

Signalverarbeitung für das Bewegungstracking von kinematischen Ketten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)
der Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Tobias Schmidt

Kiel, 2024

Tag der Einreichung:
Tag der Disputation:

[XX.XX.2024?]
[XX.XX.2024?]

Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmidt
[Prof. Dr. rer. nat. XXX]
[Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. XXX]

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation nach Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist und von mir selbst verfasst worden ist, wobei mir mein Doktorvater Herr Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmidt beratend zur Seite stand. Die Arbeit war weder in Teilen noch im Ganzen Bestandteil eines früheren Prüfungsverfahrens und ist an keiner anderen Stelle zur Prüfung eingereicht. Der Inhalt der Arbeit wurde in Teilen in meinen wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht. Dies ist in der Arbeit entsprechend vermerkt. Die Arbeit ist nach bestem Wissen und Gewissen konform mit den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis, welche durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft festgelegt sind.

Ort	Datum	Vorname Nachname
-----	-------	------------------

Kurzzusammenfassung

TEXT

Abstract

TEXT

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xv
Notation	xvii
Symbolverzeichnisse	xix
Verzeichnis lateinischer Symbole	xix
Verzeichnis griechischer Symbole	xix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Einordnung der Arbeit	1
1.3 Aufbau der Arbeit	1
2 Grundlagen	3
2.1 Feldtheoretische Grundlagen	3
2.2 Grundlagen der Signalverarbeitung	3
2.3 Grundlagen Lokalisierung	3
2.3.1 optisch	3
2.3.2 IMU	3
2.3.3 magnetisch	3
2.4 Anatomie	3
3 Konzeption	5
3.1 Einordnung und Unterteilung in Aufgabenpakete	5
3.1.1 Relative Lokalisierung	5
3.1.2 Absolute Lokalisierung	5
4 Algorithmik	7
4.1 Simulationsetup	7
4.2 Maximalvektor	7
4.2.1 Lokalisierungszusammenhänge	8
4.2.2 Merkmalsextraktion	10
4.3 Relative Lokalisierung	10
4.3.1 Iterativer Algorithmus	11
4.3.2 Eindeutigkeit der Lösung	11
4.3.3 Optimierungen	13
4.3.4 Analyse der Unsicherheiten	13

4.3.5	Nachverarbeitung	13
4.4	Absolute Lokalisierung	15
4.4.1	Sender Empfänger Dualismus	15
4.4.2	Äquibetragsflächen	15
4.4.3	Schätzalgorithmus	15
5	Umsetzung	17
5.1	Allgemeines zum Kapitel	17
5.2	Hardware	17
5.3	Implementierung	17
5.4	Diskussion	17
6	Evaluierung	19
6.1	Messszenarios	19
6.2	Messergebnisse	19
6.3	Fehlerdiskussion	19
7	Zusammenfassung und Ausblick	21
7.1	Zusammenfassung	21
7.2	Ausblick	21
	Literaturverzeichnis	23
A	Weitere Messdaten	I
A.1	Tmp	I
B	Herleitung XXX	III
B.1	Tmp	III

Abbildungsverzeichnis

4.1	Verwendetes Setup für die Herleitung: \vec{e}_r und \vec{e}_s liegen beide in der xy -Ebene. ϕ_m und θ_m definieren die Richtung des rotierenden magnetischen Dipols \vec{e}_m in Kugelkoordinaten.	8
4.2	Einfaches Beispiel einer kinematischen Kette aus zwei Elementen: Die Abbildung zeigt eine im Ursprung lokalisierte Quelle, mit detektiertem Maximalvektor(gelb). Die Quelle ist am ersten kinematischen Element befestigt. Auf dem zweiten Element ist ein Magnetfeldsensor angebracht. In rot ist die Projektion $\vec{e}_{\max,pyz}$ mit dem zugehörigen Winkel $\phi_{\max,1}$ dargestellt. Die zweite Projektion $\vec{e}_{\max,pxz}$ ist in blau dargestellt, mit zugehörigem Winkel $\phi_{\max,2}$	12
4.3	Einfacher Aufbau: Im Ursprung ist ein magnetischer Aktuator lokalisiert. In blau ist die Projektion $\vec{e}_{\max,pxz}$ mit dem zugehörigen Winkel $\phi_{\max,2}$. Auf der Sensorseite ist die Projektion der Sensorachse in die xz -Ebene mit dem Winkel $\phi_{s,2}$	13
4.4	The relation between $\phi_{s,j}$ and $\phi_{\max,j}$ is represented for different values of Q . The plots are subdivided for different values of Q . In the ranges $0 < Q < 0.5$ and $Q > 1$ there is a clear assignment, i.e., there is a unique bidirectional relation between $\phi_{\max,j}$ and $\phi_{s,j}$. However, between 0.5 and 1 we observe a non-unique relation.	14

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

AD	.....	Analog-Digital
AlN	.....	Aluminiumnitrid
AP	.....	Affine Projektion (engl.: <i>Affine Projection</i>)
Au	.....	Gold
Cr	.....	Chrom
Cu	.....	Kupfer
DA	.....	Digital-Analog
DNR	.....	Störungs-zu-Rausch-Verhältnis (engl.: <i>Distortion-to-Noise Ratio</i>)
EBASNR	.....	geschätztes, biomagnetisches und gemittelttes SNR (engl.: <i>Estimated Biomagnetic Averaged Signal-to-Noise Ratio</i>)
engl.	.....	englisch
FeCoSiB	.....	metallisches Glas (Eisen-Cobalt-Silizium-Bor)
LMS-Algorithmus	.....	stochastischer Gradientenalgorithmus (engl.: <i>Least Mean Square Algorithm</i>)
LOD	.....	Detektionslimit (engl.: <i>Limit of Detection</i>)
MEMS	.....	mikro-elektromechanische Systeme (engl.: <i>Microelectromechanical Systems</i>)
MnIr	.....	Mangan-Iridium
MVDR	.....	Minimum Variance Distortionless Beamformer (engl.: <i>Minimum Variance Distortionless Beamformer</i>)
NLMS-Algorithmus	.....	normalisierter stochastischer Gradientenalgorithmus (engl.: <i>Normalized Least Mean Square Algorithm</i>)
PZT	.....	Blei-Zirkonat-Titanat
RLS-Algorithmus	.....	rekursives stochastisches Gradientenverfahren (engl.: <i>Recursive Least Squares Algorithm</i>)
SNR	.....	Signal-zu-Rausch-Verhältnis (engl.: <i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
Ta	.....	Tantal
w.E.	.....	willkürliche Einheit

Notation

X	Skalar, zumeist frequenzabhängig (nicht fettgedruckt, groß)
\mathbf{X}	Matrix (fettgedruckt, groß)
x	Skalar, zumeist zeitabhängig (nicht fettgedruckt, klein)
\mathbf{x}	Vektor (fettgedruckt, klein)
$|z|$ .....	Betrag der komplexen Zahl z
$\arg\{z\}$	Argument der komplexen Zahl z
$\Im\{z\}$	Imaginärteil der komplexen Zahl z
z^*	konjugierte komplexe Zahl zur komplexen Zahl z
$\Re\{z\}$	Realteil der komplexen Zahl z
j	imaginäre Einheit, $j^2 = -1$
$\mathbf{x}^H, \mathbf{X}^H$	hermitescher Vektor/Matrix, $\mathbf{X}^H = (\mathbf{X}^*)^T$
$\mathbf{x}^T, \mathbf{X}^T$	transponierter Vektor/Matrix
$\lg(z)$	Logarithmus der reellen Zahl z zur Basis 10
$\mathbf{x} \circ \mathbf{y}$	Hadamard-Produkt, elementweise Multiplikation
$\|\mathbf{x}\|$ .....	Norm des Vektors
$E x(n)$	Erwartungswert von $x(n)$
$\max\{x(n)\}$	Maximum von $x(n)$
$\min\{x(n)\}$	Minimum von $x(n)$

Symbolverzeichnisse

Verzeichnis lateinischer Symbole

f_s Abtastrate

k Blockindex

n Zeitindex

t Zeit

Verzeichnis griechischer Symbole

μ Frequenzstützstelle

Kapitel 1

Einleitung

Text

1.1 Motivation

Text

1.2 Einordnung der Arbeit

Text

1.3 Aufbau der Arbeit

Text

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Feldtheoretische Grundlagen

2.2 Grundlagen der Signalverarbeitung

2.2.1

2.3 Grundlagen Lokalisierung

2.3.1 optisch

2.3.2 IMU

2.3.3 magnetisch

2.4 Anatomie

verwendete Gelenke Beschreibung von kinematischen Ketten

Kapitel 3

Konzeption

Im Folgenden Kapitel, wird die dieser Arbeit zugrunde liegende Aufgabe in kleinere Einzelpakete unterteilt. Bei herkömmlichen magnetischen Bewegungstracking Systemen wird zunächst jedes Element einzeln lokalisiert und im Anschluss zu einer kinematischen Kette zusammengefügt. Dies führt zu einer zweistufigen Struktur, einer vorigen Lokalisierung und einem anschließenden Fitting.

Der Aufbau des Systems soll aus einem Handschuh bestehen, bei dem jedes kinematische Element mit einem Sensor ausgestattet wird. Auf dem Handgelenk wird eine 3D-Spule angebracht, die ein künstliches magnetisches Feld erzeugen kann. Im gesamten Raum werden ortsfeste Sensoren angebracht.

3.1 Einordnung und Unterteilung in Aufgabenpakete

Die Lokalisierungsaufgabe soll für eine bessere Effizienz in zwei kleinere Aufgaben aufgeteilt werden. Zum einen eine relative Lokalisierung, die die Handhaltung oder Haltung der kinematischen Kette bestimmt. Zum anderen wird eine absolute Lokalisierung benötigt, welche die Position und Orientierung der 3D-Spule innerhalb des Messvolumens bestimmt.

3.1.1 Relative Lokalisierung

3.1.2 Absolute Lokalisierung

Kapitel 4

Algorithmik

Im Folgenden Kapitel soll die verwendete Algorithmik vorgestellt werden.

4.1 Simulationsetup

Die Herleitung des Algorithmus soll mit kleinen Simulationen veranschaulicht werden. Die Simulation besteht aus 3 idealen Dipolquellen, die die verwendete Quelle modellieren, sowie zunächst einem ideal angenommenen Punktsensor. Dies bedeutet, dass der Sensor die Projektion des magnetischen Feldes auf die sensitive Achse des Sensors detektiert. Im späteren Verlauf wird für die Herleitung des Schätzalgorithmus eine kinematische Kette mit zwei Elementen verwendet.

4.2 Maximalvektor

In der vorgestellten Algorithmik wird ein räumliches Feature eingeführt. Der Hauptgedanke dahinter ist, dass eine kinematische Kette durch die Ausrichtung der einzelnen Elemente beschrieben werden können. Die Ausrichtung der einzelnen Elemente kann in kartesischen Koordinaten mit einem Vektor der Länge 1 beschrieben werden. Die Zielgröße ist dementsprechend eine Anzahl an räumlichen 3D-Vektoren, daher wurde als Eingangsgröße ebenfalls ein räumlicher Vektor ausgewählt. Der Maximalvektor (MV) wird wie

folgt definiert. Es sei eine dreidimensionale Quelle $\vec{m} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}$, lokalisiert im Koordinatenursprung, sowie ein Sensor am Ort \vec{r} mit einer Orientierung der sensitiven Achse \vec{e}_s .

Ein magnetischer Dipol sei definiert wie folgt [Zitat]

$$\vec{B}_{\text{dip}}(\vec{r}, \vec{m}) = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{3\vec{r}(\vec{m} \cdot \vec{r}) - \vec{m}r^2}{r^3}. \quad (4.1)$$

Ein idealer Sensor misst die Projektion des magnetischen Feldes auf die Sensorachse

$$B_{\text{sensor}}(\vec{r}, \vec{e}_s, \vec{m}) = \vec{B}_{\text{dip}}(\vec{r}) \cdot \vec{e}_s. \quad (4.2)$$

Der MV ist in diesem Fall, die Dipolorientierung $\frac{\vec{m}}{|\vec{m}|}$ für die $B_{\text{sensor}}(\vec{r}, \vec{e}_s, \vec{m})$ maximal wird.

4.2.1 Lokalisierungszusammenhänge

Im Folgenden soll der Zusammenhang zwischen dem MV \vec{e}_{\max} , dem normierten Positionsvektor \vec{e}_r und der Sensororientierung \vec{e}_s hergeleitet werden.

Da ein Zusammenhang zwischen den einzelnen normierten Vektoren gesucht wird, nutzen wir eine normierte Beschreibung des Dipolfeldes und kommen zu folgender Beschreibung

$$\vec{B}_{\text{norm}} = \frac{4\pi r^3}{m} \vec{B}_{\text{dip}}(\vec{r}) = 3\vec{e}_r(\vec{e}_m \cdot \vec{e}_r) - \vec{e}_m. \quad (4.3)$$

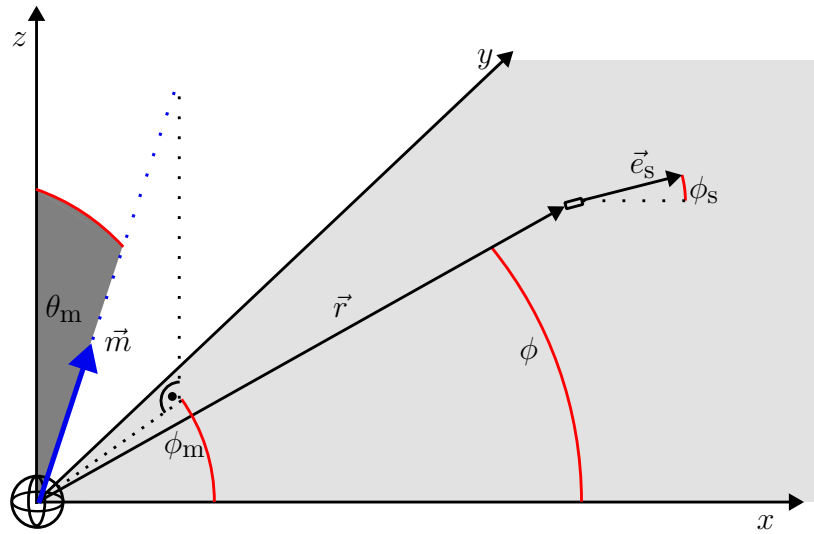


Abbildung 4.1: Verwendetes Setup für die Herleitung: \vec{e}_r und \vec{e}_s liegen beide in der xy -Ebene. ϕ_m und θ_m definieren die Richtung des rotierenden magnetischen Dipols \vec{e}_m in Kugelkoordinaten.

Für die Herleitung werden zunächst einige Annahmen getroffen. Zwei nicht kollineare Vektoren spannen immer eine Ebene auf. Daher kann das Koordinatensystem so gelegt werden, dass \vec{e}_r und \vec{e}_s in der xy -Ebene liegen. Die beiden Vektoren seien daher wie folgt definiert.

$$\vec{e}_r = \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \vec{e}_s = \begin{bmatrix} \cos(\phi_s) \\ \sin(\phi_s) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Die dreidimensionale magnetische Quelle hat ein konstantes magnetisches Dipolmoment der Stärke m die jedoch in jede beliebige Richtung zeigen kann. Die Definition der Richtung ist an die Rücktransformation von Kugelkoordinaten in kartesische Koordinaten angelehnt. Das Dipolmoment ist in kartesischen Koordinaten definiert wie folgt

$$\vec{e}_m = \begin{bmatrix} \cos(\phi_m) \sin(\theta_m) \\ \sin(\phi_m) \sin(\theta_m) \\ \cos(\theta_m) \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Durch einsetzen der Vektordefinition in Gl. 4.3 kommt man zu den folgenden vektoriellen Komponenten des Dipolfeldes

$$\begin{aligned} B_{\text{norm},x}(\phi, \phi_m, \theta_m) &= [3 \cos(\phi)^2 - 1] \cos(\phi_m) \sin(\theta_m) \\ &+ 3 \sin(\phi_m) \sin(\theta_m) \sin(\phi) \cos(\phi), \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} B_{\text{norm},y}(\phi, \phi_m, \theta_m) &= [3 \sin(\phi)^2 - 1] \sin(\phi_m) \sin(\theta_m) \\ &+ 3 \cos(\phi_m) \sin(\theta_m) \cos(\phi) \sin(\phi), \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$B_{\text{norm},z}(\theta_m) = -\cos(\theta_m). \quad (4.8)$$

Mit Gl. 4.2 kommt man zum Sensorsignal B_{sensor}

$$B_{\text{sensor}}(\phi, \phi_s, \phi_m, \theta_m, r) = \frac{m}{4\pi r^3} \left((\cos(\phi_s) B_{\text{norm},x}(\phi, \phi_m, \theta_m) + \sin(\phi_s) B_{\text{norm},y}(\phi, \phi_m, \theta_m)) \right). \quad (4.9)$$

Bezüglich einer Varierung von θ_m , wird das Sensorsignal maximal wenn $\theta_m = \frac{\pi}{2}$. Dies zeigt außerdem, dass die Komponente des rotierenden Dipols, die senkrecht zur von \vec{e}_r und \vec{e}_s aufgespannten Ebene liegt, keinen Einfluss auf das Sensorsignal hat. Diese Beobachtung zeigt, dass der MV in dieser aufgespannten Ebene liegen muss. Diese Erkenntnis vereinfacht die Problemstellung zu einem 2D-Problem und kann daher in einer Ebene weiter betrachtet werden.

Um einen Zusammenhang zwischen den drei Vektoren zu erhalten wird nun angenommen, dass der Sensor auf x -Achse lokalisiert sei. Die Vektoren sind in kartesischen Koordinaten wie folgt definiert

$$\vec{e}_r = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{e}_m = \begin{bmatrix} \cos(\phi_m) \\ \sin(\phi_m) \end{bmatrix}, \quad \vec{e}_s = \begin{bmatrix} \cos(\phi_s) \\ \sin(\phi_s) \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

Dies führt zum folgenden magnetischen normierten Feld für die einzelnen Komponenten $B_{\text{norm},x}$, $B_{\text{norm},y}$, $B_{\text{norm},z}$ führt

$$B_{\text{norm},x}(\phi) = 2 \cos(\phi_m), \quad (4.11)$$

$$B_{\text{norm},y}(\phi) = -\sin(\phi_m), \quad (4.12)$$

$$B_{\text{norm},z}(\phi) = 0. \quad (4.13)$$

$$(4.14)$$

Die Projektion auf die Sensorachse führt zu:

$$B_{\text{sensor}}(\phi_s, \phi_m) = \frac{m}{4\pi r^3} (2 \cos(\phi_m) \cos(\phi_s) - \sin(\phi_m) \sin(\phi_s)). \quad (4.15)$$

Es wird der Wert ϕ_{max} von ϕ_m gesucht, für den B_{sensor} maximal wird. Dafür wird Gleichung 4.15 nach ϕ_m differenziert und man erhält einen Zusammenhang zwischen ϕ_{max} und ϕ_s .

$$\frac{dB_{\text{sensor}}(\phi_m)}{d\phi_m} = \frac{m}{4\pi r^3} (-2 \sin(\phi_m) \cos(\phi_s) - \sin(\phi_s) \cos(\phi_m)) \quad (4.16)$$

$$-2 \sin(\phi_{\max}) \cos(\phi_s) - \sin(\phi_s) \cos(\phi_{\max}) = 0. \quad (4.17)$$

$$-2 \cdot \tan(\phi_{\max}) = \tan(\phi_s). \quad (4.18)$$

Der gefundene Zusammenhang zeigt einen Zusammenhang zwischen \vec{e}_{\max} , \vec{e}_r und \vec{e}_s . Dieser kann genutzt werden um bei bekanntem \vec{e}_r und detektiertem Maximalvektor \vec{e}_{\max} das zugehörige \vec{e}_s zu bestimmen. Die zugehörige Berechnungsvorschrift wird im folgenden einmal gezeigt.

1. Zunächst wird die Rotationsachse bestimmt \vec{e}_n :

$$\vec{e}_n = \frac{\vec{e}_{\max} \times \vec{e}_r}{\|\vec{e}_{\max} \times \vec{e}_r\|}. \quad (4.19)$$

2. Im zweiten Schritt wird der Winkel zwischen MV und dem normierten Positionsvektor bestimmt:

$$\phi_{\max} = \arccos(\vec{e}_{\max} \cdot \vec{e}_r). \quad (4.20)$$

3. Anschließend wird der Winkel zwischen dem Ortseinheitsvektor und der Sensorausrichtung aus Gl. 4.18:

$$\phi_s = \arctan(-2 \tan(\phi_{\max})). \quad (4.21)$$

4. Abschließend kann für jeden \vec{e}_r die Sensororientierung \vec{e}_s wie folgt berechnet werden:

$$\vec{e}_s = \cos(\phi_s)(\vec{e}_n \times \vec{e}_r) \times \vec{e}_n + \sin(\phi_s)(\vec{e}_n \times \vec{e}_r). \quad (4.22)$$

4.2.2 Merkmalsextraktion

Zeitlich Räumlich rotierendes Feld

Einführung von kartesischen und sphärischen magnetischen Koordinaten

FDMA

Einordnung in übliche FDMA Ansätze

Vergleich

4.3 Relative Lokalisierung

In diesem Kapitel wird ein Ansatz aufbauend auf den theoretischen Grundlagen des vorherigen Kapitels vorgestellt. Zunächst wird ein iterativer Ansatz gezeigt, mit dem die Haltung einer kinematischen Kette effizient geschätzt werden kann. Desweiteren werden die Eindeutigkeit, Optimierungen (des Modells und des Rechenbedarfs) und eine Nachverarbeitung vorgestellt.

4.3.1 Iterativer Algorithmus

Es wurde ein iterativer Algorithmus entwickelt, der Vorwissen über die Anatomie integriert und so effizient die Haltung schätzt. Die Prämisse für den Algorithmus ist, dass jedes kinematische Element, mit Ausnahme des ersten, mit einem Magnetfeldsensor ausgestattet wird. Am ersten kinematischen Element ist eine 3D-Spule befestigt. Desweiteren wird zunächst angenommen, dass die Sensorachse dieselbe Orientierung wie das zugehörige kinematische Element und der Sensor genau in der Mitte des kinematischen Elements lokalisiert. Im Allgemeinen hat die Pose eines Sensors fünf Freiheitsgrade, drei für die Position, sowie 2 für die Orientierung der Sensorachse. Durch die Kopplung des Sensors an die Elemente wird die Anzahl der Freiheitsgrade reduziert zur Anzahl der Freiheitsgrade des Gelenks. Bei einem Sattelgelenk sind dies zwei.

Bild einfügen Sensorplacement

Der Algorithmus kombiniert die magnetischen Zusammenhänge und das Vorwissen über die Anatomie. Die Grundidee ist, dass bei korrekt angenommener Position des Sensors die korrekte Orientierung mit Hilfe des MVs bestimmt werden kann. Es wird zunächst eine zufällige Orientierung des Sensors angenommen. Mit der Anatomie wird die zugehörige Sensorposition bestimmt. Im nächsten Schritt wird die Sensororientierung für die Position mit den magnetischen Zusammenhängen bestimmt. Diese Prozedur wird mit der jeweils neuen Orientierung wiederholt bis die Veränderung der Orientierung einen Schwellwert unterschreitet. Der Ablauf des Algorithmus ist in Abbildung X zu sehen.

Bild einfügen Programmablaufplan

Eine Visualisierung dieser Prozedur ist in Abbildung, wo die Orientierungen und Positionen für die einzelnen Iterationen dargestellt ist. Nach etwa 15 Iterationen stimmt die Sensorpose mit einer potentiellen Pose überein.

Bild Visualisierung des Prozesses

Einfluss der Längenänderungen auf die Konvergenzgeschwindigkeit

4.3.2 Eindeutigkeit der Lösung

Im folgenden wird die Eindeutigkeit des vorgestellten iterativen Algorithmus geprüft. Der Algorithmus ist eindeutig, wenn jedem möglichen Eingangsvektor \vec{e}_{\max} eine Sensororientierung \vec{e}_s zugeordnet werden kann. Die Eingangs- und Ausgangsvektoren werden dafür in jeweils zwei Winkel aufgeteilt.

Zunächst definieren wir zur Darstellung, dass ein Beispielgelenk auf der x -Achse lokalisiert sei und $\vec{e}_{jr} = \vec{e}_x$. Außerdem werde ein dazu orthogonaler Vektor definiert, der im weiteren als Bezugsvektor $\vec{e}_{\text{Orth},B}$ dient. Um dies leichter darzustellen wird $\vec{e}_{\text{Orth},B} = \vec{e}_z$ angenommen. Es werden nun zwei Projektionen von \vec{e}_{\max} erstellt. Zum einen in die Projektion $\vec{e}_{\max,pyz}$ von \vec{e}_r aufgespannte Ebene, die yz -Ebene. Die zweite Projektion $\vec{e}_{\max,pxz}$ ist in die von \vec{e}_r und $\vec{e}_{\text{Orth},B}$ aufgespannten Ebene, die xz -Ebene. Aus den zwei projizierten Vektoren, werden nun zwei Winkel abgeleitet. Der Winkel $\phi_{\max,1}$ zwischen dem Bezugsvektor und $\vec{e}_{\max,pyz}$, sowie der Winkel zwischen \vec{e}_{rj} und $\vec{e}_{\max,pxz}$. Die Darstellung des Vektors ähnelt an dieser Stelle der Darstellung in Kugelkoordinaten, in der auch zwei Winkel verwendet werden um die Richtung zu definieren. Der Wertebereich der beiden Winkel ist $0 < \phi_{\max,1} < \pi$, sowie $0 < \phi_{\max,2} < 2\pi$. Die projizierten Vektoren und die verwendeten Winkel sind in der Abbildung 4.2 dargestellt.

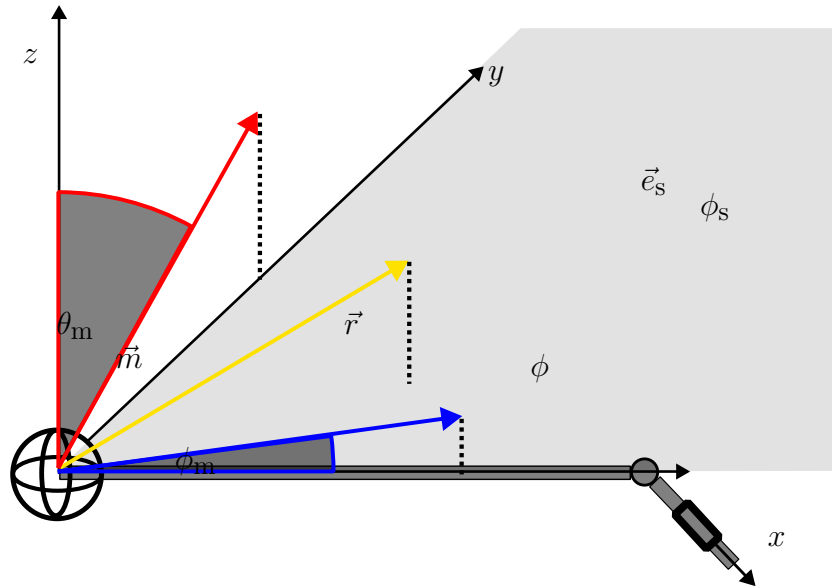


Abbildung 4.2: Einfaches Beispiel einer kinematischen Kette aus zwei Elementen: Die Abbildung zeigt eine im Ursprung lokalisierte Quelle, mit detektiertem Maximalvektor (gelb). Die Quelle ist am ersten kinematischen Element befestigt. Auf dem zweiten Element ist ein Magnetfeldsensor angebracht. In rot ist die Projektion $\vec{e}_{\max,pyz}$ mit dem zugehörigen Winkel $\phi_{\max,1}$ dargestellt. Die zweite Projektion $\vec{e}_{\max,pxz}$ ist in blau dargestellt, mit zugehörigem Winkel $\phi_{\max,2}$.

Der Ausgangsvektor, die Sensororientierung wird wie der Maximalvektor aufgeteilt. So ergeben sich auf Sensorseite die Winkel $\phi_{s,1}$ und $\phi_{s,2}$. Der Vorteil dieser Darstellung ist nun, dass es eine Entkopplung gibt. $\phi_{s,1}$ hängt nur von $\phi_{\max,1}$, und $\phi_{s,2}$ nur von $\phi_{\max,2}$.

Wie bereits in Kapitel 4.2.1 gezeigt, liegen Sensorposition, Maximalvektor und Sensororientierung in einer Ebene. Daher liegt auch die Position des Gelenks in dieser Ebene, da dieser Ort von der Sensorposition in Richtung der Sensororientierung liegt. Das Kreuzprodukt aus Maximalvektor und Gelenkposition ergibt den Normalenvektor dieser Ebene. Diese Ebene ist in diesem Fall, die xz -Ebene um den Winkel $\phi_{\max,1}$ geneigt. Das führt zu

$$\phi_{s,1} = \phi_{\max,1}, \quad (4.23)$$

und somit gibt es eine eindeutige Zuordnung des ersten Winkels.

Im zweiten Schritt wird ein Zusammenhang zwischen $\phi_{\max,2}$ und $\phi_{s,2}$ gesucht. In Abbildung 4.3 sind die Winkel skizziert. Die Betrachtungen des zweiten Winkels erfolgt im zweidimensionalen, da nach Betrachtung des ersten Winkels bereits eine Ebene definiert wurde. Im Folgenden wird zunächst ein funktionaler Zusammenhang $\phi_{\max,2} = f(\phi_{s,2})$ aufgestellt. Zu nächst sei die Gelenkposition \vec{r}_j wie folgt definiert, wobei l_{aj} , der Distanz von Quelle zu Gelenk entspricht

$$\vec{r}_j = \begin{bmatrix} l_{aj} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Die Position des Sensors \vec{r}_s kann mit der Länge zwischen Sensor und Gelenk l_{js} wie folgt

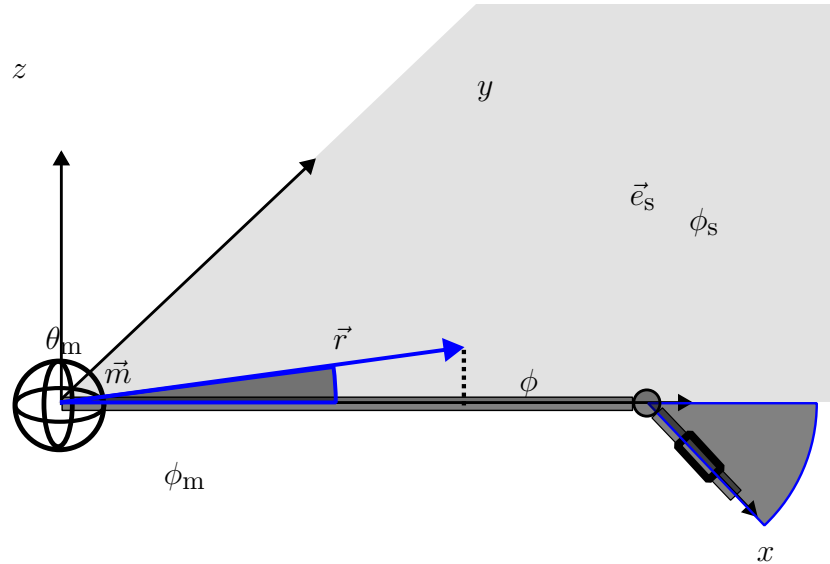


Abbildung 4.3: Einfacher Aufbau: Im Ursprung ist ein magnetischer Aktuator lokalisiert. In blau ist die Projektion $\vec{e}_{\max,pxz}$ mit dem zugehörigen Winkel $\phi_{\max,2}$. Auf der Sensorseite ist die Projektion der Sensorachse in die xz -Ebene mit dem Winkel $\phi_{s,2}$.

beschrieben werden.

$$\vec{r}_s = \begin{bmatrix} l_{aj} + l_{js} \cos(\phi_{s,2}) \\ l_{js} \sin(\phi_{s,2}) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Nun wird zunächst die Winkel zwischen x -Achse und \vec{r}_s bestimmt.

$$\phi_r = \arctan\left(\frac{l_{js} \cos(\phi_{s,2})}{l_{aj} + l_{js} \sin(\phi_{s,2})}\right) \quad (4.26)$$

mit Gleichung 4.18 kann nun $\phi_{\max,2}$ bestimmt werden

$$\phi_{\max,2} = -\arctan\left(\frac{1}{2} \tan(\phi_{s,2} - \phi_r)\right). \quad (4.27)$$

Dieser Zusammenhang ist nicht trivial und nicht einfach umkehrbar.

4.3.3 Optimierungen

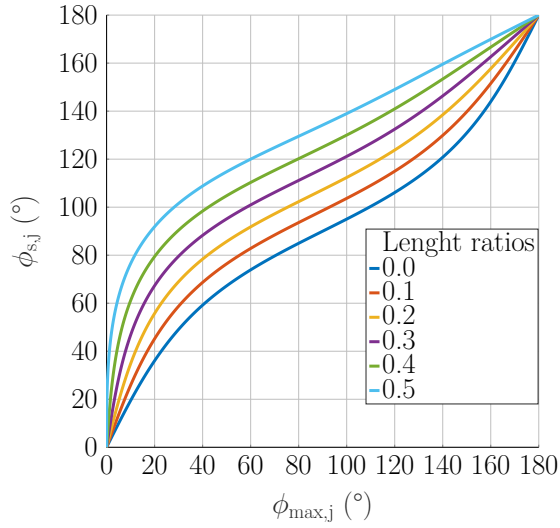
Laufzeitoptimierung(LookUpTable), Korrektur von Modellfehlern (Dicke des Fingers, Verdrehung des Sensors) Diskussion...

4.3.4 Analyse der Unsicherheiten

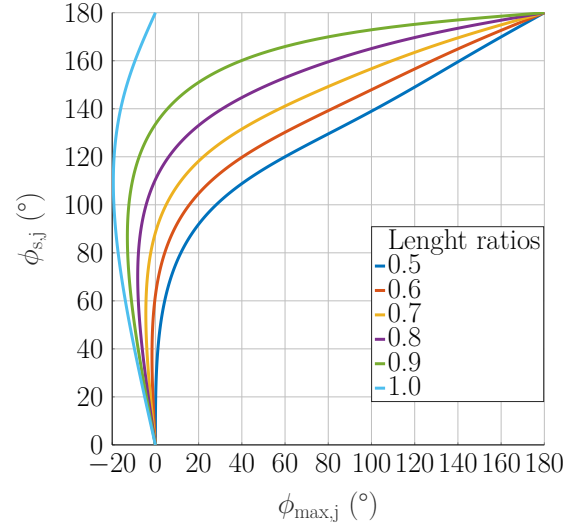
Einführung virtuelle/mechanische Achsen,

4.3.5 Nachverarbeitung

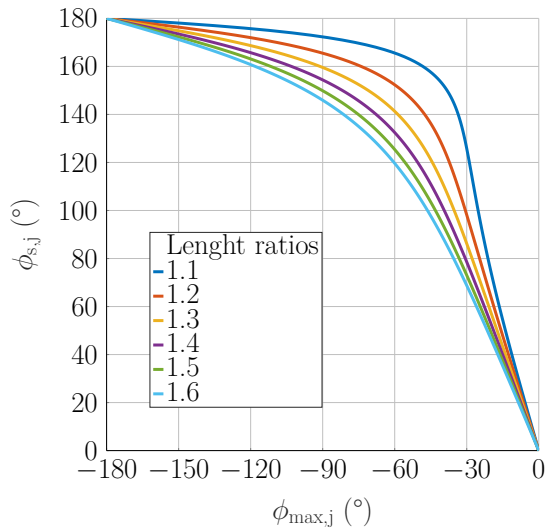
Kalman Filter



(a) $0 < Q \leq 0.5$



(b) $0.5 < Q \leq 1$



(c) $1 < Q$

Abbildung 4.4: The relation between $\phi_{s,j}$ and $\phi_{\max,j}$ is represented for different values of Q . The plots are subdivided for different values of Q . In the ranges $0 < Q < 0.5$ and $Q > 1$ there is a clear assignment, i.e., there is a unique bidirectional relation between $\phi_{\max,j}$ and $\phi_{s,j}$. However, between 0.5 and 1 we observe a non-unique relation.

4.4 Absolute Lokalisierung

Übersicht, Schätzung der Koordinaten separat,

4.4.1 Sender Empfänger Dualismus

4.4.2 Äquibetragsflächen

4.4.3 Schätzalgorithmus

Kapitel 5

Umsetzung

5.1 Allgemeines zum Kapitel

5.2 Hardware

5.3 Implementierung

5.4 Diskussion

Kapitel 6

Evaluierung

6.1 Messszenarios

6.2 Messergebnisse

6.3 Fehlerdiskussion

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Text

7.1 Zusammenfassung

Text

7.2 Ausblick

Text

Literaturverzeichnis

Anhang A

Weitere Messdaten

A.1 Tmp

Text

Anhang B

Herleitung XXX

Text

B.1 Tmp

Text