

Модели и алгоритмы управления группой мобильных роботов в задаче уборки урожая*

Припотнев М.С., Диане С.А.К., Акуловский Д.В.

ИПУ РАН

г. Москва, Российская Федерация

diane1990@yandex.ru

Аннотация. Предложено решение транспортной задачи для группы мобильных роботов, перемещающихся по участку местности сельскохозяйственного назначения в целях сбора и транспортировки плодов растений. Представлена виртуальная модель робототехнического комплекса, включающего в свой состав подвижную платформу и манипуляционное устройство. Описан алгоритм захвата целевых объектов с применением метода конечных смещений на основе визуальной обратной связи. Разработан алгоритм группового управления роботами, учитывающий взаимное расположение роботов, целевых объектов и препятствий. Входом алгоритма является множество координат агентов и объектов внешней среды. Выходом алгоритма является набор опорных точек траекторий каждого из роботов. Для поиска маршрутов автономных роботов на решетчатом графе местности применен модифицированный волновой метод. Произведено моделирование многоагентной робототехнической системы при различных ее параметрах. Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: групповое управление, автономный мобильный робот, уборка урожая, планирование маршрута.

ВВЕДЕНИЕ

Сфера сельского хозяйства традиционно является одной из важнейших в структуре экономики России, составляя по последним оценкам свыше 4,5% в валовой добавленной стоимости. При этом важно отметить, что разнообразие отраслей и типов сельхозпроизводства предопределяет широкий фронт перспективных научно-исследовательских работ, направленных на повышение эффективности и рациональности использования природных ресурсов и развития инновационной технологической и социально-экономической среды [1].

Обобщение передовых отечественных разработок и опыта зарубежных стран в контексте развития новых методов управления и обработки информации в агропромышленном комплексе позволяет выделить 6 основных направлений цифровой трансформации сельского хозяйства, представленных на рис. 1.

Особый интерес представляют направления, связанные с разработкой алгоритмов группового управления мобильными роботизированными комплексами (МРТК) в задаче уборки урожая и моделированием технологических процессов сельского хозяйства.

Отметим, что ряд алгоритмов обработки информации и управления уже активно применяются для автоматизации сельскохозяйственных работ.

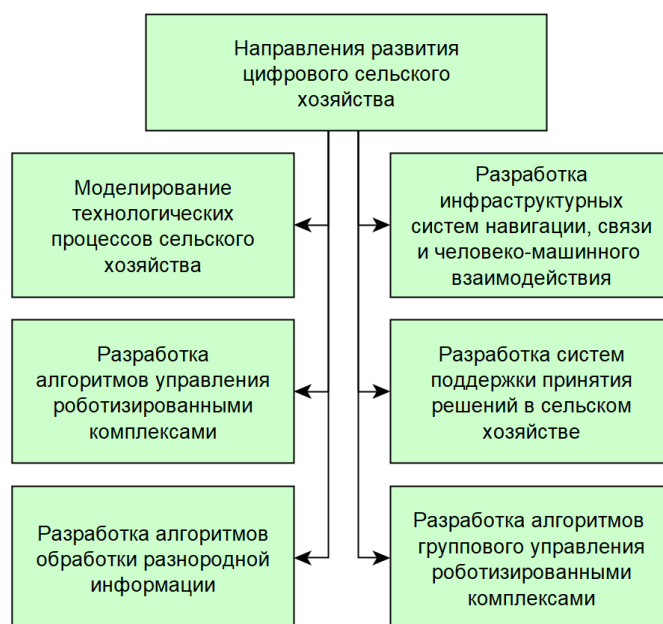


Рис. 1. Ключевые направления технологического развития цифрового сельского хозяйства

Так, например, научно-исследовательский центр Wageningen UR (Нидерланды), разработал мобильного робота с бортовой системой технического зрения, способной распознавать спелые плоды яблок, сладкого перца, винограда. При помощи манипуляционного устройства робот захватывает и срезает урожай (рис. 2, а) [2].

Еще один мобильный робототехнический комплекс для сбора урожая в теплицах разработан компанией Ostinion (Бельгия) [3]. Данный робот оснащен захватным устройством с мягкими пластиковыми губками и высокочувствительными камерами для определения степени зрелости клубники. Робот перемещается на самоуправляемой платформе, захватывает спелые ягоды, проворачивает их на 90 градусов и отправляет в корзину (рис. 2, б). Производительность робота составляет 24 кг клубники в час, что в полтора раза превышает возможности обычного рабочего [3].

Теоретической основой решений, используемых в задачах сбора плодов сельскохозяйственными роботами, являются:

- алгоритмы целенаправленного перемещения мобильных роботов на местности с препятствиями [4-7];
- алгоритмы визуальной детекции и сегментации объектов

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

в поле зрения автономного робота [8, 9];
 - алгоритмы управления манипуляционным устройством робота в режимах прямой и обратной задач кинематики [10].



Рис. 2. Примеры существующих МРТК для сбора спелых плодов:
 а – SWEeper robot (Wageningen UR, Нидерланды);
 б – Harvesting robot (Octinion, Бельгия)

Остановимся подробнее на первой из перечисленных групп алгоритмов. Задача целенаправленного перемещения мобильных роботов на местности успешно решается с середины XX века и послужила катализатором развития целого ряда методов дискретной математики, цифровой обработки сигналов, автоматического управления.

Тем не менее, неопределенность внешней среды функционирования мобильных роботов сельскохозяйственного назначения столь существенна, а разнообразие моделей робототехнических систем и обрабатываемых ими целевых объектов так велико, что вплоть до настоящего времени нет эффективных многокритериальных алгоритмов, учитывающих всю совокупность требований, предъявляемых к системам подобного рода.

Сложность разработки подобного рода алгоритмов тем более возрастает при переходе к мультиагентной постановке задачи сбора урожая, когда проблемы планирования траекторий движения роботов дополняются вопросами планирования временной очередности заданий и распределения их между автономными роботами.

Конкретизация существующих подходов к решению транспортной задачи с учетом проблематики уборки урожая требует, с одной стороны, тщательной проработки математической модели функционирования группы мобильных роботов, а с другой – грамотного применения современных комбинаторных и графоаналитических методов в сочетании с технологиями численного и виртуального моделирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА ПЛОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИЗУАЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Выполнение захвата обнаруженного спелого плода растения для последующей его транспортировки в указанную позицию предполагает слаженную работу системы технического зрения, алгоритма управления платформой мобильного робота и алгоритма управления манипуляционным устройством (рис. 3).

В общем случае структура алгоритмического обеспечения мобильного робота должна включать:

- алгоритмы предобработки изображений;
- алгоритмы детектирования целевых объектов;
- алгоритмы определения отклонения захватного устройства от целевого объекта;
- алгоритмы управления манипуляционным устройством в

- режимах прямой и обратной задач кинематики;
- алгоритмы управления колесной платформой.

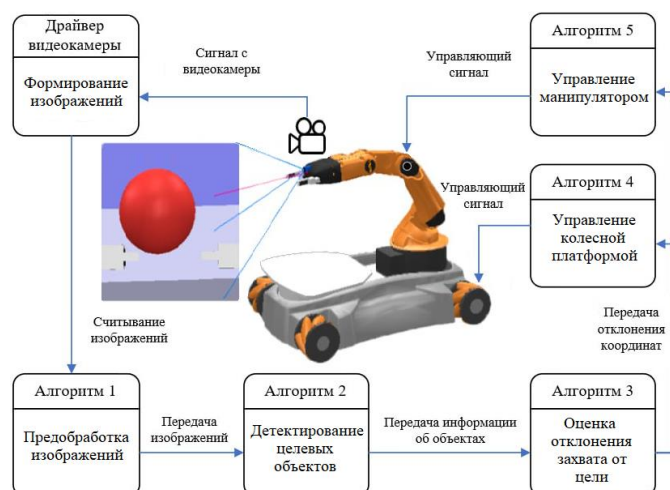


Рис. 3. Общая структура алгоритмического обеспечения мобильного робота

Управление колесной платформой робота обеспечивает его передвижение в зону достижимости целевого объекта.

Тем не менее, остается рассогласование между положением захватного устройства робота и целевого объекта. Для его устранения используется алгоритм управления манипуляционным устройством, который может быть реализован на базе аналитического или численного решения обратной задачи кинематики.

Для задач с высокой степенью неопределенности параметров внешней среды робота, эффективным решением является применение визуальной обратной связи в сочетании с методом конечных поворотов и смещений [10].

Для сегментации виртуального объекта используется архитектура U-Net, основанная на энкодере VGG-11 [9]. По множеству сегментированных пикселей рассчитывается центр масс p объекта на изображении и площадь S проекции объекта. В качестве точки отсчета используется центр изображения p_c . Невязка $e = p - p_c$ используется для расчета уставок на приводы манипулятора по методу конечных поворотов и смещений. В свою очередь, параметр S используется при расчете критерия остановки движения манипулятора.

На рис. 4 представлен фрагмент виртуального моделирования МРТК на базе платформы KUKA youBot в задаче целенаправленного движения и захвата тестового объекта.

Важным параметром с точки зрения стратегического уровня системы управления роботом является радиус рабочей зоны робота, который составляет $R_w=0,54$ м от основания манипулятора, закрепленного на платформе.

ФОРМАЛИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ РОБОТА-СБОРЩИКА

Рассматриваемый вопрос планирования движений группы МРТК на местности при проведении сельхозуборочных работ может быть рассмотрен с позиции решения транспортной задачи [11] и задачи коммивояжера [12]. Однако дополнительного рассмотрения требуют вопросы формализованного представления автономных роботов-исполнителей [7], учета препятствий на пути их движения и выбора оптимального количества агентов в составе робототехнической группировки.

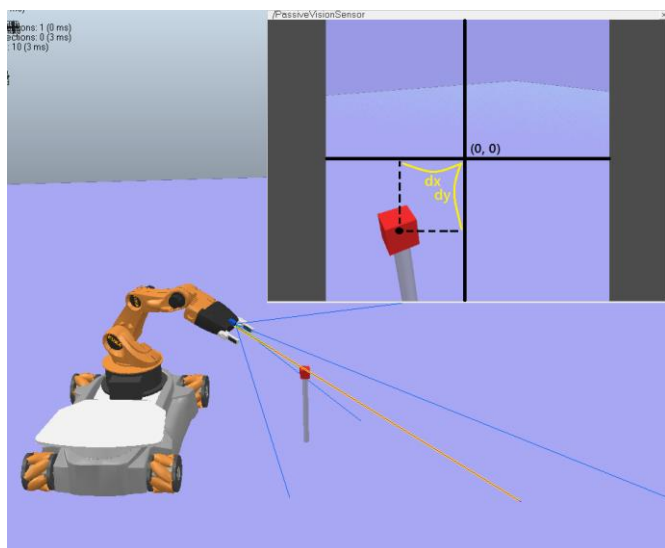


Рис. 4. Фрагмент моделирования МРТК с видеокamerой, закрепленной на конце захватного устройства

Опишем агента (робота-сборщика) конечным автоматом следующего вида:

$$K = \{S, U_i, U_o, f, h\},$$

где S – алфавит состояний, в которых может находиться автономный робот в процессе функционирования; U_i – входной алфавит сигналов на переход робота в состояния из множества S ; U_o – выходной алфавит подтверждающих сигналов о переходе робота в состояния из множества S ; f, h – функции переходов и выходов автомата, задаваемые диаграммой на рис. 5.



Рис. 5. Диаграмма состояний робота в видеконечного автомата

Как видно из диаграммы, в состав вектора S входит 5 состояний робота-сборщика:

- “Выключен” (Disabled) – изначальное состояние нового робота, включается/выключается по команде извне. При включении переходит в состояние Ready.
- “Готов” (Ready) – готовый к выполнению задач, свободный робот. Именно из этих роботов планировщик выбирает ближайшего до заданной цели и назначает выбранному задачу захвата объекта.
- “Двигается” (Going) – робот,двигающийся к намеченной точке, имеющий задание на захват объекта. При захвате объекта переходит в состояние Carrying.

- “Перевозит” (Carrying) – робот, успешно добравшийся до объекта и захвативший его; по команде планировщика прокладывает маршрут до ближайшей базы и перевозит объект туда. По окончании перевозки робот переходит в состояние Ready.

- “Сломан” (Broken) – робот, неспособный проложить маршрут ко всем возможным целям, в то время как другие роботы таких проблем не имеют.

Перечисленные состояния позволяют планировщику групповых заданий эффективно распределять задачи между свободными агентами и отправлять собравших урожай роботов на базу.

ФОРМАЛИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Математическая формализация решаемой задачи может быть представлена в следующем виде. Пусть $R = \{r_1, \dots, r_{N_r}\}$ – множество робототехнических агентов. Каждый из агентов описывается набором переменных $r_i = \{i, s, x, y\}$, включающим порядковый номер робота i , состояние ассоциированного конечного автомата s и дискретизированные координаты робота на плоскости перемещения $\{x, y\} \in \mathbb{Z}^2$.

Шаг дискретизации σ выбирается как можно большим в целях оптимизации скорости вычислений, но не превышающим радиус R_w рабочей зоны робота.

Множество целевых объектов (собираемых роботами плодов растений) определяется как $Q = \{q_1, \dots, q_{N_q}\}$, где $q_i = \{i, x, y\}$. Координаты целей так же принимают дискретные значения $\{x, y\} \in \mathbb{Z}^2$.

В то же время набор препятствий на рассматриваемом участке местности задается множеством $P = \{p_1, \dots, p_{N_p}\}$. Причем каждое препятствие $p_i = \{v_1, \dots, v_{N_v}\}$ задается набором занятых ячеек $v_i \in \mathbb{Z}^2$ на дискретизированной местности.

Анализ расположения вышеперечисленных объектов позволяет сформировать направленный граф местности $G = \{U, E\}$. Множество вершин графа определяется как $U = \{u_1, \dots, u_{N_u}\}$, где $u_i \in \mathbb{Z}^2$. Ребра графа задаются набором переменных $e_i = \{i, j, w\} \in E$, содержащим в порядке перечисления индексы двух соседних вершин и вес ребра, пропорциональный расстоянию между соответствующими дискретами местности.

Поиск маршрута каждого из роботов в пределах данного графа осуществляется в формате: $U_i = \{u_{i_1}, \dots, u_{i_M}\} \subset U$ и реализуется с применением графо-аналитического алгоритма поиска пути A^* .

ГРУППОВОЙ АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАНИЙ МЕЖДУ РОБОТАМИ

Введём дополнительный ряд обозначений для дальнейшего описания алгоритма:

- свободные роботы-сборщики R_f – все робототехнические агенты в состоянии Ready;
- свободные цели Q_f – все несобранные объекты на карте, для которых отсутствует (не выбран) конкретный сборщик.

Роботы в состоянии Ready вычисляют кратчайшую траекторию до ближайшей доступной цели с помощью алгоритма A*. Результат – цель и расстояние – сохраняется в переменную.

Вначале распределитель просматривает все свободные роботы и все свободные цели и назначает им ближайшую по эвристике цель. Эвристика предназначена для вычислительно эффективного расчета оценок достижимости целевых точек в процессе перебора допустимых назначений роботов и задается формулой квадрата евклидова расстояния между положением робота $\{x_r, y_r\}$ и положением цели $\{x_g, y_g\}$: $h = (x_r - x_g)^2 + (y_r - y_g)^2$.

При этом следует отметить, что одна цель может являться ближайшей сразу для нескольких роботов.

На следующем этапе алгоритма каждый робот просчитывает уточненную траекторию до цели с учетом обхода препятствий вдоль ребер графа местности и возвращает полученный маршрут U_i с длиной $L_i = \sum_{j=1}^{N-1} |u_{j+1} - u_j|$.

Далее планировщик выбирает доступного робота для достижения целевого объекта, исходя из кратчайшего пути L_i от робота до цели вдоль ребер графа местности, и переводит его в состояние Going. У всех остальных агентов убирается привязанный целевой объект, просчитанная траектория очищается. Затем планировщик обновляет список доступных целей и для всех свободных роботов пересчитывает расстояние до нового списка целей. Таким образом, общий алгоритм работы состоит из следующих шагов:

1. Жадное распределение свободных целей по роботам по принципу: каждому роботу – ближайшая по эвристике цель;
2. Расчёт уточненной траектории к цели каждым роботом с применением графоаналитического алгоритма;
3. Выбор для каждой свободной цели робота по принципу наименьшего уточненного пути (из списка претендентов выбирается один робот);
4. Перевод выбранного робота для каждой цели в состояние Going с временным исключением данного робота из процесса распределения заданий.
5. Проверка роботов, прибывших к своему объекту на расстояние меньше или равное радиусу рабочей зоны R_w , на завершение процесса захвата и перевод их в состояние Carrying с одновременным расчетом траектории их движения до базы.
6. Проверка роботов в состоянии Carrying, движущихся к базе на достижение целевой точки; при положительном результате проверки происходит перемещение транспортируемого объекта на базу и перевод роботов в состояние Ready, после чего они снова попадают под действие распределительного процесса.
7. Если остались несобранные объекты, то возврат к п.1, иначе конец алгоритма.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУППОВОГО ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В ПРОЦЕССЕ УБОРКИ УРОЖАЯ

Верификация предложенного подхода к групповому распределению и планированию маршрутов автономных роботов потребовала разработки моделирующей среды с развитым графическим интерфейсом. В качестве средств разработки был выбран язык C# с применением технологии WPF.

Основными задачами моделирующей программы является отображение карты модели местности с размещенными на ней роботами-сборщиками, объектами для сбора, точками сбора и препятствиями; распределение задач между роботами-сборщиками; планирование траекторий роботов; симуляция изменений в расположении и состоянии объектов с течением времени.

Обработка функционала программы производилась на 4 типовых сценах, представленных на рис. 6.

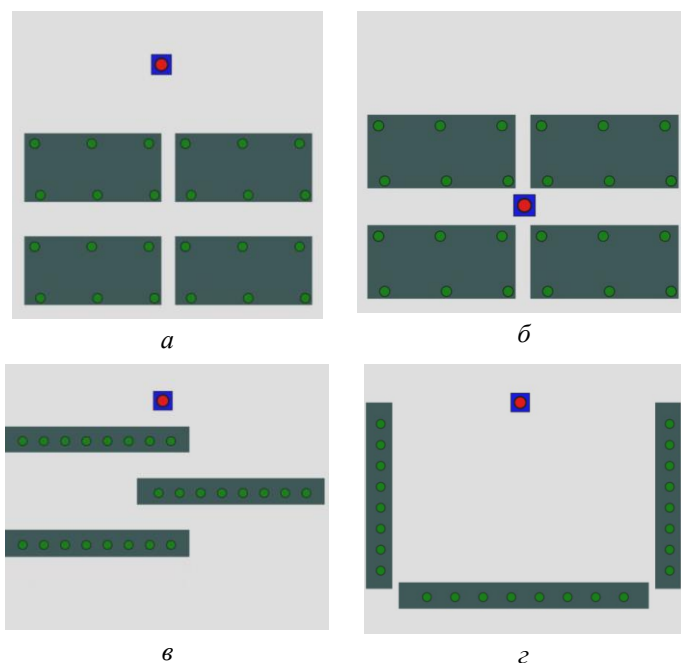


Рис. 6. Наборы тестовых сцен: а – Standard; б – Standard-Center; в – Lines; з – Quad

Каждая из виртуальных сцен допускает вариацию параметров, связанных с количеством робототехнических агентов N и целевых объектов M . Так, на рис. 7 представлен пример запуска симуляции на сцене Standard-Center для 3 агентов и 24 собираемых плодов растений. Роботы выдвигаются из позиции, обозначенной синим квадратом, захватывают близлежащие плоды и транспортируют их обратно на базу.

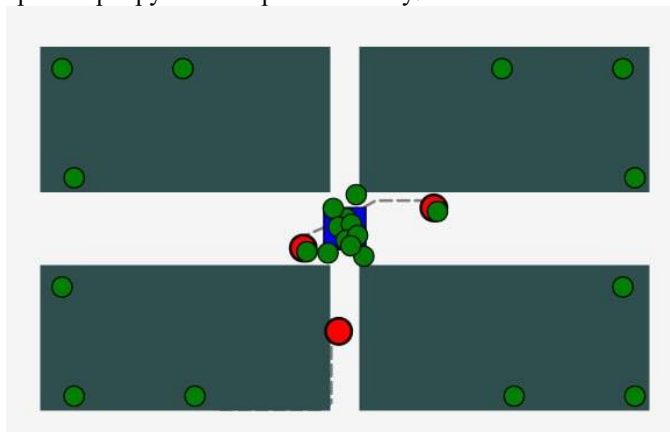


Рис. 7. Фрагмент моделирования движений группы роботов в процессе сбора урожая на сцене Standard-Center при параметрах $N=3$, $M=24$

Для оценки зависимости между количеством используемых роботов и эффективности мультиагентной системы проведем серию тестовых запусков процесса уборки урожая на различных сценах.

На рис. 8 представлена зависимость общего времени движения роботов по виртуальному полигону от типа сцены, а также от параметров N и M. Как и следовало ожидать, время выполнения задачи для большего числа роботов падает. Отклонения от данной закономерности на некоторых из сцен связаны с особенностями базовой версии планировщика, действующего по жадному алгоритму. Особенно отчетливо этот эффект виден для сцены Standard-Center при количестве роботов $N > 11$.



Рис. 8. Влияние количества роботов на время выполнения задачи

Преимуществом жадного алгоритма является его скорость. Как видно из рис. 9, время вычисления группового маршрута значительно меньше, чем представленное на рис. 8. время непосредственного выполнения задачи мультиагентной системой.



Рис. 9. Влияние количества роботов на время расчета группового маршрута

При детальном рассмотрении кривой времени расчетов можно заметить, что для сцены Standard распределение больших групп роботов на 12 целей занимает больше времени, чем для 24 целей. Эта неочевидная на первый взгляд особенность вызвана двухэтапностью алгоритма.

Когда роботов меньше, чем целей, распределение на этапе эвристического поиска ближайших целей происходит практически без коллизий, по принципу – каждому

работу – отдельная цель. При увеличении же числа роботов, пересечений в назначении целей становится больше. В этой связи алгоритм чаще переключается на второй этап, связанный с уточнением истинных длин маршрутов по графу местности для роботов, претендующих на одинаковые цели.

Достигнутая скорость работы алгоритма вполне достаточна для нужд малых и средних фермерских хозяйств. Тем не менее, дальнейшее улучшение процедуры согласования группового плана маршрутов возможно за счет отказа от жадного алгоритма распределения и применения эволюционного подхода для поиска субоптимальных назначений роботов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были обобщены основные требования к функциональности мобильных робототехнических комплексов для сбора урожая. Представлен пример виртуального моделирования подобного комплекса в задаче захвата целевого объекта с визуальной обратной связью.

На основе полученных результатов была разработана упрощенная двумерная модель процесса уборки урожая. Наряду с автоматной моделью робототехнического агента разработаны формализованная модель мультиагентной робототехнической системы, а также групповой алгоритм распределения задач на базе графоаналитического подхода к оценке стоимости назначений роботов-сборщиков.

Развитие предложенного подхода предполагает проведение комплексного моделирования группы роботов в трехмерной среде с учетом таких аспектов их функционирования, как обход динамических препятствий, учет неопределенностей в окраске и степени наблюдаемости собираемых плодов растений.

Кроме того, ряд улучшений возможен в направлении оптимизации алгоритма распределения заданий, в частности, за счет учета комплексных оценок пригодности робототехнических агентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абросимов В.К. Интеллектуальные сельскохозяйственные роботы. / В.К. Абросимов, А.Н. Райков. – М.: Карьера Пресс, 2022. – 512 с.
2. Arad B. Development of a sweet pepper harvesting robot / B. Arad, J. Balendonck, R. Barth, O. Ben-Shahar, Y. Edan, T. Hellström, J. Hemming, P. Kurtser, O. Ringdahl, T. Tielen, B. Tuijl // Journal of Field Robotics. – 2020. – Vol. 37, is. 6. – P. 1027-1039.
3. De Preter A. Development of a robot for harvesting strawberries / A. De Preter, J. Anthonis, J. De Baerdemaeker // IFAC-PapersOnLine, 2018. – Vol. 57, is. 17. – P. 14-19.
4. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2015. – 305 с.
5. Multi-robot systems, trends and development / Edited by T. Yasuda. – InTech, 2011. – 586 p.
6. Диане С.А.К. Алгоритм сетцентрического управления движением группы мобильных роботов / С.А.К. Диане, А.Ю. Исхаков, А.О. Исхакова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, №1. – С. 1-11.

7. Лохин В.М. Способы представления знаний и особенности функционирования мультиагентных робототехнических систем / В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов, С.А.К. Диане // Мехатроника, автоматизация, управление. – М.: Новые технологии, 2014. – №1. – С. 36-39.

8. Redmon J. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // CVF 2016. – P. 779-788.

9. Iglovikov V. TerausNet: U-Net with VGG11 Encoder Pre-Trained on ImageNet for Image Segmentation / V. Iglovikov, A. Shvets // arXiv:1801.05746. – 2018.

10. Данилов А.В. Применение метода конечного поворота и смещения для манипулятора последовательной

структуры с кинематическими парами пятого класса / А.В. Данилов, А.Н. Кропотов, О.В. Трифонов // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2018. – № 107. – 16 с.

11. Hitchcock F.L. The distribution of a product from several sources to numerous localities // MIT Journal of Mathematics and Physics. – 1941. – Vol. 20. – P. 224-230.

12. Kent T.E. Decentralised Multi-Demic Evolutionary Approach to the Dynamic Multi-Agent Travelling Salesman Problem / T.E. Kent, A.G. Richards // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion on - GECCO '19. – New York: Association for Computing Machinery (ACM), 2019. – P. 147-148.

DOI: 10.24892/RIJIE/20230407

Models and Algorithms for Controlling a Group of Mobile Robots in the Problem of Harvesting

Pripotnev M., Sekou Diane, Akulovskiy D.

ICS RAS

Moscow, Russian Federation

diane1990@yandex.ru

Abstract. The solution of the transport problem for a group of mobile robots is proposed for a case when they move within a piece of agricultural land in order to collect and transport plant fruits. A virtual model of a robotic complex is presented, which includes a movable platform and a manipulation device. An algorithm for capturing targets using the finite displacement method based on visual feedback is described. The algorithm for group control of robots was developed, that takes into account the relative position of robots, target objects and obstacles. The input of the algorithm is the set of coordinates of agents and objects of the external environment. The output of the algorithm is a set of ref-

erence points for the trajectories of each of the robots. To search for the routes of autonomous robots on a lattice graph of the terrain, a modified wave method was applied. A simulation of a multi-agent robotic system with its various parameters was carried out. The results of experimental studies confirmed the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: group control, autonomous mobile robot, harvesting, route planning.

Библиографическое описание статьи

Припотнев М.С. Модели и алгоритмы управления группой мобильных роботов в задаче уборки урожая / М.С. Припотнев, С.А.К. Диане, Д.В. Акуловский // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т.10, №4. – С. 32-37. DOI: 10.24892/RIJIE/20230407

Reference to article

Pripotnev M., Sekou Diane, Akulovskiy D. Models and algorithms for controlling a group of mobile robots in the problem of harvesting, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.4, pp. 32-37. DOI: 10.24892/RIJIE/20230407