

# Kartographie mit Lego-Mindstorms

Jacob Ruhe, Elektro- und Informationstechnik, 218349

**Zusammenfassung**—Im Rahmen des Lego-Mindstorms-Projekts war es das Ziel einen Kartographierungsroboter, aus einem Legobausatz, zu entwickeln. Dazu wurden verschiedene Transformationsmatrizen verwendet. Diese werden dazu benutzt, die Messwerte vom polaren Koordinatensystem in das globale kartesische Koordinatensystem umzuwandeln. Am Ende wird ein ungefährer Grundriss der Umgebung erstellt. Dieser Roboter kann in der Höhlenforschung sowie zur Rettung von Menschen in eingestürzten Gebäuden benutzt werden.

**Schlagwörter**—Lego-Mindstorms, Ultraschall, Kartographie, Koordinatentransformation

## I. EINLEITUNG

IN der heutigen Zeit wird alles automatisiert, so auch die Kartographie. Wo früher alles mit Hand aufgezeichnet wurde, können heute Roboter eine Grundrisskarte erstellen. Die Intention meines Partners Fabian Schimke und mir war es, einen Kartographierungsroboter zu konstruieren, welcher genau dies bewerkstelligen kann. Dieser wäre zum Beispiel in der Höhlenforschung einsetzbar. Der Roboter könnte in eine unbekannte, gefährliche Höhlenöffnung gesetzt werden und so den Forschern erste Daten über das Innere der Höhle liefern, ohne dass die Forscher sich selbst in Gefahr begeben. Ein weiteres Anwendungsgebiet wäre die Rettung von Menschen in eingestürzten Gebäuden, in Erdbebengebieten. Das Fahrzeug könnte in enge und gefährliche Spalten gelangen und so einen Grundriss des Raumes erstellen um verletzte Menschen zu lokalisieren. So wären die Helfer in der Lage einen Rettungsplan zu entwerfen. Um dies zu schaffen, müsste der Roboter in der Lage sein, Wände bzw. Gegenstände zu erkennen und diesen selbständig ausweichen. Des Weiteren müsste der Roboter Menschen erkennen und diese dann bei der Kartographie des Gebietes auf der Karte erkenntlich machen. Außerdem müsste das Fahrzeug in verschiedenen Gelände fahren und überall seine Messwerte aufnehmen können. Die Messwerte des Roboters müssten so umgewandelt werden, dass selbst bei translatorischen Bewegungen oder Rotation des Fahrzeuges die Messwerte immer zum Anfang zurückgerechnet werden. Durch zusätzliche Transformation der Messwerte würde dann zum Schluss eine ungefähre Grundrisskarte erstellt werden.

## II. VORBETRACHTUNGEN

Es gibt ein paar Geräte und Techniken, womit man bestimmte Gebiete kartographieren kann. Meistens ist der Zeitaufwand dieser Geräte hoch, da viele Messungen noch von Hand getätigt werden.

### A. Höhlenforschung

In der Höhlenforschung müssen die Forscher meist alles manuell vermessen. Das heißt, es wird jeder einzelne Abstand

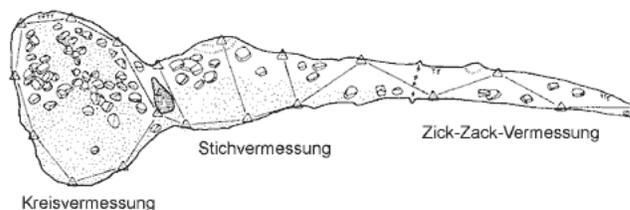
oder Ecke mit Maßband und Winkelmesser vermessen. Die Daten müssen dann in einer ungefähren Skizze übertragen werden. Erst später werden dann die Messwerte und die grobe Skizze zusammen, zu einer genaueren Skizze zusammengefügt. Dies ist im großen und ganzen sehr zeitaufwendig. Daher liegt es nahe einen Roboter zu konstruieren, welcher diese Vermessungen mit Hilfe von Ultraschallmessungen schneller erledigen kann. Die Ultraschallmesswerte können dann anschließend in eine Karte umgewandelt werden. Zum Vermessen gibt es mehrere Messmethoden. Durch den Aufbau des Roboters empfiehlt es sich die Sternvermessungsmethode anzuwenden, welche in Abbildung 1 veranschaulicht ist



Sternvermessung

Abbildung 1. Sternvermessung

Die Sternvermessung wird bei manuellen Vermessungen von großen Hohlräumen eingesetzt. Da sich bei unserem Roboter der Ultraschallsensor, welcher die Messwerte aufnimmt, oben am Fahrzeug befindet und sich um 360 Grad dreht, ist die Anwendung in großen Hohlräumen mit der Sternvermessung naheliegend. Bei der Sternvermessung wird ein zentraler Punkt im Raum ausgemessen, wo sich der Messroboter oder das Messgerät befindet. Anschließend wird in alle Richtungen gemessen, wobei die Ultraschallmessung wesentlich schneller ist. Aus den Messwerten ergibt sich dann eine ungefähre Grundrisskarte der Höhle. Bei schmalen Gängen wird die 'Zick-Zack-Vermessung' verwendet, welche in Abbildung 2 unter anderem abgebildet ist.



Kreisvermessung

Stichvermessung

Zick-Zack-Vermessung

Abbildung 2. Vermessungsmethoden der Höhlenvermessung

Bei dieser Vermessungsmethode werden immer abwechselnd an den Wänden bei markanten Stellen, wie zum Beispiel eine hervorstehende Kante, Farbpunkte gesetzt. Anschließend werden anhand dieser Punkte Vermessungen angestellt.

**B. Gleichung für Rotation und Translation**

Damit die Messwerte am Ende, trotz Rotationsbewegungen und Translationsbewegungen, an der Ausgangsstellen zurückgerechnet werden und so eine ungefähre Grundrisskarte erkennen lassen, benötigt man folgende Formel.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & t_x \\ -\sin \theta & \cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

In dieser Formel befindet sich die Formel der Rotations Koordinaten

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

sowie die Formel der Translation Koordinaten

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

zusammengefasst. Mit Hilfe dieser zusammengefassten Formel werden die Messwerte, auch bei einer Drehung oder vorwärts Bewegung des Roboters, zu dem Ausgangspunkt des Roboters zurückgerechnet. So entsteht schließlich eine ungefähre Grundrisskarte.

**C. Odometrie**

Odometrie ist eine Methode, um anhand der Motoren eines Fahrzeugs, die ungefähre Position dieses Fahrzeuges im Raum zu bestimmen. In unserem Projekt verwendeten wir unter anderem diese Methode. Da wir mit dem uns zu Verfügung stehenden Materialien keine allzu hohe Genauigkeit erzielen konnten, weichen die Daten vom realistischen ab. Die Methode der Odometrie wendeten wir beim oberen Sensor an, welcher um 360 Grad drehbar ist. Durch experimentelles Probieren fanden wir heraus, dass 20000 MotorCounts nötig sind, um diesen Sensor einmal um die eigenen Achse drehen zu können. Dies führt theoretisch zu einer Auflösung von

$$\frac{360deg}{20000MotorCount} = 0.018 \frac{deg}{MotorCount} \quad (4)$$

Allerdings ist weder die Auflösung noch der MotorCount realistisch, wenn man bedenkt welche Bauteile verwendet wurden.

**III. HAUPTTEIL**

Unsere Idee war es einen Roboter zu konstruieren, der in einer unbekanntem Umgebung eine Grundrisskarte dieses Gebietes erstellen kann. Realisiert haben wir dies mit dem Fahrzeug, welches sie in Abbildung 6 sehen können. Diese Abbildung finden sie im Anhang wieder.

Zu sehen ist ein Kettenfahrzeug, welches von zwei unabhängigen Motoren betrieben wird. Dadurch ist der Roboter in der Lage sich um seine eigene Achse zu drehen, um so seinen Kurs zu ändern. Des Weiteren haben wir dieses Projekt mit zwei Ultraschallsensoren und einem Gyroskopicsensor verwirklicht.

Der Gyroskopicsensor befindet sich zentral an der Unterseite des Fahrzeugs. Dieser Sensor ist in der Lage zu messen, um wie viel Grad sich das Fahrzeug um seine eigene Achse dreht. Damit diese Messung so genau wie möglich ist, muss sich der Sensor möglichst zentriert im Roboter befinden. Die Gradzahl wird benötigt, um die Messwertpunkte bei einer Drehung des Fahrzeugs zurück auf die Anfangsmessung zu rechnen. Somit ergibt sich dann eine nicht verdrehte Darstellung. Der erste Ultraschallsensor, an der Front des Fahrzeugs angebracht, dient zur Messung der Entfernung zu Wänden oder Gegenständen. Bei einem bestimmten Mindestabstand zu einer Wand oder einem Gegenstand ist das Fahrzeug in der Lage diesen auszuweichen, indem es sich um eine festgelegte Gradzahl um seine eigene Achse dreht. Der zweite Ultraschallsensor befindet sich oben auf dem Roboter. Dieser ist so montiert, dass er sich um 360 Grad drehen kann. Diese Drehung benötigt man, um in alle Richtungen Messwerte aufnehmen zu können und so eine Karte vom Raum zu erstellen. Außerdem befindet sich der Ultraschallsensor am Ende einer Schiene, wodurch die Aufnahme von Störgeräuschen vom Fahrzeug selber vermindert wird. Die Messwerte werden vom zweiten Ultraschallsensor so umgewandelt, dass am Ende eine Darstellung bzw. ein ungefährer Grundriss vom Raum erkennbar wird. Zuerst werden die Messwerte in polaren Koordinaten wiedergegeben.

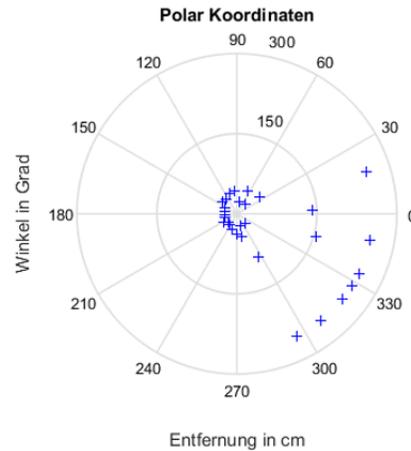


Abbildung 3. Polare Koordinaten

Diese werden mithilfe von Matrixmultiplikation in lokalen kartesischen Koordinaten transformiert. Um die Messwerte von polaren Koordinaten in kartesische Koordinaten umzuwandeln, benötigt man folgende Formel

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = r \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Der obere Ultraschallsensor befindet sich auf eine Kreisbahn und nicht genau im Zentrum des Roboters. Daher muss die Formel 5 noch um den Abstand des Sensors zum Fahrzeugmittelpunkt und den Winkel ergänzt werden. Dadurch entsteht folgende Formel

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = r \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix} + r_s \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (r + r_s) \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Mit Hilfe der Formel 7 werden die polaren Koordinaten in kartesische Koordinaten umgewandelt.

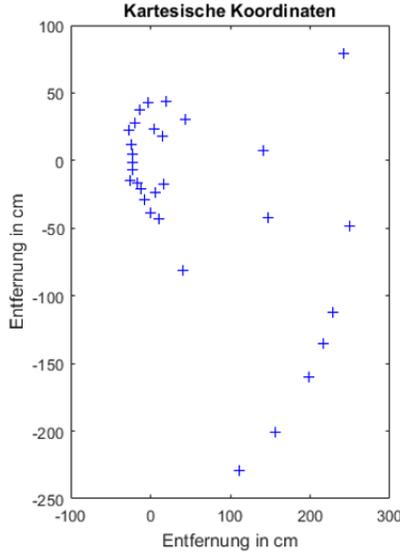


Abbildung 4. Kartesische Koordinaten

Der Unterschied der lokalen kartesischen Koordinaten zu den polaren Koordinaten ist der, dass die Messwerte der lokalen kartesischen Koordinaten den Roboter als Bezugspunkt haben. Da sich nun der Roboter allerdings nach jeder Messung um 13 cm nach vorne bewegt und dadurch die Messwerte am Ende keinen Raum erkennen lassen würden, muss eine erneute Transformation der lokalen kartesischen Koordinaten in globale kartesische Koordinaten erfolgen. Bei den globalen kartesischen Koordinaten werden die Messwerte immer wieder zur Anfangsmessung zurückgerechnet und die Punkte bilden jeweils untereinander einen Bezug zueinander. Damit die Messwerte bei einer Translation des Roboters zurückgerechnet werden, benötigt man folgende Formel

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (8)$$

So bleibt der Roboter, der bei der Darstellung im Mittelpunkt sich befindet, auch dort und verschiebt nicht seinen Mittelpunkt immer wieder bei jeder neuen translatorischen Bewegung mit, wie bei den lokalen kartesischen Koordinaten. Des Weiteren werden mithilfe folgender Formel die Messwerte bei einer Rotation übereinandergelegt.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (9)$$

Die beiden Formeln 8 und 9 werden der Formel 10 zusammengefasst.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & t_x \\ -\sin \theta & \cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

So entsteht am Ende aus den globalen kartesischen Koordinaten eine ungefähre Darstellung bzw. Grundriss des Gebietes.

#### IV. ERGEBNISDISKUSSION

Das Ergebnis unserer Arbeit ist ein Roboter, welcher einen ungefähren Grundriss seiner Umgebung erstellen kann, sowie Hindernisse erkennt und ihnen selbständig ausweicht. Allerdings ist dieses Fahrzeug nur für eine gerade Ebene geschaffen. Des Weiteren ist die Reflexion der Ultraschallwellen an schrägen Objekten ein Problem. Dadurch werden die Ultraschallwellen nicht gerade zum Ultraschallsensor zurückgeworfen. Somit erkennt der Roboter dieses Objekt nicht. Ein weiteres Problem besteht in der Erkennung von Ecken. Durch die Nichterkennung der Ecken wird der Raum oval förmig wiedergegeben. Außerdem werden die Sensorkennlinien statisch verzerrt.

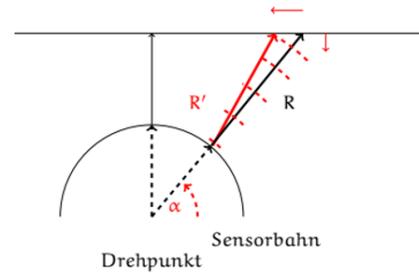


Abbildung 5. Verzerrung von Linien

Das heißt, dadurch dass der Ultraschallsensor, welcher die Messwerte aufnimmt, nicht genau im Mittelpunkt des Roboters befestigt ist, entsteht ein kleiner Abstand, welcher bei den Messungen nicht berücksichtigt wird. Auch treffen die Ultraschallwellen zuerst auf das Objekt, da die Wellen sich mit zunehmender Entfernung immer weiter ausbreiten. Dadurch wird dann ein Messwert gemessen, der allerdings weiter rechts oder links von der eigentlichen Sensorkennlinie ist und somit die Ultraschallwellen früher zurückwirft. Die Sensorkennlinie ist der gerade Abstand vom Sensor bis hin zum Gegenstand.

#### V. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wir einen Kartographierroboter gebaut haben, welcher in der Lage ist eine ungefähre Grundrisskarte seiner Umgebung zu erstellen. Dazu werden mit Hilfe eines um 360 Grad drehbaren Ultraschallsensors Messwerte aufgenommen. Diese werden zuerst in einem polaren Koordinatensystem dargestellt und mit Transformationsmatrizen erst in ein lokales kartesisches Koordinatensystem und dann in ein globales kartesisches Koordinatensystem umgewandelt. Durch zu Hilfenahme eines Gyroskopisensors und eines weiteren Ultraschallsensors werden die Messwerte zurück zum Ausgangspunkt gerechnet.

Dadurch entsteht am Ende, auch wenn sich der Roboter bewegt, keine große verzerrte Grundrisskarte. Allerdings könnte man die Qualität verbessern, indem man mehrere Punkte aufnimmt. Des Weiteren könnten Gegenstände sowie Ecken genauer abgefahren werden zu der besseren Erkennung dieser. Auch würde ein 3. Ultraschallsensor, welcher ebenfalls um 360 Grad drehbar ist und Messwerte aufnimmt, helfen, um bei einem Vergleich der beiden drehbaren Ultraschallsensoren genauere Daten zu erzielen. Zum anderen wäre die Befestigung eines Wärmesensors eine Verbesserung, um damit Menschen zu erkennen. Eine weitere Überlegung wäre die Anwendung einer Heatmap, damit die Darstellung noch deutlicher wird. Bei der Heatmap werden bei einer bestimmten Dichte von Punkten diese mit einer Farbe dargestellt. So könnte man schlussendlich auch eine dreidimensionale Darstellung anstreben.

## VI. ANHANG



Abbildung 6. Kartographierungsroboter

## VII. LITERATURVERZEICHNIS

- (1) Abbildung 1 und 2: Einführung in die Höhlenvermessung, Autor: Jochen Hartig, DAV Höhlengruppe Frankfurt/Main, <http://caverender.de/vermess/vermess.htm>
- (2) Transformations matrix, Wikipedia, 22.03.2018, 10:02,