

УДК 658.7

Е. П. Михайлов, канд. техн. наук,
Б. С. Ременюк

РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ СКЛАДЕ

***Аннотация.** Рассмотрено решение проблемы уменьшения транспортных затрат и площади склада путем выбора и размещения оборудования склада, а также сокращением пути перемещения транспортного мобильного робота. Показано, что при этом необходимо учитывать тип мобильного робота, их количество, а также погрешность траектории перемещения.*

***Ключевые слова:** автоматизированный склад, транспортный робот, автоматизированный погрузчик, навигационные системы, одометрия, оптимизация распределения, маршрутослажение, оптический датчик, ультразвуковой датчик, дифференциальный привод, трицикл*

E. Mikhailov, PhD.,
B. Remeniuk

IMPLEMENTATION OF MOVEMENT OF THE MOBILE ROBOT IN THE AUTOMATED WAREHOUSE

***Abstract.** Presented a solution of the problem of reducing transport costs and storage space by optimizing the placement and selection of warehouse equipment, as well as reduced vehicle travel path of the mobile robot. It is shown that it is necessary to consider the type of mobile robot, their number, and the error of the path. Considered selection of the optimum location of the warehouse on the example of the distribution of products to the gravitational stock. It is shown that in determining the optimal starting position of the vehicle in addition to the method of conditional robot's center of gravity to take account of accommodation options with a variety of cargo flows of goods in the warehouse need to use a heuristic method and iterate. It is also necessary to take into account the positioning accuracy of the selected transport robot navigation system.*

***Keywords:** automated warehouse, transport robot, automatic loader, navigation systems, odometry, optimization of distribution, optical sensor, ultrasonic sensor, differential drive, tricycle*

Є. П. Михайлов, канд. техн. наук,
Б. С. Ременюк

РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА У АВТОМАТИЗОВАНОМУ СКЛАДІ

***Анотація.** Розглянуто рішення проблеми зменшення транспортних витрат і площі складу шляхом вибору і розміщення обладнання складу, а також скороченням шляху переміщення транспортного мобільного робота. Показано, що при цьому необхідно враховувати тип мобільного робота, їх кількість, а також похибку траєкторії переміщення.*

***Ключові слова:** автоматизований склад, транспортний робот, автоматизований навантажувач, навігаційні системи, оптимізація розподілу, маршрутослідкування, оптичний датчик, ультразвуковий датчик, диференціальний привод, трицикл*

Введение. В настоящее время для перемещения продукции на складах находят широкое применения транспортные мобильные роботы, а в случае, когда груз установлен на паллетах, автоматизированные вилочные погрузчики.

Уменьшение транспортных затрат при использовании транспортных мобильных роботов можно осуществить путем сокращения траектории их перемещения при развороте и установке груза, а также за счет размещения груза на складе с учетом грузопотоков.

© Михайлов Е.П., Ременюк Б.С., 2016

При этом необходимо рассматривать вопросы размещения продукции на складе, выбора траекторий перемещения, в зависимости от количества и типа транспортных роботов, а также ошибки позиционирования.

На складах, где размещается готовая продукция, с последующей погрузкой на транспортные средства для отправки потребителю могут предъявляться разные требования к мобильным роботам, осуществляющих установку и съем груза со стеллажей.

Использование гравитационных складов позволяет разделить маршруты транспорт-

ных средства для установки и съема груз, что позволяет использовать при этом различные мобильные роботы.

Выбор размещения продукции на складе с целью уменьшения пути перемещения транспортных роботов можно решить путем использования метода условного центра масс [1].

Выбор траектории перемещения транспортного робота по складу зависит от количества роботов, типа и размеров робота, а также от выбранных средств навигации, которые определяют стоимость оборудования и сложность алгоритма обработки данных, используемого для позиционирования робота [2].

В данной работе рассматривается задача сокращения пути перемещения транспортных мобильных роботов и уменьшения используемой площади склада путем учета их габаритов и траекторий перемещения, а также распределения груза на примере гравитационного склада.

Цель работы – выбор перемещения транспортных мобильных роботов в автоматизированном складе, позволяющего уменьшить траекторию перемещения на примере гравитационного склада.

Рассматриваются вопросы минимизация пути перемещения транспортных роботов, площади, занимаемой складом, а также стоимости систем навигации.

Материалы исследования. Пример структуры автоматизированного гравитационного склада приведен на рис. 1.

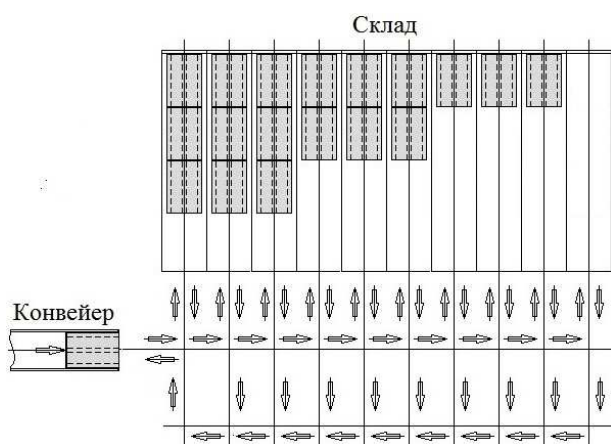


Рис. 1. Структура распределения оборудования на складе

Конвейер обеспечивает поступление на склад несколько видов продукции, установленных на паллетах, с разной величиной грузопотока G_j . Автоматизированные погрузчики с помощью системы идентификации, например, путем распознавания штрих-кода, и устанавливают эту продукцию на соответствующие ячейки гравитационного склада.

При выборе траектории перемещения погрузчика необходимо учитывать оптимальное использование площади склада.

В нашем случае используется несколько погрузчиков, поэтому траектория перемещения при установке груза на стеллаж представляет собой прямую линию, проходящую вдоль стеллажа максимально близко к нему. Возвращение погрузчиков к конвейеру осуществляется по параллельной линии.

Расстояние между траекториями прямого и обратного перемещения, а также между траекториями перемещения и стеллажами определяется габаритными размерами погрузчиков и площадями, необходимыми для осуществления их поворота.

Для упрощения алгоритма управления движением ограничимся двумя видами перемещения – движением по прямой линии и разворотом на месте.

Такой подход позволит обеспечить максимально возможную точность позиционирования тележки робота при использовании метода одометрии, поскольку на движение по дуге окружности влияет большее число факторов, приводящих к увеличению погрешности перемещения [2].

На рис. 2 показаны два наиболее распространенных типа автоматизированных вилочных погрузчиков, погрузчика с дифференциальным приводом и погрузчика с кинематикой трехколесного велосипеда с приводным рулевым колесом (трицикла).

Отсюда следует, что для определения расстояния между траекториями прямого и обратного перемещения, а также между траекториями перемещения и стеллажами необходимо учитывать габаритные радиусы разворота передней и задней части погрузчика R_{11} , R_{21} и R_{12} , R_{22} , а также ширину погрузчика B_1 , B_2 .

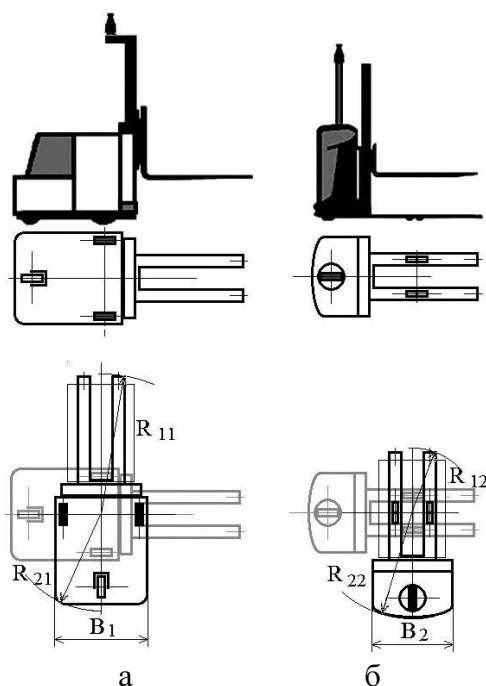


Рис. 2. Виды транспортных роботов – с дифференциальным приводом (а) и трицикл (б)

Использование трицикла, который имеет меньшие размеры, позволяет уменьшить площадь, необходимую для разворота (рис. 3) и, соответственно, размеры используемого складского помещения.

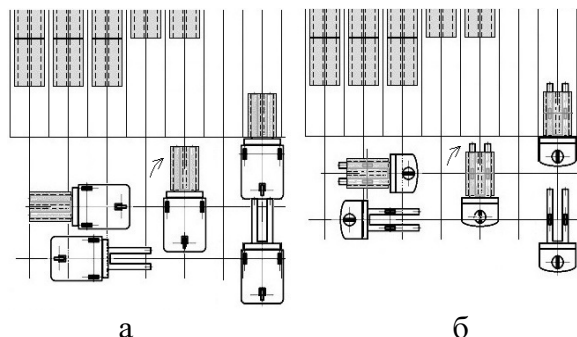


Рис. 3. Площадь, занимаемая для проезда роботом с дифференциальным приводом (а) и трициклом (б)

Задача оптимизации размещения продукции на складе сводится к определению положения исходной точки погрузчика, которая обеспечивает минимальный суммарный путь перемещения погрузчика с учетом величины грузопотока G_i для каждого вида продукции.

В данном случае исходная точка находится в начале пути перемещения роботов, поэтому груз должен располагаться максимально близко к первой позиции. При этом

величина грузопотока для каждого вида продукции в ячейках стеллажа должна уменьшаться, начиная с первой позиции [1].

Требуемое количество транспортных роботов можно определить, исходя из суммарного грузопотока и времени, необходимого на перемещение всего груза одним роботом.

Если величина грузопотока G_i определяет число паллет, перевозимых за нормативное время $t_{ном}$ для каждого вида продукции i , то суммарный пробег L_S с учетом пути перемещения в каждую позицию стеллажа L_{X-X_i} , куда помещается груз i , определится следующим образом.

$$L_S = \sum_{i=1}^n G_i \cdot L_{X-X_i} \cdot 2. \quad (1)$$

Время T_S , необходимое для перемещения всего груза одним роботом, который перемещается с номинальной скоростью на расстояние суммарного пробега L_S , равно

$$(2)$$

Общее время T_o , необходимое для перемещения суммарного грузопотока одним роботом с учетом дополнительного времени $t_{доп}$, которое требуется для установки груза и перемещения с одной траектории на другую, составит

$$T_o = T_S + t_{доп} \cdot \sum_{i=1}^n G_i. \quad (3)$$

Тогда минимальное число транспортных роботов N_p , необходимых для перемещения всего груза составит

$$(4)$$

Здесь необходимо еще учесть возможные остановки для предотвращения столкновения роботов.

Для определения дополнительного времени, которое требуется для установки груза и перемещения с одной траектории на другую, необходимо определить время, необходимое для этих операций, исходя из пути, которое проходит робот, а также с учетом времени на подъем и опускание вилочного захвата.

Как уже было отмечено, при перемещении робота предлагается использовать толь-

ко линейное перемещение и разворот на месте. При расчете для трицикла необходимо учитывать путь, который проходит приводное рулевое колесо [3 – 5]. При линейном перемещении этот путь соответствует пути, который проходит робот.

При повороте на угол $\Delta\theta$ (в радианах) путь $l_{\Delta\theta}$, проходимый приводным рулевым колесом, определяется радиусом поворота R , который в данном случае равен расстоянию между осями опорных колес и приводного рулевого колеса L , (рис. 4) и составляет

$$l_{\Delta\theta} = L \cdot \Delta\theta. \quad (5)$$

При повороте на 90° путь, проходимый приводным рулевым колесом будет равен

$$l = L \cdot \pi/2. \quad (6)$$

Маршрут перемещения транспортного робота можно разделить на длинные участки перемещения (перемещение от места съема груза до точки, где нужно осуществить установку груза, и обратное перемещение к месту загрузки) и короткие участки перемещения (перемещения при установке груза на стеллаж и перемещение между траекториями прямого и обратного перемещения).

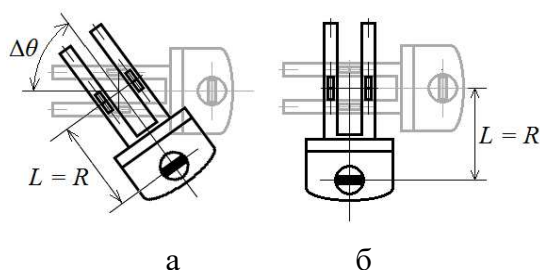


Рис. 4. Поворот трицикла на месте на угол $\Delta\theta$ (а) и на 90° (б)

На коротких участках перемещения, как было указано выше, для позиционного управления можно использовать методы одометрии [6]. При этом перемещение колеса определяется с помощью датчиков, определяющих угол поворота колеса в процессе перемещения. Чаще всего для этого используются импульсные датчики с оптическим или индуктивным считывающим устройством, которые выдают определенное количество импульсов за один оборот. Упрощенный принцип действия такого датчика показан на рис. 5.

Для программирования перемещения в системе управления движением робота необходимый путь задается числом импульсов, получаемых с датчика.



Рис. 5. Упрощенный принцип действия одометрического датчика

Зависимость между расстоянием l , которое проходит колесо с диаметром d , и числом импульсов датчика n_l для случая, когда на один оборот колеса он выдает n_d импульсов, определяется зависимостью.

$$n_l = l \cdot \frac{n_d}{\pi \cdot d}. \quad (7)$$

Недостатком одометрических методов является накопление ошибки позиционирования при выполнении последовательности перемещений, поэтому для перемещения на длинные дистанции желательно использовать методы навигации с внешними указателями. Чаще всего для решения таких задач используются методы локальной навигации на основе маршрутослежения с индуктивными или оптическими датчиками, а также системы навигации на основе лазерных дальномеров и лазерных сканирующих датчиков [5 – 11]. Лазерные датчики обеспечивают высокую точность позиционирования, однако используют сложный алгоритм обработки данных и отличаются высокой стоимостью.

Наиболее простыми для решения задач маршрутослежения являются системы на основе оптических датчиков, обеспечивающих перемещение вдоль указателя перемещения в виде контрастной полосы на полу. В данном случае перемещение осуществляется по прямой линии, поэтому могут быть использованы простейшие датчики определения уровня освещенности, отличающиеся сравнительно низкой стоимостью.

Один из вариантов маршрутослежения с такими датчиками показан на рис. 6.

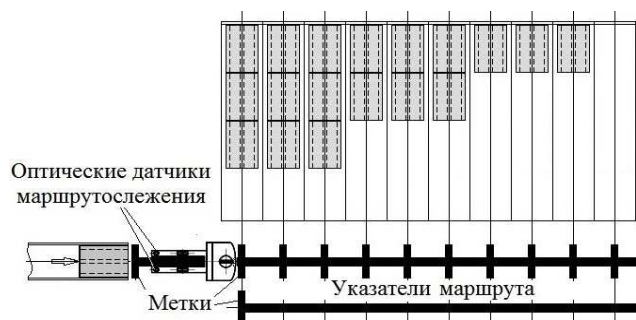


Рис. 6. Использование оптических датчиков маршрутослежения для позиционирования мобильного робота

Используются два оптических датчика, расположенные по обе стороны указателя перемещения (например, темный указатель на светлом фоне). Датчик срабатывает при переходе на темный фон.

При этом перемещение осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Если не сработали оба датчика, осуществляется движение по прямой линии.

2. Если сработал левый датчик, осуществляется поворот направо.

3. Если сработал правый датчик, осуществляется поворот налево.

4. Если сработали оба датчика, робот находится на метке, которая определяет последующее действие (например, вычисление номера метки, по которому определяется позиция ячейки стеллажа для установки груза, или при возвращении – конец маршрута).

Аналогичное решение может быть использовано и для перемещения грузов со склада на внешние транспортные средства (рис. 7).

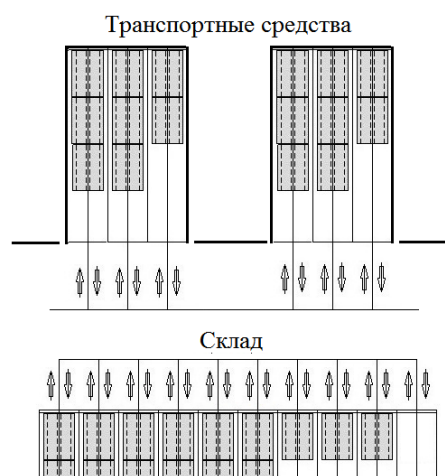


Рис. 7. Перемещения грузов со склада на внешние транспортные средства

Выводы. Рассмотрены вопросы уменьшения транспортных расходов при использовании транспортных мобильных роботов для автоматизации склада на основе сокращения траектории перемещения мобильных роботов путем выбора соответствующих габаритов и пути перемещения при развороте и установке груза, а также размещения груза с учетом грузопотока, что позволяет уменьшить площадь склада и время перемещения роботов.

Предлагается использовать простейшие методы навигации мобильного робота, что позволяет сократить стоимость используемого оборудования.

Список использованной литературы

1. Михайлов Е. П. Оптимизация размещения складской транспортной системы / Е. П. Михайлов, Б. С. Ременюк // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2015. – № 18(94). – С. 60 – 64.
2. Михайлов Е. П. Позиционное управление тележками мобильных роботов / Е. П. Михайлов // *Подъемно-транспортная техника*. – 2015. – № 2(46). – С. 52 – 57.
3. Мартыненко Ю. Г. Управление движением мобильных колёсных роботов. / Ю. Г. Мартыненко // *Фундаментальная и прикладная математика*, – 2005. – Том 11. – № 8. – С. 29 – 80.
4. Антонов А. Описание движения мобильного робота // *Робототехника*. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://robotosha.ru/robotics/robot-motion.html> (дата доступа 23.06. 2014).
5. *Mobile Robots – Current Trends*, Edited by Zoran Gacovski p. cm. ISBN 978-953-307-716-1, Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, First published September, 2011, p. 414, Printed in Croatia, A free online edition of this book is Available at: www.intechopen.com.
6. Chong K.S., and Kleeman L., (1996), *Accurate Odometry and Error Modelling for a Mobile Robot*, MECSE-1996-6.
7. McGillem C.D., and Rappaport T.S., (1989), *A Beacon Navigation Method for Autonomous Vehicles*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 38, No. 3, pp. 132 – 139.

8. Skewis T., and Lumelsky V., (1994), Experiments with a Mobile Robot Operating in a Cluttered Unknown Environment, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 11, No. 4, pp. 281 – 300.

9. Hanebeck U.D., and Schmidt G., (1996), Set Theoretic Localization of Fast Mobile Robots Using an Angle Measurement Technique. In: *Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 1387 – 1394.

10. Gyula Mester G., and Aleksandar Rodić A., (2010), Sensor-Based Intelligent Mobile Robot Navigation in Unknown Environments, *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, Vol. 1, No. 2, pp. 1 – 8.

11. Borenstein J., Everet H.R., Feng L., and Wehe D., (1999), Mobile Robot Positioning - Sensors and Techniques, *Invited paper for the Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots*, Vol. 14, No. 4, pp. 231 – 249.

Получено 30.05.2016

References

1. Mihaylov E.P., and Remenyuk B.S. Optimizatsiya razmescheniya sklads koy transportnoy sistemyi [Optimize the Placement Warehouse Transport System], (2015), *Elektrotehnicheskie i Kompyuternyye Sistemyi*, Vol. 94, No. 18, pp. 60 – 64 [In Russian].

2. Mihaylov E.P. Pozitsionnoe upravlenie telezhkami mobilnykh robotov [Positional Control of Mobile Robots], (2015), *Podemno-Transportnaya Tehnika*, Vol. 46, No. 2, pp. 52 – 57 [In Russian].

3. Martynenko Yu.G., Upravlenie dvizheniem mobil'nykh koljosnykh robotov [Motion Control of Mobile wheeled Robots], (2005), *Fundamentalnaya i Prikladnaya Matematika*, Vol. 11, No. 8, pp. 29 – 80 [In Russian].

4. Antonov A. Opisanie dvizheniya mobilnogo robota. [Description of the Motion of the Mobile Robot], (2014) [In Russian], *Robototekhnika*. [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa : <http://robotosha.ru/robotics/robot-motion.html> (data dostupa 23.06. 2014).

5. Mobile Robots – Current Trends, Edited by Zoran Gacovski p. cm. ISBN 978-953-307-716-1 *Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, First published September,*

2011, p. 414, Printed in Croatia, A free online edition of this book is available at www.intechopen.com.

6. Chong K.S., and Kleeman L., (1996), Accurate Odometry and Error Modelling for a Mobile Robot, MECSE-1996-6.

7. McGillem C.D., and Rappaport T.S., (1989), A Beacon Navigation Method for Autonomous Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 38, No. 3, pp. 132 – 139.

8. Skewis T., and Lumelsky V., (1994), Experiments with a Mobile Robot Operating in a Cluttered Unknown Environment, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 11, No. 4, pp. 281 – 300.

9. Hanebeck, U.D., and Schmidt G., (1996), Set Theoretic Localization of Fast Mobile Robots Using an Angle Measurement Technique. In: *Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 1387 – 1394.

10. Gyula Mester G., and Aleksandar Rodić A., (2010), Sensor-Based Intelligent Mobile Robot Navigation in Unknown Environments. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, Vol. 1, No. 2, pp. 1 – 8.

11. Borenstein J., Everet H.R., Feng L., and Wehe D., (1999), Mobile Robot Positioning - Sensors and Techniques, *Invited paper for the Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots*. Vol. 14, No. 4, pp. 231 – 249.



Михайлов

Евгений Павлович,
канд. техн. наук, доц.
каф. Подъемно-
транспортного и робото-
технического оборудова-
ния Одесского нац. поли-
техн. ун-та.
E-mail: epmix@mail.ru



Ременюк

Богдан Сергеевич,
студент кафедры Подъ-
емно-транспортного и
робототехнического обо-
рудования
Одесского нац. политехн.
ун-та.
E-mail: r.b.s@i.ua