

Gemeinsame Ausgleichung von Laserscannerdaten und digitalen photogrammetrischen Bildern

AXEL WENDT, Oldenburg

Zusammenfassung: Dieser Aufsatz beschreibt eine Methode mehrere Datenarten in einer gemeinsamen Ausgleichung zur Schätzung der Objektoberfläche heranzuziehen. Im Gegensatz zu den in der Praxis angewandten Methoden aus einem Aufnahmeverfahren eine Oberfläche zu rekonstruieren, wird in diesem Aufsatz die Kombination zweier Verfahren aufgezeigt: digitale photogrammetrische Bilder und Laserscanningdaten. Das Facetten-Stereosehen, ein allgemeiner photogrammetrischer Matchingansatz, der digitale Bilder im Objektraum zuordnet, wird zur mathematischen Beschreibung zwischen Sensor und Objekt herangezogen. Dieser Matchingansatz schätzt zum einen das radiometrische und zum anderen das geometrische Oberflächenmodell. Durch Integration der Laserscannerdaten in das Ausgleichungsmodell der Oberflächenrekonstruktion – das Facetten Stereosehen – wird durch diese zusätzlichen geometrischen Beobachtungen ein schnelleres Konvergenzverhalten in der Ausgleichung festgestellt. Die unabhängigen Datenarten lassen eine automatische punkt- oder pixelweise (pixel = picture element) bzw. surfelweise (surfel = surface element) Kontrolle des rekonstruierten Objektes zu.

Summary: *Combined Adjustment of Laser Scanning Data and Digital Photogrammetric Images.* This paper discusses a method for surface reconstruction by a combined adjustment of multiple data types. Contrary to the practical methods of reconstruction of an unknown surface with only one data type, this paper describes a way of joining two data types: digital photogrammetric images and 3-D laser scanning data. The Facet Stereo Vision method, a general photogrammetric matching algorithm for digital images, is used to form the mathematical relationship between sensor and object. On the one hand, the result of this general matching algorithm is, the radiometric model – the ortho image. On the other hand, the geometric model – the digital terrain model, is determined simultaneously. For laser scanning data integrated as additional observations in the Facet Stereo Vision surface reconstruction adjustment a faster convergence is noticed. These two independent data types provide an automatic point- or pixelwise (pixel = picture element) respectively surfelwise (surfel = surface element) control of the reconstructed object.

1 Einleitung

Auf Grund der enormen Nachfrage von Geodaten stellt die Erfassung, Rekonstruktion und Simulation realer Objekte eine bedeutende Schlüsselposition in der Wirtschaft dar. Doch alleinige Quantität von Geodaten reicht zur Befriedigung des Marktes nicht aus. Schnell erfasste, preiswerte und real texturierte Modelle werden von der Wirtschaft gefordert. Eine detailgetreue Rekonstruktion der wahren Welt (virtual reality) ermöglicht z.B. Unternehmen überzeugend Simulationen Kunden u.a. vorzustel-

len, siehe auch (GRÜN et al. 2000). Die Erfassung, Rekonstruktion und Simulation realer Objekte, etabliert sich mehr und mehr in die Praxis und stößt dabei auf hohe Resonanz. Auf Grund dieses Verlangens nach Geodaten konkurrieren bei der Erfassung realer Objekte verschiedene Aufnahmeverfahren um Wirtschaftlichkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit. In dieser Studie hat sich der Verfasser mit dem Laserscanningverfahren und der Luftbildphotogrammetrie beschäftigt; zwei Aufnahmesensoren, die um die Erfassung der Erdoberfläche konkurrieren, siehe z. B. (BALTSAVIAS 1999).

In diesem Aufsatz wird die Rekonstruktion wahrer Objekte in Kombination der genannten Datenarten exemplarisch durchgeführt. Die primären Ziele sind: ein hochgenaues digitales Oberflächenmodell (DOM) zu erstellen, die Vorteile aus der Kombination dieser beiden Datenarten auszunutzen, sowie den gesamten Informationsgehalt auszuschöpfen. Dabei wird untersucht, inwieweit sich der Nachbearbeitungsprozess verringert, sich das Konvergenzverhalten der iterativen Ausgleichung verhält, eine unabhängige Kontrolle bei der Rekonstruktion auftritt und ob die Bereiche auftretender Diskrepanzen automatisch lokalisiert werden können. Als Nebenprodukt wird zudem ein Orthophoto erzeugt, ein radiometrisches Modell, welches die „wahre“ Textur approximiert.

Zur Realisierung der Zielsetzung, wird der allgemeine photogrammetrische Auswertansatz des Facetten-Stereosehens aufgegriffen. Das Facetten-Stereosehen, welches erstmals von (WROBEL 1987) veröffentlicht und von (WEISENSEE 1992, TSAY 1996, SCHLÜTER 2000, WEISENSEE 2000) u.a. untersucht und weiterentwickelt wurde, ordnet digitale Bilder direkt im Objektraum zu.

Hinsichtlich der geometrischen Beobachtungen – den Laserscannerdaten – wird das Ausgleichungsmodell der objektraum-orientierten Bildzuordnung erweitert, damit diese Beobachtungen am Schätzungsprozess zur Rekonstruktion des Objektes ihrer Güte nach teilhaben.

Im Folgenden wird das Facetten-Stereosehen mit der integrierten geometrischen Beziehung zu der verwendeten Punktwolke aus Laserscannerdaten aufgezeigt. Weiter werden erste Ergebnisse, die im Rahmen der Untersuchungen erzeugt wurden, vorgestellt und hinsichtlich der angesprochenen Zielsetzung untersucht. Zur Bewertung werden die Ergebnisse in Form von Bildern, Bildsequenzen und virtuellen Modellen visualisiert. Als statistische Momente werden insbesondere die Residuen – getrennt in geometrische und radiometrische – betrachtet, aus denen primär die Bewertung der Ausgleichung abgeleitet wird.

Diese Art der Datenerfassung bzw. Auswertung stellt einen neuen Ansatz zur präzisen Rekonstruktion und digitalen Simulation von Freiformoberflächen dar.

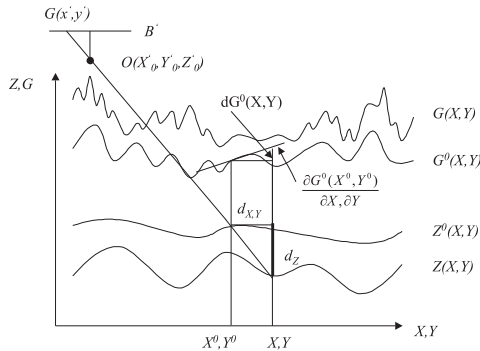
2 Das Facetten-Stereosehen

Der mathematische Ansatz des Facetten-Stereosehens zeichnet sich durch seine Offenheit aus, jegliche objektbezogene Informationen zur Objektrekonstruktion mit heranzuziehen. Hierbei wird die Korrespondenz zwischen Pixel und Surfel im Objektraum über die i.d.R. zentralperspektive Abbildungsgeometrie geschaffen. Sind die Orientierungsdaten, die zur Vereinfachung konstant in die Ausgleichung eingehen, der einzelnen Bilder bekannt, so steht jedes Bild mit Hilfe der Abbildungsgeometrie in direktem Bezug zu dem zu rekonstruierenden Objekt. Durch die inverse Formulierung der Bildentstehung, dem Prinzip des Facetten-Stereosehens, findet die Bildzuordnung im Objektraum unter Hinzunahme eines geometrischen und radiometrischen Näherungsmodells nach der Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Markov-Modell) statt. Dabei werden die Grauwerte der einzelnen Pixel in den Objektraum projiziert und mit der Objektgeometrie zum Schnitt gebracht (s. Abb.1).

Allgemein lässt sich der in Abb.1 beschriebene Zusammenhang auch für n Bilder ausdrücken, siehe (1), wobei T die jeweilige Transferfunktion darstellt, welche die Beziehung des Intensitätswertes, zwischen dem Objekt und dem Bild herstellt.

$$\begin{aligned} G(X, Y) &= T'[G'(x', y')] \\ &= T''[G''(x'', y'')] = \dots \end{aligned} \quad (1)$$

Wie aus Abb. 1 ersichtlich, ergibt sich für die Stelle X^0, Y^0 mit dem Grauwert $G'(x', y')$ im Bild B' durch die lineare Transformation T des Bildsignalwertes vom Bildraum zum Objektraum und die anschließende Entwicklung der Objektgrauwertfunktion in eine Taylor-Reihe unter Vernachlässigung der Restglieder folgende Gleichung:



- Z (X, Y) Oberflächenfunktion des geometrischen Objektraummodells
- Z⁰(X, Y) Näherungsfunktion des geometrischen Objektraummodells
- G (X, Y) Oberflächenfunktion des radiometrischen Objektraummodells
- G⁰(X, Y) Näherungsfunktion des radiometrischen Objektraummodells

Abb. 1: Grundbegriffe der Bildinversion: Der Verlauf eines Bildsignals nach TSAY 1996.

$$\begin{aligned}
 G(X, Y) &= G^0(X^0 + dX, Y^0 + dY) \\
 &+ dG^0(X, Y) \\
 &\approx G^0(X^0, Y^0) + \frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta X} \cdot dX \\
 &+ \frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta Y} \cdot dY + dG^0(X, Y)
 \end{aligned} \tag{2}$$

wobei

$$\frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta Y} \text{ und } \frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta X}$$

den in X und Y aufgespalteten Grauwertgradienten entspricht. Die Differenziale dX, dY an den Stellen X^0, Y^0 sind abhängig von den zu erwartenden Höhenänderungen dZ in Z^0 . Dies lässt sich mit Hilfe des Abbildungsstrahles ausdrücken, der sich in den Kollinearitätsgleichungen, den Grundgleichungen der Photogrammetrie, wiederfinden lässt. Das Projektionszentrum O des heranzuziehenden perspektiven Bildes wird durch X'_0, Y'_0, Z'_0 ausgedrückt und wie schon erwähnt als fester Parameter eingeführt.

Dadurch, dass die Orientierungsparameter bekannt sind, ist der Abbildungsstrahl der Bildinversion fest definiert. Der Grauwert eines Pixels darf sich bei der Projektion in den Objektraum nur auf diesem Strahl bewegen, der sich wie folgt aus der zentral-

perspektiven Abbildungsgeometrie beschreiben lässt:

$$\begin{aligned}
 dX &= \frac{\delta X}{\delta Z} \cdot dZ = \frac{X^0 - X'_0}{Z^0 - Z'_0} \cdot dZ \\
 &= X'_Z \cdot dZ \\
 dY &= \frac{\delta Y}{\delta Z} \cdot dZ = \frac{Y^0 - Y'_0}{Z^0 - Z'_0} \cdot dZ \\
 &= Y'_Z \cdot dZ
 \end{aligned} \tag{3}$$

durch Einsetzen von (2) und (3) in (1) folgt:

$$\begin{aligned}
 G'(x', y') &= T'^{-1} \left(\begin{array}{c} G^0(X^0, Y^0) + dG^0(X, Y) \\ + \left(\frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta X} \cdot X'_Z + \frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta Y} \cdot Y'_Z \right) \cdot dZ \end{array} \right) \tag{4}
 \end{aligned}$$

was der Grundgleichung des Facetten-Stereosehens entspricht, siehe (WROBEL 1987, WEISENSEE 1992). In (4) wird der funktionale Zusammenhang zwischen den Bildgrauwerten $G'(x', y')$ mit dem radiometrischen Objektraummodell $G(X, Y)$ und geometrischen Objektraummodell $Z(X, Y)$ beschrieben. Dabei wird das geometrische Modell durch

dZ vertreten, was einer Korrekturfunktion entspricht, die mit der vorgegebenen Funktion $Z^0(X^0, Y^0)$ – dem als Vorwissen eingebrachten Näherungsmodell – addiert, das Objektraummodell bildet. Der funktionale Zusammenhang ist in (5) dargestellt:

$$Z(X, Y) = Z^0(X^0, Y^0) + dZ(X^0, Y^0) \quad (5)$$

Im nächsten Schritt sind die Funktionen der Objektgeometrie $Z(X, Y)$ und des radiometrischen Modells $G(X, Y)$ einzusetzen. Um aber eine generell gültige Gleichung zu erhalten, wird hier die allgemeine Ausdrucksform gewählt.

Für die Geometriebeschreibung im Objektraum gilt:

$$\begin{aligned} Z(X, Y) &\approx Z(X, Y) & (6) \\ &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij}(X, Y) \cdot Z_{ij}^0 \end{aligned}$$

bzw. aufgespaltet nach Gleichung (5) in

$$\begin{aligned} Z^0(X^0, Y^0) & & (7) \\ &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij}(X^0, Y^0) \cdot Z_{ij}^0 \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} dZ(X^0, Y^0) & & (8) \\ &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij}(X^0, Y^0) \cdot dZ_{ij} \end{aligned}$$

Für die Grauwertfunktion gilt analog:

$$\begin{aligned} G(X, Y) &\approx G(X, Y) & (9) \\ &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij}(X, Y) \cdot G_{ij} \end{aligned}$$

wiederum aufgespaltet in

$$\begin{aligned} G^0(X^0, Y^0) & & (10) \\ &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij}(X^0, Y^0) \cdot G_{ij}^0 \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} dG^0(X^0, Y^0) & & (11) \\ &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij}(X^0, Y^0) \cdot dG_{ij} \end{aligned}$$

Des Weiteren werden die bei der Linearisierung nach Taylor hergeleiteten Grau-

wertgradienten mit eingesetzter Grauwertfunktion benötigt. Die in X und Y aufgespalteten Grauwertgradienten erhält man durch die partiellen Ableitungen der Grauwertfunktion nach ihren Gewichtskoeffizienten und ihren beiden Lagekoordinaten, die dann heißen:

$$\begin{aligned} \frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta X} & & (12) \\ &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta \alpha_{ij}(X^0, Y^0)} \cdot \frac{\delta \alpha_{ij}(X^0, Y^0)}{\delta X} \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta Y} & & (13) \\ &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta \alpha_{ij}(X^0, Y^0)} \cdot \frac{\delta \alpha_{ij}(X^0, Y^0)}{\delta Y} \end{aligned}$$

Setzt man nun die funktional beschriebenen Objektraummodelle in die Grundgleichung des Facetten-Stereosehens (4) ein, so erhält man:

$$\begin{aligned} G(x', y') & & (14) \\ &= T'^{-1} \left(\begin{aligned} &\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij}(X^0, Y^0) \cdot G_{ij}^0 \\ &+ \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij}(X^0, Y^0) \cdot dG_{ij}^0 \\ &\quad \frac{\delta G^0(X^0, Y^0)}{\delta \alpha_{ij}(X^0, Y^0)} \\ &+ \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \left[\frac{\delta \alpha_{ij}(X^0, Y^0)}{\delta X} \cdot X'_z \right. \\ &\quad \left. + \frac{\delta \alpha_{ij}(X^0, Y^0)}{\delta Y} \cdot Y'_z \right] \\ &\cdot \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij}(X^0, Y^0) \cdot dZ_{ij} \end{aligned} \right) \end{aligned}$$

Die Gleichung (14) enthält eine allgemeine Beschreibung der Objektraummodelle, die noch durch geeignete Interpolationsfunktionen spezifiziert werden müssen. Aus (14) lässt sich irrtümlicherweise interpretieren, dass – durch die analoge Ausdrucksweise $m, -n$ – die Funktion der Grauwertbeschreibung gleich der Funktion der Geometriebeschreibung sein soll, was aber keinesfalls Bedingung ist.

3 Die Verbesserungsgleichungen der gemeinsamen Ausglei chung

Greift man wieder den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Objektgrauwert $G(X, Y)$ eines Surfels und seinen korrespondierenden Bildgrauwert $G'(x', y')$ auf, so lässt sich aus (1) folgende Verbesserungsgleichung aufstellen:

$$T'[G'(x', y')] + v_{G'(x', y')} = G(X, Y) \quad (15)$$

nach $v_{G'(x', y')}$ umgestellt ergibt:

$$v_{G'(x', y')} = G(X, Y) - T'[G'(x', y')] \quad (16)$$

In dem Ansatz des Facetten-Stereosehens wird davon ausgegangen, dass das radiometrische Modell als Sollmodell vorliegt. Durch die Mehrbildzuordnung im Objekt-raum wird jeweils nach erfolgter Projektion aller Bildgrauwerte in dem Objektraum ein Soll-Grauwertmodell gebildet, zu dem dann die Verbesserungen ermittelt werden. Durch diesen angesprochenen Lösungsweg wird deutlich, dass dafür mehrere Iterationen notwendig sein werden.

Die Verbesserungsgleichungen für die Koordinatentripel der Laserscannerdaten ergeben sich aus:

$$v_{Z_p} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l a_{ij}(X_p, Y_p) \cdot \hat{Z}_{ij} - Z_p \quad (17)$$

mit

$$\hat{Z}_{ij} = Z_{ij}^0 + dZ_{ij} \quad (18)$$

bezogen auf die Unbekanntenzuschläge zu:

$$v_{Z_p} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l a_{ij}(X_p, Y_p) \cdot dZ_{ij} - \left[Z_p - \sum_{j=0}^l \sum_{i=0}^l a_{ij}(X_p, Y_p) \cdot Z_{ij}^0 \right] \quad (19)$$

Die Forderung der gemeinsamen Ausglei chung lautet:

$$(\mathbf{A}_1 \mathbf{P}_1 \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}_1)^2 + (\mathbf{A}_2 \mathbf{P}_2 \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}_2)^2 \rightarrow \min., \quad (20)$$

wobei diese durch stabilisierende Bedingungen erweitert werden kann.

4 Auswertung eines Beispiel-datensatzes

Zur Beurteilung der gemeinsamen Ausglei chung soll im Folgenden ein Beispiel genauer betrachtet werden, welches in Anbe-tracht der digitalen Bildzuordnung eine Herausforderung darstellt. Das erwartete geometrische wie auch radiometrische Objektraummodell beinhaltet mehrere Un-stetigkeitsstellen. Das Beispiel weist unter anderem eine Häuserschlucht zwischen zwei großen Gebäuden auf und enthält damit auf kleinem Raum einen Höhenunterschied von ca. 10 m. Zudem liegen homogene Textur und Schattenbereiche vor. All diese erwähn-ten Einschränkungen werden von den Laserscannerdaten ignoriert. Im Rahmen der Studie wird analysiert inwieweit die Laserscannerdaten, die in diesem Bereich liegen, die erhofften Erwartungen erfüllen, dennoch ein qualitativ hochwertiges geo-metrisches sowie radiometrisches Objekt-raummodell zu erzeugen.

Vorerst werden die Datenarten grafisch getrennt betrachtet. Abb. 2 zeigt das geo-metrische Objektraummodell in einer Auf-lösung von 2 m, welches ausschließlich aus Laserscannerdaten entstanden ist. Die Struktur der Gebäude (s. auch Abb. 3 u. 4) ist deutlich zu erkennen. Auf Grund der Peaks auf dem Gebäudedach werden Aus-reißer im Datensatz vermutet, die z.B. durch Mehrfachreflexion, Vegetation bzw. der Ge-länderauheit herrühren.

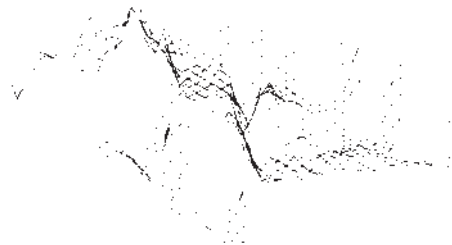


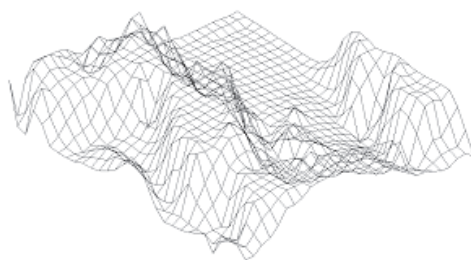
Abb. 2: Geometrisches Objektraummodell aus Laserscannerdaten.

Diese Ausreißer können nicht ohne weiteres lokalisiert werden, da die Laserscannerdaten zum einen „blinden“ Daten entsprechen und zum anderen keiner unabhängigen Kontrolle unterliegen. Hierbei soll insbesondere Letzteres als Begründung gelten, da das erste Argument der blinden Daten nur teilweises gilt. Durch das Registrieren der Intensitäten während der Laserscannerbefliegung lässt sich direkt auf ein orthophotoähnliches Bild rückschließen, welches aber eher etwas über die Reflexionseigenschaft des Objektes aussagt. Grundsätzlich lässt sich daher festhalten, dass eine unabhängige Kontrolle geschaffen werden muss, durch die dann die Ausreißer entlarvt werden.

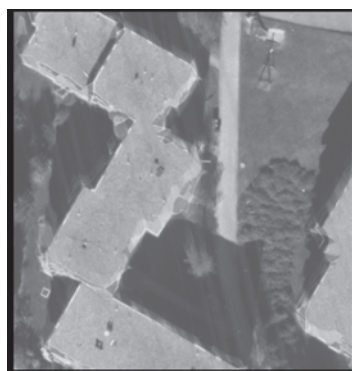
Betrachtet man analog zu diesem Modell das Höhenmodell, welches ausschließlich aus Bilddaten generiert wurde, so stellt man fest, dass dies im Gegensatz zu den Laserscannerdaten die Gebäudestruktur schwächer widerspiegelt. In den texturarmen Bereichen sind mehrdeutige Lösungen möglich, wodurch eine ersichtliche Fehlzuordnung statistisch richtig erscheint. Es wird deutlich, dass auch hier eine unabhängige Kontrolle erforderlich ist. In den Bereichen ausreichender Textur konnte das Objektmodell zuverlässig generiert werden. Im Gegensatz zu den Laserscannerdaten liegen bei der Verwendung der Bilddaten wesentlich mehr Beobachtungen vor, was zu einer höheren Redundanz bzw. Genauigkeit und Zuverlässigkeit führt.

Wir stellen fest, dass sich durch eine Kombination der beiden Datenarten eine unabhängige Kontrolle ergibt. Durch eine Kombination werden sich die beiden Datenarten ebenfalls ergänzen. Zudem lassen sich Ausreißer in den Datensätzen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit lokalisieren.

Exemplarisch für die in der Studie empirisch verwendeten stochastischen Modelle wird ein Beispiel vorgestellt, in dem die Beobachtungen gleichberechtigt eingeführt werden. Die Summe aller Gewichte der geometrischen Beobachtungen ist gleich der Summe aller Gewichte der radiometrischen Beobachtungen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt.



(a) geometrisches Modell



(b) radiometrisches Modell

Abb. 3 Gemeinsame Ausgleichung von Laserscanner- und Luftbilddaten

Die Verschmierungen an den Gebäudekanten im radiometrischen Modell in Abb. 3 werden im geometrischen Modell bestätigt. Die fehlerbehaftete Objektgenerierung lässt sich auf die Unstetigkeiten der Radiometrie und Geometrie an den Gebäudekanten zurückführen. In den Bereichen, in denen das Objekt sichtlich vertrauenswürdig rekonstruiert wurde, bestärkt die unabhängige Kontrolle erheblich die Zuverlässigkeit des Ergebnisses. Die zuvor angesprochenen Diskrepanzen an den Gebäudekanten werden ebenfalls lokalisiert. Durch eine individuelle adäquate Wahl des stochastischen Modells muss in diesen Fällen die vertrauenswürdigere erscheinende Datenart höher gewichtet werden. Dieser Prozess sollte implizit in der Ausgleichung iterativ geschehen, wobei der Einfluss der Ausreißer sukzessiv eliminiert wird. Man spricht dabei von sukzessiver Regewichtung, die für diese

Fälle prädestiniert ist. Jede Beobachtung hat eine Daseinsberechtigung und fließt mit in die Ausgleichung ein. Allein die Wahl des Gewichtes steuert ihren Einfluss bei der Schätzung der Unbekannten.

5 Wertung und Ausblick

Hinsichtlich der zu Anfang genannten Ziele ist es notwendig, die geometrischen und radiometrischen Beobachtungen miteinander zu verknüpfen. Jeder Laserpunkt wird einem Pixel zugeordnet, was in Abb. 4 (a) u. (b) zu sehen ist.

Durch diese Verknüpfung ist die Grundlage geschaffen, dass neben den etablierten, auf Hypothesen beruhenden Filtermethoden der Laserscannerdaten, hypothesenfreie Methoden bzw. Bedingungen auf Grund der Bilddaten bzw. der digitalen Bildzuordnung möglich werden.

Abb. 4 (c) zeigt die Objektraummodelle der gemeinsamen Ausgleichung. Das radiometrische Modell – die Textur – wird mit dem geometrischen Modell überlagert.

In dieser Studie werden, anstatt die differenzierenden Aufnahmesensoren kritisch gegenüber zu stellen, durch Kombination ihre Vorteile genutzt. Denkbar ist zudem eine kombinierte Aufnahmebefliegung, wodurch die Wirtschaftlichkeit gewährleistet wird. Die erhöhte Datenaufzeichnung und der Mehraufwand bei der Auswertung lässt sich durch die ständig fortschreitende Automation der Auswerteprozesse vertreten.

Zukünftig müssen hinsichtlich dieser Problemstellung weitere empirische Untersuchungen angestellt werden. Das stochastische Modell muss verfeinert werden, damit nicht nur eine unabhängige Kontrolle geschaffen wird und die auftretenden Diskrepanzen lokalisiert werden, sondern ebenfalls ein hochgenaues Objektraummodell generiert werden kann. Je vielseitiger und flexibler Bedingungen zur stochastischen Anpassung formuliert werden, desto mehr kann auf einen manuellen Eingriff verzichtet werden. Diese Vorgehensweise wird dadurch nicht nur wirtschaftlich vertretbar, sondern sogar kostengünstiger.

Danksagung

Durch das bereitwillige zur Verfügung stellen von Laserscanningdaten sowie Luftbilddaten von Seiten der TopScan GmbH wurde diese Arbeit erst praktisch durchführbar. Daher möchte sich der Verfasser bezüglich der Datensätze, sowie der freundlichen und hilfsbereiten Einweisung in die Laserscanneraltimetrie bei der TopScan GmbH herzlichst bedanken.

Literatur

BALTSAVIAS, E.P., 1999: A comparison between photogrammetry and laser scanning. – International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, J. Photogramm. Remote Sensing **54** (2/3): 83–94, Zürich.

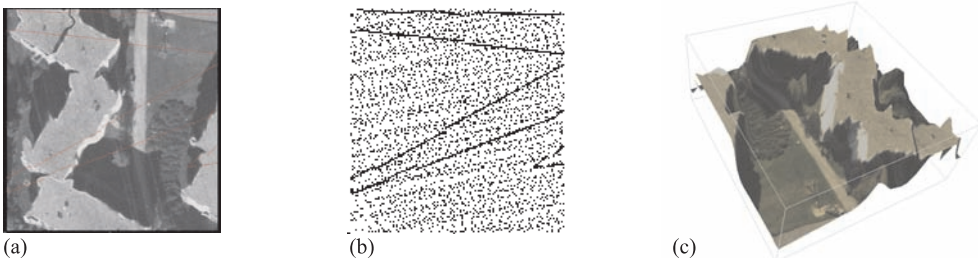


Abb. 4: (a) Verknüpfung der geometrischen und radiometrischen Beobachtungen, (b) Verdeutlichung der Laserscannerdaten, (c) Visualisierung via VRML (Virtual Reality Modeling Language).

- GRÜN, A., STEIDLER, F. & WANG, X., 2000: CyberCity Modeler – ein System zur halbautomatischen Generierung von 3-D-Stadtmodellen. – *Der Vermessungsingenieur* 2000: 201–205.
- SCHLÜTER, M., 1999: Von der 2 ½D- zur 3D-Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 506, München.
- TSAY, J.-R., 1996: Wavelets für das Facetten-Stereosehen. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 454, München.
- WEISENSEE, M., 1992: Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 374, München.
- WEISENSEE, M., 2000: Combined Adjustment of Laser Scanning Data and Digital Photogrammetric Images. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Amsterdam.
- WROBEL, B. & SCHLÜTER, M., 1998: Das Dezimeter-DGM durch photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion mit dem Facetten-Stereosehen. – *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, **105**(8/9): 295–303.
- WROBEL, B., 1987: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. – *Bildmessung und Luftbildwesen*, **55**: 93–101.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. (FH) AXEL WENDT

Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/ Wilhelmshaven

Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik

Ofener Str. 16–19

D-26121 Oldenburg, Tel.: 0441-7708 3365,

Fax: 0441-7708 3170

e-mail: a.wendt@fh-oldenburg.de

Manuskript eingereicht: August 2001

Angenommen: August 2001