



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Seminarausarbeitung

Carsten Fries

Kameragesteuerter Roboterarm zur Identifizierung, Lokalisierung und
Manipulation von Gegenständen

Carsten Fries

Carsten.Fries@haw-hamburg.de

Kameragesteuerter Roboterarm zur Identifizierung, Lokalisierung und Manipulation
von Gegenständen

Ausarbeitung eingereicht im Rahmen der Veranstaltung *Seminar*

im Studiengang Informatik (Master)
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel

Prüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Kai von Luck

Prof. Dr. rer. nat. Gunter Klemke

Abgegeben am 07. Februar 2011

Carsten Fries

Thema der Ausarbeitung

Kameragesteuerter Roboterarm zur Identifizierung, Lokalisierung und Manipulation von Gegenständen

Stichworte

Objekterkennung, Lokalisierung, SURF, SIFT, Merkmalsextraktion, Knickarmroboter

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Lösungsansatz, zur autonomen Identifizierung, Lokalisierung und Manipulation von Gegenständen, vorgestellt. Als Grundlage dient ein kameragesteuerter Knickarmroboter. Die Kamera liefert Bildinformationen, welche sogenannte invariante Merkmale bezüglich Rotation, Translation, Skalierung, Änderung der Lichtverhältnisse und teilweiser affiner Verzerrung beinhalten. Dabei ermöglichen die robusten Merkmalseigenschaften eine Wiedererkennung von Merkmalen in perspektivisch unterschiedlichen Kameraaufnahmen. Mit dieser eindeutigen Merkmalszuordnung kann ein Gegenstand identifiziert, lokalisiert und letztendlich bewegt werden.

Carsten Fries

Title of the paper

Camera-articulated robot for object identification, localization and manipulation

Keywords

object detection, localization, SURF, SIFT, feature extraction, manipulator-arm

Abstract

This work focuses on an approach for the autonomous identification, location and manipulation of objects. This approach is based on a camera-articulated robot. The camera images include features which are invariant to rotation, translation, scale, illumination changes and partially invariant to affine distortion. These characteristics allow features to be recognized in different perspective images. This leads to the resolution that objects can be identified, located and manipulated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	1
1.2	Zielsetzung	2
2	Vergleichbare Arbeiten	3
2.1	Sensorbasierte Methoden	3
2.2	Bildbasierte Methoden	3
2.2.1	Markerbasierte Verfahren	4
2.2.2	Markerlose Verfahren	5
3	Vorgehensweise	6
3.1	Kamerakalibrierung	7
3.2	Modellbasierte Posenbestimmung	7
3.2.1	Initiale Bestimmung von Weltpunkten	7
3.2.2	Weltpunkte aus weiteren Aufnahmen	9
3.2.3	Berechnung der Pose	9
3.3	Manipulation von Gegenständen	9
4	Risiken	10
5	Zusammenfassung und Ausblick	10
	Abbildungsverzeichnis	11
	Quellenverzeichnis	12

1 Einleitung

1.1 Stand der Technik

Die bis heute rasante technologische Entwicklung führte zu einer zunehmenden Anzahl an existierenden Assistenzrobotern. Sie kommen für unterstützende Tätigkeiten wie Handlings-, Pick & Place-, Manipulations-, Prüf- und Nachbearbeitungsaufgaben zum Einsatz. Dabei werden die Tätigkeiten ortsfest, portabel oder mobil und gegebenenfalls autonom durchgeführt. Portable und mobile Roboter sind nicht auf einen Aufstellungsort beschränkt, welches einen größeren Einsatzort mit sich bringt. Roboter bieten im Vergleich zu Menschen konstante Fähigkeiten im Bereich der Präzision, Geschwindigkeit, Kraft und Ausdauer. In der Industrie ist dabei die Kostenreduktion bei gleichzeitiger Produktivitätssteigerung ein wichtiges Kriterium für den ansteigenden Einsatz von Assistenzrobotern (HELMS UND MEYER, 2005). Immer verbreiteter wird der Fokus auf autonome sensorbasierte Roboter gelegt. Sie können mehr als lediglich fest einprogrammierte Handlungsabläufe auszuführen. Messbare physikalische und chemische Eigenschaften wie Wärmestrahlung, Temperatur, Feuchtigkeit, Druck, Schall, Helligkeit oder Beschleunigung werden über Sensoren erfasst, bewertet und führen zu einer den Umwelteinflüssen angemessenen Reaktion (SCHRAFT U. A., 2004).

Häusliche Assistenzroboter finden heutzutage vermehrt Gebrauch. Ein Haushaltsroboter benötigt für seine einwandfreie Verwendung u.a. Verfahren zur häuslichen Navigation. Beispielsweise müssen dafür Hindernisse erkannt und umfahren werden. Dabei liefern Sensoren wichtige Informationen zur Erstellung und Aktualisierung von Umgebungskarten. Diese dienen zur Selbstlokalisierung sowie zur Routenplanung innerhalb des Arbeitsbereiches. Dies ermöglicht unter anderem Serviceleistungen wie Staubsaugen, Fensterreinigung, Wegführung, Such- und Bringdienste. Des Weiteren kann ein Assistenzroboter als Mensch-Maschine-Schnittstelle eingesetzt werden. Beispielhaft fordert eine videobasierte Personen- und Gestenerkennung einen Assistenzroboter zu festgelegten Reaktionen auf. So können gefährliche Situationen wie Personenstürze oder akustische Notrufe wahrgenommen und auf diese schnell und effizient reagiert werden. Der Einsatz einer künstlichen Haut, bei der die Interaktion über Berührungen stattfindet, stellt eine weitere Interaktionsmöglichkeit dar (FRAUNHOFER IPA, 2009).

Das Institut für Neuroinformatiker der Ruhr-Universität Bochum entwickelt seit über zehn Jahren einen autonomen Assistenzroboter namens *Cooperative Robot Assistant* (CoRA). Eine schwenk- und neigbare Stereokamera ermöglicht das Erkennen und Lokalisieren eines angelernten Gegenstandes. Nachdem die relative räumliche Position des Gegenstandes bekannt geworden ist, kann dieser mit einer Zwei-Finger-Hand gegriffen werden. Dabei besitzt der ortsfeste Roboter sieben Freiheitsgrade und eine Sprachschnittstelle, sodass Befehle über ein Mikrofon aufnehmbar sind. Eine weitere Fähigkeit ist die vorhandene künstliche Haut, welche Berührungen wahrnimmt (SCHRAFT U. A., 2004).

Die Anwendungsbreite von Assistenzroboter reicht noch viel weiter hinaus. Aufgrund der rasant ansteigenden technologischen Erfolge ist davon auszugehen, dass sich in der Zukunft die Assistenzroboter weiter verbreiten und in neue Anwendungsbereiche etablieren werden.

Weitere Informationen über den Praxiseinsatz von Assistenzrobotern finden sich in HELMS UND MEYER (2005), ICHBIAH (2005) und NEURONICS AG (2010).

1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit ist eine autonome Identifizierung, Lokalisierung und Mobilisierung von Gegenständen zu entwickeln. Dabei soll der Lösungsansatz auf Basis von Bildmerkmalen realisiert werden. Für ein derartiges Vorhaben müssen die Merkmale in perspektivisch unterschiedlichen Aufnahmen eindeutig wiedererkennbar sein. In dem Fall, dass ein Merkmal falsch klassifiziert wird, beeinflusst dies die Identifizierung und nachfolgend die Lokalisierung erheblich. Aus diesem Grund ist eine falsche Merkmalszuordnung auszuschließen.

Damit Gegenstände auch aus perspektivisch unterschiedlichen Blickwinkeln identifiziert und lokalisiert werden können, muss eine Kamerabewegung möglich sein. Des Weiteren muss für eine 3D-Rekonstruktion die Kamera oder der Gegenstand bewegbar sein. Einerseits für die Kamerabewegung und andererseits zur Mobilisierung von Gegenständen soll der 4 kg leichte Katana-Greifarm der Firma Neuronics (NEURONICS AG, 2010) zum Einsatz kommen. Aufgrund dessen sind die nachfolgend aufgelisteten Eigenschaften des Roboters zu beachten. Dabei entspricht die maximale Bewegungsgeschwindigkeit einer Bewegung von einem Meter pro Sekunde.

- Bewegungsgeschwindigkeit von 90° pro Sekunde
- Maximale Nutzlast von 500 g
- Am Endeffektor montierte Kamera mit einem Weitwinkelobjektiv
- Ortsgebundener Roboterarm mit einem Bewegungsradius von 60 cm

Eine weitere Bedingung ist die Position des zu greifenden Gegenstandes. Ein Gegenstand muss sich im sichtbaren und greifbaren Umfeld des Greifarmes befinden. Für den Greifvorgang ermöglicht ein montierter Winkelgreifer das Greifen von Gegenständen. Dieser besteht aus zwei Fingern, welche mit Infrarot-, Kraft-, Leitfähigkeitssensoren und *Encoder*n für die Greiferöffnung bestückt werden können.

Die nachfolgende Abbildung 1.1 veranschaulicht die gesamt zu behandelnde Problemstellung. Die Grafik 1.1A stellt die Ausgangsposition des Roboters dar. Es soll der rot-dargestellte Gegenstand erkannt, lokalisiert und bewegt werden. Die türkis-markierte Kamera liefert Bildinformationen. Diese Aufnahmen ermöglichen das Identifizieren und Lokalisieren des Gegenstandes, sodass sich der Knickarmroboter in die Zielposition 1.1B bewegen und den Gegenstand im anschließenden greifen kann.

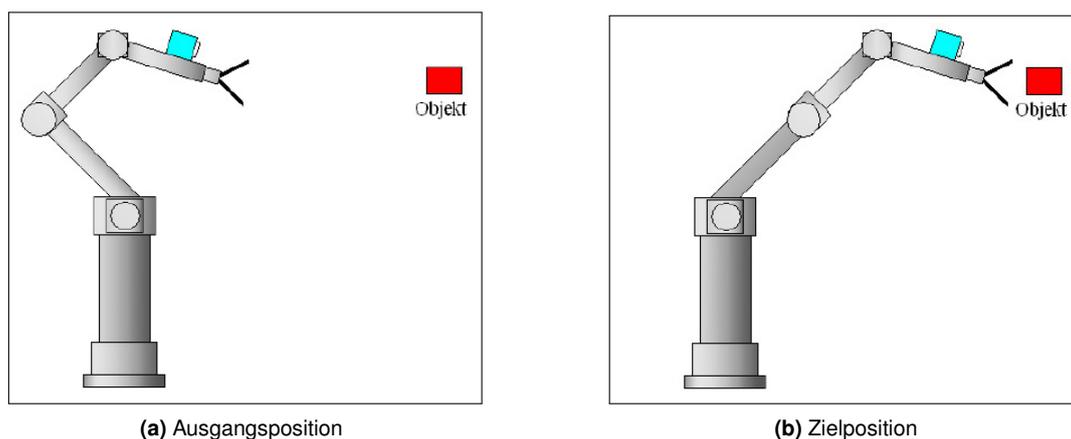


Abbildung 1.1: Identifizieren, Lokalisieren und Greifen eines Gegenstandes. (WAGNER, 2009B)

2 Vergleichbare Arbeiten

Inhalt

2.1	Sensorbasierte Methoden	3
2.2	Bildbasierte Methoden	3
2.2.1	Markerbasierte Verfahren	4
2.2.2	Markerlose Verfahren	5

In diesem Kapitel werden bestehende Lösungsansätze vorgestellt und verglichen. Anmerkend sei erwähnt, dass die Identifizierung zur Lokalisierung gehört und das Wissen über die räumliche Lage eine Mobilisierung ermöglicht. Aus diesem Grund ist in diesem Kapitel das Augenmerk auf die Posenbestimmung gelegt. Dabei beschreibt eine Pose die räumliche Lage eines Gegenstandes relativ zu einem Bezugspunkt, wie beispielsweise einer Kamera.

Die bestehenden Verfahren zur Posenbestimmung werden nach MÜCKE (2007) in sensorbasierte- und bildbasierte Methoden eingeordnet. Die nachfolgenden zwei Unterkapitel gehen auf diese ein.

2.1 Sensorbasierte Methoden

Bei der sensorbasierten Posenbestimmung wird mit ein oder mehreren Sensoren gearbeitet. Unter anderem können diese magnetisch, akustisch, funkbasiert oder inertial sein. Beispielsweise ist ein funkbasiertes Verfahren das globale Navigationssatellitensystem namens *Global Positioning System* (GPS). GPS basiert auf 24 weltumfassend verteilten Satelliten, welche über die Atomzeit synchronisiert sind. Diese versenden in kontinuierlich zeitlichen Abständen Nachrichten, die von GPS-Empfängern entgegengenommen werden. Dabei beinhaltet eine Nachricht z.B. die Satellitenkennung, den Sendezeitstempel und die Satellitenposition. Als erstes berechnet ein Empfänger aus dem mitgesandten Sende- und dem eigenen Empfangszeitstempel die Laufzeit der Nachricht. Anschließend lässt sich aus der Laufzeit und der bekannten Übertragungsgeschwindigkeit die Entfernung zum Satelliten berechnen. Abschließend ist die Empfängerposition durch eine Triangulierung zu bestimmen, indem mehrere Satellitennachrichten ausgewertet werden (BRAUER, 2010). Dabei ist eine Lokalisierungsgenauigkeit von einem Meter möglich. Allerdings kann durch geeignete Differenzverfahren eine Genauigkeit von einem Zentimeter erzielt werden. Dies führt zu dem sogenannten *Differential Global Positioning System* (DGPS) (GLEASON UND GEBRE-EGZIABHER, 2009). Die Kommunikation mit einem GPS-Satelliten ist in Räumen bzw. Gebäuden oftmals problematisch. Die GPS-Signale sind üblicherweise zu schwach um Wände und Decken störungsfrei zu durchdringen. Aus diesem Grund werden seit ein paar Jahren Verfahren weiterentwickelt, die Signale auf Basis der *Ultra-Breitband-Technologie* (UWB) aussenden und empfangen (RUWANPURA U. A., 2010).

Eine detaillierte Übersicht über sensorbasierte Verfahren sind in TEGTMEIER (2006) zu finden.

2.2 Bildbasierte Methoden

Die bildbasierten Methoden unterteilen sich in markerbasierte und markerlose Verfahren. Diese verwenden eine oder mehrere Kameras und sind aus diesem Grund üblicherweise preisgünstiger als die sensorbasierten Verfahren aus Kapitel 2.1. Die bildbasierten Verfahren berechnen eine Pose anhand von Punktkorrespondenzen in perspektivisch unterschiedlichen Bildern. Dabei unterscheiden sich die Verfahren in der Detektion von künstlichen-

oder natürlichen Bildmerkmalen sowie deren Korrespondenzsuche. Im Nachfolgenden werden markerbasierte- und markerlose Verfahren vorgestellt.

2.2.1 Markerbasierte Verfahren

Bei den markerbasierten Verfahren finden künstliche Marker Verwendung. Dabei ist die Geometrie und Textur eines Markers bekannt. Die Abbildung 2.1 veranschaulicht drei Arten von künstlichen Markern. Ein einfacher Marker zeigt die Grafik 2.1A. Dieser besitzt eine weiße Grundfläche auf der ein schwarzer Rahmen aufgedruckt ist. Die jeweils vier äußeren und inneren Ecken sind die Merkmale, welche in jeder Kameraaufnahme zur Korrespondenzfindung gesucht werden. Es gibt mehrere Methoden die Bildposition der Eckpunkte zu bestimmen (JÄHNE, 2005)(SCHARR, 2000). Einen Ansatz beschreibt FRIES UND SCHUHFUSS (2010)(S.42-49). Zu erst werden alle Kanten in der Kameraaufnahme gesucht. Dafür kann der Canny-Algorithmus zum Einsatz kommen (CANNY, 1986). Dieser erzeugt aus einem Grauwertbild ein Kanten- und Gradientenrichtungsbild. Anschließend bestimmt die Hough-Transformation die Position und Ausrichtung jeder Kantengerade. Dabei definiert die Geradensteigung ob es sich um eine vertikale oder horizontale Linie handelt. Zu Letzt gibt jeder Schnittpunkt einer vertikalen mit einer horizontalen Gerade Aufschluss über die gesuchten acht Kantenpositionen im Bild. An dieser Stelle angelangt fehlt jedoch noch die Information um welchen Kantenpunkt es sich handelt. Denn wenn die Ecken nicht eindeutig identifizierbar sind, lassen sich keine Korrespondenzen zwischen Bildern ermitteln. Aus diesem Grund besitzt der Marker noch eine weitere Bezugsquelle innerhalb des schwarzen Rahmens. Dort befindet sich beispielsweise ein Wort, welches erkannt wird und anschließend die Indizierungsreihenfolge der Ecken festlegt (FIALA, 2005).

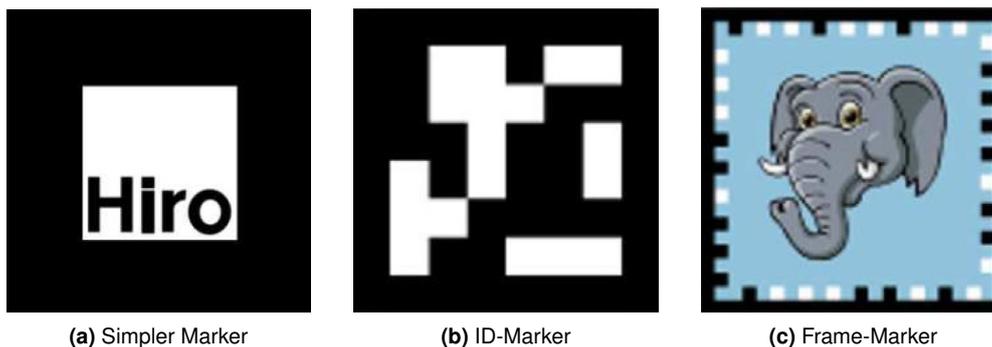


Abbildung 2.1: Drei typische künstliche Marker. (MAIERO, 2009)

Die Grafik 2.1B besitzt im Gegensatz zum einfachen Marker eine binäre Kodierung. Ein solches Bitmuster ermöglicht eine schnelle und zuverlässige Indizierung der Eckpunkte. In der Grafik 2.1C ist der sogenannte Frame-Marker abgebildet. Dieses beinhaltet kein Bitmuster im Inneren des Markers. Die Binärkodierung des Markers befindet sich lediglich am Innenrand. Dabei besitzt jeder Rand neun Quadrate, welche entweder schwarz oder weiß sind. Insgesamt verfügt damit ein Marker über $4 \cdot 9 = 32$ Quadrate, wobei jeweils neun eine Ecke indizieren. Daraus ergeben sich $2^9 = 512$ Kombinationsmöglichkeiten zur Indizierung. Ein Vorteil bei diesem Marker ist die Invarianz gegenüber einer Teilverdeckung. Denn Quadrate werden im Uhrzeigersinn interpretiert, sodass lediglich eine vollständige Seite mit jeweils den neun Quadraten detektiert werden muss, um alle vier Ecken zu indizieren. Im Inneren des Markers kann gegebenenfalls eine Grafik eingebettet werden. Dies ist jedoch nicht notwendig und wird im Allgemeinen im Detektionsalgorithmus nicht berücksichtigt. WAGNER U. A. (2008) evaluierte den Frame-Marker auf einem Smartphone, dass mit einem 400 MHz Prozessor und einer Kamera mit einer 320 x 240 Bildauflösung ausgestattet war. Dabei wurden die Kanten in einer Kameraaufnahme in 0.9 ms extrahiert. Insgesamt konnte ein Marker mit seinen Merkmalen in einer Zeit von 4.1 ms erkannt werden.

Es existieren noch weitere Marker, wie beispielsweise der Split- oder Dot-Marker. Detaillierte Informationen sind in FIALA (2005) und WAGNER U. A. (2008) zu finden.

Wie bereits auf Seite 3 erwähnt, findet die relative Lokalisierung anhand von Punktkorrespondenzen in perspektivisch unterschiedlichen Bildern statt. Die Kanten eines Markers werden eindeutig identifiziert, was zu einer

fehlerfreien Korrespondenzsuche führt. Eine abschließende Triangulierung bestimmt die Translation und Rotation zwischen Kamera und Marker.

Der Vorteil der Verwendung von Markern liegt in der Wiedererkennungsrate und deren Positionsberechnung. Ein im Kamerabild sichtbarer Marker wird schnell und korrekt wiedererkannt. Aufgrund der bekannten Markergeometrie ist eine sehr genaue Kantenposition bestimmbar. Diese genannten Eigenschaften führen zu fehlerfreien Korrespondenzen. Der große Nachteil des markerbasierten Ansatzes ist das manuelle Anbringen des Markers an den Gegenständen. Je nachdem wie viele Marker benötigt sind, kann dies sehr aufwendig werden (KATO UND BILLINGHURST, 1999).

2.2.2 Markerlose Verfahren

Die Nachteile des markerbasierten Ansatzes sind bei den markerlosen Verfahren nicht vorhanden. Diese arbeiten mit natürlichen Markern, welche jeder Gegenstand bzw. jedes Objekt besitzt. Dies können Ecken, Kanten, Flächen, Konturen oder Nachbarschaftsinformationen bzgl. eines Pixels sein. Jede Kameraaufnahme enthält abhängig von Aufnahme und Auflösung eine Vielzahl von natürlichen Markern. Die Schwierigkeit ist die Berechnungsdauer und die eindeutige Identifizierung. Zahlreiche Forschungsergebnisse haben jedoch gezeigt, dass eine falsche Zuordnung von natürlichen Markern in einem adäquaten Berechnungsaufwand fast vermieden werden kann (LOWE, 2004)(HOFMANN, 2009).

Der sogenannte *Harris Corner Detector* erschien erstmals in HARRIS UND STEPHENS (1988). Mit diesem ist es möglich die Ecken in einem Bild zu extrahieren. Lediglich die Ecken ohne Zusatzinformationen zu verwenden, ist jedoch durch ihre schlechte Unterscheidbarkeit nicht als wiedererkennbares Merkmal geeignet. Dagegen wurde 2004 ein Verfahren namens *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) veröffentlicht, welches eine gute Merkmalsdetektion besitzt. Diese Merkmale verfügen über eine große Invarianz gegenüber Rotation, Translation, Belichtung und Verzerrung, und können damit gut in unterschiedlichen Bildern wiedererkannt werden (LOWE, 2004). Ein weiterer Merkmalsdetektor wurde in BAY U. A. (2008) veröffentlicht, welcher ähnliche Eigenschaften wie die SIFT-Merkmale besitzt. Gleichmaßen wie SIFT arbeitet dieser mit Nachbarschaftsinformationen von einzelnen Bildpunkten.

In WAGNER (2009A) wird das sogenannte *2D Visual Servoing*-Verfahren, zur Lösung der in dieser Arbeit gestellten Problemstellung, beschrieben. Dieses Verfahren arbeitet grundlegend in Abhängigkeit einer Regelung und wird im Folgenden erläutert.

Eine am Roboter-Endeffektor montierte Kamera nimmt in kontinuierlichen Abständen Aufnahmen auf. Dabei enthält eine Aufnahme den zu lokalisierenden sowie mobilisierenden Gegenstand.

Das Verfahren basiert auf einer vorab gespeicherten Zielansicht, aus der mindestens acht Gegenstandsmerkmale als Sollgröße festzulegen sind. Damit setzt sich die Zielansicht durch die Orientierung von mindestens acht bekannten Gegenstandsmerkmalen (Siehe Merkmale, Detektion sowie Merkmalsvergleich ab S. 7) zusammen. Diesbezüglich besteht eine Merkmalsorientierung aus einer x- und y-Bildkoordinate. Aus Sicherheitsgründen wurden in WAGNER (2009A) 16 bekannte Merkmale detektiert und als Zielansicht definiert.

In der Regelung ist die Sollgröße die Orientierung der bekannten Merkmale aus der Zielansicht. Die Istgröße ist die aktuelle Orientierung dieser Merkmale. Die Differenz der Ist- und Sollgröße gibt die momentane Regelabweichung an. Aus der Regelabweichung wird die Bewegung des Knickarmroboters in Richtung zur Zielansicht abgeleitet. Für die Berechnung der Roboterbewegung wird dabei ein Regelgesetz aus CHAUMETTE UND HUTCHINSON (2006) verwendet. Die Bewegung wird in Geschwindigkeiten bezüglich des Knickarm-Basiskoordinatensystems angegeben, wobei sich das Basiskoordinatensystem im Fuß des Roboters befindet. Die Regelabweichung wird dabei im Verlauf minimiert. Der Knickarmroboter nähert sich dadurch der Zielansicht (Regelabweichung ≈ 0) an und lokalisiert letztendlich den gesuchten Gegenstand.

Befindet sich die Zielansicht jedoch zu weit von der Startansicht entfernt, kann das Verfahren instabil werden. Die Instabilität wirkt sich mit einer Entfernung zum gesuchten Gegenstand aus (Vgl. CHAUMETTE UND HUTCHINSON (2006)). Wenn die Verdrehung der Kamera um die optische Achse zwischen der Start- und Zielpose zu groß ist, dann führt dies zur gleichen Problematik.

Das Problem kann durch eine Triangulation von Merkmalskorrespondenzen behoben werden. Denn mit Hilfe einer Triangulation kann der zu zwei Merkmalskorrespondenzen zugehörige Raumpunkt berechnet werden. Sind die Raumpunkte der Merkmale bekannt, kann mit einer 3D-2D-Korrespondenz die Kameraentfernung zum Gegenstand berechnet werden. Für diese Berechnung ist die *Direkt Linear Transformation* (DLT) zu verwenden. Die Kenntnis über die Entfernung ermöglicht eine Überprüfung ob sich die Kamera, im Gegensatz zur letzten Aufnahme, zum gesuchten Gegenstand entfernt oder angenähert hat.

Der Vorteil eines solchen Regelkreises ist die kontinuierliche Korrektur der aktuellen Roboterposition. Dies führt zu einer sehr genauen Lokalisation eines gesuchten Gegenstandes. Des Weiteren ist das Verfahren robust gegenüber Kalibrierungsungenauigkeiten.

Weitere Informationen über das *2D Visual Servoing*-Verfahren sind aus WAGNER (2009A) und CHAUMETTE UND HUTCHINSON (2006) zu entnehmen.

Im Gegensatz zum Visual-Servoing-Verfahren wurde in EBERT (2009) ein modellbasierter Ansatz zur Posenbestimmung untersucht. Bei dieser Methode wird in einem initialen Vorgang ein 3D-Modell von einem Gegenstand erstellt. Dafür wird eine monokulare Kamera und ein Stereoalgorithmus verwendet, welcher in perspektivisch unterschiedlichen Aufnahmen Korrespondenzen von künstlichen SIFT-Markern (Bildmerkmale) sucht und trianguliert. Das Modell ist dabei ein rekonstruiertes Oberflächenmodell bestehend aus 3D-Punkten und natürlichen Markern. Jeder Oberflächenpunkt wird somit über die natürlichen Marker identifiziert. Das 3D-Merkmalmodell ermöglicht in einem aktiven Prozess die relative Lokalisierung zwischen einer Kameraaufnahme und dem Gegenstand. Dafür wird eine Aufnahme auf natürliche Marker untersucht. Die gefundenen Marker werden anschließend mit den Markern des 3D-Merkmalmodells verglichen. Abschließend führt die Korrespondenzmenge unter Verwendung der DLT zu der gesuchten relativen Pose. Alternativ wurde ein lineares Optimierungsverfahren zur robusteren Posenschätzung verwendet.

Der entwickelte Lösungsansatz benötigt eine kalibrierte Kamera. Da eine Falschzuordnung von SIFT-Merkmalen nicht ausgeschlossen werden konnte, erfolgt während der Modellerstellung ein manueller Benutzereingriff. Dabei wird die erste Schätzung der Epipolargeometrie durch eine manuelle Selektion von Merkmalskorrespondenzen fehlerfrei realisiert. Einen ähnlichen modellbasierten Ansatz verfolgte LEPETIT UND FUA (2005) ohne manuellen Eingriff.

3 Vorgehensweise

Inhalt

3.1	Kamerakalibrierung	7
3.2	Modellbasierte Posenbestimmung	7
3.2.1	Initiale Bestimmung von Weltpunkten	7
3.2.2	Weltpunkte aus weiteren Aufnahmen	9
3.2.3	Berechnung der Pose	9
3.3	Manipulation von Gegenständen	9

In diesem Kapitel ist die Vorgehensweise, zur merkmalsbasierten Erfassung, Lokalisierung und Manipulation von Gegenständen, beschrieben.

Aufgrund des zu verwendenden Weitwinkelobjektivs sind die Aufnahmen bei der verwendeten Kamera stark verzerrt. Für den nachfolgenden Lösungsansatz ist es jedoch notwendig, dass die tonnenförmige Linsenver-

zeichnung für die Merkmalspunkte¹ herausgerechnet wird. Würde keine Entzerrung stattfinden, könnten die Merkmalspunkte nur schwer in anderen Aufnahmen wiedererkannt werden. Aus diesem Grund beschreibt das nachfolgende Kapitel 3.1 die Kalibrierung einer Kamera. Anschließend beschreiben die Kapitel 3.2 und 3.3 die Identifizierung, Lokalisierung und Bewegung von Gegenständen auf Basis eines 3D-Merkmalmodells.

3.1 Kamerakalibrierung

Der Lösungsansatz basiert auf den bekannten intrinsischen Kameraparametern. Oftmals sind diese vom Hersteller bekannt. Aufgrund der abweichenden Kameraparameter innerhalb der gleichen Baureihe ist eine Kalibrierung dennoch notwendig. Aus diesem Grund wird mit einer Kalibrierung sichergestellt, dass die intrinsischen Kameraparameter spätere Berechnungen nicht verfälschen.

Die intrinsischen Parameter beschreiben die interne Geometrie einer Kamera und somit Eigenschaften wie Brennweite, Bildhauptpunktverschiebung, Pixelskalierung und Linsenverzeichnung.

Dass in Matlab implementierte Kalibrierverfahren *Camera Calibration Toolbox* (BOUGUET, 2008) kann u.a. für die Kalibrierung verwendet werden. Es basiert auf einem bekannten Kalibrierkörper, welches ein Schachbrettmuster darstellt. Für den Kalibriervorgang sind mindestens zwei, jedoch möglichst viele Aufnahmen aus verschiedenen Perspektiven des Kalibrierkörpers aufzunehmen. Anhand dieser perspektivisch unterschiedlichen Aufnahmen werden die intrinsischen Kameraparameter berechnet.

3.2 Modellbasierte Posenbestimmung

Die modellbasierte Posenbestimmung basiert auf einem bekannten 3D-Merkmalmodell, welches für jeden Gegenstand erstellt werden muss. Das Ergebnis der modellbasierten Posenbestimmung führt zur relativen räumlichen Orientierung zwischen einem Gegenstand und einer Kamera. In den nachfolgenden drei Unterkapiteln wird die Posenbestimmung erläutert.

3.2.1 Initiale Bestimmung von Weltpunkten

Sind die intrinsischen Kameraparameter bekannt, können die ersten 3D-Oberflächenpunkte eines Gegenstandes ermittelt werden. 3D-Oberflächenpunkte werden im Folgenden als sogenannte *Weltpunkte* bezeichnet. Für die Berechnung der ersten Weltpunkte sind zunächst zwei perspektivisch unterschiedliche Ansichten eines Gegenstandes aufzunehmen. Diese werden auf robuste Merkmale und Korrespondenzen zwischen den beiden Kameraaufnahmen untersucht.

3.2.1.1 Suche nach Merkmalskorrespondenzen

Die skaleninvariante Merkmalsextraktion (engl. Scale-invariant feature transform, kurz SIFT)² und SURF (engl. Speeded Up Robust Features)³ sind zwei gebräuchliche Verfahren zur Suche nach robusten Merkmalen, welche eine Invarianz bezüglich Rotation, Translation, Skalierung, Änderung der Lichtverhältnisse und teilweiser affiner Verzerrung aufweisen.

¹Ein Merkmalspunkt ist ein robuster Punkt im Kamerabild, welcher in unterschiedlichen Bildern anhand von Nachbarschaftsinformationen wiedererkannt werden kann (FRIES, 2009).

²Veröffentlichung des SIFT-Algorithmus: LOWE (1999)

Weiterentwicklungen sind in LOWE (2001), BROWN UND LOWE (2002) und LOWE (2004) beschrieben.

³Wurde erstmals in BAY U. A. (2006B) veröffentlicht. SURF besitzt im Vergleich zu SIFT einen ähnlichen Algorithmus. Er hat jedoch einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil. Dieser wird durch eine effizientere Suche nach Merkmalskandidaten erzielt. Detaillierte Informationen bezüglich SURF sind in BAY U. A. (2006A) und BAY U. A. (2008) zu finden.

Ein Merkmal beschreibt einen markanten Punkt in einem Bild. Das Merkmal besteht aus einem Merkmalsvektor, einer Hauptorientierung und der Bildkoordinate des markanten Punktes. Ein Merkmalsvergleich zwischen zwei Ansichten kann anhand des kleinsten euklidischen Abstands bezüglich der Merkmalsvektoren durchgeführt werden (FRIES, 2009). Die nachfolgende Abbildung 3.1 stellt ermittelte Merkmalskorrespondenzen dar.

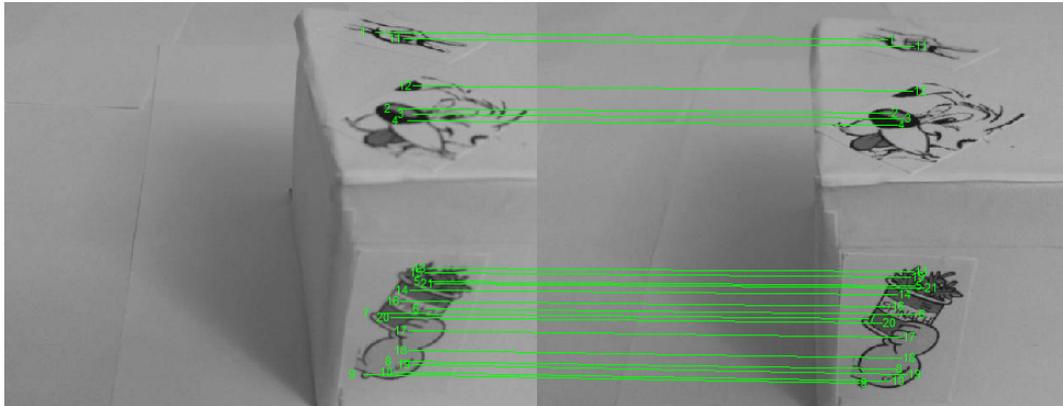


Abbildung 3.1: Merkmalskorrespondenzen zwischen zwei perspektivisch unterschiedlichen Aufnahmen.

3.2.1.2 Berechnung der Fundamentalmatrix

Nehmen zwei voneinander abweichend positionierte Kameras ein Objekt im dreidimensionalen Raum auf, entstehen zwei unterschiedliche zweidimensionale Bilder. Die Fundamentalmatrix F beschreibt die relative Orientierung zwischen diesen Bildern.

Mit Hilfe des 8-Punkte-Algorithmus⁴ kann die Fundamentalmatrix berechnet werden (HARTLEY UND ZISSERMAN, 2004). Das RANSAC-Verfahren⁵ wird gängigerweise herangezogen, um die Fundamentalmatrix mit Hilfe der verfügbaren Merkmalskorrespondenzen und dem 8-Punkte-Algorithmus optimal zu schätzen. Bei dieser Schätzung der Fundamentalmatrix werden, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit, alle Fehlzuordnungen aufgedeckt. Diese falschen Merkmalskorrespondenzen werden als *Outlier* bezeichnet. Dagegen besitzen sogenannte *Inlier* eine richtige Zuordnung.

3.2.1.3 Bestimmung der Projektionsmatrizen

Eine Projektionsmatrix bildet 3D-Weltpunkte auf 2D-Bildpunkte einer Kameraaufnahme ab. Die Projektionsmatrix kann anhand der ermittelten Fundamentalmatrix, den intrinsischen Kameraparametern und den Merkmalskorrespondenzen berechnet werden. Dafür wird die Fundamentalmatrix zusammen mit den intrinsischen Kameraparametern zu einer sogenannten *Essentialmatrix* erweitert (EBERT, 2009). Anschließend können die Projektionsmatrizen P_1 und P_2 der ersten beiden Kameraaufnahmen, auf Basis der Singulärwertzerlegung⁶, ermittelt werden.

3.2.1.4 Berechnung von 3D-Weltpunkten

Sind die Projektionsmatrizen P_1 und P_2 vorhanden, kann der dreidimensionale Ursprung für alle Merkmalskorrespondenzen zurückgerechnet werden. Dafür sind mit Hilfe der Projektionsmatrizen die Merkmalskorrespon-

⁴Der 8-Punkte-Algorithmus wurde erstmals in LONGUET-HIGGINS (1981) vorgestellt. Dieser benötigt mindestens acht korrespondierende Punkte zwischen zwei Bildern. An dieser Stelle sei auf den 7-Punkte-Algorithmus verwiesen, welcher lediglich sieben Korrespondenzen benötigt (HARTLEY UND ZISSERMAN, 2004).

⁵RANSAC steht für *RANdom SAmple Consensus*. Detaillierte Informationen bezüglich des RANSAC-Verfahrens sind in RODEHORST (2004) ab S. 143 zu finden.

⁶Die Singulärwertzerlegung (engl. *Singular Value Decomposition*, kurz SVD) ist in RODEHORST (2004) auf S. 151 beschrieben.

denzen zu triangulieren. Die Triangulation erfolgt durch eine Minimierung des Rückprojektionsfehlers eines 3D-Weltpunktes zu seinen zwei Bildpunkten (EBERT, 2009). Das Ergebnis der Triangulation sind die gesuchten ersten 3D-Weltpunkte von einem Gegenstand.

Des Weiteren sind jedem 3D-Weltpunkt seine Merkmale zugeordnet. Dies ermöglicht in einem späteren Merkmalsvergleich, welcher zwischen zwei Bildern durchgeführt wird, dass der dreidimensionale Ursprung und damit die räumliche Lage eines Merkmales bekannt ist.

3.2.2 Weltpunkte aus weiteren Aufnahmen

Für einen hohen Wiedererkennungsgrad eines Gegenstandes müssen Merkmale aus weiteren Aufnahmen in das bereits bestehende 3D-Merkmalmodell hinzugefügt werden. Dafür ist eine zu den ersten zwei Bildern (B_1, B_2) abweichende perspektivische Aufnahme B_3 aufzunehmen. Um neue Weltpunkte für das 3D-Merkmalmodell berechnen zu können, wird zuerst die Projektionsmatrix P_3 des aktuellen Bildes B_3 benötigt. Wird ein Merkmalsvergleich zwischen der Aufnahme B_3 und den Merkmalen aller Weltpunkte durchgeführt, dann kann auf Basis dieser 3D-Welt- zu 2D-Bild-Korrespondenzen die Projektionsmatrix P_3 berechnet werden. Die sogenannte *Direct Linear Transformation* (DLT) ermöglicht die Berechnung von P_3 mit Hilfe der 3D-2D-Korrespondenzen (EBERT, 2009).

Im Anschließenden sind die Merkmale zwischen der aktuellen Aufnahme B_3 und der vorherigen Aufnahme B_2 zu vergleichen. Alle Merkmalskorrespondenzen welche zu einem noch nicht vorhandenen Weltpunkt führen, sind mit dem Triangulationsverfahren zu berechnen.

Wenn viele Aufnahmen flächendeckend um einen Gegenstand herum aufgenommen wurden, ist ein komplettes 3D-Merkmalmodell von diesem Gegenstand möglich. Grundsätzlich gilt, je mehr Merkmale im 3D-Modell vorhanden sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die räumliche Lage eines Gegenstandes auf Basis eines Bildes berechnet werden kann.

3.2.3 Berechnung der Pose

Gesucht sei die Pose eines Gegenstandes in der räumlichen Umgebung des Knickarmroboters. Gegeben ist lediglich ein Kamerabild aus einer beliebigen Perspektive. Für die Ermittlung der Gegenstandsposition und -ausrichtung ist die einzige Bedingung, dass sich der Gegenstand im Kamerabild befinden muss. Ist diese Vorbedingung erfüllt, kann die Position eines Gegenstandes berechnet werden. Dafür sind zu Beginn die Merkmale der aktuellen Aufnahme mit dem 3D-Merkmalmodell zu vergleichen. Eine anschließende Berechnung der Projektionsmatrix mit den 3D-2D-Korrespondenzen erzielt die gesuchten Informationen bezüglich der Raumpose des Gegenstandes. Denn aus der Projektionsmatrix folgt die Rotation und Translation zwischen der Kamera (-aufnahme) und dem im Raum positionierten Gegenstand.

3.3 Manipulation von Gegenständen

Eine bekannte räumliche Gegenstandsposition ermöglicht das Greifen und Bewegen von diesem Gegenstand. Dafür wird ein individueller Greifvorgang durchgeführt. Dabei muss der Greifvorgang aufgrund unterschiedlicher Gegenstandsmaße individuell sein.

4 Risiken

Dieses Kapitel beschreibt zwei potentielle Gefahren, welche die Vorgehensweise aus Kapitel 3 beeinflussen könnten. Dabei wird die Eintrittswahrscheinlichkeit und der resultierende Schaden in drei Stufen *niedrig*, *mittel* oder *hoch* eingestuft.

Das erste Risiko ist eine zu geringe Lokalisierungsgenauigkeit. In dem Fall besteht die Gefahr, dass ein Greifvorgang nicht durchgeführt werden kann. Beispielsweise könnte der Greifer des Roboters bei einer zu ungenauen Lokalisierung den Gegenstand beschädigen. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Lokalisierung wäre eine Dimensionserhöhung der Merkmale, was jedoch zu einem deutlichen Geschwindigkeitsverlust führt. Eine andere Möglichkeit ist eine rein iterative Positionsbestimmung. Dabei sind iterative Verfahren fehlerunanfälliger. Nicht-iterative Verfahren besitzen dagegen einen Geschwindigkeitsvorteil. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des beschriebenen Risikos ist niedrig, führt allerdings zu einem hohen zeitlichen Aufwand für die Problembeseitigung.

Die zweite Gefahrensituation ist ein Hardwareschaden des Roboters. Dies würde für eine längere Dauer das Testen einer Software bzw. eines Programmausschnittes im Praxiseinsatz verhindern. In diesem Fall wird die Eintrittswahrscheinlichkeit und der resultierende Schaden als *mittel* eingestuft.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden vergleichbare Arbeiten, die angestrebte Vorgehensweise und deren Risiken für eine kamerabasierte Erkennung, Lokalisierung und Manipulation von Gegenständen beschrieben und untersucht.

Bei dem einzusetzenden Knickarmroboter handelt es sich um einen 4 kg leichten Katana-Greifarm. Dieser besitzt sechs Freiheitsgrade (inkl. Greifer) und kann ortsgebunden Tätigkeiten in einem Radius von 60 cm bewältigen. Für die Identifikation von Gegenständen ist eine Kamera notwendig. Diese wurde am Winkelgreifer des Roboters befestigt und liefert Grauwertbilder zu einem nah positionierten Computer.

Das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren basiert auf einem 3D-Merkmalmodell pro Gegenstand. Die einzelnen Schritte der Modellgenerierung wurden in Kapitel 3 beschrieben. Dazu gehört die benötigte Kalibrierung der verwendeten Kamera. Die aus der Kalibrierung gewonnenen intrinsischen Kameraparameter sind für die exakte Berechnung der Weltpunkte notwendig. Des Weiteren wurden zwei Methoden zur Merkmalsextraktion vorgestellt. Dabei hat sich das Verfahren zur skaleninvarianten Merkmalstransformation (*Scale-Invariant Feature Transform*) als sehr robust herausgestellt. Dagegen wies das sogenannte *Speeded Up Robust Features*-Verfahren einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil auf. Nach der Merkmalsextraktion wurde die Bestimmung von Weltpunkten erläutert. Diese beschreibt wie Weltpunkte aufgrund von Merkmalskorrespondenzen und den intrinsischen Kameraparametern zu bestimmen sind. Die berechneten Weltpunkte werden in einer Modelldatenbank (Merkmalsmodell) abgelegt. Dabei sind zu jedem Weltpunkt Merkmale, die einen Weltpunkt eindeutig identifizieren sollen, zugeordnet.

Auf Basis der Modellgenerierung kann ein Gegenstand in Kameraaufnahmen wiedererkannt werden. Des Weiteren ermöglicht eine Korrespondenzsuche zwischen Merkmalen in einer Kameraaufnahme und Merkmalen der Modelldatenbank die Lokalisierungs- und letztendlich die Manipulation eines Gegenstandes.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Identifizieren, Lokalisieren und Greifen eines Gegenstandes.	2
2.1	Typische künstliche Marker	4
3.1	Merkmalskorrespondenzen zwischen zwei perspektivisch unterschiedlichen Aufnahmen	8

Quellenverzeichnis

Literaturquellen

- [Bay u. a. 2008] BAY, Herbert ; ESS, Andreas ; TUYTELAARS, Tinne ; GOOL, Luc V.: Speeded-Up Robust Features (SURF). Computer Vision and Image Understanding, 2008
- [Bay u. a. 2006a] BAY, Herbert ; FASEL, Beat ; GOOL, Luc V.: Interactive Museum Guide: Fast and Robust Recognition of Museum Objects. Computer Vision Laboratory (BIWI), 2006
- [Bay u. a. 2006b] BAY, Herbert ; TUYTELAARS, Tinne ; GOOL, Luc V.: SURF: Speeded Up Robust Features. Computer Vision (ECCV), 2006. – ISBN 978-3-540-33832-1
- [Brauer 2010] BRAUER, Henrick: Entwicklung eines Augmented Reality Frameworks auf Basis von Kamera-basierten Trackingverfahren. Masterarbeit - Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2010
- [Brown und Lowe 2002] BROWN, Matthew ; LOWE, David G.: Invariant features from interest point groups. British Machine Vision Conference, 2002
- [Canny 1986] CANNY, F. J.: A Computational Approach to Edge Detection. 8 (1986), Nr. 6, S. 679–698
- [Chaumette und Hutchinson 2006] CHAUMETTE, Francois ; HUTCHINSON, Seth: Visual servo control, Part I: Basic approaches. IEEE Robotics and Automation Magazine 13, Nr. 4, S. 82-90, 2006
- [Ebert 2009] EBERT, Matthias: Modellbasierte Posebestimmung aus 2-D/3-D SIFT-Korrespondenzen. Diplomarbeit - Universität Koblenz, 2009
- [Fiala 2005] FIALA, Mark: ARTag, a Fiducial Marker System Using Digital Techniques. In: Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Volume 2 - Volume 02. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2005 (CVPR '05), S. 590–596. – ISBN 0-7695-2372-2
- [Fries 2009] FRIES, Carsten: Objekterkennung mit SIFT-Merkmalen. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2009
- [Fries und Schuhfuß 2010] FRIES, Carsten ; SCHUHFUSS, Martin: Realisierung eines 3D-Laserscanners: auf Basis der Lichtschnitttechnik. VDM Verlag Dr. Müller, 2010. – ISBN 9-783-63928153-8
- [Harris und Stephens 1988] HARRIS, Chris ; STEPHENS, Mike: A Combined Corner and Edge Detector. In: Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, 1988, S. 147–151
- [Hartley und Zisserman 2004] HARTLEY, Richard I. ; ZISSERMAN, Andrew: Multiple View Geometry in Computer Vision. Second. Cambridge University Press, 2004. – ISBN 0-521-54051-8
- [Helms und Meyer 2005] HELMS, E. ; MEYER, C.: Assistor - Mensch und Roboter rücken zusammen: Einsatz von sicheren und einfach bedienbaren Assistenzrobotern im Produktionsalltag. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung : Werkstattstechnik online, 2005 ISSN 1436-4980
- [Hofmann 2009] HOFMANN, Robert: Implementierung des SURF-Feature-Detektors auf der GPU mit Hilfe von CUDA. Universität Koblenz, 2009
- [Ichbiah 2005] ICHBIAH, Daniel: Roboter: Geschichte - Technik - Entwicklung. Knesebeck, 2005. – ISBN 3-896-60276-4

- [Jähne 2005] JÄHNE, Bernd: Digitale Bildverarbeitung. Springer, 2005
- [Kato und Billinghurst 1999] KATO, Hirokazu ; BILLINGHURST, Mark: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-Based Augmented Reality Conferencing System. In: Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 1999, S. 85–. – ISBN 0-7695-0359-4
- [Lepetit und Fua 2005] LEPETIT, Vincent ; FUA, Pascal: Monocular model-based 3D tracking of rigid objects. In: Found. Trends. Comput. Graph. Vis. 1 (2005), January, S. 1–89. – ISSN 1572-2740
- [Longuet-Higgins 1981] LONGUET-HIGGINS, Hugh C.: A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. University of Sussex, 1981
- [Lowe 1999] LOWE, David G.: Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. International Conference on Computer Vision, 1999
- [Lowe 2001] LOWE, David G.: Local Feature View Clustering for 3D Object Recognition. International Conference on Computer Vision, 2001
- [Lowe 2004] LOWE, David G.: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, 2004
- [Maiero 2009] MAIERO, Jens: Image-based Tracking. (2009)
- [Mücke 2007] MÜCKE, Florian E.: Analyse GPU-basierter Feature Tracking Methoden für den Einsatz in der Augmented Reality. (2007)
- [Rodehorst 2004] RODEHORST, Volker: Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion im Nahbereich durch Auto-Kalibrierung mit projektiver Geometrie. wvb Wissenschaftlicher Verlag Berlin, 2004. – ISBN 9-783-93684-683-6
- [Ruwanpura u. a. 2010] RUWANPURA, J. ; MOHAMED, Y. ; LEE, S. H.: Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice: Proceedings of the 2010 Construction Research Congress, May 8-10, 2010, Banff, Alberta, Canada. American Society of Civil Engineers, 2010. – ISBN 9-78078441-109-4
- [Scharr 2000] SCHARR, Hanno: Optimale Operatoren in der Digitalen Bildverarbeitung. 2000
- [Schraft u. a. 2004] SCHRAFT, Rolf D. ; HÄGELE, Martin ; WEGENER, Kai: Service-Roboter-Visionen. Hanser, 2004. – ISBN 9-783-44622840-5
- [Tegtmeier 2006] TEGTMEIER, André: Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie. Dissertation - Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2006
- [Wagner 2009a] WAGNER, Benjamin: Positionierung eines Roboterarms mittels bildbasierter Regelung. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2009
- [Wagner 2009b] WAGNER, Benjamin: Visuelle Regelung für einen Roboterarm. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2009
- [Wagner u. a. 2008] WAGNER, Daniel ; LANGLOTZ, Tobias ; SCHMALSTIEG, Dieter: Robust and unobtrusive marker tracking on mobile phones. In: Mixed and Augmented Reality, IEEE / ACM International Symposium on 0 (2008), S. 121–124. ISBN 978-1-4244-2840-3

Internetquellen

- [Bouguet 2008] BOUGUET, Jean-Yves: Camera Calibration Toolbox for Matlab. Stand: 02.06.2008. 2008. –
URL: [HTTP://WWW.VISION.CALTECH.EDU/BOUGUETJ/CALIB_DOC/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)
- [Fraunhofer IPA 2009] FRAUNHOFER IPA: Care-O-bot 3 Serviceroboter. Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung - Stand: 29.10.2009. 2009. –
URL: [HTTP://WWW.CARE-O-BOT.DE/](http://www.care-o-bot.de/)
- [Gleason und Gebre-Egziabher 2009] GLEASON, S. ; GEBRE-EGZIABHER, D.:
GNSS Applications and Methods. Artech House, 2009 (GNSS Technology and Applications). – URL
[HTTP://BOOKS.GOOGLE.DE/BOOKS?ID=JUXAE3SHQROC](http://books.google.de/books?id=juxae3shqroc). – ISBN 9-78159693-329-3
- [Neuronics AG 2010] NEURONICS AG: Neuronics AG - intelligent & personal robotics. Stand: 04.10.2010.
2010. –
URL: [HTTP://WWW.NEURONICS.CH/](http://www.neuronics.ch/)