

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Чумаков О. А.

*Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники,
Минск, Беларусь, olegchumakov@bsuir.by*

Аннотация. Поиск оптимальной компоновки робототехнологической ячейки связан с задачей синтеза плавной траектории движения инструмента, при которой оптимально используются кинематические возможности промышленного робота в среде с препятствиями. Разработан метод оптимизации расположения робота в РТК лазерной и плазменной резки, основанный на векторном критерии качества, учитывающем особенности технологического процесса. Создан алгоритм оптимизации и проведено моделирование на модели трехстепенного манипулятора в среде MATLAB.

Ключевые слова: антропоморфный манипулятор, РТК, траектория, промышленный робот, технологический процесс.

Abstract. The search for the optimal layout of a robotic cell is associated with the problem of synthesizing a smooth tool trajectory, in which the kinematic capabilities of an industrial robot in an environment with obstacles are optimally used. A method has been developed for optimizing the location of the robot in the robotic complex for laser and plasma cutting, based on a vector quality criterion that takes into account the features of the technological process. An optimization algorithm was created and modeling was carried out on a model of a three-degree manipulator in the MATLAB environment.

Key words: anthropomorphic manipulator, robotic complex, trajectory, industrial robot, technological process.

Процесс поиска оптимального положения робота относительно траектории резки разбивается на несколько этапов. В связи с тем, что при перемещении инструмента по траектории переход из одной конфигурации робота к другой приводит к резкому изменению скорости суставов, что по технологии является недопустимым, оптимизация положения основания для каждой конфигурации производится отдельно. Сначала разработчику дается возможность задать область поиска. Затем для определенной конфигурации робота производится поиск координат основания, для которых все точки траектории достижимы и отсутствуют столкновения между элементами РТК и изделием. Для этого пространство поиска представляется в виде сетки. Ее шаг выбирается исходя из геометрических размеров РТК, времени поиска и необходимой точности решения. На практике целесообразно производить поиск в двух приближениях. В первом – произвести грубую оценку, которая даст ответ о приблизительных возможных

положениях, а во втором – с необходимой точностью найти наиболее оптимальные координаты основания робота.

Определение достижимости инструментом заданной точки траектории производится путем решения обратной задачи кинематики. Так как эта задача решается для избыточных манипуляционных систем, то для каждой точки траектории может быть найдено несколько решений, обусловленных вращением инструмента вокруг оси режущего луча. Количество таких возможных положений инструмента является входным параметром алгоритма и определяется пользователем. Кроме того, для каждого такого решения производится анализ отсутствия столкновений. Для этого производится проверка пересечений поверхностей, описывающих звенья манипулятора и инструмента с поверхностями элементов РТК и изделия. Отсутствие решения хотя бы для одной точки траектории свидетельствует о невозможности размещения основания робота в рассматриваемом узле сетки. Таким образом, для заданной конфигурации робота формируется массив данных, определяющих декартовы координаты x , y , z , соответствующие допустимой локации, ее углы ориентации a , b , c , индекс конфигурации M и значения обобщенных координат суставов манипулятора q . В связи со значительным объемом вычислений для сложных траекторий, состоящих из сотен или тысяч узлов, в первом приближении целесообразно ограничиться проверкой только характеристических точек траектории резки. Они выбираются как наиболее удаленные точки от центра тяжести траектории. На заключительном этапе необходимо проверить достижимость инструментом всех точек.

Массив полученных данных представляется в виде многослойного направленного графа, где каждый слой соответствует определенному индексу конфигурации [1]. На полученном графе, для каждого индекса конфигурации, решается задача поиска оптимального пути, обеспечивающего как требуемый закон движения технологического инструмента, так и минимум перемещений по каждому суставу. При этом используется метод динамического программирования. Найденная оптимальная траектория однозначно определяет закон изменения всех шести суставов и трех углов ориентации инструмента. Качество движения для каждого сустава и угла ориентации оценивается векторным критерием качества, учитывающим диапазон изменения обобщенных координат, их отклонение от середины допустимого диапазона, объем движений, максимальные скорости суставов.

В процессе оптимизации пользователь имеет возможность ранжирования и выбора приоритетных критериев. Чтобы сбалансировать взаимопротиворечивые критерии качества пользователь может назначить им весовые коэффициенты. Для РТК резки, в частности, критичными являются суставы, несущие кабели питания плазменной горелки или лазерного излучателя, а также первый сустав, обеспечивающий поворот всего робота относительно основания. Поэтому они должны быть наименее подвижными и иметь наибольшие веса. Необходимо отметить, что начальные и конечные положения робота в пространстве обобщенных координат не являются единственными, поэтому они изменяются в процессе оптимизации.

Алгоритм поиска оптимального положения основания робота включает:

Входные данные:

- массив равноудаленных точек p , описывающих траекторию резки;
 - длины звеньев робота l ;
 - весовые коэффициенты суставов w ;
 - количество положений инструмента m (угол поворота инструмента fi);
 - границы области поиска по соответствующим осям x_B, y_B, z_B ;
 - шаг сетки области поиска $stepB$;
 - массивы координат p_{displ} , описывающие препятствия;
 - индексы конфигурации M , для которых необходимо произвести вычисления;
- Выходные данные:*

- массив возможных координат основания робота k с количественными оценками соответствующих положений F_{opt} ;
- координаты наиболее оптимальных положений x_{opt}, y_{opt} для каждого индекса конфигурации M .

Разработанный алгоритм позволяет пользователю сформировать множество Парето-оптимальных решений для задачи оптимизации положения робота в РТК резки.

Эффективность предложенного алгоритма проиллюстрируем на модельном примере. Для этого используем манипулятор, состоящий из трех вращательных суставов и трех звеньев с длинами $l_1 = 1,0$ м, $l_2 = 1,0$ м и $l_3 = 0,25$ м. Контур резки зададим как квадрат со стороной $d = 0,8$ м, углы которого скруглены с радиусом $r = 0,10$ м. Центр контура расположим в точке $(1,0$ м, $1,0$ м). Приблизим задачу к реальной, окружив контур препятствием с зазором $\Delta d = 0,05$ м. После дискретизации, контур представляется последовательностью 60 равномерно распределенных узлов. Найденные возможные положения робота будем отображать в виде точек, а оптимальное положение для каждой конфигурации обведем кружком. Для наглядности представления результатов опишем линиями уровня области с одинаковыми значениями критерия (рис. 1). В связи с тем, что для рассматриваемого примера решение обратной задачи кинематики возможно для двух индексов конфигурации, оптимальных решений будет также два.

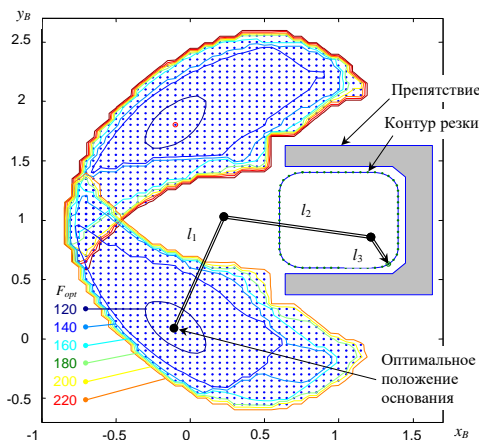


Рисунок 1 – Множество решений и показатели качества для задачи оптимизации расположения плоского трехзвенного манипулятора

Для рассматриваемого манипулятора, прямое преобразование координат описывается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}x &= l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + x_b; \\y &= l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) + y_b; \\ \varphi &= q_1 + q_2 + q_3,\end{aligned}$$

где q_1, q_2, q_3 – обобщенные координаты; x, y, φ – параметры ориентации инструмента (две декартовы координаты и угол ориентации), а x_b и y_b определяют расположение основания манипулятора. Для решения обратной задачи кинематики последовательно решим полученные уравнения относительно q_2, q_1 и q_3 :

$$\begin{aligned}q_2 &= M \cdot \arccos((x' - x_b)^2 + (y' - y_b)^2 - l_1^2 - l_2^2) / 2l_1l_2, \\q_1 &= \arctan 2 \frac{(y' - y_b)(l_1 + l_2 \cos(q_2)) - (x' - x_b)l_2 \sin(q_2)}{(x' - x_b)(l_1 + l_2 \cos(q_2)) + (y' - y_b)l_2 \sin(q_2)}, \\q_3 &= \varphi - q_1 - q_2,\end{aligned}$$

где $M = \operatorname{sgn}(q_2)$ – индекс конфигурации, а x_b и y_b – координаты основания робота.

Результаты оптимизации по критериям объема движений и диапазона изменения обобщенных координат для различных весовых коэффициентов представлены в табл.1 и 2 соответственно.

Как следует из результатов оптимизации, предложенный алгоритм обеспечивает нахождение оптимального положения робота для всех возможных индексов конфигурации M . Время моделирования для шага сетки 0,05 м. и траектории, состоящей из 61 узла, составило примерно 1,7 часа. Это подтверждает предположение о том, что на практике целесообразно производить расчет сначала для большого шага сетки, затем уточнять решение на малом шаге. В пользу этого подхода говорит и то, что область полученных решений характеризуется очень близкими показателями критерия качества. Симметричность траектории и препятствия объясняют и симметричность полученной области возможных решений.

Таблица 1 – Оптимизация расположения основания робота по критерию объема движения

Критерий	Весовые коэффициенты суставов			F_{opt}		Координаты оптимального расположения основания робота			
						$M = -1$		$M = 1$	
	w_1	w_2	w_3	$M = -1$	$M = 1$	x	y	x	y
Объем движений	1	1	0	121,71	122,83	0,65	2	0,75	-0,1
	1	1	1	120,4	120,45	-0,1	1,8	-0,1	0,15
	2	1	1	116,65	116,59	-0,1	1,8	-0,1	0,1
	3	1	1	114,27	114,27	-0,15	1,8	-0,1	0,1
	4	1	1	112,6	112,57	-0,15	1,8	-0,15	0,1
	5	1	1	111,34	111,33	-0,15	1,85	-0,15	0,1
	6	1	1	110,36	110,4	-0,15	1,85	-0,15	0,1
7	1	1	109,61	109,67	-0,15	1,85	-0,15	0,1	

Критерий	Весовые коэффициенты суставов			F_{opt}		Координаты оптимального расположения основания робота			
						$M = -1$		$M = 1$	
	w_1	w_2	w_3	$M = -1$	$M = 1$	x	y	x	y
Объем движений	1	2	1	123,28	124,97	0,75	2,1	0,55	-0,1
	1	3	1	122,56	123,79	0,7	2,05	0,6	-0,05
	1	4	1	122,56	123,79	0,7	2,05	0,6	-0,05
	1	5	1	121,63	122,31	0,65	2	0,6	0
	1	6	1	121,23	121,65	0,65	2	0,6	0
	1	1	2	116,64	116,59	-0,1	1,8	-0,1	0,1
	1	1	3	114,24	114,29	-0,1	1,85	-0,1	0,1
	1	1	4	112,58	112,58	-0,1	1,85	-0,1	0,05
	1	1	5	111,39	111,33	-0,1	1,85	-0,1	0,05
	1	1	6	110,43	110,4	-0,1	1,9	-0,1	0,05
	1	1	7	109,66	109,67	-0,1	1,9	-0,1	0,05

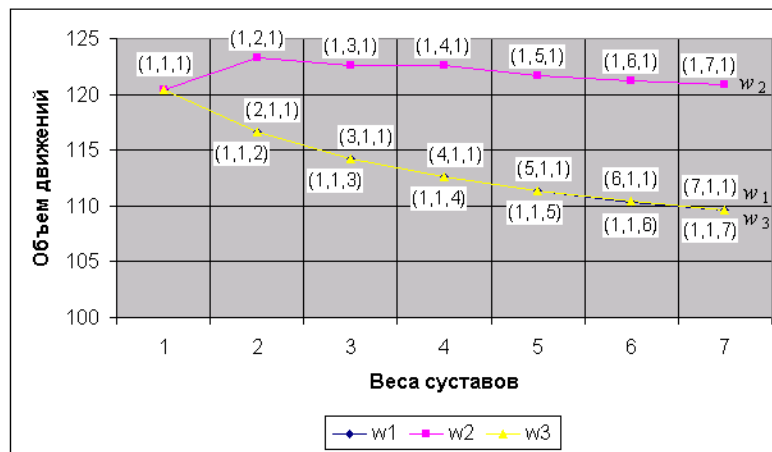


Рисунок 2 – Зависимость объема движений от весов суставов w при индексе конфигурации $M = -1$

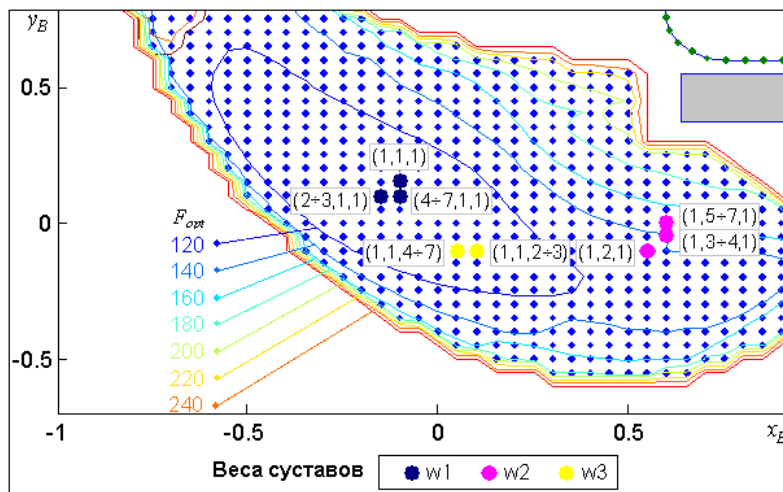


Рисунок 3 – Зависимость оптимального расположения манипулятора от весов суставов

Таблица 2 – Оптимизация расположения основания робота по критерию диапазона изменения обобщенных координат

Критерий	Весовые коэффициенты суставов			F_{opt}		Координаты оптимального расположения робота			
						$M = -1$		$M = 1$	
	w_1	w_2	w_3	$M = -1$	$M = 1$	x	y	x	Y
Диапазон изменения обобщенных координат	1	1	0	2,9042	2,9256	-0,5	1,95	0,5	-0,5
	1	1	1	2,5375	2,5354	-0,15	1,9	-0,1	0
	2	1	1	2,6539	2,6783	-0,05	2,05	0,1	-0,2
	3	1	1	2,7434	2,7448	0,05	2,15	0,1	-0,25
	4	1	1	2,7896	2,8229	0,6	2,25	0,15	-0,3
	5	1	1	2,8636	2,8814	0,25	2,25	0,15	-0,3
	6	1	1	2,8907	2,8982	0,15	2,25	0,3	-0,35
	7	1	1	2,9251	2,9131	0,15	2,25	0,25	-0,35
	1	2	1	2,5909	2,5992	-0,05	1,75	-0,05	0,15
	1	3	1	2,6608	2,6494	0,1	1,75	0	0,25
	1	4	1	2,6996	2,6786	0,05	1,65	0,05	0,3
	1	5	1	2,7045	2,7161	0,1	1,6	0,1	0,3
	1	6	1	2,7501	2,7598	0,15	1,6	0,15	0,35
	1	7	1	2,7643	2,7702	0,15	1,55	0,15	0,33
	1	1	2	2,6498	2,6762	-0,35	1,75	-0,4	0,25
	1	1	3	2,7395	2,751	-0,45	1,65	-0,45	0,3
	1	1	4	2,8173	2,8107	-0,5	1,6	-0,55	0,75
	1	1	5	2,8691	2,8318	-0,5	1,6	-0,55	0,75
	1	1	6	2,8691	2,8318	-0,55	1,45	-0,55	0,45
	1	1	7	2,9236	2,9153	-0,55	1,5	-0,55	0,4

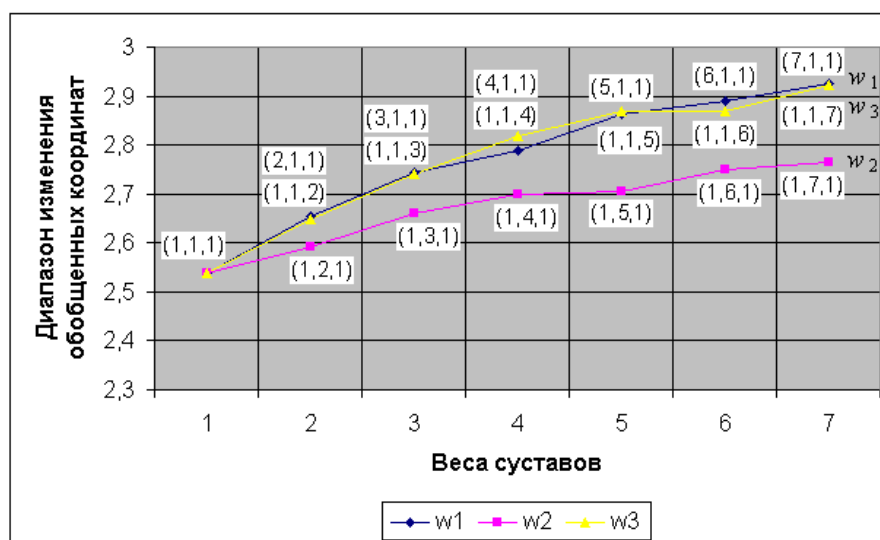


Рисунок 4 – Зависимость диапазона изменения координат от весов суставов при индексе конфигурации $M = -1$

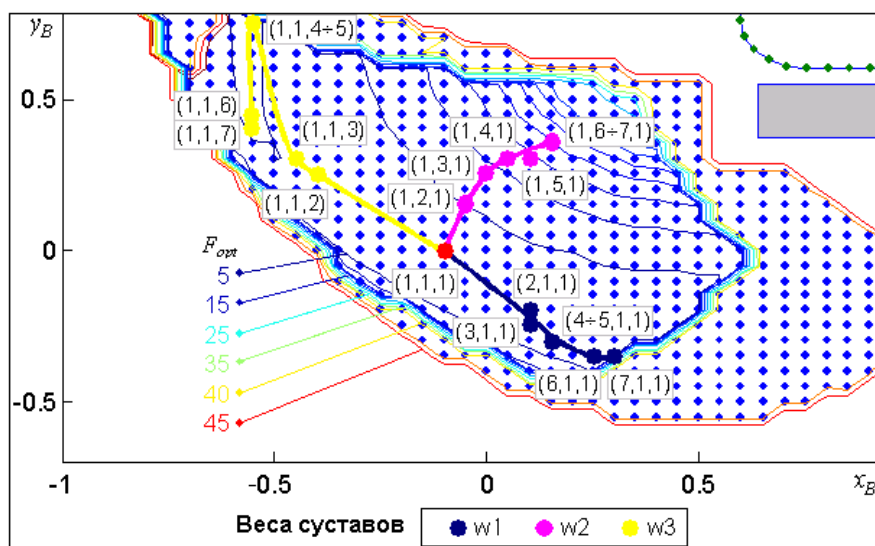


Рисунок 5 – Зависимость диапазона изменения координат от весов суставов при индексе конфигурации $M = 1$

Как видно из зависимостей показателя качества от весов суставов (рис. 3–5), наиболее чувствительны первый и третий суставы. Например, изменение весовых коэффициентов от (1,1,1) до (2,1,1) уменьшает критерий качества на 3,2 %, в то время как их изменение от (6,1,1) до (7,1,1) приводит к его уменьшению лишь на 0,62 %.

Таким образом, для рассмотренного примера предложенный алгоритм позволяет получить искомое решение за приемлемое для практики время. При этом наибольшие весовые коэффициенты целесообразно назначать компонентам векторного критерия, учитывающим характер движения по первой и третьим координатам.

Список использованных источников:

1. Pashkevich, A. Optimal Control of Robotic Manipulator for Laser Cutting Applications / A. Pashkevich, A. Dolgui, O. Chumakov // 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control. Barcelona, SPAIN, 21th-26th July, 2002. Book of abstracts p. 273. CDROM proceedings, 6pp.

2. Комбинированный метод синтеза траекторий сборочно-сварочных роботоманипуляторов в рабочей среде с препятствиями. / М. М. Кожевников [и др.] // Доклады БГУИР. – Минск, 2016. – С. 12–18.