



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Christian Ahlf

**3D-Modellgenerierung mit Hilfe eines roboterbewegten
Laserschnittsensors**

*Fakultät Technik und Informatik
Studiendepartment Informatik*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Computer Science*

Christian Ahlf

**3D-Modellgenerierung mit Hilfe eines roboterbewegten
Laserschnittsensors**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Bachelor of Science Technische Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel
Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Reinhard Baran

Eingereicht am: 09. Mai 2012

Christian Ahlf

Thema der Arbeit

3D-Modellgenerierung mit Hilfe eines roboterbewegten Laserschnittsensors

Stichworte

3D-Modellgenerierung, Laser, Laser-Triangulation, Roboterarm, Laserschnittsensor, Mikrocontroller, Pulse Width Modulator, Kalibrierung

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Laserschnittsensors, der speziell für den Einsatz auf Roboterarmen ausgelegt ist. Mit Hilfe dieses Sensors und des Roboterarmes können 3D-Modelle von Objekten in seiner Umgebung erzeugt werden. Für die Umsetzung des Laserschnittsensors wurden eine Kamera und ein Linienlaser verwendet.

Christian Ahlf

Title of the paper

3D model generation with the help of a robot moving laser section sensor

Keywords

3D model generation, laser, laser triangulation, robotic arm, laser section sensor, microcontroller, puls width modulator, calibration

Abstract

This work deals with the development of a laser section sensor, specially designed for the usage on robotic arms. With the help of this sensor and the robotic arm it is possible to generate 3D models of objects in their environment. For the implementation of the laser section sensor a camera and a laser line have been used.

Danksagung

Mein Dank gilt an erster Stelle meinem Gutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel von der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW). Die Möglichkeiten und den Freiraum, den Sie mir gewährten, trugen maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei.

Mein Dank gilt Frank Freyer, Stephanie Böhning, Laura Knetter und den Kollegen im Robot Vision Lab der HAW Hamburg für viele konstruktive und aufschlussreiche Diskussionen.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich stets unterstützt haben und mir die nötige Zeit zur Fertigstellung der Arbeit gegeben haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.0.1	Problemstellung	1
1.0.2	Zielsetzung	1
1.0.3	Struktur der Arbeit	2
2	Stand der Technik	3
2.0.4	Kameras	3
2.0.5	Roboter	4
2.0.6	Laser	4
2.0.7	Zusammenführung der Techniken	5
3	Konzeptionierung	7
3.1	Lastenheft	7
3.2	Realisierungsmöglichkeiten	8
3.2.1	Auswahl der Realisierungsmöglichkeit	11
4	Grundlagen	13
4.1	Sensorik	13
4.1.1	CCD	13
4.1.2	CMOS	14
4.2	Optik	15
4.2.1	Brennweite	15
4.2.2	Schärfentiefe	16
4.2.3	Blende	16
4.2.4	Fokus	16
4.3	Kameramodell	16
4.4	Koordinatensysteme	16
4.4.1	Bildkoordinatensystem	16
4.4.2	Kamerakoordinatensystem	18
4.4.3	Weltkoordinatensystem	18
4.4.4	Endeffektorkoordinatensystem	18
4.5	Homogene Koordinaten	19
4.6	PWM	20
5	Technischer Aufbau	21
5.1	Kamera	21

5.2	Objektiv	21
5.3	Laser	22
5.4	Laserhalterung	23
5.5	Laseransteuerung Hardware	23
5.6	Roboterarm	25
5.7	Computer	26
5.7.1	Hardware	26
5.7.2	Software	27
6	Laser	29
6.1	Laseransteuerung Software	29
6.2	Laserlinienerkennung	30
6.3	Verfahren zur Auswertung	30
6.3.1	Maximum	30
6.3.2	Schwellwert	31
6.3.3	Schwerpunkt	31
7	Kalibrierung	34
7.1	Kamera Kalibrierung	34
7.2	Hand-Auge Kalibrierung	36
7.3	Laser-Kamera Kalibrierung	36
8	Roboterarm	41
8.1	Freiheitsgrade und kinematische Kette	41
8.2	Vorwärtskinematik	42
8.3	Inverse Kinematik	44
8.4	Denavit-Hartenberg-Transformation	46
8.5	Ansteuerung des Roboters	48
9	3D-Modellgenerierung	50
9.1	Modell abfahren	50
9.2	Laserlinie bestimmen	50
9.3	3D Modell generieren	52
10	Ergebnisse	53
10.1	Objekte im Laser	53
10.2	Genauigkeit	56
11	Fazit	57
11.1	Zusammenfassung	57
11.2	Ausblick	57
11.2.1	Polarisationsfilter	57
11.2.2	Laseransteuerung	58

1 Einleitung

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden einerseits Probleme beschrieben, die bei der Erstellung von 3D-Modellen mittels Bildverarbeitung auftreten können, andererseits sollen die Ziele des neu zu entwickelnden Systems verdeutlicht werden. Die Struktur der Arbeit ist insgesamt in Kapitel Struktur der Arbeit aufgeführt.

1.0.1 Problemstellung

Roboterarme können sich innerhalb ihrer Reichweite frei im Raum bewegen. Bei vielen Anwendungen, bei denen Roboterarme Aufgaben zu erledigen haben, müssen sie mit Objekten arbeiten. Wenn die Parameter unbekannt sind, besteht das Problem, mit dem Objekt in der Umgebung zu interagieren. Die Parameter sind die Abmessungen des Objektes und seine Lage im Raum. Eine Art der Interaktion ist z.B. das Greifen des Objektes. Aus diesem Grunde ist es notwendig, mittels Sensorik dem Roboterarm eine Sondierung seines Umfeldes zu ermöglichen. In dieser Arbeit soll ein möglicher Lösungsansatz für diese Problematik erstellt werden.

1.0.2 Zielsetzung

Für diese Arbeit soll der Katana Roboterarm [5.9](#) benutzt werden. Dieser soll von einem PC aus gesteuert werden und sich gezielt über Objekte bewegen lassen. Die genaue Ausrichtung des Roboters muss berechnet werden, um seine exakte Position im Raum zu kennen. Der Roboterarm soll am letzten Armsegment mit einem zusätzlichen Sensor ausgestattet werden. Der Sensor soll in Richtung des Arms ausgerichtet sein und darf diesen nicht in der Bewegung einschränken. Des Weiteren muss auch auf das Gewicht des Sensors geachtet werden, damit der Roboterarm nicht durch Überlastung der Gelenke beschädigt wird. Der Sensor muss so beschaffen sein, dass mit Hilfe der Bewegung des Roboterarms eine komplette Abtastung des Objekts möglich ist. Die Daten sollen im PC verarbeitet werden, um daraus ein 3D-Modell zu generieren. Da der Roboterarm in einem Raum mit unterschiedlichen Lichtsituationen eingesetzt werden soll, muss der Sensor sich daran anpassen lassen.

1.0.3 Struktur der Arbeit

- **Kapitel 2** stellt einen Überblick über den Stand der Technik dar und wird anhand von Beispielen verdeutlicht.
- **Kapitel 3** dient der Festlegung der Anforderungen. Aufbauend darauf werden verschiedene Realisierungsmöglichkeiten vorgestellt. Durch eine anschließende Bewertung der Anforderungen wird die zu realisierende Lösung ausgewählt.
- **Kapitel 4** gibt eine Einführung in Grundlagen der Sensorik, Kameramodelle und Mathematik. In den nachfolgenden Kapitel wird auf diese Grundlagen zurückgegriffen.
- **Kapitel 5** beschreibt den technischen Aufbau der Hilfsmittel, die in dieser Arbeit verwendet werden.
- **Kapitel 6** beinhaltet die Ansteuerung und Auswertung der erzeugten Laserlinie.
- **Kapitel 7** beschäftigt sich mit den notwendigen Kalibrierungen der verwendeten Sensorik.
- **Kapitel 8** erörtert die Steuerung des Roboterarms und dessen Bewegungen im Raum.
- **Kapitel 9** führt die Daten aus den vorherigen drei Kapiteln zusammen und beschreibt die Erzeugung des 3D-Modells.
- **Kapitel 10** stellt die Ergebnisse und einen Versuchsaufbau dar.
- **Kapitel 11** gibt einen Rückblick auf die Arbeit und einen Ausblick auf Weiterentwicklungen.

2 Stand der Technik

In dem nachfolgenden Kapitel soll ein kurzer Überblick über die am Markt verfügbaren Geräte gegeben werden, die nach aktuellem Stand der Technik für die bevorstehende Aufgabe geeignet wären.

2.0.4 Kameras

Kameras haben eine ähnlich optische Wahrnehmung wie das menschliche Auge. Im Allgemeinen sind die Aufnahmen für den Menschen direkt interpretierbar. Kameras können ihre Umwelt berührungslos erfassen. Kameras sind sehr verbreitet und für verschiedenste Anwendungen benutzbar. Sie können in verschiedenen Einsatzgebieten, wie z.B. Stereoendoskope, Intelligenten Häusern und oder bei Qualitätskontrollen zum Tragen kommen.¹

Stereoendoskop

Stereoendoskope werden in der Medizin eingesetzt, um dem Chirurgen Aufnahmen vom Inneren eines Körpers (Abbildung: 2.1) zu liefern, ohne größere Schnitte durchzuführen.

Intelligentes Haus

In einem Intelligentem Haus (Abbildung: 2.2) werden Gegenstände und Menschen mit verschiedenen Kameras lokalisiert. Damit ist es möglich, die Umwelt mit dem Menschen interagieren zu lassen.

Qualitätskontrollen

Bei Qualitätskontrollen in der Industrie werden Bauteile über ein Förderband an Kameras vorbei geführt. Mit den Aufnahmen können Fehler der Produktion erkannt werden. Bauteile, die die Prüfung nicht bestanden haben, können automatisch über eine Weiche aussortiert werden.

¹Quelle: Azad u. a. (2009) Seite 62 ff.

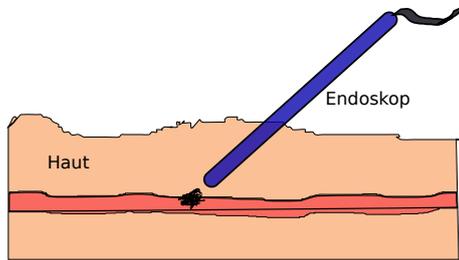


Abbildung 2.1: Stereoadendoskop im Inneren eines Körpers

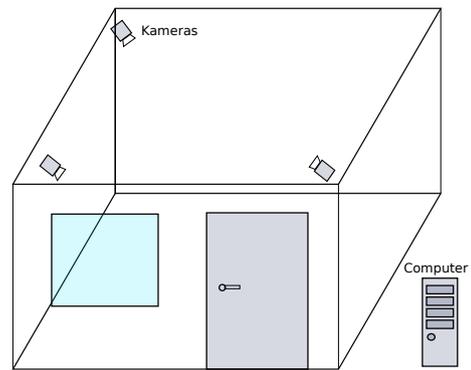


Abbildung 2.2: Intelligentes Haus mit Kameras

2.0.5 Roboter

“Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wege bzw. Winkeln frei programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.”²

Roboter können für Menschen Arbeiten erledigen, die für sie zu gefährlich sind oder sich damit viel schneller erledigen lassen. Unterstützend lassen sich Roboter einsetzen, wenn mehr Kraft erforderlich ist oder es sich um immer gleichartige Tätigkeiten handelt. Ein Beispiel hierfür sind Fertigungsroboter.^{3 4}

Fertigungsroboter

In der Automobilherstellung werden verstärkt Roboter eingesetzt. Diese übernehmen Arbeiten wie z.B. Schweißarbeiten an der Karosserie.

2.0.6 Laser

Der vom Laser erzeugte Lichtstrahl ist sehr geradlinig und kann gut gebündelt werden. Dadurch bietet er Möglichkeiten, die mit anderen Techniken nicht zu erreichen sind. Dies verdeutlichen die folgenden Beispiele.⁵

²Zitat nach VDI Stark (2009)

³Quelle: Stark (2009)

⁴Quelle: Ahlers (1991)

⁵Quelle: Eichler und Eichler (2010)

Optische Compact-Disc

Auf CDs (Abbildung: 2.3) werden digitale Informationen in Erhebungen unterschiedlicher Länge gespeichert. Der Laser kann berührungslos die Oberfläche abtasten und die Reflexionen messen, die sich an den Erhebungen verändern.

Entfernungsmessung

Mittels eines sehr kurzen Impulses eines Lasers kann man die Entfernung zwischen Mond und Erde bestimmen (Abbildung: 2.4). Dabei wird der Laserstrahl auf den Mond geschossen und von dort durch einen Reflektor zurückgeworfen, um seine Laufzeit zu messen.

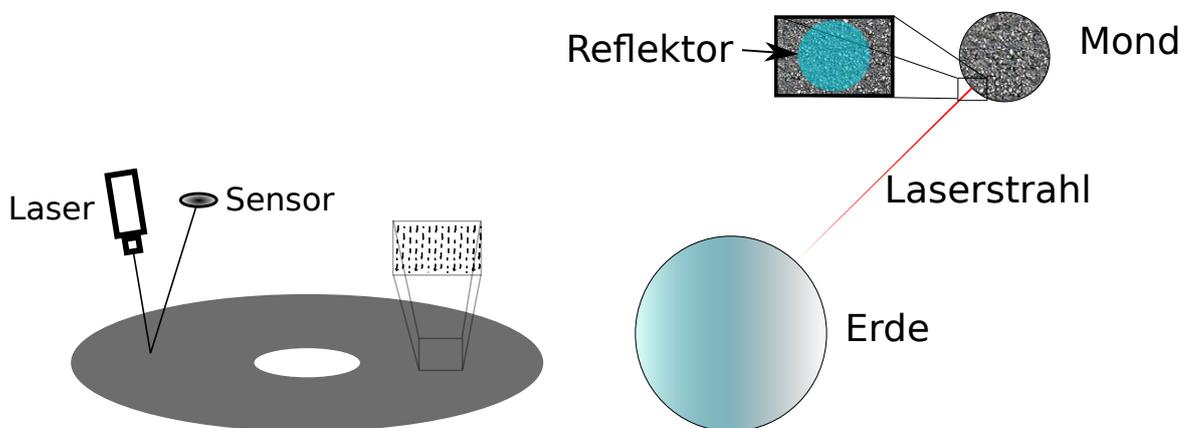


Abbildung 2.3: Optische Compact-Disc

Abbildung 2.4: Entfernungsmessung zwischen Erde und Mond

2.0.7 Zusammenführung der Techniken

In vielen Anwendungsgebieten werden die obigen Techniken beliebig kombiniert. Beispiele hierfür sind die Kleberauppeninspektion und die Vermessung von Tunnelwänden.

Kleberauppeninspektion

Eine Kombination aus Kamera und Laser verwenden Firmen für die Kleberauppeninspektion, um die Fehlerfreiheit von langen Klebungen zu prüfen. Bei der Kleberauppeninspektion (Abbildung:

2.5 ⁶⁾ wird das Lichtschnittverfahren eingesetzt. Hier werden Form- und Lagekontrolle der Kleberaupe auf dem Trägerteil kontrolliert, welches unter dem Messsystem durchgeführt wird. ⁷⁾

Vermessung von Tunnelwänden

Bei der Vermessung von Tunnelwänden wird ein Lasermesssystem (Abbildung: 2.6 ⁸⁾) verwendet. Um den ganzen Tunnel inspizieren zu können, ist dieses auf einem fahrbaren Roboterschlitten montiert. Beim Lasermesssystem werden zwei unterschiedliche Verfahren verwendet. Bei dem einen Verfahren wird die Entfernung mit Hilfe der Laserlaufzeit gemessen. Das andere Verfahren basiert auf der Lasertriangulation. ⁹⁾

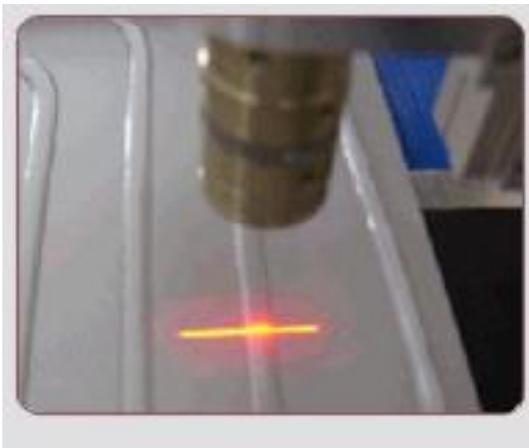


Abbildung 2.5: Kleberaupeninspektion



Abbildung 2.6: Vermessung von Tunnelwänden

⁶⁾Quelle: <http://www.automationstechnology.de/cms/uploads/pics/kleberaupe1.jpg> zuletzt aufgerufen: 03.05.2012

⁷⁾Quelle: <http://www.automationstechnology.de/cms/3d-bildverarbeitung/3d-technologie/das-lichtschnittverfahren.html> zuletzt aufgerufen: 03.05.2012

⁸⁾Quelle: http://www.zf-laser.com/profiler_principle_s.jpg zuletzt aufgerufen: 03.05.2012

⁹⁾Quelle: http://www.zf-laser.com/d_profilgebende.html zuletzt aufgerufen: 03.05.2012

3 Konzeptionierung

In den nachfolgenden Kapiteln soll die Konzeptionierung des zu verwendenden Sensors erläutert werden. Dazu wird ein Lastenheft erstellt, welches nach der Vorlage aus dem Buch "Lehrbuch der Softwaretechnik" [Balzert u. a. \(2009\)](#) aufgebaut ist. Die geforderten Eigenschaften des Sensors werden gewichtet. Nach einer Auflistung der Realisierungsmöglichkeiten werden diese verglichen und eine Möglichkeit ausgewählt.

3.1 Lastenheft

Der zu verwendende Sensor soll es ermöglichen, Objekte abzutasten und die Daten an einen PC zu übertragen. Der PC soll aus den Informationen ein 3D-Modell erzeugen können. Es soll möglich sein, das 3D-Modell mit einer Oberflächentextur zu modellieren.

Der Sensor soll so auf dem Roboterarm montiert und betrieben werden können, dass er den verwendeten Roboterarm nicht in seinem Arbeitsumfeld beeinträchtigt.

Der gesamte Aufbau soll im Robot Vision Labor der HAW Hamburg verwendet werden. Der Roboterarm ist frei auf dem Arbeitstisch zu betreiben. Die Räumlichkeiten können nicht verdunkelt werden.

Der gesamte Aufbau soll auch nach hoher Anzahl von Wiederholungen reproduzierbare Ergebnisse liefern. Es sollen auch Objekte ohne Merkmale zuverlässig erfasst werden können.

Aufgrund der Vorgaben konnte folgende Anforderungsliste erstellt werden.

- Bewegungsfreiheit darf durch den Sensor nicht eingeschränkt werden.
- Das Gewicht darf die Roboterarmgelenke nicht überlasten.
- Die Lichtverhältnisse können sich verändern.
- Die Genauigkeit sollte ausreichend sein, um auch kleine Objekte zuverlässig darzustellen.
- Es sollen normale Bildaufnahmen der Objekte möglich sein.
- Der Sensor muss die Messwerte so erfassen, dass der PC sie verarbeiten kann.

- Der Messbereich des Sensors muss zu dem Arbeitsbereich des Roboterarms passen.
- Die Kosten sollten den Rahmen der von der HAW Hamburg finanzierten üblichen Aufwendung für eine Bachelor-Arbeit nicht übersteigen.
- Erkennung von Objekten ohne besondere Merkmale.
- Für die Montage eines Sensors müssen Halterungen gefertigt werden.

In der folgende Tabelle 3.1 wurden die Anforderungen aus der Anforderungsliste gewichtet¹ und sortiert.

Eigenschaft	Gewichtung
Objekte ohne Merkmale	+++++
Bewegungsfreiheit	++++
Gewicht	++++
Messbereich	+++
Normale Bildaufnahmen	+++
Lichtverhältnisse	+++
Genauigkeit	++
Kosten	+
Aufwand Halterung	+
Messwerterfassung	+

Tabelle 3.1: Gewichtete Anforderungen

3.2 Realisierungsmöglichkeiten

In diesem Abschnitt sollen vier Realisierungsmöglichkeiten für einen Sensor vorgestellt werden.

Als Erste Realisierungsmöglichkeit soll das Produkt Kinect von der Firma Microsoft vorgestellt werden (Abbildung: 3.1²). Das Gerät beinhaltet eine Farbkamera, die Bilder mit einer Auflösung von 640x480 Pixeln liefert. Die Entfernungsmessung wird mit Hilfe eines Infrarotlasers und einer zusätzlichen Infrarotkamera realisiert. Der Laser projiziert ein Muster aus einzelnen Punkten. Über Stereo-Triangulation kann die Tiefeninformation errechnet werden. Da die Kinect für den

¹wichtig = +++++ bis unwichtig = +

²Quelle: <http://i.msdn.microsoft.com/dynimg/IC534687.png> zuletzt aufgerufen 04.05.2012

Heimbereich entwickelt worden ist, ist sie relativ unempfindlich gegenüber wechselnden Lichtverhältnissen. Mit jeder Aufnahme wird gleichzeitig ein Farbbild und die Tiefeninformation des gesamten Bildes geliefert. Die Messwerte der Tiefeninformationen sind mit größerem Rauschen behaftet. Der Messbereich, in dem verwertbare Informationen gesammelt werden können, liegt bei 1,2 m bis 3,5 m. Das Gewicht der Kinect liegt bei 560 g, die Abmessungen ³ bei 8,5 cm x 28,3 cm x 7 cm. Für die Montage auf dem Roboterarm müsste eine Adapterplatte gefertigt werden. Die Anbindung an den PC erfolgt über USB. Für die Messwernerfassung kann die Software openkinect verwendet werden ⁴. Die Software kann frei verwendet werden und stellt alle benötigten Treiber und Schnittstellen zur Verfügung. Die Kosten für die Kinect liegen zur Zeit bei ca. 120 € ^{5 6}



Abbildung 3.1: Microsoft Kinect

Die zweite Lösung basiert auf Merkmalskorrespondenzen. Bei dem Verfahren werden zwei Aufnahmen aus verschiedenen Positionen gemacht. In beiden Bildern wird versucht, Merkmale wie Muster oder Kanten auf dem Objekt zu finden, die in beiden Bildern erkennbar sind. Wenn genügend Übereinstimmungen gefunden werden, kann die Lage im Raum bestimmt werden. Bei Objekten, die kaum Merkmale aufweisen, ist eine zuverlässige Erkennung unmöglich. Ein Beispiel wäre ein rundes Objekt ohne Muster. Da das Verfahren nur eine Kamera und ein passendes Objektiv benötigt, kann es sehr leicht und kompakt aufgebaut werden und mit einer einfachen Adapterplatte montiert werden. Der Messbereich ist abhängig von der verwendeten Hardware. Die Software muss sich an wechselnde Lichtverhältnisse anpassen. Für die Datenübertragung zum PC stehen die gängigen Schnittstellen wie Firewire oder USB zur Verfügung. Kameras und Objektive sind im Robot Vision Labor der HAW Hamburg vorhanden. Es fallen keine Zusatzkosten an.

³Quelle: <http://www.test.de/Spielekonsole-Xbox-360-Kinect-Voller-Koerpereinsatz-4179653-4179932/> zuletzt aufgerufen: 04.05.2012

⁴Quelle: <http://openkinect.org> zuletzt aufgerufen: 04.05.2012

⁵Quelle: <http://www.idealo.de> zuletzt aufgerufen: 04.05.2012

⁶Quelle: Hertzberg u. a. (2012)

7

Beim dritten Lösungsansatz wird ein Laserschnittsensor (Abbildung: 3.2 ⁸) verwendet. Die Sensoren arbeiten nach dem Triangulationsprinzip. Sie projizieren eine Laserlinie auf ein Objekt und nehmen mit einer Kamera die Laserlinie auf. Durch den Versatz der Laserlinie kann ein Höhenprofil errechnet werden. Diese Sensoren lassen sich als fertige Produkte erwerben, die an die gewünschte Anwendung speziell angepasst sind. Unterscheidungen gibt es im Messbereich, Genauigkeit, Geschwindigkeit und Spezialisierungen auf bestimmte Objektoberflächen. Durch die richtige Wahl der Sensors kann eine Genauigkeit im Mikrometer-Bereich realisiert werden. Die in die Sensoren verbauten Kameras sind auf die Erkennung der Laserlinie angepasst, und können keine normalen Bilder von dem Objekt aufnehmen. Die Sensoren können mittels einer einfachen Adapterplatte montiert werden. Da es die Sensoren in vielen unterschiedlichen Baugrößen und Gewichtsklassen gibt, können sie zweckgebunden erworben werden. Zur Messwerterfassung dienen proprietäre Software- und Hardwarelösungen. Kosten fallen für den Laserschnittsensor an. ⁹

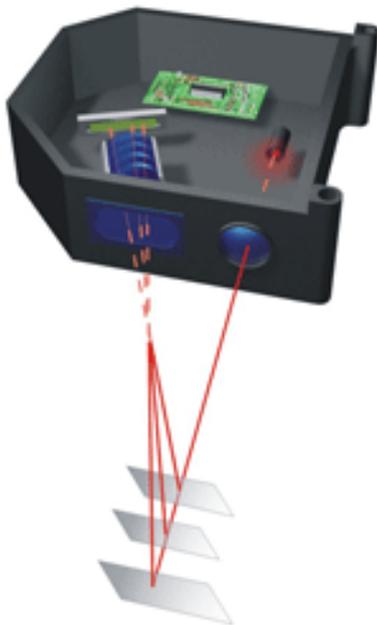


Abbildung 3.2: Laser-Triangulationssensor der Firma micro-epsilon. Auch mit Laserlinie erhältlich

⁷Quelle: Fries (2011)

⁸Quelle: <http://www.micro-epsilon.com/images/glossar/Laser-Triangulation.gif> zuletzt aufgerufen: 07.05.2012

⁹Quelle: Löffler-Mang (2012) Seite: 172 ff.

Als vierte Variante wird eine Lösung in Betracht gezogen, die auf dem Funktionsprinzip der dritten Lösung aufbaut. Hierbei wird jedoch anstatt eines fertigen Sensors der Aufbau aus einzelnen Komponenten zusammengestellt. Es wird ein leichter Laser benötigt, der die Laserlinie projiziert und eine Kamera, die diese Laserlinie aufnehmen kann (Abbildung: 3.3). Im Unterschied zu der vorherigen Lösung kann die Kamera auch für normale Aufnahmen des Objektes verwendet werden, wenn der Laser abgeschaltet ist. Für den Laser ist eine zusätzliche Halterung zu montieren, die den Roboterarm nicht in seiner Bewegungsfreiheit einschränkt. Hierbei entfallen die Kosten für den Laserschnittsensor, dafür entstehen Kosten für Kamera und Halterung.

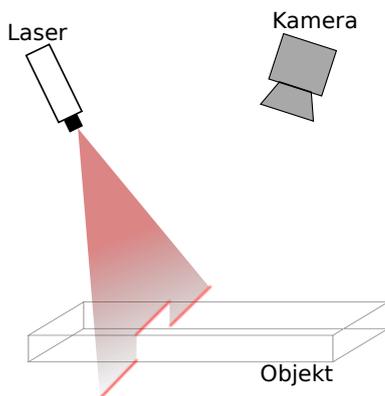


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung vom Laserschnittverfahren

3.2.1 Auswahl der Realisierungsmöglichkeit

Um aufgrund der geforderten Eigenschaften die beste Lösung auszuwählen, wurde ein Morphologischer Kasten 3.2 erstellt. In diesem werden die geforderten Eigenschaften und Realisierungsfähigkeit¹⁰ der Eigenschaften der Sensoren zur besseren Veranschaulichung dargestellt.

¹⁰ + = einfach, ● = mittel, - = nicht oder schwer zu realisieren

3 Konzeptionierung

Eigenschaft	Kinect	Merkmalsk.	Laserschnitt	Var. Laserschnitt
Objekte ohne Merkmale	+	-	+	+
Bewegungsfreiheit	-	+	+	+
Gewicht	-	+	+	+
Messbereich	-	+	+	+
Normale Bildaufnahmen	+	+	-	+
Lichtverhältnisse	+	+	+	+
Genauigkeit	●	+	+	+
Kosten	+	+	●	●
Aufwand Halterung	+	+	+	●
Messwerterfassung	+	●	+	●

Tabelle 3.2: Morphologischer Kasten

Die Kinect lässt sich aufgrund ihrer Größe und ihres Gewichtes nicht mit dem Roboterarm betreiben, da sie ihn zu sehr in der Bewegung einschränkt. Die zweite Realisierungsmöglichkeit mit den Merkmalskorrespondenzen ist für Objekte ohne Merkmale nicht zuverlässig einsetzbar. Bei der dritten Lösung können wegen der fehlenden Kamera keine normalen Bildaufnahmen erzeugt werden. Eine zusätzliche Kamera würde das Gewicht zu stark erhöhen. Die vierte Lösung, die Variante des Laserschnittverfahrens, ist die hier ermittelte beste Lösung, da sie alle wichtigen Eigenschaften erfüllt.

4 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der verwendeten Sensorik, Optik und Bildverarbeitung erörtert. In den späteren Kapiteln wird auf diese Grundlagen zurückgegriffen.

4.1 Sensorik

Es gibt zwei gängige Sensoren bei der digitalen Bildaufnahme, die CCD- und CMOS-Sensoren. Beide machen sich den photoelektrischen Effekt¹ zunutze, um einen Teil der elektromagnetischen Strahlung des Lichts zu detektieren.

4.1.1 CCD

Bei einem CCD-Sensor werden die elektrischen Ladungen jedes Pixels, die durch die Strahlung erzeugt werden, zeilenweise aus dem Sensor ausgelesen und gemessen. Der Abtransport der Ladungen wird über Transportbereiche realisiert.

Besonderheiten

Bei den CCD-Sensoren können bei sehr hoher Lichtintensität die beiden folgenden störenden Effekte auftreten. Beim Blooming (Abbildung: 4.1) werden einige Pixel zu stark belichtet und die Ladungen greifen auf die Nachbarpixel über. Dieser beim Auslesen des Sensors als weiße Fläche zu erkennende Effekt kann aber technisch verringert werden, indem die überschüssige Ladung vor dem Überlaufen abgefangen wird.

Wenn ein Teil des Sensors zu stark belichtet wird, kann es zum Effekt des Smears (Abbildung: 4.2) kommen. Beim Auslesen des Sensors werden die Transportbereiche mit belichtet. Diese Bereiche sind Bahnen zum Abtransport der Ladungen. Transportbereiche können nicht komplett gegen Licht geschützt werden. Dadurch entsteht ein gerader weißer Strich im Bild.

¹weitere Informationen zum photoelektrischen Effekt [Camejo \(2006\)](#)

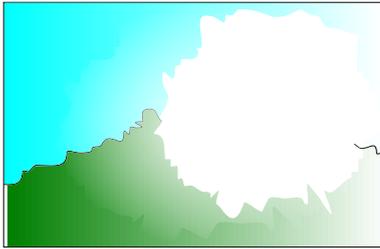


Abbildung 4.1: Blooming

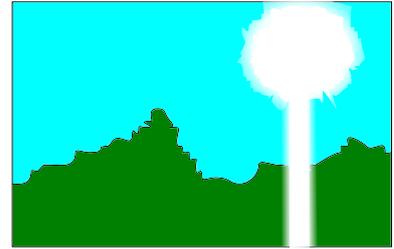


Abbildung 4.2: Smear

4.1.2 CMOS

Bei CMOS-Sensoren werden die Ladungen direkt in dem jeweiligen Pixel gemessen und können vorverarbeitet werden. Integrierte Schaltungen sind in der Lage eine Vorverarbeitung vorzunehmen. Durch die direkte Adressierung der Pixel lassen sich auch nur bestimmte Bereiche des Sensors auslesen. CMOS-Sensoren haben einen Großteil der Funktionen schon im Sensor integriert, dadurch sind die Kameras von den Abmessungen kleiner und das Gewicht ist geringer.

Besonderheiten

Effekte wie Smear (Abbildung: 4.2) und Blooming (Abbildung: 4.1) werden verhindert, da die einzelnen Pixel direkt die Auswertungen vornehmen.

Bei CMOS-Sensoren gibt es zwei unterschiedliche Arten die Shutter-Funktion zu realisieren, um die Belichtungszeit des Pixels zu regulieren. Beim sogenannten Rolling Shutter werden die Pixel zeilenweise nacheinander ausgelesen und danach für eine erneute Messung zurückgesetzt. Die Messdauer ist bei jedem Pixel identisch, aber der Belichtungszeitpunkt nicht. Deshalb werden bewegte Objekte verzerrt dargestellt. Mit der Erweiterung der Schaltung in jedem Pixel lassen sich Global Shutter realisieren. Alle Pixel beginnen ihre Messung zum gleichen Zeitpunkt, nur das Auslesen wird Pixel für Pixel durchgeführt.

Da jeder Pixel bei dem CMOS-Sensor seine eigene Schaltung für die Auswertung besitzt und diese nur in einem gewissen Toleranzbereich hergestellt werden können, ist mit einem höheren Bildrauschen zu rechnen.²

²Quelle: Azad u. a. (2009) Seite 43 ff.

4.2 Optik

4.2.1 Brennweite

Die Brennweite f ist der Parameter, der bestimmt, wie der Gegenstand abgebildet wird (Abbildung: 4.3). Aus der Gegenstandsgröße G , dem Arbeitsabstand g , Bildweite b und der Größe des Sensors S berechnet sich mit der Formel 4.1 die einzusetzende Brennweite. Der Arbeitsabstand beschreibt die Entfernung zwischen Objekt und Objektiv. Die Distanz zwischen Sensor und Objektiv nennt sich Bildweite. ^{3 4}

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b} = \frac{f}{b-f} \quad (4.1)$$

Mit Hilfe des Strahlensatzes lässt sich die Formel 4.2 aufstellen und nach der Brennweite f umstellen 4.3:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \quad (4.2) \quad f = \frac{g \cdot S}{G + S} \quad (4.3)$$

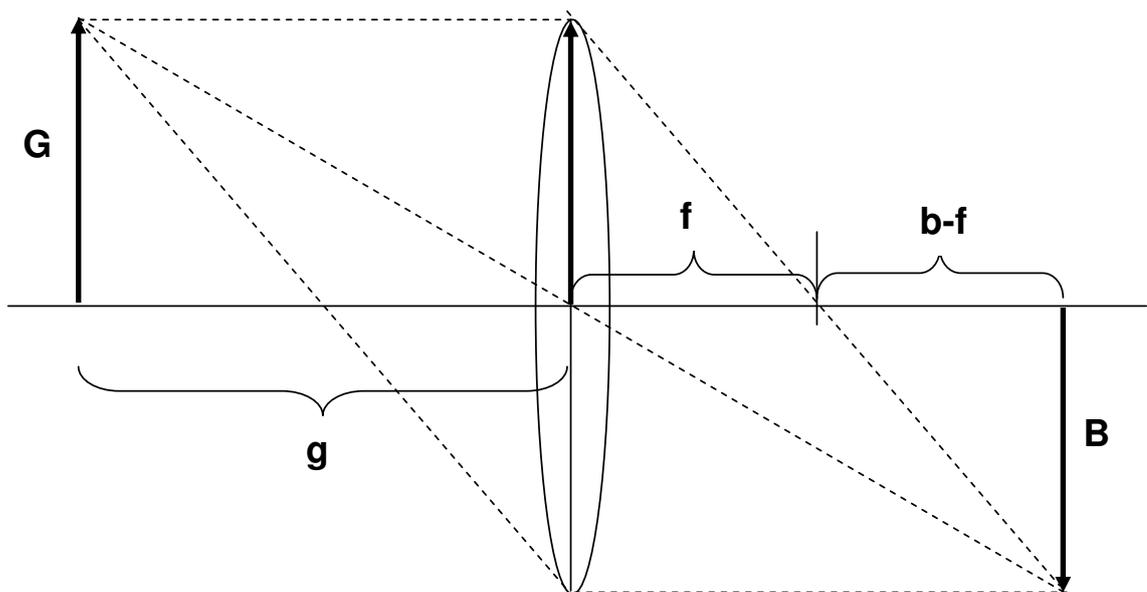


Abbildung 4.3: Linsengleichung

³Quelle: http://www.theimagingsource.com/downloads/choosinglenswp.de_DE.pdf zuletzt aufgerufen: 03.05.2012

⁴Quelle: Azad u. a. (2009) Seite 31 ff.

4.2.2 Schärfentiefe

Mit einem Objektiv lässt sich jeweils nur eine Ebene scharf abbilden. Bei räumlichen Aufnahmen werden Objektpunkte der anderen Ebenen als sogenannte Zerstreuungskreise abgebildet. Eine Unschärfe entsteht, wenn diese Zerstreuungskreise größer werden als die Größe des jeweiligen Pixels.

4.2.3 Blende

Die Blende regelt die Lichtmenge und Schärfentiefe. Die Blendenzahl k eines Objektivs errechnet sich aus der Brennweite f und dem Durchmesser der Öffnung d_o .

$$k = \frac{f}{d_o} \quad (4.4)$$

4.2.4 Fokus

Der Fokus dient dem Scharfstellen eines Objektes. Durch den Fokus wird die Bildweite verändert. Bei sehr weit entfernten Objekten nähern sich Brennweite und Bildweite an.

4.3 Kameramodell

Wie aus Abbildung 4.4 zu erkennen ist, werden alle Punkte der Objektebene durch das Projektionszentrum P auf die Bildebene abgebildet. Die Koordinaten x_{Bild} und y_{Bild} beschreiben einen Punkt in der Bildebene und x_{Objekt} , y_{Objekt} und z_{Objekt} in der Objektebene. Die Kamerakonstante c gibt den Abstand von dem Projektionszentrum zur Bildebene wieder. Die optische Achse ist die Gerade, die vom Projektionszentrum orthogonal durch die Bildebene verläuft.

4.4 Koordinatensysteme

4.4.1 Bildkoordinatensystem

Das Bildkoordinatensystem (Abbildung: 4.5) ist ein zweidimensionales Koordinatensystem für das erzeugte Bild mit dem Ursprung links oben.

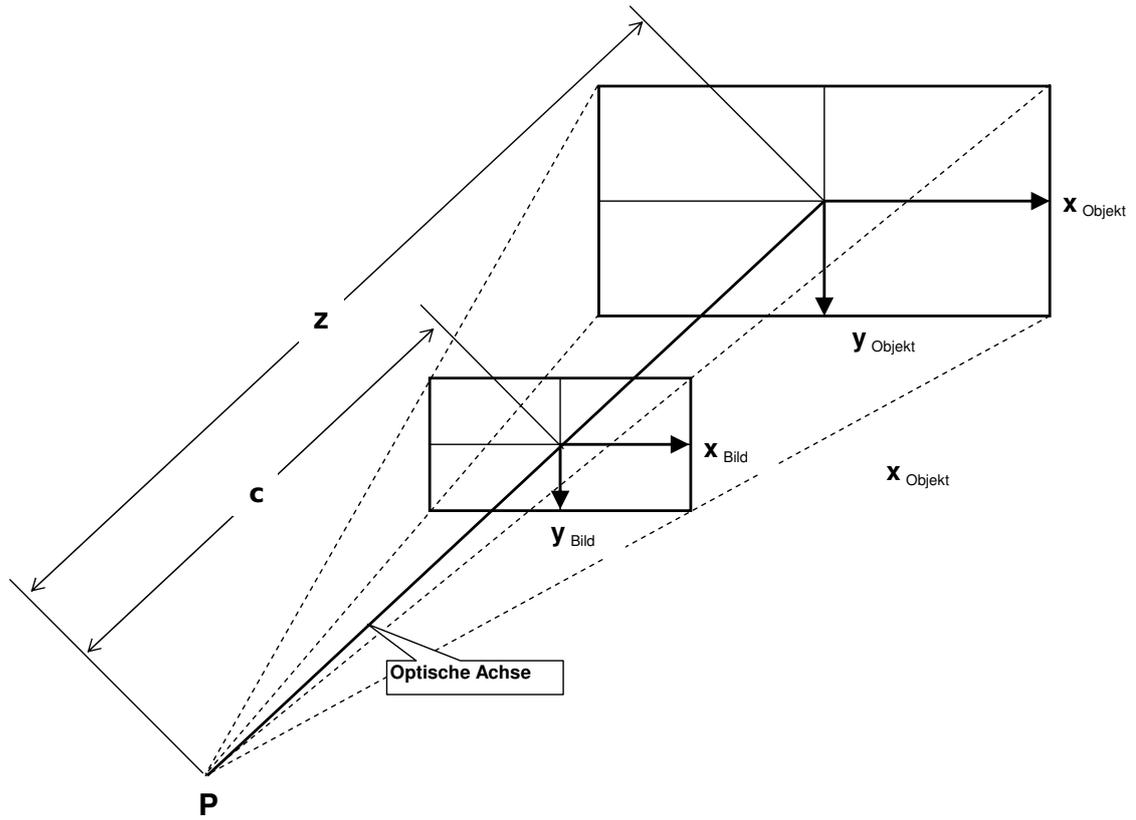


Abbildung 4.4: Kameramodell

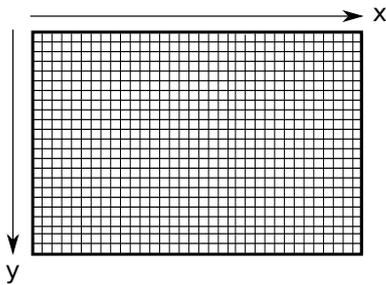


Abbildung 4.5: Bildkoordinatensystem

4.4.2 Kamerakoordinatensystem

Das Kamerakoordinatensystem (Abbildung: 4.6) ist ein dreidimensionales Koordinatensystem mit orthogonalen Achsen. Seinen Ursprung hat das Koordinatensystem im Projektionszentrum. Die x- und y-Achsen laufen parallel zu denen des Bildkoordinatensystems. Die z-Achse zeigt in Richtung des Objektes.

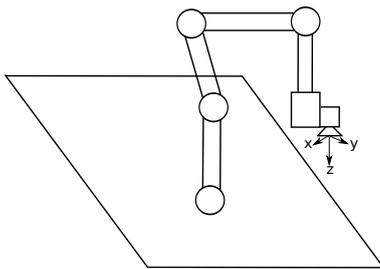


Abbildung 4.6: Kameramodell

4.4.3 Weltkoordinatensystem

Das Weltkoordinatensystem (Abbildung: 4.7) beschreibt ein dreidimensionales Koordinatensystem mit orthogonalen Achsen. Sein Ursprung kann beliebig im Raum liegen und dient gleichzeitig als Basiskoordinatensystem. In der Abbildung 4.7 ist der Ursprung des Koordinatensystems im Fuß des Roboters. In gleicher Weise ist die z-Achse auch die Achse des ersten Gelenks.

4.4.4 Endeffektorkoordinatensystem

Der Endeffektor ist der äußerste Punkt am Arm ohne Greifer. Am Endeffektor des Roboterarms befindet sich das Endeffektorkoordinatensystem (Abbildung: 4.8). Die z-Achse verläuft gerade

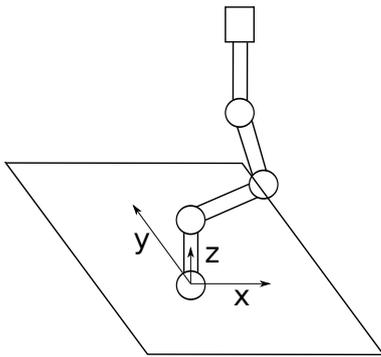


Abbildung 4.7: Weltkoordinatensystem

von dem Roboterarm weg. Die x- und y-Achse jeweils seitlich. In der Abbildung 4.8 sind der Endeffektor und sein Koordinatensystem abgebildet.

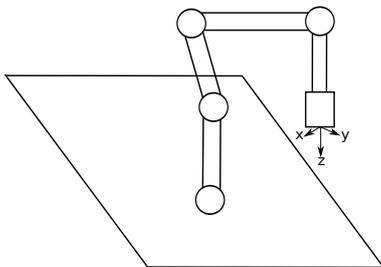


Abbildung 4.8: Endeffektorkoordinatensystem

4.5 Homogene Koordinaten

Rotationen im dreidimensionalen Raum lassen sich durch eine 3 x 3 Matrix beschreiben, eine Translation nicht. Um Rotation und Translation in einer Matrix darzustellen, wird die Matrix um eine Dimension erweitert. In der Formel 4.5 ist der Rotationsteil mit R und der Translationsteil mit T dargestellt.⁵

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

⁵Quelle: Hartmann (2006)

4.6 PWM

Die Pulsweitenmodulation moduliert ein Signal (Abbildung: 4.9), welches zwischen den Spannungen U_{low} und U_{high} wechselt. Hierbei wird in der Regel mit einer festen Frequenz T_r gearbeitet und die Modulation erfolgt mit Hilfe der Dauer der Ein- und Ausschaltzeiten. Der Mittelwert der Spannung lässt sich damit anpassen. Mit der Formel 4.6 lässt sich der Mittelwert berechnen.⁶

$$U_{Mittelwert} = U_{low} + \frac{t_{high}}{T_r} * (U_{high} - U_{low}) \quad (4.6)$$

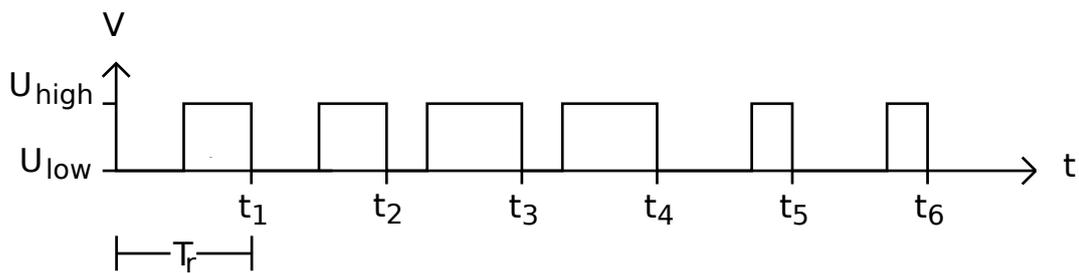


Abbildung 4.9: PWM

⁶Quelle: <http://tserver02.cpt.haw-hamburg.de/~heitmann/ce.php?page=scripts&action=file&file=ce-06-1.pdf> zuletzt aufgerufen: 28.04.2012

5 Technischer Aufbau

In diesem Kapitel wird der technische Aufbau beschrieben. Alle Hilfsmittel, die für das Erstellen dieser Arbeit notwendig sind, werden hier behandelt.

5.1 Kamera

Die zu verwendende Kamera (Abbildung: 5.1 ¹) ist das Modell DMK 72AUC02 der Firma The Imaging Source und hat eine Auflösung von 2592 x 1944 Pixel. Die Kamera wurde ausgewählt, da sie eine sehr hohe Auflösung liefert und der CMOS Sensor gegen Smear und Blooming unempfindlich ist. Der CMOS Sensor MT9P031 der Firma Micron hat eine Sensorfläche von 1/2.5 inch. Es können zwei weitere Auflösungen angeboten werden, die die ganze Sensorfläche nutzen und 2x2 oder 4x4 Pixel zu einem zusammenschalten. Dieses Verfahren wird binning ² genannt und intern in der Kamera realisiert. Diese kleineren Bilder lassen sich schneller verarbeiten, ohne dass eine zusätzliche Kalibrierung nötig ist. Die Kamera und der Kamerasockel wiegen 61 g. Der Preis der Kamera beträgt zum Zeitpunkt dieser Arbeit 299,00 €.³

Für die Montage auf dem Roboterarm wurde eine biegesteife Adapterplatte (Abbildung: 5.3) aus Aluminium angefertigt. Ihr Gewicht beläuft sich incl. Schrauben auf 21 g.

5.2 Objektiv

Das verwendete Objektiv (Abbildung: 5.2 ⁴) ist das Model H0514-MP2 von der Firma computar. Die Brennweite beträgt 5mm und die Blende 1.4. Es wiegt incl. des Adapters 118 g. Dieses Objektiv ist im Inventar des Robot Vision Labor der HAW Hamburg vorhanden.⁵

¹Quelle: <http://s2.www.theimagingsource.com/img/pph/xl/dmk72auc02.png> zuletzt aufgerufen: 07.05.2012

²für matlab steht der separate Treiber TISimaq in der Version 1.0.0.26 zur Verfügung. Der Treiber ist nicht öffentlich verfügbar, wurde aber auf Anfrage zur Verfügung gestellt

³Quelle: http://www.theimagingsource.com/en_US/products/cameras/usb-cmos-mono/dmk72auc02/ zuletzt aufgerufen: 07.05.2012

⁴Quelle: <http://computarganz.com/images/products/original/551/H0514-MP.png> zuletzt aufgerufen: 07.05.2012

⁵Quelle: http://computarganz.com/product_view.cfm?product_id=551 zuletzt aufgerufen: 07.05.2012



Abbildung 5.1: Kamera DMK
72AUC02



Abbildung 5.2: Objektiv
H0514-MP2

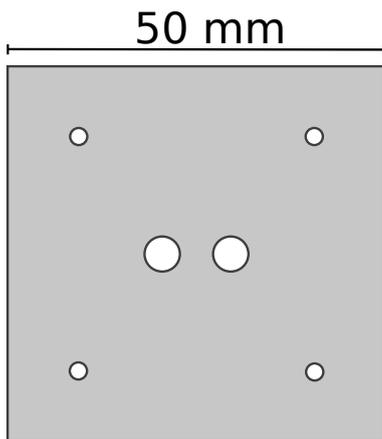


Abbildung 5.3: Adapterplatte für Kamera

5.3 Laser

Für die Erzeugung des Laserstrahls wird ein Laserdiodenmodul (Abbildung: 5.4), mit einem Gewicht von 4 g verwendet. Die Leistung ist mit weniger als 4 mW angegeben. Die Wellenlänge beträgt 650 nm (rot). Die Fokussierung des Laserstrahls lässt sich mit Hilfe eines Gewindes am Kupfergehäuse justieren. Die Abmessung des Moduls beträgt 13 mm x 8,05 mm.⁶

⁶Quelle: Datenblatt siehe CD

Da der verwendete Laser nur einen Punkt erzeugt, wird eine Linse (Abbildung: 5.5) vor dem Laser angebracht, um eine Laserlinie mit 90° Ausgangswinkel zu erzeugen. Bei der Linse handelt es sich um eine Rasterlinse, die den Strahl mit mehreren Prismen formt. Die Linse wird von der Firma Picotronic GmbH in Koblenz hergestellt und unter dem Namen Line Lens 90° vertrieben.^{7 8}



Abbildung 5.4: Laserdiodenmodul



Abbildung 5.5: Laserlinien
Linse

5.4 Laserhalterung

Die Laserhalterung (Abbildung: 5.6) ist 20 g schwer und wurde aus einem 2 mm dicken Aluminiumblech gefräst. Sie ist sehr starr und gegenüber Schwingungen unempfindlich. Das Lasermodul und die Optik sind in einer Kunststoffhalterung (14 g) eingeklebt. Diese Halterung ermöglicht es, dass sich der Abstand zwischen Roboterarm und Laser und der Winkel in dem der Laser auf die Objekte strahlen soll, verändern lässt. Die Halterung wurde nach einer Zeichnung in der Werkstatt der HAW Hamburg gefertigt.

5.5 Laseransteuerung Hardware

Zur Ansteuerung des Lasermoduls wird zum Testaufbau das Atmel Evaluations-Board (Abbildung: 5.8) in der Version 2.0.1 benutzt. Dieses wurde von der Firma Pollin Electronic GmbH in Pförring entwickelt und vertrieben. Der eingesetzte Mikrocontroller ist ein ATmega32 von der

⁷Quelle: <https://secure.picotronic.de/laserfuchs/media/products/datasheets/LFL-LENS90.pdf> zuletzt aufgerufen: 07.05.2012

⁸weitere Information gingen auf Anfrage per E-Mail ein (siehe CD)

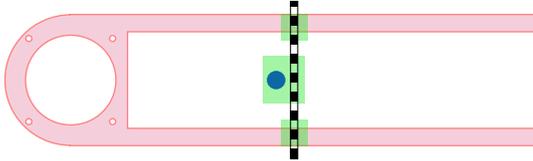


Abbildung 5.6: Laserhalterung als Zeichnung

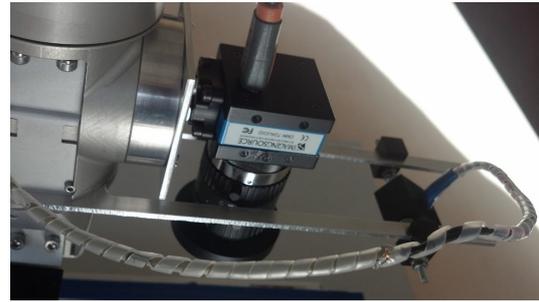


Abbildung 5.7: Montierte Laserhalterung

Firma Atmel und wird mit einem 8 MHz Quarz getaktet. Die Programmierung des Mikrocontrollers erfolgt über eine RS-232 Schnittstelle. Für die Kommunikation zwischen dem Atmel und dem Computer kann auch ein RS-232-zu-USB-Wandler benutzt werden.^{9 10}

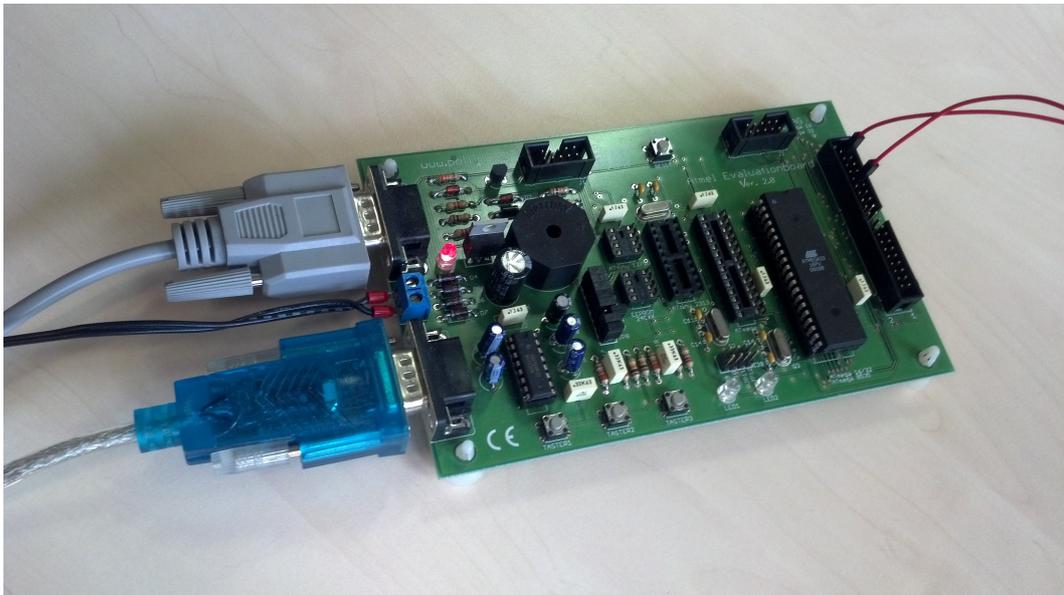


Abbildung 5.8: Atmel Evaluations-Board

⁹Quelle: <http://www.pollin.de/shop/downloads/D810074B.PDF> zuletzt aufgerufen 08.05.2012

¹⁰Quelle: <http://www.atmel.com/Images/doc2503.pdf> zuletzt aufgerufen 08.05.2012

5.6 Roboterarm

Bei dem verwendeten Roboterarm (Abbildung: 5.9 ¹¹) handelt es sich um ein Modell mit sechs Freiheitsgraden von der Firma Neuronics. Die genaue Modellbezeichnung ist Katana-Greifarm 450 - 6M180 und beinhaltet einen geraden Greifer. Der Greifer lässt sich demontieren und durch andere Greifvorrichtungen austauschen. Alle sechs Gelenke (Abbildung: 5.10 ¹²) sind mit Harmonic Drive-Getrieben ausgerüstet. Dies ermöglicht spielfreie Bewegungen und eine Wiederholgenauigkeit bis zu 0.1 mm. Die Winkelangaben zu den einzelnen Gelenken ¹³ können aus der folgenden Tabelle 5.1 entnommen werden. Der Operationsradius ohne Greifer wird mit 517 mm angegeben. Der Roboterarm wiegt 4,8 kg. Die Tragkraft am Greifer wird vom Hersteller mit maximal 400 g angegeben. Dies ist der Grund, weshalb keine bestehenden Lösungen, wie z.B. die Kinect eingesetzt werden können. Der hier verwendete Aufbau mit der Kamera, dem Objektiv, der Adapterplatte, der Laserhalterung und dem Laser wiegt 238 g.

Gelenk	Winkel
1	+/- 169,5°
2	+ 102° / -30°
3	+/- 122,5°
4	+/-112°
5	+/- 168°

Tabelle 5.1: Winkelangaben vom Katana

Die Ansteuerung des Roboterarms läuft über eine externe Controlbox, die ebenfalls von Neuronics vertrieben wird. Zur Kommunikation mit dem Computer stehen USB und LAN zur Verfügung. Durch einen Defekt im dritten Gelenks des Roboterarms, lässt sich die genaue Position des Gelenks nicht mehr zuverlässig bestimmen. Das Gelenk hat zudem in seiner Bewegung einige Grad Spiel. ¹⁴

¹¹Quelle: Neuronics AG (2008) Seite: 7

¹²Quelle: Neuronics AG (2008) Seite: 36

¹³Gelenke werden von dem Sockel aus durchnummeriert

¹⁴Quelle: Neuronics AG (2008)



Abbildung 5.9: Bild vom Katana Roboterarm

5.7 Computer

Der verwendete Computer gehört zur Grundausstattung des Arbeitsplatzes im Robot Vision Labor der HAW Hamburg. Die verwendete Software entspricht den gängigen Softwarelösungen.

5.7.1 Hardware

- HP Compaq Elite 8100 CMT ¹⁵
- Processor: Intel Core i5 750 Clock Speed: 2,66 GHz
- 4 GB Arbeitsspeicher
- Grafikkarte: ATI Radeon Graphics Processor 4650 mit 1 GB Arbeitsspeicher ¹⁶

¹⁵Quelle: http://h10010.www1.hp.com/wwpc/pscmisc/vac/us/product_pdfs/HP_Compaq_8100_Elite_Business_PC_Data_Sheet_FINALv2.pdf zuletzt aufgerufen 07.05.2012

¹⁶Quelle: <http://www.amd.com/us/products/desktop/graphics/ati-radeon-hd-4000/hd-4600/Pages/ati-radeon-hd-4600-specifications.aspx> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

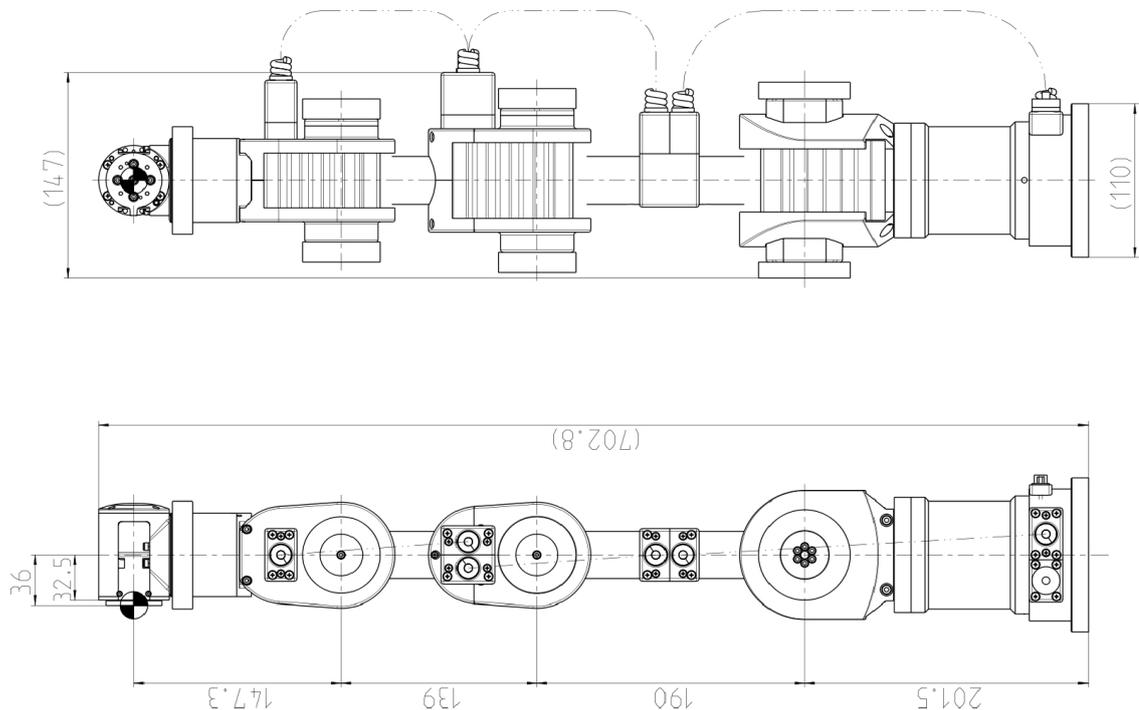


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung vom Katana Roboterarm

5.7.2 Software

Für die Programmierung des Microcontrollers wurde folgende Software verwendet:

- Xubuntu Version: 11.04 ¹⁷
- Eclipse Version: 3.5.1 ¹⁸
- AVR Eclipse Plugin Version: 2.3.1.20081204P ¹⁹
- AVR Dude Version: 5.10-3 ²⁰

Die folgende Software wird für die Entwicklung und Ansteuerung des Roboters verwendet:

- Microsoft Windows 7 Enterprise (64-bit) Service Pack 1 ²¹
- MATLAB R2010b Version 7.11.0.584 (32-bit) ²²

¹⁷Quelle: <https://wiki.ubuntu.com/NattyNarwhal/TechnicalOverview> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

¹⁸Quelle: <http://www.eclipse.org/downloads/> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

¹⁹Quelle: http://avr-eclipse.sourceforge.net/wiki/index.php/The_AVR_Eclipse_Plugin zuletzt aufgerufen 07.05.2012

²⁰Quelle: <http://savannah.nongnu.org/projects/avrdude> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

²¹Quelle: <http://windows.microsoft.com/de-DE/windows7/products/features> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

²²Quelle: <http://www.mathworks.de/products/matlab/> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

- MATLAB Image Processing Toolbox Version 7.1 ²³
- Robotics Toolbox for MATLAB Version 8 ²⁴
- Camera Calibration Toolbox for Matlab Version 27-July-2010 ²⁵
- Katana Native Interface Version 4.0.0 ²⁶

Für die Erstellung der Dokumentation wurde folgende Software verwendet:

- \LaTeX Version: pdfTeX 3.1415926-1.40.10-2.2 (TeX Live 2009/Debian) ²⁷
- Texmaker 2.2.1 ²⁸
- Xubuntu 11.04 ²⁹
- inkscape Version: 0.48 ³⁰

²³Quelle: <http://www.mathworks.de/products/image/> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

²⁴Quelle: http://www.petercorke.com/Robotics_Toolbox.html zuletzt aufgerufen 07.05.2012

²⁵Quelle: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ zuletzt aufgerufen 07.05.2012

²⁶Quelle: Neuronics KNI 4.0.0 CD Version: 2008

²⁷Quelle: <http://www.tug.org/texlive/> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

²⁸Quelle: <http://www.xm1math.net/texmaker/download.html> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

²⁹Quelle: <https://wiki.ubuntu.com/NattyNarwhal/TechnicalOverview> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

³⁰Quelle: <http://inkscape.org/download/?lang=de> zuletzt aufgerufen 07.05.2012

6 Laser

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie der Laser vom PC aus angesteuert werden und in seiner Intensität geregelt werden kann. Des Weiteren werden Verfahren beschrieben, mit der die Laserlinie und ausgewertet werden kann.

6.1 Laseransteuerung Software

Die Ansteuerung des Lasers mit Hilfe des Evaluations-Board hat das Ziel, den Laser in seiner Helligkeit zu regeln, da das Lasermodul keine eigene Regelung besitzt, die vom Computer aus angesprochen werden kann. Deshalb ist es nur möglich, die Helligkeit über eine einstellbare Spannung zu steuern. Der Laser wird über den Ausgang für das PWM Signal ¹ an den Mikrocontroller angeschlossen. Der auf dem Board verbaute ATmega32 Mikrocontroller wird über die integrierte ISP Schnittstelle programmiert. Das Programm ist in der Programmiersprache C in der Entwicklungsumgebung Eclipse erstellt worden, mit Hilfe des Compiler avr-gcc übersetzt und mit AVRdude in den Mikrocontroller geladen worden. In dem Programm wurde die Komponente USART des Mikrocontrollers eingerichtet, damit das Board und der verbundene Computer über die RS-232 Schnittstelle Daten austauschen können. Die genaue Konfiguration kann dem Programmcode im Anhang und dem ATmega32 Handbuch ² entnommen werden.

Aus MATLAB heraus kann man über die Funktion serial eine Verbindung zum Mikrocontroller konfigurieren und mit dem Befehl fopen öffnen. Mit der Funktion fprintf können jetzt Werte gesendet werden. Im Programmablauf des Mikrocontrollers wird auf die Steuerbefehle reagiert.

Um die Spannung für die Helligkeit des Lasers anpassen zu können, muss der Wechsel zwischen dem Ein- und Ausschalten so schnell sein, dass durch induktive und kapazitive Merkmale des Lasermoduls ein Mittelwert entsteht. Da die Elektronik des Lasermoduls nicht dokumentiert ist, mussten die passenden Werte empirisch ermittelt werden. Dies erfolgte durch Aufnahmen von der verwendeten Kamera. Hier konnte gezeigt werden, dass bei einer zu langsamen Frequenz die Laserlinie nicht immer zu erkennen war. Ziel ist es, die Frequenz möglichst niedrig zu halten, um

¹Der Ausgang die verwendete PWM befindet sich am 19. Pin, interne Bezeichnung OC1A

²Quelle: <http://www.atmel.com/Images/doc2503.pdf> zuletzt aufgerufen 08.05.2012

Störungen im Lasermodul zu vermeiden.

Die hier verwendete PWM wurde so eingestellt, dass die Periode immer 1000 Takte lang ist. Der ausgewählte Wert stellt die Dauer von Takten dar, die die volle Ausgangsspannung von 5 V liefert. Mit der Formel 4.6 lassen sich so alle Mittelwertspannungen errechnen. Zum Schutz des Lasermoduls werden keine Werte über 500 zugelassen, da dies einem Spannungsmittelwert von über 2,5 V entspricht und das Lasermodul beschädigen könnte.

6.2 Laserlinienerkennung

Die erzeugte Laserlinie lässt sich in den Aufnahmen als helle weiße Linie erkennen. Die Helligkeitswerte der Linie entsprechen in der Breite der Gauß- Normalverteilung. Dies macht eine subpixelgenaue Auswertung möglich.

Um die Laserlinie einfacher und robuster von den restlichen Bilddaten zu unterscheiden, werden jeweils zwei Bilder aus der gleichen Pose aufgenommen. Bei nur einem Bild ist der Laser eingeschaltet. Die Bilder werden danach von einander subtrahiert. Dadurch entsteht ein Bild, welches nur die Laserlinie darstellt und somit die Auswertung erleichtert.³

Da der Roboterarm nicht in einem abgedunkelten Raum verwendet werden kann, muss mit unterschiedlicher Helligkeit gerechnet werden. Aus diesem Grund wurde die Laseransteuerung so aufgebaut, dass die Intensität des Lasers gesteuert werden kann.

6.3 Verfahren zur Auswertung

Die Laserlinie wird im Bild jeweils in der y-Reihe ausgewertet (orthogonal zur Laserlinie). Die abgebildete Laserlinie setzt sich aus einer Reihe von Helligkeitswerten (Abbildung: 6.1) zusammen. Hier werden drei Verfahren vorgestellt, um aus der Reihe einen einzelnen Wert zu errechnen, der einfacher und genauer weiterverarbeitet werden kann.

6.3.1 Maximum

Es wird der höchste Helligkeitswert in der Reihe gesucht und seine Position wird weiterverarbeitet (Abbildung: 6.3)

³Quelle: (Eichler u. a. (2005))

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5339	0.5787	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4863	0.5081	0.5570	0.5721	0.5494	0.5353	0.5522	0	0	0	0
0.4941	0.5020	0.5198	0.5198	0.5137	0.5020	0.5141	0.5356	0.5466	0.5579	0.5721
0.5059	0.5098	0.5176	0.5216	0.5137	0.5020	0.5098	0.5059	0.5020	0.5020	0.5059
0.5059	0.5137	0.5216	0.5216	0.5059	0.5059	0.5137	0.5137	0.5137	0.5098	0.5098
0.5176	0.5098	0.5216	0.5216	0.5098	0.5137	0.5098	0.5137	0.5176	0.5176	0.5255
0.5137	0.5020	0.5137	0.5176	0.5137	0.5098	0.5059	0.5059	0.5020	0.5020	0.5137
0.5176	0.5059	0.5137	0.5137	0.5137	0.5059	0.5020	0.5059	0.4980	0.4941	0.5059
0.5137	0.5059	0.5137	0.5137	0.5137	0.5098	0.5098	0.5098	0.5098	0.5059	0.5098
0.5020	0.5098	0.5137	0.5216	0.5137	0.5059	0.5137	0.5137	0.5137	0.5059	0.5059
0.5098	0.5176	0.5137	0.5137	0.5098	0.5020	0.5059	0.5137	0.5098	0.5059	0.5020
0.5137	0.5137	0.5020	0.5020	0.5059	0.4941	0.4980	0.5098	0.5059	0.5020	0.5059
0.5098	0.5020	0.4980	0.5020	0.5020	0.4980	0.5020	0.5020	0.5020	0.5020	0.5020
0.5020	0.5020	0.5059	0.5098	0.5020	0.5059	0.5137	0.5020	0.4980	0.5059	0.5020
0.4980	0.5059	0.5098	0.5137	0.5176	0.5059	0.5020	0.5020	0.5059	0.5059	0.4980
0.4980	0.5059	0.5265	0.5560	0.5394	0.5118	0.5020	0.5020	0.5098	0.5059	0.5020
0.5060	0.5039	0.5494	0	0	0.5664	0.5224	0.5059	0.5059	0.5020	0.5137
0.5696	0.5532	0.5792	0	0	0	0.5359	0.5020	0.5059	0.5098	0.5098
0	0	0	0	0	0	0.5500	0.5020	0.4980	0.5137	0.5242
0	0	0	0	0	0	0.5481	0.5098	0.5098	0.5425	0
0	0	0	0	0	0	0.5752	0.5551	0.5665	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 6.1: Ausschnitt der Messwerte von der Laserlinie

6.3.2 Schwellwert

Es wird ein Schwellwert festgelegt und die Reihe durchlaufen. Wird der Schwellwert das erste mal in der Reihe von Helligkeitswerten überschritten, wird diese Position als P1 gespeichert. Beim folgenden Unterschreiten des Schwellwertes wird die Position als P2 gespeichert. Für die Weiterverarbeitung wird die Position in der Mitte der beiden gespeicherten Positionen verwendet (Abbildung: 6.5).

6.3.3 Schwerpunkt

Die Schwerpunktmethode hat den Vorteil, dass alle Helligkeitswerte der Laserlinie in die Berechnung eingehen. Die angewendete Formel 6.1 (Meisel (2010)) zur Berechnung des Schwerpunktes wurde für diesen Zweck um eine Dimension verringert, da nur die Breite der Laserlinie einfließen soll (Abbildung: 6.7).

$$y_{\text{Schwerpunkt}} = \frac{\sum_y f(y) \cdot y}{\sum_y f(y)} \quad (6.1)$$

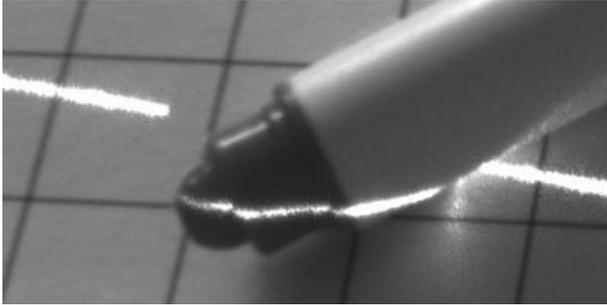


Abbildung 6.2: Aufnahme mit Laserlinie

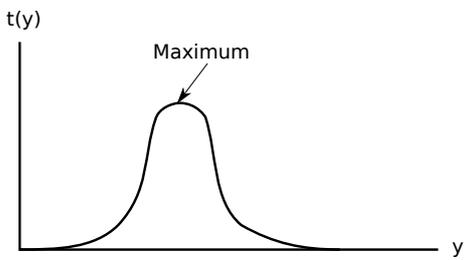


Abbildung 6.3: Maximum-Methode



Abbildung 6.4: Laserlinie mit Maximum-Methode ausgewertet

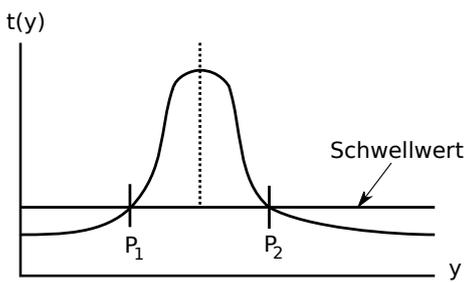


Abbildung 6.5: Schwellwert-Methode



Abbildung 6.6: Laserlinie mit Schwellwert-Methode ausgewertet

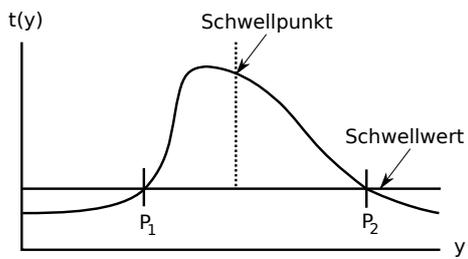


Abbildung 6.7: Schwerpunkt-Methode



Abbildung 6.8: Laserlinie mit Schwerpunkt-Methode ausgewertet

7 Kalibrierung

In der Messtechnik müssen für alle Abweichungen der Messgeräte Korrekturgrößen ermittelt werden. Für diese Arbeit müssen die Kameraparameter, die Lage zwischen Endeffektor und Kamera und die Laserebene mit der Kamera kalibriert werden.

7.1 Kamera Kalibrierung

Die intrinsischen Kameraparameter sind unabhängig vom Weltkoordinatensystem. Eine Veränderung der Kameralage beeinflusst nicht die Brennweite oder die Optische Achse. Extrinsische Kameraparameter modellieren dagegen die Transformation vom Weltkoordinatensystem in das Kamerakoordinatensystem. Bei einer Veränderung der Kameralage müssen diese Parameter neu bestimmt werden. ¹

Für diese Kalibrierung wird die Erweiterung der Camera Calibration and Hand-to-Eye-Calibration Toolbox für MATLAB verwendet. In diesem Kapitel wird nur exemplarisch die Vorgehensweise beschrieben. Die Funktion ist beschrieben unter [Wengert \(2012\)](#). Als Kalibrierungsmuster (Abbildung: [7.3](#)) wird ein Gitter aus Punkten verwendet. Dieses Gitter hat den Vorteil, dass nicht wie beim Schachbrettmuster, das ganz Muster auf den Aufnahmen sichtbar sein muss. Es ermöglicht eine automatische Kalibrierung. Das Kalibrierungsmuster wird flach auf den Boden gelegt. Danach fährt der Roboter in kleinen Schritten einen Kreisbogen über das Muster. Bei jedem Schritt wird ein Bild von der Kamera aufgenommen. Die automatische Kalibrierung wird mit dem Befehl `autocalibrate` ausgeführt. Nach diesem Schritt sind alle Parameter für die Umrechnung der Bilder vorhanden. Die Abbildungen [7.1](#) und [7.2](#) zeigen die radiale und tangentialen Verzerrungen, die durch das Objektiv verursacht werden.

¹Quelle: [Azad u. a. \(2009\)](#)

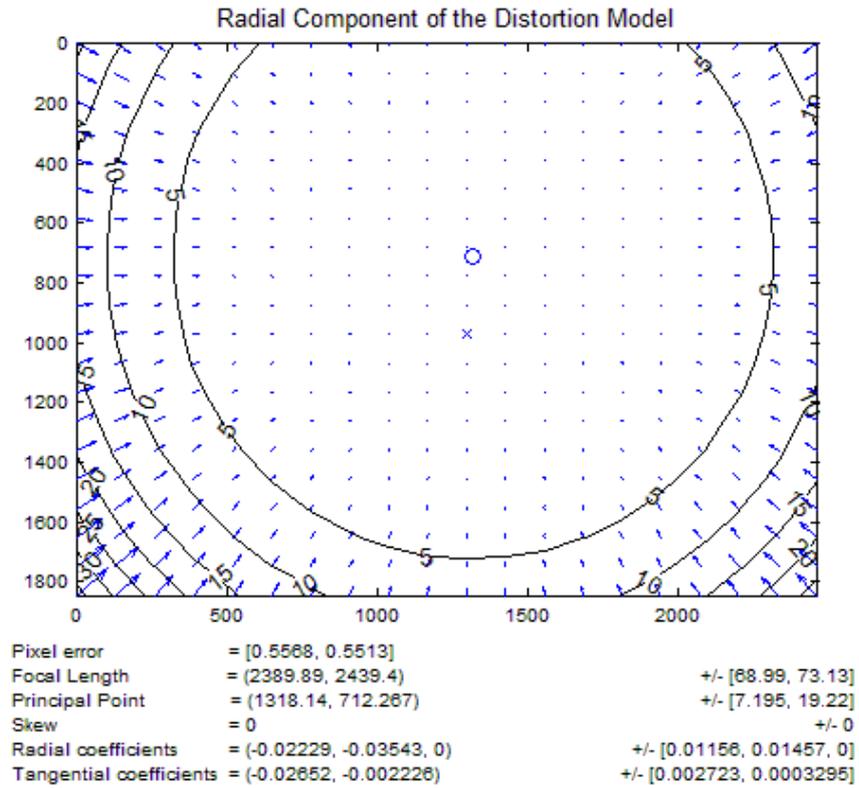


Abbildung 7.1: radiale Verzerrungen

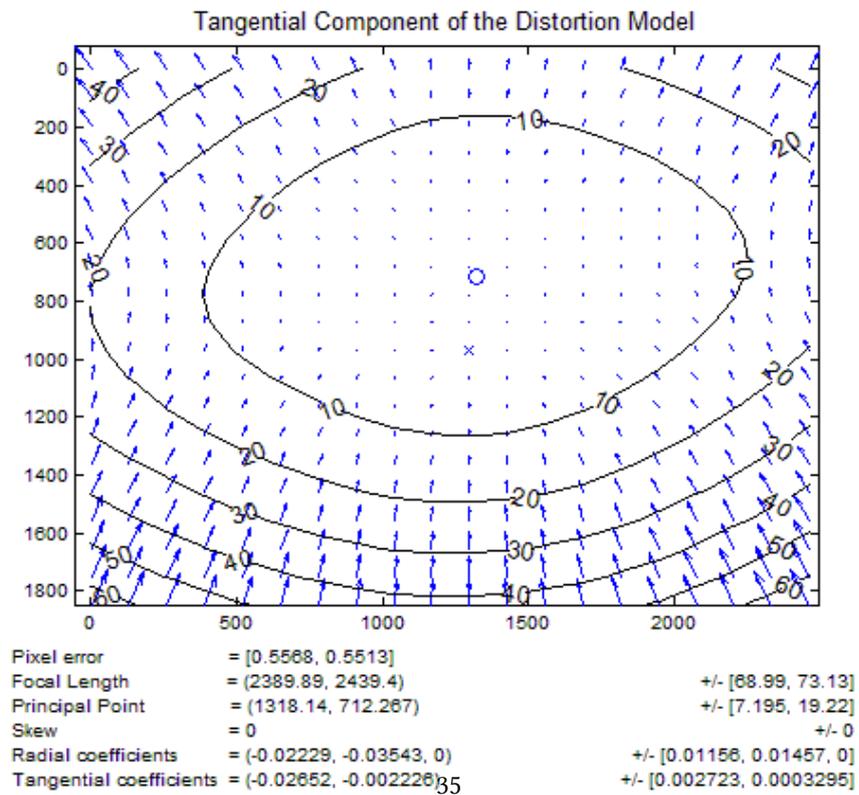


Abbildung 7.2: tangentielle Verzerrungen

7.2 Hand-Auge Kalibrierung

Um die genaue Lage der Kamera bezüglich des Endeffektors zu ermitteln, ist die sogenannte Hand-Auge-Kalibrierung notwendig. Da sich zwischen Kamera und Endeffektor keine weiteren Gelenke befinden, verändert sich die Lage zwischen Kamera und Endeffektor nicht mehr. Diese Kalibrierung läuft genau so ab, wie die Kalibrierung der Kamera. Zusätzlich wird die aktuelle Pose des Endeffektors mit dem Bild zusammen abgespeichert. Diese Pose setzt sich mit der Rotation- und Translationsmatrix zu einer 4x4 Transformation zusammen. Das Programm handeye erzeugt die Transformationsmatrix zwischen Kamera und Endeffektor.²

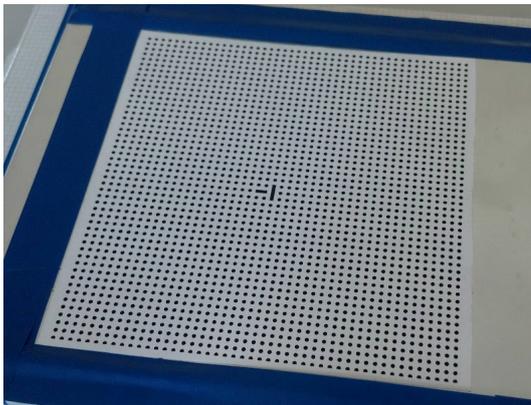


Abbildung 7.3: Kalibrierungsmuster

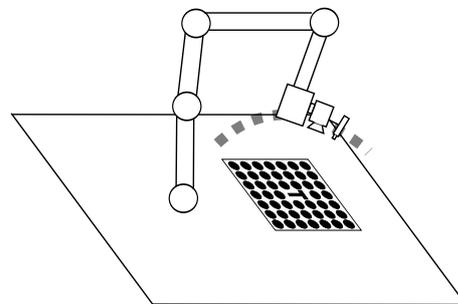


Abbildung 7.4: Schwenk über das Kalibrierungsmuster

7.3 Laser-Kamera Kalibrierung

Der Linienlaser spannt mit dem Laserstrahl eine Ebene auf. Diese Ebene ist von der Lage her unbekannt. Deshalb ist es das Ziel der Laser-Kamera Kalibrierung Bildpunkte im Kamerabild in Koordinaten der Laserebene zu transformieren.

Um die Parameter zu bestimmen, wurde das folgende Kalibrierungsverfahren entwickelt. Voraussetzung für die Kalibrierung zwischen Kamera und Laserebene ist ein verzerrungsfreies Kamerabild. Für die Kalibrierung wurde eine Kalibrierungstreppe (Abbildung: 7.5) mit zwei Ebenen im Abstand $hk = 15 \text{ mm}$ hergestellt. Auf dieser Treppe befinden sich schwarze Linien im Abstand von 10 mm, die mit Hilfe eines Laserdruckers gedruckt werden. Die Kamera wird so

²Quelle: Wengert2012

positioniert, dass die erste Linie oben und unten in der gleichen vertikalen Ebene liegt (Abbildung: 7.6). Damit befindet sich die Kamera senkrecht über der Kalibrierungstreppe.

Als nächstes wird der Laser so justiert, dass sich die Laserlinie auf der unteren Ebene mit der ersten Linie der Kalibrierungstreppe deckt (Abbildung: 7.6). Die in MATLAB geschriebene Anwendung erzeugt Bilder mit aus- und eingeschaltetem Laser. Die Linien werden vom Benutzer im Programm grob ausgewählt und vom MATLAB Programm genau erkannt. Für diese Erkennung wird ein angepasster Schwellwert-Algorithmus, wie unter 6.3.2 beschrieben, verwendet. Die Laserlinie, die auf dem oberen Teil der Kalibrierung zu sehen ist, wird grob ausgewählt. Zur genauen Erkennung kann zwischen den drei Verfahren, die unter 6.3 beschrieben sind, gewählt werden. Ihre Position kann ins Verhältnis zu den bekannten Linien auf der Kalibrierung gesetzt werden. Damit ist der Abstand $Abstand_{Laserlinie}$ zur ersten Linie ermittelt. Der Abstand $Abstand_{Ebenen}$ zwischen der unteren Ebene und der oberen Ebene ist bekannt. Damit kann der Winkel α_{Laser} zwischen Kamera und Laser mit der Formel 7.1 bestimmt werden.

$$\tan(\alpha_{Laser}) = \frac{Abstand_{Laserlinie}}{Abstand_{Ebenen}} \quad (7.1)$$

Zur Berechnung der Kamerahöhe wird im Kamerabild der Abstand der vierten Linie auf der oberen Ebene $p2$ und der unteren Ebene $p1$ erkannt (Abbildung: 7.8). Mit Hilfe des Strahlensatzes (Abbildung: 7.8) ergibt sich daraus die Kamerahöhe wie folgt:

$a1$ ist als festes Maß (40 mm) auf der Kalibrierungsvorrichtung vorgegeben. $a2$ errechnet sich aus der Formel 7.2.

$$a2 = \frac{a1}{p1} \cdot p2 \quad (7.2)$$

Die Differenz von $a2$ und $a1$ ergibt ak . Mit der Formel 7.3 lässt sich $\tan(\alpha_{Kamera})$ bestimmen.

$$\tan(\alpha_{Kamera}) = \frac{ak}{hk} \quad (7.3)$$

Die Höhe der Kamera $h1$ ergibt sich mit der Formel 7.4

$$h1 = \frac{a2}{\tan(\alpha_{Kamera})} \quad (7.4)$$

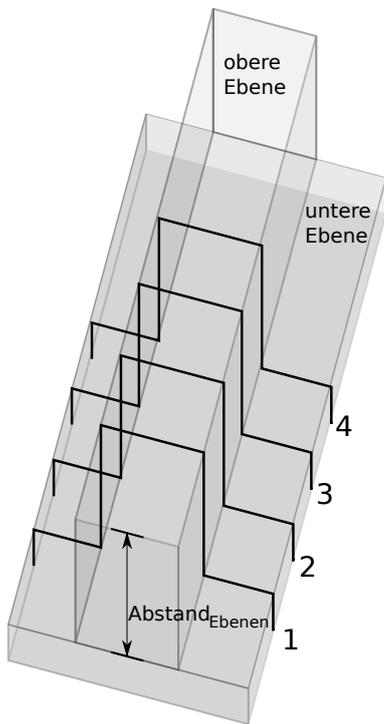


Abbildung 7.5: Schematische Darstellung der Laserkalibrierungstreppe

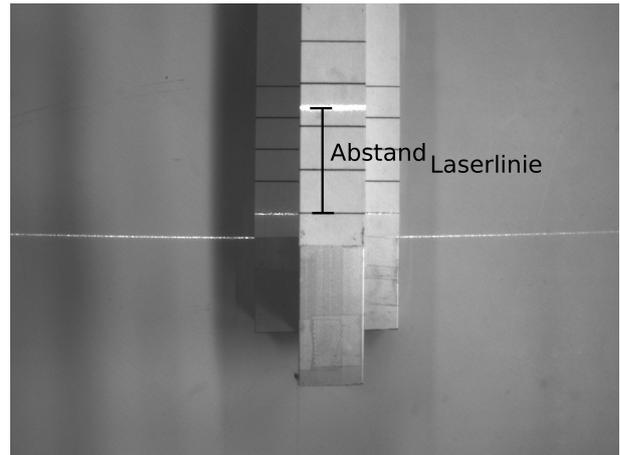


Abbildung 7.6: Laserkalibrierungstreppe mit aktivem Laser

Die Kamerakonstante f_{pixel} wird wie die Maße im Bild in Pixel errechnet. Dies lässt sich mit der Formel 7.5 berechnen. Da sämtliche Maße im Raum über den Strahlensatz ermittelt werden, werden auf der Kameraseite alle Maße im Pixel angegeben.

$$f_{pixel} = \frac{h1 \cdot p1}{a1} \quad (7.5)$$

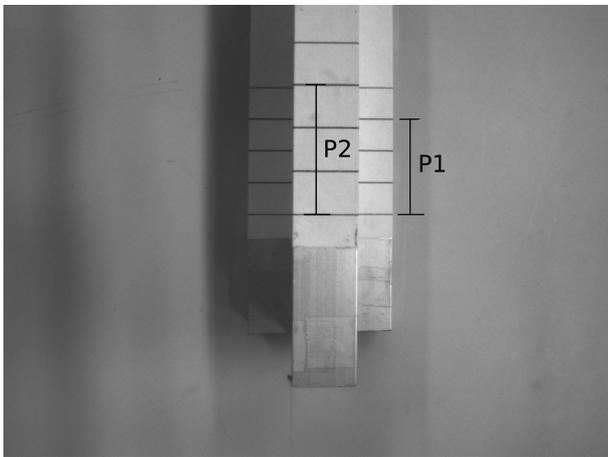


Abbildung 7.7: Laserkalibrierungstreppe

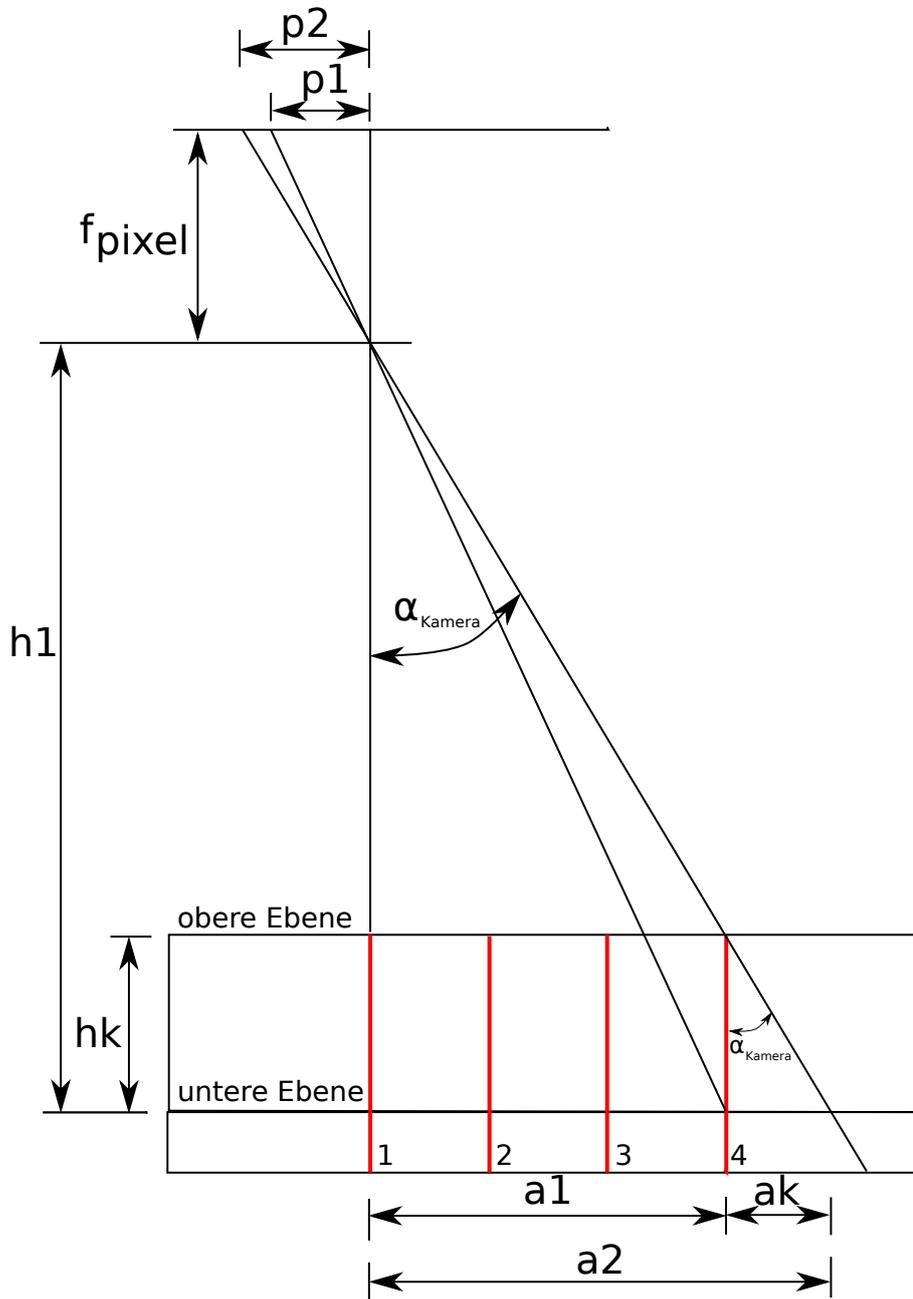


Abbildung 7.8: Berechnung mit Hilfe des Strahlensatzes

8 Roboterarm

In diesem Kapitel wird die Roboterkinematik behandelt. Es beschreibt die Abhängigkeiten zwischen den Bewegungen der einzelnen Roboterarme und Roboterjelenke. Des Weiteren wird auf die räumliche Orientierung mit Hilfe der Koordinatensysteme eingegangen.

8.1 Freiheitsgrade und kinematische Kette

Der Freiheitsgrad beschreibt die von einander unabhängigen Achsen. Ein Punkt in der Ebene hat nur die Bewegungsmöglichkeiten in Richtung X und Y. Im Raum kommt noch die Richtung Z dazu. Körper haben im Raum noch weitere drei Freiheitsgrade, da sie noch um sich selbst rotieren können.

Die kinematische Kette besteht aus starren Körpern mit fester Länge die über Gelenke verbunden sind. Jedes Rotationsgelenk (Roll) und Knickgelenk (Pitch) ¹ eines Roboterarms hat einen Freiheitsgrad. Mit der folgenden Formel 8.1 lässt sich aus der Anzahl der Körper n , Gelenke g und dem Freiheitsgrad der einzelnen Gelenke f_i der gesamte Freiheitsgrad F_g der kinematischen Kette bis zum Endeffektor berechnen.

$$F_g = 3(n - 1 - g) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (8.1)$$

In den Abbildungen 8.1 und 8.2 werden die zwei Gelenktypen in symbolischer Darstellung gezeigt. Der gesamte Roboterarm ist in Abbildung 8.3 dargestellt. Bei dem Katana handelt es sich um eine offene kinematische Kette, da es keine parallelen Gelenke gibt, die die Bewegung wieder einschränken. Damit ist der Katana ein RPPPR-Roboterarm. Der Katana besitzt sechs Körper und fünf Gelenke mit jeweils einem Freiheitsgrad. Mit der Formel 8.1 kommt man auf den Gesamtfreiheitsgrad von fünf. Der zusätzliche Greifer erhöht die Anzahl auf sechs Freiheitsgrade.²

¹Schub- und Kugelgelenke werden hier nicht beachtet

²Quelle: Stark (2009)

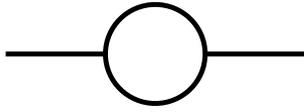


Abbildung 8.1: Knickgelenk in symbolischer Darstellung

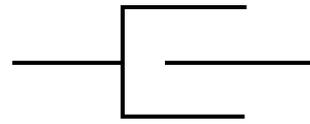


Abbildung 8.2: Rotationsgelenk in symbolischer Darstellung

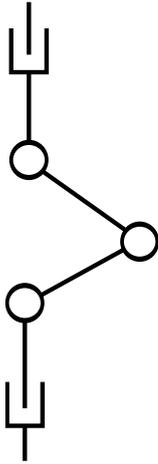


Abbildung 8.3: Symbolische Darstellung vom Katana Roboterarm

8.2 Vorwärtskinematik

Bei der Vorwärtskinematik sind alle Gelenkwinkel bekannt. Damit lässt sich die Position des Roboterarms eindeutig im Raum bestimmen. Mit Hilfe des Katanaroboterarms soll jetzt die direkte Herleitung beschrieben werden. Zuerst werden nur die Pitch-Gelenke betrachtet. Da diese alle gleich ausgerichtet sind, ergibt sich zuerst eine 2D-Darstellung (Abbildung: 8.4) des Roboterarms. Mit Hilfe der trigonometrischen Funktion des Sinus und Cosinus, wird die Höhe h_i 8.2 und der Radius r_i 8.3 jedes Körpers und Gelenkes berechnet.

$$h_i = l_i \cdot \sin(\theta_i) \quad (8.2)$$

$$r_i = l_i \cdot \cos(\theta_i) \quad (8.3)$$

Für die Berechnung der Gesamthöhe h_{gesamt} 8.4 und des Gesamtradius r_{gesamt} 8.5 muss beachtet werden, dass die Gelenkwinkel aufaddiert werden. Bei der Gesamthöhe muss noch der Körper des ersten Körpers hinzugezählt werden.

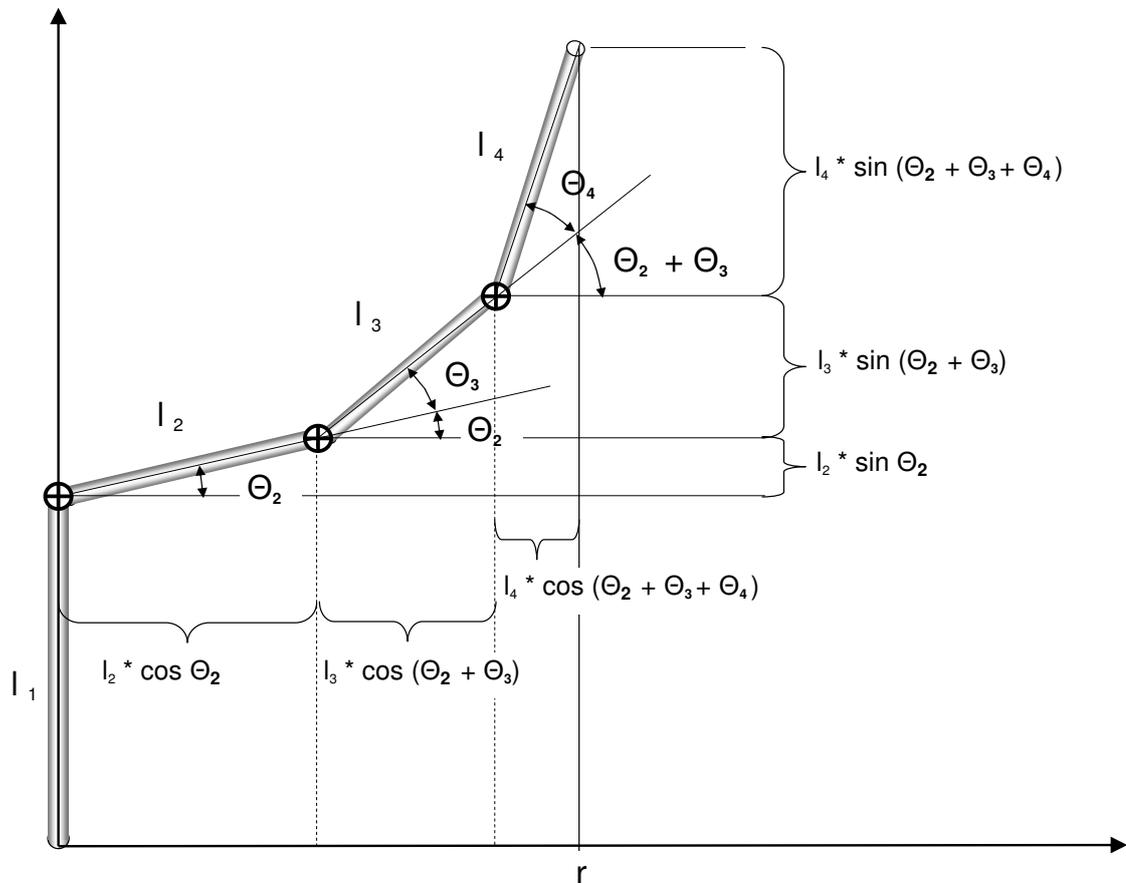


Abbildung 8.4: 2D-Darstellung Darstellung des Roboterarms

Mit dem ersten Gelenk (Roll-Gelenk) wird die Ebene um die Radialebene erweitert und es entsteht ein Bewegungszylinder (Abbildung: 8.5) Das 1. Gelenk kann unabhängig von den anderen Gelenken verändert werden, da es nur auf die Radialebene wirkt.

Das fünfte Gelenk kann die Hand des Roboterarms um seine Radialebene drehen lassen. Durch Fehlen eines weiteren Pitch-Gelenks nach dem letzten Roll-Gelenk, ist ein Verschwenken aus der Radialachse nicht möglich.³

Eine anschauliche Darstellung für die Posen sind die Zylinderkoordinaten 8.6.

$$\delta_{\text{Radialebene}} = \theta_1$$

$$\delta_{\text{Neigung}} = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$$

$$\delta_{\text{Handdrehung}} = \theta_5$$

³Quelle: unveröffentlichtes Manuskript - Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel

$$h_{gesamt} = l_2 \cdot \sin(\theta_2) + l_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + l_1 \quad (8.4)$$

$$r_{gesamt} = l_2 \cdot \cos(\theta_2) + l_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (8.5)$$

$$\text{Zylinderkoordinaten} = (r, z, \delta_{\text{Radialebene}}, \delta_{\text{Neigung}}, \delta_{\text{Handdrehung}}) \quad (8.6)$$

8.3 Inverse Kinematik

Ziel der Inversen Kinematik ist es, die gewünschte Endeffektorstellung anzufahren, in dem man die Position vorgibt. Für den verwendeten Roboter können die Zylinderkoordinaten vorgegeben werden. Die Rotation des Roboters und die Handverdrehung können direkt berechnet werden, da sie unabhängig von den anderen Gelenken sind. Die Höhe, der Radius und die Handverdrehung hängen allerdings von den drei Pitch-Gelenken ab. Man kann die Gleichungen 8.6 jeweils nach h , r und $Neig$ umstellen, allerdings ist dieses ein nicht lineares Gleichungssystem.

An dieser Stelle wird ein iterativer Lösungsansatz gewählt, um die Winkel der drei Pitch-Gelenke zu bestimmen. Für andere Lösungswege wird hier auf die Literatur verwiesen [Stark \(2009\)](#).

Als Ansatz wird das Nullstellenproblem nach Newton formuliert. Die Gleichungen 8.7, 8.8 und 8.9 werden nach 0 umgeformt.

$$0 = l_2 \cdot \sin(\theta_2) + l_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + l_1 - h_{gesamt} \quad (8.7)$$

$$0 = l_2 \cdot \cos(\theta_2) + l_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - r_{gesamt} \quad (8.8)$$

$$0 = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 - Neig \quad (8.9)$$

Um das Newton Verfahren anwenden zu können, müssen alle Gleichungen jeweils nach θ_2 , θ_3 und θ_4 abgeleitet werden. Diese neun Gleichungen werden dann in die Jacobi Matrix 8.10 eingesetzt.

$$J_n = \begin{pmatrix} \frac{df_1}{d\theta_2} & \frac{df_1}{d\theta_3} & \frac{df_1}{d\theta_4} \\ \frac{df_2}{d\theta_2} & \frac{df_2}{d\theta_3} & \frac{df_2}{d\theta_4} \\ \frac{df_3}{d\theta_2} & \frac{df_3}{d\theta_3} & \frac{df_3}{d\theta_4} \end{pmatrix} \quad (8.10)$$

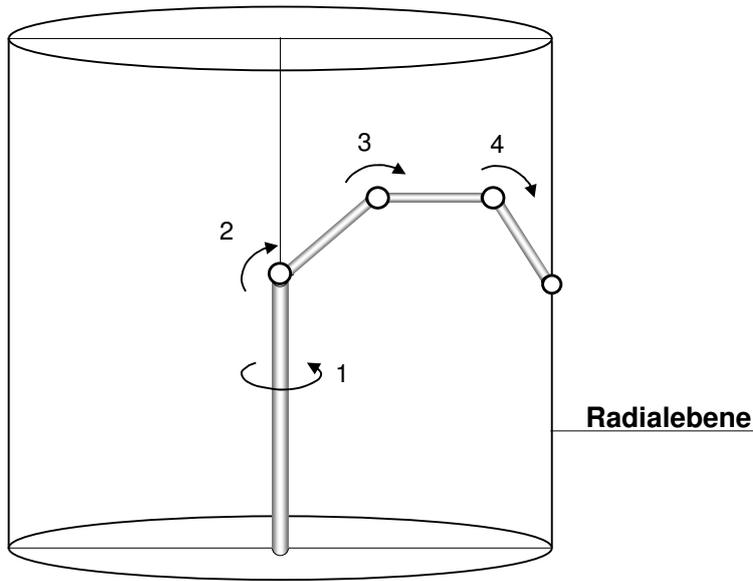


Abbildung 8.5: Bewegungszylinder des Roboterarms

Die folgende Schritte müssen iterativ durchlaufen werden, bis die Lösung stabil ist. $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_3$ und $\Delta\theta_4$ sind die neuen Winkelfunktionen.⁴

$$J(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cdot \begin{pmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f1(\theta_{2n}, \theta_{3n}, \theta_{4n}) \\ f2(\theta_{2n}, \theta_{3n}, \theta_{4n}) \\ f3(\theta_{2n}, \theta_{3n}, \theta_{4n}) \end{pmatrix} \quad (8.11)$$

$$\theta_{2n+1} = \theta_{2n} + \Delta\theta_{2n} \quad (8.12)$$

$$\theta_{3n+1} = \theta_{3n} + \Delta\theta_{3n} \quad (8.13)$$

$$\theta_{4n+1} = \theta_{4n} + \Delta\theta_{4n} \quad (8.14)$$

In MATLAB wird die Funktion `fsolve` implementiert. Diese Funktion dient zum Lösen von nicht-linearen Gleichungssystemen. Wenn die Positionsänderungen zu groß sind, kann es passieren,

⁴Quelle: unveröffentlichtes Manuskript - Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel

dass eine Lösung gefunden wird, die die Gelenke ruckartig in eine andere Stellung bringt. Um dies zu vermeiden, wurde die Positionsänderung in mehrere kleine Schritte aufgeteilt.

8.4 Denavit-Hartenberg-Transformation

Die Denavit-Hartenberg-Transformation ist eine mathematische Darstellung des Kinematikmodells. Als Grundlage dienen die homogenen Matrizen, die die Transformation der Koordinatensysteme zwischen den einzelnen Gelenken beschreiben. Mit den Transformationen werden Drehungen oder Verschiebungen modelliert.

Das erste Koordinatensystem im Fuß des Roboters ist das Basiskoordinatensystem. Dieses Koordinatensystem ist so ausgerichtet, dass die z-Achse die Drehachse des ersten Gelenks darstellt

Die DH-Parameter sind θ , d , a und α und sind wie nachfolgend definiert. Mit Ihnen wird die Transformation zwischen zwei Gelenken beschrieben (Abbildung: 8.6)

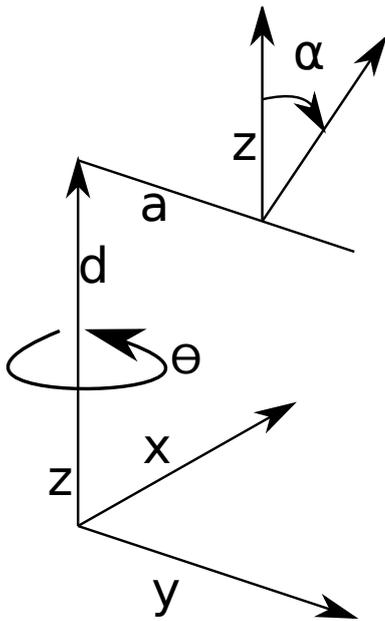


Abbildung 8.6: Schematische Darstellung der DH-Parameter

θ = Rotation um die z-Achse mit dem Winkel θ

d = Translation der Länge d entlang der z-Achse

a = Translation der Länge a entlang der x-Achse

α = Rotation um die x-Achse mit dem Winkel α

$$DH(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.15)$$

$$DH(d) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.16)$$

$$DH(a) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.17)$$

$$DH(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.18)$$

Durch Matrizenmultiplikation der einzelnen Transformationen, ergibt sich eine Gesamttransformationsmatrix [8.19](#)

$$DH(\theta, d, \alpha, a) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\cos(\alpha) \cdot \sin(\theta) & \sin(\alpha) \cdot \sin(\theta) & a \cdot \cos(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\alpha) \cdot \cos(\theta) & -\sin(\alpha) \cdot \cos(\theta) & a \cdot \sin(\theta) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.19)$$

Um eine Transformation zwischen dem Basiskoordinatensystem und dem Endeffektorkoordinatensystem zu errechnen, werden die Transformationen der Gelenke miteinander multipliziert.

Für den Katana wird die folgende DH-Parameterliste [8.1](#) ermittelt. Diese wird nur Beispielhaft erklärt. Das erste Gelenk ist automatisch ein Roll-Gelenk, da es um die z-Achse gedreht wird. Der Körper hat die Länge l1 und liegt entlang der z-Achse. Das Gelenk, das nach dem Körper folgt, ist ein Pitch-Gelenk, deshalb wird es an der x-Achse um 90° dreht. Die nächsten Körper werden an

Achse	α	a	θ	d
1	$\frac{\pi}{2}$	0	θ	l1
2	0	l2	θ	0
3	0	l3	θ	0
4	$-\frac{\pi}{2}$	0	θ	0
5	0	0	θ	l4

Tabelle 8.1: DH-Parameterliste

der x-Achse liegen, damit sie als Pitch-Gelenk funktionieren. Das fünfte Gelenk stellt wieder ein Roll-Gelenk dar, deshalb wird es an der x-Achse um -90° gedreht und der Körper verläuft entlang der z-Achse. ^{5 6}

8.5 Ansteuerung des Roboters

Für die Ansteuerung des Roboterarms unter MATLAB (Abbildung: 8.7) wurde von Herrn Carsten Fries ⁷ ein Programm geschrieben. Mit dieser Steuerung kann direkt über Winkelangaben der Roboterarm bewegt werden. Für die Berechnung der Gelenkwinkel wird die Inverse Kinematik benutzt. Für die Simulation des Roboterarms in MATLAB und die Berechnung der Transformationsmatrixen wurde die Denavit-Hartenberg-Transformation verwendet.

⁵Quelle: Stark (2009)

⁶Quelle: Hertzberg u. a. (2012)

⁷Quelle: Fries (2011)

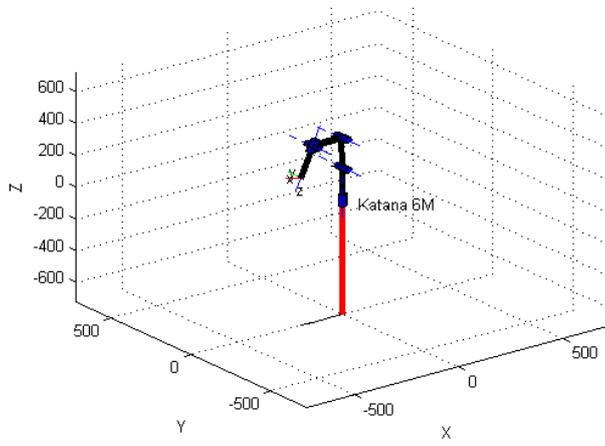


Abbildung 8.7: Simulation des Roboterarms

9 3D-Modellgenerierung

Die 3D-Modellgenerierung führt die Daten aus den vorherigen drei Kapiteln zusammen und beschreibt die Erzeugung des 3D-Modells.

9.1 Modell abfahren

Um ein Objekt komplett erfassen zu können, ist es erforderlich, mit dem Roboterarm in einem Bogen über das Objekt zu fahren. Dabei wird der Schwenk in einzelne Schritte unterteilt. Bei jedem einzelnen Schritt wird der Roboterarm kurz angehalten und es wird je ein Bild mit eingeschaltetem und mit ausgeschaltetem Laser gemacht. Zu jeder Aufnahme werden die Koordinaten des Endeffektors gespeichert.

9.2 Laserlinie bestimmen

Die Kamera nimmt von dem Objekt in der Laserebene ein Höhenprofil auf. Die Laserlinie wird mit den Methoden aus Kapitel 6 erkannt und ausgewertet. Für jeden dieser Messwerte muss die genaue Position des Objektes bezogen auf die Kamera bestimmt werden. Durch die Laser-Kamera Kalibrierung ist der Abstand zur unteren Ebene h_1 , der Tangens des Lasers α_{Laser} und der Abstand zum Projektionszentrum f_{pixel} (in Pixel) bekannt. Im folgenden werden die Formeln für h_o 9.1 und z 9.2 hergeleitet. Zur Verdeutlichung wurde die schematische Darstellung (Abbildung: 9.1) angefertigt.

$$\tan(\gamma) = \frac{z}{h_o}$$

$$\tan(\alpha_{Laser}) = \frac{z}{h_u}$$

Da z in beiden Gleichungen identisch ist, folgt daraus:

$$\tan(\gamma) \cdot h_o = \tan(\alpha_{Laser}) \cdot (h_1 - h_o)$$

$$h_o = h_1 \cdot \frac{\tan(\alpha_{Laser})}{\tan(\gamma) + \tan(\alpha_{Laser})} \quad (9.1)$$

und

$$z = \tan(\gamma) \cdot h_o \quad (9.2)$$

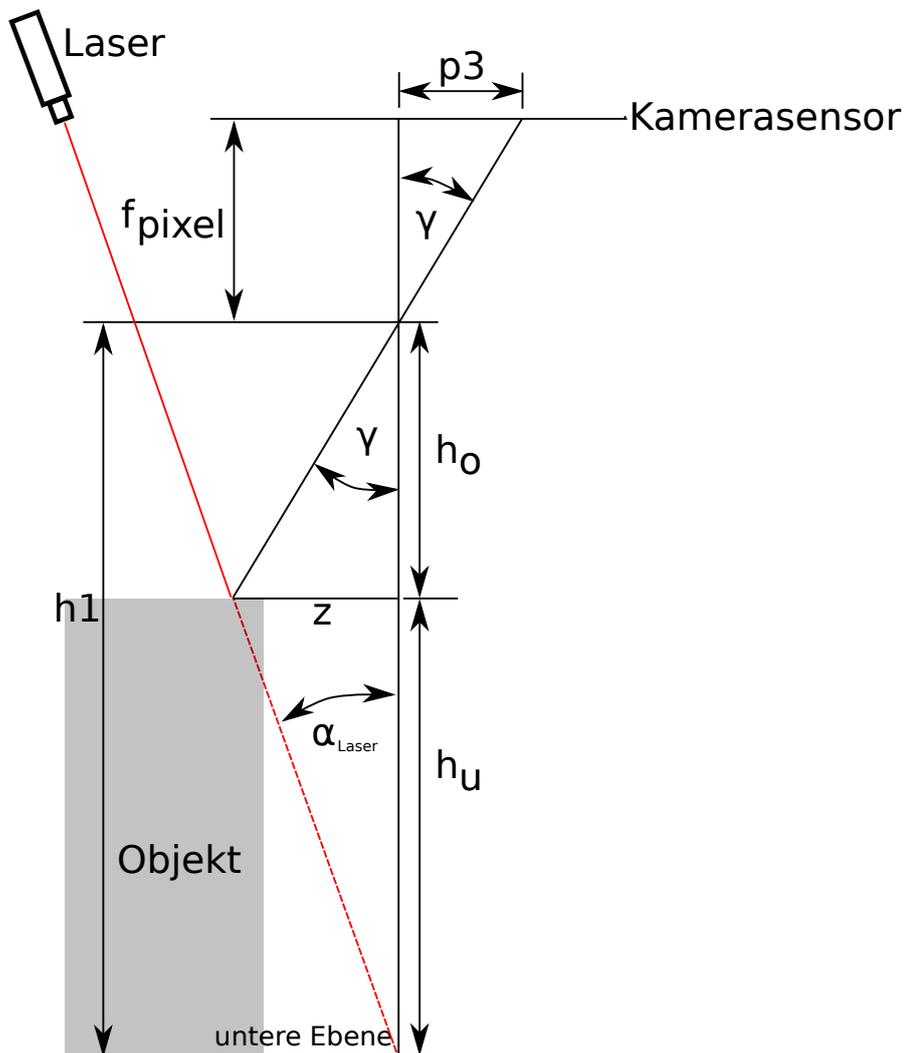


Abbildung 9.1: Ermittlung von h_o und z

Die Koordinaten der Kamera lassen sich mit Hilfe der Transformationsmatrix des Endeffektors und der Transformationsmatrix der Kamera genau bestimmen. In Verbindung mit den ermittelten Werten z und h_o lässt sich damit die genaue Position des Objektes im Raum bestimmen. (Abbildung: 9.1)

9.3 3D Modell generieren

Aus der Vorlage (Abbildung: 9.2) soll nun das 3D-Modell erstellt werden. Der Roboterarm wird so bewegt, dass die Schrittweiten genau erkennbar sind. Die bestimmten Punkte lassen sich nun in einem 3D-Koordinatensystem (Abbildung: 9.3¹) darstellen.

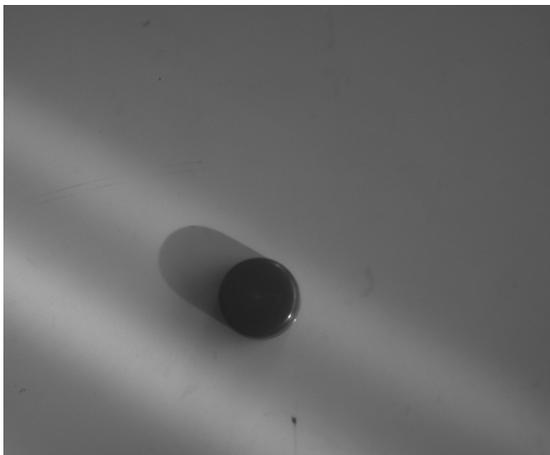


Abbildung 9.2: Vorlage für das 3D-Modell

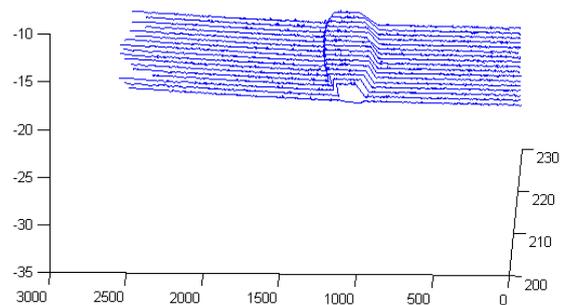


Abbildung 9.3: Erzeugtes 3D-Modell

¹Der mit MATLAB erzeugte 3D-Plot ist so eingestellt, dass einzelne Punkte mit Linien verbunden werden

10 Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse vorgestellt und Tests durchgeführt werden.

10.1 Objekte im Laser

Im folgenden werden einige Objekte aus verschiedenen Materialien getestet. Die Objekte werden in dem Laserstrahl positioniert und wie in Kapitel 6 beschrieben ausgewertet.

Holz

Ein Holzlineal (Abbildung: 10.1) mit einem Loch wird von dem Laser bestrahlt. Die Auswertung (Abbildung: 10.2) ergibt zuverlässige Werte.

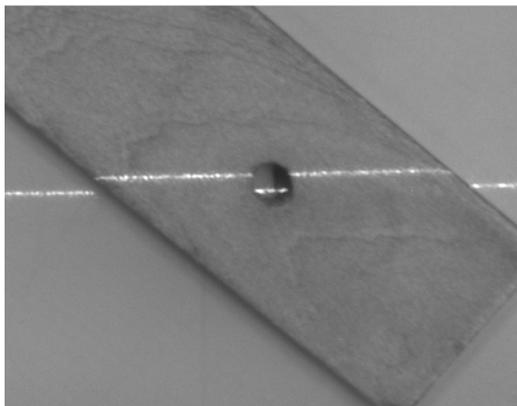


Abbildung 10.1: Holzlineal mit Laserlinie



Abbildung 10.2: Erkannte Laserlinie auf dem Holzlineal

Kunststoff

Die Oberfläche des Akkus (Abbildung: 10.3) besteht aus mattem hellen Kunststoff. Die glänzende Seite des Akkus, wird zusätzlich von direktem Sonnenlicht bestrahlt. Im Ergebnis (Abbildung: 10.4) ist zu erkennen, dass die Auswertung bei den überstrahlten Flächen an ihre Grenzen stößt.

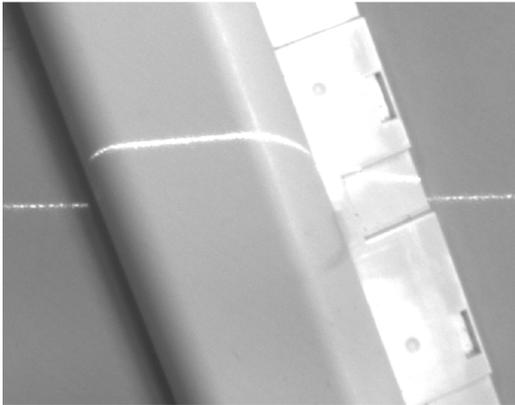


Abbildung 10.3: Akku mit Laserlinie

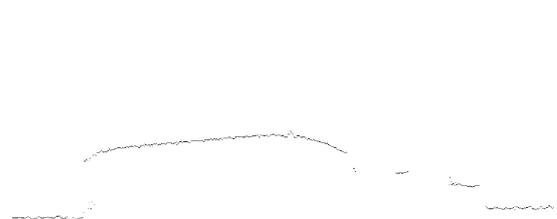


Abbildung 10.4: Erkannte Laserlinie auf dem Akku

Metall

Auf der Metallplatte (Abbildung: 10.5) befinden sich rechts und links Aufkleber. Diese werden zuverlässig erkannt. In dem Teilbereich dazwischen lässt sich die Laserlinie (Abbildung: 10.6) nur ungenau oder nicht mehr auswerten.

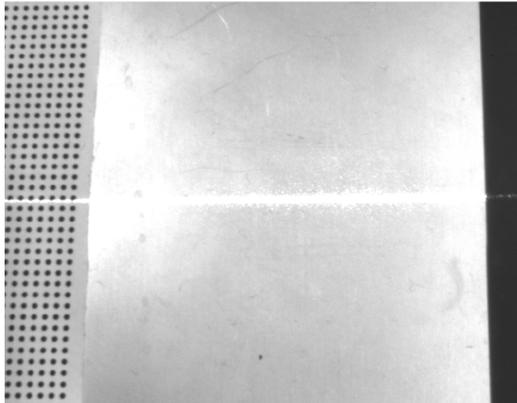


Abbildung 10.5: Metallplatte
mit Laserlinie

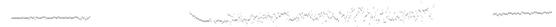


Abbildung 10.6: Erkannte Laserlinie auf der
Metallplatte

Papier

Auf dem Isolierband (Abbildung: 10.7) lässt sich die Laserlinie (Abbildung: 10.8) einwandfrei auswerten.

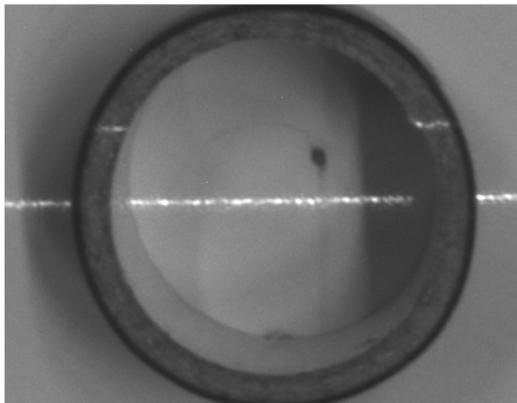


Abbildung 10.7: Isolierband
mit Laserlinie



Abbildung 10.8: Erkannte Laserlinie auf dem
Isolierband

10.2 Genauigkeit

Um die Genauigkeit des Sensors zu überprüfen wird hier ein Versuchsaufbau erstellt. Für den Aufbau wird die Kalibrierungstreppe verwendet, da ihre Abmessungen bereits bekannt sind. Es wird ein Schwenk über die Kalibrierungstreppe (Abbildung: 10.9) gefahren und die Messwerte erfasst.

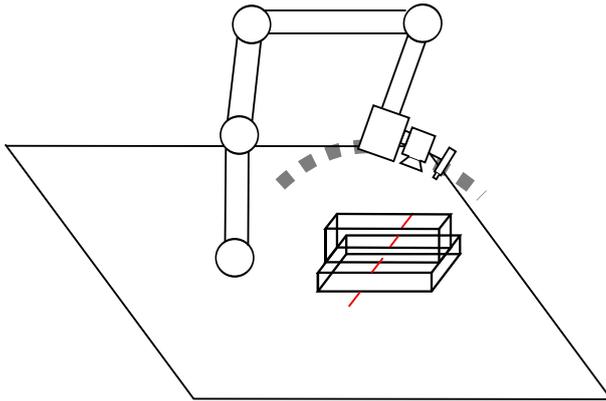


Abbildung 10.9: Schwenk über die Kalibrierungstreppe

Durch die Abweichungen des defekten Roboterarmgelenks ist diese Messung leider nicht möglich gewesen. Das defekte Gelenk lässt keine genaue Positionierung des Roboterarms zu. Eine weitere Überprüfung der Genauigkeit ist somit nicht möglich.

11 Fazit

Dieses Kapitel soll einen Rückblick auf die Arbeit und einen Ausblick auf Weiterentwicklungen geben.

11.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit ist gezeigt worden, wie ein 3D-Laserschnittsensor erstellt worden ist. Dieser Sensor ist auf einem Roboterarm montiert und in der Lage, 3D-Modelle von Objekten zu erzeugen, in dem er einen Schwenk über diese macht. Die Anforderungen an den Sensor wurden genau beschrieben und es folgte eine Auswahl der besten Realisierungsmöglichkeit. Für den technischen Aufbau wurden eine Kamera mit Objektiv und ein Laser verwendet. Für die Kamera und den Laser mussten Halterungen gefertigt werden. Der Laser wird mit Hilfe eines Mikrocontrollers angesteuert. Für die zuverlässige Auswertung der Laserlinie wurden Algorithmen geschrieben. Die einzelnen Komponenten des Sensor mussten kalibriert werden. Für den Roboterarm wurde eine Ansteuerung geschrieben. Mit der Zusammenführung der einzelnen Entwicklungsstufen ließ sich zum Schluss ein 3D-Modell von Objekten erzeugen.

11.2 Ausblick

In diesem Abschnitt sollen Modifikationen beleuchtet werden, die in der Aufgabenstellung nicht gefordert waren, aber eine weitere Verbesserung ergeben würden.

11.2.1 Polarisationsfilter

Reflektionen von der Laserlinie, die z.B. von sehr glatten Kunststoffen oder Folien stammen, können sehr schlechte Messergebnisse liefern. Diese unerwünschten Reflektionen lassen sich mit linearen Polarisationsfiltern vermindern. Es müssen zwei um 90° gegeneinander verdrehte Filter vor der Kamera und dem Laser montiert werden. Auf hochglänzenden Metallen funktioniert diese Methode nicht. ¹

¹Quelle: Azad u. a. (2009)

11.2.2 Laseransteuerung

Das für die Laseransteuerung verwendete Evaluations-Board ist sehr groß und benötigt eine extra Stromversorgung. Hier wäre es möglich, eine eigene Platine mit dem Mikrocontroller zu entwickeln. Um die Stromversorgung einzusparen und einen direkten Betrieb über USB zu ermöglichen, kann z.B. der IC FT232RL von der Future Technology Devices International genutzt werden. Dieser IC arbeitet als USB zu serial UART interface, damit ist die direkte Kommunikation mit dem Mikrocontroller möglich. ²

²Quelle: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf zuletzt aufgerufen: 07.05.2012

Abbildungsverzeichnis

2.1	Stereoendoskop im Inneren eines Körpers	4
2.2	Intelligentes Haus mit Kameras	4
2.3	Optische Compact-Disc	5
2.4	Entfernungsmessung zwischen Erde und Mond	5
2.5	Kleberauppeninspektion	6
2.6	Vermessung von Tunnelwänden	6
3.1	Microsoft Kinect	9
3.2	Laser-Triangulationssensor der Firma micro-epsilon. Auch mit Laserlinie erhältlich	10
3.3	Schematische Darstellung vom Laserschnittverfahren	11
4.1	Blooming	14
4.2	Smear	14
4.3	Linsengleichung	15
4.4	Kameramodell	17
4.5	Bildkoordinatensystem	18
4.6	Kameramodell	18
4.7	Weltkoordinatensystem	19
4.8	Endeffektorkoordinatensystem	19
4.9	PWM	20
5.1	Kamera DMK 72AUC02	22
5.2	Objektiv H0514-MP2	22
5.3	Adapterplatte für Kamera	22
5.4	Laserdiodenmodul	23
5.5	Laserlinien Linse	23
5.6	Laserhalterung als Zeichnung	24
5.7	Montierte Laserhalterung	24
5.8	Atmel Evaluations-Board	24

5.9	Bild vom Katana Roboterarm	26
5.10	Schematische Darstellung vom Katana Roboterarm	27
6.1	Ausschnitt der Messwerte von der Laserlinie	31
6.2	Aufnahme mit Laserlinie	32
6.3	Maximum-Methode	32
6.4	Laserlinie mit Maximum-Methode ausgewertet	32
6.5	Schwellwert-Methode	32
6.6	Laserlinie mit Schwellwert-Methode ausgewertet	32
6.7	Schwerpunkt-Methode	33
6.8	Laserlinie mit Schwerpunkt-Methode ausgewertet	33
7.1	radiale Verzerrungen	35
7.2	tangentiale Verzerrungen	35
7.3	Kalibrierungsmuster	36
7.4	Schwenk über das Kalibrierungsmuster	36
7.5	Schematische Darstellung der Laserkalibrierungstreppe	38
7.6	Laserkalibrierungstreppe mit aktivem Laser	38
7.7	Laserkalibrierungstreppe	39
7.8	Berechnung mit Hilfe des Strahlensatzes	40
8.1	Knickgelenk in symbolischer Darstellung	42
8.2	Rotationsgelenk in symbolischer Darstellung	42
8.3	Symbolische Darstellung vom Katana Roboterarm	42
8.4	2D-Darstellung Darstellung des Roboterarms	43
8.5	Bewegungszyylinder des Roboterarms	45
8.6	Schematische Darstellung der DH-Parameter	46
8.7	Simulation des Roboterarms	49
9.1	Ermittlung von h_o und z	51
9.2	Vorlage für das 3D-Modell	52
9.3	Erzeugtes 3D-Modell	52
10.1	Holzlineal mit Laserlinie	53
10.2	Erkannte Laserlinie auf dem Holzlineal	53
10.3	Akku mit Laserlinie	54
10.4	Erkannte Laserlinie auf dem Akku	54

Abbildungsverzeichnis

10.5	Metallplatte mit Laserlinie	55
10.6	Erkannte Laserlinie auf der Metallplatte	55
10.7	Isolierband mit Laserlinie	55
10.8	Erkannte Laserlinie auf dem Isolierband	55
10.9	Schwenk über die Kalibrierungstreppe	56

Tabellenverzeichnis

3.1	Gewichtete Anforderungen	8
3.2	Morphologischer Kasten	12
5.1	Winkelangaben vom Katana	25
8.1	DH-Parameterliste	48

Listings

Aus Platzgründen ist der Quellcode auf der beliegenden CD zu finden.

Literaturverzeichnis

- [Ahlers 1991] AHLERS: *Industrieroboter messen und prüfen - Aussprachetag Köln, 12. Und 13. November 1991*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1991. – ISBN 978-3-180-90921-9
- [Azad u. a. 2009] AZAD, Pedram ; GOCKEL, Tilo ; DILLMANN, Rüdiger: *Computer vision - das Praxisbuch*. 1. Aufl. Elektor, 2009. – ISBN 978-3-895-76165-2
- [Balzert u. a. 2009] BALZERT, Helmut ; BALZERT, Heide ; KOSCHKE, Rainer ; LÄMMEL, Uwe ; LIGGESMEYER, Peter ; QUANTE, Jochen: *Lehrbuch Der Softwaretechnik: Basiskonzepte Und Requirements Engineering* -. 3. Aufl. Wiesbaden : Gabler Wissenschaftsverlage, 2009. – ISBN 978-3-827-41705-3
- [Camejo 2006] CAMEJO, Silvia A.: *Skurrile Quantenwelt* -. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler Wissenschaftsverlage, 2006. – ISBN 978-3-540-29720-8
- [Eichler und Eichler 2010] EICHLER, Hans-Joachim ; EICHLER, Jürgen: *Laser - Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 7. aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Gabler Wissenschaftsverlage, 2010. – ISBN 978-3-642-10461-9
- [Eichler u. a. 2005] EICHLER, Hans-Joachim ; KRONFELDT, Heinz-Detlef ; SAHM, Jürgen: *Das Neue Physikalische Grundpraktikum* -. 2. erw. u. aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Gabler Wissenschaftsverlage, 2005. – ISBN 978-3-540-21453-3
- [Fries 2011] FRIES, Carsten: *Kamerabasierte Identifizierung und Lokalisierung von Gegenständen für flexible Roboter*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Abschlussarbeit, 2011
- [Hartmann 2006] HARTMANN, Peter: *Mathematik für Informatiker - Ein praxisbezogenes Lehrbuch*. 4. Aufl. 2006. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006. – ISBN 978-3-834-81856-0
- [Hertzberg u. a. 2012] HERTZBERG, Joachim ; LINGEMANN, Kai ; NÜCHTER, Andreas: *Mobile Roboter - Eine Einführung aus Sicht der Informatik*. 2012. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag New York Incorporated, 2012. – ISBN 978-3-642-01725-4

- [Löffler-Mang 2012] LÖFFLER-MANG, Martin: *Optische Sensorik - Lasertechnik, Experimente, Light Barriers*. 2012. Aufl. Wiesbaden : Gabler Wissenschaftsverlage, 2012. – ISBN 978-3-834-81449-4
- [Meisel 2010] MEISEL, Prof. Dr.-Ing. A.: Definition der Zentralmomente. (2010). – URL http://www.informatik.hawhamburg.de/fileadmin/Homepages/ProfMeisel/Vorlesungen/WP_RobotVision/V/RV06.pdf. – Zugriffsdatum: 14.04.2012
- [Neuronics AG 2008] Neuronics AG (Veranst.): *Katana 450 Benutzerhandbuch*. 2.0.3. 2008
- [Stark 2009] STARK, Georg: *Robotik mit MATLAB* -. München, Wien : Hanser Verlag, 2009. – ISBN 978-3-446-41962-9
- [Wengert 2012] WENGERT, Christian: Fully automatic camera and hand to eye calibration. (2012). – URL http://www.vision.ee.ethz.ch/software/calibration_toolbox/calibration_toolbox.php. – Zugriffsdatum: 09.04.2012

Abkürzungsverzeichnis

HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
CCD	Charge-coupled Device
ca.	zirka
CD	Compact-Disc
cm	Zentimeter
CMOS	Complementary Metal Oxid Semiconductor
DH	Denavit-Hartenberg-Transformation
ff.	folgende Seiten
g	Gramm
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
IC	Integrated Circuit
kg	Kilo Gramm
LAN	Local Area Network
MHz	Megahertz
mm	Millimeter
μm	Mikrometer
mW	Milliwatt
nm	Nanometer
PC	Personal Computer
PWM	Pulse Width Modulator
RPPPR	Roll-Pitch-Pitch-Pitch-Roll
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
USART	Universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter
USB	Universal Serial Bus
z.B.	zum Beispiel

Formelzeichen

α_{Laser}	Winkel zwischen Kamera und Laser
α	Rotation x-Achse
δ	Rotation z-Achse
a	Translationslänge entlang x-Achse
a_1	festes Maß 40 mm
a_2	Wert errechnet sich aus Formel 7.2
$\text{Abstand}_{\text{Ebene}}$	Abstand zwischen oberer und unterer Ebene
$\text{Abstand}_{\text{Laserlinie}}$	Abstand zur Laserlinie
ak	Differenz zwischen a_2 und a_1
b	Bildweite
c	Kamerakonstante
d_o	Durchmesser der Öffnung
d	Translationslänge entlang z-Achse
DH	Denavit-Hartenberg-Transformation
f_{pixel}	Kamerakonstante in Pixeln
F_g	gesamter Freiheitsgrad
f_i	Freiheitsgrad von einem einzelmem Gelenk
f	Brennweite
g	Anzahl Gelenke
g	Arbeitsabstand
G	Gegenstandsgröße
h_{gesamt}	Höhe jedes Körpers und Gelenkes
h_i	Höhe eines Körpers und Gelenkes
h_o	Abstand zwischen von Objekt und Kamera
h_u	Abstand zwischen von Objekt und unterer Ebene
h_1	Höhe der Kamera
hk	Abstand zwischen zwei Ebenen
J	Jakobi Matrix
k	Blendenzahl
l_i	Länge der Arme
n	Anzahl Körper

P	Projektionszentrum
$p1$	Abstand der der vierten Linie (untere Ebene)
$p2$	Abstand der der vierten Linie (obere Ebene)
r_{gesamt}	Radius jedes Körpers und Gelenkes
r_i	Radius eines Körpers und Gelenkes
R	Rotationsteil
r	Zylinderkoordinate r
S	Größe des Sensors
T	Translationsteil
t	Zeit
Tr	Frequenz
U_{high}	höchster Spannungswert
U_{low}	niedrigster Spannungswert
$U_{Mittelwert}$	Spannungsmittelwert
V	Spannung
x_{Bild}	x Koordinaten Bildebene
x_{Objekt}	x Koordinaten Objektebene
y_{Bild}	y Koordinaten Bildebene
y_{Objekt}	y Koordinaten Objektebene
$y_{Schwerpunkt}$	Schwerpunkt
z_{Objekt}	z Koordinaten Objektebene
z	Zylinderkoordinate z

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 09. Mai 2012 Christian Ahlf