

# Autonome Exploration und 3D-Modellierung der Umgebung eines Roboters

Andreas Nüchter

[andreas@nuechti.de](mailto:andreas@nuechti.de)

Institut für Informatik III  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Fraunhofer Institut für Autonome Intelligente Systeme  
Schloss Birlinghoven, Sankt Augustin

Betreuer der Arbeit: PD Dr. J. Hertzberg (AIS und Universität Bonn), Dr. H. Surmann (AIS),  
Prof. Dr. A. B. Cremers (Universität Bonn)

Art der Arbeit: Diplomarbeit

Fachbereich: 1

## Zusammenfassung:

Autonome mobile Roboter müssen in der Lage sein, sicher durch ihre Umgebung zu navigieren, um anwendungsspezifische Aufgaben ausführen zu können. Gelingen kann dies nur durch den Einsatz von 3D-Sensoren und 3D-Karten. Daher ist die automatische und schnelle 3D-Modellierung der Umgebung eine wichtige Fragestellung in der Robotik. 3D-Laserscanner sind eine junge Technologie, die die Erfassung räumlicher Daten revolutioniert und Robotern das dreidimensionale Abtasten von Objekten möglich macht. Die vorliegende Arbeit untersucht und evaluiert die zur autonomen 3D-Kartenerstellung notwendigen Algorithmen mit Hilfe des AIS 3D-Laserscanners, der sich auf einer geeigneten Roboterplattform befindet. Das entwickelte System ermöglicht das berührungslose Abtasten der gesamten Umgebung. Dafür werden mehrere 3D-Scans zu einer konsistenten Szene zusammengefügt sowie Scanpositionen generiert.

## 1 Problemstellung

Ein Roboter soll so programmiert werden, dass er seine Umgebung exploriert und eine 3D-Karte von ihr erstellt [4]. Der Roboter muss nicht nur seine ihm unbekannt Umgebung erfassen, sondern auch ein konsistentes Modell von ihr erstellen. Er muss sicher navigieren und fahren können, sowie ermitteln, wo interessante Positionen sind, die die Erforschung des noch unbekanntes Terrains erlauben. Bei der zu explorierenden Umgebung soll es sich um normale Gebäude handeln. Es werden keine Veränderungen in Form von Landmarken oder Strukturvereinfachungen vorgenommen. Als Roboter dient die Ariadne Roboterplattform. Dieses 60 cm × 80 cm × 80 cm große und 250 kg schwere, fahrerlose Transportsystem wird mit dem AIS 3D-Laserscanner [2,3,4] und einem PIII-800 Notebook erweitert. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen den AIS 3D-Laserscanner und das Robotersystem.

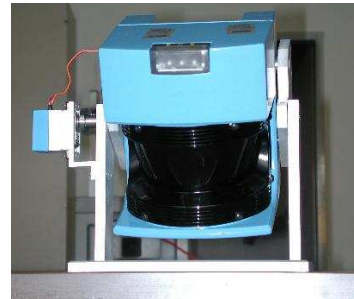


Abbildung 1: AIS 3D-Laserscanner

## 2 Scanmatching

Das vollständige Erfassen von komplexen Objekten und Szenen erfordert das Scannen von mehreren Roboterpositionen aus. Nach dem Scannvorgang werden die aufgenommenen 3D-Scans so aneinandergefügt, dass sie die Objekte und die Szene richtig repräsentieren. Das Aneinanderfügen von Scans heißt Registrieren. Ist die Position des Scanners und damit jene des Roboters genau bekannt, können die 3D-Scans auf der Grundlage dieser Position registriert werden. Leider ist die Selbstlokalisierung des Roboters mit einem Fehler behaftet. Daher stellt sich die Frage: Wie ist die Lage der 3D-Scans zueinander? Das Zusammenfügen der 3D-Scans darf deshalb nicht nur auf der Roboterposition basieren, sondern muss auch auf der Grundlage der 3D-Scans selbst geschehen. Letzterer Vorgang heißt Scanmatching.

Für das Matching von 3D-Scans, die sich überlappen, wurden in den letzten Jahren verschiedene Verfahren entwickelt, die folgendermaßen unterteilt werden:

- Matching als Optimierungsproblem. Das Registrieren als Optimierungsproblem bedeutet, eine Kostenfunktion für die Qualität eines Matchings einzuführen. Die Registrierung der 3D-Scans erfolgt über eine Suche nach derjenigen Transformation, die die Kostenfunktion minimiert. Unterschiedliche Kostenfunktionen und Transformationssuchstrategien wurden bereits erforscht.



Abbildung 2: Ariadne Roboterplattform, ausgestattet mit dem AIS 3D-Laserscanner

- **Merkmalsbasiertes Matching.** Dieses Verfahren basiert auf der Suche nach verschiedenen Merkmalen in zwei zu registrierenden 3D-Scans. Aus der Korrespondenz zwischen gleichen Merkmalen kann anschließend die Lage der Scans bestimmt werden. Diese Technik benötigt kein Vorwissen über die Transformation, ist aber wegen der Merkmalsextraktion rechenaufwendig.

## 2.1 Matching als Optimierungsproblem — Der iterative Algorithmus der nächsten Punkte

Gegeben sei eine Menge von 3D-Punkten  $M = \{m_i \mid m_i \in R^3, i = 1, \dots, N_m\}$ . Für einen 3D-Scan mit der Datenmenge  $D = \{d_i \mid d_i \in R^3, i = 1, \dots, N_d\}$  sind eine Rotation  $\mathbf{R}$  sowie eine Translation  $\mathbf{t}$  gesucht, die beide Mengen korrekt ineinander abbilden. Dabei muss die Fehlerfunktion

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_d} w_{i,j} \|m_i - (\mathbf{R}d_j + \mathbf{t})\|^2 \quad (1)$$

minimiert werden.  $w_{i,j}$  nimmt hierbei den Wert 1 an, falls die Messpunkte  $m_i \in R^3$  und  $d_j \in R^3$  den gleichen Punkt darstellen. Die Minimierung von (1) muss mit der Maximierung von

$$\sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_d} w_{i,j} \quad (2)$$

einhergehen. Trifft dies nicht zu, ist die triviale Lösung  $w_{i,j} = 0 \quad \forall i, j$  zulässig, was der Idee des Scanmatchings widerspricht.

Der iterative Algorithmus der nächsten Punkte [4] (iterative closest points (ICP)) stellt einen allgemeinen Rahmen für die Registrierung von 3D-Tiefenbildern dar. Die fundamentalen Schritte des Algorithmus sind:

1. Für jeden Punkt  $d_i \in R^3$  berechne bzw. suche den am nächsten gelegenen Punkt in  $M$ . Es werden die für (1) benötigten  $w_{i,j}$  bestimmt.
2. Berechne aus der in Schritt 1 bestimmten Korrespondenz die Transformation  $\mathbf{R}$  und  $\mathbf{t}$ , die die Fehlerfunktion  $E(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  (1) minimiert. Dies gelingt in geschlossener Form durch die Darstellung der Rotation  $\mathbf{R}$  als Einheitsquaternion.
3. Wende die in Schritt 2 gefundene Transformation auf die Menge  $D$  an.
4. Berechne die Differenz des durchschnittlichen quadratischen Fehlers. Falls diese Differenz kleiner als ein Schwellenwert ist, terminiere. Ansonsten gehe zu Schritt 1.

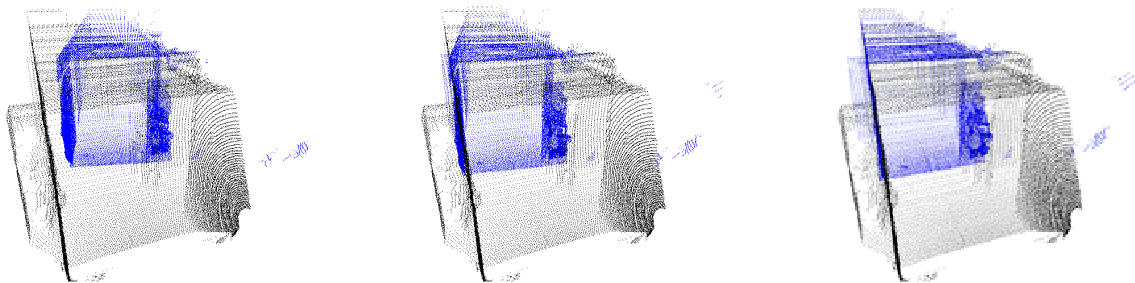


Abbildung 3: Visualisierung der Ergebnisse des ICP-Algorithmus. Die anfängliche Lage zweier 3D-Scans und die nach der 5. und 10. Iteration sind dargestellt. In jedem Iterationsschritt wird eine Rotation  $\mathbf{R}$  und Translation  $\mathbf{t}$  errechnet und auf den zweiten 3D-Scan angewendet.

Es kann nachgewiesen werden, dass der obige Algorithmus konvergiert und ein lokales Minimum findet. Die Abbildung 3 zeigt die anfängliche Lage zweier 3D-Scans und die nach dem fünften und 10. Iterationsschritt. Das Scanmatching benötigt weniger als 2 Sekunden (PIII-600), wenn eine anfängliche Positionsschätzung durch die Odometrie des Roboters vorliegt.

## 2.2 Matching mehrerer 3D-Scans

Erst eine Registrierung vieler Scans erlaubt das vollständige Erfassen von Szenen. Beim Matching mehrerer 3D-Scans muss der beim Registrieren zweier Punktmengen auftretende Fehler global minimiert werden, damit die entstehende Szene konsistent ist. Folgender Algorithmus verteilt den Fehler gleichmäßig über alle 3D-Scans:

1. In einem Vorverarbeitungsschritt benutze paarweises Matching, wende also den ICP-Algorithmus auf den zu registrierenden 3D-Scan und die Punktmenge der bereits vorhandenen 3D-Scans an.
2. Initialisiere eine Liste mit dem zu registrierenden 3D-Scan.
3. Solange die Liste nicht leer ist, führe folgende Schritte aus:
  - (a) Der aktuelle Scan ist das vorderste Element der Liste und dieser Scan wird aus der Liste entfernt.
  - (b) Falls der aktuelle Scan nicht der Masterscan ist, bestimme seine Nachbarn und registriere ihn anhand der Menge der Nachbar-Scans.
  - (c) Falls der aktuelle Scan seine Lage ändert, füge die Nachbar-Scans der Liste hinzu.

Dieser Vorgang dauert wenige Sekunden (<1 Minute). Soll Scanmatching online auf einem Roboter eingesetzt werden, ist paarweises Matching (jeweils 2 3D-Scans Zusammenfügen) vorzuziehen. Das Matching korrigiert dabei gleichzeitig die Pose (Position und Orientierung) des Roboters.

### 3 Die optimale nächste Scanposition

Der Aufbau kompletter digitaler 3D-Modelle erfordert nicht nur das Zusammenfügen von 3D-Scans, sondern auch die Berechnung der optimalen nächsten Scanposition. Diese sollte einerseits möglichst viel Information über die Umgebung liefern und andererseits für den Roboter einfach anzufahren sein. Folglich stellt sich nach jedem Scan immer wieder die Frage: Wohin muss der Roboter fahren, um eine möglichst optimale Position für den nächsten 3D-Scan zu erreichen? Die Antwort auf das Explorationsproblem geben so genannte Nächste-beste-Sicht (engl.: next best view) Algorithmen. Sie ermitteln die optimale nächste Scanposition.

Drei Schritte werden benötigt, um den optimalen nächsten Scanpunkt zu errechnen:

1. Generiere ein Riss-Polygon aus einem 3D-Scan. Ein Riss-Polygon enthält detektierte Kanten, die durch hinzugefügte Linien verbunden sind, so dass sich hinter den hinzugefügten Linien Terrain befindet, das noch nicht gescannt wurde. Liegen mehrere 3D-Scans vor, erzeuge je Scan ein Riss-Polygon. Benutze in diesem Fall Scanmatching nur, um die Polygone richtig auszurichten, und füge die Riss-Polygone mit einem Polygon-Clipping Algorithmus aneinander.
2. Generiere eine ausreichend große Menge zufälliger Kandidatenpositionen innerhalb der als Riss-Polygon P gegebenen Karte der bekannten Roboterumgebung.
3. Berechne für jede Kandidatenposition den Teil des Riss-Polygons P, der von dieser Position aus zusätzlich sichtbar gemacht werden kann. Derjenige Kandidatenpunkt, der den größten Informationszuwachs verspricht und sich leicht anfahren lässt, ist der optimale nächste Scanpunkt.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen ein Riss-Polygon, mit eingestreuten Kandidatenpunkten, sowie den Weg des Roboters zur nächsten optimalen Scanposition. Der berechnete Weg führt kollisionsfrei an Hindernissen vorbei, die aus Grundlage der 3D-Scans ermittelt wurden (vgl. [2]). Für das Fahren des Roboters wird eine geschlossene Motorregelung verwendet, die aus den AIS Fußballrobotern (GMD Musashi) stammt [4].

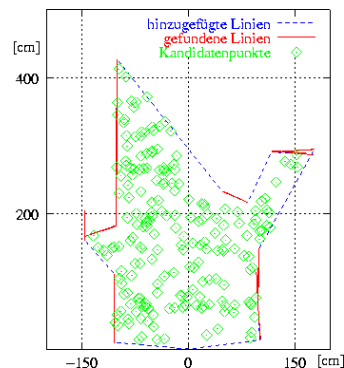


Abbildung 4: Riss-Polygon mit detektierten und hinzugefügten Kanten, sowie Kandidatenpunkte

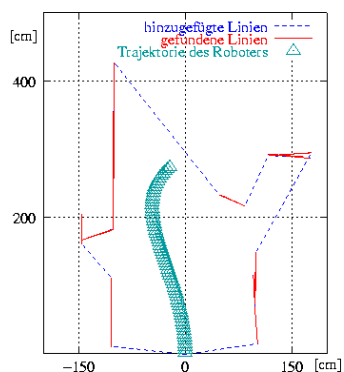


Abbildung 5: Trajektorie zur nächsten optimalen Scanposition

### 4 Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass sich der AIS 3D-Laserscanner zur Erstellung eines dreidimensionalen Weltmodells eignet [4]. Effiziente Algorithmen für diesen Sensor werden vorgestellt. Durch die Kombination des 3D-Laserscanners und des Roboters mit den ausgefeilten Algorithmen entsteht ein geschlossenes System zur schnellen Exploration und Modellierung von Umwelten. Scanmatching fügt 3D-Scans zu einer konsistenten Szene zusammen und korrigiert dabei gleichzeitig die Roboterposition. Das Planungsmodul liefert Positionen, von denen aus effizient unbekanntes Terrain erforscht werden kann. Des Weiteren wird eine Methode zur kollisionsfreien Robotersteuerung vorgestellt.

Literaturverzeichnis:

- [1] P. Besl, N. McKay. A method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239 - 256, Februar 1992.
- [2] Andreas Nüchter, Kai Lingemann, Ein 3D-Laserscanner für autonome mobile Roboter, in Tagungsband *Informatiktage 2001 - Fachwissenschaftlicher Informatik-Kongress*, Bad Schussenried, November 2001.
- [3] Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Andreas Nüchter, Joachim Hertzberg, A 3D laser range finder for autonomous mobile robots, in *Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics*, Korea, 2001.
- [4] Andreas Nüchter, *Autonome Exploration und Modellierung von 3D-Umgebungen*, Diplomarbeit an der Universität Bonn, Juli 2002.
- [5] Der AIS 3D-Laserscanner. <http://capehorn.gmd.de:8080/>.