3D-EasyCalib™ - Toolkit zur geometrischen Kalibrierung von Kameras und Robotern

Darko Vehar[1,2], Rico Nestler[1,3], Karl-Heinz Franke[1]

[1]Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e. V.,
Werner-von-Siemens-Straße 10, 98693 Ilmenau
[2]TU Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung,
[3]TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, FG QBV,
Postfach 10 05 65, 98684 Ilmenau
eMail: darko.vehar@zbs-ilmenau.de, rico.nestler@tu-ilmenau.de,
karl-heinz.franke@zbs-ilmenau.de

Zusammenfassung. Der Einsatz von multimodalen Mehrkamerasystemen zur optischen Erfassung von 3D-Daten ist im Bereich der Robotik allgemein und der Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) weit verbreitet. In diesen Anwendungen müssen vielfach 2D- und 3D-Sensordaten geometrisch registriert und fusioniert sowie darin enthaltene Elemente der Aufnahmeanordnung und Szenenobjekte korrekt im Raum verortet werden. Dabei spielen Methoden zur geometrischen Kalibrierung von datenerfassenden Systemen, wie Kameras, und von im Raum agierenden Objekten, wie Robotern, eine herausragende Rolle. Gegenstand der geometrischen Kalibrierung ist die Bestimmung der (intrinsischen) Abbildungseigenschaften von Kameras sowie der geometrischen Lage und Orientierung von Kameras bzw. Roboter in Weltkoordinaten durch extrinsische Parameter.

Im Beitrag werden ausgewählte Aufgaben der geometrischen Kalibrierung, wie z.B. Kalibrierung von Einzelkameras und Kamerapaaren, von inversen Kameras (Projektoren) und von Kamera-Roboter-Anordnungen theoretisch behandelt und beispielhaft mit Hilfe eines modularen Toolkits, dem 3D-EasyCalib™, ausgewertet.

1 Einleitung und Motivation

Mehrkamerasysteme werden heutzutage für eine Vielzahl von Aufgaben in der Robotik und MRK eingesetzt. In solchen Anwendungen ist vor der eigentlichen 3D-Datenanalyse in der Regel eine 2D-, 3D-Fusion aller sensorisch erfassten Daten in einem gemeinsamen Koordinatensystem sowie darin eine Kamera-zu-Roboter-Registrierung erforderlich. Die hierfür bewährten Methoden zur Kamera- wie auch Kamera-zu-Roboter-Kalibrierung verwenden geometrisch bekannte Kalibrierkörper, die üblicherweise aus verschiedenen Blickrichtungen aufgenommen werden müssen. Aus Korrespondenzen von bekannten Welt- und ermittelten Bildpunkten lassen sich die inneren Kameraparameter wie auch die räumlichen Bezüge von Sensoren und Szenenobjekten, wie Robotern, sehr genau ermitteln. Da zur Kalibrierung einer konkreten Anordnung, z.B. eines Kamera-Roboter-Systems, oft verschiedene Methoden kombiniert werden müssen, ist der Kalibrierungsvorgang zeitaufwändig und die Bewertung der erzielten Ergebnisse der Kalibrierung erschwert. Zur nutzerfreundlichen uni-

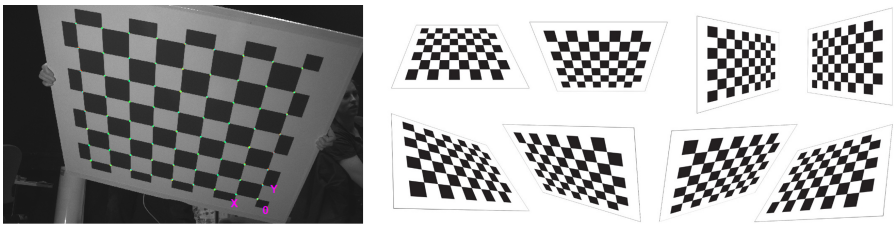

Abb. 1: Planares Kalibriertarget mit 9×8 Passpunkten (links) zur Kamerakalibrierung. Acht empfohlene Targetposen zur Erstellung eines Kalibrierdatensatzes (rechts).

versellen Umsetzung unterschiedlicher Aufgaben der geometrischen Kalibrierung in verschiedenen Aufnahmeszenarien wurde am ZBS e. V. das modulare Toolkit 3D-EasyCalib™ entwickelt.

Das Programm 3D-EasyCalib™ bietet zahlreiche Toolboxes, Verfahren und ein bedienerfreundliches Frontend. Das Ziel der Entwicklung des Toolkits war es, eine Möglichkeit zu schaffen, ohne vorhandenes Expertenwissen geometrische Kalibrierungen mit hoher Präzision durchführen zu können und dem Nutzer die Auswahl eines für die konkrete Anwendung geeigneten Verfahrens zu vereinfachen. Dazu werden im Programm einheitliche Fehlermetriken verwendet, die mit spezifizierten Kalibriernormalen (siehe z.B. Abb. 1) genutzt werden.

2 Kalibriertarget und Auswertung von Targetbildern

Die Voraussetzung für gute Kalibrierungsergebnisse ist ein präzise gefertigtes Kalibriernormal, auch Kalibriertarget genannt. Ein klassisches Target stellt mehrere Raum-(Pass-)Punkte mit bekannter geometrischer Lage im Raum (3D-Target) oder auf einer Ebene (2D- bzw. planares Target) bereit. Die Gestaltung der Passpunkte und ihres Umfeldes auf dem Target muss so gewählt sein, dass sie anhand ihrer Geometrie und Umgebungskontraste im realen Kamerabild möglichst robust, eindeutig und automatisch zu detektieren und zu vermessen sind. Aus praktischer Sicht sind Normale, die einfach und in unterschiedlichen Größen herstellbar sind und universell für viele Kalibrieraufgaben verwendet werden können, zu bevorzugen. Ein planares Kalibriertarget mit einem Schachbrettmuster, wie in der Abb. 1 links dargestellt, erfüllt diese Anforderungen. Die Passpunkte sind an den Ecken der Quadrate lokalisiert. Im Gegensatz zu kreisförmigen Marken sind diese invariant gegenüber Linsenverzeichnungen [1] und somit auch für die Ermittlung und Korrektur der Verzeichnung im Rahmen der inneren Kamerakalibrierung verwendbar.

Die automatische Target-Erkennung im 3D-EasyCalib™ im Einzelbild erfolgt nach der Grundlage von Merkmalen der gesuchten geometrischen Form [2]. Zur subpixelgenauen Berechnung der Passpunkte stehten u.a. ein klassischer, gradientenbasierter Ansatz [3] oder die Radon-Methode [4] zur Verfügung. Das zweite Verfahren ist insbesondere für verrauschte Bilder geeignet.

Zur Gewährleistung eines gut auswertbaren Kalibrierdatensatzes umfasst die Kalibrierung Aufnahmen eines Targets mit unterschiedlichen Positionierungen und, im

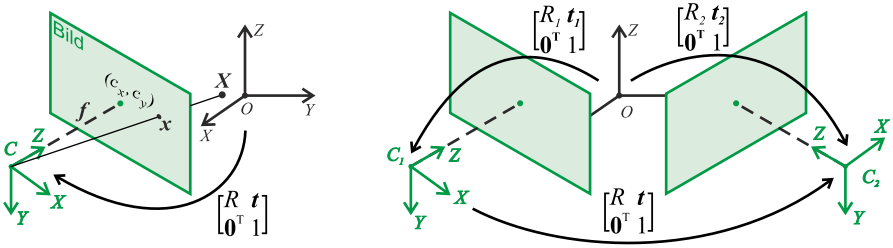

Abb. 2: Lochkameramodel (links), extrinsische Parameter zwischen zwei Kameras (rechts).

Fall planarer Targets, Orientierungen im 3D-Messraum. Dies wird bei einem ebenen Target durch Variation der Orientierung um alle drei Raum-Achsen erreicht. Da handhabbare Targets im Allgemeinen kleiner sind als der Messraum, sind Aufnahmen an unterschiedlichen Positionen erforderlich, so dass das gesamte Messraumvolumen in die Kalibrierung einbezogen wird. Ein Beispiel für acht empfohlene Targetposen, die zur Einzelkamerakalibrierung mit unterschiedlichen Abständen zur Kamera aufgenommen werden, ist in der Abb. 1 rechts dargestellt.

3 Intrinsische Kalibrierung einer Kamera und Lochkameramodell

3.1 Algebraische Beschreibung der Lochkamera

Das Lochkameramodell definiert die Transformation des dreidimensionalen euklidischen Raums auf eine zweidimensionale Bildebene nach dem Prinzip der Zentralprojektion und wird zur Approximation realer Kameras benutzt. In einer Lochkamera erfolgt die Abbildung eines Raumpunktes in einen Bildpunkt kollinear durch einen Strahl, der durch das Projektionszentrum der Kamera geht. Wird zunächst das 3D-Koordinatensystem der Welt gleich dem 3D-Koordinatensystem der Kamera mit dem Ursprung im Punkt C gesetzt, dann ist bei der Verwendung einer Notation gemäß [5] diese Projektion kompakt mit der Gleichung

$$\boldsymbol{x} = K[I|\mathbf{0}]\boldsymbol{X_C} \tag{1}$$

beschrieben. Mit $\boldsymbol{X_C}$ und $\boldsymbol{x}$ werden homogene Koordinatenvektoren des Raumpunktes beziehungsweise des resultierenden Bildpunktes bezeichnet. Diese sind bis auf einen Skalierungsfaktor eindeutig bestimmt. Der Index C(amera) verdeutlicht, dass der Raumpunkt $\boldsymbol{X_C}$ im Kamerakoordinatensystem definiert ist. Die 3×3-Matrix K

$$K = \begin{bmatrix} f & \gamma & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

wird hier als Kameramatrix oder auch Kalibrierungsmatrix des Lochkameramodells bezeichnet. Sie besteht aus den intrinsischen Parametern Bildweite f als Abstand der

Bildebene vom Kamerazentrum, dem Bildhauptpunkt (c_x, c_y) und dem Scherungsparameter γ. Ist der Raumpunkt $\boldsymbol{X}$ in einer 3D- Welt definiert und die Orientierung sowie die Lage der Kamera in dieser Welt allgemein mit der Rotationsmatrix R und der Translation $\boldsymbol{t}$ beschrieben, dann muss $\boldsymbol{X}$ zunächst affin in das Kamera-Koordinatensystem transformiert $\boldsymbol{X_C} = \left[\begin{smallmatrix} R & \boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{0}^T & 1 \end{smallmatrix}\right] \boldsymbol{X}$ und erst im Anschluss nach Gleichung (1) auf die Bildebene projiziert werden (siehe dazu auch Abb. 2 links). Diese extrinsischen Parameter vervollständigen die algebraische Beschreibung des bekannten Lochkameramodells

$$\boldsymbol{x} = K[R|\boldsymbol{t}]\boldsymbol{X}\,. \tag{3}$$

Dieses Modell ist nicht nur für visuelle Kameras anwendbar, sondern für alle bildgebenden Geräte, die das Bild nach dem Prinzip der Zentralprojektion erzeugen oder für Projektoren. Ausnahmen sind die sogenannten affinen Kameras, d.h. Kameras mit Projektionszentren im Unendlichen, die z.B. mit einem telezentrischen Objektiv realisiert werden. Dieser Spezialfall der perspektivischen Abbildung muss gesondert beschrieben werden.

3.2 Intrinsische Kamerakalibrierung

Bei einer intrinsischen Kalibrierung wird die Kameramatrix K (2) mit Aufnahmen eines geometrischen Kalibriertargets, dessen bekannte Welt-Punkte $\boldsymbol{X_i}$ und dazu korrespondierende Bild-Punkte $\boldsymbol{x_i}$, durch Lösung von (3) bestimmt. In der „Community“ hat sich die Methode von Zhang [6] durchgesetzt. Nach diesem Ansatz werden im ersten Schritt die Targetposen mit der Homographie zwischen der Target- und Bildebene geschätzt. Danach wird aus n Aufnahmen des Kalibriertargets (vgl. Abb. 3) und m bekannten Koordinaten der Kalibrierpunkte $\boldsymbol{X_j}$ auf dem Target sowie deren Abbildung $\boldsymbol{x_{ij}}$ auf der Bildebene, das Funktional

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \|\boldsymbol{x_{ij}} - \boldsymbol{x}(K, R_i, \boldsymbol{t_i}, \boldsymbol{X_j})\|^2 \tag{4}$$

minimiert. Die in der (4) enthaltenen euklidischen Abstände zwischen den nach dem Modell projizierten Kalibrierpunkten $\boldsymbol{x}(K, R_i, \boldsymbol{t_i}, \boldsymbol{X_j})$ und den im Bild vermessenen Punkten $\boldsymbol{x_{ij}}$ werden *Reprojektionsfehler* genannt. Diese Fehlermetrik, angegeben für jeden Kalibrierpunkt sowie als Gesamtfehler (RMS) für jede Kalibriertarget-Pose, ist ein Indiz für die Güte einer Kalibrierung und wird im Toolkit dementsprechend dargestellt, vgl. Abb. 4, links. Da bei realen Aufnahmen die Koordinaten der Passpunkte z.B. wegen Verdeckung, Schattenwurf, Kamerarauschen oder Bewegung während der Aufnahme unpräzise oder falsch detektiert werden können, werden potenzielle Ausreißer farblich gekennzeichnet. Sie können auf dieser Grundlage manuell aus dem Kalibrierungs-Datensatz entfernt werden.

Wenn durch die optischen Elemente des Objektivs eine Verzeichnung auftritt, lässt sich das Lochkameramodell mit Parametern zur Beschreibung der Linsenverzeichnung erweitern und dann nichtlinear nach dem gleichem Prinzip (4) optimieren.

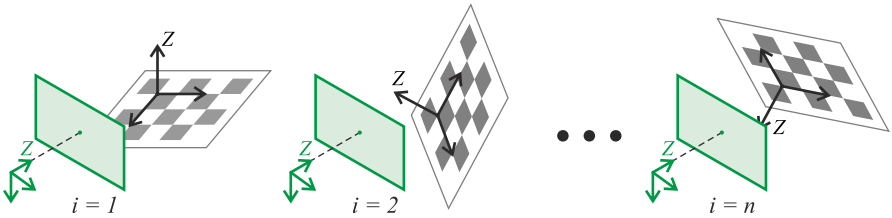

Abb. 3: Der Kalibrierdatensatz mit einem planaren Target setzt sich aus mehreren Aufnahmen des Targets in unterschiedlichen Posen zusammen.

4 Extrinsische Kalibrierung von Mehrkameraanordnungen (Stereo)

Ziel der extrinsischen Kalibrierung ist die Bestimmung der relativen Lage $\boldsymbol{t}$ und Orientierung R von Kameras zueinander, z.B. bei einer Stereoanordnung von zwei Kameras. Das Target wird hier simultan von mehreren Kameras erfasst, die Target-Pose aus der Sicht der Kameras berechnet und die gesuchte euklidische Transformation, vgl. Abb. 2, rechts, als

$$\begin{bmatrix} R & \boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{0^T} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_2 & \boldsymbol{t_2} \\ \boldsymbol{0^T} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & \boldsymbol{t_1} \\ \boldsymbol{0^T} & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

hergeleitet. Die resultierenden extrinsischen Parameter $R = R_2 R_1^T$ und $\boldsymbol{t} = \boldsymbol{t_2} - R\boldsymbol{t_1}$ erlauben es, 3D-Punkte im Koordinatensystem der ersten Kamera in das Koordinatensystem der zweiten Kamera zu überführen und virtuell dort abzubilden.

Die nichtlineare Optimierung ist der intrinsischen Kamerakalibrierung ähnlich, mit dem Unterschied, dass hier die intrinsischen Parameter als bekannt vorausgesetzt und unverändert bleiben können. Eine Nachoptimierung der intrinsischen Parameter im Zuge dieser Optimierung ist auch denkbar. Die Erweiterung der Betrachtung auf mehr als zwei Kameras ist formal möglich. Hierbei ist anzumerken, dass die Kameras beliebig zueinander angeordnet sein können (solange sich deren Sichtkegel zumindest zyklisch paarweise schneiden) und auch unterschiedliche Kameras (unterschiedliche intrinsische Parameter) eingesetzt werden können. Ein Beispiel für die extrinsische Kalibrierung eines multimodalen Kamerapaars aus monochromer VIS-Kamera und eines bildgebenden THz-Scanners [7] ist in Abb. 5 dargestellt.

5 Kalibrierung von inversen Kameras (Projektoren)

Bei einer Kamera wird die 3D-Szene auf die 2D-Bildebene projiziert während bei einem Projektor ein ebenes 2D-Muster in den 3D-Raum abgebildet wird. Daher werden Projektoren häufig als inverse Kameras bezeichnet und modelliert. Die der Abbildung zugrundeliegende mathematische Theorie ist für eine Kamera und eine inverse Kamera (Projektor) gleich. Folglich können dieselben Kalibrieralgorithmen verwendet werden. Die Herausforderung bei der Kalibrierung eines Projektors besteht lediglich darin, die Kalibrierpunkte in einem Projektor-Bild präzise zu bestimmen.

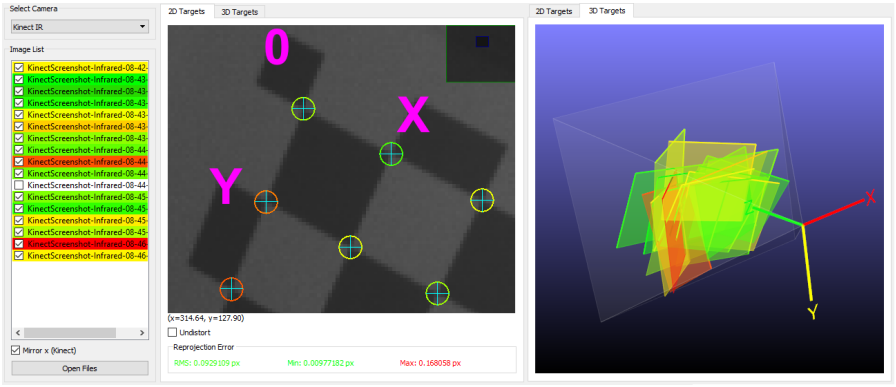

Abb. 4: Intrinsische Kalibrierung einer KinectV2 IR-Kamera. Links sind die Kalibrierbilder farblich nach der Größe des Kalibrierungsfehlers gelistet, von grün (min. Fehler) bis rot (max. Fehler). Mittig ist eine ausgewählte Target-Pose mit detektierten Kalibriermarken (Kreise) und den nach dem Modell berechneten Punkten (Kreuze) abgebildet. Die Farbe der Kreise kodiert ihre absolute Differenz. Rechts sind die unterschiedlichen Targetposen im Koordinatensystem der Kamera dargestellt.

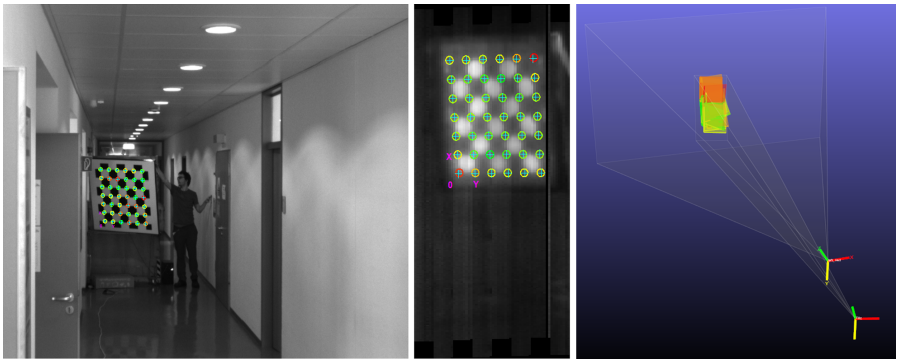

Abb. 5: Extrinsische Kalibrierung eines bildgebenden THz-Scanners [7] und einer monochromen VIS-Kamera. Links ist das Bild des Targets mit einer VIS- Kamera und mittig das Bild des gleichen Targets, aufgenommen mit der THz-Kamera, dargestellt. Die 3D-Ansicht rechts zeigt anhand der Kamerakoordinatensysteme die relative Orientierung und Lage dieser zwei Sensoren zueinander sowie die unterschiedlichen Targetposen des Targets bei der Kalibrierung.

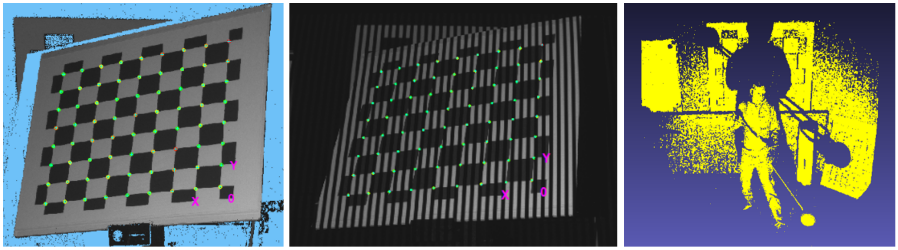

Abb. 6: Für die Projektor-Kalibrierung werden die Passpunkte im Projektor-Bild (links) mithilfe der Gray-Codierung (mittig) bestimmt. Rechts dargestellt ist die 3D-Rekonstruktion einer Szene mit einer so kalibrierten Kamera-Projektor-Anordnung mit aktiver Streifenprojektion.

Dieses Problem lässt sich elegant mit einer Kamera, die die Projektion im Sinne von kodiertem Licht auf einem Kalibriertarget erfasst, lösen. Die Dekodierung des Kamerabildes ergibt dann die gesuchten Projektorkoordinaten. Als eine universelle und verbreitete Methode für die Lichtcodierung wurde im 3D-EasyCalib™ die komplementäre Gray-Code-Sequenz umgesetzt. Diese lässt sich für beliebige Projektor-Auflösungen erzeugen und im Kamerabild robust dekodieren.

Ähnlich dem Vorgehen zur subpixelgenauen Vermessung von Kalibrierpasspunkten in Kamerabildern werden die Musterpositionen in Projektorbildkoordinaten berechnet. Methodisch wird die Kalibrierung eines Projektors mit einer Kamera im 3D-EasyCalib™ auf die Kombination von intrinsischer und extrinsischer Stereo-Kalibrierung zurückgeführt, die in den vorherigen Abschnitten bereits diskutiert wurden.

Kalibrierte Projektoren werden häufig zur 3D-Szenenerfassung mit strukturiertem Licht (Abb. 6) oder für die Augmented Reality (AR) verwendet. AR-Beispiele sind die Markierung von Objekten und Objektteilen in 3D-Szenen oder die Darstellung von Bedienoberflächen oder Hilfsinformationen im Raum bzw. auf 3D-Objekten (Abb. 9).

6 Kamera-Roboter-Kalibrierung

Die Kalibrierung einer Kamera zu einem Roboter wird immer dann benötigt, wenn ein Roboter mit einem Objekt, das die Kamera detektiert hat, interagieren oder kooperieren soll. Für die Vorgehensweise wichtig ist, ob die Kamera in diesem Szenario z.B. auf dem Greifer des Roboters mitbewegt wird, oder ob die Kamera unbewegt den Roboter aus einer fixierten Position im Raum beobachtet. In der Literatur werden diese zwei Problemklassen mit den Gleichungen $AX = YB$ und $AX = XB$ repräsentiert. Die Transformationen A, B, X, Y sind algebraisch Matrizen der Form $\left[\begin{smallmatrix} R & \boldsymbol{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{smallmatrix}\right]$. Die Gleichungen deuten auf die Invarianten, die für die Lösung von X und Y benutzt werden müssen.

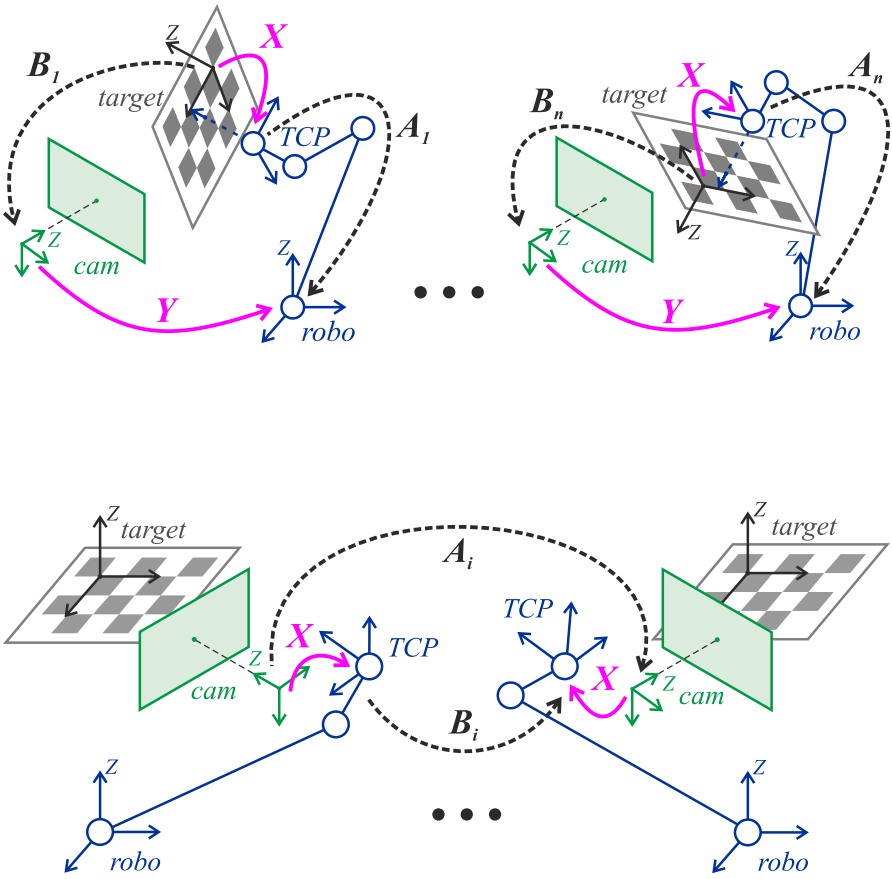

Abb. 7: Symbolische Darstellung der zwei Problemklassen bei Kamera/Roboter-Kalibrierung. Oben ist die Robot/World- und Tool/Flange- und unten die Hand/Eye-Kalibrierung dargestellt.

6.1 $AX{=}YB$: Robot/World- und Tool/Flange-Kalibrierung

Für die Bestimmung der euklidischen Transformation zwischen dem Koordinatensystem einer stationären Kamera und einer Roboter-Basis (Y) sowie der relativen Lage und Orientierung eines potenziellen Werkzeuges zum Flansch (X) wird ein Kalibriertarget an den End-Effektor des Roboters fest montiert, das Target mit dem Roboter in unterschiedlichen Positionen bewegt und mit der Kamera aufgenommen. Die Targetpose B wird mithilfe der bekannten intrinsischen Kameraparameter aus (3) automatisch ermittelt. Die genaue Position und Orientierung des End-Effektors (engl. Tool Center Point, TCP) A wird vom Roboter ausgegeben. Die Gleichung $AX = YB$ lässt sich nun als Transformation vom Kalibriertarget- zum Roboter-Koordinatensystem über zwei unterschiedliche Wege interpretieren (vgl. Abb. 7, oben). Für jede unterschiedliche Flansch- bzw. Targetpose i wird das lineare Gleichungssystem als $A_iX = YB_i$ zusammengesetzt und in geschlossener Form gelöst.

Die Genauigkeit der Kalibrierung wird neben dem Fehler bei der Target-Erkennung noch von der Positionierungenauigkeit des Roboters beeinflusst. Wir definieren den Gesamtfehler (3D-Fehler) der Kalibrierung als euklidische Norm der Differenzen zwischen den Passpunkten auf dem Kalibriertarget $\boldsymbol{X_k}$, transformiert mit A_iX (über TCP) und transformiert mit YB_i (über Kamera) $\|(A_iX - YB_i)\boldsymbol{X_k}\|$. Dieser Fehler lässt sich im 3D-EasyCalib™ für jede Targetpose berechnen und ähnlich dem Reprojektionsfehler visuell darstellen (Abb. 8).

6.2 $AX{=}XB$: Roboterwerkzeug zu Kamera Kalibrierung (Hand/Eye)

Das Problem der Hand-Auge-Kalibrierung (engl. Hand/Eye) besteht in der Berechnung einer starren Transformation zwischen einer an dem Roboteraktuator montierter Kamera und dem Aktuator selbst, d.h. der euklidischen Transformation X zwischen dem Kamera- und dem Werkzeugkoordinatensystem. Die gesuchte Transformation wird mithilfe eines im Raum fest fixierten Kalibriertargets bestimmt. Dabei wird vorausgesetzt, dass das Robotersystem die genaue Position und Orientierung des End-Effektors kennt. Der Roboter fährt damit einige vordefinierten Positionen an und die Kamera nimmt die jeweilige Target-Pose auf.

Die Gleichung $AX = XB$ (siehe Abb. 7, unten) stellt die feste Lage und Orientierung des Targets bezüglich des Roboters bei unterschiedlichen Aufnahmen dar. Die gesuchte Transformation von Kamera- in das Werkzeug-Koordinatensystem X wird mithilfe von A und B, die Transformationen zwischen zwei Kameraposen beziehungsweise die Transformation zwischen zwei TCP-Posen darstellen, berechnet. Für 3D-EasyCalib™ wurde eine optimierte, geschlossene Lösung von $AX = XB$ umgesetzt. Das Frontend des 3D-EasyCalib™ für diese Kalibrieraufgabe entspricht dem der Robot/World- und Tool/Flange-Kalibrierung.

Die bekannteste Anwendung dieser Art von Kalibrierung ist das „Griff in die Kiste"-Szenario (engl. bin picking). Hier nimmt ein Roboter zufällig platzierte Objekte aus einem Behälter auf.

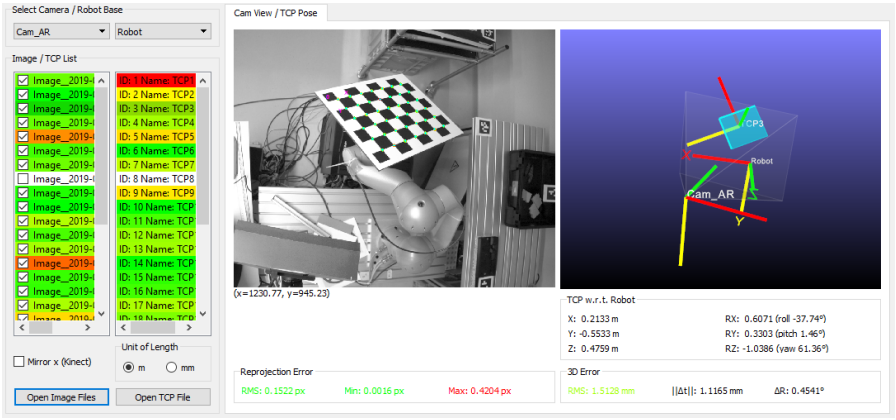

Abb. 8: Bedienoberfläche für die Robot/World- und Tool/Flange- Kalibrierung. In der linken Spalte sind die einzelnen Kameraaufnahmen mit farblich kodiertem Reprojektionsfehler dargestellt. Unmittelbar daneben sind die TCP-Posen entsprechend dem 3D-Fehler markiert. Mittig ist ein ausgewähltes Bild und rechts sind die Komponenten in 3D dargestellt.

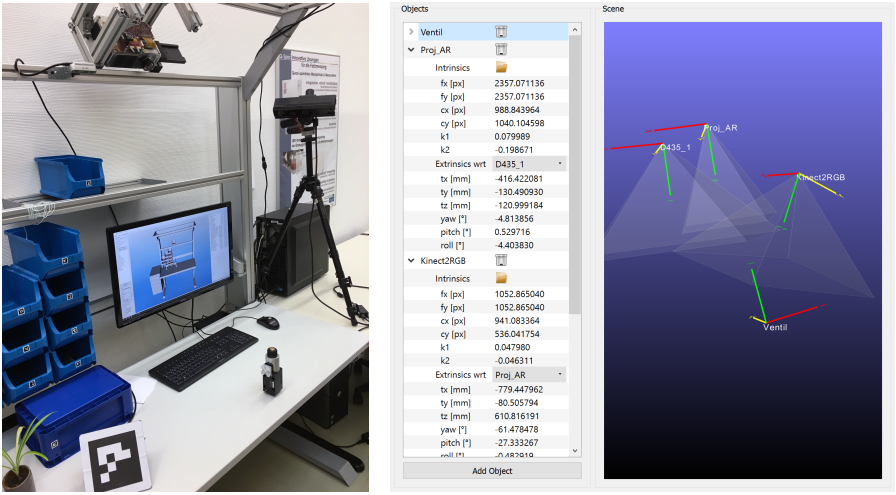

Abb. 9: Demonstrator eines Arbeitsplatzes für Montageprozesse im ZBS e. V. (links). Die Überprüfung der Handlungen des Montagearbeiters erfolgt durch Tracking seiner Hände mit mehreren Kameras und Abgleich der Informationen mit einem Montageablaufplan. Die Sensorik besteht aus einer Time-of-Flight-Kamera zur Personenerkennung, drei aktiven Stereo-Kameras zur Bauteilerkennung und Hand-Tracking sowie einem Projektor für die Augmentierung. Die Darstellung rechts zeigt die kalibrierten Komponenten der Anordnung im Software-Frontend des 3D-EasyCalib™.

7 Fazit und Ausblick

Die vorgestellten Anwendungen demonstrieren die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des modularen universellen Toolkits 3D-EasyCalib™ (www.zbs-ilmenau.de/3D-Easy Calib) zur geometrischen Kalibrierung. Bislang mussten dazu unterschiedliche Softwarewerkzeuge eingesetzt werden. Diese verwenden häufig unterschiedliche Konventionen für die Kalibrierparameter und benutzen unterschiedliche Kalibrierkörper.

Das 3D-EasyCalib™ kombiniert und erweitert Methoden gemäß Stand der Technik und ergänzt sie durch eine ergonomische und intuitive Bedienung und Nutzerführung. Dazu wurden Werkzeuge zur Visualisierung und Analyse von Fehlermaßen, zur 3D-Visualisierung von Messanordnungen und Tutorials auf Grundlage der im Beitrag dargestellten theoretischen Ausführungen zu Kalibrierproblemen umgesetzt. Damit sollen einerseits Nichtexperten befähigt werden, Kalibrierungaufgaben schnell und ausreichend genau zu bewältigen. Andererseits sollen Experten bei der Auswahl und Parametrisierung der Verfahren im Sinne ihrer konkreten Anwendungen effizient unterstützt werden.

Der Fokus der kommenden Weiterentwicklung des 3D-EasyCalib™ liegt in der Verbesserung der Methoden zur Kamera-zu-Robot-Kalibrierung mit nichtlinearer Optimierung.

Neben den diskutierten klassisch-targetbasierten Kalibrierungsmethoden ist im 3D-EasyCalib™ die szenenbezogene Kalibrierung [8] enthalten. Bei dieser Art von Kalibrierung wird die Orientierung und Lage der Kameras mithilfe der Manhattan-Welt-Annahme ohne Kalibrierkörper bestimmt. Die Extraktion von extrinsischen Kameraparameter aus Fluchtpunkten stellt insbesondere für große urbane oder industrielle Arbeitsräume eine sinnvolle Alternative oder Ergänzung zu den vorhanden Kalibrierverfahren dar.

8 Danksagung

Die in diesem Beitrag dargelegten Ergebnisse sind im Rahmen des Förderprogramms „zwanzig20 – Partnerschaft für Innovationen“ im Verbundvorhaben “Ergonomics Assistance Systems for Contactless Human-Machine-Operation (EASY COHMO)“ gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung entstanden.

Literatur

[1] J. Mallon und P. F. Whelan, „Which Pattern? Biasing Aspects of Planar Calibration Patterns and Detection Methods,“ *Pattern Recognition Letters*, Jg. 28, Nr. 8, S. 921–930, Juni 2007.

[2] G. Bradski, „The OpenCV Library,“ *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.

[3] W. Förstner und E. Gülch, „A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distict Point, Corners and Centres of Circular Features,“ in *Proceedings of the ISPRS Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, 1987, S. 281–305.

[4] A. Duda und U. Frese, „Accurate Detection and Localization of Checkerboard Corners for Calibration,“ in *29th British Machine Vision Conference, BMVC-29*, Newcastle, UK, Sep. 2018.

[5] R. Hartley und A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2003.

[6] Z. Zhang, „A Flexible New Technique for Camera Calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Jg. 22, Nr. 11, S. 1330–1334, Nov. 2000.

[7] N. Zeike, „TESCA - Spiegel-Direktantrieb für Terahertz-Scanner," IMMS GmbH, Techn. Ber., 2012, https://www.imms.de/wirtschaft/projekte/tesca-1212.html.

[8] D. Vehar, R. Nestler und K.-H. Franke, „Präzise Berechnung von Kameraposen in Manhattan-Welten," in *21. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, 3D-NordOst*, GFaI Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V., Dez. 2018, S. 15–24.