

УДК 621.865.8

**Е. П. Михайлов**, канд. техн. наук,  
**И. К. Короткий, В. С. Онуфриенко**

### ПОЗИЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

***Аннотация.** Рассмотрены возможности позиционного управления мобильного робота-манипулятора. Представлены алгоритм управления и методика расчета параметров перемещения при позиционном управлении роботом-манипулятором с совмещенным механизмом подъема и захвата, а также тележкой робота с использованием систем навигации.*

***Ключевые слова:** мобильный робот, манипулятор, алгоритм управления, позиционное управление, система навигации, оптический датчик, ультразвуковой датчик, регулируемый привод*

**E. P. Mihajlov**, PhD.,  
**I. K. Korotkij, V. S. Onufrienko**

### POSITIONAL CONTROL OF MOBILE ROBOTS

***Abstract.** There are shown possibilities of position control of mobile robot manipulator. Presented a control algorithm and method of calculating the displacement parameters in positional control of the robot manipulator with a combined lifting mechanism and trapping and robocar using navigation systems.*

***Keywords:** mobile robot, manipulator, control algorithm, positional control, navigation system, optical sensor, ultrasonic sensor, steering actuator*

**Є. П. Михайлов**, канд. техн. наук,  
**І. К. Короткий, В. С. Онуфрієнко**

### ПОЗИЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

***Анотація.** Розглянуті можливості позиційного управління мобільного робота-маніпулятора. Наведені алгоритм управління та методика розрахунку параметрів переміщення при позиційному управлінні роботом-маніпулятором з поєднаним механізмом підйому і захоплення, а також візком робота з використанням систем навігації.*

***Ключові слова:** мобільний робот, маніпулятор, алгоритм управління, позиційне керування, система навігації, оптичний датчик, ультразвуковий датчик, регульований привод*

**Введение.** В настоящее время значительно ускорилось развитие робототехники. При этом одним из наиболее приоритетных направлений является использование автономных мобильных роботов (АМР), что дает возможность значительно упростить переналадку гибких производственных систем, одним из основных элементов которых являются транспортные системы. В этом случае переналадка транспортной системы сводится к перепрограммированию мобильных транспортных роботов и изменению маршрутов их перемещения [11]. Особый интерес представляют мобильные роботы-манипуляторы, способные осуществлять перемещение различных грузов.

Основной задачей при этом является позиционирование рабочего органа, которое решается с помощью датчиков положения и регулируемых приводов.

© Михайлов Е.П., Короткий И.К.,  
Онуфриенко В.С., 2014

В процессе позиционирования с помощью системы управления мобильного робота-манипулятора решаются две задачи: управление перемещением манипулятора и управление перемещением тележки робота.

В составе АМР могут использоваться различные манипуляторы, например, многозвенный манипулятор или манипулятор-трипод [1]. Такие манипуляторы обеспечивают перемещение рабочего органа в трехмерном пространстве, что требует использования нескольких приводов и реализации совместного их управления для позиционирования в пространстве.

В то же время перемещение рабочего органа на горизонтальной плоскости может обеспечиваться за счет перемещения тележки. Манипулятор в этом случае может обеспечить перемещение только по одной вертикальной оси и ориентацию рабочего органа. Если ориентация рабочего органа не меняется, как в случае вилочного захватного устройства, то достаточно обеспечить пере-

мещение только одной оси, что значительно упрощает структуру механических узлов и системы управления АМР. При использовании зажимного захватного устройства может использоваться совмещенный механизм подъема и захватного устройства [12].

Для перемещения АМР могут использоваться различные типы колесных и гусеничных тележек. Для позиционного управления перемещением тележек необходимо описать траекторию перемещения, как это сделано в [7,8], однако из-за скольжения точность позиционирования будет низкой, а ошибка будет накапливаться в процессе перемещения. Поэтому для определения места положения и ориентации тележки АМР применяются различные методы навигации [10], начиная от простейших способов маршрутослежения на основе индуктивных и оптических датчиков, заканчивая системами навигации с использованием ориентации по маякам на основе радио и инфракрасных каналов. Используются также средства GPS-навигации. Для локализации положения мобильных роботов также могут использоваться алгоритмы на основе фильтров Калмана [11]. При использовании АМР в составе гибких производственных систем основным требованием является уменьшение времени и стоимости переналадки оборудования, а одним из путей решения этого требования является упрощение структуры механических узлов и алгоритма управления АМР.

**Цель работы** – провести анализ позиционного управления манипулятора с вилочным и зажимным захватным устройством, а также тележки автономных мобильных роботов-манипуляторов с целью упрощения структуры механических узлов и алгоритма управления АМР.

**Материалы исследования.** Рассмотрены вопросы позиционирования рабочего органа автономного мобильного робота-манипулятора, а именно:

- позиционное управление манипулятором;
- позиционное управление тележкой робота с использованием средств локальной навигации.

При этом рассматриваются два варианта АМР, которые могут использоваться для перемещения объектов в гибких производ-

ственных системах, а именно, АМР с вилочным и зажимным захватом без изменения ориентации.

Для упрощения структуры механических узлов предлагается использовать манипулятор на основе пантографа [6]. Это дает возможность осуществлять перемещение манипулятора с одним звеном по вертикали, используя один привод (рис. 1).

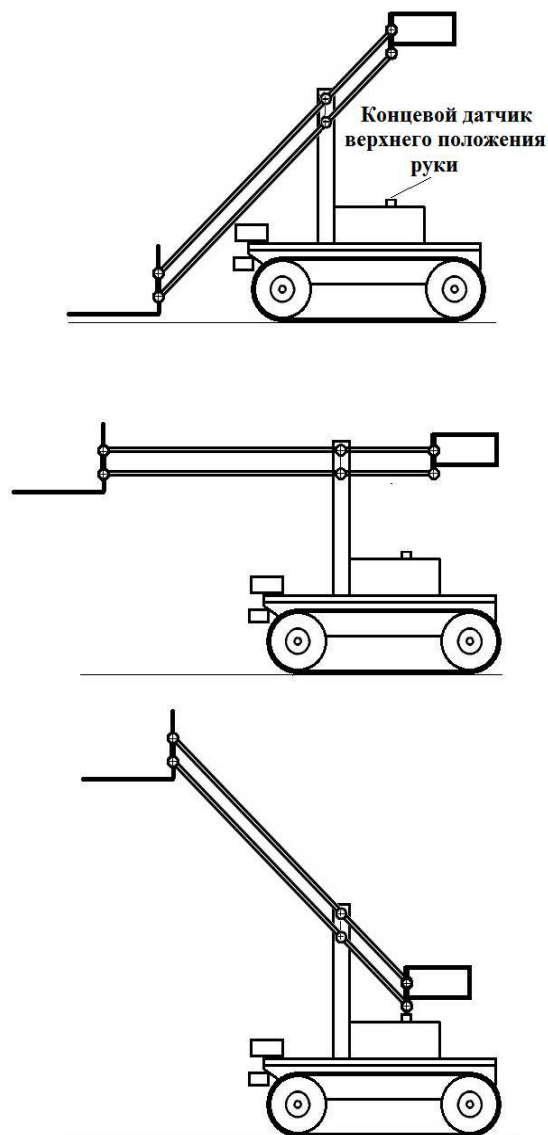
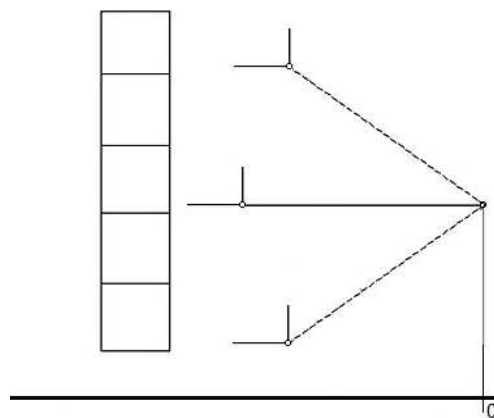
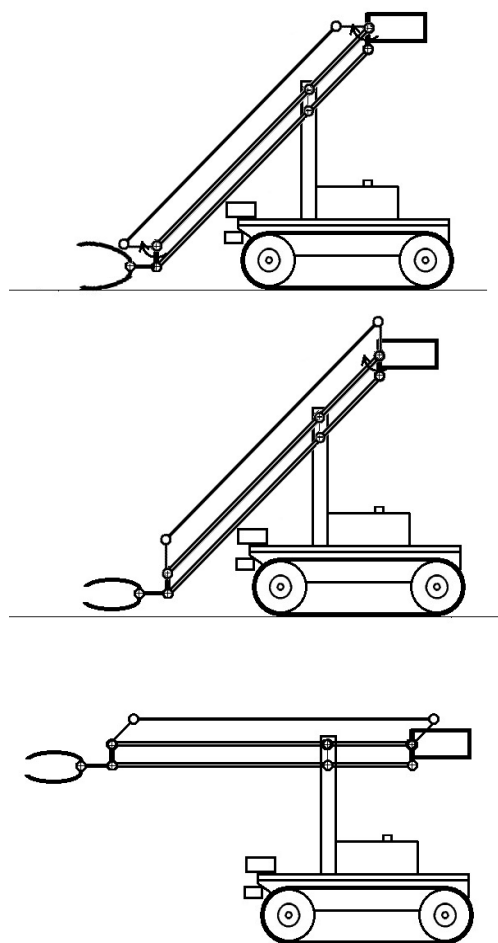
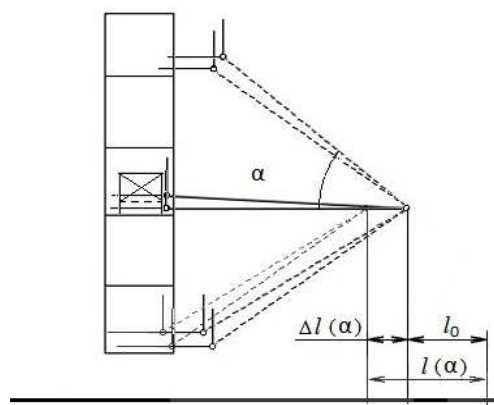


Рис. 1. Автономный мобильный робот с манипулятором на основе пантографа и вилочным захватом

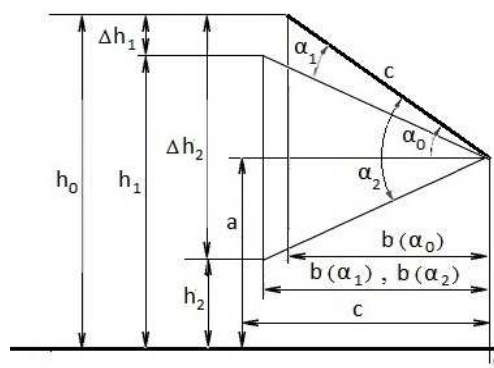
Аналогичное решение может быть использовано и для манипулятора с зажимным захватом (упрощенное представление такого манипулятора приведено на рис. 2), при этом один привод может обеспечить как подъем руки, так и работу захватного устройства.



а



б



в

Рис. 2. Автономный мобильный робот с манипулятором на основе пантографа и зажимным захватом

Для решения задачи позиционного управления в данном случае необходимо определить зависимость перемещения руки от параметров системы позиционирования.

Одним из наиболее часто используемых параметров в данном случае является угол поворота оси привода, осуществляющего подъем руки. При этом для снятия или установки объекта необходимо определить зависимость перемещения захватного устройства, как по вертикали, так и по горизонтали. Для зажимного захватного устройства необходимо учитывать угол поворота оси привода, который обеспечивает изменения состояния захватного устройства (открытое или закрытое).

На рис. 3 показано, как связаны между собой параметры автономного мобильного робота-манипулятора с вилочным захватным устройством при установке груза на стеллаж.

Рис. 3. Параметры автономного мобильного робота-манипулятора, точка позиционирования тележки (а), перемещение тележки для разных уровней подъема (б), перемещение рабочего органа при подъеме руки (в)

На рис. 3, а показана точка позиционирования тележки, на рис 3, б – перемещение тележки для разных уровней подъема, на рис 3, в показано, как изменяется перемещение рабочего органа по вертикали и горизонтали при подъеме руки.

Поскольку положение рабочего органа определяется углом поворота руки, то для позиционного управления необходимо знать влияние этого угла на перемещение по горизонтали и вертикали.

В рассматриваемом случае расчет необходимых перемещений сводится к тригонометрическим зависимостям.

При измерении угла поворота с помощью фотоимпульсного датчика необходимо задавать начало отсчета. Здесь предлагается определить его как максимальное верхнее положение руки манипулятора. Сброс начала отсчета для датчика угла поворота может осуществляться с помощью концевого датчика верхнего положения руки (рис. 1, а).

Рассмотрим зависимости высоты подъема рабочего органа  $h$  и перемещения тележки  $l$  от угла поворота руки  $\alpha$  (рис. 3, б, в).

Высота подъема рабочего органа  $h$  в зависимости от угла поворота  $\alpha$  определяется следующей зависимостью:

$$h(\alpha) = a + c \sin(\alpha_0 - \alpha), \quad (1)$$

где  $a$  – высота оси поворота руки;  $\alpha_0$  – угол поворота для верхнего положения руки относительно горизонтального положения,  $c$  – длина руки.

Отсюда получаем, что для установки рабочего органа на высоте  $h$  руку необходимо опустить на угол

$$\alpha = \alpha_0 - \sin^{-1}\left(\frac{h - a}{c}\right). \quad (2)$$

Изменение пути перемещения  $\Delta l$  при

опускании руки на угол  $\alpha$  определяется зависимостью

$$\Delta l(\alpha) = c - c \cos(\alpha_0 - \alpha). \quad (3)$$

Приведенные зависимости позволяют определить параметры для перемещения тележки в зависимости от угла поворота руки и таким образом осуществить позиционное управление при вертикальном перемещении рабочего органа.

При этом точность позиционирования при перемещении руки по вертикали определяется точностью позиционирования углового перемещения оси привода с учетом передаточного отношения редуктора и соотношением (1). На суммарную точность позиционирования при перемещении руки по вертикали также будет влиять изменение наклона тележки под воздействием груза.

При перемещении на плоскости предлагается использовать методы локальной навигации, например на основе оптических датчиков.

Один из вариантов такой навигации показан на рис. 4. При этом реализуется следующий алгоритм перемещения. Тележка перемещается в рабочей зоне перпендикулярно указателям маршрута. При достижении заданного указателя, например подсчетом числа пересечений, тележка разворачивается на соответствующий указатель и перемещается по нему до достижения метки позиционирования. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 5.

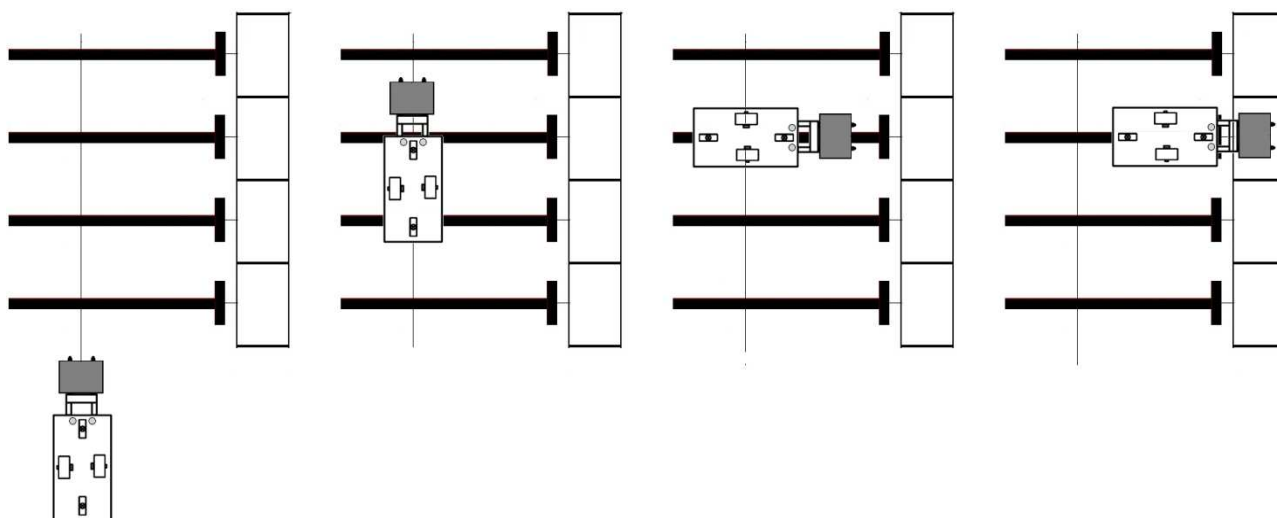


Рис. 4. Позиционирование тележки на основе оптических датчиков



Рис. 5. Блок-схема алгоритма перемещения АМР

В данном примере показано перемещение с двумя оптическими датчиками, при котором коррекция траектории осуществляется при попадании одного датчика на указатель. Срабатывание обоих датчиков фиксирует наезд на метку остановки. После этого осуществляется перемещение тележки и руки для установки или снятия груза.

Точность позиционирования в этом случае определяется точностью, которую обеспечивает система навигации. В рассмотренном примере перемещение при подходе к месту погрузки или разгрузки осуществляется по прямой линии и определяется отклонением чувствительной зоны оптических датчиков от указателя из-за отличия ширины указателя от расстояния между датчиками, что может привести к отклонению маршрута перемещения от заданного направления. Для складских роботов эта погрешность может быть учтена за счет соответствующего увеличения ширины ячейки, куда устанавливается груз. Для АМР с зажимным захватом необходимо учесть возможное смещение груза при захвате и установке.

Массогабаритные характеристики АМР определяются весом и размерами перемещаемого груза.

**Выводы.** Рассмотренный подход к реализации автономных мобильных роботоманипуляторов позволяет значительно упростить структуру самого робота и алгоритма его управления. Это дает возможность создать сравнительно простые транспортные роботы для работы в составе гибких производственных систем, а также значительно упростить алгоритм управления, что особенно важно при переналадке производственных комплексов.

#### Список использованной литературы

1. Белиовская Л. Г. Программируем микроконтроллер NXT в LabVIEW / Л. Г. Белиовская., А. Е. Белиовский. – М. : ДМК Пресс; 2010. – 280 с.: ил. + DVD. – ISBN 978-5-94075-594-5
2. Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования / [В. М. Герасун и др.] – М. : Институт прикладной математики им. М. В.Келдыша, 2012. № 44. 24 с. : ил., табл. – (Препринт / ИПМ им. М. В. Келдыша ; 2012-44). – Библиогр.: с. 22 (5 назв.)
3. Мартыненко Ю. Г. Управление движением мобильных колёсных роботов. / Мартыненко Ю. Г. // *Фундаментальная и прикладная математика*, – 2005. – Том 11. – № 8. – С. 29 – 80.

4. Мельник А. А. Мобильные роботы компании «k-team» для решения специфических технических задач / А. А. Мельник, В. Ф. Борисенко, В. Н. Хоменко, П. С. Плис // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 4 (63). – Ч. 3. – С. 36 – 39

5. Borenstein J., Everett H.R., Feng L., and Wehe D. Mobile Robot Positioning, (1997), *Sensors and Techniques Invited Paper for the Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots*, Vol. 14, No. 4, pp. 231 – 249.

6. Liang, C., Ceccarelli M., and Takeda Yu., Operation Analysis of a One-DOF Pantograph Leg Mechanisms. *Proceedings of the RAAD 2008, 17th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*. September 15-17, 2008, Ancona, Italy.

7. Mandow A., Mart'ínez J. L., Morales J., Blanco J.-L., Garc'ıa-Cerezo A., and Gonzalez J. Experimental Kinematics for Wheeled Skid-steer Mobile robots, (2007) *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, pp. 1222 – 1227.

8. Martinez J., Mandow A., Morales J., Pedraza S. & Garcia-Cerezo, A. Approximating Kinematics for Tracked Mobile Robots, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 10, October 2005, pp. 867 – 878.

9. 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*

10. Siegwart R., and Nourbakhsh I. Introduction to Autonomous Mobile Robots (Intelligent Robotics and Autonomous Agents) A Bradford Book. Includes Bibliographical References and Index, (2004). – ISBN 0-262-19502-X

11. Suliman C., Cruceanu C., and Moldoveanu F. Mobile Robot Position Estimation Using the Kalman Filter. *Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures*, Vol. 6 (XXIII), 2009 pp. 75 – 78. ISSN 1841-9267.

12. Valk L. The LEGO Mindstorms NXT 2.0 Discovery Book : a Beginner's Guide to Building and Programming Robots, (2010) p.

cm. Includes Index. ISBN-13: 978-1-59327-211-1.

Получено 05.03.2014

## References

1. Beliovskaia L.G., and Beliovskiy A.E. Programmirovanie mikrokontrol'lerov v LabVIEW [NXT Microcontroller Programming in LabVIEW], (2010), Moscow, Russian Federation, *DMK Press*; 280 p.: il. + DVD (In Russian), ISBN 978-5-94075-594-5.

2. Gerasun V.M., Pyndak V.I., Nesmiyanov I.A., Dyashkin-Titov V.V., and Pavlovsky V.E. Manipulyatory dlya mobil'nyh robotov. Konceptii i principy proektirovaniya [Manipulators for Mobile Robots. Concepts and Design Principles], (2012), *Institut Prikladnoj Matematiki im. M.V.Keldysha*, No. 44, 24 p. (In Russian).

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

4. Melnyk A., Borissenko V., Khomenko V., and Plis P. Mobil'nye roboty kompanii «k-team» dlya resheniya specifiicheskikh tehniceskikh zadach [Mobile Robots of K-Team Corporation to Solve Specific Technical Problems], *Visnik KDU imeni Mihajla Ostrograds'kogo Publ.*, (2010), Kremenchuk, Ukraine, Vol. 4 (63), part 3, pp. 36 – 39 (In Russian).

5. Borenstein J., Everett H.R., Feng L., and Wehe D. Mobile Robot Positioning. *Sensors and Techniques Invited Paper for the Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots*, (1997), Vol. 14, No. 4, pp. 231 – 249.

6. Liang, C., Ceccarelli M., and Takeda Yu. Operation Analysis of a One-DOF Pantograph Leg Mechanisms. *Proceedings of the RAAD 2008, 17th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*. September 15-17, 2008, Ancona, Italy.

7. Mandow A., Mart'ínez J. L., Morales J., Blanco J.-L., Garc'ıa-Cerezo A. and Gonzalez J. Experimental Kinematics for Wheeled Skid-steer Mobile Robots, (2007), *Proceedings of the International Conference on Intelligent*

*Robots and Systems*, San Diego, CA, pp. 1222 – 1227.

8. Martinez J., Mandow A., Morales J., Pedraza S. & Garcia-Cerezo A. Approximating Kinematics for Tracked Mobile Robots, *The International Journal of Robotics Research Publ.*, Vol. 24, No. 10, October 2005, pp. 867 – 878.

9. 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](http://www.intechopen.com)

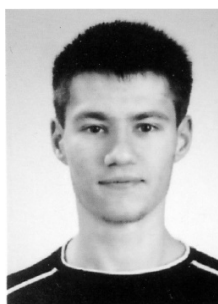
10. Siegwart R., and Nourbakhsh I. Introduction to Autonomous Mobile Robots (Intelligent Robotics and Autonomous Agents). A Bradford Book. *Includes Bibliographical References and Index.* (2004). ISBN 0-262-19502-X.

11. Suliman C., Cruceru C., and Moldoveanu F. Mobile Robot Position Estimation Using the Kalman Filter, (2009), *Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures*, Vol. 6 (XXIII), pp. 75 – 78. ISSN 1841-9267

12. Valk L. The LEGO Mindstorms NXT 2.0 Discovery Book: a Beginner's Guide to Building and Programming Robots, (2010) p. cm. Includes index. ISBN-13: 978-1-59327-211-1.



Михайлов Евгений Павлович,  
канд. техн. наук,  
каф. подъемно-транспортного и робототехнического оборудования Одесского нац. политехн. ун-та,  
65044, г. Одесса, пр. Шевченко,1,  
т. +38(050)3161210.  
E-mail : [ermix@mail.ru](mailto:ermix@mail.ru)



Короткий Игорь Константинович,  
студент каф. подъемно-транспортного и робототехнического оборудования Одесского нац. политехн. ун-та,  
т. +38(099)4148201.  
E-mail :  
[mr.demon.ivan@mail.ru](mailto:mr.demon.ivan@mail.ru)



Онуфриенко Виталий Сергеевич,  
студент каф. подъемно-транспортного и робототехнического оборудования Одесского нац. политехн. ун-та,  
т. +38(093)2290007.  
E-mail :  
[vilnakasa@gmail.com](mailto:vilnakasa@gmail.com)