

EINSATZ KÜNSTLICHER PASSKÖRPER ZUR REGISTRIERUNG VON SCANDATEN SOWIE ZUR FUSION VON BILD- UND SCANDATEN

KATHRIN SCHILLING, FRANK BOOCHS¹

Zusammenfassung: Bild- und Scandaten verfügen über komplementäre Eigenschaften, sodass ihre Fusion einen Informationsgewinn verspricht. Ihre gemeinsame Nutzung erfordert jedoch die Herstellung einer Korrespondenz zwischen den heterogenen Datentypen. Diese lässt sich mit natürlichen Objektinformationen nur schwer realisieren, insbesondere wenn die relative Orientierung von Kamera und Scanner unbekannt ist. Zur Verknüpfung der Bild- und Scandaten sowie zur Registrierung der Scandaten sollen deshalb spezielle Passkörper zum Einsatz kommen.

1 Einleitung

Für die Erfassung, Modellierung und Interpretation dreidimensionaler Objekte sind geometrische und visuelle Informationen, wie Farben und Texturen, von zentraler Bedeutung. Als typische Erfassungstechniken kommen die digitale Photogrammetrie und das terrestrische Laserscanning infrage, da beide Verfahren eine detaillierte geometrische Beschreibung der Objekte erlauben.

Allerdings weisen beide Verfahren gewisse Defizite auf. So liefern Scandaten im Gegensatz zu Bildern zwar direkt 3D-Informationen, besitzen aber eine geringere Auflösung als die Bilddaten und verfügen über keinerlei Farbinformation. Bilddaten liegen originär als 2D-Informationen vor und müssen im Rahmen eines mehrstufigen Auswerteprozesses in ein 3D-Modell überführt werden.

Aufgrund der komplementären Eigenschaften von Bild- und Scandaten lassen sich einige der genannten Defizite durch den kombinierten und fusionierten Einsatz beider Verfahren ausgleichen bzw. minimieren. Zur gemeinsamen Datennutzung ist allerdings die Herstellung einer Korrespondenz zwischen den beiden heterogenen Datentypen unabdingbar.

Der vorgestellte Lösungsansatz zeigt die exemplarische Vorgehensweise zur Verknüpfung von Bild- und Scandaten bei Verwendung einer unabhängig vom Scanner positionierten (externen) Kamera. Im Rahmen der dazu notwendigen Untersuchungen erfolgte die Entwicklung eines weitgehend automatisierten Verfahrens zur Registrierung von Scandaten, das auch auf die automatisierte Verknüpfung von Bildern und Scans ausgedehnt werden kann.

2 Problemstellung

Den Vorteilen der komplementären Eigenschaften von Bild- und Scandaten steht das Problem ihrer Korrespondenzherstellung gegenüber. In beiden Datensätzen muss die Identifikation von identischen Elementen erfolgen, um eine gemeinsame Modellierung vornehmen zu können. Aufgrund der unterschiedlichen Auflösung und Perspektive der beiden Sensoren gestaltet sich diese allerdings schwierig.

¹ i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, FH Mainz, Lucy-Hillebrand-Str. 2, 55128 Mainz; E-Mail: (kschilling, boochs)@geoinform.fh-mainz.de

Werden Bild- und Scandaten von unterschiedlichen Standpunkten erfasst, und ist deren relative Orientierung nicht bekannt, verschärft sich die Problematik. Demnach muss ein Verfahren entwickelt werden, das diese Schwierigkeiten überwindet und mit dem es gelingt, identische Elemente aus beiden Datensätzen möglichst automatisiert zu extrahieren und einander zuzuordnen. Grundlage hierfür bilden die von Kamera und Laserscanner erfassten Informationen sowie die sensortypischen Eigenschaften beider Systeme.

Scandaten liefern Geometrie- und Intensitätsinformationen, Bilder Farb- und Texturinformationen. Sollen korrespondierende Elemente identifiziert und extrahiert werden, müssen sie durch Informationen beider Messverfahren in geeigneter Weise repräsentiert werden. Kanten erfüllen diesen Sachverhalt unter gewissen Voraussetzungen. Sie lassen sich in Scandaten eindeutig identifizieren und auch in den Bilddaten ist ihre Identifikation möglich, wenn angrenzende Seiten eines Objektes unterschiedliche Farben aufweisen.

Der entwickelte Lösungsansatz basiert deshalb auf der Verwendung von künstlichen Passkörpern, deren Kanten und Eckpunkte als Verknüpfungselemente von Bild- und Scandaten dienen und die zugleich die Kombination gleichartiger Datensätze erlauben. Die Verknüpfung der Scandaten mit Hilfe dieser speziellen Passkörper wird in einem ersten Schritt untersucht und nachgewiesen.

3 Passkörperkonzeption

3.1 Abstimmung auf Scan- und Bilddaten

Für die Registrierung von Scandaten mit Passkörpern oder Zielmarken existiert eine Vielzahl von Möglichkeiten, und die Gestaltung der Marken ist derzeit ebenso Thema wissenschaftlicher Untersuchungen. Existierende Zielmarken lassen sich gemäß ihrer Informationsnutzung in zwei Gruppen einteilen [KERN ET AL]. Während die eine Gruppe das Zentrum der Marke anhand der Geometrie der Punktwolke ableitet (z.B. Passkugeln), analysiert die zweite die Remissions- bzw. Intensitätswerte (z.B. Retromarken).

Beide Markendesigns nutzen demnach nur eine mögliche Information, entweder die Geometrie- oder die Intensitätsinformation. Um die größtmögliche Informationsdichte zu erhalten und die erforderliche Korrespondenz zu den Bilddaten herstellen zu können, sollen die neu zu entwickelnden Passkörper sowohl die Geometrie- als auch die Intensitätsinformationen nutzen.

Folgende Aspekte finden dabei Berücksichtigung:

- Werden dreidimensionale Passkörper verwendet, besteht eine Unabhängigkeit von der Zielrichtung. Es ist keine Zwangszentrierung wie bei rotierbaren Zielmarken notwendig.
- Ebene Flächen sind im Gegensatz zu unregelmäßigen Oberflächen mit relativ hoher Genauigkeit erfass- und modellierbar. Kanten sollten im 3D aufgrund ihres hohen Messrauschens und den damit verbundenen Ungenauigkeiten indirekt, beispielsweise über den Schnitt zweier ebener Flächen, ermittelt werden.
- Um die Intensitätsinformation nutzen zu können, müssen die Passkörper unterschiedliche Grau- und/oder Farbwerte repräsentieren. Da sich die Unterscheidung von Farben über die am Scanner empfangenen Intensitätswerte als schwierig erweist und eine

Abhängigkeit von Farben von den spektralen Eigenschaften des genutzten Lasers besteht, sind Grauwerte vorzuziehen.

- Um in einem gewissen Entfernungsbereich zuverlässig abgebildet zu werden, müssen die Passkörper eine gewisse Mindestgröße besitzen.

Des Weiteren müssen sich die speziellen Merkmale der Passkörper in den Bilddaten abbilden, um extrahiert werden zu können. In Anlehnung an die zuvor genannten Aspekte wie Nutzung von 3D-Körpern, Ebenen und Grauwerten bieten sich regionen- oder kantenbasierte Segmentierungsverfahren an, die Merkmale wie Intensität oder Textur nutzen, um markante Objektbereiche zu identifizieren.

In einem früheren Projekt des i3mainz [BOOCHS] erfolgte die Verwendung von farbigen Passwürfeln zur Orientierungsberechnung von Bildern. Da die zuvor spezifizierten Anforderungen den Einsatz eines Würfels als Passkörper rechtfertigen, wurde die „Würfelform“ als geometrische Form für den Passkörper festgelegt, wobei ebenso die Nutzung eines Quaders möglich gewesen wäre. Anstatt der Unterscheidung der einzelnen Ebenen über unterschiedliche Farben soll diese durch Nutzung verschiedener Grauwerte mit möglichst hohen Intensitätsunterschieden realisiert werden.

3.2 Modellierung

Ein Passwürfel erlaubt eine vollständige mathematische Formulierung seiner einzelnen Komponenten. Werden in den Scandaten drei Ebenen erkannt, lassen sich bei bekannter Kantenlänge die im Vordergrund liegenden Elemente direkt berechnen. Die sich im Hintergrund befindlichen Elemente können durch Transformation der bekannten Sollgeometrie oder ausgehend von Orthogonalitäts- und Parallelitätsbedingungen rekonstruiert werden. Dies ermöglicht die Bestimmung aller sechs Ebenen, zwölf Kanten und acht Eckpunkte.

In den Bilddaten bilden sich die Kanten des Würfels bei ausreichendem Kontrast als Grauwertdiskontinuitäten ab und können mit Hilfe von Algorithmen zur Kantenfindung extrahiert werden. Eckpunkte des Würfels lassen sich im Anschluss durch Kantenschnitt berechnen. Die Korrespondenzherstellung von Bild- und Scandaten kann demnach durch die Würfeckpunkte realisiert werden.

Um die Eckpunkte identifizieren und die räumliche Ausrichtung des Würfels ermitteln zu können, muss die Unterscheidbarkeit der sechs Würfebenen gewährleistet werden. Hierzu erfolgt die Nutzung der Intensitätsinformation. Jede Ebene wird so gestaltet, dass sie sich in ihrem Aussehen von den anderen fünf Ebenen unterscheidet.

Die theoretische Nutzung sechs unterschiedlicher Grauwerte, und somit die Verwendung jeweils eines Grauwertes für eine Ebene, wäre aufgrund der zu geringen Differenzen in den Intensitätswerten der einzelnen Ebenen – trotz Nutzung einer Auflösung von 12bit – nicht robust genug. Eigens durchgeführte Testmessungen zeigen allerdings, dass sich die Grauwerte weiß, grau und schwarz aufgrund ihrer hohen Reflexionsunterschiede sehr gut unterscheiden lassen. Für die Würfelkonzeption wird deshalb lediglich auf diese drei Grauwerte zurückgegriffen. Um die sechs Ebenen eindeutig unterscheiden zu können, muss jede Ebene über zwei dieser Grauwerte verfügen. Jede Würfebene wird deshalb in eine Grund- (außen) und Symbolfläche (innen) unterteilt, wobei benachbarte Grundflächen stets einen unterschiedlichen Grauwert aufweisen, sodass im Bild eine Grauwertkante entsteht. Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt der

Punktwolke in intensitätsbasierter Darstellung, wobei der Würfel noch einmal rechts oben separat zu sehen ist. Zum direkten Vergleich befindet sich darunter die Darstellung des Würfels mit Hilfe eines Kamerabildes.

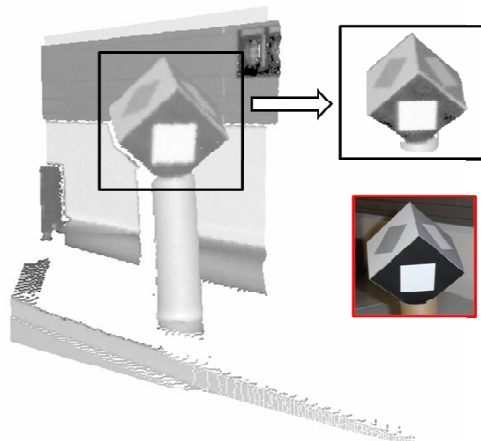


Abb. 1: Punktwolke und Kamerabild eines Passwürfels

3.2.1 Geometrisches Modell

Jede Ebene wird durch den Normalenvektor mit seinen drei Komponenten n_x , n_y , n_z beschrieben. Sie lässt sich durch die allgemeine Ebenengleichung folgendermaßen formulieren:

$$n_x x + n_y y + n_z z + d = 0 \quad (1)$$

Die Kanten des Würfels werden durch den Schnitt zweier benachbarten Ebenen berechnet. Die Parameterdarstellung der Kante entspricht dabei der allgemeinen Darstellung für eine Gerade.

$$\vec{g} : x_S + t \cdot \begin{pmatrix} n_{1x} \\ n_{1y} \\ n_{1z} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} n_{2x} \\ n_{2y} \\ n_{2z} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Der Richtungsvektor der Kante wird durch das Vektorprodukt der Normalenvektoren der beiden sich schneidenden Ebenen repräsentiert. Für die Beschreibung der Kante wird der Aufpunkt x_S benötigt, der die beiden Ebenengleichungen der benachbarten Ebenen erfüllen muss. Nach Umformungen ergibt sich das zu lösende Gleichungssystem:

$$x_S = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} \\ n_{2x} & n_{2y} & n_{2z} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Für dieses unterbestimmte Gleichungssystem mit drei Unbekannten (x, y, z) , aber lediglich zwei Beobachtungsgleichungen, existieren im Allgemeinen entweder keine oder unendlich viele Lösungen. Da die beiden Ebenen nicht parallel sind, müssen sie sich schneiden, woraus eine unendliche Lösungsmenge, in Form der gesuchten Kante, entsteht.

Werden die Normalenvektoren dreier benachbarter Ebenen geschnitten, lassen sich die Koordinaten des ersten Eckpunktes E_{1x} , E_{1y} , E_{1z} mit Hilfe der Gleichungen (4) und (5) berechnen, wobei Δ die Determinante sowie Δx , Δy , Δz Unterdeterminanten darstellen.

$$E_{1x} = \frac{-\Delta x}{\Delta} \quad E_{1y} = \frac{-\Delta y}{\Delta} \quad E_{1z} = \frac{-\Delta z}{\Delta} \quad (4)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} \\ n_{2x} & n_{2y} & n_{2z} \\ n_{3x} & n_{3y} & n_{3z} \end{vmatrix} \quad \Delta x = \begin{vmatrix} d_1 & n_{1y} & n_{1z} \\ d_2 & n_{2y} & n_{2z} \\ d_3 & n_{3y} & n_{3z} \end{vmatrix} \quad \Delta y = \begin{vmatrix} n_{1x} & d_1 & n_{1z} \\ n_{2x} & d_2 & n_{2z} \\ n_{3x} & d_3 & n_{3z} \end{vmatrix} \quad \Delta z = \begin{vmatrix} n_{1x} & n_{1y} & d_1 \\ n_{2x} & n_{2y} & d_2 \\ n_{3x} & n_{3y} & d_3 \end{vmatrix} \quad (5)$$

3.2.2 Topologisches Modell

Das topologische Modell des Würfels legt die topologischen Beziehungen und somit die Nachbarschaften der einzelnen Komponenten des Würfels fest. Es beschreibt beispielsweise die Lage benachbarter Ebenen mit den dazugehörigen Eckpunkten.

Ebenenkodierung		Teilflächencodierung	
Buchstabencode	Zahlencode	Grundfläche	Symbolfläche
Wg	1	3	2
Ws	2	3	1
Gw	3	2	3
Gs	4	2	1
Sw	5	1	3
Sg	6	1	2

Tab. 1: Ebenenkodierung des Passwürfels

Um das Modell zu formalisieren, werden Codierungen verwendet. Jede Ebene, Teilfläche, Kante und jeder Eckpunkt bekommt einen Zahlencode zugewiesen. Die Teilflächen werden gemäß ihres Grauwertes codiert: 3 für weiß, 2 für grau und 1 für schwarz. Die Ebenenkodierung setzt sich aus dem Code ihrer beiden Teilflächen zusammen, und bildet ihrerseits die Basis für die Codierung der Kanten und Eckpunkte.

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Codierung des Eckpunktes
Wg (1)	Gw (3)	Sw (5)	135
Wg (1)	Gw (3)	Sg (6)	136
Wg (1)	Gs (4)	Sw (5)	145
Wg (1)	Gs (4)	Sg (6)	146
Ws (2)	Gw (3)	Sw (5)	235
Ws (2)	Gw (3)	Sg (6)	236
Ws (2)	Gs (4)	Sw (5)	245
Ws (2)	Gs (4)	Sg (6)	246

Tab. 2: Benachbarte Ebenen mit dazugehörigen Eckpunkten

Die möglichen Ebenencodierungen sind Tab. 1 zu entnehmen. Sie lassen sich in Form einer Buchstaben- oder einer Zahlenkombination ausdrücken. Die Buchstabenkombinationen sind Abkürzungen für die Grauwerte der Grund- und Symbolflächen, wobei der erste Buchstabe die Grund- und der zweite Buchstabe die Symbolfläche bezeichnet. Da eine Kante zwei benachbarte Ebenen besitzt, setzt sich ihr Code aus dem Ebenencode der beiden Ebenen zusammen, analog gilt dies für einen Eckpunkt und seine drei benachbarten Ebenen (siehe Tab. 2). Werden zwei Ebenen identifiziert, d.h. ihre Codierung entschlüsselt, und ist ihre relative Lage zueinander bekannt, kann die vollständige Rekonstruktion des Würfels erfolgen. Hieraus ergibt sich für die Registrierung von Scandaten der Vorteil, dass keine identischen Ebenen bzw. Würfeckpunkte identifiziert werden müssen und sich die Standpunktwahl vereinfacht.

Abb. 2 zeigt den schematischen Aufbau des konzipierten Würfels. Auf der linken Seite ist das Würfelnetz mit den entsprechenden Punktnummern der Ecken dargestellt, auf der rechten Seite zwei mögliche Ausrichtungen des Würfels.

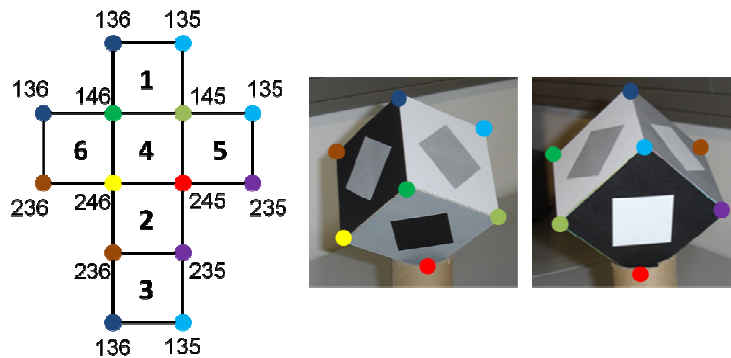


Abb. 2: Würfelnetz mit festgelegter Würfeckencodierung

4 Berechnungsschritte

4.1 Geometrische Bestimmung der Würfelemente

In einem ersten Schritt erfolgt die Ebenensegmentierung der erfassten Ebenen. Hierzu kommt ein von [ZULIANI] entwickelter Ransac-Algorithmus zum Einsatz. Im Folgenden werden für jede Ebene der Normalenvektor mit seinen drei Komponenten n_x , n_y , n_z sowie der Parameter d bestimmt. Der erste Eckpunkt wird gemäß der Gleichungen (4) und (5) berechnet. Dieser ist Ausgangspunkt für die Bestimmung der Eckpunkte E_2 , E_3 und E_4 , die sich nach Gleichung (6) bestimmen lassen.

$$E_2 = E_1 + k_l \frac{\vec{n}_1 \times \vec{n}_2}{|\vec{n}_1 \times \vec{n}_2|} \quad E_3 = E_1 + k_l \frac{\vec{n}_1 \times \vec{n}_3}{|\vec{n}_1 \times \vec{n}_3|} \quad E_4 = E_1 + k_l \frac{\vec{n}_2 \times \vec{n}_3}{|\vec{n}_2 \times \vec{n}_3|} \quad (6)$$

Hierbei stellt k_l die Kantenlänge des Würfels dar. Die Eckpunkte E_5 - E_8 werden wiederum durch den Schnitt zweier Kanten berechnet. Diese Kanten verlaufen parallel zu den bereits zuvor bestimmten Kanten. Ausgangspunkte bilden jeweils zwei sich auf einer Würfebene diagonal

gegenüberliegenden Eckpunkte. Zur Bestimmung der Lage der einzelnen Ebenen zueinander, wird die relative Lage ihrer Schwerpunkte bestimmt. Der Zusammenhang der Berechnungsgrößen wird in Abb. 3 veranschaulicht.

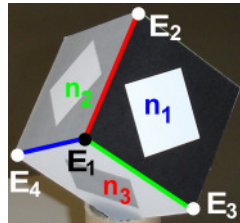


Abb. 3: Normalenvektoren und Eckpunkte des Würfels

4.2 Codierung der Eckpunkte

Für die Codierung der Eckpunkte müssen die Intensitätswerte der einzelnen Ebenen untereinander sowie die Intensitätswerte der Teilflächen einer Ebene analysiert werden.

Aufgrund der Abhängigkeit des Intensitätswertes von mehreren Einflussfaktoren wie beispielsweise dem Auftreffwinkel des Laserstrahls lassen sich für die einzelnen Grauwerte der unterschiedlichen Ebenen keine Schwellwerte definieren, die eine direkte Identifikation der Ebenen und ihrer Teilflächen zuließen. Da diese Faktoren allerdings für eine Ebene und ihre zugehörigen Teilflächen in der gleichen Weise wirken, kann direkt ermittelt werden, welche der beiden Teilflächen die hellere oder die dunklere ist. Wird diese Analyse für alle drei Ebenen durchgeführt und das topologische Modell berücksichtigt, verbleiben als Resultat vier mögliche Ebenenkombinationen. Durch die Definition von weiteren Regeln lassen sich die Ebenen derzeit in 50-60% der Fälle eindeutig identifizieren.

4.3 Registrierung der Scandaten

Nach Bestimmung aller Würfeckpunkte lassen sich die Scandaten registrieren. Hierzu muss lediglich bei der Nummerierung des einzelnen Würfels manuell eingegriffen werden. Die Eckpunktberechnung und Zuordnung der Eckpunkte erfolgt für jeden Würfel automatisiert.

5 Durchführung von Testmessungen

Zur Prüfung des Verfahrens erfolgt eine Reihe von Testmessungen. Um die Ergebnisse der Registrierung der Scandaten mit bestehenden Verfahren vergleichen zu können, werden neben den Würfeln gleichzeitig Passkugeln und Black- and White-Targets eingesetzt. Im Anschluss erfolgt die separate Registrierung mit den drei unterschiedlichen Verknüpfungsobjekten.

Erste Auswertungen zeigen, dass bezüglich der Genauigkeit ebenso gute Ergebnisse erreicht werden können wie bei den derzeit existierenden Verfahren zur Registrierung von Scandaten, wobei im Vergleich zu den Black- and White-Targets weniger Passkörper notwendig sind.

6 Fazit

Die zuverlässige Extraktion von korrespondierenden Elementen aus Bild- und Scandaten gestaltet sich durch die unterschiedliche Charakteristik der heterogenen Daten schwierig. Das entwickelte Verfahren umgeht diese Problematik, indem speziell auf beide Messverfahren abgestimmte Passkörper zur Korrespondenzherstellung verwendet werden. Das Verfahren ist noch in Entwicklung, sodass noch nicht bei allen Aufnahmekonfigurationen durchgreifende Ergebnisse erhalten werden. Dennoch stellt sich das Verfahren als sehr zweckmäßig dar. Durch den Einsatz der konzipierten Passkörper gelingt eine weitgehend automatisierte Registrierung der Scandaten. Hierbei muss die eindeutige Identifikation der einzelnen Würfelseiten sichergestellt werden, weshalb derzeit an der Entwicklung allgemeingültiger Regeln zur Intensitätsanalyse gearbeitet wird. Der vorgestellte Lösungsansatz liefert zudem die Voraussetzungen, Bilder mit Scandaten zu verknüpfen.

7 Literaturverzeichnis

- ABDELHAFIZ, A. & RIEDEL, B. & NIEMEIER, W., 2005: Towards a 3D true colored space by the fusion of laser scanner point cloud and digital photos. Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Beitrag des Workshops „3D-ARCH 2005: Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures“, Italien. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W17/pdf/31.pdf>
- ALSHAWABKEY, Y., 2006: Integration of laserscanning and photogrammetry for heritage documentation. Dissertation, Universität Stuttgart. http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2899/pdf/PHd_Thesis.pdf
- BOOCHS, F., 2001: Ein Verfahren zur automatischen Detektion von kubischen Verknüpfungsobjekten in digitalen Farbmessbildern. DGPF-Publikationen, Vol. 11, 2001.
- BRONSTEIN, I. & SEMENDJAJEW, K. & MUSIOL, G. & MÜHLIG, H., 2008: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch 7., vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage.
- DOLD, C. & BRENNER, C., 2006: Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. ISPRS Symposium “Image Engineering and Vision Metrology”, Dresden, Germany.
- KAMPMANN, G. & RENNER, B., 2004: Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung ausgleichender Ebenen und Geraden. Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, Ausgabe 02/2004, Wichmann Verlag, Berlin - Offenbach.
- KERN, F. & SIEGRIST, B. & HUXHAGEN, U. & MEHLIG, S., 2010: Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns. Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, Ausgabe 05/2010, Wichmann Verlag, Berlin - Offenbach.
- SCHILLING, K., 2009: Datenfusion von Bild- und Scandaten. Denkmäler3.de - Industriearchäologie. Tagungsband des interdisziplinären Kolloquiums vom 5.-7. November 2008 in Essen, Zollverein School, Hrsg.: Przybilla, H.-J., Grünkemeier, A., Shaker Verlag, Aachen.
- ZULIANI, M., 2008: RANSAC for Dummies, Draft (27. November, 2008).