

Registrierung von Flugzeug getragenen Kameraaufnahmen und UAV-Aufnahmen zur Anreicherung von 3D Daten

RICHARD BOERNER¹, YUSHENG XU¹, LUDWIG HOEGNER¹ & UWE STILLA¹

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt ein Verfahren zur automatischen Bestimmung eines initialen Modells für eine anschließende Feinregistrierung von gemeinsam aufgenommenen ALS-Punktwolken und Luftbildern mit einer weiteren, von einem UAV nicht zeitgleich aufgenommenen Bildsequenz. Dabei wird der Ansatz verfolgt, geometrische Features ohne radiometrische Information zur Koregistrierung zu verwenden. Hier soll sowohl auf Passpunkte als auch auf manuell festgelegte Verknüpfungspunkte verzichtet werden. Als geometrische Elemente dienen Geradenstücke. Die Geradenstücke werden in den Luftbildern gesucht zu Strukturen von paarweise Parallelen zusammengefasst und anschließend zur Bestimmung der Affintransformation zwischen den Bildern verwendet. Als Testdatensatz dient ein Waldstück des Mangfallgebietes südöstlich von München. Hier ist es mit dem vorgestellten Verfahren möglich eine initiale Orientierung mit einer Genauigkeit von 20 Pixeln in einem Gebiet zu schätzen, das nur natürliche Strukturen aufweist, die sich in den geschätzten Geradenstücken als wiederkehrende Muster generalisieren lassen.

1 Einleitung

Sollen großräumige Flächen 3-dimensional erfasst werden, wird oft eine Befliegung durchgeführt, bei der sowohl Luftbilder als auch Laserscans gemeinsam mit einem GPS/INS-System aufgenommen werden. Die Kamera und der Laserscanner liegen kalibriert in einem gemeinsamen Koordinatensystem vor. Aus diesen Daten wird eine kolorierte 3D-Punktwolke mit Georeferenzierung erzeugt. Eine weitere Variante ist die Befliegung mit einem unbemannten Luftfahrzeug (unmanned aerial vehicle: UAV). Die Verwendung eines UAVs ist kostengünstiger und unabhängiger von Witterungsbedingungen. Des Weiteren wird durch eine geringere Flughöhe eine ebenfalls geringere Bodenpixelgröße erzielt. Eine aus einer 3D-Rekonstruktion resultierende Punktwolke der vom UAV aufgenommenen Bilder besitzt also eine höhere Punktdichte als die Punktwolke aus der Flugzeug-Befliegung. Auf der anderen Seite sind in UAVs zumeist kleinere und günstigere GNSS-Antennen und günstigere IMUs verbaut, wodurch die Orientierungsparameter im Vergleich zur Flugzeug-Befliegung ungenauer sind und lediglich als Näherungswerte angenommen werden können. Die Schwierigkeit einer Registrierung von UAV-basierten und flugzeugbasierten Aufnahmen besteht darin, dass die Daten nicht zwangsläufig zeitgleich aufgenommen werden und dadurch sowohl geometrische als auch vor allem radiometrische Unterschiede in der Szene vorliegen können. Des Weiteren existieren große Maßstabsunterschiede im Fall einer Bild-zu-Bild-Zuordnung und Unterschiede in der Geometrie im Fall einer Punktwolke-Bild-Zuordnung. Eine Kombination beider Sensoren würde folglich eine lokal höhere zeitliche und räumliche Auflösung von großräumigen Referenzdaten erzielen.

¹ Technische Universität München, Photogrammetrie und Fernerkundung, Arcisstraße 21, D-80333 München, E-Mail: [richard.boerner, yusheng.xu, ludwig.hoegner, stilla]@tum.de

Eine Zuordnung auf Grundlage von radiometrischen Verteilungen gestaltet sich folglich schwierig. Stattdessen wird die geometrische Verteilung von markanten Punkten in beiden Bildern für die Suche nach Korrespondenzen verwendet. Das vorgestellte Verfahren dient dazu, den Suchraum bei solch einer rein geometrischen Zuordnung durch eine grobe Vororientierung zu reduzieren. Zur Reduktion der Komplexität bei der Zuordnung wird hierfür auf Geradenstücke zurückgegriffen. Es wird davon ausgegangen, dass Geradenstücke markante Strukturen in der Szene auch für natürliche Umgebungen zumindest grob annähern und diese markanten Geradenstücke sowohl in den Luftbildern als auch in den vom UAV aus aufgenommenen Bildern auftreten und vergleichbar sind. Die Geradenstücke werden zu einer Struktur von paarweise parallelen Geraden zusammengefasst und über deren Abstand den Maßstab abzuschätzen. Anschließend werden in einem RANSAC-basierten Verfahren die Geradenpaare aus beiden Bildern zugeordnet. Hier wird eine räumliche Abgrenzung von potentiell zuordenbaren Geraden durch eine Segmentierung von Linienelementen vorgenommen. Mit einer Homographie wird die Affintransformation zwischen den Bildern auf Grundlage der zugeordneten Geraden bestimmt. Die resultierenden Parameter der groben Orientierung können in einer folgenden Feinregistrierung mit einem stark eingeschränkten verbleibenden Suchraum für eine geometrische Verknüpfung von markanten Punkten verwendet werden. In zukünftigen Arbeiten sollen die so berechneten Affinparameter dazu verwendet werden, um aus der ALS-Punktewolke ein Tiefenbild aus Sicht der Luftbildkamera zu erzeugen und dieses Tiefenbild in das Bild der UAV-Kamera zu übertragen. Die übertragenen Entfernungswerte des Tiefenbildes liefern somit 3D-Informationen zu den Pixeln des Bildes der UAV-Kamera, welche mittels dieser 3D-Informationen im Raum neu orientiert werden kann, um anschließend die vorhandene 3-Punktewolke zu verdichten.

Abschnitt 2 stellt einen kurzen Überblick über vorangegangenen Arbeiten im Bereich der Registrierung von 3D- und 2D-Daten dar. Abschnitt 3 beschreibt die vorgestellte Methode und Abschnitt 4 zeigt die verwendeten Daten. Im Anschluss werden die Ergebnisse unter Abschnitt 5 vorgestellt und unter Abschnitt 6 folgt eine Zusammenfassung und Ausblick auf zukünftige Arbeiten.

2 Vorangegangene Arbeiten

Die Thematik der Multi-Sensor-Registrierung wird aktuell auf zwei unterschiedliche Wegen gelöst: im 2D-Raum durch Rückprojektion der 3D-Information in eine Ebene und Registrierung der rückprojizierten Bilder oder direkt im 3D-Raum. In beiden Fällen gestaltet sich die Verwendung von radiometrischer Information aufgrund der unterschiedlichen radiometrischen Eigenschaften der unterschiedlichen Sensoren schwierig. Somit müssen geometrische Eigenschaften über die räumliche Verteilung der markanten Punkte für die Registrierung herangezogen werden.

Im 3D-Fall finden punktbasierte als auch auf geometrischen Primitiven basierende Methoden Anwendung. Der verbreitetste punktbasierte Algorithmus ist hier der Iterative Closest Point (ICP) (BESL & MCKAY 1992), welcher mehrfach adaptiert wurde. Hier werden Punkt-zu-Punkt-Distanzen in überlappenden Gebieten minimiert. Hierfür ist eine gute Vororientierung der Datensätze notwendig, damit der Algorithmus die richtigen 3D-Korrespondenzen für die

Minimierung des Abstandes findet. Alternativ gibt sich auch Algorithmen, die gezielt nach markanten Punkten suchen und die diese über einen Deskriptor beschreiben. Somit wird die Anzahl der möglichen Korrespondenzen auf diejenigen mit ähnlichem Deskriptor drastisch reduziert. Zur Beschreibung von markanten Punkten finden sich beispielsweise SIFT-basierte (WEINMANN et al. 2011) Ansätze als auch Schnittpunkt-basierte (THEILER & SCHINDLER 2012; GE 2017). Als geometrische Primitive finden Geraden (HABIB et al. 2005), Raumkurven (YANG & ZANG 2014) oder Ebenen (XIAO et al. 2012; XU et al. 2017) Anwendung. Diese auf geometrischen Primitiven basierenden Methoden hängen stark vom Inhalt der aufgenommenen Szene ab. Finden sich in der Szene keine urbanen Objekte wie zum Beispiel Gebäude, ist sowohl der Erfolg als auch die Genauigkeit dieser Methoden limitiert.

Sollen 2D-Daten registriert werden, ist das am meisten verwendete geometrische Primitiv ebenfalls der Punkt. Markante Punkte werden im 2D Fall über Algorithmen gefunden, die nach starken Grauwert-Variationen in unterschiedlichen Bildmaßstäben suchen. Als Beschreibung eines markanten Punktes finden beispielsweise der etablierte SIFT (LOWE 2004), Surf (BAY et al. 2006) oder mit der Verwendung eines nicht linearen Skalenraumes: KAZE (ALCANTARILLA et al. 2012). Diese sogenannten Deskriptoren benötigen aber eine annähernd gleiche radiometrische Beschreibung der lokalen Umgebung eines markanten Punktes, da sich sonst die Deskriptoren zu stark unterscheiden und die Punkte einander nicht mehr zugeordnet werden können. Dies ist auch der Fall, wenn die Bilder starke Rotations- und Maßstabsunterschiede aufweisen, wie im besonderen Fall der Registrierung von Aufnahmen einer UAV-Kamera und Luftbildern (KOCH et al. 2016). Hier wird auf andere geometrische Primitiven wie Konturen oder Geraden zurückgegriffen. Konturen benötigen allerdings vorab eine aufwendige Segmentierung und Vektorisierung. Geraden sind einfach zu segmentieren und lassen sich über die mathematische Repräsentation mit wenigen Parametern eindeutig beschreiben. Aus diesem Grund fokussiert sich dieser Beitrag auf die Verwendung von Geraden welche in einer Registrierung von Smartphone Aufnahmen zu einer Referenz Punktwolke bereits verwendet wurden (BOERNER & KRÖHNERT 2016).

3 Methodik

Die Vorgestellte Methode gliedert sich in die folgenden 3 Teile: erstens: die Extraktion von Geraden und die Segmentierung von Linien entlang dieser Geraden; zweitens: die Definition der Zuordnungsstruktur und die Zuordnung dieser Strukturen in einem RANSAC basierten Ansatz; drittens: die Bestimmung der Affinparameter für die Transformation der Bilder in ein gemeinsames Koordinatensystem.

3.1 Extraktion von Geraden und Segmentierung

Die Geraden in einem Bild werden mit Hilfe des Sobel Filters und einer Hough Transformation extrahiert. Die Hough Transformation verwendet die Geradengleichung:

$$d = r \cdot \sin \alpha + c \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

mit:

d = Distanz vom Ursprung des Bildes

α = Winkel der Gerade zur Horizontalen Achse des Bildes (gleich der Kantenrichtung resultierend aus dem Sobel-Operators)

Der Hough-Raum ist auf einen Prozentsatz zur Anzahl der Pixel im Bild normiert. Ausgehend von einem Prozentsatz als Schwellwert werden dann die Hauptgeraden extrahiert. Die so extrahierten Hauptgeraden werden für eine Liniensegmentierung verwendet und auf Grundlage der entstandenen Segmente weiter gefiltert.

Bei der Segmentierung (schematisch in Abbildung 1 gezeigt) wird die Hough-Gerade traversiert und alle Pixel mit der gleichen Gradientenrichtung wie die Hough-Gerade, die einander benachbart sind, zu einem Segment zusammengefasst. Hat das nächste Pixel entlang der Geraden eine andere Richtung, zählt das aktuelle Segment als abgeschlossen und ein neues Segment entsteht am nächsten Pixel. Anschließend werden Geraden eliminiert die kein Segment mit minimaler Größe besitzen. So erfolgt die Filterung der Hauptgeraden nicht nur auf Grundlage eines Schwellwertes im Hough-Raum, sondern zusätzlich auch auf Grundlage der Konnektivität der Pixel die die Gerade bilden.

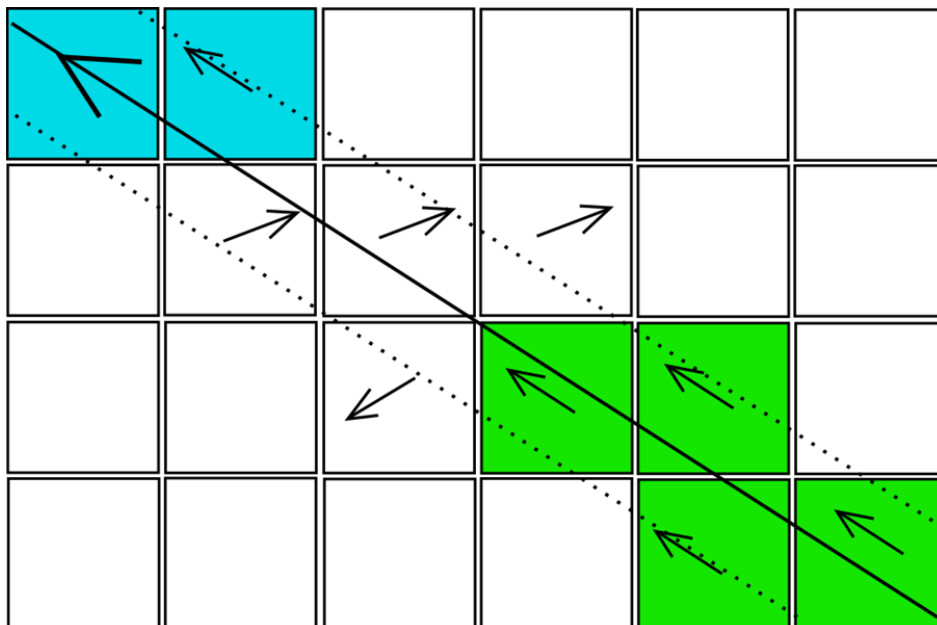


Abb. 1: Schema der Segmentierung. Die Pfeile verdeutlichen die Gradientenrichtung der einzelnen Pixel und die Farben symbolisieren die unterschiedlichen gefundenen Segmente.

3.2 Ransac Zuordnung

Nachdem die Geraden gefunden und Segmente gebildet sind, werden diese für eine Zuordnung von Korrespondenzen verwendet. Hierbei erfolgt zunächst die Zuordnung der Geraden in einem RANSAC-basierten Ansatz. Alle Geradenpaare, die in ein Initialmodell passen, zählen zunächst als zugeordnete Paare. Aus dieser Gesamtheit aller möglichen Paare werden nun zufällig 4 Paare ausgesucht. Diese 4 Paare müssen zwei Bedingungen erfüllen: es müssen paarweise parallele Geraden in einem Bild sein und der Winkel zwischen den nicht parallelen Geraden muss größer als 45 Grad sein. Die Erfüllung dieser Bedingungen garantiert, dass auf Grundlage der gefundenen Korrespondenzen eine Affintransformation bestimmbar ist. Ein optimaler

Schnittwinkel wären dabei 90 Grad, aber um den Suchraum nicht so stark einzugrenzen, dass in manchen Fällen keine Korrespondenzen zu finden sind, ist die Grenze für den Schnittwinkel herabgesetzt. Die parallelen Geraden der Struktur liefern einen Abstandswert der Linien zueinander. Da es sich um paarweise parallele Geraden handelt, können entsprechend zwei Abstände in einem Bild berechnet werden (Abbildung 2). Das Verhältnis eines Abstandes im Bild B zum Abstand der korrespondierenden Geraden im Bild B' liefert eine Schätzung des Maßstabes der Transformation. Folglich muss für eine valide Transformation das Verhältnis der anderen Abstände gleich sein, andernfalls werden die Korrespondenzen erneut zufällig gezogen. Korrespondierende Geraden, die die Randbedingungen der Struktur erfüllen, werden zur Bestimmung der Affintransformation verwendet (siehe 3.3). Die Parameter der Affintransformation stellen dann das Modell der aktuellen RANSAC-Iteration dar.

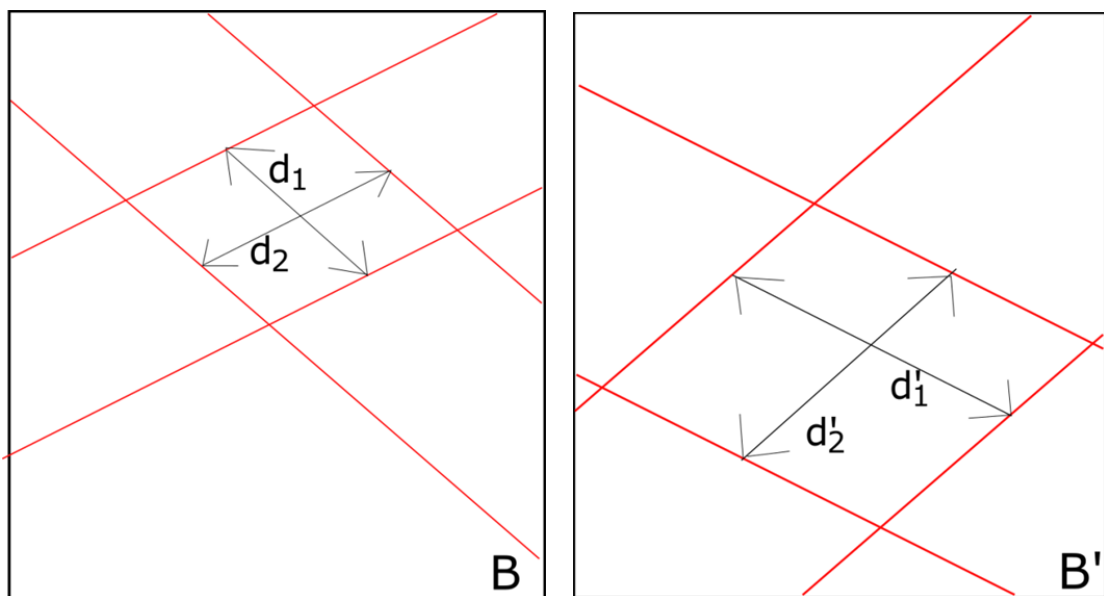


Abb. 2: Prinzipskizze der Struktur-Bedingung. Die roten Linien symbolisieren die Hough-Geraden im jeweiligen Bild B bzw. B' . Die Distanz zwischen den parallelen Geraden wird mit d dargestellt.

Zur Evaluierung des aktuellen Modells erfolgt eine Zählung der Geraden, die zu diesem Modell passen (Inlier). Dafür erfolgt auf Grundlage der Affinparameter eine Projektion der Geraden vom Bild B' in das Bild B . Ist der Abstand zwischen der Geraden in B und der korrespondierenden transformierten Geraden aus B' kleiner als ein Grenzwert, zählt die Gerade zunächst als zum Modell passend. Um die Gerade vollständig als zum Modell passend zu deklarieren, erfolgt im zweiten Schritt eine Untersuchung der Segmente der projizierten und der tatsächlichen Geraden in B . Liegt ein Abstand der projizierten Segmente zu allen Segmenten der Gerade im Bild unterhalb einer Schwelle, wird die Gerade vollständig als zum Modell passend definiert, andernfalls wird diese wieder aus der Anzahl der zum Modell passenden Geraden herausgenommen. Das Modell mit den meisten passenden Geraden gilt als das beste Modell am Ende aller RANSAC-Iterationen.

3.3 Bestimmung der Parameter

Die Bestimmung der Affintransformation auf Grundlage von korrespondierenden Geraden wird wie in Hartey and Zisserman (2004) beschrieben vorgenommen. Ausgangspunkt ist die homologe Geradenpräsentation.

$$l = \begin{pmatrix} x \\ y \\ w \end{pmatrix} \quad (2)$$

mit

$$l \cdot \begin{pmatrix} c \\ r \\ 1 \end{pmatrix} = x \cdot c + y \cdot r + w = 0 \quad (3)$$

Diese Repräsentation lässt sich aus der Hough-Geradengleichung (Gleichung 1) extrahieren. Mittels Vergleich der Koeffizienten ergibt sich:

$$l = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ -d \end{pmatrix} \quad (4)$$

Die Affintransformation zwischen den Geraden l und l' wird mit der Homographie

$$l = H^T l' \quad (5)$$

definiert mit:

$$H = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_1^T \\ \mathbf{h}_2^T \\ \mathbf{h}_3^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h1 & h2 & h3 \\ h4 & h5 & h6 \\ h7 & h8 & h9 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Die homologen Beobachtungsgleichungen ergeben sich zu:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{0}^T & -w_i \mathbf{x}_i'^T & y_i \mathbf{x}_i'^T \\ w_i \mathbf{x}_i'^T & \mathbf{0}^T & -x_i \mathbf{x}_i'^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{h}_3 \end{pmatrix} = A_i \mathbf{h} = \mathbf{0} \quad (7)$$

wobei der Index i eine Gerade bestimmt. Die Funktionalmatrix A besitzt damit doppelt so viele Zeilen wie Beobachtungen (Korrespondierende Geraden). Die Lösung für \mathbf{h} ist der Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert der Eigenwertzerlegung von $A^T A$.

4 Daten

Als Testdatensatz dient ein Waldgebiet des Mangfall-Gebietes südöstlich von München. Hier liegen Daten einer Befliegung der Mangfall im April 2017 vor, wobei eine Haselblad-Kamera zur Bildaufnahme und ein Riegl VQ880G Scanning System zur Aufnahme der ALS-Punktwolke zum Einsatz kamen. Des Weiteren erfolgte eine UAV-Befliegung des genannten Waldgebietes im Mai 2016, wobei eine Nikon Nex-7 zur Bildaufnahme verwendet wurde. Das Gebiet zeigt einen Seitenarm der Mangfall in einem Waldstück (Abbildung 3). Somit ist von einem nicht urbanen Gebiet auszugehen. Hier finden sich keine von Menschenhand geschaffenen Elemente die für eine Registrierung der Aufnahmen herangezogen werden könnten. Die Bodenpixelgröße

beträgt in den Bilddaten ca. 8 cm bei der Flugzeug-Befliegung und bei der UAV-Befliegung ca. 1 cm. Im Hinblick auf eine Registrierung der Daten sind zwei Fehlerquellen ersichtlich: Erstens kann sich im Fall einer nicht zeitgleichen Aufnahme der Flusslauf ändern und zweitens hängen die Wasserpixel durch unterschiedliche Refraktion beim Luft-Wasser Übergang stark von der Aufnahme-richtung und anderen Faktoren ab. Die mögliche Änderung des Flusslaufes wird im Rahmen dieses Beitrages ignoriert, da im Untersuchungszeitraum keine starke Änderung stattgefunden hat. Die Korrektur der Refraktion wird ebenfalls ignoriert, da sich das Verfahren auf detektierte Kanten beschränkt und diese hauptsächlich an Land und am Übergang vom Boden zum Wasser erwartet werden. Diese Annahmen können im Einzelfall zu fehlerhaften Geradenzuordnungen führen, die jedoch durch die RANSAC-Schätzung als Ausreißer eliminiert werden.



Abb. 3: Die Testdaten: links das Luftbild aus der Luftbefliegung, rechts eine Aufnahme aus der UAV-Befliegung des gleichen Gebietes.

5 Ergebnisse

Die vorgestellte Methode liefert die Möglichkeit mit Hilfe eines Hough-Raumes Geraden zu generalisieren. Für die Segmentierung der Geraden wurde eine Distanz von bis zu 4 Pixel zu der Hough-Gerade zugelassen. Dieser Distanzschwellewert wurde kleiner gewählt, als die Distanz der Hough-Geraden zueinander (Abhängig vom Generalisierungsgrad), damit die Liniensegmente nicht zu stark in die Breite wachsen. Der Schwellwert zur Bestimmung von markanten Kanten im Hough-Raum ist auf einen Wert von $2 \cdot 10^{-2} \%$ gesetzt, womit die Filterung nach Hauptgeraden hauptsächlich durch die Segmentgröße erfolgt. Abbildung 4 zeigt die nach dem Segmentfilter verbliebenen Geraden. Es ist zu sehen, dass die Segmente eine geometrische Abgrenzung der sonst kontinuierlichen Geraden in einem wiederkehrenden Muster ermöglichen.

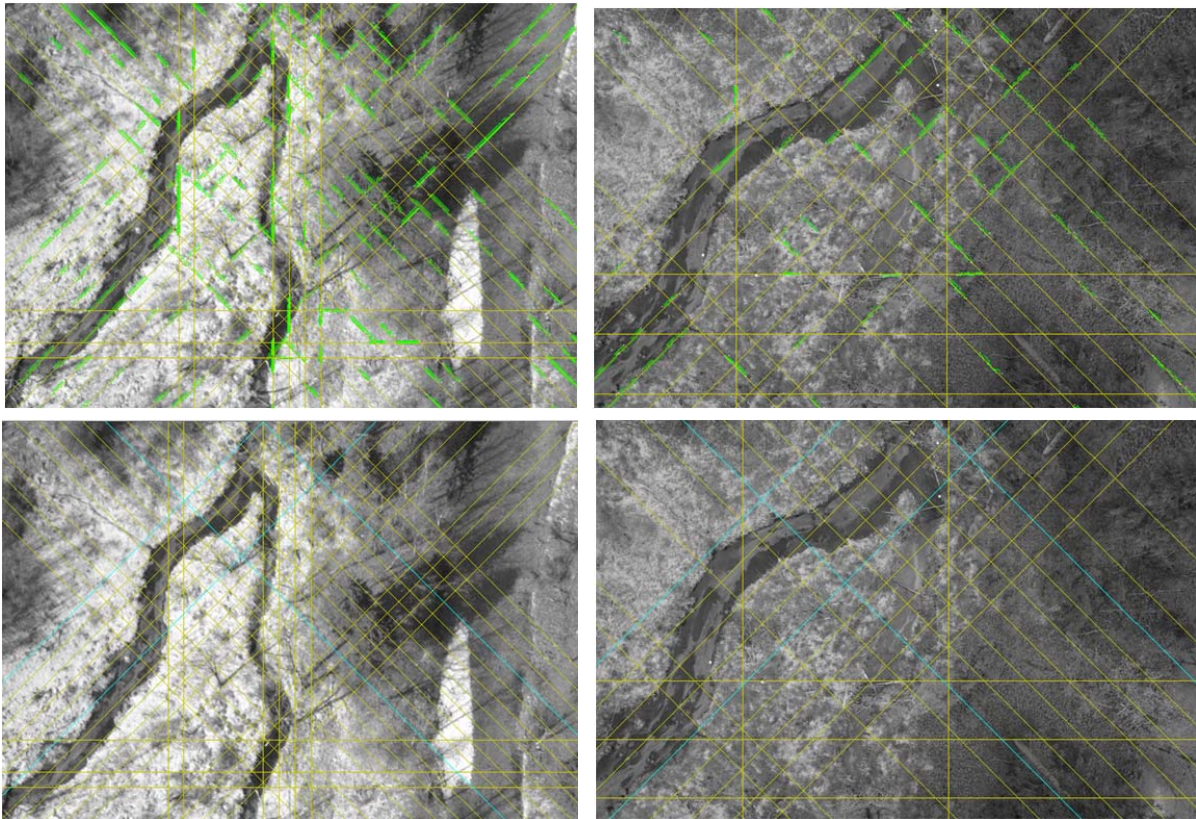


Abb. 4: Ergebnisse der Segmentierung (oben) und der Geradenzuordnung (unten):in Gelb die Hough-Geraden, in Grün: gefundene Segmente, in Blau: gefundene Korrespondierende Strukturen.

Beim Testen der Registrierung hat sich gezeigt, dass eine feinere Diskretisierung des Hough- (höhere Auflösung in der Distanz als auch in der Richtung) dazu führen kann, dass es vermehrt zu wiederkehrenden Strukturen kommt, die eine falsche Modellannahme des RANSAC-Verfahrens bewirken. Mit einer Einheitsmatrix als initialer Homographie und einer zulässigen Distanz der zugeordneten Geraden von 15 m (aus der Pixeldistanz und der Bodenpixel Größe berechnet) konnte das dargestellte Ergebnis der Koregistrierung (Abbildung 4) erzeugt werden. Mit einem groben Hough-Raum mit einer Richtungsauflösung von 45 Grad und einer Distanzauflösung von $1/25$ der Bilddiagonale wurde eine Genauigkeit von umgerechnet 3 m der Bild-zu-Bild-Zuordnung erzielt.

Beim Betrachten der Hough-Geraden lassen sich folgende Vor- und Nachteile des Verfahrens erkennen: Zwar muss der Suchraum mit Hilfe der Hough-Generalisierung stark eingeschränkt werden, wenn kein hinreichend genaues Modell vorliegt, aber die Verwendung von Liniensegmenten und die Bedingung der geometrischen Struktur ermöglichen auch, dass Korrespondenzen in hochfrequenten Mustern zu finden sind. Des Weiteren sind die Hough-Geraden nicht auf tatsächlich vorhandene Linienelemente beschränkt, da eine Generalisierung stattfindet. So lässt sich das Verfahren auch in nicht urbanen Gebieten verwenden. Da geometrische Primitive verwendet werden besteht keine Beschränkung der Zuordnung durch

radiometrische Unterschiede in den Aufnahmen. Somit lassen sich unterschiedlich stark belichtete Szenen als auch Bilddaten verschiedener Spektralbereiche koregistrieren.

6 Diskussion

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren zur Registrierung von 2D-Bilddaten verschiedener Sensoren und Aufnahmezeitpunkte mit Hilfe von extrahierten Geradenstücken vorgestellt. Diese Geradenstücke werden über einen Hough-Raum generalisiert und nachfolgend segmentiert. Die so entstehenden Liniensegmente tragen dazu bei, auch Korrespondenzen in wiederkehrenden Strukturen von Hough-Geraden zu finden. Durch die Verwendung von geometrischen Primitiven kann das Verfahren auch zur Registrierung von Bilddaten mit stark unterschiedlichen radiometrischen Eigenschaften verwendet werden, wie beispielsweise multitemporale Daten und Luftbilder mit unterschiedlichen Blickrichtungen und Maßstäben. Beides ist im vorgestellten Datensatz der Fall. Das Ergebnis des Verfahrens ist eine grobe Vororientierung der Bilddaten, welche für nachfolgende Feinorientierungen mit eingeschränktem Suchraum verwendet werden können. So ist das gefundene grobe Modell verwendbar, um markante Punkte rein durch deren geometrische Verteilung im Bild zu verknüpfen. Außerdem kann die Generalisierungsstufe der Hough-Transformation iterativ angepasst werden, um ein grobes Modell der vorherigen Stufe zu verfeinern und so eine Feinregistrierung auf Kantenbasis zu erzielen.

Zukünftige Arbeiten werden das Ziel verfolgen Multisensordaten zu fusionieren und die Orientierung der UAV-Daten auf Grundlage der Luftbefliegungsdaten zu verbessern. Hierfür soll die ALS-Punktwolke der Befliegung in die Luftbilder rückprojiziert und von Luftbildern über die Affintransformation in die korrespondierenden Bilder der UAV-Kamera übertragen werden. Somit können zu jedem Pixel des vom UAV aufgenommenen Bildes 3D-Koordinaten interpoliert werden, welche für eine Lokalisierung der Kamera verwendet werden können. Des Weiteren soll untersucht werden, wie die ALS-Punktwolke um einer höher aufgelöste photogrammetrische Punktwolke aus den Bildern der UAV-Befliegung lokal verdichtet werden kann. Außerdem sollen über die kürzere Wiederholrate der UAV-Befliegungen 3D-Punktwolken zur Änderungsdetektion verwendet werden.

7 Danksagung

Diese Arbeit ist gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung, Projekt "Schritthalte 3D-Rekonstruktion und -Analyse (AZ-1184-15)", Teilprojekt „Änderungsdetektion in Punktwolken“. Die Luftbefliegung wurde von der Firma „AHM- Airborne Hydro Mapping“ durchgeführt.

8 Literatur

- ALCANTARILLA, P. F., BARTOLI, A., & DAVISON, A. J., 2012: KAZE features. European Conference on Computer Vision, 214-227.
- BAY, H., TUYTELAARS, T. & VAN GOOL, L., 2006: Surf: Speeded up robust features. Computer vision–ECCV 2006, 404-417.

- BESL, P.J. & MCKAY, N.D., 1992: Method for registration of 3-d shapes. Robotics-DL tentative, International Society for Optics and Photonics, 586-606.
- BOERNER, R. & KRÖHNERT, M., 2016: Brute force matching between camera shots and synthetic images from point clouds. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 771-777.
- GE, X., 2017: Automatic markerless registration of point clouds with semantic-keypoint-based 4-points congruent sets. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **130**, 344-357.
- HABIB, A., GHANMA, M., MORGAN, M. & AL-RUZOUQ, R., 2005: Photogrammetric and lidar data registration using linear features. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **71(6)**, 699-707.
- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A., 2003: Multiple View geometry in computer vision. Cambridge University Press.
- KOCH, T., ZHUO, X., REINARTZ, P. & FRAUNDORFER, F., 2016: A new paradigm for matching uav-and aerial images. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **3**, 83-90.
- LOWE, D.G., 2004: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International journal of computer vision, **60(2)**, 91-110.
- STAMOS, I. & LEORDEANU, M., 2003: Automated feature-based range registration of urban scenes of large scale. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, **2**, II–ii.
- THEILER, P. & SCHINDLER, K., 2012: Automatic registration of terrestrial laser scanner point clouds using natural planar surfaces. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **3**, 173-178.
- WEINMANN, M., WEINMANN, M., HINZ, S. & JUTZI, B., 2011: Fast and automatic image-based registration of tfs data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **66(6)**, 62-70.
- XIAO, J., ADLER, B. & ZHANG, H., 2012: 3d point cloud registration based on planar surfaces. IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), 40-45.
- XIAO, J., ADLER, B., ZHANG, J. & ZHANG, H., 2013: Planar segment based three-dimensional point cloud registration in outdoor environments. Journal of Field Robotics, **30(4)**, 552-582.
- XU, Y., BOERNER, R., HOEGNER, L. & STILLA, U., 2017: Automated coarse registration of point clouds in 3d urban scenes using voxel based plane constraint. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **IV-2/W4**, 185-191.
- YANG, B. & ZANG, Y., 2014: Automated registration of dense terrestrial laser-scanning point clouds using curves. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **95**, 109-121.