

Erkundung unzugänglicher Bereiche mit mobilen Robotern

Exploration of Inaccessible Areas Using Mobile Robots

Rainer Worst, Hartmut Surmann, Thomas Christaller

Fraunhofer-Institut für Autonome Intelligente Systeme (AIS), Sankt Augustin
E-Mail: *vorname.name@ais.fraunhofer.de*

Zusammenfassung

Erkundungsroboter ermöglichen das Vordringen in für den Menschen unzugängliche Bereiche und Räume sowie die Erfassung von Daten, die unter Umständen mit menschlichen Sinnesorganen nicht unmittelbar wahrgenommen werden können. Mit ihrer Hilfe erhält der Mensch Zugang zu diesen Welten und kann so bessere Handlungsentscheidungen treffen. Als besonders nützlich für viele dieser Aufgaben hat sich die Ausstattung eines mobilen Roboters mit einer 3D-Sensorik erwiesen. Die von dieser Sensorik generierten 3D-Punktwolken müssen dann aber durch geschickte Algorithmen in ein vollständiges 3D-Modell der erkundeten Umgebung zusammengesetzt werden. Weiterhin muss der Roboter seine Aufgabe abschnittsweise (teil-) autonom durchführen, weil eine (Funk-) Fernsteuerung nicht immer zuverlässig oder gar nicht funktionieren wird. Auf dem vom Fraunhofer AiS entwickelten mobilen Roboter KURT3D wurden derartige Verfahren entwickelt, implementiert und in verschiedenen Anwendungen, wie z. B. Kanalinspektion und Katastropheneinsatz, erfolgreich erprobt. Mit Daten aus der stillgelegten Mathies-Mine in Pittsburgh (USA), die uns von einem Forscherteam der CMU zur Verfügung gestellt wurden, wird die Anwendbarkeit des hier vorgestellten Ansatzes im Bergbau demonstriert.

Abstract

Exploration robotics allow robots to find their way into areas and spaces that are out of human reach in order to capture data that the sensory organs of human beings are not necessarily able to perceive directly. This helps mankind to get an access to these worlds and enables it to make better decisions on actions. The equipment of a mobile robot with 3D-Sensors proved as particularly useful for many of these tasks. Efficient algorithms are needed, to assemble the 3D point clouds generated by these sensors in a complete 3D model of the explored environment. Further, the robot must accomplish its task partial (semi-) autonomously, because (radio-) remote control will not always work reliably or not at all. Appropriate procedures were developed and implemented on the mobile robot KURT3D, which was developed by Fraunhofer AIS. They were tested successfully in different applications, including sewer inspection and rescue after disasters. The applicability of the presented approach in the mining industry is demonstrated with data from the abandoned Mathies mine in Pittsburgh (USA), which were provided to us by a research team of the CMU.

1 Einleitung

Für die Planung, Modellierung und Durchführung von Aufgaben im Bergbau werden aktuelle und genaue Daten der Arbeitsumgebung benötigt. Diese sind insbesondere

in für den Menschen unzugänglichen Bereichen schwierig zu erhalten. Vergleichbare Aufgabenstellungen finden sich aber auch in der Automatisierungstechnik (Fabrikhallen), in der Architektur, in der Landwirtschaft, im Tunnelbau und in der Kanalinspektion wieder. Die benötigten Messgeräte werden entweder von Menschen zu den Messpunkten gebracht, oder wo das nicht möglich oder zu gefährlich ist, müssen mobile Roboter diese Aufgabe übernehmen. Hier haben besonders Systeme mit einer 3D-Sensorik, die entweder auf Kameras oder Laserscannern basieren können, ein großes Potential. Ein mit 3D-Sensorik ausgestatteter Roboter kann damit nämlich nicht nur Messdaten über seine Umgebung zum Zwecke ihrer Modellierung erfassen, sondern er kann diese Information auch verwenden, um in dem unbekanntem Terrain selbstständig zu navigieren und Karten anzulegen. Das setzt allerdings voraus, dass diese Information auf dem Roboter in Echtzeit verfügbar gemacht wird.

Das Problem der automatischen Erfassung und Modellierung einer Umgebung ist komplex, weil eine Reihe schwieriger Themen zu behandeln sind: Autonome Navigation eines mobilen Roboters, Ortung des mobilen Roboters, Datenerfassung mit einer 3D-Sensorik in Echtzeit, Zusammenbau eines konsistenten Modells aus einzelnen Aufnahmen von verschiedenen Standpunkten aus unter Berücksichtigung des Roll-, Nick- und Gierwinkels des Roboters. In dem hier vorgestellten Ansatz wird eine schnelle Variante des Iterative Closest Point (ICP)-Algorithmus verwendet, um die einzelnen Aufnahmen in einem gemeinsamen Koordinatensystem zu registrieren und zugleich den Roboter selbst zu orten. Der Algorithmus arbeitet in Echtzeit, weil zwei Verbesserungen vorgenommen wurden. Zum einen werden die 3D-Daten jeder einzelnen Aufnahme sinnvoll reduziert und zum anderen wird die aufwendige Suche nach benachbarten Punkten in den zwei unterschiedlichen Scans mittels sogenannter kd-Bäume realisiert.

Das Verfahren wird im Folgenden näher vorgestellt und zum Teil am Beispiel der Erkundung der stillgelegten Mathies-Mine in Pittsburgh (USA) demonstriert. Die kartographische Erfassung von Hohlräumen unter Tage ist schon deshalb von Bedeutung, um eventuell von ihnen ausgehende Gefahren für die öffentliche Sicherheit rechtzeitig zu erkennen. Wenn Karten von stillgelegten Bergwerken existieren, dann häufig nur in 2D. Das reicht nur zum Teil aus, um den strukturellen Zustand zu beurteilen. Möglichst genaue 3D-Modelle erlauben hier eine präzisere und realistische Einschätzung möglicher Störungen oder Gefahren. Welcher Nutzen sich durch den Einsatz von Laserscannern unter Tage erzielen lässt, ist schon in [BENECKE 2005] näher ausgeführt.

Gefährliche Betriebsbedingungen und schwierige Zugänge legen es nahe, die Kartierung mit Hilfe mobiler Roboter als eine Alternative zu der herkömmlichen manuellen Kartierung vorzunehmen. In der Tat ist es keine neue Idee, Bergbaustollen mit Hilfe mobiler Roboter zu vermessen. In [CORKE 1996] werden Fahrzeuge beschrieben, die genaue 2D-Karten von Stollen erzeugen und nutzen. Ähnlich berichtet [BAILEY 2002] über die 2D-Kartierung unter Tage. Das in diesem Beitrag vorgestellte Beispiel der Mathies-Mine verwendet Daten des Roboters Groundhog, der an der Carnegie Mellon University (CMU) entwickelt wurde ([FERGUSON 2003] und [THRUN 2003]) und sich ebenfalls auf 2D-Karten für die Erkundung und Kartierung aufgebener Bereiche verlässt. Sowohl Groundhog als auch eine Bohrlochsonde namens Ferret [MORRIS 2003] verwendet lokale 3D-Aufnahmen für die Navigation und die Geländebeurteilung; jedoch kann keines dieser Geräte mehrere 3D-Aufnahmen integrieren und vollständige und konsistente 3D-Darstellungen aufgebener Bereiche erzeugen.

2 Der mobile Roboter KURT3D

Die hier vorgestellten Verfahren wurden zum größten Teil auf mobilen Robotern des Typs KURT3D entwickelt und erprobt. KURT3D verkörpert die jüngste Generation des Systems KURT (Kanal-Untersuchungs-Roboter-Testplattform), das im Fraunhofer-Institut AIS ursprünglich für die Inspektion von Abwasserkanälen entwickelt wurde. KURT3D ist 45 cm lang, 33 cm breit, 47 cm hoch und wiegt insgesamt 22,6 kg.

Die Mechatronik der Plattform ist hauptsächlich in einem robusten Gehäuse aus glasfaserverstärktem Kunstharz (GFK) untergebracht. Links und rechts befinden sich je drei Räder zur Fortbewegung, die auf jeder Seite über einen Zahnriemenantrieb miteinander verbunden sind und jeweils von einem 90 W-Motor angetrieben werden. Als Energiequelle für den Antrieb und die Hauptplatine dient ein Paket von 20 NiMH-Akkus mit einer Nennspannung von 24 V und einer Nennkapazität von 4500 mAh. Damit ist praktisch eine ununterbrochene Betriebszeit von etwa 4 Stunden möglich.

Die Sensorik/Aktorik ist an einen 16-Bit-Mikrocontroller des Typs Infineon C167CR angeschlossen. Die Rechenleistung des Roboters liefert ein PC – entweder im PC104-Format oder in Form eines robusten Notebooks, z. B. Panasonic Toughbook mit einem 1.4 GHz Pentium IV. Die Verbindung zwischen PC und Mikrocontroller wird durch einen CAN-Bus hergestellt, über den Sensorwerte und Stellgrößen für die Motoren mit einer Rate von 1 Mbit/s übertragen werden können.

Über eine serielle RS422-Schnittstelle ist an den PC außerdem ein 3D-Laserscanner mit 500 Kbit/s angeschlossen, der die schnelle und präzise Erfassung ganzer Oberflächen in Form von 3D-Punktwolken erlaubt. Dieser vielseitig nutzbare Sensor wird über ein zusätzliches Akku-Paket mit Energie versorgt.

Es gibt zwei Varianten von KURT3D: einen Indoor-Roboter, der für strukturierte Innenräume und hohe Geschwindigkeiten ausgelegt ist, und einen Outdoor-Roboter, der größere Räder und dadurch eine höhere Bodenfreiheit hat.

KURT3D verwendet eine Roboterkontrollarchitektur mit einem speziellen Echtzeitalgorithmus, um seinen Weg selbständig zu finden. Da KURT3D mit einem 3D-Laserscanner ausgestattet ist, eignet er sich besonders gut für die schnelle und vollautomatische Digitalisierung von Gebäuden und Hallen. Durch seine hohe Geschwindigkeit (im Indoor-Bereich maximal 4 m/s) und seine zwei Kameras ist der Roboter ebenfalls ideal geeignet zur Inspektion und Überwachung von Umgebungen. Er kann schnell durch Gebäude fahren und dabei Bilder von seiner Umgebung aufnehmen oder sogar einen kompletten 3D-Scan durchführen. Mittels seiner WLAN-Funkverbindung überspielt KURT3D die Bilder oder 3D-Pläne dann direkt in das Intranet oder Internet. Die relative hohe Geschwindigkeit erfordert neben einer schnellen Sensorik und dem Beachten der Fahrzeugdynamik insbesondere eine Toleranz gegenüber Rauschen und Fehlern, die durch Vibrationen entstehen. Weiterhin sind die Algorithmen und Regler für schnelle Roboter mit ihren schnellen Verarbeitungszyklen deutlich robuster und sparsamer als herkömmliche Verfahren.

Die Outdoor-Variante von KURT3D wurde für den Einsatz in leichtem Gelände entwickelt. Die Aufgabe des Roboters ist es hier, automatisch Karten von Indoor- und Outdoor-Umgebungen zu erstellen. Das gab es bislang nur in mäßiger 2D-Qualität; KURT3D dagegen produziert hochqualitative dreidimensionale räumliche Bilder, wie in [SURMANN 2003] im Detail dargestellt. Die Zuverlässigkeit unserer Verfahren haben

wir in dem jährlich ausgetragenen internationalen Wettbewerb „RoboCup Rescue Real Robot League“ demonstriert (u. a. Vizeweltmeister 2004).

Im RoboCup Rescue-Wettbewerb muss der Roboter, wie in [NÜCHTER 2005] beschrieben, eine Karte einer Katastrophenumgebung nach einem Erdbeben erstellen, in der aufgefundene Verschüttete eingezeichnet werden. Er wird dabei von seinem Operator in der Leitzentrale unterstützt; der orientiert sich an den Bildern, die von KURT3Ds Bordkamera per Funk übertragen werden. KURT3D sucht jeden Winkel ab. Wenn er unter den Trümmern eine Hand entdeckt, die von einem Überlebenden sein könnte, sendet er die genauen Koordinaten der Fundstelle, die er mit Hilfe seines präzisen 3D-Laserscanners dreidimensional abgebildet hat, an den Operator. Zusätzlich unterstützen weitere Sensoren wie beispielsweise Infrarotkameras, Mikrophone und CO₂-Sensoren die Lagebeurteilung. Erkundungsroboter sollen zunächst vornehmlich als Kundschafter eingesetzt werden, um den Rettungskräften einen Eindruck von der Lage in einem zerstörten Gebäude zu vermitteln. Der RoboCup Rescue ist ein Wettbewerb nach Regeln, die von Jahr zu Jahr höhere Ansprüche an die Wissenschaftler und ihre Roboter stellen, damit die Wettbewerbsbedingungen immer mehr einem echten Katastropheneinsatz angepasst werden können. Inspiriert wurde dieser Wettbewerb durch das große Erdbeben in Kobe 1995.

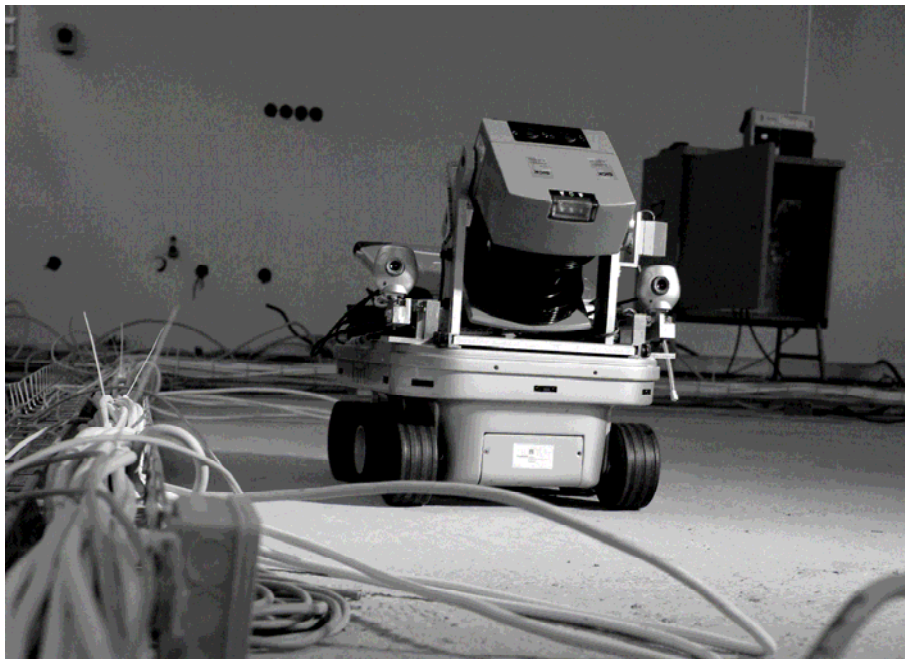


Abb. 1: *KURT3D (Indoor-Variante) auf Erkundungsfahrt in einem Rohbau.*

3 3D-Datenerfassung mit Laserscannern

Die 3D-Sensorik auf mobilen Robotern basiert in der Regel auf Laserscannern. 3D-Laserscanner sind eine junge Technologie, welche die räumliche Datenerfassungsindustrie revolutioniert. 3D-Scanner erlauben die schnelle und präzise Erfassung ganzer Oberflächen in Form von dreidimensionalen Punktwolken. In Verbindung mit der Signalintensität können komplette dreidimensionale Umgebungsbilder von Büros, Fluren, Gebäuden bzw. von zu erkundenden Umgebungen gemacht werden.



Abb. 2: Draufsicht auf ein automatisch vom Roboter aufgenommenes 3D-Modell während des RoboCup Rescue Wettbewerbs 2004.

Der AIS 3D-Scanner ist ein präziser, zuverlässiger, preisgünstiger und echtzeitfähiger mobiler Sensor. Er kann sowohl zum Erfassen von Gebäuden als auch zum Scannen von Büros und Fluren verwendet werden. Er basiert auf einem Standard-Laserscanner (z. B. SICK LMS-200) und hat einen Scanbereich von horizontal 180° und vertikal 120° . Die Genauigkeit der 3D-Scans liegt im cm-Bereich. Neben der Qualität ist generell die Geschwindigkeit ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz von Sensoren auf mobilen Plattformen. Die Zeit, die für eine Aufnahme einer 3D-Szene benötigt wird, ist von der Geschwindigkeit des Lasers abhängig sowie von der gewählten Auflösung. Die Zeit für einen kompletten Scan von $180^\circ \times 120^\circ$ beträgt – je nach Auflösung – zwischen 1,6 und 15 Sekunden, wobei der Scanner alle 13 ms einen 2D-Scan mit 181 Datenpunkten aufnimmt.

Der noch relative neue Einsatz von 3D-Scannern auf autonomen mobilen Robotern erfordert die Lösung einer Reihe von Problemen. Neben der eigentlichen Datenaufnahme müssen die akquirierten Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem integriert werden. Dazu müssen weiterhin die Scanpositionen ermittelt werden, die einen Raum möglichst vollständig ohne Abschattungen erfassen.

Hat man für die verschiedenen einzelnen Probleme adäquate Lösungen gefunden, so bleibt noch die häufig unterschätzte Schwierigkeit, alle unterschiedlichen Verfahren zusammen mit einer recht komplexen Hardware in ein großes Gesamtsystem zu integrieren. Erst wenn dieses gelungen ist, kommt man dem Ziel der automatischen

Erfassung, Vermessung und Kartierung kompletter Innenräume näher. Der autonome Roboter wird dabei durch die Gebäude fahren, Türen öffnen, Fahrstühle benutzen und dabei seine Umgebung erfassen und vermessen.

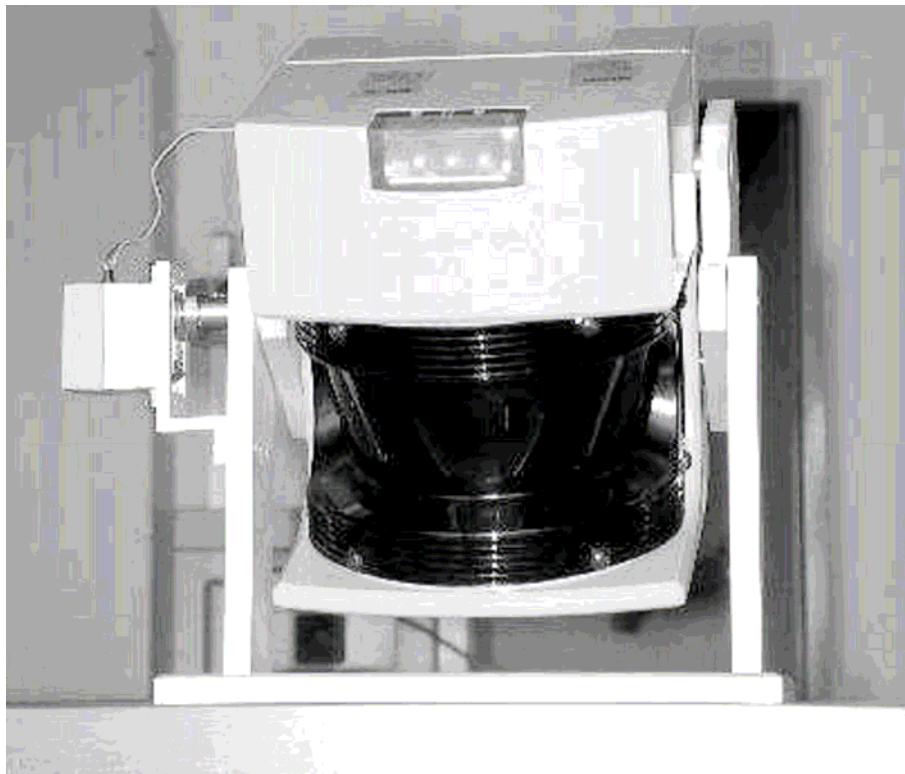


Abb. 3: AIS 3D-Laserscanner basierend auf einem Sick LMS 200.

4 Verfahren zur Kartenerstellung in einer unbekanntem Umgebung

SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) [Nüchter 2004] bezeichnet das Problem des autonomen Navigierens von Robotern oder unbemannten Flugobjekten unter dem gleichzeitigen Aufbau einer lokalen Karte der unbekanntem Umgebung. SLAM wird seit den späten 80er Jahren erforscht und ist vor allem unter dem Gesichtspunkt der Echtzeitfähigkeit noch nicht perfekt gelöst. Der hier vorgestellte Ansatz erweitert den Stand der Technik für strukturierte Umgebungen mit 3 Freiheitsgraden auf unstrukturierte Umgebungen mit 6 Freiheitsgraden (6D-SLAM) durch die Einbeziehung der 3 Raumkoordinaten x , y , z und der 3 Roll-Nick-Gier-Winkel.

Dies ist eine echte Herausforderung, da die relative Bewegung des Roboters bezüglich seiner Umgebung durch seine Sensoren nur fehlerhaft bestimmt werden kann. Diese Sensoren könnten beispielsweise Odometriesensoren, Radar, Laserscanner, GPS, Ultraschall- oder Videosensoren sein. Falls in der Kartenerstellung von einer Iteration zur nächsten die zurückgelegte Distanz und die neue Orientierung des Roboters geringfügig falsch bestimmt wurden, dann werden neu zur Karte hinzugefügte Merkmale entsprechende Fehler enthalten. Ungeprüft würden sich die Fehler in der Positionsbestimmung immer weiter anhäufen, die Karte würde grob falsch bestimmt und damit eine weitere präzise Positionsbestimmung verhindert. Es gibt verschiedene Methoden diese Problematik anzugehen, wie beispielsweise das Wiedererkennen von bereits gesehenen Merkmalen und Verdrehen jüngerer Kartenbereiche, um beide Instanzen des Merkmals auf dieselben Punkte abzubilden. Eine andere Methode,

welche im folgenden dargestellt wird, ist das iterative Verschieben der Punktwolken zueinander unter Berücksichtigung der Nachbarschaft der jeweiligen Punkte.

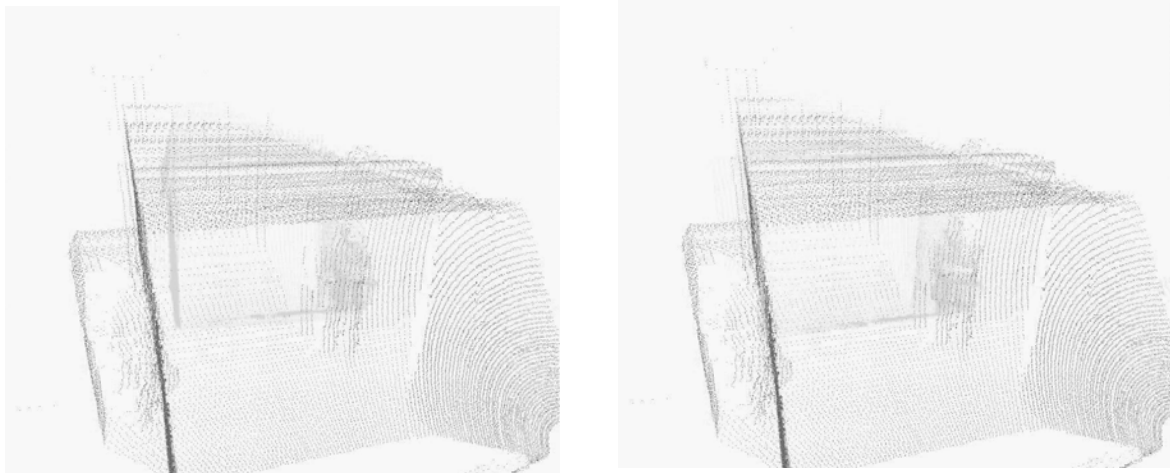


Abb. 4: Links: Vereinigung zweier 3D-Scans auf der Basis der Roboterdometrie. Rechts Dieselben 3D-Scans nach der Registrierung mittels des ICP-Verfahrens. Beide Scans liegen korrekt übereinander.

Die Vereinigung zweier unabhängiger Scans in ein Koordinatensystem wird als Registrierung bezeichnet. Die Registrierung zweier 3D-Scans geschieht mittels des Iterative Closest Point (ICP)-Algorithmus [BESL 1992]. Dieser Algorithmus funktioniert wie folgt:

Gegeben seien zwei Mengen M („model set“) und D („data set“), d. h. Punktwolken von verschiedenen 3D-Scans. In einem ersten Suchschritt werden jetzt jeweils die Punkte in beiden Scans gesucht, die zueinander gehören. Für diese Punkte wird eine Gewichtsmatrix w_{ij} (in $\{0,1\}$) auf eins gesetzt. Nicht korrespondierende Punkte erhalten den Wert Null. Danach wird in einem zweiten Schritt eine Rotation R und eine Translation t berechnet, die die gleichen Punkte aufeinander abbildet. Die nachfolgende Formel beschreibt diesen Rechenschritt:

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \left| \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_d} w_{i,j} \|\mathbf{m}_i - (\mathbf{R}\mathbf{d}_j + \mathbf{t})\|^2 \right|$$

Das besondere an der im AIS entwickelten Realisierung ist eine online- und onboard-fähige Version des ICP. Sie verwendet eine reduzierte Punktmenge und kD-Bäume. Damit ist die Registrierung zweier Scans (181 x 256 Punkte) in weniger als 1,4 sec (P-III 800) möglich.

Neben der Registrierung der aus verschiedenen Positionen aufgenommenen Scans bleibt das Problem zu lösen, nach jeder Aufnahme eine möglichst günstige Position für den nächsten Scan zu ermitteln. Die Position, die den größten Gewinn an Information verspricht und einfach anzufahren ist, ist die nächste optimale Scan-Position. Gleichzeitig ist dabei die Kollisionsvermeidung mit Bounding-Boxen der Objekte zu berücksichtigen. Auch für diese Problemstellung haben wir Lösungen entwickelt. Interessierte Leser können die Verfahren in weiteren Veröffentlichungen auf den Webseiten der Autoren nachlesen: <http://www.ais.fraunhofer.de/~surmann/>.

5 Anwendungsbeispiel: Erkundung der Mathies-Mine

In [NÜCHTER 2004] wird ausführlich dargestellt, wie das hier beschriebene Verfahren angewandt wurde, um 3D-Aufnahmen, die von einem Forscherteam der CMU mit Hilfe des mobilen Roboters Groundhog gesammelt worden waren, nachträglich zu registrieren. Groundhog befuhr nach gründlichen Tests in einem zugänglichen Stollen am 30. Mai 2003 erstmals autonom die stillgelegte und aus Sicherheitsgründen für Menschen gesperrte Mathies-Mine in der Nähe von Pittsburgh, USA. Im wesentlichen besteht dieser Teil aus zwei 1,5 km langen Stollen, von denen zahlreiche Seitenstollen abzweigen. Die Hauptstollen sind von beiden Enden her zugänglich, wodurch eine natürliche Belüftung gewährleistet ist. Hierdurch ist die Gefahr des Vorhandenseins explosiver Gase im Inneren des Stollens relativ gering.

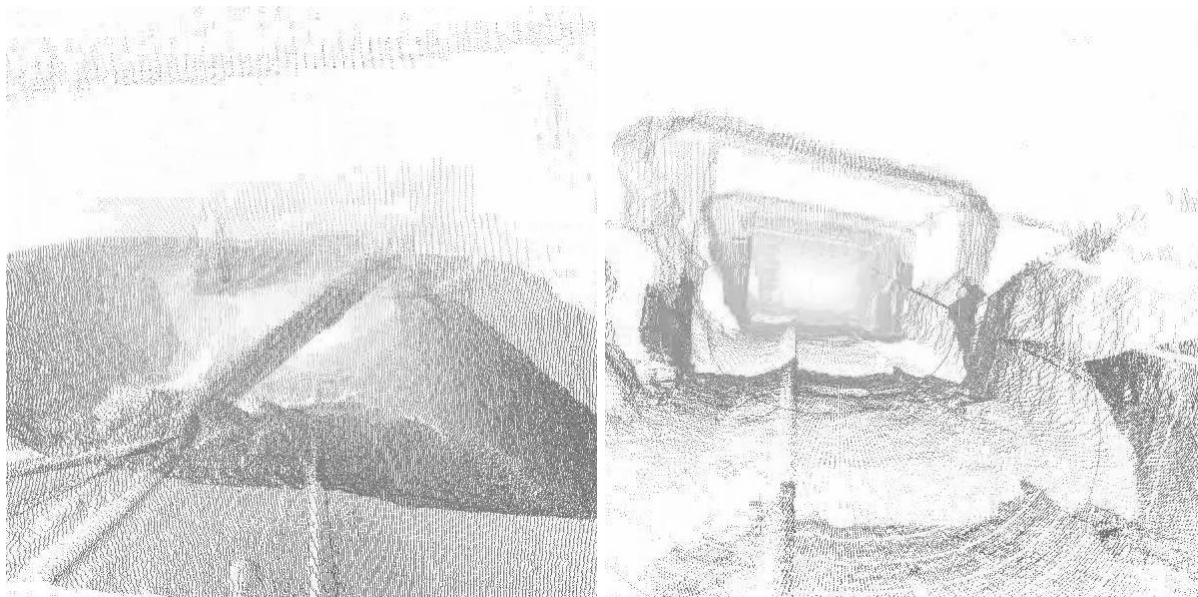


Abb. 5: 3D-Punktwolke der Mathies-Mine. Links: Deutlich sichtbar ist der Einsturz der eine Weiterfahrt des Roboters verhindert hat. Rechts: Blick zurück in den Stollen. Die dunkleren Stellen zeigen die Positionen von denen 3D-Scans aufgenommen wurden.

Um eine genaue 3D-Karte eines der Hauptstollen zu erzeugen, wurde der Roboter so programmiert, dass er autonom durch den Stollen fahren sollte. Nach 250 m traf der Roboter auf eine eingebrochene Deckenstütze, die ihm den weiteren Weg versperrte. Daraufhin traf das Programm die richtige Entscheidung, nämlich zurückzufahren. Nachdem das Forscherteam der CMU freundlicherweise unserem Institut die erfassten 3D-Aufnahmen zur Verfügung gestellt hatte, gelang es, daraus ein genaues und detailgetreues 3D-Modell des befahrenen Abschnitts zu erzeugen – also eines unterirdischen Gebietes, das wahrscheinlich für immer für Menschen unzugänglich bleiben wird.

Um dieses Modell zu visualisieren, gibt es eine Viewer-Software, die auf Basis von OpenGL implementiert wurde. Dieser Viewer projiziert die 3D-Szene auf den Bildschirm, so dass sie aus jeder Perspektive betrachtet werden kann. Ein Video mit allen registrierten 3D-Scans der Mathies-Mine ist zum Download verfügbar unter:

<http://www.ais.fraunhofer.de/ARC/3D/mine/>

6 Ausblick

Die schnelle und automatische 3D-Datenaufnahme – insbesondere in für Menschen schlecht oder nicht zugänglichen Umgebungen – stellt eines der Hauptanwendungsgebiete für autonome Roboter mit 3D-Sensorik dar. Neben Inspektion und Monitoring lassen sich auf der Basis der 3D-Daten schnell genaue Visualisierungen der inspierten Umgebungen aufbauen, in denen sich Bearbeitungsprozesse virtuell simulieren und testen lassen. Interessant ist hier die Aussicht, mittels der Roboter erfasste reale und simulierte Daten parallel in Echtzeit zu betrachten. Diese sogenannte „Erweiterte Realität“ (augmented reality) leistet Hilfestellung bei komplexen Aufgaben.

Die Möglichkeiten und Grenzen der schnellen automatischen Erfassung von Umgebungen mittels autonomer Roboter und 3D-Laserscanner werden im wesentlichen durch die Kosten, die Rechenkapazität, die Größe und das Gewicht der Systeme, deren Energieversorgung und Geschwindigkeit bestimmt. 3D-Laserscanner sind ab 9.000 €, bei einer Genauigkeit von ca. 10 cm und einem Gewicht von 7 kg bei einer Reichweite von 32 m verfügbar. Ab 100.000 € sind Systeme mit einer Genauigkeit von 5 mm, einem Gewicht von 15 kg und einer Reichweite von 60 m verfügbar. Kleine mobile Roboter, die mit 3D-Scannern ausgerüstet werden können, fangen bei ca. 6.000 € an. Größere Roboter für High-End 3D-Scanner erreichen schnell einen Preis von 20.000 €. Roboterkontrollsoftware und 3D-Auswertungssoftware verursachen nochmals Kosten in der gleichen Größenordnung.

Neben der automatischen Datenaufnahme ist die automatische Datenauswertung (Objekterkennung in 3D) eines der noch nicht zufrieden stellend gelösten Probleme. Bisher können meist nur einfache 2D- oder 3D-Geometrien automatisch gefunden und in CAD-Modellen zur Verfügung gestellt werden.

Interessant könnten in Zukunft die in der Entwicklung befindlichen 3D-Kameras sein. Sie ermöglichen eine einfache Verknüpfung von Bild und Abstandsdaten und zeigen damit besonders realistisch wirkende 3D-Modelle.

Danksagung: Für die freundliche Unterstützung, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanken wir uns bei unseren ehemaligen AIS-Kollegen Andreas Nüchter, Kai Lingemann und Joachim Hertzberg sowie bei Sebastian Thrun und Dirk Hähnel.

Quellennachweis

BENECKE 2005

Benecke, N.; Kuchenbecker, R.: Praktischer Einsatz von Laserscannern unter Tage. In: 5. Altbergbau-Kolloquium, Clausthal-Zellerfeld, November 2005.

CORKE 1996

Corke, P.; Cunningham, J.; Dekker, D.; Durrant-Whyte, H.: Autonomous underground vehicles. In: Proc. of the CMTE Mining Technology Conference, Seiten 16-22, Australien, September 1996.

BAILEY 2002

Bailey, T.: Mobile robot localisation and mapping in extensive outdoor environments. PhD thesis, University of Sydney, Australien, 2002.

FERGUSON 2003

Ferguson, D.; Morris, A.; Hähnel, D.; Baker, C.; Omohundro, Z.; Reverte, C.; Thayer, S.; Whittaker, W.; Burgard, W.; Thrun, S.: An autonomous robotic system for mapping abandoned mines. In: S. Thrun, L. Saul und B. Schölkopf, Hrsg., Proc. of NIPS, MIT Press, 2003.

THRUN 2003

Thrun, S.; Hähnel, D.; Ferguson, D.; Montemerlo, M.; Triebel, R.; Burgard, W.; Baker, C.; Omohundro, Z.; Thayer, S.; Whittaker, W.: A system for volumetric robotic mapping of abandoned mines. In: Proc. of the IEEE ICRA, 2003.

MORRIS 2003

Morris, A.; Kurth, D.; Whittaker, W.; Thayer, S.: Case studies of a borehole deployable robot for limestone mine profiling and mapping. In: Proc. FSR, Japan, 2003.

SURMANN 2003

Surmann, H.; Nüchter, A.; Hertzberg, J.: An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 45, Seiten 181-198, Dezember 2003.

NÜCHTER 2005

Nüchter, A.; Lingemann, K.; Hertzberg, J.; Surmann, H.; Pervözl, K.; Hennig, M.; Tiruchinapalli, K. R.; Worst, R.; Christaller, T.: Mapping of rescue environments with Kurt3D. In: Proceedings of the International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR '05), ISBN 0-7803-8946-8, Seiten 158-163, Kobe, Japan, Juni 2005.

NÜCHTER 2004

Nüchter, A.; Surmann, H.; Lingemann, K.; Hertzberg, J.; Thrun, S.: 6D SLAM with an application in autonomous mine mapping. In: Proceedings IEEE 2004 International Conference Robotics and Automation (ICRA 2004), New Orleans, USA, Omnipress, ISBN 0-7803-8233-1, Seiten 1998-2003, April 2004.

BESL 1992

Besl, P.; McKay, N.: A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on PAMI, 14(2):239 - 256, Februar 1992.