“The Surface Model”
An Uncertain Continuous Representation of the Generic Camera Model and its Calibration

Von der

Carl-Friedrich-Gauß-Fakultät
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines

Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von

Dipl.-Ing. Dennis Rosebrock
geboren am 26.12.1980
in Peine

Eingereicht am: 06.08.2015
Disputation am: 19.02.2016
1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Wolfgang Förstner

2016

Fortschritte in der Robotik **Band 15**

Technische Universität Braunschweig
Institut für Robotik und Prozessinformatik
Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl (Hrsg.)

Dennis Rosebrock

The Surface Model

An Uncertain Continuous Representation
of the Generic Camera Model and its Calibration

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2016

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4494-2
ISSN 1431-7222

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Acknowledgements

With joy I think back at my time in the Institute of Robotics of the Technical University of Braunschweig. Apart from writing my thesis, I worked on many other things, which sometimes were even more fun. I got to develop autonomous cars (and see them actually driving by themselves), visit foreign countries to present my work, and hold lectures in front of a crowd of 200 more or less interested students. But even more importantly, I made new friends at the institute. I will never forget the discussions in our little "coffee kitchen" where we, while drinking tea, developed with enthusiasm new groundbreaking ideas like self-deactivating squid robots. And of course the activities we had outside of our building (having to deal with the sun and all), enriched my personal life.

I would like to thank my advisor and Head of the Institute of Robotics, Professor Friedrich M. Wahl. He gave me the possibility to explore any topic of my personal interest. This allowed me to gain knowledge and experience in many different areas, such as computer vision, robotics, advanced driver assistance systems and, last but not least, camera calibration. I am deeply thankful for all the freedom Professor Wahl gave me, his helpful advice and for his trust and support, which continued even after his retirement.

Many thanks go also to my second advisor, Professor Wolfgang Förstner. His publications and the fruitful discussions we had allowed me to gain new insights into the topic of parameter estimation and therefore lead to the development of the approach proposed in this thesis.

Additionally, I was very grateful that Anne-Sophie Poulin-Girard and her team provided calibration data, such as I was able to verify my approach for their extraordinary panomorph camera lens.

Without the help of my proof-readers, who gave a lot of useful hints and advice, this work would be significantly less structured and more cumbersome to read. Thank you very much Grace, Dirk, Caro and Volker for your help and your time.

Finally, I thank those who believed in me and my abilities to make a scientific contribution. This includes my family, my colleagues, my friends and everyone who supported me and helped me to never lose sight of the goal of finishing this work.

Dennis Rosebrock

Abstract

Using digital cameras for measurement purposes requires the knowledge of the mapping between 3D world points and 2D positions on the image plane. There are many different mathematical models that provide this mapping for a specific imaging system. These models tend to make assumptions about the structure of the system, e.g. an exact alignment of vision sensor and lenses or mirrors. If these constraints are not met or an inappropriate model is chosen, the measurement process will eventually deliver inaccurate results.

To avoid these problems, Grossberg and Nayar proposed a discrete generic camera model that describes a digital camera by assigning an arbitrary viewing ray to each pixel of the camera image. This makes the model applicable to any kind of camera, especially also to non-central ones like onmidirectional catadioptrics. However, this model is difficult to use in practice, as there is no direct method for mapping a 3D point to the image or determining rays for subpixel image positions.

In this work, the *Surface Model*, an uncertain continuous representation of the generic camera model, will be introduced. It uses a spline surface in 6D Plücker space to describe the camera. The interpolation abilities of the spline surface allow the viewing ray and its uncertainty for any (subpixel) position to be easily determined. Furthermore, the description facilitates the mapping from 3D world points to the image.

The calibration of the generic model has to be performed pixel-wise and is technically involved and time-consuming. In this work, hand-held sparse planar chessboard patterns are used for calibration. This introduces the assumption of a certain mapping continuity, but the calibration is much simpler to execute from a technical point of view. Furthermore, the uncertainties of the corresponding image point measurements are taken into account and propagated during the complete calibration procedure to obtain an uncertain model. It delivers uncertainty information in the form of covariance matrices for each camera operation. Simulations prove the validity of each step and the practical applicability of the procedure is shown by calibrating several real cameras of different types.

Kurzfassung

Um digitale Kameras zu Vermessungszwecken einzusetzen muss der mathematische Zusammenhang zwischen 3D Weltpunkten und 2D Bildpunkten bekannt sein. Es existiert eine Vielzahl an mathematischen Modellen, welche diese Abbildung für spezifische Kamerasysteme beschreiben. Für deren Gültigkeit ist die Einhaltung der zugehörigen Randbedingungen, beispielsweise die hochgenaue Ausrichtung von Bildsensor, Linsen und Spiegeln, zwingend erforderlich. Andernfalls können stark fehlerhafte Messergebnisse die Folge sein.
Um diese Problematik zu meiden, haben Grossberg und Nayar ein diskretes generisches Kameramodell vorgeschlagen. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass jedem einzelnen Pixel ein separater Sehstrahls zugeordnet wird. Somit kann jede erdenkliche Kamera beschrieben werden. Dies gilt auch, wenn kein punktförmiges optisches Zentrum existiert, wie es zum Beispiel bei omnidirektionalen catadioptrischen Systemen der Fall sein kann. Aufgrund der Diskretisierung kann allerdings nicht für jede beliebige Subpixel-Position ein Sehstrahl ermittelt werden kann. Auch die Projektion eines beliebigen 3D-Punktes ins Kamerabild ist nicht ohne Weiteres möglich.
In dieser Arbeit wird das *Surface Model* vorgestellt. Es dient als eine kontinuierliche Repräsentation des generischen Kameramodells, welche Modellunsicherheiten explizit berücksichtigt. Zur mathematischen Beschreibung wird eine Splineoberfläche im sechsdimensionalen Plücker-Raum genutzt. Deren Interpolationsfähigkeiten erlauben es, für jedwede Subpixel-Position direkt einen Sehstrahl zu ermitteln, sowie einen beliebigen 3D-Punkt unmittelbar ins Kamerabild zu projizieren.
Die Kalibrierung des diskreten generischen Modells erfordert die Bestimmung mehrerer Messpunkte für jeden einzelnen Pixel. Entsprechende Verfahren sind zeitaufwändig und technisch anspruchsvoll. Um den Prozess zu vereinfachen, werden in dieser Arbeit von Hand platzierte, planare Schachbrettmuster eingesetzt.
Während der Messdatengewinnung für die Kalibrierung treten unweigerlich Messungenauigkeiten auf. Beim hier vorgestellten Verfahren zur Parameterermittlung des Surface Models werden diese Unsicherheiten explizit zur Stabilisierung und Verbesserung der Genauigkeit genutzt. Dies resultiert in einem unsicheren Kameramodell, welches für die Anwendungen der Sehstrahlermittlung und der Punktprojektion Ergebnisunsicherheiten in Form von Kovarianzmatrizen zur Verfügung stellt.
Mittels Simulationen wird die Anwendbarkeit sämtlicher vorgestellter Verfahren validiert. Durch die Kalibrierung verschiedener realer Kameras wird darber hinaus deren praktische Nutzbarkeit aufgezeigt.

Contents