

Superweitwinkel- und Fisheye-Kameras in photogrammetrischen Anwendungen

MUYAN XIAO¹ & MICHAEL CRAMER¹

Zusammenfassung: Im Rahmen der Arbeit soll untersucht werden, in wie weit sich das klassische perspektivische Kalibriermodell (mit physikalischer Parameter von D. Brown) auf superweitwinklige bzw. Fisheye-Kameras übertragen lässt bzw. modifizierte Parametersätze notwendig sind. Dafür wird das Kalibriermodell mathematisch simuliert und der Einfluss der Kalibrierungen an empirischen Datensätzen untersucht. Aus dem Ergebnis der Simulation lässt sich feststellen, dass sich der Unterschied zwischen dem erweiterten perspektivischen Modell und einer idealen Fisheye-Projektion mit steigendem Einfallswinkel des Abbildungsstrahls vom Objektpunkt vergrößert. Bis zu einem maximalen Einfallswinkel von etwa 60° zeigt die durchgeführte Simulation eine Abweichung beider Modelle kleiner 1 pix. Das erweiterte klassische perspektivische Kalibriermodell reicht also nicht aus um die Bilder mit großen Bildwinkeln wie bei Fisheye-Objektiven komplett auszuwerten. In der empirischen Untersuchung werden drei Fisheye-Kamerasysteme und eine normale weitwinklige Kamera verwendet. Der Unterschied von äquidistantem bzw. erweitertem perspektivischem Kalibriermodell wird anhand verschiedener Datensätze einer Laborszene untersucht.

1 Einleitung

Fisheye-Optiken sind Objektive, die extrem kurze Brennweite besitzen und sehr große Öffnungswinkel bis 180° oder sogar mehr realisieren können. Heutzutage finden sich solche Kamerasysteme im Massenmarkt überwiegend in Freizeitanwendungen. Aufgrund des großen Sichtfelds und der Realisierung von kurzen Aufnahmedistanzen sind Fisheye-Objektive im Sportbereich anzutreffen. Als Beispiel soll die „Action Cam“ Hero GoPro genannt werden. Fisheye-Kameras finden sich aber auch zunehmend im photogrammetrischen Bereich. Zunächst waren sie eher im Bereich der Innenraumvermessung bzw. Robotik zu finden. Mittlerweile gibt es erste UAV-Systeme mit Fisheye-Kameras z.B. für die Erzeugung von 3D-Punktwolken oder zur (Bauwerks-)Überwachung. Ein weiterer Anwendungsbereich ist das fahrzeuggestützte Mobile-Mapping (BEERS 2011), vor allem auch für die Modellierung von Straßenszenen. Bei Verwendung von Fisheye-Kameras werden im Vergleich zu normalen Kameras viel weniger Bilder benötigt, um den gleichen Anteil der Überlappung zwischen den Bildern zu bekommen (KEDZIERSKI et al. 2009).

Die starke Verzeichnung derartiger Optiken erlaubt in der Regel nicht die Verwendung von herkömmlichen Parametermodellen zur Modellierung der Kamerageometrie. Viele Forschungsarbeiten bieten daher verschiedene Methode an, um Fisheye-Optiken zu kalibrieren. In einigen Untersuchungen werden bestimmte Eigenschaften aus dem Lochkamera-Modell als Bedingungen zur Rektifizierung der Bilder von Fisheye-Kameras eingesetzt (ABRAHAM &

¹ Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, E-Mail: xiaomy92@gmail.com, michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

FÖRSTNER 2005). Manche Arbeiten versuchen ein generelles Kalibriermodell für verschiedene Abbildungsgeometrien einschließlich Fisheye-Linsen zu erstellen. KANNALA & BRANDT (2006) empfehlen ein Modell basierend auf einem Polynom neunten Grades für alle Arten von Fisheye-Kameras. GENNERY (2006) formuliert ein allgemeines Linsenmodell, das unterschiedliche Abbildungsgeometrie zusammen kombiniert, wobei ein Parameter das spezielle Kameramodell bestimmt. Nach GROSSBERG & NAYAR (2005) werden Abbildungsgeometrien einfach durch eine Gruppe von Elementen beschrieben, die geometrische, radiometrische und optische Eigenschaften bezeichnet.

2 Abbildungsgeometrie der Fisheye-Objektive

2.1 Projektionsart der Fisheye-Optiken

Je nach Projektionsart können Fisheye-Objektive mit äquidistanter, flächentreuer, orthographischer und stereo-graphischer Projektion klassifiziert werden (nach PRENZEL 1986; RAY 2002). Die meisten Fisheye-Optiken sind entsprechend der äquidistanten Projektionsart konstruiert. Im Folgenden wird diese Abbildungsgeometrie im Vergleich zur perspektivischen Abbildung vorgestellt (nach SCHNEIDER et al. 2009; ABRAHAM & FÖRSTNER 2005).

Der Abbildungsvorgang der äquidistanten Projektion wird in Abb. 1 dargestellt, wobei die Volllinie den entsprechenden äquidistanten Abbildungsstrahl zeigt und die Strichlinie die Zentralprojektion bezeichnet. Die Gleichungen (1) und (3) beschreiben die jeweils zugehörige Beziehung zwischen dem Einfallswinkel (α) eines Objekts und der radialen Distanz (r) des abgebildeten Punkts, wobei c die Kamerakonstante ist. Aus der Gleichung (3) wird der Einfallswinkel eines Abbildungsstrahls zu radialen Distanz linear transformiert. Deswegen wird ein Objektpunkt mit einem Einfallswinkel von 90° auf dem Rand des Bildkreises ($R = c \cdot \pi/2$) abgebildet, während der gleiche Punkt in der perspektivischen Abbildung unendlich weit projiziert wird. Die Gleichungen (2) und (4) sind die Kameramodelle beider Abbildungsarten, mit denen der Bezug zwischen Bildkoordinaten (x, y) und Objektkoordinaten (X, Y, Z) hergestellt wird.

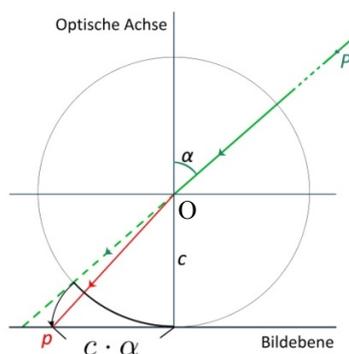


Abb. 1: Äquidistante und perspektive Projektion

Perspektivische Projektion:

$$r = c \cdot \tan \alpha \quad (1)$$

$$x = c \cdot \frac{X}{Z} \quad y = c \cdot \frac{Y}{Z} \quad (2)$$

Äquidistante Projektion:

$$r = c \cdot \alpha \quad (3)$$

$$x = c \cdot \frac{X}{\sqrt{X^2+Y^2}} \cdot \arctan \frac{\sqrt{X^2+Y^2}}{Z} \quad (4)$$

$$y = c \cdot \frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2}} \cdot \arctan \frac{\sqrt{X^2+Y^2}}{Z}$$

2.2 Physikalisches Verzeichnungsmodell

Das Verzeichnungsmodell von Brown definiert physikalisch relevante Parameter, um die Abweichung zwischen Abbildungsrealität und theoretischem Kameramodell zu kompensieren.

Diese Parameter beschreiben sowohl radial-symmetrische- und tangentielle Verzeichnung als auch Unebenheit und in-plane Verzerrung (BROWN 1971). Die Anwendung dieser Parameter in der geometrischen Kamerakalibrierung ist bekannt. In dieser Arbeit wird das perspektivische Kameramodell mit den Brown-Verzeichnungsparametern erweitert und mit dem äquidistanten Modell verglichen. Parallel kann das Verzeichnungsmodell von Brown auch für die Erweiterung von geometrischen Modellen von Fisheye-Optiken verwendet werden (SCHNEIDER et al. 2009). Entsprechend wird das physikalische Verzeichnungsmodell sowohl für die Zentralprojektion als auch die Fisheye-Abbildung in den später in den empirischen Untersuchungen eingesetzten Auswerteprogrammen implementiert.

3 Simulation

Um die Kameramodelle mathematisch darzustellen und das Potenzial des erweiterten perspektivischen Modells für die Fisheye-Geometrie ohne Einfluss von möglichen realen Fehlerquellen zu simulieren, wird folgende Simulation vorgenommen: Eine simulierte Fisheye-Kamera macht aus unterschiedlichem Abstand Nadir-Aufnahmen einer mit bekannten Punkten versehenen Fläche (Abb. 2).

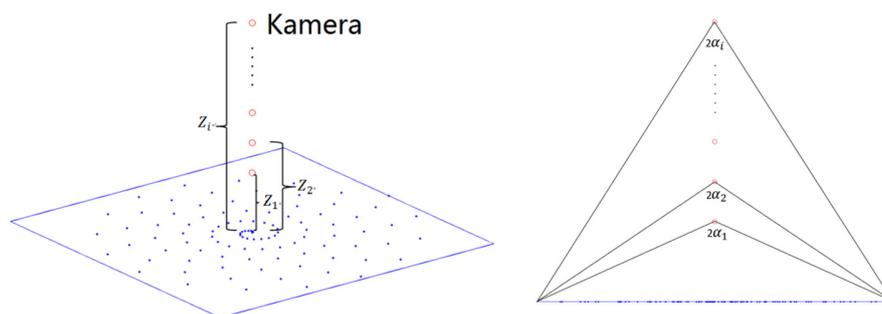


Abb. 2: Simulationsszene

Die Fläche hat eine Ausdehnung von $60\text{m} \times 60\text{m}$ und enthält 100 bekannte Punkte. Die Koordinaten (X, Y, Z) der Punkte im Objektraum werden mit Ursprung im Projektionszentrum des Bildes simuliert. Wenn sich die Distanz (Z) zwischen dem Aufnahmestandpunkt und der Fläche vergrößert, wird der zugehörige Einfallswinkel (α) repräsentiert durch die Objektpunkte kleiner (siehe Abb. 2, rechts). Für die Simulation werden zwei unterschiedliche Kameras angenommen, die in ihrer Geometrie ähnlich den später in den empirischen Untersuchungen eingesetzten Kameras sind: Kamera 1 hat eine Kamerakonstante von 1.25 mm , eine Pixelgröße von $3.75\ \mu\text{m}$, und Kamera 2 entsprechend 5 mm und $1.41\ \mu\text{m}$.

Mit den vorgegebenen Aufnahmestandpunkten lassen sich nun die entsprechenden Bildkoordinaten der Objektpunkte mit dem äquidistanten Modell (Gl. 4) berechnen. Parallel wird in der Simulation versucht, die Objektpunkte auch mit dem um die radiale Verzeichnung erweiterten perspektivischen Modell zu berechnen. Dabei wurden sechs Verzeichnungsparameter $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$ verwendet – i.d.R. werden nur die Parameter $k_1 - k_4$ eingesetzt. Die

mittlere Abweichung der simulierten Bildkoordinaten in Abhängigkeit von den unterschiedlichen maximalen Einfallswinkeln ist für beide Abbildungsmodelle logarithmisch in Abb. 3 dargestellt.

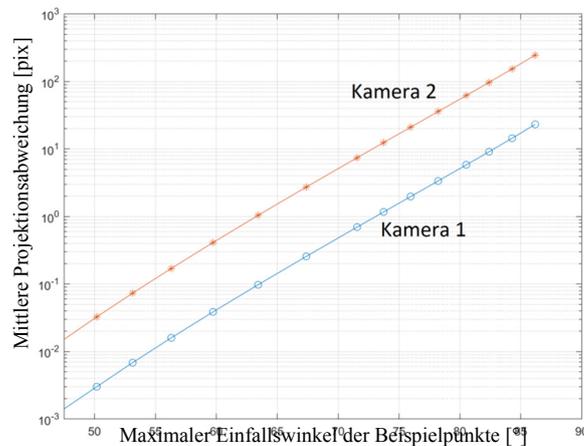


Abb. 3: Abweichung der Bildkoordinaten beider Abbildungsmodelle (in [pix])

Die Simulation zeigt, dass die Abweichung zwischen dem äquidistanten Modell und dem erweiterten perspektivischen Modell mit steigendem Einfallswinkel immer größer wird. Außerdem ist die Größe der Abweichung abhängig von der gewählten Kamerageometrie. Für die Kamera 1 liegt die Abweichung bei einem maximalen Einfallswinkel von etwa 70° noch im sub-pixel Bereich. Für die Kamera 2 ist die Abweichung kleiner als 1 pix, wenn der max. Einfallswinkel kleiner gleich etwa 63° ist. Damit können Fisheye-Kameras (je nach Geometrie) bis zu diesen Winkeln noch mit einem erweiterten perspektivischen Abbildungsmodell sub-pixel genau ausgewertet werden. Für größere Bildwinkel reicht die Anwendung des erweiterten perspektivischen Modells nicht aus. Deswegen ist es wichtig, das korrekte Abbildungsmodell für Fisheye-Kameras für genaue photogrammetrische Anwendungen zu benutzen.

4 Empirische Untersuchung

Für die empirische Untersuchung werden Bildverbände einer Laborraumszene erfasst. Zentrum dieser Szene ist eine Kalibrierwand (Schrankfläche), die mit gleichmäßig verteilten kodierten Zielmarken beklebt ist. Die Ausdehnung dieser Kalibrierwand beträgt etwa $3 \text{ m} \times 2.45 \text{ m}$ (B×H). Zur Anwendungen kommen 3 unterschiedliche Fisheye-Optiken um die Bandbreite vorhandener Systeme gut abzudecken. Es handelt sich dabei um eine (Industrie-)Kamera mit einem Zirkular-Fisheye (Chameleon 1.3 MP Mono USB 2.0 (Sony ICK445) mit Lensagon BF2M12520 Objektiv). Außerdem wird das UAV-System DJI Phantom Vision mit der Kamera FC 200 untersucht. Die dritte Konfiguration ist eine vollformatige Spiegelreflexkamera (Nikon D800E) mit einem 16 mm Fisheye-Objektiv. Diese Kamera wird auch in Kombination mit einem klassischen 20 mm Weitwinkel-Objektiv untersucht. Dieses repräsentiert die eher klassische Aufnahme Konfiguration, die dann als Referenzlösung für die Fisheye-Objektive dient. Ähnlich der Simulation werden Bildverbände aus unterschiedlicher Distanz (ca. 1 m, 2 m, 3 m Aufnahmeabstand) erfasst. Damit ergeben sich unterschiedliche maximale Einfallswinkel.

Jeder Bildverband von einem Fisheye wird mit sowohl dem perspektivischen als auch dem äquidistanten Kalibriermodell mit den bekannten Softwarepaketen Agisoft PhotoScan bzw. Pix4D Pix4Dmapper ausgewertet. Nach der Bildorientierung wird eine dichte Punktwolke für jeden Bildverband generiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertungen dargestellt und diskutiert.

Tab. 1 zeigt die mittlere Verbesserung (Rückprojektionsfehler) an den kodierten Marken nach der Orientierung jedes Bildverbands. Tab. 2 zeigt das Rauschen der Punktwolke.

Tab. 1: Mittlere Verbesserung (Rückprojektionsfehler) der kodierten Marken

Bildverband	Einfallswinkel (max.)	Fisheye-Modell [pix]		Perspektivisches Modell [pix]	
		PhotoScan	Pix4Dmapper	PhotoScan	Pix4Dmapper
Chameleon 1m	70°	0.389	0.468	7.420	3.209
Chameleon 2m	47°	0.148	0.292	2.511	1.504
Chameleon 3m	32.5°	0.162	0.231	1.347	0.743
Nikon-Fisheye 1m	62.5°	0.136	—	58.173	—
Nikon-Fisheye 2m	42.5°	0.151	—	5.553	—
DJI 1m	52°	1.128	0.660	2.042	0.962
DJI 2m	33°	0.453	0.353	0.922	0.640
Nikon-Weitwinkel	47°	—	—	0.110	—

Tab. 2: Rauschen (Abweichung von ausgleichender Ebene) der 3D-Punktwolke (relative Genauigkeit)

Bildverband	Einfallswinkel (max.)	Fisheye-Modell [cm]		Perspektivisches Modell [cm]	
		PhotoScan	Pix4Dmapper	PhotoScan	Pix4Dmapper
Chameleon 1m	70°	0.92	1.70	12.57	3.63
Chameleon 2m	47°	0.64	1.51	2.47	3.58
Chameleon 3m	32.5°	0.73	1.67	0.90	2.20
Nikon-Fisheye 1m	62.5°	0.34	—	9.38	—
Nikon-Fisheye 2m	42.5°	0.42	—	0.93	—
DJI 1m	52°	1.46	1.70	2.44	1.98
DJI 2m	33°	1.26	1.51	1.36	1.55
Nikon-Weitwinkel	47°	—	—	0.42	—

Die Genauigkeit der Punktwolke wird durch die Analyse des Rauschens bzw. der Abweichung von einer die Kalibrierungswand ausgleichenden Ebene vorgenommen (relative Genauigkeit). Ein Beispiel dieser relativen Genauigkeitsanalyse wird in Abb. 4 gezeigt, wobei die Histogramme der Differenzbildung für den Datensatz Chameleon 1 m dargestellt sind. Oben und unten sind jeweils die Ergebnisse der Punktwolken ausgewertet mit dem Fisheye- und perspektivischen Kalibriermodell. Tab. 2 zeigt die statistische Auswertung (Standardabweichung) der Differenzen der Punktwolke von der vermittelnden Ebene.

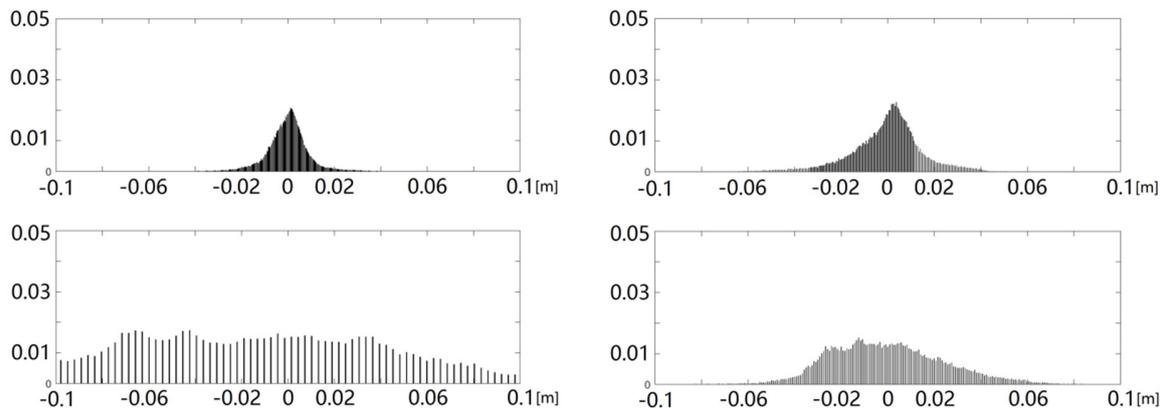


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung des Rauschens der 3D-Punktwolke: äquidistantes Modell (oben) bzw. perspektives Modell (unten), Datensatz Chameleon $1m$, Auswertung PhotoScan (links) bzw. Pix4Dmapper (rechts)

Die Anwendbarkeit des klassisch perspektivischen Kameramodells ist eine Funktion vom maximalen Einfallswinkel, wie auch schon in der Simulation gezeigt. Die Auswertungen zeigen, dass der Rückprojektionsfehler der Bündelausgleichung mit dem erweiterten perspektivischen Modell in Abhängigkeit vom max. Einfallswinkel abnimmt. Das gilt auch für die Genauigkeit der Punktwolke. Wenn man das Rauschen der abgeleiteten Punktwolke vergleicht, so scheinen die Differenzen zwischen beiden Abbildungsmodellen für die kleineren max. Einfallswinkel geringer. Der Rückprojektionsfehler für den Nikon-Fisheye $1m$ Datensatz (Perspektivmodell) ist auffallend groß. Das Objektiv hat eine viel größere Kamerakonstante als die anderen Systeme und damit ist die Abweichung größer (siehe auch Simulation).

In allen Fällen liefert das Fisheye-Abbildungsmodell bessere Resultate als das erweiterte Perspektivmodell, wie in Abb. 4 dargestellt: die Histogramme der Differenz der Punktwolke mit dem perspektivischen Kalibriermodell von der vermittelnden Ebene sind viel breiter gestreut als mit dem Fisheye-Kalibriermodell, mit dem fast alle Bildverbände mit einem mittleren Rückprojektionsfehler besser 1 pix ausgewertet werden. Die besten Genauigkeiten werden mit der Nikon-Fisheye-Konfiguration erreicht, was an der deutlich besseren Abbildungsqualität liegt. Der Rückprojektionsfehler (Fisheye) bleibt für beide Nikon-Datensätze praktisch gleich und erreicht die Qualität der Weitwinkel-Referenzlösung. Außerdem wird für die Genauigkeit der Punktwolke mit einer Standardabweichung von ca. 0.4 cm die Qualität der Referenzlösung erreicht.

Wenn man die Ergebnisse der Auswertungen beider Softwarepakete vergleicht, so ist die Genauigkeit der Punktwolke mit dem Fisheye-Kalibriermodell von Pix4Dmapper schlechter als das Ergebnis von PhotoScan. Es könnte daran liegen, dass für das Fisheye-Kalibriermodell in Pix4Dmapper ein anderes Verzeichnungsmodell als die physikalischen Parameter von Brown implementiert sind (HARTLEY & ZISSERMAN 2003). Hinzu kommen Unterschiede in den Auswerteprozessen der beiden Softwarepakete. PhotoScan erlaubt es, die Bündelblockausgleichung zuerst nur mit automatisch extrahierten Verknüpfungspunkten (z.B. Feature-Punkte) zu berechnen und erst danach signalisierter Kontrollpunkte (kodierte Zielmarken) in den Bildern manuell zu messen. So wird die Triangulation nicht von den

manuellen Messungen beeinflusst und die Projektionsfehler an den Zielmarken können bezüglich der schon existierenden Orientierung ermittelt werden. In Pix4Dmapper werden die Rückprojektionsfehler erst dann geliefert, wenn die Triangulation gleichzeitig mit den von der Software automatisch erkannten Verknüpfungspunkten und den manuell gemessenen Zielmarken durchgeführt wird. Aufgrund der Berücksichtigung der manuell gemessenen Punkte im Rahmen der Ausgleichung werden die deren Residuen entsprechend minimiert, sodass die Auswertung mit dem perspektivischen Modell von Pix4Dmapper kleinere Rückprojektionsfehler an den Zielmarken und geringere Abweichung zwischen den Punktwolken und der ausgleichenden Ebene im Vergleich zu den Ergebnissen von PhotoScan liefert.

5 Zusammenfassung

Die theoretischen und empirischen Auswertungen dieser Studie zeigen, dass Fisheye-Bilder bei Verwendung des richtigen Abbildungsmodells die sub-pixel Genauigkeitsanforderung photogrammetrischer Anwendungen erfüllen. Die Untersuchung zeigt aber auch, dass das äquidistante Kalibriermodell die Fisheye-Kameras besser als das (erweiterte) perspektivische Modell mit Verzeichnungsparametern von Brown modelliert. Die Genauigkeit des erweiterten perspektivischen Modells wird mit steigendem max. Einfallswinkel immer schlechter. Da die Realisierung eines großen Sichtfelds die eigentliche Motivation der Fisheye-Objektive ist, kann das klassische Modell daher in den meisten Fällen nicht verwendet werden.

Bezüglich der Simulationen in dieser Arbeit sind beide Abbildungsmodelle jedoch ineinander überführbar, sofern der max. Einfallswinkel kleiner etwa 60° bleibt. Die meisten normalwinkligen Kameras können einen Bildwinkel von 120° nicht erreichen. Deswegen könnte das äquidistante Modell mit entsprechenden Verzeichnungsparametern als ein generelles Kalibriermodell für beiden Kameratypen eingesetzt werden.

Die Unterschiede der mathematischen Modellierung der Fisheye-Geometrie in unterschiedlichen Softwarepaketen werden ebenfalls thematisiert. Pix4Dmapper implementiert dabei ein anderes Verzeichnungsmodell als die physikalische Parametersätze von Brown. Das Abbildungsmodell beeinflusst die Genauigkeit, was der Vergleich mit den Ergebnissen aus PhotoScan zeigt.

6 Literaturverzeichnis

- ABRAHAM, S. & FÖRSTNER, W., 2005: Fish-eye-stereo calibration and epipolar rectification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **59**, 278-288.
- BEERS, B., 2011: Collection and application of 2d and 3d panoramic imagery. *Photogrammetric Week '11*, Fritsch, D. (Ed.), Wichmann Verlag, 277-287.
- BROWN, D., 1971: Close-range camera calibration. *Photogram. Eng. Remote Sens* **37**, 855-866.
- GENNERY, D., 2006: Generalized camera calibration including fish-eye lenses. *International Journal of Computer Vision* **68** (3), 239-266.
- GROSSBERG, M. & NAYAR, S., 2005: The raxel imaging model and ray-based calibration. *International Journal of Computer Vision* **61** (2), 119-137.

- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A., 2003: Multiple view geometry in computer vision. Cambridge university press.
- KANNALA, J. & BRANDT, S., 2006: A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **28** (8), 1335-1340.
- KEDZIERSKI, M., WALCZYKOWSKI, P. & FRYSKOWSKA, A., 2009: Application of fisheye lens and terrestrial laser scanning in architectonic documentation of hard-to-reach cultural heritage objects. *Proceedings of the ASPRS 2009 Annual Conference*.
- PRENZEL, W., 1986: Entwicklungstendenzen der fotografischen Optik. *Bild und Ton - wissenschaftliche Zeitschrift für visuelle und auditive Medien*.
- RAY, S., 2002: *Applied photographic optics: Lenses and optical systems for photography, film, video, electronic and digital imaging*. Focal Press.
- SCHNEIDER, D., SCHWALBE, E. & MAAS, H.-G., 2009: Validation of geometric models for fisheye lenses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **64** (3), 259-266.