

Синтез траектории движения механизма манипулятора в пространстве обобщенных координат на основе использования областей, задающих разрешенные конфигурации

Ф.Н. Притыкин, Д. И. Нефедов

Омский государственный технический университет, г. Омск

Аннотация: Предложен способ синтеза траектории движения механизма манипулятора, на основе использования области, задающей разрешенные конфигурации в пространстве обобщенных координат. Исследовано соответствие точек пространства положений выходного звена и конфигурационного пространства.

Ключевые слова: синтез движений роботов, конфигурационное пространство, запретные зоны, интеллектуальные системы управления роботами.

Создание и использование автономно функционирующих робототехнических систем является одним из приоритетных направлений исследований. Автономное функционирование робота при наличии запретных зон может быть возможным благодаря использованию интеллектуальных систем управления [1]. В работе [2] с целью обеспечения автономного функционирования робота предложено использовать систему управления, одной из составных частей которой является наличие блока предназначенного для обеспечения виртуального моделирования на начальном этапе реализации движения. Двигательные возможности механизма манипулятора в этом случае оценивают на основе виртуального моделирования движения, где используют модель окружающей среды и механизма манипулятора. Если движение смоделировано виртуально, далее выполняется реализация конкретных движений. Анализ положения механизма манипулятора и заранее известных запретных зон может быть осуществлен на основе исследования разрешенных и запрещенных конфигураций [3,4]. В работах [5,6] предложено определять в аналитическом виде область разрешенных конфигураций мобильного робота «Варан» на

Для пространственного пятизвенного механизма, представленного на рис. 1аб, для случая, когда $q_1 = 0$ пространство конфигураций L_q будет трехмерным. Механизм манипулятора при этом установлен на транспортной тележке. Центр выходного звена (ВЗ) механизма манипулятора в пространстве положений захвата O_o определяется координатами x_{o4} и y_{o4} (ориентация ВЗ может быть какой угодно). На рис. 2а представлено множество конфигураций для которых центр ВЗ занимает одно и тоже положение определяемое радиус вектором $R_A(x_A, y_A)$ точки A_1 . Множество конфигураций построено графическим способом на основе построения окружностей радиусы которых равны длинам звеньев механизма. Произвольной точки $B_i \in L_q$ (знак \in определяет принадлежность точки пространству L_q) соответствует единственная точка $O_4 \in O_o$. Данное соответствие будет нелинейным, так как оно определяется тригонометрическими функциями (называемыми функциями положения):

$$x_{o4} = \cos q_3 (l_2 (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2) + l_1 \cos q_1) - \sin q_3 (l_2 (\sin q_1 \cos q_2 + \cos q_1 \sin q_2) + l_1 \sin q_1) + l_3 \cos q_3, \quad (1)$$

$$y_{o4} = \sin q_3 (l_2 (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2) + l_1 \cos q_1) - \cos q_3 (l_2 (\sin q_1 \cos q_2 + \cos q_1 \sin q_2) + l_1 \sin q_1) + l_3 \sin q_3,$$

где l_1, l_2 и l_3 – определяют длины звеньев механизма. Для рассматриваемого примера $l_1 = 900$ мм, $l_2 = 700$ мм и $l_3 = 500$ мм. Обратное соответствие точек будет многозначным. Точке $A_1 \in O_o$ будет соответствовать однопараметрическое множество точек $B_i \in L_q$ принадлежащих линии l_{A1} . На рис. 2б представлено изображение кривой $l_{A1} \in L_q$. Другим точкам траектории движения ВЗ A_2, A_3, \dots будут соответствовать другие кривые l_{A2}, l_{A3}, \dots которые в совокупности определяют каркас поверхности Ψ (см. рис. 2б).

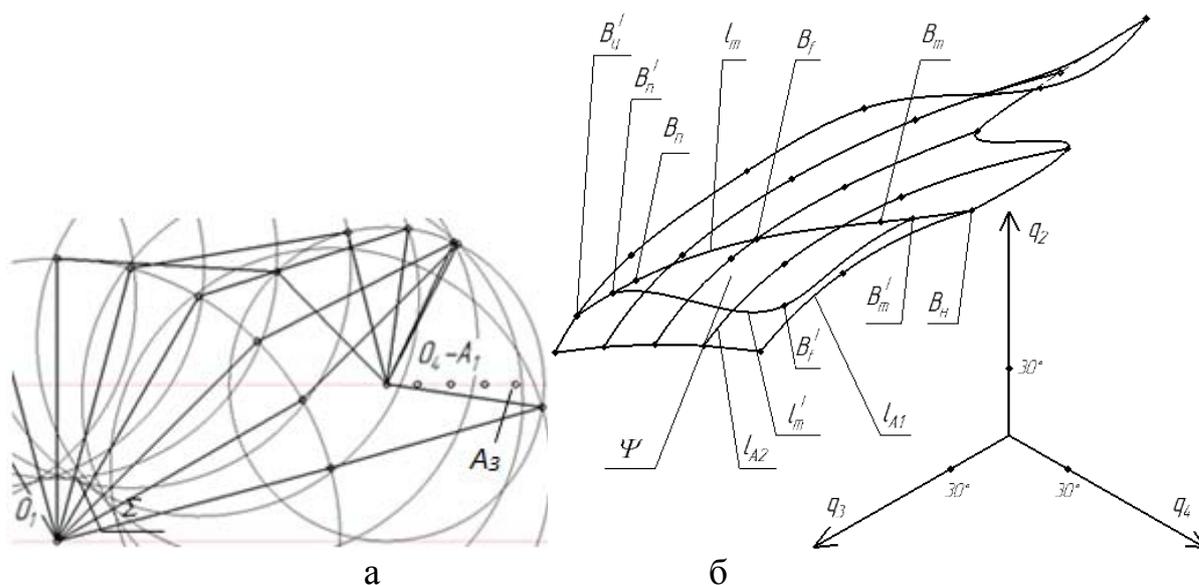


Рис. 2 Положения точек A_i и B_i пространств O_o и L_q : а – множество конфигураций для которых $R_{oA}(x_{oA}, y_{oA}) = R_{AI}(x_A, y_A)$; б – изображение поверхности Ψ в пространстве L_q

Известно, что синтез движения манипулятора по заданной траектории A_1A_3 центра ВЗ может быть осуществлен единственным образом по критерию минимизации объёма движения [7]. При этом на поверхности Ψ определится кривая l_m соответствующая заданному движению. Пусть в пространстве O_o задана запретная зона P в виде горизонтальной плоскости уровня (соответствует функционированию мобильного робота в туннеле). При наличии запретной зоны P и заданных предельных значения обобщенных координат в пространстве L_q разрешенные конфигурации заданные точками B_i определяют область Λ [6]. По анализу взаимного положения кривой l_m и области Λ можно судить возможно или нет смоделировать движение по заданной траектории ВЗ без столкновения с препятствием на виртуальном уровне (кривая l_m должна целиком принадлежать области Λ).

На рис. 3а б изображены множество разрешенных конфигураций в декартовом пространстве O_o и соответствующая этим конфигурациям область Λ при $\Delta q_i = 15^\circ$. Данная область исследовалась в работах [5,6]. Анализ

формы области Λ показывает, что при некотором положении запретной зоны P в неподвижном пространстве O_o в области Λ существуют пустоты, которые задают запрещенные конфигурации. В общем случае точки B_n и B'_n , задающие начальную и конечную конфигурации заданной траектории, соответствующие точкам $A_1=O_4$ и A_3 положениям ВЗ, могут располагаться в различных частях области Λ (см рис. 3б). Точка A_3 задает целевую точку ВЗ.

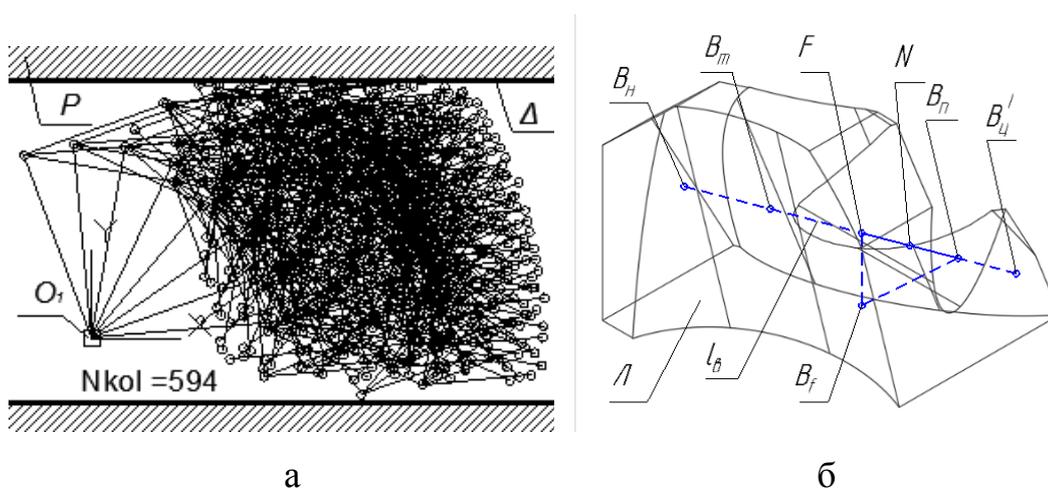


Рис.3 –Определение разрешенных конфигураций: а – изображения множества N_{kol} разрешенных конфигураций при $z_{op} = 1200$ мм; б– изображение области Λ в пространстве L_q

Положение конечной конфигурации, заданной точкой B'_n при наличии двигательной избыточности, определяется синтезом движения по критерию минимизации объема движения по вектору скоростей [7]. Рассмотрим алгоритм синтеза траектории l'_6 в пространстве L_q , позволяющий исключить ее пересечение с граничными поверхностями области Λ , и располагающейся в данной области. При этом центр ВЗ должен перемещаться по траектории, заданной отрезком прямой A_1A_3 . На рис. 4а представлены изображения области Λ построенные в САПР ACAD соответственно при значении $z_{op} = 1000$ мм и $z_{op} = 1300$ мм (точки B_i изображены в

пространстве L_q совокупностью сфер). Взаимное положение поверхности Ψ и области Λ представлено на рис.4б. Проекция кривой l_m , соответствующей критерию минимизации объема движения, на рисунке 4в обозначены l_{m1} и l_{m2} . Плоскости проекций, изображенные на рис. 4в, определяют обобщенными координатами q_2, q_3 и q_3, q_4 . Пусть траектория l_m , соответствующая синтезу движений центра ВЗ по отрезку A_1A_3 , пересекает границу области Λ в точках $B_m(B_{m1}, B_{m2})$ и $B_n(B_{n1}, B_{n2})$.

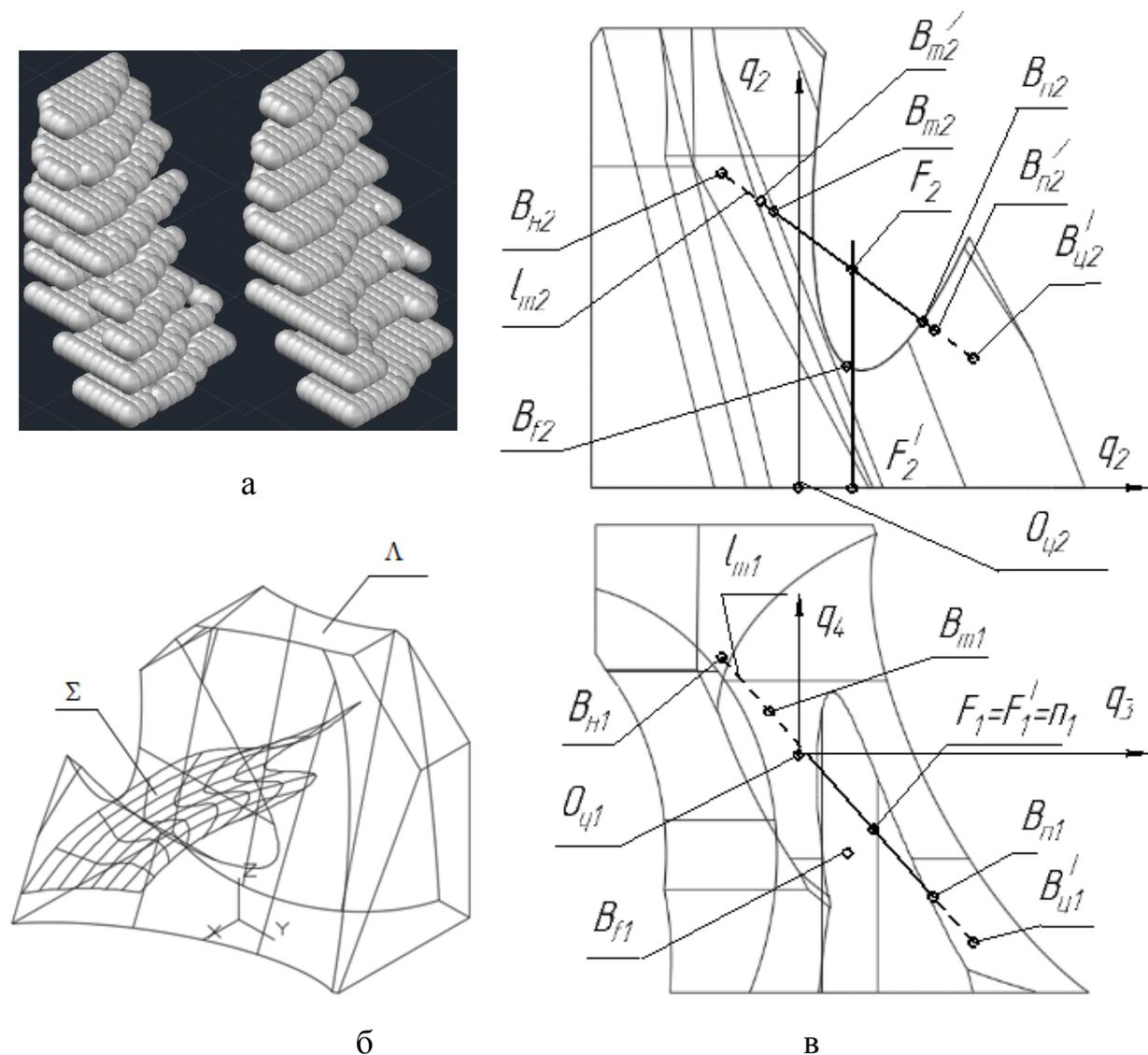


Рис. 4 – Синтез траектории движения манипулятора в пространстве L_q : а – изображение области Λ ; б – взаимное положение поверхности Ψ и области Λ ; в – проекции области Λ разрешенных конфигураций и кривой l_m

С целью определения траектории в пространстве L_q , располагающейся целиком в области Λ , определим вспомогательную точку B_f . Для нахождения указанной точки $B_f(B_{f1}, B_{f2}) B_f \in \Omega_6$, имеющей наименьшее значение обобщенной координаты q_2 (где, Ω_6 поверхность параболического цилиндра, который ограничивает фрагмент области Λ [6]), необходимо найти линию пересечения плоскости $\Delta(B_m, B_n, F)$ (точки B_m, B_n, F задают положение плоскости в пространстве L_q) с поверхностью, определяемой параболическим цилиндром Ω_6 . Точки F и F' принадлежат прямой n , которая перпендикулярна горизонтальной плоскости проекции $O_q q_3 q_4$ (координаты q_3 и q_4 для точек F и F' совпадают). При этом $F' \in l_m$ определяется точкой, принадлежащей траектории l_m и имеющей одинаковое удаление от точек B_m и B_n . Координата q_2 точки F равна нулю.

Коэффициенты A, B, C и D уравнения плоскости Δ вычисляются на основе использования координат трех точек B_m, B_n и F . Точки линии пересечения кривой $l_p = \Delta \cap \Omega_6$ определяют совместным решением уравнений:

$$\begin{cases} Aq_4 + Bq_3 + Cq_2 + D = 0, \\ \left(q_2 \cos \varphi^{\Omega_6} + q_3 \sin \varphi^{\Omega_6} + m_2^{\Omega_6} \right)^2 - 2p^{\Omega_6} \left(q_2 \sin \varphi^{\Omega_6} + q_3 \cos \varphi^{\Omega_6} + m_3^{\Omega_6} \right) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где первое уравнение системы (2) определяет уравнение плоскости $\Delta(B_m, B_n, F)$, а второе уравнение задает параболический цилиндр [9]. Параметры φ^{Ω_6} , $m_2^{\Omega_6}$, $m_3^{\Omega_6}$ и p^{Ω_6} определяют форму параболического цилиндра [6]. На кривой l_p необходимо определить точку B_f имеющую минимальное значение обобщенной координаты q_2 .

Если же точка пересечения кривой l_m существует с поверхностью эллиптического цилиндра Ω_5 [6], то уравнение линии пересечения кривой l_p определится совместным решением следующих уравнений:

$$\begin{cases} A1q_4 + B1q_3 + C1q_2 + D1 = 0, \\ \frac{\left(q_3 \sin \varphi^{\Omega_5} + q_4 \cos \varphi^{\Omega_5} + k_1^{\Omega_5}(q_2) + m_1^{\Omega_5}\right)^2}{(a^{\Omega_5})^2} + \frac{\left(q_3 \sin \varphi^{\Omega_5} + q_4 \cos \varphi^{\Omega_5} + k_2^{\Omega_5}(q_2) + m_2^{\Omega_5}\right)^2}{(b^{\Omega_5})^2} - 1 = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где первое уравнение системы (2) определяет плоскость $\Delta'(B_m, B_n, F')$, а второе определяет уравнение эллиптического цилиндра. Параметры φ^{Ω_5} , $m_2^{\Omega_5}$, $m_3^{\Omega_5}$, $k_1^{\Omega_5}$, $k_2^{\Omega_5}$, a^{Ω_5} и b^{Ω_5} определяют форму эллиптического цилиндра [6]. В этом случае необходимо определить точку $E_f \in l_p$, имеющую максимальное удаление d_e от горизонтальной проекции прямой заданной точками B_{m1} и B_{n1} .

После вычисления точки B_f или E_f необходимо на поверхности Ψ итерационным образом определить точку B_f' пересечения отрезка прямой $B_f F'$ или $E_f F'$ с поверхностью Ψ . Поверхность Ψ при этом задается массивом точек A_1, B_1, C_1 , и т. п., которые затем интерполируются методом Лагранжа [10]. Уравнение поверхности имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{(q_4 - q_4^{B1})(q_4 - q_4^{C1})(q_4 - q_4^{D1})(q_4 - q_4^{E1})}{(q_3^{A1} - q_3^{B1})(q_3^{A1} - q_3^{C1})(q_3^{A1} - q_3^{D1})(q_3^{A1} - q_3^{E1})} q_2^{A1} + \\ & + \frac{(q_4 - q_4^{A1})(q_4 - q_4^{C1})(q_4 - q_4^{D1})(q_4 - q_4^{E1})}{(q_4^{B1} - q_4^{A1})(q_4^{B1} - q_4^{C1})(q_4^{B1} - q_4^{D1})(q_4^{B1} - q_4^{E1})} q_2^{B1} + \\ & + \frac{(q_4 - q_4^{A1})(q_4 - q_4^{B1})(q_4 - q_4^{D1})(q_4 - q_4^{E1})}{(q_4^{C1} - q_4^{A1})(q_4^{C1} - q_4^{B1})(q_4^{C1} - q_4^{D1})(q_4^{C1} - q_4^{E1})} q_2^{C1} + \\ & + \frac{(q_4 - q_4^{A1})(q_4 - q_4^{B1})(q_4 - q_4^{C1})(q_4 - q_4^{E1})}{(q_4^{D1} - q_4^{A1})(q_4^{D1} - q_4^{B1})(q_4^{D1} - q_4^{C1})(q_4^{D1} - q_4^{E1})} q_2^{D1} + \\ & + \frac{(q_4 - q_4^{A1})(q_4 - q_4^{B1})(q_4 - q_4^{C1})(q_4 - q_4^{D1})}{(q_4^{E1} - q_4^{A1})(q_4^{E1} - q_4^{B1})(q_4^{E1} - q_4^{C1})(q_4^{E1} - q_4^{D1})} q_2^{E1} = 0, \quad (4) \end{aligned}$$

маршрута движения в пространстве L_q необходимо участок траектории l_m , на котором находятся точки B_n', F' и B_m' , заменить участком $l_m' \in \Sigma$, на котором находятся точки $B_n' \in \Psi$, $B_m' \in \Psi$ и $B_f' \in \Psi$. Положение траектории l_m' определяется пересечением поверхности Ψ с плоскостью Δ' , проходящей через точки B_n' , B_m' и B_f' . Для этого необходимо последовательно определять пересечение линий уровня поверхности Ψ (4) (соответствующих заданным значениям q_3) с плоскостью Δ' . При этом получают численным методом совокупность точек, задающих траекторию l_m' . Очевидно, что на участке траектории (B_n', B_m', B_f') движение манипулятора осуществляется без учета критерия минимизации объема движения.

Схема алгоритма синтеза траектории движения в конфигурационном пространстве представлена на рис. 5. На рис. 5 приняты следующие обозначения: 1 – начало; 2 – Задание точек A_n и A_u , определяющих начальное и целевое положение ВЗ; 3 – Синтез движения от точки A_1 к целевой точке A_3 по критерию минимизации объема движения, вычисление траектории l_m в пространстве L_q ; 4 – Определение точек пересечения B_m и B_n кривой l_m областью Λ ; 5 – $B_m = \text{null}$, $B_n = \text{null}$; 6 – Вычисление точки $F' l_m$, $F' B_m = F' B_n$. Задание координат точки F ; 7 – Вычисление коэффициентов уравнений плоскостей $\Delta(B_m, B_n, F)$ и $\Delta'(B_m, B_n, E')$; 8 – вычисление точки B_f E_f принадлежащей кривой l_p по соотношениям (2) и (3) при выполнении условий $q_2 = \min$ (для точки B_f), $d_e = \max$ (для точки E_f) (где d_e – параметр определяет расстояние проекции текущей точки $E_f \in l_p$ до проекции прямой на плоскости $q_3 q_4$, заданной точками B_m и B_n); 9 – Определение точек B_m' и B_n' ; 10 – Вычисление точки $B_f' \in \Psi$, $B_f' = B_f F' \cap \Psi$ или $E_f' \in \Psi$, $B_f' = E_f F' \cap \Psi$; 11 – Вычисление коэффициентов уравнения плоскостей $\Delta''(B_m', B_n', B_f')$ или $\Delta'''(B_m', B_n', E_f')$; 12 – Вычисление координат точек кривой $l_m' = \Delta'' \cap \Psi$, $l_m' = \Delta''' \cap \Psi$, (определение

пересечения линий уровня $q_3 = const$ поверхности Ψ с плоскостью Δ'' или Δ''');
 13 – Определение точек M и N пересечения кривой l_m' с областью Λ ; 14 – $N = null, M = null$; 15 – Вывод координат точек траектории движения заданной в пространстве L_q ; 16 – Конец.

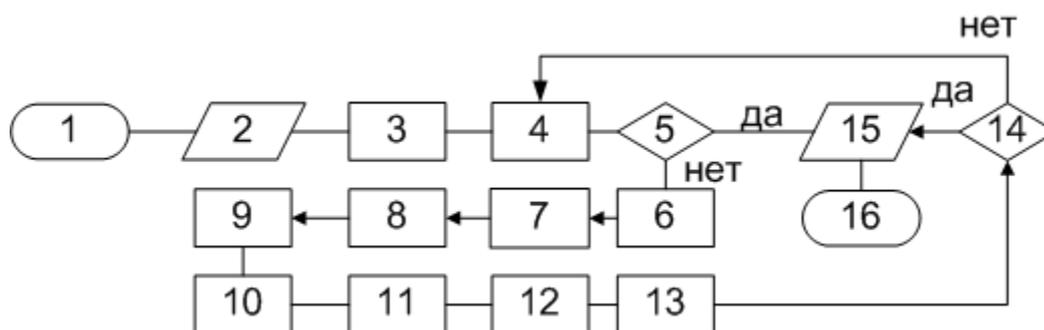


Рис.5 – Схема алгоритма синтеза траектории движения манипулятора в пространстве L_q

На рис. 6а представлены результаты виртуального моделирования движений механизма манипулятора при использовании критерия минимизации объема движения и отсутствии запретной зоны. Моделирование движения выполнено в системе САПР ACADc использованием алгоритмического языка программирования AutoLISP.

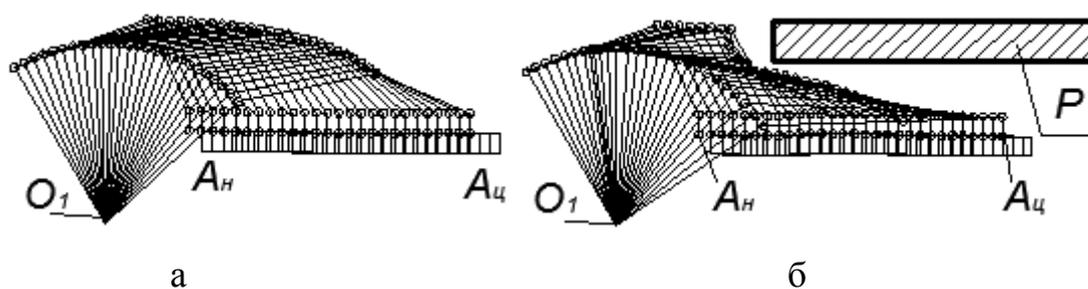


Рис. 6–Результаты синтеза движений манипулятора: а – синтез по критерию минимизации объема движения, б – синтез при наличии запретной зоны P

На рис. 6б соответственно показан синтез движений при наличии запретной зоны. Использование алгоритма, представленного на рисунке 5,

позволяет на виртуальном уровне синтезировать траекторию движения от начальной до целевой точки ВЗ. Данная траектория движения обеспечивает заданное удаление от запретных зон и отсутствие тупиковых ситуаций при синтезе движений по вектору скоростей. Результаты исследований могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем управления роботами.

Литература

1. Ющенко, А. С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №3. – С. 5 – 18.
2. Hasegawa T., Suehiro T., Takase K. A model-based manipulation system with skill-based execution. // "IEEE Trans. Rob. and Autom.", 1992, 8, №5, pp 535–544.
3. Isto P.A. Parallel motion planner for systems with many degrees of freedom // Proc. of the 10th Intemat. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2001), August 22–25, 2001, Hotel Mercure Buda, Budapest, Hungary. pp. 339–344.
4. Lopatin P. K. Algorithm of a manipulator movement amidst unknown obstacles // Proc. of the 10th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2001). August 22–25. 2001. Hotel Mer- cure Buda, Budapest, Hungary. pp. 327–331.
5. Притыкин, Ф.Н., Нефедов Д.И., Рингельман А.В. Исследование областей, задающих множества разрешенных конфигураций при нахождении механизма мобильного манипулятора в близости от запретных зон / Инженерный вестник Дона, 2015 – № 2. Часть 2, URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y2015/3007.
6. Притыкин, Ф.Н., Осадчий А.Ю., Нефедов Д.И. Аналитическое описание области, задающей множество разрешенных конфигураций



механизма мобильного манипулятора с учетом положения запретных зон / Евразийский союз ученых (ЕСУ), 2015 –№ 10(19), С. 119–123.

7. Кобринский, А. А., Кобринский, А.Е. Манипуляционные системы роботов. – М.: Наука. 1985. – 343 с.

8. Притыкин, Ф.Н., Осадчий А.Ю.Способ кодирования информации при задании геометрических моделей исполнительных механизмов роботов // Инженерный вестник Дона, 2014, № 2. URL: ivdon.ru/magazine//archive/n2y2014/2363/.

9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике.– М.: Наука. 1984. – 831 с.

10. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве. Пер. с англ. – М: Мир, 1982.– 340 с.

References

1. Yushchenko, A. S. Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2005. №3. pp. 5–18.

2. Hasegawa T., Suehiro T., Takase K. "IEEE Trans. Rob. andAutom.» 1992, 8, №5, pp. 535–544.

3. Isto P. Proc. of the 10th Intemat. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2001), August 22–25, 2001, Hotel Mercure Buda, Budapest, Hungary.pp. 339—344.

4. Lopatin P. K. Proc. of the 10th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2001). August 22–25.2001. Hotel Mercure Buda, Budapest, Hungary.pp. 327–331.

5. Pritykin F.N., Nefedov D.I., Ringel'man A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015 № 2. Chast' 2, URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y2015/3007.



6. Pritykin, F.N., Osadchij A.Yu., Nefedov D.I. Evrazijskij soyuz uchenyh (ESU), 2015. № 10(19), pp. 119–123.
7. Kobrinskij, A. A., Kobrinskij A. E. Manipulyacionnye sistemy robotov [Manipulative robots system]. M.: Nauka. 1985. 343 p.
8. Pritykin, F. N., Osadchij A. Yu. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, № 2. URL: indon.ru/magazine//archive/n2y2014/2363/.
9. Korn G., Korn T. Spravochnikpomatematike. [Handbook of Mathematics] M.: Nauka. 1984. 831p.
10. Foks A., Pratt M. Vychislitel'naya geometriya. Primenenie v proektirovanii i na proizvodstve. Per. s angl. [Computational geometry. The use in the design and manufacturing. Translate from English] M: Mir, 1982.340 p.