

Erfassung und Analyse der zeitlichen Signalform bei gepulsten Lasersystemen

Boris JUTZI & Uwe STILLA

Kurzfassung

Bei gepulsten Lasersystemen erfolgt die Bestimmung der Entfernung zu einem angeleuchteten Objekt durch Messung der Laufzeit eines Pulses. Die Zeitmessung wird typischerweise durch einen analogen Vergleich des Signals mit einem Schwellwert durchgeführt. Es wurde ein Experimentalsystem aufgebaut, mit dem das rückgestreute Signal über der Zeit digital aufgezeichnet werden kann. Eine durch Abtastung aufgenommene Szene wird dann durch einen Datenquader mit Intensitätswerten repräsentiert. Dieser erlaubt einerseits die Berücksichtigung der zeitlichen Form und Intensität eines Pulses zur Bestimmung seiner zeitlichen Position. Andererseits können Nachbarschaften ausgewertet werden um Mehrdeutigkeiten aufzulösen, die bei Mehrfachreflektionen auftreten. Am Beispiel einer terrestrischen aufgenommenen Szene wird der Signalverlauf einer Mehrfachreflektionen diskutiert. Eine Auswertung der vertikalen Nachbarschaft wird durch Approximation von Geradenstücken mit Hilfe der Hough-Transformation durchgeführt.

1 Einleitung

Die automatische Generierung von dreidimensionalen Modellen zur Beschreibung von „man-made“ und natürlichen Objekten wie beispielsweise Gebäude oder Bäume ist für verschiedene Anwendungen von Interesse. Neben der indirekten Messung über die Aufnahme von Messbildern und stereoskopische Auswertung bieten aktive abtastende Laser eine direkte, präzise und schnelle Erfassung der Entfernung von 3D-Objekten unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen. Für die topographische Aufnahme der Erdoberfläche durch Flugzeuggetragene Systeme werden typischerweise gepulste Laser verwendet (HUISING & PEREIRA 1998; WEHR & LOHR 1999; BALTSAVIAS 1999).

Zur Ermittlung der Entfernung wird bei gepulsten Systemen die Laufzeit des Laserpulses gemessen, die typischerweise aus einem charakteristischen Wert des reflektierten Signals abgeleitet wird (z.B. Leading Edge Detection, Peak Detection, Constant Fraction Detection) (JUTZI & STILLA 2003). Problematisch ist die Messung von Rückstreuungen bei Objekten, die sich in unterschiedlichen Entfernungen innerhalb eines Strahlkegels befinden und Mehrfachreflexionen erzeugen. Solche Rückstreuungen ergeben sich sowohl bei natürlichen als auch künstlichen Objekten wie beispielsweise bei Bäumen mit ihren Ästen und Blattwerk oder unterschiedlich weit entfernte Gebäudekanten. Je nach Anwendung wertet man dann für jeden gesendeten Laserpuls die Laufzeit des ersten bzw. der letzten reflektierten Pulses aus. Objektstrukturen, die dazwischenliegende Pulse liefern, werden hierbei nicht erfasst. Bei voreingestelltem Schwellwert kann eine Abschwächung des Signals bei der Transmission durch Aerosole, Nebel, Regen, Schnee etc. oder bei der Reflexion durch

geringen Rückstreuquerschnitt oder absorbierendem Material zu unterschwelligen Signalwerten führen, bei denen die Wahrnehmung des Objektes verloren geht.

Im Gegensatz zur Messung charakteristischer Entfernungswerte besteht bei der Aufnahme des kompletten zeitlichen Signals und entsprechender Auswertung die Möglichkeit, szenenbedingte Mehrdeutigkeiten aufzulösen. Bei der Auswertung kann auch die Energie der rückgestreuten Pulse berücksichtigt werden. Untersuchungen und Beschreibungen der Form von gesendeten Pulsen und empfangenen Pulsen unter Einfluss unterschiedlicher Oberflächen (JUTZI *et al.* 2002) (WAGNER *et al.* 2003; 2004) bilden die Basis für die Interpretation der aufgezeichneten Signalform. Zur Vorhersage des Signalverlaufs bei der Beleuchtung einer komplizierten Oberfläche kann ein Simulationssystem helfen (JUTZI & STILLA 2004).

2 Erfassung der Szene

2.1 Aufbau des Experimentalsystems

Zur Entwicklung von Auswertelgorithmen und der Untersuchung von Grenzleistungen bei der Objektdetektion mit gepulsten Lasern wurden zwei verschiedene Experimentalsysteme aufgebaut. Zunächst wurde ein monostatisches Lasersystem mit dem Messprinzip „Einzel-Photon-Detektion“ und dann ein bistatisches Lasersystem mit dem Messprinzip „Mehrfach-Photonen-Detektion“ verwendet (JUTZI & STILLA 2003). Zum Abtasten wurde beim ersten System ein in zwei Achsen beweglicher Umlenkspiegel und beim zweiten System eine Faserbündelzeile mit einem in einer Achse beweglichen Umlenkspiegel verwendet. Bei diesen bestehenden Lasersystemen wurden jeweils die Empfangseinheiten so modifiziert, dass eine zeitliche Aufzeichnung des Empfangssignals möglich ist.

Vom zuletzt genannten Lasersystem soll der Systemaufbau exemplarisch dargestellt werden. Es setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen, nämlich der *Sendeeinheit*, der *Empfangseinheit* und der *Abtasteinheit* (siehe Abb. 1).

Die *Sendeeinheit* besteht aus einem Erbium Faser Laser, der mit einer Wellenlänge von $1,55\text{ }\mu\text{m}$ und einer Pulsspitzenleistung von 10 kW emittiert. Die Pulse besitzen bei halber Amplitudenhöhe eine Länge von 5 ns und werden mit einer Wiederholrate von 42 kHz gesendet. Die Strahldivergenz des Laserstrahls beträgt ca. 1 mrad.

Die *Empfangseinheit* besteht aus einer InGaAs Photodiode, deren Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 900-1700 nm liegt, einem Vorverstärker, der in einer Bandbreite von bis zu 250 MHz verstärkt und einem A/D Wandler, der das analoge Signal des rückgestreuten Pulses mit 20 GSamples/s abtastet. Die A/D Wandlung und Speicherung erfolgt durch ein digitales Speicher-Oszilloskop.

Die *Abtasteinheit* besteht aus einer horizontal angeordneten Zeile mit 63 Fasern und einem vertikal beweglichen Umlenkspiegel, der sich in 320 Rasterschritten positionieren lässt. Damit kann ein Gesichtsfeld von ± 15 Grad in horizontaler und vertikaler Richtung abgetastet werden.

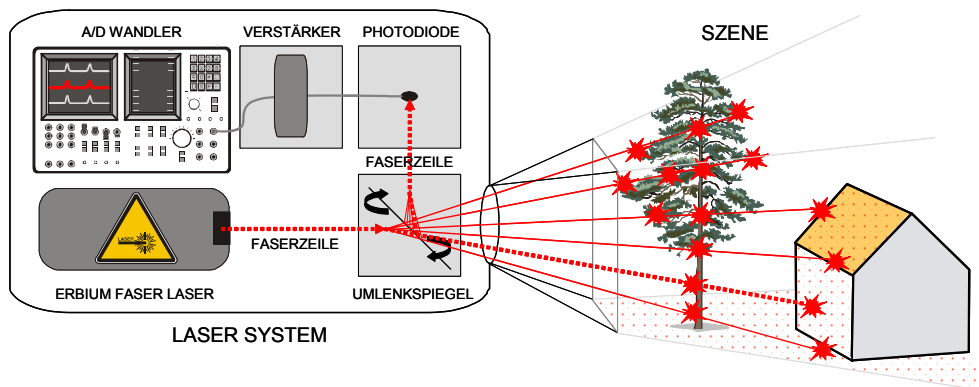


Abb. 1: Aufbau des Experimentalsystems mit Sendeeinheit (Erbium Faser Laser), Empfangseinheit (Photodiode, Verstärker, A/D Wandler) und Abtasteinheit (Umlenkspiegel, Faserbündelzeilen)

2.2 Speicherung der Szene im Datenquader

Wie aus der Beschreibung des vorhergehenden Abschnittes und aus Abb. 1 ersichtlich, kann das scannende Lasersystem stationär betrieben werden. Es liefert dann Informationen der Szene in Zentralperspektive. Dem Experimentalsystem kommt dabei lediglich die Aufgabe zu, Daten für die Entwicklung von Algorithmen zur Analyse der zeitlichen Signalform zu liefern. Ziel ist es, ein Flugzeuggetragenes Lasersystem mit Auswertalgorithmen zu entwickeln, die die entsprechende Aufnahmegeometrie berücksichtigen.

In den ersten Untersuchungen wurden Experimente zur Aufzeichnung der Signalform und Abtastung von urbanen Materialien auf einer Testplatte (siehe Abb. 2a) im Labor durchgeführt. Dazu wurde das erstgenannte Lasersystem mit einer Auflösung im Abtastraster von 128×128 Punkten verwendet.

In den weiteren Untersuchungen wurden mit dem Faser-Lasersystem von einer 15 m hohen Plattform natürliche Szenen im Außenbereich aufgenommen (Abb. 5). Objekte der Szene sind Gebäude, Strasse, Fahrzeuge, Parkbuchten, Bäume, Büsche und Wiese. Einige Objekte sind stellenweise verdeckt und die Materialien haben unterschiedliche Rückstreuungseigenschaften.

Zu jeder Ausrichtung des Laserstrahls im Abtastraster wird das empfangene Signal über der Zeit t für ein Zeitintervall t_{min} bis t_{max} aufgezeichnet. Das gewählte Zeitintervall hängt von der gewünschten Aufzeichnung der Tiefe des Raums und der erwarteten Entfernung interessierender Objekte ab. Zu jedem diskretisierten Zeitwert bzw. Entfernungswert wird ein Intensitätswert des Pulses gespeichert. In den Bereichen vor und hinter den Objekten, wo es keine Reflexion gibt, ist die aufgenommene Intensität näherungsweise Null. Die Gesamtheit aller Aufzeichnungen eines Abtastraster kann als diskretisierter Datenquader (x, y, t) visualisiert werden. Dabei geben die Koordinaten auf der Vorderseite des Quaders (x, y) jeweils die Position des Strahls und die Koordinaten in der Tiefe (t) die Zeitwerte an. Bei der Auswertung des Datenquaders ist die Aufnahmegeometrie zu berücksichtigen.

Ein Beispiel für einen aufgenommenen Datenquader ist in Abb. 2b dargestellt. Die aufgenommene Szene besteht aus einer Testplatte mit verschiedenen Objekten in unterschiedlicher Entfernung und Ausrichtung (Abb. 2a). Die Objekte sind Wellblech (links oben), Kieselsteine (im Hintergrund), schiefe Schieferplatte (rechts oben) und ein flacher Dachziegel (rechts unten). Der Ausschnitt des dazu gemessenen Datenquaders zeigt an verschiedenen Positionen die gemittelte rückgestreute Intensität in einem Zeitschritt. Man sieht das Wellblech auf der linken Seite und den Dachziegel auf der rechten Seite in der x - y -Ebene (Vorderseite des Quaders). Die Kieselsteine sind innerhalb des Datenquaders und deswegen nicht sichtbar. Die zeitliche Abhängigkeit der Intensität an den Positionen der obersten Zeile und der rechten Spalte ist sichtbar durch die obere und die rechte Fläche des Quaders.

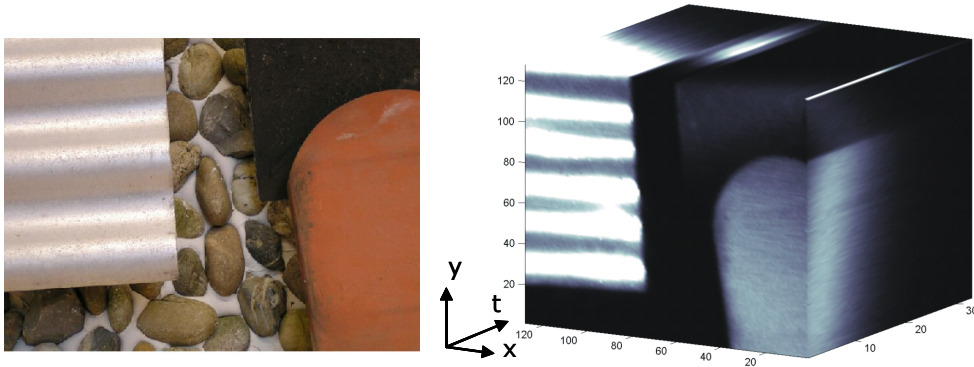


Abb. 2: Urbane Materialien auf einer Testplatte. a) Foto der Testplatte (links), b) Ausschnitt des aufgenommenen Datenquaders (rechts). Die mittlere Intensität des empfangenen Pulses in einem Zeitschritt ist durch die Helligkeit dargestellt.

3 Analyse des Signalverlaufs im Datenquader

3.1 Analyse des Einzelpulses

Zur Analyse der einzelnen Pulse müssen zuerst die Bereiche im Signalverlauf in dem sich Pulse befinden, detektiert werden. Zur Detektion der Bereiche wird ein Schwellwert s_{th} in Abhängigkeit vom Rauschen des Signals bestimmt. In einer pulslosen Phase wird das Rauschen mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ geschätzt. Praktisch kann jedoch auch der gesamte Signalverlauf mit Puls herangezogen werden, da die Pulsdauer im Vergleich zur Aufzeichnungszeit gering ist. Die Bereiche von Pulsen werden mit dem Schwellwert $s_{th} = \mu + 3\sigma$ detektiert, wobei zusätzlich gefordert wird, dass das überschwellige Signal mindestens 5 ns (Breite des emittierten Pulses bei halber Amplitudenhöhe) anhält.

Charakteristische Merkmale des Pulses zur Beschreibung der Oberfläche mit Entfernung, Rauigkeit und Reflektivität sind zeitliche Position, Breite und Amplitude des Pulses. Die

direkte Ableitung dieser Merkmale aus dem Signalverlauf führt jedoch aufgrund der gestörten Signalform auf nicht repräsentative Parameter. Unter der Annahme dass der Sendepulse einen gaußförmigen Verlauf hat, werden auch empfangene Pulse durch eine Gaußfunktion approximiert.

$$s(t - \tau) = \frac{a}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(t - \tau)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

Zur Schätzung der Parameter *Mittlerer Zeitwert* τ , *Standardabweichung* σ und *Maximale Amplitude* a : wird die iterative Gauß-Newton-Methode verwendet (HARTLEY & ZISSERMAN 2000). Als Startwerte für τ wird die zeitliche Position des Pulsmaximums, für σ die Breite des Pulses bei halber Amplitudenhöhe und für a der Wert des Pulsmaximums verwendet.

In Abb. 3 ist ein Beispiel für den gemessenen Verlauf eines Pulses mit durchgehender Linie dargestellt. Der durch die approximierte Gaußfunktion geschätzte Verlauf des Pulses ist durch die überlagerte gestrichelte Linie dargestellt. Mit dem geschätzten τ kann mit der Lichtgeschwindigkeit c der *Mittlere Entfernungswert* r zum Objekt durch $r = \tau c / 2$ berechnet werden:

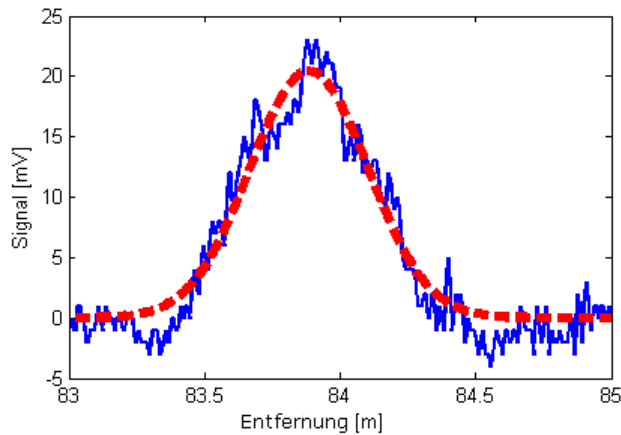


Abb. 3. Signalform des rückgestreuten Pulses: Gemessener Verlauf (durchgehende Linie) überlagert mit dem geschätzten Verlauf (gestrichelte Linie); Abgeleitet Parameter: *Maximale Amplitude* $a = 20,4$ mV; *Standardabweichung* $\sigma = 0,216$ m; *Mittlerer Entfernungswert* $r = 83,884$ m

3.2 Mehrfachreflexionen

Befinden sich mehrere Objekte kleiner als der Strahldurchmesser innerhalb des Strahlgangs des Lasers in verschiedenen Entfernungen, führt dies zu Mehrfachreflexionen. Dies tritt zum Beispiel durch die teilweise Beleuchtung von Vegetation (z.B. Blätter, Zweige, Äste, Stamm) bzw. urbanen Objekten (z.B. Gebäudekanten, Hochspannungsleitungen) auf.

Zur Wahrnehmung von Vegetation wird in der Regel der erste Puls für die Auswertung berücksichtigt. Darauf folgende Pulse werden für die Vegetation nicht berücksichtigt. Zur Wahrnehmung von urbanen Objekten wird in der Regel der letzte Puls für die Auswertung berücksichtigt. Vorher auftretende Pulse werden für urbane Objekte nicht berücksichtigt. Dazwischen liegende Pulse können jedoch sowohl zur Interpretation natürlicher als auch von „man-made“ Objekten wichtige Informationen liefern. Die Aufzeichnung des kompletten Signalverlaufs erlaubt die Analyse von Mehrfachreflexionen. Ein Beispiel für einen Signalverlauf der von mehrfachen Reflexionen stammt, ist in Abb. 4 dargestellt.

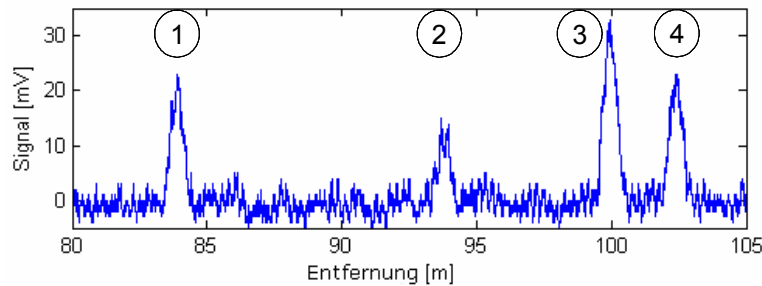


Abb. 4. Gemessener Signalverlauf mit Mehrfachreflexionen

Der Signalverlauf zeigt vier ausgeprägte Pulse, wobei der 1. und 2. Puls von einem Baum stammen und der 3. und 4. Pulse von einem Gebäude stammen. Aus dem Abstand von 1. Puls und 2. Puls kann auf die minimale Breite der Baumkrone geschlossen werden. Der Abstand vom 3. Puls und 4. Puls zeigt die Differenz zweier dominanter urbaner Rückstreuer. Eine Zuordnung zu unterschiedlichen Objekte ist jedoch aufgrund der alleinigen Analyse des Signalverlaufs ohne Berücksichtigung der Nachbarschaft nicht möglich.



Abb. 5. Foto von der aufgenommenen Szene

4 Analyse von Bildern im Datenquader

Zur Auswertung von Nachbarschaften und weiterer Rekonstruktion von Objekten kann in einfacher Form auf die Intensitätswerte im Datenquader zurückgegriffen werden. Das verwendete Faser-Lasersystem hat durch die Konstruktion in Faser-Richtung und Scan-Richtung unterschiedliche Auflösungen. Beim Versuchsaufbau wurde in vertikale Richtung (y -Richtung) mit einer Auflösung von 320 Schritten gescannt. In horizontaler Richtung (x -Richtung) stehen nur 63 Messungen zur Verfügung. Die mit dem Faser-Lasersystem aufgenommene Szene im Außenbereich ist in Abb. 5 zu sehen.

Die Untersuchung lokaler Strukturen erfolgt wegen der besseren Auflösung zunächst in der Nachbarschaft in y -Richtung. Dabei kann die Intensität in unterschiedlichen y -Positionen in Abhängigkeit von Zeit t auch als y - t -Bild aufgefasst werden. Die aufgezeichneten Daten im Quader liefern dann eine Sequenz von y - t -Bildern in x -Richtung. Ein Beispiel solcher benachbarter Bilder in x -Richtung zeigt Abb. 6. Das Bild Nr. 4 dieser Sequenz zeigt einen Baum in der Mitte und Gebäudefragmente auf der rechten Seite. Die Ausbreitungsrichtung des Lasers bei der Aufnahme war von links nach rechts, d.h. der Baum steht näher zum Lasersystem als das Gebäude. Die Grauwerte entsprechen den Intensitätswerten des Signals $s(t)$. Die Intensitätswerte entlang der eingezeichneten Linie im y - t -Bild Nr. 4 sind in Abb. 4 als Profil dargestellt. Es zeigt vier ausgeprägte Pulse. Bei der Darstellung der Sequenz ist zu beachten, dass zwar die Zeit t zur z -Richtung (Raumtiefe) korrespondiert, man jedoch bei einer Totalreflexion einer Oberfläche natürlich nicht hinter die Oberfläche schauen kann und somit auch nicht einen seitlichen Einblick in die Szene erhält.

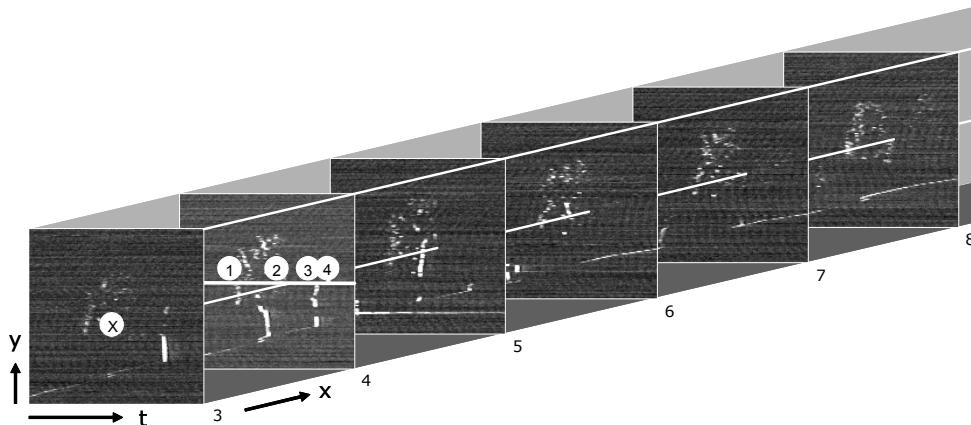


Abb. 6. Sequenz von benachbarten y - t -Bildern des Datenquaders

Da häufig Oberflächen von „man-made“ Objekten wie z.B. Wände und Dächer von Gebäuden Gegensatz zu Vegetation wie z.B. Baumkronen eben sind, werden zur Unterscheidung in y - t -Richtung Geradenstücke gesucht. Zur Extraktion von Geraden wird die Hough-Transformation (BALLARD 1981; GONZALEZ *et al.* 2004) verwendet.

In das y - t -Bild werden die ermittelten Entfernungswerte mit einem Label eingetragen. Eine Gerade im y - t -Bild kann durch den Winkel θ und den Abstand ρ zur einer Parallelen durch den Ursprung beschrieben werden

$$(y, t) \leftrightarrow \rho = y \cos \theta + t \sin \theta . \quad (2)$$

Geraden werden durch die Hough-Transformation in Punkte des ρ - θ -Parameterraumes abgebildet. Punkte im y - t -Bild lassen eine Schar von Geraden zu, die durch den Punkt laufen. Diese Geradenschar wird im Hough-Raum durch sinusförmige Funktionen abgebildet. Praktisch wird für jeden Meßpunkt im y - t -Bild an den entsprechenden Stellen im Hough-Raum ein Akkumulator um einen Werte erhöht. Sind einzelne Messpunkte in Form einer Geraden angeordnet, so führt dies zu einer der Anzahl dieser Messpunkte entsprechenden Erhöhung an der Stelle der ρ - θ -Parameter der Geraden. Hohe Werte im Akkumulator deuten also auf Geraden im y - t -Bild hin. (Abb. 7a).

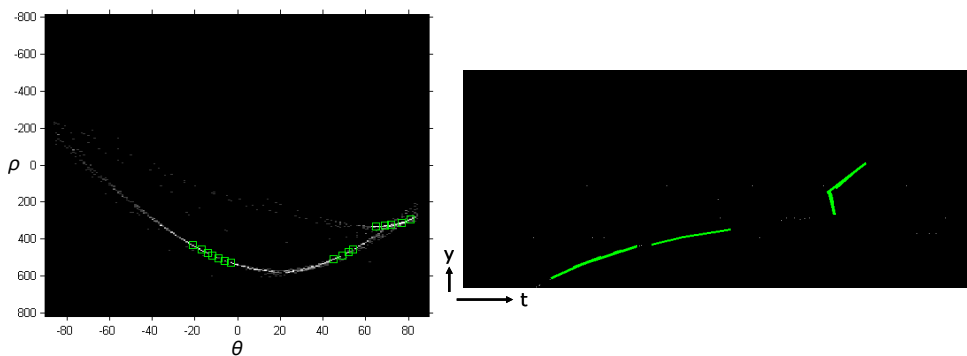


Abb. 7. y - t -Bild Nr. 34. a) Hough-Raum und detektierte Maxima (links), b) Binärbild mit Geradenstücke (rechts)

Die Werte im Hough-Raum größer 8 werden auf lokale Maxima untersucht, indem Maxima lokalisiert werden und in deren Nachbarschaft im Intervall $\rho < 25$ und $\theta < 5$ Grad die Einträge eliminiert werden. Durch diese Schwellwerteinstellung werden nur solche Geraden berücksichtigt, die auf mindestens 8 Entfernungswerten zurückzuführen sind und zudem werden Geraden in nächster Nachbarschaft ausgeschlossen. Die auf diese Weise bestimmten ρ - θ -Koordinaten (Abb. 7a, markierte Einträge) werden für die Rücktransformation berücksichtigt.

Von den für die Rücktransformation ermittelten Geraden muss der Anfangs- und Endpunkt der Geradenstücke bestimmt werden. Hierfür werden die Intensitätswerte des y - t -Bildes entlang der Gerade verglichen. Liegt der Intensitätswerte oberhalb eines vorgegebenen Schwellwerts wird ein Geradenstück bestimmt. Die gewonnen Geradenstücke müssen im letzten Verarbeitungsschritt eine Mindestlänge vorweisen, um weiter berücksichtigt zu werden (siehe Abb. 7b).

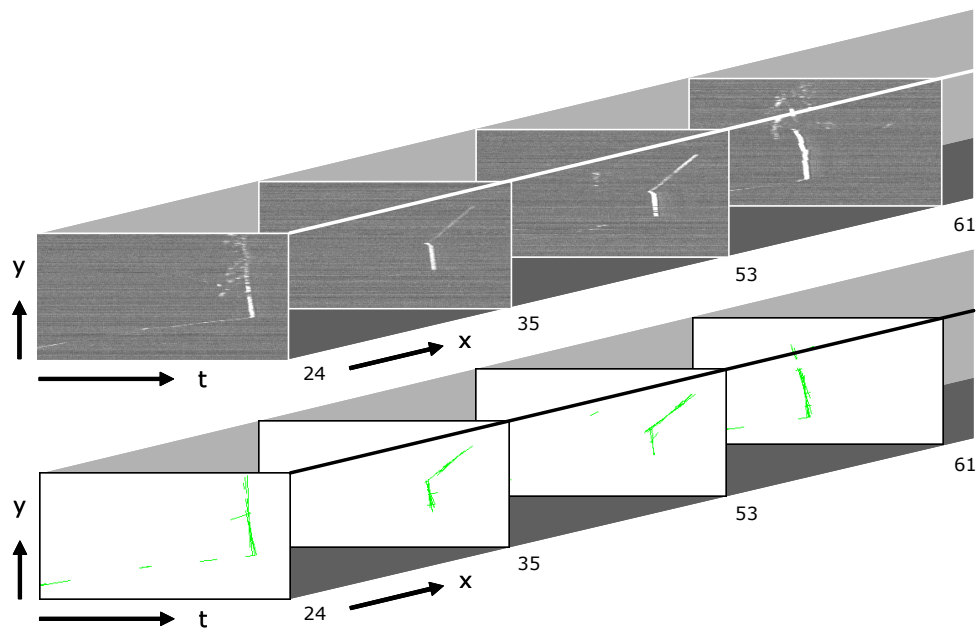


Abb. 8. Ermittelte Geradenstücke in einer Auswahl von y - t -Bildern

In Abb. 8 sind y - t -Bilder (oben) und die dazugehörigen detektierten Geradenstücke (unten) nach dem beschriebenen Verfahren dargestellt. Es wird der Erdboden, die Fassade und das Dach des Hauptgebäudes und der Stamm eines Baumes mit Geradenstücke beschrieben.

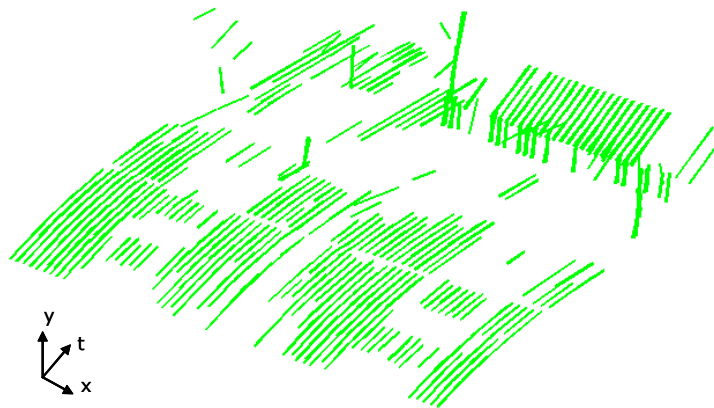


Abb. 9. 3D-Darstellung der Geradenstücke aller y - t -Bilder

Die gesamte Menge der extrahierten Geradenstücke aus den y - t -Bildern ist in einer dreidimensionalen Visualisierung in Abb. 9 dargestellt. Das Bild zeigt den Erdboden (linke Seite und Vordergrund), das Hauptgebäude (rechte Seite) und ein paar Stämme von Bäumen.

5 Diskussion

Die Szene des vorherigen Beispiels wurde durch einen Datenquader aufgenommen. Es wurden zuerst die Signalverläufe nach signifikanten rückgestreuten Pulsen untersucht und deren Positionen bestimmt. Zur Interpretation von Mehrfachreflexionen wurde die lokale Umgebung aufgrund der besseren Auflösung zunächst in vertikaler Richtung untersucht. Prinzipiell können diese Untersuchungen natürlich auch in horizontaler Richtung durchgeführt werden, wodurch ermöglicht wird, vereinzelte schmale geradlinige Strukturen (z.B. Baumstämme) von Ebenen zu unterscheiden.

Vertikal benachbarte Punkte einer vertikal geneigten Fläche der Szene sind im Datenquader je nach Diskretisierung und Neigung nicht zwingend benachbart, wodurch eine einfache Bestimmung von Zusammenhangskomponenten mit Bildverarbeitungsoperatoren aus-schied. Räumliche Nachbarschaften von Punkten auf einer glatten Oberfläche können durch Approximation von in y -Richtung benachbarter Pulspositionen durch linienhafte Formprimitive im y - t -Bild gefunden werden. Dabei stellen die kollineare Anordnungen von Pulspositionen zwar nicht die einzige, aber eine häufige Anordnung dar, die von „man-made“-Objekten ausgeht.

Treten Mehrfachreflexionen bei der Durchleuchtung von Baumkronen auf, wie im Beispiel von Abb. 6 zu sehen, gibt jeweils der erste Puls im Signal (Abb. 6 Nr. 1) die Information zur Hülle der Baumkrone (Blatt- und Astwerk). Typischerweise bildet die Hülle keine Ebene. Weitere Pulse aus der Baumkrone können folgen (z.B. Abb. 5 Nr. 2). Die Zugehörigkeit von Pulspositionen zur Baumkrone könnte durch das Bilden eines Clusters geprüft werden.

Einige Bereiche in Abb. 9 zeigen keine Geradenstücke, obwohl der Hintergrund eben ist. Dies ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass es während der Datenaufnahme geregnet hat. Im Bereich der Straße wurde durch die feuchte Fahrbahnoberfläche das Signal wegreflektiert. Im unteren Drittel von Abb. 9 sieht man eine regelmäßige Unterbrechung der Geradenstücke. Diese streifenförmige Lücke ist auf eine noch nicht behoben systembedingte Eigenheit des Lasersystems zurückzuführen, die in Abhängigkeit von der Scan-Bewegungsrichtung (aufwärts bzw. abwärts) ein Versatz der gemessenen Daten in y -Richtung bewirken kann.

Die Menge der aufgenommenen Daten wurde in Abschnitt 2.2 anschaulich durch einen Quader dargestellt. Der Quader suggeriert eine Parallelprojektion der Szene. Die Szene wurde jedoch bei dem Experiment in Zentralperspektive aufgenommen. Eine x - y -Ebene im Quader, die ja Intensitäten mit gleicher Laufzeit enthält, bildet in der Szene einen Teil einer Kugelfläche ab. Eine Gerade im y - t -Bild bildet einen Bogen in der Szene. Das bedeutet, dass man zur Suche von vertikalen Geraden in der Szene entsprechen Bögen als Formprimitiv in den y - t -Bildern verwenden müsste oder die Pulspositionen in die Geometrie der Parallelprojektion transformiert. Fasst man den Quader als Raum von Volumenelementen auf, wäre für die zweite Lösung noch eine erneute Abtastung (Resampling) notwendig. Beide Möglichkeiten wurden noch nicht durchgeführt, so dass die bisher dargestellte Vorgehensweise nur dann für stationäre Lasersysteme verwendet werden kann, wenn davon auszugehen ist, dass Objekte weit vom Sensor entfernt sind (wie bei Flugzeuggetragenen Systemen) und das Gesichtsfeld (FOV) klein ist.

Literatur

- Ballard, D.H. (1981) *Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes*. Pattern Recognition, Vol. 13, No. 2, 111–122
- Baltsavias, E.P. (1999) *Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54: 164-198
- Gonzalez, R.C., Woods R.E. & S.L. Eddins (2004) *Digital Image Processing Using MATLAB*, Prentice Hall
- Hartley, R. & A. Zisserman (2000) *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Proc. Cambridge University Press, Cambridge.
- Huising, E.J. & L.M. Gomes Pereira (1998) *Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 53: 245-261
- Jutzi, B., Eberle B., & U. Stilla (2002) *Estimation and measurement of backscattered signals from pulsed laser radar*. In: Serpico S.B. (ed) (2003) Image and Signal Processing for Remote Sensing VIII, SPIE Proc. Vol. 4885: 256-267.
- Jutzi, B. & U. Stilla (2003) *Laser pulse analysis for reconstruction and classification of urban objects*. In: Ebner H., Heipke C., Mayer H. & K. Pakzad (eds) Photogrammetric Image Analysis PIA'03. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 34, Part 3/W8, 151-156
- Jutzi, B. & U. Stilla (2004) *Extraction of features from objects in urban areas using space-time analysis of recorded laser pulses*. In: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Part B, 107-112
- Wagner, W., Ullrich A. & C. Briese (2003) *Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, VGI 4/2003, 223-235
- Wagner, W., Ullrich A., Melzer T., Briese C. & K. Kraus (2004) *From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges*. In: Altan M.O. (ed) International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol 35, Part B3, 201-206
- Wehr, A. & U. Lohr (1999) *Airborne laser scanning – an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54: 68-82