

# Plenoptische Szenenmodellierung aus unkalibrierten Bildfolgen

Benno Heigl  
Siemens Medical Solutions, Forchheim  
Benno.Heigl@siemens.com

**Abstract:** Durch geeignete Kombination von Algorithmen aus den Bereichen Computergrafik und Rechnersehen wird es möglich, Szenen, die mit einer handgeführten Kamera aufgenommen wurden, aus beliebigen Blickrichtungen zu visualisieren.

## 1 Einführung

Dieser Beitrag gibt einen kurzen Abriss der Ansätze und Ergebnisse, die im Rahmen der Dissertation [He03] erarbeitet wurden. Neben der Einführung in die Thematik werden aus der Arbeit resultierende wesentliche Neuerungen aufgezeigt und deren Anwendbarkeit in einem breiten Spektrum von Experimenten belegt.

**Arten der Szenenmodellierung.** In den letzten Jahren hat der Einsatz von Spezialeffekten in den visuellen Medien enorm zugenommen. Dabei verbesserte die Verwendung von computergestützten Systemen die Realitätstreue so sehr, dass künstlich erzeugte Szenen oder Bildteile fast nicht mehr von realen zu unterscheiden sind. Bekannte Beispiele hierfür sind Anwendungen in den Bereichen Werbung, Filmproduktion und Computerspiele.

Aus der Literatur sind im Wesentlichen zwei grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen bekannt, um Szenen für die Erzeugung virtueller Bilder zu modellieren. Die erste Klasse von Methoden setzt genaues Wissen über alle physikalischen Rahmenbedingungen voraus, welche das optische Erscheinungsbild eines Objektes oder einer Szene beeinflussen. Eine exakte Beschreibung kann im Allgemeinen nicht oder nur mit extrem hohem Aufwand erzeugt werden, sodass Störungen wie Mikrostrukturen in der Modellierung fehlen und somit die Visualisierung oft unnatürlich und künstlich wirkt.

Um derartige Probleme zu vermeiden, hat sich eine zweite Hauptrichtung an Forschungsaktivitäten etabliert, welche unter der Bezeichnung *plenoptische* oder *bildbasierte Modellierung* bekannt ist. Der grundsätzliche Ansatz besteht hierbei darin, die Modelle basierend auf Bildern aufzubauen, welche in einer realen Umgebung aufgenommen wurden. Derartige Methoden haben gegenüber den oben beschriebenen konventionellen Ansätzen den Vorteil, dass sie keine exakte physikalische Beschreibung von Szeneneigenschaften benötigen, da sie die Szene direkt durch ihr Erscheinungsbild modellieren. Sogar hoch komplexe Phänomene wie Reflexionen, Wechselwirkungen zwischen Objekten, geometri-

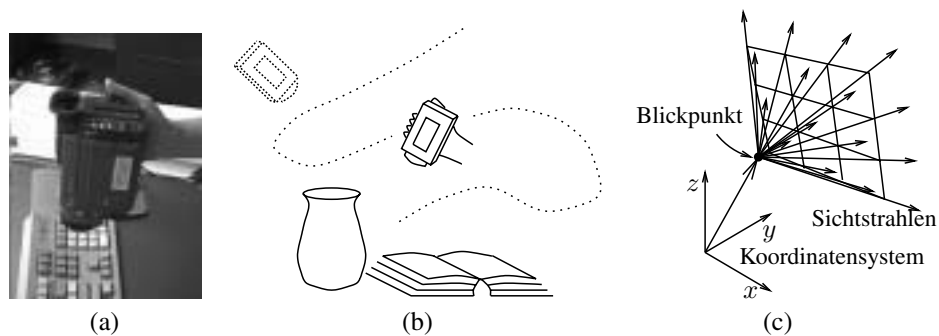


Abbildung 1: Aufnahme eines kontinuierlichen Bildstroms mittels einer handelsüblichen Videokamera (a)/(b). Aus den so akquirierten Bildern wird ein plenoptisches Szenenmodell errechnet, aus welchem beliebige neue Szenenansichten erzeugt werden können, wie durch die gestrichelt gezeichnete Kamera in (b) angedeutet. Jede einzelne Aufnahme liefert für jeden einzelnen Pixel einen Sichtstrahl, der als Abtastwert der plenoptischen Funktion interpretiert werden kann (c).

sche Mikrostrukturen, spekulare Effekte und sogar Lichtbrechungen müssen nicht explizit modelliert werden sondern sind implizit in Form aller aufgenommenen Bilder enthalten.

**Möglichkeiten der Datenakquisition.** Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Akquisition plenoptischer Szenenmodelle. Die weitverbreitetste Methode hierfür ist, die verwendete Kamera an den Arm eines Roboters zu montieren und hunderte von Bildern an unterschiedlichen bekannten Positionen aufzunehmen, die einander sehr nahe benachbart sind. Eine weitere Akquisitionsmöglichkeit besteht darin, die Kamera frei mit der Hand zu führen und deren Position unter Verwendung eines Kalibrierungsmusters automatisch zu bestimmen [GGSC96, WAA<sup>+</sup>00]. Diese Verfahren setzen voraus, dass ein aus leicht zu detektierenden Markierungen bestehendes Kalibrierungsmuster immer im Blickfeld bleibt, was die Anwendbarkeit des Verfahrens erheblich einschränkt.

Schon wurde theoretisch bewiesen, dass es möglich ist, die Struktur einer beobachteten Szene sowie die Bewegung der beobachtenden Kamera nur aus korrespondierenden Bildmerkmalen zu bestimmen [U179]. Zur Lösung dieses Problems sind inzwischen vielfältige Verfahren bekannt [HZ00], jedoch ist die Aufgabenstellung immer noch aktives Forschungsthema, um Robustheit gegenüber fehlerhaften Bildkorrespondenzen und speziellen Aufnahmekonstellationen zu erhöhen.

**Aufgabenstellung.** Da die Verwendung einer frei mit der Hand geführten Kamera zur Datenakquisition für den Benutzer den geringsten Aufwand bezüglich Zeit und Gerätschaft verursacht, war das Ziel dieser Arbeit die automatische Generierung eines bildbasierten Szenenmodells aus Bildsequenzen, welche mit einer handelsüblichen Videokamera aufgenommen wurden (siehe Abbildung 1(a)/(b)). Die Kamera wird frei bewegt, wobei eine Szene oder ein Objekt von vielen verschiedenen Seiten betrachtet wird. Die Szene sollte genügend Struktur enthalten, damit Merkmale extrahiert und zwischen unterschiedlichen Aufnahmen zugeordnet werden können.

Dieses Anwendungsszenario bedingt spezielle Anforderungen an die Algorithmen, welche die Kameraparameter und die Szenengeometrie rekonstruieren, sowie an die Verfahren zur Erzeugung virtueller Ansichten. Methoden des Rechnersehens müssen hierbei mit Methoden der Computergrafik kombiniert werden. Die meisten der bisherigen Untersuchungen wurden rein auf einem der beiden Gebiete durchgeführt. Jedoch mit dem zunehmenden Erfolg der bildbasierten Methoden wird es immer wichtiger, diese beiden Fachgebiete zusammenzuführen. Diese Arbeit trägt hierzu bei, indem sie existierende Algorithmen aus beiden Bereichen erweitert, um sie auf geeignete Weise kombinierbar zu machen.

## 2 Plenoptische Modellierung

Die *plenoptische Funktion* beschreibt den sichtbaren Farbwert, der innerhalb einer Szene als Funktion des Blickpunktes und der Blickrichtung beobachtet werden kann [AB91]. Wird ein Kamerabild aus einer bestimmten Position im Raum aufgenommen, erhält man ein ganzes Bündel von Sichtstrahlen mit zugehörigen Farbwerten (siehe Abbildung 1(c)). Jeder Sichtstrahl kann dabei als ein Abtastwert der kontinuierlichen plenoptischen Funktion interpretiert werden, die hier als Funktion der Pixelkoordinaten und der Projektionsparameter den Farbwert zurückliefert.

Werden viele Bilder aus unterschiedlichsten Blickrichtungen aufgenommen, erhält man eine mehr oder weniger dichte Abtastung der plenoptischen Funktion. Hätte man das Wissen über die vollständige plenoptische Funktion, wäre das Erzeugen beliebiger virtueller Szenenansichten einfach, da ein virtuelles Bild wie in Abbildung 1(c) durch einfache Auswertung der plenoptischen Funktion an den für jeden Pixel zugehörigen Sichtstrahl erzeugt werden könnte. In der Praxis kann jedoch nur eine begrenzte Anzahl von Szenenansichten aufgenommen werden.

Eine einfache Repräsentation der diskret abgetasteten plenoptischen Funktion wurde in [LH96, GGSC96] publiziert. Bei diesem Ansatz werden im Raum zwei Ebenen mit einem jeweiligen diskreten Gitter positioniert. Alle Sichtstrahlen, welche Gitterpunkte einer Ebene mit denen der zweiten Ebene verbinden, können so einfach parametrisiert werden.

Um diese regelmäßige Struktur aufzubauen, wird eine Kamera mittels Roboter exakt an die Gitterpositionen der einen Ebene bewegt. Wegen ihrer regulären Gitterstruktur ist die Zwei-Ebenen-Parametrisierung nicht sehr flexibel einsetzbar und ist damit nicht geeignet für Bilder, welche mit einer handgeführten Kamera aufgenommen wurden. Es ist zwar möglich, diese Form der Parametrisierung aus unregelmäßigen Aufnahmepositionen zu interpolieren [GGSC96], was jedoch zu Einbußen in der Bildqualität führt.

Anstatt einen Sichtstrahl durch Blickpunkt und Blickrichtung zu parametrisieren, kann er alternativ dazu auch als Punkt auf einer Objektoberfläche mit zugehöriger Betrachtungsrichtung beschrieben werden. Für eine derartige Modellierung ist die exakte geometrische Beschreibung der Szenenoberflächen vonnöten [DTM96, WAA<sup>+</sup>00].

Da keine der verfügbaren Ansätze Anforderungen der Aufgabenstellung entspricht, wird hier als plenoptisches Szenenmodell lediglich die Bildfolge selbst mit zugehörigen Kamerapositionen und Abbildungseigenschaften verwendet. Dieser Ansatz verringert den Ak-

quisitionsaufwand, stellt aber erhöhte Anforderungen an das Erzeugen virtueller Szenenansichten.

### 3 Rekonstruktion der Kamerabewegung und Szenengeometrie

Zur plenoptischen Szenenmodellierung ist das Wissen über Bewegung und Projektionseigenschaften der aufnehmenden Kamera notwendig. Beim Vorgang der Kalibrierung wird diese Information rein aus den Bilddaten berechnet.

Aus der Literatur sind die so genannten Faktorisierungsmethoden bekannt, die speziell zur Kalibrierung vieler Bilder geeignet sind. Sie lösen die Kalibrierungsaufgabe geschlossen in einem einzigen Berechnungsschritt unter Berücksichtigung aller Eingangsdaten [PK97, ST96]. Aufgrund der Beschaffenheit der hier angenommenen Eingangsdaten ist diese Gruppe von Ansätzen sehr gut geeignet.

Um diesen geschlossenen Ansatz jedoch anwenden zu können, ist es notwendig, Bildmerkmale zu extrahieren und sie über die Bildsequenz hinweg zu verfolgen, um Korrespondenzen zwischen Bildern herzustellen. Dieser Vorgang wird im Folgenden als Punktverfolgung bezeichnet. Wir verwenden bekannte Ansätze wie in [ST94] beschrieben. Der Algorithmus extrahiert Punktmerkmale, in deren Nachbarschaft die Bildinformation in allen Richtungen heterogen ist. Diese Punktmerkmale werden durch Vergleich kleiner Bildregionen um diese Punkte — so genannter Fenster — in nachfolgenden Bildern wiedergefunden. Beim Vergleich werden Verzerrungen berücksichtigt, welche durch unterschiedliche Blickrichtungen verursacht sind.

Faktorisierungsmethoden können das Kalibrierproblem geschlossen für viele Aufnahmen gleichzeitig lösen. Voraussetzung ist jedoch dass alle Punktmerkmale in allen betrachteten Aufnahmen vollständig detektierbar sind. Diese Bedingung ist im Allgemeinen für den hier erwähnten Fall nicht erfüllt, weshalb wir Faktorisierungsmethoden lediglich für Teilsequenzen einsetzen können, in denen möglichst viele Merkmale in möglichst vielen Bildern vollständig sichtbar sind. Hierfür wurde ein Algorithmus entwickelt, der automatisch die längste Teilsequenz ermittelt, in der mindestens eine vorgegebene Anzahl von Merkmalen vollständig sichtbar und detektierbar ist.

Die Grundlage des verwendeten Kalibrieransatzes bilden die Faktorisierungsmethoden [PK97] und [ST96]. Während in [PK97] eine schwach-perspektivische Approximation als Kameramodell angenommen wird, wurde in [ST96] der Ansatz für das perspektivische Kameramodell erweitert. Der erste Ansatz benötigt nur die 2-D-Merkmalpositionen und ist äußerst robust gegenüber kleinen Lokalisierungsfehlern in der Detektion, führt jedoch wegen des vereinfachten Kameramodells zu Verzerrungen der Rekonstruktion. Der zweite Ansatz hat den Vorteil, dass er exakte Rekonstruktionen erlaubt, jedoch sehr anfällig gegenüber vorhandenen Fehlzuordnungen ist. Um die Vorteile beider Verfahren zu nutzen und deren Nachteile zu überwinden, wurden beide Ansätze kombiniert, um insgesamt ein robustes Verfahren für exakte Kalibrierungen zu erhalten. Erwähnenswert ist, dass kein Wissen bezüglich der Brennweite oder anderer Abbildungseigenschaften der verwendeten Kamera vorausgesetzt wird, weshalb Selbstkalibrierungsmethoden eingesetzt werden



Abbildung 2: Die Bilder 0, 50, und 250 einer typischen Bildsequenz (obere Reihe), sowie das Ergebnis der Kamerakalibrierung (untere Reihe). Die Aufnahmepositionen sind als kleine sich gegenseitig überlappende Pyramiden visualisiert. Die schwarzen Punkte zeigen rekonstruierte Punkte der Szenenoberfläche.

müssen [Po99].

Nach Anwendung dieser Kombination der beiden Faktorisierungsmethoden erhält man sowohl Kamerapositionen und Abbildungseigenschaften als auch die 3-D-Koordinaten der Verfolgten Punktemerkmale für die anfänglich selektierte Teilsequenz. Um letztlich die gesamte Bildfolge zu kalibrieren, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Verfahren entwickelt, das abwechselnd neue Aufnahmen mit Hilfe bekannter 3-D-Punkte und deren Projektionen kalibriert, bestehende 3-D-Punkte gemäß der neu hinzugekommenen Information korrigiert und neue, bisher noch nicht berücksichtigte 3-D-Punkte hinzufügt. Durch diesen Ansatz kann man so das Kalibrierungsergebnis für die gesamte Bildfolge errechnen. Eine Beispielkalibrierung ist in Abbildung 2 zu sehen.

#### 4 Visualisierung durch Interpolation und Extrapolation

In vorangegangenen Abschnitten wurden Beispiele sowohl für die Akquisition von Bildern sowie für die Repräsentation durch plenoptische Szenenmodelle aufgezeigt. Dieser Abschnitt widmet sich der Erzeugung virtueller Szenenansichten aus diesen Modellen.

Wie bereits erläutert, kann ein Sichtstrahl durch einen Punkt auf der Szenenoberfläche in Verbindung mit einer Betrachtungsrichtung beschrieben werden. Ist nun ein Oberflächen-

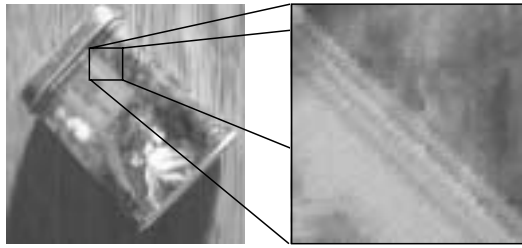


Abbildung 3: Artefakte verursacht durch fehlerhafte Tiefeninformation und zu weit voneinander entfernte Aufnahmepositionen

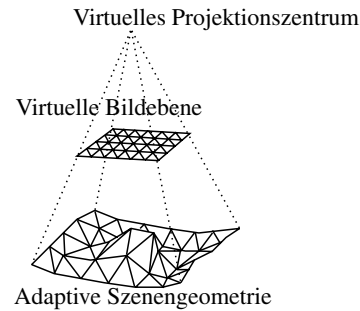


Abbildung 4: Beschreibung der Szenengeometrie durch Unterteilung in Dreiecke.

punkt in Kamerabildern aus unterschiedlichen Blickwinkeln sichtbar, kann man davon ausgehen, dass er bei matten Oberflächen unabhängig von der Betrachtungsrichtung im selben Farbwert erscheint. Sind Glanzlichter oder Spiegelungseffekte vorhanden, wird sich der Farbwert in Abhängigkeit von der Betrachtungsrichtung ändern. Für die Ansichtenrekonstruktion heißt das, dass zwischen den benachbarten Sichtstrahlen interpoliert werden sollte. Die Verfahren [DTM96, WAA<sup>+</sup>00] verwenden diesen Ansatz. In jedem Fall wird jedoch die genaue Kenntnis über die Szenengeometrie vorausgesetzt, was hier nicht angenommen werden, da sämtliche geometrische Daten vollautomatisch rekonstruiert werden und damit im Allgemeinen zumindest lokal fehlerbehaftet sind.

Vielmehr soll die aus der Kalibrierung als Nebenprodukt abfallende Punktwolke zur Beschreibung der Szenengeometrie verwendet werden. Es ist bekannt, dass selbst bei ungenauer Information über die Szenengeometrie photo-realistische Ansichtenerzeugung möglich ist, solange eine genügend dichte Abtastung des Blickwinkelbereichs vorliegt [CTCS00]. Falls bei fehlerhafter Szenengeometrie die Aufnahmepositionen zu weit voneinander entfernt liegen, treten Artefakte wie in Abbildung 3 gezeigt auf, welche sich durch Unschärfe an Farbübergängen bemerkbar machen.

Neben der Interpolation von Sichtstrahlen und damit ganzer Ansichten ist oft auch eine Extrapolation notwendig, nämlich dann, wenn der virtuelle Blickpunkt außerhalb des Bereichs der Aufnahmepositionen liegt. Um dies zu erreichen, wird eine möglichst benachbarte Aufnahme auf die Szenengeometrie rückprojiziert. Dieser Ansatz birgt den Nachteil, dass keine ansichtenabhängige Veränderung der Farbe eines Oberflächenpunktes modellierbar ist.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren vereint die Möglichkeiten der Interpolation unter Verwendung einer approximativ ansichtenabhängigen Beschreibung der Szenengeometrie mit der Ansichtenextrapolation. Abbildung 4 zeigt die regelmäßige Unterteilung des virtuellen Bildes in Dreiecke und die jeweilige Zuordnung von Tiefeninformation. Für jedes dieser Dreiecke wird bestimmt, welche der benachbarten Originalaufnahmen welchen Beitrag zur Interpolation oder Extrapolation leisten kann. Die Originalbilder werden auf diese Dreiecke rückprojiziert und miteinander überlagert. Durch den geschlossenen Ansatz muss nicht explizit zwischen Interpolation und Extrapolation unterschieden werden.



Abbildung 5: Virtuelle Ansichten der Szene aus Abbildung 2

Vielmehr spielt ausschließlich die Nähe der Originalaufnahme zur virtuellen Aufnahme sowie die Sichtbarkeit des entsprechenden Oberflächenbereichs die entscheidende Rolle.

Die Vorteile der Interpolation werden so mit der der Extrapolation verknüpft, wobei allerdings die negativen Auswirkungen einer fehlerbehafteten Oberflächengeometrie vor allem für die Extrapolation erhalten bleiben. Abbildung 5 zeigt Beispiele virtueller Ansichten, welche für unterschiedliche, in den Originaldaten nicht vorhandenen Blickwinkeln rekonstruiert wurden. Die Ursache der unregelmäßigen Ränder liegt darin, dass die benachbarten Originalaufnahmen nicht den gesamten notwendigen Szenenbereich abdeckten.

Hervorzuheben ist, dass mit dem Beitrag [HKP<sup>+</sup>99] erstmalig ein Verfahren zur direkten Interpolation von Ansichten aus unstrukturierten Eingangsdaten veröffentlicht wurde.

## 5 Experimente und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurden umfangreiche Experimente durchgeführt, wovon eine Auswahl in Abbildung 7 zu sehen ist. Sie zeigt die breite Anwendbarkeit der Verfahren, die nur durch besonderes Augenmerk auf Robustheit und geeignete Kombination der Verfahren aus der Computergrafik und dem Rechnersehen ermöglicht werden konnte.

Neben der reinen Visualisierung eignet sich die plenoptische Szenenmodellierung auch zum Training statistische Objektmodelle, zum Training einer automatischen Ansichtenauswahl sowie zur Roboterselbstlokalisierung. Dies wurde in Experimenten nachgewiesen. Abbildung 6 zeigt beispielsweise ein Szenario, in dem ein autonomer Roboter im Bereich vor drei Aufzugstüren steht. Auf dem Roboter ist eine Kamera montiert. Mit Hilfe eines plenoptischen Szenenmodells wird die Position des Roboters ermittelt, indem virtuelle Ansichten aus unterschiedlichsten Positionen mit dem realen Kamerabild verglichen werden. Stimmen virtuelle und reale Ansicht überein, kann man bei ausreichender Szenenstruktur davon ausgehen, dass die Parameter der virtuellen Aufnahme der realen Position des Roboters entsprechen. Durch Anwendung eines auf Hypothesen basierenden statistischen Verfahrens konnte die Roboter-Selbstlokalisierung erfolgreich durchgeführt werden.

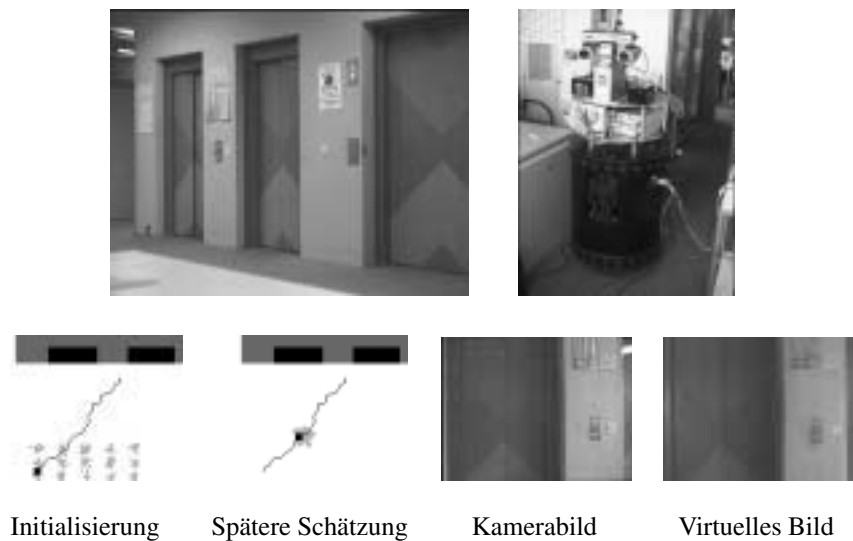


Abbildung 6: Experiment zur Roboter-Selbstlokalisierung. Oben ist die Umgebung zu sehen, in der das Experiment durchgeführt wurde, sowie der sich darin bewegende autonome Roboter mit montierter Kamera. Im unteren Teil sind links Draufsichten auf die Szene gezeigt, wobei die schwarzen Rechtecke die Aufzugtüren darstellen. Die graue Linie zeigt die Bewegung des Roboters. Der schwarze Punkt zeigt die Position des Roboters zu Beginn der Fahrt (erstes Bild) sowie nach 10 weiteren Aufnahmen (zweites Bild). Daneben ist das zugehörige reale Kamerabild sowie das virtuelle Bild der erfolgreich geschätzten Position zu sehen.

Die Ergebnisse zeigen das in diesem Ansatz liegende Potenzial der Anwendbarkeit in verschiedensten Bereichen. In Nachfolgeprojekten werden diese derzeit auch entsprechend adressiert.

**Werdegang des Autors** Benno Heigl schloss sein Studium der Informatik an der Universität Erlangen-Nürnberg im Jahre 1997 mit Diplom ab. Anschließend war er dort bis 2001 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mustererkennung tätig. Die in diesem Zeitraum durchgeführten Forschungsaktivitäten erfolgten im Rahmen der Sonderforschungsbereiche 182 "Multiprozessor- und Netzwerkkonfigurationen" sowie 603 "Modellbasierte Analyse und Visualisierung komplexer Szenen und Sensordaten" und fanden mit der Promotion zum in diesem Beitrag beschriebenen Thema im Jahre 2003 ihren Abschluss. In dieser Zeit entstanden über 20 wissenschaftliche Veröffentlichungen, zum größten Teil Beiträge auf internationalen Tagungen, aber auch Buchkapitel sowie Artikel in wissenschaftlichen Zeitschriften. Seit Mai 2001 ist Benno Heigl bei Siemens Medical Solutions in Forchheim tätig. Nach zweijähriger Forschungs- und Entwicklungstätigkeit im Umfeld von 3-D-Rekonstruktion aus Angiographischen Röntgenbildern, 3-D-Anwendungen im Interventionellen Umfeld sowie 2-D/3-D-Fusion ist er nun Leiter der Entwicklungsabteilung *Image Acquisition* mit Standorten in Forchheim und Hoffman Estates bei Chicago, Illinois.



## Literatur

- [AB91] Adelson, E. H. und Bergen, J. R.: The plenoptic function and the elements of early vision. In: Laudy, M. und Movshon, J. A. (Hrsg.), *Computational Models of Visual Processing*. S. 3–20. Cambridge, MA. 1991. MIT Press.
- [CTCS00] Chai, J.-X., Tong, X., Chand, S.-C., und Shum, H.-Y.: Plenoptic sampling. *Proceedings SIGGRAPH 2000*. S. 307–318. July 2000.
- [DTM96] Debevec, P. E., Taylor, C. J., und Malik, J.: Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry- and image-based approach. In: *Proceedings SIGGRAPH '96*. S. 11–20. New Orleans. August 1996. ACM Press.
- [GGSC96] Gortler, S., Grzeszczuk, R., Szeliski, R., und Cohen, M. F.: The lumigraph. In: *Proceedings SIGGRAPH '96*. S. 43–54. New Orleans. August 1996. ACM Press.
- [He03] Heigl, B.: *Plenoptic Scene Modelling from Uncalibrated Image Sequences*. Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg, Germany. ibidem-Verlag, Stuttgart. November 2003.
- [HKP<sup>+</sup>99] Heigl, B., Koch, R., Pollefeys, M., Denzler, J., und van Gool, L.: Plenoptic modeling and rendering from image sequences taken by a hand-held camera. In: *Mustererkennung 1999*. S. 94–101. Springer-Verlag. 1999.
- [HZ00] Hartley, R. I. und Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press. 2000.
- [LH96] Levoy, M. und Hanrahan, P.: Light field rendering. In: *Proceedings SIGGRAPH '96*. S. 31–42. New Orleans. August 1996. ACM Press.
- [PK97] Poelman, C. J. und Kanade, T.: A paraperspective factorization method for shape and motion recovery. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 19(3):206–218. March 1997.
- [Po99] Pollefeys, M.: *Self-Calibration and Metric 3D Reconstruction from Uncalibrated Image Sequences*. PhD thesis. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium. May 1999.
- [ST94] Shi, J. und Tomasi, C.: Good features to track. In: *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. S. 593–600. Seattle, WA. June 1994. IEEE Computer Society Press.
- [ST96] Sturm, P. und Triggs, B.: A factorization based algorithm for multi-image projective structure from motion. In: *Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV)*. S. 709–720. Springer-Verlag. 1996.
- [UI79] Ullman, S.: *The Interpretation of Visual Motion*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts. 1979.
- [WAA<sup>+</sup>00] Wood, D. N., Azuma, D. I., Aldinger, K., Curless, B., Duchamp, T., Salesin, D. H., und Stuetzle, W.: Surface light fields for 3D photography. In: *Proceedings SIGGRAPH 2000*. S. 287–296. New Orleans. July 2000. ACM Press.

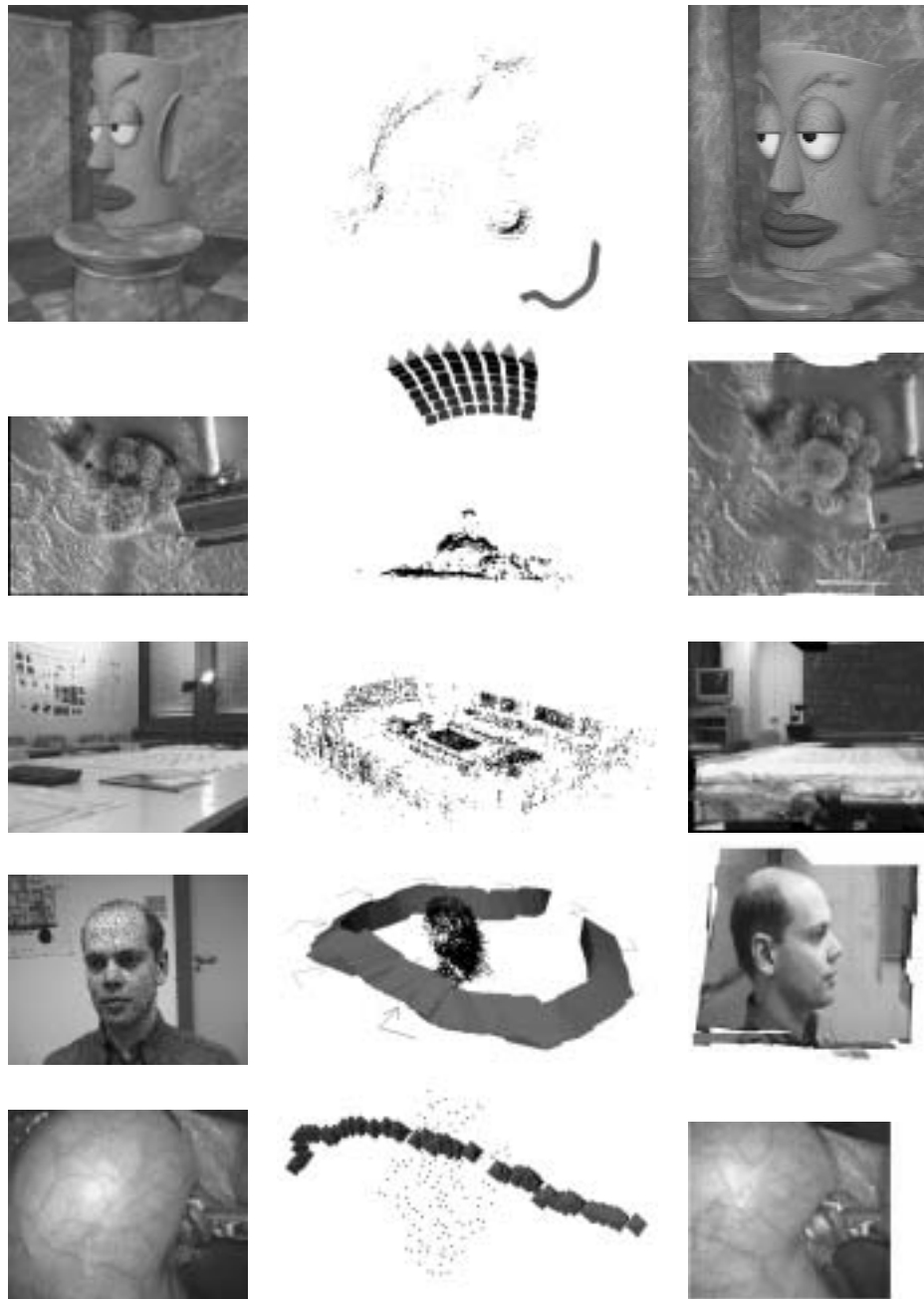


Abbildung 7: Beispiele für Experimente zur Kalibrierung und Ansichtenrekonstruktion. Links ist jeweils ein Bild der Originalsequenz zu sehen, in der Mitte die Rekonstruierten Punkte sowie die Aufnahmepositionen, rechts eine virtuelle Szenenansicht. Von oben nach unten: Synthetische Szene zur Evaluierung der Genauigkeit, mit Roboter aufgenommenem Kaktus, Innenansicht eines Seminarraums, 360-Grad-Ansicht eines Kopfes, laparoskopische Ansicht einer menschlichen Galle.