заготовки, деталі тощо), яка знаходиться в захваті ПР, який (захват) перебуває у фіксованому кутовому положенні (орієнтації).

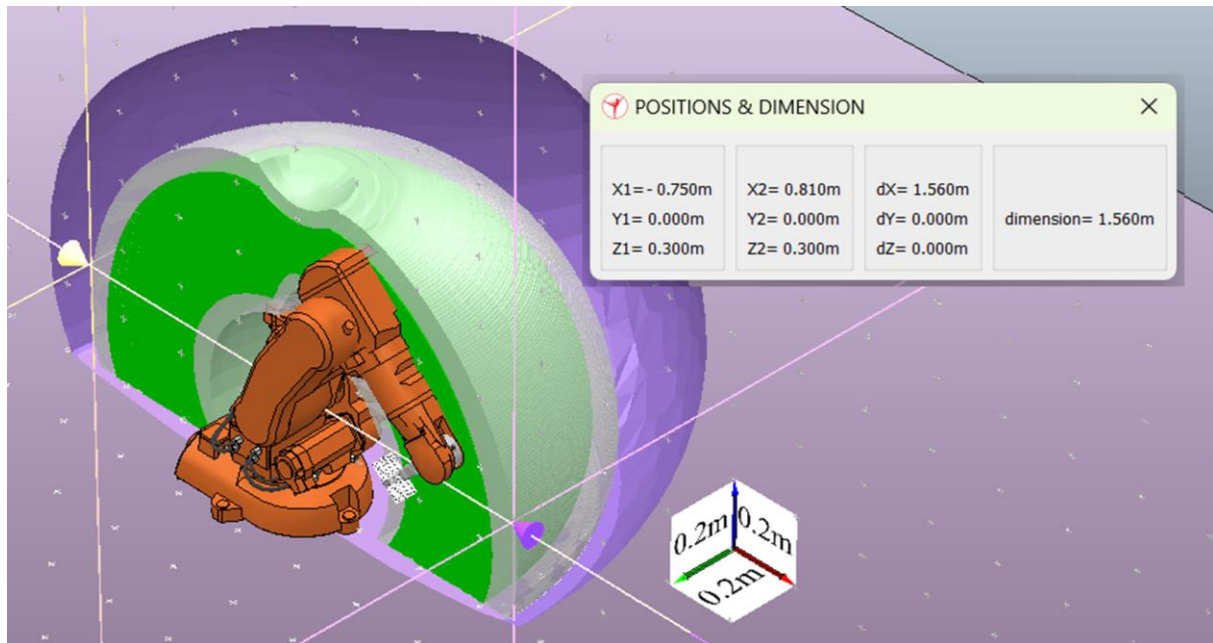


Рис. 5. Інтерфейс відображення результатів моделювання робочих зон ПР з урахуванням кутового положення (орієнтації) захвату ПР

Для уможливлення виконання просторової верифікації у сцені модельного простору нанесено горизонтальну та вертикальну сітку з міток. Напрямні горизонтальних та вертикальних міток добре розрізняються по відображенню (рис. 5). Сітка дозволяє оцінювати дійсні горизонтальні та вертикальні розміри 3D-моделей ПР та отриманих робочих зон.

На сцені простору також розміщено мірний куб (рис. 5, знизу), який показує актуальну відстань у метрах між мітками у трьох просторових напрямках. Таким чином користувач може оцінити розмірності, отриманих 3D-фігур робочих зон ПР.

На сцену можливо завантажити також робочі зони, отримані для різних варіантів фіксованого кутового положення захвату для їх візуальної верифікації. Інструменти руху по 3D-простору сцени моделювання, які вбудовані у CoppeliaSim, дозволяють переглянути робочі зони з різних ракурсів та проєкцій. Нанесена сітка міток дозволяє оцінити значення габаритів або відстані відхилень між окремими 3D-фігурами робочих просторів, або будь-які інші лінійні розміри.

Важливою є можливість отримати 3D-форму робочої зони з урахуванням знаходження у захваті затиснутої певної заготовки, враховуючи при цьому розмір заготовки та можливі колізії при русі цієї заготовки захватом ПР, зокрема колізії заготовки із самими елементами ПР.

Для оцінки розмірів робочих зон відносно базової системи координат ПР була необхідність розробити окремий інструмент, з яким можливо було б взаємодіяти користувачу на віртуальній 3D-сцені. Було прийнято рішення, яке часто практикується в подібних ситуаціях: відображення лише двох координатних вказівників – вказівників розміру (рис. 5). Рухаючи вказівники розміру, користувач має можливість верифікувати координати їх знаходження на сцені і, таким чином, реальні координати робочого простору, оскільки координати відповідають реальним фізичним розмірностям.

Зчитування показників координат здійснюється у окремому розробленому користувацькому вікні POSITIONS & DIMENSION (рис. 5, зверху справа) за напрямками осей: (X1, Y1, Z1) – для маркованого центру системи координат першого вказівника, (X2, Y2, Z2) – для маркованого центру системи координат другого вказівника, (dX, dY, dZ) – значення різниці між відповідними координатами, dimension – значення обчисленого розміру, який приймається як відстань між центрами координат осей. Розмір, очевидно, обчислюється як корінь суми квадратів значень dX, dY, dZ.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результати представлених досліджень свідчать про можливість створення ефективної програмної системи автоматизованої атестації метрики для визначення та оцінки просторових параметрів ПР, які характеризують робочу зону аналізованого ПР з урахуванням просторового положення захвату ПР.

Як середовище реалізації експериментального моделювання використано кросплатформне програмне середовище CoppeliaSim, яке, як перевірено та доведено під час дослідження, відповідає за набором інструментів та функцій вимогам під час побудови системи автоматизованої атестації метрики ПР. CoppeliaSim, окрім безпосередньої візуалізації просторових об'єктів, має функціонал побудови механічно зв'язаних багатоелементних конструкцій та широкий набір необхідних інструментів для керування їх статикою та динамікою, зокрема такі інструменти та функції, застосування яких не потребує знань у галузі програмування.

Завдання алгоритмізації під час проведення експерименту вирішено за рахунок застосування вбудованого в CoppeliaSim інтерпретатора програмної мови Lua. На базі скриптів цієї мови побудовано підсистему управління моделлю ПР при проведенні автоматизованої атестації метрики, результатом якої є просторові моделі робочих зон ПР з урахуванням накладених обмежень щодо кутового положення захвату ПР. На базі інструментів програмного середовища CoppeliaSim вирішено також завдання ініціалізації початкових даних для виконання головного алгоритму за рахунок розробки просторового візуального 3D-об'єкта задавача фіксованого кутового положення захвату.

Показано, що завдання автоматичного формування та візуалізації робочої зони ПР з урахуванням накладених початкових умов може бути вирішено за рахунок застосування спеціальних команд мови Lua для обробки множини точок: задавання кутових положень, контролю колізій, формування 3D-поверхонь за Convex Hull-алгоритмами [23]. Завдання вимірювання розмірів робочих зон вирішено шляхом розробки окремого інструменту, що складається з двох рухомих у 3D-просторі осьових вимірювачів розмірів та вікна відображення значень їх поточних координат та відстані між їх центрами, яка інтерпретується як вимірний розмір.

Основним напрямом подальших досліджень все ж можливо визначити роботу щодо доопрацювання програмного продукту до стану придатності для практичного використання користувачами, тобто до реального інженерного використання в галузі конструювання, враховуючи невідповідності в частині навички програмування, з орієнтацією на вимоги промислових підприємств.

References:

1. Liu, Y., Zhao, L., Liang, M. and Wang, F. (2024), «Kinematics Study of Six-Axis Industrial Robots Based on Virtual Simulation Technology», [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/377133228_Kinematics_Study_of_Six-Axis_Industrial_Robots_Based_on_Virtual_Simulation_Technology
2. Li, L., Neau, M., Ung, T. and Buche, C. (2024), «Crossing Real and Virtual: Pepper Robot as an Interactive Digital Twin», [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/378950579_Crossing_Real_and_Virtual_Pepper_Robot_as_an_Interactive_Digital_Twin
3. Guanopatin, A. and Ortiz, J. (2023), «Meaningful Learning Processes of Service Robots Through Virtual Environments», pp. 59–73, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/375163185_Meaningful_Learning_Processes_of_Service_Robots_Through_Virtual_Environments
4. Ge, Y., Hu, Y. and Sun, X. (2023), «Co-Design of Service Robot Applications Using Virtual Reality», [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/372003848_Co-Design_of_Service_Robot_Applications_Using_Virtual_Reality
5. Liu, R., Wandeto, J., Nageotte, F. et al. (2023), «Spatiotemporal modeling of grip forces captures proficiency in manual robot control», [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/369021403_Spatiotemporal_modeling_of_grip_forces_captures_proficiency_in_manual_robot_control
6. Yamamoto, J., Tahara, K. and Wada, T. (2024), «Effect of Presenting Stiffness of Robot Hand to Human on Human-Robot Handovers», [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/379495985_Effect_of_Presenting_Stiffness_of_Robot_Hand_to_Human_on_Human-Robot_Handovers
7. Lu, Y., Deng, B., Wang, Z. et al. (2022), «Hybrid Physical Metric For 6-DoF Grasp Pose Detection», [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/361479841_Hybrid_Physical_Metric_For_6-DoF_Grasp_Pose_Detection
8. Bamfather, J., Goodfellow, M.J. and Abram, T. (2016), «A performance evaluation methodology for robotic machine tools used in large volume manufacturing», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 37, pp. 49–56, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/281716706_A_performance_evaluation_methodology_for_robotic_machine_tools_used_in_large_volume_manufacturing
9. Slamani, M., Nubiola, A. and Bonev, I. (2012), «Assessment of the positioning performance of an industrial robot», *Industrial Robot*, Vol. 39, pp. 57–68, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/238308032_Assessment_of_the_positioning_performance_of_an_industrial_robot
10. Panneerselvam, S. and Karthikeyan, R. (2020), «Simulation of Robot Kinematic Motions using Collision Mapping Planner using Robo Dk Solver», *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, Vol. 9, pp. 2278–3075, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/348232778_Simulation_of_Robot_Kinematic_Motions_using_Collision_Mapping_Planner_using_Robo_Dk_Solver

11. Chakraborty, S. and Aithal, S. (2021), «ABB IRB 120-30.6 Build Procedure in RoboDK», *International Journal of Management, Technology and Social Sciences*, pp. 256–264, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/357158252_ABB_IRB_120-306_Build_Procedure_in_RoboDK
12. Henriques, J., Neto, E., Paiva, J. et al. (2023), «Trajectory Generation Using RoboDK for a Staubli SCARA TS 60 Robot», pp. 121–126, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/377072550_Trajectory_Generation_Using_RoboDK_for_a_Staubli_SCARA_TS_60_Robot
13. Goryl, K. and Pollák, M. (2023), «Calibration of Panasonic TM-2000 Welding Robot Using Simulation Software», [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/373005487_Calibration_of_Panasonic_TM-2000_Welding_Robot_Using_Simulation_Software
14. Salihovic, I., Skamo, A. and Jokic, D. (2021), «RoboDK to MATLAB Joint Position Transformation», pp. 1–6, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/355600999_RoboDK_to_MATLAB_Joint_Position_Transformation
15. Chakraborty, S. and Aithal, S. (2021), «Forward and Inverse Kinematics Demonstration using RoboDK and C#», *International Journal of Applied Engineering and Management Letters*, pp. 97–105, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/352394242_Forward_and_Inverse_Kinematics_Demonstration_using_RoboDK_and_C
16. Salihovic, I., Skamo, A. and Jokic, D. (2021), «RoboDK to MATLAB Joint Position Transformation», pp. 1–6, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/355600999_RoboDK_to_MATLAB_Joint_Position_Transformation
17. Kyrylovych, V., Kravchuk, A., Melnychuk, P. and Mohelnytska, L. (2021), «Automated Attestation of Metrics for Industrial Robots' Manipulation Systems», [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/349048956_Automated_Attestation_of_Metrics_for_Industrial_Robots'_Manipulation_Systems
18. Kyrylovych, V. and Kravchuk, A. (2023), «A Three-Tiered Approach to The Initial Stages of Design of Collaborative Robotic Technologies», *Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences*, Issue 4, [Online], available at: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2023/09/323-180-187.pdf>
19. CoppeliaSim, [Online], available at: <http://www.coppeliarobotics.com>
20. Chakraborty, S. and Aithal, S. (2021), «An Inverse Kinematics Demonstration of a Custom Robot using C# and CoppeliaSim», *International Journal of Case Studies in Business, IT and Education*, pp. 78–87, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/351566000_An_Inverse_Kinematics_Demonstration_of_a_Custom_Robot_using_C_and_CoppeliaSim
21. ABB, [Online], available at: <https://new.abb.com>
22. OnRobot, «RG2 gripper», [Online], available at: <https://onrobot.com/en/products/rg2-gripper>
23. Escobar, L. and Kaveh, K. (2020), «Convex polytopes, algebraic geometry, and combinatorics», *Notices of the American Mathematical Society*, Vol. 67, No. 8, pp. 1116–1123, [Online], available at: <https://www.ams.org/journals/notices/202008/noti-p1116.pdf>

Добржанський Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4330-0287>.

Наукові інтереси:

- автоматизація;
- приладобудування;
- програмування.

Кирилович Валерій Анатолійович – доктор технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4412-1344>.

Наукові інтереси:

- автоматизація методами роботизації в приладо- та машинобудуванні;
- технологічна підготовка роботизованих механоскладальних виробництв.

Кравчук Антон Романович – доктор філософії, старший викладач Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-8305-2492>.

Наукові інтереси:

- колаборативні механоскладальні технології.

Пуховський Євген Степанович – доктор технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7843-0922>.

Наукові інтереси:

- автоматизація машино- та приладобудування.

Підтиченко Олександр Владиславович – кандидат технічних наук, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації імені проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-1748-8068>.

Наукові інтереси:

- гнучкі виробничі системи та комірки;
- автоматизоване проектування ГВС;
- автоматизація виробництва;
- програмовані логічні контролери.

Dobrzhanskyi O.O., Kurylovych V.A., Pukhovskiy E.S., Kravchuk A.R., Pidtychenko O.V.

Approaches to Programming and 3D Modeling in the Automated Certification of Industrial Robots' Metrics

The focus of this work is on the programming features and 3D modeling in the automated certification of metrics for the manipulative system links of nearly all modern models of single-arm and single-grip industrial robots (IR), utilizing the well-known CoppeliaSim software environment. The results of the analysis and a list of existing methods and approaches to automated metric certification are presented. The conceptual essence of the term 'metric certification,' the functional capabilities, and the availability of CoppeliaSim for free use determined its selection as the software tool for automating the certification process. This enabled the execution of spatial 3D modeling with full-scale virtual models of each link and the manipulative system as a whole of the analyzed modern industrial robots, which is a necessary component of the certification process. This ensures reliability and precision in the subsequent synthesis of necessary elements of robotic technologies, such as optimizing the placement of equipment in the IR's working area, forming the optimal trajectory of movement for the manipulative system's links of industrial robots with working tools or with a grip during their technological interaction with objects of manipulation, and so on. An analysis of the tools and instruments that allow for the consideration of primarily spatial factors on the IR metric, such as the geometric parameters of the IR construction, tools, grip, and possible limitations due to the constructive-technological features of the technological equipment, has been performed. Recommendations are provided for forming a complex of modeling tools and using automated certification to support decision-making in real-world conditions of designing/synthesizing robotic mechanossembly technologies. This makes the certification process practically significant regarding its engineering use. The materials of this study are intended for use by researchers, engineers, students, and postgraduates who deal with problems and practical tasks of industrial robotics in terms of their automated modeling and analysis, with subsequent application in the technological preparation of robotic mechanossembly productions.

Keywords: metrics; modeling; certification; automation; robot; technology.

Стаття надійшла до редакції 05.03.2024.