



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

Ausarbeitung Anwendungen 2 -  
SoSe 2009  
Benjamin Wagner  
Visuelle Regelung für einen Roboterarm

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>7</b>
2.1 2-D Visual Servoing . . . . .	7
2.2 3-D Visual Servoing . . . . .	8
2.3 Fortgeschrittenes Visual Servoing . . . . .	8
2.3.1 Hybrid Visual Servoing . . . . .	8
2.3.2 Partitioned Visual Servoing . . . . .	9
2.3.3 Switched-system Visual Servoing . . . . .	10
2.3.4 Trajectory Planning . . . . .	11
2.3.5 Direct Visual Servoing . . . . .	11
2.4 Anwendungsbereiche . . . . .	12
<b>3 Konzept</b>	<b>12</b>
<b>4 Zusammenfassung</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>14</b>

### **Kurzzusammenfassung**

In dieser Ausarbeitung wird die Annäherung eines Roboterarms an einen bekannten sichtbaren Gegenstand auf Basis von Kameradaten behandelt. Ausgehend von einem Regelkreis als Lösungsansatz wird der Stand der Forschung auf dem Gebiet des Visual Servoing beschrieben. Weiterhin wird ein Konzept zur Lösung der Problemstellung für eine zukünftige Masterarbeit vorgestellt.

## 1 Einleitung

Ein Roboterarm, der über eine Kamera an seinem Endeffektor verfügt, soll sich einem bekannten sichtbaren Gegenstand nähern können (vgl. Abbildung 1 a und b). Die Zielpose des Endeffektors relativ zu einem Objekt ist im Gegensatz zur Startpose fest vorgegeben und beschreibt wie die Hand des Roboters in der Zielsituation zu einem Gegenstand stehen soll. Der Gegenstand kann dabei an einer beliebigen Stelle im Arbeitsraum des Roboters stehen. Der Kontext ist, dass ein Gegenstand anschließend von der Hand des Roboters manipuliert werden soll. Zum Beispiel könnte man ein Objekt greifen lassen und dieses an einer anderen Position im Arbeitsbereich des Roboters abstellen lassen. Allerdings wird die Manipulation von Gegenständen in dieser Ausarbeitung nicht weiter behandelt.

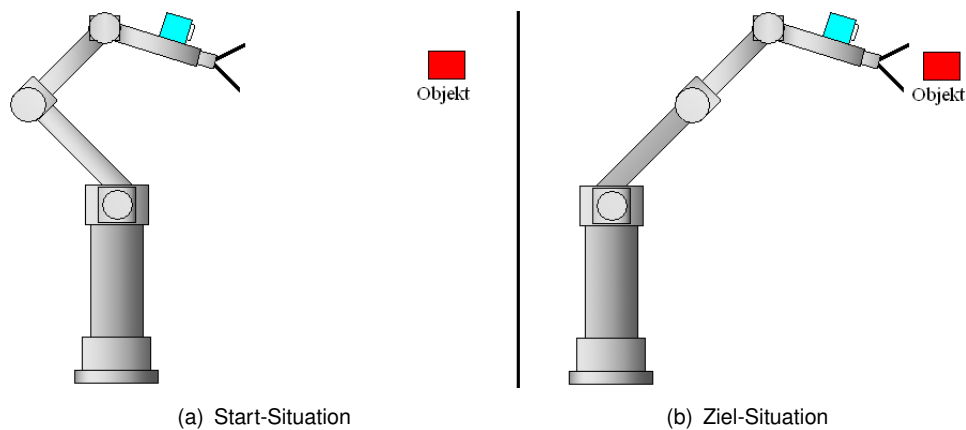


Abbildung 1: Problemskizze

Die Bewegung eines Roboterarms in eine vorgegebene Zielpose relativ zu einem Gegenstand auf Basis von Kameradaten kann durch eine direkte Steuerung realisiert werden (vgl. Abbildung 2). Die ausgewerteten Kameradaten werden im Steuerungsblock zusammen mit dem Wissen über das Objekt zur Berechnung von Steuersignalen für den Roboter verwendet. Die Annäherung des Roboters an das Objekt erfolgt danach in einem Schritt. Der Nachteil der laut [Hutchinson u. a. \(1996\)](#) dabei entsteht ist, dass die Endpose der Hand relativ zum Objekt von der vorgegebenen Zielpose abweichen kann.

Ein weiterer Lösungsansatz für die Problemstellung ist durch den Regelkreis in Abbildung 3 gegeben. Die ausgewerteten Kameradaten stellen die Ist-Größe im Regelkreis dar und werden vom Wissen über das Objekt, der Soll-Größe, in geeigneter Weise subtrahiert. Die daraus resultierende Abweichung von der Soll-Größe wird im Regler verwendet um die Grundlage zur Berechnung von Steuersignalen für den Roboterarm zu generieren. Die Annäherung des Roboters an den Gegenstand erfolgt hier nicht in einem Schritt. Stattdessen legt der Roboter

nur eine kurze Strecke in Richtung des Gegenstands zurück. Das beschriebene Vorgehen wird kontinuierlich wiederholt, bis die Differenz aus Objektwissen und verarbeiteten Kameradaten 0 beträgt. Der Roboter hat in diesem Fall die vorgegebene Zielpose relativ zum Gegenstand erreicht und muss sich nicht mehr bewegen. Der Vorteil einer solchen Regelung ist, dass die Endpose des Endeffektors relativ zum Objekt so eingestellt werden kann, dass sie der vorgegebenen Zielpose entspricht (vgl. [Hutchinson u. a. \(1996\)](#)).

Die in [Abbildung 3](#) dargestellte visuelle Regelung wird als Visual Servoing bezeichnet und besteht seit 1979 (vgl. [Hutchinson u. a. \(1996\)](#)). Seitdem gibt es die zwei klassischen Forschungsbereiche 2-D und 3-D Visual Servoing. Da die meisten aktuellen Forschungsbereiche auf dem Gebiet der visuellen Regelung auf den beiden klassischen Bereichen basieren, werden diese im Folgenden kurz vorgestellt. Es ist anzumerken, dass Visual Servoing laut [Chaumette und Hutchinson \(2006\)](#) auch für mobile Roboter eingesetzt werden kann und das mehrere Kameras gleichzeitig verwendet werden können. Weiterhin kann eine Konfiguration gewählt werden bei der eine Kamera die Bewegung eines Roboters ausgehend von einer festen Position im Arbeitsraum beobachtet. Der Fokus dieser Ausarbeitung liegt allerdings auf der Variante bei der eine Kamera am Endeffektor eines Roboterarms befestigt ist.

Beim 2-D Visual Servoing wird nur auf Basis von Bilddaten geregelt. Dabei handelt es sich um Bildmerkmale ([Marey und Chaumette \(2008\)](#)) wie zum Beispiel markante Bildpunkte, Linien, geometrische Strukturen oder Bildmomente. Die Ist-Größe im Regelkreis besteht aus den Merkmalen des aktuellen Bildes, das von der Kamera gesendet wird. Die Soll-Größe ist durch die Bildmerkmale aus der Zielansicht gegeben. Um die Zielansicht zu erhalten muss der Roboter offline, also vor der Ausführung der Regelungsaufgabe, in die gewünschte Zielpose relativ zum Objekt geführt werden. In der Zielpose wird anschließend ein Bild vom Gegenstand aufgenommen, das als Zielansicht dient. Die Regelungsaufgabe soll aus jeder beliebigen Startpose des Endeffektors relativ zum Objekt erfolgreich durchgeführt werden können.

2-D Visual Servoing besitzt laut [Chaumette und Hutchinson \(2006\)](#) einen erheblichen Nachteil. Wenn die Start- und die Zielpose weit auseinander liegen, dann kann es passieren dass das Verfahren instabil wird. In diesem Fall wird das System nicht konvergieren und der Roboter

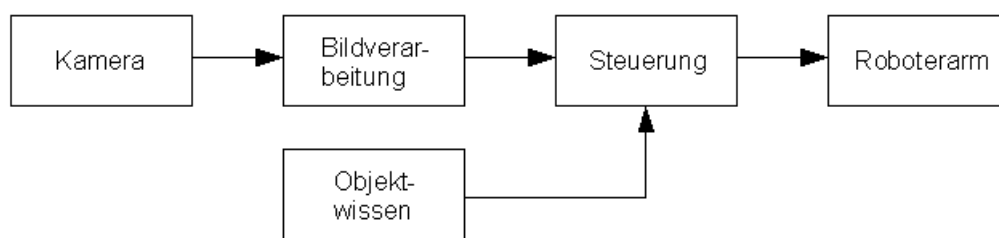


Abbildung 2: Direkte Steuerung

kann nicht die vorgegebene Zielpose erreichen. Es besteht also ein Konvergenzradius der nur kleine Abstände zwischen Start- und Zielpose zulässt. Die Ursache des Problems ist, dass unbekannt ist wie weit sich das Objekt von der Kamera entfernt befindet. Es fehlen also 3-D Informationen. Ein Vorteil von 2-D Visual Servoing ist, dass nur wenig Wissen über das Objekt benötigt wird. Dabei handelt es sich um die Zielansicht die offline vom Objekt erstellt werden muss. Weiterhin ist das Verfahren robust gegenüber Kalibrierungsfehlern der Kamera.

3-D Visual Servoing ist ein Verfahren bei dem auf Basis der Kamerapose relativ zum Objekt geregelt wird. Die Kamerapose besteht aus der Position des Kamerazentrums und der Orientierung der Kamera relativ zum Objekt. Die Position des Kamerazentrums ist ein Raumpunkt  $P \in \mathbb{R}^3$  im Koordinatensystem des Objekts. Es besteht ein Objektkoordinatensystem, weil für das 3-D Visual Servoing ein 3-D Modell des Objekts benötigt wird (vgl. [Chaumette und Hutchinson \(2006\)](#)). Die Orientierung der Kamera relativ zum Objekt ist durch die drei Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  gegeben, die den Winkelversatz zwischen dem Kamera- und Objektkoordinatensystem beschreiben. Der Ursprung des Kamerakoordinatensystems ist das Kamerazentrum. Die aktuelle Kamerapose relativ zum Objekt stellt die Ist-Größe im Regelkreis dar. Die Soll-Größe ist durch die Kamerapose gegeben, wenn sich der Roboter in der vordefinierten Zielpose relativ zum Objekt befindet. Die Berechnung der Soll-Größe muss offline erfolgen.

Ein Nachteil des 3-D Visual Servoing ist, dass ein 3-D Modell des Objekts benötigt wird. Ein solches Modell muss aufwendig berechnet werden und benötigt viel Speicherkapazität. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass es eine hohe Stabilität gewährleistet solange keine Kalibrierungsfehler der Kamera vorhanden sind.

Der Inhalt der Arbeit ist wie folgt gegliedert. In Abschnitt 2 wird der Stand der Forschung auf dem Gebiet des Visual Servoing beschrieben. Darauf folgt Kapitel 3 in dem erläutert wird wie die beschriebene Problematik gelöst werden soll. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung in Abschnitt 4.

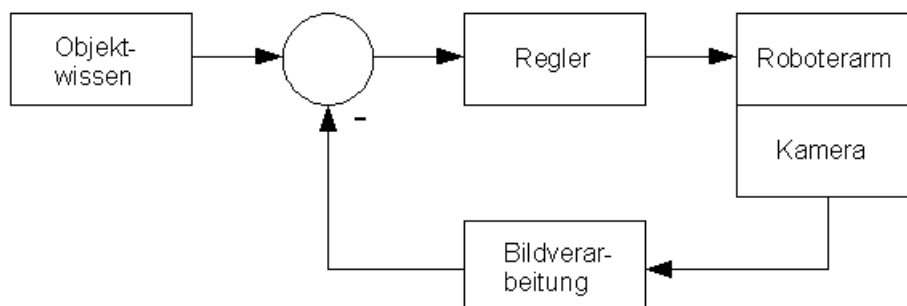


Abbildung 3: Regelkreis

## 2 Stand der Forschung

Die in Kapitel 1 beschriebenen Einschränkungen des 2-D- und 3-D Visual Servoing haben dazu geführt, dass bis heute einige neue Forschungsbereiche auf dem Gebiet des Visual Servoing entstanden sind. Dazu gehören die im Folgenden aufgelisteten Bereiche (vgl. [Chaumette und Hutchinson \(2007\)](#)), die im Laufe dieser Ausarbeitung unter dem Begriff fortgeschrittenes Visual Servoing zusammengefasst werden.

- Hybrid Visual Servoing
- Partitioned Visual Servoing
- Switched-system Visual Servoing
- Trajectory Planning
- Direct Visual Servoing

In den folgenden Gliederungspunkten werden aktuelle Verfahren aus den einzelnen Forschungsbereichen vorgestellt und bewertet. Zu den wichtigsten Bewertungskriterien für Verfahren zu Visual Servoing zählt die Stabilität eines entwickelten Systems. Weitere Aspekte sind die Robustheit bei Kalibrierungsfehlern der Kamera und die Menge des benötigten Wissens über einen Gegenstand dem sich ein Roboter nähern können soll. Anschließend werden in Abschnitt 2.4 einige anwendungsbezogene Forschungsprojekte und eine Anwendung aus der Industrie vorgestellt.

### 2.1 2-D Visual Servoing

In [Comport u. a. \(2006\)](#) wird ein 2-D Verfahren beschrieben, das robust gegenüber visuellem Rauschen ist. Bei visuellem Rauschen handelt es sich um Objekte die zusammen mit dem Zielobjekt im Kamerabild zu sehen sind. Die Bildmerkmale dieser Objekte können einen negativen Einfluss auf die Stabilität des Systems haben, so dass die vorgegebene Zielpose relativ zum Ziel-Gegenstand nicht mehr erreicht werden kann. Im Folgenden wird die Ursache dafür erläutert. In dem Verfahren [Comport u. a. \(2006\)](#) wird auf Basis der Position von mehreren markanten Bildpunkten geregelt, wobei diese Bildpunkte einen Teil des Zielobjekts im Bild darstellen. Damit eine Berechnung der Abweichung zwischen der Soll- und Ist-Position von markanten Bildpunkten erfolgen kann, müssen die markanten Bildpunkte im aktuellen Kamerabild eindeutig wiedergefunden werden. Auf Grund von visuellem Rauschen kann es vorkommen, dass einige markante Bildpunkte im aktuellen Bild wiedergefunden werden die nicht Bestandteil des Zielobjekts im Bild sind. Somit können nicht alle markante Bildpunkte durch die

Bewegung des Roboters in die vorgegebene Soll-Position gebracht werden und das System kann nicht konvergieren. Um dieses Problem zu lösen wird in dem Verfahren entschieden mit welcher Gewichtung ein markanter Bildpunkt in den Regelungsprozess eingeht. Ein markanter Bildpunkt kann die Regelung dann im Laufe der Zeit in einem Bereich zwischen 0 und 100% beeinflussen.

Experimentelle Ergebnisse zeigen, dass das Verfahren eine hohe Robustheit gegenüber visuellem Rauschen erreicht. Die in Kapitel 1 beschriebenen Eigenschaften von 2-D Visual Servoing treffen auch für dieses Verfahren zu.

## 2.2 3-D Visual Servoing

3-D Visual Servoing ist nicht robust bei Kalibrierungsfehlern der Kamera (vgl. [Siciliano u. a. \(2009\)](#)), wodurch die Stabilität des Systems negativ beeinflusst werden kann. Um 3-D Visual Servoing durchführen zu können, müssen vorher die intrinsischen Kameraparameter kalibriert werden. Zu diesen Parametern zählen die Brennweite und die Verschiebung des Bildhauptpunkts ([Hartley und Zisserman \(2003\)](#)). Diese werden für die Berechnung der in Abschnitt 1 beschriebenen Kamerapose relativ zum Gegenstand benötigt. Wenn sich die intrinsischen Parameter in der Kamera während der Ausführung der Regelungsaufgabe ändern, dann kann die aktuelle Kamerapose nicht mehr exakt bestimmt werden. Daraus resultiert, dass die Endpose der Hand relativ zum Objekt von der vorgegebenen Zielpose abweicht. Weiterhin kann die Stabilität des Systems negativ beeinflusst werden. Um auf Veränderungen der inneren Kameraparameter reagieren zu können, wird in dem Verfahren [Pomares u. a. \(2007\)](#) eine Kalibrierung dieser Parameter zur Laufzeit integriert. Somit kann auch die initiale Kalibrierung eingespart werden. Es wurde empirisch ermittelt, dass das Verfahren die inneren Kameraparameter sehr genau zur Laufzeit bestimmen kann.

## 2.3 Fortgeschrittenes Visual Servoing

Im Folgenden werden Verfahren aus den Forschungsbereichen vorgestellt, die auf den klassischen Bereichen 2-D- und 3-D Visual Servoing basieren.

### 2.3.1 Hybrid Visual Servoing

In [Malis u. a. \(1999\)](#) wird ein Verfahren vorgestellt, dass gleichzeitig 2-D- und 3-D Visual Servoing verwendet. Das Ziel ist es die Vorteile von beiden Systemen zu vereinen. In dem Verfahren wird im Gegensatz zum reinen 3-D Visual Servoing kein 3-D Modell des Zielobjekts benötigt. Stattdessen wird nur die in Gliederungspunkt 1 beschriebene Zielansicht vom Objekt



verwendet. Für den 3-D Anteil des Verfahrens wird die Kamerapose zwischen dem aktuellen Kamerabild und der Zielperspektive berechnet. Weiterhin werden in dem Verfahren 2 Regler verwendet, um die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade der Kamera voneinander zu entkoppeln. Beim klassischen 2-D- oder 3-D Visual Servoing wird hingegen jeweils nur ein Regler verwendet, der als Ausgangsgrößen die Geschwindigkeit der translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade der Kamera besitzt. Diese Größen werden verwendet, um die Berechnung von Steuersignalen für den Roboterarm zu ermöglichen (vgl. Abschnitt 1). Beim klassischen Visual Servoing sind die Ausgangsgrößen im Regler voneinander abhängig und somit gekoppelt. In [Malis u. a. \(1999\)](#) sind die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade der Kamera hingegen unabhängig voneinander. Das Verfahren bietet laut mathematischen Analysen und experimentellen Ergebnissen eine hohe Stabilität und das auch im Fall von Kalibrierungsfehlern der Kamera. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass koplanare Objektpunkte für die Berechnung der Kamerapose benötigt werden (vgl. [Corke und Hutchinson \(2001\)](#)).

Ein weiteres hybrides Verfahren wird in [Hafez und Jawahar \(2006\)](#) erläutert. Es beruht auf dem Wissen, dass sich 3-D Visual Servoing hinsichtlich der Stabilität genau dann gut verhält, wenn 2-D Visual Servoing dies nicht unterstützt und umgekehrt. In dem Verfahren wird das klassische 2-D- und 3-D Visual Servoing gleichzeitig verwendet, wobei jeweils ein einzelner Regler eingesetzt wird. Beide Regler bestimmen jeweils alle Geschwindigkeiten der translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade der Kamera und auf Basis einer Gewichtung wird entschieden in welcher Höhe ein Regler-Ergebnis in die Summe der beiden Regler-Ergebnisse eingeht. Dieses Verhalten wird durch Formel 1 beschrieben, welche die Addition der Geschwindigkeitsvektoren des 2-D- und 3-D Reglers zeigt. Der Faktor  $w$  gibt an wie geeignet das Ergebnis der 2-D Regelung in einem Regelungsschritt ist.

$$v = w * v_{2D} + (1 - w) * v_{3D}, \text{ mit } 0 < w < 1. \quad (1)$$

Mathematische Untersuchungen und experimentelle Ergebnisse haben gezeigt, dass das Verfahren eine hohe Stabilität gewährleistet. Eine negative Eigenschaft des 3-D Visual Servoing, die Notwendigkeit eines 3-D Modells des Zielobjekts, bleibt in [Hafez und Jawahar \(2006\)](#) erhalten.

### 2.3.2 Partitioned Visual Servoing

Der Bereich Partitioned Visual Servoing umfasst Verfahren welche auf einer entkoppelten Regelung basieren, wie sie auch in dem in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Vorgehen [Malis u. a. \(1999\)](#) verwendet wird. Bei der Vorgehensweise in Abschnitt 2.3.1 liegt der Schwerpunkt allerdings auf der hybriden Verwendung von 2-D- und 3-D Visual Servoing. Wie in [Corke und Hutchinson \(2001\)](#) erwähnt, möchte man durch eine entkoppelte Regelung die Stabilität des Systems verbessern.

In [Tahri u. a. \(2008\)](#) wird ein entkoppeltes 2-D Verfahren beschrieben, bei dem die Regelung auf Basis von Bildmomenten durchgeführt wird. Bei Bildmomenten handelt es sich um geometrische Merkmale, wie zum Beispiel den Schwerpunkt eines Bilds ([Chaumette \(2004\)](#)). Um Bildmomente berechnen zu können muss zunächst eine Segmentierung durchgeführt werden, damit nur das Zielobjekt auf einem einheitlichen Hintergrund im Bild zu sehen ist. Der Schwerpunkt des Bilds ist dann der Schwerpunkt des Gegenstands im Bild an einer bestimmten Bildposition. Die Abweichung dieser Position bezüglich der Zielansicht und des aktuellen Kamerabilds kann als Eingangsgröße für einen 2-D Regler verwendet werden. Das Verfahren [Tahri u. a. \(2008\)](#) verwendet außer einer Kamera eine spiegelnde Halbkugel, die vor der Kamera angebracht ist. Die visuellen Informationen aus der Umwelt werden zuerst auf diese Halbkugel projiziert und dann auf den Kerasensor. Somit erhält man wie bei einer omnidirektionalen Kamera eine 360 Grad Ansicht. Durch die Projektion auf die spiegelnde Halbkugel entstehen spezielle Bildmomente auf der Oberfläche dieser Halbkugel, welche berechnet und für die Regelung verwendet werden. Auf diese Weise wird in dem Verfahren versucht die Stabilität des Systems positiv zu beeinflussen.

Weiterhin werden in [Tahri u. a. \(2008\)](#) die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade der Kamera voneinander entkoppelt. Es entstehen somit 2 Regler für die geeignete Eingangsgrößen bestimmt werden. Es wird dazu ermittelt, welche Bildmomente auf der Oberfläche der spiegelnden Halbkugel als Eingangsgröße für einen Regler prädestiniert sind. In einer Simulation wurde gezeigt, dass das beschriebene Verfahren eine hohe Stabilität gewährleistet. Das gilt auch im Fall von Kalibrierungsfehlern der Kamera.

### 2.3.3 Switched-system Visual Servoing

Bei Switched-system Visual Servoing handelt es sich um Systeme, die zum Beispiel 2-D- und 3-D Visual Servoing verwenden. Beide Regelungsverfahren werden gleichzeitig berechnet, aber es wird nur ein Ergebnis zur Zeit verarbeitet (vgl. [Gans und Hutchinson \(2003\)](#)). Dies wird durch eine Umschaltung zwischen den beiden Systemen erreicht, die darauf beruht dass sich 2-D Visual Servoing genau dann eignet wenn 3-D Visual Servoing versagt und umgekehrt. Zur Laufzeit kann es dabei zu mehreren Umschaltungen kommen. Das Ziel ist es zwischen instabilen Systemen so umzuschalten, dass das Gesamt-System stabil wird.

Ein Verfahren das auf diese Weise funktioniert wird in [Gans und Hutchinson \(2007\)](#) vorgestellt. Das Verfahren erreicht das im Folgenden beschriebene Umschaltverhalten. Wenn 2-D Visual Servoing verwendet wird, dann verringert sich die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Wert hinsichtlich der Bildmerkmale. Die 3-D Regelung wird unterdessen ebenfalls berechnet, aber nicht verwendet. Es kann dann vorkommen dass die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Wert für die 3-D Merkmale, wie zum Beispiel die in Abschnitt 1 erläuterte Kamerapose, ansteigt. Wenn diese Abweichung zu hoch ist, dann wird auf das 3-D Verfahren umgeschaltet. Somit

verringert sich die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Wert für die 3-D Merkmale. Gleichzeitig kann es zu einer Erhöhung der Abweichung bei der 2-D Regelung kommen und ab einer bestimmten Grenze wird wieder auf das 2-D Verfahren umgeschaltet. Experimentelle Ergebnisse und mathematische Analysen belegen, dass das Verfahren eine hohe Stabilität gewährleistet. Ein Nachteil ist, dass das System theoretisch unendlich oft umschalten kann und die vorgegebene Zielpose relativ zum Objekt dann nicht erreicht werden kann.

### 2.3.4 Trajectory Planning

In [Hornung und Heimann \(2005\)](#) und [Allotta und Fioravanti \(2005\)](#) wird jeweils ein Verfahren beschrieben, durch das das klassische 2-D Vorgehen um eine Trajektorien-Planung erweitert wird. Bei einer Trajektorien-Planung handelt es sich üblicherweise um eine Offline-Planung der Bahn auf der sich der Endeffektor des Roboters einem Gegenstand nähern soll. Der Endeffektor wird offline ausgehend von einer Startpose bis zur Zielpose relativ zum Objekt geführt, wobei sich das Objekt die ganze Zeit im Bild der Kamera befindet. Währenddessen werden in kurzen Abständen Bilder aufgenommen und gespeichert. Es entsteht somit eine Kette von mehreren Zielansichten und zur Laufzeit wird die 2-D Regelung dann sukzessive pro Subzielbild durchgeführt. Das bedeutet, dass die Soll-Größe im Regelkreis durch das nächste Subzielbild aus der Bildkette aktualisiert wird, sobald das aktuelle Kamerabild mit dem aktuellen Subzielbild übereinstimmt.

Da 2-D Visual Servoing für kleine Abstände zwischen Start- und Zielpose stabil ist, kann eine hohe Stabilität des Systems auf Grund der Bildkette erreicht werden. Ein erheblicher Nachteil von Trajektorien-Planung ist allerdings, dass eine Bildkette nur für die Bahn zwischen einer Startpose und der Zielpose relativ zum Gegenstand gilt. Um die Zielpose aus einer beliebigen Startpose zu erreichen benötigt man eine Bildkette für jede Bahn. Das benötigte Wissen über das Zielobjekt ist somit sehr hoch. Um dieses Problem zu umgehen wird in den Verfahren [Hornung und Heimann \(2005\)](#) und [Allotta und Fioravanti \(2005\)](#) eine geeignete Trajektorie zwischen Start- und Zielpose zur Laufzeit berechnet. Auf Basis dieser Trajektorie wird eine Bildkette aus zuvor erstellten Trainingsdaten generiert. Das benötigte Wissen über das Zielobjekt ist trotzdem noch hoch, da viele Trainingsdaten benötigt werden. Neben einer hohen Stabilität wird in [Hornung und Heimann \(2005\)](#) keine Kalibrierung der Kamera benötigt.

### 2.3.5 Direct Visual Servoing

Verfahren in denen nur das Kamerabild zur Regelung verwendet wird, können als Direct Visual Servoing bezeichnet werden (vgl. [Silveira und Malis \(2007\)](#)). Als Soll-Größe dient die Helligkeit jedes Pixels aus der Zielansicht. Die Ist-Größe ist durch die Helligkeit jedes Pixels des aktuellen

Kamerabilds gegeben. Der Vorteil ist, dass die Bildverarbeitung zur Berechnung von visuellen Merkmalen für die Regelung eingespart werden kann.

Diese Vorgehensweise wird in [Collewet u. a. \(2008\)](#) verwendet. Das Verfahren besitzt die Einschränkung, dass die Regelung nur für sogenannte Lambert-Objekte erfolgreich durchgeführt werden kann. Bei einem Lambert-Objekt handelt es sich um einen Gegenstand mit einer stumpfen Oberfläche, die dafür sorgt das auftreffendes Licht in alle Richtungen gleichmäßig reflektiert wird. Diese Eigenschaft besitzt zum Beispiel Papier. Das Gegenteil eines Lambert-Objekts ist ein Gegenstand mit einer spiegelnden Oberfläche. Es wurden Versuche für geringe Abweichungen zwischen Start- und Zielpose relativ zum Objekt durchgeführt. Die Regelungsaufgabe konnte in diesen Fällen stabil durchgeführt werden.

## 2.4 Anwendungsbereiche

Visual Servoing kann in vielen Anwendungsfeldern für mobile Roboter und Roboterarme eingesetzt werden (vgl. [Kragic und Christensen \(2002\)](#)). Im Folgenden werden anwendungsbezogene Forschungsprojekte und eine Anwendung aus der Industrie erwähnt, um zu zeigen dass Visual Servoing erfolgreich verwendet werden kann.

In [Cherubini u. a. \(2008\)](#) wird ein System für einen mobilen Roboter vorgestellt, der einer Linie auf dem Boden folgt. Die automatische Landung eines Flugzeugs in einer Simulation wird in [Bourquardez und Chaumette \(2007\)](#) behandelt. Eine weitere Anwendung für den Flugbereich wird in [Bourquardez u. a. \(2008\)](#) erläutert, bei der sich ein fliegender Roboter einer Zielpose relativ zu einem Objekt nähert. Ein Andockmanöver für ein autonomes Unterwasser-Fahrzeug wird in [Lee u. a. \(2003\)](#) beschrieben. In der Medizin wird daran gearbeitet Visual Servoing für Assistenzroboter zu verwenden, um bei Eingriffen ein Operationsinstrument präzise bis zu einer vorgegebenen Position zu führen (vgl. [Vitrani u. a. \(2005\)](#)). Ein weiterer Anwendungsbereich ist das Greifen von Gegenständen durch einen Haushaltsroboter ([Kragic u. a. \(2005\)](#)). Visual Servoing wird bereits in der Automobilindustrie verwendet, um Bauteile in der Bewegung durch Roboter bearbeiten zu lassen ([inos Automationssoftware GmbH](#)).

## 3 Konzept

In diesem Kapitel wird ein Lösungskonzept für die in Abschnitt 1 beschriebene Problemstellung erläutert. Das Ziel ist es, das Konzept im Rahmen einer künftigen Masterarbeit umzusetzen.

Das Verfahren Visual Servoing with Moments of SIFT Features wurde an der Technischen Universität in Dortmund entwickelt (vgl. [Hoffmann u. a. \(2006\)](#)) und lässt sich in den Bereich des Partitioned Visual Servoing einordnen. Es handelt sich um ein 2-D Verfahren bei dem

SIFT-Merkmale (Lowe (2004)) als Bildmerkmale für die Regelung verwendet werden. Ein SIFT-Merkmal beschreibt einen markanten Bildpunkt in Form eines Zahlenvektors und der Pixelkoordinaten. In dem Verfahren wird auf Basis der Abweichung der Pixelkoordinaten, Skalierung und Orientierung von 6 SIFT-Merkmalen geregelt. Die Abweichung entsteht durch den Versatz zwischen Zielansicht und aktuellem Kamerabild. Die Skalierung und die Orientierung kann mit Hilfe des Zahlenvektors eines SIFT-Merkmals berechnet werden. Durch die Verwendung von Skalierung und Orientierung werden die in Kapitel 1 erläuterten 3-D Informationen hinzugefügt, die im klassischen 2-D Visual Servoing fehlen.

Wie in Gliederungspunkt 2.3.1 beschrieben, sind die Ausgangsgrößen eines Regelungsblocks beim Visual Servoing durch die Geschwindigkeit der Freiheitsgrade der Kamera gegeben. In Hoffmann u. a. (2006) sind alle Freiheitsgrade voneinander entkoppelt, um die Stabilität des Systems positiv zu beeinflussen. Laut experimentellen Ergebnissen besitzt das Verfahren eine hohe Stabilität. Eine weitere positive Eigenschaft ist, dass nur wenig Objektwissen notwendig ist. Dabei handelt es sich um die in Abschnitt 1 beschriebene Zielansicht die offline aufgenommen werden muss.

Das Verfahren Hoffmann u. a. (2006) wurde als Lösungskonzept gewählt, da es eine hohe Stabilität auf Grund der starken Entkopplung und der Verwendung von SIFT-Merkmalen bei der Regelung gewährleistet. Ein weiterer Aspekt für die Wahl des Verfahrens ist, dass es sich um ein 2-D Verfahren handelt und somit nur wenig Wissen über ein Zielobjekt benötigt wird. Diese Eigenschaften sind ansonsten in den vorgestellten Verfahren aus Kapitel 2 nicht gemeinsam anzutreffen.

## 4 Zusammenfassung

In dieser Ausarbeitung wird die Annäherung eines Roboterarms an einen bekannten sichtbaren Gegenstand auf Basis von Kameradaten behandelt. Ausgehend von einem Regelkreis als Lösungsansatz wird der Stand der Forschung auf dem Gebiet des Visual Servoing beschrieben. Das Ergebnis der aktuellen Forschung auf diesem Gebiet ist, dass es Verfahren gibt die wenig Wissen über das Zielobjekt benötigen. Allerdings gibt es kein Verfahren das global stabil ist (vgl. Bourquardez u. a. (2006)) und somit ist eine vorgegebene Zielpose relativ zu einem Objekt nicht aus jeder Startpose erreichbar. Trotzdem gibt es konkrete Anwendungen die Visual Servoing verwenden und keine globale Stabilität benötigen. Als Lösungskonzept für eine künftige Masterarbeit wurde ein entkoppeltes 2-D Verfahren gewählt, welches eine hohe Systemstabilität unterstützt. In Zukunft ist weiterhin viel Forschungsaktivität auf dem Gebiet des Visual Servoing zu erwarten, da viele Anwendungsbereiche für diese Technologie vorhanden sind (Chaumette und Hutchinson (2007)).

## Literatur

- [Allotta und Fioravanti 2005] ALLOTTA, B. ; FIORAVANTI, D.: 3D motion planning for image-based visual servoing tasks. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2005), April, S. 2173 – 2178
- [inos Automationssoftware GmbH ] AUTOMATIONSSOFTWARE GMBH inos: *inos Visual Servoing*. – URL [http://www.inos-automation.de/de/visual\\_servoing.html](http://www.inos-automation.de/de/visual_servoing.html). – Zugriffsdatum: 1. Juni 2009
- [Bourquardez und Chaumette 2007] BOURQUARDEZ, O. ; CHAUMETTE, F.: Visual servoing of an airplane for auto-landing. In: *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2007), November, S. 1314 – 1319
- [Bourquardez u. a. 2008] BOURQUARDEZ, O. ; GUENARD, N. ; HAMEL, T. ; CHAUMETTE, F. ; MAHONY, R. ; ECK, L.: Kinematic visual servo controls of an X4-flyer: practical study. In: *2008 Mediterranean Conf. on Intelligent Systems and Automation* (2008), Juni
- [Bourquardez u. a. 2006] BOURQUARDEZ, O. ; MAHONY, R. ; HAMEL, T. ; CHAUMETTE, F.: Stability and performance of image based visual servo control using first order spherical image moments. In: *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2006), Oktober, S. 4304 – 4309
- [Chaumette 2004] CHAUMETTE, F.: Image moments: a general and useful set of features for visual servoing. In: *IEEE Transactions on Robotics* 20 (2004), August, Nr. 4, S. 713 – 723
- [Chaumette und Hutchinson 2006] CHAUMETTE, F. ; HUTCHINSON, S.: Visual servo control, Part I: Basic approaches. In: *IEEE Robotics and Automation Magazine* 13 (2006), December, Nr. 4, S. 82 – 90
- [Chaumette und Hutchinson 2007] CHAUMETTE, F. ; HUTCHINSON, S.: Visual servo control, Part II: Advanced approaches. In: *IEEE Robotics and Automation Magazine* 14 (2007), März, Nr. 1, S. 109 – 118
- [Cherubini u. a. 2008] CHERUBINI, A. ; CHAUMETTE, F. ; ORIOLO, G.: An image-based visual servoing scheme for following paths with nonholonomic mobile robots. In: *10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2008* (2008), Dezember, S. 108–113
- [Collewet u. a. 2008] COLLEWET, C. ; MARCHAND, E. ; CHAUMETTE, F.: Visual servoing set free from image processing. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2008), Mai, S. 81–86
- [Comport u. a. 2006] COMPORT, A.I. ; MARCHAND, E. ; CHAUMETTE, F.: Statistically robust 2-D visual servoing. In: *IEEE Transactions on Robotics* 22 (2006), April, Nr. 2, S. 415 – 420

- [Corke und Hutchinson 2001] CORKE, P. I. ; HUTCHINSON, S. A.: A new partitioned approach to image-based visual servo control. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17 (2001), August, Nr. 4, S. 507 – 515
- [Gans und Hutchinson 2003] GANS, N. R. ; HUTCHINSON, S. A.: An experimental study of hybrid switched system approaches to visual servoing. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation* 3 (2003), September, S. 3061 – 3068
- [Gans und Hutchinson 2007] GANS, N. R. ; HUTCHINSON, S. A.: Stable visual servoing through hybrid switched-system control. In: *IEEE Transactions on Robotics* 23 (2007), Juni, Nr. 3, S. 530 – 540
- [Hafez und Jawahar 2006] HAFEZ, A. H. A. ; JAWAHAR, C. V.: Integration framework for improved visual servoing in image and cartesian spaces. In: *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2006), Oktober, S. 2320 – 2325
- [Hartley und Zisserman 2003] HARTLEY, R. ; ZISSERMAN, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2. Auflage. Cambridge University Press, 2003. – ISBN 0-521-54051-8
- [Hoffmann u. a. 2006] HOFFMANN, F. ; NIEROBISCH, T. ; SEYFFARTH, T. ; RUDOLPH, G.: Visual Servoing with Moments of SIFT Features. In: *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (2006), Oktober, S. 4262–4267
- [Hornung und Heimann 2005] HORNUNG, O. ; HEIMANN, B.: A model-based approach for visual guided grasping with uncalibrated system components. In: *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2005), August, S. 226 – 232
- [Hutchinson u. a. 1996] HUTCHINSON, S. ; HAGER, G. D. ; CORKE, P. I.: A tutorial on visual servo control. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12 (1996), Oktober, Nr. 5, S. 651 – 670
- [Kragic u. a. 2005] KRAGIC, D. ; BJÖRKMAN, M. ; CHRISTENSEN, H. I. ; EKLUNDH, J.-O.: Vision for robotic object manipulation in domestic settings. In: *Robotics and Autonomous Systems* 52 (2005), Juli, Nr. 1, S. 85–100
- [Kragic und Christensen 2002] KRAGIC, D. ; CHRISTENSEN, H. I.: Survey on visual servoing for manipulation / Computational Vision and Active Perception Laboratory. URL <ftp://ftp.nada.kth.se/CVAP/reports/cvap259.ps.gz>, 2002. – Forschungsbericht. Zugriffsdatum: 1. Juni 2009
- [Lee u. a. 2003] LEE, P.-M. ; JEON, B.-H. ; KIM, S.-M.: Visual servoing for underwater docking of an autonomous underwater vehicle with one camera. In: *OCEANS 2003. Proceedings* 2 (2003), September, S. 677 – 682
- [Lowe 2004] LOWE, D. G.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: *International Journal of Computer Vision* 2 (2004), November, Nr. 60, S. 91–110

- [Malis u. a. 1999] MALIS, E. ; CHAUMETTE, F. ; BOUDET, S.: 2-1/2-D visual servoing. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15 (1999), April, Nr. 2, S. 238 – 250
- [Marey und Chaumette 2008] MAREY, M. ; CHAUMETTE, F.: Analysis of classical and new visual servoing control laws. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2008), Mai, S. 3244 – 3249
- [Pomares u. a. 2007] POMARES, J. ; CHAUMETTE, F. ; TORRES, F.: Adaptive visual servoing by simultaneous camera calibration. In: *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2007), April, S. 2811 – 2816
- [Siciliano u. a. 2009] SICILIANO, B. ; SCIavicco, L. ; VILLANI, L. ; ORIOLo, G.: *Robotics. Modelling, planning and control*. Springer London, 2009 (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). – ISBN 978-1-84628-641-4
- [Silveira und Malis 2007] SILVEIRA, G. ; MALIS, E.: Direct visual servoing with respect to rigid objects. In: *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2007), Oktober/November, S. 1963 – 1968
- [Tahri u. a. 2008] TAHRI, O. ; CHAUMETTE, F. ; MEZOUAR, Y.: New decoupled visual servoing scheme based on invariants from projection onto a sphere. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2008), Mai, S. 3238 – 3243
- [Vitrani u. a. 2005] VITRANI, M.-A. ; MOREL, G. ; ORTMAIER, T.: Automatic Guidance of a Surgical Instrument with Ultrasound Based Visual Servoing. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2005), April, S. 508 – 513