

TRANSPORTABLE EINRICHTUNG ZUR 3D-AUFNAHME VON SKULPTUREN AUCH UNTER FREILUFTBEDINGUNGEN

Lothar Paul
 Projektleiter 3D-Datenverarbeitung
 GFaI e.V. Berlin
 Rudower Chaussee 5, Geb. 13.7
 12484 Berlin
 Telefon: 030/6392-1625, Telefax: 030/6392-1602

In der Projektgruppe 3D-Datenverarbeitung der GFaI e.V. sind in den letzten drei Jahre umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Anwendungen der berührungslosen 3D-Datenerfassung für unterschiedliche Objektklassen sowie zu Fragen des Handlings und der Weiterverarbeitung solcher Daten geleistet worden. Einen wesentlichen Schwerpunkt des Interesses bildeten dabei stets auch Anwendungen und Beiträge in Kultur, Kunst und Geschichte, was u.a. durch die Kontinuität der Beteiligung an den verschiedenen EVA-Veranstaltungen in Berlin und London zum Ausdruck kommt.

Inzwischen verfügt die Gruppe über ein ganzes Arsenal nicht nur eigener Erfahrung und flexibel konfigurierbarer Programmmoduln im Bereich der 3D-Informatik, sondern gleiches trifft auch für spezielle, eigenentwickelte Gerätekonfigurationen mit Meßbereichen von weniger als 1 cm bis hin zu mehreren Metern für unterschiedliche Einsatz- bzw. Umgebungsbedingungen zu. Der vorliegende Beitrag ist - geschuldet dem besonderen Interesse der Anwender aus nichttechnischen Bereichen wie Denkmalschutz, Museen, Künstlern, Kulturwissenschaftlern, Archäologen etc.- insbesondere einem mobilen, auch netzunabhängig einsetzbaren 3D-Aufnahmesystem gewidmet, das 1996 im Rahmen einer ursprünglich technischen Aufgabenstellung entstanden ist und vor wenigen Wochen erstmalig auf der Bildverarbeitungsmesse VISION '96 in Stuttgart vorgestellt wurde. Eine weitere 3D-Geräteentwicklung der GFaI, das für die 3D- und Bilderfassung von musealen Gegenständen im Größenbereich bis etwa 30 cm geeignet ist, ist u.a. in [1][3] beschrieben.

Das Meßsystem war von Anfang an für den mobilen Einsatz (Straßen- Baustellen- bzw. Werkhallenumgebung) sowie für die Erfassung von Objekten mit typischen Abmessungen von 1 bis ca. 3 Metern konzipiert. Das unmittelbare Entwicklungsziel war jedoch zunächst die Schaffung einer Lösung für die effektive und objektive Erfassung dreidimensionaler Geometrieparameter an Grabwerkzeugen der Baumaschinenbranche (Baggerlöffel, -schaufeln) vor Ort. Das Aufnahmesystem war eingebunden in eine Gesamtlösung zur parametrischen 3D-Modellierung der genannten Objektklassen im Kontext von Reparatur, Nach- und Neukonstruktion (Einsatzadaption) der Grabwerkzeuge. Diese Entwicklungsarbeiten werden gegenwärtig fortgesetzt.

Der Meß- und Erfassungsbereich des Systems, die typischen Objektgrößen, der inzwischen realisierte Grad an Meßpunktdichte und -genauigkeit sowie an Transportabilität und Mobilität legt jedoch den Gedanken einer breiteren Nutzung des Systems nahe, was eine Vielzahl von Anfragen aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen, genannt seien neben dem kulturellen Bereich auch Textilindustrie und Medizin (beide zur individuellen Körpervermessung) unterstreicht.

Meßprinzip und gerätetechnische Realisierung des Prototyps

Für die mobile Aufnahme von Objekten vor Ort mußte ein Ansatz gewählt werden, der dem Nutzer möglichst viel Spielraum in der Positionierung von Aufnahmesystem und Objekt (Erfassung aus unterschiedlichen Positionen in Abhängigkeit von der räumlichen Objektausprägung) mit einem möglichst einfachen Handling des Systems einschließlich der erforderlichen Kalibrierprozeduren bietet. Darüber hinaus sollte die Lösung zumindest begrenzt netzunabhängig betrieben werden können, der konstruktive Aufbau und die technischen Parameter sollten eine hohe Robustheit unter den zu erwartenden Einsatzbedingungen gewährleisten und letztlich sollte das System auch hinsichtlich der Fremdlichtbedingungen möglichst variabel sein.

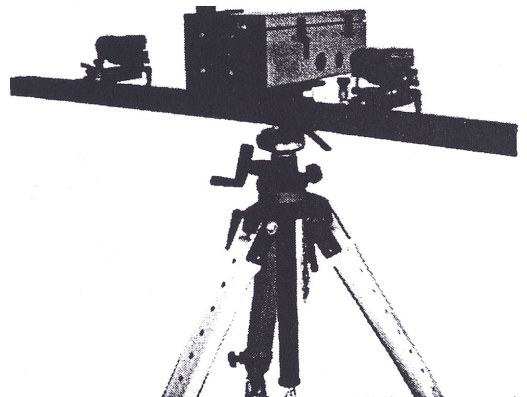


Abb. 1: Gerätekonfiguration

Um hinsichtlich der Beweglichkeit des Aufnahmesystems und der Einfachheit der Kalibrierung den Anforderungen möglichst nahe zu kommen, wurde ein aktiv stereometrischer Ansatz priorisiert. Aufgrund der bestehenden Erfahrungen mit 3D-Erfassungslösungen auf der Basis der codierten Weißlichtprojektion, die im Unterschied zu klassischen stereometrischen Verfahren eine weitaus bessere Meßpunktdichte bei eindeutiger Auflösung der Bildreferenzen liefern, wurde ein LCD-basierter, programmierbarer Streifenprojektor der Fa. ABW mit horizontalen und vertikalen Streifen zur Generierung Gray-codierter Marken eingesetzt. Mit den im vorliegenden Fall vorhandenen maximal 320 Streifen in jeweils horizontaler und vertikaler Richtung sind theoretisch $320 \times 320 = 102.400$ eineindeutig zuordenbare Marken auf dem Objekt realisierbar, die -objektabhängig- jeweils einem Abschnitt auf der Kameramatrix von im Mittel etwa 3×3 Pixel entsprechen. Praktisch werden im System jeweils 256 Streifen genutzt, was einer maximalen Meßpunktzahl von 65536 entspricht. Die Auswertung der Geometrie der Markenabbildungen (projizierte Rechtecke) zur Gewinnung von mehr als einem Meßpunkt pro Marke ist theoretisch möglich, wurde jedoch aus Aufwandsgründen nicht weiter verfolgt. Als die einer Marke zugeordneten lateralen Meßpunktkoordinaten wurde der geometrische Schwerpunkt der Markenabbildung gewertet, der aus der Stereobildauswertung resultierende Tiefenwert entsprechend zugeordnet.

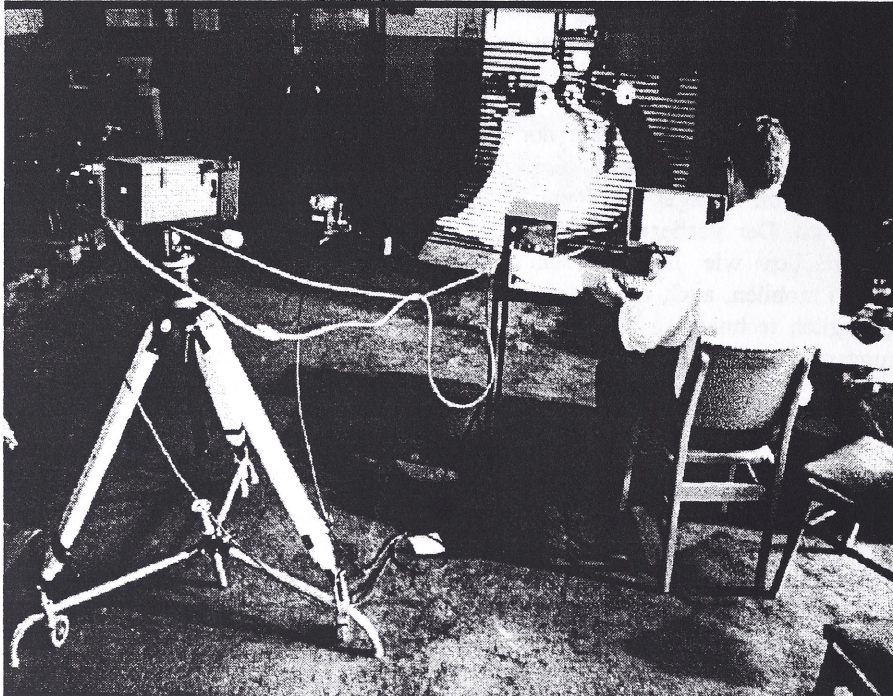


Abb. 2:
Der erste Prototyp im Praxistest (Vermessung von Grabwerkzeugen)

Der so realisierte erste Prototyp des Aufnahmesystems besteht aus zwei Kameras (768x512 Pixel) und der Projektionseinheit, die auf einer Trägerschiene so angeordnet sind, daß die optischen Achsen aller drei Module in einer Ebene liegen. Dabei können sowohl der Abstand der Kameras von der Projektionseinheit als auch der Winkel zwischen den optischen Achsen der Kameras und der des Projektors durch geeignete Justageeinrichtungen variiert und fixiert werden. Eine Korrektur der Matrixausrichtung der Kameras nach den projizierten Streifen ist ebenfalls vorgesehen. Das Gesamtsystem Kameras-Projektionseinheit ist auf einem belastbaren, mit den üblichen Justage- und Transporthilfsmitteln ausgestattetem Vermessungsstativ montiert. Unabhängig von den dadurch

ermöglichten Positioniervarianten des Systems ist die Trägerachse der Kameras noch um exakt 90 Grad um die Projektorachse schwenkbar, sodaß de facto auch 4 Kamerabilder von einer Objektansicht ausgewertet werden können oder einfach die nicht quadratische Kameramatrix in Abhängigkeit vom Objekt besser ausgenutzt werden kann. Die konstruktive Lösung des ersten realisierten Prototyps ist in Abb. 1 und 2 dargestellt.

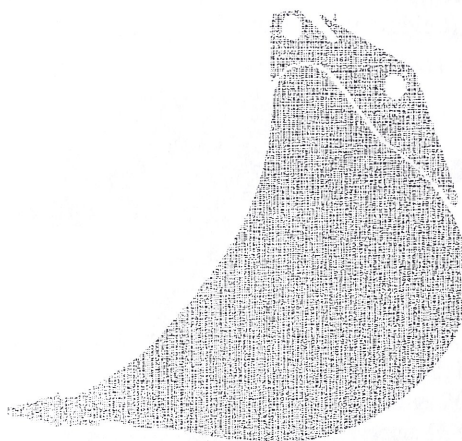


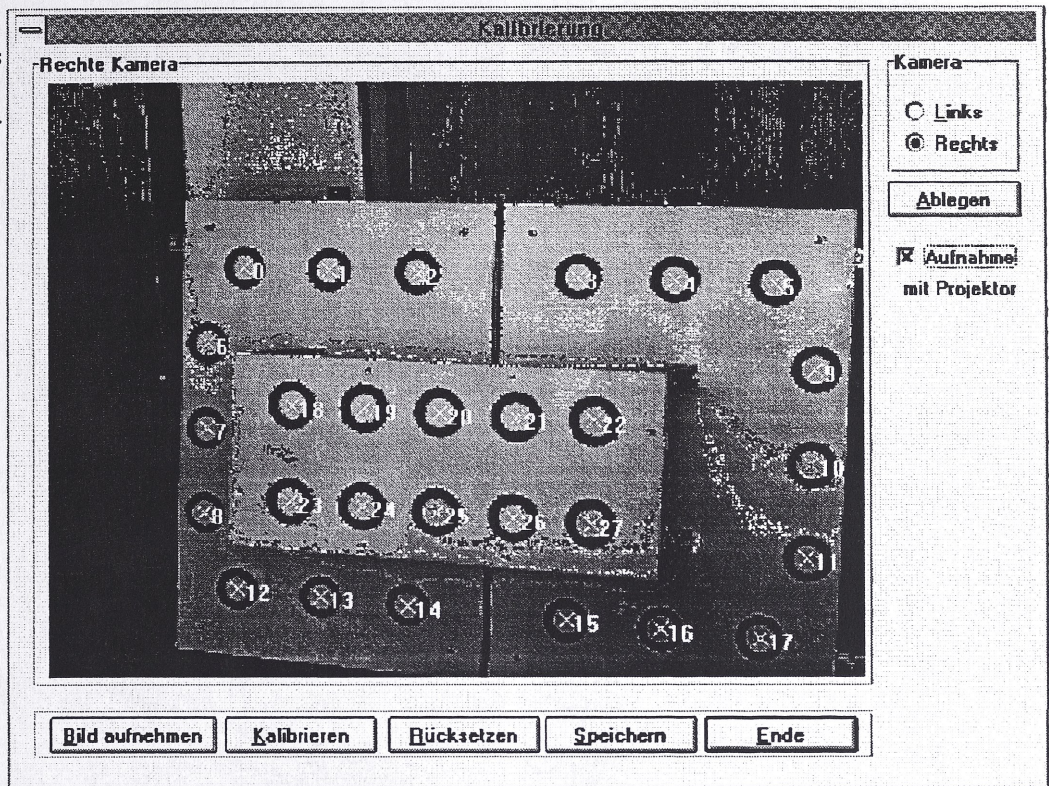
Abb. 3:
Ergebnisdatensatz Seitenfläche . zur Demonstration der stereometrisch realisierbaren Punktdichte (Objekt ca. 500 mm)

Die Steuerung des Systems und die Datenauswertung werden auf einem transportablen, netzunabhängigen PC-System (Pentium, 32-40 MB) als WINDOWS™-Applikation realisiert. In der realisierten Variante wurde ein stoß- und spritzwassergeschütztes PC-System der Fa. DOLCH verwendet. Der Einsatz eines Standard-Laptop ist aufgrund des benötigten Fragegrabber-Steckplatzes (PCI-Framegrabber) gegenwärtig nicht möglich.

Die Kalibrierung des Systems erfolgt mit Hilfe eines stabil gefertigten Kalibriernormals (Siehe auch Abb. 4), auf welchem in bekanntem Abstand und in zwei Raumebenen eine größere Anzahl von Ringen mit

definiertem Innen- und Außendurchmesser aufgebracht sind. Dieser Kalibrierkörper wird ohne besondere Lageanforderungen im Sichtbereich der Kameras aufgestellt. Die Ringe werden über eine in die Bediensoftware integrierte Bildauswertung automatisch erkannt, und für jeden Ring wird aus Innen- und Außenkreis die Mittelpunktlage berechnet. Über die somit bekannten Bildkoordinatenabstände im rechten und linken Kamerabild wird nach bekannten Verfahren die Anbindung an die Weltkoordinaten sowie die Tiefenkalibrierung des Meßbereiches durchgeführt. Für die Tiefenkalibrierung wird also die eingestellte Variante der Position und Ausrichtung im System Kamera1-Projektor-Kamera2 bestimmt, sodaß dieses System (die gesamte Montageschiene mit den Moduln) anschließend problemlos neu positioniert, ausgerichtet oder bewegt werden kann, ohne die daß die ermittelten Kalibrierwerte neu festgestellt werden müssen. Nach einer einmal erfolgten Kalibrierung vor Ort kann -mit anderen Worten- die Vermessung eines Objektes aus frei wählbaren Positionen erfolgen, wobei die Erfassung einer Objektansicht jeweils nur Sekunden in Anspruch nimmt.

Abb. 4:
Menübild des
Aufnahmesystems
bei der Kalibrie-
rung



Hinsichtlich Netzunabhängigkeit und Fremdlichteinfluß sind folgende Bemerkungen angebracht:

Bei den bisherigen praktischen Erprobungen im Außenbereich wurde die Projektionseinheit noch aus dem Netz gespeist. Mit dieser Aufnahmevariante konnten auch ca. zwei Meter große Objekte unter Werkhallenbedingungen (Tageslicht, gedämpft) erfaßt werden. Die im Außenbereich erfolgten Aufnahmen einer Statue (Abb. 5, 6) erfolgten in den Abendstunden, was für viele Anwender keine prinzipielle Schwierigkeit darstellt. Für die im Projektor eingesetzte Halogenlampe (24V, 100 oder 150W) können jedoch bei Bedarf auch zwei handelsübliche Auto-Akkumulatoren eingesetzt werden. Zwar ist die benötigte Stromstärke relativ groß, jedoch sind für die Erfassung der 3D-Meßwerte einer Objektansicht nur vier bis 5 Sekunden erforderlich, sodaß die Kapazität der Akkumulatoren nur kurzzeitig in Anspruch genommen wird. Alternativ kann ein Blitzprojektor mit entsprechendem Akkumulator eingesetzt werden. In diesem Fall kann auch unter normalen Tageslichtbedingungen (nicht gerade bei praller Sonne) vermessen werden. Ein Nachteil der Blitzvariante ist jedoch das Problem der Scharfeinstellung des Projektors, die wegen der kurzen Blitzzeiten nur anhand von Einzelbildern realisiert werden kann.

Weiterentwicklung des Systems

Aus den oben gemachten Angaben zur Meßpunktermittlung ist ersichtlich, daß die mit diesem Verfahren realisierte Punktauflösung noch deutlich unter der Pixelauflösung der Kamera liegt (mit Hilfe von ca. 9 Bildpunkten wird ein 3D-Wert bestimmt), was im Fall anderer Lösungen, speziell bei Einbeziehung von Phasenshift-Algorithmen, deutlich

überboten wird. Andererseits ist die Gewinnung mehrerer zehntausend 3D-Koordinaten in wenigen Sekunden im Vergleich mit taktilen Verfahren oder klassischer Stereometrie dennoch ein beachtlicher Fortschritt.

Nach Inbetriebnahme und Einsatztest des ersten Prototyps wurden ungeachtet dessen jedoch weitere Überlegungen zur Verbesserung der Punktdichte und anderer Parameter angestellt. Natürlich können mit dem Einsatz höherauflösender Kameras zusammen mit einer leistungsfähigeren Projektionseinheit (640 Streifen pro Richtung) wesentlich bessere Auflösungen und Genauigkeiten zu erwarten. Andererseits muß diese, extensive Qualitätsverbesserung jedoch auch mit einem -insbesondere bei den Kameras- überproportional hohen Preis bezahlt werden, sodaß diese Variante, abhängig von dem zu erwartenden Nutzen, immer noch zur Verfügung steht (gegenwärtig wird sie in der GFaI für eine technische Anwendung realisiert). Die Überlegungen gingen jedoch dahin, durch verfahrenstechnische Verbesserungen eine adäquate Leistungssteigerung zu erreichen. Es liegt nahe, die aus der Projektionstechnik bekannte

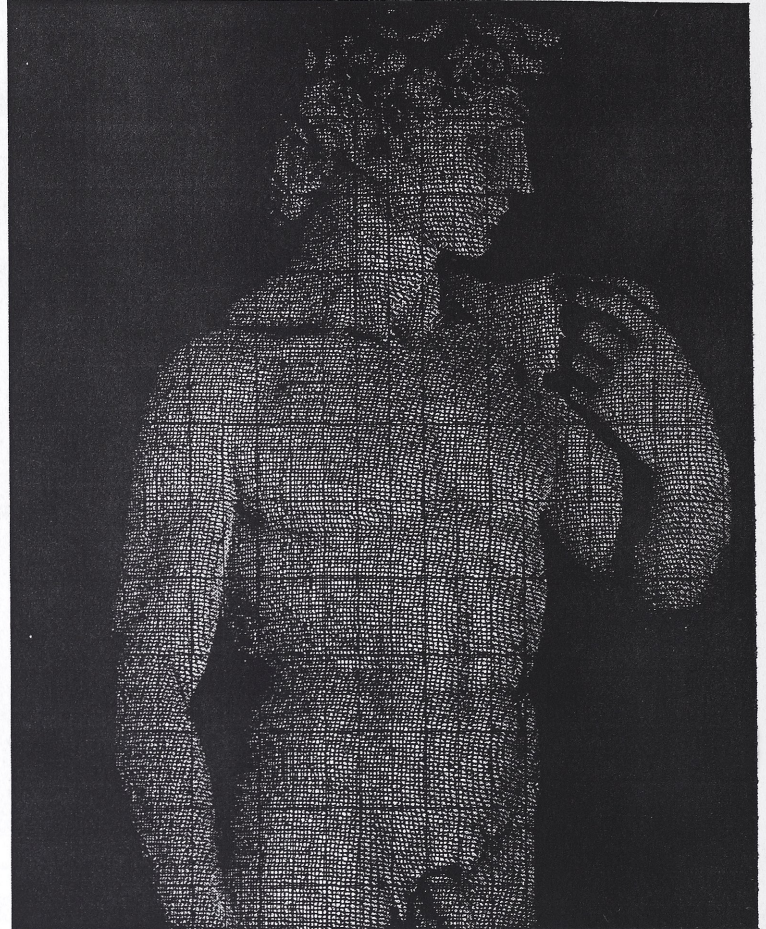
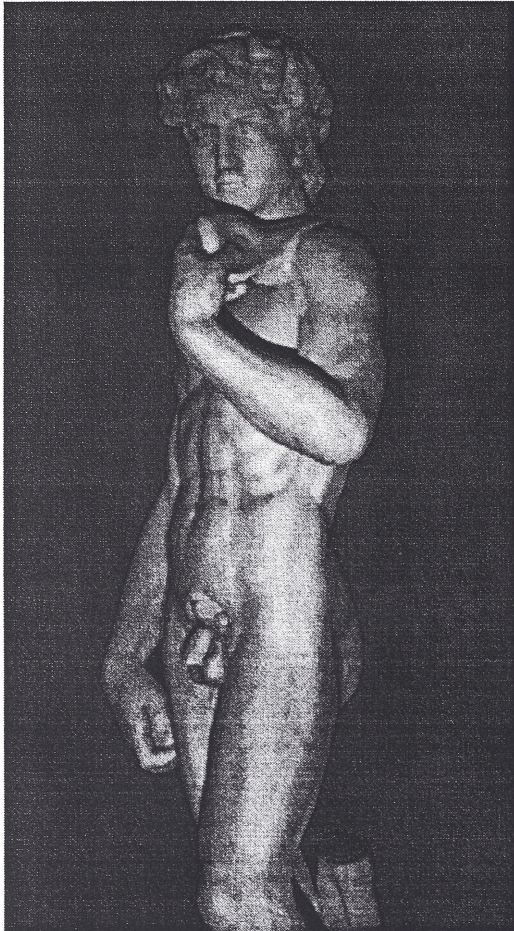


Abb. 5 und 6:

Grauwertbild und 3D-Datensatz (Punktwolke), gewonnen während der 3D-Vermessung einer lebensgroßen Statue im Freiland. Die 3D-Vermessung wurde in den Abendstunden mit der bereits verbesserten Methodik (Phasenshift) gewonnen. (Objekthöhe ca. 1,8m)

Phasenshiftmethode einzubeziehen. Die einfache Übertragung der bei anderen Systemen $[x][y]$ realisierten hybriden Algorithmen (Gray-Code und Phasenshift mit Einsatz eines optischen Tiefpaßelementes zur Erzeugung sinusförmiger Hell-Dunkel-Charakteristiken) auf das mobile Meßsystem war jedoch aufgrund der Kalibrierstrategie ohne Einschränkungen für die Beweglichkeit des Systems nicht möglich. Darüber hinaus kann auch das optische Tiefpaßelement bei der Projektion orthogonaler Streifenmuster nicht eingesetzt werden.

In den letzten Wochen ist es gelungen, ohne zusätzlichen Hardwareaufwand eine einsetzbare Modifikation des 3D-Meßsystems zu entwickeln, bei der der stereometrische Ansatz teilweise aufgegeben und durch ein Graycode-Phasenshift-Verfahren ersetzt wurde. Die Dichte der erfaßten 3D-Koordinaten des zu vermessenden Objektes steigt damit theoretisch bis zur Auflösung der Kameramatrix (in der Praxis liegt die Zahl der vermessenen 3D-Punkte, z.T. aufgrund von unvermeidlichen Abschattungen und Oberflächeneffekten, natürlich darunter). Das Phasenschieben erfolgt lediglich in einer der beiden Streifenrichtungen, wobei gegenwärtig zur Erzeugung des Hell-Dunkel-Sinus nur

eine definierte Unschärfereinstellung des Projektors genutzt wird. Aufgrund der wesentlich erhöhten Meßpunktdichte und des somit geringeren Mittelungsfehlers wird jedoch trotz dieser Einschränkung eine insgesamt erhöhte Meßqualität erreicht (Vergleiche auch die Abbildungen). Die übrigen Einsatzmerkmale des Meßsystems, insbesondere die Mobilität, Robustheit und die Bewegungsfreiheit bei der Vermessung, werden von den Modifikationen nicht berührt, das Vorgehen bei der Kalibrierung ist -trotz inhaltlicher bzw. algorithmischer Modifikationen- aus der Sicht des Anwenders nicht komplizierter geworden.

Weiterverarbeitung der Meßdaten

Für nahezu alle Anwendungen der 3D-Meßtechnik stellen die anfallenden Punktwolkendaten noch nicht das gewünschte Endergebnis dar. Sowohl für die Zwecke der Dokumentation und Archivierung, als auch für Visualisierungs- und Präsentationsanwendungen, erst recht aber für eine nachfolgende CAD/CAM-Bearbeitung ist die Modellierung, d.h. die Erzeugung mathematischer Flächen- oder Volumenbeschreibungen unerlässlich. In der GFaI e.V. Berlin wurde auch für diese Prozeßschritte spezielle Software entwickelt, es sei jedoch auch auf inzwischen verfügbare, (wenn auch teure) kommerzielle Softwareprodukte wie SURFACERTM, POMOSTM usw. verwiesen. Für die verschiedenen Prozeduren der Modellierung ist zunächst das exakte Zusammenführen der einzelnen Punktdatensätze (aus verschiedenen Perspektiven und Aufnahmepositionen) unbedingte Voraussetzung.

Im Fall des hier beschriebenen Systems, wo gerade die freie Positionsauswahl für die Vermessungen eine Prämisse der Entwicklung darstellte, ist eine einfache Rückführung über bekannte Objekt-Sensor-Positionen ausgeschlossen (bei dem unter [1],[3] erwähnten System wird das Objekt über eine Präzisionspositionierung gegenüber dem Sensor bewegt, sodaß die relative Lage der einzelnen Telidatensätze bekannt ist).

Für die Zusammenführung der Datensätze stehen zwei Methoden zur Verfügung. In der ersten Variante wird das Objekt mit einem daran befestigten Markierungssystem (Siehe Abb. 2, oberhalb des Meßobjektes) aus drei symbolisch markierten Kugeln verbunden, die mit Hilfe der parallel erfaßten Bildinformation erkannt werden und deren Raumlage in den jeweiligen Aufnahmen berechnet wird. Diese Methodik führt zu eindeutigen Zuordnungen, kann jedoch die Aufnahme-prozedur erschweren, da die Erkennbarkeit der Markierungen in jeder Aufnahme zu gewährleisten ist.

Alternativ werden in der Projektgruppe der GFaI eigene, interaktiv ausgelegte Programme zum „Matchen“ bzw. „3D-Puzzeln“ einzelner Punktwolkensätze anhand von Überlappungsbereichen mit korrelativen Verfahren (Gradientenverfahren) genutzt.

Literatur:

- [1] Stanke G., Paul L., "3-D Modelling: Measurements and Modelling in Cultural Applications" , Proceedings, EVA'95 Berlin, Berlin, 27.07.95
- [2] Paul, L., T. Bürger, R. Gast : "Entwicklung eines prototypischen Aufnahmesystems für die automatisierte Erfassung der Geometrie und von Oberflächenmerkmalen dreidimensionaler Objekte", GFaI Jahresbericht, Berlin, 1994
- [3] Paul, L., "Computer Aided Methods for 3D-Measurement and Modelling in Cultural Applications", The Hidden Resource, MDA-Conference, Proceedings Edinburgh, 1995