

Institut für Photogrammetrie und Kartographie
der Technischen Universität München
Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung

Analyse der zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpulsen

Boris Jutzi

Vollständiger Abdruck
der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla
2. Univ. Prof. Dr. techn. Norbert Pfeifer,
Technische Universität Wien/Österreich

Die Dissertation wurde am 08.06.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 11.09.2007 angenommen.

Kurzfassung

Bei gepulsten Lasersystemen erfolgt die Bestimmung der Entfernung zu einem angeleuchteten Objekt durch Messung der Laufzeit eines Pulses. Die Zeitmessung wird typischerweise aus einem charakteristischen Wert der empfangenen Signalform des rückgestreuten Pulses bestimmt. Kritische Messsituationen ergeben sich, falls die zeitliche Signalform des rückgestreuten Pulses deformiert ist oder mehr als ein Puls rückgestreut wird. Solche Rückstreuungen ergeben sich sowohl bei natürlichen als auch „*man-made*“ Objekten wie beispielsweise bei Bäumen mit ihren Ästen und Blattwerk, unterschiedlich weit entfernte Gebäudekanten oder geneigte Dachflächen.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob bei den oben genannten problematischen Messsituationen durch die Analyse der zeitlichen Signalform die Grenzleistung von boden- und luftgestützten Lasersystemen verbessert werden kann. Um die Vielfalt der empfangenen Signalform handhaben zu können, wird ein Modell entworfen, das sowohl die Signalform des emittierten Laserpulses, die örtliche Energieverteilung des Laserstrahls, die Reflexionseigenschaft der Oberfläche als auch die Transmission des Laserstrahls durch die Atmosphäre und die Empfängercharakteristik berücksichtigt. Die Modellierung von komplexen Oberflächen erfordert aufwendige Simulationsrechnungen. Es werden Simulationen zu ebenen Oberflächen mit unterschiedlicher Neigung und sphärischen Oberflächen durchgeführt, wobei unterschiedliche örtliche Energieverteilungen des Laserstrahls berücksichtigt wurden. Durch eine Simulation wurde in der Arbeit der Neigungswinkel einer ebenen Fläche für eine radialsymmetrische zylinderförmige örtliche Energieverteilung aus einer einzigen Messung geschätzt.

Es werden sieben Methoden vorgestellt, die neue zusätzliche Möglichkeiten der Objektbeschreibung aufzeigen. Zur Objektbeschreibung werden die Merkmale *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* aus der Signalform bestimmt. Diese Merkmale werden untersucht und die erzielten Resultate diskutiert, bewertet und verglichen.

Für die Durchführung der Experimente wurde ein Experimentalsystem aufgebaut, mit dem sowohl die gesendete als auch die empfangene Signalform über der Zeit mit 20GSamples/s getrennt aufgezeichnet werden können. Dadurch wird es möglich, die Signalform jedes individuellen Pulses detailliert zu vermessen. Es zeigt sich, dass die gesendete Signalform sowohl von den bekannten Modellen (Gauß-, Exponential- oder Rechteckform) erheblich abweicht, als auch in seiner jeweiligen Ausprägung kaum vorhersehbar ist.

Es wurde mit der Wiener-Filter-Methode ein neues Verfahren zur besseren Unterscheidbarkeit von mehreren Bereichen mit geringer unterschiedlicher Entfernung entwickelt. An einem Beispiel wird gezeigt, dass eine Unterscheidbarkeit bei zwei Bereichen mit einem Entfernungsunterschied von 0.15 m für eine typische Pulslänge von 5 ns möglich ist. Durch die Wiener-Filter-Methode kann eine zeitabhängige Oberflächenrepräsentation bestimmt werden, die eine von der gesendeten Signalform unabhängige Beschreibung der Oberfläche ermöglicht. Es konnte in Experimenten gezeigt werden, dass mit dieser Methode eine hohe Genauigkeit für die Bestimmung der *Entfernung* erreicht wird.

Abstract

Pulsed laser scanning systems determine the range to an illuminated object by a time-of-flight measurement. The time-of-flight is typically derived by the elapsed time between the emitted and backscattered laser pulses. Critical measurement situations can occur if the temporal waveform of the backscattered pulse is strongly deformed or more than one pulse is backscattered. Such kind of backscattered pulses can be expected for natural, as well as for man-made objects, like the canopy and the branches of trees, and different elevated building edges or sloped roof areas.

In this thesis, the above mentioned critical measurement situations are investigated by the analysis of the temporal waveform to improve the capabilities of terrestrial and airborne laser scanning systems. Due to the varying received waveforms, a model is invented, which considers the transmitted waveform of the emitted laser pulse, the spatial energy distribution of the laser beam, the reflectance properties of the surface as well as the atmospheric transmission of the laser beam on the way from the sensor to the surface and the receiver characteristic. The modeling of complex surfaces requires a large effort for the calculations of the simulation. Simulations for plane surfaces with different slopes and spherical surfaces are carried out for various spatial energy distributions of the laser beam. In this work the slope of a plane surface is estimated for a symmetric uniform spatial energy distribution by a single measurement.

In total seven methods are presented to gain additional possibilities for object representations. For object description the features are derived by the waveform, namely *range*, *range variation*, and *reflectivity*. These features are investigated and the achieved results are discussed, evaluated and compared.

To carry out the experiments an experimental setup was built up, for capturing separately the transmitted as well as the received waveform with 20GSamples/s. Therefore the waveform of each individual pulse can be recorded in detail. Experiments have shown that the transmitted waveform differs strongly from well-known models (Gaussian, exponential, or rectangular function), and in addition to this, its current appearance is hardly to predict.

With the Wiener Filtering a new procedure was invented for an improved discrimination of several areas with slightly different elevations. An example is given, that demonstrates a discrimination of two areas, with a range difference of 0.15 m for a typical pulse length of 5 ns, can be distinguished. By the Wiener Filtering a time-dependent surface representation can be obtained by removing the characteristic of the transmitted waveform to enable an independent description of the surface. Experiments have shown that with this method a high accuracy for determining the *range* can be derived.