

# LOKALISATION MOBILER ROBOTER MIT ODOMETRIE UND BILDVERARBEITUNG IN EINER THEATERINSTALLATION

## M A S T E R A R B E I T

eingereicht am

03.09.2013

bei

Prof. Dr.-Ing. Udo Frese

Prof. Dr.-Ing. X Y

Universität Bremen

von

Josef F. Hiller

Matr. Nr: 2055491

Osterstr 79

28199 Bremen



# Zusammenfassung

**Schlagwörter:** abc, def, xyz



# Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und mich fremder Hilfe nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß veröffentlichtem oder unveröffentlichtem Schrifttum entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Bremen, xx.09.2013

---

Josef F. Hiller



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Erklärung</b>	<b>v</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel und Aufgabenstellung der Arbeit . . . . .	1
1.2 Gliederung . . . . .	3
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Der Roboter . . . . .	5
2.2 Bühneninstallation . . . . .	6
2.3 Lokalisation . . . . .	6
2.3.1 Übersicht gängiger Verfahren . . . . .	7
2.3.2 Der Partikel Filter . . . . .	8
2.4 Bildverarbeitung . . . . .	11
<b>3 Lokalisierung mittels Bildverarbeitung</b>	<b>13</b>
3.1 Bitmuster . . . . .	13
3.2 Partikel Filter . . . . .	14
3.2.1 Zustandsraum . . . . .	14
3.2.2 Dynamikmodell . . . . .	14
3.2.3 Messmodell . . . . .	15
3.3 Musterbewertung . . . . .	17
3.4 Parameter einstellen . . . . .	17

<b>4</b>	<b>Software</b>	<b>19</b>
4.1	Simulation . . . . .	19
4.1.1	Die Szene . . . . .	19
4.1.2	Messen in der Simulation . . . . .	22
4.2	Lokalisation . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>25</b>
5.1	Theoretische Vorüberlegungen . . . . .	25
5.2	Versuchsaufbau . . . . .	25
5.3	Versuchsvorbereitung . . . . .	25
5.4	Praktische Versuchsdurchführung . . . . .	25
5.5	Versuchsergebnisse . . . . .	25
5.6	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	25
<b>6</b>	<b>Mögliche Anwendung und Ausblick</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>29</b>
<b>A</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>C</b>	<b>Anhang</b>	<b>V</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Roboter und Besucher auf der EPKOT . . . . .	2
1.2	Roboter vor Lichtwand auf der EPKOT . . . . .	2
1.3	every1000mspics . . . . .	3
1.4	every500mspics . . . . .	4
2.1	Nahaufnahme eines der Roboter . . . . .	5
2.2	Bühnenmodell . . . . .	6
3.1	Bitmuster der Lichtwände . . . . .	13
4.1	Simulierte Szene . . . . .	20
5.1	Bereich der zu einem Bild . . . . .	26
C.1	code 93 Tabelle . . . . .	VI



# Tabellenverzeichnis



# 1 Einleitung

In dieser Arbeit soll, mit Hilfe einer Simulation, untersucht werden, wie gut sich Kameras bei der Standortbestimmung in mobilen Roboter einsetzen lassen. Anlass dieser Arbeit war eine Anfrage der Künstlergruppe *Beobachter der Bediener von Maschinen* (BBM), die schon bei mehreren Performances<sup>1</sup> mobile Roboter eingesetzt haben. Dabei interessierten sie sich für eine Lokalisierungslösung welche möglichst ohne weitere spezial Hardware und geringem Installationsaufwand vor Ort auskommt. Der Ansatz der daraus entstand war: die Kameras, die bereits an jedem der Roboter verbaut waren, zu nutzen um markante Muster in der Bühneninstallation zu erkennen und gemeinsam mit den Odometrie-Daten zur Positionsberechnung zu verwenden. Dabei sollte ein Partikelfilter als Zustandsschätzer verwendet werden. Zu der Bühneninstallation gehören große Lichtwände, zu sehen auf Abbildung 1.1 und 1.2. Auf diese Lichtwände könnte ein hell/dunkel Bit-Muster angezeigt werden das es mit Hilfe geeigneter Bildverarbeitungsalgorithmen und mit den Kameras zu erkennen gilt.

## 1.1 Ziel und Aufgabenstellung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Simulationsumgebung mit Hilfe geeigneter 3D-Visualisierungs Bibliotheken erstellt werden. Die in der Lage ist eine 3D-Szene der Bühne zu simulieren und Kamerabilder sowie Odometrie-Daten einer Roboterfahrt zu erzeugen. Außerdem soll ein Lokalisationsalgorithmus entwickelt werden, der auf Grundlage dieser Daten die Position und Orientierung des Roboters auf der Bühne schätzen kann. Anschließend soll die Qualität dieser geschätzten Position beurteilt werden und mögliche Fehlerquellen diskutiert werden.

---

<sup>1</sup>unter Anderem:

2000 Themenpark "Wissen" der Expo 2000 Hannover

2010 Joybots in der BMW-Welt

2012 EPKOT Experimental Prototype Killers of Tomorrow , Hannover

siehe auch <http://www.bbm.cfnt3.de>



Abbildung 1.1: Roboter und Besucher auf der EPKOT Quelle: <http://www.bbm.cfnt3.de>



Abbildung 1.2: Roboter vor Lichtwand auf der EPKOT Quelle: <http://www.bbm.cfnt3.de>

## 1.2 Gliederung

Die Arbeit wird im folgenden Kapitel eine kurze Übersicht gängiger Lokalisationsverfahren sowie ihre Vor- und Nachteile geben. Außerdem wird in die Grundlagen eingeführt, welche zum Verständnis der folgenden Kapitel notwendig sind. Das Kapitel *Lokalisierung mittels Bildverarbeitung* beschreibt wie die Methoden aus den Grundlagen an das gestellte Problem angepasst wurden und wie das vorgestellte Verfahren funktioniert. Anschließend wird die Simulations- und Lokalisationssoftware vorgestellt und deren Implementation erklärt und begründet. Insbesondere wird darauf eingegangen, wie realistisch die Simulation ist. In Kapitel 5 beginnt die Beschreibung verschiedener Versuche die zum Beurteilen der Lokalisierungsergebnisse durchgeführt wurden. Ergebnispräsentation und Diskussion erfolgen jeweils im Anschluss der Beschreibungen. Abschließend wird ein Ausblick zur möglichen Anwendung dieses Verfahrens gegeben, sowie mögliche Fehlerquellen und Probleme dabei. Im letzten Kapitel wird ein Fazit zu den Erkenntnissen dieser Arbeit gezogen.

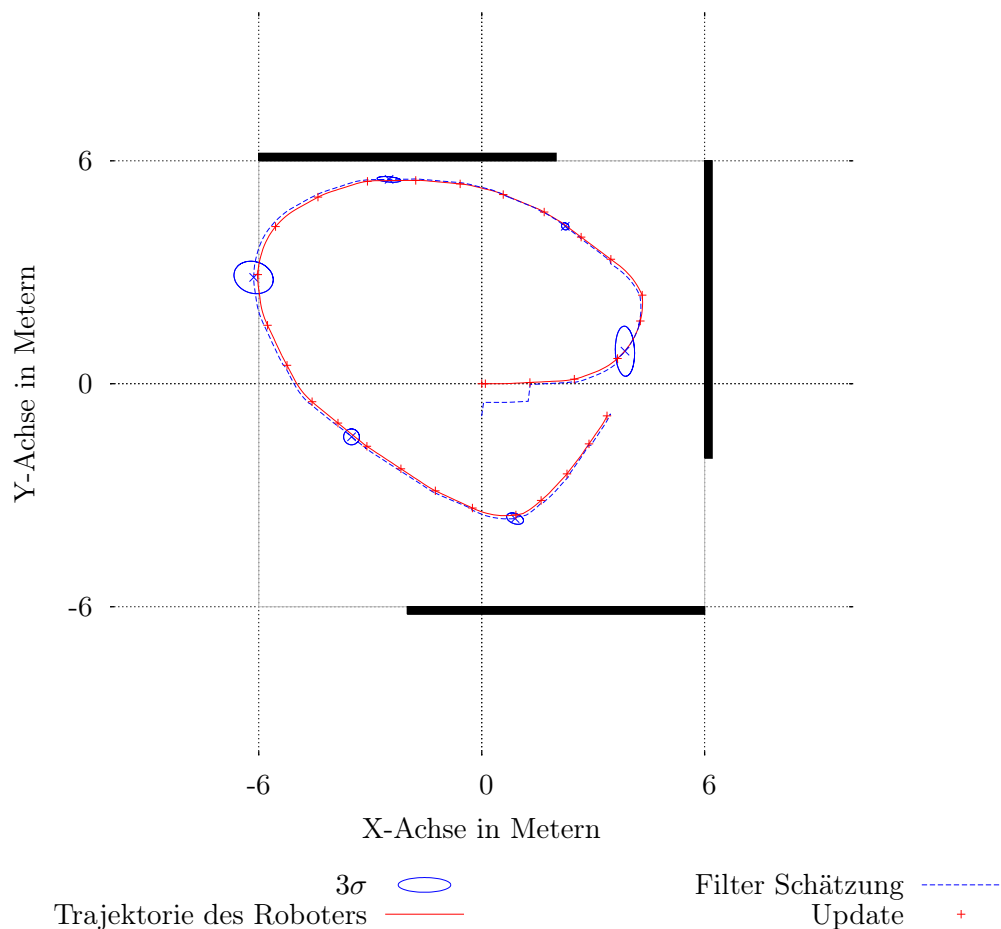


Abbildung 1.3: every1000mspics

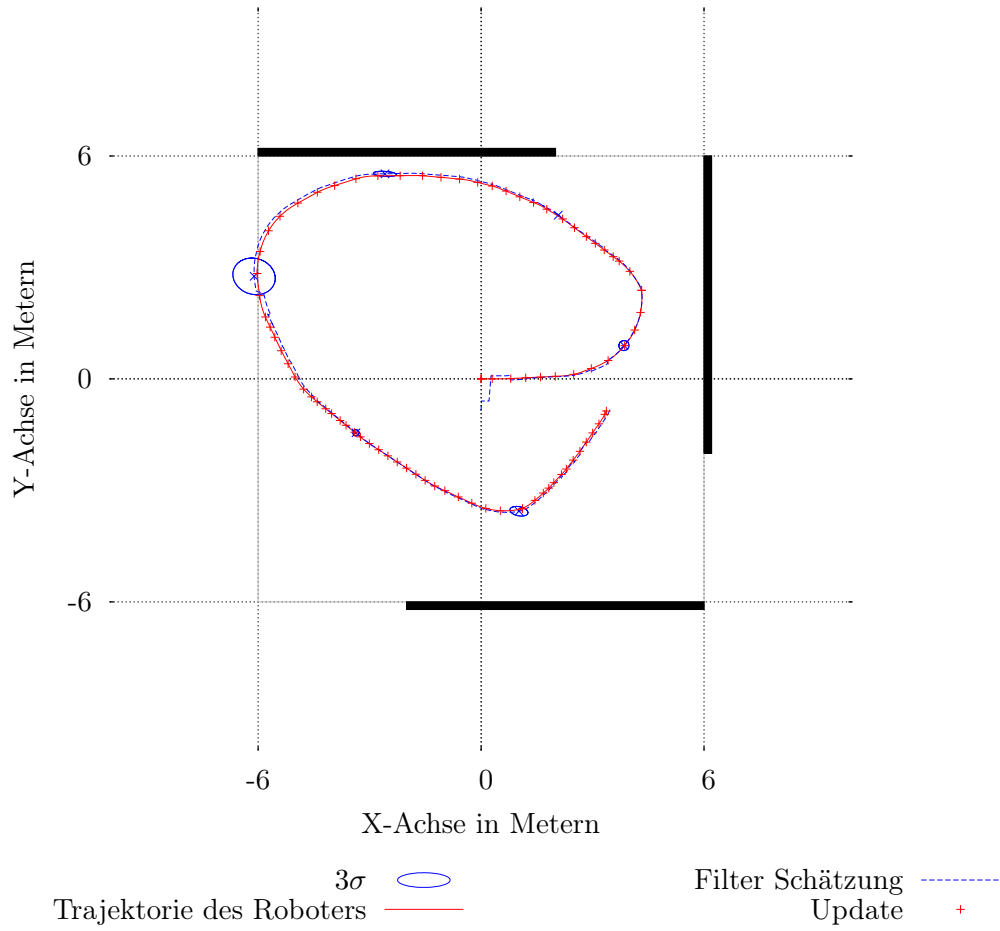


Abbildung 1.4: every500mspics



## 2 Grundlagen

### 2.1 Der Roboter

An dieser Stelle soll kurz beschrieben werden, wie die Roboter aufgebaut sind die als Grundlage für die Simulation dienen. Auf den Abbildungen 1.1, 1.2 und 2.1 sind sie zu sehen. Sie besitzen zwei angetriebene Räder und mindestens ein weiteres Stützrad, dass frei drehbar ist. Die Räder können unabhängig von einander angetrieben werden. Dazu sind pro Rad ein Servomotor mit Motorsteuerung und ein Getriebe mit Übersetzung verbaut. Zudem ist an jedem Rad ein Inkremental-

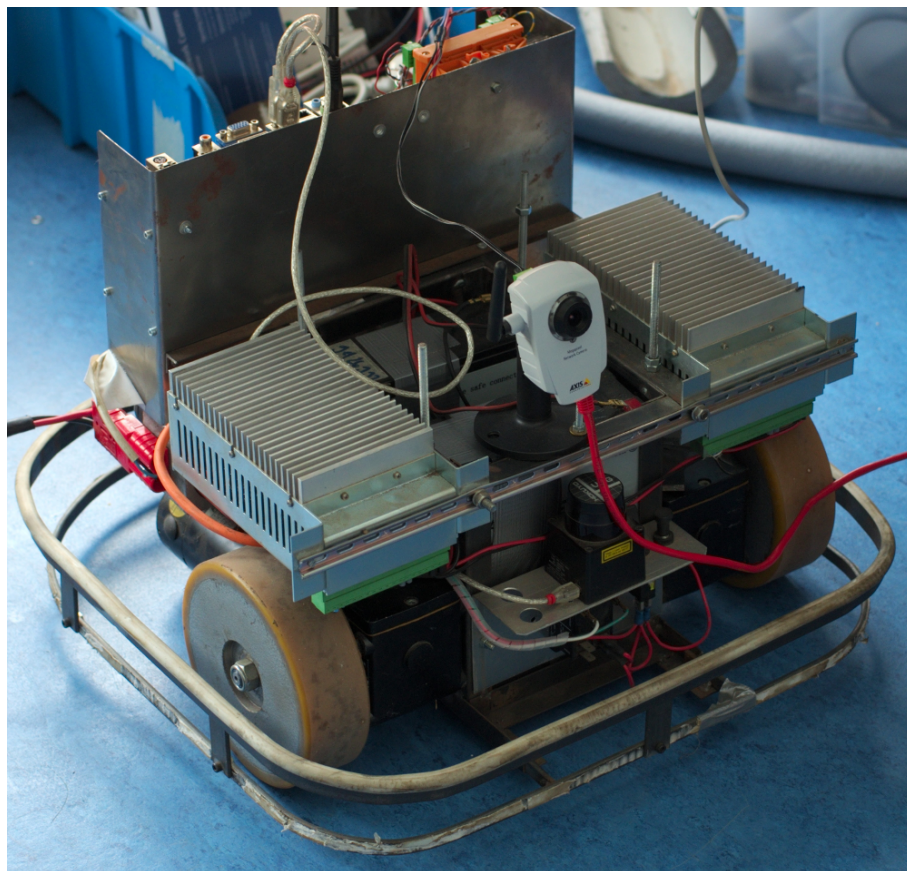


Abbildung 2.1: Einer der Roboter in Nahaufnahme

geber angebracht, der die Umdrehungen der Motorwelle misst. Es gibt verschiedene

Baugrößen, der Antrieb ist aber bei allen der selbe. Die Räder haben einen Durchmesser von 160 mm, das Getriebe hat ein Übersetzungsverhältnis von 1:14,5 und die Inkrementalgeber haben eine Auflösung von 2000 Ticks pro Umdrehung. Lediglich der Randstand unterscheidet sich bei den Baugrößen. Für die Simulation wird mit 700 mm gearbeitet.

## 2.2 Bühneninstallation

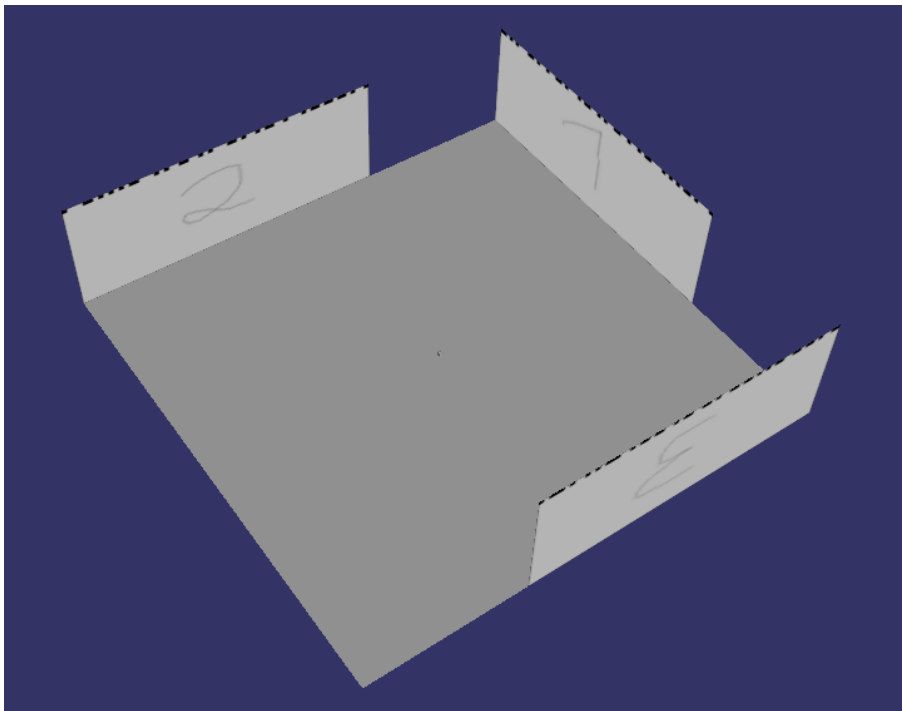


Abbildung 2.2: Ein Modell einer möglichen Bühne

Zum Zeitpunkt dieser Arbeit gab es keine stehende Bühne die man hätte zeigen können. Deshalb wurde nach Vorgabe eine mögliche Installationsanordnung modelliert. In Abbildung 2.2 sieht man von schräg Oben eine 12 x 12 m Grundfläche. An drei Seiten stehen so genannte Lichtwände die 3 m hoch und 8 m breit sind.

## 2.3 Lokalisation

Die Lokalisation ist eines der Grundprobleme das beim Einsatz von mobilen Robotern auftritt. In [Thrun et al., 2006, Seite 193] wird es in drei Teilprobleme zerlegt:

**Position Tracking** bezeichnet den Vorgang, bei dem mit bekannter Ausgangspo-

sition diese mit Hilfe von Sensordaten bei Bewegungen verfolgt werden kann. Dabei spielt das Dynamikmodell des Roboters sowie darin modellierte Unsicherheiten eine wichtige Rolle. Denn bewegt sich der Roboter von einer bekannten Position aus, wird mit dem Dynamikmodell seine neue Position geschätzt. Die Unsicherheiten des Modells erzeugen dabei eine Wahrscheinlichkeitsverteilung um diese neue Position, in der sich die wahre Position befinden sollte. Ohne Messungen von weiteren Sensoren die Rückschlüsse auf die Umgebung erlauben, würde die Positionsschätzung mit der Zeit immer ungenauer. Mit Hilfe eines Messmodells lässt sich beurteilen, ob eine Messung an einer bestimmten Position wahrscheinlich erscheint, oder nicht. Dadurch lässt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Position nach einer Bewegung durch eine Messung wieder eingrenzen. Auf den Bereich, in dem der Messwert des Sensors am Wahrscheinlichsten ist.

**Global Localization** ist das Finden der Anfangsposition des Roboters unter allen Möglichen Posen die im Szenario vorkommen können. Im Vergleich zum *Position Tracking*, bei dem es genügt die Unsicherheit um die geschätzte neue Pose zu berücksichtigen, umfasst hier der Raum möglicher Posen ein erheblich größeres Volumen. Ein Ansatz wäre alle möglichen Posen mit der selben Wahrscheinlichkeit anzunehmen, und mit den ersten Messungen und dem Messmodell diese einzugrenzen. Auf Bereiche in denen diese Messungen mit hoher Wahrscheinlichkeit auftritt.

**Kidnapped Robot Problem** ist eine verschärfte Variante des *Global Localization* Problems. Dabei geht man davon aus, dass sich der Roboter spontan an einem anderen Ort aufhält als vom Roboter angenommen. Nun müsste die Lokalisation des Roboters wieder im gesamten möglichen Raum erfolgen. Nur das der Roboter diesen Zustand nicht feststellen kann.

### 2.3.1 Übersicht gängiger Verfahren

Die meisten Lösungsansätze verwenden im Grunde eine Variante des Bayes-Filters wie z.B. in [Thrun et al., 2006, Seite 26] beschrieben. Abhängig vom Einsatzumfeld und der verwendeten Hardware gibt es aber noch andere Verfahren.

In [Seco et al., 2009] zum Beispiel werden, neben dem Bayes-Filter, drei weitere genannt: *Geometry-Based Methods*, *Minimization of the cost function* und *Fingerprint Methods* die sich in Gebäuden unter Nutzung von Elektromagnetischen Signalen ver-

wenden lassen. Je nach Sensorausstattung werden verschiedene Karten der Umgebung verwendet. Auf die sich der Roboter durch Auswertung von Sensormessungen lokalisieren muss. Dabei gibt es Karten die vorher angefertigt wurden, und dem Roboter bereits zur Verfügung stehen. Und es gibt Karten die der Roboter selbstständig während der Lokalisation erstellen muss. Letzteres wird als *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) Problem bezeichnet zu dem es bereits viele Veröffentlichungen gibt (u.a.) [Thrun et al., 2006, Seite 309], [Thrun, 2002], [Hertzberg et al., 2012, Seite 229]

Der in Kapitel 1 erwähnte Partikel Filter ist eine Variante des Bayes-Filters. Er ist auch als *Monte Carlo Localization* (MCL) bekannt. Alternativ dazu gibt es zum Beispiel den Kalman Filter, der mit Normalverteilungen die Wahrscheinlichkeiten abbildet. Er ist in seiner Anwendbarkeit auf lineare Probleme beschränkt oder ist auf Linearisierung angewiesen. Dafür ist er aber eines der ältesten Verfahren und damit am besten untersucht. In [Ha et al., 2012] wird er bei einem Lokalisationsproblem verwendet. Außerdem gibt es noch so genannte Grid-Based-Filter oder Histogram Filter. Diese teilen den Zustandsraum in so genannte Grids auf in denen ein Wahrscheinlichkeitswert jeweils den Zustand der Region abbildet. Für bestimmte Probleme mit nur zwei Zuständen, kann ein Binary Bayes Filter zum Einsatz kommen. Da in dieser Arbeit ein Partikel Filter verwendet wird, soll seine Funktionsweise kurz erklärt werden.

### 2.3.2 Der Partikel Filter

#### Zustandsraum

Der Partikel Filter bildet die Wahrscheinlichkeitsverteilung des vermuteten Zustandes durch eine diskrete Menge von so genannten Partikeln ab. Ein Partikel ist dabei ein Punkt im Zustandsraum zu dem noch ein Gewichtungswert gehört. Angenommen, der Zustand wäre die Position in einem dreidimensionalen Koordinatensystem ist, dann wäre der Zustandsraum alle möglichen Punkte in diesem Koordinatensystem. Ein Partikel in diesem Raum hätte also vier Attribute: einen X-Wert, einen Y-Wert, einen Z-Wert und einen Gewichtungswert. Im Grundzustand, ist der Gewichtungswert bei allen Partikeln gleich und die räumliche Verteilung oder Häufung repräsentiert die Wahrscheinlichkeitsverteilung des vermuteten Zustandes (hier die Position im Koordinatensystem). Häuften sich die Partikel um eine Position, so wäre bei einer zufälligen Ziehung aus den Partikeln, die Wahrscheinlichkeit höher ein Partikel von dieser Position zu ziehen. Mittelt man nun über alle Partikel im Zu-

standsraum, so erhält man eine Position die dem vermuteten Zustand entspricht. Dabei ist die Varianz über alle Partikel ein Maß dafür, wie zuverlässig diese Position ist.

## **Dynamikmodell**

Partikel Filter nutzen für die Zustandsschätzung ein Dynamikmodell. In diesem Modell wird abgebildet, wie sich der Zustand über die Zeit verändert, z.B. durch Physikalische Gesetzmäßigkeiten oder durch eine Hilfsgröße die sich Messen lässt (z.B. zurück gelegter Weg). Damit erlaubt das Dynamikmodell eine Prognose über den nächsten Zustand abzugeben. Um das Beispiel weiter zu führen stelle man sich vor, man will die Position eines Satelliten der um die Erde kreist bestimmen. Dabei soll lediglich die Position im Raum und nicht seine Orientierung betrachtet werden. Der Zustandsraum besteht damit schon einmal aus X, Y, und Z-Koordinaten. Für das Dynamikmodell könnten hier die Keplerschen Gesetze zur Bahnberechnung verwendet werden. Allerdings ist es dafür nötig, die Geschwindigkeit des Objektes zu kennen. Dazu wird der Zustandsraum um die Geschwindigkeiten in X, Y und Z-Richtung erweitert. Nun ist es bei einem Gegebenen Zustand möglich einen Folgezustand nach einer verstrichenen Zeit zu errechnen. Leider wird diese Prognose mit der Zeit immer ungenauer, denn in der Realität gibt es immer Störgrößen, die sich nicht vorhersagen lassen. Häufig jedoch lassen sich Aussagen über die Art und Stärke der Störung machen. Dieses Wissen kann in Form von einer Wahrscheinlichkeitsverteilung um die Prognose verwendet werden. Bei dem Satelliten wäre als Störung der Einfluss von Sonnenwind denkbar der ihn von der Sonne weg beschleunigt. Weiß man wie stark der Einfluss werden kann, könnte man ihn als Statistische Größe in die Prognose einfließen lassen.

## **Messmodell**

Das Messmodell wird benötigt, um entscheiden zu können, wie plausibel eine Messung bei gegebenem Zustand (Im Beispiel die Position) ist. Ein Sensor, über den das System verfügt, liefert einen Messwert. Mit dem Messmodell kann jetzt zu einem Beliebigen Zustand eine Aussage darüber gemacht werden, wie Wahrscheinlich es wäre diesen Messwert zu messen. Im Beispiel des Satelliten könnte der Abstand zu einer Bodenstation gemessen werden. Im Messmodell würde dann aus einem gegebenen Zustand, also Position und Geschwindigkeit, zusammen mit weiteren Informationen wie Position der Bodenstation auf der Erde, Datum und Uhrzeit der Messung er-

rechnet werden wie groß der Abstand sein müsste. Stimmt dieser erwartete Abstand nicht mit dem gemessenen überein, so ist die Messung bei diesem Zustand (Position und Geschwindigkeit) unwahrscheinlich. Zusätzlich ist natürlich jeder Messwert mit einer Ungenauigkeit behaftet, die vom Messprinzip und Sensortyp abhängt. Aber auch diese lässt sich Statistisch angeben und auf den Messwert aufschlagen bevor er ins Messmodell gegeben wird. So lassen sich Zustände im Zustandsraum hervorheben, für die eine gegebene Messung wahrscheinlich sind.

### Angewendet auf den Filter

Wenn der Zustandsraum alle möglichen Zustände eines Systems beschreibt, so sind die Partikel des Partikel Filters eine Untermenge davon, die in ihrer räumlichen Häufung den tatsächlichen Zustand des Systems beschreiben. Während des Betriebs gibt es zwei Ereignisse auf die der Filter reagiert:

Das **Dynamik-Update** berechnet auf Grundlage des Dynamikmodells eine neue Prognose. Konkret wird im Partikel Filter dafür zu jedem Partikel eine eigene Prognose gestellt. Dabei wird eventuelles Systemrauschen durch eine Ziehung pro Partikel aus dessen Wahrscheinlichkeitsverteilung (häufig Gaußverteilung) abgebildet. Die Prognosen aller Partikel bilden dann den neuen Systemzustand.

Der **Observe** Aufruf verarbeitet eine Messung mit Hilfe des Messmodells. Konkret wird für jedes Partikel, und damit den Zustand den es repräsentiert, geprüft wie wahrscheinlich eine solche Messung wäre. Bei einer hohen Wahrscheinlichkeit, wird der Gewichtungswert im Partikel größer. Bei geringer Wahrscheinlichkeit für eine solche Messung sinkt der Gewichtungswert. Nun repräsentieren diese Gewichte der Partikel den neuen Systemzustand.

Ein **Resampling** überführt die Information in den Partikel Gewichten wieder in die Partikel Häufung. Es wird normaler weise nach jedem Observe vorgenommen. Dies geschieht durch Ziehen von Partikeln der alten Partikelmenge mit einer Wahrscheinlichkeit die proportional zum Gewicht eines Partikels ist. Somit werden Partikel die ein hohes Gewicht hatten häufiger gezogen als jede, die nur ein geringes Gewicht hatten. Damit "überleben" das Resampling die Partikel dessen Zustand von einer vorgenommenen Messung bestätigt wird. In [Thrun et al., 2006, Seite 108] wird ein Problem beim Resampling beschrieben, welches bei unabhängigen Ziehungen auftritt. Es wird VARIANCE REDUCTION genannt und führt dazu, das Partikel mit geringem Gewicht zufällig gar nicht gezogen werden. Dies bedeutet einen Informationsverlust, der mit wiederholtem Resampling im Extremfall auf nur einen einzigen

Zustand degeneriert. Um dem entgegen zu wirken, sollte das Resampling nur durchgeführt werden, wenn sich die Gewichte in den Partikeln verändert haben. Also nach einer Messung beispielsweise. Weiß man jedoch sicher, dass sich am Zustand nichts ändern kann (z.B. Roboter steht still) sollte man weder Messungen auswerten, noch ein Resampling durchführen. Zudem sollte systematisches Ziehen anstelle von unabhängigen Ziehungen eingesetzt werden. Hierbei wird ein Partikel zufällig ausgewählt, und die übrigen systematisch anhand ihrer Gewichtung ermittelt.

## 2.4 Bildverarbeitung

Da die von einer Kamera aufgenommenen Bilder in dieser Arbeit eine zentrale Rolle spielen, ist es wichtig zu verstehen, wie diese zustande kommen. Daher soll an dieser Stelle kurz darauf eingegangen werden, wie sich eine Kamera formal beschreiben lässt.

Die Lochkamera ist ein sehr einfaches Modell das häufig zur Veranschaulichung verwendet wird. Es soll hier nicht im Detail beschrieben werden, dafür wären [Jähne, 2005, Seite 203] oder [Tönnies, 2005, Seite 47] zu empfehlen. Doch für das hier vorgestellte Verfahren ist es wichtig das Konzept dahinter zu verstehen:

Die Kamera projiziert im Wesentlichen Punkte aus dem Raum(3D) auf die Bildebene(2D). Um nun bei gegebenen Koordinaten eines 3D-Punktes in Weltkoordinaten den passenden Punkt auf der Bildebene berechnen zu können, ist die Kenntnis verschiedener Parameter erforderlich. Dabei trennt man in extrinsische und intrinsische Parameter. Unter den extrinsischen Kamera Parametern versteht man die Pose der Kamera in Weltkoordinaten. Also wo sich die Kamera befindet, und wie sie ausgerichtet ist. Dies wird in einer Transformationsmatrix ausgedrückt, mit der sich Punkte zwischen dem Kamera- und Weltkoordinatensystem transformieren lassen.

Die intrinsischen Parameter sind nötig, um 3D-Punkte (in Kamerakoordinaten) auf die Bildebene und in Pixelkoordinaten zu projizieren. Sie beinhalten neben der Brennweite, auch die Koordinaten wo die optische Achse auf den Bildsensor trifft. Um die auf den Bildsensor projizierten Punkte auch in Pixeln angeben zu können, gibt es einen Skalierungsfaktor.

Bei realen Kameras, muss in der Regel eine Kalibrierung durchgeführt werden, um diese Parameter zu bestimmen. Dabei können die intrinsischen Parameter gespeichert und wieder verwendet werden, wenn sich die Brennweite nicht ändert (kein

Optischer Zoom). Die extrinsischen Parameter müssen neu bestimmt werden, sobald sich die Kamera bewegt. Oder die Bewegung muss bekannt sein um sie in die Transformationsmatrix ein fließen zu lassen.



## 3 Lokalisierung mittels Bildverarbeitung

In diesem Kapitel soll das Verfahren beschrieben werden, mit dem die Lokalisierung erfolgt. Dabei wird erklärt wie das zu erkennende Bitmuster aufgebaut ist, wie der eingesetzte Partikel Filter ausgelegt wurde, und wie genau der Filter die Bilder beurteilt. Im letzten Abschnitt wird auf verschiedene Parameter eingegangen, die Einstellmöglichkeiten des Filters erlauben.

### 3.1 Bitmuster

Die drei Bitmuster, in der Obersten Zeilen der Lichtwände, sind 64 Bit lang, da eine Lichtwand aus 8 Segmenten mit je 8 Bit aufgebaut ist. Jedes Segment ist 1 m lang. Damit ist ein Bit 125 x 125 mm groß. Als Muster wurde eine Zeichenfolge in Strichcode verwendet. Als Codierung wurde Code 93 eingesetzt. Er codiert 48 verschiedene Zeichen in 9 Bit langen Blöcken. Dabei sind mindestens 3 Bit immer **true**(1) und 3 immer **false**(0). Außerdem können höchstens 4 gleiche Bits aufeinander folgen. Code 93 wurde gewählt, weil es schnell zu implementieren war, und sicher stellen konnte, dass es auch in beliebigen Ausschnitten der Muster genug Unterschiede zwischen den Lichtwänden gab. Auf Abbildung 3.1 sieht man die drei verwendeten Codestreifen. Rechts daneben sind die Zeichen für den codierten Abschnitt angegeben. Es sind 9 Bit lange Blöcke. Es gibt 7 solcher Blöcke die 63 Bits füllen, das letzte Bit ist bei zwei schwarz und einem weiß gewählt worden. Eine vollständige Tabelle der Codierung ist im Anhang auf Seite VI zu sehen.

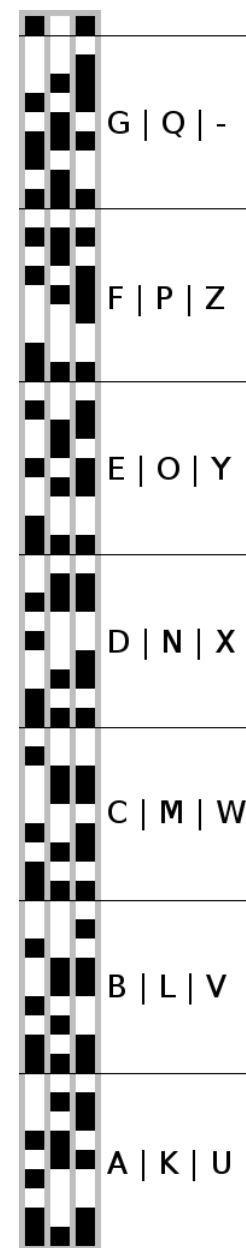


Abbildung 3.1: Muster

## 3.2 Partikel Filter

Für die Lokalisierung wird ein Partikel Filter verwendet. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie dieser entworfen wurde. Wie der Zustandsraum gewählt wurde und wie viele Partikel verwendet werden. Wie das Dynamikmodell die Odometrie der Antriebe verwendet um die Pose des Roboters zu schätzen. Und wie im Messmodell die Bilder der Kamera verwendet werden.

### 3.2.1 Zustandsraum

Der Zustandsraum der Partikel setzt sich aus der Position und der Pose des Roboters zusammen. Da er sich ausschließlich auf einer ebenen Bühne befindet, führt dies zur Reduktion der Freiheitsgrade von sechs auf drei: X, Y und  $\psi$ .

todo wieviel partikel, warum?

### 3.2.2 Dynamikmodell

Das Dynamikmodell für den Roboter basiert auf der Odometrie. Als Input bekommt das Dynamik-Update die Inkremente des linken und rechten Rades. Es sind absolute Inkrementwerte aus denen die Differenzen  $\Delta I_{r/l}$  zum letzten Update gebildet werden. Sie werden verwendet, um daraus eine Vorwärtsfahrt  $\Delta s$  und einen Drehwinkel  $\Delta\psi$  zu berechnen:

$$\Delta s = \frac{\Delta I_r + \Delta I_l}{2} \cdot \underbrace{\frac{2\pi r}{g \cdot \gamma}}_E$$

$$\Delta\psi = \frac{\Delta I_r - \Delta I_l}{2} \cdot \frac{2 \cdot E}{D}$$

mit Radabstand  $D$ , Getriebeübersetzung  $g$  und Geberauflösung  $\gamma$

Jedes Partikel berechnet daraus seinen neuen Zustand:

$$x_t = x_{t-1} + \cos(\psi_{t-1} + \frac{\Delta\psi}{2}) \cdot \Delta s$$

$$y_t = y_{t-1} + \sin(\psi_{t-1} + \frac{\Delta\psi}{2}) \cdot \Delta s$$

$$\psi_t = \psi_{t-1} + \Delta\psi$$

Dabei wird erst eine Drehung um  $\frac{\Delta\psi}{2}$  vollzogen, gefolgt von der Geradeausfahrt um  $\Delta s$  mit einer abschließenden Drehung um  $\frac{\Delta\psi}{2}$ . Damit der Partikel Filter funktioniert,

muss er die Messunsicherheiten der Eingangswerte berücksichtigen. Dazu wird vor der Zustandsberechnung, zu  $\Delta s$  und  $\Delta \psi$  ein Gaußsches Rauschen addiert. Es ist proportional zu deren Betrag:

$$\Delta s_{err} = \Delta s \cdot \sigma_s \cdot \text{RandomGaussian}()$$

$$\Delta \psi_{err} = \Delta \psi \cdot \sigma_\psi \cdot \text{RandomGaussian}()$$

$\sigma_s$  und  $\sigma_\psi$  sind dabei ein Maß dafür wie breit die Streuung der Normalverteilung ist. Sie sind Parameter die auf den Anwendungsfall, nach Stärke des erwarteten Rauschens, eingestellt werden müssen. Dabei soll die Streuung der Partikel im Zustandsraum mindestens genau so groß sein, wie die Streuung um den wahren Wert, verursacht durch Messunsicherheit der Sensoren. Wenn das  $\sigma$  zu klein gewählt, so kann es passieren, dass die Verteilung der Partikel den wahren Zustand nicht mehr enthält. Somit gibt es bei einer Messung kein Partikel mehr, dessen Zustand diese als wahrscheinlich erscheinen lässt. Damit folgen die Partikel im Zustandsraum einer falschen Schätzung, und die Messungen sind wertlos. Der Partikel Filter hätte die Position verloren.

Setzt man das  $\sigma$  größer an, so divergieren die Partikel mit jedem Dynamik-Update stärker und der wahre Wert wird hoher Wahrscheinlichkeit von Partikeln abgedeckt, so dass bei einer Messung diese einen guten Score bekommen und durch ein Resampling sich die Partikel wieder um den wahren Wert konzentrieren. Allerdings ist bei zu großem  $\sigma$  die Aussagekraft der Partikelverteilung sehr ungenau und es sind viele Partikel nötig, um die nötige Dichte im Zustandsraum zu gewährleisten. Dabei spielt es eine entscheidende Rolle, wie häufig Messungen erfolgen. Denn zwischen den Messungen muss sich der Filter auf das Dynamikmodell verlassen, und bei großem  $\sigma$  ist die Schätzung nach wenigen Schritten bereits mit einer großen Unsicherheit verbunden.

### 3.2.3 Messmodell

Als Messungen werden die Bilder einer Kamera auf dem Roboter verwendet. Das Messmodell dahinter beruht auf dem Wissen um die Position von bestimmten Mustern in der Umgebung. Dies kann als Karte der Umgebung verstanden werden, anhand derer sich der Roboter orientieren muss. Es gibt drei verschiedene Muster, auf jeder Lichtwand eines. Die Muster werden in der obersten Zeile der Lichtwand angezeigt, um möglichst selten verdeckt zu werden. Bei dem Messmodell gilt es nun zu prüfen, ob ein Bild zu einer bestimmten Pose passt oder nicht. Dafür könnte man in dem Bild nach den bekannten Mustern suchen, und sobald diese gefunden sind

versuchen diese einer Pose zu zuordnen. Aber eine solche Mustersuche in einem Bild ist immer in verschiedene Schritte aufgeteilt, die aufeinander aufbauen. Also z.B. Binarisierung über einen Schwellwert, Regionenbildung mit Charakterisierung und anschließende Auswertung ausgewählter Regionen. Oder Kantenerkennung, Hough-Transformation und finden von parallelen kurzen Linien. Ein Problem daran ist, dass wenn in einem ersten Schritt z.B. ein Schwellwert falsch gewählt wurde, oder nur sehr schwache Kanten vorhanden sind, alle folgenden Schritte scheitern, weil ihre Vorbedingungen nicht ausreichend erfüllt werden. Aus diesem Grund wurde ein anderer Ansatz verfolgt, bei dem man nicht das Bild und die Informationen darin als Ausgangspunkt nimmt, sondern die Pose der Partikel und die Position der Muster im Raum. Dazu soll aus der Pose des Partikels die Pose der Kamera abgeleitet werden. Und anschließend die Position des Musters aus dem Raum in Pixelkoordinaten projiziert werden. Damit könnte man für jede beliebige Pose des Roboters sagen wo im Bild das Muster zu sehen sein müsste und diese Bereiche mit dem erwarteten Muster vergleichen. Je besser der Bereich zu dem Muster passt, umso höher wird der Score für die Partikel Bewertung. Wie die gefundenen Pixel im Bild mit dem erwarteten Muster verglichen werden, wird in Abschnitt 3.3 näher beschrieben. Um die Position des Musters im Bild aus der Roboter Position zu berechnen sind mehrere Koordinatentransformationen und eine Projektion nötig. Die Musterposition liegt als Punktmenge  $M_W$  der Pixelmittelpunkte in Weltkoordinaten vor. Um sie mit der Kamerageleichung in das Bild zu projizieren, müssen sie in die Kamerakoordinaten transformiert werden. Dazu sind folgende Schritte nötig:

**Welt zu Roboter** ( $T_R^W$ ) In diese Transformation fließt die Pose des Roboters ein, die in Weltkoordinate vorliegt. Diese Transformation besteht aus Translation in x- und y-Richtung sowie einer Drehung um die z-Achse mit dem Winkel  $\psi$ . Sie muss für jedes Partikel neu erzeugt werden. Da die Pose sich natürlich ständig ändert, und unter den Partikeln verschieden ist.

**Roboter zu Kamera** ( $T_K^R$ ) Diese Transformation entspricht der extrinsischen Kameramatrix, die die Pose der Kamera relativ zum Roboter ausdrückt. In der Simulation wurde sie in 500 mm Höhe am Roboter angebracht. Sie blickt in Fahrtrichtung und ist  $20^\circ$  nach Oben geneigt. Ist diese Transformation einmal bekannt, so kann sie immer wieder verwendet werden. In dieser Arbeit ist sie aus der Simulation bekannt. Aber bei einer realen Anwendung müsste zunächst eine Kamerakalibrierung durchgeführt werden, um sie zu bestimmen. Um dieses Verfahren erst einmal untersuchen zu können, wird auf die Problematik der Kamerakalibrierung in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Durch Multiplikation der Transformationmatrizen

$$M_K = T_K^R \cdot T_R^W \cdot M_W$$

erhält man die Koordinaten der Bitmuster im Kamerasystem  $M_K$ . Diese können nun mit der intrinsischen Kameramatrix

$$K_i = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

in eine Punktmenge in Pixelkoordinaten  $M_P$  projiziert werden

$$M_P = K_i \cdot M_K$$

### 3.3 Musterbewertung

Bei der Musterbewertung geht es darum, zu einer bekannten Region im Bild eine Bewertung ab zu geben, wie gut sie zu einem gegebenen Muster passt. Dabei soll ein Score berechnet werden der zwischen 0 und 1 liegt. Wobei 0 keinerlei und 1 volle Übereinstimmung signalisiert. Es ist gewollt, dass hier keine harte Entscheidung getroffen wird. Denn damit gehen Informationen verloren, die zur Lokalisierung beigetragen hätten. Wenn beispielsweise ein Teil des Musters verdeckt wurde, so wäre immer noch ein mittlerer Score möglich. Bei einer harten Entscheidung würde dieses Bild verworfen werden.

Für die Musterbewertung stehen die Bildpositionen jedes Bits der drei Bitmuster aus der Projektion zur Verfügung. Dabei entspricht sie stets dem Mittelpunkt der 125 x 125 mm großen Bits der Lichtwände. Der erste Schritt ist eine einfache Überprüfung, ob die Pixelkoordinaten der Muster-Bits tatsächlich in dem Bild liegen. Denn die Projektion ist nicht auf einen Bildausschnitt beschränkt. Aus der Menge der Bildpunkte die ein Muster-Bit repräsentieren  $M_P$  können so alle aussortiert werden, die nicht in dem betrachteten Bildausschnitt gelandet sind. Ein Spezialfall wäre nun, das kein Muster-Bit als Punkt im Bild gelandet ist.

### 3.4 Parameter einstellen

Wieviele Partikel, und warum?

Wie sieht der Partikelraum aus?

Wie ist das Messmodell aufgebaut?

Besonderheiten im Messmodell: erst an 10 Punkten wird ausgewertet, geringer Kontrast führt zu Abwertung.

Wie wird initialisiert?

Wie ist das Dynamikmodell aufgebaut?

Wie ist das Muster aufgebaut?

Wie wird die "geschätzte"Position berechnet?

## 4 Software

Die Software die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, ist in C++ geschrieben. Als Entwicklungsumgebung wurde Eclipse mit den *C/C++ Development Tools* (CDT) auf einem Linux<sup>1</sup> Betriebssystem verwendet.

### 4.1 Simulation

Grundlage der Simulation ist das 3D Grafiktoolkit *Open Scene Graph* (OCG)<sup>2</sup>. Damit lässt sich eine 3D Szene in Form eines Graphen aufbauen und mit einem Viewer darstellen. Um den Ablauf kontrollieren zu können, lässt sich die Render-Schleife manuell aufrufen um jeden Frame einzeln berechnen zu lassen. Dies wurde als Simulationsschritt gewählt in dem alle nötigen Berechnungen durchgeführt werden können. Da die Geschwindigkeit mit der die Simulation im manuellen Modus abläuft nicht begrenzt wird, wurde eine Mindestbearbeitungszeit integriert. Denn die Geschwindigkeiten von Objekten in der Simulation, wie dem Roboter, werden durch eine zurückgelegte Strecke pro Simulationsschritt festgelegt. Bei sehr schneller Hardware ergab dies eine zu hohe Bewegungsrate um den Roboter noch manuell steuern zu können. Für automatisierte Simulationsläufe mit festgelegten Fahrprofilen könnte man diese Begrenzung wieder lösen um Zeit zu sparen.

#### 4.1.1 Die Szene

Die Szene in der Simulation ist aus mehreren Komponenten aufgebaut, die im Folgenden näher beschrieben werden. Dabei wird ein Vergleich zu den echten Elementen auf der Bühne gezogen, um zu erläutern wie deren Attribute in der Simulation abgebildet werden können. In Abbildung 4.1 kann man alle Elemente der Szene erkennen.

---

<sup>1</sup>Ubuntu 12.04 LTS

<sup>2</sup><http://www.openscenegraph.org/>

**Die Grundfläche (1)** der Bühne misst 12 x 12 m. Sie wird als einfach weiße Fläche in der Szene dargestellt. Da die Bildverarbeitung nur auf den Oberen Teil des Bildes beschränkt ist, spielen Farbe und Helligkeit keine Rolle bei der Erkennung des Musters im Bild.

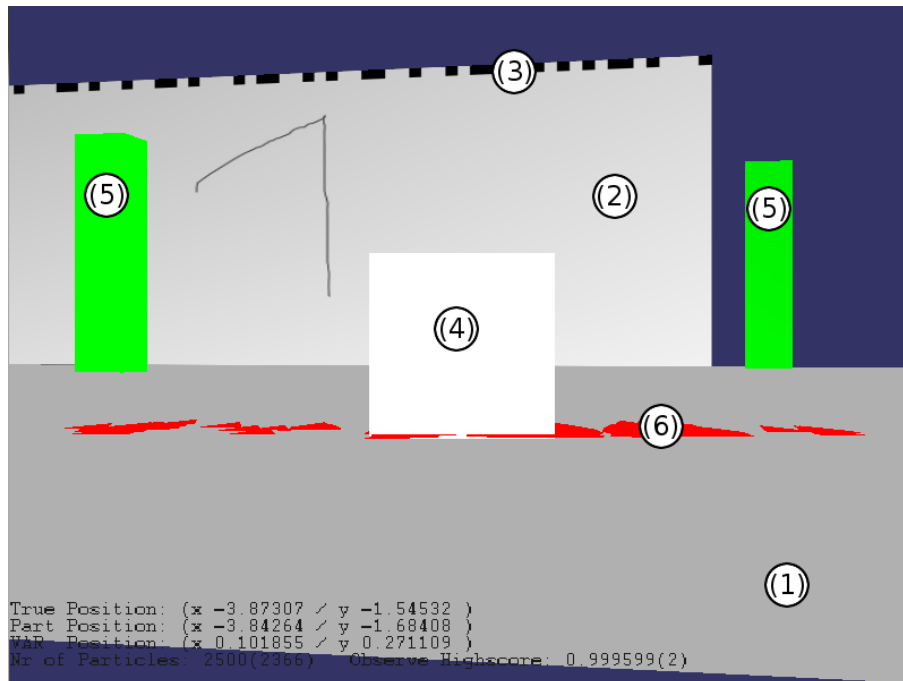


Abbildung 4.1: Simulierte Szene

**Die Lichtwände (2,3)** sind zu drei Seiten der Grundfläche aufgestellt. Sie messen 3m in der Höhe und 8m in der Länge. Wie bereits in @@@@ beschrieben soll das Muster in der obersten Zeile der Lichtwände dargestellt werden. Hierzu können verschiedene Texturen geladen werden die das Bitmuster enthalten. In der Realität sind die Lichtwände auf der Bühne sind aus 1 x 1 Meter großen Segmenten zusammen gesetzt, dies wird in der Simulation nicht abgebildet. Es wäre jedoch denkbar, dies in den Aufbau der Texturen einfließen zu lassen. Also leichte Abstands Änderungen der Bits in der Textur. Auf jedem Segment sind 8 x 8 Bits unter gebracht. Das macht eine Kantenlänge von 125 mm bei jedem dieser Pixel und 64 Pixel über die ganze Länge einer Wand. Ein solches Segment besteht aus einer Milchigen Plexiglasplatte, die auf eine Struktur geschraubt wurde die für jedes Pixel ein Leuchtmittel vorsieht. Dessen Helligkeit lässt sich einstellen, wäre aber für das Bitmuster auf die Zustände: dunkel(ausgeschaltet) oder hell(ein, mit größter Helligkeit) einzustellen. Die Plexiglasplatte wird also pro Pixel von Hinten durchleuchtet. Dies führt dazu, das die Helligkeitsverteilung in einem beleuchteten Pixle inhomogen ist. In der Mitte ist die größte Helligkeit, während sie radial nach Außen etwas



abnimmt. Die Ecken der Pixle sind die dunkelsten Stellen. Auf Abbildung 1.2 auf Seite 2 ist dieser Effekt gut zu sehen. Er wird besonders stark, wenn die Leuchtmittel mit niedriger Helligkeit betrieben werden. Bei hoher Helligkeit ist der Effekt noch wahrnehmbar, aber nicht mehr so ausgeprägt. Und noch etwas fällt auf wenn man dieses Bild betrachtet, die Lichtfarbe und Helligkeit variiert leicht von Pixel zu Pixel. All diese Effekte können in der Simulation nur durch verändern der Texturen abgebildet werden.

**Der Roboter (4)** wird nur durch einen weißen Würfel dargestellt. Die genaue Form und das Aussehen spielen für die Lokalisation keine Rolle. Die Kameras sind so angebracht, dass der Roboter selbst nicht im Bild zu sehen ist. Der Würfel ist für den Bediener gedacht, der die Szene aus einem Blickwinkel hinter dem Roboter steuert. Das Bild 4.1 ist aus diesem Blickwinkel aufgenommen. Der Roboter lässt sich mit den Tasten W, A, S, D (vorwärts, links, rückwärts, rechts) grob verfahren oder mit einem Pad<sup>3</sup> mit Analogsticks auch präziser steuern. Die Steuerbefehle für den Roboter werden in Geschwindigkeit (gerade aus) und Drehrate interpretiert. Diese führen dann, in jedem Simulationsschritt zu einer Positionsänderung. Es wird erst eine Drehung um die Hälfte der Winkeländerung durchgeführt. Anschließend wird in die neuer Richtung geradeaus die Streckenänderung zurück gelegt. Und mit einer zweiten Drehung bis zur vollen Winkeländerung wird die Bewegung abgeschlossen.

**Besucher (5)** werden mit 400 x 400 x 1800 mm Quadern dargestellt. Damit sie, für den Bediener, besser in der Szene zu erkennen sind, wurden sie grün gefärbt. Sie bewegen sich nicht, sondern stehen an vorher festgelegten Positionen. Vor einer Simulation wird die Anzahl der Besucher eingestellt, die auf der Bühne stehen sollen. Dabei gibt es 25 mögliche Positionen aus denen dann die gewünschte Anzahl zufällig gezogen wird. Sie sollen mögliche Verdeckungen im Bildbereich des Roboters darstellen. Damit soll untersucht werden, wie gut der Algorithmus mit teilweise verdeckten Code-Bereichen klar kommt. Und ab Wie vielen Personen auf der Bühne es Kritisch wird, mit der Lokalisation.

**Partikel (6)** werden zur Veranschaulichung und zu debugging Zwecken visualisiert. Sie werden durch rote kleine spitze Dreiecke dargestellt. Der spitze Winkel zeigt dabei die Orientierung an. Sie befinden sich nur auf dem Boden und beeinträchtigen die Bildverarbeitung deshalb nicht.

---

<sup>3</sup>PlayStation 3 Wireless Sixaxis Controller

### 4.1.2 Messen in der Simulation

Die Simulation soll, neben der Visualisierung, Messungen liefern um den Lokalisationsalgorithmus testen zu können. Anders als bei Messungen an realen Experimenten hat man in der Simulation den Vorteil, alle das Messergebnis beeinflussenden Faktoren unter Kontrolle zu haben. Möchte man also, dass Messungen eine systematische Abweichung aufweisen, muss diese in der Simulation definiert werden. Genau so verhält es sich mit statistischen Abweichungen. Es lassen sich also schnell die Messunsicherheiten der Simulierten Vorgänge anpassen. Beim Debugging und Funktionstest des Lokalisationsalgorithmus wurde die Unsicherheit zum Beispiel zeitweise entfernt.

#### Messwerte der Inkrementalgeber

Wie beim Robotermodell schon beschrieben, wird in der Simulation dessen X/Y-Koordinate sowie der Winkel zur X-Achse als Repräsentation der Pose verwendet. Aus den Positions- ( $\Delta s$ ) und Orientierungsänderungen ( $\Delta\psi$ ), in jedem Simulationsschritt, werden Drehwinkeländerungen ( $\Delta\alpha_{r/l}$ ) der Beiden Räder berechnet:

$$\Delta\alpha_{rechts} = \frac{\Delta s + \Delta\psi \cdot D_r}{R_r}$$

$$\Delta\alpha_{links} = \frac{\Delta s - \Delta\psi \cdot D_l}{R_l}$$

mit Abstand  $D_{r/l}$  des Rades von der Mitte der Achse und Radradius  $R_{rad}$ . Die Drehwinkeländerungen werden aufsummiert um die Radstellungen zu speichern:

$$\alpha = \alpha + \Delta\alpha$$

Aus diesen Winkelstellungen<sup>4</sup> der Räder wird ein Wert für die Inkrementalgeber abgeleitet und auf ganze Inkremente gerundet:

$$I_{rechts} = \alpha_{rechts} \cdot \frac{g \gamma}{2\pi}$$

$$I_{links} = \alpha_{links} \cdot \frac{g \gamma}{2\pi}$$

mit Getriebeübersetzung:  $g$  und Inkrementalgeber Auflösung(pro Umdrehung):  $\gamma$

---

<sup>4</sup>Die Winkelstellung der Räder wird nur numerisch simuliert und ist am Modell nicht sichtbar.

## Messabweichung des Inkrementalgebers

Es können drei verschiedene Typen von Messabweichungen simuliert werden:

Eine **systematische Abweichung** bei der Umrechnung vom Radwinkel in Inkremente. Dies führt zu einem sich akkumulierenden Fehler in der Gefahrenen Strecke und der Orientierung. In der Simulation wurde diese Art Unsicherheit durch einen veränderten Radradius erzeugt. Für beide Räder wird vor jedem Simulationslauf in einem Fehlerintervall der Radius leicht verändert. Je stärker die Radien sich unterscheiden, umso stärker scheint der Roboter bei geradeaus Fahrt zu einer Seite zu driften. Diese Art Messabweichung ist also über die Dauer eine Simulation konstant, aber für jeden Simulationslauf zufällig.

Eine **systematische Abweichung** die nur bei Drehungen auftritt. Dies ist typischerweise die dominante Fehlerquelle bei radgetriebenen Robotern. Bei einer Drehung ist der Auflagepunkt der Räder nicht bekannt, da der innen liegende Teil der Rades sich langsamer drehen müsste als der äußere. Dies führt bei einer Drehung dazu, dass der Abstand des Rades zur Drehachse nicht genau bekannt ist. In der Simulation wird daher dieser Abstand über die Breite der Räder zufällig bestimmt. Realistischer weise müsste dieser Abstand für jede Drehung neu bestimmt werden. Zum testen der Lokalisation reicht es aber aus, wenn dies nur einmal zu Beginn einer Simulation geschieht. Dadurch treten bei Drehungen Messabweichungen auf, die zwar über einen Simulationslauf konstant und damit systematisch sind, aber die Lokalisierung genau so erschweren wie zufällige Abstände während der Laufzeit.

Eine **zufällige Abweichung** bei den Inkrementenritten soll ein mögliches Spiel in Kupplung oder Getriebe simulieren. Dabei wird zu dem akkumulierten Inkrementalwert eines Rades ein Gaußsches Rauschen addiert, welches proportional zur letzten Winkeländerung ist. Ist diese bei Stillstand gleich Null, so wird nur ein schwaches Grundrauschen addiert.

## Bilder der Kamera

noch mehr test text zum testen.

## 4.2 Lokalisation

Die Lokalisation ist als eine Klasse implementiert

## 5 Versuchsdurchführung

### 5.1 Theoretische Vorüberlegungen

Ideen zu Fragestellungen die Versuche nötig machen:

- Wie viele Bilder pro Zeit/Stecke sind nötig? Wie genau will man dabei noch sein? Evtl. Bildfrequenz zu Mittlerer Unsicherheit Darstellen?
- Wie wirkt es sich aus, wenn teile des Musters verdeckt sind? Ist eine Lokalisation auch bei ständiger Verdeckung möglich?
- Wie muss das Muster aufgebaut sein? Was für Fehler könne entstehen, wenn ein ungeeignetes Muster verwendet wird?
- Wie gut kommt der Filter mit Systematischen Fehlern zurecht?

### 5.2 Versuchsaufbau

### 5.3 Versuchsvorbereitung

### 5.4 Praktische Versuchsdurchführung

### 5.5 Versuchsergebnisse

### 5.6 Diskussion der Ergebnisse

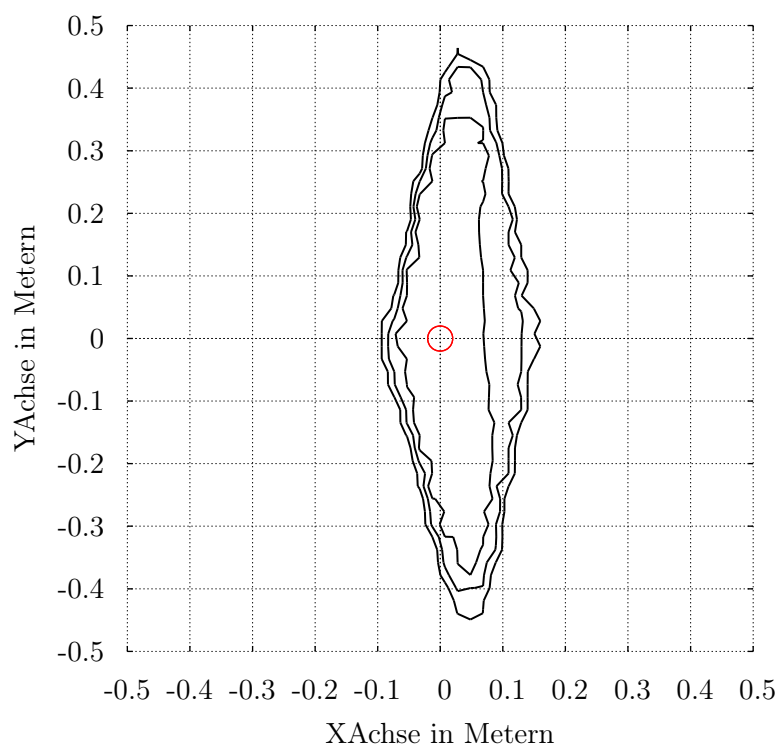


Abbildung 5.1: Bereich der zu einem Bild

## 6 Mögliche Anwendung und Ausblick





## 7 Fazit

## A Abkürzungsverzeichnis

**CDT** *C/C++ Development Tools*

**OCG** *Open Scene Graph*

**BBM** *Beobachter der Bediener von Maschinen*

**SLAM** *Simultaneous Localization and Mapping*

**MCL** *Monte Carlo Localization*



## B Literaturverzeichnis

- [Ha et al., 2012] Ha, X. V., Ha, C., and Lee, J. (2012). *Intelligent Computing Technology: 8th International Conference, ICIC 2012, Huangshan, China, July 25-29, 2012. Proceedings: Trajectory Estimation of a Tracked Mobile Robot Using the Sigma-Point Kalman Filter with an IMU and Optical Encoder*, volume 7389 of *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg.
- [Hertzberg et al., 2012] Hertzberg, J., Lingemann, K., and Nüchter, A. (2012). *Mobile Roboter: eine Einführung aus Sicht der Informatik*. eXamen.press. Springer Vieweg, Berlin [u.a.]. X, 389 S. : zahlr. Ill. und graph. Darst.
- [Jähne, 2005] Jähne, B. (2005). *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 6., überarbeitete und erweiterte auflage edition. Online-Ressource : v.: digital.
- [Seco et al., 2009] Seco, F., Jiménez, A. R., Prieto, C., Roa, J., and Koutsou, K. (2009). A survey of mathematical methods for indoor localization. In *Intelligent Signal Processing, 2009. WISP 2009. IEEE International Symposium on*, pages 9–14. IEEE.
- [Thrun, 2002] Thrun, S. (2002). Particle filters in robotics. In *Proceedings of the Eighteenth conference on Uncertainty in artificial intelligence, UAI'02*, pages 511–518, San Francisco, CA, USA. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [Thrun et al., 2006] Thrun, S., Fox, D., and Burgard, W. (2006). *Probabilistic robotics*. Intelligent robotics and autonomous agents. MIT Press, Cambridge, Mass. [u.a.]. XX, 647 S. : Ill., graph. Darst.
- [Tönnies, 2005] Tönnies, K. D. (2005). *Grundlagen der Bildverarbeitung*. Informatik. Pearson Studium, München. Online-Ressource.



## C Anhang

**Code 93 bar code**

ID	Character	Widths	Binary	ID	Character	Widths	Binary
0	0	131112	100010100	28	S	211122	110101100
1	1	111213	101001000	29	T	211221	110100110
2	2	111312	101000100	30	U	221121	110010110
3	3	111411	101000010	31	V	222111	110011010
4	4	121113	100101000	32	W	112122	101101100
5	5	121212	100100100	33	X	112221	101100110
6	6	121311	100100010	34	Y	122121	100110110
7	7	111114	101010000	35	Z	123111	100111010
8	8	131211	100010010	36	-	121131	100101110
9	9	141111	100001010	37	.	311112	111010100
10	A	211113	110101000	38	SPACE	311211	111010010
11	B	211212	110100100	39	\$	321111	111001010
12	C	211311	110100010	40	/	112131	101101110
13	D	221112	110010100	41	+	113121	101110110
14	E	221211	110010010	42	%	211131	110101110
15	F	231111	110001010	43	(\$)	121221	100100110
16	G	112113	101101000	44	(%)	312111	111011010
17	H	112212	101100100	45	(/)	311121	111010110
18	I	112311	101100010	46	(+)	122211	100110010
19	J	122112	100110100	Start/Stop *		111141	101011110
20	K	132111	100011010	(Reverse stop)		114111	101111010
21	L	111123	101011000	Unused		411111	111101010
22	M	111222	101001100			111132	101011100
23	N	111321	101000110			111231	101001110
24	O	121122	100101100			113112	101110100
25	P	131121	100010110			113211	101110010
26	Q	212112	110110100			213111	110111010
27	R	212211	110110010			212121	110110110

Abbildung C.1: code 93, Quelle: Wikipedia