

УДК 681.5.015

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА ТРАЕКТОРИЙ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ В РАБОЧЕЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

М.М. КОЖЕВНИКОВ, О.А. ЧУМАКОВ*, И.Э. ИЛЮШИН, А.В. СТАРОВОЙТОВ

*Могилевский государственный университет продовольствия
Шмидта, 3, Могилев, 3212027, Беларусь*

**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 30 июля 2015

Предложен новый метод синтеза траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, который, в отличие от известных методов, позволяет эффективно учитывать сложную форму элементов роботизированного технологического комплекса. Эффективность разработанного метода подтверждается результатами тестирования.

Ключевые слова: робот-манипулятор, синтез траекторий, конфигурационное пространство.

Введение

Задача синтеза траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями возникает при создании современных промышленных роботизированных технологических комплексов (РТК) преимущественно в машиностроении. Поскольку данная задача является довольно трудоемкой, то разработка эффективных методов ее решения позволит повысить эффективность сборочно-сварочных технологических процессов за счет сокращения сроков ввода новых РТК в эксплуатацию и сокращения сроков переналадки действующих комплексов.

В известных работах предложен ряд алгоритмов синтеза траекторий роботов в среде с препятствиями [1, 2], которые основаны на дискретной модели свободного от столкновений конфигурационного пространства. Задача синтеза при этом сводится к поиску кратчайшего пути на графе, ребрам которого ставятся в соответствие линейные либо дуговые фрагменты траектории робота, при движении по которым отсутствуют столкновения и удовлетворяются конструктивные ограничения. В ряде последних исследований [3, 4] реализованы алгоритмы синтеза выполняющие поиск нескольких решений, что увеличивает вероятность нахождения траектории за фиксированное время. В частности, в работе [5] синтез реализован с использованием концепции мультиграфа задачи движения (ТММ).

Необходимо отметить, что известные алгоритмы синтеза траекторий позволяют эффективно обойти проблему размерности конфигурационного пространства роботов [6–9], но не учитывают форму препятствий и форму звеньев манипулятора, что приводит к реализации траекторий низкого качества с большим объемом движений [6]. При использовании таких алгоритмов траектория робота может быть найдена за конечное время также лишь с определенной вероятностью, т.е. свойство «полноты» решения теряется [6, 10].

В данной работе предложен новый комбинированный метод синтеза траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на использовании решетчатой дискретизации «насыщенных» препятствиями зон конфигурационного пространства. Такой подход, в отличие от известных, позволяет эффективно учитывать

сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов. В соответствии с этим подходом синтез свободной от столкновений траектории осуществляется путем поиска кратчайшего пути на графе, ребрам которого ставятся в соответствие линейные движения робота между промежуточными конфигурациями, найденными как путем рандомизированной дискретизации (в зонах с малым количеством препятствий), так и путем решетчатой дискретизации (в зонах с большим количеством препятствий сложной формы.) Такой метод позволяет синтезировать участки траекторий робота в наиболее сложных зонах выполнения технологических операций сборки/сварки без предварительной проверки его движений на столкновение, что обеспечивает приемлемое количество тестов столкновения при сохранении свойства «полноты» при фиксированном шаге дискретизации.

Комбинированный метод синтеза траектории роботов-манипуляторов

Рассматривается робот-манипулятор, имеющий n поворотных сочленений, в рабочей зоне которого расположено некоторое множество препятствий $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$. Конфигурацию этого робота зададим в виде вектора $q = [q_i]^T$, где q_i – величины углов в сочленениях ($i = 1:n$). Ограничения на изменения углов в сочленениях зададим в виде $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$, где q_{\min} , q_{\max} – векторы, определяющие нижнее и верхнее конструктивные ограничения на изменение углов в сочленениях робота-манипулятора. Зададим геометрическую модель робота-манипулятора, установленного в конфигурацию q , в виде множества $M(q)$. Тогда свободное от столкновений конфигурационное пространство определяется как

$$C_f = \{q \in C \mid M(q) \cap B = \emptyset\}. \quad (1)$$

Задача определения пересечения множеств $M(q)$ и B решается путем проведения теста столкновения между роботом и препятствиями [2]. Прямолинейный участок траектории между двумя конфигурациями q_a и q_b ($a \neq b$, $q_a, q_b \in C_f$) задается в виде множества векторов

$$d_{ab} = \{d_k \mid M(d_k) \cap B = \emptyset\}, \quad (2)$$

где $d_k = q_a + (h/Nh)(q_b - q_a)$, $h = 0:Nh$, $Nh > N$ – параметр дискретизации прямолинейного участка траектории.

Дискретная конфигурация робота $q_b \in C_f$ является соседней с конфигурацией $q_a \in C_f$, если между ними существует прямолинейный участок траектории d_{ab} и $D(q_a, q_b) \leq d$, где $D(\bullet)$ – симметричная функция, характеризующая расстояние между двумя локациями робота-манипулятора. Траектория, соединяющая стартовую q_{s1} и целевую q_{sg} конфигурации робота, представляет собой последовательность, состоящую из соседних конфигураций $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg} \in DC_f$ и прямолинейных участков, соединяющих эти конфигурации $d_{s1s2}, d_{s1s2}, \dots, d_{(sg-1)sg}$. В качестве критерия качества траектории движения робота манипулятора при сварке шва предлагается использовать суммарное время перемещения технологического инструмента:

$$\tau = N\Delta t + \rho/v, \quad (3)$$

где N – количество операций выполняемых роботом в технологическом процессе сборки/сварки, Δt – время выполнения одной операции, ρ – длина пути технологического инструмента при его движении в направлении от начальной к конечной локации, v – скорость движения технологического инструмента.

Тогда задача синтеза траектории робота-манипулятора может быть сформулирована следующим образом: среди всех последовательностей дискретных конфигураций $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg} \in C_f$, координаты которых лежат внутри области, ограниченной предельно допустимыми значениями углов в сочленениях $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$, найти последовательность, на которой достигает минимума критерий качества (3).

Для описания конфигурационного пространства робота применена статистическая модель, представленная в виде неориентированного графа $R = (V, E)$. Вершины V этого графа

представляют собой множество свободных от столкновений конфигураций робота, координаты которых являются случайными величинами.

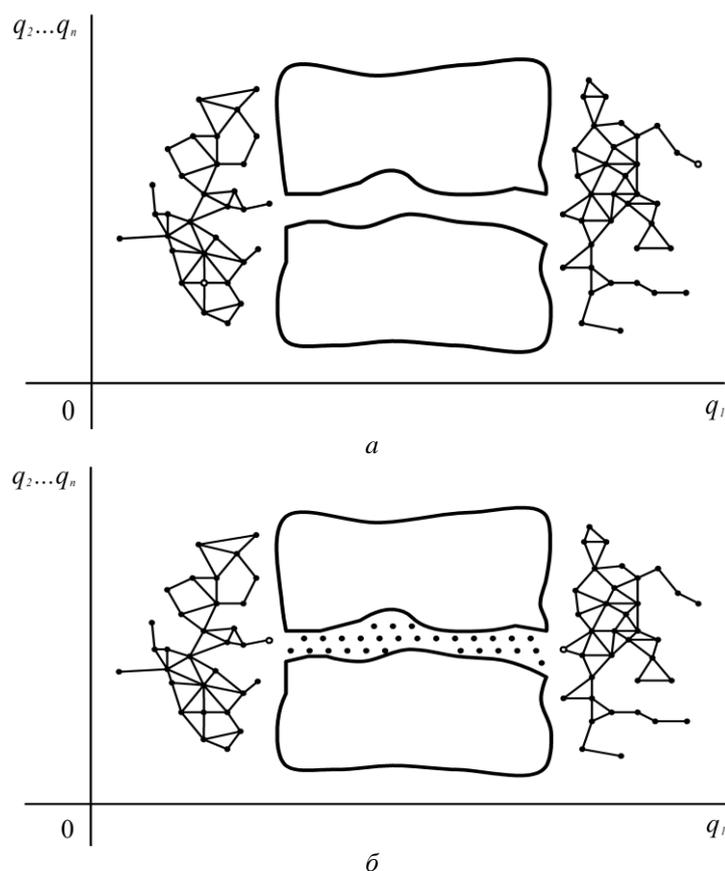


Рис. 1. Комбинированный подход к дискретизации конфигурационного пространства робота-манипулятора

Формирование множества V , осуществляется следующим образом: генерируется случайная конфигурация робота-манипулятора и выполняется тест столкновения робота с препятствиями. Если столкновения нет, то конфигурация добавляется в множество V , в противном случае она отбрасывается. Ребрам E графа ставятся в соответствие прямолинейные участки траекторий между свободными от столкновений конфигурациями рис. 1, а. Зона, насыщенная препятствиями (так называемый «узкий коридор» [1]) – рис. 1, б, дискретизируется регулярной решеткой, поскольку вероятность выявления такой зоны рандомизированным методом близка к нулю. Соответствующие вершины и ребра решетки добавляются в граф R . Такой подход к формированию статистической модели позволяет эффективно решить проблему размерности, возникающую при планировании траекторий промышленных роботов-манипуляторов [1, 2, 6].

Предложенный комбинированный метод синтеза траектории предполагает реализацию следующих этапов.

1. Генерируется множество V , состоящее из N_{\max} свободных от столкновений конфигураций робота-манипулятора.

2. Выполняется поиск прямолинейных участков траекторий между соседними конфигурациями q_i, q_j и найденные участки заносятся в множество E .

3. Если между соседними конфигурациями q_i, q_j нет прямолинейного участка траектории и эти конфигурации находятся в зоне, насыщенной препятствиями, то выполняется поиск криволинейного участка траектории между q_i и q_j , дискретизированного регулярной решеткой G . Если такой участок траектории найден, то он добавляется в граф R .

4. Формирование множества E выполняется путем циклического повторения шагов 2, 3 K_{\max} раз.

5. Выполняется поиск кратчайшего пути на графе R исходя из критерия качества (3).

Алгоритм синтеза траектории роботов-манипуляторов

С учетом специфики и возможностей геометрического моделирования роботов-манипуляторов в современных CAD-системах на основе предложенного метода разработан алгоритм планирования траектории, ориентированный на интеграцию в систему автономного программирования сборочно-сварочных роботизированных технологических комплексов (табл. 1). Алгоритм использует следующие обозначения. $Randq$ – функция генерации вектора конфигурации с координатами, имеющими случайные значения в допустимом диапазоне $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$. $Rand$ – функция генерации случайных целых чисел $i \neq j$ в диапазоне от 1 до N_{\max} . $EPath$ – функция вычисления прямолинейного участка траектории между двумя конфигурациями q_i и q_j ; $TTest$ – функция, выполняющая оценку «насыщенности» окрестности конфигурации q препятствиями, путем генерации случайных конфигураций в ее окрестности и тестировании их на столкновение. В случае если количество столкновений превышает допустимый предел, функция $TTest$ возвращает 1, указывая на то, что окрестность конфигурации q «насыщена» препятствиями. $Connect$ – функция выполняющая поиск конфигураций (q_i^s, q_j^g) на решетке дискретизации G , являющихся соседними с конфигурациями (q_i, q_j) . $GraphSearch$ – функция поиска кратчайшего пути на графе R исходя из критерия качества (3).

Таблица 1. Алгоритм синтеза траектории сборочно-сварочных роботов манипуляторов

Исходные данные: геометрическая модель РТК – $M(q)$, B , начальная и целевая конфигурации робота – q_s, q_g .	
1:	$i \leftarrow 1; V \leftarrow q_s, q_g;$
2:	повторять
3:	$q_i \leftarrow Randq;$
4:	если $q_i \in Cf$
5:	то $V \leftarrow q_i;$
6:	$i \leftarrow i+1;$
7:	до тех пор пока $i \leq N_{\max};$
8:	$k \leftarrow 1;$
9:	повторять
10:	$(i, j) \leftarrow Rand(1, N_{\max});$
11:	если $(D(q_i, q_j) \leq d$ и $EPath(q_i, q_j) \neq \emptyset$)
12:	то $E \leftarrow EPath(q_i, q_j)$
13:	иначе
14:	если $(D(q_i, q_j) \leq d$ и $(TTest(q_i)=1$ или $TTest(q_j)=1))$
15:	то $(q_i^s, q_j^g) \leftarrow Connect(q_i, q_j, G),$
16:	$R \leftarrow SearchGridPath(q_i^s, q_j^g),$
17:	$V \leftarrow (EPath(q_i, q_i^s), EPath(q_j, q_j^g));$
18:	$k \leftarrow k+1;$
19:	до тех пор пока $k \leq K_{\max};$
20:	$path \leftarrow GraphSearch(R, q_s, q_g);$

Особого внимания заслуживает рассмотрение процедуры $SearchGridPath$, разработанной на основе методики, предложенной в предыдущих работах авторов данной статьи [11–14]. Процедура выполняет поиск криволинейной траектории между двумя конфигурациями робота-манипулятора (q_i^s, q_j^g) , путем дискретизации окрестности данных конфигураций дискретной решеткой. Соответственно, в результате выполнения процедуры в граф R добавляются вершины и ребра, принадлежавшие криволинейному участку траектории между (q_i^s, q_j^g) . Алгоритм процедуры $SearchGridPath$ приведен в табл. 2.

Алгоритм использует следующие обозначения: N_0 – начальное значение параметра дискретизации конфигурационного пространства робота решеткой; N_{\max} – максимально допустимое значение параметра дискретизации конфигурационного пространства робота решеткой; N_s – шаг изменения параметра дискретизации; P – криволинейная траектория робота. Алгоритм использует следующие функции: $\max f(\phi_{b_k})$ – функция, возвращающая

максимальное значение весовой ϕ из множества ϕ_{b_k} ; $\max b(\phi_{b_k})$ – функция, возвращающая индекс b максимального значения весовой функции из множества ϕ_{b_k} ; $q(\phi)$ – функция, возвращающая конфигурацию робота, соответствующую значению весовой функции ϕ ; $\text{explore}(q(\phi_a), q(\phi_b))$ – функция проверки существования прямолинейного участка траектории между двумя конфигурациями робота $q(\phi_a)$ и $q(\phi_b)$ в соответствии с формулой (2). Если такой участок траектории существует, функция возвращает «1», в противном случае она возвращает «0».

Таблица 2. Алгоритм процедуры SearchGridPath

Исходные данные: геометрическая модель РТК – $M(q)$, B , начальная и целевая конфигурации робота – $q_{s1} = q_i^s, q_{sg} = q_j^g$.	
1:	установить начальное значение параметра дискретизации $N \leftarrow N_0$;
2:	повторять
3:	вычислить V_a для параметра дискретизации N ;
4:	установить весовые коэффициенты для ребер решетки $T_{ab_k} \leftarrow 1/3n$ ($k=1:d$);
5:	повторять
6:	вычислить весовую функцию ϕ_a ($a=1:N^n$);
7:	$a \leftarrow s1$;
8:	повторять
9:	$\phi \leftarrow \max f(\phi_{b_k})$;
10:	$b \leftarrow \max b(\phi_{b_k})$;
11:	$p \leftarrow \text{explore}(q(\phi_a), q(\phi_b))$;
12:	$P \leftarrow \{q(\phi_a), q(\phi_b)\}$;
13:	если $b = sg$ то вернуть фрагмент траектории P ;
14:	$a \leftarrow b$;
15:	до тех пор пока $p=0$;
16:	$T_{ab_k} \leftarrow 0$;
17:	$P \leftarrow 0$;
18:	до тех пор пока $\phi_{s1}=0$;
19:	$N \leftarrow N + N_s$;
20:	до тех пор пока $N \leq N_{\max}$.

Данный алгоритм функционирует следующим образом. Первоначально конфигурационное пространство робота дискретизируется с низким разрешением N_0 и предполагается, что между всеми соседними конфигурациями существуют прямолинейные участки траектории, т.е. всем весовым коэффициентам ребер решетки присваивается значение $1/3n$. Далее вычисляется весовая функция для каждого узла решетки ϕ_a ($a = 1:N_n$) и ищется траектория между стартовой q_{s1} и целевой q_{sg} конфигурациями путем подъема в направлении градиента весовой функции узлов решетки. Для этого отрезки, соединяющие соседние конфигурации q_a и q_{b_k} , дискретизируются с высоким разрешением N_h в соответствии с (2) и для каждой дискретной конфигурации робота d_k выполняется тест столкновения. Если столкновения отсутствуют, то выбираются две новые конфигурации на решетке низкого разрешения в направлении градиента. Если обнаружено столкновение, то значение весового коэффициента ребра решетки T_{ab_k} устанавливается в ноль.

Значения весовой функции ϕ_a для каждого узла решетки вычисляются на основе следующей итерационной формулы:

$$\phi_a^{(l+1)} = f_a \left(\sum_{k=1}^d T_{ab_k} \phi_{b_k}^{(l)} + V_a \right), \quad (4)$$

где l – номер итерации, V_a – параметр, значение которого определяется следующим образом: $V_a = -1$, если $q_a \notin C_f$; $V_a = 1$ если $q_a = q_{sg}$; $V_a = 0$ во всех остальных случаях.

Нелинейная функция f_a имеет следующий вид:

$$f_a(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < 0 \\ \tanh(x), & \text{если } x \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Величина весовых коэффициентов ребер решетки T_{ab_k} выбирается исходя из достаточных условий сходимости итерационной процедуры (4), полученных в работах [11, 14]. В частности, $T_{ab_k} = 1/3n$, если существует прямолинейный участок траектории между конфигурациями q_a и q_{b_k} и $T_{ab_k} = 0$ в противном случае.

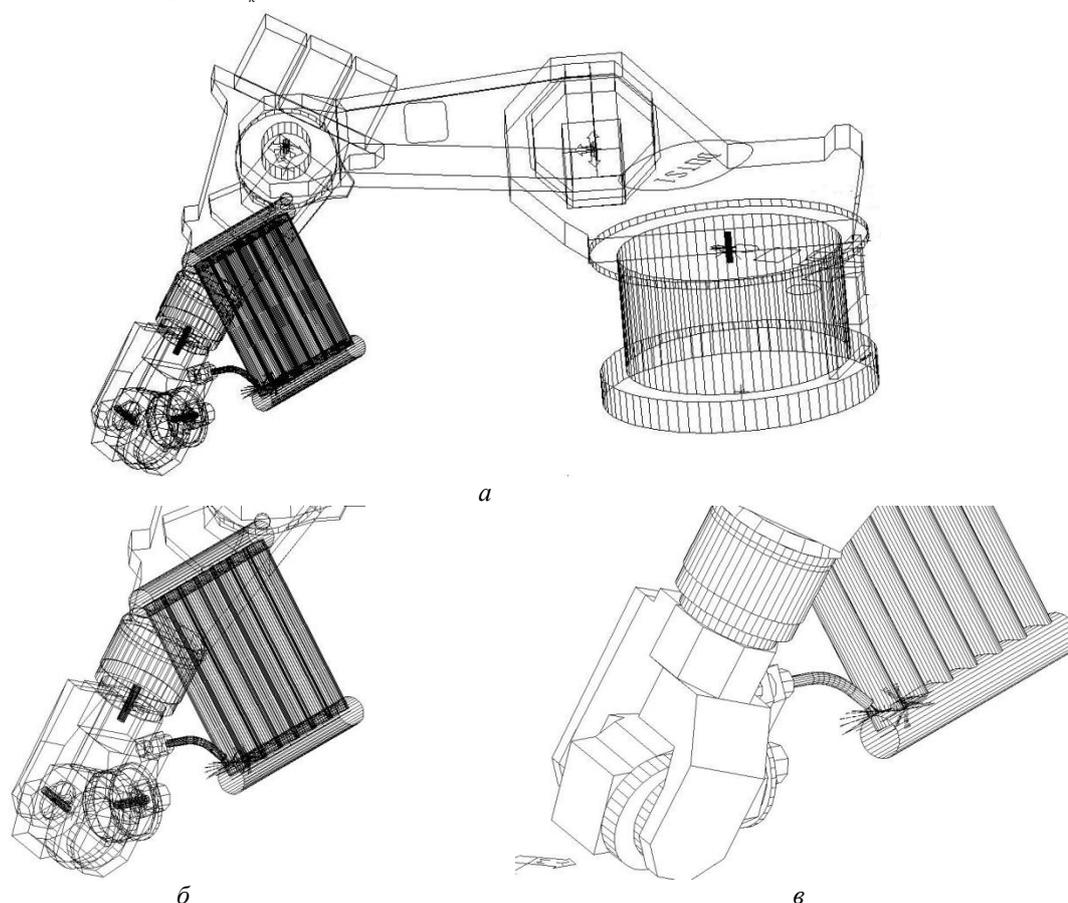


Рис. 2. Роботизированная ячейка для дуговой сварки и траектории движения сварочной горелки

Исследование эффективности метода

Исследование эффективности предложенного метода выполнялось в среде САПР ROBOMAX. Предложенный алгоритм синтеза реализован на языке программирования C++ и интегрирован в данную САПР. В качестве объекта исследования использовалась роботизированная ячейка для дуговой сварки металлической конструкции, состоящей из 9 труб. Ячейка включает робот-манипулятор KR125, оснащенный сварочной горелкой (рис. 2, а). На трехмерную модель металлоконструкции нанесено 14 сварных швов, имеющих форму эллипса, изогнутого в пространстве. Предложенный алгоритм позволил выполнить синтез свободных от столкновений траекторий робота-манипулятора, обеспечивающих движение сварочной горелки вдоль каждого из 14 швов. На основе полученных траекторий сформированы технологические программы сварки на языке программирования робота SRCL (Siemens Robot Control Language). Тестирование этих программ в подсистеме off-line программирования САПР ROBOMAX показало, что они обеспечивают свободное от столкновений движение робота-манипулятора. Примеры позиционирования сварочной горелки на линии пространственного сварного шва, при выполнении роботом технологической программы, приведены на рис. 2, б, в. Анализ результатов данных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый подход эффективен при синтезе траекторий роботоманипуляторов в рабочей среде с препятствиями.

Заклучение

Предложен новый комбинированный метод синтеза траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на использовании решетчатой дискретизации «насыщенных» препятствиями зон конфигурационного пространства. Такой подход, в отличие от известных, позволяет эффективно учитывать сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов. В соответствии с этим подходом синтез свободной от столкновений траектории осуществляется путем поиска кратчайшего пути на графе, ребрам которого ставятся в соответствие линейные движения робота между промежуточными конфигурациями, найденными как путем рандомизированной дискретизации, так и путем решетчатой дискретизации в локальных зонах с большим количеством препятствий сложной формы. Эффективность предложенного метода планирования подтверждается результатами тестирования в среде САПР ROBOMAX.

COMBINED METHOD FOR TRAJECTORY SYNTHESSES OF ASSAMBLY AND WELDING ROBOTIC-MANIPULATORS IN WORKSPACE WITH OBSTACLES

M.M. KOZHEVNIKOV, O.A. CHUMAKOV, I.E. ILUSHIN, A.V. STAROVOITOV

Abstract

A new method is proposed for trajectory syntheses of assembly and welding robotic manipulators in workspace with obstacles, which in contrast to known effectively take in to account complex shape of the elements of the robotic technological cell. The effectiveness of the proposed method is confirmed by the tests results.

Keywords: manipulator robot, trajectories synthesis, configurational space.

Список литературы

1. *Choset H., Lynch K.M., Hutchinson S. et. al.* Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. Cambridge, 2006.
2. *LaValle S.M.* Planning Algorithms. Cambridge, 2006.
3. *Lahijanian M. A., Kavraki L. E., Vardi M. Y.* // International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong, 2014. P. 3005–3012.
4. *Maly M.R., Lahijanian M. A., Kavraki L.E. et. al* // ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC). Philadelphia, 2013. P. 353–362.
5. *Sucan I.A., Kavraki L.E.* // IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Paul, 2012. P. 4822–4828.
6. Motion planning. Springer Handbook of Robotics / edited by B. Siciliano and O. Khatib. Springer-Verlag, 2008.
7. *Geraerts R.J., Overmars M.H.* // Algorithmic Foundations of Robotics V. Berlin 2003. P. 43–58.
8. *Geraerts R.J., Overmars M.H.* // Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2007. № 55. P. 824–836.
9. *Geraerts R.J., Overmars M.H.* // Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2006. № 54. P. 165–173.
10. *LaValle S.M., Branicky M., Lindemann S.R.* // International Journal of Robotic Research. 2004. № 23(7/8). P. 673–692.
11. *Pashkevich A.P., Kazheunikau M.M., Ruano, A.E.* // International Journal of Systems Science. 2006. № 37 (8). P. 555–564.
12. *Кожевников М.М., Пашкевич А.П., Чумаков О.А.* // Докл. БГУИР. 2010. № 4 (50), С. 55–62.
13. *Кожевников М.М., Ульянов Н.И., Субоч С.Н.* // Вест. Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. 2011. № 1. С. 44–55.
14. *Кожевников М.М. Господ А.В.* // Исследования наукограда. 2012. № 1 (1). С. 37–41.