

Ein 3D-Laserscanner für autonome mobile Roboter

Andreas Nüchter, Kai Lingemann

andreas@nuechti.de, lingeman@cs.bonn.edu

Institut für Informatik III

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Bewerber zur Teilnahme an den Informatiktagen 2001: Andreas Nüchter, Diplomand

Betreuer der Arbeit: PD Dr. J. Hertzberg (FhG-AiS und Universität Bonn), Dr. H. Surmann (FhG-AiS)

Art der Arbeit: Studienarbeit (gleichzeitig Basis für eine Diplomarbeit)

Fachbereich: FB1

Zusammenfassung:

Diese Arbeit stellt das Konzept und die Realisierung eines präzisen, leichten und preiswerten 3D-Laserscanners vor. Der 3D-Laserscanner ist als Sensor für autonome mobile Roboter geeignet, da Umgebungen im Bereich von 180° (horizontal) x 90° (vertikal) berührungslos in 1.35 – 16.2 Sekunden vermessen werden können. Dabei wird ein 2D-Laserscanner mittels eines Servomotors um eine horizontale Drehachse gedreht. Es kann eine Auflösung bis zu 194400 Punkten mit einer Genauigkeit von 1cm erreicht werden. Während des Scanvorgangs werden verschiedene Online-Algorithmen zur Linien- und Flächenerkennung eingesetzt. Anschließend wird das Tiefenbild segmentiert und Objekte werden detektiert.

1 Problemstellung

Mobile autonome Roboter müssen durch unbekannte Umgebungen navigieren können, um ihre Aufgaben wie Post austragen oder Staub saugen zu erledigen. Für diese grundlegenden Navigationsaufgaben standen bisher nur 2D-Laserscanner zur Verfügung, mit denen lediglich eine horizontale Abtastung der Umgebung möglich war. Derartige Systeme sind insbesondere nicht in der Lage, Hindernisse wie Tische oder Objekte mit überstehenden Kanten außerhalb der Scan-Ebene zu erfassen.

2 Aufbau des 3D-Laserscanners

Ein 2D-Laserscanner (Gewicht: 4.5kg, Größe: 35cm x 24cm x 24cm) wird um einen Freiheitsgrad erweitert, indem er durch eine Drehvorrichtung und einen Standard servomotor um eine horizontale Achse rotiert wird (vgl. Abbildung 1). Dabei wird der Servomotor über die parallele Schnittstelle direkt vom Hostcomputer angesteuert, und die Messdaten werden über ein serielles Interface an den Host übertragen. Der mechanische Aufbau bestimmt eine Reihenfolge in den Messdaten. Die Daten des 2D-Laserscanners sind gegen den Uhrzeigersinn geordnet, die einzelnen Scan-Ebenen sind durch die kontinuierliche Drehbewegung ebenfalls geordnet.

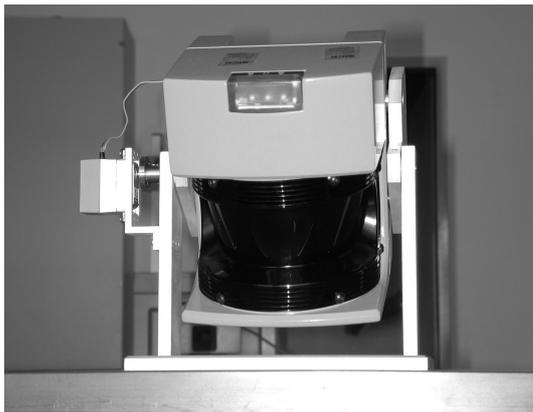


Abbildung 1: Der 3D-Laserscanner



Abbildung 2: der autonome mobile Roboter ausgestattet mit dem 3D-Laserscanner

Die maximale Scanauflösung für einen kompletten 3D-Scan eines Raumwinkels von 180° (horizontal) x 90° (vertikal) beträgt 194400 Punkte, die in 16.2 Sekunden gescannt werden können. 3D-Scans niedriger Auflösungen (z.B. 16200 Punkte) können in 1.35 Sekunden aufgenommen werden. Dabei ist die Genauigkeit abhängig vom verwendeten 2D-Laserscanner (Schmersal: 5cm, SICK: 1cm) und der Genauigkeit des Servomotors und der Servoansteuerung.

3 Implementierte Software Module

3.1 Real-Time Linux und Online-Algorithmen zur Linien- und Flächenerkennung

Der Servo wird direkt vom Echtzeitbetriebssystem RealTime-Linux angesteuert. Ein Servomotor erwartet einen TTL-Impuls alle 20ms. Dabei bestimmt die Länge des Impulses die Position des Servos (1ms = Links, 1.5ms = Mitte, 2ms = Rechts). Dies ist ein sehr zeitkritischer Job, da bereits eine Abweichung von 10µs zu einem Fehler von 1° führt. RealTime-Linux hat eine durchschnittliche Latenz von 5µs (PII-333) und somit kann die Rotation bis auf ein halbes Grad genau realisiert werden.

Während des Scans werden verschiedene Online-Algorithmen zur Linien- und Flächenerkennung eingesetzt. Der erste Schritt der Messdatenverarbeitung ist die Linienerkennung (vgl. Abbildung 4), die auf jedem 2D-Schnitt einzeln ausgeführt wird. Dabei kommen wahlweise zwei Algorithmen zum Einsatz: Ein einfacher Matching-Algorithmus oder die Hough-Transformation. Der Matching-Algorithmus betrachtet die Punkte in der von der Scan-Reihenfolge bestimmten Reihenfolge. Die Messpunkte a_0, a_1, \dots, a_n sind gegen den Uhrzeigersinn geordnet. Wenn die Punkte a_i, \dots, a_j bereits auf einer Linie liegen, ist die Bedingung, dass der Punkt a_{j+1} auf der Linie liegt:

$$\frac{\|a_i, a_{j+1}\|}{\sum_{k=i}^j \|a_k, a_{k+1}\|} < \epsilon().$$

Dieser Test kann sehr schnell ausgeführt werden, die Qualität der Linien ist jedoch wegen des Rauschens der Messdaten nicht optimal. Die Hough-Transformation ($O(c \cdot n)$, n = Anzahl der Scan-Punkte) liefert bessere Linien, ist jedoch nur begrenzt als Online-Algorithmus einsetzbar, da die Konstante c sehr groß wird.

Anschließend wird die 3. Dimension berücksichtigt. Aus den detektierten Linien werden sukzessive Flächen gebaut. Dabei wird eine Linie, bzw. die oberste Linie einer bereits vorhandenen Fläche, mit einer neu erkannten Linie vereinigt, falls folgende Kriterien erfüllt sind:

- Die Endpunkte der neuen Linien müssen in einer Epsilon-Umgebung der Endpunkte der bereits vorhandenen Linien liegen.
- Der Winkel zwischen den beiden Linien sollte einen gewissen Schwellenwert nicht überschreiten.
- Die neu erkannte Linie muß in der Ebene der bereits vorhandene Fläche liegen. Dieses sukzessive Vergrößern der Flächen ist als Online-Algorithmus implementiert, ausgeführt.

3.2 Polygon-Generierung

Die in Abschnitt 3.1 vorgestellte Flächendetektion liefert wegen des Rauschens innerhalb der Messdaten viele Flächen, die eventuell überlappen. Die Aufgabe der Polygon-Generierung ist es, die aus Linien aufgebauten Flächen in Polygone umzuwandeln und überlappende Polygone zu vereinigen. Die Polygonerzeugung erfolgt in 2 Schritten: Als erstes werden auf den Endpunkten aller Linien einer Fläche mittels eines Linienerkenners 3D Kanten erkannt. Dadurch wird die aus Linien bestehende Fläche in ein Polygon umgewandelt. Anschließend wird mittels Vatti's Polygon-Clipping-Algorithmus die Vereinigung von Polygonen gebildet, die auf einer Ebene liegen (vgl. Abbildung 5).

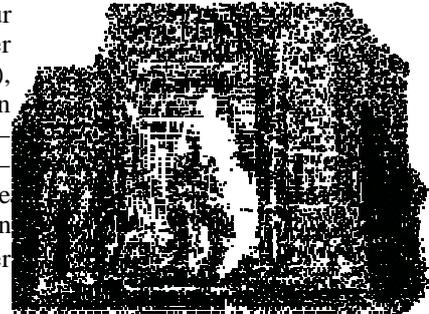


Abbildung 3: Messdaten des Beispielscans

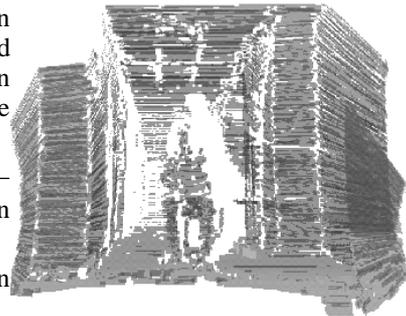


Abbildung 4: Linienerkennung angewendet auf jede Scan-Ebene

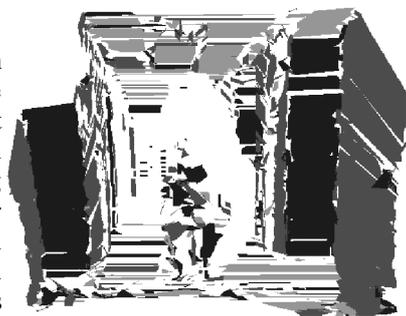


Abbildung 5: erkannte Flächen in der Polygondarstellung

3.3 3D-Objekt-Segmentierung

Algorithmen zur Objektsegmentierung werden benutzt, um 3D Karten der Szene zu erstellen. Ein sequenzieller Algorithmus vereinigt Punktwolken, Linien und Flächen/Polygone zu Objekten, welche durch eine Bounding-Box dargestellt werden.

Dabei werden folgende 3 Schritte ausgeführt:

- In einem Vorverarbeitungs-Schritt werden alle Flächen, deren Größe einen Schwellenwert übersteigt, direkt als Objekte markiert.
- Iteriere über die zuvor gefundenen Elemente und prüfe, ob für jedes Objekt ein weiteres "nahe genug" liegt. Dabei bemisst sich "nahe genug" bei der Anwendung für autonome mobile Roboter entsprechend der Roboter-Maße: Objekte, zwischen denen der Roboter nicht hindurch passt, werden in diesem Schritt vereinigt.
- Wenn ein solches Element gefunden wird, dann wird eines der beiden Objekte vergrößert, so dass die Bounding-Box beide Objekte umschließt.

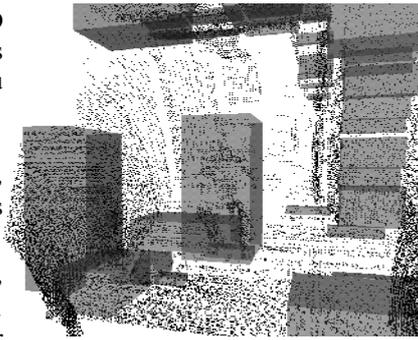


Abbildung 6: Detektierte Objekte

Dieser Algorithmus liefert eine Aufteilung der Szene in Objekte dergestalt, dass Akkumulationen von Punkten, Linien und/oder Flächen zu Objekten zusammengefasst und von ihrer Bounding-Box umschlossen werden. Diese Bounding-Box stellt nicht nur einen wichtigen Schritt zur Objekterkennung dar. Vielmehr ermöglicht sie das Umfahren dreidimensionale Hindernisse.

4 Ergebnisse

Zur Visualisierung der 3D Daten wird OpenGL eingesetzt. Die Abbildungen 2–5 zeigen eine Person, die in einem Flur auf einem Stuhl sitzt. Abbildung 2 zeigt die 115000 Messpunkte, die in 12 Sekunden aufgenommen wurden. In Abbildung 3 werden 1706 Linien dargestellt, die zu 175 Polygonen zusammengefasst werden (vgl. Abbildung 4). Diese Polygone sind aus 1083 Punkten aufgebaut. Der 3D-Objektsegmentierungsalgorithmus detektiert 38 Objekte (vgl. Abbildung 5).

Weitere Beispiele befinden sich in [1], [2] und unter <http://capehorn.gmd.de:8080>.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte 3D-Scanner basiert auf einem 2D-Scanner, wie sie heute schon üblicherweise auf autonomen Robotern eingesetzt werden. Zum sicheren Fahren braucht der Roboter Informationen über das Raumvolumen und nicht nur auf einer (Scan-)Ebene. Dafür benötigt er "flächige" Sensorik, die Online arbeitet. Digitale Bildverarbeitung wäre möglich, benötigt aber viel Rechenzeit. Der vorgestellte 3D-Laserscanner bietet dafür eine Alternative. Durch die Verbindung von Online- und Offline-Algorithmen wird die vorhandene Rechenzeit optimal genutzt und es können Objekte im Nahbereich können ab einer Größe von 5cm x 5 cm x 5cm erkannt werden und ein Roboter kann darauf reagieren.

Die zukünftige Arbeiten werden sich auf das Scanmatching und Viewpoint-Generierung, sowie das Scannen im Fahren fokussieren. Weitere Anwendungsgebiete für den 3D-Laserscanner sind beispielsweise:

- Facility Management Systeme. Diese benötigen aktuelle Informationen über Gebäude. Es wird versucht, ein digitales Gebäudemodell aktuell zu halten.
- Objektklassifikationssysteme. Es wird versucht, aus den 3D Informationen (Tiefenbildern) Objekte zu klassifizieren.
- 3D-Überwachungssysteme. Hierbei werden Einrichtungen und Anlagen überwacht, um zum Beispiel den Sicherheitsbereich von Maschinen zu kontrollieren.

Literaturverzeichnis

[1] Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Andreas Nüchter, Joachim Hertzberg, *Aufbau eines 3D-Laserscanners für autonome mobile Roboter*, GMD-Report 126, ISBN 3-88457-974-6, März 2001

[2] Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Andreas Nüchter, Joachim Hertzberg, A 3D laser range finder for autonomous mobile robots, in *Proc. of the 32nd International Symposium on Robotics*, April 2001