ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ

№ 1 (4), 2021

М. І. Вігуро

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, maksym.vihuro.mnee.2019@edu.lpnu.ua

А.В. Маляр

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, andrii.v.maliar@lpnu.ua

РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ КІНЕМАТИКИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО МАНІПУЛЯТОРА З ШІСТЬМА СТУПЕНЯМИ СВОБОДИ

http://doi.org/10.23939/sepes2021.01.027

© Вігуро М. І., Маляр А. В., 2021

Запропоновано розв'язок прямої задачі кінематики для зварювального маніпулятора з шістьма ступенями свободи. Розв'язання такої задачі є першим необхідним етапом створення системи керування вказаним маніпулятором. Це дасть можливість визначити переміщення, прискорення та моменти в кожній з ланок маніпулятора та забезпечить точне позиціонування зварювального інструменту.

Під час розв'язання поставленої задачі описано структуру маніпулятора та вказано особливості його застосування. Наведено кінематичну схему маніпулятора із шістьма ступенями свободи. На її основі та на основі методу Денавіта–Хартенберга складено матриці перетворення, які визначають просторові положення кожної з ланок маніпулятора. Використання перетворення Денавіта–Хартенберга дало змогу зменшити загальну кількість узагальнених координат з шести до чотирьох без втрати точності кінцевого результату.

Щоб знайти кінцеве положення зварювального інструменту, склали алгоритм послідовних операцій, на основі якого здійснюються поступові переходи між зчленуваннями зварювального робота-маніпулятора. Створений алгоритм реалізовано в середовищі Matlab у вигляді математичної моделі. З метою перевірки правильності прийнятих рішень наведено приклад розрахунку траєкторії переміщень та кінцевого положення зварювального інструменту промислового маніпулятора фірми "Carl Cloos Schweisstechnik". Отримані результати повністю збігаються із заданим наперед положенням, що свідчить про адекватність створеної моделі. Надалі на основі цієї моделі заплановано синтезувати систему керування зварювальним маніпулятором.

Ключові слова: зварювальний маніпулятор; пряма задача кінематики; метод Денавіта–Хартенберга; система координат; траєкторія; математична модель.

Вступ

Для модернізації машинобудівного комплексу України потрібні передусім комплексна механізація і автоматизація виробництва на основі впровадження маніпуляторів і промислових роботів. Широке впровадження робототехнічних засобів зумовлено не тільки економічними та технічними передумовами, але і соціальними, оскільки безперервне зростання обсягів виробництва спричиняє виникнення дефіциту трудових ресурсів.

М. І. Вігуро, А. В. Маляр

Промислові роботи-маніпулятори використовують у машинобудуванні, в металургії, легкій та харчовій промисловості тощо. Зокрема роботи-маніпулятори, які здійснюють операції зварювання, найбільше застосовують у машинобудуванні [1], оскільки вони здатні не тільки зварювати рівні деталі, але й ефективно виконувати зварювальні роботи під кутом, у важкодоступних місцях. Сьогодні обладнання, яке використовують для зварювання складних поверхонь, містить систему числового програмного керування переміщенням маніпулятора за наперед заданою траєкторією.

У цьому сенсі важливим є синтез алгоритму керування рухом маніпулятора, від якого залежатиме точність зварювання, і, відповідно, якість продукції. З огляду на це, дослідження роботаманіпулятора та розрахунок необхідних для зварювання переміщень його ланок є актуальним заданням, яка вирішується у статті.

Постановка проблеми

З погляду кінематики робота-маніпулятора можна розглядати як незамкнений ланцюг твердих ланок, з'єднаних послідовно за допомогою призматичних (поступальних) або шарнірних (обертальних) зчленувань. Один кінець цього ланцюга з'єднаний з основою маніпулятора, інший її кінець, як правило, оснащений інструментом. Здатність здійснювати будь-які рухи досягається завдяки тому, що у маніпулятора є декілька ступенів свободи. Розташування та орієнтація пристрою захоплення залежать від спільної дії обертання і/або перенесення кожного зчленування ланцюга ланок. Для виконання операції зварювання на сучасних машинобудівних підприємствах використовують конструкцію з шістьма ступенями свободи (рис. 1) [1, 2].



Рис. 1. Зварювальний робот-маніпулятор з шістьма ступенями свободи

Під час дослідження поведінки маніпуляторів необхідно розв'язати пряму та зворотну задачі кінематики, які є основними під час синтезу алгоритму роботи робота-маніпулятора. Найпоширенішим математичним апаратом, який дає змогу розв'язати обидві задачі, є метод Денавіта– Хартенберга [3–6]. На основі цього методу для розв'язання прямої задачі кінематики зварювального робота-маніпулятора потрібно вирішити такі завдання [5, 7, 8]:

- прив'язати системи координат до ланок маніпулятора;
- визначити параметри Денавіта-Хартенберга;
- побудувати матриці однорідного перетворення;
- визначити позицію кінцевої ланки за узагальненими координатами.

Розв'язання прямої задачі кінематики зварювального маніпулятора з шістьма ступенями свободи

Аналіз останніх досліджень

На відміну від інших типів маніпуляторів, до точності позиціювання зварювального маніпулятора ставлять особливі вимоги, адже від цього прямо залежить якість кінцевого виробу. Складності також додає наявність великої кількості ступенів свободи, яка може призводити до кількох наборів узагальнених координат кінцевого положення зварювального інструменту. Як наслідок, виникає додаткова задача пошуку оптимальної траєкторії руху маніпулятора [8, 9].

Звідси випливає, що для точного розрахунку координат положення зварювального інструменту потрібно вибрати методи, які мають найменшу похибку обчислень та можуть давати результат у режимі реального часу.

Відомо, що пряма задача кінематики полягає у визначенні координат кінцевого положення інструменту маніпулятора за значеннями узагальнених координат [4–6]. Це положення визначають за допомогою координат, які характеризують відносні переміщення окремих кінематичних пар. Обернена задача полягає у визначенні параметрів руху кожної із ланок для позиціонування інструменту в задану точку. Розв'язання задач кінематики розглянуто у багатьох дослідженнях [4, 7–9]. Здебільшого вони грунтуються на методах Денавіта–Хартенберга і Лагранжа–Ейлера [3, 6–9] та наведені для маніпуляторів з невеликою кількість зчленувань та ступенів свободи. Для випадків, коли частини суміжних зчленувань маніпулятора повинні перетинатись в одній точці або бути паралельними чи перпендикулярними, відомі застосування сучасних підходів на основі кватерніонної кінематичної теорії [10–12], ітеративних методів розв'язування задачі [13], теорії нейронних мереж [14]. Однак які б методи не застосовувались, для створення ефективної системи керування переміщенням маніпулятора спочатку потрібно розв'язати першу задачу кінематики, адже від отриманих даних залежить результат розв'язання оберненої задачі.

Отже, розв'язання прямої задачі кінематики для маніпулятора, який має шість ступенів свободи, є актуальним завданням, яке дасть змогу спроєктувати позиційну систему керування зварюванням конструкцій.

Виклад основного матеріалу

Керування маніпулятором передбачає переміщення в певну точку з певною орієнтацією. Це переміщення здійснюється відносно узагальнених координат. Узагальненими координатами є вимірювані кутові переміщення між двома сусідніми ланками робота. З кожною ланкою робота пов'язана локальна декартова система координат.

Перша базова система координат розміщена біля основи робота (рис. 1). Всі інші початкові точки систем координат розміщені в рухливих зчленуваннях, початок останньої шостої системи координат – на кінці електрода зварювання. Загалом є шість локальних систем координат і одна базова, яка пов'язана з основою маніпулятора.

Кожна система координат сформована на основі трьох правил:

1. Вісь *z*_{*i*-1} спрямована уздовж осі *i*-го з'єднання.

2. Вісь x_i перпендикулярна до осі z_{i-1} і спрямована від неї.

3. Вісь y_i доповнює осі x_i , z_i так, щоб система координат була правобічною.

З метою описання обертальних і поступальних зв'язків між сусідніми ланками використано метод Денавіта–Хартенберга [3, 4], який полягає у формуванні однорідної матриці перетворення розмірністю 4'4, яка описує стан системи координат кожної ланки щодо системи координат попередньої. Такими координатами в методі Денавіта–Хартенберга є:

1) θ_i – кут, на який треба повернути вісь x_{i-1} навколо осі z_{i-1} , щоб вона була спрямована в один бік з віссю x_i ;

2) d_i – відстань між осями x_{i-1} та x_i вздовж осі z_{i-1} ;

3) α_i – кут, на який треба повернути вісь z_{i-1} навколо осі x_i , щоб вона стала спрямованою в один бік з віссю z_i ;

4) a_i – відстань між осями z_{i-1} та z_i вздовж осі x_i .

Для розрахунку матриць перетворення використано кінематичну схему зварювального маніпулятора (рис. 2). На цій схемі:

 $-d_2 = 0$, оскільки перетин осі z_1 з віссю x_2 та початок першої системами координат містяться в одній точці, тобто відстань між перетином осей і початком координат дорівнює нулеві;

 $-d_3 = 0$ і $d_5 = 0$, тому що дійсні значення цих величин входять у d_4 та d_6 відповідно, для спрощення розрахунків та візуалізації схеми маніпулятора. Це спрощення доцільно виконати, оскільки d_3 , d_4 та d_5 , d_6 під час будь-яких рухів маніпулятора містяться на одній осі, тобто жорстко з'єднані;

 $-a_4 = 0$, $a_5 = 0$ та $a_6 = 0$, оскільки осі z_3 , z_4 , z_5 і z_6 розміщені перпендикулярно одна до одної, тому найкоротша відстань між ними дорівнює нулеві.



Рис. 2. Кінематична схема маніпулятора

На підставі характеристик кожної ланки на основі кінематичної схеми побудовано таблицю зі значеннями параметрів для кожного зі зчленувань заданого маніпулятора (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри систем координат ланок маніпулятора згідно з методом Денавіта–Хартенберга

№ зчленування	q	d	а	а
1	$ heta_1$	d_1	-90°	<i>a</i> ₁
2	$\theta_2 - 90^\circ$	0	0°	<i>a</i> ₂
3	$ heta_3$	0	-90°	<i>a</i> ₃
4	$ heta_4$	d_4	90°	0
5	θ_5	0	-90°	0
6	$ heta_6$	d_6	0°	0

Кожному з елементарних рухів, які здійснює зчленування маніпулятора, відповідає або матриця обертання, або матриця зсуву. Використовуючи перетворення Денавіта–Хартенберга, отримали результуючу матрицю переходу A_i [3, 8], що зв'язує системи координат i-1 та i:

$$A_{i} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{i}) & -\cos(\alpha_{i}) \cdot \sin(\theta_{i}) & \sin(\alpha_{i}) \cdot \sin(\theta_{i}) & a_{i} \cdot \cos(\theta_{i}) \\ \sin(\theta_{i}) & \cos(\alpha_{i}) \cdot \cos(\theta_{i}) & -\sin(\alpha_{i}) \cdot \cos(\theta_{i}) & a_{i} \cdot \sin(\theta_{i}) \\ 0 & \sin(\alpha_{i}) & \cos(\alpha_{i}) & d_{i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$
 (1)

Для маніпулятора, розглянутого в цій роботі, ці матриці набули такого вигляду:

$$A_{1} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1}) & 0 & -\sin(\theta_{1}) & a_{1} \cdot \cos(\theta_{1}) \\ \sin(\theta_{1}) & 0 & \cos(\theta_{1}) & a_{1} \cdot \sin(\theta_{1}) \\ 0 & -1 & 0 & d_{1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(2)

$$A_{2} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{2} - \frac{\pi}{2}) & \sin(\theta_{2} - \frac{\pi}{2}) & 0 & a_{2} \cdot \cos(\theta_{2} - \frac{\pi}{2}) \\ \sin(\theta_{2} - \frac{\pi}{2}) & \cos(\theta_{2} - \frac{\pi}{2}) & 0 & a_{2} \cdot \sin(\theta_{2} - \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix};$$
(3)

$$A_{3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \cos(\theta_{3}) & 0 & -\sin(\theta_{3}) & a_{3} \cdot \cos(\theta_{3}) \\ \sin(\theta_{3}) & 0 & \cos(\theta_{3}) & a_{3} \cdot \sin(\theta_{3}) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$
(4)

$$A_{4} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ \cos(\theta_{4}) & 0 & \sin(\theta_{4}) & 0 \\ \sin(\theta_{4}) & 0 & -\cos(\theta_{4}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_{4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$
(5)

$$A_{5} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{5}) & 0 & -\sin(\theta_{5}) & 0\\ \sin(\theta_{5}) & 0 & \cos(\theta_{i}) & 0\\ 0 & -1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$
(6)

$$A_{6} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{6}) & -\sin(\theta_{6}) & 0 & 0\\ \sin(\theta_{6}) & \cos(\theta_{6}) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & d_{6} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$
 (7)

Для отримання координат позиції кінцевої ланки (зварювального інструменту маніпулятора) в базовій системі координат потрібно перемножити однорідні матриці перетворення (2)–(6)

 $T_0^6 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6.$

Для прикладу здійснено розрахунок кінцевої точки положення зварювального інструменту, який містився у точці *A*, з координатами в координатах XYZ (1566; 25, 1395). Параметри маніпулятора та кути, на які здійснювались повертання осей, внесені у табл. 2.

Таблиця 2

Параметри систем координат ланок зварювального маніпулятора

№ зчленування	θ	<i>d</i> , мм	α	а, мм
1	90°	637	-90°	249
2	30–90°	0	0°	650
3	-45°	0	-90°	100
4	90°	815	90°	0
5	- 60°	0	-90°	0
6	0°	499	0°	0

У результаті здійснених рухів зварювальний інструмент перемістився в точку **B** з координатами (432; 1576, 1572). Розрахунок траєкторії руху елементів-маніпулятора виконано в програмному середовищі Matlab. Отримані графіки траєкторії руху показано на рис. 3, рис. 4.





Рис. 3. Траскторія руху інструменту маніпулятора з точки А в точку В в координатах ХҮΖ.



Рис. 4. Траєкторія руху інструменту маніпулятора з точки А в точку В у різних площинах.

32

Розв'язання прямої задачі кінематики зварювального маніпулятора з шістьма ступенями свободи

Висновки

Створена модель руху ланок маніпулятора з шістьма ступенями свободи дає можливість отримати значення кінцевого положення зварювального інструменту, а також позицію кожної з проміжних ланок робота. Розв'язання такої задачі є необхідним етапом для розв'язання задачі динаміки і знаходження прискорення та моменту, як у кінцевій точці маніпулятора, так і в проміжних ланках, що необхідно для створення системи керування зварювальним маніпулятором.

Перспективи подальших досліджень

У подальших дослідженнях буде розглянуто розв'язання зворотної задачі кінематики з метою синтезу системи керування електроприводами ланок зварювального маніпулятора.

Список літератури

1. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: Підручник / Л. Є. Пелевін, К. І. Почка, О. М. Гаркавенко, Д. О. Міщук, І. В. Русан. К.: НВП"Інтерсервіс", 2016. 258 с. http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/ Pelevin_2016_258.pdf.

2. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка: навч. посібник. Д.: Національний гірничий університет, 2007. 216 с. http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Tsvirkun_2017_224.pdf.

3. Denavit J. and Hartenberg R. S. "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices," Journal of Applied Mechanics, vol. 22, pp. 215–221, 1955. DOI:10.1115/1.4011045.

4. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Перевод с англ. М.: Мир, 1989. 624 с. https://www.studmed. ru/fu-k-gonsales-r-li-k-robototehnika_8855f0f7adb.html.

5. Сокол Г. І. Теорія механізмів робототехнічних систем. Кінематика: навч. посібник / Г. І. Сокол. Дніпропетровськ: PBB ДНУ, 2002. 92c. https://studfile.net/preview/2425278/.

6. Марущак Я. Ю., Кушнир А. П. Математическая модель механизма перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи на основе представления Денавита-Хартенберга // Электротехнические и компьютерные системы. 2016. № 22 (98). С. 20–27. DOI: 10.15276/eltecs.22.98.2016.03.

7. Дмитрієва І. С., Левченко Д. О. Дослідження кінематичної моделі маніпуляційного робота // Системні технології. 2015. № 3 (98). С. 57–62. https://journals.nmetau.edu.ua/issue/download/49-24-PB-2.pdf.

8. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 400 с. https://djvu.online/file/0I3NB4SOBiMb6.

9. Бурдаков С. Ф., Дьяченко В. А., Тимофеев А. Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов. М.: Высшая школа, 1986. 264 с. https://www.studmed.ru/burdakov-sf-dyachenko-va-timofeev-an-proektirovanie-manipulyatorov-promyshlennyh-robotov-i-robotizirovannyh-kompleksov_f9dfe59d37d.html.

10. Ломовцева Е. И., Челноков Ю. Н., Дуальные матричные и бикватернионные методы решения прямой и обратной задач кинематики роботов-манипуляторов на примере стэнфордского манипулятора // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 88–95. DOI:10.0000/cyberleninka.ru/article/n/dualnye-matrichnye-i-bikvaternionnye-metody-resheniya-pryamoy-i-obratnoy-zadach-kinematiki-robotov-manipulyatorov-na-primere.

11. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М.: Физматлит, 2006. 511 с. https://llib.pl/book/2901112/ddd29d.

12. Funda, J.; Taylor, R. H. & Paul, R. P. On homogeneous transforms, quaternions, and computational efficiency //IEEE Trans.Robot. Automat. 1990. Vol. 6. pp. 382-388. DOI:10.1109/70.56658.

13. Colomé A., Torras C. Redundant inverse kinematics: Experimental comparative review and two enhancements // Intelligent Robots and Systems (IROS). 2012. pp. 5333-5340. DOI: 10.1109/IROS.2012.6385672.

14. Duka A. V. Neural network based inverse kinematics solution for trajectory tracking of a robotic arm // Procedia Technology. 2014. Vol. 12. pp. 20-27. DOI:10.1016/j.protcy.2013.12.451.

References

1. Synthesis of robotic systems in mechanical engineering: Textbook / L. E. Pelevin, K. I, Pochka, O. M. Garkavenko, D. O. Mishchuk, I. V. Rusan. K.: NVP "Interservice", 2016. 258 p. http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Pelevin_2016_258.pdf.

2. Tsvirkun L. I., Gruler G. Robotics and mechatronics: Study guide. D. National Mining University, 2007. 216 p. http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Tsvirkun_2017_224.pdf.

3. Denavit J. and Hartenberg R. S. "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices," Journal of Applied Mechanics, vol. 22, pp. 215–221, 1955. DOI:10.1115/1.4011045.

4. Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee Robotics C. S. G.: Trans. from Eng. M.:Mir, 1989. 624 p. https://www.studmed. ru/fu-k-gonsales-r-li-k-robototehnika_8855f0f7adb.html.

5. Sokol G. I. Theory of mechanisms of robotic systems. Kinematics: Study guide. / Sokol G. I. Dnipro: RVV DNU, 2002. 92 p. https://studfile.net/preview/2425278/.

6. Marushchak Y. Y., Kushnir A. P. The mathematical model of the mechanism of electrodes movement of arc steel-melting furnaces on he basis of Denavit-Hartenberg presentation // Electrical and computer systems. 2016. No. 22 (98). pp. 20–27. DOI: 10.15276/eltecs.22.98.2016.03.

7. Dmitrieva I. S., Levchenko D. O. Research of kinematic model of manipulative robot // System technology. 2015. No. 3 (98). pp. 57–62. https://journals.nmetau.edu.ua/issue/download/49-24-PB-2.pdf.

8. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. Robot control. The basics of manipulating robots control: Textbook for universities – M.: Pub. BMSTU, 2000. 400 p. https://djvu.online/file/0l3NB4SOBiMb6.

9. Burdakov S. F., Dyachenko V. A., Timofeev A. N. Design of manipulators of industrial robots and robotic complexes. M.: High school, 1986. 264 p. https://www.studmed.ru/burdakov-sf-dyachenko-va-timofeev-an-proektirovanie-manipulyatorov-promyshlennyh-robotov-i-robotizirovannyh-kompleksov_f9dfe59d37d.html.

10. Lomovtseva E. I., Chelnokov Y. N., Dual matrix and biquaternion methods for solving direct and inverse problems of kinematics of robotic manipulators on the example of a Stanford manipulator // Pub. Saratov univ. new ep. Ep. Mathematics. Mechanics. Informatics. 2014. T. rel. 1. pp. 88–95. DOI:10.0000/cyberleninka.ru/article/n/dualnye-matrichnye-i-bikvaternionnye-metody-resheniya-pryamoy-i-obratnoy-zadach-kinematiki-robotov-manipulyatorov-na-primere.

11. Chelnokov Y. N. Quaternion and biquaternion models and methods of rigid body mechanics and their applications. Geometry and kinematics of motion. M.: Fizmatlit, 2016. 511 p. https://llib.pl/book/2901112/ddd29d.

12. Funda, J.; Taylor, R. H. & Paul, R.P. On homogeneous transforms, quaternions, and computational efficiency //IEEE Trans.Robot. Automat. 1990. Vol. 6. pp. 382–388. DOI:10.1109/70.56658.

13. Colomé A., Torras C. Redundant inverse kinematics: Experimental comparative review and two enhancements // Intelligent Robots and Systems (IROS). 2012. pp. 5333–5340. DOI: 10.1109/IROS.2012.6385672.

14. Duka A.V. Neural network based inverse kinematics solution for trajectory tracking of a robotic arm // Procedia Technology. 2014. Vol. 12. pp. 20–27. DOI:10.1016/j.protcy.2013.12.451.

M. Vihuro

Lviv Polytechnic National University, maksym.vihuro.mnee.2019@edu.lpnu.ua

A. Malyar

Lviv Polytechnic National University, Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems, andrii.v.maliar@lpnu.ua

SOLVING THE FORWARD KINEMATICS PROBLEM FOR A WELDING MANIPULATOR WITH SIX DEGREES OF FREEDOM

© Vihuro M., Malyar A., 2021

The article proposes a solution of the forward kinematics problem for a welding manipulator with six degrees of freedom. Solving this problem is the first necessary step in creating a control system for this manipulator. This will make it possible to determine the displacement, accelerations and moments in each of the manipulator parts and will ensure accurate positioning of the welding tool.

When solving the set task, the manipulator structure was described and features of its application were specified. The kinematic scheme of the manipulator with six degrees of freedom is presented. Based on it and using the Denavit–Hartenberg method, transformation matrices were compiled, which determine the spatial positions of each of the manipulator links. Using the Denavit–Hartenberg transformation made it possible to reduce the total number of generalized coordinates from six to four without losing the accuracy of the final result.

To find the final position of the welding tool, an algorithm of sequential operations was developed, based on which gradual transitions between the joints of the welding manipulator are carried out. The created algorithm was implemented in the Matlab environment in the form of a mathematical model. In order to verify the correctness of the decisions made, an example of calculating the trajectory of movement and the final position of the welding tool of the Carl Cloos Schweisstechnik industrial manipulator is presented. The obtained results completely coincided with the predetermined position, which indicates the adequacy of the created model. In the future, based on this model, it is planned to synthesize a control system for the welding manipulator.

Key words: welding manipulator; forward kinematics; Denavit–Hartenberg method; coordinate system; trajectory; mathematical model.