



**FAKULTÄT FÜR BAUINGENIEURWESEN UND GEODÄSIE
INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND GEOINFORMATION**

Masterarbeit
im Studiengang Navigation und Umweltrobotik

**Untersuchung von visueller Lokalisierung mithilfe
mehrerer kooperierender Kameras**

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke
Zweitprüfer: Philipp Trusheim, M.Sc.

Eingereicht von: Maximilian Lenz, B.Eng.
Matrikelnummer: 10018190

Ausgabedatum: 23.03.2020
Abgabedatum: 23.09.2020

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremdem Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Hannover, den 23.09.2020

Ort, Datum

Maximilian Lenz

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung eines Konzepts zur kooperativen Lokalisierung mehrerer dynamischer Kameras. Dieses soll durch das Verfahren der Bündelausgleichung gelöst werden. Die Kameras bewegen sich in einer Szene, dabei nehmen sie Bilder auf. Diese enthalten Beobachtungen anderer Kameras sowie zusätzlich Beobachtungen von Verknüpfungspunkten im Raum. Durch die Bewegung der Kameras ist ihre Position abhängig von der Zeit. Dies soll durch ein zeitlich abhängiges funktionales Modell berücksichtigt werden. Als zusätzliche Beobachtungen stehen die Positionen der Kameras in einem globalen System zur Verfügung. Es soll überprüft werden, inwieweit die kooperative Lokalisierung das Ergebnis einer einzelnen Kamera verbessern kann. Hierfür werden simulierte Daten verwendet.

Zur Lösung wird ein Verfahren der Bündelausgleichung adaptiert. Dieses fusioniert alle zur Verfügung stehenden Beobachtungen in einem Ausgleichungssystem. Das funktionale Modell der gegenseitigen Beobachtung der Kameras enthält eine lineare Interpolation der Position der beobachteten Kamera. Die Unbekannten sind die äußeren Orientierungen der Kameras für jedes Bild sowie die Positionen der Verknüpfungspunkte. Da ein nicht-lineares funktionales Modell vorliegt, wird das Ausgleichungsproblem durch ein iteratives Gauß-Markov-Modell gelöst.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die theoretische Präzision der Unbekannten als auch die Genauigkeit im Vergleich zu den Referenzwerten der Simulation durch die kooperative Lokalisierung verbessert werden. Das Ergebnis verbessert sich bei der Kooperation zweier Kameras um ca. 50% in der Präzision und in der Genauigkeit.

Zudem wird die Ursache der Verbesserung untersucht. Hier ergibt sich, dass die gegenseitigen Beobachtungen der Kameras das Ergebnis nur geringfügig verbessern. Der Hauptgrund für die Verbesserung ist die Beobachtung identischer Verknüpfungspunkte.

Abstract

The goal of this thesis is the investigation of a concept for cooperative localization of multiple cameras. Therefore the procedure of bundle adjustment should be used. The cameras are dynamic objects within a scene, while moving they capture images. These images contain observations of other cameras as well as tie points. Due to their movement, the positions of the cameras are time dependent. Therefore a time dependent functional model needs to be considered for the bundle adjustment. Additionally the positions of the cameras are observed in a global coordinate system. It is necessary to consider to which extend the cooperative localization may be superior compared to the use of a single camera. A simulation environment is used for this investigation.

An adapted version of the bundle adjustment is applied to solve this task. This adaption fuses all the available observations in a single estimation problem. The functional model describing the mutual observations of the cameras includes a linear interpolation of the observed camera's position. The unknowns of the estimation problem are the exterior orientations of the cameras for every image as well as the positions of the tie points. Since the functional model is non-linear, the estimation problem is solved by an iterative Gauß-Markov model.

The results show that both the theoretical precision of the unknowns and the accuracy compared to the ground truth of the simulation can be improved by the use of cooperative localization. The result of a single camera is improved by about 50% in precision and 50% in accuracy when a second camera is used in the estimation process.

The cause of the improvement is also investigated. It becomes evident that the mutual observations of the cameras are only of minor importance, the main improvement is due to the observation of a high number of mutual tie points.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen	4
2.1 Transformationen in 3D	4
2.2 Zentralprojektive Abbildung	6
2.3 Parameterschätzung	9
2.4 Bündelausgleichung	12
2.5 Koordinatensysteme	14
3 Stand der Forschung	17
4 Methodik	20
4.1 Bündelausgleichung	20
4.1.1 Funktionales Modell	21
4.1.2 Stochastisches Modell	25
4.1.3 Kooperative Lösung	26
4.2 Auswertungsmetriken	28
5 Experimente	30
5.1 Simulation der Daten	30
5.2 Szenario 1: Abbiegemanöver	32
5.2.1 Untersuchung der Präzision	35
5.2.2 Untersuchung der Genauigkeit	40
5.2.3 Einfluss der kooperativen Lokalisierung	45
5.3 Szenario 2: Verfolgung	50
5.3.1 Präzision	52
5.3.2 Genauigkeit	55
5.3.3 Einfluss der kooperativen Lokalisierung	60
5.3.4 Einfluss des GNSS Beobachtungsrauschens	64
6 Diskussion	67
6.1 Präzision	67
6.2 Genauigkeit	68

Inhaltsverzeichnis

6.3	Kooperative Lokalisierung	69
6.4	Einfluss des GNSS Beobachtungsrauschens	70
7	Fazit und Ausblick	72
	Literaturverzeichnis	X

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kartenausschnitt eines innerstädtischen Bereichs	3
2.1	Modell der Lochkamera	7
2.2	Modell einer Bündelausgleichung	14
4.1	Zeitstrahl der Bilder zweier Kameras	23
4.2	Zeitstrahl der verfügbaren Beobachtungen zweier Kameras in der Bündelausgleichung	25
5.1	Beispiel einer Simulation	31
5.2	Trajektorien der Kameras in Szenario 1	33
5.3	Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild in Szenario 1	34
5.4	Präzision der geschätzten Positionen der Kameras in Szenario 1	35
5.5	Präzision der geschätzten Orientierungen der Kameras in Szenario 1	36
5.6	Präzision der geschätzten Positionen der Kameras in Szenario 1 im Kamerakoordinatensystem	38
5.7	Präzision der geschätzten Orientierungen der Kameras in Szenario 1 im Kamerakoordinatensystem	39
5.8	Absolute Differenz der Positionen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1	42
5.9	Absolute Differenz der Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1	43
5.10	Absolute Abweichung der Positionen der Verknüpfungspunkte in Szenario 1	43
5.11	Positionen der Verknüpfungspunkte mit der höchsten und geringsten absoluten Abweichung in Szenario 1	44
5.12	Präzision der Positionen von Kamera Cam a im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1 mit unterschiedlichen Varianten	45
5.13	Präzision der Orientierungen von Kamera Cam a im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1 mit unterschiedlichen Varianten	46
5.14	Positionen der Verknüpfungspunkte mit der höchsten und geringsten absoluten Abweichung für Variante 3 von Szenario 1	48
5.15	Absolute Abweichung der Positionen der Verknüpfungspunkte für Variante 3 von Szenario 1	49
5.16	Trajektorien der Kameras in Szenario 2	50
5.17	Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild in Szenario 1	51
5.18	Präzision der geschätzten Positionen der Kameras in Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem	52
5.19	Präzision der geschätzten Orientierungen der Kameras in Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem	54

5.20 Absolute Differenz der Positionen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 2	56
5.21 Absolute Differenz der Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 2	57
5.22 Absolute Differenz der Positionen der Verknüpfungspunkte in Szenario 2	58
5.23 Positionen der Verknüpfungspunkte mit der höchsten und geringsten absoluten Abweichung in Szenario 2	59
5.24 Präzision der geschätzten Positionen von Kamera Cam a für verschiedene Varianten von Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem .	61
5.25 Präzision der geschätzten Orientierungen von Kamera Cam a für verschiedene Varianten von Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem	62
5.26 Präzision der geschätzten Positionen der Kameras in Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem für verschiedenes GNSS Beobachtungsrauschen	64
5.27 Präzision der geschätzten Orientierungen der Kameras in Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem für verschiedenes GNSS Beobachtungsrauschen	65

Tabellenverzeichnis

4.1 Übersicht der Varianzen der Beobachtungstypen 26

4.2 Übersicht der funktionalen Modelle sowie deren Abhängigkeiten von den unbekanntem Parametern 27

5.1 Eigenschaften der Bosch Multi purpose camera 30

5.2 Standardabweichungen der Beobachtungen in Szenario 1 34

5.3 Standardabweichungen der Normalverteilungen der initialen Werte der Unbekannten 34

5.4 RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Karten-Rahmen in Szenario 1 41

5.5 RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1 41

5.6 RMSE der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen in Szenario 1 41

5.7 RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem für Varianten von Szenario 1 47

5.8 RMSE der Positionen der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen für die Varianten von Szenario 1 47

5.9 RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 2 55

5.10 RMSE der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen für Szenario 2 55

5.11 RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem für Szenario 2 mit verschiedenen Varianten des Szenarios. 63

5.12 RMSE der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen für die Varianten von Szenario 2 63

5.13 RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem für Szenario 2 mit unterschiedlichem GNSS Beobachtungsrauschen 66

5.14 RMSE der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen für die Variation des GNSS Beobachtungsrauschens in Szenario 2 66

Abkürzungsverzeichnis

BA	Bündelausgleichung
DLT	Direkte Lineare Transformation
EKF	Extended Kalman Filter
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertiale Messeinheit
iSAM	Incremental Smoothing and Mapping
RMSE	Root Mean Squared Error
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
VKM	Varianz-Kovarianz-Matrix

1 Einleitung

Autonome Fahrzeuge arbeiten häufig nach dem Prinzip *Sehen - Planen - Handeln* (Siegel 2003). Der Teil des *Planens* beinhaltet die Vorbereitung eines Manövers, welches im Teil *Handeln* durchgeführt wird. Sowohl für die Planung als auch für die Durchführung eines Manövers sind jedoch Informationen zur Umgebung sowie zur eigenen Position notwendig. Diese werden im Teil *Sehen* erfasst.

Um die eigene Position zu bestimmen, werden in der Regel mehrere Sensoren verwendet und deren Daten fusioniert ausgewertet. Häufig wird ein Global Navigation Satellite System (GNSS) in Kombination mit einer inertialen Messeinheit (IMU) verwendet. Gerade in innerstädtischen Bereichen ist eine hohe Genauigkeit des GNSS nicht immer gewährleistet, da hier die GNSS Signale häufig von Abschattungen und Mehrwegeeffekten betroffen sind (Irsigler 2009). Auch eine IMU kann den dadurch entstehenden systematischen Fehler in der Positionierung nicht ausgleichen. Eine IMU alleine ist ebenfalls nicht geeignet, da es sich bei der Inertialnavigation um ein Verfahren der Koppelnavigation handelt und sich die Fehler der Sensoren in der Positionierung aufsummieren (Titterton und Weston 2004).

Daher werden als Ergänzung zu GNSS und IMU häufig optische Sensoren wie Laserscanner oder Kameras verwendet. Mit diesen wird die lokale Umgebung des Fahrzeugs erfasst, daraus können Informationen zur Position bezogen auf einen Startpunkt geschlossen werden. Liegen Karteninformationen vor, kann auch eine absolute Positionierung erreicht werden. Kameras haben den Vorteil, dass sie außerdem zur semantischen Wahrnehmung des Umfelds genutzt werden können. Die Technik des lokalen Erfassens der Umgebung und Nutzung zur Lokalisierung ist in der Literatur unter dem Begriff Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) beschrieben (Thrun, Burgard und Fox 2005). Bei der Auswertung von Kameradaten von verschiedenen Positionen und Ausrichtungen kommt häufig das Verfahren der Bündelausgleichung (BA) zum Einsatz, welches in dieser Anwendung ebenfalls als SLAM Verfahren angesehen werden kann.

In innerstädtischen Bereichen herrscht häufig eine hohe Dichte an Fahrzeugen. Wenn mehrere von ihnen mit einem optischen Sensor ausgestattet sind, können sie die Umgebung aus verschiedenen Perspektiven erfassen. Durch die aktuelle Entwicklung der Car2X Technologie sind die Fahrzeuge zudem in der Lage, Informationen zu ihrer Umgebung untereinander austauschen oder an eine zentrale Infrastruktur zu senden. Die gesammelten Informationen können dann alle teilnehmenden Fahrzeuge zur Positionierung nutzen. Dies beschreibt das Konzept der kooperativen Lokalisierung.

Abbildung 1.1 zeigt einen Kartenausschnitt der Innenstadt von Hannover, den Aegidientorplatz. Hier treffen sich mehrere Ausfallstraßen, welche durch eine Ampelkreuzung verbunden sind. Verschiedene Fahrzeuge können daher die Szene aus

unterschiedlichen Perspektiven erfassen. Der Platz wird durch hohe Gebäude eingefasst, welche die Positionierung mithilfe eines GNSS erschweren. Die Positionierung durch GNSS erfolgt in der Regel in einem erdfesten Koordinatensystem. Die Erfassung der Umwelt erfolgt normalerweise in einem lokalen tangentialen Koordinatensystem, da hier nur die nähere Umwelt von Bedeutung ist. In diesem Karten-Rahmen können die Beobachtungen der Kameras gemeinsam mit den Positionsbeobachtungen durch GNSS fusioniert werden, somit kann die Lokalisierung der Fahrzeuge verbessert werden.

1.1 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es, ein Verfahren zur kooperativen Lokalisierung mehrerer Kameras zu entwickeln und zu untersuchen. Dabei werden die Positionen der Fahrzeuge, auf denen die Kameras montiert sind, mithilfe von GNSS beobachtet. Die Kameras erfassen ihre Umwelt und können dabei auch andere Fahrzeuge detektieren. Alle Beobachtungen sollen in Form einer BA fusioniert werden. Dabei ist die äußere Orientierung der Kameras bestehend aus ihrer Position und Ausrichtung durch die Bewegung der Fahrzeuge zeitlich abhängig. Um dies zu berücksichtigen, soll ein zeitlich abhängiges funktionales Modell der Fahrzeugbeobachtung eingeführt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit der Erläuterung von Grundlagen in Kapitel 2, welche für das Konzept der kooperativen Lokalisierung benötigt werden. Diese umfassen zum einen die Grundlagen von Transformationen im dreidimensionalen Raum sowie der zentralprojektiven Abbildung einer Kamera. Zum anderen benötigt die BA ein Ausgleichungsmodell zur Lösung, ein solches wird zusammen mit den Grundlagen der BA ebenfalls beschrieben.

Der Stand der Forschung baut auf den Grundlagen auf und wird daher im Anschluss in Kapitel 3 beschrieben. Dabei werden Konzepte zur kooperativen Lokalisierung beschrieben, welche jedoch den Fokus auf der Erstellung einer Karte der Umgebung legen. Des Weiteren werden Konzepte zur Fusion von Kamerabeobachtungen und der Eigenlokalisierung durch GNSS vorgestellt.

In Kapitel 4 wird das entwickelte Konzept zur kooperativen Lokalisierung vorgestellt. Dabei werden sowohl das funktionale Modell als auch das stochastische Modell der BA beschrieben. Anschließend wird ein Ausgleichungsmodell zur Lösung der BA vorgestellt, zusätzlich werden Metriken zur Evaluation erläutert.

In Kapitel 5 werden die Experimente zur Auswertung des Konzepts beschrieben und die Ergebnisse dargelegt. Diese werden in Kapitel 6 diskutiert. Die Arbeit schließt mit einem Fazit und Ausblick zu weiteren Entwicklungen in Kapitel 7 ab.

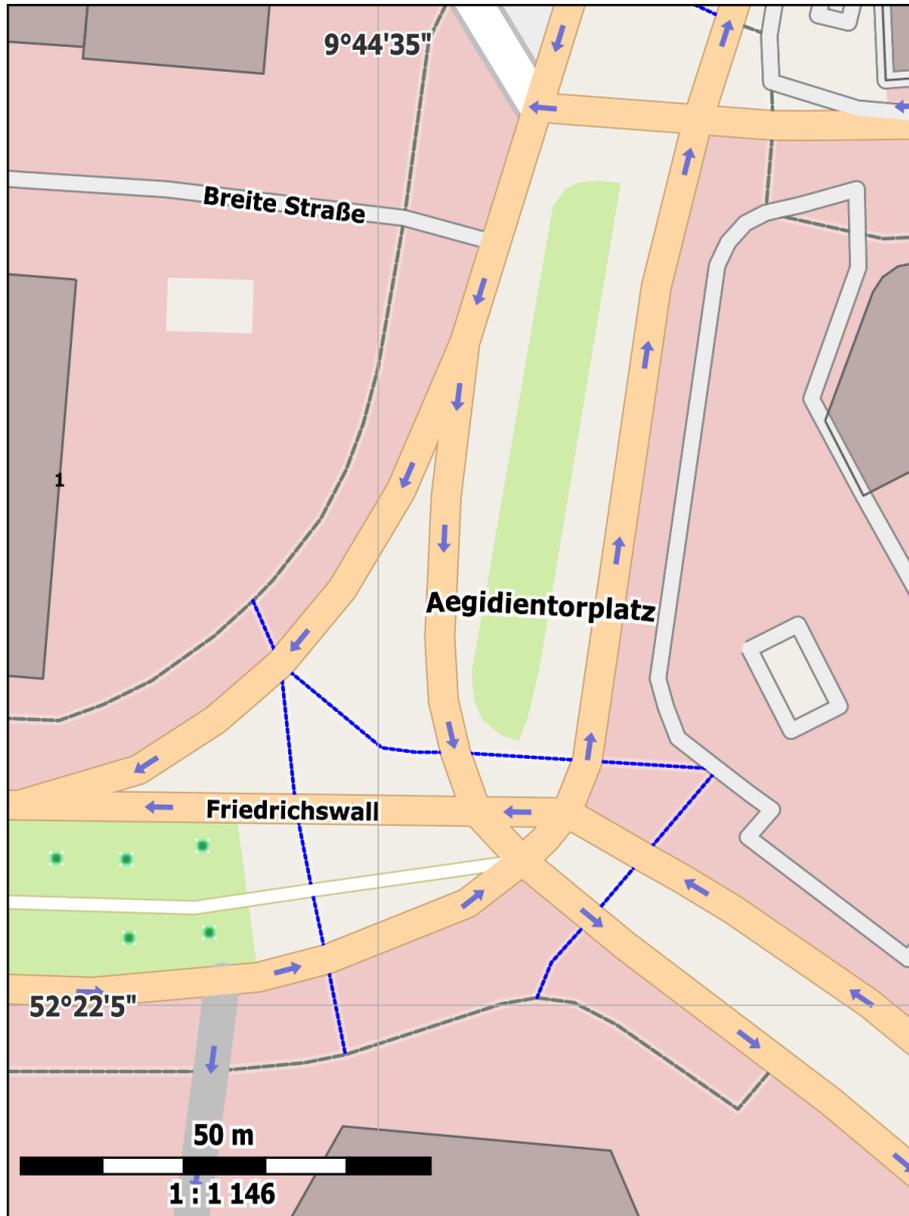


Abbildung 1.1: Kartenausschnitt eines innerstädtischen Bereichs. Dargestellt sind die Straßen mit den entsprechenden Fahrrichtungen sowie Verkehrsflächen und Gebäude des Aegidientorplatzes in Hannover. Die Koordinaten sind ellipsoidische Koordinaten, welche im erdfesten System angegeben werden. Diese beziehen sich auf den entsprechenden Längen- bzw. Breitengrad, welche durch den Kartenausschnitt verlaufen. Erstellt mit Daten von OpenStreetMap.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der in dieser Arbeit verwendeten Techniken beschrieben. In Abschnitt 2.1 werden Transformationen von Punkten und Koordinatensystemen im dreidimensionalen Raum beschrieben. In Abschnitt 2.2 wird das verwendete Kameramodell sowie dessen mathematische Beschreibung erklärt, anschließend werden in Abschnitt 2.3 die Grundlagen der nichtlinearen Parameterschätzung vorgestellt. Abschließend wird in Abschnitt 2.4 das Verfahren der Bündelausgleichung sowie dessen Anwendung für SLAM beschrieben.

2.1 Transformationen in 3D

Der folgende Abschnitt ist an die Beschreibung in (Luhmann 2010) angelehnt und wird dort ausführlich beschrieben.

Die Transformation zwischen unterschiedlichen Koordinatensystemen in einem dreidimensionalen euklidischen Raum kann durch eine Ähnlichkeitstransformation beschrieben werden, welche insgesamt sieben Parameter umfasst. Darin sind drei Parameter für die Translation \mathbf{X}_0 , drei Parameter für die Rotation \mathbf{R} sowie ein Parameter für die Skalierung m enthalten. Die Transformation wird mit der folgenden Gleichung beschrieben.

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{X} \quad (2.1)$$

Dabei wird der dreidimensionale Punkt \mathbf{X} durch die Transformation in den Punkt \mathbf{X}' überführt. Die Translation \mathbf{X}_0 entspricht einem Spaltenvektor mit drei Einträgen, jeweils einem für die Verschiebung entlang der X-, Y- und Z-Achse, beschrieben in Gleichung (2.2).

$$\mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{bmatrix}^T \quad (2.2)$$

Die Rotationsmatrix \mathbf{R} kann auf unterschiedliche Weisen dargestellt werden. \mathbf{R} ist eine 3×3 Matrix, welche somit überparametrisiert ist. Daher gelten weitere Bedingungen, es handelt sich um eine orthonormale Matrix, d.h. jede Spalte entspricht einem Einheitsvektor und die drei Einheitsvektoren müssen orthogonal zueinander stehen. Die Eigenschaften dieser Matrix sind in den Gleichungen (2.3) - (2.5) aufgelistet.

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{R}^T = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{R} = \mathbf{I} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T \quad (2.4)$$

$$\det(\mathbf{R}) = 1 \quad (2.5)$$

In dieser Arbeit wird die Rotationsmatrix mithilfe der Eulerwinkel parametrisiert. Dabei beschreibt die Winkel ω , φ und κ die Rotation um die X-Achse, um die Y-Achse beziehungsweise um die Z-Achse. Neben dieser Möglichkeit gibt es noch weitere Bildungsvorschriften für die Rotationsmatrix wie durch Quaternionen oder durch eine einzige räumliche Drehachse. Im Folgenden werden die Drehungen um jeweils eine Raumachse beschrieben.

Drehung um die X-Achse Die Rotation um die X-Achse erfolgt gegen den Uhrzeigersinn um den Winkel ω . Wird Gleichung (2.1) auf eine Rotation um die X-Achse reduziert, ergibt sich Gleichung (2.6).

$$\mathbf{X}' = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} \quad (2.6)$$

Drehung um die Y-Achse Die Rotation um die Y-Achse erfolgt gegen den Uhrzeigersinn um den Winkel φ . Analog zu Gleichung (2.6) ergibt sich Gleichung (2.7).

$$\mathbf{X}' = \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} \quad (2.7)$$

Drehung um die Z-Achse Die Rotation um die Z-Achse erfolgt gegen den Uhrzeigersinn um den Winkel κ . Analog zu Gleichung (2.6) ergibt sich Gleichung (2.8).

$$\mathbf{X}' = \mathbf{R}_\kappa \cdot \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} \quad (2.8)$$

Die Gesamtdrehung ergibt sich aus der Verkettung der Rotationen um die einzelnen Achsen, wobei die Anordnung der Rotationen nicht beliebig ist. Eine Möglichkeit ist die Drehung um mitgedrehte Achsen, d.h. eine Rotation um die X-Achse um ω , anschließend eine Rotation um die mitgedrehte Y-Achse um den Winkel φ und abschließend eine Rotation um die zweifach gedrehte Z-Achse um den Winkel κ . Die Gesamtdrehung ist somit entsprechend der Gleichungen (2.9) und (2.10) definiert.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\kappa \quad (2.9)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Die ausschließliche Rotation eines dreidimensionalen Punktes \mathbf{X} ist durch Gleichung (2.11) gegeben.

$$\mathbf{X}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X} \quad (2.11)$$

Die Eulerwinkel können aus der Rotationsmatrix \mathbf{R} nach den Gleichungen (2.12) - (2.14) bestimmt werden.

$$\sin \varphi = r_{13} \quad (2.12)$$

$$\tan \omega = -\frac{r_{23}}{r_{33}} \quad (2.13)$$

$$\tan \kappa = -\frac{r_{12}}{r_{11}} \quad (2.14)$$

Ein Nachteil dieser Parametrierung ist die Möglichkeit einer Singularität, da bei $\varphi = 90^\circ$ die Terme r_{11} und r_{33} null sind. Das bedeutet, dass die Eulerwinkel nicht bestimmt werden können, diese Situation wird *Gimbal Lock* genannt. Dieser Fall kann jedoch bei geschickter Anordnung des Koordinatensystems oder beschränkten Rotationen vermieden werden. Des Weiteren ist die Bestimmung von φ nicht eindeutig, da es stets Lösungen in zwei Quadranten gibt.

2.2 Zentralprojektive Abbildung

Die Aufnahmen einer Kamera können durch die zentralprojektive Abbildung modelliert werden. Eine Möglichkeit dazu ist das Lochkameramodell, welches in Abbildung 2.1 dargestellt ist. Die folgenden Ausführungen sind, sofern nicht anders gekennzeichnet, aus (Luhmann 2010) übernommen.

Die Lage der Kamera in einem übergeordneten Koordinatensystem KS_m wird als äußere Orientierung bezeichnet. Diese umfasst sowohl die Position \mathbf{X}_0 als auch die Orientierung, welche in Form einer Rotationsmatrix \mathbf{R} angegeben wird. Beide werden in der Regel bezogen auf das Projektionszentrum angegeben. Zudem können Abweichungen vom idealen Kameramodell, wie Verzeichnungen, als Parameter der

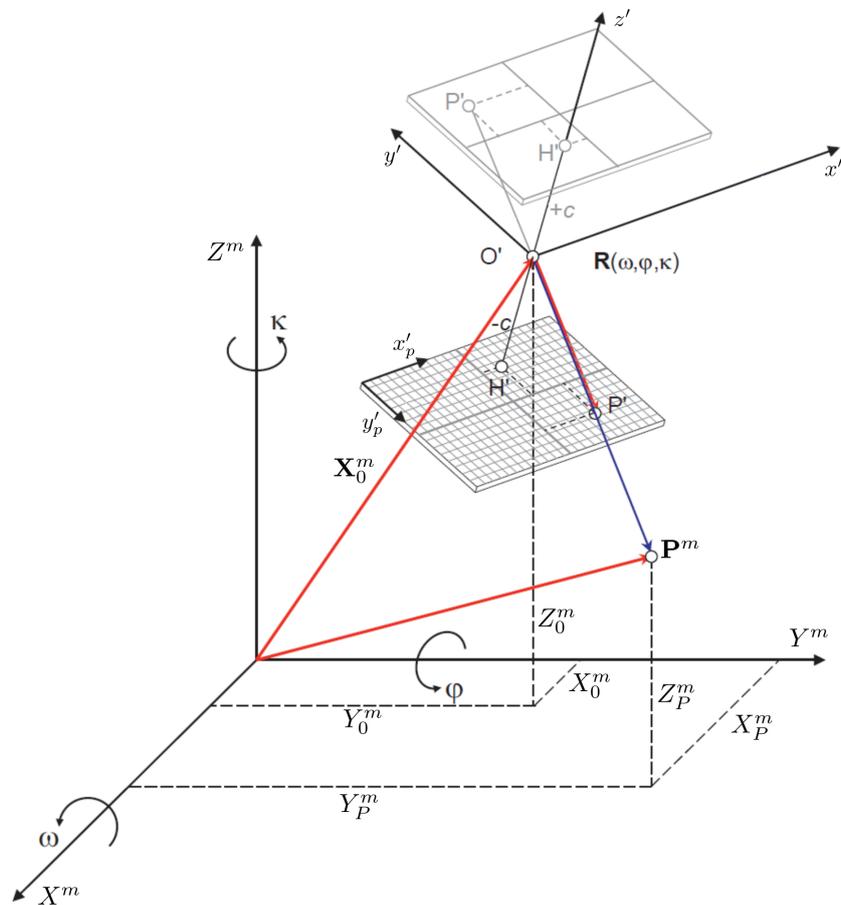


Abbildung 2.1: Modell der Lochkamera: In dieser Abbildung ist P der Objektpunkt im Raum, P' der Punkt in der Bildebene der Kamera und O' das Projektionszentrum. Durch dieses fallen alle Bildstrahlen in einer geraden Linie. Die innere Orientierung der Kamera ist eine Beschreibung für das Kameramodell. Diese enthält die Kamerakonstante c , welche den orthogonalen Abstand zwischen dem Projektionszentrum und der Bildebene beschreibt. Des Weiteren enthält die innere Orientierung die Koordinaten des Kamerahauptpunktes $H' = [x'_{0,p} \ y'_{0,p}]^T$. Die Abbildung enthält ein globales Koordinatensystem mit den Achsen X^m , Y^m und Z^m sowie das Kamerakoordinatensystem mit den Achsen x' , y' und z' . Des Weiteren ist das Sensorkoordinatensystem mit den Achsen x'_p und y'_p abgebildet. Angelehnt an (Luhmann 2010).

inneren Orientierung modelliert werden, eine genauere Beschreibung dazu lässt sich in (Kraus 2004) finden. Die Parameter der inneren Orientierung werden durch die Kamerakalibrierung bestimmt. Die Terme zur Beschreibung der Verzeichnungen einer Kamera werden hier nicht berücksichtigt. Da in dieser Arbeit ausschließlich simulierte Daten verwendet werden, wird eine Korrektur der Verzeichnungen

in dieser Arbeit nicht benötigt. Alle Daten werden unter der Annahme einer idealen Kamera simuliert. Daher kann die innere Orientierung direkt aus der Simulation übernommen werden.

Das Kamerakoordinatensystem hat seinen Ursprung im Projektionszentrum O' . Die Ebene, welche die x' -Achse und die y' -Achse aufspannen, ist parallel zur Bildebene. Ein Punkt im Kamerakoordinatensystem $\mathbf{x}' = [x' \ y' \ z']^T$ kann mit Hilfe von Gleichung (2.1) in einen Objektpunkt in einem übergeordneten Koordinatensystem transformiert werden. Invertiert man diese Transformation, ergibt sich Gleichung (2.15). Da es sich bei der Rotationsmatrix um eine orthonormale Matrix handelt, gilt Gleichung (2.4) für die Inversion. Der Maßstabsfaktor m ist unbekannt.

$$\mathbf{x}' = \frac{1}{m} \mathbf{R}^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (2.15)$$

Die Kamera erfasst die Punkte jedoch im sogenannten Sensorkoordinatensystem, welches seinen Ursprung in der oberen linken Ecke des Bildes hat. Die x'_p -Achse des Sensorkoordinatensystems zeigt nach rechts, die y'_p -Achse nach unten. Der Punkt $\mathbf{x}'_p = [x'_p \ y'_p \ z'_p]^T$ wird zunächst mit Hilfe der inneren Orientierung in das Kamerakoordinatensystem überführt, wie Gleichungen (2.16) bzw. (2.17) zeigen. Im Sensorkoordinatensystem werden die Koordinaten nicht metrisch, sondern in Pixeln angegeben. Für die Z-Koordinate im Sensorkoordinatensystem gilt stets $z'_p = 0$.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_p - x'_0 \\ y'_p - y'_0 \\ z'_p - c \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x}'_p - \mathbf{x}'_0 \quad (2.17)$$

Wird Gleichung (2.17) in Gleichung (2.15) eingesetzt, ergibt sich die Transformation eines Punktes vom Objektkoordinatensystem in das Sensorkoordinatensystem. Dies wird in Gleichung (2.18) beschrieben.

$$\mathbf{x}'_p = \mathbf{x}'_0 + \frac{1}{m} \mathbf{R}^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (2.18)$$

Werden die ersten beiden Gleichungen dieses Gleichungssystems jeweils durch die dritte Gleichung dividiert, ergeben sich die sogenannten Kollinearitätsgleichungen in Gleichung (2.19) bzw. (2.20).

$$x'_p = x'_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.19)$$

$$y'_p = y'_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.20)$$

Beim Aufstellen der Kollinearitätsgleichungen wird der unbekannte Maßstabsfaktor m eliminiert.

Geometrisch beschreiben die Kollinearitätsgleichungen die zentralprojektive Abbildung eines Objektpunktes im Raum durch eine Kamera im Sensorkoordinatensystem.

2.3 Parameterschätzung

In dieser Arbeit wird das Verfahren der Bündelausgleichung verwendet, welches in Abschnitt 2.4 beschrieben wird. Dafür ist ein Verfahren der Parameterschätzung, insbesondere eines für nicht-lineare Modelle, notwendig.

Eines dieser Verfahren ist das iterative Gauß-Markov-Modell, welches im Folgenden beschrieben wird. Die Beschreibung ist, soweit nicht anders angegeben, aus (Luhmann 2010) entnommen und wird dort ausführlich beschrieben.

Bei der Parameterschätzung liegt folgendes grundlegendes Problem vor: Es gibt eine Anzahl u an Unbekannten $x_i, i = 1 \dots u$, welche durch den Parametervektor \mathbf{x} dargestellt werden. Des Weiteren gibt es eine Anzahl n an Beobachtungen $l_j, j = 1 \dots n$, welche im Beobachtungsvektor \mathbf{l} gespeichert werden.

Eine eindeutige Lösung ist möglich, wenn die Anzahl der Unbekannten u und die Anzahl der Beobachtungen n identisch sind. Liegen mehr Beobachtungen als Unbekannte vor, ist das System überbestimmt und es ist aufgrund von Messunsicherheiten keine eindeutige Lösung möglich. Daher werden Residuen \mathbf{v} eingeführt, um eine widerspruchsfreie Lösung zu erhalten (Lee und McGlone 2013).

Die Unbekannten \mathbf{x} und die Beobachtungen \mathbf{l} sind über einen funktionalen Zusammenhang miteinander verbunden. Da die wahren Parameter unbekannt sind, werden die geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{x}}$ verwendet.

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}) \quad (2.21)$$

Um eine Lösung zu erhalten, wird die Bedingung eingeführt, dass die Norm der Residuen $\|\mathbf{v}\|$ minimal sein soll. Somit handelt es sich um eine Schätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Lee und McGlone 2013). Das Gauß-Markov-Modell stellt sicher, dass die Schätzung der Unbekannten erwartungstreu und optimal ist.

Wenn es sich bei dem funktionalen Modell \mathbf{f} um einen nichtlinearen Zusammenhang handelt, werden initiale Werte für die Unbekannten \mathbf{x}^0 benötigt. Mit Hilfe dieser können initiale Werte für die geschätzten Beobachtungen \mathbf{l}^0 bestimmt werden, wie in Gleichung (2.22) beschrieben ist.

$$\mathbf{l}^0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}^0) \quad (2.22)$$

Damit lässt sich der verkürzte Beobachtungsvektor $\Delta \mathbf{l}$ berechnen, wie Gleichung (2.23) zeigt.

$$\Delta \mathbf{l} = \mathbf{l} - \mathbf{l}^0 \quad (2.23)$$

Die geschätzten Werte der Unbekannten sollen iterativ mit der Korrektur $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ verbessert werden. Dazu wird diese Korrektur auf den ursprünglichen Wert des Vektors der Unbekannten $\hat{\mathbf{x}}$ aufaddiert, j stellt dabei den Iterationsindex dar. Dieser Zusammenhang wird in Gleichung (2.24) gezeigt.

$$\hat{\mathbf{x}}^{(j+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(j)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(j)} \quad (2.24)$$

Für kleine $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ kann Gleichung (2.21) durch eine Taylor-Approximation erster Ordnung um die Näherungswerte \mathbf{x}^0 beschrieben werden, siehe Gleichung (2.25)

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{f}(\mathbf{x}^0) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}^0} \cdot \Delta \hat{\mathbf{x}} \quad (2.25)$$

Die partielle Ableitung des funktionalen Zusammenhangs \mathbf{f} nach den unbekanntem Parametern \mathbf{x} wird als Designmatrix \mathbf{A} bezeichnet, dieser Zusammenhang wird in Gleichung (2.26) gezeigt.

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \quad (2.26)$$

Daraus ergibt sich die linearisierte Verbesserungsgleichung (2.27).

$$\Delta \hat{\mathbf{l}} = \Delta \mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \Delta \hat{\mathbf{x}} \quad (2.27)$$

Die Beobachtungen \mathbf{l} haben zufällige Messunsicherheiten. Diese werden im stochastischen Modell mit Hilfe der Varianz-Kovarianz-Matrix (VKM) der Beobachtungen $\Sigma_{\mathbf{ll}}$ beschrieben. Diese enthält auf der Hauptdiagonalen die Varianzen der Beobachtungen und auf den Nebendiagonalen die Kovarianzen, sprich die Korrelationen zwischen den Beobachtungen. Die VKM kann in einen a-priori Varianzfaktor σ_0 und die Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\mathbf{ll}}$ zerlegt werden, was in Gleichung (2.28) beschrieben wird.

$$\Sigma_{\mathbf{ll}} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{\mathbf{ll}} \quad (2.28)$$

Sind die Beobachtungen unkorreliert, so sind sowohl $\Sigma_{\mathbf{ll}}$ als auch $\mathbf{Q}_{\mathbf{ll}}$ lediglich auf der Hauptdiagonalen besetzt. Die Gewichtsmatrix der Beobachtungen \mathbf{P} entspricht der Inversen der Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\mathbf{ll}}$, siehe Gleichung (2.29).

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{\mathbf{ll}}^{-1} \quad (2.29)$$

Wie bereits oben beschrieben, soll die Norm der Residuen minimiert werden. Durch die Einführung des stochastischen Modells muss dabei zudem die Gewichtung der jeweiligen Beobachtung berücksichtigt werden. Es ergibt sich Gleichung (2.30).

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v} \rightarrow \min! \quad (2.30)$$

Die Beobachtungen werden dabei als normalverteilt angenommen. Mit dem in Gleichung (2.27) aufgestellten funktionalen Modell sowie dem in Gleichung (2.28) beschriebenen stochastischen Modell können die Verbesserungen der unbekannt Parameter $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ durch die Lösung des Normalgleichungssystems (2.31) bestimmt werden.

$$\mathbf{N} \cdot \Delta \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (2.31)$$

\mathbf{N} ist die Normalgleichungsmatrix, \mathbf{n} das Absolutglied. Ihre Definition wird in Gleichung (2.32) bzw. (2.33) beschrieben.

$$\mathbf{N} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A}) \quad (2.32)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \Delta \mathbf{l} \quad (2.33)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}^{-1} \quad (2.34)$$

$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ ist die Kofaktormatrix der Unbekannten. Diese ergibt sich nach Gleichung (2.34). Die Lösung des Gleichungssystems ist in Gleichung (2.35) beschrieben.

$$\Delta \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \Delta \mathbf{l} \quad (2.35)$$

Eine Lösung des Systems ist nur möglich, wenn die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} und somit auch die Designmatrix \mathbf{A} einen vollen Spaltenrang haben, da die Normalgleichungsmatrix sonst nicht invertiert werden kann. Die Residuen werden nach Gleichung (2.36) berechnet.

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \Delta \hat{\mathbf{x}} - \Delta \mathbf{l} \quad (2.36)$$

Die ausgeglichenen Beobachtungen werden mithilfe von Gleichung (2.37) berechnet.

$$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \mathbf{v} \quad (2.37)$$

Der Vektor der Unbekannten wird nach Gleichung (2.24) aktualisiert. Für nichtlineare funktionale Modelle wird diese Prozedur iterativ wiederholt. Dabei wird $\mathbf{x}^0 = \hat{\mathbf{x}}$ gesetzt. Dies wird durchgeführt, bis die Norm der Differenz zwischen ausgeglichenen Beobachtungen $\hat{\mathbf{I}}$ und prädizierten Beobachtungen $\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}})$ kleiner als ein Schwellwert ϵ ist, wie in Gleichung (2.38) beschrieben ist.

$$\|\hat{\mathbf{I}} - \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}})\| < \epsilon \quad (2.38)$$

Mit Hilfe des a-posteriori Varianzfaktors $\hat{\sigma}_0^2$ kann die VKM der ausgeglichenen Parameter $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ bestimmt werden, siehe Gleichung (2.39) und Gleichung (2.40).

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v}}{n - u} \quad (2.39)$$

Der Term $n - u$ im Nenner beschreibt die Differenz zwischen der Anzahl der Beobachtungen und der Anzahl der Unbekannten und somit den Freiheitsgrad des Gleichungssystems.

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} \quad (2.40)$$

2.4 Bündelausgleichung

Um die Parameter der äußeren Orientierung einer Kamera zu verschiedenen Zeitpunkten sowie die Koordinaten von Objektpunkten, welche von der Kamera in mehreren Bildern aufgezeichnet werden, zu bestimmen, kann das Verfahren der Bündelausgleichung verwendet werden. Dies stellt eine Lösung des SLAM-Problems dar. Dabei wird von einem unbekanntem Gebiet eine Karte erstellt, welche währenddessen bereits zur Lokalisierung verwendet wird. Die in diesem Kapitel enthaltenen Beschreibungen sind aus (Förstner und Wrobel 2016) entnommen und werden dort vertieft beschrieben. Für die Durchführung sind die folgenden Gegebenheiten notwendig:

Überlappende Bilder Die einzelnen Bilder müssen einen überlappenden Anteil enthalten. Dies stellt sicher dass, die Bilder in Relation zueinander gebracht werden können.

Startwerte Da das funktionale Modell (siehe Gleichungen (2.19) bzw. (2.20)) nichtlineare Teile enthält, werden für die Ausgleichung initiale Werte für alle unbekanntem Parameter benötigt.

Kamerakalibrierung Um eine hohe Genauigkeit zu erhalten, werden kalibrierte Kameras benötigt, d.h. die intrinsischen Kameraparameter sind in hoher Güte bestimmt, bspw. durch eine Kalibrierung. Diese kann entweder vor den Aufnahmen geschehen oder als zusätzlicher Teil in die Bündelausgleichung mit aufgenommen werden.

Datumsdefinition Ohne Festlegung eines Koordinatensystems kann dieses in der Bündelausgleichung nicht eindeutig bestimmt werden. Dies kann durch eine direkte Beobachtung der Kamerapositionen oder einzelner Objektpunkte in einem übergeordneten Koordinatensystem erfolgen. Alternativ kann die erste Kameraposition als Ursprung des Koordinatensystems definiert werden.

Das Problem kann folgendermaßen modelliert werden: Es gibt eine Anzahl I räumlicher Merkmale F_i , welche beispielsweise dreidimensionale Objektpunkte darstellen können. Die Positionen der Merkmale sind unbekannt und werden im Vektor \mathbf{k}_i aufgelistet.

Des Weiteren sind T Bilder der Szene bzw. von Teilen der Szene vorhanden. Jedes Bild enthält eine Projektion der Szene P_t . Die Parameter der äußeren Orientierung der Kameras für jedes Bild sind unbekannt und werden im Vektor \mathbf{p}_t aufgelistet.

In jedem Bild t sind Beobachtungen der räumlichen Merkmale F_i enthalten, diese werden auch Bildmerkmale f_{it} genannt. Der Index verdeutlicht dabei, dass jedes Bildmerkmal nur für ein Paar, bestehend aus einem Bild t und einem Merkmal F_i , gegeben ist. Die Zuordnung der Bildmerkmale in verschiedenen Bildern wird als gegeben angenommen und muss, ebenso wie die Detektion der Bildmerkmale, im Vorhinein gelöst werden. Jedes Bild enthält somit ein Bündel aus Strahlen zwischen der Position der Kamera und den räumlichen Merkmalen, welche durch die Bildebene verlaufen.

Ein solches Modell wird in Abbildung 2.2 dargestellt. Wichtig ist, dass nicht alle räumlichen Merkmale in jedem Bild beobachtet werden müssen. Die Beobachtungen der Bildmerkmale f_{it} werden mit l_{it} bezeichnet, sie werden als mittelwertfrei normalverteilt mit der VKM $\Sigma_{l_{it}l_{it}}$ sowie unabhängig voneinander angenommen.

Des Weiteren können einige räumliche Merkmale direkt beobachtet werden, sogenannte Passpunkte F_{i0} . Dabei wird die Unsicherheit der Parameter \mathbf{k}_{i0} mit $\Sigma_{k_{i0}k_{i0}}$ beschrieben.

Ähnliches ist auch für die äußeren Orientierungen der Kameras \mathbf{p}_t möglich. Hier ist eine direkte Beobachtung beispielsweise durch ein GNSS möglich. Die Unsicherheit der Beobachtungen wird durch $\Sigma_{p_t p_t}$ beschrieben. Auch hier werden die Beobachtungen als normalverteilt angenommen.

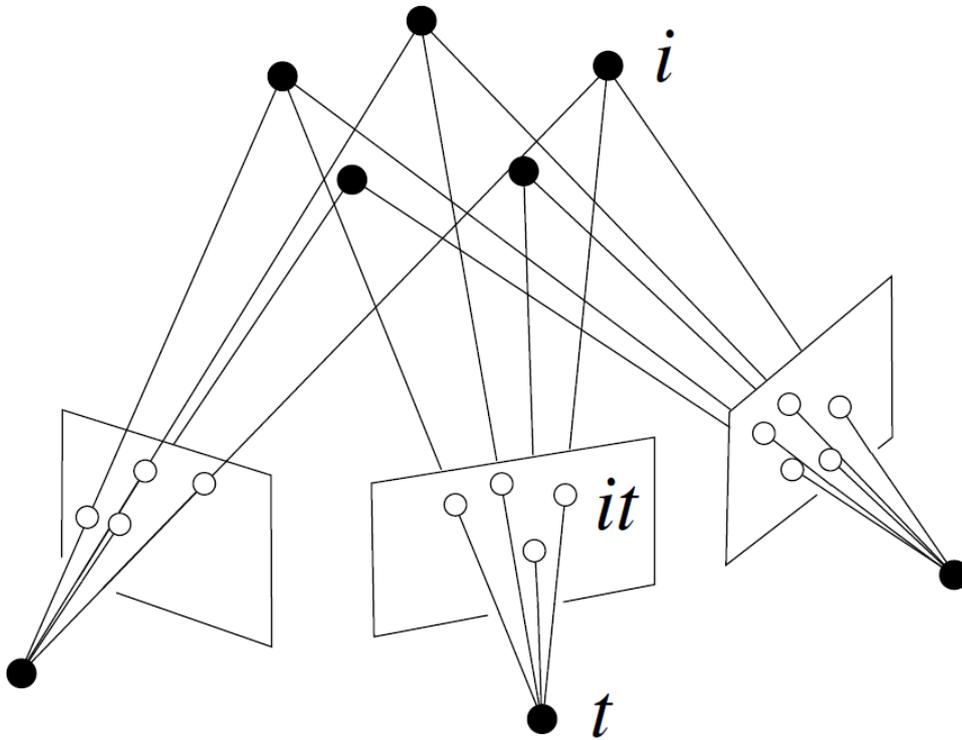


Abbildung 2.2: Modell einer Szene mit den Indizes für die äußeren Orientierungen der Kameras t , für die räumlichen Merkmale i sowie für die Bildmerkmale it (Förstner und Wrobel 2016)

Das funktionale Modell der wahren Beobachtungen \tilde{I}_{it} ist eine Funktion der wahren Koordinaten der räumlichen Merkmale $\tilde{\mathbf{k}}_i$ sowie der wahren Parameter der äußeren Orientierungen der Kameras $\tilde{\mathbf{p}}_t$, es ergibt sich Gleichung (2.41)

$$\tilde{I}_{it} = \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{k}}_i, \tilde{\mathbf{p}}_t) \quad (2.41)$$

Als funktionales Modell werden hier die Kollinearitätsgleichungen verwendet, welche in Gleichung (2.19) bzw. Gleichung (2.20) beschrieben sind. Dabei handelt es sich um einen nicht-linearen Zusammenhang. Die Schätzung der Parameter kann daher mit dem in Abschnitt 2.3 vorgestellten nichtlinearen Gauß-Markov-Modell erfolgen.

2.5 Koordinatensysteme

Als übergeordnetes globales Koordinatensystem kann ein erdfestes, ellipsoidisches Koordinatensystem KS_e verwendet werden. In diesem können sich Fahrzeuge mithilfe eines GNSS lokalisieren. Der Ursprung befindet sich im Massenmittelpunkt der Erde. Die X-Achse ist auf den Nullmeridian, welcher durch Greenwich

im Vereinigten Königreich verläuft, ausgerichtet. Die Z-Achse ist identisch mit der Rotationsachse der Erde. Die Y-Achse wird entsprechend eines rechtshändigen Koordinatensystems gewählt. (Lichtenegger, Hofmann-Wellenhof und Wasle 2007) Des Weiteren können die Koordinaten auch als ellipsoidische Koordinaten angegeben werden. Diese entsprechen der geodätischen Länge $\lambda^{ell,e}$, der geodätischen Breite $\varphi^{ell,e}$ und der Höhe $h^{ell,e}$ bezogen auf das Referenzellipsoid des zugehörigen Referenzsystems. Die Umrechnung von ellipsoidischen in kartesische Koordinaten und andersherum ist in der Literatur beschrieben. (Lichtenegger, Hofmann-Wellenhof und Wasle 2007)

Für die Lokalisierung der Kameras durch die Bündelausgleichung wird häufig ein lokaler Karten-Rahmen KS_m aufgespannt. Dieser schmiegt sich tangential an das erdfeste System an. Der Ursprung kann beliebig in die Nähe der Kameras gelegt werden, beispielsweise identisch zur Position einer Kamera im ersten Zeitschritt der Ausgleichung. Die X-Achse ist nach Osten ausgerichtet und die Y-Achse nach Norden. Das Koordinatensystem wird als rechtshändig definiert, daher zeigt die Z-Achse nach oben. Die Transformation eines Punktes \mathbf{X}_i zwischen erdfestem Rahmen und Karten-Rahmen erfolgt durch die in Gleichung (2.42) beschriebene Rotation. Die Rotationsmatrix \mathbf{R}_e^m wird dabei mit den ellipsoidischen Koordinaten des Ursprungs des Karten-Rahmens $\lambda_m^{ell,e}$ und $\varphi_m^{ell,e}$ parametrisiert. Dies ist in Gleichung (2.43) beschrieben. Der Vektor $\mathbf{X}_{m,i}^e$ entspricht der Differenz zwischen dem Punkt im Raum \mathbf{X}_i^e und dem Ursprung des Karten-Rahmens \mathbf{X}_m^e in den Koordinaten des erdfesten Rahmens. Diesen Zusammenhang zeigt Gleichung (2.44). (Lichtenegger, Hofmann-Wellenhof und Wasle 2007)

$$\mathbf{X}_i^m = \mathbf{R}_e^m \cdot \mathbf{X}_{m,i}^e \quad (2.42)$$

$$\mathbf{R}_e^m = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi_m^{ell,e}) \cos(\lambda_m^{ell,e}) & -\sin(\varphi_m^{ell,e}) \sin(\lambda_m^{ell,e}) & \cos(\varphi_m^{ell,e}) \\ -\sin(\lambda_m^{ell,e}) & \cos(\lambda_m^{ell,e}) & 0 \\ \cos(\varphi_m^{ell,e}) \cos(\lambda_m^{ell,e}) & \cos(\varphi_m^{ell,e}) \sin(\lambda_m^{ell,e}) & \sin(\varphi_m^{ell,e}) \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\mathbf{X}_{m,i}^e = \mathbf{X}_i^e - \mathbf{X}_m^e \quad (2.44)$$

Jedes Fahrzeug besitzt ein eigenes fahrzeugfestes Koordinatensystem KS_b . Der Ursprung befindet sich im kinematischen Zentrum des Fahrzeugs. Die X-Achse ist in Fahrtrichtung orientiert, die Y-Achse nach links und die Z-Achse nach oben. Von diesem Koordinatensystem ausgehend können weitere fahrzeugfeste Koordinatensysteme definiert werden. Zwischen den fahrzeugfesten Koordinatensystemen gelten starre Transformationen. (Seiffert und Braess 2013)

Das in Abschnitt 2.2 eingeführte Kamerakoordinatensystem ist ebenfalls fahrzeugfest definiert. An diesem Beispiel wird die Transformation zwischen zwei fahrzeugfesten Koordinatensystemen gezeigt. Diese besteht zum einen aus der Rotationsmatrix \mathbf{R}_b^K , welche wie in Gleichung (2.10) gezeigt, parametrisiert werden kann. Die translatorische Verschiebung zwischen dem optischen Zentrum der Kamera und dem Ursprung des fahrzeugfesten Koordinatensystems ist abhängig von der Einbaulage der Kamera und somit für jedes Fahrzeug individuell festzulegen. Die Beschreibung erfolgt im Translationsvektor $\mathbf{t}_{bK} = \begin{bmatrix} t_{bK}^x & t_{bK}^y & t_{bK}^z \end{bmatrix}^T$. Wenn die Kameraposition bestimmt ist, kann mithilfe der Rotationsmatrix \mathbf{R}_b^K und des Translationsvektors \mathbf{t}_{bK} die Position und Orientierung des fahrzeugfesten Koordinatensystems bestimmt werden, welches anschließend für Navigationsanwendungen verwendet werden kann.

3 Stand der Forschung

Visuelle Lokalisierung ist eng mit dem Problem des SLAM verknüpft. Die SLAM Verfahren lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen, zum einen Filter-basierte Verfahren und zum anderen die BA sowie das eng verwandte Graph-basierte SLAM.

Die BA hat den Vorteil, dass dabei die äußeren Orientierungen der gesamten Trajektorie optimal geschätzt werden und nicht nur die äußere Orientierung zum aktuellen Zeitpunkt. Dies ist bei einem Filter-SLAM Ansatz wie dem Extended Kalman Filter (EKF)-SLAM der Fall. Dabei werden die vorangegangenen Posen marginalisiert. Beide Verfahren werden in (Strasdat, Montiel und Davison 2010) bezüglich ihrer jeweiligen Eignung für SLAM mit monokularen Kameras verglichen. Um den Berechnungsaufwand in Grenzen zu halten, werden im BA-SLAM nicht alle Kamera-Bilder verwendet, sondern nur sogenannte *Keyframes* ausgewählt. Als Resultat zeigt die Untersuchung, dass BA-SLAM dem Filter-SLAM, abgesehen von Anwendungen mit geringen Rechenkapazitäten, überlegen ist.

In (Mur-Artal, Montiel und Tardós 2015) wird eine Umsetzung eines solchen Systems gezeigt. In einem ersten Schritt wird eine initiale Karte unter Verwendung der ersten beiden Bilder erstellt. Anschließend werden für jeden Zeitschritt ORB Merkmale (Ruble u. a. 2011) aus den Bildern extrahiert. Mit diesen wird zuerst eine initiale Pose geschätzt. Dazu wird mit Hilfe eines Bewegungsmodells zuerst eine neue Pose der Kamera prädiiziert. Anschließend werden Korrespondenzen zwischen den Merkmalen des letzten und des aktuellen Bildes gesucht. Mit diesen Korrespondenzen wird die initiale Pose optimiert.

Auch in diesem System werden zur Reduzierung des Rechenaufwands nur ausgewählte Bilder, *Keyframes*, verwendet. Die Auswahl erfolgt anhand eines Kriteriums, welches beurteilt, ob sich die Szene im Vergleich zum letzten *Keyframe* verändert hat. Außerdem muss eine Mindestanzahl an Merkmalen im Bild vorhanden sein.

Die BA wird in zwei Teile getrennt. Im ersten Teil wird für jeden neuen *Keyframe* eine lokale BA durchgeführt. Dabei werden alle weiteren *Keyframes*, welche Merkmale des aktuellen *Keyframes* enthalten, verwendet. Im zweiten Teil wird ein hierarchisch übergeordneter Graph durch eine BA optimiert, sobald eine Schleife festgestellt wurde. Dies ist der Fall, wenn eine hohe Anzahl an Merkmalen in einem neuen Bild wiedererkannt wurde und die entsprechenden Bilder nicht aufeinander folgen.

Der vorherige Ansatz wird in (Li u. a. 2017) verwendet, um ein kooperatives SLAM System aufzubauen. Als Struktur wird ein Client-Server System verwendet, wobei jeder Client ein in (Mur-Artal, Montiel und Tardós 2015) beschriebenes ORB-SLAM-System verwendet. Mit jedem neuen *Keyframe* wird die Karte des Clients an den Server gesendet. Dieser fusioniert dann die überlappenden Kartenteile der Clients

und führt anschließend eine globale BA durch. Die optimierte globale Karte wird anschließend den Clients zu Verfügung gestellt. Dies ermöglicht auch eine genauere Positionierung der Clients.

Ein weiteres Beispiel für ein kooperatives SLAM-System wird in (Kim u. a. 2010) vorgestellt. Dabei wird das System Incremental Smoothing and Mapping (iSAM) (Kaess, Ranganathan und Dellaert 2008) verwendet. Jeder beteiligte Roboter wird durch einen Posen-Graphen beschrieben, in denen die Posen als Knoten dargestellt werden und durch Beobachtungen mit gewichteten Kanten verbunden werden. Die Posen-Graphen der Roboter sind jeweils in einem lokalen Koordinatensystem definiert. Die Trajektorie des ersten Roboters wird durch einen Anker in einem globalen Koordinatensystem fixiert. Die einzelnen Graphen werden durch sogenannte Begegnungen verbunden, wobei zwei Arten unterschieden werden. Erstere entspricht der Beobachtung der identischen Szene, sprich einer relativen Begegnung, zweiteere geschieht durch eine gegenseitige Beobachtung. In beiden Fällen werden die Posen zum entsprechenden Zeitpunkt der jeweiligen Roboter durch eine gewichtete Kante verbunden. Dadurch werden auch die Posen-Graphen aller Roboter durch den Anker des ersten Roboters im globalen Koordinatensystem beschrieben.

Diese beiden Ansätze sind hauptsächlich für die Erstellung von lokalen Karten konzipiert, die aus der Kooperation entstehenden genaueren Karten erlauben jedoch auch eine exakte Positionierung. Im Folgenden werden Ansätze betrachtet, welche eine exakte globale Positionierung als primäres Ziel haben.

In (Cucci, Rehak und Skaloud 2017) wird ein System vorgestellt, welche die Beobachtungen einer Kamera, eines GNSS-Empfängers sowie einer Inertiale Messeinheit (IMU) in einem BA-Ansatz fusioniert. Für diese Sensoren werden einzelne Koordinatensysteme definiert, wobei das der IMU mit dem fahrzeugfesten Body-Frame übereinstimmt. Zu allen anderen Sensoren werden Hebelarme und Rotationsmatrizen definiert, welche auch in den entsprechenden Beobachtungsgleichungen berücksichtigt werden. Des Weiteren können die durch Passpunkte bekannten räumlichen Koordinaten einzelner Merkmale als Beobachtung eingefügt werden.

Alle Unbekannten und Beobachtungen werden in einem sogenannten dynamischen Netzwerk zusammengefasst, welches in (Cucci und Matteucci 2014) vorgestellt wird. Dieses ist eine Graph-Struktur, in der die Posen des Fahrzeugs als Knoten dargestellt werden. Die Kanten entsprechen Zwangsbedingungen durch Beobachtungen. Das Gewicht der Kanten entspricht dem Wert der Fehlerfunktion der entsprechenden Beobachtung. Für die Optimierung werden nur eine bestimmte Anzahl vergangener Zeitschritte berücksichtigt, alle vorherigen Posen werden marginalisiert.

Die Uhren aller Sensoren werden als zeitsynchronisiert bezogen auf die GNSS-Zeit

angenommen. Da alle diese Beobachtungen nicht gleichzeitig sondern asynchron auftreten, wird für die Zeitpunkte der Bildaufnahme eine GNSS/IMU-Pose durch lineare Interpolation ermittelt. Mit jedem neuen Bild wird diese Pose als initialer Wert für die BA verwendet, wobei auch alle bereits bekannten Merkmale berücksichtigt werden. Mit der verbesserten initialen Pose werden dann durch eine Direkte Lineare Transformation (DLT) initiale Werte für die neuen Merkmale berechnet, welche in diesem Bild erstmals auftreten. Anschließend wird eine BA mit allen Merkmalen durchgeführt.

In diesem System ist das Fahrzeug mindestens mit einem Sensor zur absoluten Positionsbestimmung wie GNSS ausgestattet. In (Trusheim und Heipke 2020) wird dieser Sensor durch dynamische Passpunkte ersetzt, welche bspw. Fahrzeuge mit GNSS-Empfänger sein können. Eine Kamera, welche sich ebenfalls durch die Szene bewegt, beobachtet diese Passpunkte sowie weitere Verknüpfungspunkte. Die Posen der Kamera sowie die Positionen der Verknüpfungspunkte sind unbekannt. Alle Beobachtungen und Unbekannten werden in einer BA zusammengefasst. Um eine gleichbleibende Rechendauer für Echtzeit-Anwendungen zu erhalten, wird hier ein *Sliding Window* Ansatz verwendet, bei dem nur eine bestimmte Anzahl zurückliegender Epochen für die BA verwendet wird.

Ein solches *Sliding Window* Verfahren wird in (Tong u. a. 2014) gezeigt. Dabei wird nur ein Teil der äußeren Orientierungen der Trajektorie bzw. deren korrespondierende Bilder berücksichtigt. Die erste Gruppe äußerer Orientierungen wird bis zum Erreichen der Fenstergröße in einer konventionellen BA gelöst. Sobald die Fenstergröße erreicht ist, wird nur eine bestimmte Anzahl an zurückliegenden Bildern verwendet. Die bereits zuvor in einer BA optimierten äußeren Orientierungen werden als bekannt und fest angenommen. Eine geringe Anzahl an neuen äußeren Orientierungen sowie die Merkmale stellen die Unbekannten der Ausgleichung dar. Anschließend wird das Fenster um ein Bild weitergeschoben. Durch die konstante Anzahl an Bildern lässt sich eine relativ konstante Rechenzeit darstellen. Diese ist in der Regel nicht exakt konstant, da die Anzahl der Merkmale immer noch variieren kann.

In dieser Arbeit wird die kooperative Lokalisierung von mehreren Kameras untersucht. Diese wird mit der Integration von Kamerabeobachtungen mit GNSS Beobachtungen in einer BA kombiniert. Dabei wird untersucht, inwieweit die Kooperation mehrerer Kameras das Ergebnis der BA im Vergleich zur Nutzung einer einzelnen Kamera verbessern kann.

4 Methodik

In diesem Kapitel wird ein System zur kooperativen Lokalisierung mehrerer Kameras beschrieben. Das Vorgehen wird allgemein anhand von zwei Kameras gezeigt, kann jedoch beliebig erweitert werden. Dabei müssen jedoch der steigende Rechen- und Speicherbedarf berücksichtigt werden.

Es wird ein angepasstes Verfahren der Bündelausgleichung vorgestellt. Dieses berücksichtigt die Beobachtungen von Verknüpfungspunkten, die Eigenlokalisierung durch GNSS sowie die gegenseitige Beobachtung mehrerer Kameras. Dabei werden auch zeitlich abhängige Beobachtungen berücksichtigt.

4.1 Bündelausgleichung

Das in Abschnitt 2.4 vorgestellte Verfahren der BA wird im Rahmen dieser Arbeit zur kooperativen Lokalisierung mehrerer Kameras adaptiert. Da es sich dabei um die Untersuchung eines Konzeptes handelt, werden bestimmte Annahmen zur Vereinfachung getroffen. Zum einen wird ein idealer Datenaustausch zwischen den Kameras angenommen, sodass alle Beobachtungen einer Kamera ohne Zeitverzögerung und Verluste übertragen werden können. Des Weiteren wird eine BA für die gesamten Trajektorien der Kameras durchgeführt. Dies ist nicht für Navigationsanwendungen in Echtzeit geeignet, da sich einerseits eine hohe Rechenlast ergibt und andererseits erst die Daten für alle Zeitschritte vorliegen müssen. Um dieses Konzept für Echtzeit-nahe Anwendungen verwenden zu können, müsste ein *Sliding Window* Ansatz gewählt werden. Dieses Konzept ist in Kapitel 3 beschrieben.

Zudem wird angenommen, dass die Uhren aller Fahrzeuge und Sensoren zeitsynchronisiert sind. Dies ist durch die Nutzung des Global Positioning System (GPS) möglich, dies ist eine Umsetzung eines GNSS. Aus dieser Annahme resultiert, dass Beobachtungen verschiedener Sensoren, welche einen identischen Zeitstempel haben, tatsächlich gleichzeitig aufgenommen wurden. Die BA wird in einem lokal aufgespannten Karten-Rahmen durchgeführt.

Das Ziel der BA ist die Bestimmung der Unbekannten. Diese enthalten die äußeren Orientierungen der Kameras, welche wiederum aus der Position $\mathbf{X}_0^k = \begin{bmatrix} X_0^k & Y_0^k & Z_0^k \end{bmatrix}^T$ sowie der Orientierung bestehen. Für die Orientierung erfolgt die Bestimmung der Unbekannten in Form der in Abschnitt 2.1 vorgestellten Euler-Winkel ω^k , φ^k sowie κ^k . Die äußere Orientierung wird für jede Bildaufnahme bestimmt. Zusätzlich werden die Positionen $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T$ aller Verknüpfungspunkte bestimmt. Alle Unbekannten werden im Vektor \mathbf{x} der Unbekannten aufgelistet.

Als Beobachtungen stehen die Aufnahmen der Kamera zur Verfügung. Diese enthalten die Positionen sowohl von Verknüpfungspunkten als auch von anderen

Kameras im Sensorkoordinatensystem. Des Weiteren werden die Positionen der Kameras im Karten-Rahmen direkt beobachtet. Dies soll der Lokalisierung durch GNSS entsprechen. Zur besseren Lesbarkeit werden diese Beobachtungen im Folgenden als GNSS Beobachtungen bezeichnet, auch wenn es sich nicht um diese in der eigentlichen Form von Pseudorange handelt. Alle Beobachtungen werden im Beobachtungsvektor \mathbf{l} zusammengefasst.

Kameras, welche im Automobilbereich eingesetzt werden, haben in der Regel Bildraten von mehr als zehn Bildern pro Sekunde. Ein Beispiel für eine solche Kamera ist die *Bosch Multi purpose camera* (Bosch 2020), welche eine Bildrate von 45 Bildern pro Sekunde aufweist. Eine solch hohe Bildrate würde schon bei sehr kurzen Trajektorien zu einer sehr hohen Zahl an Unbekannten und Beobachtungen führen. Dies würde in einer sehr hohen Rechenlast resultieren. Um dies zu vermeiden, werden nur ausgewählte Bilder verwendet, sogenannte *Keyframes*. Da in dieser Arbeit lediglich simulierte Daten verwendet werden, wird die Auswahl basierend auf der zurückgelegten Distanz zum letzten Bild getroffen. Für reale Daten können Kriterien wie eine Mindestanzahl an neuen Verknüpfungspunkten und eine Mindestanzahl an beobachteten Verknüpfungspunkten verwendet werden, wie es in (Mur-Artal, Montiel und Tardós 2015) der Fall ist. Für kooperative Ansätze kann die Auswahl außerdem basierend auf der Anzahl an Beobachtungen gleicher Merkmale in Bildern verschiedener Kameras erfolgen.

4.1.1 Funktionales Modell

Das funktionale Modell stellt wie in Abschnitt 2.3 beschrieben den Zusammenhang zwischen den unbekanntem Parametern und den Beobachtungen her. Für Beobachtungen der Kameras werden bei einer BA in der Regel die Kollinearitätsgleichungen (2.19) und (2.20) genutzt.

Diese gelten für ein Kamerakoordinatensystem bei dem die x' -Achse nach rechts zeigt und die y' -Achse nach oben. Ein solches Koordinatensystem ist in Abbildung 2.1 gezeigt und in Abschnitt 2.2 beschrieben. Das in Abschnitt 2.1 beschriebene Problem des *Gimbal Lock* tritt auf, wenn die zweite Rotation, das heißt die Rotation um die Y-Achse, einen Wert von 90° aufweist. Wenn das Kamerakoordinatensystem wie üblich mit der y' -Achse nach oben definiert wird, ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des *Gimbal Lock* in einer Fahrzeuganwendung sehr groß. Um dieses zu vermeiden, wird die z' -Achse als Bildhochachse festgelegt. Die y' -Achse zeigt nach rechts, die x' -Achse wird entsprechend eines rechtshändigen Koordinatensystems ausgerichtet. Das Kamerakoordinatensystem ist somit zum fahrzeugfesten Koordinatensystem um 180° um die z-Achse rotiert. Die resultierende Rotationsmatrix R_b^K ist in Gleichung (4.1) dargestellt.

$$\mathbf{R}_b^K = \begin{bmatrix} \cos(\pi) & -\sin(\pi) & 0 \\ \sin(\pi) & \cos(\pi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Daher werden nun die Gleichungen 2 und 3 des Gleichungssystems (2.18) durch die erste Gleichung dividiert. Es ergeben sich die modifizierten Kollinearitätsgleichungen in Gleichung (4.2) und Gleichung (4.3).

$$x'_p = x'_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)} \quad (4.2)$$

$$y'_p = y'_0 - c \frac{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)} \quad (4.3)$$

Diese Beobachtungsgleichungen werden sowohl für die Beobachtung der Verknüpfungspunkte als auch die Beobachtungen der anderen Fahrzeuge verwendet. Der Vektor $\mathbf{X} = [X \ Y \ Z]^T$ stellt dabei die Position des beobachteten Objekts im Raum dar. Weil die Verknüpfungspunkte als statisch angenommen werden, können Gleichung (4.2) und Gleichung (4.3) hier angewandt werden. Die Position eines Verknüpfungspunktes hat drei Freiheitsgrade. Um die Position eindeutig bestimmen zu können, sind daher insgesamt drei Beobachtungen notwendig. Eine Erfassung eines Verknüpfungspunktes im Bild liefert zwei Beobachtungen, welche durch die Kollinearitätsgleichungen beschrieben werden. Um die Position eines Verknüpfungspunktes bestimmen zu können, muss dieser daher in mindestens zwei Bildern erfasst werden. Diese Bilder dürfen nicht identisch sein, was bei einer statischen Kamera möglich ist. In diesem Fall würden die Beobachtungen des zweiten Bildes keine zusätzlichen geometrischen Informationen liefern. Zusätzliche Beobachtungen sind hilfreich, um ein überbestimmtes Gleichungssystem zu erhalten. Dadurch ist eine Qualitätsaussage über das Ergebnis möglich. Dieses kann wie in Abschnitt 2.3 beschrieben mithilfe einer Ausgleichung bestimmt werden.

Die Kameras bewegen sich jedoch dynamisch im Raum. Dadurch ist die Position der Kameras eine Funktion mit zeitlicher Abhängigkeit. Die Position \mathbf{X}_0^k der k Kameras und somit der Fahrzeuge wird in der BA für jedes verwendete Bild geschätzt. Die Uhren der Kameras sind zeitsynchronisiert, jedoch nehmen die Kameras, welche sich gegenseitig beobachten, die Bilder nicht gleichzeitig auf. Das bedeutet, dass die Position der beobachteten Kamera zu diesem Zeitpunkt nicht im Vektor der Unbekannten enthalten ist. Daher muss diese anderweitig ermittelt werden. Da in diesem Konzept die gesamten Trajektorien verwendet werden, steht immer eine Position der Kamera vor und nach dem entsprechenden Zeitpunkt zur Verfügung. Ausgenommen hiervon sind in der Regel das Bild mit dem frühesten und spätesten

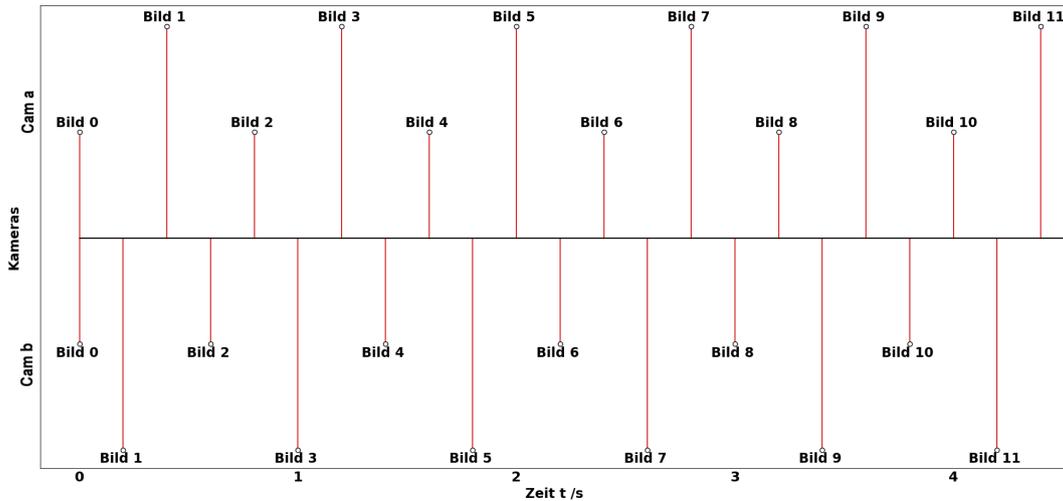


Abbildung 4.1: Zeitstrahl der Bilder zweier Kameras. Auf der x-Achse ist die Zeit in Sekunden dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte zeigen den Zeitpunkt der Bildaufnahme für beide Kameras.

Zeitstempel. Abbildung 4.1 zeigt die Zeitpunkte der Bildaufnahmen am Beispiel von zwei Kameras. Hier zeigt sich, dass Kamera Cam a Bild 1 zum Zeitpunkt $t = 0,4 \text{ s}$ aufnimmt. Zu diesem Zeitpunkt nimmt Kamera Cam b jedoch kein Bild auf, sodass der Vektor der Unbekannten \mathbf{x} die Position von Kamera Cam b zu diesem Zeitpunkt nicht enthält. Eine Näherungslösung für diese Position ist durch lineare Interpolation möglich. Dafür werden die Positionen von Kamera Cam b bei der Aufnahme von Bild 1 und Bild 2 verwendet. Bewegen sich die Kameras linear, das heißt mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Strecke, so wird die Lösung exakt. In der Realität ist dieses jedoch nicht möglich. Allerdings stellt es eine gute Näherung für Szenarien dar, in denen die Fahrzeuge weder stark beschleunigen noch stark verzögern. Treten hohe Beschleunigungen oder Verzögerungen auf, kann die Position durch die Schätzung der Fahrzeuggeschwindigkeit und Beschleunigung geschätzt werden.

Für die lineare Interpolation wird das Verfahren aus (Trusheim und Heipke 2020) adaptiert. Dafür wird jeweils ein Faktor für die Position vor (α) und nach (β) der gesuchten Position berechnet. Dies ist in Gleichung (4.4) bzw. (4.5) gezeigt. Die Berechnung der Näherungsposition ist in Gleichung (4.6) gezeigt. Der Zeitpunkt t_0 liegt vor dem Zeitpunkt t der gesuchten Position, der Zeitpunkt t_1 danach.

$$\alpha = \frac{t_1 - t}{t_1 - t_0} \quad (4.4)$$

$$\beta = \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{X}_{0,t}^k = \alpha \cdot \mathbf{X}_{0,t_0}^k + \beta \cdot \mathbf{X}_{0,t_1}^k \quad (4.6)$$

Für die Beobachtung anderer Kameras werden die Kollinearitätsgleichungen (4.2) und (4.3) um die interpolierte Position der beobachteten Kamera erweitert. Dies wird in den Gleichungen (4.7) und (4.8) gezeigt. Cam a ist dabei die beobachtende Kamera, Cam b die beobachtete Kamera.

$$x'_p = x'_0 - c \frac{r_{12}(X_{0,t}^b - X_{0,t}^a) + r_{22}(Y_{0,t}^b - Y_{0,t}^a) + r_{32}(Z_{0,t}^b - Z_{0,t}^a)}{r_{11}(X_{0,t}^b - X_{0,t}^a) + r_{21}(Y_{0,t}^b - Y_{0,t}^a) + r_{31}(Z_{0,t}^b - Z_{0,t}^a)} \quad (4.7)$$

$$y'_p = y'_0 - c \frac{r_{13}(X_{0,t}^b - X_{0,t}^a) + r_{23}(Y_{0,t}^b - Y_{0,t}^a) + r_{33}(Z_{0,t}^b - Z_{0,t}^a)}{r_{11}(X_{0,t}^b - X_{0,t}^a) + r_{21}(Y_{0,t}^b - Y_{0,t}^a) + r_{31}(Z_{0,t}^b - Z_{0,t}^a)} \quad (4.8)$$

In realen Anwendungen ist es nahezu unmöglich, die Kamera eines anderen Fahrzeugs bzw. deren optisches Zentrum direkt zu beobachten. In der Regel würde hierzu das gesamte Fahrzeug detektiert und die Position und Orientierung des fahrzeugfesten Koordinatensystems geschätzt werden. Hiervon ausgehend würde über den in Abschnitt 2.5 beschriebenen Hebelarm die Lage der Kamera bestimmt werden. Da in dieser Arbeit lediglich simulierte Daten verwendet werden, wird zur Vereinfachung angenommen, dass die Kamera direkt beobachtet werden kann.

Zusätzlich zu den Beobachtungen der Kameras stehen noch GNSS Beobachtungen zur Verfügung. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Position der Kamera direkt im Karten-Rahmen beobachtet wird. Dies ist in der Realität nicht möglich und müsste durch einen Hebelarm als Transformation zwischen der GNSS Antenne und der Kamera modelliert werden. Da es bei dieser Untersuchung jedoch hauptsächlich um das Konzept der kooperativen Lokalisierung handelt, wird diese Vereinfachung angenommen.

Die GNSS Beobachtungen werden normalerweise im erdfesten Koordinatensystem ausgedrückt. Da die BA in Koordinaten des Karten-Rahmens durchgeführt wird, müssen die GNSS Beobachtungen zuerst in den Karten-Rahmen transformiert werden. Dieses ist hier bereits durch die Simulation gelöst, da die Beobachtungen direkt im Karten-Rahmen vorliegen. Die GNSS Beobachtungen \mathbf{X}_{GNSS}^m beinhalten die Position der Kamera, dieses wird in Gleichung (4.9) gezeigt.

$$\mathbf{X}_{GNSS}^m = \begin{bmatrix} X_{GNSS}^m & Y_{GNSS}^m & Z_{GNSS}^m \end{bmatrix}^T \quad (4.9)$$

Die GNSS Beobachtungen treten ebenfalls nicht synchron mit den Bildaufnahmen auf. Daher ist auch in diesem Fall eine Interpolation notwendig. Abbildung 4.2 erweitert Abbildung 4.1 um die Zeitpunkte der GNSS Beobachtungen und zeigt somit alle für die BA verfügbaren Beobachtungen. Ein Beispiel für eine notwendige Interpolation ist Bild 3 von Kamera Cam a. In diesem Fall werden die unmittelbar vorhergehende und nachfolgende GNSS Beobachtung zur Interpolation angewandt. Für die Interpolation wird das oben erwähnte Modell zur linearen Interpolation verwen-

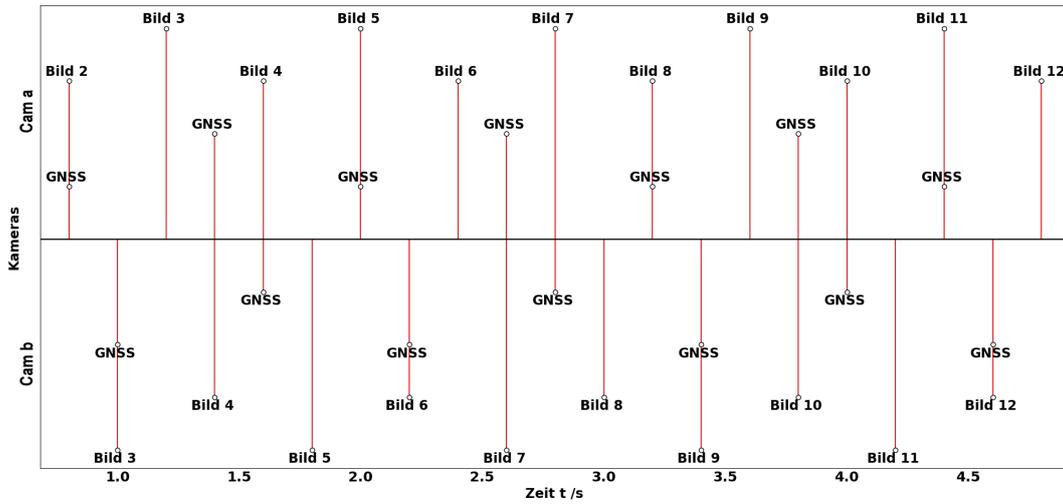


Abbildung 4.2: Zeitstrahl der Beobachtungen zweier Kameras in der BA. Auf der x-Achse ist die Zeit in Sekunden dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte zeigen die Zeitpunkte der Bildaufnahme für beide Kameras sowie die Zeitpunkte der GNSS Beobachtungen beider Fahrzeuge.

det. Die Faktoren α und β werden nach den Gleichungen (4.4) und (4.5) berechnet. Gleichung (4.10) zeigt die Interpolation einer GNSS Beobachtung für einen Zeitpunkt t .

$$\mathbf{X}_{GNSS,t} = \alpha \cdot \mathbf{X}_{GNSS,t_0} + \beta \cdot \mathbf{X}_{GNSS,t_1} \quad (4.10)$$

Wie oben beschrieben wird angenommen, dass die GNSS-Antenne mit dem optischen Zentrum der Kamera übereinstimmt. Daher erfolgt eine direkte Beobachtung der Position der Kamera, diese wird in den Gleichungen (4.11) - (4.13) beschrieben.

$$X_{GNSS,t} = X_{0,t} \quad (4.11)$$

$$Y_{GNSS,t} = Y_{0,t} \quad (4.12)$$

$$Z_{GNSS,t} = Z_{0,t} \quad (4.13)$$

4.1.2 Stochastisches Modell

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, werden die Beobachtungen in der Ausgleichung gewichtet. Alle Beobachtungen werden als normalverteilt angenommen. Zusätzlich werden alle Beobachtungen als unabhängig voneinander angenommen. Die VKM der Beobachtungen Σ_{ll} ist somit nur auf der Hauptdiagonalen besetzt, alle anderen Einträge sind null. Die Werte der einzelnen Einträge sind abhängig von der Art der Beobachtung. Tabelle 4.1 stellt die einzelnen Varianzen der unterschiedlichen Beobachtungen dar. Nach Gleichung (2.28) kann die VKM Σ_{ll} in einen a-priori Varianzfaktor σ_0^2 und eine Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{ll} zerlegt werden. Hier wird ein a-priori

Tabelle 4.1: Übersicht der Varianzen der Beobachtungstypen

Beobachtungstyp	Varianz
Verknüpfungspunkt durch Kamera (x-Koordinate)	$\sigma_{Cam,x,TP}^2$
Verknüpfungspunkt durch Kamera (y-Koordinate)	$\sigma_{Cam,y,TP}^2$
Fahrzeug durch Kamera (x-Koordinate)	$\sigma_{Cam,x,Car}^2$
Fahrzeug durch Kamera (y-Koordinate)	$\sigma_{Cam,y,Car}^2$
GNSS X	$\sigma_{GNSS,X}^2$
GNSS Y	$\sigma_{GNSS,Y}^2$
GNSS Z	$\sigma_{GNSS,Z}^2$

Varianzfaktor von $\sigma_0^2 = 1$ festgelegt, da die unterschiedlichen Beobachtungstypen unterschiedliche Genauigkeiten haben. Daher gilt $\mathbf{Q}_{ll} = \Sigma_{ll}$. Die Gewichtsmatrix \mathbf{P} entspricht nach Gleichung (2.29) der Inversen der Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{ll} .

4.1.3 Kooperative Lösung

Da es sich bei den Kollinearitätsgleichungen um nichtlineare Gleichungen handelt, ist lediglich eine iterative Lösung mit entsprechenden Startwerten möglich. Dies ist in Abschnitt 2.3 beschrieben. Die Startwerte werden zur Vereinfachung in dieser Arbeit als gegeben angenommen. Sie können aus den simulierten Daten extrahiert werden. Für Anwendungen mit realen Bildern können die initialen Werte für die äußeren Orientierungen der Kameras durch die GNSS Beobachtungen ermittelt werden. Initiale Werte für die Positionen der Verknüpfungspunkte lassen sich beispielsweise mithilfe stereoskopischer Verfahren ermitteln. Ein solches Verfahren wird in (Klein und Murray 2007) verwendet. Die benötigte Skalierung kann ebenfalls durch die GNSS Beobachtungen angenähert werden.

In Abschnitt 4.1 sind der Vektor \mathbf{x} der Unbekannten sowie der Vektor \mathbf{l} der Beobachtungen beschrieben. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die verschiedenen funktionalen Modelle, welche in Abschnitt 4.1.1 beschrieben sind. Dabei gilt für die Position $\mathbf{X}_{0,t}^k$ einer Kamera Cam k stets, dass diese von zwei zeitlich umschließenden Positionen \mathbf{X}_{0,t_0}^k und \mathbf{X}_{0,t_1}^k abhängt. Dies ist in Gleichung (4.6) beschrieben. Ausgenommen hiervon sind die Zeitpunkte t , in denen die Kamera Cam k ein Bild aufnimmt.

Die BA folgt dem Schema des in Abschnitt 2.3 beschriebenen iterativen Gauß-Markov Modells. Zunächst wird die Designmatrix \mathbf{A} durch die partiellen Ableitungen des entsprechenden funktionalen Zusammenhangs nach den Parametern für alle vorhandenen Beobachtungen aufgestellt. Diese ist bei n Beobachtungen und u Unbekannten eine $n \times u$ Matrix. Ein Ausschnitt aus einer möglichen Designmatrix zeigt Gleichung (4.14). Dabei entspricht $\mathbf{X}^m = [X^m \ Y^m \ Z^m]^T$ der Position des m -ten Verknüpfungspunktes. Die Werte der partiellen Ableitungen werden da-

Tabelle 4.2: Übersicht der funktionalen Modelle sowie deren Abhängigkeiten von den unbekanntem Parametern

Beobachtungstyp	Funktionale Abhängigkeit	Gl.
Verknüpfungspunkt durch Cam k (x-Koordinate)	$f_1(X_0^k, Y_0^k, Z_0^k, \omega^k, \varphi^k, \kappa^k, X, Y, Z)$	(4.2)
Verknüpfungspunkt durch Cam k (y-Koordinate)	$f_2(X_0^k, Y_0^k, Z_0^k, \omega^k, \varphi^k, \kappa^k, X, Y, Z)$	(4.3)
Cam b durch Cam a (x-Koordinate)	$f_3(X_0^a, Y_0^a, Z_0^a, \omega^a, \varphi^a, \kappa^a, X_0^b, Y_0^b, Z_0^b)$	(4.7)
Cam b durch Cam a (y-Koordinate)	$f_4(X_0^a, Y_0^a, Z_0^a, \omega^a, \varphi^a, \kappa^a, X_0^b, Y_0^b, Z_0^b)$	(4.8)
GNSS X	$f_5(X_0^k)$	(4.11)
GNSS Y	$f_6(Y_0^k)$	(4.12)
GNSS Z	$f_7(Z_0^k)$	(4.13)

bei immer an der Stelle des Vektors der Unbekannten der aktuellen Iteration $\hat{\mathbf{x}}^j$ berechnet.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix}
 X_{0,t_0}^a & Y_{0,t_0}^a & Z_{0,t_0}^a & \dots & X_{0,t_1}^b & X_{0,t_1}^b & X_{0,t_1}^b & \dots & X^m & Y^m & Z^m \\
 \frac{\partial f_1}{\partial X_0} & \frac{\partial f_1}{\partial Y_0} & \frac{\partial f_1}{\partial Z_0} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X} & \frac{\partial f_1}{\partial Y} & \frac{\partial f_1}{\partial Z} \\
 \frac{\partial f_2}{\partial X_0} & \frac{\partial f_2}{\partial Y_0} & \frac{\partial f_2}{\partial Z_0} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial X} & \frac{\partial f_2}{\partial Y} & \frac{\partial f_2}{\partial Z} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X_0} & \frac{\partial f_1}{\partial Y_0} & \frac{\partial f_1}{\partial Z_0} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X} & \frac{\partial f_1}{\partial Y} & \frac{\partial f_1}{\partial Z} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial X_0} & \frac{\partial f_2}{\partial Y_0} & \frac{\partial f_2}{\partial Z_0} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial X} & \frac{\partial f_2}{\partial Y} & \frac{\partial f_2}{\partial Z} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial f_3}{\partial X_0^b} & \frac{\partial f_3}{\partial Y_0^b} & \frac{\partial f_3}{\partial Z_0^b} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial X_0^a} & \frac{\partial f_3}{\partial Y_0^a} & \frac{\partial f_3}{\partial Z_0^a} & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial f_4}{\partial X_0^b} & \frac{\partial f_4}{\partial Y_0^b} & \frac{\partial f_4}{\partial Z_0^b} & \dots & \frac{\partial f_4}{\partial X_0^a} & \frac{\partial f_4}{\partial Y_0^a} & \frac{\partial f_4}{\partial Z_0^a} & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial f_5}{\partial X_0} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\partial f_6}{\partial Y_0} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{\partial f_7}{\partial Z_0} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0
 \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Anschließend wird für jede Beobachtung eine prädizierte Beobachtung l_0 mithilfe des entsprechenden funktionalen Modells berechnet. Die Differenz zwischen dieser und der tatsächlichen Beobachtung l entspricht nach Gleichung (2.23) dem verkürzten Beobachtungsvektor Δl . Mithilfe der in Abschnitt 4.1.2 aufgestellten Gewichtsmatrix \mathbf{P} wird nun das Normalgleichungssystem $\mathbf{N} \cdot \Delta \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{n} = 0$ aufgestellt. Dafür werden die Gleichungen (2.32) und (2.33) verwendet. Die Lösung dieses Systems erfolgt anhand von Gleichung (2.35). Dafür muss die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} invertiert werden. Daher darf diese keine Singularität aufweisen und somit keinen Rangabfall haben. Die Gewichtsmatrix \mathbf{P} hat nach ihrer Definition einen vollen

Rang, da jede Stelle der Hauptdiagonalen mit einem entsprechenden Gewicht für die jeweilige Beobachtung besetzt ist. Daher muss vor allem sichergestellt werden, dass die Designmatrix \mathbf{A} keinen Rangabfall aufweist. Dies wird erreicht, wenn genug Beobachtungen vorliegen, um alle Unbekannten bestimmen zu können. Um dieses zu erreichen, müssen für jedes Bild mindestens drei Verknüpfungspunkte beobachtet werden, da jede äußere Orientierung einen Freiheitsgrad von sechs aufweist und jede Beobachtung eines Verknüpfungspunktes zwei Beobachtungsgleichungen liefert. Alternativ werden bei einer vorhandenen GNSS Beobachtung (drei Beobachtungsgleichungen) nur noch zwei Verknüpfungspunkte benötigt. Um das Gleichungssystem robuster gegen Ausreißer zu machen, sollte eine deutlich größere Anzahl an Verknüpfungspunkten beobachtet werden. Jeder Verknüpfungspunkt mit drei Freiheitsgraden der Position muss mindestens zwei Mal beobachtet werden. Auch hier gilt, dass eine häufigere Beobachtung das System stabilisiert. Ein Datumsdefekt tritt in diesem System nicht auf, da die GNSS Beobachtungen als Anker dienen.

Nach der Bestimmung der Verbesserungen $\Delta\hat{\mathbf{x}}$ wird der Vektor der Unbekannten $\hat{\mathbf{x}}$ nach Gleichung (2.24) für den aktuellen Iterationsschritt aktualisiert. Dieser wird als neuer Startwert für den nächsten Iterationsschritt verwendet. Des Weiteren werden mithilfe von Gleichung (2.36) die Residuen \mathbf{v} berechnet. Diese werden anschließend genutzt, um die ausgeglichenen Beobachtungen $\hat{\mathbf{I}}$ nach Gleichung (2.37) zu bestimmen.

Die iterative Ausgleichung wird fortgesetzt, bis die Abbruchbedingung $\|\hat{\mathbf{I}} - \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}})\| < \epsilon$ (Gleichung (2.38)) erfüllt ist. Nachdem das der Fall ist, kann durch Gleichung (2.39) der a-posteriori Varianzfaktor $\hat{\sigma}_0^2$ bestimmt werden. Mit diesem lässt sich nach Gleichung (2.40) die VKM der ausgeglichenen Parameter $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ bestimmen. Diese Größen werden für die Auswertung der BA, welche in Abschnitt 4.2 beschrieben wird, verwendet.

4.2 Auswertungsmetriken

Durch die Verwendung von simulierten Daten stehen Ground-Truth-Daten zur Verfügung. Diese entsprechen den wahren Werten der Unbekannten, mit ihnen kann das Resultat der BA verglichen werden. Dazu wird der Root Mean Squared Error (RMSE) verwendet. Dabei wird die Differenz zwischen dem wahren Wert P_i und dem geschätzten Wert \hat{P}_i quadriert und anschließend die Summe aller i Werte gebildet. Aus dieser wird die Quadratwurzel gezogen. Somit erhält man ein Maß für die mittlere Abweichung in der Einheit der ursprünglichen Größe. Dies beschreibt Gleichung (4.15).

$$RMSE = \sqrt{\sum_i (P_i - \hat{P}_i)^2} \quad (4.15)$$

Des Weiteren stehen die VKM der ausgeglichenen Parameter Σ_{xx} zur Verfügung. Diese enthält die Varianzen und Kovarianzen aller ausgeglichenen Parameter. Dadurch lässt sich zum einen analysieren, mit welcher Präzision die Parameter bestimmt werden können. Zum anderen können durch die Kovarianzen Abhängigkeiten einzelner Parameter voneinander aufgedeckt werden. So kann untersucht werden, inwiefern die gegenseitigen Beobachtungen der Kameras sich auf deren Präzision der Position und Orientierung auswirken. Statt der Kovarianzen wird häufig die Korrelation zweier Parameter als Maß für deren lineare Abhängigkeit angegeben. Die Korrelation entspricht der Kovarianz normiert mit den Varianzen der Parameter. Die Korrelation ρ_{12} zweier Parameter 1 und 2 mit den Varianzen σ_1^2 bzw. σ_2^2 und der Kovarianz σ_{12} berechnet sich nach Gleichung (4.16) (Niemeier 2008).

$$\rho_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\sqrt{\sigma_1^2} \cdot \sqrt{\sigma_2^2}} \quad (4.16)$$

Die Korrelation nimmt dabei Werte von -1 bis 1 an. Ein Wert von -1 bzw. 1 bedeutet eine vollständige lineare Abhängigkeit, ein Wert von 0 hingegen eine vollständige lineare Unabhängigkeit.

Die Ausgleichung findet in den Koordinaten des Karten-Rahmens statt. Um die VKM der ausgeglichenen Parameter unabhängig von der Ausrichtung des Karten-Rahmens beurteilen zu können, wird diese mithilfe von Gleichung (4.17) in das jeweilige Kamerakoordinatensystem transformiert. \mathbf{R} entspricht dabei der Rotationsmatrix der Orientierung der Kamera zum entsprechenden Zeitpunkt. $\Sigma_{\hat{x}\hat{x},3 \times 3}$ ist dabei eine 3×3 Submatrix auf der Hauptdiagonalen von $\Sigma_{\hat{x}\hat{x}}$. (Soler und Chin 1985)

$$\Sigma_{\hat{x}\hat{x},3 \times 3}^K = \mathbf{R}^T \cdot \Sigma_{\hat{x}\hat{x},3 \times 3}^m \cdot \mathbf{R} \quad (4.17)$$

Tabelle 5.1: Eigenschaften der Bosch Multi purpose camera (Bosch 2020)

Charakteristik	Wert
Sichtfeld horizontal	$\pm 50^\circ$
Sichtfeld vertikal	$-21^\circ - 27^\circ$
Auflösung	2048×1280 px
Kamerakonstante	859,238 px
Bildrate	45 fps

5 Experimente

In diesem Abschnitt wird die experimentelle Auswertung des in Kapitel 4 vorgestellten Systems zur kooperativen Lokalisierung mehrerer Kameras beschrieben. Dazu kommen insbesondere die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Metriken zum Einsatz. Zuerst werden die verfügbaren Daten sowie deren Entstehung erläutert. Anschließend werden die einzelnen untersuchten Szenarien vorgestellt und die Ergebnisse der Experimente beschrieben.

5.1 Simulation der Daten

In dieser Arbeit werden ausschließlich simulierte Daten verwendet. Die Simulation beruht auf den in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Kollinearitätsgleichungen. In diesem Fall stehen die äußeren Orientierungen der Kameras zur Verfügung. Diese werden für alle Kameras als Wegpunkte einer Trajektorie in der Ebene definiert. Die Höhe der Kameras ist konstant, die konkreten Werte werden für jedes Szenario definiert. Gleichzeitig wird lediglich eine Rotation um die z-Achse vorgenommen, sodass die Winkel ω und φ für alle Kameras zu jedem Zeitpunkt null sind. Des Weiteren sind die Positionen aller Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen bekannt. Diese werden zufällig um die Trajektorien der Kameras angeordnet. Dabei werden die Punkte gleichverteilt in einem Bereich von ± 10 m neben der Trajektorie platziert. Am Ende der Trajektorien werden die Verknüpfungspunkte bis zu einem Radius von 15 m verteilt. Ihre Höhe ist ebenfalls zufällig in einem Band von 0 m bis 10 m gleichverteilt. Es wird sichergestellt, dass stets mindestens zehn Verknüpfungspunkte von jedem Wegpunkt aus für die Kamera sichtbar sind. Als Kamera wird die *Bosch Multi purpose camera* (Bosch 2020) simuliert, deren Spezifikationen zeigt Tabelle 5.1. Die Kamerakonstante ist nicht im Datenblatt enthalten. Sie ergibt sich jedoch aus der Auflösung sowie dem Sichtfeld. Die räumlichen Merkmale werden durch die Kollinearitätsgleichungen (4.2) und (4.3) in das Sensorkoordinatensystem projiziert. Der Bildhauptpunkt wird dabei in der Mitte des Sensorkoordinatensystems angenommen, es gilt $\mathbf{H}' = \begin{bmatrix} 1024 \text{ px} & 640 \text{ px} \end{bmatrix}^T$. Abbildung 5.1 zeigt ein Beispiel einer Bildaufnahme der Simulation mit zwei Kameras. Auf der linken Seite befinden sich die Sensorkoordinatensysteme von Kamera Cam a und Kamera Cam b. In

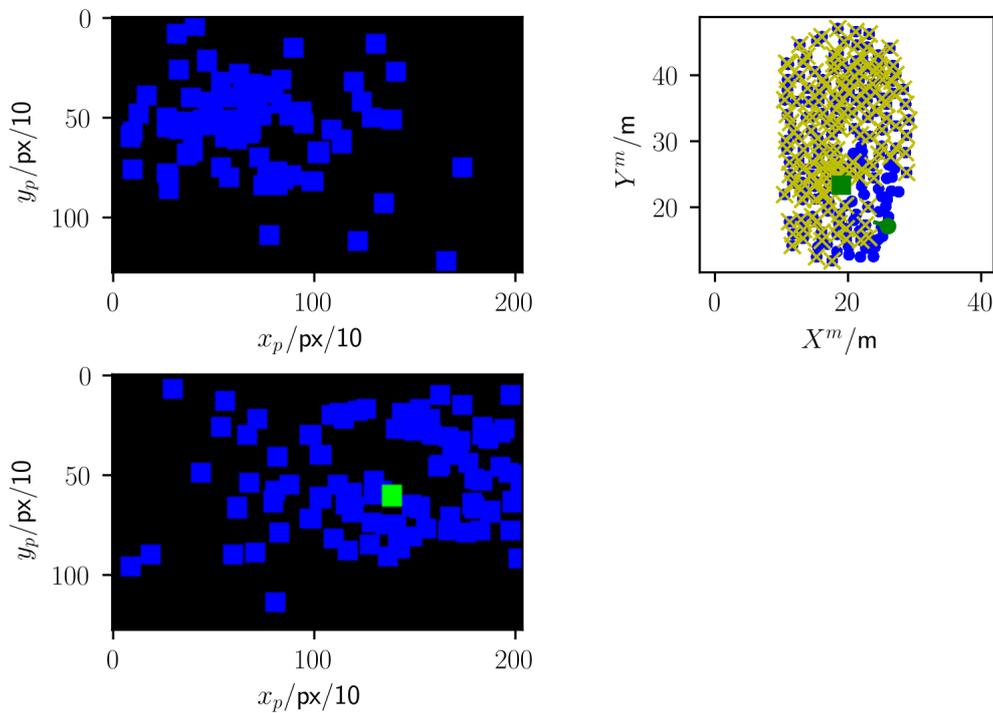


Abbildung 5.1: Beispielhafte Darstellung einer Bildaufnahme in der Simulation mit zwei Kameras. Links befinden sich die beiden Sensorkoordinatensysteme der Kameras. Rechts im Bild befindet sich der Karten-Rahmen.

diesen sind die beobachteten Verknüpfungspunkte als blaue Quadrate dargestellt. Die beobachteten Kameras werden durch grüne Quadrate dargestellt. Rechts im Bild befindet sich eine Abbildung des Karten-Rahmens in der X-Y Ebene. Dort sind die Positionen der Verknüpfungspunkte mit blauen Kreisen markiert. Cam a ist als grünes Quadrat gezeigt, Cam b als grüner Punkt. Die Verknüpfungspunkte, welche zu diesem Zeitpunkt von einer der Kameras beobachtet werden, sind zusätzlich mit einem gelben Kreuz markiert. Um asynchrone Beobachtungen wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben simulieren zu können, werden in jedem Zeitschritt der Simulation Bilder für alle Kameras gespeichert. Zudem wird stets die Position der Kamera als GNSS Beobachtung gespeichert. Anschließend werden einzelne Beobachtungen aus den Daten entfernt, dadurch entsteht ein Beobachtungsmuster wie es in Abbildung 4.2 gezeigt wird.

Die Geschwindigkeit und die Bildrate sind in dieser Simulation voneinander abhängig, da die Bilder an festen Wegpunkten und somit in festen euklidischen Abständen aufgenommen werden. In dem in Abbildung 4.2 beschriebenen Muster werden die Bilder ursprünglich im Takt von 0,1 s aufgenommen, zwischen zwei Bildern einer Kamera legt diese 0,33 m zurück. Anschließend wird jedes zweite Bild entfernt. Somit

ergibt sich eine Bildrate von 5 Bildern pro Sekunde bzw. eine Distanz von 0,66 m pro Bild. Die Kamera- bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt in diesem Beispiel ca. 12 km/h. Dies ist eine realistische Geschwindigkeit für ein Abbiegemanöver innerorts. Im Folgenden werden zwei verschiedene simulierte Szenarien vorgestellt und die Güte der BA in diesen beiden Szenarien untersucht.

5.2 Szenario 1: Abbiegemanöver

Dieses Szenario stellt eine typische Situation im Stadtverkehr nach. Zwei Fahrzeuge stehen sich an einer Kreuzung gegenüber und biegen dann nacheinander auf eine gemeinsame Fahrspur ab. Abbildung 5.2 zeigt die Trajektorien der beiden Kameras. Zusätzlich ist es möglich, dass eine dritte Kamera die Szene statisch beobachtet. Auch diese Möglichkeit wird im Folgenden untersucht. Insgesamt nimmt jede Kamera 55 Bilder auf, zudem stehen für jede Kamera 38 GNSS Beobachtungen zur Verfügung. Die Gesamtlänge der Trajektorie von Kamera Cam a beträgt 21,7 m, von Kamera Cam b 22,8 m. Dieses Szenario ist dem in der Einleitung vorgestellten innerstädtischen Szenario nachempfunden. Die Höhe der Kameras ist auf unterschiedliche Werte festgelegt, um verschiedene Fahrzeugtypen zu berücksichtigen. Die Höhe von Cam a beträgt 1,8 m, die Höhe von Cam b beträgt 1,5 m und die Höhe von Cam c beträgt 2 m.

Für die BA steht die Spezifikation der Kamera, dargestellt in Tabelle 5.1, zur Verfügung. Die innere Orientierung der Kamera wird als konstant angenommen. Als Beobachtungen sind die Bildbeobachtungen der Kameras sowie die Beobachtungen ihrer Positionen im Karten-Rahmen gegeben. Das Problem der Zuordnung der Verknüpfungspunkte aus unterschiedlichen Bildern zueinander ist durch die Simulationsumgebung bereits gelöst, daher liegen keine Ausreißer vor. Alle Beobachtungen werden wie in Kapitel 4.1.2 als normalverteilt angenommen. Die jeweiligen Standardabweichungen zeigt Tabelle 5.2. Dies sind typische Werte und werden beispielsweise in (Trusheim und Heipke 2020) verwendet. Da die Beobachtungen simuliert sind, tritt dabei kein Beobachtungsrauschen auf. Um dieses ebenfalls zu simulieren, werden die Beobachtungen mit ihrer angenommenen Standardabweichungen normalverteilt verrauscht. Die Startwerte, welche für alle Unbekannten für die Ausgleichung notwendig sind, werden mithilfe der Ground Truth bestimmt. Um initiale Werte mit einer realistischen Qualität zu erzielen, werden die Werte der Ground Truth ebenfalls durch eine Normalverteilung verrauscht. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Die initialen Werte und die verrauschten Beobachtungen beeinflussen die Konvergenz der iterativen Ausgleichung. Um die Auswirkung dieses Effekts zu reduzieren, wird die Ausgleichung mehrmals mit unterschiedlichen Initialisierungen wiederholt.

Während sich die Kameras auf den in Abbildung 5.2 gezeigten Trajektorien be-

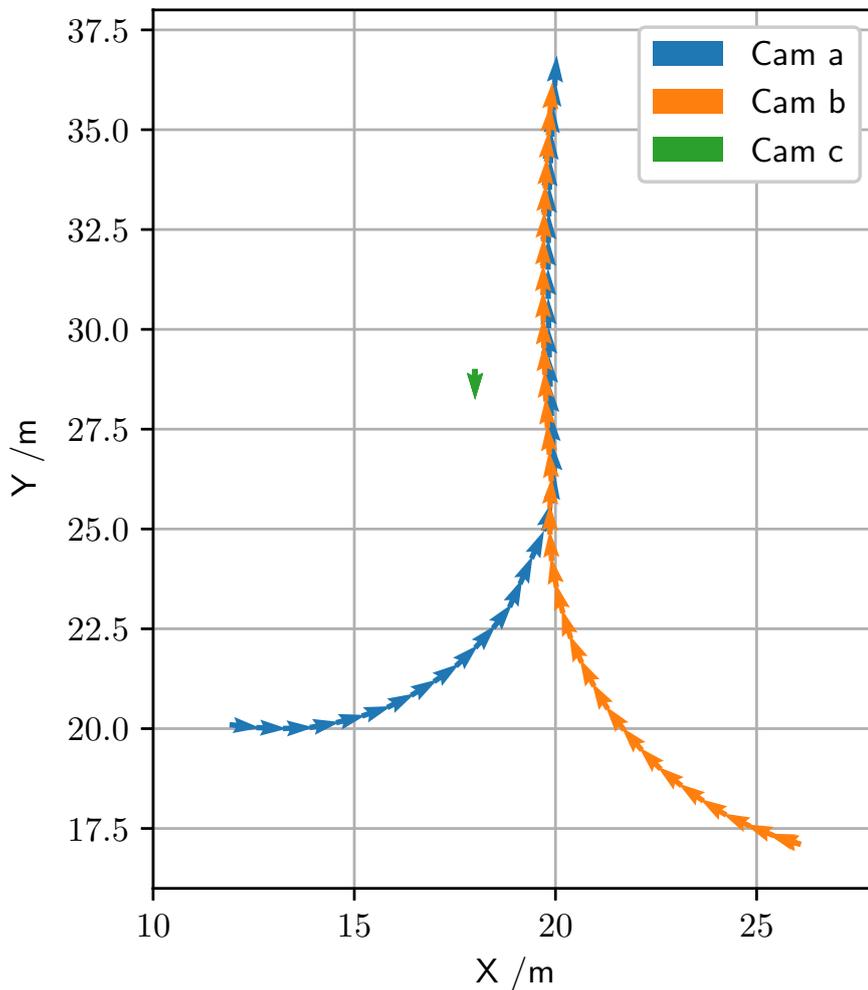


Abbildung 5.2: Trajektorien der Kameras in Szenario 1. Die Pfeile stellen die äußeren Orientierungen der Kameras im zweidimensionalen Koordinatensystem dar. Kamera Cam a bewegt sich zuerst. Sobald sie auf der gemeinsamen Fahrspur angekommen ist, folgt Kamera Cam b. Am Ende der Trajektorie wartet Cam a auf Cam b. Kamera Cam c beobachtet die Szene statisch.

wegen, werden Verknüpfungspunkte beobachtet. Die Anzahl dieser Verknüpfungspunkte pro Bild ist für den zeitlichen Verlauf der Trajektorie in Abbildung 5.3 gezeigt. Dabei ist zu beobachten, dass die Anzahl an Verknüpfungspunkten ungefähr in der Mitte der Trajektorie am höchsten ist. Die Sichtweite der Kamera ist in der Simulation nicht beschränkt. Daher ist die Anzahl zu Beginn der Trajektorie nur etwas geringer. Zum Ende der Trajektorie nimmt die Anzahl der beobachteten Verknüpfungspunkte ab, das Minimum ist am Ende der Trajektorie erreicht. Jede Kamera erfasst mindestens 26 Verknüpfungspunkte pro Bild.

Tabelle 5.2: Standardabweichungen der Beobachtungen in Szenario 1

Beobachtungstyp	Standardabweichung	Wert
Verknüpfungspunkt durch Kamera (x-Koordinate)	$\sigma_{Cam,x,TP}$	0,5 px
Verknüpfungspunkt durch Kamera (y-Koordinate)	$\sigma_{Cam,y,TP}$	0,5 px
Fahrzeug durch Kamera (x-Koordinate)	$\sigma_{Cam,x,Car}$	0,5 px
Fahrzeug durch Kamera (y-Koordinate)	$\sigma_{Cam,y,Car}$	0,5 px
GNSS X	$\sigma_{GNSS,X}$	1 m
GNSS Y	$\sigma_{GNSS,Y}$	1 m
GNSS Z	$\sigma_{GNSS,Z}$	1 m

Tabelle 5.3: Standardabweichungen der Normalverteilungen der initialen Werte der Unbekannten

Parameter	Standardabweichung	Wert
Position Kamera X_0	σ_{init,X_0}	0,5 m
Position Kamera Y_0	σ_{init,Y_0}	0,5 m
Position Kamera Z_0	σ_{init,Z_0}	0,5 m
Orientierung Kamera ω	$\sigma_{init,\omega}$	2°
Orientierung Kamera φ	$\sigma_{init,\varphi}$	2°
Orientierung Kamera κ	$\sigma_{init,\kappa}$	2°
Position Verknüpfungspunkt X	$\sigma_{init,X}$	0,5 m
Position Verknüpfungspunkt Y	$\sigma_{init,Y}$	0,5 m
Position Verknüpfungspunkt Z	$\sigma_{init,Z}$	0,5 m

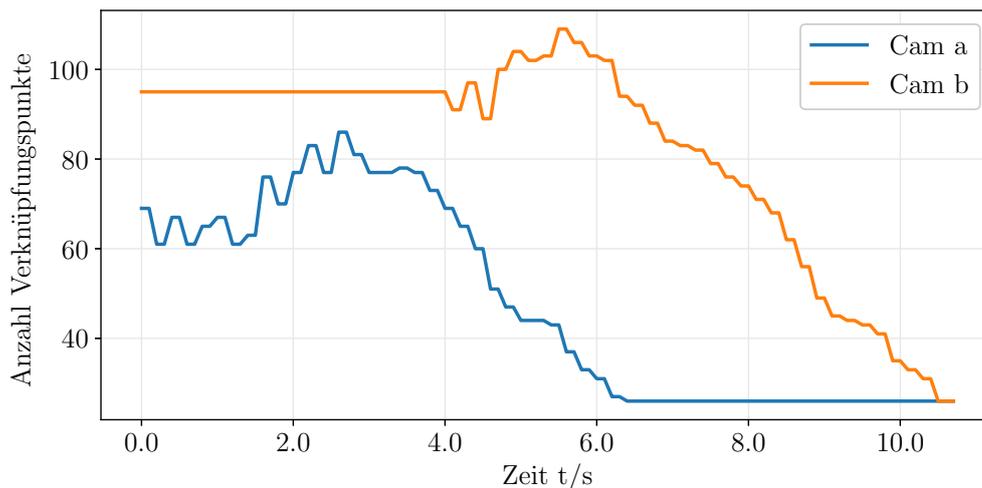


Abbildung 5.3: Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild in Szenario 1. Diese wird über den zeitlichen Verlauf des Szenarios dargestellt.

Im Folgenden wird das Szenario mit Cam a und Cam b untersucht. Der Einfluss bei der Verwendung der dritten Kamera Cam c wird in Abschnitt 5.2.3 untersucht.

5.2.1 Untersuchung der Präzision

Zunächst wird die Präzision der ausgeglichenen Parameter der BA betrachtet. Diese entspricht der Wurzel des entsprechenden Eintrags auf der Hauptdiagonalen der VKM der ausgeglichenen Parameter $\Sigma_{\hat{x}\hat{x}}$. Abbildung 5.4 zeigt die Präzision der geschätzten Positionen der beiden Kameras im Karten-Rahmen.

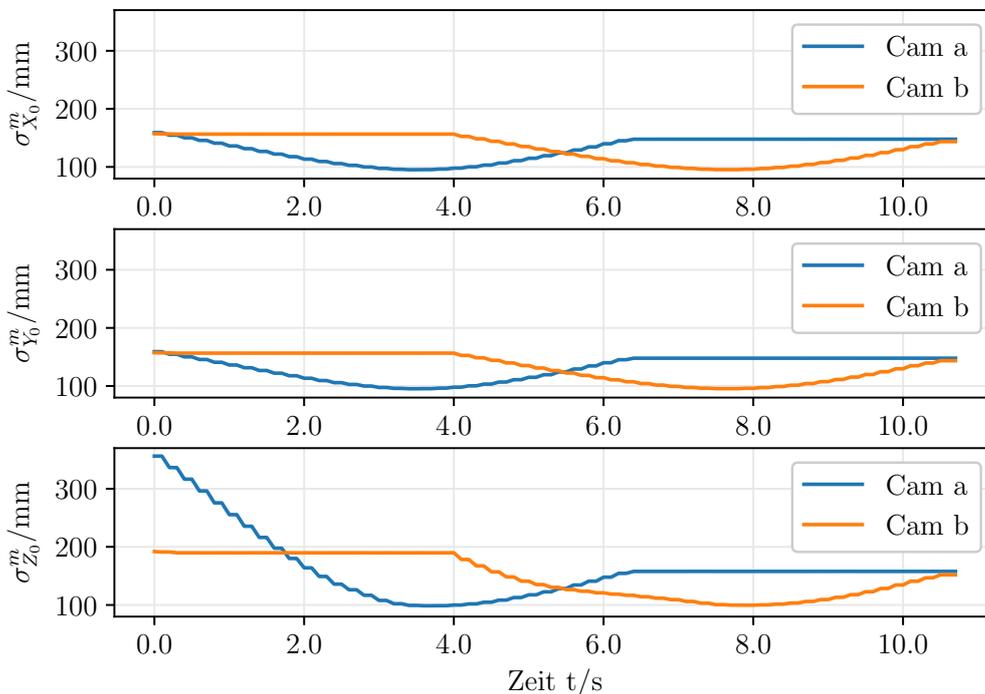


Abbildung 5.4: Präzision der geschätzten Positionen der Kameras in Szenario 1. Gezeigt sind in drei Darstellungen die Standardabweichungen der ausgeglichenen Positionen \mathbf{X}_0 beider Kameras über die Zeit. Für Zeitpunkte, zu denen keine Position geschätzt wurde, ist der Wert zwischen dem vorherigen und dem nachfolgenden Wert interpoliert. Die Standardabweichungen sind im Karten-Rahmen angegeben.

Im Verlauf der Präzision spiegelt sich der zeitliche Ablauf des Szenarios wider. Kamera Cam b steht bis ca. $t = 4$ s an ihrer Startposition. Kamera Cam a bewegt sich vom Start bis ca. $t = 6$ s. Für die Zeiten, in denen eine Kamera die Szene statisch beobachtet, kann die äußere Orientierung der entsprechenden Kamera durch die Ausgleichung mit einer nahezu konstanten Präzision bestimmt werden.

Die Präzision der Position verbessert sich für Kamera Cam a bis etwa zur Mitte der Trajektorie. Dabei ist eine Abhängigkeit der Präzision von der äußeren Orientierung der Kamera in der Szene und somit von den beobachteten Verknüpfungspunkten

zu erkennen. In Abbildung 5.2 sind die äußeren Orientierungen der Kameras in der X-Y-Ebene dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Präzision der Position bis zum Erreichen der finalen Ausrichtung der Kamera, ungefähr in Richtung der Y-Achse, ihr Maximum mit etwa 100 mm erreicht. Anschließend sinkt die Präzision in X- und Y-Richtung wieder fast bis zum Niveau der ersten Positionen auf etwa 150 mm an. Die Präzision in Z-Richtung ist mit etwa 360 mm für Cam a deutlich ungenauer bestimmt als in X- und Y-Richtung. Auch die Präzision von Cam b in Z-Richtung ist mit etwa 200 mm ungenauer als in X- und Y-Richtung. Das Maximum der Präzision in Z-Richtung liegt wie für die X- und Y-Richtung bei etwa 100 mm. Zum Ende der Trajektorie sinkt die Präzision in Z-Richtung geringfügig. Sie bleibt mit etwa 150 mm jedoch präziser als für die ersten Positionen und erreicht ungefähr die Präzision in X- und Y-Richtung.

Der Verlauf der Präzision der Winkel ist ebenfalls von der Position und Orientierung der Kameras bzw. den beobachteten Verknüpfungspunkten abhängig. Dies ist in Abbildung 5.5 zu sehen.

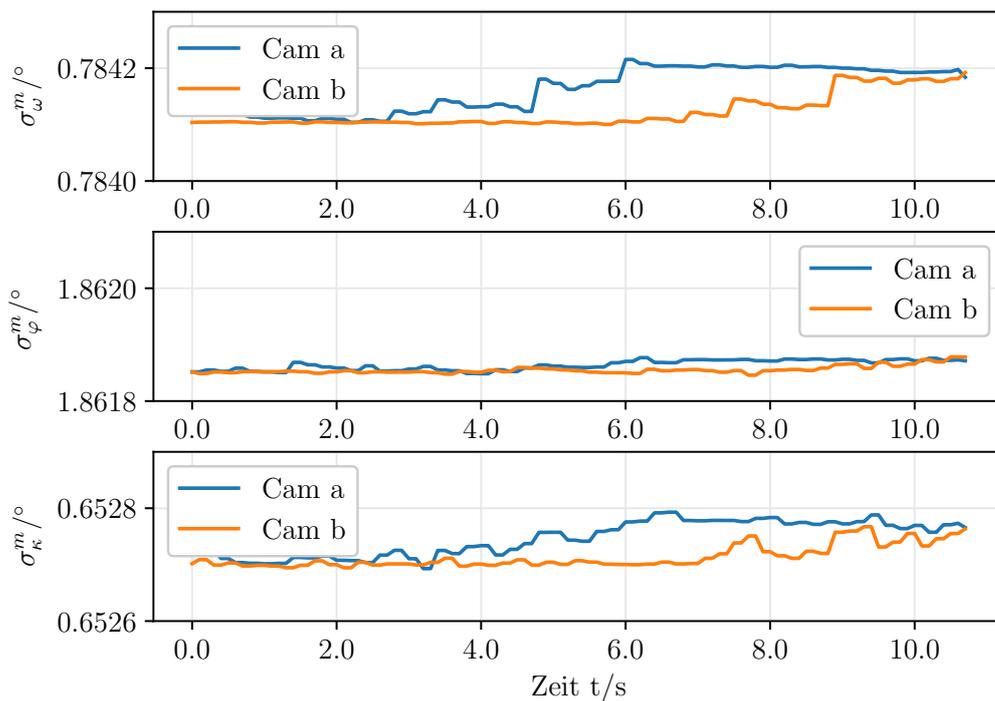


Abbildung 5.5: Präzision der geschätzten Orientierungen der Kameras in Szenario 1. Gezeigt sind in drei Darstellungen die Standardabweichungen der ausgeglichenen Orientierungen ω , φ und κ beider Kameras über die Zeit. Für Zeitpunkte, zu denen keine Position geschätzt wurde, ist der Wert zwischen dem vorherigen und dem nachfolgenden Wert interpoliert. Die Standardabweichungen sind im Karten-Rahmen angegeben. Die Wertebereiche der einzelnen Darstellungen variieren, die Skalierung ist jedoch identisch.

Werden die gleichen Verknüpfungspunkte aus der gleichen Blickrichtung von verschiedenen Kameras beobachtet, so ähnelt sich die Präzision der Orientierungen der Kameras. Dies ist am Verlauf von σ_{ω}^m zu sehen. Die Werte, welche Kamera Cam a in der Mitte des Szenarios annimmt, ähneln stark den Werten von Kamera Cam b gegen Ende des Szenarios. Insgesamt ist die Präzision der Orientierungen um die Y-Achse σ_{φ}^m mit $1,86^\circ$ deutlich ungenauer als die der Orientierungen um die X-Achse σ_{ω}^m mit etwa $0,78^\circ$ und um die Z-Achse σ_{κ}^m mit $0,65^\circ$. Obwohl keine Beobachtungen der Orientierungen der Kameras vorliegen, können diese trotzdem geschätzt werden. Insgesamt ist die Änderung der Präzision der Orientierungen über die Zeit nur gering.

Um die Präzision unabhängig von dem globalen Koordinatensystem des Karten-Rahmens analysieren zu können, werden die VKMs der Positionen der Kameras sowie der Orientierungen der Kameras in das jeweilige Kamerakoordinatensystem transformiert. Dies bietet sich besonders für Fahrzeuganwendungen an, da hierbei die Lokalisierung des Fahrzeugs die Hauptaufgabe darstellt. Dabei ist besonders die Unsicherheit des Ergebnisses quer zur Fahrtrichtung sowie entlang der Fahrtrichtung von Bedeutung. Die Unsicherheit quer zur Fahrtrichtung ist gleichbedeutend mit der Unsicherheit, sich auf der richtigen Fahrspur zu bewegen. Die Präzision entlang der Fahrtrichtung ist wichtig, um nicht mit folgenden oder vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern zu kollidieren. Abbildung 5.6 zeigt die Präzision der Positionen der Kameras, ausgedrückt im jeweiligen Kamerakoordinatensystem. Hierzu wird die in Abschnitt 4.2 eingeführte Gleichung (4.17) verwendet.

Die Präzision der Position in x' - und y' -Richtung des Kamerakoordinatensystems ist der Präzision im Karten-Rahmen sehr ähnlich. Dies liegt daran, dass die Werte der Präzision der Position in X- und Y-Richtung im Karten-Rahmen nahezu identisch sind. Somit sind die Fehlerellipsen der Positionen der Kameras in der X-Y-Ebene kreisförmig. Da sich die Kameras lediglich in der X-Y-Ebene des Karten-Rahmens bewegen, beschränkt sich die Rotation zwischen Karten-Rahmen und Kamerakoordinatensystem fast ausschließlich auf eine Rotation um die Z-Achse mit dem Winkel κ . Dies erklärt außerdem die Tatsache, dass die Präzision der Positionen in Z-Richtung des Karten-Rahmens und des Kamerakoordinatensystems identisch ist.

Abbildung 5.7 zeigt den Verlauf der Präzision der Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem. Dieser wird durch die Transformationsvorschrift in Gleichung (4.17) aus den VKMs der ausgeglichenen Orientierungen der Kameras berechnet. Die Präzision des Winkels κ um die Z-Achse bleibt annähernd konstant bei $0,65^\circ$. Hierfür gilt die gleiche Erklärung wie für die Transformation der Präzision der Position in Z-Richtung. Die Präzision der Winkel ω um die X-Achse sowie φ um die Y-Achse verändert sich mit dem Verlauf der Trajektorien. Kamera Cam a startet mit einer Ausrichtung der x' -Achse des Kamerakoordinatensystems entlang

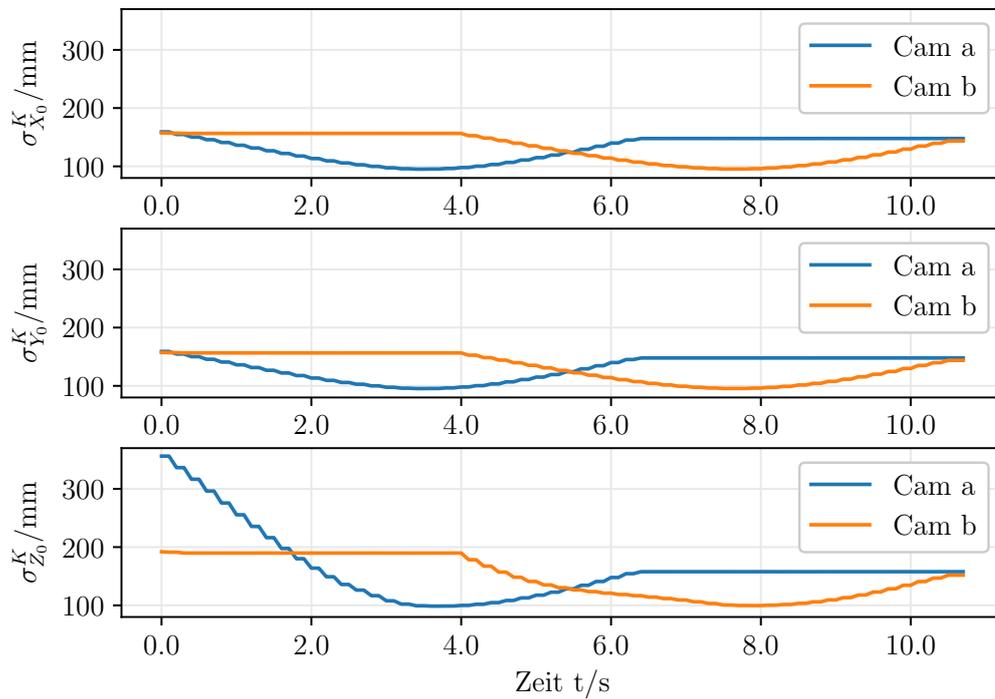


Abbildung 5.6: Präzision der geschätzten Positionen der Kameras in Szenario 1 im Kamerakoordinatensystem. Gezeigt sind in drei Darstellungen die Standardabweichungen der ausgeglichenen Positionen \mathbf{X}_0 beider Kameras über die Zeit. Diese sind in das jeweilige Kamerakoordinatensystem des entsprechenden Zeitpunkts transformiert. Für Zeitpunkte, zu denen keine Position geschätzt wurde, ist der Wert zwischen dem vorherigen und dem nachfolgenden Wert interpoliert.

der X-Achse des Karten-Rahmens. Daher entspricht auch die Präzision σ_{ω}^K zu Beginn des Szenarios mit etwa 1° derjenigen im Karten-Rahmen σ_{ω}^m . Zum Ende der Trajektorie ist die x' -Achse des Kamerakoordinatensystems entlang der Y-Achse des Karten-Rahmens orientiert. Daher entspricht die Präzision σ_{ω}^K mit etwa $1,7^\circ$ ungefähr der Präzision des Winkels um die Y-Achse σ_{φ}^m im Karten-Rahmen. Ein ähnliches Verhalten lässt sich für Kamera Cam b beobachten.

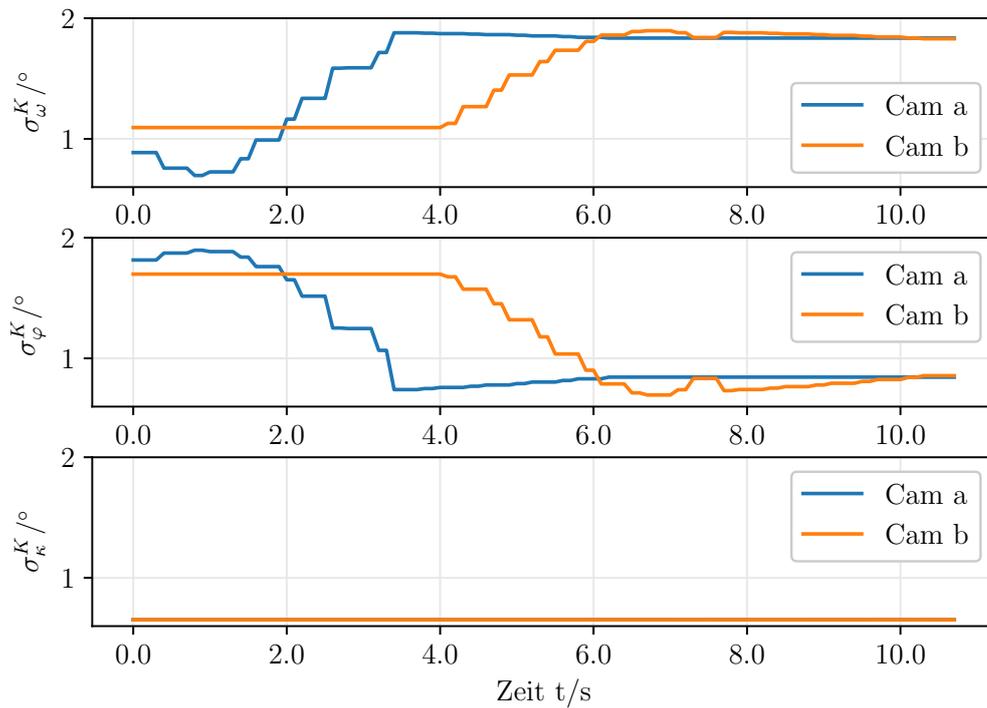


Abbildung 5.7: Präzision der geschätzten Orientierungen der Kameras in Szenario 1 im Kamerakoordinatensystem. Gezeigt sind in drei Darstellungen die Standardabweichungen der ausgeglichenen Orientierungen ω , φ und κ beider Kameras über den zeitlichen Verlauf des Szenarios. Für Zeitpunkte, zu denen keine Position geschätzt wurde, ist der Wert zwischen dem vorherigen und dem nachfolgenden Wert interpoliert. Die Standardabweichungen sind im Kamerakoordinatensystem der jeweiligen Kamera zum entsprechenden Zeitpunkt angegeben.

5.2.2 Untersuchung der Genauigkeit

Die Präzision berücksichtigt nur die zufälligen Fehler. Dies umfasst im Fall der BA die zufälligen Abweichungen der Beobachtungen. Die Genauigkeit hingegen enthält zusätzlich systematische Abweichungen und stellt somit die Möglichkeit zur Untersuchung des Gesamtfehlers der Lösung eines Ausgleichungsproblems dar. Dies ist in DIN ISO 5725 (*Statistik - Genauigkeit von Messungen - Ringversuche : Normen, DIN-Taschenbuch 2004*) beschrieben.

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, wird zur Untersuchung der Genauigkeit der RMSE verwendet. Da die Lösung der Ausgleichung abhängig von den verrauschten Beobachtungen ist, wird die Ausgleichung zehn Mal wiederholt. In jeder Wiederholung werden zufällig generierte Beobachtungen und Startwerte verwendet. Anschließend wird der RMSE nicht nur wie in Gleichung (4.15) über alle Punkte i berechnet, sondern zusätzlich auch über alle Wiederholungen gemittelt. Somit kann der Einfluss des Rauschens der Beobachtungen auf das Ergebnis verringert werden.

Der RMSE wird, wie die Präzision, für alle Kameras separat berechnet. Zusätzlich wird zwischen den einzelnen Parametern der äußeren Orientierung unterschieden. Tabelle 5.4 zeigt den RMSE der Position der Kameras im Karten-Rahmen. Es ist zu sehen, dass die Positionen und Orientierungen beider Kameras im Karten-Rahmen ähnlich genau bestimmt werden können. Tabelle 5.5 zeigt ebenfalls den RMSE der Position, jedoch berechnet im Kamerakoordinatensystem. Hier werden die Orientierungen der Kameras mit sehr ähnlicher Genauigkeit bestimmt. Bei der Position hingegen ist die Abweichung von der Ground Truth in X- und Y-Richtung für beide Kameras unterschiedlich. Cam a hat eine stärkere Abweichung in X-Richtung während Cam b eine stärkere Abweichung in Y-Richtung hat. Die Werte des RMSE sind niedriger als die jeweilige Präzision.

Wie bereits bei der Präzision ist auch beim RMSE aufgrund der Trajektorie der Kameras keine Veränderung in den Werten der Position in Z-Richtung sowie bei der Orientierung um die Z-Achse zu sehen. Insgesamt liegt der RMSE sowohl der Positionen als auch der Orientierungen unter der Präzision.

Tabelle 5.6 zeigt den RMSE der ausgeglichenen Positionen der Verknüpfungspunkte. Hierbei fällt auf, dass die Werte höher sind als für die Positionen der Kameras.

Um den Verlauf der Genauigkeit beurteilen zu können, wird die absolute Abweichung zwischen den geschätzten äußeren Orientierungen und der Ground Truth bestimmt. Dies wird in Abbildung 5.8 für die Positionen dargestellt. Auch hierbei wird die absolute Abweichung über alle zehn Wiederholungen der Ausgleichung gemittelt. Während der Zeiten, in denen die Kameras sich nicht bewegen, kann die Position mit einem konstanten Fehler geschätzt werden, ähnlich zum Verlauf der Präzision. Auch der weitere Verlauf ähnelt dem der Präzision. So ist die ab-

Tabelle 5.4: RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Karten-Rahmen in Szenario 1. Dabei wird der RMSE für die einzelnen Parameter der äußeren Orientierung sowie jede Kamera separat angegeben.

Parameter	RMSE Cam a	RMSE Cam b
X_0	66,8 mm	61,6 mm
Y_0	128,2 mm	115,0 mm
Z_0	74,4 mm	68,6 mm
ω	0,40°	0,40°
φ	0,54°	0,54°
κ	0,28°	0,28°

Tabelle 5.5: RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1. Dabei wird der RMSE für die einzelnen Parameter der äußeren Orientierung sowie jede Kamera separat angegeben.

Parameter	RMSE Cam a	RMSE Cam b
X_0	130,1 mm	97,4 mm
Y_0	63,1 mm	86,7 mm
Z_0	74,4 mm	68,6 mm
ω	0,50°	0,51°
φ	0,45°	0,45°
κ	0,27°	0,29°

Tabelle 5.6: RMSE der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen in Szenario 1. Dabei wird der RMSE für die einzelnen Koordinaten angegeben.

Koordinate	X	Y	Z
RMSE	130,2 mm	190,2 mm	139,2 mm

solute Abweichung am geringsten, wenn die Kameras in der Mitte des Szenarios positioniert sind. Insgesamt ist zu sehen, dass die äußeren Orientierungen der Kameras, wie schon beim RMSE, genauer als die Präzision geschätzt werden können. Zudem liegen keine Ausreißer vor, wobei diese durch die Mittlung über alle zehn Wiederholungen der Ausgleichung ebenfalls abgeschwächt worden sein könnten.

Abbildung 5.9 zeigt die absolute Abweichung der Orientierungen von der Ground Truth im Kamerakoordinatensystem. Auch hier sind Gemeinsamkeiten zum Verlauf der Präzision in Abbildung 5.7 zu sehen. So steigt die Abweichung $\Delta\omega^K$ für Cam a zunächst, während $\Delta\varphi^K$ sinkt. Für Cam b ist mit zeitlichem Verzug ein ähnliches Verhalten zu sehen. Zum Ende der Trajektorie nähern sich sowohl $\Delta\omega^K$ als auch $\Delta\varphi^K$ beider Kameras an. Die absolute Abweichung der Orientierungen beträgt über den Verlauf gesehen etwa 30% der Präzision.

Abbildung 5.10 zeigt die absolute Abweichung der Positionen der Verknüpfungs-

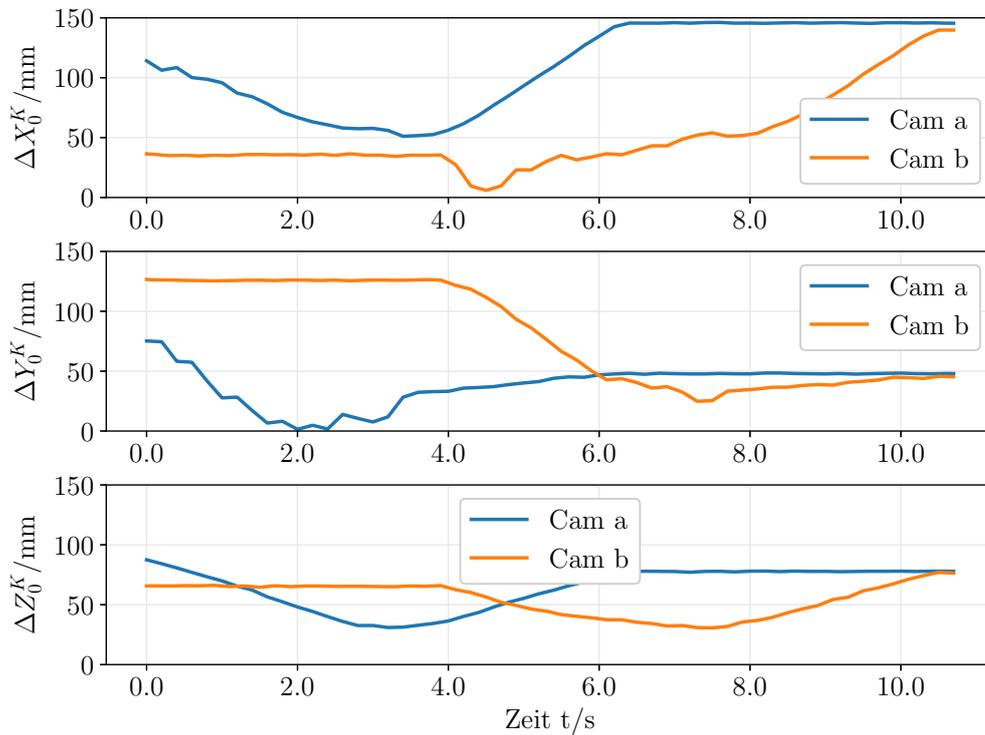


Abbildung 5.8: Absolute Differenz der Positionen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1. Dargestellt ist die absolute Abweichung zwischen den geschätzten Positionen und der Ground Truth in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf des Szenarios.

punkte. Dafür wird die euklidische Distanz zwischen der geschätzten Position und der wahren Position jedes Verknüpfungspunkts berechnet. Dieser Wert wird über alle zehn Wiederholungen gemittelt. Es ist zu sehen, dass einzelne Verknüpfungspunkte besser geschätzt werden können als andere. Zudem werden nur wenige Positionen der Verknüpfungspunkte mit einer absoluten Abweichung von mehr als 0,4 m geschätzt, welche deutlich über dem RMSE liegt.

Abbildung 5.11 zeigt die Positionen in der X-Y Ebene des Karten-Rahmens der jeweils 20% Verknüpfungspunkte mit den geringsten und höchsten absoluten Differenzen zu den Referenzpositionen. Es werden vor allem Punkte, welche nur aus einer Richtung beobachtet werden, schlechter geschätzt. Dies ist am Ende der Trajektorie zu sehen. Diese Punkte werden zudem nur aus einer gewissen Entfernung beobachtet, was für die Verknüpfungspunkte direkt am Ende der Trajektorie nicht der Fall ist. Außerdem handelt es sich hierbei um Verknüpfungspunkte, welche nur in wenigen Bildern beobachtet werden. Dies ist im unteren Bildteil zu sehen. Die Verknüpfungspunkte in der Mitte der Trajektorie werden in vielen Bildern aus einer geringen Entfernung beobachtet und das zusätzlich aus verschiedenen Perspektiven. Daher ist die absolute Abweichung hier am geringsten.

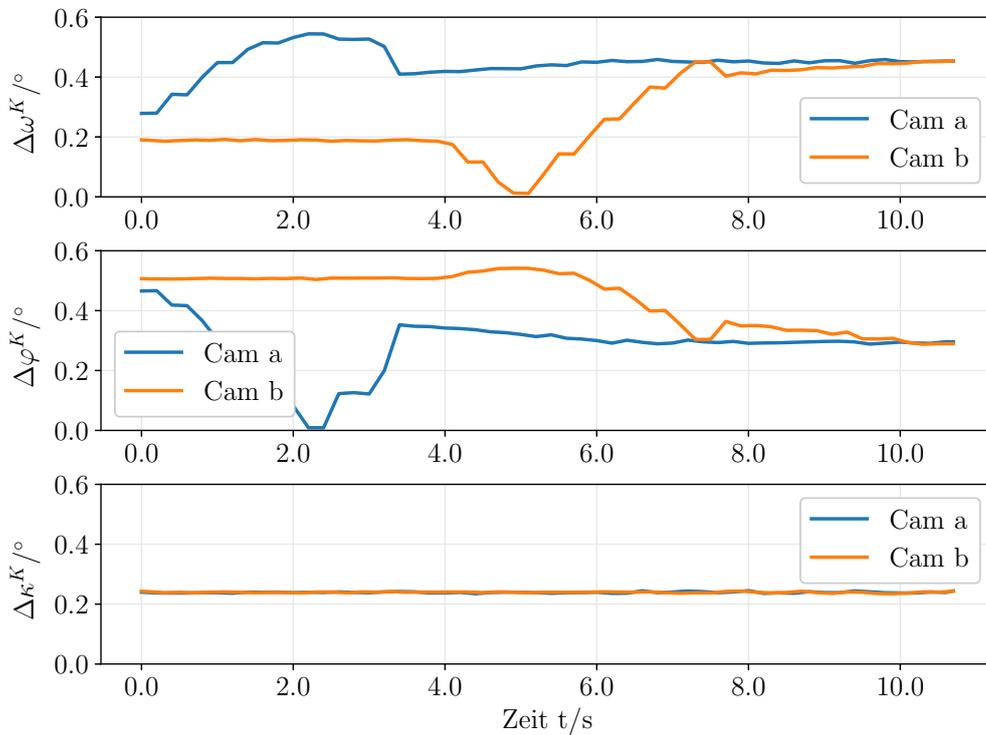


Abbildung 5.9: Absolute Differenz der Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1. Dargestellt ist die absolute Abweichung zwischen der geschätzten Orientierungen und der Ground Truth in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf des Szenarios. Der Verlauf von Cam a wird für $\Delta\kappa^K$ vom Verlauf von Cam b überdeckt.

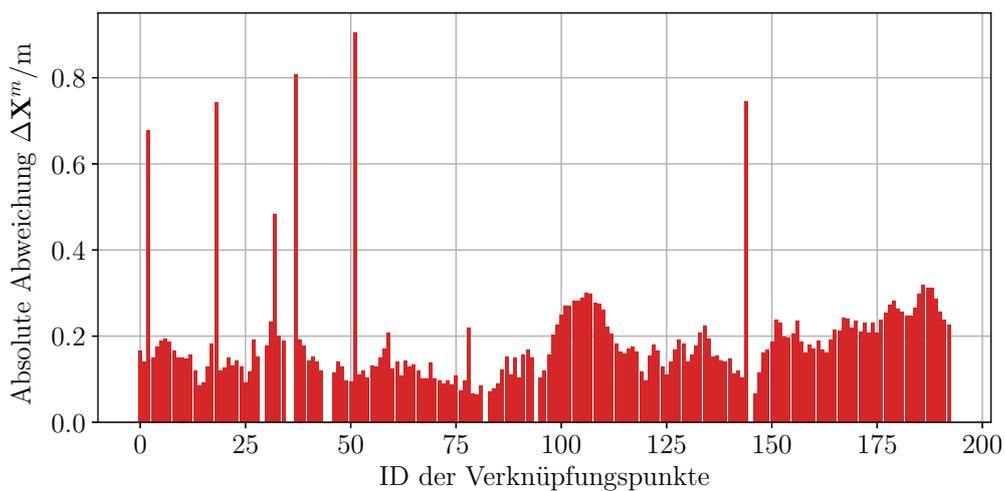


Abbildung 5.10: Absolute Abweichung der Positionen der Verknüpfungspunkte in Szenario 1. Dargestellt ist die absolute Abweichung zwischen der geschätzten Position und der Ground Truth der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen.

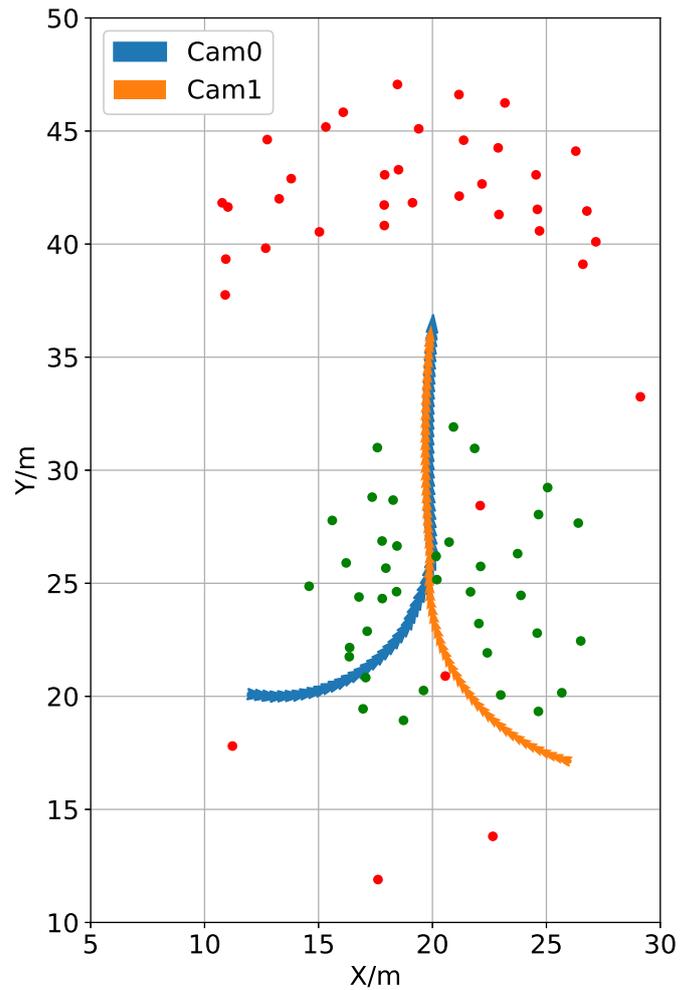


Abbildung 5.11: Positionen der Verknüpfungspunkte mit der höchsten und geringsten absoluten Abweichung in Szenario 1. Dargestellt sind die Positionen der 20% Verknüpfungspunkte mit der geringsten (grün) und höchsten (rot) absoluten Abweichung zwischen der geschätzten Position und der Ground Truth im Karten-Rahmen. Die Trajektorien der Kameras entsprechen denen in Abbildung 5.2

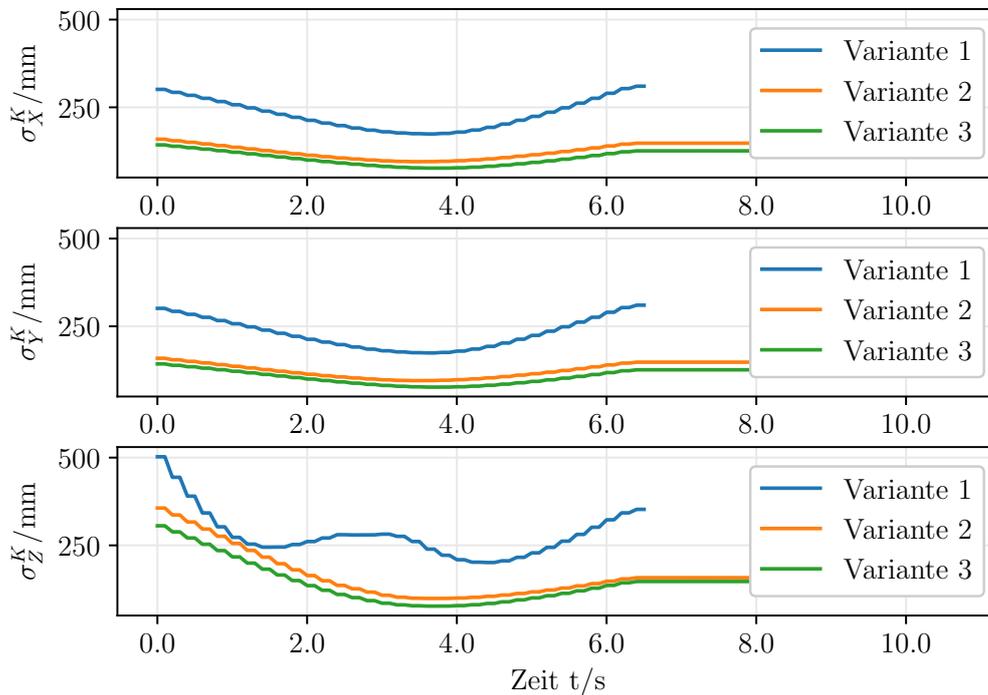


Abbildung 5.12: Präzision der Positionen von Kamera Cam a im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1 mit unterschiedlichen Varianten. Gezeigt wird die Präzision in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf des Szenarios.

5.2.3 Einfluss der kooperativen Lokalisierung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Kooperation zwischen den Kameras untersucht. Dazu wird die Anzahl der Kameras in dem Szenario variiert. Zum einen wird im Vergleich zur obigen Auswertung das Szenario nur mit Kamera Cam a gefahren. Zum anderen wird eine zusätzliche, statische Kamera eingefügt, welche zusätzliche Beobachtungen liefert. Dadurch soll eine Einschätzung ermöglicht werden, inwiefern das Konzept der kooperativen Lokalisierung das Ergebnis der BA einer einzelnen Kamera verbessern kann.

Abbildung 5.12 zeigt den Verlauf der Präzision der Position der Kameras in unterschiedlichen Varianten des Szenarios. Variante 1 entspricht der Fahrt von Kamera Cam a ohne weitere Kameras in der Szene. Variante 2 stellt das oben bereits ausgewertete Szenario mit Kamera Cam a und Kamera Cam b dar. In Variante 3 wird dieses zusätzlich um Kamera Cam c ergänzt, wobei diese die Szene statisch beobachtet. Bei Variante 1 entfällt die Phase des Stillstands am Ende des Szenarios, da nur eine Kamera vorhanden ist und nicht der Ablauf der Trajektorie einer anderen

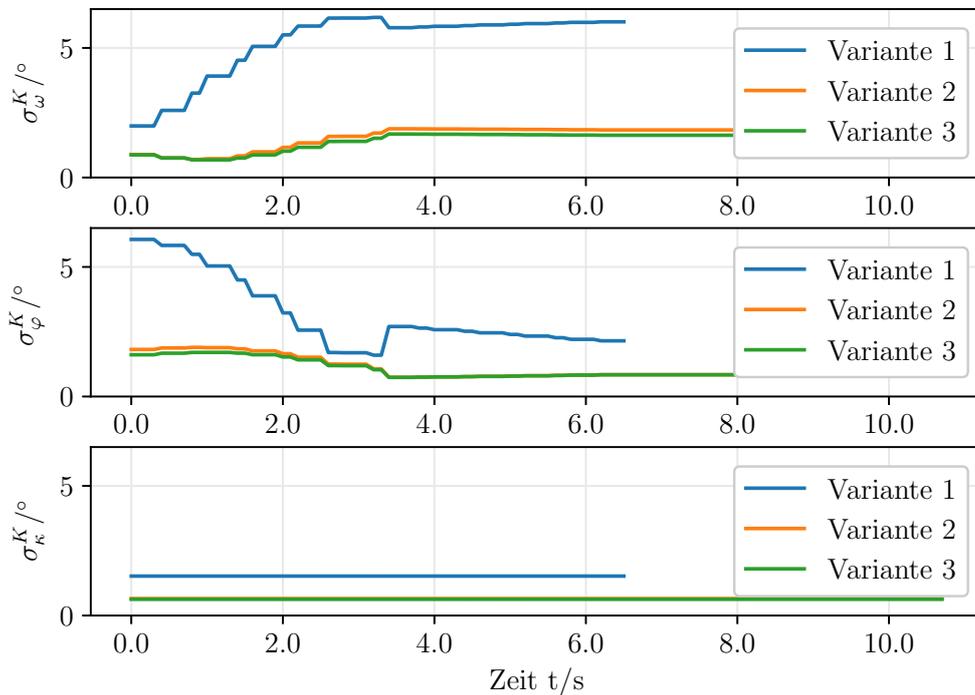


Abbildung 5.13: Präzision der Orientierungen von Kamera Cam a im Kamerakoordinatensystem in Szenario 1 mit unterschiedlichen Varianten. Gezeigt wird die Präzision in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf des Szenarios. Der Verlauf von Variante 3 überdeckt in dieser Skalierung den Graphen von Variante 2 für σ_{κ}^K .

Kamera abgewartet wird. Die Beobachtungen im Stillstand liefern, wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, keine zusätzlichen geometrischen Informationen. Wie in Variante 2 und 3 zu sehen ist, bleibt die Präzision in diesem Fall konstant.

Es ist zu sehen, dass die Kooperation von mindestens zwei Kameras das Ergebnis deutlich verbessert. Die Präzision in X- und Y-Richtung im Kamerakoordinatensystem kann ungefähr um 50% erhöht werden. Die Präzision in Z-Richtung kann ebenfalls um etwa 40% verbessert werden. Weiterhin ist auffällig, dass eine dritte Kamera das Ergebnis nicht in dem gleichen Maß verbessern kann wie die zweite Kamera. Hier ist die Verbesserung mit etwa 15% in X- und Y-Richtung sowie 10% in Z-Richtung deutlich geringer. Die kooperative Lösung verhindert ebenfalls, dass sich die Präzision der Z-Koordinate während einer Kurve verschlechtert. Dies ist in Variante 1 ungefähr in der Mitte des Szenarios der Fall, während dieser Effekt bei Variante 2 und 3 nicht auftritt.

Abbildung 5.13 zeigt die Präzision der Orientierungen von Kamera Cam a in den Varianten des ersten Szenarios. Das Verhalten ähnelt dem der Präzision der Positionen in Abbildung 5.12. Die Kooperation verbessert das Ergebnis maßgeblich. Die Präzision der Orientierungen um die X- sowie Z-Achse kann um etwa 70% bzw.

60% verbessert werden. Die Präzision der Orientierungen um die Y-Achse kann ebenfalls um 60% verbessert werden. Die Verbesserung zwischen Variante 2 und 3 fällt mit durchschnittlich 7% auch bei der Präzision der Orientierungen sehr gering aus.

Tabelle 5.7: RMSE der äußeren Orientierungen von Kamera Cam a im Kamerakordinatensystem. Dabei wird der RMSE für die einzelnen Parameter der äußeren Orientierung sowie jede Variante des Szenarios separat angegeben.

Parameter	RMSE Cam a		
	Variante 1	Variante 2	Variante 3
X_0	161,4 mm	130,1 mm	128,2 mm
Y_0	141,3 mm	63,1 mm	51,5 mm
Z_0	141,9 mm	74,4 mm	67,4 mm
ω	1,08°	0,50°	0,62°
φ	0,88°	0,44°	0,40°
κ	0,59°	0,28°	0,32°

Tabelle 5.8: RMSE der Positionen der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen für die Varianten von Szenario 1. Dabei wird der RMSE für die einzelnen Koordinaten angegeben.

Koordinate	X	Y	Z
RMSE Variante 1	243,8 mm	321,1 mm	264,6 mm
RMSE Variante 2	130,2 mm	190,2 mm	139,2 mm
RMSE Variante 3	144,0 mm	183,7 mm	158,4 mm

Neben der Präzision wird ebenfalls die absolute Genauigkeit der drei Varianten untersucht. Tabelle 5.7 zeigt den RMSE der Positionen sowie der Orientierungen von Kamera Cam a in den drei Varianten von Szenario 1. Auch der Vergleich der absoluten Genauigkeit in Form des RMSE zeigt eine deutliche Verbesserung, sobald mehr als eine Kamera für die BA verwendet wird. So wird der RMSE bei der Kooperation zweier Kameras im Vergleich zur Lösung mit einer Kamera für die Orientierung um etwa 50% verbessert. Der RMSE für die Position X_0 entlang der Fahrtrichtung verringert sich um 20%. Für die Position quer zur Fahrtrichtung entlang der Y-Achse und entlang der Z-Achse ist die Verbesserung mit etwa 50% noch deutlicher. Der Unterschied zwischen der Verwendung von zwei bzw. drei Kameras ist nicht eindeutig. Dies kann daran liegen, dass die Szenarien nur zehn Mal gefahren werden und somit immer noch eine Abhängigkeit von den verrauschten Werten der Beobachtungen besteht. Die Präzision in Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 zeigt jedoch auch nur eine sehr geringe Verbesserung, sodass hier keine deutlichen Verbesserungen der Lokalisierung möglich sind. Zudem sind die Szenarien, in denen sich drei oder mehr Fahrzeuge gegenseitig beobachten, in der Regel auf

Kreuzungen beschränkt. Daher wird im folgenden Szenario 2 die kooperative Lokalisierung durch zwei Kameras in einem Verfolgungsszenario genauer untersucht. Tabelle 5.8 zeigt den RMSE der Positionen der Verknüpfungspunkte für die drei Varianten von Szenario 1. Die Werte für Variante 1 sind höher als die der Varianten 2 und 3. Auch hier zeigt sich eine Verbesserung bei der kooperativen Lokalisierung um etwa 45%. Bei der Kooperation von drei Kameras verschlechtern sich die Werte leicht im Vergleich zur Kooperation zweier Kameras.

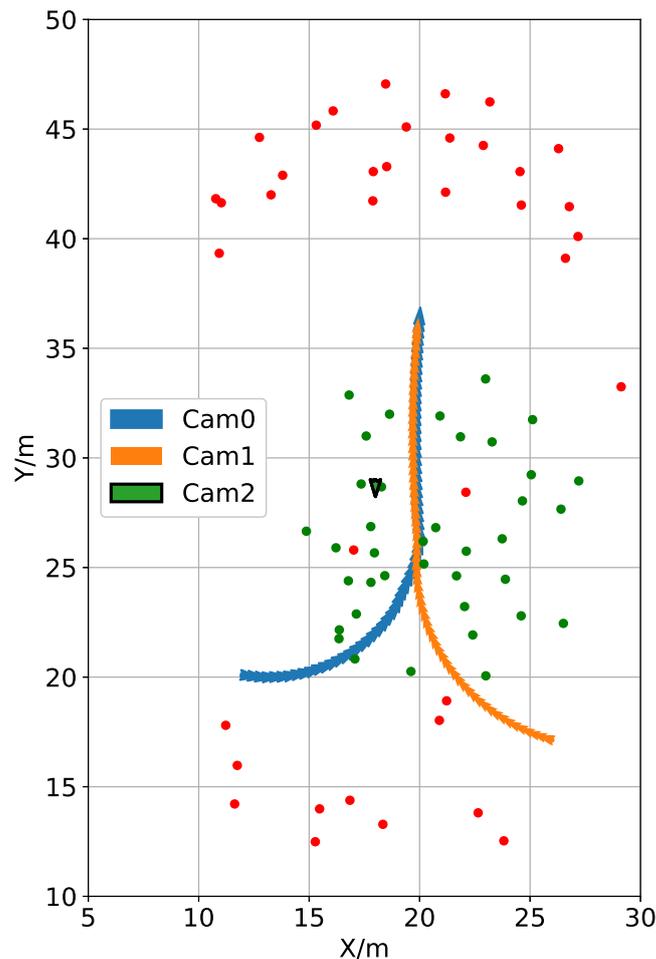


Abbildung 5.14: Positionen der Verknüpfungspunkte mit der höchsten und geringsten absoluten Abweichung für Variante 3 von Szenario 1. Dargestellt sind die Positionen der 20% Verknüpfungspunkte mit der geringsten (grün) und höchsten (rot) absoluten Abweichung zwischen der geschätzten Position und der Ground Truth im Karten-Rahmen. Die Trajektorien der Kameras entsprechen denen in Abbildung 5.2

Abbildung 5.14 zeigt einen Ausschnitt der Darstellung der 20% Verknüpfungspunkte mit der höchsten und niedrigsten absoluten Abweichung zur Ground Truth. In Abbildung 5.15 ist die absolute Abweichung der Positionen der Verknüpfungspunkte

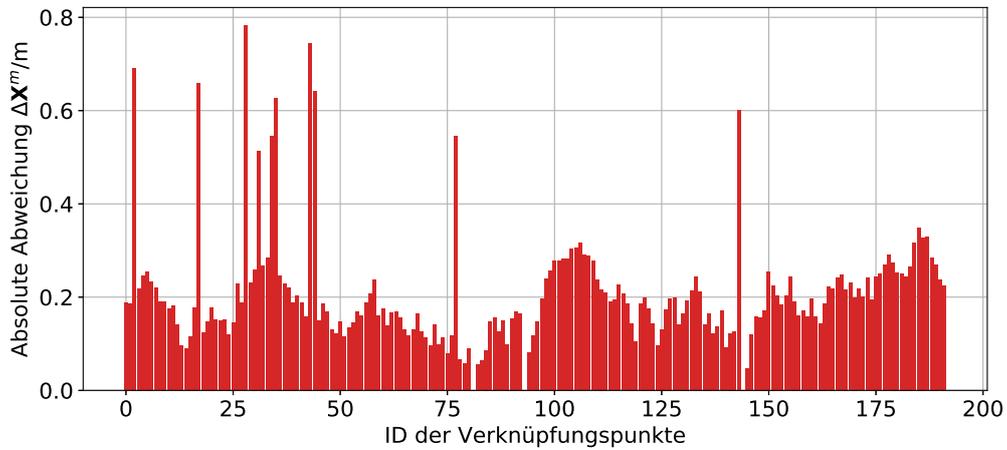


Abbildung 5.15: Absolute Abweichung der Positionen der Verknüpfungspunkte für Variante 3 von Szenario 1. Dargestellt ist die absolute Abweichung zwischen der geschätzten Position und der Ground Truth der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen.

von der Ground Truth abgebildet. Hier sind im Vergleich zu Variante 2 in Abbildung 5.10 mehr Verknüpfungspunkte mit einer hohen absoluten Abweichung von mehr als 0,4m zu sehen, allerdings treten auch keine Werte größer als 0,8m auf. Durch die dritte Kamera können mehr Verknüpfungspunkte beobachtet werden.

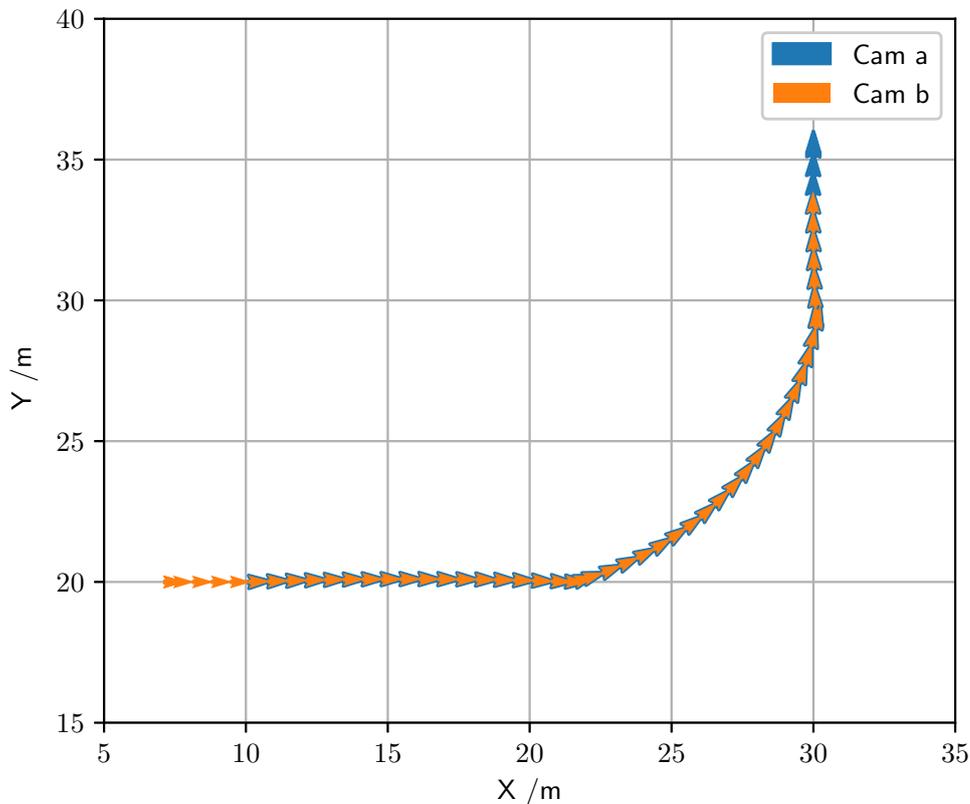


Abbildung 5.16: Trajektorien der Kameras in Szenario 2. Die Pfeile stellen die äußeren Orientierungen der Kameras in der X-Y Ebene des Kartenrahmens dar. Beide Kameras bewegen sich nach einer kurzen Wartezeit zu Beginn gleichzeitig in konstantem Abstand zueinander.

5.3 Szenario 2: Verfolgung

Dieses Szenario beschreibt eine Verfolgung zweier Fahrzeuge. Wenn beide Kameras in Fahrtrichtung ausgerichtet sind, kann eine Kamera die andere Kamera permanent beobachten. Unter der Annahme, dass eine Kamera rückwärts gerichtet ist, können beide Kameras sich gegenseitig beobachten. Beide Möglichkeiten werden im Folgenden untersucht und verglichen. Abbildung 5.16 zeigt die Trajektorien beider Kameras. Es gibt insgesamt 62 Bilder pro Kamera. Zusätzlich stehen pro Kamera 43 GNSS Beobachtungen zur Verfügung. Kamera Cam a fährt auf der Trajektorie vor Kamera Cam b. Diese folgt Kamera Cam a nach einer kurzen Wartezeit zu Beginn der Trajektorie. Anschließend bewegen sich beide Kameras mit konstantem Abstand von ca. sieben Metern entlang der Trajektorie. Die Gesamtlänge der Trajektorie beträgt ca. 42 Meter. Die Höhe von Cam a beträgt 1,8 m und die Höhe von Cam b beträgt 1,5 m.

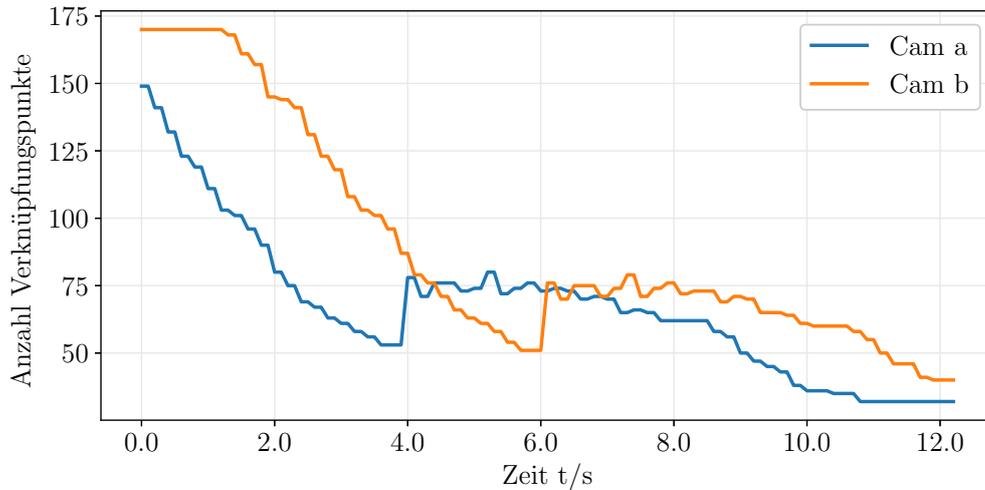


Abbildung 5.17: Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild in Szenario 2. Diese wird über den zeitlichen Verlauf des Szenarios dargestellt.

Der Aufbau des Szenarios entspricht dem von Szenario 1. Zur Bestimmung der initialen Werte werden die Werte der Ground Truth mithilfe einer Normalverteilung verrauscht. Die entsprechenden angenommenen Standardabweichungen werden von Szenario 1 übernommen und sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Die Werte für das angenommene Beobachtungsrauschen werden ebenfalls von Szenario 1 übernommen und sind in Tabelle 5.2 beschrieben. Auch hier wird für die Kameraspezifikationen die *Bosch Multi purpose camera* verwendet, die Spezifikationen sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Die Anzahl der beobachteten Verknüpfungspunkte jeder Kamera ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Die Verknüpfungspunkte sind in einem Bereich mit einer Breite von 16 m entlang der Trajektorie zufällig verteilt. Die Trajektorie stellt dabei die Mittellinie dieses Bereichs dar. Am Ende der Trajektorie sind die Verknüpfungspunkte bis zu einem Radius von 10 m verteilt. Die höchste Anzahl an Verknüpfungspunkten wird am Anfang der Trajektorie beobachtet. Die Anzahl nimmt bis zum Beginn der Kurve ab, in der Kurve erhöht sich die Anzahl der beobachteten Verknüpfungspunkte wieder. Anschließend nimmt die Anzahl bis zum Ende der Trajektorie wieder ab. Es werden von Kamera Cam a mindestens 32 Verknüpfungspunkte pro Bild beobachtet, von Kamera Cam b mindestens 42.

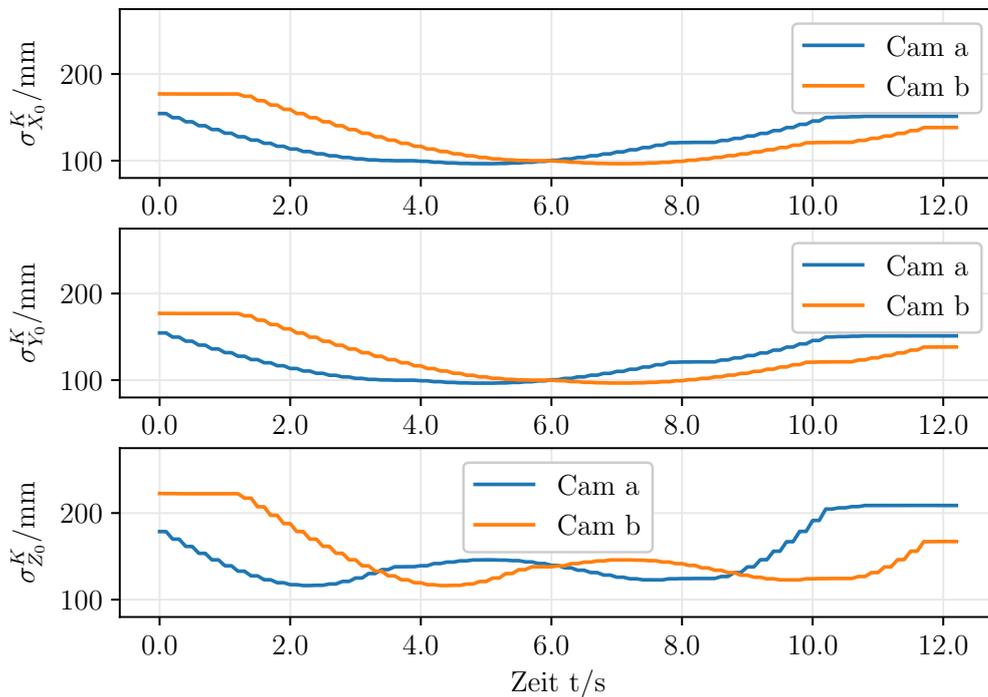


Abbildung 5.18: Präzision der geschätzten Positionen der Kameras in Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem. Gezeigt sind in drei Darstellungen die Standardabweichungen der ausgeglichenen Positionen X_0 beider Kameras über die Zeit. Diese sind in das jeweilige Kamerakoordinatensystem des entsprechenden Zeitpunkts transformiert. Für Zeitpunkte, an denen keine Position geschätzt wurde, ist der Wert zwischen dem vorherigen und dem nachfolgenden Wert interpoliert.

5.3.1 Präzision

Die Präzision der ausgeglichenen Positionen der Kameras wird in Abbildung 5.18 dargestellt. Die Werte sind auf das Kamerakoordinatensystem bezogen. Der Verlauf der Präzision für beide Kameras ist sehr ähnlich, findet jedoch zeitlich versetzt statt. So folgt der Verlauf der Präzision von Kamera Cam b dem von Kamera Cam a mit einem Verzug von zwei Sekunden. Dieser Verzug resultiert aus der Wartezeit von Kamera Cam b sowie dem Abstand der beiden Kameras zu Beginn des Szenarios. Daraus lässt sich schließen, dass die Kameras an gleichen Positionen sich mit gleicher Präzision lokalisieren können. Die Präzision der X- und Y-Koordinate der Kamera erreicht in der Mitte der Trajektorie mit etwa 100 mm ihr Maximum. Zu Beginn und zum Ende der Trajektorie können die Positionen der Kameras mit einer schlechteren Präzision bestimmt werden. Zu Beginn liegt diese für Cam a bei etwa 160 mm in X- und Y-Richtung, für Cam b bei etwa 180 mm. Am Ende der Trajekto-

rie liegt die Präzision in X- und Y-Richtung bei etwa 150 mm für Cam a und etwa 140 mm für Cam b. Der generelle Verlauf ist auch für die Präzision der Z-Koordinate zu sehen. Allerdings verschlechtert sich die Präzision hier in der Mitte der Trajektorie, wenn sich die Kamera in der Kurve befindet. So befindet sich das Maximum der Präzision der Z-Koordinate mit etwa 115 mm vor der Kurve zum Beginn der Trajektorie. Zudem ist die Präzision der Z-Koordinaten insgesamt um etwa 20% schlechter als die der X- und Y-Koordinaten. Der Wertebereich der Präzision befinden sich in einem ähnlichen Bereich wie in Szenario 1.

Abbildung 5.19 zeigt die Präzision der Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem. Auch hier lässt sich die zeitliche Verschiebung der Präzision der Kameras wie bei der Präzision der Positionen erkennen. Die Präzision der Orientierungen um die Z-Achse mit dem Winkel κ ist wie in Szenario 1 konstant und liegt bei etwa $0,5^\circ$. Die Präzision der Winkel ω und φ verläuft in Abhängigkeit von der Position und Orientierung der Kameras. Zu Beginn der Trajektorie liegt die Präzision σ_ω^K für beide Kameras bei etwa $1,5^\circ$ und σ_φ^K beträgt etwa 1° . In der Kurve verschlechtert sich die Präzision σ_ω^K zunächst auf etwa $1,7^\circ$, während sich σ_φ^K auf etwa $0,6^\circ$ verbessert. Mit dem Verlauf der Kurve kehrt sich dieses Phänomen um. Zum Ende der Trajektorie ist die Präzision σ_ω^K ähnlich hoch wie σ_φ^K zu Beginn der Trajektorie. Die Präzision σ_φ^K hingegen ist am Ende der Trajektorie in etwa so hoch wie σ_ω^K zu Beginn. Die Korrelation zwischen ω und φ im Kamerakoordinatensystem wird aus der VKM der ausgeglichenen Orientierung $\Sigma_{\hat{x}\hat{x},3\times 3}^K$ für jede äußere Orientierung der Kameras berechnet. Dabei nimmt die Korrelation $\rho_{\omega\varphi}$ für jede äußere Orientierung der Kameras den Wert 0,76 an.

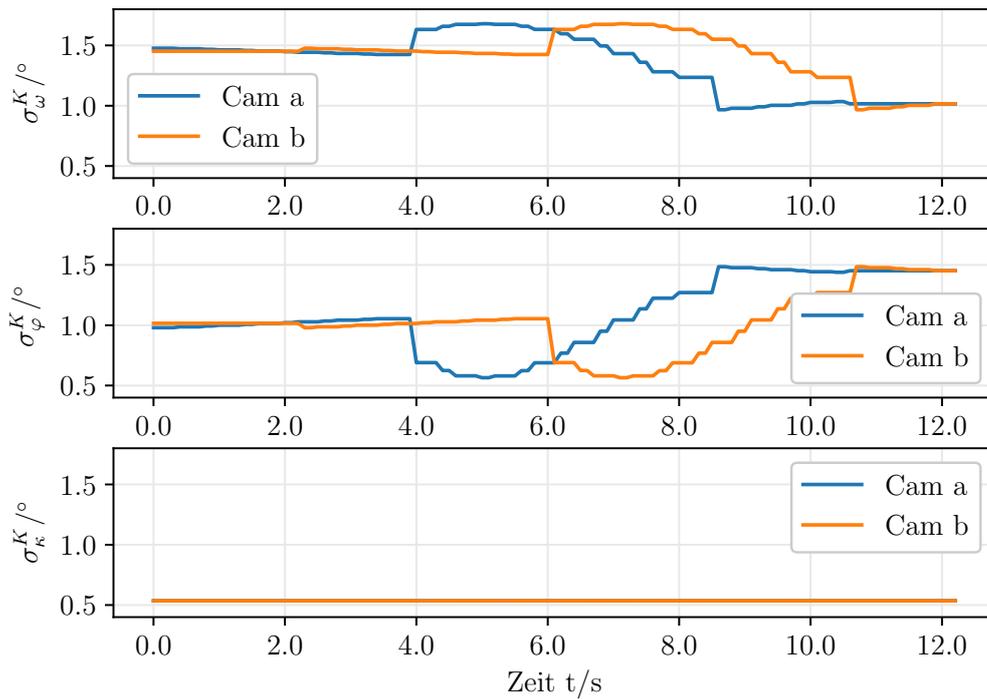


Abbildung 5.19: Präzision der geschätzten Orientierungen der Kameras in Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem. Gezeigt sind in drei Darstellungen die Standardabweichungen der ausgeglichenen Orientierungen beider Kameras über die Zeit. Diese sind in das jeweilige Kamerakoordinatensystem des entsprechenden Zeitpunkts transformiert. Für Zeitpunkte, an denen keine Position geschätzt wurde, ist der Wert zwischen dem vorherigen und dem nachfolgenden Wert interpoliert. Für σ_{κ}^K wird der Verlauf von Cam a in der Darstellung von dem von Cam b überdeckt.

Tabelle 5.9: RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 2. Dabei wird der RMSE für die einzelnen Parameter der äußeren Orientierung sowie für jede Kamera separat angegeben.

Parameter	RMSE Cam a	RMSE Cam b
X_0	99,9 mm	113,5 mm
Y_0	76,6 mm	66,9 mm
Z_0	73,8 mm	68,9 mm
ω	0,58°	0,63°
φ	0,51°	0,45°
κ	0,28°	0,28°

Tabelle 5.10: RMSE der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen für Szenario 2. Dabei wird der RMSE für die einzelnen Koordinaten angegeben.

Koordinate	X	Y	Z
RMSE	173,0 mm	197,0 mm	201,0 mm

5.3.2 Genauigkeit

Die Genauigkeit der ausgeglichenen Parameter wird wie in Szenario 1 mithilfe des RMSE bewertet. Auch in diesem Fall werden zehn Wiederholungen gemittelt, um den Einfluss der verrauschten Beobachtungen zu reduzieren. Der RMSE ist für beide Kameras in Tabelle 5.9 aufgelistet. Der RMSE wird im Kamerakoordinatensystem berechnet. Die Werte für beide Kameras sind ähnlich. Die Winkel werden ähnlich genau bestimmt. Der RMSE für ω ist bei Cam a etwas niedriger als bei Cam b. Dafür ist der RMSE von φ von Cam a etwas höher im Vergleich zu Cam b.

Tabelle 5.10 zeigt den RMSE der Positionen der Verknüpfungspunkte. Die Werte sind höher als die der Positionen der Kameras. Die Werte der einzelnen Koordinaten weichen nicht stark voneinander ab, sodass die Positionen der Verknüpfungspunkte in alle drei Raumrichtungen ungefähr gleich gut bestimmt werden.

Um den Verlauf der Genauigkeit zu beurteilen, zeigt Abbildung 5.20 die absolute Abweichung der Position X_0 von der Ground Truth. Die Werte werden über alle zehn Wiederholungen der BA gemittelt. Auch hier ist wie bei der Präzision eine Verschiebung zwischen den Verläufen sichtbar. So folgt die Abweichung von Kamera Cam b der von Kamera Cam a. Das Minimum der Abweichung befindet sich für X_0 mit etwa 50 mm und Y_0 nahe 0 mm im mittleren Verlauf der Trajektorie. Zu Beginn der Trajektorie liegt die Abweichung ΔX_0^K für Cam a bei etwa 150 mm und für Cam b bei etwa 180 mm. Die Abweichung ΔY_0^K liegt zum Beginn für beide Kameras bei etwa 50 mm. Der Verlauf der Abweichung von Z_0 hingegen ist bereits zu Beginn der Trajektorie auf einem niedrigen Niveau bei etwa 50 mm. In der Mitte der Trajektorie sind leichte Schwankungen entsprechend dem Verlauf der Präzision in Abbildung 5.18 zu sehen. Am Ende der Trajektorie steigt die absolute Abweichung leicht an.

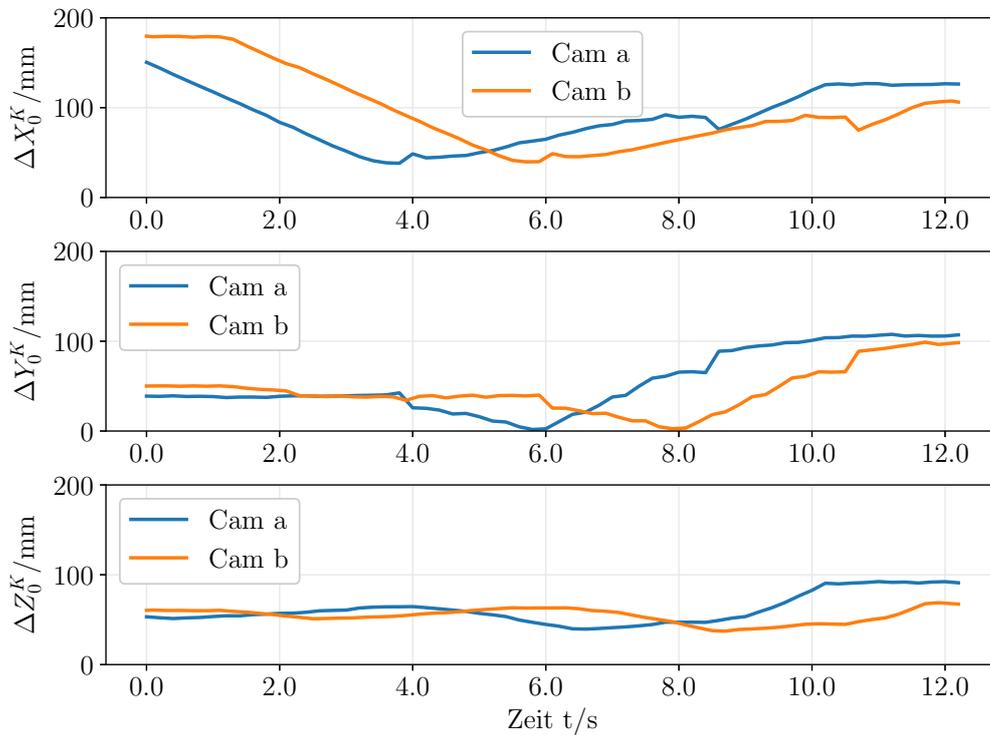


Abbildung 5.20: Absolute Differenz der Positionen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 2. Dargestellt ist die absolute Abweichung zwischen der geschätzten Position und der Ground Truth in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf des Szenarios.

Dieser Anstieg ist für Cam a auf etwa 100 mm etwas höher als für Cam b. Hier liegt die Abweichung am Ende der Trajektorie bei etwa 70 mm. Auch die Abweichung von X_0 ist am Ende der Trajektorie für Cam a größer als für Cam b.

Abbildung 5.21 zeigt die absolute Abweichung der Orientierungen von Kamera Cam a und Kamera Cam b zur Ground Truth. Diese Abweichung ist im Kamerakoordinatensystem ermittelt. Der Verlauf ähnelt stark dem Verlauf der Präzision in Abbildung 5.19. Insgesamt ist die absolute Abweichung für ω^K und φ^K etwa 60% geringer als die Präzision. Für κ^K beträgt der Unterschied etwa 50%.

Abbildung 5.22 zeigt die absolute Abweichung der Positionen der Verknüpfungspunkte. Dafür wird die euklidische Distanz zwischen der geschätzten Position und der wahren Position jedes Verknüpfungspunkts berechnet. Dieser Wert wird über alle zehn Wiederholungen gemittelt. Es sind nur wenige erhöhte Werte über 0,4 m zu sehen. Einige Verknüpfungspunkte können besser geschätzt werden als andere. Die Verknüpfungspunkte, für die kein Balken dargestellt wird, werden nicht häufig genug von einer Kamera beobachtet. In diesem Szenario sind dies vor allem Punkte, welche hinter Kamera Cam b liegen und für den Fall der rückblickenden Kamera Cam a vorhanden sind.

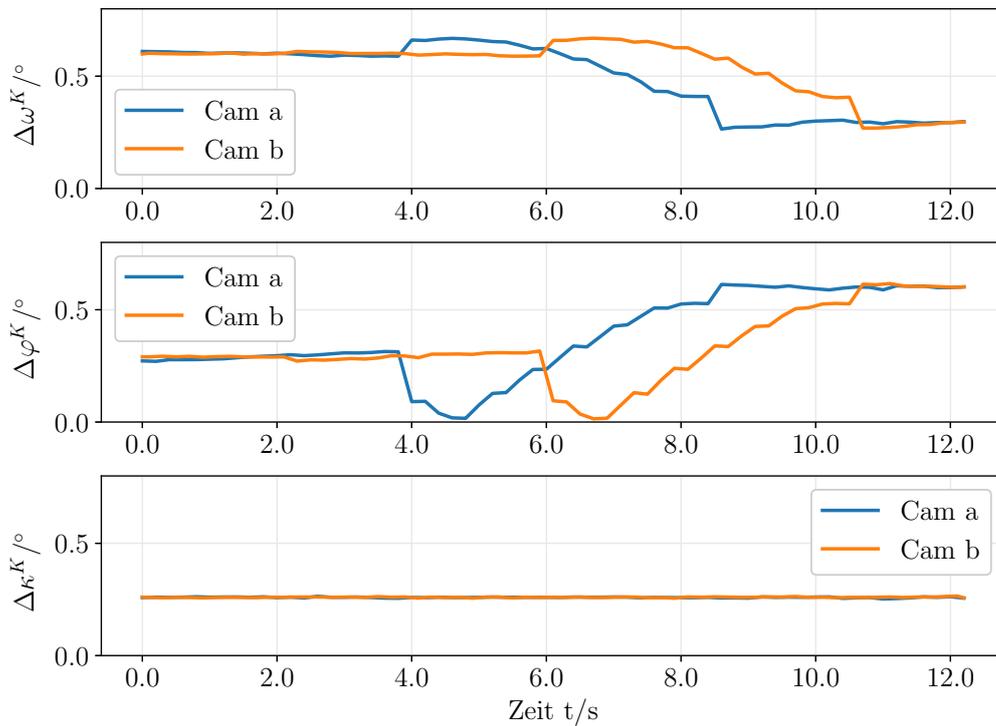


Abbildung 5.21: Absolute Differenz der Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem in Szenario 2. Dargestellt ist die absolute Abweichung zwischen der geschätzten Orientierung und der Ground Truth in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf des Szenarios. Der Verlauf von Cam b überdeckt den Verlauf von Cam a für $\Delta\kappa^K$.

Abbildung 5.23 zeigt die Position des jeweils 20 prozentigen Anteils der Verknüpfungspunkte mit der höchsten und niedrigsten absoluten Abweichung zur Ground Truth. Dabei ist ein ähnliches Bild wie in Szenario 1 zu sehen. Die Verknüpfungspunkte mit der geringsten Differenz zur Referenzposition befinden sich in der Nähe der Trajektorie, wo sie in vielen Bildern und in geringer Entfernung zur Kamera beobachtet werden. Die Verknüpfungspunkte mit der größten Abweichung zur Ground Truth befinden sich am Beginn und am Ende der Trajektorie. Diese Punkte werden nur in wenigen Bildern beobachtet und sind dabei weit von der Kamera entfernt.

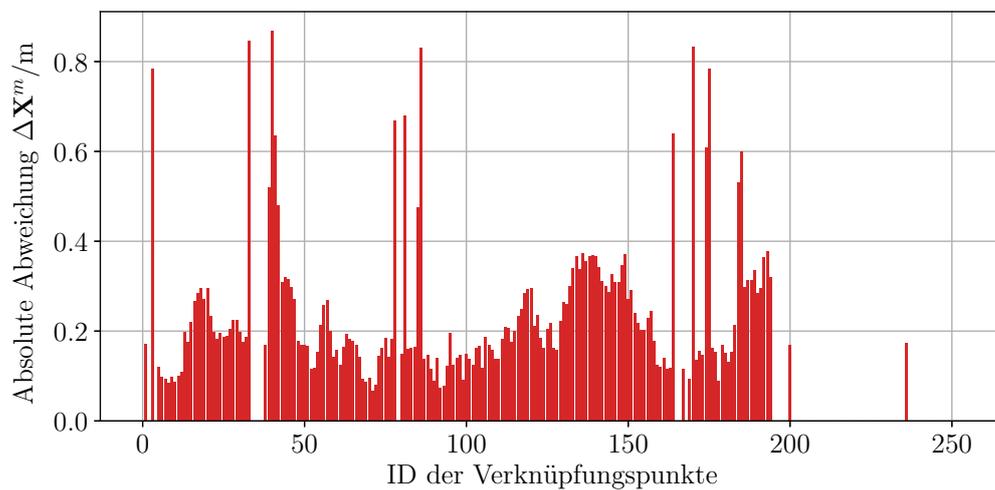


Abbildung 5.22: Absolute Differenz der Positionen der Verknüpfungspunkte in Szenario 2. Dargestellt ist die absolute Abweichung zwischen der geschätzten Position und der Ground Truth der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen.

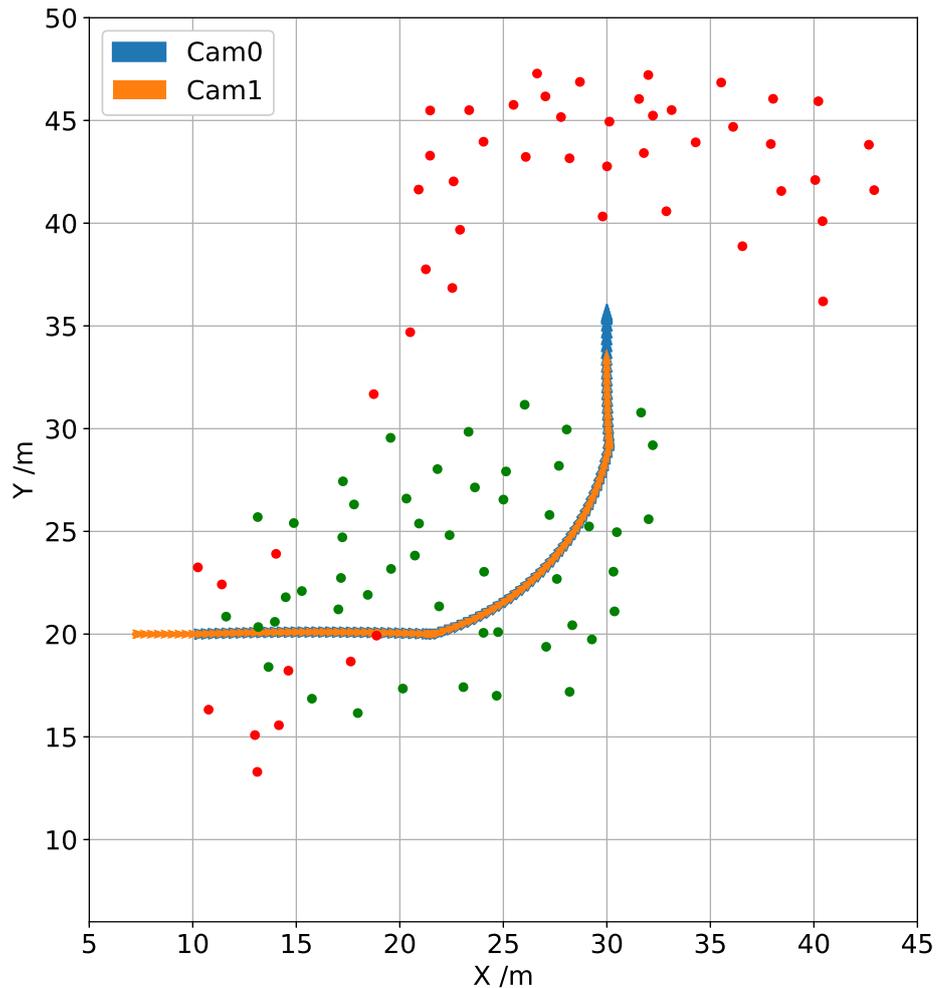


Abbildung 5.23: Positionen der Verknüpfungspunkte mit der höchsten und geringsten absoluten Abweichung in Szenario 2. Dargestellt sind die Positionen der 20% Verknüpfungspunkte mit der geringsten (grün) und höchsten (rot) absoluten Abweichung zwischen der geschätzten Position und der Ground Truth im Karten-Rahmen. Die Trajektorien der Kameras entsprechen denen in Abbildung 5.16

5.3.3 Einfluss der kooperativen Lokalisierung

In diesem Szenario wird ebenfalls der Einfluss der kooperativen Lokalisierung auf das Ergebnis der BA untersucht. Dazu werden drei Varianten von Szenario 2 betrachtet.

Variante 1 In Variante 1 werden keine Fahrzeuge bzw. Kameras beobachtet. Dies bedeutet, dass die Kameras lediglich Verknüpfungspunkte beobachten und mithilfe von GNSS lokalisiert werden. Beide Kameras sind hier in Fahrtrichtung ausgerichtet.

Variante 2 Variante 2 entspricht dem oben vorgestellten ursprünglichen Szenario. Kamera Cam a fährt voraus und wird von Kamera Cam b beobachtet. Beide Kameras beobachten zudem Verknüpfungspunkte und werden durch GNSS lokalisiert. Beide Kameras sind in Fahrtrichtung ausgerichtet.

Variante 3 In Variante 3 fährt Cam a ebenfalls vor Cam b. In diesem Fall ist die Kamera Cam a jedoch um 180° um die Z-Achse rotiert. Das Kamerakordinatensystem entspricht somit wieder dem fahrzeugfesten Koordinatensystem, welches in Abschnitt 2.5 definiert wird. Dies hat zur Folge, dass Cam a entgegen der Fahrtrichtung, sprich rückwärts, blickt. Somit beobachten sich beide Kameras gegenseitig. Zudem beobachten beide Kameras Verknüpfungspunkte und werden durch GNSS lokalisiert.

Abbildung 5.24 zeigt die Präzision der geschätzten Positionen aller drei Szenarios jeweils für Kamera Cam a. Alle drei Varianten weisen eine nahezu identische Präzision für X_0 auf. Da der Verlauf von Variante 3 zuletzt abgebildet wird, ist nur dieser mit der gewählten Skalierung der Y-Achse zu sehen. Zwischen den Varianten gibt es kleine Unterschiede, welche mit einer feineren Skalierung sichtbar werden. Dies ist in den Ausschnitten oberhalb der Verläufe zu sehen. Zu Beginn der Trajektorie ist die Präzision von Variante 3 für X_0 und Y_0 geringfügig besser als die von Variante 1 und 2. Für die Präzision von Y_0 ist Variante 3 geringfügig schlechter als Variante 1 und 2. Die Präzision aller drei Koordinaten von X_0 von Variante 1 ist über den gesamten Verlauf geringfügig schlechter als die von Variante 2. In der Mitte der Trajektorie ist die Präzision für X_0 , Y_0 und Z_0 von Variante 3 schlechter als von Variante 1 und 2. Zum Ende der Trajektorie ist die Präzision von X_0 von Variante 3 geringfügig schlechter als von Variante 1 und 2. Für die Präzision von Y_0 und Z_0 ist Variante 3 geringfügig besser als Variante 1 und 2. Alle hier beschriebenen Differenzen befinden sich im einstelligen μm -Bereich. Für Cam b zeigt sich ein ähnlicher Verlauf mit den gleichen Relationen der Varianten zueinander.

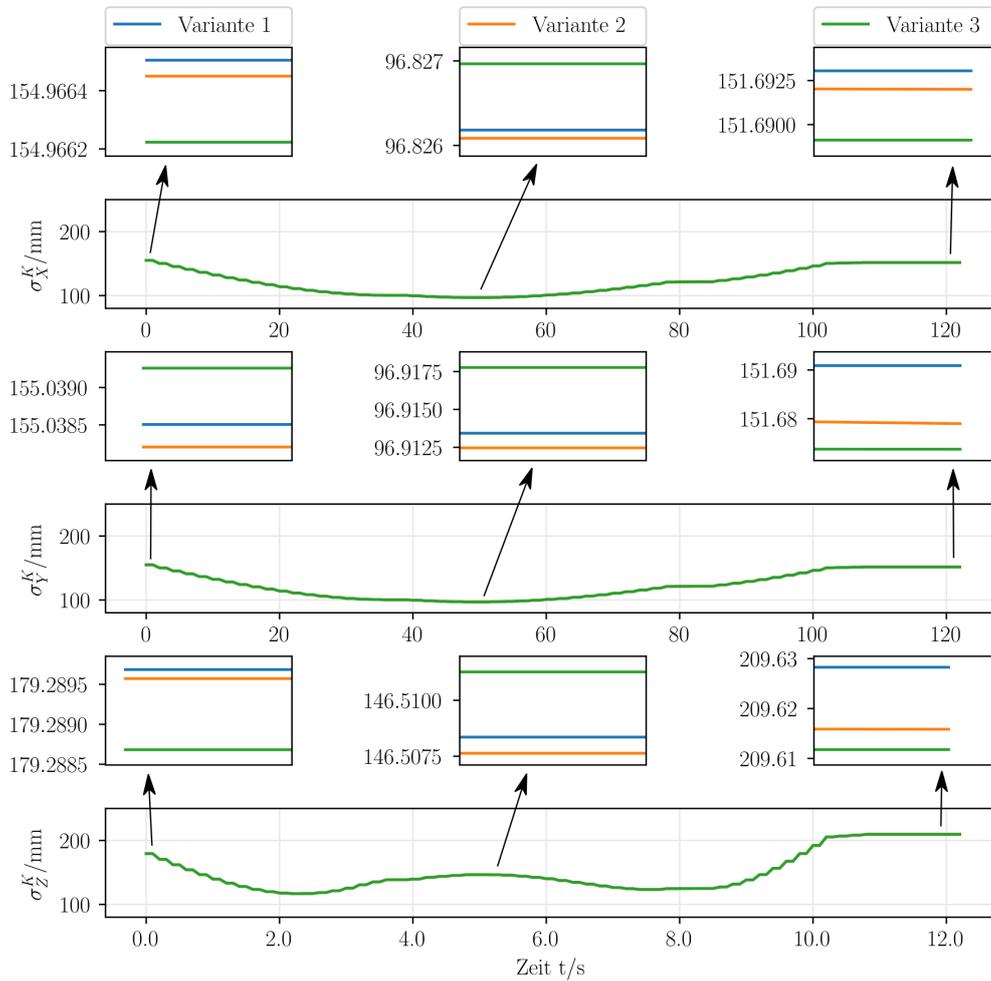


Abbildung 5.24: Präzision der geschätzten Positionen von Kamera Cam a für verschiedene Varianten von Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem. Gezeigt sind in drei Darstellungen die Standardabweichungen der ausgeglichenen Positionen \mathbf{X}_0 von Cam a über die Zeit. Dabei sind drei verschiedene Varianten dargestellt. Die Standardabweichungen sind in das jeweilige Kamerakoordinatensystem des entsprechenden Zeitpunkts transformiert. Die Skalen der Ausschnitte unterscheiden sich, diese sind zum qualitativen Vergleich der Verläufe der Präzision dargestellt.

Abbildung 5.25 zeigt die Präzision der ausgeglichenen Orientierungen von Kamera Cam a in den oben beschriebenen drei Varianten von Szenario 2. Der Verlauf der Präzision aller drei Winkel ω , φ und κ ist für alle drei Varianten sehr ähnlich. Die Änderung der Präzision von κ ist über den gesamten Verlauf der Trajektorie sehr gering. Daher lässt sich hier der relative Verlauf der Varianten zueinander in der ursprünglichen Skalierung der Y-Achse beobachten. Für die Präzision von ω und φ ist dies nicht möglich, daher sind die Ausschnitte oberhalb des Verlaufes dargestellt.

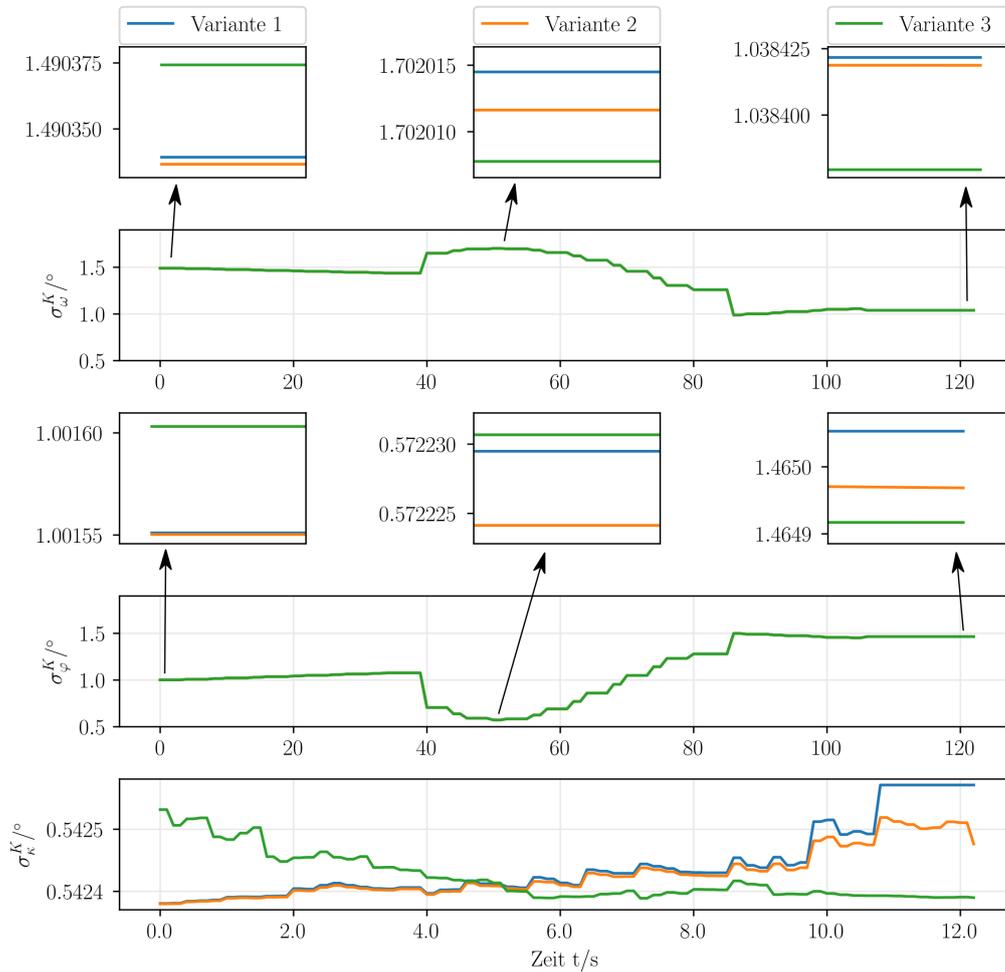


Abbildung 5.25: Präzision der geschätzten Orientierungen von Kamera Cam a für verschiedene Varianten von Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem. Gezeigt sind in drei Darstellungen die Standardabweichungen der ausgeglichenen Orientierungen von Cam a über die Zeit. Dabei sind drei verschiedene Varianten dargestellt. Diese sind in das jeweilige Kamerakoordinatensystem des entsprechenden Zeitpunkts transformiert. Die Skalen der Ausschnitte unterscheiden sich, diese sind zum qualitativen Vergleich der Verläufe der Präzision dargestellt. Die Skalierung des Verlaufs von σ_{κ}^K ist ebenfalls feiner aufgelöst als die der anderen beiden Verläufe.

Die Präzision aller drei Winkel ist in Variante 3 des Szenarios zu Beginn der Trajektorie schlechter als für Variante 1 und 2. Dies ändert sich im Verlauf der Trajektorie, sodass am Ende die Präzision aller drei Winkel für Variante 3 besser ist als in Variante 1 und 2. Die Präzision von Variante 1 ist für alle drei Winkel über den gesamten Verlauf der Trajektorie schlechter als die Präzision von Variante 2. Die Abweichung der Präzision der verschiedenen Varianten ist sehr gering und befindet sich im Bereich von tausendstel Grad.

Tabelle 5.11: RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem für Szenario 2 mit den verschiedenen Varianten des Szenarios.

Parameter	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	Cam a	Cam b	Cam a	Cam b	Cam a	Cam b
X_0	72,6 mm	87,6 mm	99,9 mm	113,5 mm	87,4 mm	95,0 mm
Y_0	70,9 mm	66,1 mm	76,6 mm	66,9 mm	74,1 mm	71,5 mm
Z_0	70,8 mm	64,2 mm	73,8 mm	68,9 mm	59,2 mm	64,5 mm
ω	0,45°	0,50°	0,58°	0,63°	0,46°	0,49°
φ	0,43°	0,39°	0,51°	0,45°	0,41°	0,38°
κ	0,22°	0,22°	0,28°	0,28°	0,16°	0,16°

Tabelle 5.12: RMSE der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen für die Varianten von Szenario 2. Dabei wird der RMSE für die einzelnen Koordinaten angegeben.

Koordinate	X	Y	Z
RMSE Variante 1	186,2 mm	181,4 mm	187,8 mm
RMSE Variante 2	181,5 mm	206,6 mm	210,8 mm
RMSE Variante 3	157,4 mm	157,5 mm	144,6 mm

Neben der Präzision wird ebenfalls die Genauigkeit in Form des RMSE untersucht. Eine Übersicht über den RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras für die drei Varianten bietet Tabelle 5.11. Dabei fällt auf, dass die Positionen mit einer etwas höheren Genauigkeit als Präzision bestimmt werden können. Alle drei Szenarien liefern ähnlich gute Werte für die Genauigkeit. In der Präzision ist Variante 1 stets unpräziser als Variante 2. Für die Genauigkeit lässt sich diese Aussage nicht treffen.

Neben den äußeren Orientierungen der Kameras wird der RMSE ebenfalls für die Positionen der Verknüpfungspunkte berechnet. Auch hier sind zwischen den Varianten des Szenarios keine großen Unterschiede zu erkennen. Einzig Variante 3 weist einen etwa um 25% besseren RMSE auf als die anderen beiden Varianten. Insgesamt werden die Positionen der Verknüpfungspunkte schlechter bestimmt als die Positionen der Kameras.

5.3.4 Einfluss des GNSS Beobachtungsrauschens

Das Datum des Karten-Rahmens wird durch die GNSS Beobachtungen der Kameras definiert. Die Genauigkeit dieser Beobachtungen kann bedingt durch die Umwelt beispielsweise in Form von Gebäuden variieren. Um abschätzen zu können, wie stark das Ergebnis der BA dadurch beeinflusst wird, wird das angenommene Beobachtungsrauschen der GNSS Beobachtungen in der Simulation ebenfalls variiert. Dabei werden drei Varianten mithilfe von Szenario 2 untersucht. Bei der ersten Variante beträgt das Beobachtungsrauschen $\sigma_{GNSS} = 0,1\text{ m}$. Dies stellt eine Annahme für eine präzise GNSS Lokalisierung dar, beispielsweise an Orten ohne Gebäude oder ähnliche Strukturen um den GNSS Empfänger. Dies ist im innerstädtischen Bereich in der Regel nicht gegeben. Daher wird in der zweiten Variante ein GNSS Beobachtungsrauschen von $\sigma_{GNSS} = 1\text{ m}$ angenommen. Dies ist ein üblicher Wert für GNSS Empfänger im Automotive Bereich. Um eine ungenauere GNSS Lokalisierung zu simulieren, wird in der dritten Variante ein Beobachtungsrauschen von $\sigma_{GNSS} = 3\text{ m}$ angenommen. Dies ist insbesondere für städtische Bereiche mit Häuserschluchten und anderen Abschattungen der GNSS Signale ein üblicher Wert.

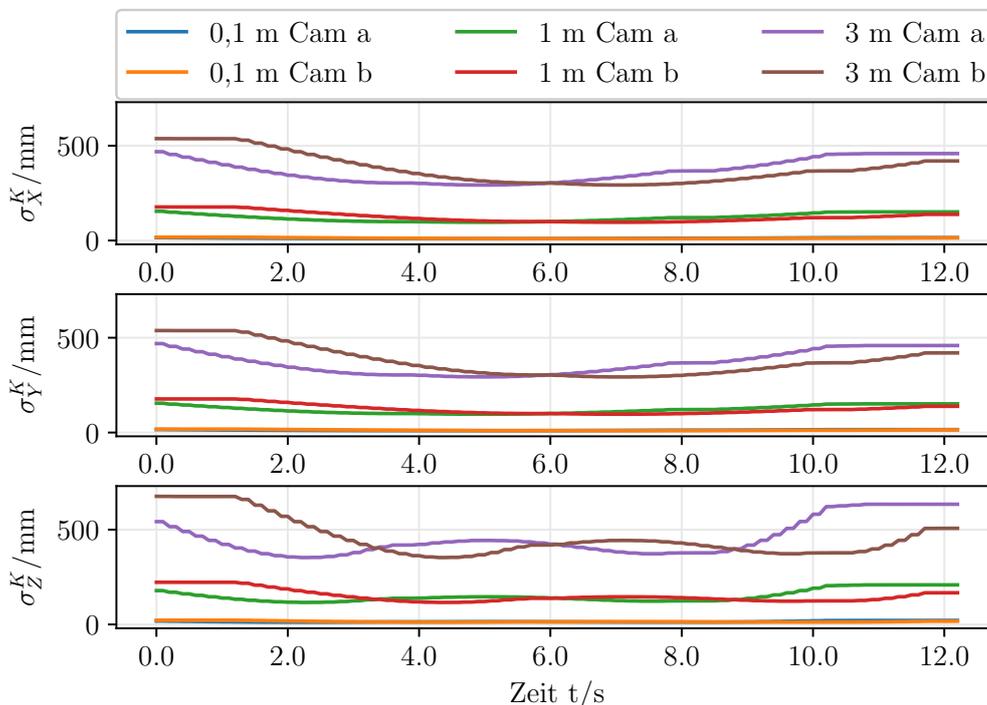


Abbildung 5.26: Präzision der geschätzten Positionen der Kameras in Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem für verschiedenes GNSS Beobachtungsrauschen. Der Verlauf von Cam a für die Variante $\sigma_{GNSS} = 0,1\text{ m}$ wird in allen drei Darstellungen vom Verlauf von Cam b überdeckt.

Abbildung 5.26 zeigt die Präzision der Positionen beider Kameras für die drei Varianten des GNSS Beobachtungsrauschens. Dabei ist zu sehen, dass die Präzision mit sinkendem Beobachtungsrauschen zunimmt. Dies gilt für X_0 , Y_0 und Z_0 . Der Verlauf bleibt erhalten, jedoch verringert sich die Variation der Präzision und somit auch die Differenzen zwischen den Kameras. Dies führt dazu, dass die Variation des Verlaufs der Präzision für die Variante $\sigma_{GNSS} = 0,1\text{ m}$ in dieser Skalierung der Y-Achse nicht mehr sichtbar ist.

Abbildung 5.27 zeigt den Verlauf der Präzision der Orientierungen der Kameras für die oben beschriebenen Varianten des GNSS Beobachtungsrauschens. Es ist ein ähnlicher Effekt wie bei der Präzision der Positionen zu beobachten. Die Präzision der Orientierungen verbessert sich für alle drei Winkel ω , φ und κ mit abnehmendem GNSS Beobachtungsrauschen. Die Form der Verläufe bleibt jedoch erhalten. Die Präzision der äußeren Orientierungen der Kameras verbessert sich von Variante 3 mit $\sigma_{GNSS} = 3\text{ m}$ zu Variante 2 mit $\sigma_{GNSS} = 1\text{ m}$ um etwa 67%. Von Variante 2 zu Variante 1 mit $\sigma_{GNSS} = 0,1\text{ m}$ verbessert sich die Präzision um etwa 90%.

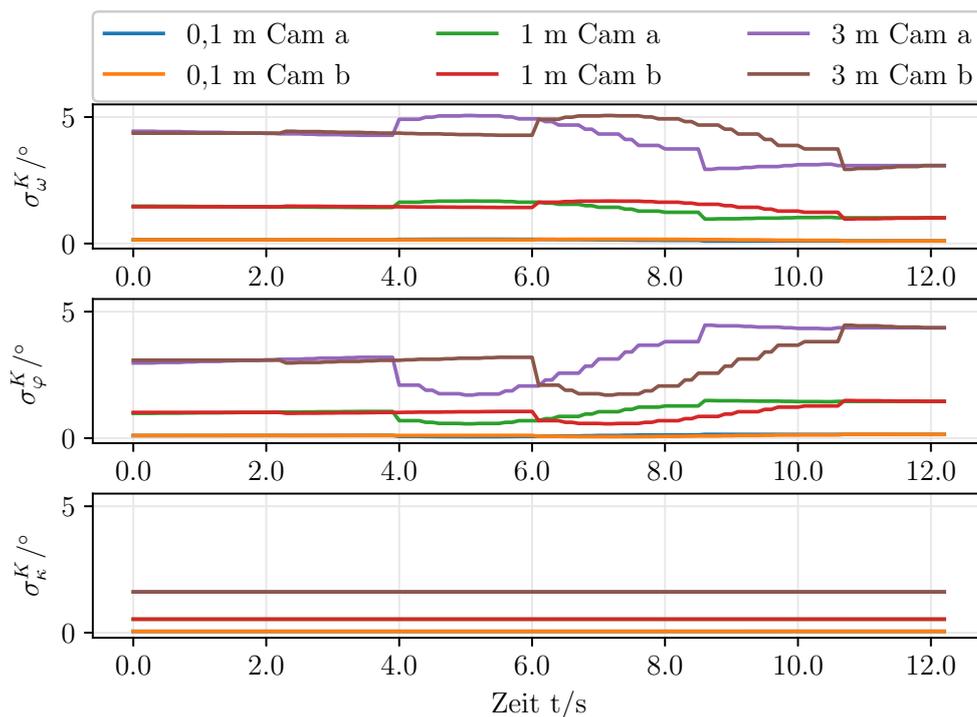


Abbildung 5.27: Präzision der geschätzten Orientierungen der Kameras in Szenario 2 im Kamerakoordinatensystem für verschiedenes GNSS Beobachtungsrauschen. Diese wird über den zeitlichen Verlauf des Szenarios dargestellt. In der gewählten Skalierung überdeckt der Verlauf von Cam b den Verlauf von Cam a für die Variante $\sigma_{GNSS} = 0,1\text{ m}$ in allen drei Darstellungen. Dies geschieht ebenfalls für alle drei Varianten in der Darstellung von σ_{κ}^K .

Tabelle 5.13: RMSE der äußeren Orientierungen der Kameras im Kamerakoordinatensystem für Szenario 2 mit unterschiedlichem GNSS Beobachtungsrauschen. Zudem wird die jeweilige Standardabweichung des RMSE angegeben.

Koordinate	$\sigma_{GNSS} = 0,1 \text{ m}$		$\sigma_{GNSS} = 1 \text{ m}$		$\sigma_{GNSS} = 3 \text{ m}$	
	Cam a	Cam b	Cam a	Cam b	Cam a	Cam b
X_0	74,0 mm	79,5 mm	104,7 mm	119,0 mm	89,5 mm	81,1 mm
σ_{RMSE, X_0}	27,4 mm	33,3 mm	48,4 mm	52,9 mm	33,5 mm	27,9 mm
Y_0	73,0 mm	80,1 mm	80,4 mm	70,2 mm	73,6 mm	78,8 mm
σ_{RMSE, Y_0}	42,0 mm	45,6 mm	35,1 mm	28,1 mm	50,3 mm	43,2 mm
Z_0	64,4 mm	61,3 mm	77,4 mm	72,3 mm	79,7 mm	93,1 mm
σ_{RMSE, Z_0}	26,8 mm	24,2 mm	32,4 mm	34,5 mm	35,0 mm	40,9 mm
ω	0,58°	0,61°	0,61°	0,66°	0,87°	0,88°
$\sigma_{RMSE, \omega}$	0,38°	0,40°	0,34°	0,37°	0,49°	0,51°
φ	0,47°	0,44°	0,53°	0,47°	0,68°	0,67°
$\sigma_{RMSE, \varphi}$	0,28°	0,27°	0,28°	0,23°	0,37°	0,36°
κ	0,21°	0,21°	0,29°	0,29°	0,27°	0,27°
$\sigma_{RMSE, \kappa}$	0,14°	0,14°	0,14°	0,14°	0,11°	0,11°

Tabelle 5.14: RMSE der Verknüpfungspunkte im Karten-Rahmen für die Variation des GNSS Beobachtungsrauschens in Szenario 2. Dabei wird der RMSE für die einzelnen Koordinaten angegeben.

Koordinate	X	Y	Z
RMSE $\sigma_{GNSS} = 0,1 \text{ m}$	167,4 mm	174,9 mm	189,5 mm
RMSE $\sigma_{GNSS} = 1 \text{ m}$	181,5 mm	206,6 mm	210,8 mm
RMSE $\sigma_{GNSS} = 3 \text{ m}$	164,6 mm	214,1 mm	207,5 mm

Die Genauigkeit der Varianten des GNSS Beobachtungsrauschens wird mithilfe des RMSE untersucht. Dieser ist für Kamera Cam a und Kamera Cam b in Tabelle 5.13 dargestellt. Dabei ist auffällig, dass sich der RMSE im Gegensatz zur Präzision mit abnehmenden GNSS Beobachtungsrauschen nicht verbessert. Einzig Variante 2 mit $\sigma_{GNSS} = 1 \text{ m}$ weist leicht erhöhte Werte für den RMSE von X_0 für beide Kameras auf. Zudem ist der RMSE von ω und φ in Variante 3 leicht erhöht. Der RMSE wird über alle 10 Wiederholungen der BA berechnet, für jede Wiederholung werden die Beobachtungen und Startwerte neu initialisiert. Um abschätzen zu können, wie stark der RMSE zwischen den einzelnen Wiederholungen variiert, wird zusätzlich die Standardabweichung σ_{RMSE} des RMSE berechnet. Dabei ist zu sehen, dass erhöhte Werte des RMSE mit einer höheren Standardabweichung einhergehen. Dies zeigt sich für die Koordinate X_0 bei $\sigma_{GNSS} = 1 \text{ m}$ und für ω und φ bei $\sigma_{GNSS} = 3 \text{ m}$. Insgesamt kann beobachtet werden, dass die Werte des RMSE relativ stark streuen. Tabelle 5.14 zeigt den RMSE der Positionen der Verknüpfungspunkte für die drei Varianten des GNSS Beobachtungsrauschens. Auch hier lässt sich keine eindeutige Verbesserung der Werte feststellen.

6 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Kapitel 5 vorgestellten und ausgewerteten Experimente kritisch diskutiert. Dabei steht der Einfluss der kooperativen Lokalisierung besonders im Fokus.

6.1 Präzision

Der Verlauf der Präzision der Position entspricht in beiden Szenarien den Erwartungen. Wie in Abbildung 5.6 und 5.18 dargestellt wird, ist die Präzision der Positionen der Kameras in beiden Szenarien zu Beginn und am Ende der Trajektorie am ungenaueren. Die Maxima der Präzision befinden sich in der Mitte der Trajektorie. Eine Ursache hierfür ist die größere Anzahl an identischen Merkmalen von Verknüpfungspunkten in aufeinanderfolgenden Bildern. Je größer diese Anzahl ist, desto stabiler ist die Schätzung der Transformation zwischen diesen Bildern und somit zwischen den äußeren Orientierungen der Kameras. So ist die Anzahl an Verknüpfungspunkten pro Bild in Szenario 1 in der Mitte des Szenarios am höchsten, dies ist in Abbildung 5.3 zu sehen.

Die Präzision der Position in Z-Richtung ist ungenauer als in X- und Y-Richtung. Dies liegt zum einen an der Verteilung der Verknüpfungspunkte. Diese sind entlang der Z-Achse des Karten-Rahmens in der Simulation geringer ausgedehnt als in der X-Y Ebene. Zum anderen ist der vertikale Öffnungswinkel der verwendeten Kamera geringer als der horizontale Öffnungswinkel. Diese sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Die Öffnungswinkel beeinflussen die Maße des Sensorkoordinatensystems. Dieses ist nicht quadratisch, sondern rechtwinklig. Die x-Achse ist dabei länger als die y-Achse. Dadurch können Punkte in großer Höhe nur aus einer gewissen Entfernung beobachtet werden.

Insgesamt ist die Präzision der Positionen in beiden Szenarien etwa um den Faktor 6 besser als das angenommene Beobachtungsrauschen der GNSS Beobachtungen. Zudem stehen diese nicht für jede äußere Orientierung der Kameras zur Verfügung und müssen darüber hinaus für den Großteil der Kamerapositionen interpoliert werden. Dies bedeutet, dass die Struktur der BA durch Beobachtungen der Verknüpfungspunkte derart stabilisiert wird, dass die Positionen der Kameras mit hoher Präzision bestimmt werden können.

Die Präzision der Orientierung um die Y-Achse im Karten-Rahmen σ_{φ}^m ist in Szenario 1 deutlich ungenauer als die der Orientierung um die X-Achse σ_{ω}^m und um die Z-Achse σ_{κ}^m . Eine Begründung hierfür könnte die längere Fahrt entlang der Y-Achse beider Kameras sein. Da Cam a dabei direkt vor Cam b fährt und beide Kameras in einer ähnlichen Höhe sind, befindet sich die Beobachtung von Cam a in Cam b nahe des Bildhauptpunktes. Je weiter eine Beobachtung vom Bildhauptpunkt entfernt

ist, desto besser ist die Stabilisierung der Orientierung in Blickrichtung, in diesem Fall des Winkels φ . Insgesamt ist die Änderung der Präzision der Orientierung im Karten-Rahmen über die Zeit nur gering. Dies kann durch die Ausgleichung, welche global im Karten-Rahmen durchgeführt wird, bedingt sein.

Zudem ist zu erkennen, dass der Verlauf der Präzision beider Kameras in Szenario 2 verschoben ist. Dies ist für die Positionen in Abbildung 5.18 und für die Orientierungen in Abbildung 5.19 zu sehen. Da die Kameras versetzt eine sehr ähnliche Trajektorie abfahren, lässt sich daraus schließen, dass die Kameras sich an gleichen Positionen mit gleicher Präzision lokalisieren können. Dies liegt an den identischen räumlichen Merkmalen, welche sie bei gleicher Position und Orientierung sehen. Dies ist in Szenario 1 ebenfalls am Ende der Trajektorie zu sehen, da hier die äußeren Orientierungen der Kameras ebenfalls sehr ähnlich sind. Dies zeigen Abbildung 5.6 für die Position sowie Abbildung 5.7 für die Orientierung. Da es sich um ein globales Ausgleichungssystem handelt, profitiert sowohl die vorausfahrende als auch die folgende Kamera von der kooperativen Lokalisierung. Im Gegensatz hierzu würde bei einer iterativen Filterlösung lediglich die folgende Kamera von den Beobachtungen der vorausfahrenden Kamera profitieren.

In den Phasen, in denen die Kameras stehen, wird deren äußere Orientierung mit konstanter Präzision geschätzt. Eine Begründung hierfür liefern die beobachteten Verknüpfungspunkte. Da sich diese nicht ändern, und deren Position über die gesamte Zeit des Szenarios ausgeglichen wird, bleiben die beobachteten Verknüpfungspunkte konstant in ihrer Position und Präzision.

6.2 Genauigkeit

Die Genauigkeit wird einerseits durch den RMSE als Vergleich zwischen dem Resultat der BA und den Werten der Ground Truth bestimmt. Andererseits wird diese in Form der absoluten Abweichung der ausgeglichenen Parameter von der Ground Truth gezeigt. Die BA benötigt initiale Werte. Hierfür werden die wahren Werte der äußeren Orientierungen der Kameras aus der Simulation mit einer Normalverteilung verrauscht. Der Mittelwert entspricht dabei dem wahren Wert. Gleiches gilt für die Beobachtungen. Beide beeinflussen das Ergebnis der ausgeglichenen Parameter und somit auch die Genauigkeit. Um diesen Effekt zu verringern, werden die Experimente zehn Mal wiederholt. Der Mittelwert der Ergebnisse der einzelnen Wiederholungen wird als Resultat der Experimente verwendet. Da es nur zehn Wiederholungen sind, ist trotzdem noch ein Einfluss der initialen Werte und der Beobachtungen möglich. Insgesamt ist die Genauigkeit etwas besser als die Präzision, bewegt sich jedoch in einer ähnlichen Größenordnung.

Die absolute Abweichung hat einen ähnlichen Verlauf wie die Präzision. Dies zeigt sich für Szenario 1 beim Vergleich von Abbildung 5.8 mit Abbildung 5.6. Die in

Tabelle 5.3 aufgelisteten Standardabweichungen für die initialen Werte werden sowohl im RMSE als auch in der absoluten Abweichung unterschritten. Die Startwerte befinden sich zudem außerhalb der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Präzision. Daran ist zu erkennen, dass das Gleichungssystem konvergiert und eine stabile Lösung ermöglicht.

6.3 Kooperative Lokalisierung

Die kooperative Lokalisierung verbessert das Ergebnis der BA sowohl in der Präzision als auch in der Genauigkeit. Dies ist für Szenario 1 in Abbildung 5.12 und 5.13 für die Präzision gezeigt. Dabei verbessert sich die Präzision für die Position in X- und Y-Richtung um 50% bei der Kooperation mit einer zweiten Kamera. Die Präzision der Position in Z-Richtung verbessert sich ebenfalls. Dies wird durch die Kombination der Beobachtungen beider Kameras ermöglicht. Da sich die Kameras gegenseitig sowie gleiche Verknüpfungspunkte beobachten, können die Positionen dieser Verknüpfungspunkte genauer bestimmt werden. So sinkt der RMSE der Positionen der Verknüpfungspunkte von Variante 1 zu Variante 2 um durchschnittlich 55%, wie in Tabelle 5.8 zu sehen ist. Variante 3 enthält eine zusätzliche statische Kamera. Hier verbessert sich die Präzision der Kamerapositionen um 10 bis 15% und die Präzision der Orientierungen um etwa 7% im Vergleich zu Variante 2. Die geringfügige Verbesserung kann auch dadurch bedingt sein, dass die dritte Kamera statisch ist und somit in jedem Bild die gleichen Verknüpfungspunkte beobachtet. Die Position von Verknüpfungspunkten, welche von nur einer Position aus beobachtet werden, kann nicht geschätzt werden. Werden diese Verknüpfungspunkte jedoch zusätzlich für eine kurze Zeit von einer anderen Kamera beobachtet, so kann die Position geschätzt werden. Diese ist in der Regel jedoch nicht präzise, wie in Variante 3 zu sehen ist. In der Variante mit einer zusätzlichen statischen Kamera befinden sich mehr ungenau bestimmte Verknüpfungspunkte am unteren Ende des Kartenausschnitts in Blickrichtung von Kamera Cam c. Dies zeigt Abbildung 5.14 im Vergleich mit Abbildung 5.11. Je häufiger ein Verknüpfungspunkt von verschiedenen Positionen beobachtet wird, desto präziser kann seine Position bestimmt werden. Durch die Kooperation steht zudem eine größere Anzahl an GNSS Beobachtungen zur Verfügung, jedoch enthalten die Unbekannten auch mehr zu bestimmende Parameter.

Des Weiteren kann durch die Kooperation die Verschlechterung des Ergebnisses in Kurven teilweise unterbunden werden. Dies ist in Abbildung 5.6 zu sehen. Die Präzision der Position in Z-Richtung verschlechtert sich etwa in der Mitte der Trajektorie bei Variante 1, der Fahrt einer einzelnen Kamera. Dies tritt bei Variante 2 und 3, der Kooperation mehrerer Kameras, nicht auf. In Szenario 2 lässt sich diese Verbesserung nicht beobachten. So verschlechtert sich die Präzision der Position

in Z-Richtung, wie in Abbildung 5.18 zu sehen ist. Hier beobachten die Kameras die Verknüpfungspunkte aus einer ähnlichen Perspektive. Eine Erklärung hierfür liefert die größere Anzahl an Verknüpfungspunkten, welche in Szenario 1 aus verschiedenen Perspektiven beobachtet werden.

Die gegenseitigen Beobachtungen der Fahrzeuge beeinflussen das Ergebnis nur marginal. Dies zeigt sich in der Präzision und Genauigkeit der drei Varianten der gegenseitigen Beobachtungen in Szenario 2. Abbildungen 5.24 und 5.25 zeigen die Präzision der äußeren Orientierungen der Kameras für die drei Varianten. Der Unterschied dieser ist sehr gering und befindet sich im Bereich von Mikrometern bzw. tausendstel Grad. Auch der RMSE der drei Varianten zeigt keinen deutlichen Unterschied. Erklärt werden kann dieses Phänomen durch die Struktur der BA. Da beide Kameras die gleichen Verknüpfungspunkte beobachten, sind sie bereits stark miteinander verknüpft. Je größer die Anzahl dieser Verknüpfungspunkte ist und je genauer die Beobachtungen der Merkmale der Verknüpfungspunkte sind, desto stärker ist diese Verbindung. Die direkte gegenseitige Beobachtung fügt zu dieser starken Verbindung lediglich eine weitere Beobachtung hinzu. Diese wird zudem noch mit der gleichen Beobachtungsgenauigkeit wie eine Beobachtung eines Merkmals angenommen.

Somit zeigt sich, dass das Teilen einer gemeinsamen Karte den Hauptanteil an der Verbesserung der Positionierung in einem kooperativen System hat. Die gegenseitigen Beobachtungen der Kameras hingegen spielen nur eine untergeordnete Rolle. In der Simulation wird ein perfekter Datenaustausch zwischen den Kameras angenommen. Dies ist in der Realität nicht möglich, daher können die übertragenen Daten unvollständig oder fehlerhaft sein. Außerdem ist das Problem der Datenassoziation für die Verwendung einer gemeinsamen Karte zu lösen. Dies ist in dieser Arbeit ebenfalls durch die Simulation gelöst.

6.4 Einfluss des GNSS Beobachtungsrauschens

Die Genauigkeit der GNSS Beobachtungen beeinflusst das Ergebnis der BA ebenfalls. Dies wird in Szenario 2 untersucht. Dabei ist der Einfluss auf die Präzision in den Experimenten deutlich. Diese verbessert sich mit steigender Beobachtungsgenauigkeit. Abbildung 5.26 und Abbildung 5.27 zeigen dieses Verhalten. Dies liegt an dem höheren Gewicht, welches die GNSS Beobachtungen in diesem Fall in der Ausgleichung erhalten. Die Präzision wird dabei unabhängig von den Startwerten der Ausgleichung ermittelt und stellt somit eine theoretische Betrachtung des Ausgleichungssystems dar.

Der RMSE ist hingegen von den Startwerten, den verrauschten Beobachtungen und dem Verlauf der Ausgleichung abhängig. Die initialen Werte sind normalverteilt, das GNSS Beobachtungsrauschen ebenso. Wird die Standardabweichung für das

Beobachtungsrauschen vergrößert, wie es in den Experimenten der Fall ist, bleibt der Mittelwert trotzdem konstant. Somit werden die Kameras lediglich weiter von der wahren Position entfernt beobachtet. Trotzdem kann das System zu ähnlichen Werten wie bei einem geringeren Beobachtungsrauschen konvergieren, was Tabelle 5.13 zeigt. Dies wird durch das iterative Verfahren des Gauß-Markov-Modells ermöglicht. Die geringfügigen Abweichungen zwischen den Varianten können durch die Abhängigkeit von der Initialisierung der Beobachtungen und der Startwerte begründet werden. Dies zeigt die Standardabweichung des RMSE, welche ebenfalls in Tabelle 5.13 aufgelistet ist. Dabei ist zu sehen, dass der RMSE für alle Varianten zwischen den Wiederholungen ähnlich stark variiert.

7 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur kooperativen Lokalisierung mehrerer Kameras vorgestellt. Dieses nutzt das Verfahren der Bündelausgleichung und fusioniert damit die Beobachtungen der verschiedenen Kameras sowie die Eigenlokalisierung der Kameras mithilfe von GNSS. Die Beobachtungen der Kameras umfassen sowohl Beobachtungen von Verknüpfungspunkten als auch Beobachtungen der weiteren Kameras. Hier wurde angenommen, dass die Kameras direkt beobachtet werden können. Da die Kameras ihre Bilder nicht zu identischen Zeitpunkten aufnehmen, wurde ein zeitabhängiges funktionales Modell verwendet. Dieses interpoliert die Position einer Kamera zu einem bestimmten Zeitpunkt zwischen zwei bekannten Positionen vor bzw. nach diesem Zeitpunkt. Ziel der Bündelausgleichung ist es, die äußeren Orientierungen der Kameras für alle Bilder sowie die Positionen aller beobachteten Verknüpfungspunkte zu bestimmen. Zur Lösung des Problems wurde das Gauß-Markov-Modell als iteratives Ausgleichungsverfahren verwendet. In der Simulation wurden Szenarien dem realen Straßenverkehr nachempfunden. Es wurde angenommen, dass die Kameras auf Fahrzeugen montiert sind, welche sich im Straßenverkehr bewegen. In zwei simulierten Szenarien wurde die Anwendung des Verfahrens erprobt. Zum einen ist dies ein Szenario an einer Kreuzung, zum anderen wurde ein Verfolgungsszenario simuliert. Die Simulation hat den Vorteil, dass Referenzwerte für alle zu schätzenden unbekannt Parameter vorliegen. Diese wurden zur Auswertung verwendet.

Es wurde gezeigt, dass das Verfahren der kooperativen Lokalisierung das Ergebnis einer Bündelausgleichung einer einzelnen Kamera verbessern kann. Dies gilt für beide untersuchte Szenarien. Dabei ist sowohl die Präzision als auch die Genauigkeit im Vergleich zu den Referenzwerten bei der Verwendung von mehr als einer Kamera besser. Bei der zusätzlichen Kooperation mit einer dritten, statischen Kamera ist keine deutliche Verbesserung im Vergleich zur Verwendung von zwei Kameras zu beobachten. Die Präzision, welche die theoretische Genauigkeit des Ausgleichungsproblems darstellt, zeigt eine geringe Verbesserung. Bei der Genauigkeit in Form des RMSE ist diese Verbesserung nicht eindeutig zu erkennen.

Des Weiteren wurde der Einfluss der verschiedenen Beobachtungstypen auf die Verbesserung der Lokalisierung durch die Kooperation untersucht. Dabei zeigte sich, dass die direkten gegenseitigen Beobachtungen der Kameras nur eine untergeordnete Rolle spielen und das Gesamtergebnis nur marginal verbessern. Dies wird stattdessen durch die Beobachtung vieler gemeinsamer Verknüpfungspunkte durch beide Kameras erreicht. Diese können dadurch präzise geschätzt werden, was wiederum eine starke Verknüpfung der kooperierenden Kameras zur Folge hat.

Zudem wurde der Einfluss der Beobachtungsgüte der Eigenlokalisierung der Ka-

meras durch GNSS untersucht. Diese kann in innerstädtischen Umgebungen stark variieren. Es wurde gezeigt, dass die theoretische Präzision der geschätzten Parameter mit sinkendem Beobachtungsrauschen verbessert werden kann. Für die Genauigkeit der Werte in der Simulation ist das jedoch nicht der Fall. Dies liegt vermutlich an der Tatsache, dass die Beobachtungen durch die Ziehung aus einer Normalverteilung erstellt wurden und der Mittelwert somit dem Referenzwert entspricht. Da es sich bei der Bündelausgleichung um ein iteratives Ausgleichungsverfahren handelt, konnte das Optimum trotzdem gefunden werden.

Für die Entwicklung des hier vorgestellten Konzepts wurden einige Annahmen getroffen, welche das Problem vereinfachen. In zukünftigen Arbeiten können diese Annahmen nach und nach verringert werden und das Problem somit an die Realität angenähert werden. Zum einen kann ein reales Szenario simuliert werden, um die Verteilung der Verknüpfungspunkte eines innerstädtischen Szenarios besser abbilden zu können. Hierfür können Daten eines terrestrischen Laserscanners von bestimmten Verkehrsknotenpunkten verwendet werden. Zudem können systematische Fehler in der Lokalisierung durch GNSS modelliert werden, welche beispielsweise durch Mehrwegeeffekte im innerstädtischen Bereich entstehen können. Des Weiteren kann die Simulation durch die Verwendung von realen Bildern ersetzt werden. Hierbei sind vor allem die Datenassoziation nicht nur zwischen den verschiedenen Bildern einer Kamera, sondern auch zwischen den Bildern verschiedener Kameras zu lösen, zumal es sich um eine dynamische Szene handelt. Zudem muss das Herausfiltern von Ausreißern bei der Zuordnung berücksichtigt werden. Außerdem können die Kameras in realen Bildern nicht direkt beobachtet werden. Daher muss hierfür das Fahrzeug detektiert werden und die Position der Kamera anschließend über einen Hebelarm bestimmt werden.

Auf der methodischen Seite kann das verwendete Gauß-Markov-Modell zu einem Levenberg-Marquardt Algorithmus erweitert werden, um eine schnelle Konvergenz der Ausgleichung zu erreichen. Außerdem kann das Verfahren als Sliding Window Verfahren umgesetzt werden, um die Lokalisierung in Echtzeit durchführen zu können. Das in dieser Arbeit umgesetzte Konzept einer zentralen Bündelausgleichung ist zudem auf die Übertragung vieler Daten angewiesen. Dafür kann untersucht werden, inwieweit ein dezentrales System die Datenübertragung verringern kann und welchen Einfluss dies auf die Präzision und Genauigkeit der Lokalisierung hat. Zusammenfassend wurde mit dem vorgestellten Konzept gezeigt, dass die Lokalisierung einer Kamera durch Bündelausgleichung verbessert werden kann, wenn diese mit weiteren Kameras kooperiert und alle vorliegenden Beobachtungen in einem zentralen Ausgleichungssystem fusioniert werden.

Literaturverzeichnis

- Bosch (2020). *Produktdatenblatt Multi purpose camera*. Robert Bosch GmbH. URL: https://www.bosch-mobility-solutions.com/media/global/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/multi-camera-system/multi-purpose-camera/zusammenfassung_multifunktionskamera_de.pdf (besucht am 18.09.2020).
- Cucci, D. A. und Matteucci, M. (2014). „Position tracking and sensors self-calibration in autonomous mobile robots by Gauss-Newton optimization“. In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, S. 1269–1275.
- Cucci, Davide Antonio, Rehak, Martin und Skaloud, Jan (2017). „Bundle adjustment with raw inertial observations in UAV applications“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 130, S. 1 –12.
- Förstner, Wolfgang und Wrobel, Bernhard (2016). *Photogrammetric computer vision : statistics, geometry, orientation, and reconstruction, Geometry and computing*. Bd. volume 11. Berlin: Springer;
- Irsigler, Markus (2009). „Multipath propagation, mitigation and monitoring in the light of Galileo and the modernized GPS“. Diss. Neubiberg, Univ. d. Bundeswehr München.
- Kaess, M., Ranganathan, A. und Dellaert, F. (2008). „iSAM: Incremental Smoothing and Mapping“. In: *IEEE Transactions on Robotics* 24.6, S. 1365–1378.
- Kim, B., Kaess, M., Fletcher, L., Leonard, J., Bachrach, A., Roy, N. und Teller, S. (2010). „Multiple relative pose graphs for robust cooperative mapping“. In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 3185–3192.
- Klein, G. und Murray, D. (2007). „Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces“. In: *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, S. 225–234.
- Kraus, Karl (2004). *Photogrammetrie / Karl Kraus ; Bd. 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, De-Gruyter-Lehrbuch, De-Gruyter-Studium*. Berlin: de Gruyter.

- Lee, George Y. G. und McGlone, J. Chris (2013). *Manual of photogrammetry*. Bethesda, Md.: ASPRS, American Soc. for Photogrammetry und Remote Sensing.
- Li, Fu, Yang, Shaowu, Yi, Xiaodong und Yang, Xuejun (12/2017). „CORB-SLAM: a Collaborative Visual SLAM System for Multiple Robots“. In: *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*.
- Lichtenegger, Herbert, Hofmann-Wellenhof, Bernhard und Wlasle, Elmar (2007). *GNSS : Global Navigation Satellite Systems - GPS, Glonass, Galileo, and More*. Wien: Springer;
- Luhmann, Thomas (2010). *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. ger. 3., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Wichmann, XVIII, 668 S.
- Mur-Artal, R., Montiel, J. M. M. und Tardós, J. D. (2015). „ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System“. In: *IEEE Transactions on Robotics* 31.5, S. 1147–1163.
- Niemeier, Wolfgang (2008). *Ausgleichsrechnung : statistische Auswertemethoden*. Berlin: de Gruyter.
- Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K. und Bradski, G. (2011). „ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF“. In: *2011 International Conference on Computer Vision*, S. 2564–2571.
- Seiffert, Ulrich und Braess, Hans-Hermann (2013). *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, ATZ / MTZ-Fachbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg;
- Siegel, M. (2003). „The sense-think-act paradigm revisited“. In: *1st International Workshop on Robotic Sensing, 2003. ROSE 03*. IEEE; 5 pp.
- Soler, Tomas und Chin, Miranda (01/1985). „On transformation of covariance matrices between local Cartesian coordinate systems and commutative diagrams“. In: *45th Annual Meeting ASP-ACSM Convention*, S. 393–406.
- Statistik - Genauigkeit von Messungen - Ringversuche : Normen, DIN-Taschenbuch* (2004). Bd. 355. Wechselnde Verlagsorte und Verleger: Beuth.
- Strasdat, H., Montiel, J. M. M. und Davison, A. J. (2010). „Real-time monocular SLAM: Why filter?“ In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 2657–2664.

- Thrun, Sebastian, Burgard, Wolfram und Fox, Dieter (2005). *Probabilistic robotics*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Titterton, David H. und Weston, John L. (2004). *Strapdown inertial navigation technology, IET radar, sonar, navigation, and avionics series*. Bd. 17. London: Inst. of Electrical Engineers.
- Tong, Chi Hay, Anderson, Sean, Dong, Hang und D. Barfoot, Timothy (2014). „Pose Interpolation for Laser-based Visual Odometry“. In: *Journal of Field Robotics* 31.5, S. 731–757.
- Trusheim, P. und Heipke, C. (2020). „Precision of Visual Localization using Dynamic Ground Control Points“. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B1-2020*, S. 363–370.