

УДК 621.865.8

Mykhaylov Yevgen, PhD; Lingur Valeriy, PhD; Matveiko Olga.  
*Nationale Polytechnische Universität Odessa*

## VERWENDUNG VON LASERSCANNERN FÜR LOKALE NAVIGATION DER FAHRERLOSEN TRANSPORTFAHRZEUGEN

**Zusammenfassung.** Die Verwendung von Laserscannern für lokale Navigation der fahrerlosen Transportfahrzeugen wird ausgelegt. Die Abhängigkeiten für Bestimmung der Lage fahrerloser Transportfahrzeugen mit Laserscannern und Reflektoren werden dargestellt. Es wird gezeigt, dass die Position und Orientierung von Fahrzeugen über zwei Reflektoren bei der Bewegung von fahrerlosen Transportfahrzeugen entlang der Regale bestimmt werden können.

**Stichworte:** fahrerlose Transportfahrzeuge, Navigation, Laserscanner.

**Анотація.** Розглянуті питання застосування лазерних сканерів для локальної навігації транспортних мобільних роботів. Отримані залежності для визначення положення мобільних роботів з використанням лазерних сканерів та рефлекторів. Показано, що у разі переміщення транспортних роботів вздовж стелажів, положення та орієнтацію робота можна визначити за допомогою двох рефлекторів.

**Ключові слова:** транспортний мобільний робот, навігація, лазерні сканери.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы использования лазерных сканеров для локальной навигации транспортных мобильных роботов. Получены зависимости для определения положения мобильных роботов с использованием лазерных сканеров и рефлекторов. Показано, что в случае перемещения транспортных роботов вдоль стеллажей, положение и ориентацию робота можно определить с помощью двух рефлекторов.

**Ключевые слова:** мобильный робот, навигация, лазерные сканеры.

### Problemstellung

Die Bewegung von fahrerlosen Transportfahrzeugen entlang der vorbestimmten Fahrbahn wird durch verschiedene Navigationsverfahren, inklusive die Methoden der lokalen und globalen Navigation, ausgeführt. [1,2]

---

© Mykhaylov Yevgen, Lingur Valeriy, Matveiko Olga.

Die Methoden der Navigation mittels eingebauter Sensoren, zum Beispiel mittels Odometrie, ermöglichen es, relative Position von Transportfahrzeug zu bestimmen; bei der Bewegung aber wird der Fehler der Positionsbestimmung akkumuliert, was eine periodische Bestimmung der tatsächlichen Position durch zusätzliche lokale oder globale Navigationsmethoden fordert[3, 4].

Deswegen sind lokale Navigationsmethoden heute weit verbreitet, zum Beispiel, auf der Basis von Laserscannern. Mit Laserscannern kann die Position des Transportfahrzeuges durch die Messung der relativen Position und des Abstandes zu den Reflektoren bestimmt werden, die an den vorgesehenen Stellen des Raumes, in dem sich ein Transportfahrzeug bewegt, angebracht sind, sowie zu Hindernissen oder Wänden im Raum. Zur Bestimmung der gegenseitigen Position von Objekten in bezug auf die Position des Transportfahrzeuges werden die Laserscanner verwendet, die eine Scannierung durch Rotation ausführen, wobei der Drehwinkel des Sensors im Hinblick auf die Position des Transportfahrzeuges gemessen wird.

Die Algorithmen zur Bestimmung der Position des Transportfahrzeuges anhand der Scanner sind jedoch ziemlich kompliziert, deshalb ist die Frage der Vereinfachung dieser Algorithmen von großem Interesse.

#### **Analyse aktueller Forschungsergebnisse und Publikationen**

Mittels der Lasersensoren lässt sich die Position des Transportfahrzeuges durch die Messung der relativen Position und des Abstandes zu den Reflektoren bestimmen, die an den vorgesehenen Stellen des Raumes, in dem sich ein Transportfahrzeug bewegt, angebracht sind, sowie zu Hindernissen oder Wänden im Raum. Zur Bestimmung der gegenseitigen Position von Objekten in bezug auf die Position des Transportfahrzeuges werden die Laserscanner verwendet, die eine Scannierung durch Rotation ausführen, wobei der Drehwinkel des Sensors im Hinblick auf die Position des Transportfahrzeuges gemessen wird.

Die Laserscanner verfügen über einen Messbereich von mehreren zehn und hundert Metern als auch die Messgenauigkeit der Messeinheiten und Zehner von Millimetern, und sind in der Lage, einen Drehwinkel mit Genauigkeit von  $0,125^\circ$  -  $1,5^\circ$  zu bestimmen.

Bei der Verwendung eines Laserscanners und der Reflektoren zur Bestimmung der Position eines Transportfahrzeuges braucht man nicht weniger als drei Reflektoren für eindeutige Bestimmung der Position des Transportfahrzeuges.

Ein Anwendungsbeispiel des Laserscanners mit drei Reflektoren zur Bestimmung der Position und Orientierung des Transportfahrzeuges ist in Abb. 1 dargestellt.

Es gibt 3 Reflektoren mit gegebenen Koordinaten  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  und gemessenen Abständen zu ihnen  $(L_1, L_2, L_3)$ .

Es ist nötig, die Koordinaten des Transportfahrzeuges ( $x_r$ ,  $y_r$ ) und seine Orientierung bezogen auf Ausgangsposition  $\alpha_r$  zu bestimmen.

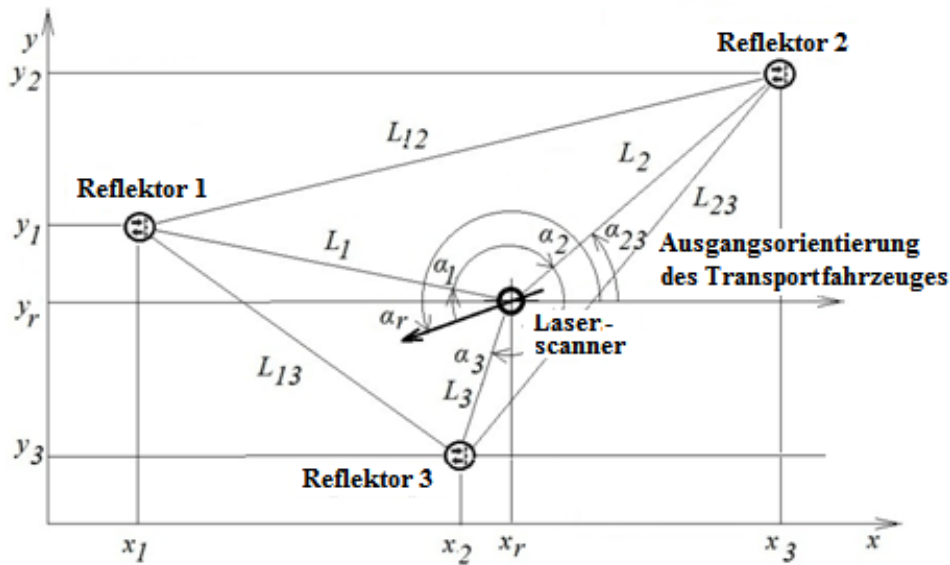


Abb. 1. Verwendung des Laserscanners und Reflektoren zur Bestimmung der Position und Orientierung des Transportfahrzeuges

Die Bestimmung der Position des Transportfahrzeuges kann man bei der Bewegung als die Position des Transportfahrzeuges und Koordinaten der  $i$ -ten Referenz (Reflektor) ausführen, die sich im Zustandsvektor des Systems im aktuellen Schritt  $k$  [6] befinden:

$$h_i(X_k) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_{i_k} - x_{r_k})^2 + (y_{i_k} - y_{r_k})^2} \\ \arctan\left(\frac{y_{i_k} - y_{r_k}}{x_{i_k} - x_{r_k}}\right) - \alpha_{r_k} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Diese Koordinaten lassen sich durch Berechnung des Gleichungssystems für den Abstand zu den Reflektoren  $L_i$  finden:

$$L_i = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2} \quad (2)$$

Um die Orientierung des Transportfahrzeuges zu bestimmen, kann man verschiedene Varianten verwenden, zum Beispiel,

$$\alpha_r = \alpha_{23} - \alpha_2, \quad (3)$$

wo:  $\alpha_{23} = \arctan((y_2 - y_r) / (x_2 - x_r))$ .

Dadurch ist es möglich, die Position eines fahrerlosen Transportfahrzeuges mit einer ziemlich hohen Präzision zu bestimmen.

Bei der Bewegung eines Transportfahrzeuges im Raum mit vielen Objekten wird die Anzahl der Reflektoren erhöht, so dass Signale in jeder Position des Transportfahrzeuges direkt an dem Transportfahrzeug von mindestens drei Reflektoren erhalten werden. In diesem Fall aber muss man die Position des Transportfahrzeuges auf dem Raumplan markieren, was die Anwendung der Methoden der globalen Navigation erfordert.

Es wird die Möglichkeit betrachtet, die Algorithmen zur Bestimmung der Position und Orientierung des Transportfahrzeuges zu vereinfachen.

### Zielstellung und Forschungsaufgaben

Bei der Bewegung des Transportfahrzeuges im Lager entlang des Regals, indem Reflektoren direkt im Regal installiert sind, gibt es die Möglichkeit, sich nur auf 2 Reflektoren zu beschränken, denn das Transportfahrzeug kann sich nur an einer Seite des Regals befinden.

Ein Beispiel für die Verwendung von Laserscannern zur Bestimmung der Position des Transportfahrzeuges bei der Bewegung entlang des Regals ist in Abb. 2. dargestellt. Der Laserscanner gibt die Abstände zu den Reflektoren  $L_1$  und  $L_2$ , sowie die entsprechenden Drehwinkel des Scanners in bezug auf Orientierung des Transportfahrzeuges und Reflektoren  $\alpha_1, \alpha_2$  an.

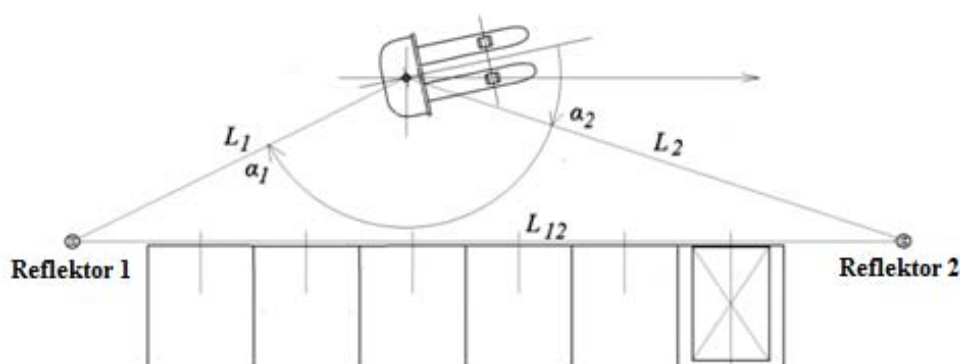


Abb. 2. Beispiel für den Einsatz von Lasersensoren zur Bestimmung der Position des Transportfahrzeuges

Um die Position gemäß den Messergebnissen des Scanners zu bestimmen, müssen die Koordinaten des Transportfahrzeuges im definierten Koordinatensystem und die Orientierung des Transportfahrzeuges bezüglich Ausgangsposition gefunden werden.

### Hauptteil

In Abb. 3 ist ein Beispiel zur Bestimmung der Position und Orientierung des Transportfahrzeuges mit Hilfe vom Laserscanner dargestellt.

In Abbildung werden folgende Bezeichnungen benutzt:

$L_1$  – der Abstand zum Reflektor 1;

$L_2$  – der Abstand zum Reflektor 2;

$L_{12}$  – der Abstand zwischen Reflektoren 1, 2;

$\alpha_r$  – Orientierung des Transportfahrzeuges bezüglich der Ausgangsorientierung;

$\alpha_1$  – der Winkel gerichtet auf den Reflektor 1 bezüglich der Ausgangsorientierung des Transportfahrzeuges;

$\alpha_2$  – der Winkel gerichtet auf den Reflektor 2 bezüglich der Ausgangsorientierung des Transportfahrzeuges;  
 $\alpha_{12}$  – der Winkel zwischen der Richtungslinie auf den Reflektor 1 und der Richtungslinie auf den Reflektor 2;  
 $\alpha_{22}$  – der Winkel zwischen der Richtungslinie auf den Reflektor 2 und der Linie senkrecht zu der Linie des Abstandes zwischen den Reflektoren.

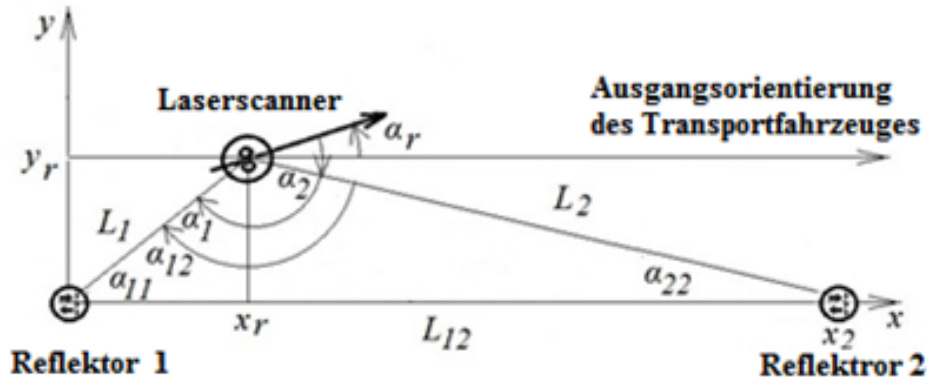


Abb. 3. Bestimmung der Position und Orientierung des Transportfahrzeuges mithilfe des Laserscanners

Zur Bestimmung der Position und Orientierung des Transportfahrzeuges wird von uns ein Koordinatensystem gewählt, wobei die x-Achse mit der Abstandslinie zwischen den Reflektoren und der y-Achse in der Richtung übereinstimmen, in der sich das Transportfahrzeug bewegt. Dann durch  $x_r$  und  $y_r$  werden die aktuellen Koordinaten des Transportfahrzeuges bezeichnet, die mit Abständen zu Reflektoren  $L_1$ ,  $L_2$  und dem Abstand zwischen Reflektoren  $L_{12}$  mittels solcher Abhängigkeiten verbunden sind:

$$\begin{aligned} y_r^2 + x_r^2 &= L_1^2, & y_r^2 + (L_{12} - x_r)^2 &= L_2^2, \\ y_r^2 &= L_1^2 - x_r^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Durch folgende Umformungen:

$$\begin{aligned} L_1^2 - x_r^2 + (L_{12} - x_r)^2 &= L_2^2; \\ L_1^2 - x_r^2 + L_{12}^2 - 2 L_{12} x_r + x_r^2 &= L_2^2; \\ L_1^2 + L_{12}^2 - L_2^2 &= 2 L_{12} x_r, \end{aligned} \quad (5)$$

gelangen wir zum Ergebnis, dass für  $x_r$  und  $y$  gilt

$$\begin{aligned} x_r &= (L_1^2 + L_{12}^2 - L_2^2) / 2 L_{12}; \\ y_r &= (L_1^2 - x_r^2)^{1/2}, \end{aligned} \quad (6)$$

weil:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{22} &= y_r / L_2, \\ \alpha_{22} &= \arcsin (y_r / L_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Für Orientierung des Transportfahrzeuges  $\alpha_r$  in bezug auf Ausgangsorientierung unter Berücksichtigung, dass die Drehung im Uhrzeigersinn positiv ist, erhalten wir folgenden Wert:

$$\alpha_r = \alpha_{22} - \alpha_2. \quad (8)$$

Die erhaltenen Abhängigkeiten können ausgehend von dem Sinustheorem [7] gefunden werden. Daraus folgt für das Beispiel in Abb.3:

$$\sin(\alpha_{11}) / L_2 = \sin \alpha_{12} / L_{12}, \quad (9)$$

dann

$$\sin(\alpha_{11}) = L_2 \sin(\alpha_{12}) / L_{12}. \quad (10)$$

Im Hinblick darauf, dass

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2, \quad (11)$$

erhalten wir den Wert  $\alpha_{11}$ :

$$\alpha_{11} = \arcsin(L_2 \sin(\alpha_{12}) / L_{12}) = \arcsin(L_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) / L_{12}). \quad (12)$$

Es ermöglicht, sowohl die Koordinaten  $x_r$ , und  $y_r$  als auch die Orientierung  $\alpha_r$  des Transportfahrzeuges zu bestimmen:

$$\begin{aligned} x_r &= L_1 \cos(\alpha_{11}), \\ y_r &= L_1 \sin(\alpha_{11}). \end{aligned} \quad (13)$$

Da

$$\alpha_r = \alpha_{22} - \alpha_2, \quad (14)$$

und für den Winkel  $\alpha_{22}$  gilt:

$$\alpha_{22} = \pi - \alpha_{11} - \alpha_{12} = \pi - \alpha_{11} - \alpha_1 + \alpha_2, \quad (5)$$

erhalten wir folgenden Wert:

$$\alpha_r = \pi - \alpha_{11} - \alpha_1. \quad (16)$$

Wenn die Rotationsachse des Transportfahrzeuges mit der Rotationsachse des Scanners nicht übereinstimmt, ist es notwendig, die Position des Transportfahrzeuges mit Rücksicht auf den Abstand des Scanners von der Rotationsachse des Transportfahrzeuges  $l_s$  für verschiedene Verschiebungsantrieben, z. B. für differentiale oder Dreiradtyp, zu korrigieren (Abb. 4).

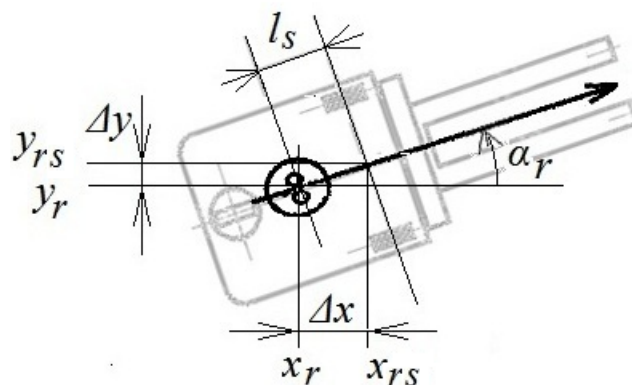


Abb. 4. Korrigieren der Position des Transportfahrzeuges mit Rücksicht auf den Abstand des Scanners von der Rotationsachse des Transportfahrzeuges  $l_s$

In diesem Fall für die Abweichung im festgelegten Koordinatensystem gilt:

$$\begin{aligned} \Delta x &= l_s \sin(\alpha_{11}), \\ \Delta y &= l_s \cos(\alpha_{11}). \end{aligned} \quad (16)$$

Ähnlich lässt sich die Verschiebung von Koordinaten beim Bewegen eines Transportfahrzeuges mit Hinblick auf den Weg während der Rotation des Scanners bestimmen.

### **Fazit**

Die Fragen der Vereinfachung von Algorithmen zur Bestimmung der Position eines Transportfahrzeuges mittels Laserscanner wurden betrachtet.

Es wurde auch gezeigt, dass die Vereinfachung des Algorithmus zur Bestimmung der Position des Transportfahrzeuges beim Bewegen entlang der Regale unter Verwendung von zwei Reflektoren realisiert werden kann.

Die Abhängigkeiten zur Bestimmung der Position und Orientierung des Transportfahrzeuges durch einen Laserscanner unter Verwendung von zwei Reflektoren wurden beschrieben.

Auch wurden die Möglichkeiten vorgestellt, Fehler unter Berücksichtigung des Abstandes des Scanners von der Rotationsachse des Transportfahrzeuges und der Verschiebung des Transportfahrzeuges während der Rotation des Scanners zu bestimmen.

## LITERATURVERZEICHNIS

1. Mobile Robot Navigation. Edited by Alejandra Barrera. Published by InTech. Croatia. 2010. Printed in Croatia, A free online edition of this book is available at [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com).

2. Siegwart R. Nourbakhsh I. R. Introduction to Autonomous Mobile Robots. A Bradford Book The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England © 2004 Massachusetts Institute of Technology p. 336.

3. Михайлов Е.П., Кризь М.В. Локальна навігація мобільних роботів з використанням засобів одометрії //Подъемно-транспортная техника. – 2015. – № 4 (48). – с.21–30.

4. Михайлов Е.П., Скринник А.І Дослідження засобів локальної навігації мобільних роботів // Подъемно-транспортная техника. – 2017. – № 3 (48), с. 55–61.

5. SICK Sensor Intelligence. Датчики 2D-LiDAR. [Електронний ресурс] URL: <https://www.sick.com/ru/ru/detection-and-ranging-solutions/-2d-lidar/c/g91900> (дата звернення 09.06.2018).

6. Кучерский Р.В., Манько С.В. Алгоритмы локальной навигации и картографии для бортовой системы управления автономного мобильного робота // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. Раздел I. Робототехника – 2012. – №3, том 128. с.13-22.

7. Теорема синусов. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. [Електронний ресурс] URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B0\\_%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%83%D1%81%D0%BE%D0%B2](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%83%D1%81%D0%BE%D0%B2) (дата звернення 09.06.2018).

---

8. Антонов А. Описание движения мобильного робота. // 23 июня, 2014. Робототехника. [Электронный ресурс] URL: <http://robotosha.ru/robotics/robot-motion.html> (дата звернения 09.06.2018).

9. Мартыненко Ю. Г. Управление движением мобильных колёсных роботов // Фундаментальная и прикладная математика, 2005, том 11, № 8, с. 29—80.

10. 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).