

# Управление складским манипуляционным роботом с применением технологии ассоциативной памяти

С.А.К. Диане<sup>1</sup>, Е.А. Аникина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

**Аннотация** – В статье описана обобщенная структура аппаратно-программного обеспечения роботизированной складской ячейки на базе автономного многозвенного манипуляционного робота. Предложены модели и алгоритмы для системы управления роботом-манипулятором. Для решения обратной задачи кинематики применена технология ассоциативной памяти. Задача формирования маршрута движения робота-манипулятора решается графоаналитическим методом. Обработка движений по перемещению целевого объекта основана на нелинейной интерполяции обобщенных координат робота по матрице Якоби. Приведены результаты экспериментальных исследований с оценкой работоспособности предложенных алгоритмов и выводы о перспективах развития данного подхода.

**Ключевые слова** – автоматизированный склад, складская ячейка, хранение товаров, манипуляционный робот, ассоциативная память, поиск пути на графе.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированные системы хранения (АСХ) с одним или несколькими автономными роботами, выступающими в роли центрального элемента автоматизации, играют все более важную роль в хозяйственной деятельности промышленных предприятий и складов. На рис. 1 представлены фотографии некоторых манипуляционных роботов, способных перемещать объекты в комнате или переставлять их в рабочей зоне.

Транспортно-манипуляционный робот *Mobile Dual-Arm Robot* [1] предназначен для перемещения коробок на небольшом складе. Преимуществом робота является наличие двух взаимодействующих друг с другом манипуляторов, что позволяет осуществлять такие комплексные действия, как захват объекта из выдвигаемой или удерживаемой на весу коробки. Основания манипуляторов могут перемещаться по вертикали, обеспечивая достижимость как нижних, так и верхних полок стеллажей.

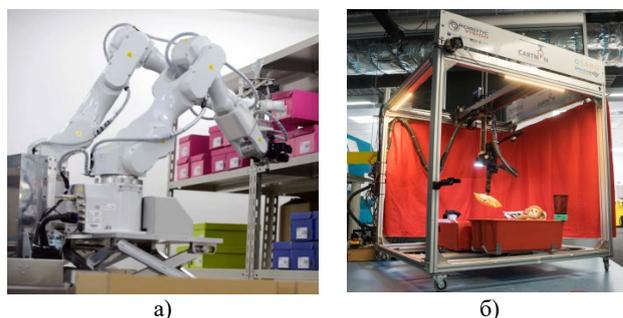


Рис. 1. Системы хранения на основе манипуляционных роботов а) Mobile Dual-Arm Robot (Hitachi, Япония); б) APM Cartman (Australian Centre for Robotic Vision, Австралия)

Определенной популярностью пользуются складские роботы-манипуляторы стационарного типа. Так, автономный робот-манипулятор *Cartman* [2], изображенный на рис. 1, б, с декартовой системой координат обладает рабочей зоной 1,4 м<sup>3</sup>, имеет 6 степеней подвижности и вакуумный захват.

Существуют также похожие по компоновке роботы с дельта-кинематикой, способные развивать значительно большие скорости движения [3], но уступающие по размерам рабочей зоны.

Отмеченные выше роботы свидетельствуют о возможности модульного подхода к организации АСХ для малых складских помещений. Фактически речь идет о создании роботизированной складской ячейки, где автономный манипуляционный робот закреплен на неподвижном основании или подвесе, а места хранения товаров совпадают с рабочей зоной манипулятора.

Такого рода складские ячейки характеризуется компактностью, простотой наладки и эксплуатации. В числе преимуществ такого способа организации АСХ стоит дополнительно отметить оперативность развертывания, высокую скорость выдачи товаров и постановки их на хранение, а также безопасность, достигаемую за счет разграничения рабочих зон робота-манипулятора и людей-сотрудников склада.

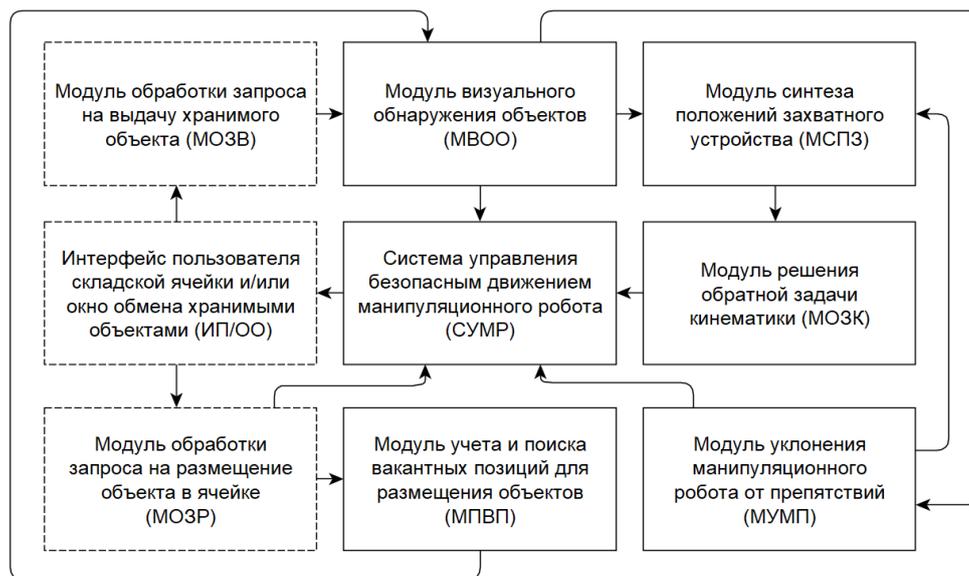


Рис. 2. Обобщенная архитектура аппаратно-программного обеспечения роботизированной складской ячейки

Разработка АСХ на основе манипуляционных роботов не сводится к простой интеграции готовых мехатронных и аппаратно-программных компонент. Для такого рода систем возникает потребность в разработке средств принятия решений и управления, построенных на принципах интеллектуальной обработки информации. Обобщенная архитектура аппаратно-программного обеспечения АСХ с элементами роботизации представлена на рис. 2.

В состав АСХ на базе робота-манипулятора должен входить интерфейс пользователя (в ряде случаев это просто окно приема-выдачи товаров), система управления движением робота, а также ряд модулей, отвечающих за обработку информации и принятие высокоуровневых управляющих решений.

С учетом сокращений, принятых на рис. 2, следует выделить два контура обработки информации:

- нижний контур размещения объекта на хранение, состоящий из последовательно включенных в технологический процесс модулей ИП/ОО, МОЗР, МПВП, МВОО, МСПЗ, МОЗК, СУМР;

- верхний контур выдачи хранимого объекта, состоящий из последовательно включенных в технологический процесс модулей ИП/ОО, МОЗВ, МПВП, МВОО, МСПЗ, МОЗК, СУМР.

Несмотря на то, что два контура весьма схожи, значительные отличия заключаются в параметрах, передаваемых в системы визуального обнаружения объектов и управления целенаправленным движением манипулятора. Отметим, что модуль уклонения манипуляционного робота от препятствий (МУМП) активируется параллельно с МСПЗ и МОЗК и выдает корректирующий вектор целеуказания. В системе же управления рассчитывается консенсусная траектория безопасного движения манипулятора.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенный обзор показал, что существуют складские системы, основанные на использовании многозвенных манипуляционных роботов (ММР) – для постановки объектов на хранение и их последующей выдачи.

В ряде случаев ММР неподвижно крепится к опорной раме некоторого контейнера (складской ячейки). Возникает задача планирования движения ММР внутри контейнера с уклонением от расположенных внутри него препятствий (частей корпуса, стеллажей, хранимых объектов).

Иными словами, основной проблемой в организации АСХ на базе ММР является наличие ограничений, прежде всего, геометрического характера. На пути к алгоритмическому решению данной проблемы формализуем геометрию некоторого составного объекта, относящегося к АСХ, в виде:

$$S_{\xi} = \{s_1, \dots, s_{N(\xi)}\}, \quad (1)$$

где  $\xi$  – рассматриваемый объект;  $s_i$  – геометрические примитивы, образующие объект и маркируемые индексом  $i = 1, \dots, N(\xi) \in \mathbb{N}$ .

Среди возможных типов составных объектов будем рассматривать контейнер:  $\xi = C$ ; ММР:  $\xi = M$ ; перемещаемый объект:  $\xi = O$ .

Определим операцию проверки столкновения объектов  $\xi$  и  $\chi$  как поиск геометрического пересечения некоторых из элементов, входящих в их состав:

$$S_{\xi} \cap S_{\chi} = \exists i, j : (s_i \in S_{\xi}, s_j \in S_{\chi} \Rightarrow s_i \cap s_j). \quad (2)$$

Цель настоящего исследования заключается в разработке алгоритмов управления целенаправленным движением ММР в составе АСХ.

Как известно, управление многозвенными манипуляционными роботами на тактическом уровне информационно-управляющей системы может

осуществляться в двух основных режимах: в режиме решения прямой задачи кинематики (ПЗК) и в режиме решения обратной задачи кинематики (ОЗК).

При решении ПЗК по обобщенным координатам робота определяется конкретная точка в декартовой системе координат, в которую приходит захватное устройство манипулятора.

При решении ОЗК, наоборот, по целевой точке в декартовой системе координат определяются обобщенные координаты, в которые должны прийти звенья манипулятора. Для ангулярного робота под обобщенными координатами понимаются углы поворота сочленений.

Перемещение ММР внутри контейнера еще более усложняется с учетом того, что в захватном устройстве манипулятора может располагаться некоторый груз, подверженный столкновению с объектами рабочей зоны. Кроме того, конфигурация препятствий может меняться по мере заполнения стеллажей объектами хранения. По этой причине вместо аналитических подходов к решению ОЗК и траекторному управлению ММР удобно применять численные методы и, в частности, методы искусственного интеллекта.

В качестве такого интеллектуального метода хорошо подходит ассоциативная память (АП) – технология хранения и обработки знаний, основанная на соотношении входных данных с эталонными векторами и последующем выполнении продуцирующих операций: фильтрации данных, классификации образов или регрессии выходных переменных.

Удобство технологий АП проявляется, с одной стороны, в лингвистической интерпретируемости логики ее работы, а с другой – в многообразии доступных подходов для ее реализации. Знания об эталонных векторах могут храниться в табличной, нейросетевой, графоаналитической и иных формах.

Задачами настоящего исследования являются:

- разработка алгоритма формирования табличной АП для сопоставления точек рабочей зоны ММР с допустимыми положениями его звеньев;

- разработка графоаналитического алгоритма поиска маршрута перемещения ММР между двумя точками рабочей области и выбор метода отработки данного маршрута в позиционном режиме;

- визуализация упрощенной модели АСХ на базе ММР и имитационное моделирование процесса перемещения целевого объекта.

### III. ТЕОРИЯ

Рассмотрим подробнее вопрос управления ММР – прежде всего на тактическом уровне при движении в целевую точку (с применением технологии АП). Затем рассмотрим стратегический уровень траекторного управления ММР при перемещении захваченного объекта (с применением графоаналитического метода). И, наконец, поясним работу исполнительного уровня

ММР, реализующего позиционное управление (с применением метода нелинейной интерполяции координат).

#### A. Формирование ассоциативной памяти ММР

Пусть аналитическое решение ПЗК манипулятора с  $n$  степенями подвижности (на тактическом уровне управления) задается многомерным отображением следующей формы:

$$(x, y) = A(q_1, \dots, q_n). \quad (3)$$

Пусть аналитическое решение ОЗК манипулятора (на тактическом уровне управления) в условиях отсутствия препятствий в рабочей зоне задается многомерным отображением следующей формы:

$$(q_1, \dots, q_n) = B(x, y). \quad (4)$$

Пусть ассоциативная память табличного типа хранит аппроксимацию многомерного отображения (4):

$$(q_1, \dots, q_n) = B'(x, y), \quad (5)$$

где  $q_1, q_2$  – обобщенные координаты манипулятора;  $x, y$  – декартовы координаты концевой точки.

В таком случае выполняется приближенное равенство ассоциативного и аналитического отображений:

$$\begin{cases} B'(x, y) \approx B(x, y), & \text{если } D(x, y) = 1, \\ B'(x, y) = B(x^*, y^*), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (6)$$

где  $D(x, y) \in \{0; 1\}$  – вспомогательная логическая функция, подтверждающая принадлежность целевой точки рабочей области  $W$  манипуляционного робота, а также отсутствие столкновений ММР с препятствиями через отрицание формулы (2):

$$D(x, y) = \{(x, y) \in W\} \cup \{\neg S_M \cap S_C\}; \quad (7)$$

$(x^*, y^*) \in \mathbb{R}^2 \cap D(x^*, y^*)$  – ближайшая эталонная точка, замещающая точку целеуказания с применением евклидовой нормы:

$$(x^*, y^*) = \operatorname{argmin}_{(x^*, y^*)} \|(x - x^*, y - y^*)\|. \quad (8)$$

Обучение ассоциативной памяти может быть организовано по результатам многократного решения ПЗК через заполнение таблицы соответствий строками вида:

$$(q_1^{(i)}, \dots, q_n^{(i)}) \rightarrow (x^{(i)}, y^{(i)}), \quad (9)$$

где  $i = 1, \dots, K \in \mathbb{N}$  – номер записи в таблице АП.

Обобщенные координаты  $Q$  тестовых положений манипулятора заносятся в левые (антецедентные) колонки таблицы. Рассчитанные декартовы координаты  $X$  концевой точки сохраняются в правых (консеквентных) колонках таблицы.

Взаимная инверсия антецедентных и консеквентных колонок в системе ассоциативно-регрессионного вывода позволяет вычислительно простым способом перейти от решения ПЗК к решению ОЗК по формуле:

$$(x^{(i)}, y^{(i)}) \rightarrow (q_1^{(i)}, \dots, q_n^{(i)}), \quad (10)$$

которая уточняет выражение (5).

Для равномерного заполнения таблицы применяется дискретизация обобщенных координат манипулятора:

$$q_i(j) = q_i^{(start)} + \frac{j \cdot (q_i^{(end)} - q_i^{(start)})}{J_i - 1}, \quad j = 0, \dots, J_i - 1, \quad (11)$$

где  $q_i^{(start)}$ ,  $q_i^{(end)}$  – начальное и конечное значение  $i$ -й обобщенной координаты;  $J_i$  – число шагов разбиения по данной обобщенной координате.

По существу, дискретность записей таблицы, лежащей в основе АП, обуславливает приближенный характер равенств (6).

Верхняя оценка числа записей в таблице АП определяется по формуле:

$$K = \prod_{i=1}^n J_i. \quad (12)$$

На практике число записей сокращается, поскольку часть из них отбраковывается на этапе проверки коллизий с учетом формулы (2).

### В. Траекторное и позиционное управление ММР

Для поиска маршрута движения манипуляционного робота формируется двунаправленный граф:

$$G = \{V, Q, E\}, \quad (13)$$

где  $V$  – вершины графа, совпадающие с декартовыми координатами концевой точки манипулятора, хранимыми в ассоциативной памяти;  $Q$  – обобщенные координаты манипулятора, связанные с вершинами графа;  $E$  – ребра графа.

При формировании графа вершины соединяются по принципу  $k$  ближайших соседей, где число  $k$  определяется эмпирически [4].

Входными данными алгоритма планирования пути являются декартовы координаты начальной и конечной точек маршрута  $p^{(start)}$ ,  $p^{(end)}$ . Данные координаты могут отличаться от записей, хранимых в АП, поэтому применяется формула (8) для их уточнения.

Маршрут между начальной и конечной точками на стратегическом уровне управления определяется по алгоритму Дейкстры [5]:

$$P = F_{Dijkstra}(G, p^{(start)}, p^{(end)}) \quad (14)$$

Обработка построенного маршрута на исполнительном уровне управления выполняется через интерполяцию декартовых и обобщенных координат ММР:

$$q_{t+\Delta t} = q_t + J_t \cdot (p_{t+\Delta t} - p_t), \quad (15)$$

где  $J_t$  – матрица Якоби манипулятора в момент времени  $t$ ;  $\Delta t$  – интервал времени между рассматриваемыми точками траектории [6].

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки эффективности разработанных моделей и алгоритмов управления ММР с применением таблично-графоаналитической АП было разработано тестовое программное обеспечение на языке Python.

В рамках виртуальной сцены производился расчет и отрисовка двухмерного контейнера АСХ (шириной: 2м, высотой: 2м), включающего полки для хранения объектов и закрепленный в центре его основания ММР ангулярного типа (длины 3 звеньев: 1 м; 0,65 м; 0,41 м).

### А. Обработка механизма формирования АП

На рис. 3 представлена визуализация векторов  $(x^{(i)}, y^{(i)})$  ассоциативной памяти для случая перемещения ММР без объекта в захватном устройстве. Пределы вариации углов сочленений установлены одинаковыми и соответствуют диапазону  $[-\pi/2; \pi/2]$ . Для обеспечения 10-градусного шага приращения угла число дискрет в формуле (11) выбрано равным  $J_i = 18$ ,  $i=1,2,3$ . Фактическое число записей в АП составило  $K^* = 1598$ .

По форме облака эталонных точек можно заключить, что кинематические параметры манипулятора позволяют ему свободно перемещаться между окном приема-выдачи хранимых объектов и всеми полками складской ячейки за исключением правой нижней.

На рис. 4 представлена визуализация векторов  $(x^{(i)}, y^{(i)})$  ассоциативной памяти для более сложного случая перемещения ММР – при удержании объекта в захватном устройстве. Как и следовало ожидать, размер области достижимости уменьшился ввиду необходимости избегать столкновений объекта с препятствиями, согласно формуле (2). Фактическое число записей в АП составило  $K^* = 1128$ .

### В. Обработка целенаправленных движений ММР

В целях повышения наглядности при исследовании графоаналитического алгоритма планирования маршрута дискретизация положений ММР была укрупнена.

Так, на рис. 5 представлена визуализация векторов  $(x^{(i)}, y^{(i)})$  ассоциативной памяти при увеличении шага дискретизации в формуле до 20 градусов. Число дискрет в формуле (11) было выбрано равным  $J_i = 9$ ,  $i=1,2,3$ . Фактическое число записей в АП составило  $K^* = 134$ .

На рис. 6 представлена визуализация графа  $G$  потенциальных перемещений ММР. При построении графа использовалось число ближайших соседей  $k \geq 3$ . Также на рис. 6 отображен маршрут движения манипуляционного робота, сформированный алгоритмом Дейкстры по формуле (14). Начальная и конечная точки маршрута (точки захвата и размещения целевого объекта) выбирались вручную пользователем программы.

Плавность движений робота при обработке маршрута достигается за счет итеративного расчета формулы (15) для последовательных опорных точек маршрута  $p_t$ .

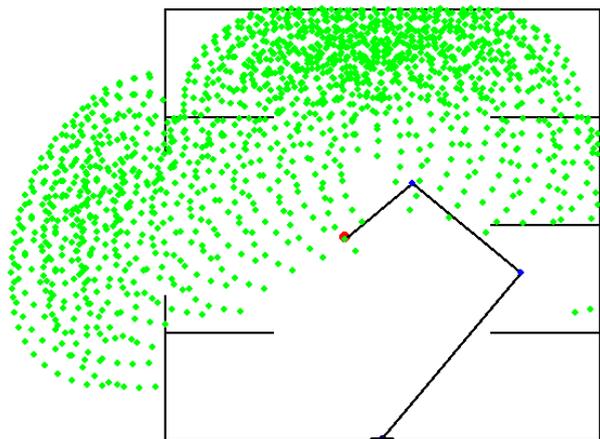


Рис. 3. Эталонные точки рабочей зоны манипулятора (10° шаг приращения углов)

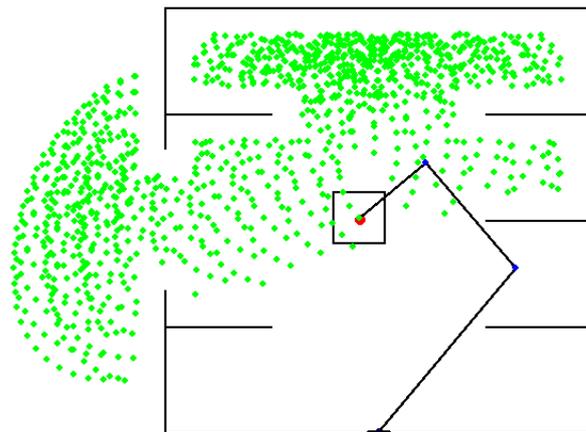


Рис. 4. Эталонные точки рабочей зоны манипулятора с захваченным объектом (10° шаг приращения углов)

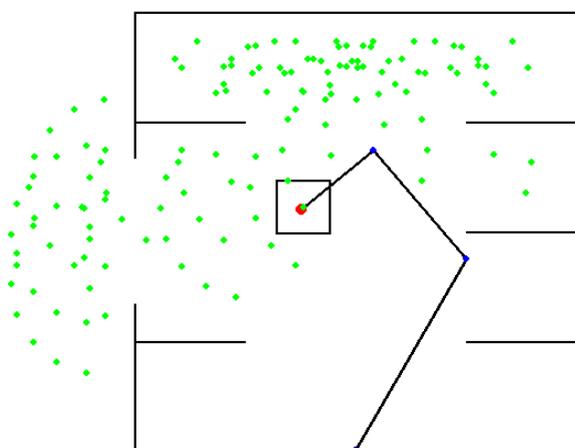


Рис. 5. Эталонные точки рабочей зоны манипулятора с захваченным объектом (20° шаг приращения углов)

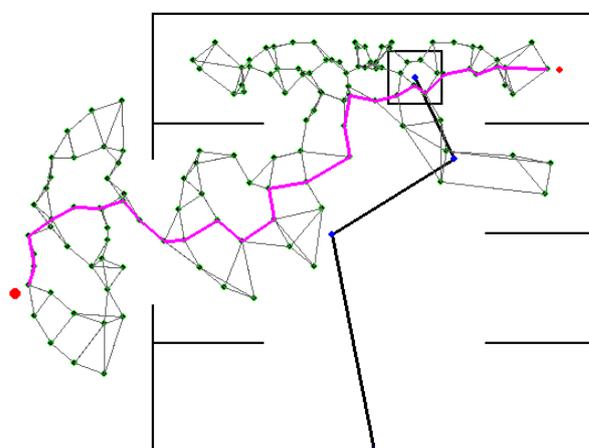


Рис. 6. Граф потенциальных перемещений манипулятора и сформированный на нем маршрут (фиолетовая линия)

## V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты экспериментов подтверждают, что разработанная модель табличной АП и сопряженный с ней граф  $G$  рабочей зоны ММР в действительности позволяют осуществить планирование целенаправленных движений робота с применением формул (14) и (15). Сформированный маршрут (рис. 6) достаточно точно улавливает геометрию складской ячейки. Вместе с тем наблюдаются многочисленные изломы траектории. Плавность маршрута может быть повышена как за счет уменьшения шага дискретизации обобщенных координат ММР при построении графа  $G$ , так и за счет применения сплайнов для сглаживания траектории [7].

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформированная обобщенная структура аппаратно-программного обеспечения автоматизированной системы хранения на базе робота-манипулятора отражает наличие двух ее важных функциональных

возможностей – постановки объектов на хранение и выдачи объектов по запросу человека-оператора.

В целях обеспечения данного функционала алгоритмическое обеспечение АСХ на базе стационарного ММР должно решать три основных задачи: восприятие сцены, определение целевого положения захватного устройства и планирование движений манипуляционного устройства.

В проведенном исследовании основное внимание было уделено вопросу планирования движений ММР. На пути к данной цели была решена задача формирования табличной ассоциативной памяти в сочетании с графом потенциально достижимых положений для тактического уровня управления ММР. Кроме того, была решена задача планирования маршрута движения ММР за счет применения алгоритма Дейкстры на стратегическом уровне управления. На исполнительном же уровне был применен метод нелинейной интерполяции обобщенных координат ММР по матрице Якоби

Визуализация упрощенной схемы складской ячейки с входящим в ее состав ММР позволила оценить эффективность формируемой траектории и сделать выводы о возможности повышения ее гладкости.

В дополнение к указанным выше соображениям следует отметить, что дальнейшие перспективы развития проведенного исследования включают:

– динамическое перестроение графа потенциальных перемещений при изменении числа или расположения хранимых объектов;

– добавление в алгоритм планирования маршрута эвристики по минимизации изменений обобщенных координат ММР;

– анализ погрешностей ассоциативной регрессии декартовых координат концевой точки ММР в режиме ОЗК при различной дискретизации его опорных положений;

– построение и исследование трехмерных моделей АСХ и ММР с различными конструктивными и кинематическими параметрами.

– автоматизированный выбор параметров расположения и геометрии ММР по критерию минимизации времени приема и выдачи хранимых объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] N. Kimura et al., “Mobile dual-arm robot for automated order picking system in warehouse containing various kinds of products,” Proc. of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SI), pp. 332–338, 2015.
- [2] M. McTaggart et al., “Mechanical design of a cartesian manipulator for warehouse pick and place,” arXiv:1710.00967, pp. 1–7, 2017.
- [3] Пат. 201065 РФ, МПК В25J 9/00. Модульная производственная ячейка на основе малогабаритного робота / Романов А. М., Романов М. П., Шютц В. А. Заявл. 15.06.2020. Оpubл. 25.11.2020. Бюл. № 33. – 7 с.
- [4] W. Dong, C. Moses, K. Li, “Efficient k-nearest neighbor graph construction for generic similarity measures,” Proc. of the 20th international conference on World wide web (WWW '11). Association for Computing Machinery, pp. 577–586, 2011.
- [5] Z. Haruna, M. Mu'azu, A. Umar, G. Ufuoma, “Path Planning Algorithms for Mobile Robots: A Survey,” In book: Motion Planning for Dynamic Agents, 2023.
- [6] M. Walthe, A. Sewohl, H. Schlegel, R. Neugebauer, M. Walther, “Trajectory planning for kinematically redundant robots using jacobi matrix – an industrial implementation,” Journal of Machine Engineering, pp. 24-35, 2017.
- [7] P. E. Koch, K. Wang, “Introduction of b-splines to trajectory planning for robot manipulators,” vol. 9, no. 2, pp. 69-80, 1988.

#### Информация об авторах:

Диане Секу Абдель Кадер, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории №90 Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия, e-mail: [diane1990@yandex.ru](mailto:diane1990@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-8690-6422

Аникина Екатерина Александровна, бакалавр МИРЭА – Российского технологического университета, г. Москва, Россия, e-mail: [katerina.anikina.04@mail.ru](mailto:katerina.anikina.04@mail.ru)

#### Control of a warehouse manipulator using associative memory technology

S. A. K. Diane<sup>1</sup>, E. A. Anikina<sup>2</sup>

*V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences<sup>1</sup>*

*MIREA – Russian Technological University<sup>2</sup>*

**Abstract** – The article describes the generalized structure of the hardware and software of a robotic storage cell based on an autonomous multi-link manipulation robot. Models and algorithms for the robot manipulator control system are proposed. Associative memory technology is used to solve the inverse kinematics problem. The task of forming the route of the robot manipulator is solved through graph analysis. Performing movements to reach a target object is based on nonlinear interpolation of generalized robot coordinates using the Jacobi matrix. The results of experimental studies with an assessment of the operability of the proposed algorithms and conclusions about the prospects for the development of this approach are presented.

**Keywords** – automated warehouse, storage cell, storage of goods, manipulation robot, associative memory, graph pathfinding.

#### References

- [1] N. Kimura et al., “Mobile dual-arm robot for automated order picking system in warehouse containing various kinds of products,” Proc. of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SI), pp. 332–338, 2015.
- [2] M. McTaggart et al., “Mechanical design of a cartesian manipulator for warehouse pick and place,” arXiv:1710.00967, pp. 1–7, 2017.
- [3] Пат. 201065 РФ, МПК В25J 9/00. Modul'naya proizvodstvennaya yacheyka na osnove malogabaritnogo robota (Modular production cell based on a small-sized robot) / Romanov A. M., Romanov M. P., Shyutts V. A. Zayavl. 15.06.2020. Opubl. 25.11.2020. Byul. № 33. – 7 s. (In Russian).
- [4] W. Dong, C. Moses, K. Li, “Efficient k-nearest neighbor graph construction for generic similarity measures,” Proc. of the 20th international conference on World wide web (WWW '11). Association for Computing Machinery, pp. 577–586, 2011.
- [5] Z. Haruna, M. Mu'azu, A. Umar, G. Ufuoma, “Path Planning Algorithms for Mobile Robots: A Survey,” In book: Motion Planning for Dynamic Agents, 2023.
- [6] M. Walthe, A. Sewohl, H. Schlegel, R. Neugebauer, M. Walther, “Trajectory planning for kinematically redundant robots using jacobi matrix – an industrial implementation,” Journal of Machine Engineering, pp. 24-35, 2017.
- [7] P. E. Koch, K. Wang, “Introduction of b-splines to trajectory planning for robot manipulators,” vol. 9, no. 2, pp. 69-80, 1988.