Complex Control Systems
ISSN 1310-8255 **Proceedings of the International Scientific Conference "Robotics & Mechatronics 2023"**

Алгоритми за моделиране на движенията на роботи с неявно решима позиционна задача на кинематичния анализ за помощ в здравеопазването

Пламен Райков, Нина Вълчкова, Роман Захариев
plamen.raykov@abv.bg; nvalchkova@abv.bg; roman.zahariev@robotic.bg;

Българска Академия на Науките - Институт по Роботика
София, 1113, ул."Акад. Г. Бончев" бл. 1

***Резюме*:** *В настоящата статия се прави опит за систематизиране на подходите за директно и числено определяне на положенията на звената на произволен затворен механизъм за манипулатора на робот, като се въвеждат нови или са доразвити елементи от съществуващите такива. Това се прави с цел улесняване на логическото свързване на отделните модули в конкретен механизъм, както и за определяне характеристиките на специфични точки от звената на затворени многоподвижни механизми с неявно решима позиционна задача на кинематичния анализ, каквито са роботите със затворена сложна структура, предназначени за обслужване на пациенти в здравеопазването. Описаните алгоритми също така са приложими, както при решаване на правата задача, така и при решаване на обратната задача на кинематиката, когато е зададена целевата функция на изпълнителното звено. С такива кинематични структури на робота за помощ в здравеопазването се гарантира високата точност на позициониране на изпълнителното звено, необходима при реализацията на целевата функция при обслужването на пациентите.*

Ключови думи: Алгоритъм за моделиране на движението на манипулатори, Механизми и Роботи със затворена структура.

I.ВЪВЕДЕНИЕ

В последно време с развитието на електрониката се оформи ново направление, свързано с навлизането в инженерната практика на професионални мини- и микрокомпютри с графични възможности. Те позволяват изследването на механизми с една или повече степени на подвижност да стане реално достъпно за самия конструктор, който е основният потребител на получените резултати. Това предполага създаване на математични подходи за изследване на отделни групи и възли на механизмите. Тези подходи могат да бъдат изградени като отделни модули (подпрограми) и да бъдат използвани в зависимост от конкретната структура на изследвания механизъм. Елементи от такива програми са описани [1, 7, 8]. Такъв пакет подпрограми винаги би могъл да бъде допълван и насочван към конкретната задача, в зависимост от потребностите и спецификата на работата на конструкторския колектив.

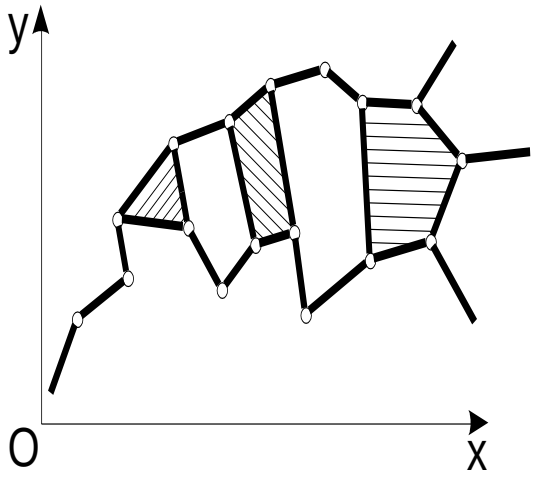
Естественото еволюционно развитие в Роботиката през последните години и усъвършенстването на информационно-измервателните им системи доведе до създаването на колаборативните роботи. Основно тяхно качество е възможността им напълно безопасно да работят съвместно с човек. Намаляващите цени на компютърните технологии и използваните сензори са сред причините колаборативните роботи да са все по-достъпни и да намират широко приложение не само в индустрията, но и в сервизната роботика.

Роботите с два манипулатора, които понастоящем излизат на пазара, са конструирани с оглед на максимална сигурност и безопасност, което означава, че не могат да наранят човек. Те имат датчици, отчитащи силата на натиск, която прилагат манипулаторите им; осите им са проектирани, така че да се избегнат всички възможни точки на съприкосновение на звената им; имат електромотори с управление по ограничена скорост и са програмирани със софтуер, управляващ безопасността и безконфликтността на движенията [9, 10, 11]. Високата точност на позициониране на работния орган на тези роботи е основна предпоставка за коректното изпълнение на целевата функция на

такъв робот, предназначен да изпълнява сервизно обслужване на пациентите в здравеопазването.

II. Механизми с неявно решима позиционна задача на кинематичния анализ

Механизмите с неявно решима позиционна задача на кинематичния анализ са равнинни механизми с неограничен брой звена, брой на затворените контури и кинематични двоици от V клас, при които след отстраняване на началните звена и стойката, нито един от контурите не може да бъде сведен до Асурова група от II и/или III клас (фиг.1).



Фиг.1. Кинематична верига от общ клас.

За изследване на тези структури се използува метода на Нютон за числено решаване на система от нелинейни уравнения. Ако структурата на Асуровата група съдържа като неизвестни nR броя ротационни, nIT броя вътрешни транслационни и nOT броя външни транслационни кинематични двоици, то за еднозначно определяне на позиционните функции на звената при зададен закон на движение на началните звена е необходимо да се запишат $2.n_\Sigma$

$$(n_\Sigma = n_R + n_{IT} + n_{OT})$$

брой уравнения [4].

• постоянството на дължините на звената, свързани с ротационните кинематичните двоици се представя във вида:

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 = l_{ij}^2 ,$$
$$i, j \in [1, 2, 3, \ldots, n_R] \ , \ i \neq j ,$$

където (x_i , y_i) и (x_j , y_j) са координатите на i - тата и j - тата ротационни кинематични двоици, а l_{ij} е дължината на звеното, което ги свързва

$(l_{ij} \neq l_{ji})$.

• движението на точка от звено, фиксирана върху плъзгач на външна транслационна кинематична двоица се записва във вида:

$$A_S x_t + B_S y_t + C_S = 0 ,$$
$$t \in [1, 2, 3, \ldots, n_{OT}]$$

• и за движението на точка, свързваща две звена на вътрешна кинематична двоица

$$y_Q - y_N = k(x_Q - x_N) ,$$

$$k = \frac{A}{\sqrt{l_{MN}^2 - A^2}} = const ,$$

$$A = b\sin\alpha\sqrt{l_{MN}^2 - (y_M - y_N)^2} + (y_M - y_N)\sqrt{l_{MN}^2 - b^2\sin^2\alpha} .$$

Нека с $\vec{v}_s$ означим вектора на неизвестните координати или дължини в зависимост от вида на кинематичната двоица.

$$\vec{v}_s = (x_s, y_s, l_s), \quad s = 1 , 2 , 3 , \ldots , n_\Sigma$$

Тогава системата нелинейни уравнения

$$\begin{Vmatrix} f_p = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 - l_{ij}^2 = 0 \ , \ p \in [1, 2, 3, \ldots, n_R] \ , \\ f_q = A_s x_t + B_s y_t + C_s = 0 \ , \ q \in [1, 2, 3, \ldots, n_T] \end{Vmatrix}$$

се решава числено итерационно, като всяко следващо k + 1-во приближение се получава от предходното k-то приближение по формулата:

$$\vec{V}^{(k+1)} = \vec{V}^{(k)} - \bar{J}^{-1} \cdot \vec{F} \Big|_{\vec{V} = \vec{V}^{(k)}} ,$$

където:

$\vec{v}^{(k)} = (v_1^{(k)}, v_2^{(k)}, \ldots, v_{n_\Sigma}^{(k)})^T$ е k-то приближение на вектора на неизвестните,

$$\vec{F} = (f_1 , f_2 , \ldots , f_{n_\Sigma})^T$$

$$\bar{J} = \left(\frac{\partial f_i}{\partial v_j} \right) \ , \ i = 1, 2, \ldots, p_\Sigma \ , \ j = 1, 2, \ldots, p_\Sigma \ ,$$

където p_Σ е броят на кинематичните двоици, свързващи звената на изследваната кинематична структура.

Методът има добра сходимост при начално приближение $\vec{v}^{(0)}$, достатъчно близко до търсеното решение. При изследване на движенията на механизмите можем да намерим такова, тъй като винаги съществува фиксирано положение на звената, при което можем да определим (напр. геометрично) достатъчно точно координатите на центровете на всички кинематични двоици. Прилагайки метода на Нютон можем да доуточним тези координати с подходящо избрана точност. Итеративно, използувайки предходното положение на механизма като начално приближение за следващото, при достатъчно малки стъпки на промяна на законите на движение на началните звена е възможно постъпково моделиране на движенията на звената на произволна кинематична структура.

Като критерий за получаване на достатъчно точно решение и завършване на итерационния процес може да се използва условието:

$$\sum_{i=1}^{n_\Sigma} f_i^2(v^{(k)}) \le \varepsilon, \qquad \varepsilon > 0,$$

където ε е предварително избрано достатъчно малко число (фиг.2).

Подходът е приложим когато на механизмът не се намира в близост до особена точка $(\det(\bar{J}) \to 0)$, за която матрицата $\bar{J}^{-1}$ не съществува. С използването му е възможно да се изследват движенията на звената на всички познати механизми, с или без отстраняване на задвижващите звена.

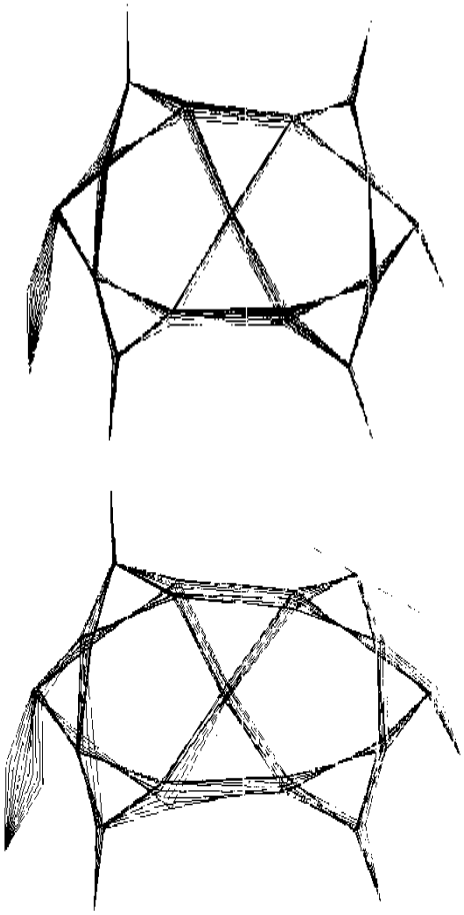
Основните неудобства при използването му са следните:

• необходимост от задаване на начално приближение, максимално близко до търсеното;

• не е възможно достигане на точно решение, както при по-горе разгледаните алгоритми;

• продължителността на изчислителните процедури и сходимостта на изчисленията на итерационния процес е в пряка зависимост от предварително зададената точност;

• необходимостта от задаването на достатъчно на брой начални приближения, равен на броя на реконфигурациите на реалния механизъм в изследваната област



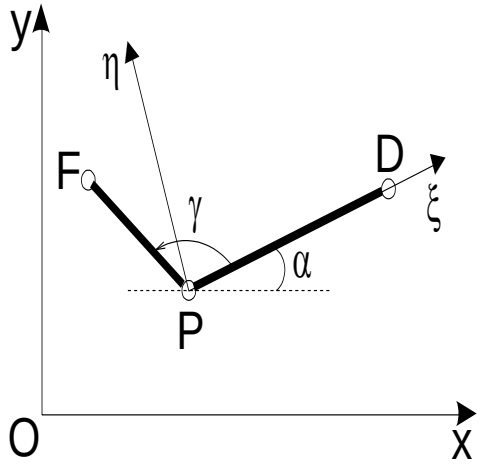
Фиг.2. Симулации на движенията на звената на Асурова група от VIII клас.

II. Помощни модули

А.Изчисляване на ориентиран ъгъл между две съседни звена.

Ако са дадени са точките $P(x_P,y_P)$, $D(x_D,y_D)$ и $F(x_F,y_F)$ ($P \neq D$ и $P \neq F$), които определят дължините и разположението на две звена PD и PF в равнината, то целта, която си поставяме е да се

намери ориентираният ъгъл между тях, отчитан от рамото PD по посока обратна на часовниковата стрелка (фиг.3).



Фиг.3. Обща постановка за определяне на ориентиран ъгъл.

За целта се построява локална дясна координатна система Pξη с начало в точката P и абсцисна ос минаваща през точката D. Намират се разстоянията PD, PF и DF:

$$\left\| \begin{array}{l} PD = \sqrt{(x_P - x_D)^2 + (y_P - y_D)^2} \\ PF = \sqrt{(x_P - x_F)^2 + (y_P - y_F)^2} \\ DF = \sqrt{(x_D - x_F)^2 + (y_D - y_F)^2} \end{array} \right.$$

Използвайки косинусовата теорема се намира ъгълът между рамената PD и PF:

$$\gamma = \arccos \frac{PD^2 + PF^2 - DF^2}{2PD \cdot PF},$$

който е в интервала $0 \le \gamma \le \pi$. Тъй като търсим ориентиран ъгъл в интервала $0 \le \gamma < 2\pi$ се прилага следната схема:

от формулите за смяна на координатната система:

$$\left\| \begin{array}{l} x_F = x_P + \xi_F \dfrac{y_D - y_P}{PD} - \eta_F \dfrac{x_D - x_P}{PD} \\ y_F = y_P + \xi_F \dfrac{x_D - x_P}{PD} + \eta_F \dfrac{y_D - y_P}{PD} \end{array} \right.,$$

се изчислява η-координатата на точката F в локалната координатна система Pξη:

$$\eta_F = \frac{-(x_F - x_P)(y_D - y_P) + (x_D - x_P)(y_F - y_P)}{PD}$$

Ако $\eta_F \ge 0$, то ъгълът между рамената PD и PF е γ.

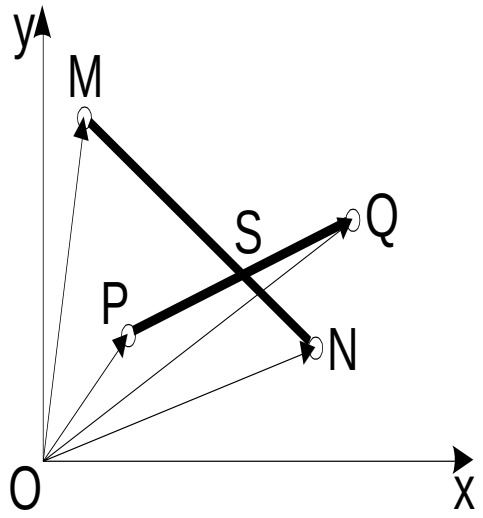
Ако $\eta_F < 0$, този ъгъл е $2\pi - \gamma$.

Като частен случай на тази задача, може да се разглежда определянето на ориентиран ъгъл, който дадено звено сключва с една от координатните оси на локалната или базисната координатна система [1,6].

В. Проверка на взаимното положение на две звена

Проверката на взаимното положение на две звена служи основно за да се установи дали две звена, разположени в една или съседни равнини се пресичат по конструктивно недопустим начин.

Ако са зададени звената MN и PQ чрез координатите на крайните си точки: $M(x_M,y_M)$, $N(x_N,y_N)$, $P(x_P,y_P)$, $Q(x_Q,y_Q)$ целта е да се провери дали те се пресичат (фиг.4).



Фиг.4. Проверка на пресичането на звена, движещи се в две недопустимо близки равнини.

За произволна точка A от отсечката MN може да се запише уравнението:

$$\overline{OA} = (1-\lambda)\overline{OM} + \lambda\overline{ON} \quad , 0 \le \lambda \le 1 \ .$$

Аналогично за произволна точка B от отсечката PQ:

$$\overline{OB} = (1-\mu)\overline{OP} + \mu\overline{OQ} \quad , 0 \le \mu \le 1$$

или скаларен вид:

$$\begin{cases} x_A = (1-\lambda)x_M + \lambda x_N \\ y_A = (1-\lambda)y_M + \lambda y_N \quad , 0 \le \lambda \le 1 \\ x_B = (1-\mu)x_P + \mu x_Q \\ y_B = (1-\mu)y_P + \mu y_Q \quad , 0 \le \mu \le 1 \end{cases}$$

За да има пресичане на отсечките MN и PQ трябва да е изпълнено:

$$x_A = x_B \quad 0 \le \lambda \le 1$$
$$y_A = y_B \text{ и } 0 \le \mu \le 1 ,$$

следователно:

$$\begin{cases} (1-\lambda)x_M + \lambda x_N = (1-\mu)x_P + \mu x_Q \\ (1-\lambda)y_M + \lambda y_N = (1-\mu)y_P + \mu y_Q \\ 0 \le \lambda \le 1 , 0 \le \mu \le 1 \end{cases} ,$$

откъдето се получава:

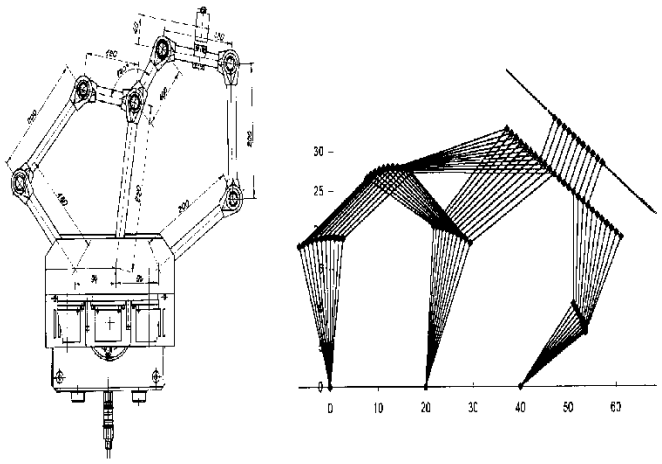
$$\begin{cases} \lambda = \dfrac{(x_P - x_M)(y_P - y_Q) - (y_P - y_M)(x_P - x_Q)}{(x_P - x_Q)(y_M - y_N) - (x_M - x_N)(y_P - y_Q)} \\ \mu = \dfrac{(x_M - x_P)(y_M - y_N) - (y_M - y_P)(x_M - x_N)}{(x_M - x_N)(y_P - y_Q) - (x_P - x_Q)(y_M - y_N)} \end{cases} .$$

Ако за така получените λ и μ са изпълнени условията $0 \le \lambda \le 1$ и $0 \le \mu \le 1$, то рамената MN и PQ се пресичат в точката S, чийто координати са:

$$\begin{cases} x_S = (1-\lambda)x_M + \lambda x_N = (1-\mu)x_P + \mu x_Q \\ y_S = (1-\lambda)y_M + \lambda y_N = (1-\mu)y_P + \mu y_Q \end{cases} .$$

Аналогично на горните могат да бъдат описани и други помощни модули, отразяващи закономерности и ограничения в конкретни механизми, обект на конкретни изследвания (фиг.5).

Като помощни алгоритми могат да бъдат считани и определянето на скоростите и ускоренията на конкретни точки от звена на изследвания механизъм, тъй като те могат да се получат посредством координатите на две съседни, безкрайно близки положения на задвижващите му звена [3, 5].



Фиг.5. Пример за решаване на обратната задача на кинематиката на равнинен робот с три степени на подвижност.

III. Заключение

Целта на създаването на сервизен робот е да се покрие широк спектър от дейности за изпълняване на различини задачи при обслужването на хората в медицинското заведение, за изпълнение на помощни функции, както и в помощ на хора с увреждания. Разбирасе това е една трудна и много отговорна задача, която предполага реализацията на специални функционални характеристики на сервизния робот. Предполага се, че ще се работи в непосредствена близост с хората от медицинския персонал, както и с обслужваните пациенти. Най-напред беше създаден сервизен робот в помощ на хората с увреждания. Поради съвпадение на поставените задачи, осигурената висока точност на позициониране на манипулатора на робота и възможността на основата на получаваната богата сензорна информация от околната среда да се работи безопасно в непосредствена близост с хората, се предлага използването на този когнитивен робот за целите на оказване на помощ в медицината.

Чрез логическо свързване, съобразено с конкретната структура на изследвания механизъм на робота могат да се получат нови знания относно кинематиката, възможностите за реконфигурация, функционалността и влиянието на метриката на звената на механизмите, които знания ще допринасят за изграждането на нови, по-ефективни конструкции на манипулационни механизми и създаване на по-реалистичен модел по който ще се управлява робота в помощ на здравеопазването. На тяхна база съвсем лесно могат да бъдат създадени и алгоритми за определяне на силовите натоварвания на отделните звена на изследвания механизъм, по начин подобен на описания от В. Каган и А. Андреев [2].

Получените резултати от изследването могат да намерят приложение в областта на конструирането на механизми за производството на манипулатори и роботи, изграждане на мехатронни изделия, обучението на студенти във ВУЗ и др.

БЛАГОДАРНОСТ

Този доклад е изготвен в рамките на проект с Административен договор № КП-06-Н57/8 от 16.11.2021 г. – „Методика за определяне на функционалните параметри на мобилен колаборативен сервизен робот асистент в здравеопазването“, финансиран от „Конкурс за Финансиране на фундаментални изследвания - 2021 г." от фонд "Научни изследвания", България.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Джолдасбеков У. А. (1983) Графоаналитические методы анализа и синтеза механизмов високих классов. Москва, Наука,Россия, 1983.
2. Каган В., Андреев А. (1979) Алгоритмы кинематического расчета двухповодковых и трехповодковых групп. Алгоритмы проектирования схем механизмов. Москва, Наука,Россия, стр. 102-125, 1979.
3. Константинов М., Райков П. (1985) Изследване на възможностите на някои затворени кинематични структури за използването им в робототехниката. Пети НКТПМ, Варна, Българаия, стр.168-173, 1985 г.
4. Пейсах Э.Е., Нестеров В.А. (1988) Система проектирования плоских рычажных механизмов. Москва, Машиностроение, Россия, 1988.
5. Пол Р. (1978) Моделирование, планирование траектории и управление робота-манипулятора. Москва, Наука, Россия, 1978.
6. Chase M.A. (1963) Vektor analysis of linkages. J. Engineering for Industry, Trans.ASME, Vol.85, 1963.
7. Chung H., C Radcliffe. (1978) Kinematics and Mechanisms Design. John Wiley & Sons Inc., 1978.
8. Denavit J., R. Hartemberg. (1955) A kinematic notation lower pair mechanisms based on matrices. J. Applied Mechanics, Vol.22,1955.
9. Paunski. Y., R. Zahariev, "Service robots control system, based on Arm cortex M architecture microprocessor system", Pr. TU Sofia, XXVI International Conference „ADP-2017", June, 2017, Sozopol, Bulgaria, 2017, pp. 300-304. https://mf.tu-sofia.bg/MNTK%20ADP%20site/4%20Proceeding/2017/ Materials/Napravlenie-7/4-7-R.Zahariev-2.pdf
10. Valchkova N., R. Zahariev "Optimization of model operator for a service robot, intended to service persons with disability.", Pr."TECIS-19" IFAC Conf.26-28 September, (2019) Sozopol, Bulgaria. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.468
11. Zahariev R., N. Valchkova, G. Angelov, Y. Paunski at al. "Robots for Help in Pedagogy and Rehabilitation." In Pr. 20-th Int. Conf. on Computer Systems and Technologies, ACM, New York, NY, (2019) USA, 1-7. DOI: https://doi.org/10.1145/3345252.3345253