

Experimentelle Auswertung von Unsicherheitsmaßen auf relativen Posen für die Multikamerakalibrierung

FERID BAJRAMOVIC¹ & JOACHIM DENZLER²

Zusammenfassung: Beim Zusammensetzen relativer Posen zur extrinsischen Kalibrierung eines Multikamerasystems können mittels informationstheoretischer Unsicherheitsmaße verlässliche relative Posen ausgewählt werden. Dadurch lässt sich die Genauigkeit der resultierenden Kalibrierung deutlich verbessern. In dieser Arbeit werden quantitative experimentelle Untersuchungen solcher Unsicherheitsmaße und des zugehörigen Kalibrieralgorithmus durchgeführt. Dabei wird analysiert, wie sehr die Unsicherheitsmaße mit dem Fehler in den geschätzten relativen Posen korrelieren. Außerdem wird der Vorteil dieser Auswahl relativer Posen im Vergleich zu einer naiven oder zufälligen Auswahl aufgezeigt, wobei auch der Einfluss mehrerer Parameter untersucht wird. Im Median wird eine Verbesserung um bis zu Faktor vier erreicht.

1 Einleitung

Multikamerasysteme spielen im Rechnersehen (Computer Vision) eine zunehmend wichtige Rolle. Eine wichtige Voraussetzung für viele Anwendungen, wie 3-D-Rekonstruktion oder Multikameraobjektverfolgung, besteht darin, das Multikamerasystem zuvor zu kalibrieren. Bestehende Verfahren lassen sich anhand der verwendeten Eingabedaten grob in drei Klassen einteilen: 1. Musterbasiert: ein klassisches (planares) Kalibrieremuster muss in allen Kameras sichtbar sein (ZHANG, 2000) oder die Posen mehrerer Kalibrieremuster müssen zueinander bekannt sein (KITAHARA ET AL., 2001). 2. LED-basiert: ein einfach zu detektierendes, sich bewegendes Merkmal, wie z.B. eine LED in einem abgedunkelten Raum, wird über die Zeit hinweg aufgenommen (BAKER & ALOIMONOS, 2000, SVOBODA ET AL., 2005, CHEN ET AL., 2000, BARRETA & DANILIDIS, 2004). 3. Selbstkalibrierung (im weiteren Sinne): Bilder werden von einer unbekanntem Szene aufgenommen, die typischerweise eine gewisse (unbekannte) 3-D-Struktur und Texturen enthalten muss (MARTINEC & PAJDLA, 2007, VERGÉS-LLAHÍ ET AL., 2008, BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B).

Rein vom Standpunkt der Multiansichtengeometrie kann die Multikamerakalibrierung als Struktur-aus-Bewegungs-Teilproblem aufgefasst werden (HARTLEY & ZISSERMAN, 2003). Bei der Selbstkalibrierung mehrerer realer Kameras besteht allerdings das Problem, dass Punktkorrespondenzen automatisch aus Bildern mit stark unterschiedlicher Perspektive extrahiert werden müssen, was oft zu vielen Falschzuordnungen (Ausreißern) führt. Eine viel versprechende Teilklasse der Selbstkalibrierungsverfahren schätzt zunächst aus Punktkorrespondenzen relative Posen zwischen einigen Kamerapaaren und setzt diese

¹ Ferid Bajramovic, E-Mail: ferid.bajramovic@informatik.uni-jena.de

² Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fakultät für Mathematik und Informatik, Lehrstuhl für Digitale Bildverarbeitung, Ernst-Abbe-Platz 2, 07743 Jena, E-Mail: denzler@informatik.uni-jena.de, Internet: www.inf-cv.uni-jena.de

anschließend zur Kalibrierung des Gesamtsystems zusammen. Die Motivation dafür besteht darin, dass relative Posen auch aus Korrespondenzen mit vielen Ausreißern meist zuverlässig geschätzt werden können (STEWÉNIUS ET AL., 2006, BRÜCKNER ET AL., 2008). Die Güte der Gesamtkalibrierung wird natürlich stark von der Güte der relativen Posen abhängen. Eine kurze Erwähnung fand dieser Aspekt in (CHEN ET AL., 2000). Eine ausführlichere Behandlung ist in (MARTINEC & PAJDLA, 2007, MARTINEC & PAJDLA, 2006) zu finden. Dort werden relative Posen gewichtet anhand ihrer „Wichtigkeit“ und der Größe ihrer Unterstützungsmenge (support set), die durch den RANSAC-Algorithmus (FISCHLER & BOLLES, 1981) bestimmt wird. Das Verfahren von (VERGÉS-LLAHÍ ET AL., 2008) wählt relative Posen mittels eines Unsicherheitsmaßes und eines graphentheoretischen Kriteriums aus. Für die Auswahl relativer Posen werden kürzeste Dreieckspfade in einem Graphen bestimmt, der Kameras, geschätzte relative Posen und deren Unsicherheiten enthält.

Dieses Vorgehen wird in (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B, BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008A) aufgegriffen. Es werden drei theoretisch fundierte Unsicherheitsmaße auf Basis einer probabilistischen Auswertung des Raums möglicher relativer Posen (ENGELS & NISTÉR, 2005) vorgeschlagen. Auf Basis dieser Unsicherheitsmaße wird ein Auswahlkriterium für relative Posen beschrieben, das eine theoretische Rechtfertigung für das zuvor genannte Verfahren liefert. Außerdem wird ein effizienter Algorithmus für die Bestimmung kürzester Dreieckspfade beschrieben, sowie ein Auswahlkriterium für das Referenzkamerapaar.

In dieser Arbeit werden zusätzliche experimentelle Untersuchungen dieses Verfahrens durchgeführt. Insbesondere wird die Korrelation zwischen den Unsicherheitsmaßen und dem Fehler in den relativen Posen untersucht. Außerdem wird die Güte der Gesamtkalibrierung im Vergleich zu einer naiven Auswahl relativer Posen und einem zufälligen „Gütemaß“ bewertet. Dabei wird auch der Einfluss verschiedener Parameter des Verfahrens analysiert.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: in Abschnitt 2 wird das Kalibrierverfahren mit Auswahl relativer Posen kurz beschrieben. Die experimentellen Untersuchungen werden in Abschnitt 3 beschrieben. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 4.

2 Das Kalibrierverfahren

Ein Multikamerasystem und die Menge geschätzter relativer Posen lässt sich durch den *Kameraabhängigkeitsgraphen* \mathcal{G}_R repräsentieren (VERGÉS-LLAHÍ ET AL., 2008): Jede Kamera wird zu einem Knoten und zwei Kameras werden verbunden, falls ihre relative Pose bekannt ist. Die Aufgabe besteht darin, aus den relativen Posen, die bis auf Skalierung bekannt sind, absolute Posen zu berechnen, die in einem beliebigen Weltkoordinatensystem mit beliebiger Skalierung ausgedrückt sind. Genauer gesagt ist eine Kalibrierung bis auf eine 3-D-Ähnlichkeitstransformation je Dreieckszusammenhangskomponente in \mathcal{G}_R möglich (MANTZEL ET AL., 2004). In dieser Arbeit wird angenommen, dass \mathcal{G}_R dreieckszusammenhängend ist. Ansonsten kann jede Dreieckszusammenhangskomponente einzeln behandelt werden.

2.1 Zusammensetzen relativer Posen mittels Triangulation und Konkatenation

Ein Dreieck in \mathcal{G}_R besteht aus drei Kameras mit drei bekannten relativen Posen. Wenn die Skalierung eines Translationsvektors bekannt ist, so lassen sich die übrigen beiden mittels

Triangulation berechnen (HARTLEY & ZISSERMAN, 2003). Indem man ein Dreieck nach dem anderen behandelt, wobei aufeinander folgende Dreiecke immer eine gemeinsame Kante besitzen müssen, lassen sich alle Skalierungsfaktoren berechnen – bis auf den frei zu wählenden der ersten relativen Pose. Anschließend lassen sich die absoluten Posen durch Konkatenation aus den relativen Posen bestimmen. Als Hilfskonstrukt wird der Dreiecksgraph \mathcal{G}_T eingeführt, der wie folgt definiert ist: Jedes Dreieck in \mathcal{G}_R wird zu einem Knoten in \mathcal{G}_T und zwei Knoten sind genau dann verbunden, wenn die beiden Dreiecke eine gemeinsame Kante in \mathcal{G}_R haben. Ein einfaches Verfahren besteht darin, den Dreiecksgraph z. B. mittels Breitensuche zu traversieren und dabei mittels Triangulation und Konkatenation die absoluten Posen zu bestimmen.

Die Art der Traversierung von \mathcal{G}_T ist nicht spezifiziert. Da insbesondere in einem dichten Kameraabhängigkeitsgraphen nur ein kleiner Teil der Dreiecke für das Zusammensetzen benötigt wird, impliziert die Traversierung eine Auswahl relativer Posen. Auf Basis von Unsicherheitsmaßen auf relativen Posen, die den Kanten in \mathcal{G}_R als Gewichte zugewiesen werden, lässt sich ein Optimierungskriterium für Auswahl relativer Posen formulieren.

2.2 Unsicherheitsmaße auf relativen Posen

In (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B) werden drei informationstheoretische Unsicherheitsmaße eingeführt auf Basis der Wahrscheinlichkeitsdichte $p(R, t^* / \mathcal{D})$ der relativen Pose (R, t^*) gegeben die Menge der Punktkorrespondenzen \mathcal{D} . Die Dichte wird dabei mittels der Blake-Zisserman-Verteilung (HARTLEY & ZISSERMAN, 2003) modelliert:

$$p(R, t^* / \mathcal{D}) \propto \left(\prod_{d \in \mathcal{D}} \left(\exp \left(-\frac{s(R, t^*, d)}{\sigma^2} + \epsilon \right) \right) \right)^{|\mathcal{D}|^\phi} p(R, t^*). \quad (1)$$

Dabei bezeichnet σ die Standardabweichung der Normalverteilung, ϵ das relative Gewicht der uniformen Verteilung, $s(R, t^*, d)$ die Sampson-Approximation des Rückprojektionsfehlers (HARTLEY & ZISSERMAN, 2003) und ϕ ist ein weiterer Parameter, der eine Abweichung von der oft üblichen Unabhängigkeitsannahme modelliert.

Mittels eines Sampling-Algorithmus auf Basis des Fünf-Punkte-Algorithmus (STEWÉNIUS ET AL., 2006), der RANSAC bzw. MLESAC ähnelt (FISCHLER & BOLLES, 1981, TORR & ZISSERMAN, 2000), wird eine diskret repräsentierte Approximation A der Randverteilung $p(t^* / \mathcal{D})$ bestimmt (ENGELS & NISTÉR, 2005, BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B). Dabei ist A eine Matrix wählbarer Größe $a \times a$, deren Einträge die Wahrscheinlichkeit der entsprechenden Translationsrichtungen t^* angeben. Eine solche Repräsentation bietet sich an, da t^* zwei Freiheitsgrade mit endlichem Wertebereich besitzt. Außerdem berechnet der Sampling-Algorithmus noch eine Schätzung (\hat{R}, \hat{t}^*) der relativen Pose. Mittels der Ergebnisse des Sampling-Algorithmus werden gemäß (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B) die folgenden drei Unsicherheitsmaße berechnet:

1. Die Information $w_I(\hat{t}^*) = -\log(p(\hat{t}^* / \mathcal{D}))$.
2. Die Entropie $w_E(\hat{t}^*) = -\sum_{k,l} A_{kl} \log(A_{kl})$.
3. Die „geglättete Information“ $w_S(\hat{t}^*) = -\log \sum_{k,l} \mathcal{N}(\alpha(k, l, \hat{t}^*); 0, \gamma) A_{kl}$. Dabei bezeichnet $\mathcal{N}(\alpha(k, l, \hat{t}^*); 0, \gamma)$ die mittelwertfreie Normalverteilung mit Standardabweichung γ , wobei $\alpha(k, l, \hat{t}^*)$ der Winkel zwischen der Translationsrichtung, die durch (k, l) repräsentiert wird, und der Schätzung \hat{t}^* ist. Die Summe bewirkt also eine räumliche Glättung von A , ähnlich einer Faltung mit einem Gaußkern.



Abb. 1: Aufbau der Experimente, von links nach rechts: Multikamerasystem mit Muster für die Zhang-Kalibrierung, Szene für die Selbstkalibrierung, Szene im ersten Roboterarmexperiment.

2.3 Optimierungskriterium für die Auswahl relativer Posen

Um bezüglich einer Referenzkamera i die Pose einer Kamera j zu bestimmen, wird ein *Dreieckspfad* von i nach j in \mathcal{G}_R benötigt, wobei i im ersten Dreieck und j im letzten Dreieck enthalten sein muss. Die Auswahl des Dreieckspfades erfolgt so, dass die Gesamtunsicherheit aller enthaltenen relativen Posen minimiert wird. Nimmt man Unabhängigkeit zwischen den einzelnen relativen Posen an, so erhält man unabhängig von der Wahl des Unsicherheitsmaßes den Ausdruck $w(\mathcal{P}) = \sum_{t^* \in \mathcal{P}} w(t^*)$ für die Gesamtunsicherheit eines Dreieckspfades \mathcal{P} (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B). Aufgrund der Summe kann man einen Dreieckspfad mit *minimaler* Gesamtunsicherheit auch als *kürzesten* Dreieckspfad auffassen. Für die Gesamtkalibrierung werden kürzeste Dreieckspfade von einem *Referenzkamerapaar* zu allen anderen Kameras berechnet, wobei das Referenzpaar so bestimmt wird, dass die Gesamtunsicherheit aller verwendeten relativen Posen minimal ist. Details können der Literatur (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008A, BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B) entnommen werden.

3 Experimente

Es werden Experimente auf drei verschiedenen Szenen durchgeführt. Der erste Aufbau („Multikamera“) besteht aus acht Kameras (zwei AVT Marlin und sechs AVT Pike Kameras) wie in Abb. 1 dargestellt. Bei den anderen beiden Aufbauten („Roboterarm 1“ und „Roboterarm 2“) wurde ein Roboterarm verwendet, um mit einer Sony DWL-VL500 Kamera von 14 bzw. 10 verschiedenen Positionen aus Bilder aufzunehmen. In diesen beiden Versuchen wurden sehr ähnliche Szenen verwendet. Die Erste ist in Abb. 1 rechts dargestellt. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass im letzten Experiment *nicht* alle Bildpaare einen überlappenden Sichtbereich besitzen, was eine zusätzliche Schwierigkeit darstellt.

Als Voraussetzung für eine quantitative Auswertung werden Ground Truth Daten benötigt. Im ersten Aufbau werden diese gewonnen, indem vor dem eigentlichen Experiment ein Kalibrieremuster in die Szene gelegt wird (siehe Abb. 1 links) und mittels (ZHANG, 2000) eine Kalibrierung durchgeführt wird. Diese wird natürlich nur eine bedingte Genauigkeit aufweisen, reicht aber für einen Vergleich aus. Bei den anderen beiden Aufbauten werden verlässliche metrische Ground Truth Daten direkt von der Steuereinheit des Roboterarms geliefert.

Um die Unsicherheitsmaße zu bewerten, wird die Korrelation mit dem Fehler in der geschätzten relativen Pose berechnet. Als Fehlermaß wird dabei aufgrund der unbekanntenen Skalierungen der Winkel zwischen korrektem und geschätztem Translationsvektor in Grad verwendet. Da zudem

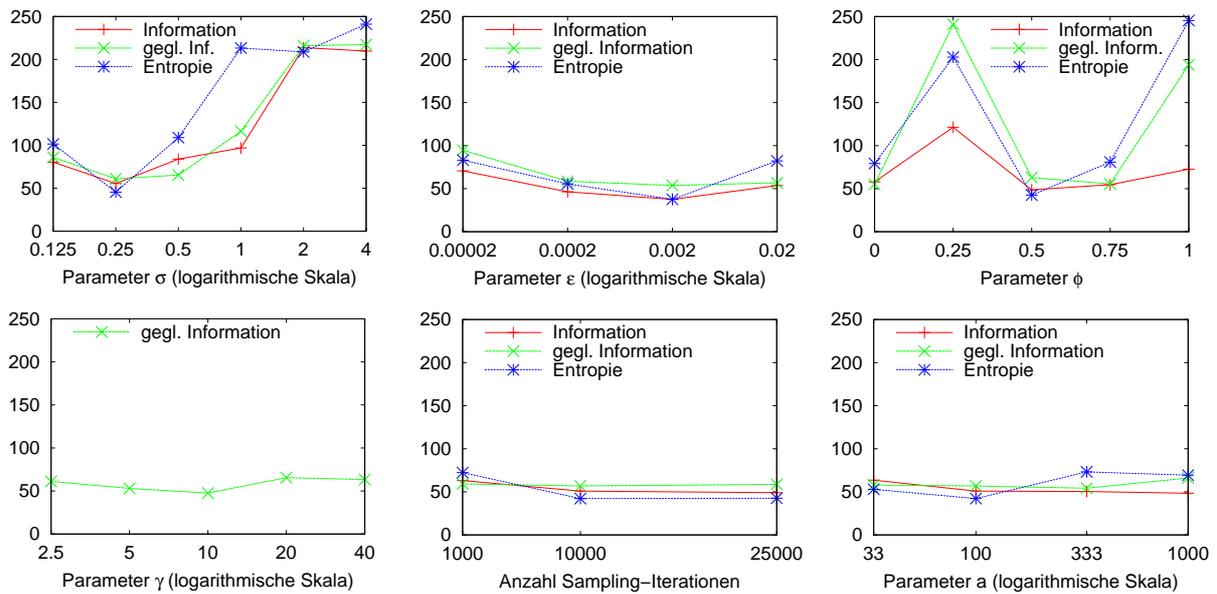


Abb. 2: Einfluss verschiedener Parameter auf den Median der Mediane der Fehler in den Kamerapositionen für den Aufbau Roboterarm 2 in Millimetern.

das Vorzeichen unbekannt ist, beträgt dieser Winkel maximal 90 Grad. Um den Fehler in der Gesamtkalibrierung zu ermitteln, muss zunächst die geschätzte Kalibrierung mit den Ground Truth Daten registriert werden, um die grundsätzlich unbestimmte Ähnlichkeitstransformation herauszurechnen. Hierfür wird randomisiert der kleinste Median der Fehlerquadrate in den Kamerapositionen bestimmt auf Basis eines nicht-linearen Registrierungsalgorithmus mit linearer Initialisierung. Der resultierende kleinste Median – in Millimetern – wird schließlich als Fehlermaß für die Kalibrierung verwendet.

Da das Schätzen der relativen Pose und die Auswertung der Unsicherheitsmaße randomisiert erfolgen, werden alle Experimente 20mal wiederholt. Es wird entweder der Median dieser 20 Wiederholungen für die weitere Auswertung verwendet oder die gesamte Verteilung in Form eines Boxplots (TUKEY, 1977) dargestellt. Eine Erklärung der Boxplots ist in Abb. 3 zu finden.

3.1 Analyse der Parameter

Zunächst werden günstige Werte für die verschiedenen Parameter der Unsicherheitsmaße und des zugehörigen Algorithmus ermittelt. Hierbei wird der Fehler bei der Gesamtkalibrierung betrachtet, wobei hier aus Platzgründen nur Ergebnisse für den Aufbau Roboterarm 2 in Abb. 2 präsentiert werden. Die beiden anderen Aufbauten liefern keine wesentlich abweichenden Werte für die optimale Wahl der Parameter.

Die Parameter σ und ϕ der Verteilung in Gleichung (1) haben einen deutlichen Einfluss auf die Gesamtergebnisse. Der Einfluss der übrigen Parameter ist hingegen relativ unbedeutend, sodass sie beinahe beliebig gewählt werden können. Es werden folgende Werte in allen Experimenten verwendet: $\sigma = 0,25$, $\epsilon = 0,002$, $\phi = 0,5$, $\gamma = 5$, $a = 100$, 10000 Sampling-Iterationen.

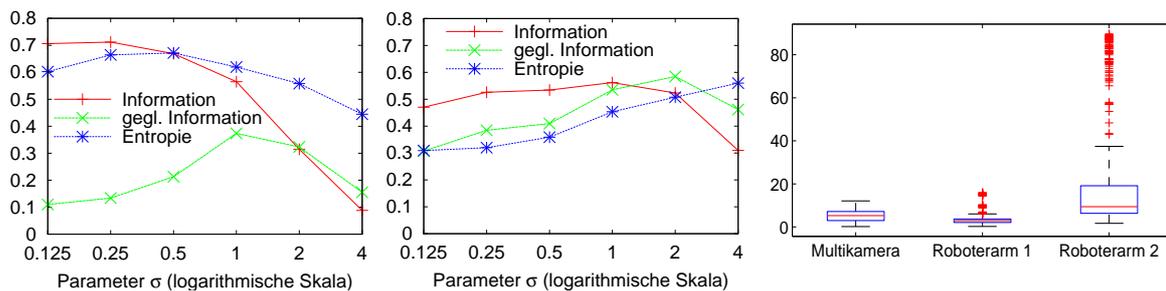


Abb. 3: Links: Pearson-Korrelation zwischen den drei Unsicherheitsmaßen und dem Translationsfehler der geschätzten relativen Posen für verschiedene Werte des Parameters σ , kombiniert ausgewertet über allen drei Experimenten. Mitte: entsprechende Spearman-Korrelation. Rechts: Translationsfehler in Grad als Boxplot, getrennt für die drei Experimente. Ein Boxplot (TUKEY, 1977) enthält einen Kasten, der die Quartile angibt, wobei der Median durch die Linie im Kasten dargestellt wird. Die Verteilung außerhalb der Quartile wird bis zur 1,5-fachen Ausdehnung zwischen den Quartilen durch Linien angedeutet. Ausreißer darüber hinaus werden durch einzelne Kreuze dargestellt.

3.2 Korrelation der Unsicherheitsmaße mit dem Translationsfehler

Um die Unsicherheitsmaße unabhängig von der Gesamtkalibrierung zu beurteilen, wird für jedes der drei Maße die Pearson-Korrelation mit dem Translationsfehler der geschätzten relativen Posen berechnet. Als Datengrundlage dienen dabei alle geschätzten relativen Posen in allen drei Experimenten über die 20 Wiederholungen. Da der Parameter σ einen ausgeprägten Einfluss auf die Ergebnisse der Gesamtkalibrierung hat, werden die Korrelationen exemplarisch für verschiedene Werte von σ angegeben. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 links dargestellt. Es zeigt sich, dass die Maße Information und die Entropie eine hohe Korrelation mit dem Translationsfehler aufweisen. Beim Maß geglättete Information ist die Korrelation mit dem Translationsfehler gering. Die Gesamtergebnisse sind hingegen vergleichbar mit den anderen beiden Maßen (siehe Abb. 4). Da die Pearson-Korrelation nur den *linearen* Zusammenhang zwischen zwei Zufallsgrößen erfasst, ist in Abb. 3 Mitte zusätzlich die Rang-basierte Spearman-Korrelation angegeben. Dort ist kein derart massiver Unterschied zu beobachten.

3.3 Vergleich mit zufälliger Auswahl und Breitensuche

In Abb. 4 werden die Ergebnisse der Gesamtkalibrierung bei Verwendung eines der drei Unsicherheitsmaße mit zufälligen Kantengewichten und der naiven Auswahl mittels Breitensuche (BFS) verglichen. Bei allen drei Aufbauten sind (im Median) alle Unsicherheitsmaße besser als Breitensuche. Zufall kann vereinzelt zwar bessere Ergebnisse liefern, streut aber sehr stark und ist im Median beim ersten und dritten Aufbau das schlechteste Verfahren. Beim Aufbau Roboterarm 1 hingegen wird Zufall selbst im Median nur vom Entropiemaß übertroffen. Diese guten Ergebnisse mit zufälligen Gewichten lassen sich durch die geringe Streuung der Fehler in den relativen Posen (Abb. 3 rechts) erklären.

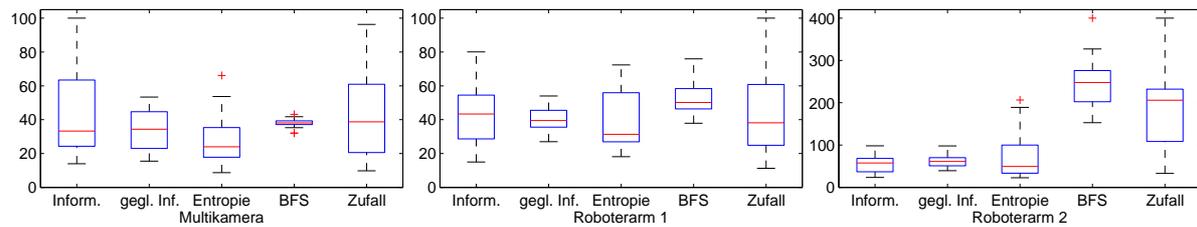


Abb. 4: Vergleich der Gesamtkalibrierung (Median des Medians der Fehler in den Kamerapositionen in Millimetern) bei Verwendung der verschiedenen Unsicherheitsmaße, bei naiver Auswahl (Breitensuche BFS) und zufälligen Kantengewichten. Für die Darstellung wurden die Werte auf 100 bzw. 400 beschränkt. (Boxplots werden in Abb. 3 erläutert.)

Beim Aufbau Roboterarm 2 fällt der Gewinn durch die drei Unsicherheitsmaße besonders groß aus und beträgt im Median bis zu Faktor vier. Dies kann dadurch erklärt werden, dass im dritten Experiment nicht alle Kamera Paare eine gemeinsame Ansicht haben, was zu deutlich höheren maximalen Fehlern in den geschätzten relativen Posen führt, wie in Abb. 3 rechts zu erkennen ist. Solche Fälle werden von Breitensuche und Zufall nicht erkannt, sodass Kamera Paare mit völlig falscher relativer Pose in die Gesamtergebnisse eingehen.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Kalibrierung eines Multikamerasystems mittels relativer Posen und deren Unsicherheiten vorgestellt, die mittels eines von drei Maßen ermittelt wurden. Mittels dreier unterschiedlicher experimenteller Aufbauten wurden das Gesamtverfahren und die Unsicherheitsmaße näher untersucht. Zunächst wurden günstige Werte für sechs Parameter der Algorithmen bestimmt. Anschließend wurde die Korrelation zwischen den Unsicherheitsmaßen und dem Fehler in den geschätzten relativen Posen bestimmt. Die Maße Information und Entropie zeigten eine hohe Korrelation, wohingegen das Maß geglättete Information nur eine geringe Korrelation aufwies. Trotz dieses Unterschieds zeigte das Kalibrierverfahren mit jedem der drei Maße relativ ähnliche Ergebnisse bei der Gesamtkalibrierung. Im Vergleich zu Breitensuche und zufälligen Kantengewichten erreichte vor allem das Entropiemaß eine deutliche Verbesserung. Beim Aufbau ohne gemeinsamen Sichtbereich für alle Kamera Paare fiel diese Verbesserung besonders groß aus: im Median etwa Faktor vier.

5 Literaturverzeichnis

- BAJRAMOVIC, FERID, & DENZLER, JOACHIM. 2008a. An Efficient Shortest Triangle Paths Algorithm for Uncertainty-based Multi Camera Calibration. Proceedings of the Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS).
- BAJRAMOVIC, FERID, & DENZLER, JOACHIM. 2008b. Global Uncertainty-based Selection of Relative Poses for Multi Camera Calibration. Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC), Band 2, S. 745–754.
- BAKER, PATRICK, & ALOIMONOS, YIANNIS. 2000. Complete Calibration of a Multi-camera Network. Proc. of the Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS), S. 134–144.

- BARRETO, JOÃO P., & DANILIDIS, KOSTAS. 2004. Wide Area Multiple Camera Calibration and Estimation of Radial Distortion. Proceedings of the Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS).
- BRÜCKNER, MARCEL, BAJRAMOVIC, FERID, & DENZLER, JOACHIM. 2008 (January). Experimental Evaluation of Relative Pose Estimation Algorithms. VISAPP 2008 Proc. of the Third Int. Conference on Computer Vision Theory and Applications, Band 2, S. 431–438.
- CHEN, XING, DAVIS, JAMES, & SLUSALLEK, PHILIPP. 2000. Wide Area Camera Calibration Using Virtual Calibration Objects. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Band 2, S. 2520–2527.
- ENGELS, CHRISTOPHER, & NISTÉR, DAVID. 2005. Global Uncertainty in Epipolar Geometry via Fully and Partially Data-driven Sampling. ISPRS Workshop BenCOS Towards Benchmarking Automated Calibration, Orientation and Surface Reconstruction from Images, S. 17–22.
- FISCHLER, MARTIN A., & BOLLES, ROBERT C. 1981. Random sample consensus a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, **24**(6), S. 381–395.
- HARTLEY, RICHARD, & ZISSERMAN, ANDREW. 2003. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, Band 2.
- KITAHARA, ITARU, SAITO, HIDEO, AKIMICHI, SHINJI, ONO, TOORU, OHTA, YUICHI, & KANADE, TAKEO. 2001. Large-scale Virtualized Reality. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Technical Sketches.
- MANTZEL, W. E., CHOI, H., & BARANIUK, R. G. 2004. Distributed Camera Network Localization. Proceedings of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Band 2, S. 1381–1386.
- MARTINEC, DANIEL, & PAJDLA, TOMAS. 2006. 3D Reconstruction by Gluing Pair-Wise Euclidean Reconstructions, or "How to Achieve a Good Reconstruction from Bad Images". 3DPVT '06 Proceedings of the Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06), S. 25–32.
- MARTINEC, DANIEL, & PAJDLA, TOMÁŠ. 2007. Robust Rotation and Translation Estimation in Multiview Reconstruction. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), S. 1–8.
- STEWÉNIUS, HENRIK, ENGELS, CHRISTOPHER, & NISTÉR, DAVID. 2006. Recent Developments on Direct Relative Orientation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **60**(4), S. 284–294.
- SVOBODA, TOMÁŠ, MARTINEC, DANIEL, & PAJDLA, TOMÁŠ. 2005. A Convenient Multi-Camera Self-Calibration for Virtual Environments. PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments, **14**(4), S. 407–422.
- TORR, P.H.S., & ZISSERMAN, A. 2000. MLESAC A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry. Comp. Vision and Image Understanding, **78**(19), S. 138–156.
- TUKEY, JOHN W. 1977. Exploratory Data Analysis. Reading, MA: Addison-Wesley.
- VERGÉS-LLAHÍ, JAUME, MOLDOVAN, DANIEL, & WADA, TOSHIKAZU. 2008. A New Reliability Measure for Essential Matrices Suitable in Multiple View Calibration. VISAPP 2008 Proceedings of the Third International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Band 1, S. 114–121.
- ZHANG, ZHENGYOU. 2000. A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**(11), S. 1330–1334.