

Automatische Grobregistrierung intraoperativ akquirierter 3D-Daten von Gesichtsoberflächen anhand ihrer Gauß'schen Abbilder

Tobias Maier¹, Michaela Benz¹, Gerd Häusler¹,
Emeka Nkenke², Friedrich Wilhelm Neukam² und Florian Vogt³

¹Lehrstuhl für Optik der Universität Erlangen, 91058 Erlangen

²Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
der Universität Erlangen, 91054 Erlangen

³Lehrstuhl für Mustererkennung der Universität Erlangen, 91058 Erlangen
Email: tobias.maier@optik.physik.uni-erlangen.de

Zusammenfassung. Zur Unterstützung des Chirurgen bei der Korrektur von Augenfehlstellungen, wird intraoperativ durch Messungen mit einem optischen 3D-Sensor die Gesichtsoberfläche mehrmals im Laufe der Operation gemessen. Diese Daten müssen mit präoperativ modellierten Soll-Daten registriert werden, um einen objektiven Soll-Ist-Vergleich zu ermöglichen. Da die Orientierung des Sensors zum Patienten nicht als bekannt vorausgesetzt werden kann, ist eine Grobregistrierung vor der Feinregistrierung (ICP-Algorithmus) erforderlich. Es wird eine problemorientierte Methode zur schnellen automatischen Grobregistrierung von Gesichtsoberflächen vorgestellt. Die Methode nutzt Merkmale im Gauß'schen Abbild, welche invariant gegenüber der Gesichtsformveränderung durch den chirurgischen Eingriff sind.

1 Problemstellung

Eines der häufigsten in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie zu versorgenden Traumata bildet die Fraktur des Jochbeinkomplexes und des dazugehörigen Orbitabodens („Knochen unter dem Auge“). Die Folge ist eine Verlagerung des Augapfels (Bulbusdislokation), die ohne Rekonstruktion des Orbitabodens zu bleibenden Schäden (Diplopie) für den Patienten führen kann. Im Rahmen unseres Forschungsprojekts wird ein System zur Unterstützung des Chirurgen bei Korrekturen von Bulbusdislokationen entwickelt. Präoperativ wird zunächst ausgehend von der gesunden Gesichtshälfte ein Soll-Zustand ermittelt [1] und als Datensatz bereitgestellt. Intraoperativ soll dann im Verlauf der Operation durch Messung mit einem optischen 3D-Sensor regelmäßig der Ist-Zustand festgestellt und ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden, um dem Chirurgen objektiv und in Echtzeit Auskunft über die Güte der bisherigen Rekonstruktion zu erteilen. Für diesen Soll-Ist-Vergleich ist es nötig, die modellierten Soll-Daten mit den intraoperativ gewonnenen Ist-Daten (starr) zu registrieren. Die Registrierung erfolgt in zwei Schritten: erst Grobregistrierung, dann Feinregistrierung. Die Grobregistrierung ist notwendig, da die Lage des Sensors relativ zum Patienten nicht

fixiert ist. Neben dem Problem, dass Datensätze zu registrieren sind, die auch im Überlappbereich nicht identisch sind, weil operativ bedingte Variationen vorliegen (Soll/Ist), muss die Registrierung automatisch und nahezu in Echtzeit erfolgen, um den Operationsverlauf nicht zu behindern. Im vorliegenden Beitrag wird das sog. Gauß'sche Abbild (Gaussian image) auf seine Möglichkeiten zur Entwicklung einer problemorientierten, geometriebasierten und echtzeitfähigen Methode für die Grobregistrierung von realen 3D-Gesichtsoberflächendaten (20.000-30.000 Vertices) hin untersucht und eine entsprechende Methode vorgestellt.

2 Stand der Forschung

Während sich für die Feinregistrierung als Optimierungsstandard verschiedene Varianten des Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) etabliert haben, siehe z.B. [2], bleibt die schnelle automatische geometriebasierte Grobregistrierung von 3D-Freifformflächen nach wie vor eine Herausforderung, die deshalb häufig nur manuell durchgeführt wird. Praktisch alle automatischen Ansätze sind merkmalsbasiert, so z.B. in [3], wo sog. „spin images“ (statistische Punktmerkmale) definiert werden. Auf Basis gefundener Merkmale soll die richtige Transformation gefunden werden, etwa nach der Hough-Methode wie bei [5]. Diese Ansätze weisen alle ein hohes Maß an Allgemeinheit auf und sind i.d.R. aufwändig zu implementieren. Einen Überblick zur Registrierung liefert [6]. Der von uns gewählte Ansatz basiert auf dem Gauß'schen Abbild eines Objekts. Es findet z.B. Anwendung bei der Detektion von Zylinderformen in 3D-Daten [7], wird aber meist in erweiterten Formen eingesetzt, z.B. zur Symmetriedetektion [8] oder zur Gesichtserkennung [9].

3 Wesentlicher Fortschritt durch den eigenen Beitrag

Ein Gauß'sches Abbild entsteht bei Auftragung aller Oberflächennormalen (Einheitsvektoren) eines Objekts in den Koordinatenursprung. Die Spitzen der Einheitsnormalen liegen somit auf der Einheitskugel.

Das Gauß'sche Abbild eines Objekts wurde bislang nicht explizit zur Registrierung eingesetzt, obwohl es einige Vorteile hat: 1) Es ist es schnell verfügbar. Die notwendigen Daten (Normalenvektoren) werden im Rahmen einer üblichen beleuchteten 3D-Visualisierung eines Dreiecksnetzdatensatzes, wie sie für medizinische Anwendungen notwendig ist, ohnehin bereitgestellt. 2) Das Gauß'sche Abbild ist translationsinvariant und die Anordnung der Punkte auf der Einheitskugel relativ zueinander rotationsinvariant. 3) Die zu extrahierenden Merkmale befinden sich auf der Oberfläche einer Einheitskugel, wodurch der Suchraum prinzipiell zweidimensional bleibt.

Der Merkmalsraum der präsentierten Methode ist eindimensional (siehe Abschnitt 4). Die Methode ist einfach zu implementieren und schnell. Sie ist problemorientiert, da sie die für Gesichtstopologien typischen flachen Bereiche als Merkmale nutzt, welche durch die hier betrachtete Art des operativen Eingriffs *nicht* verändert werden.

4 Methoden

Es wurden Modellexperimente durchgeführt, bei denen an gesunden Probanden mit hoher Gesichtssymmetrie künstlich eine einseitige Gesichtsveränderung mittels Injektion einer physiologischen Kochsalzlösung (6 ml) im linken Jochbeinbereich bewirkt wurde (siehe Abb. 1). Die 3D-Datenakquisition erfolgte durch einen optischen 3D-Sensor nach dem Prinzip der „Phasenmessenden Triangulation“ [10]. Die Messdaten wurden zur Rauschreduktion mit dem Geometrie- und Normalenfilter nach [11] geglättet.

Aus den Gauß'schen Abbildern der zu registrierenden 3D-Datensätze werden als eindimensionale Merkmale Kugelbereiche größter Dichte extrahiert. Die Dichte eines Bereichs ist der Quotient aus *Anzahl der Normalen* in diesem Kugelbereich und seiner *Fläche* F_z . Im dichtesten Bereich eines Gauß'schen Abbilds liegen sehr viele Normalen sehr nah beieinander. Jede Normale ist einem Vertex im 3D-Datensatz zugeordnet. Die Normalen des dichtesten Bereichs sind somit einer Vertexuntermenge U_V im 3D-Datensatz zugeordnet. Für zwei zu registrierende Datensätze A und B ergeben sich somit $U_V(A)$ und $U_V(B)$ wie Abb. 5 zeigt. Die Transformation für die Grobregistrierung entspricht dann der *Hauptachsentransformation von $U_V(A)$ nach $U_V(B)$* .

Das Auffinden des dichtesten Bereichs eines Gauß'schen Abbilds geschieht als schnelle Näherung wie folgt: Der Würfel mit Kantenlänge=2, der das Gauß'sche Abbild (Einheitskugel) enthält, wird in n^3 kleine Würfel (Zellen) äquidistant unterteilt (Abb. 2). Nur diejenigen Zellen, welche die Einheitskugel schneiden und Normalen enthalten, finden weitere Betrachtung (Abb. 3). Die in jeder *Zelle* $_{ijk}$ eingeschlossene Kugeloberfläche $F_z(i, j, k)$ wird approximativ berechnet. Für jede *Zelle* $_{ijk}$ kann somit die Dichte des enthaltenen Flächenstücks errechnet und das Maximum unter allen Zellen gefunden werden (Abb. 4).

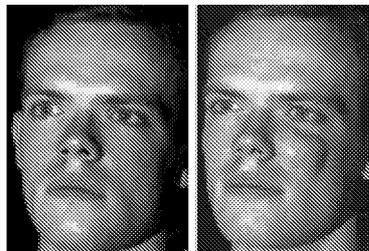


Abb. 1. Beispiel eines Probanden ohne (links) und mit (rechts) Injektion.

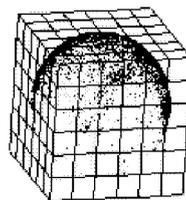


Abb. 2. 3D-Tabellenraster über dem Gauß'schen Abbild.

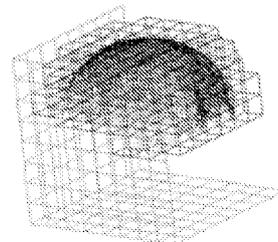


Abb. 3. Zellen, die das Gauß'sche Abbild schneiden (dunkelgrau).

Abb. 4. Gauß'sche Abbilder der Datensätze A und B. Schwarz markiert ist jeweils die Zelle mit dem dichtesten Bereich. Das Zellraster umfasst jeweils 15^3 Zellen.

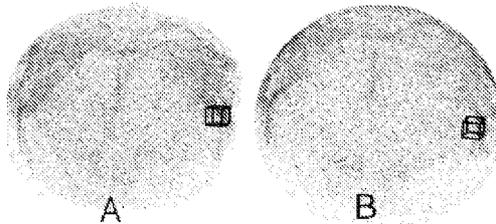
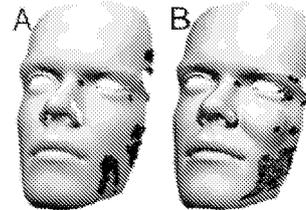


Abb. 5. Datensätze ohne (A) und mit (B) Injektion. Die schwarzen Markierungen in den Wangenbereichen entsprechen $U_V(A)$ bzw. $U_V(B)$.



5 Ergebnisse

Es wurden Experimente mit acht Probanden durchgeführt. Die Qualität der Grobregistrierung richtet sich einzig danach, ob der nachgeschaltete ICP-Algorithmus ein korrektes Resultat liefert oder nicht. Die Ergebnisse können somit binär als *tauglich* und *nicht tauglich* bewertet werden. Ein Beispiel ist in den Abb. 6 bis 8 gegeben. Alle acht Fälle lassen sich zusammenfassend charakterisieren:

- 1) Der dichteste Bereich im Gauß'schem Abbild spiegelte immer einen Wangenbereich im Gesicht wider (siehe Abb. 5).
- 2) Die Merkmale variieren leicht mit der räumlichen Orientierung des Datensatzes. Eine taugliche Grobregistrierung konnte jedoch stets durchgeführt werden (geringe Richtungsvarianz der Hauptachsen der Vertexmenge U_V).
- 3) Die Merkmale variieren mit der Zellgröße des 3D-Zellrasters. Bei einer Zellrasterung zwischen 15^3 und 25^3 Zellen war eine taugliche Grobregistrierung möglich.
- 4) Das Auffinden der dichtesten Zelle bei 20.000 Normalen und einem Zellraster von 20^3 dauert weniger als eine Sekunde auf einem 1,3 GHz Rechner.

6 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Methode in der hier präsentierten Form für die Registrierung zeitlich varianter Gesichtsoberflächen dann eignet, wenn mindestens ein Wangenbereich unverändert bleibt. Der Einfluss verschiedener Parameter, wie Orientierung des Datensatzes und Zellgröße des Zellrasters muss noch genauer untersucht werden, um die Robustheit der Methode zu optimieren. Auch der Einfluss des Datenrauschens wird zu untersuchen sein, wobei erste Versuche mit verrauschten Daten eine hohe Robustheit andeuten. Es ist zu erwarten, dass Robustheit und Genauigkeit der Grobregistrierung durch alternative Diskretisie-

Abb. 6. Datensätze A/B unregistriert.

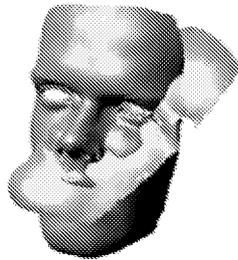


Abb. 7. Datensätze A/B mit Schnittbild nach tauglicher Grobregistrierung.

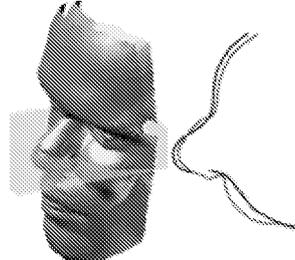
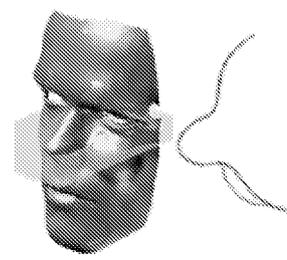


Abb. 8. Datensätze A/B mit Schnittbild feinregistriert nach Grobregistrierung.



rungsschemata des Suchraums (Kugeloberfläche) und durch Clusteranalyse der Menge U_V gesteigert werden können.

Die Grobregistrierung ist schnell und zusammen mit der Feinregistrierung bleibt der Zeitbedarf insgesamt im Rahmen der Anforderungen. Ein Vergleich der Methode mit anderen ist geplant.

Literaturverzeichnis

1. Benz M, et al.: The Symmetrie of Faces. Procs VMV 02:43–50, 1999.
2. Seeger S, Laboureux X, Häusler G: An Accelerated ICP-Algorithm. Jahresbericht 2001, Lehrstuhl für Optik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.
3. Johnson A: Spin-Images: A Representation for 3-D Surface Matching. Dissertation, Robotics Institute, Carnegie Mellon University Pittsburgh, 1997.
4. Feldmar J, Ayache N: Rigid, Affine and Locally Affine Registration of Free-Form Surfaces. International Journal Computer Vision 18(2):99–119, 1996.
5. Seeger S, Häusler G: A Robust Multiresolution Registration Approach. Procs VMV 99:75–82, 1999.
6. Girod B, Greiner G, Niemann H (Hrsg.): Principles of 3D Image Analysis and Synthesis. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 2000.
7. Chaperon T, Goulette F: Extraction cylinders in full 3D data using a random sampling method and the Gaussian image. Procs VMV 01:35–42, 2001.
8. Sun C, Sherrah J: 3D symmetrie detection using extended Gaussian image. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 19(2):164–168, 1997.
9. Matsuo H, Iwata A: Human Face Identification by Multi Scale MEGI. Procs ICARC(2):886–889, 1994.
10. Gruber M, Häusler G: Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation. Optik 89(3):118–122, 1992.
11. Karbacher S: Rekonstruktion und Modellierung von Flächen aus Tiefenbildern. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2001.