

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	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Notation	xix
Symbolverzeichnisse	xxi
Verzeichnis lateinischer Symbole	xxi
Verzeichnis griechischer Symbole	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Einordnung der Arbeit	1
1.3 Aufbau der Arbeit	1
2 Bewegungsanalyse	3
2.1 Bewegungsbeschreibung	3
2.1.1 Gelenkarten	3
2.1.2 Bewegungsdefinition	3
2.2 Konventionelle Systeme	3
2.2.1 optische Systeme	3
2.2.2 IMU basierte Systeme	3
2.3 Schlussbetrachtung	3
3 Magnetische Räumliche Signalmerkmale	5
3.1 Modellierung magnetischer Felder	5
3.1.1 Biot-Savart	5
3.1.2 Magnetischer Dipol	5
3.1.3 Quasistationäre Felder	5
3.2 3D Spule	5
3.3 Sensormodellierung	6
3.4 Maximalvektor	6
3.4.1 Lokalisierungszusammenhänge	7
4 Lokalisierungsalgorithmen	11
4.1 Simulationsetup	11
4.2 Maximalvektor	12
4.3 Relative Lokalisierung	13
4.3.1 Iterativer Algorithmus	13

4.3.2	Eindeutigkeit der Lösung	13
4.3.3	Analyse der benötigten Rechenleistung	16
4.3.4	Optimierungen	17
4.3.5	Analyse der Unsicherheiten	17
4.4	Absolute Lokalisierung	19
4.4.1	Grundsätzliche Gedanken	19
4.4.2	Ebenenschnitt	19
4.4.3	Orientierung	19
5	Signalverarbeitung	21
5.1	Allgemeines zum Kapitel	21
5.2	Hardware	21
5.3	Implementierung	21
5.3.1	Vorverarbeitung	21
5.3.2	Merkmalsextraktion	21
5.3.3	Lokalisierung	25
5.3.4	Nachverarbeitung	25
6	Evaluierung	27
6.1	Relative Lokalisierung	27
6.1.1	Simulative Evaluierung	27
6.1.2	Experimentelle Evaluierung	27
6.1.3	Diskussion	27
6.2	Absolute Lokalisierung	27
6.2.1	Simulative Evaluierung	27
6.2.2	Experimentelle Evaluierung	27
6.2.3	Diskussion	27
7	Zusammenfassung und Ausblick	29
7.1	Zusammenfassung	29
7.2	Ausblick	29
	Literaturverzeichnis	31
A	Weitere Messdaten	I
A.1	Tmp	I
B	Herleitung XXX	III
B.1	Tmp	III

Abbildungsverzeichnis

3.1	3D-Spule: a skizziert das modellierte Simulationsobjekt. Ein Foto der entsprechenden Realisierung ist in b zu sehen. Beide Objekte bestehen aus drei zueinander orthogonal stehenden Spulen. Die rote Spule steht für die X-Spule, die grüne für die Y-Spule und die blaue für die Z-Spule. Somit	6
3.2	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.	7
3.3	Die Beziehung in Gleichung ?? ist unabhängig vom Winkel ϕ . Außerdem wird die eindeutige Beziehung zwischen den 3 Einheitsvektoren \vec{e}_s, \vec{e}_{max} , und \vec{e}_r gezeigt.	9
3.4	Blaue Vektoren: Berechnete Sensorausrichtungen \vec{e}_s für verschiedene Werte der Sensorposition \vec{r} . Der Startpunkt jedes blauen Vektors entspricht dem entsprechenden \vec{r} . Gelber Vektor: Der maximale Vektor im Ursprung, immer in y -Richtung polarisiert. Beachten Sie, dass die Längen der blauen Vektoren hier nicht von Interesse sind, da nur die Richtungen relevant sind.	10
4.1	Sensor- und Quellenanordnung: Die kinematische Kette besteht aus zylinderförmigen Element, sowie Gelenken die diese verbinden und die Möglichkeit haben diese zu bewegen. Die linke Seite zeigt die Anordnung der Quellen und Sensoren auf der kinematischen Kette. Auf dem ersten Element ist eine 3D-Spule angebracht. Die weiteren Elemente sind mit Sensoren ausgerüstet. Diese sind auf der Mittelachse des kinematischen Elements (siehe rechter Teil).	12
4.2	Flussdiagramm des iterativen Algorithmus: Der Algorithmus startet mit einer zufällig ausgewählten Sensororientierung. Im ersten Schritt wird die relative Sensorposition bestimmt. Daraus wird die zugehörige Sensororientierung bestimmt. Diese Prozedur wird wiederholt, bis die Veränderung zwischen den Iterationen kleiner ist als ein definierter Schwellenwert und Konvergenz erreicht ist. Diese Orientierung ist dann die geschätzte Lösung.	14

4.3	Beispielhafter iterativer Prozess: Diese Abbildung zeigt die Iterationen für einen einfachen Aufbau. Die Unterabbildung 4.3a zeigt den verwendeten Aufbau mit dem Koordinatensystem. Der Ursprung dieses Aufbaus befindet sich am ersten kinematischen Kettenelement, wo sich auch die Quelle befindet. Die Quelle ist mit dem ersten kinematischen Element so verbunden, dass die relative Position der Quelle zur kinematischen Kette immer konstant ist. In den folgenden Abbildungen wurde das Koordinatensystem weggelassen. Die blauen Vektoren stellen die möglichen Posen für die erkannte MV dar. Die hellgrüne Konstruktion zeigt die Bodenwahrheit. Der rote Vektor ist ein normalisierter Positionsvektor des Sensors, der auf die potentielle Pose in dieser Richtung zeigt. Der Sensor ist am zweiten Knochen angebracht. Er wird durch ein schwarzes Rechteck mit einem Vektor in die sensitive Richtung dargestellt. Unterabbildung b beginnt mit einer Knochenorientierung in x -Richtung. Für einige Iterationen sind die kinematische Kette und der zugehörige Positionsvektor dargestellt. Nach 15 Iterationen (sub-figure d) stimmt die Sensorpose mit einer potentiellen Pose (ground truth) überein und der Algorithmus konvergiert.	15
4.4	Beschreibung des ersten Freiheitsgrades: In der Abbildung ist eine kinematische Kette, bestehend aus zwei Elementen. Im Ursprung ist eine 3D-Spule an der die kinematische Kette angebracht ist. In gelb ist \vec{e}_{max} dargestellt. Dieser spannt gemeinsam mit \vec{r}_j die gelbe Ebene auf. Auf dem zweiten Kettenelement ist ein Sensor in der Mitte des Sensors angebracht und das Gelenk ist so geknickt, dass der Sensor leicht nach unten schaut. Die XY-Ebene ist in grau dargestellt. In der Abbildung ist gut zu sehen, dass die gelbe Ebene, durch das erste und zweite Element schneidet. Es ist erkennbar, dass sowohl \vec{r}_j , \vec{r}_s und \vec{e}_s in dieser Ebene liegen.	16
4.5	Winkelzusammenhang: Die Abbildung zeigt den Ebenenschnitt, der gelben Ebene, von Abbildung 4.4. In der Abbildung ist die kinematische Kette in der von \vec{e}_{max} und \vec{r}_j aufgespannten Ebene. In gelb ist die zweite Eingangsgröße $\phi_{m,2}$ dargestellt. Der blaue Winkel zeigt die Ausgangsgröße $\phi_{s,2}$	17
4.6	Funktionaler Winkelzusammenhang: In der Abbildung ist der Zusammenhang zwischen $\phi_{s,2}$ und $\phi_{max,2}$ für verschiedene Wertebereiche von Q . Die Abbildungen 4.6a und 4.6c zeigen eine eindeutige Zuordnung zwischen $\phi_{s,2}$ und $\phi_{max,2}$. In diesem Bereich gibt es für jeden Eingangsvektor einen zugehörigen Ausgangsvektor. In Abbildung 4.6b ist der Zusammenhang für $0.5 < Q < 1$ zu sehen. Hier ist teilweise einem Wert für $\phi_{max,2}$ zwei unterschiedliche Werte für $\phi_{s,2}$ zugeordnet.	18
5.1	Bahn des magnetischen Dipols $\vec{m}(t)$ mit Startpunkt im Ursprung als Funktion der Zeit. Die Spitze von \vec{m} bewegt sich auf der Oberfläche einer Kugel mit Radius m_0 für $N_\omega = \omega_\theta/\omega_\phi = 10$	22

- 5.2 Die linke Abbildung zeigt beispielhaft einen Max-Vektor im Ursprung (gelb), die Position und Orientierung (orange) des Sensors und die entsprechende Ebene der Nulldurchgangsvektoren (lila). Auf der rechten Seite ist das entsprechende Sensorsignal als Funktion der Zeit dargestellt. Die Zeiten, in denen ein Nulldurchgang erreicht wird, sind mit einem lila Punkt markiert. Die Simulation arbeitet mit einer Quelle, die mit $N_\omega = \omega_\theta/\omega_\phi = 10$ angesteuert wird. Die absoluten Werte/Längen sind nicht relevant, da zum einen das relative Verhältnis zwischen den Vektoren und zum anderen die Nulldurchgänge von Interesse sind. 23

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, $j^2 = -1$
$\mathbf{x}^H, \mathbf{X}^H$	hermitischer 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

1.2 Einordnung der Arbeit

1.3 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2

Bewegungsanalyse

2.1 Bewegungsbeschreibung

2.1.1 Gelenkarten

Kugelgelenke Sattelgelenke Eigelenke Scharniergelenke

2.1.2 Bewegungsdefinition

2.2 Konventionelle Systeme

2.2.1 optische Systeme

2.2.2 IMU basierte Systeme

2.3 Schlussbetrachtung

Kapitel 3

Magnetische Räumliche Signalmerkmale

Ziel dieser Arbeit ist es, Orientierungen von kinematischen Elementen und der Positionen zu schätzen. Die Orientierungen lassen sich mit räumlichen Vektoren beschreiben. Die Merkmale für die Signalverarbeitung sollen sich daran orientieren. In diesem Kapitel werden zunächst Verfahren beschrieben mit denen magnetische Felder analytisch beschrieben werden können. Daraus abgeleitet wird ein räumliches Signalverarbeitungsmerkmal eingeführt und die Zusammenhänge zwischen Position, Orientierung und diesem Merkmal vorgestellt und diskutiert.

3.1 Modellierung magnetischer Felder

3.1.1 Biot-Savart

Theoretische Elektrotechnik Marco Leone Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure - kurze Beschreibung wie mit Biot-Savart magnetische Felder beschrieben werden, nur für einen Stromfaden

Bild von Biot Savart

3.1.2 Magnetischer Dipol

Nolting Grundkurs Theoretische Physik 3

Bild Dipol Berechnung

Herleitung des Dipolfeldes

Bestimmung des Dipolmoment

Betrag des Magnetfeldes

3.1.3 Quasistationäre Felder

Nolting Grundkurs Theoretische Physik 3

3.2 3D Spule

Bild und Simulationsbild Wieso ist das gut? Lokalisierungsansätze mit 3D- Sensoren ...

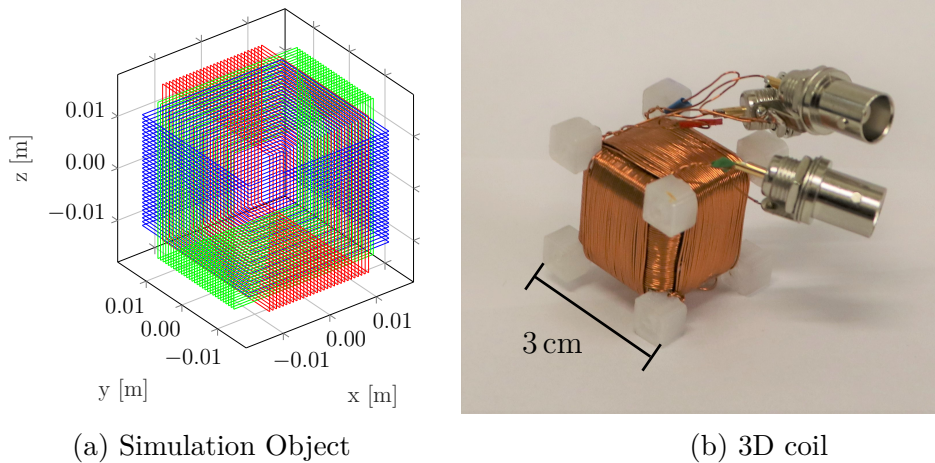


Abbildung 3.1: 3D-Spule: a skizziert das modellierte Simulationsobjekt. Ein Foto der entsprechenden Realisierung ist in b zu sehen. Beide Objekte bestehen aus drei zueinander orthogonal stehenden Spulen. Die rote Spule steht für die X-Spule, die grüne für die Y-Spule und die blaue für die Z-Spule. Somit

In dieser Arbeit wird eine 3D-Spule zur Anregung künstlicher Magnetfelder verwendet. 3D-Spule sind 3 ineinander verschachtelte Spulen. Jede einzelne hat ihre Öffnung in eine unterschiedliche Richtung, und die Normalenvektoren dieser Flächen stehen senkrecht zueinander. Damit stehen auch die resultierenden Dipolmomente senkrecht zueinander und diese drei Dipolmomente spannen ein Koordinatensystem auf. In Abbildung 3.1 ist eine kleine 3D-Spule und das zugehörige Simulationsobjekt dargestellt.

Die Spule kann unterschiedlich angesteuert werden. Zum einen gibt es die Möglichkeit, die drei Spulen einzeln anzusteuern und diese auf Sensorseite wieder voneinander zu trennen. Zum anderen können die drei Dipole so angesteuert werden, sodass durch Überlagerung ein resultierender Dipol in beliebiger Richtung erzeugt werden kann. Die zweite Ansteuerung wird in dieser Arbeit verwendet.

3.3 Sensormodellierung

In diesem Kapitel werden Zusammenhänge zwischen magnetischen Aktuatoren und magnetischen Sensoren hergeleitet. Um die Herleitung möglichst einfach zu halten wird der Sensor als ideal angenommen. „Ideal“ bedeutet, dass der Sensor in einem einzigen Punkt lokalisiert ist und dass die Ausgabe des Sensors eine ungestörte Projektion des Dipolfeldes auf die Hauptsensorachse ist. Der Ausgang $B_{\text{sensor}}(\vec{r}, \vec{e}_s)$ ergibt sich dann als

$$B_{\text{sensor}}(\vec{r}, \vec{e}_s) = \vec{B}_{\text{dip}}(\vec{r}) \cdot \vec{e}_s. \quad (3.1)$$

3.4 Maximalvektor

Der Maximalvektor ist ein Signalmerkmal, das verwendet werden kann, wenn 3D-Aktuatoren und 1D-Sensoren verwendet werden. Dabei sei angenommen, dass der Aktuator im Ursprung und der Sensor am Ort \vec{r} mit der Sensorachse \vec{e}_s lokalisiert ist. Der Maximalvektor

beschreibt die Polarisierungsrichtung des magnetischen Dipols in welcher das Sensorausgangssignal maximal wird.

3.4.1 Lokalisierungszusammenhänge

Orientierung und normierte Position

Im Folgenden soll der Zusammenhang zwischen dem Maximalvektor (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

$$\vec{B}_{\text{norm}} = \frac{4\pi r^3}{m} \vec{B}_{\text{dip}}(\vec{r}) = 3\vec{e}_r(\vec{e}_m \cdot \vec{e}_r) - \vec{e}_m. \quad (3.2)$$

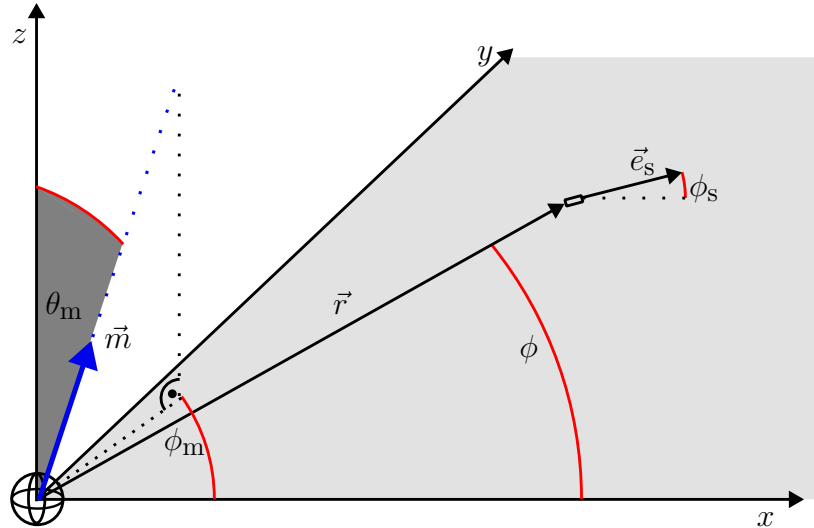


Abbildung 3.2: Verwendetes Setup für die Herleitung: \vec{e}_r und \vec{e}_s liegen beide in der xy -Ebene. ϕ_m und θ_m definieren die Richtung des rotierenden magnetischen Dipols \vec{e}_m in Kugelkoordinaten.

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.

$$\vec{e}_r = \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \vec{e}_s = \begin{bmatrix} \cos(\phi_s) \\ \sin(\phi_s) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

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

$$\vec{e}_m = \begin{bmatrix} \cos(\phi_m) \sin(\theta_m) \\ \sin(\phi_m) \sin(\theta_m) \\ \cos(\theta_m) \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Durch einsetzen der Vektordefinition in Gl. 3.2 kommt man zu den folgenden vektoriellen Komponenten des Dipolfeldes

$$\begin{aligned} B_{\text{norm},x}(\phi, \phi_m, \theta_m) &= [3 \cos(\phi)^2 - 1] \cos(\phi_m) \sin(\theta_m) \\ &+ 3 \sin(\phi_m) \sin(\theta_m) \sin(\phi) \cos(\phi), \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} B_{\text{norm},y}(\phi, \phi_m, \theta_m) &= [3 \sin(\phi)^2 - 1] \sin(\phi_m) \sin(\theta_m) \\ &+ 3 \cos(\phi_m) \sin(\theta_m) \cos(\phi) \sin(\phi), \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$B_{\text{norm},z}(\theta_m) = -\cos(\theta_m). \quad (3.7)$$

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

$$B_{\text{sensor}}(\phi, \phi_s, \phi_m, \theta_m, r) = \frac{m}{4\pi r^3} \left((\cos(\phi_s) B_{\text{norm},x}(\phi, \phi_m, \theta_m) + \sin(\phi_s) B_{\text{norm},y}(\phi, \phi_m, \theta_m)) \right). \quad (3.8)$$

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

$$\vec{e}_r = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{e}_m = \begin{bmatrix} \cos(\phi_m) \\ \sin(\phi_m) \end{bmatrix}, \quad \vec{e}_s = \begin{bmatrix} \cos(\phi_s) \\ \sin(\phi_s) \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

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

$$B_{\text{norm},x}(\phi) = 2 \cos(\phi), \quad (3.10)$$

$$B_{\text{norm},y}(\phi) = -\sin(\phi), \quad (3.11)$$

$$B_{\text{norm},z}(\phi) = 0. \quad (3.12)$$

$$(3.13)$$

Die Projektion auf die Sensorachse führt zu:

$$B_{\text{sensor}}(\phi_s, \phi_m) = \frac{m}{4\pi r^3} \left(2 \cos(\phi_m) \cos(\phi_s) - \sin(\phi_m) \sin(\phi_s) \right). \quad (3.14)$$

Es wird der Wert ϕ_{\max} von ϕ_m gesucht, für den B_{sensor} maximal wird. Dafür wird Gleichung 3.14 nach ϕ_m differenziert und man erhält einen Zusammenhang zwischen ϕ_{\max} und ϕ_s .

$$\frac{dB_{\text{sensor}}(\phi_m)}{d\phi_m} = \frac{m}{4\pi r^3} (-2 \sin(\phi_m) \cos(\phi_s) - \sin(\phi_s) \cos(\phi_m)) \quad (3.15)$$

$$-2 \sin(\phi_{\max}) \cos(\phi_s) - \sin(\phi_s) \cos(\phi_{\max}) = 0. \quad (3.16)$$

$$-2 \cdot \tan(\phi_{\max}) = \tan(\phi_s). \quad (3.17)$$

Gleichung 3.17 zeigt einen Zusammenhang zwischen \vec{e}_{\max} , \vec{e}_r und \vec{e}_s . Dieser Zusammenhang gilt nicht nur für $\phi = 0$ sondern gilt auch wenn der Sensor nicht auf der x -Achse lokalisiert sind. In Abbildung 3.3 ist diese Verallgemeinerung gezeigt.

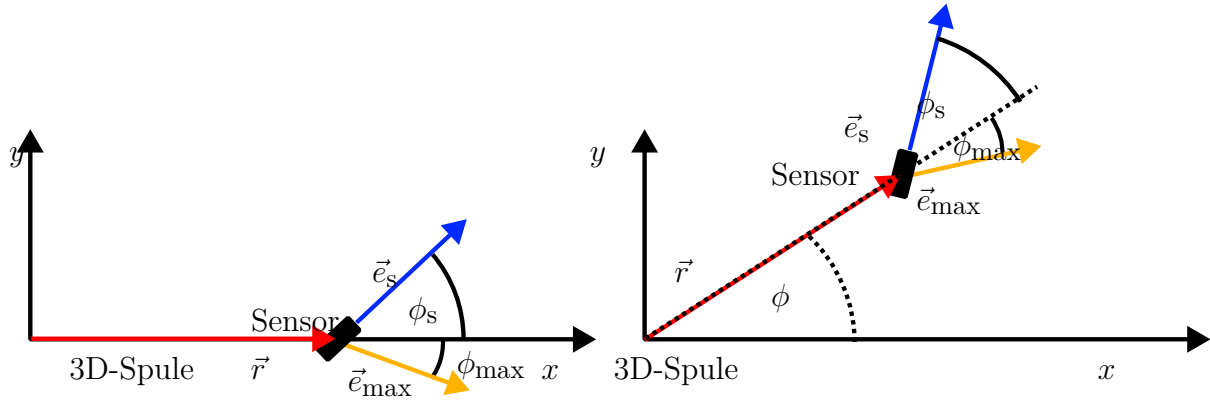


Abbildung 3.3: Die Beziehung in Gleichung ?? ist unabhängig vom Winkel ϕ . Außerdem wird die eindeutige Beziehung zwischen den 3 Einheitsvektoren \vec{e}_s , \vec{e}_{\max} , und \vec{e}_r gezeigt.

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. Hinzufügen Verallgemeinerung Formel relmaxs

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

$$\vec{e}_n = \frac{\vec{e}_{\max} \times \vec{e}_r}{\|\vec{e}_{\max} \times \vec{e}_r\|}. \quad (3.18)$$

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

$$\phi_{\max} = \arccos(\vec{e}_{\max} \cdot \vec{e}_r). \quad (3.19)$$

3. Anschließend wird der Winkel zwischen dem Ortseinheitsvektor und der Sensorausrichtung aus Gl. 3.17:

$$\phi_s = \arctan(-2 \tan(\phi_{\max})). \quad (3.20)$$

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

$$\vec{e}_s = \cos(\phi_s)(\vec{e}_n \times \vec{e}_r) \times \vec{e}_n + \sin(\phi_s)(\vec{e}_n \times \vec{e}_r). \quad (3.21)$$

Daraus ergibt sich, dass mit dem MV für jede relative Position eine Sensororientierung bestimmt werden kann. Die Verteilung der möglichen Positions- Orientierungspaare sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

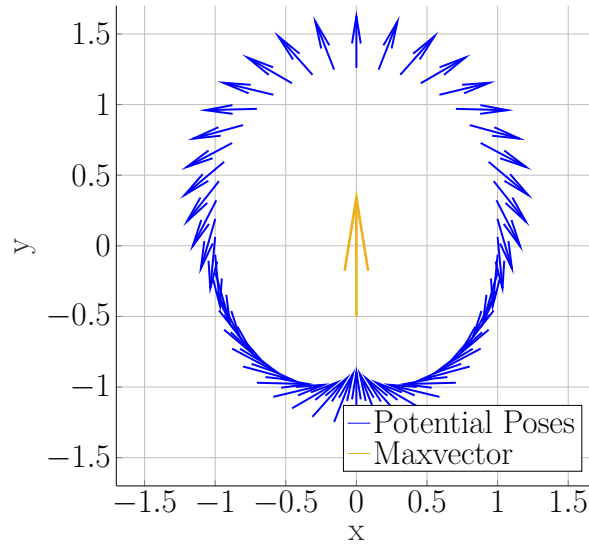


Abbildung 3.4: Blaue Vektoren: Berechnete Sensorausrichtungen \vec{e}_s für verschiedene Werte der Sensorposition \vec{r} . Der Startpunkt jedes blauen Vektors entspricht dem entsprechenden \vec{r} . Gelber Vektor: Der maximale Vektor im Ursprung, immer in y -Richtung polarisiert. Beachten Sie, dass die Längen der blauen Vektoren hier nicht von Interesse sind, da nur die Richtungen relevant sind.

Distanz zwischen Sensor und Quelle

Die Ausrichtung eines Einheitsvektors lässt sich mit 2 Winkeln beschreiben und enthält daher zwei Informationen. Mit einer 3D-Spule lassen sich wie im Grundlagenkapitel gezeigt, drei orthogonale Signale erzeugen aus denen sich dann drei Informationen extrahieren lassen. Als dritte Information definieren wir die Länge A des Maximalvektors. Diese ist in den Grundlagen als Betrag eines 3D-Spulenfeldes eingeführt worden. Der Sensor misst eine gewichtete Überlagerung der drei Spulensignale. Die Gewichtung erfolgt über die in den Grundlagen beschriebenen Übertragungsfaktoren. Mit den einzelnen Übertragungsfaktoren $G_x(\vec{r})$, $G_y(\vec{r})$, $G_z(\vec{r})$ und den Spulensignalen lässt sich das Signal am Sensor wie folgt beschreiben:

$$B_{\text{sensor}}(t, \vec{r}) = G_x(\vec{r})S_x(t) + G_y(\vec{r})S_y(t) + G_z(\vec{r})S_z(t). \quad (3.22)$$

Hier muss nochmal nachgearbeitet werden.

Definition der Intensität, Zusammenhang zwischen Intensität und Distanz, Zusammenhang zwischen normierter Position und Distanz.

Der Sensor misst eine gewichtete Summe B_{sensor} der drei Spulensignale $S_x(t)$, $S_y(t)$, $S_z(t)$. Die Gewichtung der einzelnen Signale wird durch die Dipolnäherung beschrieben $G_x(\vec{r})$, $G_y(\vec{r})$, $G_z(\vec{r})$

Kapitel 4

Lokalisierungsalgorithmen

Im Folgenden Kapitel soll die verwendete Algorithmik vorgestellt werden. Dabei wird zunächst ein magnetisch räumliches Signalverarbeitungsmerkmal vorgestellt. Dieses Merkmal wird für eine relative Lokalisierung (Rekonstruktion der einer kinematischen Kette) und eine absolute Lokalisierung innerhalb eines definierten Arbeitsraums genutzt. In diesem Kapitel werden die Sensoren als ideal angenommen, um die algorithmische Herleitung nicht unnötig kompliziert zu machen.

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.

Absolute Lokalisierung

4.1 Simulationsetup

Die Herleitung des Algorithmus soll mit kleinen Simulationen veranschaulicht werden. Die Simulation besteht aus drei 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 bis zu zwei Elementen verwendet. Eine solche Kette ist in Abbildung 4.1.

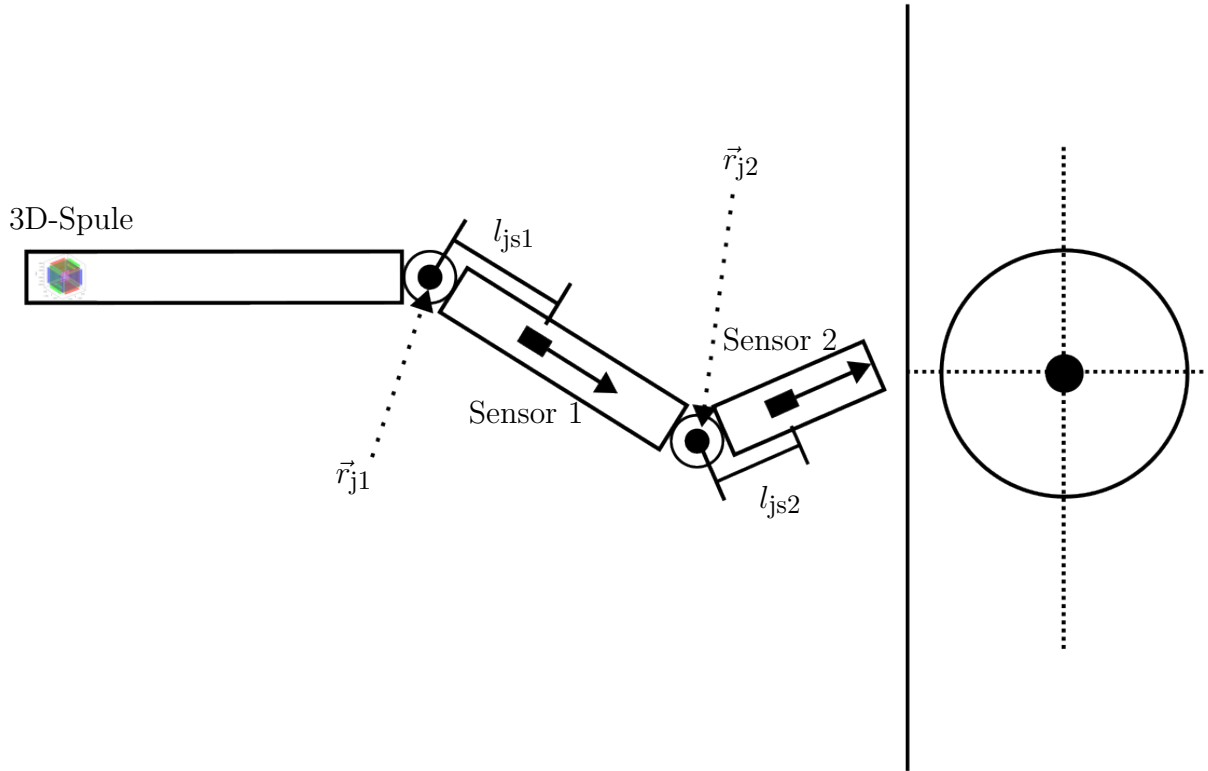


Abbildung 4.1: Sensor- und Quellenanordnung: Die kinematische Kette besteht aus zylinderförmigen Elementen, sowie Gelenken, die diese verbinden und die Möglichkeit haben, diese zu bewegen. Die linke Seite zeigt die Anordnung der Quellen und Sensoren auf der kinematischen Kette. Auf dem ersten Element ist eine 3D-Spule angebracht. Die weiteren Elemente sind mit Sensoren ausgerüstet. Diese sind auf der Mittelachse des kinematischen Elements (siehe rechter Teil).

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 Koordinatensprung, 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.

4.3 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

Der Algorithmus kombiniert die magnetischen Zusammenhänge und das Vorwissen über die Anatomie. Die Prämisse des Algorithmus ist, dass bei korrekt angenommener Sensororientierung, mit der Anatomie die korrekte Position des Sensors berechnet werden kann. Mit der korrekten Position kann mithilfe der magnetischen Zusammenhänge die korrekte Sensororientierung bestimmt werden. Diese Selbstkonsistenz wird nun ausgenutzt.

Für den Algorithmus werden die Position des Gelenks \vec{r}_j und die Distanz zwischen Gelenk und Sensor benötigt. Es wird zunächst eine zufällige Orientierung $\vec{e}_{s,1}$ des Sensors angenommen. Mit der Anatomie wird die zugehörige Sensorposition bestimmt

$$\vec{r}_{s,i} = \vec{r}_j + l_{js} \vec{e}_{s,i}. \quad (4.3)$$

Im nächsten Schritt wird die Sensororientierung für die Position mit den magnetischen Zusammenhängen, die in den Gleichungen 3.18 bis 3.21 beschrieben wurden, bestimmt.

$$\vec{e}_{s,i+1} = \vec{f}(\vec{r}_{s,i}, \vec{e}_{\text{max}}). \quad (4.4)$$

Diese Prozedur wird mit der jeweils neuen Orientierung wiederholt bis die Veränderung der Orientierung einen Schwellwert unterschreitet. Der Ablauf des Algorithmus ist in Abbildung 4.2 zu sehen.

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.

Einfluss der Längenänderungen auf die Konvergenzgeschwindigkeit Q einfügen

4.3.2 Eindeutigkeit der Lösung

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

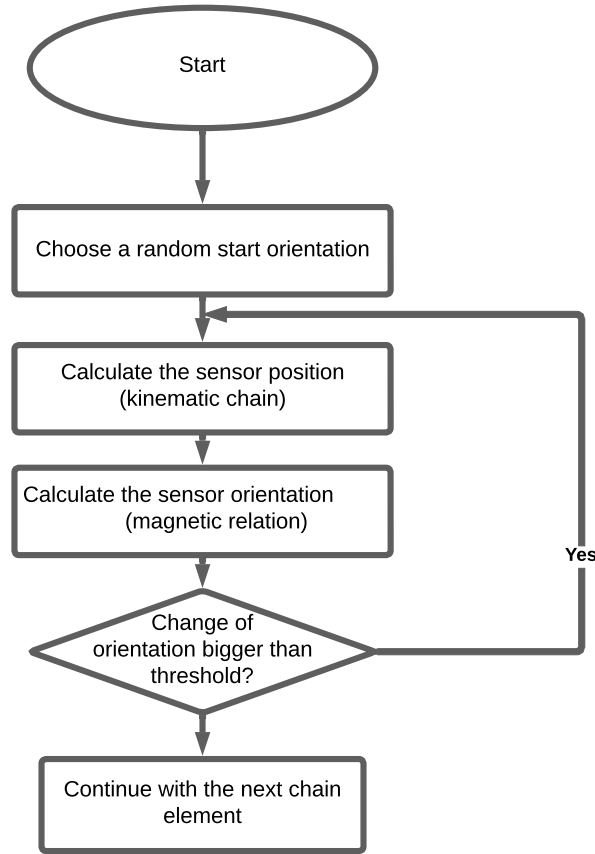


Abbildung 4.2: Flussdiagramm des iterativen Algorithmus: Der Algorithmus startet mit einer zufällig ausgewählten Sensororientierung. Im ersten Schritt wird die relative Sensorposition bestimmt. Daraus wird die zugehörige Sensororientierung bestimmt. Diese Prozedur wird wiederholt, bis die Veränderung zwischen den Iterationen kleiner ist als ein definierter Schwellenwert und Konvergenz erreicht ist. Diese Orientierung ist dann die geschätzte Lösung.

Der Eingangsvektor besitzt zwei Freiheitsgrade, die die Richtung definieren. Die Orientierung des Sensors wird ebenfalls über zwei Winkel (Freiheitsgrade) definiert. Im folgenden wird zunächst eine Entkopplung der Ein- und Ausgangsvektoren vorgenommen, also hat eine Eingangsgröße nur Einfluss auf eine Ausgangsgröße. Da es sich auf beiden Seiten um Winkel handelt, müssen diesen Winkeln Rotationsachsen zugeordnet werden.

Zunächst wird der Zusammenhang aus Kapitel 3.4.1, dass \vec{e}_{max} , \vec{e}_s und \vec{e}_r in einer Ebene liegen verwendet. Dies bedeutet gleichzeitig auch, dass die Gelenkspostion \vec{r}_j in dieser Ebene liegen muss. Dies ist der Fall, da diese von der Sensorposition in Richtung der Sensororientierung liegt. Daher kann der normalen Vektor \vec{e}_n dieser Ebene wie folgt bestimmt werden

$$\vec{e}_n = \frac{\vec{e}_{max} \times \vec{r}_j}{|\vec{e}_{max} \times \vec{r}_j|} \quad (4.5)$$

Dies bedeutet, dass die Sensororientierung auf einer Ebene, einer Ebenschar die durch \vec{r}_j definiert wird. Daher ist die erste Rotationsachse $\frac{\vec{r}_j}{|\vec{r}_j|}$. Die erste Eingangsgröße $\phi_{m,1}$ ist daher der Winkel zwischen \vec{e}_n und einer frei wählbaren Bezugsachse. Die Bezugsachse muss nur senkrecht zu \vec{r}_j stehen. Die Ausgangsgröße $\phi_{s,1}$ entspricht dann der Eingangsgröße.

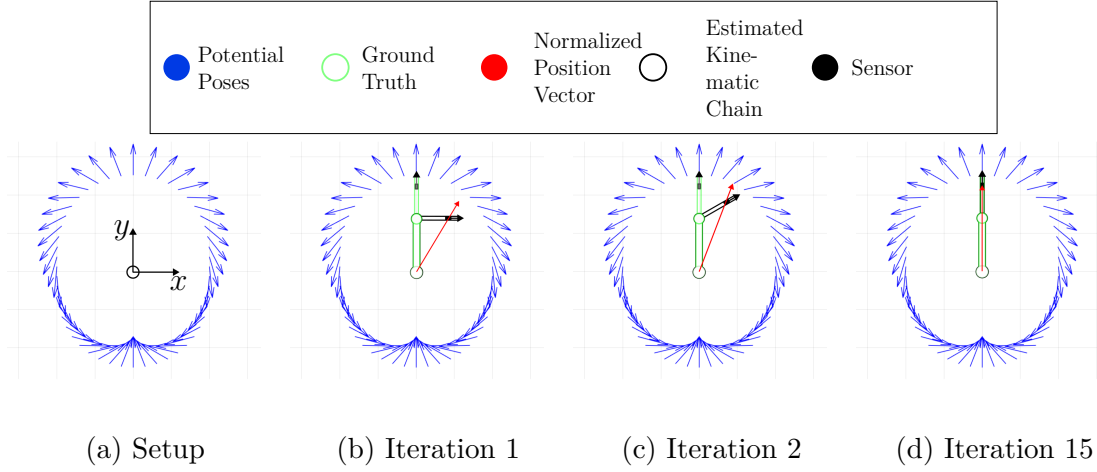


Abbildung 4.3: Beispielhafter iterativer Prozess: Diese Abbildung zeigt die Iterationen für einen einfachen Aufbau. Die Unterabbildung 4.3a zeigt den verwendeten Aufbau mit dem Koordinatensystem. Der Ursprung dieses Aufbaus befindet sich am ersten kinematischen Kettenelement, wo sich auch die Quelle befindet. Die Quelle ist mit dem ersten kinematischen Element so verbunden, dass die relative Position der Quelle zur kinematischen Kette immer konstant ist. In den folgenden Abbildungen wurde das Koordinatensystem weggelassen. Die blauen Vektoren stellen die möglichen Posen für die erkannte MV dar. Die hellgrüne Konstruktion zeigt die Bodenwahrheit. Der rote Vektor ist ein normalisierter Positionsvektor des Sensors, der auf die potentielle Pose in dieser Richtung zeigt. Der Sensor ist am zweiten Knochen angebracht. Er wird durch ein schwarzes Rechteck mit einem Vektor in die sensitive Richtung dargestellt. Unterabbildung b beginnt mit einer Knochenorientierung in x -Richtung. Für einige Iterationen sind die kinematische Kette und der zugehörige Positionsvektor dargestellt. Nach 15 Iterationen (sub-figure d) stimmt die Sensorpose mit einer potentiellen Pose (ground truth) überein und der Algorithmus konvergiert.

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.4 zu sehen.

Die Lösung ist nun auf einen Freiheitsgrad eingeschränkt. Der zweite Freiheitsgrad, ist nun der Winkel der um den Normalenvektor dreht. Als Bezugsachse wird im Folgenden ein \vec{r}_j verwendet. Die Eingangsgröße ist dann der Winkel $\phi_{m,2}$ zwischen \vec{e}_{max} und \vec{r}_j und die Ausgangsgröße $\phi_{s,2}$ ist der Winkel zwischen \vec{e}_s und \vec{r}_j .

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 und auf 1 normiert wird um den Zusammenhang später verallgemeinern zu können.

$$\vec{r}_j = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

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

$$\vec{r}_s = \begin{bmatrix} 1 + Q \cos(\phi_{s,2}) \\ Q \sin(\phi_{s,2}) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

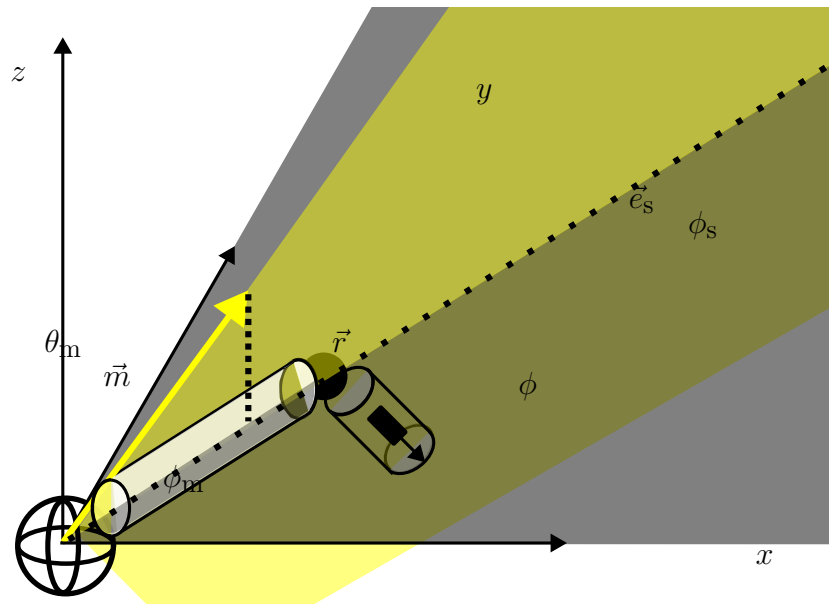


Abbildung 4.4: Beschreibung des ersten Freiheitsgrades: In der Abbildung ist eine kinematische Kette, bestehend aus zwei Elementen. Im Ursprung ist eine 3D-Spule an der die kinematische Kette angebracht ist. In gelb ist \vec{e}_{max} dargestellt. Dieser spannt gemeinsam mit \vec{r}_j die gelbe Ebene auf. Auf dem zweiten Kettenelement ist ein Sensor in der Mitte des Sensors angebracht und das Gelenk ist so geknickt, dass der Sensor leicht nach unten schaut. Die XY-Ebene ist in grau dargestellt. In der Abbildung ist gut zu sehen, dass die gelbe Ebene, durch das erste und zweite Element schneidet. Es ist erkennbar, dass sowohl \vec{r}_j , \vec{r}_s und \vec{e}_s in dieser Ebene liegen.

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

$$\phi_{\text{r}} = \arctan\left(\frac{Q \cos(\phi_{\text{s},2})}{1 + Q \sin(\phi_{\text{s},2})}\right) \quad (4.8)$$

mit Gleichung 3.17 kann nun $\phi_{\max,2}$ bestimmt werden

$$\phi_{\max,2} = -\arctan\left(\frac{1}{2}\tan(\phi_{s,2} - \phi_r)\right). \quad (4.9)$$

Dieser Zusammenhang ist nicht trivial und nicht einfach umkehrbar. In einem Skript wurde mit einer Auflösung von 1ř Verläufe für Gleichung 4.9 für unterschiedliche Q bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass der Algorithmus eindeutige Ergebnisse für $Q \leq 0.5$ und $Q > 1$ liefert. In der späteren Anwendung muss dies beachtet werden, wobei bei einer SensorGlove Anwendung die kinematischen Elemente relativ klein ist. Dies führt zu einem kleinen l_{js} und somit zu einem kleinerem Q .

4.3.3 Analyse der benötigten Rechenleistung

Analyse mit einer Matlabsimulation

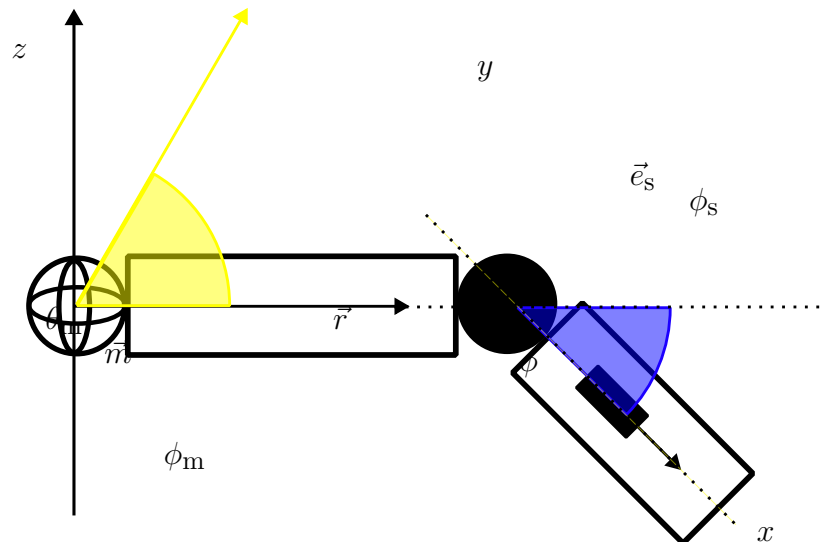


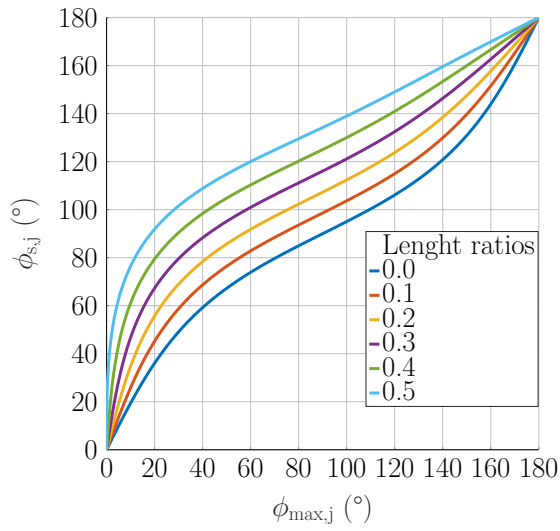
Abbildung 4.5: Winkelzusammenhang: Die Abbildung zeigt den Ebenenschnitt, der gelben Ebene, von Abbildung 4.4. In der Abbildung ist die kinematische Kette in der von \vec{e}_{max} und \vec{r}_j aufgespannten Ebene. In gelb ist die zweite Eingangsgröße $\phi_{m,2}$ dargestellt. Der blaue Winkel zeigt die Ausgangsgröße $\phi_{s,2}$.

4.3.4 Optimierungen

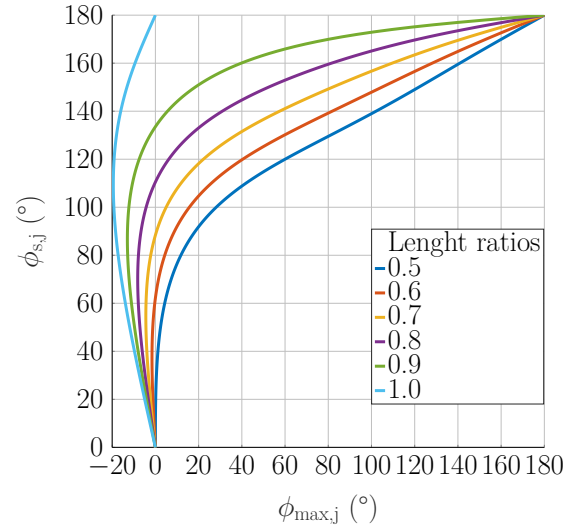
Laufzeitoptimierung(LookUpTable), Korrektur von Modellfehlern (Dicke des Fingers, Verdrehung des Sensors) Diskussion...

4.3.5 Analyse der Unsicherheiten

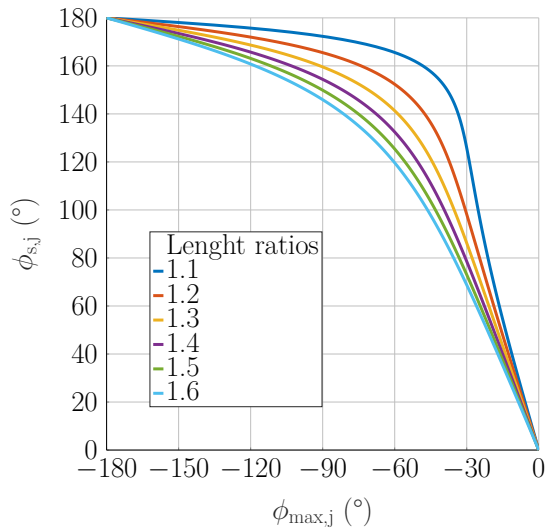
Einführung virtuelle/mechanische Achsen,



(a) $0 < Q \leq 0.5$



(b) $0.5 < Q \leq 1$



(c) $1 < Q$

Abbildung 4.6: Funktionaler Winkelzusammenhang: In der Abbildung ist der Zusammenhang zwischen $\phi_{s,2}$ und $\phi_{\max,2}$ für verschiedene Wertebereiche von Q . Die Abbildungen 4.6a und 4.6c zeigen eine eindeutige Zuordnung zwischen $\phi_{s,2}$ und $\phi_{\max,2}$. In diesem Bereich gibt es für jeden Eingangsvektor einen zugehörigen Ausgangsvektor. In Abbildung 4.6b ist der Zusammenhang für $0.5 < Q < 1$ zu sehen. Hier ist teilweise einem Wert für $\phi_{\max,2}$ zwei unterschiedliche Werte für $\phi_{s,2}$ zugeordnet.

4.4 Absolute Lokalisierung

4.4.1 Grundsätzliche Gedanken

4.4.2 Ebenenschnitt

4.4.3 Orientierung

Kapitel 5

Signalverarbeitung

5.1 Allgemeines zum Kapitel

5.2 Hardware

5.3 Implementierung

5.3.1 Vorverarbeitung

5.3.2 Merkmalsextraktion

Das vorgestellte Signalmerkmal muss für eine Echtzeitanwendung effizient aus dem Signalverlauf extrahiert werden können. Dafür werden zunächst zwei unterschiedliche Verfahren gezeigt. Zum einen ein räumliches Verfahren welches ein zeitlich rotierenden Dipol erzeugt und eines welches drei orthogonale Signale verwendet, die auf Sensorseite wieder voneinander getrennt werden.

In beiden Fällen gibt es drei Merkmale zu extrahieren. Diese können entweder in sphärischen Koordinaten (wie beim MV) oder in kartesischen Koordinaten. Diese lassen sich beliebig ineinander umrechnen. In beiden Fällen wird eine 3D-Spule verwendet

Zeitlich Räumlich rotierendes Feld

Die 3D-Spule wird so angesteuert, dass der resultierende magnetische Dipol zum einen eine konstante Intensität und zum anderen im dreidimensionalen Raum rotiert.

$$\vec{m}(t) = m_0 \begin{bmatrix} \cos(\omega_\phi t) \sin(\omega_\theta t) \\ \sin(\omega_\phi t) \sin(\omega_\theta t) \\ \cos(\omega_\theta t) \end{bmatrix}. \quad (5.1)$$

Die Ansteuerung orientiert sich dabei an der Rücktransformation von Kugelkoordinaten in kartesische Koordinaten. So wird ein konstantes magnetisches Dipolmoment sichergestellt und der Dipol in allen drei Dimensionen rotiert.

Die Frequenzen werden so gewählt, dass $\omega_\phi < \omega_\theta$ ist. Die Frequenzen müssen entsprechend der verfügbaren Bandbreite gewählt werden. Je größer die Bandbreite, desto größer kann ω_ϕ gewählt werden. Sinnvoll ist es das Verhältnis der beiden Frequenzen $N_\omega = \omega_\theta / \omega_\phi = 10$ zu wählen.

Das triviale Verfahren den MV zu bestimmen wäre es, eine Periode der langsameren Frequenz abzuwarten und den Zeitpunkt des maximalen Wertes zu speichern und die

zugehörigen Stromwerte zu normieren und als MV zu verwenden. An diesem Verfahren gibt es ein Problem, in einer begrenzten Zeit kann der Raum nur quantisiert abgetastet werden. Mit unendlich kleiner Abtastung würde die Detektion entsprechend lange dauern. In Abbildung 5.1 ist ein Verlauf des Dipolmoments über die Zeit zu sehen. In dieser Abbildung ist gut zu sehen, dass nur ein Bruchteil des Raumes abgetastet wird.

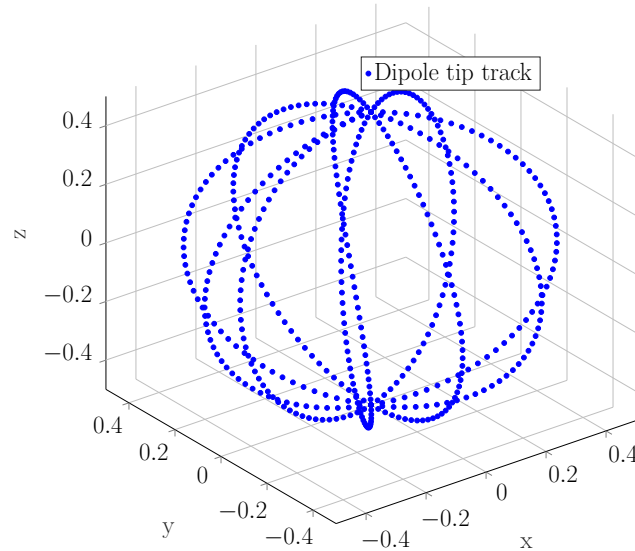


Abbildung 5.1: Bahn des magnetischen Dipols $\vec{m}(t)$ mit Startpunkt im Ursprung als Funktion der Zeit. Die Spitze von \vec{m} bewegt sich auf der Oberfläche einer Kugel mit Radius m_0 für $N_\omega = \omega_\theta/\omega_\phi = 10$.

Die Idee ist, die Nulldurchgänge des Signals zu detektieren. Es wurde angenommen, dass die Nulldurchgangsvektoren \vec{e}_{zc} (Dipolrichtungen in denen das detektierte Feld 0 ist) räumlich orthogonal zum MV ist. Dies würde bedeuten, dass nach zwei Nulldurchgängen aus den beiden Nulldurchgangsvektoren eine Ebene bestimmt werden kann, deren Normalvektor der MV ist. Die Orthogonalität muss zunächst nachgewiesen werden.

Dafür wird ausgegangen von den Formel 3.14 zu Null gesetzt wird und führen den Nullfeldwinkel ϕ_{zero} ein

$$0 = 2 \cos(\phi_{zero}) \cos(\phi_s) - \sin(\phi_{zero}) \sin(\phi_s) \quad (5.2)$$

$$2 \cot(\phi_{zero}) = \tan(\phi_s). \quad (5.3)$$

In Formel 3.17 ist die rechte Seite gleich der rechten Seite von Formel 5.3 und können deshalb gleichgesetzt werden:

$$\cot(\phi_{zero}) = \tan(-\phi_{max}) \quad (5.4)$$

$$\cot(\phi_{zero}) = \cot\left(\frac{\pi}{2} + \phi_{max}\right) \quad (5.5)$$

$$\phi_{zero} = \phi_{max} \pm \frac{\pi}{2}. \quad (5.6)$$

Das Gleichungen 5.4-5.6 zeigt, dass in der relevanten Ebene die \vec{e}_{zc} orthogonal zum \vec{e}_{max} steht. Aufgrund der Zylindersymmetrie ergibt sich so eine Nulldurchgangsebene mit der

dem MV als Normalenvektor. Eine Beispielsimulation wurde durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Darin ist gut zu sehen, dass die \vec{e}_{zc} eine Ebene aufspannen und der MV orthogonal dazu steht.

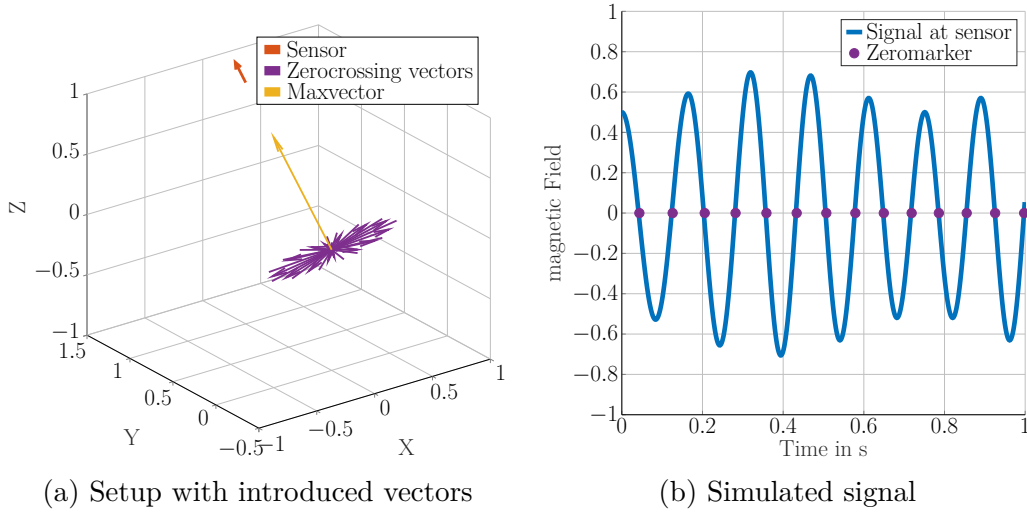


Abbildung 5.2: Die linke Abbildung zeigt beispielhaft einen Max-Vektor im Ursprung (gelb), die Position und Orientierung (orange) des Sensors und die entsprechende Ebene der Nulldurchgangsvektoren (lila). Auf der rechten Seite ist das entsprechende Sensorsignal als Funktion der Zeit dargestellt. Die Zeiten, in denen ein Nulldurchgang erreicht wird, sind mit einem lila Punkt markiert. Die Simulation arbeitet mit einer Quelle, die mit $N_\omega = \omega_\theta / \omega_\phi = 10$ angesteuert wird. Die absoluten Werte/Längen sind nicht relevant, da zum einen das relative Verhältnis zwischen den Vektoren und zum anderen die Nulldurchgänge von Interesse sind.

Es bleibt noch, die Polarität dieses Vektors zu bestimmen. Als Beispiel hat die XY -Ebene die Z -Achse, aber auch die $-Z$ -Achse als Normalenvektor. An dieser Stelle muss noch die Polarität bestimmt werden. Die \vec{e}_{zc} , k werden dafür mit dem Index k nummeriert. Jedem Vektor \vec{e}_{zc} wird eine Polarität zugeordnet, diese sagt aus, ob der Verlauf von positiv nach negativ ($z+$) oder von negativ nach positiv ($z-$). Des weiteren wird der zugehörige Strom durch die z -Spule Z_z betrachtet. Je nach Polarität wird nun die Reihenfolge des Kreuzproduktes getauscht. Dies erfolgt nach der folgenden Regel:

$$\vec{e}_{\max} = \begin{cases} \frac{\vec{e}_{\text{zero},k} \times \vec{e}_{\text{zero},k-1}}{\|\vec{e}_{\text{zero},k} \times \vec{e}_{\text{zero},k-1}\|}, & \text{for } z+ \wedge \frac{dI_z}{dt} > 0, \text{ or } z- \wedge \frac{dI_z}{dt} < 0 \\ \frac{\vec{e}_{\text{zero},k-1} \times \vec{e}_{\text{zero},k}}{\|\vec{e}_{\text{zero},k-1} \times \vec{e}_{\text{zero},k}\|}, & \text{else .} \end{cases}$$

Die Richtung des MV ist nun eindeutig definiert. Es fehlt die Bestimmung des Betrages, welcher nun hergeleitet werden soll. Der Betrag wurde im Grundlagenkapitel in Gleichung XX definiert. Der Sensor detektiert eine gewichtete Überlagerung der Spulensignale. Die Spulensignale werden mit Gleichung 5.9 beschrieben und Gleichung XX schreibt sich um zu:

$$B_{\text{sensor}}(t, \vec{r}) = m_0(G_x(\vec{r}) \cos(\omega_\phi t) \sin(\omega_\theta t) + G_y(\vec{r}) \sin(\omega_\phi t) \sin(\omega_\theta t) + G_z(\vec{r}) \cos(\omega_\theta t)) \quad (5.7)$$

mit $\omega_\phi t = \phi$ und $\omega_\theta t = \theta$ schreiben wir:

$$B_{\text{sensor}}(t, \vec{r}) = m_0(G_x(\vec{r}) \cos(\phi) \sin(\theta) + G_y(\vec{r}) \sin(\phi) \sin(\theta) + G_z(\vec{r}) \cos(\theta)). \quad (5.8)$$

Der MV wird beschrieben wie folgt:

$$\vec{e}_{\text{max}} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_{\text{max}}) \sin(\theta_{\text{max}}) \\ \sin(\phi_{\text{max}}) \sin(\theta_{\text{max}}) \\ \cos(\theta_{\text{max}}) \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

Am Sensor wird das maximale Feld detektiert, wenn der Dipol in Richtung von \vec{e}_{max} polarisiert ist. Gleichung 5.8 wird daher nach ϕ und θ differenziert und zu Null gesetzt:

$$0 = m_0(G_x(\vec{r})(-\sin(\phi_{\text{max}})) \sin(\theta_{\text{max}}) + G_y(\vec{r}) \cos(\phi_{\text{max}}) \sin(\theta_{\text{max}})), \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} 0 &= m_0(G_x(\vec{r})(\cos(\phi_{\text{max}})) \cos(\theta_{\text{max}}) \\ &\quad + G_y(\vec{r}) \sin(\phi_{\text{max}}) \cos(\theta_{\text{max}}) \\ &\quad - G_z(\vec{r}) \sin(\theta_{\text{max}})). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Aus den Gleichungen 5.10 und 5.11 lassen sich Faktoren F_{XY} , F_{XZ} zwischen den einzelnen Übertragungsfaktoren ableiten:

$$G_y(\vec{r}) = G_x(\vec{r}) \frac{\sin(\phi_{\text{max}})}{\cos(\phi_{\text{max}})} = F_{XY} G_x(\vec{r}), \quad (5.12)$$

$$G_z(\vec{r}) = G_x(\vec{r}) \frac{\cos(\theta_{\text{max}})}{\sin(\theta_{\text{max}})} (\cos(\phi_{\text{max}}) + \frac{\sin^2(\phi_{\text{max}})}{\cos(\phi_{\text{max}})}) = F_{XZ} G_x(\vec{r}). \quad (5.13)$$

Somit schreibt sich Gleichung 5.8 um zu

$$B_{\text{sensor}}(t, \vec{r}) = m_0(G_x(\vec{r}) \cos(\phi) \sin(\theta) + F_{XY} G_x(\vec{r}) \sin(\phi) \sin(\theta) + F_{XZ} G_x(\vec{r}) \cos(\theta)). \quad (5.14)$$

Bei der Detektion des MV wurden bisher nur die Nulldurchgänge betrachtet. Für den Betrag wird nun die Amplitude des Signals betrachtet. Dafür wird der Zeitpunkt t_p genau in der Mitte zwischen zwei Nulldurchgängen betrachtet. Die einzelnen Werte werden eingesetzt und nach $G_x(\vec{r})$ umgestellt:

$$G_x(\vec{r}) = \frac{B_{\text{sensor}}(t, \vec{r})}{m_0} \frac{1}{\cos(\phi) \sin(\theta) + F_{XY} \sin(\phi) \sin(\theta) + F_{XZ} \cos(\theta)}. \quad (5.15)$$

Damit lassen sich die einzelnen Übertragungsfaktoren bestimmen und der Betragswert bestimmen.

FDMA

Einordnung in übliche FDMA Ansätze

Vergleich

Matlab Simulation, Vergleich

5.3.3 Lokalisierung

5.3.4 Nachverarbeitung

Kapitel 6

Evaluierung

6.1 Relative Lokalisierung

6.1.1 Simulative Evaluierung

6.1.2 Experimentelle Evaluierung

Szenarios

Kalibrierung

Ergebnisse

6.1.3 Diskussion

6.2 Absolute Lokalisierung

6.2.1 Simulative Evaluierung

6.2.2 Experimentelle Evaluierung

6.2.3 Diskussion

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