TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Thema - Masterarbeit

für:	Seidl, Benedikt
geboren am:	16.01.1988
Studiengang:	**Medientechnologie**
Matrikelnummer:	51821
Verantwortliche/r Hochschullehrer/in:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Michael Groß
Betreuende/r wissenschaftliche/r Mitarbeiter/in:	Dipl.-Inf. Christoph Weinrich
Vorsitzende/r der Prüfungskommission:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Michael Groß
2. Gutachter/in:	Dipl.-Inf. Christoph Weinrich
Thema:	Framework zur Evaluation des Navigationsverhaltens mobiler Roboter gegenüber Menschen
Ausgegeben am:	15.10.2014
Abgabetermin:	14.04.2015

Ilmenau, den 18.09.2014

Univ.-Prof. Dr. phil. H. Krömker
Vorsitzende des Prüfungsausschusses
des verantwortlichen Studienganges

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Michael Groß
Verantwortlicher Hochschullehrer

Kurzfassung

Im Rahmen des Projekts ROREAS (Interaktiver **Ro**botischer **Re**ha-**As**sistent für das Lauf- und Orientierungstraining von Patienten nach Schlaganfällen) entwickelt das Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik der Technischen Universität Ilmenau einen Assistenzroboter. Ein wichtiges Ziel der Entwicklung ist, dass der Roboter sozial verträglich navigiert und nicht als störender Faktor im Klinik-Alltag wahrgenommen wird. Deshalb wurde ein Algorithmus entwickelt, der es dem Roboter ermöglicht, Menschen auf natürliche Weise auszuweichen, falls sich die Wege von Roboter und Mensch kreuzen. Zusätzlich wurden Algorithmen zum Folgen und Führen von Personen entwickelt.

Ziel dieser Arbeit ist es, die drei Algorithmen mit technisch messbaren Kriterien zu bewerten. Dafür wurde ein Framework entwickelt, in dem Mensch und Roboter in reproduzierbare Interaktions-Situationen gebracht werden können. In drei unterschiedlichen Experimenten wurde über fünf Stunden auswertbares Material aufgezeichnet und die Trajektorien von Mensch und Roboter ausgewertet. Durch in der Fachliteratur vorgestellte und im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Metriken konnte unter anderem gezeigt werden, dass sich die Geschwindigkeit des Roboters beim Führen der Person anpasst und dass der Roboter einen Mindestabstand zum Menschen einhält.

Um die Trajektorien von Roboter und Versuchsperson aufzeichnen zu können, wird ein verteiltes System aus Laser-Range-Scannern eingesetzt. Das bisher eingesetzte Verfahren zur Detektion von Versuchsperson und Roboter in den Punktwolken der Laser-Range-Scanner liefert in den für die Auswertung besonders interessanten Situationen (Roboter und Mensch in geringer Distanz zueinander) nicht die gewünschten Ergebnisse. Die dabei entstehenden Fehler wirken sich direkt auf die Ergebnisse der Auswertung aus. Deshalb wurde ein neuer Algorithmus zur Detektion von Menschen und Roboter in Punktwolken entwickelt. »Randomized Hough Transform« wird eingesetzt, um Ellipsen auf die ellipsenförmigen Punkt-Gruppen von Person und Roboter zu fitten und so den Standort beider festzustellen.

Abstract

Within the project ROREAS (**Ro**botic **Re**habilitation **As**sistant for Stroke Patients) the Neuroinformatics and Cognitive Robotics Lab of Technische Universität Ilmenau develops an assisting robot. One of the main goals of this project is to make sure that the robot navigates socially acceptable and is not seen as a disturbing factor during the daily hospital routine. Therefore, an algorithm was developed that enables the robot to avoid bystanders in a natural, human way when the paths of robot and bystanders cross. Additionally, algorithms were developed to enable the robot to follow or guide humans.

The aim of this work is to evaluate these three algorithms based on technical criteria. Therefore, a framework was developed where humans and robot can be set up in a reproducible interaction. Overall five hours of evaluable material were recorded for three different experiments. The resulting data was used to rate the interaction between robot and subject. On the one hand the trajectories are interpreted with metrics known from literature, on the other hand new metrics were developed to evaluate the behaviour of the robot.

A stationary network of laser range scanners is used to record both the trajectories of the robot and the subject. The former method used to detect persons in the point cloud provided by the laser range scanners is not sufficient as it fails in situations when robot and subject are close to each other. The errors made in the detection stage have a direct impact to the knowledge gained from these experiments. Therefore, a new algorithm was developed to detect human and robots in the data provided by the laser range scanners. A method based on "Randomized Hough Transform" is used to fit ellipses to the elliptical groups of points that represent the robot and the human. In this way the position of the robot and the subject can be reliably obtained.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Ziel . . . 2

1.2 Ausgangssituation . . . 2

1.3 Teilaufgaben . . . 3

2 Tracking von Personen mit LRS **4**

2.1 State of the Art . . . 5

2.1.1 Detektion von Ellipsen in LRS-Daten mit Mean-Shift . . . 7

2.2 Verteiltes System zum Personentracking . . . 9

2.3 Ellipse-Fitting . . . 11

2.3.1 State of the Art . . . 12

2.3.2 Entwickelter Algorithmus . . . 15

2.4 Evaluation . . . 19

3 Framework **22**

3.1 Durchführung und Aufzeichnung . . . 23

3.2 Auswertung . . . 25

4 Navigationsverhalten mobiler Roboter gegenüber Menschen **27**

4.1 State of the Art . . . 27

4.2 Versuchsaufbau . . . 30

4.2.1 Posen . . . 31

4.2.2 Hautleitwert 31
4.2.3 Sonstige aufgezeichnete Daten 33
4.3 Personal Space 34
4.3.1 Aufbau 34
4.3.2 Übersicht zu den gewonnenen Daten 36
4.3.3 Auswertung 36
4.4 Follow 49
4.4.1 Aufbau 49
4.4.2 Übersicht zu den gewonnenen Daten 51
4.4.3 Auswertung 52
4.5 Guide 58
4.5.1 Aufbau 58
4.5.2 Übersicht zu den gewonnenen Daten 59
4.5.3 Auswertung 61

5 Zusammenfassung und Ausblick 66
5.1 Zusammenfassung 66
5.2 Ausblick 67

Literaturverzeichnis 71

Anhang 76
A.1 Lokalisierung Roboter 76
A.2 Ellipse aus fünf Punkten 77

Kapitel 1

Einleitung

Im Rahmen des Projekts ROREAS (Interaktiver **RO**botischer **RE**ha-**AS**sistent für das Lauf- und Orientierungstraining von Patienten nach Schlaganfällen) erforscht das Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik der Technischen Universität Ilmenau unter anderem, wie die Mensch-Roboter-Interaktion verbessert werden kann (Gross u. a., 2014). Um sich in den Klinik-Alltag voll zu integrieren ist es wichtig, dass Roboter fähig sind, sozial zu navigieren: Menschen an Engstellen den Vortritt zu lassen, frühzeitig Personen auszuweichen, falls sich die Wege kreuzen oder ausreichend Abstand zu halten beim Passieren von stehenden Personen. Hierfür wurde unter anderem das »Personal Space Objective« entwickelt, welches den Roboter daran hindert, sich Personen zu stark zu nähern, um ein Gefühl der Belästigung zu vermeiden.

Zu den Folgen von Schlaganfällen gehören Orientierungsschwierigkeiten der Patienten. Roboter sollen den Patienten helfen, sich sicher in der unbekannten Rehaklinik zu bewegen und zu orientieren. Dazu ist es nötig, dass die Roboter den Patienten folgen und sie gegebenenfalls auch wieder zu ihrem Ausgangspunkt führen können. Mit den beiden Objectives »Guide« (führen) und »Follow« (folgen) ist es dem Roboter möglich diese Aufgaben zu übernehmen. Diese beiden Objectives können auch mit dem Personal Space Objective kombiniert werden,

um so unbeteiligte Menschen großräumig zu umfahren und nicht in deren Personal Space einzudringen (Gross u. a., 2014).

1.1 Ziel

Um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit neuartiger Entwicklungen in der Mensch-Roboter Interaktion treffen zu können, müssen diese mit Versuchspersonen evaluiert werden. Ziel dieser Arbeit ist es, ein Framework zur Verfügung zu stellen, mit dem die entwickelten Verfahren ausgewertet werden können. Dafür interagieren Roboter und Mensch mehrmals in einer vorher definierten Situation. Während dieser Interaktion werden die Trajektorien (Pose und jeweiliger Zeitpunkt) der Person und des Roboters aufgezeichnet. In einem zweiten Schritt werden diese Daten mit Hilfe verschiedenen Metriken ausgewertet. Dadurch ist es möglich, konkurrierende Systeme schon während der Entwicklung unter bestimmten Gesichtspunkten zu vergleichen.

1.2 Ausgangssituation

Dem Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik der Technischen Universität Ilmenau stehen fünf Laser-Range-Scanner (LRS) zur Verfügung, die zu einem verteilten Laser System (Schenk u. a., 2012) verbunden werden können. Damit können Roboter und Person unabhängig von der Sensorik des Roboters erfasst werden.

Als Roboter wird »ROREAS I« eingesetzt. Er baut auf der Roboter-Plattform SCITOS A5 von MetraLabs auf und wurde im Rahmen des Projekts »ShopBot« entwickelt (Gross u. a., 2008) (Gross u. a., 2009).

Für die Softwareentwicklung kommt MIRA (Middleware for Robotic Applications) zum Einsatz (Einhorn u. a., 2012).

1.3 Teilaufgaben

Wie bereits in Abschnitt 1.1 dargestellt, ist das Ziel dieser Arbeit, ein Framework aufzubauen mit dem das Verhalten des Roboters gegenüber Menschen bei unterschiedlichen Navigationsaufgaben evaluiert werden kann.

Die Qualität der mit dem Framework erhobenen Daten ist dabei maßgeblich von der Genauigkeit und Robustheit des Trackings von Roboter und Person abhängig. Beim bereits vorhandenen Tracker treten insbesondere dann Probleme auf, wenn sich mehrere Personen oder Roboter in geringer Distanz zueinander befinden. Um also das Framework sinnvoll einsetzten zu können, muss zuerst das Tracking verbessert werden. Dafür wird ein Ellipse-Fitting-Algorithmus zum Detektieren von Person und Roboter in den von den LRS gelieferten Daten entwickelt.

Kapitel 2

Tracking von Personen mit LRS

Laser-Range-Scanner (LRS) werden unter anderem zur Hinderniserkennung, zur Lokalisierung des Roboters und zum Personen-Tracking auf mobilen Robotern eingesetzt. Im Gegensatz zur Auswertung von Kamerabildern, bei denen die Lokalisierung von Menschen oder das Schätzen von Entfernungen sehr kompliziert ist, ist die Datenmenge bei Laser-Range-Scannern geringer und die Auswertung nicht besonders rechenintensiv (Lindstrom u. Eklundh, 2001). Darüber hinaus kann bereits mit einem einzelnen LRS ein großer Bereich abgedeckt werden.

Bei einem Laser-Range-Scanner handelt es sich um »ein[en] elektrooptische[n] Lasermesssensor, der mit Hilfe von Laserstrahlen berührungslos den Umriss seiner Umgebung in einer Ebene abtastet« (LMS, 2012, S. 21). Dabei wird ausgehend vom LRS ein gepulster Laserstrahl ausgesendet, der von den Objekten reflektiert wird. Der Abstand zwischen dem LRS und dem Objekt kann durch die Laufzeitdifferenz zwischen dem Laserpuls und der detektierten Reflexion bestimmt werden. Durch mehrfache Messungen lässt sich so die Umgebung des LRS in zweidimensionalen Polarkoordinaten vermessen (vgl. LMS, 2012, S. 21f).

Dabei ist zu beachten, dass ein einzelner LRS nur Objekte in direkter Sicht detektieren kann. Eine runde Säule vor einer Wand wird also in der Punktwolke eines LRS als Halbkreis abgebildet, während die Wand dahinter (im Schatten der Säule) unterbrochen ist (vgl. Abbildung 2.1). Dieser Effekt lässt sich durch mehre-

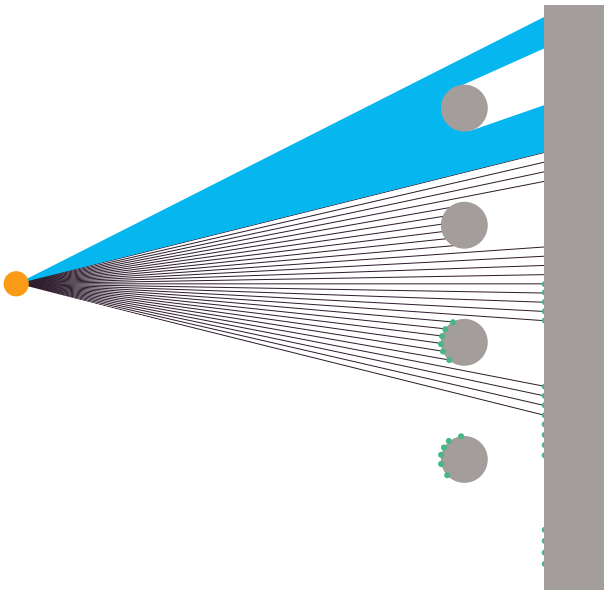


Abbildung 2.1: Theoretische Abdeckung eines Laser-Range-Scanners
Auf der linken Seite in Orange der Laser-Range-Scanner, auf der rechten Seite in Grau Säulen und eine Wand. Oben in Blau der theoretisch sichtbare Bereich des LRS. Darunter die Strahlen in denen der LRS die Entfernung misst. Wiederum darunter in Grün die Punktwolke, die zur Weiterverarbeitung zur Verfügung steht. Objekte zwischen den Säulen und der Wand wären für den LRS nicht sichtbar.

re LRS reduzieren, indem diese so aufgestellt werden, dass die zu detektierenden Objekte von unterschiedlichen Seiten von den LRS »gesehen« werden.

Dem Fachgebiet stehen fünf LRS-Einheiten zur Verfügung.

2.1 State of the Art

Bei den verschiedenen Möglichkeiten mit Hilfe von LRS Personen zu verfolgen, besteht der wesentliche Unterschied in der Höhe, in der die Laser-Range-Scanner angeordnet werden. Die untersuchte Literatur lässt sich in zwei Gruppen einteilen: Zum einen werden in Höhen zwischen 10 und 20 cm die beiden Beine einer Person detektiert und damit als kreisförmige Ringe in der Punktwolke abgebildet, zum anderen erfolgt die Detektion auf Höhe der Schultern, wodurch Personen als ellipsenförmige Ringe in der Punktwolke abgebildet werden.

Autor	Höhe der LRS	Algorithmus	Tracker
Shao u. a. (2007)	10 cm	Mean-Shift	Pratikel-Filter
Adiaviakoye u. a. (2014)	16 – 20 cm	Mean-Shift	Partikel Filter
Hashimoto u. a. (2010)	knee & waist	global-nearest-neighboring (GNN)-based data association	IMM estimator
Schenk (2011)	120cm	Mean-Shift	Partikel Filter

Tabelle 2.1: Übersicht State of the Art Personendetektion mit LRS

Shao u. a. (2007) verwendet Laser auf der Höhe von 10 cm, und wendet Mean-Shift-Clustering an um einzelne Beine zu erkennen. Anschließend wird mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse die Orientierung der gefundenen Punkt-Wolken analysiert um so Beinpaare, die fälschlicherweise zu einem Element verschmolzen sind wieder trennen zu können. Dafür werden die Daten auch mit den Positionen der Beine aus dem vorherigen Schritt verglichen. Um die Bein-Paare zu verfolgen wird schließlich ein Partikel-Filter eingesetzt.

Ebenso setzt Adiaviakoye u. a. (2014) zuerst Man-Shift zum Clustering ein und danach wird ein Partikelfilter (Rao-Blackwellized Monte Carlo Data Association) eingesetzt um Fußgänger mit Lasern auf der Höhe zwischen 16 und 20 cm zu verfolgen.

Hashimoto u. a. (2010) dagegen verwenden Laser auf unterschiedlichen Höhen: Zum einen auf der Höhe der Knie, und zum anderen auf der Höhe der Taille. Beim Suchen von Personen-Hypothesen werden die Punktwolken aus beiden Lasern gleichermaßen verwendet.

Am Fachgebiet wurde von Schenk u. a. (2012) ein monolithischer Personen-Tracker für LRS auf Schulterhöhe entwickelt. Personen werden ebenso mit dem Mean-Shift-Algorithmus erkannt, die Personen-Hypothesen werden von einem Partikel-Tracker verfolgt.

Beim Vergleich der beiden Systeme (LRS auf Bein- oder Schulterhöhe) stellen Schenk u. a. (2011) fest, dass ein Tracking auf Höhe der Schultern (»upper body«) fast in allen Situationen dem Tracking der Füße überlegen ist.

Beim Einsatz der LRS in geringer Höhe ist in der Regel eine geringere Abschat-

tung der LRS durch Personen zu erwarten, da Füße von Personen einen deutlich geringeren Umfang aufweisen als deren Oberkörper. Dafür treten theoretisch Probleme mit Rollkoffern oder bodenlangen Röcken auf, praktisch schattet aber der eingesetzte Roboter einen Bereich von 70 cm ab. Darüberhinaus können Personen nicht in Momentaufnahmen der Daten der LRS detektiert werden, da dann die Zuordnung der Füße zu einer Person erschwert wird (vgl. Schenk, 2011, S. 54). Ein weiteres Problem bei der Detektion von Beinpaaren stellen stehende Personen dar. Für den Einsatz innerhalb des Frameworks ist es aber auch wichtig, abrupte Übergänge zwischen gehenden und stehenden Personen erkennen zu können.

Daneben werden durch die relativ geringe Breite der Beine bei größeren Entfernungen nur noch wenige Messungen ein korrektes Ergebnis liefern, während bei der Messung auf Schulterhöhe unter Umständen noch ausreichend viele Punkte zur Verfügung stehen.

2.1.1 Detektion von Ellipsen in LRS-Daten mit Mean-Shift

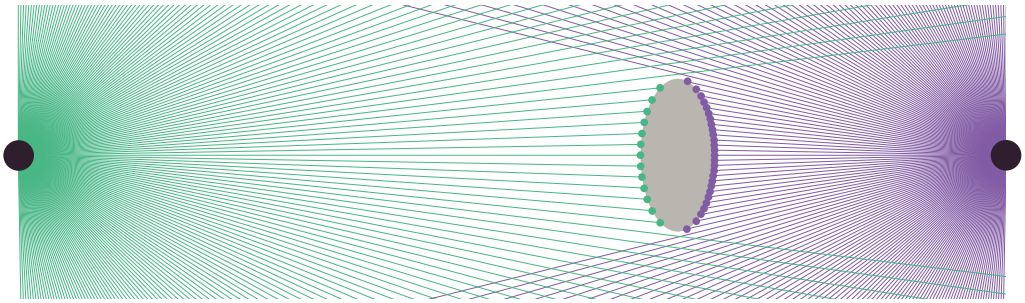


Abbildung 2.2: Theoretische Abtastung einer Ellipse durch zwei LRS
Die Strecke zwischen den beiden LRS wird durch die Ellipse in $\frac{2}{3}$ und $\frac{1}{3}$ geteilt.

Ein einzelner Laser-Range-Scanner kann nur die Seite des Oberkörpers detektieren, die ihm zugewandt ist (vgl. Abbildung 2.2). Dadurch würde eine Person durch einen halben ellipsenförmigen Ring in der Punktwolke abgebildet. Durch den Einsatz von mehreren Laser-Range-Scannern kann dieser Effekt minimiert

werden. Trotzdem unterscheidet sich die Punktdichte der Ellipse abhängig von der Entfernung des jeweilige Laser-Range-Scanners von der Person.

Für den Extremfall einer unvollständig in der Punktwolke abgebildeten Ellipse soll im Folgenden der systembedingte Nachteil des Mean-Shift-Verfahrens gegenüber des Ellipsefittings gezeigt werden.

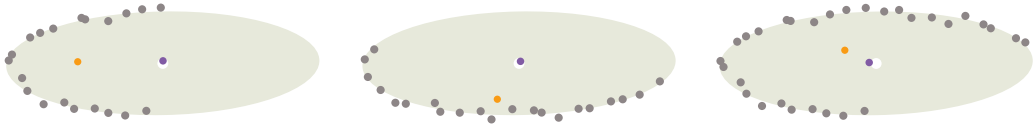


Abbildung 2.3: Ellipse-Fitting und Mean der Punktwolke im Vergleich
Gezeigt werden drei Punktwolken, die aus den hellgrauen Ellipsen generiert und getrennt voneinander verarbeitete wurden. Weiß ist der Mittelpunkt der Ellipse eingezeichnet, violett der Mittelpunkt der Ellipse, die mit dem vorgestellten Verfahren gefunden wurde, orange der Durchschnitt (Mean) der Punktwolke.

Drei der vier vorgestellten Verfahren verwenden Mean-Shift um die ellipsenförmigen Ringe in den Punktwolken zu detektieren. Dieser Algorithmus wurde von Fukunaga u. Hostetler (1975) unter dem Titel »The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition« vorgestellt. Bei den Punktwolken von Laser-Range-Scannern handelt es sich aber nicht um Dichtefunktionen im strengen Sinne. Zum Beispiel ist im Zentrum des Oberkörpers die Dichte der Punktwolke genauso gering wie in der Umgebung, leiglich auf dem ellipsenförmigen Ring befinden sich Punkte. Für die Punktwolke einer vollständigen Ellipse befindet sich trotzdem der Durchschnitt aller Punkte im Zentrum der Ellipse. Sobald aber nur Abschnitte der Ellipse in der Punktwolke enthalten sind, stimmt der Durchschnitt der Punkte nicht mehr mit dem Zentrum der Ellipse überein (vgl. Abbildung 2.3). Diese Schwäche ist dem Prinzip des Mean-Shift-Algorithmus geschuldet, der die Zentren von hoher Dichte einer Punktwolke anzeigt. Das Ellipse-Fitting unterliegt dieser Schwäche nicht.

In dieser Arbeit wird die Aufbereitung der Daten der LRS von Schenk u. a. (2012) verwendet, allerdings wird das Mean-Shift-Clustering durch das in Ab-

schnitt 2.3 beschriebene Ellipsen-Fitting ersetzt und der Personen-Tracker von Volkhardt u. a. (2013) verwendet.

2.2 Verteiltes System zum Personentracking

Um aus den Daten der Laser-Range-Scanner die Position eines Menschen oder Roboters zu extrahieren, sind im Allgemeinen fünf Schritte notwendig:

Vorverarbeitung Die LRS können prinzipbedingt keine spiegelnde Oberflächen vermessen. Befinden sich beispielsweise Glasoberflächen im Detektionsbereich, entstehen Fehlmessungen, da nicht die Entfernung bis zur Glasoberfläche gemessen wird, sondern die Lände des Strahls bis zum nächsten nicht spiegelnden Objekt. Die fehlerhafte Messung ist damit länger als der tatsächliche Abstand bis zur spiegelnden Oberfläche. Wird die maximale Entfernung für diesen Bereich in der Vorverarbeitung der Messungen eingeschränkt, können Objekte zwischen dem LRS und der spiegelnden Oberfläche ohne Einschränkung gemessen werden.

Datenzusammenführung Die Daten aus den einzelnen LRS müssen in zeitlichen und räumlichen Bezug gesetzt werden. Dadurch entsteht aus vielen Entfernungsmessungen eine Punktwolke, die die Oberfläche der Objekte auf einer bestimmten Höhe im von den LRS abgedeckten Raum darstellt (vgl. Abbildung 2.4).

Hintergrundsegmentierung Befindet sich im abgedeckten Raum keine Person oder beweglichen Gegenstände, kann davon ausgegangen werden, dass die Punktwolke nur Wände und unbewegliche Objekte enthält (der »Hintergrund«). Aus der Sicht der jeweiligen LRS kann also diese Entfernungsmessung als Hintergrund angenommen werden. Alle Entfernungsmessungen, die eine geringere Distanz aufweisen als der Hintergrund, werden als Vordergrund angenommen.

Detektion In den Vordergrundpunkten wird nach Personen gesucht. Die Position der gefunden Personen wird an den Tracker weitergeleitet.

Tracking Während die Detektion in der Regel ausschließlich mit den jeweils aktuellen Daten arbeitet, versucht der Tracker die Personenpositionen in Beziehung zueinander zu setzen: Er trackt (verfolgt) die einzelnen Personen und weist ihnen eine eindeutige Identifikationsnummer zu. Je nach Parametern des Trackers kann er kleine Fehler in der Detektion überbrücken. So kann ein kurzzeitiges Übersehen einer Person des Detektors durch den Tracker ausgeglichen werden.

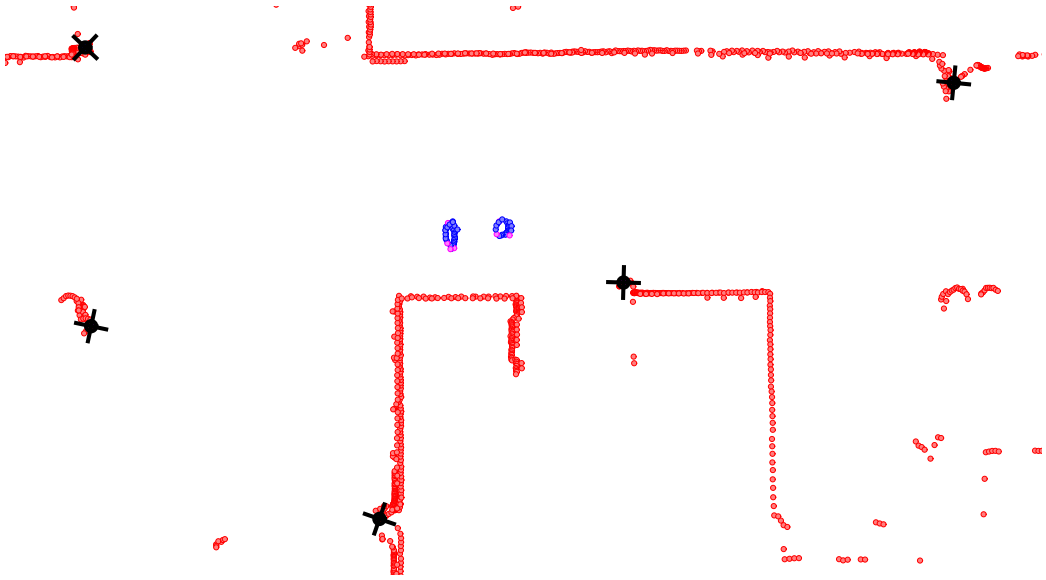


Abbildung 2.4: Punktwolke mit fünf Laser-Range-Scannern
Die Laser-Range-Scanner sind als schwarze Kreise mit Kreuzen eingezeichnet. Der gezeigte Ausschnitt ist ca. 18 m *breit. Nur blaue Punkte werden weiterverarbeitet, rote werden als Hintergrund angenommen, rosa Punkte wurden von der vorverarbeitenden Software als Punkte klassifiziert, die zwischen Vorder- und Hintergrund liegen. Die linke Ellipse stellt eine Person dar, rechts daneben befindet sich der Roboter.*

Das bei den Experimenten eingesetzte System besteht aus fünf SICK Laser-Range-Scannern vom Typ LMS151 10100. Diese verfügen über einen Öffnungswinkel von 270° bei eine maximalen Auflösung von 0,25°, die Sensoren können

aber auch in einem 0,5°-Modus betrieben werden, wie es bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimenten der Fall war.

Der Strahl wird durch einen Laser bei 905 nm Wellenlänge erzeugt und mit einem rotierenden Spiegel abgelenkt. Die verwendeten Laser-Range-Scanner unterstützen eine maximale Frequenz von 50 Hz (50 Messungen des 270°-Bereichs pro Sekunde) (LMS, 2012), werden aber lediglich mit 25 Hz betrieben.

Trifft der Laser-Strahl[1] die Kante eines Objekts, liegt die gemessene Distanz zwischen der Entfernung des Objekts und des Hintergrunds. Diese Fehlmessungen werden bereits in der Vorverarbeitung erkannt und für die weitere Verarbeitung verworfen.

Der Arbeitsbereich des LMS151 liegt bei 0,5 bis 50 m, bei 10% Remission werden jedoch nur Objekte bis zu einer Entfernung von 18 m erkannt (LMS, 2012). Die maximale Entfernung wird per Software auf 10 m begrenzt.

Beim Aufstellen der Laser-Range-Scanner sollte darauf geachtet werden, dass die zu detektierenden Objekte stets von zwei gegenüberliegenden Laser-Range-Scannern gesehen werden können, sodass jedes Objekt von allen Seiten durch LRS detektiert werden kann. Dadurch ist gewährleistet, dass alle Personen nicht nur durch Ellipsen-Segemente, sondern durch ganze Ellipsen in der Punktwolke abgebildet werden.

2.3 Ellipse-Fitting

Ellipse-Fitting steht für ein Verfahren mit dem eine oder mehrere Ellipsen in zweidimensionalen Datensätzen erkannt werden können. In der Regel wertet der Algorithmus Pixelbilder oder auch Punktwolken aus und liefert als Ergebnis die Parameter der Ellipsen, die in den Eingangsdaten enthalten sind.

Mit LRS auf Oberkörperhöhe wird eine Person in der zusammengeführten Punktwolke als eine Ansammlung von Punkten in der Form eines ellipsenförmi-

[1] Durch 0,015 rad Weitung hat der Strahl einen Durchmesser von 17 cm bei einer Entfernung von 10 m.

ge Ringes abgebildet. Bisher werden zur Detektion der Mittelpunkte dieser ellipsenförmigen Ringe Algorithmen wie Mean-Shift eingesetzt. Allerdings lassen sich bessere Ergebnisse erzielen, wenn in den Punktwolken nicht nach Maxima in der Punktdichte sondern nach Ellipsen gesucht wird.

2.3.1 State of the Art

Bei Algorithmen wie RANSAC und RHT werden zufällig Punkte aus der Vordergrundmenge der zu untersuchenden Punktmenge gezogen. Aus diesen Punkten wird anschließend die gesuchte geometrische Figur berechnet. Eine Linie lässt sich beispielsweise eindeutig durch zwei Punkte beschreiben, ein Kreis durch drei Punkte. Eine Ellipse kann entweder aus fünf Punkten (Nguyen u. a., 2009), oder drei Punkten und den Tangenten an den Punkten bestimmt werden (Zhou u. Papanikolopoulos, 2011). Die Tangenten bestimmen Zhou u. Papanikolopoulos (2011) »by performing least square fitting among a small neighborhood of pixels«.

Die meisten der hier beschriebenen Verfahren wurden entwickelt, um Ellipsen in Pixelbilder zu detektieren. Dadurch ergeben sich einige Unterschiede: Die in Abbildung 2.4 (Seite 10) zu sehende Ellipse einer Person besteht aus 37 Punkten, die des Roboters aus 25, obwohl sich beide Objekte mit 2,7 m und 3,6 m noch relativ nahe an einem Laser-Range-Scanner befinden. Dagegen besteht die synthetisch erzeugte Kontur einer Ellipse (1 Pixel breit) in der Größe 320 auf 420 Pixel bereits aus über 1000 Pixeln.

Da also bei den Daten der Laser-Range-Scanner nicht besonders viele Punkte für eine einzelne Ellipse zur Verfügung stehen und diese auch verrauscht sein können, wurde der Ansatz, bei dem die Tangenten um drei zufällig gewählte Punkte bestimmt werden müssen, nicht weiter verfolgt.

Um die relativ hohe Datendichte eines Pixelbildes zu reduzieren und Echtzeitfähigkeit zu gewährleisten, erzeugen Nguyen u. a. (2009) zusammenhängende Linien-Segmente aus dem Kantenbild. Da bei dieser Applikation auch sich über-

schneidende Ellipsen detektiert werden sollen, werden diese Linien-Züge im nächsten Schritt unter anderem anhand des Winkels getrennt und wiedervereinigt, um möglichst durchgehende Ellipsen zu erhalten. Aus der so entstandenen Gruppierung von Linien bzw. Punkten werden dann jeweils zufällig fünf Punkte gezogen und daraus eine Ellipse gebildet. Mit einem Fehlerterm, der die gefundene Ellipse mit dem ursprünglichen Kantenbild vergleicht, wird bestimmt, ob es sich dabei um eine gültige Ellipse handelt.

Da die Daten der LRS bereits in der Form von Linien-Segmenten vorliegen, könnte das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren durch diesen Ansatz weiter verbessert werden.

RANSAC

Fischler u. Bolles stellten 1981 den RANSAC-Alogrithmus (RANdom SAmple Consensus) vor. Ursprünglich entwickelt um vollautomatisch den Kamera-Standpunkt aus einem Bild mit bekannten Orientierungspunkten zu extrahieren, lässt sich RANSAC auch zum Fitten verschiedener geometrischer Elemente auf eine Punktwolke verwenden. Die Stärke von RANSAC liegt darin, auch bei stark verrauschten Datensätzen mit deutlichen Ausreißern gute Ergebnisse zu liefern. Übertragen auf das Problem der Ellipsen-Detektion in eine Punktwolke würden sich folgende Schritte des RANSAC-Algorithmus ergeben: Zuerst werden fünf zufällige Punkte aus der Punktwolke gezogen und die dazugehörige Ellipse berechnet. Danach werden die Punkte der Punktwolke gesucht, die (mit einem gewissen Fehler) die soeben gefundene Ellipse stützen. Ist die Untermenge groß genug, wird eine Ellipse auf die Untermenge der Punkte mit der Methode der kleinsten Quadrate gefittet. Als Abbruch-Kriterium für die Suche kann eine Mindestzahl an Punkten für die gefundene Ellipse oder ein Maximum an Iterationen dienen.

Wichtig für die Funktion von RANSAC sind zwei Parameter: Zum einen der Grenzwert, ab dem ein Punkt die gefundene Ellipse stützt und zum anderen die

notwendige Anzahl der Punkte, ab der die Ellipse als detektiert gilt. Beide Parameter müssen experimentell bestimmt werden. Darüberhinaus kann RANSAC nur eine einzige Ellipse in den Daten finden. Danach müssten die Punkte, die zu dieser Ellipse gehören, aus dem Datensatz entfernt werden und erneut nach weiteren Ellipsen gesucht werden. Der RANSAC-Ansatz wurde deshalb innerhalb dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

RHT

Während eine klassische Hough Transform (HT) zum Finden von Ellipsen einen fünfdimensionalen Raum als Ergebnis liefert (die fünf Dimensionen ergeben sich aus den fünf Freiheitsgraden einer Ellipse: Winkel, Koordinaten des Mittelpunkts, große und kleine Halbachse), der dann auf erhöhte Punktdichten durchsucht werden müsste, wird beim davon abgeleiteten »Randomzied Hough Transform« (RHT) das Clustern beim Ablegen der Daten integriert. Xu u. a. (1990) nennen weitere Vorteile dieser Variante: Ein unendlich großer Parameter-Raum (bei HT muss dieser vorher definiert werden) bei beliebig hoher Auflösung (bei HT wird der Parameter-Raum in ein Raster eingeteilt) und bei geringem Speicher-Verbrauch (je größer der Parameter-Raum und je genauer das Raster bei HT angelegt wird, desto mehr Speicher wird benötigt).

Um auch Teile einer Ellipse zu detektieren, schlagen Zhou u. Papanikolopoulos (2011) vor, RHT mit K-Means zu kombinieren: Es wird eine bestimmte Zahl zufälliger Ellipsen erzeugt und mit Hilfe eines Distanz-Maßes alle Vordergrundpixel auf die Ellipsen aufgeteilt. Für alle so entstandenen Segmente wird eine RHT durchgeführt und mit den Ergebnissen die dazugehörende Ellipse aktualisiert. Die Aktualisierung entfällt, wenn der Abgleich zwischen dem ursprünglichen Kantenbild und den berechneten Ellipsen schlechter ausfällt als der im vorherigen Schritt. Der Vorgang wird abgebrochen, sobald die Ellipsen in mehreren aufeinanderfolgenden Durchgängen nicht aktualisiert wurden oder eine Maximalzahl an Iterationen überschritten wurde.

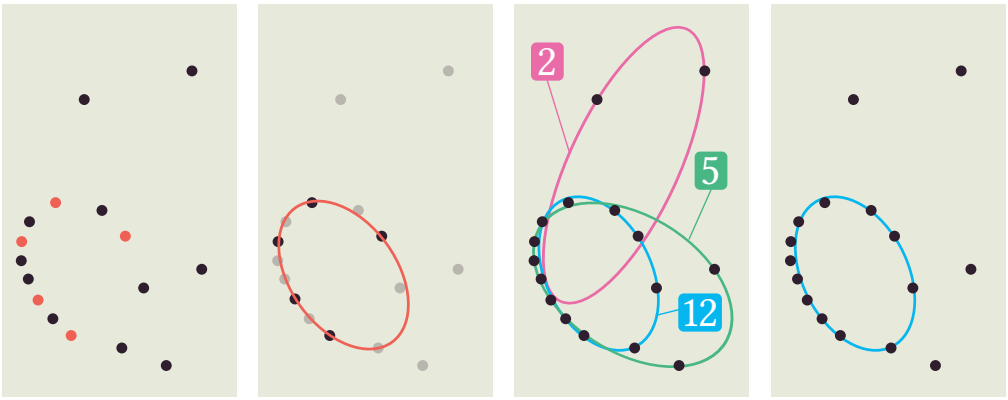
Da das implementierte Ellipse-Fitting mit RHT bereits zu ausreichend guten Ergebnissen führt, wurde eine Erweiterung mit K-Means nicht weiter verfolgt.

2.3.2 Entwickelter Algorithmus

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren orientiert sich an der »Randomzied Hough Transform« (RHT). Im Allgemeinen wird bei der RHT zu Beginn eine zufällige Menge an Vordergrundpunkten gezogen. Die Größe der Menge hängt davon ab, wie viele Punkte nötig sind, um die gesuchte Geometrie eindeutig zu beschreiben. So wären bei einer Linie beispielsweise zwei Punkte nötig, bei einer Ellipse fünf Punkte (vgl. Abbildung 2.5). Aus den Punkten werden im nächsten Schritt die Parameter der gesuchten Geometrie extrahiert. Für die Linie könnten das die Parameter Steigung und Abstand vom Ursprung sein, bei der Ellipse sind es die Parameter Mittelpunkt, Winkel, große und kleine Halbachse. Die so gefundenen Parameter werden nun mit Parametern in einer Liste verglichen. Findet sich dort bereits ein Eintrag mit ähnlichen Parametern wird der Durchschnitt der beiden berechnet und der Zähler dieser Parametern erhöht. Falls sich keine ähnlichen Parameter in der Liste befinden, werden die neuen Parameter hinzugefügt. Nach einer bestimmten Zahl an Ziehungen oder einem anderen Abbruchkriterium (z.B. maximale Zahl an Ellipsen[2]), kann die Liste nach der Anzahl der Objekte geordnet werden. Die Parameter, deren Zähler einen bestimmten Schwellenwert überschreiten, werden als detektierte Ellipsen angenommen.

Da das Ellipse-Fitting, wie es für diese Arbeit entwickelt wurde, keine beliebigen Ellipsen detektieren muss, sondern nur die von Personen und einen Robotern, können maximale Höhe und Breite für die zu findenden Ellipsen eingeschränkt werden. Darüber hinaus sind Vorder- und Hintergrund bereits von der Vorverarbeitung getrennt. Die bereits angesprochenen Unterschiede zu den Verfahren zur Detektion in Pixelbildern liegen darin, dass die Ellipse durch nur 25 bis 50 Punkte definiert wird und diese in der Regel keine perfekte Ellipse bilden.

[2] Nicht aus allen Ziehungen lässt sich eine Ellipse bilden.



Auswahl fünf zufälliger Punkte | Ellipse aus den fünf Punkten | Einfügen der Ellipse in Liste | Bewertung und Auswahl

Abbildung 2.5: Übersicht Entwickelter Algorithmus
Vereinfachte Darstellung des Entwickelten Algorithmus

Auswahl fünf zufälliger Punkte Die größte Abweichung des hier entwickelten Algorithmus gegenüber RHT erfolgt bereits im ersten Schritt: Bei der Auswahl der Punkte, aus denen im nächsten Schritt die Ellipse gebildet wird. Während bei einer klassischen RHT fünf zufällige Punkte ausgewählt werden, profitiert das vorgestellte Verfahren davon, dass nur Ellipsen mit einer maximalen Größe gesucht werden (siehe Abbildung 2.6)

Die Auswahl der Punkte erfolgt immer noch zufällig, allerdings werden nicht alle Vordergrund-Punkte berücksichtigt. Stattdessen wird ausgehend von jeden Vordergrund-Punkt nach weiteren Punkten in der näheren Umgebung gesucht und aus diesen eine Teilmenge gebildet[3]. Weist diese Teilmenge mehr als vier Punkte auf, werden daraus vier zufällige Punkte gezogen. Zusammen mit dem ursprünglichen Vordergrund-Punkt ergeben sich daraus die benötigten fünf Punkte.

Der Vorgang kann durch eine maximale Zahl an Ziehungen je Vordergrund-Punkt und einer maximalen Zahl an berücksichtigten Vordergrund-Punkten limitiert werden.

[3]Der Suchradius sollte mindestens doppelt so groß wie das Doppelte der großen Halbachse der größten Ellipse sein.

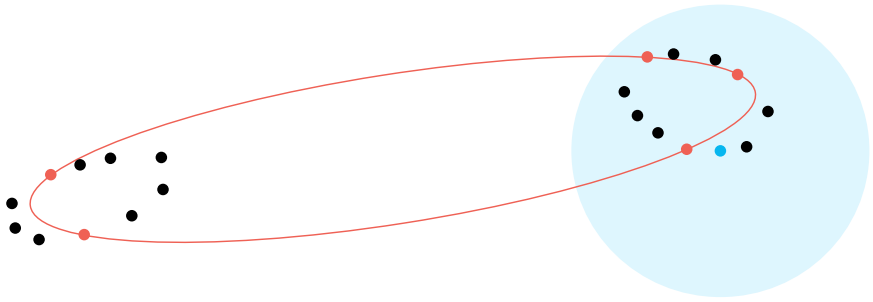


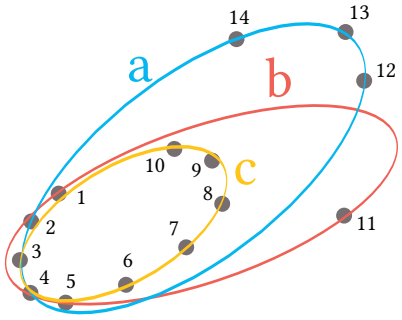
Abbildung 2.6: Auswahl der Punkte
Dargestellt sind die Punkte zweier Ellipsen: Bei einer zufälligen Auswahl der Punkte könnten die fünf roten Punkte ausgewählt werden und daraus die rote Ellipse entstehen. Da Ellipsen in dieser Größe nicht gesucht werden, können derartige Konstellationen verhindert werden, indem nur in einem bestimmten Bereich (hellblau) von einem ersten Punkt (blau) nach weiteren Punkten gesucht wird.

Ellipse aus den fünf Punkten Als nächstes wird untersucht, ob und welche Ellipse durch die gezogenen fünf Punkte verläuft. Dabei wird darauf zurück gegriffen, dass sich jede Ellipse auch mit Hilfe der allgemeinen Kegelschnittgleichung beschreiben lässt (siehe Abschnitt A.2). Aus den Parametern der Kegelschnittgleichung lassen sich dann in einem zweiten Schritt die fünf Parameter der Ellipse (Winkel, Koordinaten des Mittelpunkts, kleine und große Halbachse) berechnen.

Anschließend wird überprüft, ob die Ellipse in das Muster der gesuchten Ellipsen passt. Dafür wird die große und kleine Halbachse mit Minimal- und Maximalwerten vergleichen. Ist die Ellipse zu klein oder zu groß, wird sie verworfen.

Einfügen der Ellipse in die Liste Ein Element in der Liste in denen die gefundenen Ellipsen gespeichert werden besteht aus drei Elementen: den Parametern der Ellipse (Winkel, Koordinaten des Mittelpunkts, große und kleine Halbachse), einem Zähler wie viele Ellipsen bereits mit der vorgegeben Ellipse verschmolzen wurden und einer Liste von Punkten aus denen die Ellipsen berechnet wurden.

Entspricht die gefundene Ellipse der vorgegebenen Größe, wird sie in der



Ellipse	Anzahl gefundener Ellipse	dazugehörige Punkte						
a	4	2 3 4 5 14 13 12	c	10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	c	10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
b	1	1 2 4 5 11	a	4	2 3 4 5 14 13 12	a	4	2 3 4 5 14 13 12
c	10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	b	1	1 2 4 5 11	b	1	1 2 4 5 11

Abbildung 2.7: Bewertung und Auswahl der Ellipsen
Oben eine beispielhafte Punktverteilung mit drei gefundenen Ellipsen, darunter die dazugehörige (vereinfachte) Liste: links in zufälliger Reihenfolge, in der Mitte nach der Anzahl der gefundenen Ellipsen sortiert, rechts sind die Punkte der Ellipse, die durch die meisten gefunden Ellipsen bestätigt wurde, (c) als verbraucht markiert. Damit sind für Ellipse a nur noch 57% der Punkte gültig, für Ellipse b 20%, wodurch beide Ellipsen nicht in das Ergebnis aufgenommen werden.

Liste möglicher Ellipsen gespeichert: Befindet sich bereits eine ähnliche Ellipse in der Liste, werden die Parameter der beiden Ellipsen durch einen gewichteten Mittelwert verrechnet, der Zähler erhöht und die Punkte zu den vorhandenen Punkten hinzugefügt. Falls sich noch keine ähnlich Ellipse in der Liste befindet, wird die Ellipse und deren fünf Punkte an die Liste angehängt.

Zum Vergleich von zwei Ellipsen wird die Summe der euklidischen Distanz von drei charakterisitischen Punkten (Mittelpunkt und jeweils einem Hauptscheitel und Nebenscheitel) zwischen den beiden Ellipsen berechnet.

Vor dem nächsten Schritt wird die Liste der Ellipsen auf ähnliche Ellipsen überprüft; diese werden gegebenenfalls zusammengeführt.

Bewertung und Auswahl der Ellipsen in der Liste Da sich in der Liste der gefundenen Ellipsen auch noch viele Ellipsen befinden, die durch Rauschen in den Eingangsdaten verursacht wurden (vgl. Abbildung 2.7, rote Ellipse), müssen

die ungültigen Ellipsen aussortiert werden. Dazu wird die Liste der Ellipsen nach dem Zähler des jeweiligen Eintrags sortiert. Es befindet sich dann die Ellipse, die am häufigsten bestätigt wurde, am Anfang der Liste. Sie wird als gültig angenommen, alle Punkte, die zur dieser Ellipse geführt haben, werden als verbraucht markiert.

Für alle weiteren Einträge in der Liste wird wie folgt verfahren: Zuerst wird überprüft, wie groß der Anteil der verbrauchten Punkte des Eintrages ist. Ein hoher Anteil deutet darauf hin, dass die Ellipse eine große Überlappung mit bereits als gültig markierten Ellipsen hat. Liegt der Anteil über einem bestimmten Schwellenwert, wird die Ellipse verworfen, die Punkte werden aber nicht als verbraucht markiert.

Unabhängig von der tatsächlichen Situation, wird also immer mindestens eine Ellipse als gültig markiert. Dieser Nachteil spielt bei der beschriebenen Anwendung eine untergeordnete Rolle, da sich während der Experimente immer eine Person und ein Roboter in dem von den Laser-Range-Scannern abgedeckten Gebiet befindet. Für Anwendungen bei denen diese Situation nicht ausgeschlossen werden kann, könnte die erste Ellipse auch gesondert geprüft werden und nur dann als gültig angenommen werden, wenn zum Beispiel der Zähler, oder die Anzahl der Punkte über einem Grenzwert liegt.

2.4 Evaluation

Eine präzise Evaluation des Gesamtsystems wurde nicht durchgeführt, da für eine solche Evaluation ein weiteres Trackingsystem nötig wäre, das über eine höhere Genauigkeit und einen ähnlich großen Tracking-Bereich verfügt. Eine Möglichkeit wäre, ein optisches Tracking zur Evaluation zu verwenden. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden.

Durch den Vergleich zwischen den Daten der Laser-Range-Scanner und den gefunden Personen konnten keine prinzipiellen Probleme festgestellt wer-

Abbildung 2.8: Fehldetektion einer Ellipse
Der vorgestellte Algorithmus detektiert eine Ellipse, obwohl zwei Kreise in der Punktwolke dargestellt sind.

den. Darüber hinaus wurden bei der Entwicklung des Ellipse-Fitting auch mit Software-Tests sicher gestellt, dass das Ellipse-Fitting für die vorgegebenen Test-Fälle korrekte Ergebnisse liefert.

Das Tracking hielt während der Entwicklung und der Durchführung der Experimente den Erwartungen stand, es konnten keine gravierenden Fehlfunktionen des Trackings festgestellt werden. Die Daten, die mit Hilfe des Ellipse-Fitting gewonnen wurden, liegen innerhalb des erwarteten Rahmens. Dennoch konnten folgende Probleme beobachtet werden:

- Die Erkennung mehrerer Ellipsen ist stark von der Punktdichte der Ellipsen abhängig: Unterscheidet sich die Anzahl der Punkte pro Ellipse stark, ist das korrekte Detektieren der Ellipsen erschwert.
- Befinden sich mehrere Ellipsen in geringer Distanz zueinander, ist die korrekte Erkennung der Ellipsen erschwert.
- Eine Ellipse kann auch einfach durch zwei Kreise simuliert werden (siehe Abbildung 2.8)
- Bei einem der drei Experimente wurde mit Hilfe der LRS eine rechteckige Fläche von ca. 85 m^2 mit sehr guten Ergebnissen abgedeckt. Für die anderen beiden Experimente musste eine L-förmige Fläche von insgesamt ca. 120 m^2 abgedeckt werden und es konnten leichte Beeinträchtigungen im Tracking festgestellt werden.

Für die Auswertung des Experiments »Personal Space« (siehe Abschnitt 4.3) wurden insgesamt 564 Abschnitte aufgezeichnet, wovon 24 aufgrund fehlerhaften Trackings des Roboters oder der Person ausgeschlossen werden mussten.

Das entspricht einer Fehlerquote von unter 5%. Für die Experimente »Guide« und »Follow« ergibt sich insgesamt einer Fehlerquote von 12%. Das deutlich schlechtere Abschneiden lässt sich wahrscheinlich darauf zurückführen, dass für »Guide« und »Follow« ein größerer Bereich überwacht werden musste.

Kapitel 3

Framework

Mit dem Framework werden die Experimente gesteuert und ausgewertet. Während der Durchfühung hat es zwei Hauptaufgaben: Die Aufzeichnung der Daten wie die Trajektorien des Roboters und der Versuchsperson und das Steuern des Roboters. Durch die Instruktion der Versuchsperson und durch das Framework kann sichergestellt werden, dass sich Roboter und Versuchsperson in einer reproduzierbaren Interaktions-Situation befinden.

Ein weiterer Teil des Frameworks ermöglicht es, die so gewonnenen Daten auszuwerten: Die aufgezeichneten Trajektorien können grafisch dargestellt werden: Kenngrößen wie die Durchschnittsgeschwindigkeit der einzelnen Abschnitte werden in tabellarischer Form dargestellt und Parameter wie die Geschwindigkeit können über den Verlauf der jeweiligen Trajektorie betrachtet werden.

Im Weiteren wird die Person, die mit dem Roboter interagieren soll, als »Versuchsperson« bezeichnet, nicht beteiligte Personen im von Laser-Range-Scannern abgedeckten Bereich als »Personen«.

Die Einheit aus Trajektorie der Versuchsperson, Trajektorie des Roboters, Hautleitmesswerte der Versuchsperson und Metadaten wie das verwendete Objective des Roboters, die während einer einzelnen Interaktion aufgezeichnet wurden, wird im Weiteren als »Abschnitt« bezeichnet. In der Regel beginnt der Ab-

schnitt mit dem Start der Versuchsperson und dem Anfahren des Roboters und endet wenn die Versuchsperson und der Roboter wieder zum Stehen kommen.

3.1 Durchführung und Aufzeichnung

Am Beispiel des Experiments »Personal Space« soll im Folgenden die Funktionsweise des Frameworks in groben Zügen erklärt werden. Ziel des Experiments ist, dass sich die Wege von Roboter und Versuchsperson kreuzen und so eine Ausweichsituation erzwungen wird. Der Versuch wird über die Daten der LRS gesteuert. Das Framework erwartet mindestens zwei Posen, die als ellipsenförmige Punktwolken in den Daten der LRS detektiert werden. Die eine Pose stellt den Roboter dar, die andere die Versuchsperson. Um den Roboter von der Versuchsperson unterscheiden zu können, wird die interne Lokalisierungsinformation des Roboters verwendet. Die erste Person, die den Bereich, der von den LRS abgedeckt wird, betritt, wird als Versuchsperson getrackt.

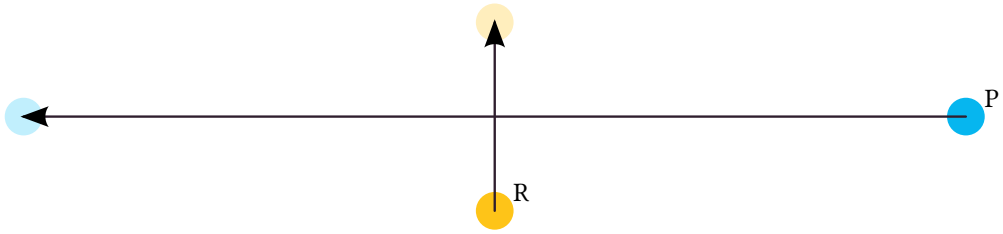


Abbildung 3.1: Möglicher Aufbau, um unterschiedliche Ausweichstrategien des Roboters zu testen
Die Person (P) startet, zur gleichen Zeit fährt der Roboter (R) los. Die Strecken sind so gewählt, dass sich Person und Roboter ungefähr zur gleichen Zeit am Kreuzungspunkt befinden und dadurch eine Situation entsteht, in der ein Ausweichmanöver notwendig wird.

Befindet sich die Versuchsperson an einem Startpunkt, wird das dazugehörige »Layout Element« aktiviert. Dieses »Layout Element« definiert neben dem Startpunkt welchen Endpunkt die Versuchsperson ansteuern kann und welche

Position der Roboter anfahren soll. Sobald die Versuchsperson den Startpunkt verlässt wird dem Roboter ein Befehl zum Fahren übermittelt. Der Zielpunkt des Roboters wird dabei in Abhängigkeit seiner Position gewählt.

Für den Roboter können verschiedene Objectives definiert werden, wobei durch die Objectives das Navigationsverhalten des Roboters genauer bestimmt wird. Das tatsächlich verwendete Objective wird zufällig ausgewählt, die Information, welches Objective gewählt wurde, wird im jeweiligen Abschnitt gespeichert.

Der Start- und Zielpunkt der Versuchsperson wird in der Regel durch eine Markierung am Boden angegeben. Das »Layout Element« wird deaktiviert, sobald sich die Versuchsperson am Zielpunkt befindet. Für das Experiment »Personal Space« sind zwei »Layout Elemente« definiert, wobei der Zielpunkt des einen der Startpunkt des anderen Elements ist.

Dadurch ist es möglich, dass sich die Versuchsperson ohne Eingriff eines Versuchsleiter zwischen zwei Punkten bewegt und der Roboter stets den Weg der Versuchsperson kreuzt.

Um auch die Experimente wie »Guide« und »Follow« durchführen zu können wurden weitere Elemente zum Framework hinzugefügt: Es ist möglich den Roboter, sobald er sich in einem bestimmten Bereich befindet, an ein vorgegebenes Ziel weiterzuleiten und so den »Follow«-Befehl zu beenden. Ebenso kann die Interaktion über einen gesonderten Befehl, der zum Beispiel über den Touchscreen des Roboters ausgelöst werden kann, begonnen werden, ohne dass die Versuchsperson den Startpunkt verlassen muss.

Darüber hinaus ist es möglich, gezielt das Tracking der Versuchsperson zu verlieren, indem Bereiche definiert werden, in denen das Tracking der Versuchsperson verloren gehen soll. Im Normalfall würde anschließend die beste Personen-Hypothese als Versuchsperson verwendet werden. Der Bereich, in dem nach neuen Personen gesucht wird, kann aber gesondert definiert werden. Da-

Abbildung 3.2: Einsatz mit nicht instruierten Passanten
Das Beispiel zeigt einen Flur, die Pfeile stellen den Weg eines möglichen Passanten dar. Er läuft zuerst durch einen Bereich, in dem er das Tracking verlieren würde, da er aber nicht getrackt wird, ändert sich der Zustand des Frameworks nicht. Sobald die Person den grünen Bereich betritt und keine andere Person bereits getrackt wird, wird die Person als Versuchsperson getrackt. Im grauen Bereich können die Experimente durchgeführt werden, sobald die Versuchsperson aber den roten Bereich betritt, verliert sie das Tracking. Der letzte Schritt könnte auch entfallen, da sie sich mit größerem Abstand außerhalb der Reichweite der LRS befindet und damit ebenfalls das Tracking verlieren würde. Es führt aber zu einer Zeitersparnis.

durch ist es möglich, auch Experimente mit nicht instruierten Personen durchzuführen (vgl. Abbildung 3.2).

3.2 Auswertung

Für die Auswertung werden die aufgezeichneten Daten in einzelne Abschnitte unterteilt. Jeder Abschnitt enthält neben den Trajektorien des Roboters und der Person auch die Daten der Hautleitwert-Messung (vgl. Unterabschnitt 4.2.2), aber auch Metadaten wie Start und Ziel der Person oder, im Falle einer Auswertung des Experiments »Personal-Space«, auch das zufällig ausgewählte Objective des Roboters.

Hat das Trackingsystem während der Aufzeichnung Versuchsperson oder Roboter verloren, werden diese Abschnitte verworfen. Darüberhinaus kann es auch vorkommen, dass das Tracking auf eigentlich unbeteiligte Personen überspringt. Diese Fälle müssen anschließend manuell aussortiert werden, können aber leicht als Ausreißer der maximalen Geschwindigkeiten erkannt werden.

Zur eigentlichen Auswertung des Abschnitts stehen zwei Möglichkeiten zur

Verfügung: Zum einen kann die Trajektorie, der Hautleitwert oder andere aufgezeichnete Daten zu einem einzelnen skalaren Wert verrechnet werden (zum Beispiel die Durchschnittsgeschwindigkeit der Person während eines Abschnitts). Zum anderen besteht auch die Möglichkeit, den Verlauf eines Wertes über die Zeit zu plotten, also zum Beispiel die Geschwindigkeit über die Zeit in einem Diagramm darzustellen.

Die skalaren Werte werden in einer Tabelle angezeigt und können auch nach Person oder Objective des Roboters gruppiert werden. Dabei werden für alle Skalare die Mittelwerte und die Standardabweichung für die jeweilige Gruppe gebildet. Zum einfacheren Einordnen der Ergebnisse können die gruppierten Werte mit dem T-Test auf ihre Signifikanz hin überprüft werden. Um die Einzelwerte innerhalb der gruppierten Werte vergleichen zu können, können diese auch als kumulative Verteilungsfunktion angezeigt werden.

Damit die Abhängigkeit zweier Metriken beurteilt werden kann, besteht die Möglichkeit, diese in einem Scatterplot anzuzeigen und die dazugehörigen Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman und den Empirischen Korrelationskoeffizienten zu berechnen.

Daneben ist es auch möglich, die jeweiligen Trajektorien zu visualisieren.

Kapitel 4

Navigationsverhalten mobiler Roboter gegenüber Menschen

4.1 State of the Art

Im Folgenden sollen verschiedene Ansätze zur Bewertung des Navigationsverhaltens eines Roboters vorgestellt werden.

Zlotowski u. a. untersuchen in einer empirischen Studie, wie sich ein Roboter idealerweise einem Passanten annähern kann. Dafür wurden sechs Videos aufgezeichnet: Die Videos zeigen, wie sich der Roboter jeweils von links, rechts oder frontal einem stehenden oder laufenden Passanten (eine für das Video instruierte Person) nähert. In einer Umfrage wurden die Teilnehmer gebeten, das Verhalten des Roboters zu bewerten. Dafür wurden jeweils einem Teilnehmer entweder die drei Videos mit stehendem oder gehendem Passanten gezeigt. Die Betrachter bevorzugten bei der Variante mit stehendem Passanten keine bestimmte Richtung, bei den Videos mit gehendem Passanten präferierten die Beobachter die beiden nicht frontalen Varianten (Zlotowski u. a., 2012).

Übertragen auf das »Personal Space Objective« könnte ausgewertet werden, ob Menschen es als angenehmer empfinden, wenn der Roboter die Versuchsper-

son großräumig umfährt, oder ob sie es bevorzugen, dass er abbremst, um der Versuchsperson den Vortritt zu lassen. Dadurch könnten verschiedene Verhaltensweisen des Roboters und der Eindruck auf die Versuchspersonen evaluiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll aber das Gesamtsystem Roboter mit seinem konkreten, implementierte Verhalten gegenüber der Versuchsperson evaluiert werden und nicht nur der Eindruck eines möglichen Verhaltens auf die Versuchsperson.

Auch Muñoz u. a. verwenden keinen realen Roboter, sondern vergleichen in ihrem Paper zwei verschiedene Navigations-Algorithmen mit Hilfe einer Simulation in Matlab, um zu entscheiden, welcher für den Roboter (30 cmx20 cm) implementiert werden soll. Dafür fährt der simulierte Roboter mit verschiedenen Start- und Endpunkten durch ein virtuelles Labyrinth mit unterschiedlichen Hindernissen. Die Autoren teilen ihre Metriken in drei Kategorien: »Security metrics«, »Dimensional metrics« und »Smoothness metrics«. Die »Security metrics« enthält minimale und durchschnittliche Abstände zu Hindernissen oder Wänden, die »Dimensional metrics« enthält unter anderem die zurückgelegte Strecke und für Roboter, die einer vorgegebenen Trajektorie folgen, ein durchschnittliche Distanz zu der vorgegebenen Trajektorie. Die letzte Kategorie enthält die »Bending Energy« mit der die Anzahl und Krümmung der Kurven in einer Trajektorie bewertet werden.

Unter anderem wird in dieser Arbeit der Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson und die zurückgelegte Strecke des Roboters zur Evaluation herangezogen. Eine Simulation der Interaktion zwischen Roboter und Versuchsperson scheidet aus, da nicht nur das Verhalten des Roboters evaluiert werden soll. Gegenstand dieser Arbeit ist auch zu untersuchen wie sich die unterschiedlichen Navigationsverhalten des Roboters auf das Verhalten der Versuchsperson auswirken.

Wonpil u. a. beschreiben in ihrem Paper, dass es üblich sei, die Lokalisierung, Kartierung und die Pfadplanung gegeneinander zu evaluieren, die drei Kompo-

nenten aber gleichzeitig ineinander verschränkt seien, weshalb sie zu Evaluierung ein externes Motion Capture System installieren. Um schließlich eine Aussage über die Performance der Navigation des Roboters treffen zu können, werden Metriken wie die »static position accuracy«, »path length«, »curvature of path« oder »maximum or average speed« ausgewertet (Wonpil u. a., 2013).

Einige der vorgestellten Metriken werden im Weiteren verwendet, um die Trajektorien der Versuchsperson und des Roboters auszuwerten.

Ebenso verwenden Dondrup u. a. ein Motion Capture System, welches die Position der Versuchsperson und des Roboters aufzeichnet. Sie evaluieren in ihrem Paper das Verhalten eines Roboters an einer Engstelle, in der dem Roboter eine Versuchsperson entgegenläuft. Als Maß für die Behinderung des Menschen durch den Roboter verwenden die Autoren die Differenz zwischen maximaler und minimaler Geschwindigkeit der Versuchsperson (Dondrup u. a., 2014).

Diese Metrik wird in der vorliegenden Arbeit auf Seite 36 ausgewertet.

Kruse u. a. verwenden ebenfalls ein Motion Capture System: ein Infrarot-Tracking-System bestehend aus zehn Kameras und vier passiven Markern, die am Kopf der Versuchsperson angebracht sind. Die Versuchsperson ist angewiesen, von ihrem Startpunkt in Richtung eines Regals (Distanz 8,5 m) zu laufen, um dort einen Fragebogen auszufüllen. Vom Startpunkt der Versuchsperson 5,5 m entfernt kreuzt ein Roboter den Weg (Gesamtstrecke Roboter: 6 m). Mit Hilfe des Fragebogens soll die Versuchsperson die Interaktion mit dem Roboter bewerten: Auf einer Skala von 1 bis 5 sollen »crossing situation (comfort)« und »robot behaviour (clear vs. confusing)« bewertet werden. Damit trotz unterschiedlicher Geschwindigkeit der Versuchspersonen immer eine »beinahe Kollision« zwischen Roboter und Versuchsperson beobachtet werden kann, wird die maximale Geschwindigkeit des Roboters je nach Versuchsperson in den ersten drei Durchgängen angepasst. Für die Auswertung folgen danach weitere zehn Durchgänge. Neben dem Fragebogen wird auch die Distanz zwischen dem Roboter und

dem Mensch ausgewertet und zwischen den beiden getesteten Modi verglichen (Kruse u. a., 2014).

Für das Experiment »Personal Space« wurde ein ähnlicher Versuchsaufbau gewählt, allerdings die Geschwindigkeit des Roboters nicht angepasst. Dadurch ergibt sich je nach Geschwindigkeit der Versuchsperson eine leicht unterschiedliche Situation. Auf eine Befragung der Versuchspersonen wurde bewusst verzichtet, da dass Navigationsverhalten des Roboters anhand technisch messbarer Kriterien evaluiert werden soll.

4.2 Versuchsaufbau

Alle Versuche wurden im Flur des 3. Stocks des Zuse-Baus an der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt. Der Flur wurde für die Versuche nicht gesperrt, der normale Durchgangsverkehr passierte also auch während der Experimente. Die Versuchspersonen wurden allerdings angehalten, erst zu starten, wenn sich alle Passanten außerhalb des durch die LRS überwachten Bereiches befinden.

Die Software und Konfiguration des Roboters wurde mit einer Ausnahme nicht speziell an den Versuch angepasst. Der verwendete Roboter lokalisiert sich selbst mit Hilfe eines Laser-Range-Scanners, der sich auf ca. 0,35 m Höhe befindet, indem er die Messung seines eigenen Laser-Range-Scanners mit einer internen Karte vergleicht. Die fünf Laser-Range-Scanner für das Tracking der Versuchsperson wurden mit Hilfe von Säulen aus stapelbaren Getränkekisten auf die Höhe von ca. 1,4 m gebracht. Die rechteckigen Hindernisse werden zwar vom Laser-Range-Scanner des Roboters erkannt, befinden sich aber nicht auf dessen interner Karte. Bei der Vorbereitung der Experimente hat sich gezeigt, dass die Lokalisierung des Roboters dadurch stark beeinträchtigt wird und damit auch die Ergebnisse des Experiments beeinflusst werden. Deshalb wurden die Säulen in die interne Karte des Roboters eingetragen.

4.2.1 Posen

Als Pose wird eine Position und die Ausrichtung im Raum bezeichnet. Im zweidimensionalen Raum besteht eine Pose also aus x- und y-Koordinate und einem Winkel.

Auf die Punktwolken der Laser-Range-Scanner wird das im Abschnitt 2.3 vorgestellte Verfahren zur Ellipsen-Detektion angewendet. Dadurch liegt im Idealfall für jede Person und den Roboter je eine Ellipse vor. Für die erkannten Personen wird der Mittelpunkt der Ellipse als der aktuelle Standpunkt angenommen. Durch den Winkel der Ellipse lässt sich theoretisch auch eine Aussage über die Ausrichtung des Oberkörpers treffen. Da der detektierte Bereich des Roboters einen Kreis darstellt, lässt sich beim Roboter keine Aussage über die Ausrichtung treffen.

In der Praxis hat sich jedoch herausgestellt, dass der Winkel der Personen für eine Auswertung zu sehr rauscht und keine eindeutigen Schlüsse daraus gezogen werden können.

Die Laser-Range-Scanner arbeiten mit einer zeitlichen Abtastung von 25 Hz. Darauf wird das vorgestellte Ellipse-Fitting angewendet und die daraus resultierenden Posen vom Personen-Tracker von Volkhardt u. a. (2013) getrackt. Dieser arbeitet mit 10 Hz, sodass im Abstand von 0,1 s die Position des Roboters und die Pose der Versuchsperson aufgezeichnet wird.

4.2.2 Hautleitwert

Mit dem Hautleitwert (auch Hautleitfähigkeit) lässt sich die elektrodermale Aktivität (EDA) einer Person messen. Die Hautleitfähigkeit schwankt dabei langsam (skin conductance level SCL), aber »[s]pontan oder reizabhängig kommt es auch zu kurzfristigen stärkeren Veränderungen (skin conductance reaction SCR)« (Bösel, 1987, S. 95). »Dabei findet man hohe Leitfähigkeitswerte bei Schreck, bei erhöhter Aufmerksamkeit, bei freudiger oder ängstlicher Anspannung, bei latenter

Angst, sowie bei tonischer (vorbereitender) und phasischer (leistender) Muskeltätigkeit.«(Bösel, 1987, S. 100) Die Latenz zwischen Reiz und Reaktion beträgt zwischen 1,3 und 2,5 Sekunden (vgl. Bösel, 1987, S. 99). Gemessen wird der Hautleitwert in Siemens ($S = \frac{1}{\Omega}$). Typische Werte liegen dabei zwischen 5 und 10 µS. Zwischen einzelnen Personen bestehen aber »erhebliche Unterschiede« (Köhler, 2001, S. 164). Bei einer Reaktion auf einen Reiz erhöht sich der Hautleitwert um 0,01 und 0,1 µS und benötigt ungefähr 5 Sekunden, um wieder abzuklingen (vgl. Köhler, 2001, S. 165).

In verschiedenen psychologischen Versuchen konnte gezeigt werden, dass Stress in Form von Elektroschocks, Filmdarstellungen von Unfällen oder lauten Tönen die elektrodermale Aktivität der Probanden beeinflusst (vgl. Boucsein, 1992, S. 284).

Gemessen wird der Hautleitwert mit Elektroden am intermedialen Phalang (vorletztes Glied des Fingers) von Mittel- und Zeigefinger, es ist aber auch möglich, Elektroden am Thenar (Daumenballen) und Hypothenar (Kleinfingerballen) anzubringen (vgl. Boucsein, 1992, S. 96). An den Fingern können wiederverwendbare Elektroden verwendet werden, am Daumen und Kleinfingerballen werden Klebeelektroden verwendet, die nur einmal verwendet werden können.

Bei der Anwendung während psychologischer Experimente wird empfohlen, für EDA-Aufnahmen grobe Bewegungen möglichst zu vermeiden (»The most important physiological source of artifacts in EDA recording is movement« (Boucsein, 1992, S. 124)). Der Proband sollte sitzen, liegen oder zumindest den Arm mit den Elektroden nicht bewegen.

Die meist verwendete Metrik beim Auswerten des Hautleitwertes ist die Amplitude (vgl. Boucsein, 1992, S. 134). Damit wird in psychologischen Versuchen die »Electrodermal Response« (EDR) gemessen. Überlappen sich mehrere EDRs, können sie – wie in Abbildung 4.1 gezeigt – ausgewertet werden.

Für die Messung wurde das System »eSense Skin Response« von »Mindfield

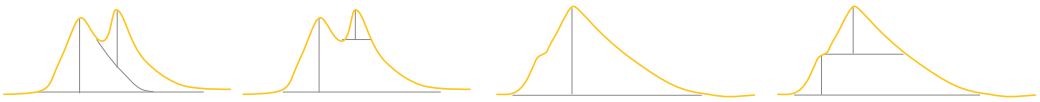


Abbildung 4.1: Auswertung Hautleitwert
Verschiedene Möglichkeiten, überlappende Anstiege des Hautleitwerts auszuwerten (vgl. Boucsein, 1992, S. 136)

Biosystems« mit Elektroden am Zeige- und Mittelfinger verwendet, die Werte wurden von einem Smartphone an das Auswertungs-Framework weitergeleitet.

4.2.3 Sonstige aufgezeichnete Daten

Damit der Roboter im Notfall selbstständig zum Stehen kommt, befindet sich rund um den Roboter ein so genannter »bumper switch«. Wird der Bumper ausgelöst, bleibt der Roboter stehen und muss manuell zurückgesetzt werden. Während des Experiments wird die erste Auslösung des Bumpers nach eine Wartezeit von zwei Sekunden überschrieben und für die Auswertung entsprechend vermerkt. Obwohl während der Vorbereitung der Experimente oft der Bumper des Roboters betätigt wurde, wurde er während der ausgewerteten Experimente nur ein einziges Mal ausgelöst.

Durch die Informationen aus verschiedenen Sensoren (auf Roboter montierte Laser-Range-Scanner, Inkremental-Sensor) lokalisiert sich der Roboter in einer Karte. Wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben, ist diese Lokalisierung nicht immer korrekt. Zu Vergleichszwecken wird diese Pose aufgezeichnet und kann so mit der Pose, die vom externen System gewonnen wurde, verglichen werden (siehe Abschnitt A.1).

Darüberhinaus wurden für die Experimente »Guide« und »Follow« ein weiterer interner Zustand des Roboters aufgezeichnet. Damit der Roboter die beiden Experimente korrekt durchführen kann, muss er die Position der Versuchsperson kennen und tracken. Die Position, an der der Roboter die Versuchsperson vermu-

tet, wurde mit aufgezeichnet. Dadurch lässt sich unabhängig von der Evaluation des Gesamtverhaltens des Roboters das Trackingsystem des Roboters beurteilen.

4.3 Personal Space

Nach Hall (1990) lässt sich der Raum um eine Person in vier verschiedene Zonen einteilen: Intimzone, persönliche, soziale und öffentliche Zone. Die jeweilige Größe der vier Zonen ist dabei vom jeweiligen Kulturkreis der Person, aber auch von der Situation abhängig. Wichtig für das Verhalten des Roboters ist, dass es Menschen als unangenehm empfinden, wenn andere Personen in ihre Zone eindringen, sofern es in der Situation als unangemessen bewertet wird. Da davon auszugehen ist, dass diese unangenehme Gefühl nicht nur durch Menschen, sondern auch durch Roboter hervorgerufen werden kann, ist es für eine angemessene Interaktion zwischen Roboter und Mensch wichtig, dass der Roboter einen Mindestabstand zum Menschen einhält. Damit dieser Abstand eingehalten werden kann, wurde das »Personal Space Objective« entwickelt.

4.3.1 Aufbau

Die Versuchsperson ist angehalten, sich zwischen zwei mit einem kleinen »x« auf dem Boden markierten Punkten hin und her zu bewegen. Sobald sie sich von einem Punkt einen bestimmten Abstand weit entfernt hat, wird der Roboter aktiviert und fährt zu einem gegenüberliegenden Punkt (Übersicht siehe Abbildung 4.2). Dadurch kreuzen sich die Wege von Person und Roboter. Wie im Weiteren gezeigt, wird dadurch, je nachdem in welchem Modus sich der Roboter befindet, die Versuchsperson mehr oder weniger behindert.

Da im Rahmen dieser Arbeit auch neue Metriken entwickelt werden sollen, ist es notwendig, die gewonnenen Erkenntnisse einordnen zu können. Deswegen soll der Roboter nicht nur mit aktivierten »Personal Space Objective« fahren, sondern auch ohne »Personal Space«. Der andere Extremfall, der komplett un-

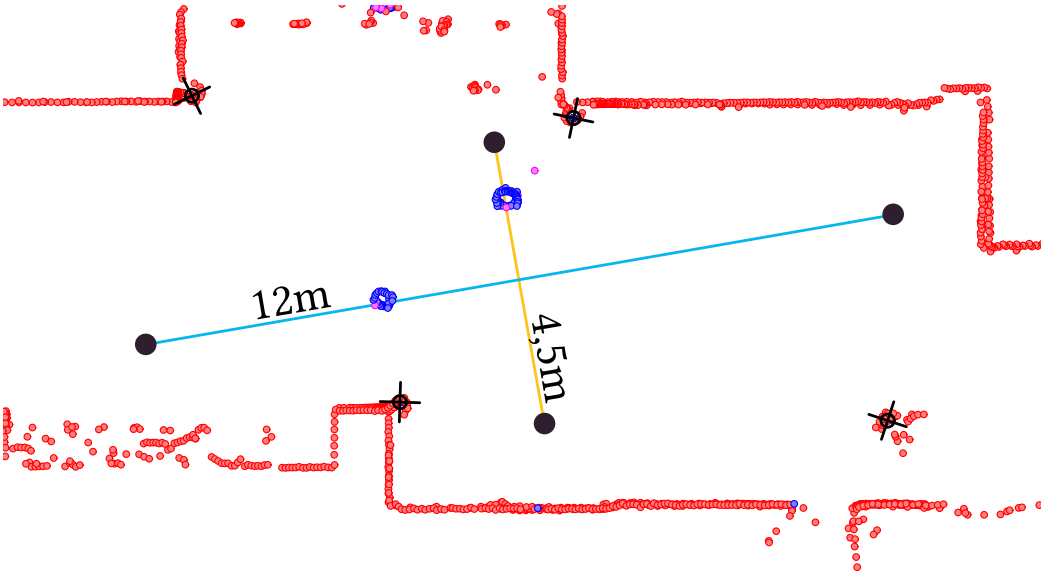


Abbildung 4.2: Punktwolke »Personal Space«
Blau eingezeichnet ist der ideale Weg der Versuchsperson, gelb der ideale Weg des Roboters. Am Anfang und Ende des Weges für die Versuchsperson wurde mit einem kleinen »x« eine Markierung auf dem Boden angebracht. Auf der blauen Linie befindet sich die Versuchsperson, auf der gelben der Roboter.

behinderte Weg der Person vom Start zum Ziel, soll ebenso evaluiert werden. Um eine Anpassung der Person an das Roboterverhalten zu verhindern, sollen die drei Modi (Roboter fährt ohne »Personal Space Objective«, Roboter fährt mit »Personal Space Objective«, Roboter bewegt sich nicht) zufällig ausgewählt werden.

Das genaue Verhalten des »Personal Space Objectives« wird durch einen Parameter bestimmt, der angibt wie groß der Bereich um die Person ist, in den der Roboter nicht eindringen soll. Der Bereich um die Person wird als Gaußfunktion modelliert. Für die Experimente wurde für die Varianz dieser Gaußfunktion 0,1 m und 0,3 m gewählt, sodass insgesamt vier unterschiedliche Verhaltensweisen des Roboters evaluiert werden.

Die Versuchspersonen wurden vor dem Experiment mit folgenden Anweisungen instruiert:

- möglichst gerade, auf kurzem Wege zwischen den beiden Punkten laufen
- die Hand mit dem Hautleitwert-Sensor möglichst nicht bewegen
- erst dann loslaufen, wenn der Roboter an seinem Ziel angekommen ist (wird durch einen kurzen Ton signalisiert)
- während des Versuchs nicht reden
- falls sich Passanten im Bereich zwischen den vier Punkten befinden, an einem der beiden Punkte warten bis diese den Bereich verlassen haben
- nach Möglichkeit gleichmäßig schnell zwischen den Punkten laufen
- am Start und am Ziel die Füße rechts und links neben den Markierungen auf dem Boden stellen

4.3.2 Übersicht zu den gewonnenen Daten

Insgesamt wurden etwas über 180 Minuten an auswertbarem Material aufgenommen. Daraus lassen sich 564 Abschnitte extrahieren. Um Fehler des Trackings oder Probleme mit dem Roboter auszuschließen, wurden die gewonnenen Trajektorien von Roboter und Person auf die maximale Geschwindigkeit hin überprüft und Ausreißer ausgeschlossen. Ebenso wurde mit der zurückgelegten Strecke verfahren. Dadurch mussten 24 Abschnitte ausgeschlossen werden. Für eine Aufschlüsselung der Daten siehe Tabelle 4.1.

Als Probanden dienten Mitarbeiter des Fachgebiets Neuroinformatik und Kognitive Robotik (1–7,11) und Studenten (8–10). Bis auf zwei Probanden (8 und 9) sind alle Probanden männlich.

4.3.3 Auswertung

Hesitation Signals

In ihrem Paper »Hesitation Signals in Human-robot Head-on Encounters: A Pilot Study« evaluieren Dondrup u. a. (2014) zwei verschiedene Verhaltensweisen eines Roboters. Im »adaptive«-Modus wird der Roboter langsamer, sobald er sich

Versuchsperson	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Gesamt
Zeit [min:sec]	8:23	18:05	16:03	16:04	16:09	18:41	17:52	16:35	18:21	17:25	17:20	180:58
Durchschnittsgschw. mean [m/s]	1,16	1,35	1,21	1,30	1,50	1,19	1,16	1,28	1,29	1,20	1,36	1,28
Durchschnittsgschw. std [m/s]	0,04	0,03	0,03	0,05	0,04	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03	0,03	0,11
Anz. Roboter fährt nicht	7	11	11	11	15	15	12	8	11	18	13	132
Anz. Personal Space 0,3 m	5	23	17	10	19	6	8	9	8	19	11	135
Anz. Personal Space 0,1 m	4	3	9	10	11	19	15	19	20	8	18	136
Anz. kein Personal Space	9	16	12	11	11	12	14	14	15	10	13	137
Gesamt	25	53	49	42	56	52	49	50	54	55	55	540

Tabelle 4.1: Übersicht gewonnene Daten »Personal Space«
Anzahl der auswertbaren Abschnitte. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Versuchspersonen schwankt zwischen 1,16 m/s *(*4,2 km/h*) und* 1,50 m/s *(*5,4 km/h*). Für die Berechnung der durchschnittlichen Geschwindigkeit wurden* 0,4 m *von Start und Ende der Trajektorie ausgeschlossen und nur Trajektorien von »Roboter fährt nicht« berücksichtigt.*

einer Person nähert, im »non-adaptive«-Modus nimmt er die Person als statisches Objekt war und wählt den kürzesten Weg zum Ziel. Im Experiment laufen Roboter und Mensch direkt aufeinander zu.

Um eine Aussage über die Wirksamkeit ihrer Methode zu treffen, werten die Autoren das Geschwindigkeitsprofil der Versuchspersonen aus und vergleichen Minimal- und Maximal-Geschwindigkeit: »The non-adaptive behaviour showed a larger deceleration of the participant during interaction than the adaptive behaviour which means that the robot interfered with the participant's goal in an unexpected way, therefore, causing annoyance and stress.« (Dondrup u. a., 2014) Für den »adaptive«-Modus wird eine durchschnittliche Geschwindigkeitsdifferenz von 0,44 m/s angegeben, für den »non-adaptive«-Modus 0,52 m/s.

Dondrup u. a. (2014) geben nicht an, wie sie ein »encounter« zwischen Versuchsperson und Roboter definieren. Aus den Geschwindigkeits-Diagrammen lässt sich aber schließen, dass sie das Anlaufen und Abbremsen der Person nicht mit einbeziehen. Im vorgestellten Framework sind diese Bereiche aber in den Trajektorien größtenteils enthalten. Über die gesamte Trajektorie (mit Anlaufen und Abbremsen) würde die minimale Geschwindigkeit immer nahe Null liegen. Deshalb wurde für die Bildung des Minimums und Maximums nur der Bereich

der Trajektorie berücksichtigt, der jeweils mindestens zwei Meter vom ersten und letzten Punkt der Trajektorie entfernt liegt.

Die durchschnittlichen Geschwindigkeitsdifferenzen sind in Tabelle 4.2 zu sehen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Geschwindigkeit der Versuchsperson am geringsten schwankt, wenn der Weg der Versuchsperson nicht vom Roboter gekreuzt wird. Fast doppelt so hoch ist die durchschnittliche Geschwindigkeitsdifferenz für den Fall, dass der Roboter ohne »Personal Space« den Weg der Versuchsperson kreuzt. Die beiden Personal Space Modi 0,1 m und 0,3 m liegen dabei zwischen den beiden Extremen, allerdings deutlich näher an »Roboter fährt nicht«.

Objective	Anz.	mean Δv [m/s]	std Δv [m/s]
Roboter fährt nicht	132	0,38	0,12
Personal Space 0,3 m	135	0,45	0,15
Personal Space 0,1 m	136	0,51	0,19
kein Personal Space	137	0,89	0,36

Tabelle 4.2: Geschwindigkeitsunterschiede aller Versuchspersonen
Nach dem Student's T-Test mit $\alpha = 0{,}05$ unterschieden sich alle Werte zueinander signifikant.

Daraus ergibt sich, dass der Roboter mit »Personal Space Objective« die Versuchsperson deutlich weniger behindert. Folgt man der Argumentation von Dondrup u. a. (2014) wird ohne dem »Personal Space Objective« Stress und Ärger der Versuchsperson ausgelöst, der mit aktiviertem »Personal Space Objective« vermieden werden kann.

Zurückgelegte Strecke von Roboter und Person

Die Versuchspersonen wurden instruiert, sich auf möglichst kurzem Weg von Start zu Ziel zu bewegen, aber falls nötig dem Roboter auszuweichen. Kreuzt der Roboter ohne »Personal Space« den Weg des Probanden, muss die Person um den Roboter herumlaufen und legt dadurch eine längere Strecke zurück. Ist »Perso-

nal Space« aktiviert, sollte dagegen der Proband ungehindert auf dem kürzesten Weg ans Ziel kommen. Stattdessen weicht der Roboter der Person aus und legt dadurch einen längeren Weg zurück.

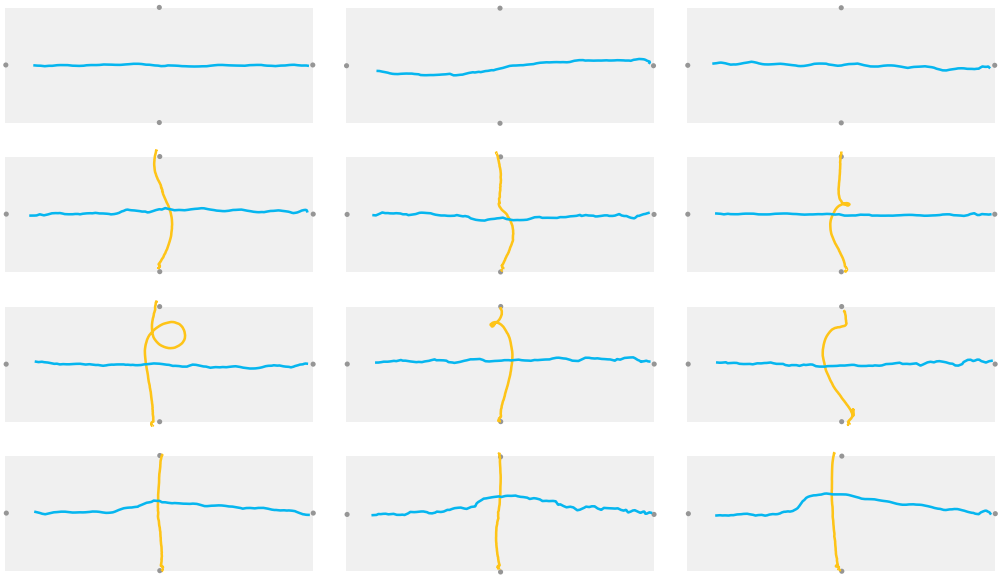


Abbildung 4.3: Typische Trajektorien für verschiedene Roboter Modi
Blau eingezeichnet ist die Trajektorie der Person, gelb die des Roboters. Von oben nach unten jeweils drei Beispiele für: Roboter fährt nicht, Personal Space 0,1 m*, Personal Space* 0,3 m*, kein Personal Space. Die Trajektorien wurden zur besseren Vergleichbarkeit so gespiegelt, dass die Person stets von links nach rechts geht und der Roboter von oben nach unten fährt.*

Die Distanz zwischen Start- und Endpunkt der Person beträgt 12 m. Für den Vergleichsfall bei dem die Versuchsperson gar nicht vom Roboter behindert wird, ergibt sich aber für die Länge der Trajektorie nur 10,9 m. Die Differenz zwischen den beiden Werten erklärt sich folgendermaßen: Sobald sich die Versuchsperson vom Startpunkt weiter als 0,8 m entfernt, wird angenommen, dass sie sich auf dem Weg zum Endpunkt befindet und die Daten zur Trajektorie gewertet. Ist die Distanz zwischen Zielpunkt und Person geringer als 0,3 m gilt die Person als angekommen. Dadurch ergibt sich eine theoretische Strecke für die aufgezeichnete Trajektorie von 12 m − 0,8 m − 0,3 m = 10,9 m. Da die Versuchsperson aber

auch im unbehinderten Fall (vgl. Abbildung 4.3) keine perfekt gerade Linie läuft, wäre ein etwas erhöhter Durchschnittswert zu erwarten.

Weil im Framework die Zeitdauer, die zum Fitten der Ellipsen benötigt wird, nicht korrekt berücksichtigt wird, ergibt sich tatsächlich für die Distanz zwischen erstem Punkt der Trajektorie und dem Startpunkt eine durchschnittliche Distanz von 1,1 m bei einer Standardabweichung von 0,090 m. Zwischen Endpunkt und der letzten Pose der Person verringert sich durch die Verzögerung die durchschnittliche Distanz auf 0,21 m mit einer Standardabweichung von 0,047 m. Dadurch ergibt sich eine etwas kürzere Strecke. Da sich der Fehler aber auf alle Objectives gleich auswirkt (keine signifikanten Unterschiede), sind die gewonnenen Daten relativ zueinander aussagekräftig.

Die Distanz zwischen dem Start- und Endpunkt des Roboters beträgt 4,5 m. Die erhöhte durchschnittliche Strecke für den Roboter lässt sich dadurch erklären, dass er sich am Zielpunkt um 180° gedreht hat, um für die nächste Fahrt korrekt zu stehen.

Objective	Anz.	Strecke Roboter		Strecke Person	
		mean [m]	std [m]	mean [m]	std [m]
Roboter fährt nicht	132	0,13	0,47	10,9	0,28
Personal Space 0,3 m	135	5,9	1,4	10,9	0,19
Personal Space 0,1 m	136	5,4	1,1	11,0	0,22
kein Personal Space	137	5,0	0,37	11,1	0,25

Tabelle 4.3: Zurückgelegte Strecke Roboter und Person für aller Versuchspersonen
Nach dem Student's T-Test mit $\alpha = 0{,}05$ sind alle Roboter-Strecken zueinander signifikant unterschiedlich, bei den durchschnittlich zurückgelegten Strecken der Versuchspersonen lässt sich nur für »kein Personal Space« ein signifikanter Unterschied feststellen. Die relativ hohe Strecke des Roboters für »Roboter fährt nicht« ist auf das Rauschen der erkannten Roboter-Pose zurückzuführen.

Aus Sicht der zurückgelegten Distanz der Person sind die beiden Objectives »Personal Space 0,1 m« und »Personal Space 0,3 m« nicht vom stehenden Roboter zu unterscheiden, während sich die Variante mit deaktiviertem »Personal

Space« signifikant von den ersten dreien unterscheidet. Im Vergleich der beiden »Personal Space«-Varianten schneidet »Personal Space 0,1« etwas besser ab, da der Roboter in diesem Modus durchschnittlich ca. 0,5 m weniger Strecke zurücklegt.

Die zurückgelegte Strecke der Versuchsperson wird durch den kreuzenden Roboter ohne »Personal Space« um ca. 15 cm länger, die Strecke des Roboters durch Aktivierung von »Personal Space« aber um 40 cm (0,1 m) bzw. 95 cm (0,3 m). Im Vergleich zur Versuchsperson weicht der Roboter also auf einem deutlich längeren Weg aus. Wie in Abbildung 4.3 zu sehen, enthält der Weg des Roboters teilweise Schleifen, die die erhöhte Strecke erklären könnten.

Durchschnittliche Krümmung der Trajektorien von Person und Roboter

Um eine Kollision mit dem Roboter zu verhindern hat die Versuchsperson die Möglichkeiten entweder ihre Geschwindigkeit zu verringern (vergleiche Auswertung »Hesitation Signals« auf Seite 36) oder die Versuchsperson hält ihre Geschwindigkeit und passt ihren Weg an. Es wird angenommen, dass die Versuchsperson bei einem weit vorhersehbarem Hindernis eine weiche Kurve läuft, im Falle eines nicht vorhersehbarem Hindernis würde ein deutlicher Knick in der Trajektorie der Versuchsperson erwartet.

Technisch gesehen lässt sich die Trajektorie in diesem Gesichtspunkt mit Hilfe der durchschnittlichen Krümmung bewerten. Dabei hat eine gerade Linie die kleinst mögliche Krümmung von $\kappa = 0$. Die Krümmung eines Kreises ist ebenso konstant und reziprok zu seinem Durchmesser: $\kappa = \frac{1}{r}$.

Um aus einer Reihe von diskreten Punkten annäherungsweise die Krümmung zu berechnen, schlagen Arras u. a. (2007) vor jeweils drei aufeinanderfolgende Punkte aus der Trajektorie zu betrachten: Die drei Punkte spannen ein Dreieck mit der Fläche A und den drei Seiten a, b und c. Daraus lässt sich wie in Gleichung 4.1 dargestellt annähernd die Krümmung berechnen.

$$\kappa \approx \frac{4A}{abc} = \frac{4\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}}{abc} \quad \text{mit} \quad s = \frac{a+b+c}{2} \tag{4.1}$$

Um Rauschen und kleinere Schwankungen zu entfernen wird die Trajektorie vor der Berechnung der Krümmung unterabgetastet: Für die Trajektorie wird für jeden Punkt die bis zum diesem Punkt zurückgelegte Strecke berechnet. Ausgehend vom ersten Punkt der Trajektorie werden alle darauf folgenden Punkte entfernt bei denen die zurückgelegte Strecke unter 20 cm liegt. Der erste Punkt bei dem die Strecke über 20 cm liegt wird zur unterabgetasteten Trajektorie hinzugefügt, und das Verfahren mit diesem Punkt wiederholt. Dadurch entsteht eine Trajektorie bei der alle Punkte mindestens 20 cm voneinander entfernt liegen.

Zusätzlich werden von der Trajektorie die ersten und letzten 50 cm entfernt, da die Versuchsperson in diesem Bereich teilweise sehr enge Kurven laufen, um auf dem Zielpunkt zum Stehen zu kommen.

Die so entstandene Trajektorie wird zur Bildung der Drei-Punkt-Gruppen erneut unterabgetastet. Es werden aus allen Punkten $(P_1, P_2, \ldots, P_i)$ der Trajektorie jeweils eine Gruppen aus den Punkten P_n, P_{n+4}, P_{n+8} mit $n = [1, 2, \ldots, i-8]$ gebildet. Für jede Gruppe wird die Krümmung nach Gleichung 4.1 berechnet, der Durchschnitt dieser Werte ist die durchschnittliche Krümmung der Trajektorie. Sechs Trajektorien mit ihrer durchschnittlichen Krümmung sind in Abbildung 4.4 abgebildet.

Für die Trajektorien der Versuchspersonen unterscheiden sich beiden Extremfälle »Roboter fährt nicht« und »kein Personal Space« deutlich, wobei die Krümmung für letzteres fast doppelt so groß ist. Die Durchschnittswerte der beiden Varianten mit aktiviertem Personal Space sind identisch und liegen mit 0,068 nahe bei dem Wert von 0,059 für den Fall, dass sich die Versuchsperson ungehindert zwischen den Punkten bewegt.

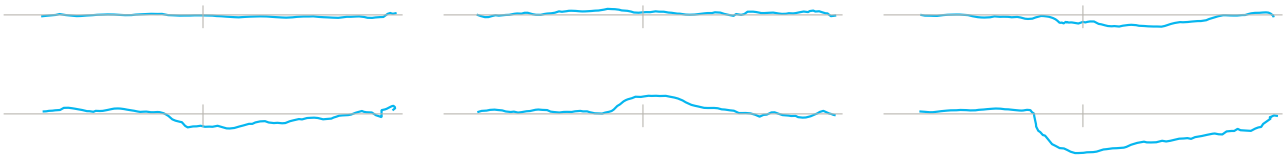


Abbildung 4.4: Trajektorien verschiedener Versuchspersonen und deren Krümmung
Die durchschnittliche Krümmung beträgt von links nach rechts: erste Zeile: 0,014; 0,057; 0,10; zweite Zeile; 0,16; 0,20; 0,36. Die Trajektorien wurden so gespiegelt, dass die Versuchsperson von links nach rechts läuft. Die graue Linie verbindet Start und Endpunkt.

		Person		Roboter	
Objective	Anz.	mean	std	mean	std
Roboter fährt nicht	132	0,059	0,023	0,00	0,01
Personal Space 0,3 m	135	0,068	0,025	0,49	0,42
Personal Space 0,1 m	136	0,068	0,035	0,35	0,31
kein Personal Space	137	0,12	0,059	0,11	0,15

Tabelle 4.4: Durchschnittliche Krümmung der Trajektorien von Roboter und Person
Nach dem Student's T-Test mit $\alpha = 0{,}05$ unterscheiden sich die Werte des Roboter signifikant, die Werte der Person unterscheiden sich, ausgenommen die Werte mit aktiviertem »Personal Space«, ebenso signifikant.

Daraus kann geschlossen werden, dass die Versuchsperson dem Roboter mit aktiviertem »Personal Space« deutlich weniger ausweichen muss.

Für den Roboter liegen die Werte für die durchschnittliche Krümmung im allgemeinen höher, für die Varianten mit aktiviertem »Personal Space« zeigen sich deutliche höhe Werte, wobei »Personal Space 0,3 m« eine höhere durchschnittliche Krümmung aufweist, ohne dass davon die durchschnittliche Krümmung der Versuchsperson beeinflusst wird.

Elektrodermale Aktivität

Wie bereits in Unterabschnitt 4.2.2 beschrieben, lässt sich mit dem Hautleitwert auf die elektrodermale Aktivität einer Person schließen und damit wiederum eine Aussage über die Erregung der Person treffen. Es sollte dadurch also möglich

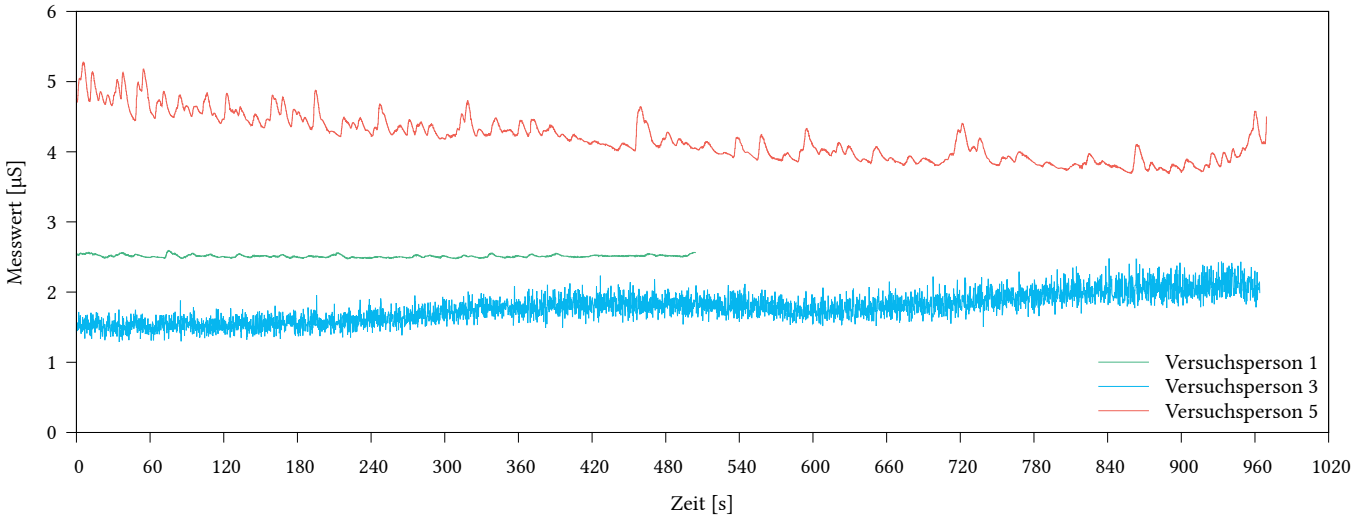


Abbildung 4.5: Hautleitwert dreier Versuchspersonen
Gezeigt wird der Verlauf des Hautleitwerts über das ganze Experiment von drei exemplarisch ausgewählten Versuchspersonen: Versuchsperson 1 zeigt nur eine geringe Änderung des Hautleitwerts, Ursache könnten Kontaktprobleme der Elektroden oder persönliche Veranlagung der Versuchsperson sein. Das deutliche Rauschen bei Versuchsperson 3 ist wahrscheinlich auf Kontaktprobleme (zum Beispiel durch zu lockere Elektroden) zurückzuführen. Versuchsperson 5 zeigt eine ideale Messkurve: Neben langsamen Schwankungen sind deutlich kleine, schnellere Schwankungen zu sehen.

sein, den Stress der Versuchsperson zu messen und Unterschiede zwischen den verschiedenen Objectives (Roboter fährt, fährt mit »Personal Space«, fährt nicht) auszumachen.

Analog zur Durchschnittsgeschwindigkeit der Versuchspersonen zeigen sich auch beim Hautleitwert der Versuchspersonen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchspersonen. In Abbildung 4.5 sind drei typische Messkurven abgebildet. Ob die Messanordnung nicht korrekt eingerichtet wurde oder es sich um eine persönliche Veranlagung der jeweiligen Person handelt, lässt sich nach Abschluss der Experimente nicht mehr feststellen.

Da die elektrodermale Aktivität in Form des Hautleitwertes bis zu 2,5 Sekunden verzögert vom Reiz auftritt (siehe Unterabschnitt 4.2.2), werden für die Auswertung nicht nur die Daten berücksichtigt, die anfallen während sich die

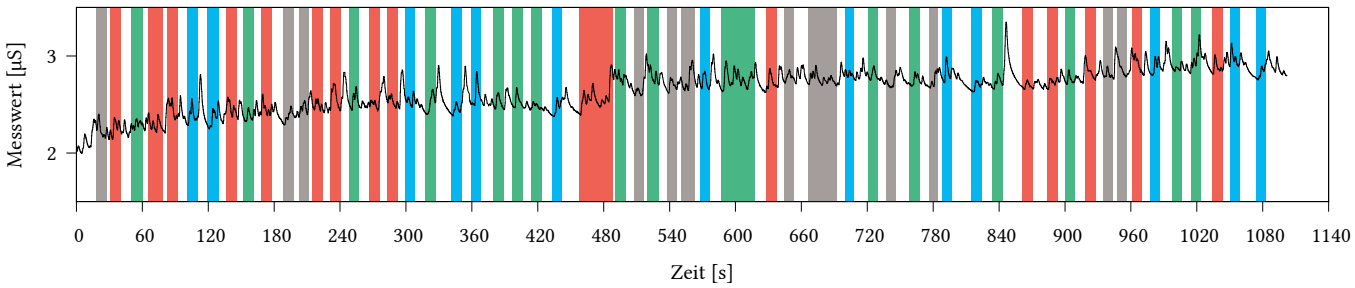


Abbildung 4.6: Hautleitwert Versuchsperson 9 mit Objective
Dargestellt ist der Hautleitwert von Versuchsperson 9, farbig hinterlegt ist das Objective mit dem der Roboter der Person begegnet ist: Personal Space 0,1 m*: grün, Personal Space* 0,3 m*: blau, kein Personal Space: rot, Roboter fährt nicht: grau. Bei den drei breiteren Bereichen um Sekunde 480, 600 und 680 erreichte die Versuchsperson den Endpunkt nicht korrekt, sodass stattdessen der Timeout aktiviert wurde. Für die Auswertung werden diese und andere fehlerhafte Elemente verworfen.*

Person zwischen den Punkten bewegt, (in Abbildung 4.6 farbig hinterlegt) sondern auch die, die in der Zeit bis sich die Person wieder vom Zielpunkt entfernt (in der Grafik also bis zum nächsten farbigen Bereich) anfallen.

Wie in Unterabschnitt 4.2.2 dargelegt, wird der Hautleitwert häufig über die Amplitude und Anzahl der Ausschläge beurteilt. Die Voraussetzung einer solchen Vermessung ist, dass die EDR deutlich sichtbar und unterscheidbar sind. Aufgrund der zahlreichen Artefakte und sich überlagernden EDR im Signal ist das mit den vorliegenden Daten schwierig.

Da eine automatische Erkennung dieser Merkmale wie in Abbildung 4.1 den Rahmen der Arbeit sprengen würde und eine manuelle Auswertung der Intention dieser Arbeit widerspricht, wurden die EDR wie folgt ausgewertet: Um leichtes Rauschen und den variablen Takt des Signals zu entfernen, wird das Signal mit einem Gaußfenster erneut abgetastet und geglättet. Das so entstandene Signal wird von tiefen Frequenzen befreit, um so den Einfluss von langsamen Schwankungen in der Amplitude auszuschließen. Für alle Bereiche in denen die Steigung größer als 0,25 ist, wird die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert des

geglätteten Signals berechnet (siehe Abbildung 4.7). Befinden sich in einem Abschnitt mehrere solche Bereiche, wird die Summe der Abschnitte gebildet.

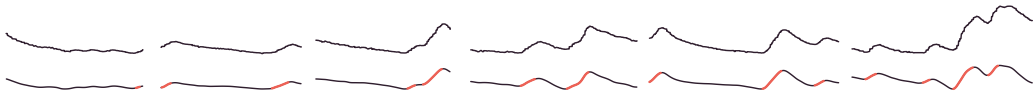


Abbildung 4.7: Verarbeitung Hautleitwert
Für sechs typische Verläufe: Oben jeweils der Hautleitwert wie er vom Sensor gemessen wird, darunter das geglättete Signal. Der Bereich, dessen Steigung größer als 0,25 ist, ist rot markiert. Die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert wird für die Auswertung verwendet. Die Daten stammen von Versuchsperson 10.

Die Sensorwerte für Versuchsperson 2, 3 und 11 sind aufgrund eines hohen Rauschanteils nicht aussagekräftig. Ebenso kann der Signalverlauf von Versuchsperson 1 wegen der sehr niedrigen Ausschläge kaum sinnvoll ausgewertet werden.

	Roboter fährt nicht			Personal Space 0,3 m			Personal Space 0,1 m			kein Personal Space		
VP	Anz.	mean	std	Anz.	mean	std	Anz.	mean	std	Anz.	mean	std
1	7	0	0	5	0	0	4	0	0	9	0,076	0,24
2	11	0,35	0,36	23	0,56	0,46	3	0,43	0,54	16	0,55	0,45
3	11	4,6	1,3	17	5,3	1,2	9	6,4	1,7	12	5,0	1,6
4	11	1,1	1,3	10	0,82	0,71	10	1,3	1,6	11	1,6	1,6
5	15	1,7	1,4	19	1,7	1,4	11	3,4	2,8	11	2,7	1,8
6	15	0,39	0,53	6	0,32	0,62	19	0,55	0,54	12	0,2	0,29
7	12	0,21	0,43	8	0,6	0,75	15	0,29	0,37	14	0,49	0,44
8	8	1,8	2,0	9	1,6	1,1	19	1,2	0,77	14	1,7	1,0
9	11	2,6	0,9	8	3,5	1,6	20	3,0	1,4	15	3,1	1,2
10	18	1,6	0,91	19	2,7	1,6	8	2,0	0,55	10	2,4	1,3
11	13	1,7	0,72	11	2,2	0,96	18	1,9	0,54	13	2,1	0,73

Tabelle 4.5: Daten Hautleitwert
Je größer der Wert desto größer der Anstieg im Hautleitwert.

Dennoch lassen sich auch bei den übrigen Versuchspersonen keine eindeutigen Rückschlüsse ziehen, die von allen Versuchspersonen bestätigt werden könnten. Erwartet würde, dass nur wenige EDR auftreten, wenn sich die Versuchsperson ohne fahrenden Roboter von Start zu Ziel bewegt, dagegen viele, wenn der Roboter ohne »Personal Space« den Weg der Person ohne Rücksicht kreuzt. Für die Versuchsperson 10 lässt sich diese Aussage mit dem Students' T-Test mit ei-

nem α von 0,05 bestätigen, bei anderen (Versuchsperson 6 und 8) liegen die Mittelwerte sogar so, dass die Versuchsperson scheinbar weniger Stress empfindet, wenn der Roboter ihren Weg kreuzt. Aufgrund der großen Streuung sind diese Messungen aber wenig aussagekräftig.

Wie bereits in Unterabschnitt 4.2.2 beschrieben, sind die Einflussgrößen auf den Hautleitwert zahlreich, und der Hautleitwert reagiert auch bereits auf Gedanken der Versuchsperson (vgl. Bösel, 1987, S. 93). Es kann aber nicht festgestellt werden, welche Ausschläge des Hautleitwerts durch welche Quelle verursacht wurde.

Da die beiden Vergleichswerte (Roboter fährt nicht, Roboter fährt ohne »Personal Space«) bereits keine eindeutige Aussage liefern, ist es schwierig, eine Aussage über die beiden Personal Space Objectives zu treffen.

Allerdings lässt sich auch nicht ausschließen, dass die verwendete Methode zur Auswertung des Hautleitwerts falsche Ergebnisse liefert. Trotzdem lässt sich in Abbildung 4.6 auch durch manuelle Überprüfung kein Zusammenhang zwischen dem Hautleitwert und dem Modus des Roboters ausmachen.

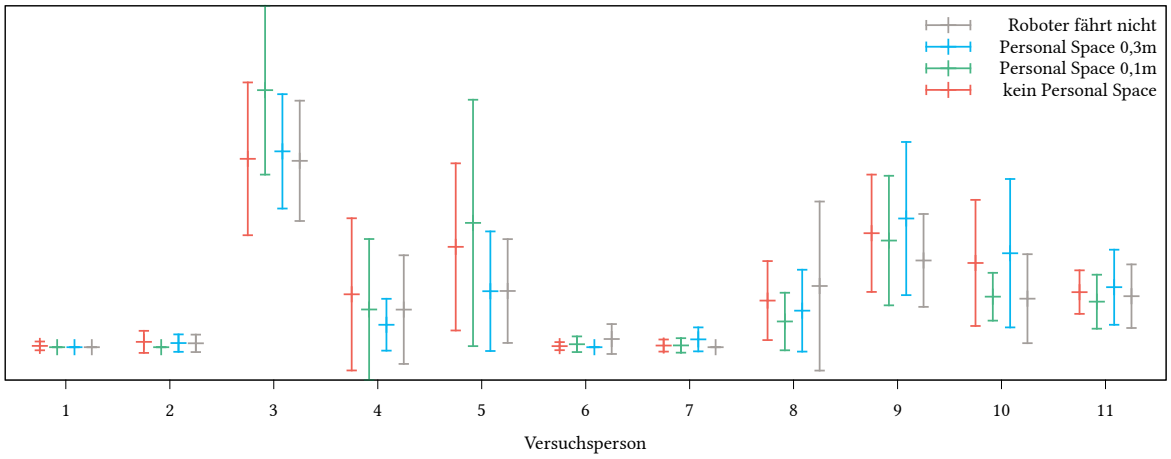


Abbildung 4.8: Grafische Darstellung von Tabelle 4.5
Je größer der Wert desto größer der Anstieg im Hautleitwert.

Minimale Distanz zwischen Roboter und Person

Die Hauptaufgabe des »Personal Space Objective« ist es, dass der Roboter einen Mindestabstand zu Personen hält. Dadurch lässt sich mit der minimalen Distanz zwischen Roboter und Versuchsperson je Abschnitt direkt eine Aussage treffen, wie gut der Roboter den Abstand zur Person hält.

Für jeden Abschnitt lässt sich mit Hilfe der Trajektorie der Versuchsperson und des Roboters der minimale Abstand zwischen den beiden berechnen. Die minimale Distanz für den Modus »Roboter fährt nicht« ist nur der Vollständigkeit halber angegeben, entspricht dabei allerdings ziemlich genau dem erwarteten Wert von 4,5 m/2 = 2,25 m (vgl. Abbildung 4.2).

Die minimale Distanz bezieht sich dabei auf die Mittelpunkte von Roboter und Versuchsperson. Um die etwas geläufigere Distanz zwischen den Oberflächen beider Objekte berechnen zu können, müssen für den Oberkörper der Versuchsperson ca. 10 cm bis 20 cm (je nach Orientierung) und für den Roboter zwischen ca. 30 cm am Boden und 15 cm am Kopf abgezogen werden.

Objective	Anz.	min Distanz mean [m]	min Distanz std [m]
Roboter fährt nicht	132	2,2	0,21
Personal Space 0,3 m	135	1,2	0,31
Personal Space 0,1 m	136	0,95	0,32
kein Personal Space	137	0,67	0,17

Tabelle 4.6: Minimale Distanz zwischen Versuchsperson und Roboter
Nach dem Student's T-Test mit $\alpha = 0{,}05$ unterscheiden sich alle minimalen Abstände signifikant.

Aus Tabelle 4.6 ist ersichtlich, dass der durchschnittliche minimale Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson für den Modus »kein Personal Space« am geringsten ist. Für die beiden »Personal Space«-Modi steigt der Abstand wie erwartet an.

Daraus kann geschlossen werden, dass das »Personal Space Objective« dazu

führt, dass der Roboter nicht in den Bereich um die Person eindringt. Der Bereich um die Person kann durch den Parameter (0,3 m oder 0,1 m) beeinflusst werden.

4.4 Follow

Statt ein Ziel im globalen Koordinatensystem anzusteuern, soll der Roboter beim so genannten »Follow« einer Person folgen. Dabei passt der Roboter seine Geschwindigkeit an die zu folgende Person an und versucht, ihr zu einem (dem Roboter unbekannten) Ziel zu folgen. Währenddessen ist es wichtig, dass die Distanz zwischen Roboter und Person nicht zu groß wird, da die Person dann nicht mehr zuverlässig getrackt werden kann. Da der Roboter nun ein Ziel relativ von ihm ansteuert, spielt die Lokalisierung des Roboters im globalen Koordinatensystem eine untergeordnete Rolle. Wichtiger ist aber, wie gut der Roboter Personen tracken kann. In den durchgeführten Experimenten wurde ein Tracking ohne Wiedererkennung verwendet. Reißt also das Tracking einer Person ab, wird einer beliebigen Personen gefolgt. In Systemen mit Wiedererkennung würden dann Merkmale wie die Farbe der Bekleidung der getrackten Person verwendet, um die verlorene Person wiederzuerkennen. Dieses System war zum Zeitpunkt der Experimente noch nicht fertiggestellt.

4.4.1 Aufbau

Sobald die Versuchsperson den Startpunkt verlässt, wird dem Roboter die aktuelle Position der Versuchsperson übertragen und ein Befehl übermittelt, der Person an eben diese Position zu folgen. Nachdem die Versuchsperson angekommen ist und an der vorgegebenen Markierung stehen bleibt, nähert sich der Roboter aufgrund des Follow-Befehls weiter der Person. Wird die Distanz von 1,3 m zwischen Roboter und der Zielposition der Versuchsperson unterschritten, wird der Roboter zur nächsten Startposition weitergeleitet. Startposition der Versuchsperson und des Roboters sind in Abbildung 4.9 abgebildet. Die Roboter-Trajektorie,

die in die Auswertung einfließt, wird kurz vor der Weiterleitung des Roboters zur nächsten Startposition abgeschlossen.

Abbildung 4.9: Aufbau »Follow«
Blau eingezeichnet sind Start- bzw. Endpunkt für Person, gelb die Startpunkte des Roboters. Start- und Endpunkt der Versuchsperson wurden mit einem kleinen »x« auf dem Boden markiert.

Aufgrund der Anordnung der Start- und Endpunkte um eine Ecke kann der Roboter von seiner Startposition keine Personen im Bereich der Endpunkte detektieren. Bis sich die Versuchsperson in dem Bereich befindet, der vom Roboter an der Startposition nicht einsehbar ist, ist der der Roboter üblicherweise bereits weit genug gefahren und kann diesen Bereich dennoch einsehen.

Die Versuchspersonen wurden angewiesen, zwischen den beiden Punkten zu laufen und jeweils darauf zu warten, bis der Roboter seine Startposition eingenommen hat. Sie wurden ebenso darauf hingewiesen, dass es unter Umständen nötig sein könnte, den Roboter »abzuholen«, sollte der Roboter ihnen nicht mehr korrekt folgen.

Für das »Follow Objective« können zwei Parameter angegeben werden. Für die »MinTolerance« wurden 1,1 m und für die »MaxTolerance« 1,2 m gewählt.

Der gewählte Aufbau beurteilt das »Follow Objective« sehr streng. Das liegt zum einen an der relativ großen Distanz zwischen Roboter und Versuchsperson (1,75 m) beim Start des Abschnitts, zum anderen daran, dass der Roboter erst den Befehl zum Folgen erhält, wenn die Versuchsperson bereits losgelaufen ist. Beim späteren Einsatz des »Follow Objectives« würde die Person vermutlich den Befehl zum Folgen sehr viel näher am Roboter (via Touchscreen) senden und sich dabei noch nicht in Bewegung befinden.

4.4.2 Übersicht zu den gewonnenen Daten

Insgesamt wurden etwas über eine Stunde an auswertbarem Material aufgenommen. Daraus lassen sich 82 Abschnitte extrahieren, wovon zwei Trajektorien mit fehlerhaften Trackingdaten enthalten waren und deshalb von der weiteren Auswertung ausgeschlossen wurden.

VP	Anz.	Dauer [min:sec]	Strecke Roboter mean [m]	Strecke Roboter std [m]	Geschw. Person mean [m/s]	Geschw. Person std [m/s]	Strecke Person mean [m]	Strecke Person std [m]
1	27	20:24	12,4	0,3	0,91	0,054	12,9	0,29
2	13	11:56	12,5	0,97	1,1	0,11	12,0	0,59
3	13	8:02	13,5	3,7	0,95	0,086	13,0	2,2
4	8	7:41	12,4	0,47	1,0	0,068	11,8	0,44
5	9	9:39	12,2	0,3	0,87	0,14	12,8	0,66
6	10	8:56	14,0	4,0	0,78	0,082	14,5	5,2
	80	66:38	12,8	2,1	0,94	0,12	12,8	2,0

Tabelle 4.7: Übersicht gewonnene Daten Follow
Jede Zeile steht für die gewonnenen Daten einer Versuchsperson, die letzte Zeile zeigt die Summe bzw. den Durchschnitt aller Daten.

Bis auf Versuchsperson 1 (Student) handelt es sich um Mitarbeiter des Fachgebiets. Alle Versuchspersonen sind männlich.

4.4.3 Auswertung

Abstand zum Roboter wenn Versuchsperson am Ziel angekommen ist

Während in Abbildung 4.12 die Verteilung des Abstands zwischen Versuchsperson und Roboter über das gesamte Experiment zeigt, ist das Ankommen der Versuchsperson am Zielpunkt ein charakteristischer Zeitpunkt. Nach der theoretischen Strecke von 14 m[1] zeigt der Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson an, ob und wie weit der Roboter zurückgefallen ist.

VP	Anz.	Geschw. Person mean [m/s]	Geschw. Person std [m/s]	Abstand Roboter mean [m]	Abstand Roboter std [m]
6	10	0,78	0,082	3,2	0,47
5	9	0,87	0,14	3,6	0,87
1	27	0,91	0,054	3,8	0,25
3	13	0,95	0,086	4,3	0,47
4	8	1,0	0,068	4,7	0,65
2	13	1,1	0,11	5,3	1,0
	80	0,94	0,12	4,1	0,88

Tabelle 4.8: Abstand zum Roboter wenn Versuchsperson am Ziel angekommen ist
Dargestellt ist, aufgeschlüsselt für jede Versuchsperson, die durchschnittliche Geschwindigkeit der Versuchsperson und der Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson zum Zeitpunkt der Ankunft der Versuchsperson am Ziel. Die Einträge sind vom kleinsten zum größten Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson sortiert, man beachte, dass die Geschwindigkeit der Versuchsperson ebenso steigt.

Über alle Abschnitte beträgt die durchschnittliche Distanz zu diesem Zeitpunkt 4,1 m bei einer Standardabweichung von 0,88 m. Tabelle 4.8 schlüsselt die Daten nach Versuchspersonen auf. Dabei fällt auf, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit der Versuchsperson in direktem Zusammenhang mit der Distanz zwischen Roboter und Versuchsperson steht. Der Empirische Korrelationskoeffizient zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit und dem Abstand zum Ro-

[1] Tatsächlich kürzen sowohl Roboter als auch Versuchsperson über die Ecke ab, vergleiche Tabelle 4.7.

boter beträgt 0,98. Man kann also von einer nahezu perfekten Korrelation und einem linearen Zusammenhang (vgl. Kockelkorn, 2012, S. 34) zwischen den beiden Werten sprechen.

Der Roboter scheint also mit steigender Geschwindigkeit der Versuchsperson weiter zurückzufallen.

Korrelation der Durchschnittsgeschwindigkeit von Roboter und Person

Die Durchschnittsgeschwindigkeit für Roboter und Person wird durch den Quotienten zwischen der zurückgelegten Strecke und der Zeitdifferenz zwischen Start und Ankunft berechnet. Dabei fließt die Beschleunigung am Anfang der Trajektorien wie auch die Verzögerung am Ende in die Durchschnittsgeschwindigkeit mit ein.

Über alle 80 Abschnitte ergibt sich so eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 0,70 m/s (Standardabweichung 0,049 m/s) für den Roboter und 0,94 m/s (Standardabweichung 0,12 m/s) für die Versuchsperson. Obwohl der Roboter signifikant langsamer ist (Students' T-Test mit $\alpha = 0{,}05$), ist im Streudiagramm (Abbildung 4.10) eine Korrelation zwischen den beiden Durchschnittsgeschwindigkeiten zu erkennen.

Der Empirische Korrelationskoeffizient beträgt 0,85, man kann also von einer starken Korrelation zwischen der Geschwindigkeit des Roboters und der Person sprechen[2]. Das bedeutet, dass ein linearer Zusammenhang (vgl. Kockelkorn, 2012, S. 34) zwischen der Geschwindigkeit des Roboters und der Geschwindigkeit der Person besteht. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich der Roboter an die Geschwindigkeit der zu folgenden Person angepasst hat.

[2] Ab einem Korrelationskoeffizient von 0,8 handelt es sich um eine starke Korrelation (vgl. Schlittgen, 2012, S. 97). Eine im 2D-Raum normalverteilte Punktemenge hätte einen Korrelationskoeffizient von 0, liegen alle Punkte auf der Geraden $y = x$, liegt der Korrelationskoeffizient bei 1.

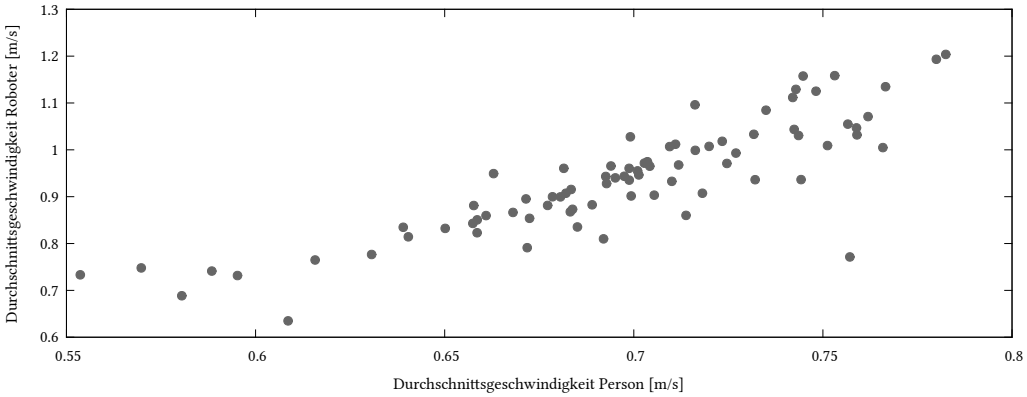


Abbildung 4.10: Korrelation der Durchschnittsgeschwindigkeit von Roboter und Person
Jeder Punkt steht für einen ausgewerteten Abschnitt; je schneller die Person läuft, umso schneller fährt der Roboter.

Zurückgelegte Strecke von Roboter und Person

Der Durchschnittswert für die zurückgelegte Strecke der Person liegt bei 12,8 m mit einer Standardabweichung von 2,03 m. Unter den 80 Trajektorien der Versuchsperson befinden sich fünf Ausreißer mit einer zurückgelegten Strecke größer als 14 m. Bei vier der Ausreißer handelt es sich um die Fälle, in denen der Roboter der Versuchsperson nicht korrekt gefolgt ist. Sie sind in Abbildung 4.11 zusammen mit fünf typischen Trajektorien abgebildet.

Für den Roboter liegt der Durchschnittswert für die zurückgelegte Strecke wie bei der Versuchsperson bei 12,8 m, aber mit einer Standardabweichung von 2,06 m. Auch beim Roboter liegen fünf Trajektorien über einer Länge von 14 m. Die vier längsten Trajektorien des Roboters fallen mit den vier längsten Trajektorien der Versuchsperson zusammen.

Man kann also davon ausgehen, dass nur in 4 von 80 Fällen das Tracking der Versuchsperson nicht funktioniert hat und es die Versuchsperson für nötig hielt, dem Roboter entgegen zu kommen. In 95% der Fälle folgte der Roboter der Versuchsperson korrekt.

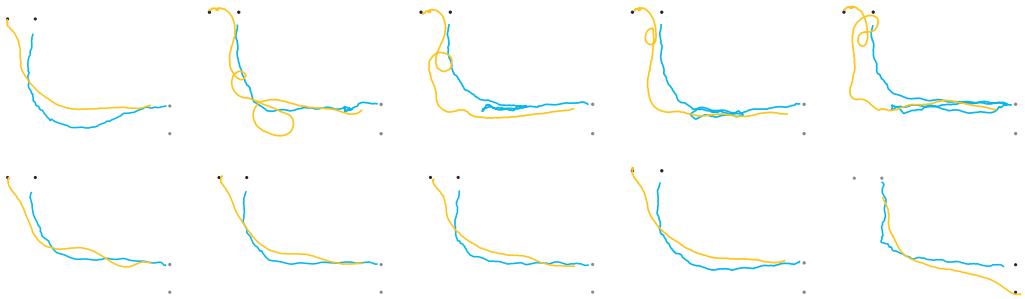


Abbildung 4.11: Trajektorien für Follow
Blau eingezeichnet ist jeweils die Trajektorie der Versuchsperson, gelb die Trajektorie des Roboters. Der Anfang des Weges ist durch dunklere Punkte markiert. Die zurückgelegten Strecken für die Person sind in der oberen Reihe (von links nach rechts): 14,0 m, 14,3 m, 18,5 m, 19,6 m, 27,1 m. *Die Reihe darunter zeigt zum Vergleich fünf weitere Trajektorien mit zurückgelegter Strecke für die Person:* 11,5 m, 11,9 m, 12,3 m, 12,6 m, 12,7 m.

Maximale Distanz zwischen Person und Personen-Hypothese des Roboters

Der Roboter wird in dieser Arbeit größtenteils als Black-Box betrachtet und einzig die Trajektorie für die Auswertung herangezogen. Allerdings lässt es das Framework auch zu, interne Zustände des Roboters auszuwerten, solange diese während des Versuchs aufgezeichnet werden. In diesem Fall wurde aufgezeichnet, welche Position der Roboter verfolgt. Diese Position wird mit der von den Laser-Range-Scannern des Frameworks bestimmten Position der Versuchsperson verglichen und die maximale Abweichung je Trajektorie betrachtet. Dabei ist zu beachten, dass die Personen-Trajektorie endet, sobald die Person am Ziel angekommen ist. Zu diesem Zeitpunkt bewegt sich der Roboter in der Regel noch und bewegt sich weiter auf die Versuchsperson zu. Während dieser Phase wird die Person auch noch vom Roboter getrackt. Diese Zeitphase fließt aber nicht in diese Auswertung ein.

Für 85% der Abschnitte liegt der Abstand zwischen der Annahme des Roboters für die Position der Versuchsperson und die vom Framework festgestellte

Position der Versuchsperson unter 1 m, für 50% liegt die maximale Abweichung unter 0,5 m.

Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson

Im Gegensatz zu den übrigen Auswertungen, die für jede Trajektorie eine Zahl (beispielsweise die Durchschnittsgeschwindigkeit) berechnet, wird für die beiden folgenden Auswertungen die Trajektorie weiter aufgeteilt. Für jede Positionsangabe in der Trajektorie des Roboters wird der Abstand zum Roboter berechnet. Dadurch liegen ca. 10 Distanz-Messungen für jede Sekunde vor. Die Verteilung der Distanz ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

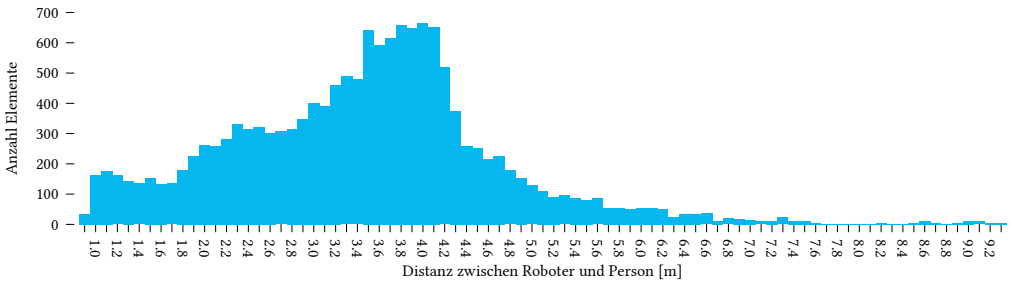


Abbildung 4.12: Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson
Ein Abschnitt (Versuchsperson und Roboter bewegen sich von Start zu Zielpunkt) dauert im Schnitt 18,5 s *und besteht aus* 185 *Positionsangaben. Für jede dieser Positionsangaben wird der Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson berechnet und in Bins mit* 10 cm *gruppiert.*

Die Ausreißer zwischen 7 m und 9,3 m sind auf die vier Fälle zurückzuführen, in denen der Roboter einer falschen Person gefolgt ist und die Versuchsperson den Roboter abholen musste. (vgl. »Zurückgelegte Strecke von Roboter und Person« auf Seite 54).

Die Durchschnittliche Distanz über alle Elemente liegt bei 3,5 m,

Geschwindigkeit der Versuchsperson und Distanz zum Roboter

Die Durchschnittsgeschwindigkeit der Versuchspersonen beträgt 0,94 m/s bei einer Standardabweichung von 0,13 m/s. Dadurch liegt sie unter den 1,28 m/s

(Standardabweichung 0,11 m/s), die beim Experiment »Personal Space« ohne Interaktion mit dem Roboter gemessen wurde[3].

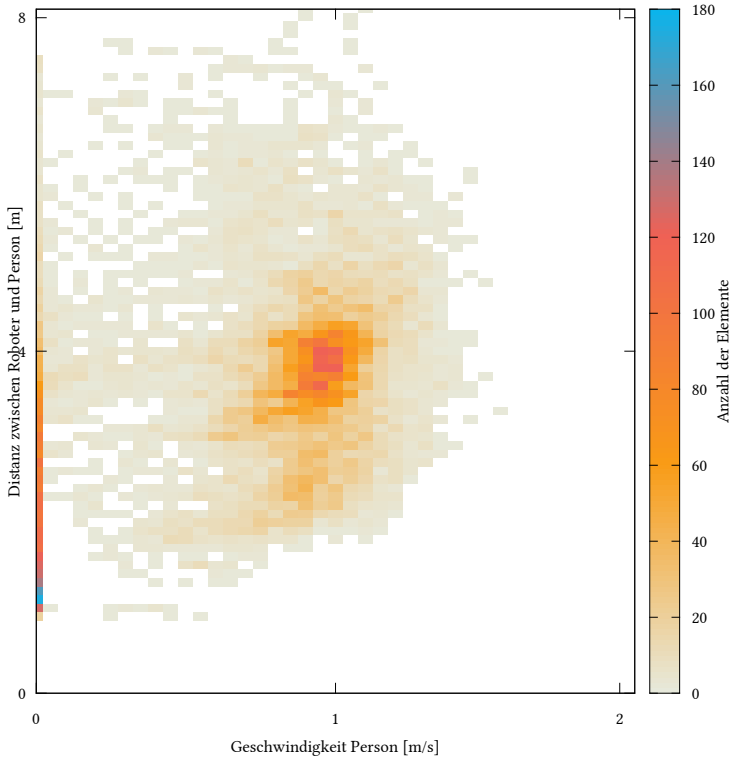


Abbildung 4.13: Geschwindigkeit der Versuchsperson und Distanz zum Roboter
Für jede Position in der Trajektorie des Roboters wird die Distanz zur Versuchsperson und die Geschwindigkeit der Versuchsperson berechnet.

In Abbildung 4.13 ist der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit der Versuchsperson und Distanz zum Roboter abgebildet. Am linken Rand der Grafik bei $v_{Person} = 0$ ist eine Häufung über alle Distanzen unter 4 m zu erkennen. Diese entstehen, wenn sich der Roboter an die stehende Person annähert. Bei einer Geschwindigkeit von ca. 0,9 m/s und einem Abstand von ca. 3,8 m befindet sich eine

[3]Beide Durchschnittsgeschwindigkeiten wurden unter Ausschluss der ersten und letzten 2 m der Trajektorie berechnet, um so den Einfluss vom Beschleunigen und Abbremsen der Versuchsperson zu minimieren.

deutliche Häufung von Elementen. Ein Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit der Versuchsperson und Abstand zum Roboter lässt sich nicht erkennen.

Die Geschwindigkeit der Versuchspersonen scheint also nicht vom Abstand zum Roboter abhängig zu sein, ist aber etwas langsamer als die Vergleichs-Geschwindigkeit aus dem Experiment »Personal Space«.

4.5 Guide

Ist der Roboter im Modus »Guide« (führen), muss er sowohl ein Ziel im globalen Koordinatensystem ansteuern, als auch eine Person tracken. Er soll diese Person zu einem ihm bekannten Ziel führen. Da das Tracking der Personen vor allem durch Laser-Range-Scannern erfolgt und der Roboter das Ziel vorwärts fahrend erreichen soll, ist dafür ein Roboter mit rückwärtigem Laser notwendig.

Bleibt die zu führende Person stehen oder entfernt sie sich vom Ziel, bremst der Roboter bis zum Stillstand ab. Sobald sich die Person dem Roboter nähert, fährt er wieder in Richtung seines vorgegebenen Ziels.

4.5.1 Aufbau

Während bei »Follow« und »Personal Space« die Interaktion von Roboter und Versuchsperson dadurch ausgelöst wird, dass sich die Versuchsperson von ihrem Startpunkt wegbewegt, ist es beim »Guide« notwendig, dass der Roboter den Weg vorgibt. Deshalb wird der Abschnitt mit dem Betätigen eines Buttons auf dem Touchscreen des Roboters gestartet. Daraufhin wählt das Framework ein zufälliges Ziel für den Roboter. Die Versuchsperson folgt dem Roboter zu seinem Ziel, ohne zu wissen zu welchem Ziel der Roboter fährt.

Neben der simpleren Variante, in der die Versuchsperson dem Roboter über die gesamte Strecke folgt, wurde auch eine Variante (»Guide-Stop«) aufgezeichnet, bei der die Versuchsperson angewiesen wurde, auf einer Dehnungsfuge (in Abbildung 4.14 als graue Linie eingezeichnet) stehen zu bleiben. In der Regel soll-

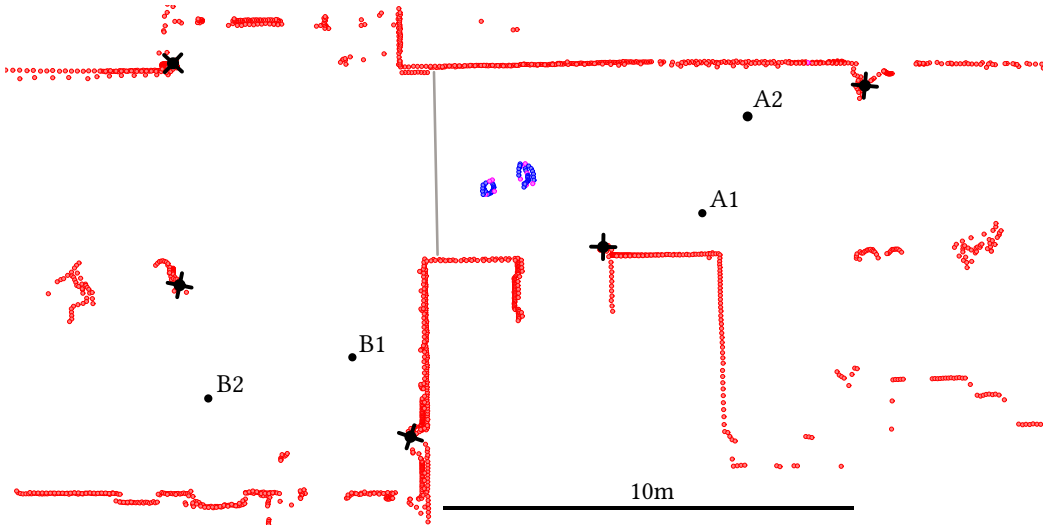


Abbildung 4.14: Punktwolke Guide
Die Position und Ausrichtung der Laser-Range-Scanner werden durch schwarze Kreuze markiert, die Ziel bzw. Startpunkte sind mit A1, A2, B1 und B2 eingezeichnet.

te der Roboter dann ebenso anhalten. Sobald der Roboter zum Stehen gekommen ist, läuft die Versuchsperson wieder weiter in Richtung Roboter.

Die Versuchspersonen wurden instruiert, den Button auf dem Touchscreen zu betätigen, sobald der Roboter durch einen kurzen Ton signalisiert hat, dass er am Ziel angekommen ist. Für den Versuch »Guide-Stop« wurden sie darüber hinaus angewiesen, bei jeder Überquerung der Dehnungsfuge solange stehen zu bleiben, bis auch der Roboter zum Stehen gekommen ist. Darüberhinaus wurden die Versuchspersonen nur angewiesen dem Roboter zu folgen.

Der Parameter »DesiredDistance« das »Guide Objective« wurde auf 1,8 m gesetzt.

4.5.2 Übersicht zu den gewonnenen Daten

In Tabelle 4.9 sind die in die Auswertung einfließenden Daten dargestellt. Ursprünglich konnten aus den aufgezeichneten Daten 76 Abschnitte extrahiert werden, davon wurden 13 aufgrund von Tracking-Fehlern in den Trajektori-

en ausgeschlossen. Um die fehlerhaften Daten zu finden, wurde nach Ausreißern bei der zurückgelegten Strecke und der Maximalgeschwindigkeit für Roboter und Versuchsperson gesucht. Von den verbleibenden 63 Abschnitten wurden wiederum 7 ausgeschlossen, da bei diesen die Versuchspersonen nicht auf der Dehnungsfuge anhielten. Diese Fälle werden über das Zeit-Geschwindigkeit-Diagramm der Versuchsperson ausgeschlossen. Weist die Zeit-Geschwindigkeit-Kurve keinen Einbruch der Geschwindigkeit auf, wird davon ausgegangen, dass die Versuchsperson vergessen hat, stehen zu bleiben.

VP	Anz.	Dauer [min:sec]	Geschw. Person mean [m/s]	std [m/s]
1	10	8:36	0,6	0,026
2	10	6:31	0,51	0,046
3	12	7:53	0,62	0,046
4	10	9:19	0,57	0,039
5	10	8:06	0,52	0,018
6	4	5:47	0,57	0,028
	56	46:12	0,57	0,056

Tabelle 4.9: Übersicht gewonnene Daten Guide-Stop
Jede Zeile steht für die gewonnenen Daten einer Versuchsperson, die letzte Zeile zeigt die Summe bzw. den Durchschnitt aller Daten.

Bei den Daten für das »Guide«-Experiment ohne Stopp (siehe Tabelle 4.10) wurden 8 der ursprünglich 37 Abschnitte aufgrund von Fehlern im Tracking des Frameworks ausgeschlossen.

Es handelt sich bei den sechs Versuchspersonen um fünf männliche Mitarbeiter des Fachgebiets und einen männlichen Studenten (Versuchsperson 6).

VP	Anz.	Dauer [min:sec]	Geschw. Person mean [m/s]	std [m/s]
1	10	6:28	0,62	0,065
2	11	5:47	0,57	0,049
6	16	14:46	0,64	0,046
	37	27:01	0,62	0,059

Tabelle 4.10: Übersicht gewonnene Daten Guide ohne Stop
Jede Zeile steht für die gewonnenen Daten einer Versuchsperson, die letzte Zeile zeigt die Summe bzw. den Durchschnitt aller Daten.

4.5.3 Auswertung

Distanz Roboter und Versuchsperson

Die übrigen Auswertungen verrechnen jeweils einen Abschnitt zu einem Wert und bilden über diese Werte den Durchschnitt. Für die folgenden drei Auswertungen wird die Trajektorie in ihre einzelnen Posen zerteilt. In diesem Fall wird für jede Pose des Roboters der Abstand zur Versuchsperson berechnet, die Verteilung der Distanzen ist in Abbildung 4.15 zu sehen.

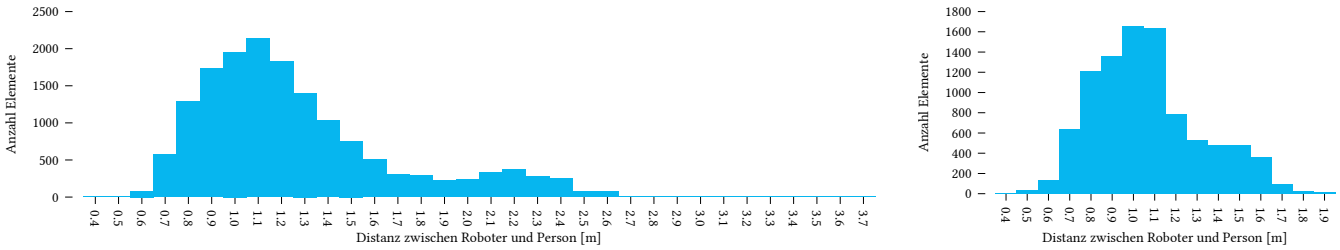


Abbildung 4.15: Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson
Im Durchschnitt besteht eine Roboter-Trajektorie aus 280 Posen (bei ca 10 Hz*). Für jede Pose wird die Distanz zur Versuchsperson gemessen, und in* 10 cm*-Bins gruppiert. Auf der linken Seite für den Versuch »Guide Stop«, auf der rechten Seite für den »Guide«-Versuch ohne stop.*

Für beide Experimente wurde 1,8 m für den Parameter »DesiredDistance« verwendet.

Für das Experiment »Guide« liegt der durchschnittliche Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson bei 1,1 m.

Für »Guide Stop« liegt der durchschnittliche Abstand bei 1,3 m, in Abbildung 4.15 sind aber zwei Maxima zu erkennen: Einmal um 1,1 m und ein weiteres, deutlich kleineres Maximum um 2,2 m. Die Ausreißer über 2,6 m sind auf einen einzelnen Abschnitt zurückzuführen, bei dem der Roboter das Tracking der Versuchsperson kurz vor dem Anhalten verloren hat.

Es ist also davon auszugehen, dass der Roboter beim normalen Führen einen Abstand von durchschnittlich 1,1 m einhält. Bleibt die zu führende Person stehen, wird ein durchschnittlicher Abstand von 2,2 m nicht überschritten.

Annäherungsgeschwindigkeit und Distanz zum Roboter

Für jede Pose des Roboters wird die Beschleunigung des Roboters, der Abstand von Roboter und Versuchsperson und die Annäherungsgeschwindigkeit des Roboters zur Versuchsperson berechnet. In Abbildung 4.16 ist der Zusammenhang zwischen den drei Größen für den Versuch »Guide Stop« abgebildet.

Deutlich zu erkennen ist ein roter Bereich im rechten oberen Quadranten. In diesem Bereich ist die Distanz zwischen Versuchsperson und Roboter größer als die geforderten 1,8 m (x-Achse), und der Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson steigt (y-Achse). Um dem entgegenzuwirken, bremst der Roboter, damit die Versuchsperson wieder aufschließen kann.

Im linken unteren Quadranten ist ein bläulicher Bereich zu erkennen. Hier ist die Distanz zwischen Versuchsperson und Roboter kleiner als die geforderten 1,8 m, und der Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson sinkt. Um den Abstand wieder zu vergrößern, beschleunigt der Roboter.

Der Roboter versucht also durch Bremsen und Beschleunigen, den Abstand zur Versuchsperson auf die verlangten 1,8 m einzustellen.

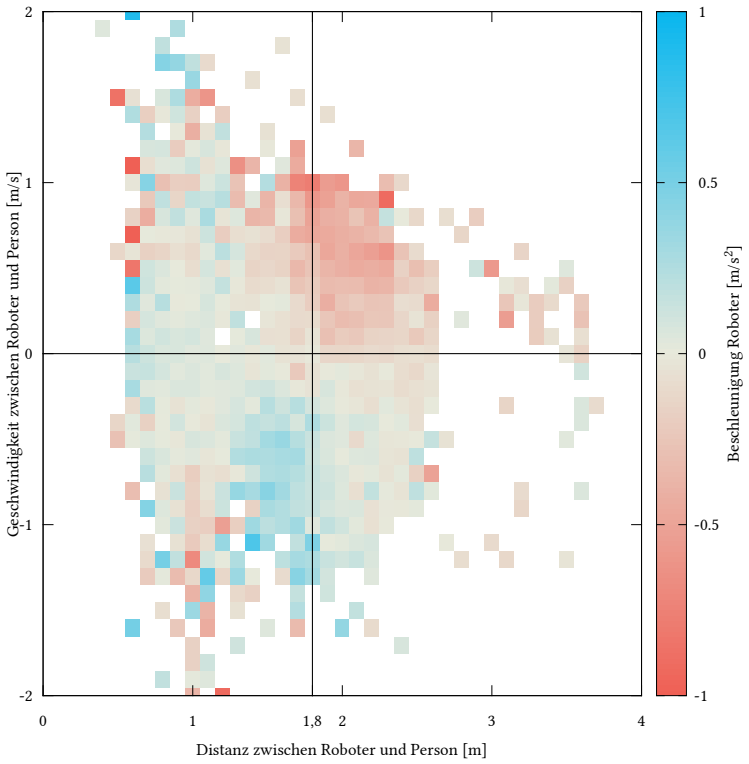


Abbildung 4.16: Annäherungsgeschwindigkeit und Distanz zum Roboter
Ein positiver Wert auf der y-Achse bedeutet, dass die Distanz zwischen Roboter und Versuchsperson steigt. Rot eingefärbt sind die Elemente, bei denen der Roboter abbremst, blau, wenn der Roboter beschleunigt. Eingezeichnet ist darüberhinaus der Parameter »DesiredDistance« mit 1,8 m.

Geschwindigkeit der Versuchsperson und Distanz zum Roboter

Führt der Roboter die Versuchsperson, gibt zwar der Roboter die Richtung vor, die Geschwindigkeit wird aber durch die Versuchsperson vorgegeben. Je näher sich die Versuchsperson am Roboter befindet, desto schneller fährt der Roboter auf sein vorgegebenes Ziel zu.

Für jede Pose der aufgezeichneten Trajektorien des Roboters wird die Geschwindigkeit der Person und der Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson berechnet.

Der am häufigsten gemessene Abstand zwischen Roboter und Versuchsper-

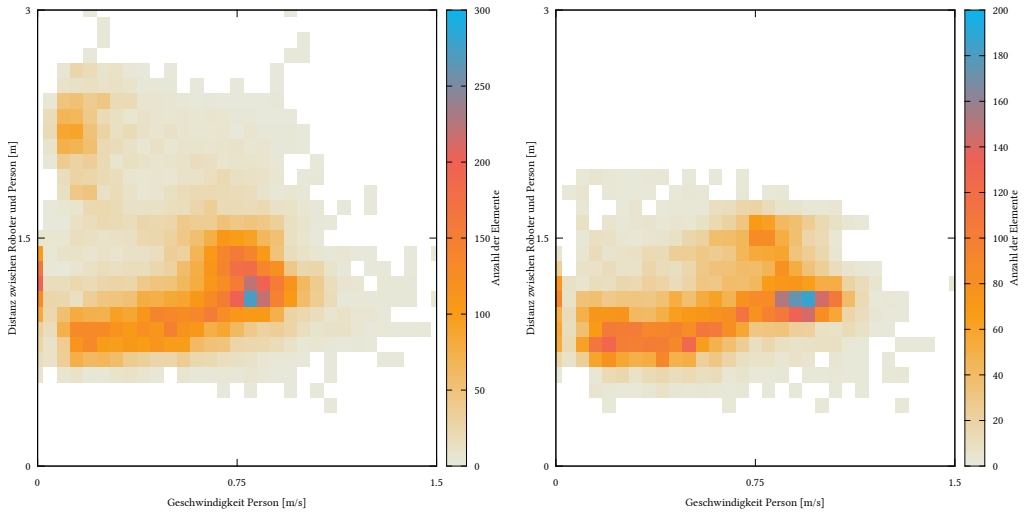


Abbildung 4.17: Geschwindigkeit der Versuchsperson und Distanz zum Roboter
Für jede Position in der Trajektorie des Roboters wird die Distanz zur Versuchsperson und die Geschwindigkeit der Versuchsperson berechnet. Auf der linken Seite für den Versuch »Guide Stop«, auf der rechten Seite Guide ohne Stop.

son liegt bei 1,1 m. Die Versuchsperson läuft dabei beim Versuch »Guide Stop« 0,8 m/s und beim Versuch »Guide« 0,95 m/s.

Die Versuchspersonen scheinen also die relativ geringe Distanz von 1,1 m zwischen den Mittelpunkten von Roboter und Person[4] zu bevorzugen um damit eine möglichst hohe Geschwindigkeit mit dem Roboter zu erreichen.

Für den Versuch »Guide Stop« (linke Seite der Abbildung 4.17) ist zusätzlich eine Häufung im linken oberen Bereich der Grafik zu sehen. Die niedrige Geschwindigkeit und der große Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson legen nahe, dass dieser Bereich auf das Anhalten der Versuchsperson zurückzuführen ist.

[4]Der Abstand bezieht sich auf die Mittelpunkte von Versuchsperson und Roboter. Bei einer Schrittlänge von 1 m und dem Durchmesser des Roboters von 70 cm am Boden bleiben für den Abstand zwischen Fuß und Roboter 25 cm.

Maximale Distanz zwischen Person und Personen-Hypothese des Roboters

Analog zur Auswertung bei »Follow« (siehe Seite 55) wurde der interne Zustand des Roboters betrachtet und die maximale Abweichung zwischen der Person und der Personen-Hypothese des Roboters ausgewertet:

Für 67% der Trajektorien liegt die Abweichung unter 1 m, für 26% unter 0,5 m. Damit sind die Werte deutlich schlechter als die des Follow-Experiments, obwohl die durchschnittliche Distanz zwischen Roboter und Versuchsperson für »Follow« bei 3,5 m liegt und für beide »Guide« Experimente bei bei nur 1,2 m.

Durch welche Umstände der Personen Tracker des Roboters bei den Guide Experimenten schlechtere Ergebnisse liefert als beim Experiment »Follow« ist nicht bekannt.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Personen-Detektion in Punktwolken von Laser-Range-Scannern verbessert, indem ein systembedingter Fehler des Mean-Shift-Verfahrens beim Detektieren von Personen in Daten von LRS aufgezeigt und ein Personen-Detektor geschaffen wurde, der diesem Fehler nicht unterliegt. Dafür wurde ein Ellipse-Fitting-Algorithmus auf Basis der »Randomized Hough Transform« entwickelt.

Um den Roboter und die Versuchsperson in eine reproduzierbare Interaktions-Situation bringen zu können, wurde ein flexibles Framework entwickelt, mit dem auch die Trajektorien der Versuchsperson und des Roboters aufgezeichnet werden können. Darüber hinaus bietet das Framework viele Möglichkeiten, die aufgenommenen Daten auszuwerten und einzuordnen.

Mit Hilfe dieses Frameworks wurden in drei unterschiedlichen Experimenten über 5 Stunden auswertbares Material aufgezeichnet, aus denen sich über 700 Trajektorien der Versuchsperson und des Roboters extrahieren ließen.

Für das Experiment »Personal Space« wurde untersucht, ob und wie gut der Roboter einer Versuchsperson ausweichen kann, wenn sich die Wege des Robo-

ters und der Versuchsperson kreuzen. Für den Roboter mit aktiviertem »Personal Space Objective« konnte gezeigt werden, dass die Person weder abbremsen noch einen Umweg laufen muss. Der Roboter hingegen fährt einen relativ großen Umweg, hält aber den Mindestabstand zur Versuchsperson ein. Die Daten der Hautleitwert-Messung während des Experiments führten zu keinem eindeutigen Ergebnis.

Beim Experiment »Follow« soll der Roboter der Versuchsperson folgen. Im Durchschnitt liegt der Roboter bei der 14 m langen Strecke, auf der die Versuchsperson verfolgt werden soll, 4,1 m zurück. Auch wenn der Roboter also nicht mit der Geschwindigkeit der Person schritthalten kann, passt er seine Geschwindigkeit an die der Person an. In 95% der ausgewerteten Abschnitte trackt und verfolgt er die Versuchsperson gut genug um zu gewährleisten, dass diese nicht von ihrem eigentlichen Weg abweicht und dem Roboter entgegengeht. Für 85% der ausgewerteten Abschnitte liegt die maximale Distanz zwischen der Position der Versuchsperson und der Position, von der der Roboter vermutet, dass sich die Versuchsperson befindet, unter einem Meter.

Schließlich soll der Roboter beim Experiment »Guide« die Versuchsperson führen. Es konnte gezeigt werden, dass der Roboter seine Geschwindigkeit verringert, wenn die Distanz zur Versuchsperson größer wird. Während die Versuchsperson normal läuft, liegt der durchschnittliche Abstand bei 1,1 m, für den Fall dass die Versuchsperson stehen bleibt, hält der Roboter im Abstand von durchschnittlich 2,2 m an. In 67% der Abschnitte ist die vom Roboter erkannte Position der Versuchsperson unter einem Meter von der tatsächlichen Position der Versuchsperson entfernt.

5.2 Ausblick

Die Auswertung »durchschnittliche Krümmung« und »durchschnittliche Pfadlänge« des »Personal Space« Experiment haben zwischen den beiden »Personal

Space«-Varianten keinen Unterschied bei der Beeinflussung der Versuchsperson gezeigt, während sich die Werte für die Trajektorien des Roboters deutlich unterscheiden. Bezogen auf diese beiden Auswertungen scheint der optimale Parameter für »Personal Space« unter 0,1 m zu liegen. Aufgabe zukünftiger Arbeiten könnte es sein, den Parameter für »Personal Space« so zu bestimmen, dass er im Vergleich zu 0,1 m nur minimal schlechtere Werte für die Versuchsperson liefert, aber die Weglänge und die Krümmung der Trajektorien des Roboter weiter reduziert.

Ellipse-Fitting Das Tracking von Versuchsperson und Roboter beeinflusst das Verhalten des Frameworks und die Ergebnisse aller Experimente stark. Deshalb ist eine weitere Verbesserung des Ellipsefitting als besonders wichtig zu bewerten.

Da die Punkte für das Ellipsefitting mehr oder weniger zufällig ausgewählt werden, werden Personen, die sich besonders nahe an einem oder mehreren Laser-Range-Scannern befinden und dadurch in der Punktwolke durch eine erhöhte Punktzahl repräsentiert werden, bevorzugt detektiert. So treffen bei einer 0,5° Auflösung des LRS auf einen 45 cm breiten Oberkörper bei 1 m Abstand 50 Punkte und bei 4 m nur noch 12 Punkte. Lindstrom u. Eklundh 2001 schlagen deshalb vor, einen Ausgleichsterm zu verwenden. In diesem Ausgleichsterm wird die Distanz des einzelnen Punktes zum LRS mit eingerechnet, um so die vom LRS weiter entfernten Punkte bei der zufälligen Auswahl zu bevorzugen.

Die Implementierung des Ellipsefitting wurde im Sinne von Donald E. Knuth (»premature optimization is the root of all evil« (Knuth, 1974, S. 268)) ohne besondere Optimierung des Quellcodes geschrieben. Für den Einsatz im Framework, wie es in dieser Arbeit beschrieben wurde, ist das Ellipsefitting kein limitierender Faktor. Dennoch sollte vor seinem Einsatz in anderen Bereichen (zum Beispiel auf einem Roboter) bedacht werden, dass die Effizienz der Software unter Umständen noch weiter gesteigert werden könnte.

Werden Laser-Range-Scanner auf Oberkörperhöhe verwendet, lassen sich Personen als ellipsenförmige Punktwolken erkennen. Dennoch wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht nach alternativen Formen zu Ellipsen gesucht. Unter Umständen könnten andere geometrische Objekte die durch Laser-Range-Scanner abgetastete Oberfläche eines Menschen besser beschreiben.

Nachdem eine Ellipse als valide markiert wurde, liegen sowohl die Parameter der durchschnittlichen Ellipse als auch die Punkte, die zur Detektion dieser Ellipse geführt haben, vor. Bisher wird ausschließlich die durchschnittliche Ellipse für die Weiterverarbeitung verwendet. Es könnten aber auch die Punkte weiterverwendet werden und zum Beispiel eine Ellipse mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate auf die Punkte gefittet werden.

Laser-Range-Scanner Die Laser-Range-Scanner wurden nicht mit der maximalen Frequenz und Winkelauflösung betrieben. Während die höhere Frequenz wahrscheinlich nur für eine Glättung der Punkte verwendet werden kann, könnte eine höhere Winkelauflösung die Qualität des Trackings deutlich verbessern.

Die LRS werden untereinander nicht synchronisiert. Falls die beiden Messungen zwei unterschiedlicher LRS (25 Hz Abtastung) um eine Periode verschoben beim auswertenden Framework ankommen und sich die Versuchsperson mit 5 km/h bewegt, unterscheiden sich die beiden Messungen im schlimmsten Fall um 5,6 cm. Dazu kommt das in der Praxis größere Problem von Netzwerkverzögerungen.

Elektrodermale Aktivität Für die Messung des Hautleitwerts wurden Elektroden um das vorletzte Glied des Mittel und Zeigefingers eingesetzt. Üblicherweise werden Elektroden mit Elektrolyt (vgl. Boucsein, 1992, S. 101ff) zum Kleben verwendet. Dadurch könnten unter Umständen einige Probleme (unterschiedlicher Anpressdruck, Leitfähigkeit zwischen Elektrode und Haut vom Schweißfilm abhängig, Kontaktprobleme durch zu lockere Elektroden) behoben werden. An dieser Stelle soll allerdings auch nicht verschwiegen werden, dass auch bei

Klebe-Elektroden mit Elektrolyt bekannte Probleme bestehen. So verändert über längere Zeit das Elektrolyt die Leitfähigkeit der Haut, wodurch die Messwerte zu driften beginnen (vgl. Boucsein, 1992, S. 129).

Da es auch nicht auszuschließen ist, dass die ernüchternden Ergebnisse bezüglich der elektrodermalen Aktivität nicht der Messanordnung, sondern der Gesamtsituation zu schulden sind, könnte bei einer Wiederholung der Experimente auch auf anderes Biofeedback wie zum Beispiel Herz-Frequenz-Messung gesetzt werden.

Außerdem könnte auch schon die Anpassung des Versuchsaufbaus, wie zum Beispiel Entspannungspausen zwischen den einzelnen Abschnitten an Start- bzw. Zielpunkt zu einer Verbesserung der Messwerte führen.

Literaturverzeichnis

[LMS 2012] *Lasermesssensoren der Produktfamilie LMS1xx.* : *Lasermesssensoren der Produktfamilie LMS1xx*, 2012. https://www.sick.com/media/pdf/0/50/550/IM0026550.PDF

[Adiaviakoye u. a. 2014] Adiaviakoye, L. ; Patrick, P. ; Marc, B. ; Auberlet, J.-M.: Tracking of multiple people in crowds using laser range scanners. In: *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2014 IEEE Ninth International Conference on*, 2014, S. 1–6

[Arras u. a. 2007] Arras, K.O. ; Mozos, O.M. ; Burgard, W.: Using Boosted Features for the Detection of People in 2D Range Data. In: *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, 2007, S. 3402–3407

[Boucsein 1992] Boucsein, Wolfram: *Electrodermal activity.* New York [u.a.] : Plenum Press, 1992 (The Plenum series in behavioral psychophysiology and medicine)

[Bösel 1987] Bösel, Rainer: *Physiologische Psychologie: Einführung in die biologischen und physiologischen Grundlagen der Psychologie.* 2., neubearb. Aufl. Berlin [u.a.] : de Gruyter, 1987

[Dondrup u. a. 2014] Dondrup, Christian ; Lichtenthäler, Christina ; Hanheide, Marc: Hesitation Signals in Human-robot Head-on Encounters: A Pilot Study. In: *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on*

Human-robot Interaction. New York, NY, USA : ACM, 2014 (HRI '14), S. 154–155

[Einhorn u. a. 2012] Einhorn, E. ; Langner, T. ; Stricker, R. ; Martin, C. ; Gross, H.: MIRA - middleware for robotic applications. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, 2012, S. 2591–2598

[Fischler u. Bolles 1981] Fischler, Martin A. ; Bolles, Robert C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. In: *Commun. ACM* 24 (1981), Juni, Nr. 6, S. 381–395

[Fukunaga u. Hostetler 1975] Fukunaga, K. ; Hostetler, L.: The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. In: *Information Theory, IEEE Transactions on* 21 (1975), Jan, Nr. 1, S. 32–40

[Gross u. a. 2009] Gross, H.-M. ; Boehme, H. ; Schroeter, C. ; Mueller, S. ; Koenig, A. ; Einhorn, E. ; Martin, C. ; Merten, M. ; Bley, A.: TOOMAS: Interactive Shopping Guide robots in everyday use - final implementation and experiences from long-term field trials. In: *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, 2009, S. 2005–2012

[Gross u. a. 2008] Gross, H.-M. ; Boehme, H.-J. ; Schroeter, C. ; Mueller, S. ; Koenig, A. ; Martin, C. ; Merten, M. ; Bley, A.: ShopBot: Progress in developing an interactive mobile shopping assistant for everyday use. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2008. SMC 2008. IEEE International Conference on*, 2008, S. 3471–3478

[Gross u. a. 2014] Gross, H.-M. ; Debes, K. ; Einhorn, E. ; Mueller, S. ; Scheidig, A. ; Weinrich, C. ; Bley, A. ; Martin, C.: Mobile Robotic Rehabilitation Assistant for walking and orientation training of Stroke Patients: A report on work

in progress. In: *Systems, Man and Cybernetics (SMC), 2014 IEEE International Conference on*, 2014, S. 1880–1887

[Hall 1990] Hall, Edward T.: *The hidden dimension.* Reprinted. New York, NY [u.a.] : Anchor Books, 1990. – Originally published: Garden City, NY: Doubleday, 1966

[Harris u. Stocker 1998] Harris, John W. ; Stocker, Horst: *Handbook of mathematics and computational science.* New York, NY [u.a.] : Springer, 1998

[Hashimoto u. a. 2010] Hashimoto, M. ; Konda, T. ; Bai, Zhitao ; Takahashi, K.: Laser-based tracking of randomly moving people in crowded environments. In: *Automation and Logistics (ICAL), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, S. 31–36

[Knuth 1974] Knuth, Donald E.: Structured Programming with Go to Statements. In: *ACM Comput. Surv.* 6 (1974), Dezember, Nr. 4, S. 261–301

[Kockelkorn 2012] Kockelkorn, Ulrich: *Statistik für Anwender.* Berlin [u.a.] : Springer Spektrum, 2012

[Kruse u. a. 2014] Kruse, Thibault ; Kirsch, Alexandra ; Khambhaita, Harmish ; Alami, Rachid: Evaluating Directional Cost Models in Navigation. In: *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction.* New York, NY, USA : ACM, 2014 (HRI '14), S. 350–357

[Köhler 2001] Köhler, Thomas: *Biopsychologie: ein Lehrbuch.* Stuttgart [u.a.] : Kohlhammer, 2001

[Lindstrom u. Eklundh 2001] Lindstrom, M. ; Eklundh, J.O.: Detecting and tracking moving objects from a mobile platform using a laser range scanner. In: *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on* Bd. 3, 2001, S. 1364–1369 vol.3

[Marsh 1999] Marsh, Duncan: *Applied geometry for computer graphics and CAD*. London [u.a.] : Springer, 1999 (Springer undergraduate mathematics series)

[Meyberg 1995] Meyberg, Kurt: *Höhere Mathematik; 1*. Bd. 1: *Differential- und Integralrechnung, Vektor- und Matrizenrechnung*. 3., korr. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 1995

[Muñoz u. a. 2007] Muñoz, N. D. ; Valencia, J. A. ; Londoño, N.: Evaluation of Navigation of an Autonomous Mobile Robot. In: *Proceedings of the 2007 Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2007 (PerMIS '07), S. 15–21

[Nguyen u. a. 2009] Nguyen, Thanh M. ; Ahuja, S. ; Wu, Q.M.J.: A real-time ellipse detection based on edge grouping. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on*, 2009, S. 3280–3286

[Schenk u. a. 2012] Schenk, K. ; Kolarow, A. ; Eisenbach, M. ; Debes, K. ; Gross, H.-M.: Automatic calibration of a stationary network of laser range finders by matching movement trajectories. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, 2012, S. 431–437

[Schenk 2011] Schenk, Konrad: *Laserbasiertes Verfahren zur vollautomatischen Erfassung und Protokollierung von Personenbewegungstrajektorien*. 2011. – Ilmenau, Techn. Univ., Masterarbeit, 2011

[Schenk u. a. 2011] Schenk, Konrad ; Eisenbach, Markus ; Kolarow, Alexander ; Gross, Horst-Michael: Comparison of laser-based person tracking at feet and upper-body height. In: *KI 2011: advances in artificial intelligence*, 2011, S. 277–288

[Schlittgen 2012] Schlittgen, Rainer: *Einführung in die Statistik: Analyse und Modellierung von Daten*. 12., korrigierte Aufl. München : Oldenbourg, 2012 (Lehr- und Handbücher der Statistik)

[Shao u. a. 2007] Shao, Xiaowei ; Zhao, Huijing ; Nakamura, K. ; Katabira, K. ; Shibasaki, R. ; Nakagawa, Y.: Detection and tracking of multiple pedestrians by using laser range scanners. In: *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, 2007, S. 2174–2179

[Volkhardt u. a. 2013] Volkhardt, M. ; Weinrich, C. ; Gross, H.-M.: People Tracking on a Mobile Companion Robot. In: *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, S. 4354–4359

[Weisstein] Weisstein, Eric W.: *Ellipse. From MathWorld—A Wolfram Web Resource.* `http://mathworld.wolfram.com/Ellipse.html`. – Besucht am 2015-03-29

[Wonpil u. a. 2013] Wonpil, Yu ; Choi, Sunglok ; Lee, Kyungkeun ; Jeong, YoungSook: A study on navigation performance evaluation of educational robots. In: *Robotics (ISR), 2013 44th International Symposium on*, 2013, S. 1–3

[Xu u. a. 1990] Xu, Lei ; Oja, Erkki ; Kultanen, Pekka: A new curve detection method: Randomized Hough transform (RHT). In: *Pattern Recognition Letters* 11 (1990), Nr. 5, S. 331 – 338

[Zhou u. Papanikolopoulos 2011] Zhou, Tinghui ; Papanikolopoulos, N.: Enhancing the Randomized Hough Transform with k-means clustering to detect mutually-occluded ellipses. In: *Control Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on*, 2011, S. 327–332

[Zlotowski u. a. 2012] Zlotowski, J. ; Weiss, A. ; Tscheligi, M.: Navigating in public space: Participants' evaluation of a robot's approach behavior. In: *Human-Robot Interaction (HRI), 2012 7th ACM/IEEE International Conference on*, 2012, S. 283–284

Anhang

A.1 Lokalisierung Roboter

Der in den Experimenten verwendete Roboter lokalisiert sich selbst in einer Karte. Da das verteilte System zur Detektion von Personen und Roboter in derselben Karte lokalisiert ist, kann die Position des Roboters, die durch die Laser-Range-Scanner des verteilten Systems festgestellt wurde und die Position an der sich der Roboter selbst lokalisiert hat, verglichen werden.

Dafür wird das in der Arbeit entwickelte Framework mit den Daten aller drei Experimente verwendet und die Lokalisierung auf der Basis der einzelnen Abschnitte ausgewertet. Während aber der Roboter bei der eigentlichen Auswertung immer wieder eine neue, von den vorherigen Durchgängen unabhängige Chance bekommt, ist die Einteilung in die einzelnen Trajektorien in Bezug auf die Lokalisierung etwas willkürlich. So könnte es passieren, dass der Roboter zum Ende eines Abschnitts n um 1 m verlokalisiert ist und kurz nach dem Start des Abschnitts $n + 1$ diesen Fehler selbstständig behebt. Trotzdem würde dieser Fall in dieser Auswertung als zwei Trajektorien mit 1 m maximaler Abweichung einfließen.

Für 95% aller Trajektorien liegt die maximale Abweichung unter 0,5 m, die durchschnittliche Abweichung liegt bei 0,56 m. Der Durchschnittswert aus allen 713 Trajektorien wird allerdings stark durch 9 Ausreißer mit einer Abweichung

von über 3 m beeinflusst. Wird der Durchschnittswert ohne diese Ausreißer gebildet liegt er bei 0,28 m.

A.2 Ellipse aus fünf Punkten

Eine Ellipse lässt sich nicht nur durch die fünf Parameter Breite, Höhe, Winkel und den Koordinaten des Mittelpunkts beschreiben, sondern auch durch einen ein Kegelschnitt.

Ein Kegelschnitt ist definiert durch

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0 \tag{A.1}$$

Dadurch ergibt sich ein lineares Gleichungssystem mit sechs Unbekannten:

$$\begin{array}{cccccccc} ax^2 & +2bxy & +cy^2 & +2dx & +2ey & +f & = & 0 \\ ax_1^2 & +2bx_1y_1 & +cy_1^2 & +2dx_1 & +2ey_1 & +f & = & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots & & \\ ax_1^5 & +2bx_5y_5 & +cy_5^2 & +2dx_5 & +2ey_5 & +f & = & 0 \end{array} \tag{A.2}$$

Ein Koeffizient kann zu 1 normiert werden, wodurch die so genannte »5-Punkte-Gleichung für den allgemeinen Kegelschnitt« ensteht (Meyberg, 1995, S. 309):

$$\begin{vmatrix} x^2 & 2xy & y^2 & 2x & 2y & 1 \\ x_1^2 & 2x_1y_1 & y_1^2 & 2x_1 & 2y_1 & 1 \\ x_2^2 & 2x_2y_2 & y_2^2 & 2x_2 & 2y_2 & 1 \\ x_3^2 & 2x_3y_3 & y_3^2 & 2x_3 & 2y_3 & 1 \\ x_4^2 & 2x_4y_4 & y_4^2 & 2x_4 & 2y_4 & 1 \\ x_5^2 & 2x_5y_5 & y_5^2 & 2x_5 & 2y_5 & 1 \end{vmatrix} = 0 \tag{A.3}$$

Bei dem so gefundenen Kegelschnitt handelt es sich um eine Ellipse, wenn

Gleichung A.4 und A.5 erfüllt sind (vgl. Harris u. Stocker, 1998, S. 394). Für die weiteren Berechnungen wird die Gleichung in die Parameter Mittelpunkt, große Halbachse, kleine Halbachse und Winkel überführt.

$$\begin{vmatrix} a & b & d \\ b & c & e \\ d & e & f \end{vmatrix} \neq 0 \qquad \text{(A.4)} \qquad \begin{vmatrix} a & b \\ b & c \end{vmatrix} = ac - b^2 > 0 \qquad \text{(A.5)}$$

Der Mittelpunkt der Ellipse lässt sich mit Hilfe der Gleichungen A.6 und A.7 bestimmen (vgl. Marsh, 1999, S. 103).

$$C_x = \frac{be - cd}{ac - b^2} \qquad \text{(A.6)} \qquad C_y = \frac{bd - ae}{ac - b^2} \qquad \text{(A.7)}$$

Die Länge der beiden Halbachsen kann wie in Gleichung A.8 und A.9 bestimmt werden (vgl. Weisstein).

$$a = \sqrt{\frac{2(ae^2 + cd^2 + fb^2 - 2bde - acf)}{(b^2 - ac)(\sqrt{(a-c)^2 + 4b^2} - (a+c))}} \qquad \text{(A.8)}$$

$$b = \sqrt{\frac{2(ae^2 + cd^2 + fb^2 - 2bde - acf)}{(b^2 - ac)(-\sqrt{(a-c)^2 + 4b^2} - (a+c))}} \qquad \text{(A.9)}$$

Der Winkel zwischen der Hauptachse der Ellipse und der X-Achse lässt sich wie folgt (Gleichung A.10) berechnen (vgl. Weisstein).

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{für } b = 0 \text{ und } a < c \\ \frac{\pi}{2} & \text{für } b = 0 \text{ und } a > c \\ \frac{1}{2}\cot^{-1}(\frac{a-c}{2b}) & \text{für } b \neq 0 \text{ und } a < c \\ \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}\cot^{-1}(\frac{a-c}{2b}) & \text{für } b \neq 0 \text{ und } a > c \end{cases} \qquad \text{(A.10)}$$

Abbildungsverzeichnis

2.1 Theoretische Abdeckung eines Laser-Range-Scanners 5
2.2 Theoretische Abtastung einer Ellipse durch zwei LRS 7
2.3 Ellipse-Fitting und Mean der Punktwolke im Vergleich 8
2.4 Punktwolke mit fünf Laser-Range-Scannern 10
2.5 Übersicht Entwickelter Algorithmus 16
2.6 Auswahl der Punkte 17
2.7 Bewertung und Auswahl der Ellipsen 18
2.8 Fehldetektion einer Ellipse 20

3.1 Möglicher Aufbau, um unterschiedliche Ausweichstrategien des Roboters zu testen 23
3.2 Einsatz mit nicht instruierten Passanten 25

4.1 Auswertung Hautleitwert 33
4.2 Punktwolke »Personal Space« 35
4.3 Typische Trajektorien für verschiedene Roboter Modi 39
4.4 Trajektorien verschiedener Versuchspersonen und deren Krümmung 43
4.5 Hautleitwert dreier Versuchspersonen 44
4.6 Hautleitwert Versuchsperson 9 mit Objective 45
4.7 Verarbeitung Hautleitwert 46
4.8 Grafische Darstellung von Tabelle 4.5 47
4.9 Aufbau »Follow« 50

4.10 Korrelation der Durchschnittsgeschwindigkeit von Roboter und Person 54
4.11 Trajektorien für Follow 55
4.12 Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson 56
4.13 Geschwindigkeit der Versuchsperson und Distanz zum Roboter 57
4.14 Punktwolke Guide 59
4.15 Abstand zwischen Roboter und Versuchsperson 61
4.16 Annäherungsgeschwindigkeit und Distanz zum Roboter 63
4.17 Geschwindigkeit der Versuchsperson und Distanz zum Roboter 64

Tabellenverzeichnis

2.1 Übersicht State of the Art Personendetektion mit LRS 6

4.1 Übersicht gewonnene Daten »Personal Space« 37
4.2 Geschwindigkeitsunterschiede aller Versuchspersonen 38
4.3 Zurückgelegte Strecke Roboter und Person für aller Versuchspersonen 40
4.4 Durchschnittliche Krümmung der Trajektorien von Roboter und Person 43
4.5 Daten Hautleitwert 46
4.6 Minimale Distanz zwischen Versuchsperson und Roboter 48
4.7 Übersicht gewonnene Daten Follow 51
4.8 Abstand zum Roboter wenn Versuchsperson am Ziel angekommen ist 52
4.9 Übersicht gewonnene Daten Guide-Stop 60
4.10 Übersicht gewonnene Daten Guide ohne Stop 61

Erklärung: Hiermit versichere ich, dass ich diese Masterarbeit selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle von mir aus anderen Veröffentlichungen übernommenen Passagen sind als solche gekennzeichnet.

Ilmenau, 2015-04-14 .....

Benedikt Seidl

Vereinbarung über die Verwertungsrechte an einer studentischen Arbeit

Wird eine Vereinbarung im Zusammenhang mit einer Diplomarbeit abgeschlossen, ist sie zur Prüfungsakte zu nehmen.

Name, Vorname der / des Studierenden (Angaben bitte in Druckbuchstaben):	Matrikel - Nr.:
Seidl, Benedikt	51821

Studiengang:	Fakultät:
MT	EI

Nach den Vorschriften des Gesetzes über das Urheberrecht (Urheberrechtsgesetz - UrhG) und des Arbeitnehmererfindergesetzes (ArbnErfG) liegen die Verwertungsrechte an einer Studien- oder Prüfungsarbeit ohne eine Vereinbarung bei der/dem Studierenden als Urheber oder Erfinder. Andererseits kann die TU Ilmenau (zum Beispiel bei gemeinsamen Projekten mit Forschungspartnern) ein Interesse an diesen Rechten haben. Zur Klärung der damit verbundene Fragen wird folgendes vereinbart:

○ Studienarbeit ○ Diplomarbeit ○ Bachelorarbeit ◉ Masterarbeit

Sonstiges: _____

Thema der Arbeit:

Framework zur Evaluation des Navigationsverhaltens mobiler Roboter gegenüber Menschen

Weitere an der Arbeit Beteiligte:

Verantwortlicher Hochschullehrer:

Univ.-Prof. Dr. H.-M. Groß

Alle prüfungsrechtlichen Bestimmungen besitzen Gültigkeit.

Ansprechpartner: Transferstelle (Telefon *2512, Email: transfer@tu-ilmenau.de)

A ○ **Alle Rechte verbleiben bei dem/der Studierenden.**
- zum Beispiel bei externen studentischen Arbeiten -
(Punkte B bis D entfallen.)

Die TU Ilmenau (in Person des verantwortlichen Hochschullehrers)
- ☐ erhält die während der Arbeit entstandenen Unterlagen (Programme, Messprotokolle etc.) zur Verwendung für eigene wissenschaftliche (nicht kommerzielle) Zwecke in Forschung und Lehre,
- ☐ darf Kopien von der Arbeit anfertigen,
- ☐ erhält auf Verlangen weitere Exemplare.

Die sonstigen Verwertungsrechte des/der Studierenden bleiben unberührt.

B ◉ Es wird ein **nicht ausschließliches Verwertungsrecht durch den/die Studierende(n) und die TU Ilmenau** vereinbart, d.h. der/die Studierende und die TU Ilmenau sind gleichermaßen berechtigt, die Ergebnisse der Arbeit zu nutzen. Im Falle einer Erfindung wird eine gesonderte Vereinbarung zwischen dem/der Studierenden und der TU Ilmenau abgeschlossen.
(Punkte C und D entfallen.)

C ○ Aufgrund einer vertraglichen Vereinbarung hat die TU Ilmenau dafür Sorge zu tragen, dass die Rechte an der Arbeit auf einen Projektpartner übergehen. Der/die Studierende **überträgt die Rechte an den Ergebnissen seiner Arbeit auf die TU Ilmenau.** Er/sie wird im Falle einer Erfindung Arbeitnehmern der TU Ilmenau gleich gestellt.
(Punkte D entfällt.)

- ☐ Dem/der Studierenden verbleibt das Recht zur Nutzung der Ergebnisse der Arbeit für eigene wissenschaftliche (nicht kommerzielle) Zwecke in Forschung und Lehre.
- ☐ Der/die Studierende wurde über Geheimhaltungsverpflichtungen, die sich aus der vertraglichen Vereinbarung mit dem Projektpartner ergeben belehrt.

Projektpartner: _____

Vertragsnummer der TU Ilmenau: _____

D ○ Die TU Ilmenau hat zur Weiterführung ihrer Forschungsarbeiten ein gesteigertes Interesse an den Ergebnissen dieser Arbeit. Aus diesem Grund **überträgt** der/die Studierende **die Rechte an den Ergebnissen seiner Arbeit auf die TU Ilmenau**. Er/sie wird im Falle einer Erfindung Arbeitnehmern der TU Ilmenau gleich gestellt.

- ☐ Dem/der Studierenden verbleibt das Recht zur Nutzung der Ergebnisse der Arbeit für eigene wissenschaftliche (nicht kommerzielle) Zwecke in Forschung und Lehre.

E Eine **Veröffentlichung/Weitergabe** der Arbeit darf ganz oder teilweise sowohl seitens des Studierenden als auch der TU Ilmenau
- ☐ uneingeschränkt
- ☒ nur im gegenseitigen Einvernehmen
- ☐ nur bis auf die in der **beigefügten weiteren Vereinbarung** ausdrücklich ausgenommenen Abschnitte
- ☐ erst nach dem _____ erfolgen.

Die Veröffentlichung der Zusammenfassung der Arbeit (Abstract) ist uneingeschränkt möglich.

Ilmenau, 11.09.2014	Ilmenau, 22.09.14	Ilmenau, 11.09.2014
Studierende(r)	Prüfungsamt (TU Ilmenau)	Verantwortlicher Hochschullehrer (TU Ilmenau)