

Änderungsdetektion beim vorwärtsblickenden Airborne Laser Scanning urbaner Räume

Uwe STILLA und Marcus HEBEL

Zusammenfassung

Helikopter und UAVs (Unmanned aerial vehicles) bieten als Sensorplattformen flexible Einsatzmöglichkeiten in niedrigen Flughöhen und mit variablen Geschwindigkeiten. Dabei können vorwärtsblickende Laserscanner durch Mehrfachüberflüge nicht nur umfassende Punktwolken von urbanen Bereichen aufnehmen, sondern könnten unter Kenntnis der aufzunehmenden 3D-Geometrie auch zur Navigation und Änderungsdetektion während des Flugs eingesetzt werden. Eine grundlegende Voraussetzung der Nutzung von Punktwolken aus mehrfachen Überflügen mit verschiedener Blickrichtung ist jedoch eine exakte Koregistrierung. Diese kann durch eine automatische Selbstkalibrierung der inneren Systemparameter und bei unzureichenden externen Navigationsdaten durch ein Matching der aufgenommenen Objektmerkmale bestimmt werden. Für den schritthaltenden Vergleich (on-the-fly) von ALS-Daten wird eine Herangehensweise vorgestellt, bei der es sich um eine Erweiterung des Konzepts der Belegungsgitter handelt. Anstelle eines Vergleichs von Punktwolken werden dabei 3D-Raubereiche entlang der Ausbreitungswege der Laserpulse bezüglich der Zustände leer, belegt und unbestimmt bewertet. Das dazu vorgeschlagene Vorgehen basiert auf der Wissensrepräsentation und Informationsfusion entsprechend der Dempster-Shafer Evidenztheorie, wobei Änderungen als Konflikte in der Raumbelegung erkennbar werden. Zusätzlich werden Objektmerkmale ausgewertet, um Änderungsereignisse verschiedenen Kategorien zuzuordnen.

1 Einleitung

Die Erfassung urbaner Strukturen und ihre Veränderung sind zur Bereitstellung von Basisinformation für Monitoring und Planung in verschiedensten Bereichen von hohem Interesse, wie etwa zur Beantwortung von Fragestellungen aus dem Umweltbereich oder der Erfassung von Schäden nach Katastrophen. In diesem Zusammenhang spielt besonders die automatische Erfassung von Gebäuden und deren 3D-Geometrie eine wichtige Rolle, was sich auch in den Forschungsbeiträgen zu einschlägigen internationalen Konferenzen, wie z.B. CMRT09 [STILLA ET AL., 2009], JURSE 2011 [STILLA ET AL., 2011a] und PIA11 [STILLA ET AL., 2011b] widerspiegelt.

Traditionell werden zur großräumigen geodätischen Erfassung von Gebäudegeometrien Stereoauswertungen auf Basis von Luftbildern durchgeführt oder Punktwolken durch Laserscanner gemessen. Die flugzeuggetragene flächige Aufnahme erfolgt dabei klassischerweise streifenförmig und in Nadirsicht. Vorwärtsblickende Laserscanner, so wie sie für die Hinderniswarnung von Hubschraubern eingesetzt werden, erlauben im Gegensatz zur Nadirsicht die gleichzeitige Erfassung von Dächern und Fassaden mit näherungsweise

gleicher Auflösung (siehe Abbildung 1). Allerdings ergeben sich durch die Schrägsicht von Gebäuden, ähnlich wie bei SAR, Abschattungen, die durch zusätzliche Überflüge des gleichen Gebietes mit unterschiedlichen azimutalen Blickrichtungen (Multi-Aspekt) ergänzt werden sollten.

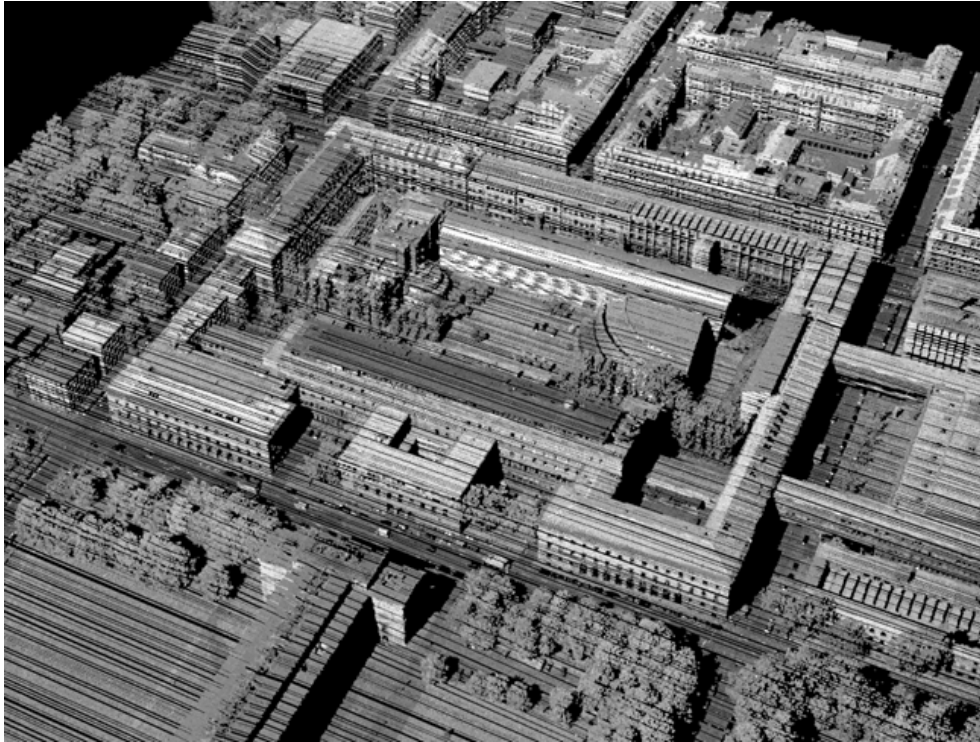


Abb. 1: 3D-Punktwolke vom Testgebiet TUM (Stammgelände der Technischen Universität München), die mit einem nach vorne blickenden Laserscanner (45° Schrägsicht) aufgenommen wurde. Der Grauwert wurde aus der Amplitude der Rückstreuung abgeleitet. Aufgrund der Schatten rechts neben den Gebäuden kann man erkennen, dass die dargestellte Ansicht der Punktwolke nicht mit der Blickrichtung des Scanners bei der Aufnahme identisch ist.

Eine grundlegende Voraussetzung der Nutzung von Punktwolken aus mehrfachen Überflügen mit verschiedener Blickrichtung und zu unterschiedlichen Zeitpunkten ist eine exakte Koregistrierung. Diese ist zum einen wichtig, um eine konsistente Referenzdatenbasis zu erstellen. Zum anderen ist diese für die Änderungsdetektion wichtig, da sonst jede Ungenauigkeit fälschlicherweise als Änderung detektiert werden würde. Somit ist besonderes Augenmerk auf eine Kalibrierung der Systemparameter und die Fehlerminimierung zu legen. Weitere Anforderungen können darin begründet sein, dass die Ergebnisse zur Änderungsanalyse schon während des Flugs (on-the-fly) benötigt werden. Diese Randbedingungen ergeben sich z.B. bei der Unterstützung von Hubschrauberpiloten im Rahmen von Überwachungsaufgaben oder Rettungseinsätzen.

2 Auswerteprozesse

Im Zuge einer objektbasierten Analyse der einzelnen Punktwolken werden planare Flächenstücke mit Hilfe eines Segmentierungsverfahrens identifiziert, das ein Flächenwachstumsverfahren mit einem RANSAC-Schätzverfahren kombiniert. Anschließend werden homologe Flächenstücke anhand geometrischer Attribute ausfindig gemacht. Mit Hilfe einer neuartigen Methode können Planaritätsbedingungen für diese Zuordnungen in lineare Gleichungssysteme überführt werden, durch deren Lösung sich einerseits die Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems und andererseits die Angleichung der ALS-Datensätze durchführen lässt [HEBEL & Stilla, 2012].

Bei der Verwendung eines kalibrierten ALS-Systems und bei schritthaltender Koregistrierung der aktuellen Messungen zu einem Referenzdatensatz stellt sich die Aufgabe, auf Basis der korrekt positionierten ALS-Daten einen (ebenfalls schritthaltenden) Vergleich zwischen beiden Zuständen des urbanen Gebiets durchzuführen. Eine einfache Differenzbildung der ALS-Daten ist nicht zielführend, da keine identischen 3D-Punkte in den einzelnen Punktwolken zu erwarten sind. Außerdem kommt es durch die Schrägsicht zu Lücken in der Geländeabdeckung und damit zu Bereichen, für die prinzipiell keine Aussage getroffen werden kann. Korrekte Zuordnungen zwischen mehreren Datensätzen werden z.B. erst durch eine objektbasierte Analyse ermöglicht (Segmentierung, Klassifizierung). Beim Vergleich der Daten kann dann auch eine spezifische Aussage über die Art der eingetretenen Veränderungen gemacht werden. Die dazu notwendigen Segmentierungsverfahren können neben geometrischen Zusammenhängen zum Beispiel auch Oberflächeneigenschaften der abgetasteten Objekte [JUTZI, 2007] berücksichtigen.

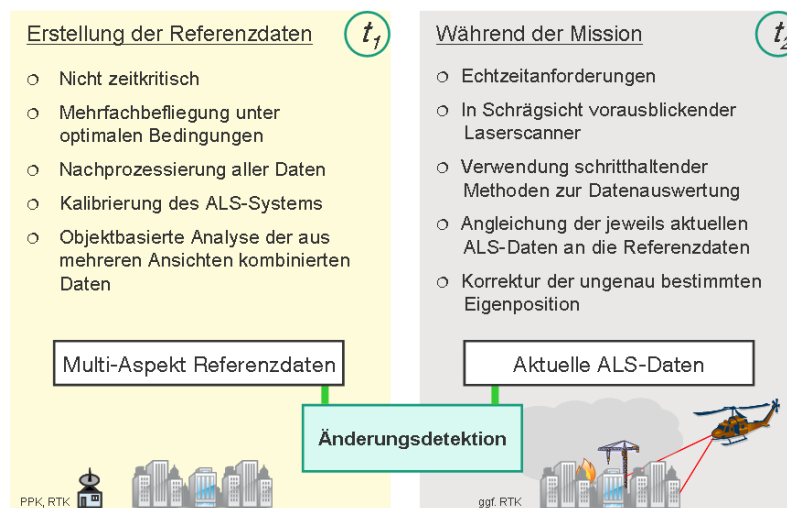


Abb. 2: Übersicht zur Datenaufnahme und Prozessierung

Für die Datenaufnahme und Prozessierung zur Änderungsdetektion werden folgende Randbedingungen unterschieden:

- **Zeitpunkt t_1 :** Bei der Erstellung einer Vergleichsgrundlage besteht keine Echtzeitanforderung an die Verarbeitung. Daher kann ein Segmentierungsver-

fahren verwendet werden, welches im Anschluss an die vollständige Abtastung des relevanten Stadtgebiets auf der kompletten Datenmenge operiert.

- **Zeitpunkt t_2 :** Da zur Durchführung des Vergleichs während der Mission eine schritt haltende Auswertung angestrebt wird, besteht nur die Möglichkeit, die unmittelbar aus dem jeweils aktuellen Datenbestand zu erkennenden Objektzusammenhänge zu verwerten. Dieser aktuelle Datenbestand beinhaltet typischerweise nur die innerhalb eines gleitenden Zeitfensters erfassten ALS-Daten, wobei die räumliche Anordnung der sich darin befindenden 3D-Punkte durch das Scanmuster des Laserscanners bestimmt wird. In jedem Fall können für den Vergleich $t_1 \leftrightarrow t_2$ die Segmentierungs- und Klassifizierungsergebnisse von Zeitpunkt t_1 in Betracht gezogen werden.

Beim eigentlichen Vergleich können unterschiedliche Änderungsvorgänge erkannt werden. Zum einen betrifft dies die Änderungsrichtung, d.h. die Behandlung der Frage, ob Objekte in der Szene verschwunden sind, bewegt wurden, neu erschienen sind oder ihr Aussehen verändert haben.

3 Änderungsdetektion

Bei der Aufnahme und Auswertung von Lasermesswerten werden wie zuvor dargestellt zwei verschiedene Prozesse unterschieden. Im Prozess I wird eine Datenbasis (Referenz) für den Zeitpunkt t_1 aufgebaut und ein 3D Voxel-Gitter, das die gesamte urbane Szene erfasst, mit Informationen gefüllt. Im Prozess II wird entschieden, ob eine vorliegende ALS Messung zum Zeitpunkt t_2 die in der Datenbasis vorliegende Information bestätigt oder widerspricht.

In einem klassischen Belegungsgitter würde die Information über den damit gemessenen Raumzustand (belegt, leer oder unbestimmt) auf diskrete Rasterzellen entlang der Strahlen übertragen werden. Dies hat den Nachteil, dass die ursprünglich vorhandene Auflösung auf die Größe der Rasterzellen reduziert wird. Wählt man hingegen eine sehr feine Zellgröße für das Belegungsgitter, so steigt dessen Speicherplatzbedarf rapide an. Stattdessen wird die sich aus den Referenzdaten ergebende Raumbelegung erst während der Vergleichsphase berechnet. Das Raster hat nicht die Funktion eines Belegungsgitters, sondern speichert in seinen Zellen lediglich die Indizes aller Halbgeraden von Laserstrahlen, die diese Zellen durchdrungen haben. Dieses 3D-Indexfeld dient anschließend als Suchstruktur für windschiefe 3D-Geraden, wobei seine Zellgröße nur geringen Einfluss auf die zu erwartenden Ergebnisse hat.

3.1 Generierung der Datenbasis für den Vergleich

Die zum Zeitpunkt t_1 erfassten Referenzdaten beinhalten die (klassifizierten und koregistrierten) Lasermessungen L von mehreren überlappenden ALS-Steifen, wobei für jeden Einzelpunkt p_i auch die Sensorposition p_N und der Entfernungsvektor r bekannt sind. Zur Speicherung von Indizes im 3D-Raum werden zwei Voxelgitter V_P und V_R mit identischen Abmessungen definiert. Die Zellen beider Gitter werden mit Indizes aus L befüllt (siehe Abbildung 3). Jeder Index wird einer einzelnen Zelle von V_P zugeordnet, die der

Position des zugehörigen Laserpunkts p_i entspricht. In dieser Weise repräsentiert V_P eine indexbasierte Rasterung der Punktwolke. V_R hat stattdessen die Aufgabe, in seinen Zellen die Indizes von Strahlen zu speichern, die die entsprechenden Voxel durchdringen. Jede Zelle von V_P und V_R kann nach der Prozessierung aller Einträge aus L entweder keinen, einen oder mehrere Indizes enthalten. Dies ist im Fall von V_P abhängig von der Anzahl an Laserpunkten, die im entsprechenden Voxel enthalten sind, bzw. im Fall von V_R abhängig von der Anzahl an Strahlen, die den Voxel durchdringen.

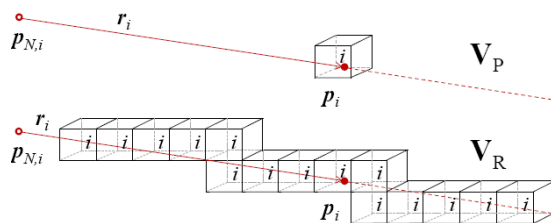


Abb. 3: Befüllen der Voxelgitter V_P und V_R mit Indizes für eine Lasermessung, i : Index der Messung, $p_{N,i}$: Sensorposition i , p_i : Laserpunkt i , r_i : Richtungsvektor i

3.2 Modellierung der Raubelegung

Für eine Lasermessung kann die Raubelegung zwischen Sensor und Laserpunkt als *leer* angesehen werden, am Laserpunkt selbst als *belegt* und hinter dem Laserpunkt in Strahlrichtung als *unbestimmt*. Wenn es mehrere Lasermessungen gibt, die nahezu den gleichen Raumbereich betreffen, so stellt sich die Frage, wie die verschiedenen und eventuell sogar widersprüchlichen Informationen fusioniert werden können. Eine Möglichkeit zur Fusion bietet die Evidenztheorie von DEMPSTER [1967] und SHAFER [1976] in der der Zustand der Unsicherheit oder Unbestimmtheit explizit behandelt. Die Anwendung dieser Theorie hat in den hier dargestellten Zusammenhängen mehrere Vorteile: Zum einen lassen sich durch Unbestimmtheit Verdeckungen und die daraus entstehenden Informationslücken modellieren. Zum anderen erlaubt Dempsters Kombinationsregel eine Bewertung von Informationskonflikten, die besonders für die automatische Änderungserkennung interessant sind.

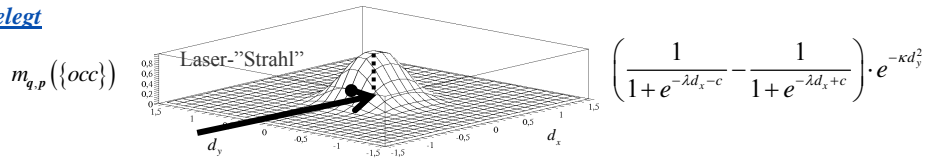
Die Raubelegung wird nach Dempster-Schafer durch Massefunktionen beschrieben, wobei jedem Element eine sogenannte (Vertrauens-)Masse aus dem Intervall $[0, 1]$ zugewiesen wird. Abbildung 4 zeigt die räumliche Modellierung von Punkten q mit transversaler und longitudinaler Distanz (dx , dy) zu einer Lasermessung p für die Zustände *belegt*, *leer* und *unbestimmt* durch die Massefunktionen $m_{q,p}(\{occ\})$, $m_{q,p}(\{emp\})$, und $m_{q,p}(U)$. Die drei Parameter (λ, c, κ) legen in diesem Modell die Unschärfe der Laserstrahlen und -punkte fest. Diese Parameter sind daher im Einklang mit den physikalischen Eigenschaften und Einschränkungen der durchgeführten ALS-Messungen zu wählen. Insbesondere sollte $m_{q,p}(\{occ\})$ die vorliegende Punktdichte und die Positionsgenauigkeit der Laserpunkte wiedergeben, die unter anderem aus der Entfernungsauflösung des Laserscanners, aus der Genauigkeit des Scanvorgangs und aus der Größe des Laser-Footprints hervorgeht.

3.3 Kombination von Evidenzen

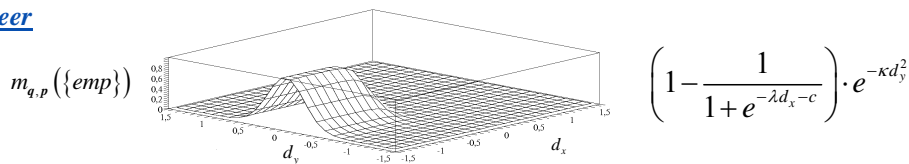
Wenn zwei oder mehrere Laserstrahlen die Umgebung von q treffen, müssen die sich jeweils ergebenden Massenzuordnungen kombiniert werden. Zur Berechnung einer fusionierten Massefunktion kommt die Kombinationsregel von DEMPSTER [1967] zur Anwendung.

So ist beispielsweise ein durch zwei unabhängige Laserentfernungsmessungen p_1 und p_2 hervorgerufener Konflikt C („leer in m_1 und belegt in m_2 , oder belegt in m_1 und leer in m_2 “) spezifiziert durch $C = m_{q,p_1}(\{emp\}) \cdot m_{q,p_2}(\{occ\}) + m_{q,p_1}(\{occ\}) \cdot m_{q,p_2}(\{emp\})$. Zu weiteren Ausführungen sei auf HEBEL ET AL. [2011] oder HEBEL [2012] verwiesen.

belegt



leer



unbestimmt

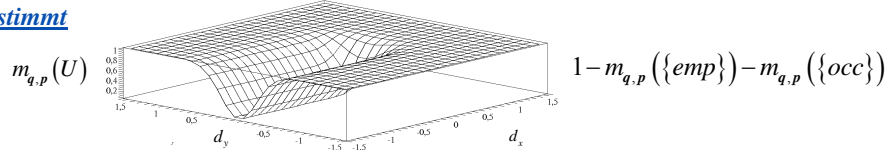


Abb. 4: Massen der Zustände *belegt*, *leer* und *unbestimmt* in der Umgebung q des Laserpunktes p

3.4 Detektion von Änderungen als Raumkonflikte

In der Vergleichsphase zum Zeitpunkt t_2 wird das zuvor definierte Modell der Raumbelegung verwendet, um zu bewerten, ob eine neue ALS-Einzelmessung $q = q_N + r_q$ die bestehenden Massenzuordnungen im Raum bestätigt oder nicht. Unter den „bestehenden Zuordnungen“ wird dabei die lokale Kombination von Massefunktionen verstanden, die von ALS-Messungen aus dem Referenzdatensatz vom Zeitpunkt t_1 stammen. Änderungen in der Szene sind damit als Widersprüche bzw. Konflikte in der Raumbelegung erkennbar. Solche Konflikte entstehen in zwei Fällen, nämlich wenn der Laserstrahl (q_N, r_q) einen Raumreich durchdringen kann, der als belegt markiert ist (Abbildung 5b), oder wenn der Laserpunkt q in einer Region gemessen wird, die eigentlich leer sein sollte (Abbildung 5a).

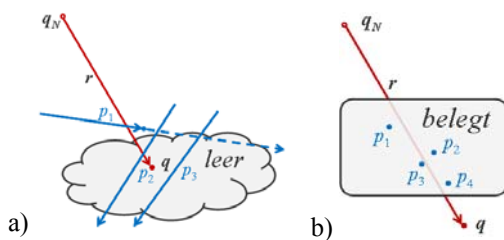


Abb. 5:

- a) Konflikt C_q: Eine neue Lasermessung liefert einen Laserpunkt q in einer Region, die als leer markiert ist,
- b) Konflikt C_p: Eine neue Lasermessung $q=q_N+r_q$ (Laser-“Strahl“) durchdringt belegten Raum

3.5 Berücksichtigung zusätzlicher Attribute

Im bisherigen Strahlmodell wurde noch nicht berücksichtigt, dass Objekte aufgrund einer starken Diskontinuität der Oberfläche oder ihrer Größe Mehrfachreflektionen erzeugen können. So wird bei einer teilweisen Durchdringung von Vegetation ein einzelner abgestrahlter Laserpuls entlang seiner Messrichtung mehrere Stellen als *belegt* aber auch gleichzeitig als *leer* markieren. Diese Belegungskonflikte treten auch bei unterschiedlichen Lasermessungen desselben unveränderten Raumbereichs der Vegetation auf. Da die Vegetation zudem auch jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt, ist es naheliegend, diese gegenüber Boden, Gebäude oder andere „man-made“-Objekte unterschiedlich zu behandeln. Neben der Full-Waveform Analyse [REITBERGER, 2010] bieten die lokale Hauptkomponentenanalyse (PCA) und Flächenwachstum [HEBEL & Stilla, 2009][YAO, 2010][HEBEL, 2012] hier Ansätze zur Identifizierung der ALS-Punkte, die zur Vegetation gehören. Für diese Messungen wird ein zusätzlicher Gewichtungsfaktor aus der lokalen PCA abgeleitet, der den Grad der Unbestimmtheit $m(U)$ erhöht. Zusätzlich wird für den räumlichen Bereich eine Unschärfe berücksichtigt.

4 Experimente

Die in dieser Studie verwendeten Daten wurden in den Jahren 2008 und 2009 mit einem Helikopter (Bell UH-1D) aufgenommen, an dem ein Laserscanner (RIEGL LMS-Q560) in Verbindung mit einem Inertialsystem (Applanix POS AV 410) montiert war. In der eingestellten Konfiguration deckte eine Scannzeile einen Sichtbereich (FOV) von 60° ab, der in 1000 Winkelschritte abgetastet wurde. Der Laserscanner hat mit einer vorwärts blickenden Neigung (45°) Steifen mit einer Breite von 500 m und einem mittleren Punkt-zu-Punkt-Abstand von 0,5 m aufgenommen. Die Zellgröße der beiden Voxelgitter V_R und V_P wurde mit $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ bemessen, was einer Gesamtgröße jedes Gitters von $300 \times 300 \times 50$ Voxeln bzw. $600 \times 600 \times 100 \text{ m}^3$ entspricht.

Im April 2008 wurde das Testgebiet Abenberg (Bayern) durch vier Streifen in einer Kreuzbefliegung (Multi-Aspekt) aufgenommen, was zu einer akkumulierten Punktwolke mit 5,4 Mio. Punkten und einer mittleren Punktdichte von 16 Punkten/ m^2 geführt hat. Abbildung 6a zeigt diesen Referenzdatensatz in bildlicher Form. Der Grauwert entspricht der maximalen Amplitude, die aus der Aufzeichnung des rückgestreuten Pulses bestimmt wurde.

Im August 2009 wurde das Testgebiet Abenberg mit dem gleichen Sensorsystem erneut aufgenommen. Der Datenstrom des Laserscanners aus dem Überflug von Süd nach Nord (1,5 Mio. Punkte) wurde mit der im vorherigen Kapitel beschriebenen Methode untersucht. Die Parameter der in Abbildung 3 dargestellten Funktionen wurden zu $\lambda=12$, $c=5$ und $\kappa=8$ gewählt. Abbildung 6b zeigt die Konflikte $C_p \geq 0,5$ (verschwunden) in rot und die Konflikte $C_q \geq 0,5$ (hinzugekommen) in gelb. Im Beispiel ist zu sehen, dass die Vegetation offensichtlich eine große Zahl von Konflikten hervorruft, was sich durch den Einfluss der unterschiedlichen Jahreszeiten (April - August) erklären lässt.

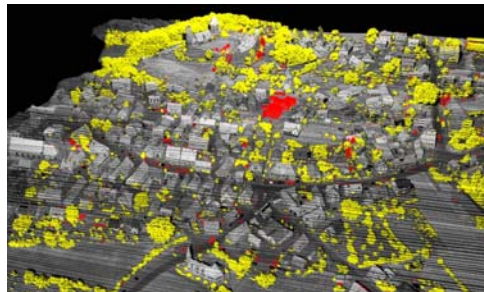
Möchte man sich mehr auf die Änderungen von „man-made“-Objekten konzentrieren, dann können, wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, zusätzliche Attribute und eine Klassifikation der

Referenzdaten in *Boden*, *Vegetation* und *Gebäude* zur Reduzierung der Detektion von Änderungen bei der Vegetation genutzt werden.

Solch ein Ergebnis ist in Abb. 6e gezeigt. Zusätzlich zur vorherigen Farbcodierung bedeuten nun die grünen Punkte, dass eine planare Fläche bestätigt wurde und sich der Teil des Gebäudes nicht geändert hat. Die verbleibenden Konflikte stammen hauptsächlich von bewegten Fahrzeugen, dem Neubau und Abriss von Gebäuden.



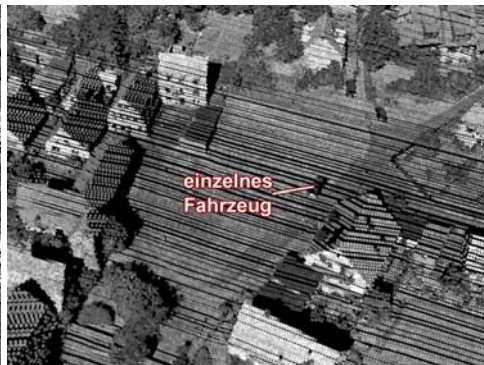
a) Referenzdaten: Abenberg, 18.04.2008



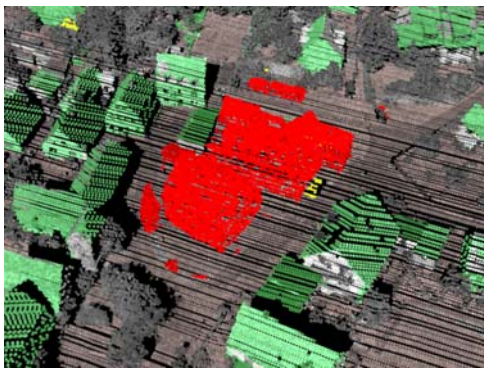
b) Vergleich: Abenberg, 31.08.2009



c) Details Abenberg (2008):



d) Details Abenberg (2009):



e) Berücksichtigung zusätzlicher Attribute

- Konflikt Cq (hinzugekommen)
- Konflikt Cp (verschwunden)
- bestätigte planare Fläche
- unverändert

Abb. 6: Unterschiedliche Arten detektierter Änderungen: Abriss von Gebäuden, hinzugekommenes Fahrzeug

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Vorgehensweise zur ALS-basierten Änderungsdetektion in urbanen Bereichen vorgestellt, die zwar für eine „on-the-fly“ Prozessierung [HEBEL & Stilla, 2010] entwickelt wurde, aber auch „off-line“ verwendet werden kann. Die Methode wurde durch das Konzept von Belegungsgittern motiviert. Anstelle eines Vergleichs von Punktwolken werden dabei 3D-Raubereiche entlang der Ausbreitungswege der Laserpulse bezüglich der Zustände leer, belegt und unbestimmt bewertet. Die Fusion von mehrfachen Messungen erfolgt durch die Kombinationsregel der Dempster-Shafer Evidenztheorie. Während dieses Prozesses werden im Hinblick auf die Detektion von möglichen Änderungen Konflikte bei Zuordnungen von unterschiedlichen Vertrauenswerten beurteilt. Der konzeptionelle Vorteil der vorgeschlagenen Methode liegt in der Behandlung von Verdeckungen als unbekannter Raum, die sonst eine komplexere Fall-zu-Fall-Analyse erfordern würden. Im Gegensatz zu probabilistischen Ansätzen erlaubt die Dempster-Schafer-Evidenztheorie die explizite Darstellung von Unkenntnis. Damit können auch nur teilweise überlappende ALS Daten kombiniert und verglichen werden, ohne fehlerhafte Änderungsdetektionen zu erzeugen. Im Gegensatz zu den bekannten 2D-Belegungsgittern wird die Belegung des Raums an den einzelnen 3D Positionen der Laserpunkte berechnet, ohne die gegebene Auflösung des Laserscanners zu verschlechtern.

Literatur

- DEMPSTER A (1967): Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics*, 38 (2): 325-339.
- HEBEL, M. (2012): Änderungsdetektion in urbanen Gebieten durch objektbasierte Analyse und schritthaltenden Vergleich von Multi-Aspekt ALS-Daten. Dissertation. Technische Universität München (TUM), Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, http://www.pf.bv.tum.de/pub/2012/hebel_phd12_dis.pdf
- HEBEL, M.; ARENS M & STILLA, U. (2011): Change detection in urban areas by direct comparison of multi-view and multi-temporal ALS data. In: STILLA, U. ET AL. (Eds.) PIA 2011, Springer, Lecture Notes in Computer Science (LNCS), 6952: 185-196.
- HEBEL, M. & STILLA, U. (2009): Automatische Koregistrierung von ALS-Daten aus mehreren Schrägansichten städtischer Quartiere. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation PFG*, 2009 (3): 261-275.
- HEBEL, M. & STILLA, U. (2010): LiDAR-supported Navigation of UAVs Over Urban Areas. *Surveying and Land Information Science, Journal of the American Congress on Surveying and Mapping*, 70 (3): 139-149.
- HEBEL, M. & STILLA, U. (2012): Simultaneous Calibration of ALS Systems and Alignment of Multiview LiDAR Scans of Urban Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50 (6): 2364-2379.

- JUTZI, B. (2007) Analyse der zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpuls. Dissertation. Technische Universität München (TUM), Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung
http://www.pf.bv.tum.de/pub/2007/jutzi_phd07_dis.pdf
- REITBERGER J. (2010): 3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner. Dissertation, Technische Universität München (TUM), Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung,
http://www.pf.bv.tum.de/pub/2010/reitberger_phd10_dis.pdf
- SCHAFER, G. (1976): A mathematical theory of evidence. Princeton University Press
- STILLA, U.; ROTTENSTEINER, F.; PAPARODITIS N. (2009)(eds) CMRT09 Object Extraction for 3D City Models, Road Databases, and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms, and Evaluation. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol 38(3/W4)
- STILLA, U.; GAMBA, P.; JUERGENS, C.; MAKTAV D. (eds) (2011a) Preface. JURSE 2011 - Joint Urban Remote Sensing Event. IEEE-GRSS, V-VI
- STILLA, U.; ROTTENSTEINER, F.; MAYER, H.; JUTZI, B.; BUTENUTH, M. (eds)(2011b) Photogrammetric Image Analysis, PIA 2011. Lecture Notes in Computer Sciences (LNCS) 6952, Heidelberg: Springer
- Yao, W. (2010); Extraction and velocity estimation of vehicles in urban areas from airborne laserscanning data. Dissertation. Technische Universität München (TUM), Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung. http://www.pf.bv.tum.de/pub/2010/yao_phd10_dis.pdf