

## ПРЕОДОЛЕНИЕ ТУПИКОВЫХ СИТУАЦИЙ СИНТЕЗА ДВИЖЕНИЙ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОСИ СХВАТОНОСИТЕЛЯ ПО ЛИНЕЙЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ТЕЛЕСНЫЙ УГОЛ СЕРВИСА

Предложен алгоритм синтеза движений руки антропоморфных роботов по вектору скоростей при установке объектов манипулирования, заданных в виде прямоугольных призм в контейнер. Алгоритм позволяет осуществлять выход из возникающих тупиковых ситуаций при компьютерном моделировании движений. Суть метода состоит в использовании перемещений руки, при которых ось схватоносителя перемещается и образует с некоторым приближением линейчатую поверхность, задающую телесный угол сервиса. С этой целью предложено использовать базу данных конфигураций, задающих определенные положения центра выходного звена и осей схватоносителя, совпадающих с образующими указанных линейчатых поверхностей. Представлены результаты расчетов промежуточных конфигураций при компьютерном моделировании движения антропоморфных роботов в организованной среде с использованием разработанного алгоритма.

**Ключевые слова:** механизмы манипуляторов, мгновенные состояния механизмов, вектор обобщенных скоростей, линейчатые поверхности, компьютерное моделирование движений антропоморфных роботов, тупиковые ситуации, запретные зоны, синтез движений манипуляторов.

**Введение.** В настоящее время актуальна разработка интеллектуальных систем управления механизмами рук антропоморфных роботов, способных заменить человека при выполнении работ, связанных с оценкой рабочей сцены и принятия в соответствии с этим тех или иных решений [1–4]. При компьютерном моделировании движений роботов применяют метод, основанный на использовании матриц частных передаточных отношений [5–7]. С помощью данных матриц устанавливается взаимосвязь скоростей выходного звена (ВЗ) и обобщенных скоростей. При использовании указанного метода часто могут возникать тупиковые ситуации. Поэтому существует необходимость в модернизации указанного метода синтеза движений по вектору скоростей, позволяющего преодолевать тупиковые ситуации при компьютерном моделировании движений антропоморфных роботов.

**Постановка задачи исследования.** Рассмотрим алгоритм компьютерного моделирования движения антропоморфных роботов на примере, где необходимо размещать объекты манипулирования, имеющие форму прямоугольных параллелепипедов,

в контейнер заданных размеров. На рис. 1 представлены объекты манипулирования 3 различных размеров, которые перемещаются по конвейеру 4. Данные объекты необходимо размещать в контейнере 5 с использованием руки антропоморфного робота 2. На рис. 1 приведено условное изображение руки антропоморфного робота с обозначением осей и поворотов во вращательных кинематических парах, задающих значения обобщенных координат  $q_2 \div q_8$ .

Рука антропоморфного робота также может смещаться поступательно вдоль направляющей 1 за счет изменения обобщенной координаты  $q_1$ . Кинематическая схема этого механизма изображена на рис. 2б. При автоматизированном управлении движением механизма руки антропоморфного робота в сложно организованном пространстве необходимо обеспечивать достижимость захватом заданных объектов манипулирования на конвейере и установку их в контейнер. Заметим, что боковые стенки контейнера и установленные в контейнере объекты манипулирования (прямоугольные призмы) выступают в качестве запретных зон при ком-

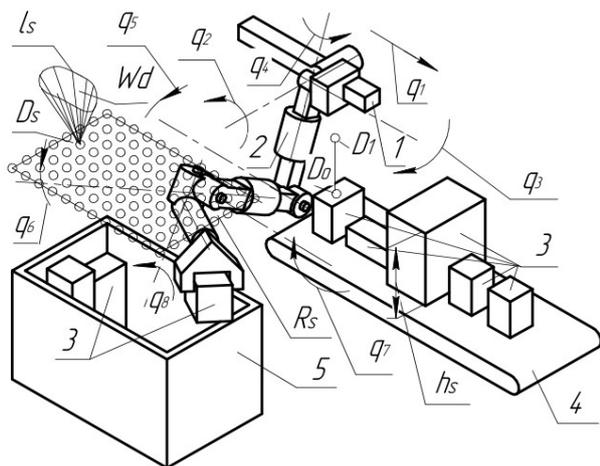


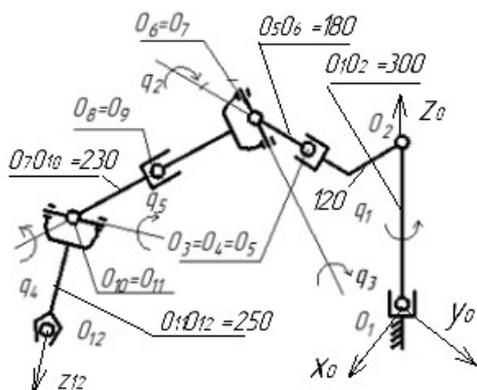
Рис. 1. Положение объектов манипулирования, контейнера, конвейера и руки антропоморфного робота

пьютерном управлении движением механизма руки (рис. 1). Решение указанной задачи при возникновении тупиковых ситуаций при автоматизированном синтезе движений по вектору скоростей возможно с помощью осуществления движения механизма руки, при котором ось схватоносителя описывает линейчатую поверхность  $W_d$ , которая приближенно ограничивает телесный угол сервиса. Тупиковая

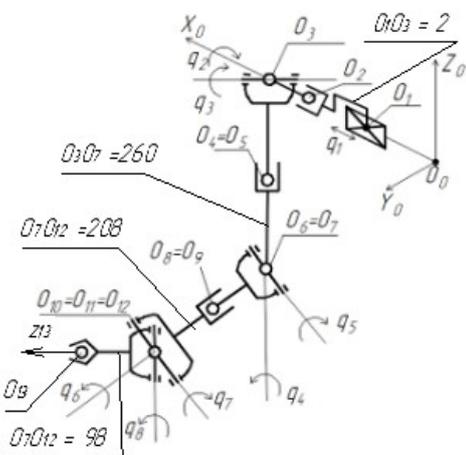
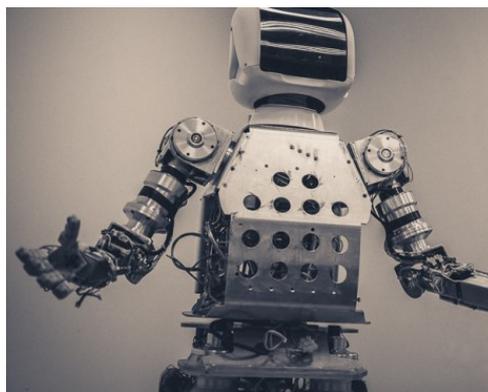
ситуация возникает, когда алгоритм синтеза движений не способен вычислить следующую промежуточную конфигурацию при смещении центра ВЗ в следующую точку заданной траектории. После возникновения тупиковой ситуации компьютерное моделирование движения осуществляется вновь от ближайшей точки  $D_s$ . При этом движении ось схватоносителя (оси  $O_{12}z_{12}$  или  $O_{13}z_{13}$ , рис. 2а, б, перемещается по образующим линейчатой поверхности  $W_d$ . Точка  $D_s$  находится в горизонтальной плоскости  $R_s$ , которая удалена от контейнера на расстояние  $h_s$ . Расстояние  $h_s$  равно наибольшей возможной высоте объектов манипулирования.

На рис. 1 представлена плоскость  $R_s$ , в которой находится совокупность целевых точек  $D_s$ , в которые первоначально перемещается центр ВЗ, заданный точкой  $D_1$ . Совокупность точек  $D_s$  образует равномерную сеть точек в плоскости  $R_s$ . На рисунке точка  $D_0$  задает точку, в которую смещается центр ВЗ при захвате объекта манипулирования. После захвата объекта манипулирования центр ВЗ из точки  $D_0$  перемещается в точку  $D_1$ .

Плоскость  $R_s$  и совокупность точек  $D_s$  используются для создания базы данных множества  $S$  конечных конфигураций  $K_s$  (заданных значениями обобщенных координат  $q_i$ ) руки антропоморфного робота, полученных при перемещении центра ВЗ из точки  $D_1$  в соответствующие точки  $D_s$ . При смещении центра ВЗ из точки  $D_1$  в точку  $D_s$  (с использованием перемещения по критерию минимизации



а)



б)

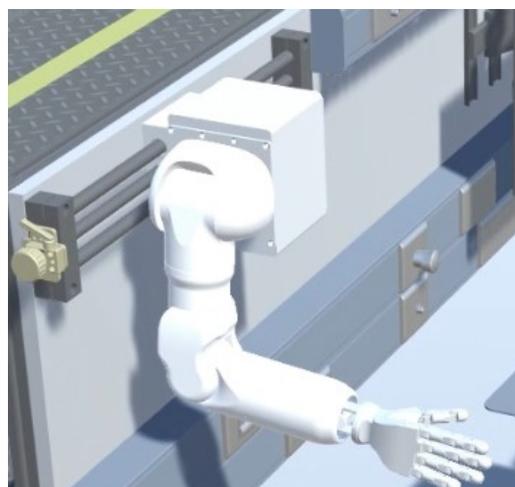


Рис. 2. Кинематические схемы и общий вид антропоморфных роботов:  
а) механизм руки и туловища робота AR-600E (M3-12-10-8-3-12-2-12-3-12-2-12),  $nm = 12$ ,  $n = 5$ ;  
б) механизм руки робота (M4-1-2-12-3-12-1-12-3-12-1-2-12),  $nm = 13$ ,  $n = 8$

объема движения [5–7]) однозначно определяются конечные значения обобщенных координат  $q_i$ , задающих множество  $S$  конфигураций  $K_s$ , количество которых равно числу точек  $D_s \in R_s$ . База данных также содержит информацию о положениях множеств  $S_{DS}$  конфигураций  $K_{su}$ , задающих положения механизма руки, при которых ось схватоносителя находится на линейчатой поверхности  $W_d$  для каждой отдельной конфигурации  $K_s$  множества  $S$ . Кривая  $l_s$  на рис. 1 ограничивает изображение линейчатой поверхности  $W_d$ . Положение центра ВЗ, заданного точкой  $D_1$ , обеспечивается строго заданной конфигурацией  $K_1$ . При создании базы данных множества  $S_{DW}$  (состоящих из двенадцати конфигураций  $K_{su}$ ) для каждой отдельной точки  $D_s$  используется метод, основанный на исследовании реализаций мгновенных состояний механизма руки антропоморфного робота [8]. Движение оси схватоносителя, задающего угол сервиса (с вершиной в точке  $D_s$ ), необходимо для изменения исходного положения звеньев руки по отношению к граням боковых стенок контейнера и граням установленных объектов манипулирования с целью обеспечения выхода из тупиковых ситуаций.

При определении конфигураций  $K_{su}$  руки, при которых ось схватоносителя совпадает с образующими поверхности  $W_d$  и задает телесный угол сервиса, центр ВЗ остается в заданной точке  $D_s$  с некоторым допущением. Это допущение задается принадлежностью центра ВЗ заданной сфере при реализации мгновенных состояний [8]. При этом радиус сферы равен заданной величине точности позиционирования центра ВЗ  $\delta$ . С целью сокращения времени вычислений промежуточных конфигураций (при возникновении тупиковых ситуаций) разработан алгоритм, при котором исключается итерационный поиск значения вектора обобщенных скоростей (вектора приращений обобщенных координат за одну итерацию).

**Построение движений механизмов манипуляторов.** Рассмотрим кинематические схемы антропоморфных роботов, представленных на рис. 2а, б. На рис. 2а задана кинематическая схема шестизвенового механизма руки и туловища антропоморфного робота AR-600E [9]. В соответствии с методикой обозначения структурных моделей открытых кинематических цепей, принятой в работе [10], данный механизм имеет обозначение МЗ-12-10-8-3-12-2-12-3-12-2-12. Соответственно, на рис. 2б представлен девятизвеновый механизм руки антропоморфного робота (М4-1-2-12-3-12-1-12-3-12-1-2-12).

На указанном рис. 2а, б узловые точки, задающие начала систем координат, связанных со звеньями механизма, обозначены точками  $O_1, O_2, \dots, O_{nm}$ , где параметр  $nm$  определяет число систем координат, используемых при задании модели кинематической цепи [10]. Расстояния между узловыми точками на рис. 2а, б заданы длинами отрезков  $O_1O_2 = 300$ , и т.п. в миллиметрах. Известно, что совокупность мгновенных состояний, удовлетворяющих заданной точности позиционирования  $\delta$ , определяет область  $\Omega^Q \subset \Gamma^Q$  в многомерном пространстве обобщенных скоростей  $Q$ . Где  $\Gamma^Q$  обозначена  $p$ -плоскость заданная линейной системой уравнений задающей зависимость скоростей простейших движений ВЗ от обобщенных скоростей  $\dot{q}_i$  (верхний индекс обозначений  $Q$  означает исследование и задание геометрических объектов  $\Omega^Q$  и  $\Gamma^Q$  в многомерном пространстве  $Q$ , а знак  $\subset$  определяет принадлежность). Указанная линейная система уравнений имеет следующий вид [5–7]:

$$JQ = V. \quad (1)$$

Или в развернутом виде:

$$\begin{aligned} J_{11}\dot{q}_1 + J_{12}\dot{q}_2 + \dots + J_{1n}\dot{q}_n &= v_x, \\ &\dots, \\ J_{r1}\dot{q}_1 + J_{r2}\dot{q}_2 + \dots + J_{rn}\dot{q}_n &= \omega_z, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $J$  — матрица частных передаточных отношений размерности  $r \times n$ , задающая мгновенные передаточные отношения  $J_{11}, \dots, J_{rn}$  [7]. Параметр  $r$  задает размерность вектора  $V$  простейших движений ВЗ и для общего случая эта размерность равна шести  $V(V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$  [6].

В зависимости от решаемой двигательной задачи параметр  $r$  может также принимать значения, равные трем или пяти [6].  $Q(q_1, q_2, \dots, q_n)$  — вектор обобщенных скоростей, размерности  $n$ . Параметр  $n$  задает число обобщенных координат механизма  $q_1, q_2, \dots, q_n$ . Область  $\Omega^Q$  определяется множеством точек  $N^Q$ , задающих допустимые мгновенные состояния механизма, при которых  $\delta_d < \delta$ , где  $\delta$  определяет заданную точность позиционирования (при проведении вычислительных экспериментов значение этого параметра принято  $\delta = 5$  мм).  $\delta_d$  — погрешность линеаризации при использовании системы уравнений (2) при расчете конфигураций. Исследованию размеров и формы областей  $\Omega^Q$  для различных механизмов манипуляторов посвящены работы [11–13]. Координаты указанных точек  $N^Q$  вычисляются по известной зависимости [10]:

$$Q_N = Q_M + \sum_{i=1}^p k_i m Q_i, \quad (3)$$

где  $Q_M$  — вектор, задающий точку  $M^Q \subset \Gamma^Q$ , соответствующую критерию минимизации объема движения [6]. Точка  $M^Q$  задает центр репера, связанного с  $p$ -плоскостью  $\Gamma^Q$ ;  $k_i$  — это координаты точки  $N^Q$  в  $p$ -плоскости  $\Gamma^Q$ ;  $m$  — длина единичного отрезка репера  $p$ -плоскости  $\Gamma^Q$ ;  $Q_i$  — единичные направляющие векторы осей репера;  $p$  — размерность  $p$ -плоскости  $\Gamma^Q$ .

Для механизма манипулятора, представленного на рис. 2а,  $n = 5$ , а размерность вектора  $V$  принята  $r = 3$ , что соответствует обеспечению движения центра ВЗ по заданной траектории с произвольной ориентацией ВЗ. Так как  $p = n - r = 2$ , область  $\Omega^Q$  будет определяться двумя параметрами  $k_1$  и  $k_2$ . Механизм руки антропоморфного робота, представленный на рис. 2б, имеет число обобщенных координат  $n = 8$ . Размерность вектора  $V$  при моделировании движений этого механизма манипулятора принята равной  $r = 5$  (движение ВЗ обеспечивается с заданной ориентацией оси схватоносителя  $O_{13}z_{13}$ , см. рис. 2б). Следовательно, для этого случая, область  $\Omega^Q$  будет определяться  $p = n - r = 3$  параметрами  $k_1, k_2$  и  $k_3$ . Изображения областей  $\Omega^Q$  для механизмов, кинематические схемы которых заданы на рис. 2а, б соответственно, представлены на рис. 3а, б.

Положения механизмов, для которых определялись области  $\Omega^Q$ , заданы соответственно векторами  $L_i$  ( $25^\circ, 60^\circ, 10^\circ, 60^\circ, 10^\circ$ ) и  $L_i$  ( $0$  см,  $91^\circ, 0^\circ, 181^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ ). Компоненты векторов  $L_i$  задают значения обобщенных координат  $q_i$ . При вычислении положения точек  $N^Q$  для двух механизмов значения компонент вектора  $V$  были приняты соответственно  $V(V_x = 0, V_y = 0, V_z = -5$  мм/с) и  $V(V_x = 0,$

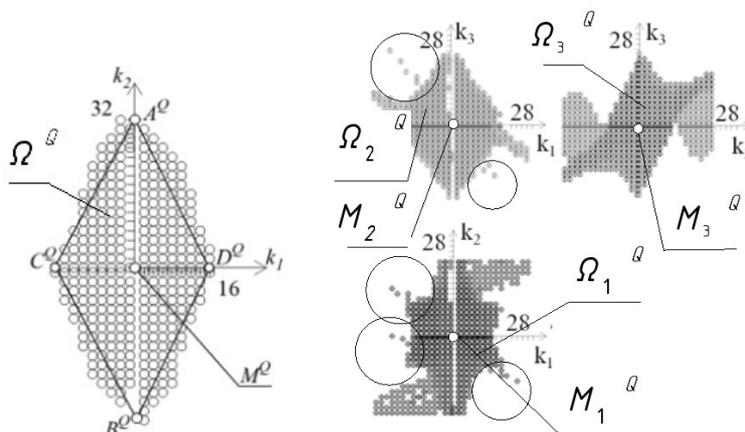


Рис. 3. Изображения областей  $\Omega^0 \subset \Gamma^0$ :  
 а) для антропоморфного робота AR-600E при  $n = 5$  и  $p = 2$  для конфигураций  $L_i$  ( $25^\circ, 60^\circ, 10^\circ, 60^\circ, 10^\circ$ );  
 б) для антропоморфного робота при  $n = 8$  и  $p = 3$  для конфигураций  $L_i$  ( $0^\circ, 91^\circ, 0^\circ, 181^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ )

$V_y = 0, V_z = -5$  мм/с,  $\omega_x = 0, \omega_y = 0$ ). Эти значения позволяют осуществлять перемещение центра ВЗ по направлению оси  $O_0z_0$  (рис. 2а, б). На рис. 3б область  $\Omega^0$  обозначена проекциями  $\Omega_1^0, \Omega_2^0$  и  $\Omega_3^0$ .

При итерационном поиске конфигураций, не пересекающих запретные зоны, могут быть определены такие положения механизма руки, которые определяются точками  $N^0$ , которые на рис. 2б изображены внутри окружностей. Данные точки целесообразно исключить при синтезе малых движений. При использовании значений вектора  $Q$  (определяющего положения этих точек) возникают значительные скачки изменений обобщенных координат, что может способствовать возникновению тупиковых ситуаций.

В настоящей работе предложен метод решения указанной проблемы при поиске промежуточных конфигураций, когда возникают ситуации пересечения исполнительного механизма с запретными зонами. Суть метода состоит в использовании перемещений осей  $O_{12}z_{12}$  и  $O_{13}z_{13}$ , при которых данные оси движутся по линейчатой поверхности  $W_d$ , приближенно ограничивающей телесный угол сервиса с вершинами в точках  $D_s$ . После возникновения тупиковых ситуаций начальное положение манипулятора выбирается такое, когда центр ВЗ совпадает с одной из точек  $D_s$ . Далее осуществляется синтез движений, при котором оси  $O_{12}z_{12}$  и  $O_{13}z_{13}$  движутся по линейчатой поверхности  $W_d$  до тех пор, пока проекции узловых точек механизма  $O_{11}$  или  $O_{12}$  (задающие соответственно звенья  $O_{11}O_{12}$  и  $O_{12}O_{13}$ , см. рис. 2а, б) будут удалены на заданные расстояния  $l_g$  от проекций боковых стенок контейнера или объектов манипулирования  $g_3$  и т. п. (рис. 4). Расстояния  $l_g$  определяют во взаимосвязи с положением и размерами объектов манипулирования и положения боковых стенок контейнера. Заметим, что задачи определения телесных углов сервиса ранее решались в работах [14–16].

Для обеспечения указанных движений осей  $O_{12}z_{12}$  и  $O_{13}z_{13}$  необходимо создание базы данных, в которой хранится информация для определенного множества конфигураций  $S$ , заданных значениями векторов  $L_s$ , при которых центр ВЗ совпадает с различными точками  $D_s \in R_s$ . В базе данных также содержится информация о множествах  $S_{DW}$  конфигураций  $L_{sw}$ , для которых оси  $O_{12}z_{12}$  и  $O_{13}z_{13}$  яв-

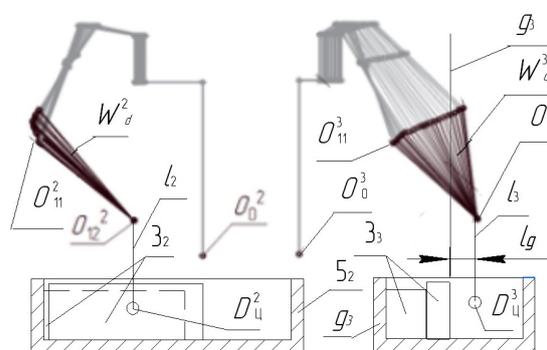


Рис. 4. Изменение положения и ориентации оси  $O_{12}z_{12}$  робота М3-12-10-8-3-12-2-12-3-12-2-12 по отношению к боковым граням контейнера и граням объектов манипулирования с использованием перемещения данной оси по линейчатой поверхности  $W_d$  для начальной конфигурации  $L_i$  ( $25^\circ, 20^\circ, -65^\circ, 25^\circ, -65^\circ$ )

ляются образующими линейчатой поверхности  $W_d$ , ограничивающей телесный угол сервиса. На рис. 4 представлен синтез движения механизма руки антропоморфного робота AR-600E для случая, когда центр ВЗ совпадает с одной из точек  $D_s$  и ось  $O_{12}z_{12}$  перемещается по линейчатой поверхности  $W_d$ . Синтез движений осуществляется до положения механизма, при котором узловая точка механизма  $O_{11}$  смещается в сторону следа профильной проецирующей плоскости  $g_3$  до тех пор, пока не займет противоположное положение. При этом след профильной проецирующей плоскости  $g_3$  располагается на расстоянии  $l_g$  от боковой соседней грани призмы (объекта манипулирования). На рис. 4 проекции точки  $O_{11}$  обозначены  $O_{11}^2$  и  $O_{11}^3$ .

После осуществления указанного перемещения оси  $O_{12}z_{12}$  по линейчатой поверхности  $W_d$  и определения конечной конфигурации, удовлетворяющей указанным требованиям, вновь осуществляется синтез движений, при котором центр ВЗ смещается по вертикальной траектории движения  $l$  ( $l_2, l_3$ ) до целевой точки  $D_u$  ( $D_u^2, D_u^3$ ). Алгоритм синтеза движений с преодолением тупиковых ситуаций и использования линейчатых поверхностей  $W_d$  представлен на рис. 5.

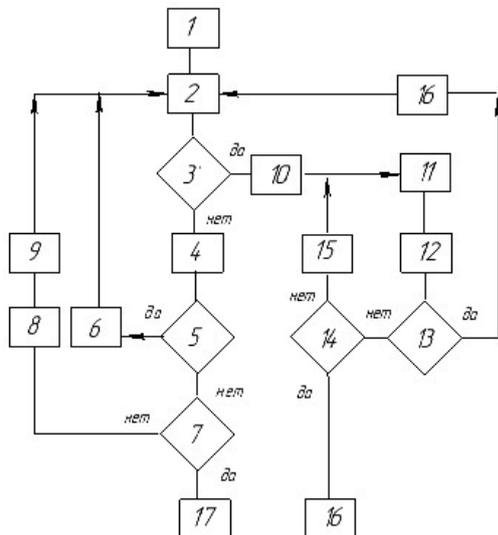


Рис. 5. Алгоритм вычисления промежуточных конфигураций с преодолением тупиковых ситуаций

На рис. 5 приняты следующие обозначения: 1 — задание информации о начальном положении механизма руки, модели кинематической цепи ( $q_1 \div q_n$ ,  $nm$ ,  $n_{kod}$ ,  $l_i$ ,  $r$ ,  $n$ , где  $n_{kod}$  — коды преобразований систем координат [10]), задание последовательности целевых точек движения центра ВЗ ( $D_1, D_s, D_u$ , рис. 1, рис. 5, рис. 6), задание значений  $k_i^{max}$  (максимальных значений параметров  $k_i^{max}$ , рис. 3а, б),  $m = 3$ ; 2 — вычисление вектора  $Q$ , обеспечивающего направление движения центра ВЗ к целевым точкам ( $D_1, D_s, D_u$ ); 3 — все значения вектора  $Q$  использованы  $k_i > k_i^{max}$ ; 4 — реализация значений вектора  $Q$  и вычисление следующей конфигурации ( $q_1 = q_1 + \Delta q_1, \dots, q_n = q_n + \Delta q_n$ , при этом принято допущение  $\dot{q}_1 \approx \Delta q_1, \dot{q}_2 \approx \Delta q_2, \dots, \dot{q}_n \approx \Delta q_n$ ,  $k_s = 0$  ( $k_s$  — номер образующей линейчатой поверхности  $W_d$  в базе данных); 5 — расчетная конфигурация пересекает запретные зоны или не удовлетворяет предельным значениям обобщенных координат; 6 — изменение значений параметров  $k_i$  ( $k_i = k_i + 1$ ); 7 — целевая точка  $D_u$  достигнута; 8 —  $k_i = 0$ ; 9 — вычисление матрицы  $J$  и вектора  $V$ ; 10 — возврат к синтезу движения от точки  $D_s$  (определение ближайшей конфигурации  $L_s$  и горизонтальной проекции точки  $D_s$ , имеющей минимальное расстояние от горизонтальной проекции центра ВЗ (точек  $O_{12}$  или  $O_{13}$ ), в которой произошла тупиковая ситуация,  $k_s = 1$ ; 11 — определение в соответствии с базой данных для положения руки  $L_s$  конфигурации  $L_{sw}$  задающей положение осей  $O_{12}z_{12}$  и  $O_{13}z_{13}$ , совпадающих с положением  $k_s$ -ой образующей линейчатой поверхности  $W_d$ ; 12 — определение значения вектора  $Q_w$  ( $\Delta q_1 = (q_1 - q_{1sw})/n_k$ ,  $\Delta q_2 = (q_2 - q_{2sw})/n_k$  и т. п.), при котором обеспечен синтез движения осей  $O_{12}z_{12}$  и  $O_{13}z_{13}$  (конфигурации  $L_{sw}$ ) до совмещения с  $k_s$ -ой образующей линейчатой поверхности  $W_d$ . Где  $n_k = ((\sum_{i=0}^n (q_i - q_{isw}))/n) / \Delta q^{max}$  ( $\Delta q^{max}$  — заданное максимальное приращение обобщенной координаты за одну итерацию при движении осей  $O_{12}z_{12}$  и  $O_{13}z_{13}$  по поверхности  $W_d$ ).  $q_{isw}$  — значения обобщенных координат механизма, задающие конфигурацию и  $k_s$ -ую образующую поверхности  $W_d$ . Реализация значений вектора  $Q_w$  и вычисление следующей конфигурации ( $q_1 = q_1 + \Delta q_1, \dots, q_n = q_n + \Delta q_n$ ) значения векторов  $Q_w$  позволяют последовательно перемещать оси  $O_{12}z_{12}$  и  $O_{13}z_{13}$  в  $k_s$ -ое

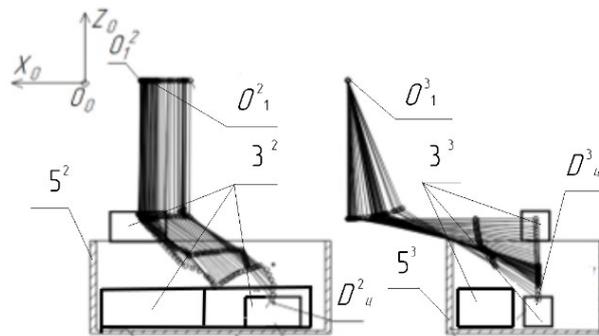


Рис. 6. Результат фрагмента компьютерного моделирования движения руки антропоморфного робота М4-1-2-12-3-12-1-12-3-12-1-2-12 на фронтальной и профильной плоскостях проекций при установке объекта манипулирования в контейнер

положение образующей линейчатой поверхности  $W_d$ , ограничивающей телесный угол сервиса (при этом используется база данных значений векторов  $L_{sw}$ ); 13 — проекции точек  $O_{12}^2, O_{13}^2, O_{12}^3$  и  $O_{13}^3$ , удовлетворяющие заданным требованиям (положение относительно  $g_3$ ); 14 —  $k_s > k_s^{max}$  (построены все положения образующих линейчатой поверхности  $W_d$  текущей конфигурации  $L_s$ ); 15 —  $k_s = k_s + 1$ ; 16 —  $k_s = 0$ ; 16 — целевая точка не может быть достигнута; 17 — вывод значений обобщенных координат, определяющих промежуточные конфигурации, позволяющие достигнуть целевую точку.

**Результаты экспериментов.** На рис. 6 на фронтальной и профильной плоскостях проекций представлен фрагмент синтеза движений руки антропоморфного робота, кинематическая схема которого представлена на рис. 2б. На рис. 6 изображения проекций объектов манипулирования обозначены  $3^2$  и  $3^3$ . Соответственно изображения проекций точек  $O_1, D_u$  и контейнера 5 обозначены  $O_1^2, O_1^3, D_u^2, D_u^3, 5^2$  и  $5^3$ . При решении тестовой задачи были приняты следующие размеры геометрических объектов — размеры контейнера (соответственно длина, ширина и высота в миллиметрах)  $500 \times 325 \times 200$ , размеры объектов манипулирования  $210 \times 110 \times 85$  — 4 шт. и  $110 \times 50 \times 50$  — 4 шт. Компьютерное моделирование движения руки позволило определить, что при значениях  $l_{kx} = 0, l_{ky} = -140, l_{kz} = -200$  и  $l_{mx} = -50, l_{my} = -380$  и  $l_{mz} = 330$  рука антропоморфного робота может обеспечить установку заданных объектов манипулирования внутри контейнера.

Выполнить анализ результатов компьютерного моделирования.

**Основные результаты и выводы.** Результаты компьютерного моделирования движения антропоморфных роботов с использованием разработанного алгоритма показали возможность преодолевать тупиковые ситуации. Создание и использование базы данных конфигураций, задающих образующие линейчатых поверхностей, образующих телесные углы сервиса, позволяет сократить время вычислений тестовых заданий, связанных с установкой объектов манипулирования в контейнер. Проведенные исследования могут быть использованы при разработке информационно-управляющих комплексов подвижных объектов, в частности при разработке интеллектуальных систем управления, автономно функционирующих роботов в организованных средах.

## Библиографический список

1. Афонин В. Л. Интеллектуальные робототехнические системы. Москва: Интернет-университет информационных технологий, 2005. 208 с. ISBN 5-9556-0024-8.
2. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В. [и др.]. Интеллектуальные робототехнические системы: тенденции развития и проблемы разработки. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 9. С. 24–26.
3. Щербатов И. А. Интеллектуальное управление робототехническими системами в условиях неопределённости // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 1. С. 73–77. EDN: KYTLCD.
4. Ющенко А. С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 5–18. EDN: YKBZOZ.
5. Whitney D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2010. № 94 (4). P. 303–309.
6. Кобринский А. А. Манипуляционные системы роботов. Москва: Наука, 1985. 343 с.
7. Корендяев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. Манипуляционные системы роботов. Москва: Машиностроение, 1989. 472 с. ISBN 5-217-00461-4.
8. Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Определение сферической кривой, задающей угол сервиса руки андроида робота методом синтеза малых движений // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 3. С. 71–75. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-3-71-76. EDN: YMCQKL.
9. Жданов Д. С., Костелей Я. В., Хохлова Л. А. [и др.]. Опыт решения обратной задачи кинематики для манипуляторов антропоморфного механизма AR-600 // Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции: сб. материалов III Междунар. форума. Томск, 26–27 ноября 2019 г. Томск: ООО СТТ, 2020. С. 81–84. EDN: ASSESJ.
10. Притыкин Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с. ISBN 978-5-8149-1693-8.
11. Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Исследование размеров и формы области в многомерном пространстве обобщённых скоростей, задающей допустимые мгновенные состояния механизма андроида робота // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 29–34. EDN: WXHOXP.
12. Ескенин Р. Н. Геометрическое моделирование и оптимизация процессов управления адаптивным промышлен-

ным роботом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. 20 с.

13. Гордеев О. И. Исследование формы и положения областей в многомерном пространстве заданных допустимых значений вектора обобщённых скоростей плоского семизвённого манипулятора // Информационные технологии в науке и производстве: материалы Всерос. молодеж. науч.-техн. конф. Омск, 09–10 февраля 2015 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. С. 216–222. EDN: TQFXIX.

14. Лебедев П. А. Аналитический метод определения коэффициента сервиса манипулятора // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 1991. № 5. С. 93–98.

15. Небритов В. И. Определение максимальных значений параметров, задающих угол сервиса и множество конфигураций андроида робота реализацией мгновенных состояний // Информационные технологии в науке и производстве: материалы III Всерос. молодеж. науч.-техн. конф. Омск, 9–10 февраля 2015 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. С. 215–220.

16. Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Конструирование линейчатых поверхностей, ограничивающих область допустимых положений звеньев механизмов манипуляторов при реализации мгновенных состояний // Программные системы и вычислительные методы. 2021. № 2. С. 74–90. DOI: 10.7256/2454-0714.2021.2.35574. EDN: ZNYZKL.

---

**ПРИТЫКИН Федор Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» Омского государственного технического университета, г. Омск.  
SPIN-код: 7628-8023  
ORCID: 0000-0001-8081-6840  
AuthorID (SCOPUS): 6507269253  
Адрес для переписки: pritykin@mail.ru

### Для цитирования

Притыкин Ф. Н. Преодоление тупиковых ситуаций синтеза движений антропоморфных роботов на основе использования перемещений оси схватоносителя по линейчатой поверхности, ограничивающей телесный угол сервиса // Омский научный вестник. 2024. № 3 (191). С. 14–21. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-14-21.

Статья поступила в редакцию 25.01.2024 г.

© Ф. Н. Притыкин

# OVERCOMING DEAD-END SITUATIONS OF SYNTHESIS OF MOTIONS OF ANTHROPOMORPHIC ROBOTS ON THE BASIS OF THE USE OF MOTIONS OF THE CLUTCH AXIS ALONG THE LINEAR SURFACE LIMITING THE BODY ANGLE OF SERVICE

An algorithm for synthesizing hand motions of anthropomorphic robots by velocity vector during the installation of objects of manipulation given, in the form of rectangular prisms in a container, is proposed. The algorithm makes it possible to solve deadlock situations in computer simulation of motions. The essence of the method consists in the use of hand motions, at which the axis of the clash carrier moves and forms with some approximation a ruled surface, which specifies the body angle of service. For this purpose, it is proposed to use a database of configurations that specify certain positions of the output link centre and of the accumulation carrier axes which coincide with the above-mentioned line surfaces. The results of calculations of intermediate configurations in computer modeling of motions of anthropomorphic robots in an organized environment using the developed algorithm are presented.

**Keywords:** mechanisms of manipulators, instantaneous states of mechanisms, vector of generalized speeds, linear surfaces, computer simulation of motions of anthropomorphic robots, deadlocks, forbidden zones, synthesis of motions of manipulators.

## References

1. Afonin V. L. *Intellektual'nyye robototekhnicheskiye sistemy* [Intelligent robotic systems]. Moscow, 2005. 208 p. ISBN 5-9556-0024-8. (In Russ.).
2. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V. [et al.]. *Intellektual'nyye robototekhnicheskiye sistemy: tendentsii razvitiya i problemy razrabotki. Ch. 1* [Intelligent robotic systems: development trends and design challenges. Part 1] // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2004. No. 9. P. 24–26. (In Russ.).
3. Shcherbatov I. A. *Intellektual'noye upravleniye robototekhnicheskimi sistemami v usloviyakh neopredelennosti* [Intellectual management of robotics systems in the conditions of uncertainty] // *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2010. No. 1. P. 73–77. EDN: KYTLCD. (In Russ.).
4. Yushchenko A. S. *Intellektual'noye planirovaniye v deyatel'nosti robotov* [Intelligent planning in robot activities] // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2005. No. 3. P. 5–18. EDN: YKBZOZ. (In Russ.).
5. Whitney D. E. *The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators* // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2010. No. 94 (4). P. 303–309. (In Engl.).
6. Kobrinskiy A. A. *Manipulyatsionnyye sistemy robotov* [Robot manipulation systems]. Moscow, 1985. 343 p. (In Russ.).
7. Korendyasev A. I., Salamandra B. L., Tyves L. I. *Manipulyatsionnyye sistemy robotov* [Manipulation systems of robots]. Moscow, 1989. 472 p. ISBN 5-217-00461-4. (In Russ.).
8. Pritykin F. N., Nebritov V. I. *Opredeleniye sfericheskoy krivoy, zadayushchey ugol servisa ruki androidnogo robota metodom sinteza malykh dvizheniy* [Determination of spherical curve defining the angle of service of android robot arm by method of small motions synthesis] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 3. P. 71–75. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-3-71-76. EDN: YMCQKL. (In Russ.).
9. Zhdanov D. S., Kosteley Ya. V., Khokhlova L. A. [et al.]. *Opyt resheniya obratnoy zadachi kinematiki dlya manipulyatorov antropomorfnoy mekhanizma AR-600* [Experience in solving the inverse problem of kinematics for manipulators of anthropomorphic mechanism AR-600] // *Intellektual'nyye sistemy 4-y promyshlennoy revolyutsii. Intelligent Systems of the 4th Industrial Revolution*. Tomsk, 2020. P. 81–84. EDN: ASSESJ. (In Russ.).
10. Pritykin F. N. *Virtual'noye modelirovaniye dvizheniy robotov, imeyushchikh razlichnyuyu strukturu kinematicheskikh tsepey* [Virtual modeling of robot movements with different kinematic chain structure]. Omsk, 2014. 172 p. ISBN 978-5-8149-1693-8. (In Russ.).

11. Pritykin F. N., Nebritov V. I. Issledovaniye razmerov i formy oblasti v mnogomernom prostranstve obobshchennykh skorostey, zadayushchey dopustimyye mgnovennyye sostoyaniya mekhanizma androidnogo robota [The study of size and shape of area in multidimensional space of generalized velocities defining permissible instantaneous state of android robot mechanism] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2016. No. 5 (149). P. 29–34. EDN: WXHOXP. (In Russ.).
12. Eskenin R. N. Geometricheskoye modelirovaniye i optimizatsiya protsessov upravleniya adaptivnym promyshlennym robotom [Geometric modeling and optimization of control processes of adaptive industrial robot]. Omsk, 2010. 20 p. (In Russ.).
13. Gordeyev O. I. Issledovaniye formy i polozheniya oblastey v mnogomernom prostranstve zadannykh dopustimyykh znacheniy vektora obobshchennykh skorostey ploskogo semizvennogo manipulyatora [Study of the shape and position of regions in the multidimensional space of given admissible values of the vector of generalized velocities of a flat seven-link manipulator] // *Informatsionnyye tekhnologii v nauke i proizvodstve. Information Technologies in Science and Production*. Omsk, 2015. P. 216–222. EDN: TQFXIX. (In Russ.).
14. Lebedev P. A. Analiticheskiy metod opredeleniya koeffitsiyenta servisa manipulyatora [Analytical method for determining the manipulator service factor] // *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 1991. No. 5. P. 93–98. (In Russ.).
15. Nebritov V. I. Opredeleniye maksimal'nykh znacheniy parametrov zadayushchikh ugol servisa i mnozhestvo konfiguratsiy androidnogo robota realizatsiyey mgnovennykh sostoyaniy [Determination of maximum values of parameters setting the service angle and set of android robot configurations by instantaneous state realization] // *Informatsionnyye tekhnologii v nauke i proizvodstve. Information Technologies in Science and Production*. Omsk, 2016. P. 215–220. (In Russ.).
16. Pritykin F. N., Nebritov V. I. Konstruirovaniye lineychatykh poverkhnostey ogranichivayushchikh oblast' dopustimyykh polozheniy zven'yev mekhanizmov manipulyatorov pri realizatsii mgnovennykh sostoyaniy [Graphic optimization model of the process of welding products by a robot based on radishchev blueprint] // *Programmnyye sistemy i vychislitel'nyye metody. Software Systems and Computational Methods*. 2021. No. 2. P. 74–90. DOI: 10.7256/2454-0714.2021.2.35574. EDN: ZNYZKL. (In Russ.).

---

**PRITYKIN Fedor Nikolayevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Engineering Geometry and CAD Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7628-8023

ORCID: 0000-0001-8081-6840

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

Correspondence address: pritykin@mail.ru

#### For citations

Pritykin F. N. Overcoming dead-end situations of synthesis of motions of anthropomorphic robots on the basis of the use of motions of the clutch axis along the linear surface limiting the body angle of service // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 3 (191). P. 14–21. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-14-21.

Received January 25, 2024.

© F. N. Pritykin