
Untersuchungen zur Genauigkeit von Streckenmessungen mit einer fokussierten plenoptischen Kamera im Fernbereich

Hannes Sardemann

Zusammenfassung

Mit der plenoptischen Kamera ist seit einigen Jahren ein Sensor verfügbar, der eine Bestimmung von Strecken und 3D Positionen mit einer einzelnen Kamera ermöglicht. Dazu ist im Inneren der Kamera ein Raster aus mehreren Tausend Mikrolinsen angebracht, das Mehrfachabbildungen auf dem Sensor erzeugt. Aus diesen Mehrfachabbildungen können Objektdistanzen und 3D Positionen bestimmt werden.

Während fokussierte plenoptische Kameras bisher hauptsächlich im Nahbereich untersucht wurden, wird der Fokus in dieser Arbeit auf den Mittel- bis Fernbereich bis zu einer Distanz von 100 m gelegt.

Nachdem zuerst die grundlegenden Prinzipien der Tiefenberechnung aus den Daten einer fokussierten plenoptischen Kamera beschrieben werden, werden anschließend Untersuchungen vorgestellt, in denen mit einer Raytrix R42 Strecken- und Ebenheitsmessungen durchgeführt wurden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Streckenmessungen zeigen den erwarteten Abfall der Genauigkeiten mit der Distanz. In einer Untersuchung kleiner Punktcluster wird eine durchschnittliche Streckenmessgenauigkeit von 3% mit maximalen Ausreißern von 10 – 12 m erreicht. Die anschließende Untersuchung von Ebenheitsmessabweichungen zeigt die große Anzahl an Ausreißern in den Tiefenbildern der fokussierten plenoptischen Kamera und unterstreicht die Notwendigkeit von räumlicher oder raum-zeitlicher Filterung der Daten.

1 Die plenoptische Kamera

Die Idee der plenoptischen Kamera ist bereits über 100 Jahre alt (IVES 1903, LIPPMANN 1908). Im Inneren einer Kamera wird ein Raster aus zehntausenden mikroskopisch kleinen Linsen vor dem Bildsensor angebracht, um so Mehrfachabbildungen auf einem Sensor zu erzeugen. Dadurch ist es möglich mit einer einzelnen Kamera Strecken und 3D Position zu messen.

Erst seit den 1990er Jahren ist durch die technischen Möglichkeiten, Mikrolinsen präzise zu schleifen, hochauflösende digitale Bilder aufzunehmen und diese mit moderner Computerhardware auszuwerten die Herstellung von plenoptischen Kameras möglich. Seit den letzten Jahren gibt es verschiedene Modelle für den privaten und industriellen Gebrauch zu erwerben.

Man unterscheidet zwischen zwei Modellen der plenoptischen Kamera. Die Standard plenoptische Kamera geht auf die auf die Grundidee von LIPPMANN (1908) zurück, wurde von

ADELSON & WANG (1992) umgesetzt und von NG ET AL. (2005) in einer handgehaltenen Version verbessert. Die von Ng gegründete Firma Lytro verkauft seit 2012 plenoptische Kameras dieses Typs.

Eine zweite Variante, die fokussierte plenoptische Kamera, wurde von LUMSDAINE & GEORGIEV (2009) vorgestellt. Die Position des Mikrolinsenrasters und des Sensors im Inneren der Kamera unterscheidet sich leicht von dem Standardmodell. Mit der fokussierten plenoptischen Kamera sind höhere laterale Bildauflösungen und bessere Streckenmessgenauigkeiten möglich. Daher wurde bisher zumeist dieser Typ für die Bestimmung von 3D Koordinaten eingesetzt. Der Hersteller Raytrix bietet seit 2010 fokussierte plenoptische Kameras für den industriellen Gebrauch an.

Die Genauigkeiten, die mit einer fokussierten plenoptischen Kamera erreicht werden können wurden bisher hauptsächlich im Nahbereich evaluiert. In dieser Arbeit soll eine Untersuchung der Streckenmessgenauigkeiten im Mittel- und Fernbereich bis 100 m erfolgen. Nachdem im Folgenden zuerst kurz das Funktionsprinzip der Distanzbestimmung mit einer fokussierten plenoptischen Kamera erläutert wird, werden anschließend Experimente vorgestellt in denen die Streckenmessgenauigkeit und Ebenheitsmessabweichung im angestrebten Distanzbereich untersucht wird. Die Untersuchungen wurden mit einer fokussierten plenoptischen Kamera des Typs R42 von Raytrix durchgeführt.

2 Verwandte Arbeiten

Der Strahlengang in einer fokussierten plenoptischen Kamera und die Generierung einer hochauflösenden scharfen Abbildung wird von LUMSDAINE & GEORGIEV (2009) vorgestellt. PERWAß & WIETZKE (2012) beschreiben die Generierung eines Tiefenbilds und leiten die Berechnung des Tiefenschärfebereichs und die theoretische Genauigkeit her.

Die in Versuchen tatsächlich erreichbare Tiefengenauigkeit von fokussierten plenoptischen Kameras wurde bisher hauptsächlich im Nahbereich bis zu wenigen Metern evaluiert. Die Ergebnisse sind dabei abhängig von den Parametern der verwendeten Kamera.

Die Genauigkeit der Streckenmessung verbessert sich proportional zur lateralen Auflösung des verwendeten Bildsensors und zur Brennweite des verwendeten Objektivs. Mit einer fünf Megapixel Raytrix R5 und einem 25 mm Objektiv können Standardabweichungen von 2 mm für die Antastgenauigkeit einer Kugel in einer Distanz bis 50 cm erreicht werden (LUHMANN ET AL. 2014). Mit einem 29 Megapixel Sensor (Raytrix R29) und einem 100 mm Objektiv verbessert sich die Streckenmessgenauigkeit im gleichen Distanzbereich auf eine mittlere Abweichung von 0,36 mm (JOHANNSEN ET AL. 2013).

Die Tiefengenauigkeit verschlechtert sich zudem mit der Distanz. Mit einem 35 mm Objektiv und einer Raytrix R5 erreichen ZELLER ET AL. (2014) ein RMS von 10 mm in einer Distanz von 1 m, der auf 75 mm in einer Distanz von 5 m ansteigt. Mit einem 12 mm Objektiv verschlechtert sich die Genauigkeit im selben Distanzbereich um den Faktor 8 bis 10.

3 Distanzbestimmung mit einer fokussierten plenoptischen Kamera

Der Aufbau einer fokussierten plenoptischen Kamera unterscheidet sich von einer klassischen digitalen Kamera durch den zusätzlichen Mikrolinsenarray (MLA) im Inneren der Kamera. Der Verlauf der Strahlen vom Objektraum vor der Kamera in den Bildraum im Inneren folgt der Linsengleichung:

$$\frac{1}{f_L} = \frac{1}{a_L} + \frac{1}{b_L} \tag{1}$$

Bei der fokussierten plenoptischen Kamera befindet sich der Bildsensor nicht wie in einer klassischen Kamera an der Position b_L des scharfen Zwischenbilds, sondern ist ein Stück versetzt dazu angebracht. Vor dem Sensor befindet sich ein Raster aus Linsen, die auf das Zwischenbild fokussiert sind. Der MLA und der Bildsensor können entweder hinter dem Zwischenbild oder davor angebracht werden. Bei Raytrix Kameras ist die zweite Variante umgesetzt (Abb. 1).

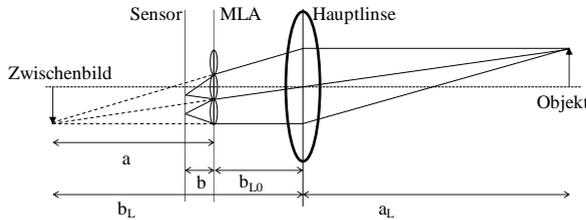


Abb. 1: Strahlengang einer fokussierten plenoptischen Kamera (SARDEMANN & MAAS, 2016).

Die Mikrolinsen bilden überlappende Ausschnitte des verkleinerten, gedrehten und tiefen-gestauchten Zwischenbilds auf dem Sensor ab. Durch Zuordnung homologer Punkte in zwei oder mehr Mikrobildern und Anwendung des räumlichen Vorwärtsschnitts kann die Distanz a zwischen dem MLA und einem Bildpunkt bestimmt werden. Da der Abstand b zwischen MLA und Bildsensor nicht bekannt ist und je nach Bauweise der Kamera variiert, wird eine relative Distanz, die virtuelle Tiefe $v = a/b$ definiert, die direkt von den gemessenen Parallaxen abgeleitet werden kann (ZELLER ET AL. 2014). Alle Objekte im Zwischenbild, die sich in einem Abstand $a > 2b$ vom MLA befinden, erscheinen in mindestens zwei Mikrobildern. Daher gilt $v \geq 2$ für die virtuelle Tiefe.

Das Tiefenbild einer fokussierten plenoptischen Kamera zeigt die (einheitslosen) virtuellen Tiefen im Zwischenbild. Für eine Bestimmung metrischer Tiefen im Objektraum muss ein funktionaler Zusammenhang zwischen der gemessenen virtuellen Tiefe v und der Objektdistanz a_L kalibriert werden. Dieser Zusammenhang lässt sich aus der Linsengleichung (Gleichung 1) und der Beziehung $b_L = b_{L0} + a$ ableiten:

$$a_L = \left(\frac{1}{f_L} - \frac{1}{b_{L0} + a} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{f_L} - \frac{1}{b_{L0} + v \cdot b} \right)^{-1} \tag{2}$$

Die Unbekannten in Gleichung (2) sind die Brennweite der Hauptlinse f_L und die Abstände b zwischen MLA und Sensor und b_{L0} zwischen Hauptlinse und MLA. Durch die Aufnahme

von Kalibrierpunkten in bekannten Distanzen mit einer fokussierten plenoptischen Kamera lassen sich diese Parameter bestimmen. Mit einer kalibrierten Kamera können dann metrische Strecken gemessen und deren Genauigkeit evaluiert werden.

4 Experimente und Ergebnisse

Im Fernbereich bis 100 m wurde die Evaluierung der Streckenmessgenauigkeit mit einer fokussierten plenoptischen Kamera des Typs R42 der Firma Raytrix durchgeführt. Dazu wurden mit einem 50 mm Objektiv (10° Öffnungswinkel) und einem 100 mm Objektiv (5° Öffnungswinkel) in den Distanzbereichen 1 – 30 m bzw. 2 – 100 m virtuelle Tiefen an einer kodierten Messmarke gemessen und diese mit Streckenmessungen übergeordneter Genauigkeit verglichen.

4.1 Kalibrierung

Für die Kalibrierung wurden im gesamten Arbeitsbereich in regelmäßigen Abständen Kalibrierpunkte angemessen. Als Kalibrierpunkt diente eine kodierte Messmarke, die auf einem Stativ entlang eines Messbands verschoben wurde. Um die Tiefe im Mittelpunkt der Marke zu bestimmen wurde eine robuste Ebene durch alle Tiefenmessungen auf der Marke gerechnet. Der Messwert ist somit ein gefilterter Wert und kann mit einer Standardabweichung angegeben und gewichtet in die Parameterschätzung eingeführt werden.

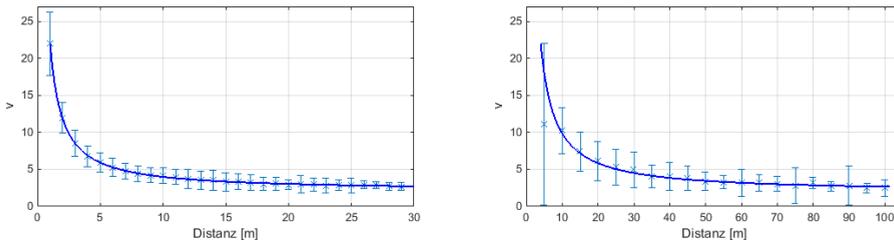


Abb. 2: Ergebnisse der Kalibrierung. Es wurden Kalibrierpunkte von 1 – 30 m in 1 m Abständen mit dem 50 mm Objektiv (links) und von 5 – 100 m in 5 m Abständen mit dem 100 mm Objektiv (rechts) gemessen.

4.2 Streckenmessungen

Mit der kalibrierten Kamera wurden anschließend Streckenmessungen im gesamten Distanzbereich durchgeführt. Aus dem Tiefenbild der fokussierten plenoptischen Kamera wurde dazu wieder der Markenmittelpunkt als virtuelle Tiefe bestimmt und dieser mit den Kalibrierparametern mit Gleichung (2) in eine metrische Distanz umgerechnet. Aus dem Vergleich zwischen Soll- und Ist-Wert kann daraus eine Aussage über die Streckenmessgenauigkeit abgeleitet werden.

In Abb. 3 sind die Soll-Ist Differenzen für die Streckenmessungen mit beiden Konfigurationen aufgetragen. Es lässt sich daraus eine mittlere relative Genauigkeit von ca. 3% berechnen. Neben einem Distanzabhängigen Faktor sind auch ein starkes zufälliges rauschen und viele Ausreißer in den Daten zu erkennen.

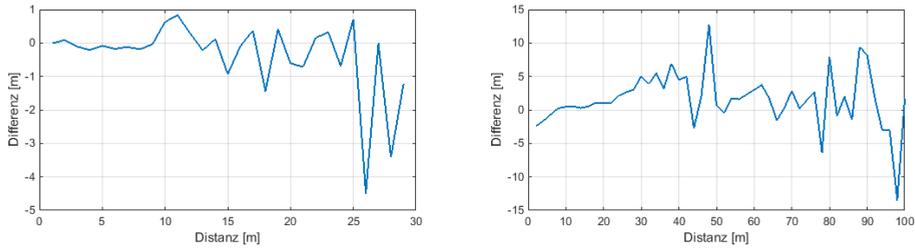


Abb. 3: Die Differenz aus der mit Messband bestimmten Sollstrecke und der mit der fokussierten plenoptischen Kamera gemessenen Ist-Strecke für das 50 mm (links) und das 100 mm (rechts) Objektiv.

4.3 Ebenheitsmessungen

Um das Rauschverhalten der virtuellen Tiefen zu untersuchen wurden Ebenheitsmessabweichungen an einer gut texturierten Wand untersucht. Mit der plenoptischen Kamera und einem 50 mm Objektiv wurden dazu formatfüllende Aufnahmen der Wand im Distanzbereich 1 – 30 m aufgenommen. Die Ebenheit der Wand wurde zuvor mit einem Laserscanner überprüft und beträgt $\pm 2,5$ cm. Mit einer L1 Schätzung wurde eine robuste Ebene durch die virtuellen Tiefen gefittet und anschließend die Residuen untersucht um eine Aussage über die Streuung der Messungen zu erhalten. Abbildung 4 zeigt die Verteilung der Messungen beispielhaft für die Distanz 15 m. Die Residuen zur Ebene sind normalverteilt und weisen 1,5% Ausreißer mit Residuen von mehr als der doppelten Standardabweichung auf. Über den gesamten Arbeitsbereich liegen die Standardabweichungen der Residuen zur Ebene in der Größenordnung von 0,5 – 0,7 virtuellen Tiefen. Maximale Abweichungen zur Ebene betragen zwischen 12 und 27 virtuellen Tiefeneinheiten. Projiziert man die maximalen Abweichungen in den Objektraum ergeben sich Ausreißer von mehreren hundert Metern. Diese großen Ausreißer unterstreichen die Notwendigkeit von Filtern zur Bereinigung der Tiefendaten. Die bereits in dieser Arbeit bei den Streckenmessungen angewendeten räumlichen Filter können um zeitliche oder raum-zeitliche Filter (LIEBOLD & MAAS 2016) in Bildsequenzen erweitert werden.

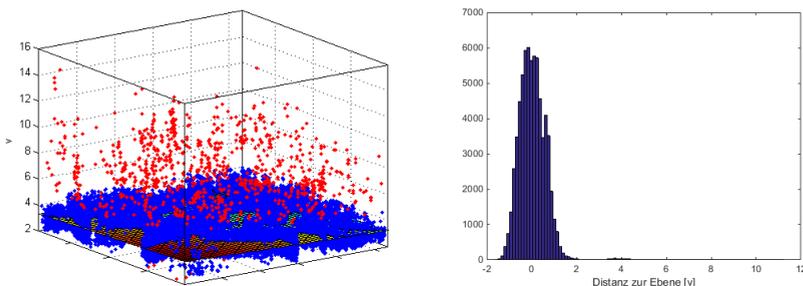


Abb. 4: In die virtuellen Tiefenmessungen auf eine Wand in 15 m Distanz wurde eine robuste Best-Fit Ebene eingepasst (links). Die Ausreißer ($> 2\sigma$) sind in rot eingefärbt. Die Verteilung der Residuen zur Ebene ist rechts dargestellt. (SARDEMANN & MAAS 2016)

5 Fazit

Die Evaluation der Streckenmessgenauigkeit einer fokussierten plenoptischen Kamera im Fernbereich hat gezeigt, dass mit diesem Kameratyp nach einer Kalibrierung und Filterung eine Distanzmessgenauigkeit in der Größenordnung von 3% in Distanzen bis 100 m erreicht werden kann. Das Rauschen und die große Anzahl von Ausreißern im Tiefenbild fordern aber robuste Filtertechniken.

6 Literatur

Adelson, E. H., & Wang, J. Y. (1992). Single lens stereo with a plenoptic camera. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* , 14 (2), 99-106.

Ives, F. E. (1903). Parallax stereogram and process of making same. *Patentnr. US725567* A. USA.

Johannsen, O., Heinze, C., Goldluecke, B., & Perwaß, C. (2013). On the calibration of focused plenoptic cameras. In *Time-of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms, and Applications* (S. 302-317). Springer.

Liebold, F., & Maas, H.-G. (2016). Advanced spatio-temporal filtering techniques for photogrammetric image sequence analysis in civil engineering material testing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* , 111, 13-21.

Lippmann, G. (1908). Epreuves reversibles donnant la sensation du relief. *J. Phys. Theor. Appl.* , 7 (1), 821-825.

Luhmann, T., Jepping, C., & Herd, B. (2014). Untersuchung zum messtechnischen Genauigkeitspotenzial einer Lichtfeldkamera. *Gemeinsame Tagung 2014 der DGfK, der DGPF, der GfGI und des GiN (DGPF Tagungsband 23 / 2014)* .

Lumsdaine, A., & Georgiev, T. (2009). The focused plenoptic camera. *IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, (S. 1-8).

Ng, R. (2005). Fourier slice photography. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 24, S. 735-744.

Perwaß, C., & Wietzke, L. (2012). Single lens 3D-camera with extended depth-of-field. *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, 8291.

Sardemann, H., & Maas, H.-G. (2016). On the accuracy potential of focused plenoptic camera range determination in long distance operation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.

Zeller, N., Quint, F., & Stilla, U. (2014). Calibration and accuracy analysis of a focused plenoptic camera. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* , 1, 205-212.

Autor:

Sardemann, Hannes

TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

hannes.sardemann@tu-dresden.de