

УДК 004.896

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ РОБОТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Жарикова (*anastasiazharikova00@gmail.com*)Г.А. Прокопович (*rprakovich@robotics.by*)В.А. Сычѐв (*vsychyov@robotics.by*)

Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье приводится описание разработки мультиагентной системы децентрализованного управления группой транспортных роботов, функционирующих в учреждении здравоохранения и выполняющих функции транспортировки медикаментов. Для регулирования движения роботов используется набор правил и система светофоров, причѐм каждый светофор, в свою очередь, является автономным агентом. Загрузка роботов осуществляется агентом-загрузочной станцией, функционирующей по принципу доски объявлений. Описанная архитектура позволила адаптировать транспортную систему под неподготовленное помещение, не позволяющее реализовать приоритетное функционирование транспортных роботов. Построена имитационная модель, позволяющая осуществлять оптимизацию параметров системы управления исходя из условий функционирования роботов.¹

Ключевые слова: мультиагентная система, транспортный робот, имитационная модель

Введение

Автоматически управляемые транспортные роботы (также называемые транспортные тележки или *automated guided vehicle*. AGV) получили широкое распространение в гибких производственных системах для выполнения повторяющихся задач транспортировки на производствах, складах, контейнерных терминалах [Vis 2006], но не ограничиваясь

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ-РФФИ (проект №Ф20Р-324).

данными объектами. Более того, с каждым годом области их применения всё более расширяются. С развитием технологий управления транспортные тележки стали применяться для автоматизации транспортных систем не только в промышленности, но и в других областях. Так, в частности, AGV находят применение здравоохранении для автоматизации больничной логистики, в гостиницах для сопровождения обслуживающего персонала [Pedan 2017], [Ageron 2019].

Именно медицинское направление в применении транспортных тележек ставит ряд новых задач в области систем автоматического управления мобильными роботами. В системе здравоохранения роботы могут выполнять задачи транспортировки медицинских препаратов, белья, продуктов питания.

Основным отличием транспортных роботов, задействованных в здравоохранении, от промышленных и складских транспортных роботов, является принципиальная невозможность исключения человека из рабочей зоны робота. Помимо этого, алгоритмы управления транспортными роботами принято проектировать исходя из жёстко заданного расписания. Даже ситуации возникновения заторов по причине поломки или появления препятствия перед роботом в литературе рассматриваются редко [Fazlollahtabar 2013]. В то же время роботы, действующие в больницах, не должны создавать помех персоналу и пациентам. Следовательно, движение по жёсткому расписанию будет затруднительно.

Автоматизация логистики в системе здравоохранения не является приоритетной задачей. Следовательно, транспортные тележки ещё долгое время должны будут функционировать в той инфраструктуре, которая уже создана в больницах и не всегда является оптимальной для транспортных роботов, а следовательно, требует большей степени автономности и гибкости. Подводя итог, можно сделать вывод, что именно транспортные тележки, предназначенные для работы в больницах, требуют применения наиболее совершенной системы управления. Технические решения, разработанные для подобных роботов, могут быть использованы для решения широкого круга задач транспортировки в различных областях. Таким образом, именно транспортные роботы для автоматизации доставки лекарств в больницах будут рассматриваться в настоящей работе.

В число функций транспортных тележек может входить доставка в палаты медикаментов и вывоз для утилизации тары от инфузионных растворов и иных препаратов. Инфраструктура для функционирования роботов включает в себя электрические зарядные станции; специализированный кабинет, в котором медицинский работник (или робот-манипулятор) осуществляет загрузку в специализированный приёмник робота медицинских препаратов для каждого из пациентов в соответствии с рекомендациями лечащего врача; специально отведённое

место, в котором производится выгрузка из робота упаковки от препаратов; метки для навигации робота внутри помещения.

1 Мультиагентная система управления для автоматизации доставки медикаментов в учреждениях здравоохранения

Рассмотрим систему управления группой транспортных роботов, основанную на мультиагентном подходе, структура которой представлена на рис. 1. В состав системы входят четыре множества равноправных агентов: пункт раздачи (функционирующий по принципу доски объявлений), бортовая система управления роботом, система управления больничной койкой, светофор. Каждый из названных объектов представляет собой агента, который может быть мультиплицирован в необходимых количествах.

Указанное выше требование к роботам функционировать в человеческой среде с возможными коллизиями реализуется в представленной схеме через разделение уровней управления на глобальный, или стратегический (планировщик заданий), и локальный, или тактический (СУ робота). В то время, как планировщик заданий отвечает за загрузку робота и формирование цели движения, СУ робота выполняет построение маршрута с учётом всех возникающих ограничений.



Рис. 1. Структура мультиагентной системы управления.

Как отмечается в [Wu 1999], для типовых логистических задач, к которым можно причислить и рассматриваемую, существует четыре класса участков пути:

- прямая дорога (коридор);
- Х-образный перекрёсток;
- Т-образный перекрёсток;
- Г-образная дорога.

Наиболее сложными участками, как и при дорожном движении автомобилей, являются перекрёстки, для преодоления которых был

разработан ряд алгоритмов. Уникальностью предложенных алгоритмов является то, что они должны использовать только локальную информацию о дороге и других участниках движения, доступную только собственной сенсорной системе. Проблему объезда Х- и Г-перекрёстков, в случае, когда встречные роботы планируют дальше двигаться в одном направлении, решается типичными правилами «кто первый начал манёвр» и «помеха справа».

В тех же случаях, когда описанные выше ситуации нельзя избежать, пришлось в разрабатываемую систему управления ввести новую сущность. В предлагаемой структуре системы управления был введён новый агент, называемый «светофор». Как и другие агенты, он является автономным и осуществляет регулирование порядка проезда перекрёстков по заранее определённым правилам. Он используется в тех случаях, когда на небольших участках дороги образуется двустороннее движение. Например, когда один робот собирается выехать из палаты, а другой – въехать. Так как двери палат достаточно узкие по сравнению с шириной коридоров (где можно обеспечить двустороннее движение вдоль противоположных стен), то въезд и выезд роботов осуществляется по одной линии через центр дверного проёма. Светофоры имеют свои собственные датчики, по которым они видят, кто и с какой целью подъезжает к регулируемому участку. Процесс управления мобильными роботами можно обеспечить как цветовыми сигналами, так и по беспроводному каналу в виде команд.

Агент «умная» койка представляет собой конечный автомат, который служит для обеспечения взаимодействия робота, пункта раздачи и пациента. Данный конечный автомат может принимать одно из состояний: «ожидание робота», «загрузка медикаментов», «медицинская процедура», «разгрузка отработанной тары».

О наличии и адресе заказов мобильных роботов узнают только в пункте раздачи, который сам принимает заказы от умных коек. Это позволяет на данном этапе развития проекта не использовать прогнозирование и оптимизацию. Задачей каждого мобильного робота является выполнение заказа, для которого надо безопасно проехать заданный маршрут. Для этого все роботы руководствуются одними и теми же алгоритмами объезда перекрёстков, а также сигналами от агентов-светофоров.

Таким образом, управление роботами осуществляется децентрализованно. Как было отмечено ранее [Прокопович 2016], децентрализованное управление группой промышленных транспортных роботов имеет преимущество перед централизованным при больших количествах роботов. Однако специфика роботов, функционирующих в больницах, накладывает дополнительные ограничения, способные повлиять на результативность метода. Для определения оптимальных параметров функционирования представленной мультиагентной системы

было проведено имитационное моделирование, результаты которого представлены ниже.

2 Имитационное моделирование мультиагентной системы управления

С целью верификации предложенной мультиагентной системы управления в системе MATLAB/Simulink была разработана её имитационная модель. На рис. 2 показана карта одного этажа потенциальной больницы, на которой должны функционировать роботы.

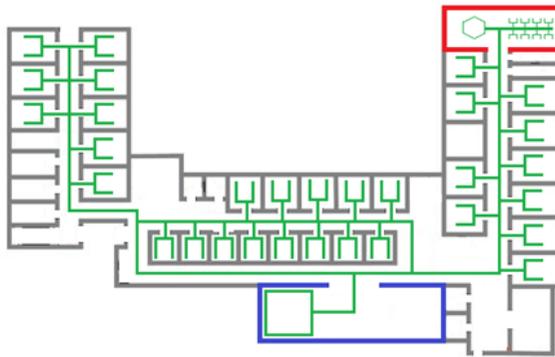


Рис. 2. Карта рабочего пространства мультиагентной системы.

Обозначения, принятые на карте на рисунке 2, представлены в табл. 1. Технологический процесс каждого из мобильных роботов заключается в следующих правилах:

1. если заряда на батареях ниже условного уровня или заказов больше нет, то двигаться на зарядную станцию;
2. двигаться к пункту раздачи;
3. после получения заказа точно двигаться намеченному маршруту;
4. после того, как маршрут завершён и капельница доставлена, двигаться к пункту раздачи и перейти в п. 1, иначе п. 5;
5. после получения пустой капельницы, отвести пустую тару в участок выгрузки использованных лекарств;
6. после выгрузки использованных лекарств, перейти в п.1.

Таблица. 1. Обозначения для рис. 1

Символ на карте	Назначение
	Движение по палате
	Движение по коридору
	Перекрёсток в маршруте движения робота
	Зарядные станции
	Участок выгрузки упаковки от использованных лекарств
	Участок загрузки медицинских препаратов
	Помещение для обслуживания роботов после завершения маршрута
	Помещение для обслуживания роботов перед началом движения по маршруту

Опираясь на представленную выше карту этажа больницы, была разработана карта для имитационного моделирования, фрагменты которой представлен на рис. 3 и 4. На данных рисунках роботы представлены схематически в виде четырёхколёсных тележек серого цвета с закруглённой передней частью. Также отмечена трасса, ведущая каждого робота от зарядной станции к участку загрузки. Там робот получает задание, при этом отметка робота на карте становится красной. После получения задания в каждый робот загружаются медицинские препараты, при этом отметка робота изменяется на красный квадрат. После выгрузки в палате медицинский препаратов отметка робота возвращается к первоначальному виду. Модель системы управления построена с использованием инструментов Stateflow charts и Robotics System Toolbox.

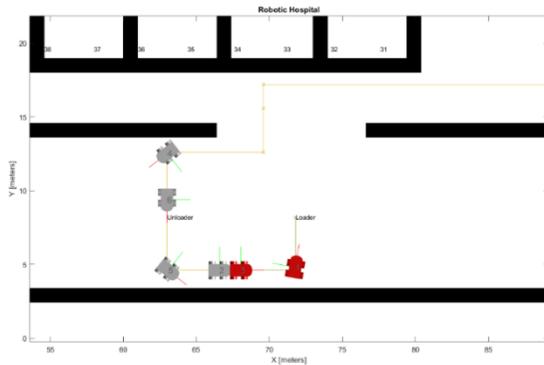


Рис. 3. Движение роботов на карте в процессе моделирования: участок загрузки

В процессе моделирования были исследованы три варианта обхода роботами пациентов в палате: случайное выбор и два варианта обхода по порядку. В результате отмечено, что влияние порядка обхода на время выполнения задания не превышает статистической погрешности.

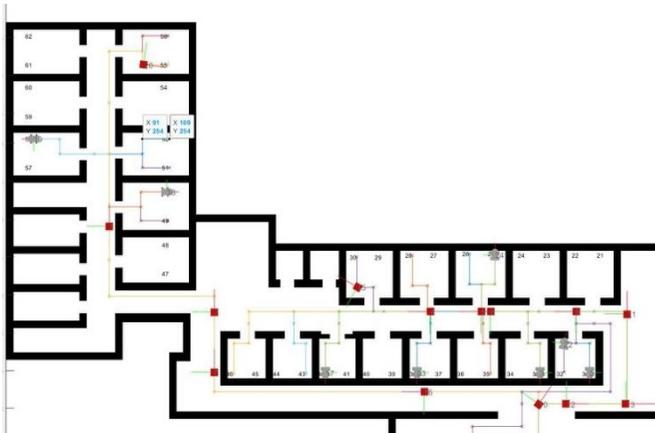


Рис. 4. Движение роботов на карте в процессе моделирования: обход палат

Полученная по результатам моделирования зависимость времени выполнения задания от числа роботов представлена на графике на рис. 5. В процессе моделирования число роботов варьировалось от 2 до 24, причём количество роботов ограничиваются размерами служебного помещения для их хранения и зарядки. По условиям моделирования роботы должны доставить инфузионные препараты шестидесяти двум пациентам.

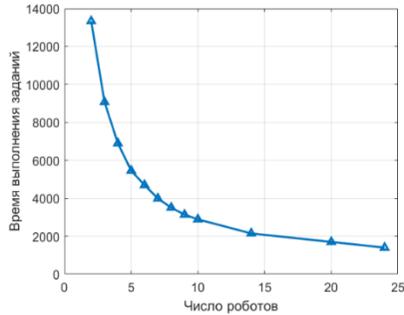


Рис. 5. Зависимость времени выполнения задания от числа роботов в группе.

Помимо времени выполнения задания, важным оценочным параметром является путь, пройденный каждым роботом в процессе выполнения задания. Зависимость пути, пройденного каждым роботом, от числа роботов, практически аналогична зависимости на рис. 5.

Тактическое управление транспортной тележкой в динамической среде подразумевает учёт и предотвращение в процессе движения ситуаций, замедляющих или делающих невозможным выполнение заданного маршрута. Ключевыми точками, для которых во избежании коллизий требуется создавать специальные правила, являются перекрёстки. Для этого было предложено два правила, которые отвечают за два уровня управления:

- зона собственной безопасности (зона ближнего действия);
- правило проезда перекрёстков (зона дальнего действия).

Формализм и принципы работы предложенного метода слежения за ближней зоной показаны на рисунке 6. Фрагмент программного кода, реализующий первое правило, показан ниже (язык программирования Matlab).

```

for i = 1:nRobots
    angle = mod(alpha(i,:),2*pi) - mod(robotPoses(3, i),2*pi);
    angle = min([angle; 2*pi - angle]);
    robotActive(i) = ~any(find(robotCollisions(i, :) & ...
        (angle > -pi/6 & angle < pi/18).*NMask(i,:)));
end

```

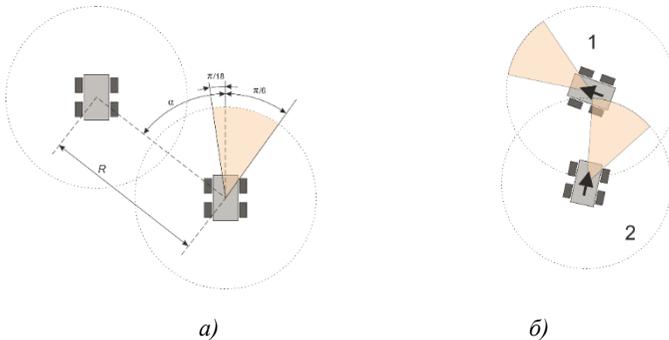


Рис. 6. Контроль за ближней зоной безопасности роботов

Таким образом, в массиве *robotActive* содержатся бинарные ключи, которые разрешают ($i = 1$) или запрещают ($i = 0$) движение каждому i -му роботу. Чтобы переменная *robotActive*(i) стала запрещающей (*robotActive* = 0) требуется одновременное выполнение двух условий (рис. 6, а):

- расстояние между роботами должно быть менее или равно R ;
- угол α должен быть больше, чем $-\pi/6$, и меньше, чем $\pi/18$; угол α откладывается от нормали i -го робота по направлению его движения до центров всех остальных роботов из группы.

В результате, первый робот (рис. 6, б) может двигаться по направлению своего движения, а второму запрещается. Фрагмент программного кода, реализующий второе правило, показан ниже. Указанное правило регламентирует последовательность проезда перекрёстка, когда к нему подъезжают с двух сторон роботы под углом 90 градусов.

```

for i = 1:nRobots
    [~, num] = min(robotCrossPointsDistance(:,i));
    r1 = (robotCrossPointsDistance(:,i) > 2.4*thresh)';
    r2 = PMask(:,num)';
    angle = abs(mod(crossPointsAlpha(:,i),2*pi) -
mod(robotPoses(3,:) ',2*pi));
    r3 = (abs(pi - min(angle, 2*pi - angle)) < 0.4)';
    r4 = (robotCrossPointsDistance(:,i) > 0.2*thresh)';
    robotActive = double(robotActive & (r1 | r2 | (r3 & r4)));
end

```

Логические переменные $r1$ и $r2$ отвечают за то, чтобы разрешение на движение получил только один робот, который находится ближе всего к i -му перекрёстку. Логические переменные $r3$ и $r4$, отвечают за то, чтобы после завершения поворота на данный робот не действовали переменные $r1$ и $r2$. Т.е. после поворота данный робот в какой-то момент окажется дальше от перекрёстка чем тот, который его пропускал.

3 Обсуждение результатов

Предлагаемая мультиагентная система позволяет решить транспортную задачу в условиях неподготовленной среды. Это стало возможным благодаря децентрализации управления и введению дополнительных агентов для регулирования проезда перекрёстков.

Однако перечисленные особенности наложили на систему ограничения, которые заключаются в образовании временных очередей (дорожных “пробок”) перед въездами в палаты при большом числе одновременно функционирующих роботов. Это связано с тем, что роботы ездят по дорогам с односторонним движением без права даже временного выезда на встречную полосу. В связи с этим, в следующих работах будет предпринята попытка уменьшить время простоя роботов в так называемых “пробках”.

Имитационное моделирование позволило не только доказать работоспособность предложенной системы управления, но и оптимизировать количество роботов и ключевые настройки самой системы управления. А именно, были уточнены время загрузки и разгрузки робота, максимальная и минимальная разрешённые скорости движения, порядок обхода пациентов, а также максимально и минимально возможные радиусы безопасности, используемые в алгоритмах обхода перекрёстков.

Список литературы

- [**Vis 2006**] Vis I.F.A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems // *European J. of Op. Research* – 2006.– No170. – P. 677-709.
- [**Pedan 2017**] Pedan M., Gregor M., Plinta D. Implementation of automated guided vehicle system in healthcare facility // *Proc. eng.*– 2017.– No192.– P. 665-670.
- [**Ageron 2019**] Ageron B., Benzidia S., Bentahar S., et al. Investigating automation and AGV in healthcare logistics: a case study based approach // *Int. J. of logistics research and applications.* – 2019. – No3(22). – P. 1-21.
- [**Fazlollahtabar 2013**] Fazlollahtabar H., Saidi-Mehrabad M. Methodologies to Optimize Automated Guided Vehicle Scheduling and Routing Problems: A Review // *Journal of Intelligent & Robotic Systems.* – 2013. – No77. – P. 525-545.
- [**Wu 1999**] Wu K-H., Chen C-H., Ko J-M., et al. Path planning and prototype design of an AGV // *Mathematical and computer modelling.* – 1999. – No30. – P. 147-167.
- [**Прокопович 2016**] Прокопович Г. А. Особенности масштабирования многоагентных систем на примере централизованного и децентрализованного алгоритмов управления группой малогабаритных мобильных роботов // *Информационно-измерительные и управляющие системы.* – 2016. – Том 14, №11. – С. 41-48.