

Range imaging metrology: investigation, calibration and development

Doctoral Thesis

Author(s):

Kahlmann, Timo

Publication date:

2007

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005465562>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Range Imaging Metrology: Investigation, Calibration and Development

A dissertation submitted to the
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences ETH Zurich

presented by

TIMO KAHLMANN

Dipl.-Ing., University of Hannover

Date of Birth May 22, 1977

citizen of
Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hilmar Ingensand, examiner
Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas, co-examiner

Abstract

In recent years, numerous sensor systems for the capturing of three-dimensional environments and objects have become available. Besides laser scanners and geodetic total stations, stereo vision and triangulation-based systems have to be exemplarily named here. Especially laser scanners have become state-of-the-art regarding speed and accuracy with respect to their ability to acquire objects up to a size of several tens of meters. A main drawback of laser scanners is their sequential mode of operation. They measure point by point. A few years ago, a new technology was developed to full functionality which is able to capture the environment simultaneously with a high resolution. So-called *range imaging* (RIM) or *flash lidar* cameras, which are based on digital imaging technology, merged with the ability to measure the distance to the corresponding object point in each pixel. Distance measurement is either based on the direct or indirect Time-of-Flight principle. Due to its parallel acquisition with up to video frame rate, RIM cameras are even able to capture moving objects. With respect to the optical dependencies, 3-D coordinates of the captured scene are derived. The nominal precision of the distance measurement is a few millimeters. RIM could become the technology of choice for many applications if the properties and characteristics become stable and predictable. Automotive, robotics, and safety systems can be named, for example. Significant deviations between nominal and measured coordinates occur in a range of several centimeters. Only intensive investigations can help to reach the theoretical limitations here.

This thesis deals with several aspects which affect the measurements of RIM cameras. First, a short introduction into the basic technologies that are associated with RIM is presented. Besides imaging and distance measurement methods, two basic principles of RIM are distinguished. Furthermore, the focus is laid on the specific limitations. During this work three different cameras have become available: the SwissRanger SR-2 and the SR-3000 from CSEM / MESA Imaging (Switzerland) and later on the 3k-S from PMDtec (Germany). These three cameras are based on the indirect Time-of-Flight principle and are equipped with different sophisticated features. Besides integrated calibration and correction functionality, the suppression of background illumination is one of the main features. However, these cameras are only intended to be highly developed demonstrators. An adaption to the specific application areas, like automotive or robotics, leads to specialized properties according to the desired claims.

The analysis of the existing camera types helps to understand the technology more closely. The raw data of the analyzed cameras is not more accurate than a few centimeters. In order to investigate the properties of the available cameras, special experimental setups had to be developed. The main part of this work deals with the investigation and calibration of the components of RIM cameras. The geometrical deviations of the optical system are addressed by means of a photogrammetric camera calibration. The distance measurement system is analyzed with respect to the deviations and statistics. Thus, limitations of both precision and accuracy are indicated. Besides the influences of the scattering effect, integration time, emitting system, and angle of incidence, target reflectivity, external and internal temperature, and finally linearity and fixed-pattern noise are discussed. Further on, an approach for a system calibration process is presented. Due to the complexity of the influencing parameters, a complete correction of the measurement data with respect to the diverse influencing parameters has not been reached. But the highly systematic dependencies promise sophisticated calibration routines in the future. This work contributes to the understanding of the sensors.

Nevertheless, the investigated influences of temperature on the distance measurement accuracy, which is indicated as a measure for the deviation between true and nominal value, have been significantly reduced by an uncoupling of the distance measurement and the external and internal temperature by means of a relative measurement setup. The introduction of an internal reference light path helps to reduce the temperature's influence on the distance data to a large degree. The experimental setup and the proof of the functionality complete this work.

The results of the numerous investigations will help to increase the accuracy of RIM cameras, especially vital for several applications, in need of improved accuracies. It has been shown that the theoretical limits lie within reach with help of suitably sophisticated calibration procedures.

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten wurden zahlreiche Sensorsysteme zur dreidimensionalen Erfassung der Umgebung entwickelt. Neben Laserscannern und geodätischen Totalstationen gehören Stereo-Vision- und Triangulationsmethoden zu den gängigen Verfahren. Insbesondere Laserscanner stellen bezüglich Geschwindigkeit und Genauigkeit der Erfassung von Objekten bis zu einer Ausdehnung von mehreren Zehnermetern den momentanen Stand der Technik dar. Ihr grösstes Manko ist ihre sequentielle Arbeitsweise: es wird ein Punkt nach dem nächsten gemessen. Vor einigen Jahren wurde eine neue Technologie bis zur vollen Funktionsfähigkeit weiterentwickelt, deren Vorzüge in der schnellen, simultanen und hochauflösenden Erfassung dreidimensionaler Umgebungen liegen. Sogenannte *Range Imaging* (RIM) oder *Flash Ladar* Kameras basieren auf der Fusion von digitalen Bilderfassungsmethoden und berührungsloser Distanzmessung. Dabei wird jedes Pixel befähigt die Distanz zum korrespondierenden Objektpunkt zu messen. Zwei differierende Verfahren werden unterschieden: direkte und indirekte Laufzeitmessung. Wegen der Parallelität der Erfassung in allen Bildelementen, sind RIM Kameras in der Lage, sogar bewegte Objekte zu erfassen. In Abhängigkeit von den geometrischen Gegebenheiten können 3D Koordinaten aus den primären Messelementen abgeleitet werden. Die nominelle Genauigkeit der Distanzmessung liegt bei einigen Millimetern. Damit besteht die Aussicht, dass RIM für viele Anwendungen interessant wird. Dazu ist es aber notwendig, die Eigenschaften dieser Technologie zu beherrschen. Automobilindustrie, Robotik und Sicherheitsanwendungen stehen zurzeit im Vordergrund der Forschungsbemühungen zur Verwendung von RIM Sensoren.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit zahlreichen Aspekten betreffend der Beeinflussung der Messergebnisse von RIM Kameras. Zunächst wird eine kurze Einführung in die Gesamthematik Range Imaging gegeben, und die wesentlichen technologischen Grundlagen werden dargestellt. Über digitale Bild- und Distanzmessverfahren hinaus werden die beiden Grundmethoden unterschieden. Weiter werden die spezifischen Grenzen der Genauigkeit betrachtet. Im Verlauf der Arbeit standen drei verschiedene RIM Kameras zur Verfügung: die Modelle SwissRanger SR-2 und SR-3000 von CSEM / Mesa Imaging (Schweiz) sowie später die 3k-S von PMD Technologies (Deutschland). Alle diese Kameras basieren auf dem indirekten Laufzeitmessverfahren und sind mit verschiedenen ausgeklügelten Funktionsmerkmalen ausgestattet. Neben integrierten Kalibrier- und Korrekturfunktionalitäten steht bei zwei Modellen die Unterdrückung der Hintergrundstrahlung zur Verfügung. Trotzdem stellen diese Sensoren lediglich Funktionsmuster dar, welche die verschiedenen Möglichkeiten dieser Technologie verdeutlichen sollen. Bei der Adaption in die verschiedensten Anwendungen, wie der Automobilsensorik oder der Robotik, sind spezialisierte Lösungen weitaus geeigneter, die spezifischen Aufgaben zu lösen.

Die Analyse bestehender Kameratypen hilft, diese aufstrebende Technologie besser zu verstehen. Die aus den Rohmessungen (Distanz und Bildpunkt) abgeleiteten 3D-Koordinaten dieser Sensoren sind nicht wesentlich genauer als einige Zentimeter. Für eine Vielzahl von Untersuchungen mussten neue Versuchsaufbauten entwickelt werden. Der Hauptteil dieser Arbeit besteht aus der Darstellung der Untersuchungsergebnisse der Komponentenkalibrierung der genannten Kameramodelle. Die geometrischen Abweichungen des optischen Systems vom Idealmodell wurden von einer photogrammetrischen Kamerakalibrierung erfasst. Das Distanzmesssystem wurde bezüglich der Statistik und Abweichungen vom Soll untersucht. Daher können Aussagen über die Grenzen der Präzision und Genauigkeit gemacht werden. Neben der Analyse des Einflusses von Scattering, Integrationszeit, Beleuchtungseinrichtung und Auftreffwinkel, werden Ergebnisse bezüglich der Einwirkung von Objektreflektivität, externer und interner Temperatur und schliesslich Erkenntnisse über Linearität und Fixed Pattern Noise dargestellt. Darüber hinaus wird ein Ansatz für eine Systemkalibrierung aufgezeigt. Wegen der grossen Komplexität der Abhängigkeiten

der einzelnen Einflussparameter untereinander konnte eine abschliessende Kalibrierung der untersuchten Kamerasysteme nicht erreicht werden. Die hochgradig systematischen Abhängigkeiten zeigen aber, dass eine umfassende Kalibrierung möglich ist. Diese Arbeit stellt einen grossen Schritt in diese Richtung dar und hilft die verschiedenen Bezüge zu verstehen.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist die Verbesserung eines bestehenden Systems (SR-3000) in Bezug auf die Empfindlichkeit gegenüber externen und internen Temperatureinflüssen. Dies wurde im Wesentlichen durch den Einbau einer internen Referenzstrecke erreicht, durch welche eine Entkopplung der extern gemessenen Distanzen von etwaigen Temperaturdriften erreicht werden konnte. Dieser relative Messaufbau wurde derart mit einer geeigneten Datenauswertung kombiniert, sodass eine signifikante Reduktion der Temperaturabhängigkeit erzielt wurde. Die Beschreibung des Versuchsaufbaus sowie die Darstellung und Erörterung der Messergebnisse runden diese Arbeit ab.

Die Ergebnisse der zahlreichen Untersuchungen sollen dazu dienen, die Genauigkeit der Messungen derart zu steigern, dass möglichst viele Applikationen davon profitieren. Es wird gezeigt, dass die theoretischen Grenzen betreffend der Genauigkeit der RIM Technologie bei der Anwendung entsprechend ausgereifter Kalibrierprozeduren erreichbar sind.
