

ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

УДК 621.865.8

КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБОК ПОЗИЦІОНУВАННЯ РОБОТА- МАНІПУЛЯТОРА В РОБОЧОМУ ПРОСТОРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Соколова О. А., Вислоух С. П., Антонюк В. С., Клочко Т. Р.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: SOA-VP-pbf21@iit.kpi.ua; t.klochko@kpi.ua

Промислові роботи широко використовують на сучасних підприємствах. Хоча висока повторюваність промислових робіт може задовольнити більшість потреб процесу, їх низька абсолютна точність позиціонування в робочому просторі не може задовольнити вимоги деяких високоточних завдань. Прикладом є те, що дія робота покладається на вибіркові дані в реальному часі, а не на змодельовані дані. Низька абсолютна точність робота до позиціонування в робочому просторі обладнання призводить до того, що робоча продуктивність значно відрізняється від очікуваної. Тож метою даної статті є аналіз розробленої програми підвищення точності позиціонування робота-маніпулятора в реальному часі за умови компіляції з програмами інтеграційних проєктів автоматизації.

У статті розглянуто деформацію ланок, що є однією з виробничих похибок робота-маніпулятора. Дія прикладених зусиль на з'єднаннях і ланках може по-різному впливати на деформацію пози робота, а ці зміни складно врахувати за допомогою лінійної алгебри, тому останнім часом зріс попит на "офлайнове програмування", що дозволить змодельовати роботу робота-маніпулятора зі зміною у часі і матиме прийнятну ціну. Тому було розглянуто застосування штучних нейронних мереж на основі алгоритмів оптимізації для компенсації абсолютної похибки. Після аналізу існуючих технічних рішень було обрано генетичний алгоритм, що задовольняє умови простоти реалізації, зрозумілості, відсутність зайвих обчислень, гнучкість до використуваних типів даних. Також в роботі представлено загальну схему алгоритмів оптимізації параметрів штучних нейронних мереж та ітеративний процес пошуку оптимальних значень гіперпараметрів із використанням генетичного алгоритму.

Після вибору методу моделювання та алгоритму оптимізації, протестовано розроблений алгоритм на відкритому наборі даних. Отримані результати показали підвищення точності від 22 до 77 % (точності позиціонування без застосування компенсаційної методики). Отже, в даній статті описано метод підвищення абсолютної точності позиціонування за умови компіляції з програмами інтеграційних проєктів автоматизації. Результатом роботи є програма, що заснована на вищезгаданому методі.

Ключові слова: генетичний алгоритм; штучні нейронні мережі; точність; позиціонування; технологічне обладнання; робот-маніпулятор.

Вступ. Постановка проблеми

В останні роки зростає попит усередині приладобудівної, автомобільної, авіабудівної галузей промисловості на більшу точність робіт [1, 2]. Завдяки підвищенню точності і в позиціонуванні, і в орієнтації об'єктів у робочому просторі технологічного обладнання, шарнірна рука робота може бути застосованою до набагато ширшого кола завдань, які колись були обмежені нестандартними машинами, включаючи високоточне складання, двостороннє свердління та кріплення, видалення матеріалу. Подібні проблеми стосуються і автоматизованого контролю в процесі виробництва [3, 4]. Порівняно з нестандартними машинами, шарнірна

рука робота може охоплювати відносно велику робочу зону, здатна переміщуватися вздовж сильно вигнутих поверхонь і в тісних просторах. Оскільки маса робота відносно низька, вимоги до фундаменту (наприклад, несучої конструкції) робіт мінімальні. За допомогою цих переваг роботи надають виробникам переваги і у підвищенні гнучкості, і в зниженні витрат.

Точність робота визначається як вимірювання відхилення між заданим і досягнутим роботом положеннями і орієнтацією 6-D (шість ступенів свободи) [5]. Точність також може відображати різницю між заданими та фактичними швидкостями, прискореннями, силами та моментами. Підви-

щення точності (тобто зменшення різниці між заданими та фактичними значеннями) дозволяє швидко та гнучко використовувати промислових роботів внаслідок швидкого перенесення або завантаження нових програм роботи робота. Це дозволяє швидко замінити робота у виробничій системі шляхом скорочення або виключення процесів повторного навчання. Висока точність роботи під час виробництва гарантує, що деталі виготовляються точно з передбачуваними результатами навіть після внесення змін у процес. Висока точність також має вирішальне значення для додатків, керованих даними, таких як програми, розроблені з використанням методів автономного програмування [6]. Висока точність дозволяє використовувати автономні програми, щоб мінімізувати час простою робота (наприклад, трудомістке завдання навчити робота свердлити тисячі отворів у фюзеляжі літака). Вимоги ринку до варіацій дизайну та малосерійного виробництва спонукали користувачів та інтеграторів більше дивитися на «офлайнове програмування». Використання роботів для контролю в процесі виконання завдання — це ще одна програма, яка вимагає високої точності позиціонування робота, оскільки робот є важливою частиною вимірювальних операцій [7, 8]. Існує велика кількість автомобільних та аерокосмічних застосувань, які в даний час використовують і можуть отримати користь від гнучкості робототехніки з високою точністю для проведення вимірювань на виготовлених деталях.

Високоточні роботи стають цінними інструментами для багатьох із вищезгаданих процесів, що призводить до істотної економії витрат для обробної промисловості [9].

Погіршення точності позиціонування роботи технологічної системи виготовлення приладу може призвести до зниження якості виготовлення та ефективності виробництва. Роботи використовуються для точного переміщення, маніпулювання та/або виконання процесу (наприклад, зварювання, свердління, складання) відповідно до певних специфікацій.

Точність позиціонування роботи в робочому просторі системи технологічного обладнання залежить від фактичної геометрії та положення компонентів у клітинці робота. Незначні зміни довжини руху, інструментів та об'єктів (геометричні помилки) у робочому просторі обладнання можуть спричинити неточності позиції центру інструменту (ТСР), що використовуються в існуючих програмах роботів. Існують також негеометричні помилки, такі як неідеальний рух з'єднань, а також прогини конструкції та з'єднань внаслідок зовнішнього навантаження або сили тяжіння. Провисання від маси зв'язку та корисного навантаження може створити значні помилки в ТСР, якщо немає компенсації.

Важливо розуміти, що похибки позиціонування наявні навіть у найновішого робота і з часом

вони можуть тільки збільшуватися. Погіршення точності важко виявити, коли система все ще працює, тому доцільним буде розробити програму для компенсації похибок позиціонування за тривалої роботи маніпулятора без технічного обслуговування.

Аналіз деформації ланок

Загальний промисловий робот показаний на рис. 1. Коли до робота прикладаються сили та враховується сила тяжіння ланки, у кожному з'єднанні та ланці створюються балансові сили та моменти.

Згідно з теоріями фізики твердого тіла, механіки матеріалів, теорії механічної обробки матеріалів, якщо на об'єкт діють сили та моменти, його форма буде змінена, наприклад, розтягнення, стиск, зсув, кручення, вигин [10].

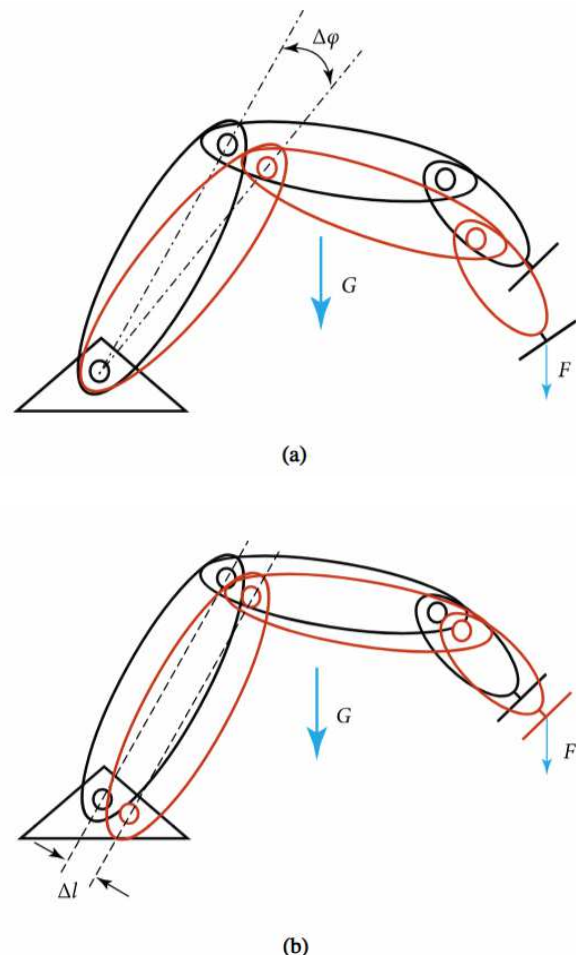


Рис. 1. Два види деформації в суглобі [9]: (а) Поворотна деформація в місці з'єднання; (б) Лінійна деформація в місці з'єднання

Дія прикладених зусиль на з'єднаннях і ланках робота є складнішою, ніж результати теоретичного аналізу, оскільки з'єднання роботів насправді складається з багатьох елементів, наприклад, двигунів, приводних валів, шестерень і редуктора.

Отже, деформація роботів насправді є комбінацією п'яти вищенаведених деформацій.

На рис. 1 показано два типи деформації, які включають обертальну деформацію навколо осі ланок і лінійну деформацію вздовж певного напрямку. З'єднання робота відхиляється на кут $\Delta\varphi$ навколо своєї осі, а його лінійна деформація Δl відбувається під дією сили тяжіння G і кінцевого навантаження F .

Керування на основі внутрішніх та точних параметрів

Оскільки при роботі з певним роботом, його структура вже визначена, а параметри також вже зберігаються у внутрішньому контролері робота, при цьому контролер виконуватиме обчислення, щоб керувати тілом робота за цими попередньо збереженими параметрами [11]. Це процес виконання обчислень на основі внутрішніх параметрів (IPBC). Якщо робот має власні реальні параметри, які відрізняються від попередньо збережених параметрів – що обов'язково станеться, реальна позиція терміналу буде відрізнятися від розрахованої контролером пози, і їх різницею буде абсолютна похибка позиціонування в робочому просторі обладнання.

Для більш точного керування роботом необхідні дві кінематичні функції, які можуть викону-

вати більш точні дії. Робот перейде до точного позиціонування, створеного цими новими функціями, і ці два обчислення виконуються на основі точних параметрів (PPBC). Усі результати обчислень PPBC можуть дозволити роботу досягати цільової позиції терміналу з малою похибкою або ж навіть нульовою похибкою. Метод калібрування є PPBC, і будь-які компенсаційні функції є PPBC, лише якщо вони можуть дати точні результати [12].

Зазвичай інформація передається між програмою управління і роботом. Легко зрозуміти, що контролер в роботі отримує команду або інформацію, що містить цільову позицію, і дозволяє своєму тілу діяти відповідно до цільової пози, виконуючи IPBC у своєму контролері.

Оскільки внутрішні параметри не збігаються з його фактичною (реальною) формою, дія робота містить нестабільну похибку. Щоб зменшити похибку за умови, що ми не можемо змінити внутрішні параметри робота, потрібно додати крок компенсації, щоб підвищити точність відпрацювання просторово-часових координат траєкторії руху робочих органів маніпулятора в просторі обладнання. Потік інформації з кроком компенсації показаний на рис. 2.

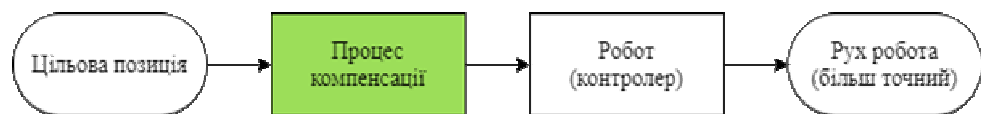


Рис. 2. Інформаційний потік з кроком компенсації

Мета цієї компенсації полягає в тому, щоб робот міг виконувати власні IPBC і діяти з досить низькою похибкою.

Процес компенсації – це процес пошуку способу, за якого робот діє під правильними кутами обертання, а також знаходження правильної кінцевої пози, щоб контролер міг обчислити оптимальні кути повороту із заданої пози. Оскільки фальшивої пози не існує, і вона має наштовхнути робота на правильний кут, фальшиву позу називають спонукаючою, а шлях, що складається зі спонукаючих поз, називається індукуючим шляхом.

Індукуюча поза розраховується на основі цільових кутів повороту та попередньо збережених параметрів, тому контролер робота може точно розрахувати цільові кути повороту на основі власного IPBC. Кути повороту цілі розраховуються за кінцевою позицією цілі та PPBC.

Застосування штучних нейронних мереж на основі алгоритмів оптимізації

Алгоритми оптимізації допомагають мінімізувати або максимізувати цільову функцію, залежну від внутрішніх параметрів моделі, що викорис-

туються в моделі при обчисленні цільових значень при множині вхідних даних. Наприклад, для пошуку оптимальних бінарних розкладів використовуються двійковий алгоритм оптимізації пошуку повернення і двійковий метод рою частинок [13, 14]. Ці методи алгоритму є потужними в оптимізації та мають швидку збіжність до рішення. Крім того, розробка вдосконаленого контролера розкладу на основі алгоритму оптимізації пошуку повернення та методу рою частинок із використанням штучних нейронних мереж забезпечують найкращу продуктивність за різних умов навантаження [15, 16].

Алгоритми оптимізації працюють як методи прогнозування, щоб знайти найкращі значення ваги для нейронних мереж, розроблених для ефективно роботи системи. У цій роботі описано алгоритм для оптимізації штучної нейронної мережі на основі генетичного алгоритму для пошуку оптимальних значень кількості шарів, нейронів у прихованих шарах, а також найкращого значення швидкості навчання. Розширений опис використання різних алгоритмів оптимізації для визначен-

ня параметрів штучних нейронних мереж (ШНМ) наведено в роботі [17].

Алгоритми застосовують обмеження, наприклад, максимальна та мінімальна кількість нейро-

нів у кожному прихованому шарі та швидкість навчання. На рис. 3 представлено загальну блок-схему оптимізації гіперпараметрів ШНМ.

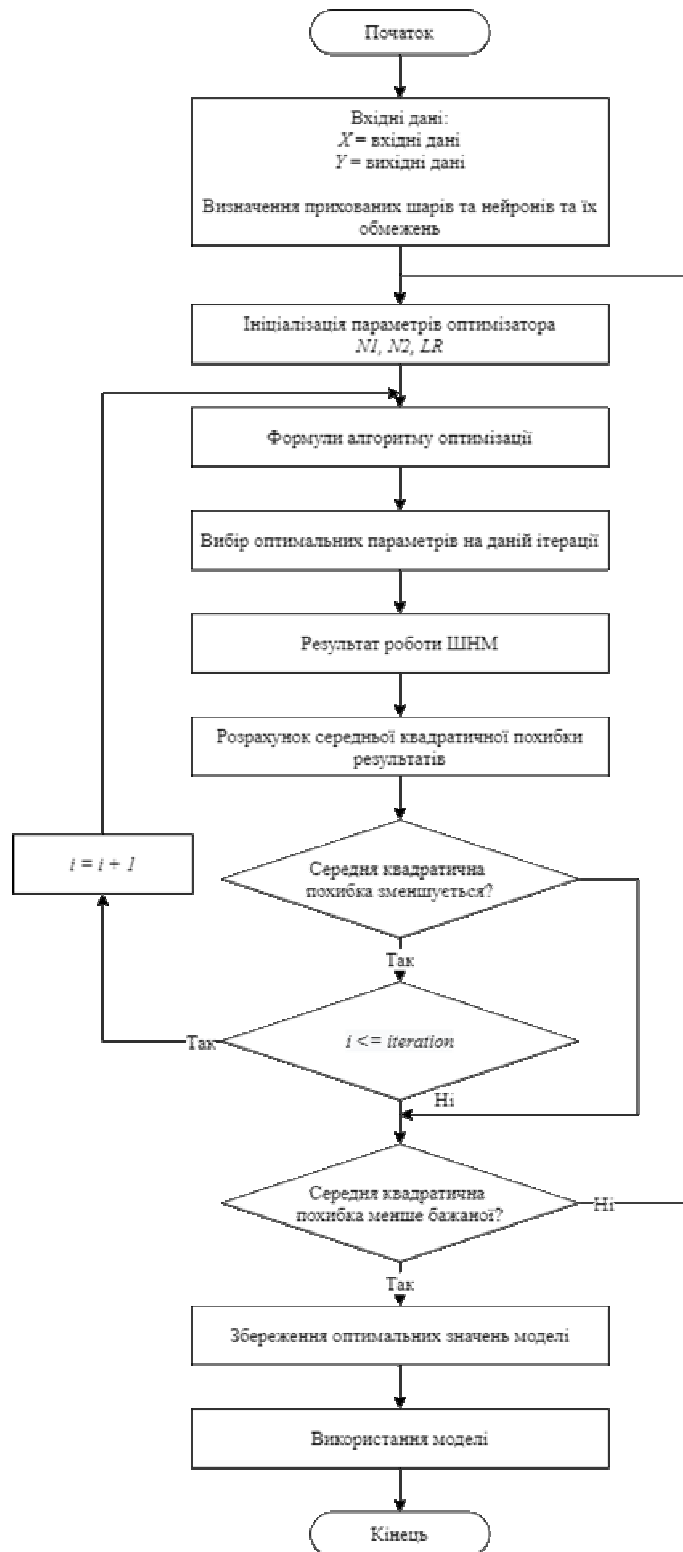


Рис. 3. Загальна схема алгоритмів оптимізації параметрів штучних нейронних мереж для 100 ітерацій

Генетичний алгоритм обрано з огляду на наступні його переваги при застосуванні в реальних технологічних процесах [18]:

- Не потребує розрахунків з лінійної алгебри, тільки обчислення. Єдині розрахунки – це прямий прохід через штучну нейронну мережу.

- Алгоритм досить гнучкий, що дозволяє ним досить легко маніпулювати, та адаптувати до нього велику кількість тестів. Це ключова перевага, що переконує в тому, що використання генетичного алгоритму надалі буде більш розповсюдженим.

- Алгоритм є досить легким для розуміння та реалізації. Це вагома перевага, оскільки використання штучних нейронних мереж полягає у вико-

ристанні технологій, що допомагають отримати уявлення про важливі питання.

Але все ж є недолік, який присутній у багатьох алгоритмах оптимізації, що використовуються для визначення параметрів ШНМ, - це час його виконання. На жаль, час виконання не можна взяти заздальгідь і іноді потрібно 20 годин для отримання оптимальних параметрів нейронної мережі. Це явище виникає через потребу у навчанні певної кількості (популяції) ШНМ на кожній ітерації. Для більшого розуміння даний процес представлено на рис. 4.

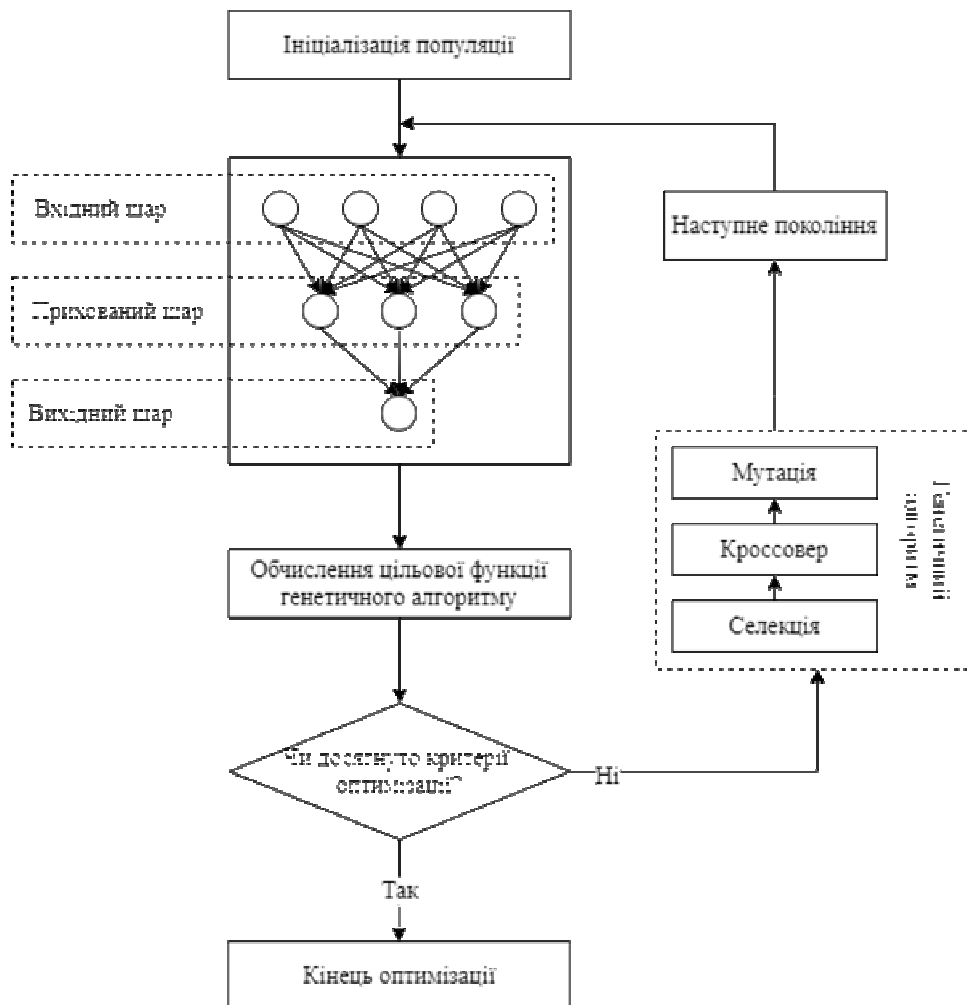


Рис. 4. Ітеративний процес пошуку оптимальних гіперпараметрів із використанням генетичного алгоритму

Практичний метод компенсації

У всіх алгоритмах на основі алгоритмів оптимізації встановлюється 100 ітерацій, а розмір популяції становить близько 20. Середня квадратична похибка (MSE) є цільовою функцією, яка покращує продуктивність ШНМ внаслідок зменшення функції помилки. В даній роботі оптимізація адаптована також для пошуку кількості нейро-

нів у прихованих шарах, кількості прихованих шарів, функцій активації та оптимальної швидкості навчання. Алгоритми використовують випадкові параметри випробування ШНМ як початковий етап попередньої ітерації для оцінки цільової функції. Кожна проміжна ШНМ навчається протягом 1000 епох для оцінки мінімальної цільової функції.

Вхідні дані включають в себе час дії робота з моменту останнього калібрування, цільові точки кожної ланки робота, їх швидкість переміщення та струм, а також температуру кожного з'єднання. Вихідними даними є актуальні позиції кожної з ланок. Набір даних [19] включає 7900 вимірів із частотою 125 Гц. Навантаження маніпулятора складає 700 грамів. Швидкість дорівнює половині від максимальної. Для дослідження використовується робот UR5, що має 6 ступенів свободи, максимальне можливе завантаження – 5 кг, радіус робочого поля – 850 мм. Вимірювання проводилися на 6 ланках робота-маніпулятора. Компенсація точності позиціонування кожної ланки виконувалася із врахуванням зміненого розташування попередньої, тобто із врахуванням покращення точ-

ності попередньої ланки. Розташування ланок робота UR5 представлено на рис. 5.

Як видно з графіку на рис. 6, в результаті тестування описаного методу точність позиціонування робота-маніпулятора з шістьма ступенями свободи значно збільшилася. Середнє квадратичне відхилення до компенсації складало $4.02566 \cdot 10^{-5}$, після ж компенсації складає $4.68348 \cdot 10^{-6}$. Тобто похибка зменшилася на 88 %.

Ця штучна нейронна мережа навчалася і тестувалася на даних, що включали час функціонування робота-маніпулятора після калібрування, що робить можливим її використання для компенсації похибок в реальному часі без потреби у перенавчанні після калібрування.

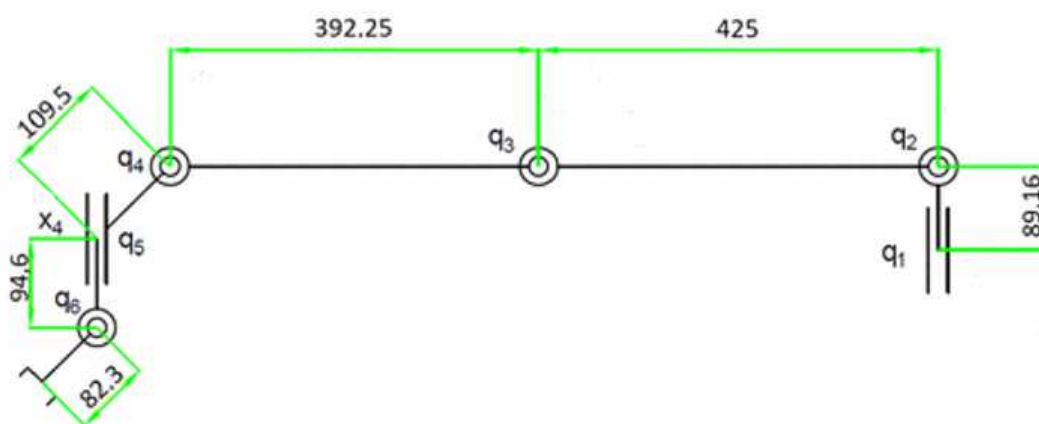


Рис. 5. Розташування ланок робота-маніпулятора UR5, де: q1 – перша ланка (основа), а q6 – остання ланка (маніпулятор)

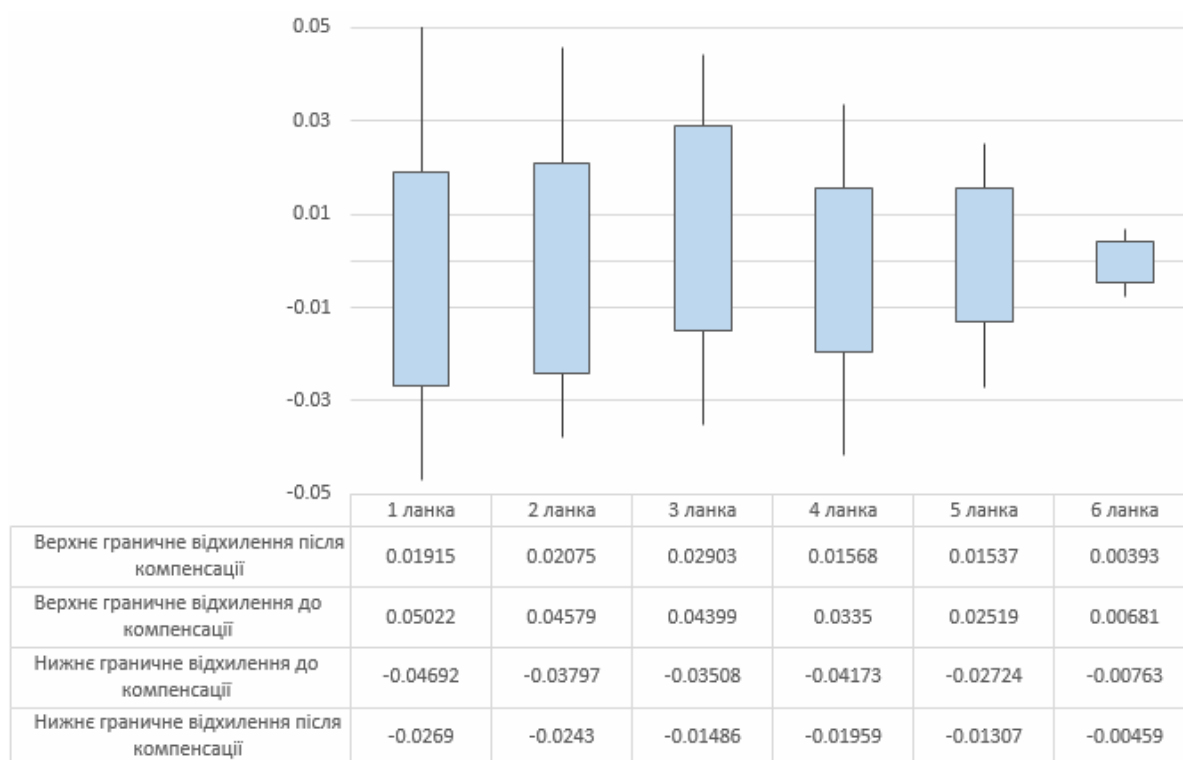


Рис. 6. Гістограма зменшення похибки внаслідок використання методу компенсації

Висновки

Аналіз основних сучасних засобів інтелектуалізації роботи промислового обладнання показав перспективність застосування роботів-маніпуляторів у приладобудівній промисловості при виготовленні точних виробів.

Визначені основні підходи з огляду на застосування штучних нейронних мереж до створення інтелектуальних систем виготовлення приладобудівної продукції в умовах автоматизації технологічних процесів із застосуванням роботів-маніпуляторів.

Точність позиціонування роботів-маніпуляторів – досить складна та комплексна тема, що потребує багатокритеріального підходу. У цій роботі обґрунтовано один з можливих методів підвищення точності просторових координат позиціонування роботів-маніпуляторів в робочому просторі обладнання. Тестування описаного методу показало його дієвість – підвищення точності від 22 до 77 %. Застосування таких розробок сприяє підвищенню точності роботи автоматизованого виробничого обладнання при обробці деталей, в складальних процесах виготовлення точних автоматизованих приладів.

Подібні маніпулятори доцільно також використати в різних галузях промисловості, в тому числі медичної промисловості при створенні біонічних пристроїв, штучних кінцівок при протезуванні та відновленні втрачених функцій біотехнічного об'єкта.

Перспективні дослідження можуть бути спрямовані на комбінування алгоритмів оптимізації для пошуку кращих параметрів моделі робота-маніпулятора, створення алгоритмів роботи таких роботів у складі технологічного обладнання.

Література

- [1] K. Young, C. G. Pickin, "Accuracy assessment of the modern industrial robot", *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 27, no. 6, pp. 427–436, 2000. DOI: 10.1108/01439910010378851.
- [2] A. Buschhaus, A. Blank, C. Ziegler, and J. Franke, "Highly Efficient Control System Enabling Robot Accuracy Improvement", *Procedia CIRP*, vol. 23, pp. 200–205, 2014.
- [3] G. S. Tymchyk, V. I. Skytsiouk, T. R. Klotchko, P. Komada, S. Smailova, & A. Kozbakova, "Modelling of the technological objects movement in metal processing on machine tools", *Mechatronic Systems II. Applications in Material Handling Processes and Robotics*, Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book (2021), Boca Raton, London, New York, Leiden, pp. 267–278, DOI: 10.1201/9781003225447-24.
- [4] V. I. Skytsiouk, & T. R. Klotchko, "Measurement errors of the shape's parameters of detail's surface by optical instruments", *Bulletin KPI. Series Instrument Making*, is. 59(1), pp. 71–78, 2020. DOI: 10.20535/1970.59(1).2020.210020.
- [5] B. Shirinzadeh, "Repeatability and accuracy – who cares and why?", *Industrial Robot*, vol. 27, no. 4, pp. 250–251, 2000.
- [6] Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, and J. Norrish, "Recent progress on programming methods for industrial robots", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 2, pp. 87–94, 2012.
- [7] I. Edinbarough, R. Balderas, S. Bose, "A vision and robot based on-line inspection monitoring system for electronic manufacturing", *Computers in Industry*, vol. 56, no. 8–9, pp. 986–996, 2005. DOI: 10.1016/j.compind.2005.05.022
- [8] C.-C. Ngan, H.-Y. Tam, "A non-contact technique for the on-site inspection of molds and dies polishing", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155–156, pp. 1184–1188, 2004. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.263
- [9] R. Devlieg, "Expanding the Use of Robotics in Airframe Assembly Via Accurate Robot Technology", *SAE International Journal of Aerospace*, vol. 3, no. 1, pp. 198–203, 2010. DOI: 10.4271/2010-01-1846
- [10] R. Denzer, F. J. Barth, P. Steinmann, "Studies in elastic fracture mechanics based on the material force method", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 58, no. 12, pp. 1817–1835, 2003. DOI: 10.1002/nme.834
- [11] Y. Li, G. Gao, F. Liu, "Positioning Error Compensation for Industrial Robots Based on Stiffness Modelling", *Complexity*, vol. 2020, pp. 1–13, 2020. DOI: 10.1155/2020/8850751
- [12] G. Shi, S. Zhao, B. Hu, "A Practical Method to Improve Absolute Positioning Accuracy of Industrial Robot", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1453, pp. 012121, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1453/1/012121
- [13] M. Abdolrasol, "Artificial Neural Network Based Particle Swarm Optimization for Microgrid Optimal Energy Scheduling", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 11, pp. 12151–12157, 2021. DOI: 10.1109/tpel.2021.3074964
- [14] M. Abdolrasol, "Energy Management Scheduling for Microgrids in the Virtual Power Plant System Using Artificial Neural Networks", *Energies*, vol. 14, no. 20, pp. 6507, 2021. DOI: 10.3390/en14206507
- [15] M. A. Hannan, "Binary Particle Swarm Optimization for Scheduling MG Integrated Virtual Power Plant Toward Energy Saving", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107937–107951, 2019. DOI: 10.1109/access.2019.2933010
- [16] M. S. Ahmed, "Real time optimal schedule controller for home energy management system using new binary backtracking search algorithm", *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 215–227, 2017. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.052

- [17] M. Abdolrasol, "Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review", *Electronics*, vol. 10, no. 21, p. 2689, 2021. DOI: 10.3390/electronics10212689
- [18] V. Sim. Using Genetic Algorithms to Train Neural Networks. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/using-genetic-algorithms-to-train-neural-networks-b5ffe0d51321>
- [19] Degradation Measurement of Robot Arm Position Accuracy. NIST. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/el/intelligent-systems-division-73500/degradation-measurement-robot-arm-position-accuracy> ..

UDC 621.865.8

O. A. Sokolova, S. P. Visloukh, V. S. Antoniuk, and T. R. Klotchko*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***COMPENSATION OF ROBOT-MANIPULATOR POSITIONING ERRORS IN WORK SPACE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT**

Industrial works are widely used in modern enterprises. Although high repeatability of industrial robots can satisfy most process needs, their low absolute positioning accuracy in the workspace cannot meet the requirements of some high-precision tasks. An example, is that the action of a robot relies on real-time sample data rather than simulated data. The low absolute robot's accuracy to positioning leads to the fact that work productivity is significantly different from what is expected. Therefore, the purpose of this paper is to analyze the developed program to increase the accuracy of robot-manipulator's positioning in real time under the compilation with the programs of integration automation projects.

The paper considers the deformation of the links, which is one of the robot manipulator's production errors. The effect of applied forces on the connections and links can affect the deformation of the robot posture in different ways, and these changes are difficult to account for using linear algebra, so recently the demand for "offline programming" has increased, which will allow you to simulate the work of a robot manipulator with a change in time and will have a reasonable price. Therefore, the application of artificial neural networks based on optimization algorithms to compensate for absolute error was considered. After analyzing the existing technical solutions, a genetic algorithm was chosen that satisfies the conditions of ease of implementation, clarity, lack of redundant calculations, flexibility to the data types used. The paper also presents a general scheme of algorithms for optimizing the parameters of artificial neural networks and an iterative process of finding optimal values of hyperparameters using a genetic algorithm.

After choosing the modelling method and optimization algorithm, the developed algorithm on an open data set was tested. The obtained results showed an increase in accuracy from 22 to 77% (positioning accuracy without the use of compensation methods). Therefore, this article describes a method of increasing the absolute accuracy of positioning under the condition of compilation with programs of integration automation projects. The result is a program based on the above method.

Key words: genetic algorithm; artificial neural networks; precision; positioning; technical equipment; robot manipulator.

*Надійшла до редакції
25 квітня 2022 року*

*Рецензовано
18 травня 2022 року*