

Das 3d-Puzzle-Problem
Effiziente Methoden zum paarweisen Zusammensetzen
von dreidimensionalen Fragmenten

Von der Carl-Friedrich-Gauß-Fakultät für Mathematik und Informatik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von	Dipl.-Inform. Simon Winkelbach
aus	(Geburtsort) Göttingen
1. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl
2. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Hans Burkhardt
eingereicht am:	16. 06. 2006
mündliche Prüfung am:	18. 09. 2006

Fortschritte in der Robotik

Band 10

Technische Universität Braunschweig
Institut für Robotik und Prozessinformatik
Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl (Hrsg.)

Simon Winkelbach

Das 3d-Puzzle-Problem

Effiziente Methoden zum paarweisen Zusammensetzen
von dreidimensionalen Fragmenten

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5567-2

ISBN-13: 978-3-8322-5567-1

ISSN 1431-7222

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Robotik und Prozessinformatik der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts Herrn Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl, denn ohne seine hilfreiche fachliche Betreuung wäre diese Arbeit sicherlich nicht möglich gewesen. Er hat mich bereits als Student frühzeitig gefördert und meine Arbeit kontinuierlich durch viele konstruktive Ideen und wertvolle Erfahrungen unterstützt. Herrn Prof Dr.-Ing. Hans Burkhardt, der sich zur Übernahme des Koreferats bereit erklärt hat, gilt ebenfalls mein Dank.

Herzlicher Dank gebührt natürlich auch allen Kolleginnen und Kollegen, sowie Studenten des Instituts für ihre aktive Mitwirkung und für die vielen interessanten und anregenden Diskussionen. Insbesondere Herr Markus Rilk, Herr Sven Molkenstruck und Herr Christoph Schönfelder haben bei den umfangreichen Implementierungsarbeiten tatkräftig mitgeholfen.

Meinen Kollegen Herrn Ralf Westphal, sowie unseren Projektpartnern an der Unfallchirurgischen Klinik der Medizinischen Hochschule Hannover unter der Leitung von Prof. Dr. med. Christian Krettek danke ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und die Bereitstellung des umfangreichen Datenmaterials.

Schließlich möchte ich mich ganz herzlich bei der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit im Rahmen des Projektes „3d-Puzzle-Problem“ (WA 848/14-1) und des Projektes „Roboterunterstützte Femurmarknagelung“ (WA 848/10-1) bedanken.

Braunschweig, im Juni 2006

Simon Winkelbach

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2	Gewinnung und Repräsentation von Basisdaten	5
2.1	Tiefendaten	6
2.1.1	Lasertriangulation	7
2.1.2	Der Codierte Lichtansatz	10
2.2	Oberflächennormalen	11
2.2.1	Oberflächenrekonstruktion durch Projektion zweier Streifenmuster	12
2.2.2	Oberflächenrekonstruktion durch Projektion eines Streifenmusters	18
2.2.3	Tiefenbilder aus Gradientenkarten	22
2.2.4	Experimentelle Ergebnisse	29
2.3	Volumendaten	31
2.3.1	Computertomographie	31
2.3.2	Extraktion von Isoflächen	33
2.4	Repräsentationsformen von Oberflächendaten	36
3	Matching von Oberflächen: Problemstellung und Stand der Technik	39
3.1	Oberflächenregistrierung versus 3d-Puzzle-Problem	39
3.2	Feinregistrierung	41
3.3	Grobregistrierung	42
3.3.1	Merkmalsbasierte Korrespondenzsuche	42
3.3.2	Hypothesen-Akkumulation (Pose Clustering)	44
3.3.3	Hypothesengenerierung und Hypothesenverifizierung	45
3.4	Stand der Technik beim 3d-Puzzle-Problem	46
4	Matching von 3d Objektfragmenten (3d-Puzzle-Problem)	49
4.1	Einführung	49
4.2	Formale Problemstellung und Begriffsdefinitionen	51
4.3	Ein zufallsbasierter Ansatz: 'Random Sample Matching'	56
4.3.1	Das RANSAC-Konzept	56
4.3.2	Schnelle Generierung von Lagehypothesen	59
4.3.3	Effiziente Bewertung der Lagehypothesen	63
4.3.4	Experimentelle Ergebnisse	64

4.3.5	Diskussion	76
4.4	Ein Grob-zu-Fein-Ansatz: 'Cluster Tree Matching'	78
4.4.1	Transformationsfreies Matching von orientierten Punktwolken	80
4.4.2	Hierarchische Zerlegung von Punktwolken	82
4.4.3	Hierarchisches Matching	86
4.4.4	Beschleunigungsmöglichkeiten	89
4.4.5	Experimentelle Ergebnisse und Diskussion	90
4.5	Anpassung an spezielle Fragментtypen	94
5	Anwendungen und Einsatzgebiete	97
5.1	Anwendungen in der Chirurgie	97
5.1.1	Repositionierung von gebrochenen Oberschenkelknochen	97
5.1.2	Repositionierung von gebrochenen Beckenknochen	112
5.2	Anwendungen in der Archäologie	123
5.3	Registrierung von Oberflächendaten	126
5.4	Objekterkennung und Lageschätzung	132
6	Zusammenfassung und Ausblick	135
A	Ungenauigkeiten bei perspektivischer Projektion	139
B	Ergänzungen zu den experimentellen Ergebnissen	143
C	Eigene Veröffentlichungen	145
	Literaturverzeichnis	149
	Index	157

Kurzfassung

Das Zusammenfügen von dreidimensionalen Objekten aus Einzelteilen (3d-Puzzle-Problem) ist in vielen wichtigen Forschungs- und Anwendungsbereichen, wie zum Beispiel der Archäologie, der Medizin, sowie der Bioinformatik und Robotik, von hoher Relevanz. So müssen in der Archäologie zerbrochene historische Artefakte rekonstruiert, in der Chirurgie gebrochene Knochen repositioniert und fixiert, in der Bioinformatik Proteine zusammengesetzt und in der Robotik Bauteile gefügt werden.

In dieser Arbeit wird die gesamte Prozesskette von der Datenakquisition mittels unterschiedlicher Sensoren, über die allgemeine Registrierung von Oberflächen, bis hin zu speziellen Anforderungen beim Zusammensetzen von Fragmenten in unterschiedlichen Anwendungsfällen, betrachtet. Insbesondere werden zwei neue Ansätze vorgestellt, mit denen ein paarweises Matching von Fragmentoberflächen äußerst effizient gelöst werden kann. Hierbei wird eine hohe Robustheit gegenüber Messungenauigkeiten, Fragment-schädigungen und Materialverschleiß erreicht. In ihrer Basiskonfiguration berechnen beide Verfahren diejenige relative Lage, bei der die Fragmente einen möglichst großen Oberflächenkontakt aufweisen. Der erste Ansatz beruht auf einer zufallsbasierten Generierung von wahrscheinlichen Lagehypothesen und einer schnellen Hochrechnung der Kontaktfläche. Der zweite Ansatz basiert auf einer deterministischen „Grob-zu-Fein-Strategie“ und kommt ohne Zufallskomponente aus.

Des Weiteren wird untersucht, auf welche Weise Vorwissen über die zerbrochenen Objekte (z.B. über Form, Symmetrieebenen, Achsen, etc.) genutzt werden kann, um die Effizienz, Genauigkeit und Robustheit zu erhöhen. Insbesondere gelingt es in dieser Arbeit durch Einbeziehung von Vorwissen gebrochene Oberschenkel- und Beckenknochen virtuell zusammenzufügen und somit einen wichtigen Baustein für die computerassistierte Frakturbehandlung in der Chirurgie zu schaffen.

Neben den 3d-Puzzle-Problemen findet das automatische Anpassen von Oberflächendaten (engl. 'surface matching') auch in vielen anderen wichtigen Bereichen des 3d-Computer-Sehens Anwendung. In diesem Zusammenhang wird gezeigt, dass die entwickelten Ansätze unter anderem auch für die Erkennung und Lageschätzung von Objekten im Raum und für die Registrierung von Tiefendaten eingesetzt werden können.

Abstract

The reconstruction of three-dimensional fragmented objects (3d-puzzle-problem) is a highly relevant task with many applications. The field of application comprises archaeology, surgery, bioinformatics and robotics. Examples are the reconstruction of broken archaeological artefacts, human bone fracture reduction in surgery, protein-docking, and the assemblage of industrial components.

This work considers the whole processing chain, starting from data acquisition with different sensors, the general registration of surfaces, up to special requirements for matching fragments in different applications. In this context, two novel and efficient pairwise matching approaches will be introduced, which are highly robust against measurement inaccuracies, material deterioration and noise. In their basic configuration, both methods search for a relative pose, where the surface contact between all fragments is as high as possible. The first approach is based on a randomized generation of likely pose hypotheses and an efficient forecasting of the contact area. The second approach is based on a deterministic coarse-to-fine strategy without any random variables.

Furthermore, this work discusses how a priori knowledge of the broken objects (like shape priors, mirror symmetries and symmetry axes) can be used to increase the efficiency, accuracy and robustness. Particularly, it shows how to use a priori knowledge to reconstruct broken femurs (thigh bones) and pelvis fractures, which is an important building block for computer-assisted fracture reduction in surgery.

In addition to the 3d-puzzle-problem, an automatic matching of surfaces has applications in many other important computer vision related fields. It will be shown that the developed approaches are also applicable for 3d object recognition and pose estimation, as well as for registration of range data.