

Метод прогнозирования столкновений двух манипуляторов робототехнического комплекса

Алексей А. Кабанов, Д. А. Токарев
Севастопольский государственный университет
Севастополь, Россия
E-mail: KabanovAleksey@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается задача обнаружения и предотвращения самостолкновений для робота с двумя манипуляторами. Предложенный метод обнаружения самостолкновений основан на дискретном разделении рабочего пространства на ряд малых объемов. Каждый из дискретных объемов имеет статус «занят» или «свободен». Система управления отслеживает ситуации, когда движение по рассчитанной траектории приведет манипулятор в занятые дискретные объемы рабочего пространства. Приведен пошаговый алгоритм работы системы обнаружения самостолкновений. Приведен пример реализации алгоритма.

Ключевые слова: *двурукий робот; самостолкновения; согласованная работа.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение и предотвращение столкновений – это базовая функция, которая играет важную роль в выполнении полностью или частично автономных действий робота-манипулятора в неструктурированной среде. На практике обычно получается, что кажущееся большое рабочее пространство робота-манипулятора значительно сокращается из-за опасности столкновения манипулятора с другими объектами, наличием пределов суставов, особых положений и зон ограниченной управляемости [1, 2]. Для роботов с двумя манипуляторами существует опасность столкновения манипуляторов друг с другом. Такие столкновения будут называться самостолкновениями робота.

Не существует единого подхода к определению площади пересечения работающих манипуляторов и анализу их возможных автоколлизий. В каждом конкретном случае конкретного робота проводится разработка системы управления с алгоритмами предотвращения столкновений. В [3] авторы представили проблему управления манипуляциями с двумя манипуляторами с помощью метода программирования на основе ограничений. Задача предотвращения столкновений сводится к анализу взаимодействия только рабочих органов двух манипуляторов. Этот метод используется для создания онлайн-планов движения для

робота с двумя манипуляторами. Разработанный метод позволяет избежать столкновений с внешними препятствиями, а также избежать столкновения рабочих органов. Очевидно, что такой подход не гарантирует предотвращения столкновений между звеньями манипуляторов. Другой способ основан на поиске управляющих сигналов, исключающих движение двух манипуляторов с пересечением траекторий всех звеньев манипулятора. В [4] предлагается подход, основанный на моделировании манипулятора и окружающих объектов с помощью простых геометрических примитивов, таких как «цилиндр» или «сфера». Используя такие геометрические представления, авторы ввели свойства различных типов столкновений. Получен простой метод обнаружения таких столкновений. Для генерации траекторий манипулятора в реальном времени, позволяющих избежать столкновений, в [5] был предложен надежный реактивный алгоритм под названием «Скелетный алгоритм». Согласно этому алгоритму, структура робота делится на сегменты, так что можно выбирать случайные точки и управлять ими. Алгоритм определяет точки столкновения на таких сегментах и генерирует подходящий элемент управления для предотвращения столкновения. Этот алгоритм требует сенсорной информации о положении каждой части, чтобы планировать траекторию избегая возможные столкновения.

Теперь выделим некоторые важные аспекты для решения проблемы обнаружения и предотвращения самопроизвольного столкновения для робота с двумя манипуляторами. Одним из способов избежать столкновения манипуляторов является разделение рабочего пространства. Рабочее пространство разделено на два подпространства, где каждый из манипуляторов может выполнять действия без столкновения с другим. Расширением этого подхода является оперативная перестройка границы раздела операционного пространства с учетом текущего положения каждого манипулятора.

При проектировании системы управления, помимо разделения рабочего пространства, следует также отдавать приоритет выполнению команды робота. Чтобы учесть взаимное влияние манипуляторов во время их совместной работы, целесообразно использовать подход ведомый-ведущий [2]. Согласно этому подходу, один из

Представленное исследование было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 14.578.21.0264, проект RFMEFI57818X0264).

манипуляторов назначается «ведущим», а другой становится «ведомым». Если ведущий находится в зоне взаимодействия, зона запрета ведомого манипулятора изменяется в соответствии с позициями ведущего манипулятора. Таким образом, подчиненный манипулятор освобождает область взаимодействия рабочего пространства, если оно занято ведущим.

Помимо подхода «ведущий-ведомый», также может применяться подход «занято». Некоторую аналогию подхода можно увидеть в [6] (с условием, что этот подход применим для двумерного пространства). По нашему мнению, расширение свободного подхода на трехмерное операционное пространство допустимо. Согласно этому подходу в систему вводится условное состояние общей области взаимодействия в виде двух опций «занято» и «свободно». Если один из манипуляторов находится в общей области взаимодействия, то эта область получает статус «занято». При этом данная зона определяется как запрещенная зона для другого манипулятора. Если манипулятор покидает общую зону, эта зона получает статус «свободной».

В данном исследовании рассматриваются вопросы разработки метода обнаружения и предотвращения самоповреждений для робота с двумя манипуляторами. Рабочее пространство манипуляторов разделено на небольшие объемные пространства. Каждый из отдельных объемов может иметь статус «занят» или «свободен». Система управления генерирует ограничения, когда движение по сгенерированной траектории приведет манипулятор в занятые объемные пространства. Этот подход имеет несколько преимуществ: простая реализация, проверка положения всех соединений манипуляторов и звеньев. Также предлагаемому способу нет необходимости заменять соединения и звенья манипуляторов объемными геометрическими примитивами.

Остальная часть статьи выглядит следующим образом. Раздел 2 содержит описание метода обнаружения и предотвращения самопроизвольных столкновений манипуляторов, пример реализации алгоритма для двурукого робота представлен в разделе 3, основные выводы приведены в разделе 4.

II. АЛГОРИТМ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ САМОСТОЛКНОВЕНИЙ

На наш взгляд, целесообразно провести анализ столкновения манипуляторов с точки зрения их кинематической модели, дополненной геометрическими параметрами манипуляторов. В результате каждое звено манипулятора может быть представлено как набор точек в рабочем пространстве. В общем случае количество этих точек не ограничено ввиду непрерывности получаемой поверхности твердого тела (манипулятора). Это приводит к необходимости поиска аналитического решения проблемы пересечения тел. Принимая во внимание, что существует более двух тел и их форма может быть неограниченной, поиск такого решения может быть довольно трудным. В данной статье для преодоления этих трудностей был предложен подход к поиску пересечения

(то есть столкновения) звеньев и соединений манипуляторов. Он основан на дискретизации операционного пространства в единичные объемы с достаточно малой частотой дискретизации. Требуемая точность и доступные вычислительные ресурсы определяют размер частоты дискретизации. Каждый манипулятор в рабочем пространстве представлен как конечное число единичных объемов. Таким образом, осуществляется переход от манипулятора в виде поверхности твердого тела в рабочем пространстве к манипулятору в виде единичных объемов, заданных в рабочем пространстве.

Эти объемы будут характеризоваться их пространственными координатами x, y, z в полученном дискретном рабочем пространстве, а также логической переменной, определяющей состояния объема («занят» и «свободен»):

$$v_k = (x_k, y_k, z_k, e_k).$$

где x_k, y_k, z_k пространственные координаты k -го единичного объема рабочего пространства манипуляторов, e_k логическая переменная с двумя возможными состояниями

$$e_k = \begin{cases} 0 & \text{— when the volume is free,} \\ 1 & \text{— when the volume is occupied.} \end{cases}$$

Каждый сустав манипулятора p_i имеет пространственные координаты (x_i, y_i, z_i) , где $i = 1, 2, \dots, n$. Преобразование, которое соединяет i -ый сустав с $(i-1)$ -м суставом описывается однородной 4x4 матрицей [3]:

$${}^{i-1}A_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $C\varphi_i$ и $S\varphi_i$ — $\cos(\varphi_i)$ и $\sin(\varphi_i)$, соответственно, θ_i — угол на который ось X_{i-1} должна вращаться вокруг оси Z_{i-1} , так что она станет сонаправлена с осью X_i , α_i — угол, на который ось Z_{i-1} должна быть повернута вокруг оси X_i так что она станет сонаправлена с осью Z_i . С помощью заданной матрицы соединяем координаты сустава p_i с предыдущим суставом p_{i-1} :

$$p_{i-1} = {}^{i-1}A_i p_i, \quad (3)$$

где $p_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1)^T$, $p_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T$.

Однородная матрица, определяющая положение i -й системы координат относительно базовой системы координат, представляется как произведение последовательности матриц однородного преобразования.

$${}^{i-1}A_i [3]:$$

$$T = \prod_{j=1}^i A_j(\theta_j) = \begin{pmatrix} {}^0R_i & {}^0p_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad i = \overline{1, n},$$

где верхняя левая подматрица R_i имеет размерность 3×3 , 0p_i это вектор, размерностью 3×1 . Таким образом, указав набор матриц преобразования, мы можем рассчитать текущую совместную позицию манипуляторов.

Координаты узлов манипуляторов должны быть преобразованы в координаты занятых объемов (в которых эти узлы находятся). Для этого умножим координаты p_i на коэффициент дискретизации K_d , равный количеству дискретных объемов в единицах базового пространства, и отбросим дробную часть.

Помимо объемов, занимаемых соединениями, существуют объемы, через которые проходят соединительные линии. Функция, по которой построены данные линии, получается из уравнения прямой в пространстве:

$$\frac{y - y_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} = \frac{z - z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}},$$

где $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$, (x_i, y_i, z_i) координаты сустава p_{i-1} и p_i в трехмерной системе координат соответственно. Для $x \in [x_{i-1}, x_i]$ мы получаем $y(x)$ и $z(x)$:

$$\begin{cases} y(x) = y_{i-1} + \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}(x - x_{i-1}), \\ z(x) = z_{i-1} + \frac{z_i - z_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}(x - x_{i-1}). \end{cases}$$

Каждый из полученных единичных объемов имеет три пространственные координаты в рамках заданного дискретного масштаба и логическую переменную с состояниями «1» или «0» (занят или свободен). Геометрическая интерпретация логического состояния может быть выделена цветом для наглядности.

В этой статье мы используем подход, согласно которому один манипулятор по отношению к другому действует как трехмерная запрещенная зона. Когда робот работает, эта область изменяется в соответствии с текущим положением манипуляторов. Расчет движения манипуляторов выполняется с учетом динамически изменяемых зон запрета. Пересечение двух тел (столкновение манипуляторов), представленных в виде набора единичных объемов, определяется совпадением координат двух или более единичных объемов. Реализация этого метода сводится к написанию алгоритма, который ищет одинаковые объемные координаты для двух объектов.

В результате в рабочем пространстве манипуляторов V мы получаем два дискретных подпространства V_L, V_R , занимаемых соответственно левым и правым манипуляторами. Таким образом, проблема обнаружения столкновений сводится к задаче поиска пересечения

дискретных пространств V_L, V_R . Учитывая дискретность координат этих подпространств, поиск их пересечения сводится к поиску не менее двух единичных объемов с совпадающими координатами. На рис. 1 показана блок-схема описанного алгоритма обнаружения и предотвращения столкновений.

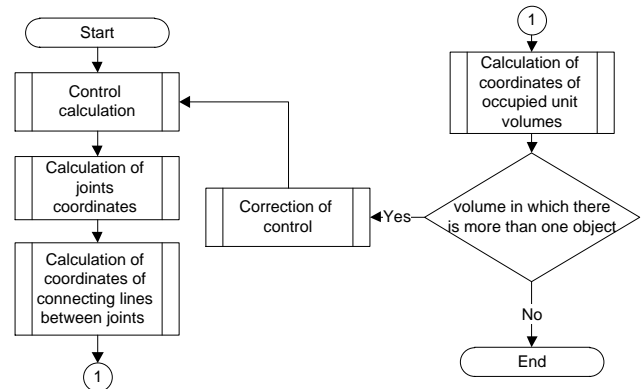


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обнаружения и предотвращения столкновений

III. ПРИМЕР

Чтобы проверить эффективность предложенного метода, мы используем его в задаче предотвращения самостолкновения для робота с двумя манипуляторами. Форма эскиза и рабочая зона рассматриваемого двурукого робота приведены на рис. 2, основные метрические данные манипуляторов представлены в табл. I.

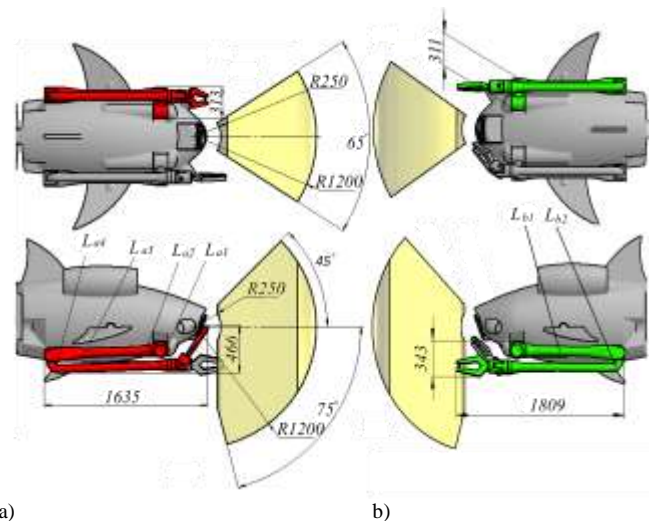


Рис. 2. Эскиза и рабочая зона двухрукого робота: левая рука (a) и правая (b)

На рис. 3 схематически изображено трехмерное рабочее пространство с двумя манипуляторами в декартовой системе координат, разделенными на дискретные единичные объемы. Схематическое представление роботов-манипуляторов построено с помощью кинематической модели в обозначении

Денавит-Хартенберга (DH) (табл. II). Такой подход упрощает представление реального робота до его интерпретации в виде звеньев и их соединений (по аналогии со скелетным алгоритмом [5]).

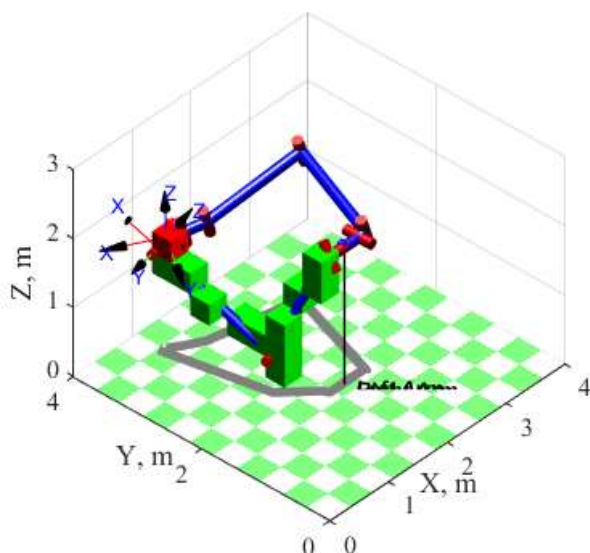


Рис. 3. Дискретное рабочее пространство со схематическим положением робота

ТАБЛИЦА I ОСНОВНЫЕ МЕТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ МАНИПУЛЯТОРОВ

Обозначение	Манипулятор робота	
	Левый	Правый
Длина звеньев, аналога человеческого плеча, мм	1100 (links La1+ La2)	1100 (link Lb1)
Длина звеньев, аналога предплечья человека, мм	1300 (links La3+ La4)	1300 (link Lb2)
Степень свободы (исключая конечный эффектор)	7	4
Габаритные размеры манипулятора в транспортном положении, мм	1635x466x313	1809x343x311
Межосевое расстояние между левой и правой рукой, мм	500	

ТАБЛИЦА II DH-ПАРАМЕТРЫ

Соединение	a_i , м	α_i , град	d_i , м	θ_i , град	Пределы, град
$\varphi_{a,1}$	0	-90	-0.25	0	-20..0
$\varphi_{a,2}$	-0.1	90	0	0	-90..165
$\varphi_{a,3}$	1.5	0	0	0	-15..25
$\varphi_{a,4}$	1.4	0	0	0	92..180
$\varphi_{a,5}$	0.3	0	0	0	0..10
$\varphi_{a,6}$	0.1	-90	0	0	0..20

Соединение	a_i , м	α_i , град	d_i , м	θ_i , град	Пределы, град
$\varphi_{a,7}$	0.1	-90	0	0	0..40
$\varphi_{b,1}$	0	-90	0.25	0	-45..-5
$\varphi_{b,2}$	-0.1	-90	0	0	-90..75
$\varphi_{b,3}$	1.5	0	0	0	-10..45
$\varphi_{b,4}$	1.8	0	0	0	60..180
$\varphi_{b,5}$	0.01	90	0	0	-45..45

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен алгоритм обнаружения и предотвращения самостолкновений для робота с двумя манипуляторами. Данный алгоритм основан на разделении рабочего пространства манипуляторов на небольшие дискретные объемы. Эти объемы характеризуются своими координатами в дискретном пространстве, а также логической переменной, которая определяет состояния объема («занят» или «свободен»). Те объемы, где расположены сочленения и звенья манипуляторов, обозначены как занятые. При вычислении управления, производится расчет будущей позиции манипуляторов. Если прогнозируется попадание в занятую область, система управления может остановить движение робота или изменить траекторию движения робота.

Учет геометрических особенностей манипуляторов является необходимой модернизацией предлагаемого подхода. Построение дискретного рабочего пространства может выполняться с учетом геометрии звеньев манипуляторов. Добавление геометрических фигур, которые описывают объемное представление этих элементов, позволит учесть столкновение манипуляторов в условиях реальной конструкции. Этот метод позволяет прогнозировать столкновение двух или более манипуляторов на этапе проектирования управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: modelling, planning and control, Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] Siciliano B., Khatib O. Springer handbook of robotics, NY: Springer-Verlag, 2008.
- [3] Wang Y., Ogren P., Simth C., Vina F., and Karayiannidis Y. "Dual arm manipulation using constraint based programming", Proc. 19th World Congress IFAC (Cape Town), vol. 19, 2014, pp. 311-319.
- [4] Patel R.V., Shadpey F., Ranjbaran F., and Angeles J. "A collision-avoidance scheme for redundant manipulators: theory and experiments", J. of Robotic Systems, vol. 22 (12), 2005, pp.737-757.
- [5] Santis A., Albu-Schäffer A., Ott C., Siciliano B., and Hirzinger G. "The skeleton algorithm for real-time collision avoidance of a humanoid manipulator interacting with humans", Proc. IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced intelligent mechatronics (Zurich), 2007, No 9871732.
- [6] Jefferies M.E., Yeap W. Robotics and cognitive approaches to spatial mapping, NY: Springer-Verlag, 2008.