

Kartographie mit Lego-Mindstorms

Fabian Schimke, Elektro- und Informationstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Zusammenfassung—Im Rahmen des Lego-Mindstorms Projekts wurde ein Roboter zur Kartographierung gebaut. Der mit Hilfe von einem Ultraschallsensors Entfernungen von sich zu Wänden oder Gegenständen um sich herum misst. Durch das Anfahren mehrerer Punkte, von denen aus gemessen werden soll, soll der Roboter auch komplexe Räume und Umgebungen aufzeichnen können. Aus den gemessenen Entfernungen soll eine zweidimensionale Karte erstellt werden. Der Roboter soll autonom von externen Ortungsdiensten (z.B. GPS) arbeiten können um viele Anwendungsfälle abdecken zu können. Das erstellen einer Karte kann zum Beispiel Anwendung finden in Räumen und Umgebungen bei denen keine Karte vorhanden ist oder durch ein Ereignis wie Erdbeben keine Aktuelle Karte/Grundriss vorhanden ist. Dies soll bei der Untersuchung oder Einsatzplanung in Höhlen oder eingestürzten Gebäuden helfen.

Schlagwörter—Kartographie, Koordinatentransformation, Lego-Mindstorms, Ortungssystem, Roboter, Ultraschall

I. EINLEITUNG

IN vielen Fällen liegt weder eine Karte noch Lageplan geschweige denn ein 3D-Modell vor. Sei es das diese verloren gegangen, nie erstellt worden oder durch Ereignisse wie Erdbeben nicht mehr aktuell sind. Durch das Erstellen dieser sollen Rettungskräfte und Forschungsgruppen unterstützt werden und vor eventuellen Gefahren (z.B. Nachbeben) geschützt werden. Die Aufzeichnung von Räumen oder Erdformationen kann in vielen Bereichen hilfreich sein. So können erstellte Lagepläne von eingestürzten Gebäuden die Rettungskräfte unterstützen und deren Vorbereitung für einen Einstieg erleichtern indem sie schon vorher die passende Ausrüstung mit sich führen können. Des Weiteren kann die automatisierte Kartographie nicht nur bei Rettungsaktionen unterstützen sondern auch beim Erfassen von Gebäuden die noch intakt sind, bei denen jedoch Pläne verloren gegangen sind oder nie erstellt worden sind, hilfreich sein. Dies kann von neu Bauten als auch von historischer Architektur der Fall sein. Somit könnten auch historische Bauten, mit Blick auf neue Technologien wie Augmented Reality oder Virtual Reality, für jeden erlebbar und untersuchbar gemacht werden, falls diese zerfallen oder schwer zu erreichen sind. Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig, um den Roboter zur Kartographie unabhängiger einsetzen zu können und soll er auf externe Ortungssysteme (GPS, Galileo, Erdmagnetfeld, u.Ä.) verzichten können da nicht jeder Anwendungsfall und/oder Ort den den Empfang dieser ermöglichen kann oder beim Verbindungsabbruch unvorhersehbar reagieren könnte. Um dies zu ermöglichen muss der Roboter seine zurückgelegte Strecke aufzeichnen oder sich an markanten Punkten orientieren und wieder erkennen.

II. VORBETRACHTUNGEN

A. Abbildung und Verzerrung

Bei dem Erstellen von Karten oder Plänen, wie sie uns meistens begegnen, werden Vereinfachungen und gewisse Annahmen gemacht die einem oft nicht bewusst sind. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur 'kleine' Räume und Umgebungen beachtet die sich in einer Ebene befinden. Wird der Raum jedoch größer müssen weitere Faktoren in Betracht gezogen werden und auch gemessen werden. Dies spielt in der Nachbearbeitung und Darstellung der aufgenommenen Messwerte eine Rolle. Als eine der bekanntesten und am stärksten ausgeprägte Verzerrungen sei hier die Mercator-Projektion genannt. Die den Globus in ein Rechteck projiziert und eine Winkel- aber nicht Flächentreue Karte umwandelt.

B. Höhlenforschung

Um einen unbekanntem Raum zu vermessen wurde sich an Beispiele der Höhlen Vermessung orientiert da diese grundsätzlich für unbekanntem Räume genutzt wird. Hier gibt es verschiedene Ansätze für unterschiedliche Höhlenabschnitte auf zu zeichnen um sie später als Karte wiedergegeben zu können. Die auf der Abbildung 1 dargestellten Methoden sind für die manuelle Vermessung gedacht in Kombination mit Maßband und Winkelmesser. So kann für die Vermessung mit dem Roboter weit mehr Messungen vorgenommen werden, da die einzelnen Messungen durch die Nutzung von Ultraschall schneller vorgenommen werden können als mit einem Maßband, bei dem die Strecke zurück gelegt werden muss. Durch den Aufbau des Roboters ist die Sternvermessung naheliegend. Die Sternvermessung ist für einen größeren Hohlraum gedacht bei der manuellen Vermessung und wird daher selten für für schmalere Gänge genutzt siehe 'Zick-Zack-Vermessung'.

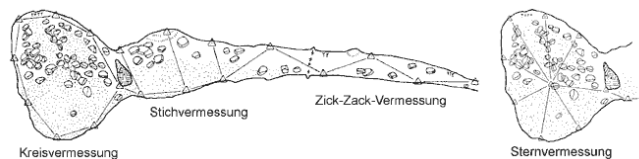


Abbildung 1. Vermessungsmethoden der Höhlenvermessung

C. Sensorwahl und Positionierung

Um die Entfernung zu messen wurde der Ultrasonic-Sensor von Lego NXT genutzt. Dieser sendet einen Ultraschallimpuls aus und errechnet durch die Laufzeit der Reflexion die Entfernung der Oberfläche von der die Ultraschallwelle reflektiert wurde. Der Messbereich reicht von 0 bis 255cm.

Um mehrere Messungen machen zu können ohne den Roboter selbst zu bewegen wurde der Sensor drehbar mittig über dem Roboter angebracht. Somit kann Rund um den Roboter die Umgebung vermessen werden ohne das sich der Roboter relativ zum Raum bewegt. Diese Position wurde auch gewählt um die Sternvermessung zu begünstigen. Würde der Sensor

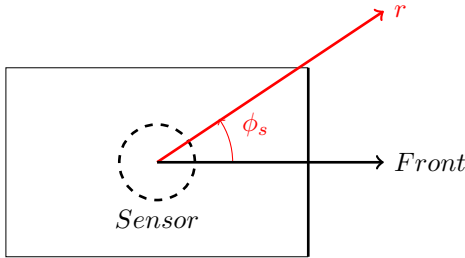


Abbildung 2. Schematische Darstellung des Roboters und position gemessener Werte

beispielsweise fest am Roboter angebracht sodass der Roboter sich um seine eigene Achse drehen müsste, müsste der genaue Drehpunkt ermittelt werden. Wohingegen der drehbar gelagerte Sensor immer auf der gleichen Bahn sich um den Roboter dreht und der systematische Fehler durch eine einzelne Messung ermittelt werden kann. So werden nun jeweils die Entfernungen und der dazu gehörige Winkel zwischen Fahrtrichtung und Sensorausrichtung aufgezeichnet. Die Werte Paare die sich bei der Entfernungsmessung ergeben können direkt als Polarkoordinaten dargestellt werden. Die für die leichtere Darstellung als Karte in der Nachbearbeitung zu kartesischen Koordinaten transformiert werden.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = r \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi_s) \\ \sin(\phi_s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Der zuvor genannte systematische Fehler entspricht dem Radius der Kreisbahn r_k auf der sich der Sensor um den Roboter bewegt.

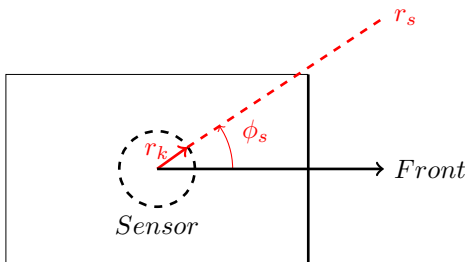


Abbildung 3. Darstellung des systematischen Fehlers bei der Messung der Entfernung durch die Drehung des Sensors auf einer Kreisbahn

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = r_s \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi_s) \\ \sin(\phi_s) \end{bmatrix} + r_k \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi_k) \\ \sin(\phi_k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Darüber hinaus kann durch die Anordnung des Sensors die gemessene Entfernung als die Normale auf der Kreisbahn des Sensors betrachtet werden womit

$$\phi_s = \phi_k$$

ist. Wodurch die Transformation (2) zu

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (r + r_k) \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi_s) \\ \sin(\phi_s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

vereinfacht werden kann. Durch diese Transformation wurden nun aus polar Koordinaten kartesische Koordinaten. Ein weiterer Sensor der verwendet wurde ist der Gyroscopic Sensor von HiTec der die Winkelgeschwindigkeit messen kann. Womit beim Anfahren verschiedener Messpunkte die Verdrehung des Roboters zu seiner Vorherigen Position gemessen werden kann.

D. Koordinaten Transformation

Da der Raum von mehreren Punkten aus vermessen wird, muss zwischen einzelnen Messreihen unterschieden werden. Alle Messungen von einem Punkt aus werden als lokale Koordinaten bezeichnet, sie beschreiben die unmittelbare Umgebung um den Roboter. Um die Darstellung zu verbessern oder auch weitere Räume zuerkennen müssen mehre Punkte angefahren von denen aus lokale Koordinaten auf genommen werden. Diese, lokalen polar Koordinaten, können mit (1) in der Nachbearbeitung in kartesische Koordinaten transformiert werden. Zunächst in lokale kartesische Koordinaten danach in globale kartesische Koordinaten. Global beschreibt hierbei das räumliche Verhältnis der einzelnen lokalen Messreihen zueinander. Um die einzelnen lokalen kartesischen Koordinaten zusammenzufügen zu globalen kartesischen Koordinaten wird der Punkt von dem aus gemessen wurde, die Roboter Position, der einzelnen lokalen Messreihen als Translation interpretiert. So muss nun jede Messreihe um die neue Roboter Position verschoben werden. Um diese Rechenoperationen durch Matrixmultiplikation zu vereinfachen werden die lokalen Koordinaten um eine z Koordinate erweitert. Die erweiterte z Koordinate hat keinen Einfluss auf die Messwerte bei den Transformationen, sie hat den Betrag 1, gleichzeitig ermöglicht sie die spätere Erweiterung auf eine 3. Dimension.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bei dieser Translation wird jedoch nicht die Verdrehung des Roboters beachtet die entstehen kann wenn ein neuer Messpunkt angefahren wird. Daher werden die neuen lokalen koordinaten beim umrechnen in globale Koordinaten ebenso mit einer Rotation um die vom Gyroscopic Sensor aufgenommene Drehung des Roboters erweitert.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Die Translation(4) und Rotation(5) können zu (6) zusammen gefasst werden.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & t_x \\ -\sin \theta & \cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6)$$

E. Odometrie

Im Rahmen des Blockseminars wurde eine Aufgabe bearbeitet die sich mit Odometrie befasst hat und dem daraus entstehenden Fehler. So ist auch hier, ähnlich wie unter 'Abbildung und Verzerrung', zu erwähnen das durch Übersetzungen, Spiel und Schlupf geringe Fehler bei der Ausrichtung des Roboters als auch der Sensor Positionierung auftreten können und somit eine hohe Genauigkeit nicht gegeben ist. So wurden experimentell ermittelt das 20000 MotorCounts den Sensor auf seiner Kreisbahn einmal um den Roboter fahren, was theoretisch zu einer Auflösung von

$$\frac{360 \text{ deg}}{20000 \text{ MotorCount}} = 0,018 \frac{\text{deg}}{\text{MotorCount}}$$

führt, die aber im Angesicht der verwendeten Bauteile nicht realistisch erscheint. Ebenso ist anzunehmen das es nicht genau 20000 MotorCounts sind.

III. HAUPTTEIL

Einzelne Funktionsgruppen wie Roboter, Messwertaufnahme, Koordinaten Transformation und Motorenansteuerungen wurden Schrittweise programmiert und separat getestet und schrittweise zusammengeführt.

A. Konstruktion

Das Roboter Fahrgestell wurde zu großen Teilen dem Standard Lego-Mindstorms NXT Set entnommen. Lediglich der dritte Motor wurde rückwärtig angebracht um eine hinzugefügte Sensorplattform die sich oben am Roboter befindet anzutreiben. Der antrieb ist durch Ketten realisiert die unabhängig von einander angesteuert werden können. Der Gesamt Aufbau wurde möglichst flach und zentralisiert gehalten damit der Ultrasonic Sensor sich frei und ohne Hindernisse über den Roboter drehen kann. Ebenso wurde der Gyroscopic Sensor von HiTec mittig vom Roboter angebracht um die Abweichung zwischen dem gemessenen Drehwinkel und dem Drehwinkel des Roboters so gering wie möglich zuhalten. Die Sensoreinheit zur Entfernungsmessung besteht aus einer Drehscheibe mit Kabeldurchführung damit das Sensorkabel nicht vor den Empfänger geraten kann.

B. Entfernungsmessung

Die Drehscheibe mit dem Ultrasonic Sensor wird über eine Schnecke angetrieben was zu einer langen Zeit für eine 360° Drehung führt (22-23 Sekunden), die es jedoch ermöglichte durchgehend Messungen vorzunehmen. In ersten Konstruktionen, bei denen der Sensor, je nach vorgegebener Auflösung, sich ein Stück gedreht und dann eine Messung vorgenommen hat, musste Anfahren und Abbremsen der Sensorhalterung abgewartet werden, da diese zu einer Verfälschung des am Motor gemessenen Winkels und dem tatsächlichen Winkel geführt hat. Die ersten Konstruktionen waren noch nicht durch eine Schnecke angetrieben. Der Antrieb über eine Schnecke erwies sich als hilfreich, da sich so die Sensoreinheit nicht leicht durch Außeneinwirkung verdrehen lässt. Die korrekte Zuordnung der Winkel und Entfernungen wurde experimentell überprüft durch den Vergleich von dargestellten polar Koordinaten und Gegenständen in der Messumgebung.

C. Verifizierung von Algorithmen

Für die Nachbearbeitung der Messwerte ist es wichtig das jeder einzelne Algorithmus für sich funktioniert und Messwerte nicht verfälscht oder unbrauchbar gemacht werden. Um die Transformationen zu verifizieren wurde der Algorithmus mit Daten aus der vorherigen Entfernungsmessung gespeist und mit festen Rotationen und Translation transformiert. Ebenso wurde eine Array erstellt das sich nach jeder Messwertaufnahme erweitert um neue Messwerte nach der Transformationen von lokalen in globale Koordinaten abzuspeichern.

D. Transformation in Verbindung mit Roboterbewegung

Die Aufzeichnung einer Messreihe, sprich einem Satz lokaler Koordinaten, ist in sich kohärent. Die erste Messreihe lokaler Koordinaten entspricht den gleichen in globalen Koordinaten, da der Roboter sich noch nicht bewegt hat und keine Messungen zuvor eingetragen hat mit denen er sie in Relation bringen muss. Wird nun ein zweiter Satz lokaler Koordinaten hinzugefügt muss die neue position des Roboters genau bestimmt werden. Hier für wurden zwei Möglichkeiten getestet. Bei der ersten Methode wurde die zurück gelegte Strecke bei vorgegebenen MotorCount vermessen und mehrmals wiederholt und gemittelt. Bei dieser Methode wird ein zufälliger Fehler erzeugt. Bei gleichbleibenden MotorCount Variierte die zurück gelegte Strecke um einen bis zwei Centimeter auf 14cm Strecke. Die zweite Methode nutzt einen zweiten Ultrasonic Sensor der in die Fahrriichtung zeigt und somit die zurückgelegte Strecke ermittelt durch ein Objekt das sich in der Fahrriichtung befindet. Diese Methode hat eine offensichtliche Einschränkung, wenn sich kein Objekt oder Wand in der Fahrt Richtung befindet kann die zurück gelegte strecke nicht ermittelt werden. Bei versuchen ergaben sich durch abweichende Messungen um Teil ein doppelt so hohe zurückgelegte strecke wie tatsächlich zurückgelegte Strecke. Auffällig waren das die stark Abweichenden Messwerte beim anfahren und abbremsen auf traten, da der Roboter zum Nicken neigt.

IV. ERPOBUNG

Um die Raumvermessung zu erproben und Fehler zu erkennen wurde eine Testumgebung aufgebaut. Diese beinhaltete eine lange Wand und auf der anderen Seite zufällig aufgestellte Rechteckige Kartons. Der Test lauf beinhaltete die Aufnahme von lokalen Koordinaten, ein Stück grade ausfahren und wieder Koordinaten aufnehmen und dies vier weitere male. Auffällig waren Messwerte die unabhängig von der Umgebung in einem Kreis von 20cm entfernung um den Roboter waren. Durch eine Anpassung der Sensoraufnahme konnten diese Fehler unterdrückt werden. Dabei wurde r_k vergrößert. Bei weiteren Erprobungen konnte aus den Messdaten kann eine Punktwolke erzeugt werden. Die sich ergebene Punktwolke lässt den vermessenen Raum erahnen jedoch weicht die Punktwolke stark von dem tatsächlich vorliegendem Raum ab. So gibt es Verzerrungen und 'wandernde' und 'plötzlich' auftauchende Oberflächen.

A. Verzerrung

Am deutlichsten sind die Verzerrungen an geraden Wänden zu erkennen die als Bögen dargestellt werden. Die Ursache für diese Verzerrungen ist das Messverfahren mit Ultraschall. Die Abstrahlung von Ultraschall erfolgt nicht Linienförmig wie Abbildung 2 nahelegt. Die Ultraschallwellen breiten sich vom Sensor in einem Kegel aus. So kommt es dazu das der Ultraschallimpuls, der ausgesendet wurde, an einer Oberfläche reflektiert wird auf die der Sensor nicht ausgerichtet ist. Die Entfernung die gemessen wird stimmt jedoch nicht der ihr zu geordnete Winkel.

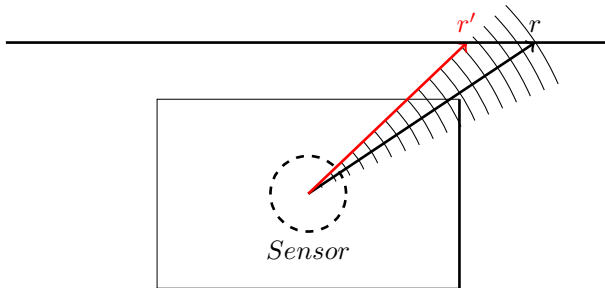


Abbildung 4. Aliasing von Oberflächen am Beispiel einer geraden Wand

B. 'Wandernde' Oberflächen

Die 'wandernde' Oberflächen bzw. Messwerte stimmten mit der Position einer in leichte Plastikfolie gehüllte Mülltonne am rand. So scheint die Messung mit Ultraschall nicht für leichte und bewegliche Oberflächen geeignet. Um dem auf den Grund zu gehen müssen noch weitere Oberflächen und Vergleichsmessungen vorgenommen werden.

C. 'plötzlich' auftauchende Oberflächen

Während den Messungen wurde ein Karton in den ersten Positionen nicht erkannt, der Sensor die maximale Entfernung ausgab, jedoch in einer weiteren Messung den Karton direkt neben sich anzeigte. So ist hier der Winkel in dem die Ultraschallwellen auf die Oberflächen treffen die Ursache. Ist der Winkel unter dem die Ultraschallwelle auf die Oberfläche trifft zu spitz reicht die Amplitude, der zum Sensor zurück geworfenen Welle, nicht aus um die Sensorschaltung zu Triggern.

D. Positionsbestimmung

Beide zuvor erwähnten Möglichkeiten um die zurückgelegten strecken zu messen wurden getestet ebenso der Gyroscopic Sensor um die Drehungen des Roboters aufzunehmen. Die gemittelte zurückgelegte Strecke hat wie schon erwähnt von Messung zu Messung eine Streuung die immer größer wird. Die gemessene zurückgelegte Strecke, mit dem zusätzlichen Sensor, machte die gesamte Transformation unbrauchbar, ein Raum konnte nicht erkannt werden. Das selbe gilt auch für den Gyroscopic Sensor.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Es ist möglich mit dem Lego-Mindstorm NXT einen Roboter zur Kartographierung zu konstruieren. Die Ergebnisse aus dem Projektseminar eignen sich noch nicht um eine Karte oder Lageplan zu erstellen. Das Problem besteht nicht in der Messwertaufnahme oder der Transformation. Hier stellt die Interpretation der Messwerte die größere und komplexere Aufgabe dar. Um die zurückgelegte Strecke und auch den Drehwinkel des Roboters besser zu erfassen können weitere Algorithmen entwickelt werden die auch die Umgebung mit einbeziehen um zum Beispiel Verzerrungen zurück zurechnen oder sich an markanten Punkten zu orientieren.

QUELLEN

Abbildung 1 :[On Station, George Dasher, NSS 1994, S. 45]