

Vergleich von haptischen Steuerungsvarianten zur manuellen Bedienung von Robotersystemen

Comparison of haptic control mechanisms for manual manipulation of robotic systems

Philipp Wabnitz, M.Sc., Dr.-Ing. Andreas Heine, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger
philipp.wabnitz@mb.tu-chemnitz.de, andreas.heine@mb.tu-chemnitz.de, maik.berger@mb.tu-chemnitz.de
Technische Universität Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik, 09107 Chemnitz, Deutschland

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der manuellen Bedienung von Robotersystemen bei der Teach-In-Programmierung und deren Weiterentwicklung hinsichtlich intuitiver und haptischer Steuerungskonzepte. Hierfür werden verschiedene Geräte zur Steuerung eines kleinen Deltaroboters verwendet und bezüglich ihrer Bedieneigenschaften untersucht. Des Weiteren wird aufgezeigt, wie ein haptisches Vibrationsfeedback mittels dieser Bedienmethoden implementiert werden kann. Ziel dieser ersten Variantenstudie ist die Bewertung der Grundkonzepte dieser Geräte in Bezug auf Ergonomie, Systemgrenzen und Fähigkeit zur Ansteuerung von Raumkoordinaten für die Teach-In-Programmierung. Die Ergebnisse stellen die Grundlage für weitere Untersuchungen dar, welche zeigen sollen, inwieweit eine Implementierung der ausgewählten Steuerungskonzepte für einen handelsüblichen Roboter möglich ist und welche Vorteile daraus für kollaborierende und hybride Robotersysteme entstehen.

Abstract

This thesis deals with the manual operation of robot systems during teach-in programming and their further development with regard to intuitive and haptic control concepts. Various devices are used to control a small Delta robot and their operating characteristics are investigated. Furthermore, it is shown how a haptic vibration feedback can be implemented by means of these operating methods. The aim of this first variant study is to evaluate the basic concepts of these devices with regard to ergonomics, system boundaries and the ability to control spatial coordinates for teach-in programming. The results are the basis for further investigations, which should show to what extent an implementation of the selected control concepts for a commercial robot is possible and which advantages arise from it for collaborating and hybrid robot systems.

1 Einleitung

Aufgrund wirtschaftlicher Bedürfnisse und Vorteile hinsichtlich Flexibilität und Zeitersparnis haben sich Robotersysteme in vielen Bereichen der Montage- und Handhabungstechnik bewährt. Für diverse Einsatzszenarien gibt es eine Vielzahl an Modellen und dafür wiederum einen enormen Umfang an Greifersystemen und Peripherie. Damit wird ein hoher Grad an Automatisierung von Arbeitsabläufen erreicht.

Bei der Programmierung dieser Systeme sind jedoch nach wie vor programmiertechnische Kenntnisse und Erfahrungswissen vonnöten. Deshalb werden an Robotersysteme weiterhin Anforderungen an eine leichte Anwendbarkeit und eine kurze Einarbeitungszeit für Programmierer gestellt, welche im täglichen Einsatz Fehler vermeiden sowie Zeit und somit Kosten einsparen.

Zum einen wird es durch die Entwicklung heutiger Roboterarbeitsplätze hin zur kollaborierenden Robotik und dem Einsatz neuartiger hybrider Systeme notwendig, neue Steuerungskonzepte zu evaluieren, welche für diese Szenarien Vorteile bringen [1]–[3]. Zum anderen ist bei jeder Mensch-Maschine-Interaktion die Ergonomie von großer Bedeutung, was sich insbesondere in der kollaborierenden

Robotik zeigt [4]. Die Haptik des Robotersystems spielt hierbei eine zentrale Rolle, denn neben dem subjektiven Befinden bei der Benutzung des Systems können haptische Sinneseindrücke zur Vermittlung von Informationen genutzt und damit die Steuerung eines komplexen Robotersystems vereinfacht werden. In diesem Bereich haben sich sogenannte Feedbacksysteme bereits bewährt, welche es erlauben haptische Informationen nicht nur wahrzunehmen, sondern auch an das System zurückzugeben.

Bei der manuellen Bedienung und insbesondere bei der Teach-In-Programmierung von Robotersystemen ist es notwendig den Tool-Center-Point (TCP) in Absolutwerten vorzugeben oder inkrementell zu verändern, um bestimmte Posen anzusteuern. Hierbei werden Handbediengeräte eingesetzt, welche zur Einstellung von Parametern die Eingabe über einen Touchscreen oder mechanische Eingabeeinheiten wie Schalter oder Drehräder unterstützen. Um eine intuitive und ergonomische Handhabung zu ermöglichen, können in Kombination mit solchen Roboterbediengeräten weitere Steuerungssysteme eingesetzt werden wie beispielsweise sogenannte 6D-Mouse-Eingabeelemente. [5]

2 Stand der Technik

Die Programmierung eines Roboters wird nach Weber in Offline- und Online-Programmierung unterteilt. Während die Offline-Programmierung eine Programmierumgebung mit Simulationstools benötigt, geschieht die Online-Programmierung direkt am Roboter selbst. Eine Variante der Online-Programmierung stellt die sogenannte Teach-In-Programmierung dar. Diese Art der Steuerung von Robotersystemen erfolgt vielfach mit sogenannten Programmierhandgeräten (Teach-Panels), welche es erlauben mit einem gewissen räumlichen Abstand Positionierbefehle zu geben und unter Sichtkontrolle ausführen zu lassen. Diese Panels werden in verschiedenen Varianten eingesetzt – zum Beispiel in Form eines Touchpanels, bei denen Eingaben mittels Touchscreen getätigt werden (siehe **Bild 1**). [5]

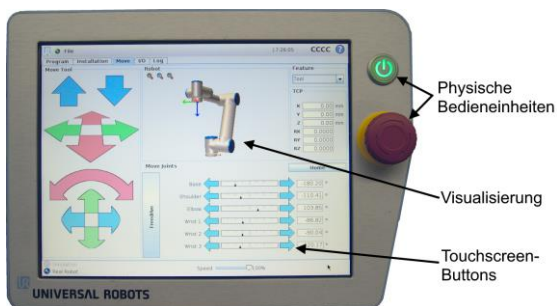


Bild 1 Teach-Pendant des UR5 der Fa. Universal Robots

Die haptische Wahrnehmung des Menschen geschieht mithilfe von Sensorzellen in der Haut und im Bewegungsapparat. Diese Zellen lassen sich nach den Reizen, die sie aufnehmen unterteilen in Merkelzellen, Meissner-, Ruffini- und Vater-Pacini-Körperchen sowie Muskelspindeln. [6] Technisch betrachtet lässt sich die Haptik jedoch auch anders unterteilen und zwar in Kinästhetik und Taktilität. Nach Kern et al. (2014) beschreibt die Kinästhetik die Wahrnehmung der Gelenkpositionen im Raum, der Ausrichtung aller Gliedmaßen, der Orientierung des Körpers und des Muskeltonus. Die Taktilität hingegen fasst Empfindungen von Temperatur, Schmerz und Berührung zusammen, wozu auch die Wahrnehmung von Vibrationen gehört. An der Mensch-Maschine-Schnittstelle werden diese Reize genutzt, um eine bidirektionale Interaktion zwischen dem Nutzer und einem virtuellen Objekt oder einem Teleoperator zu ermöglichen (siehe **Bild 2**). [7] Dieser Beitrag befasst sich vorrangig mit der Vibrotaktilität und dessen Nutzbarmachung, welche in der Literatur bereits umfangreich untersucht wurde [8], [9]. Die Wahrnehmung von taktilen Reizen während der Interaktion führt zu intuitiveren Benutzereingaben, da somit beispielsweise die Einhaltung von Parametergrenzwerten nicht nur visuell oder auditiv, sondern auch haptisch wahrgenommen werden kann. [10]–[12]

Im Hinblick auf neue Bedienkonzepte sind aber auch kinästhetische Eingabemöglichkeiten von Interesse, da sie das Erlernen der Steuerung durch den Einsatz von Gesten auf bekannte Bewegungen reduzieren und somit vereinfachen.

[13]–[15] Versuche haptische Feedbacksysteme bei der Steuerung von Robotersystemen und Greifern einzusetzen sind bereits vielfach in der Literatur beschrieben. [17]–[20]



Bild 2 Bidirektionale Interaktion bei haptischen Interfaces nach Kern et al. und Srinivasan/Basdogan [7], [16]

3 Robotersystem

Aufgrund der genannten Forschungsgegenstände musste ein Roboter gewählt werden, welcher die Anforderungen an einen Einsatz in einem hybriden und kollaborierenden Robotersystem erfüllt. Da in Folgeuntersuchungen der Schwerpunkt auf der Verwendung in einer Hybridstruktur liegt und der Roboter dabei an einem UR5 der Fa. Universal Robots befestigt wird, fiel die Wahl auf eine Deltakinematik. Hierbei erlauben die drei Achsen eine Positionierung des TCP im Raum jedoch keine Änderung der Orientierung.

Das kostengünstige, leichte und trotzdem den Belastungen gerechte Design der konzipierten Deltakinematik wird durch eine parametrische Konstruktion mit entsprechend wenigen Einzelteilen erreicht (siehe **Bild 3**). Die meisten Bauteile sind mittels FDM (Fused Deposition Modeling) gedruckt und alle weiteren Kauf- und DIN-Teile sind dem Modellbau-Bereich entnommen. Dieser kompakte Deltaroboter setzt sich aus einer zweiteiligen Basis, den Servoarmen, den Koppelstangen und der Endeffektoraufnahme zusammen und erfüllt aufgrund seines Gewichts von 700 g und der hohen Dynamik aufgrund der eingesetzten Servomotoren die an ihn gestellten Anforderungen.

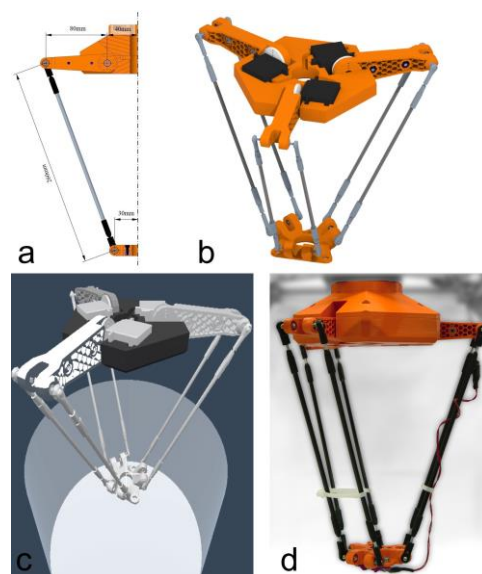


Bild 3 Konstruktion des Deltaroboters. (a) Abmessungen, (b) Rendering, (c) virtuelles Modell und (d) reales Modell

Bild 4 zeigt das Systemschema der Mensch-Roboter-Interaktion. Das eingesetzte Bediengerät gibt eine neue TCP-Position vor, welche in einem handelsüblichen Computer über die inverse Kinematik des Deltaroboters in eine Pose umgerechnet wird. Die dabei ermittelten Winkel werden daraufhin durch die Graupner DES707BBMG Servomotoren angefahren, wobei die Positionsregelung in diesen integriert ist. Ein am Endeffektor befestigter DF9-40-5kg Drucksensor misst die Belastung bei Kontakt mit dem Untergrund oder einem Objekt und diese wird anschließend in Form von Vibrationen an den Nutzer zurückgegeben.

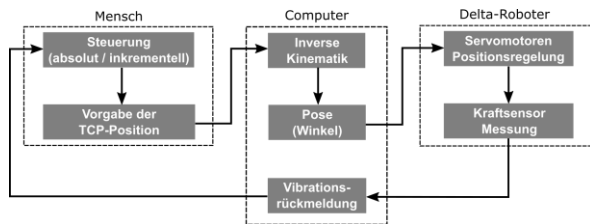


Bild 4 Systemschema für die TCP-Steuerung mit Vibrationsfeedback

Zur Steuerung kommen Komponenten des Elektronikbaukastensystems der Fa. Tinkerforge zum Einsatz (siehe **Bild 5**). Die Kommunikation mit dem Computer übernimmt dabei ein Masterbrick, welcher ebenfalls als Schnittstelle zu einem Anlaog-In-Bricklet dient, mit dem der Spannungsabfall über dem Drucksensor gemessen wird. Zur Steuerung der Servomotoren wird ein Servobrick verwendet, welches die Positionsvorgaben mittels Pulsweitenmodulation (PWM) an die angeschlossenen Servomotoren weitergibt.

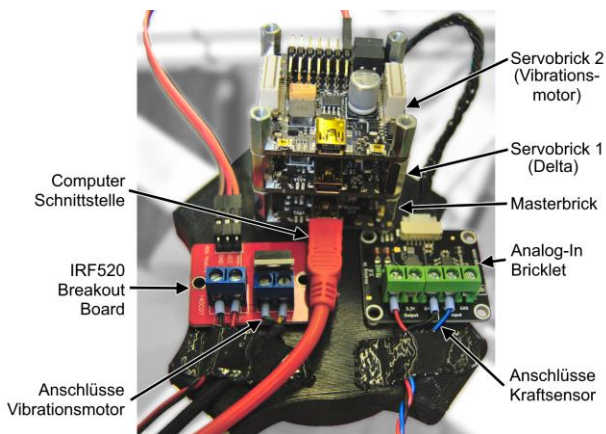


Bild 5 Steuerungskomponenten der Fa. Tinkerforge

Die Vibrationsrückmeldung erfolgt je nach Steuerungskonzept auf unterschiedliche Weise. Für die Bediengeräte, welche selbst keine eingebauten Vibrationsmotoren enthalten, wird ein Vibrationsarmband entsprechend dem von Sklar und Sarter (1999) beschriebenen „Tactor“ verwendet (siehe **Bild 6**) [21]. Hierbei kommt ein 3V DC Münzen-Vibrationsmotor zum Einsatz, welcher mit einem IRF520 (Mosfet) Breakout-Board mittels PWM in seiner Vibrationsstärke reguliert wird (siehe **Tabelle 1**). Die be-

nötigte Versorgungsspannung des IRF520 und die PWM-Signale werden aus einem zweiten Servobrick bezogen.

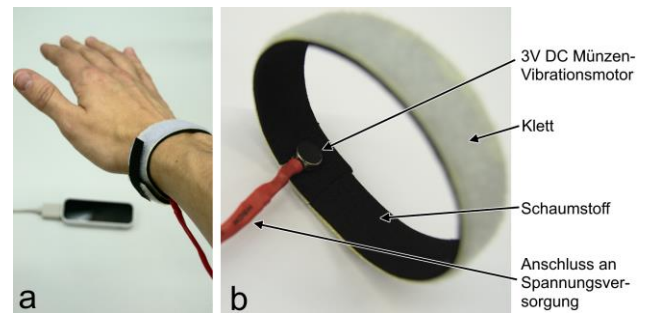


Bild 6 Vibrationsarmband. (a) Einsatz mit optischem Trackingsystem der Fa. Leap Motion und (b) Aufbau

Tabelle 1 Zusammenhang von Drucksensor-Belastung, gemessener Spannung, geregelter PWM und angelegter Betriebsspannung des Vibrationsmotors (Zwischenwerte werden linear interpoliert)

Belastung [N/mm ²]	Gemessene Spannung [mV]	PWM [μs]	Betriebsspannung [mV]
0...0.1	22 ± 3	0	0
0.11	1300	100	40
0.22	3300	10000	4000

4 Steuerungskonzepte

Grundsätzlich lässt sich der Delta-Roboter mit einer simplen Syntax programmieren. Ein Wegpunkt bzw. eine Pose wird mit dem MOVE-Befehl angesteuert. Soll die aktuelle Position mit einem MOVE-Befehl im Programm hinterlegt werden, wird die „Set Point“-Funktion aufgerufen. Für eine Rückkehr zur Nullposition ist eine „Zero“-Funktion implementiert. Der WAIT-Befehl lässt das Roboterprogramm eine bestimmte Zeitspanne in Sekunden warten und ein angeschlossenes Werkzeug kann mittels SET-TOOL-Befehl geschaltet werden.

4.1 Tastatur und Maus

Die händische Eingabe an einem handelsüblichen Computer mit Maus und Tastatur erlaubt eine direkte und inkrementelle Vorgabe des TCP. Mit der Tastatur kann die TCP-Position in Zahlenwerten angegeben oder mit den Pfeiltasten in Schritten angepasst werden. Die Maus stellt ein zusätzliches Hilfsmittel dar, bei dem der TCP in der XY-Ebene positioniert werden kann (siehe **Bild 7**). Das Vibrationsfeedback erfolgt hierbei mit dem Vibrationsarmband.

4.2 Touchscreen

Die Eingabe über den Touchscreen unterscheidet sich nur unwesentlich von der Eingabe mit Maus und Tastatur. Hierbei entfällt lediglich die Schnittstellenperipherie. Ein Betätigen der Buttons mit dem Finger ermöglicht eine intuitive Bedienung, ohne dabei Tasten für bestimmte Aktionen konfigurieren zu müssen. Das Vibrationsfeedback

wird ebenfalls mit dem Vibrationsarmband umgesetzt, jedoch wären auch Touchdisplays möglich, welche bereits Vibrationsmotoren implementiert haben.

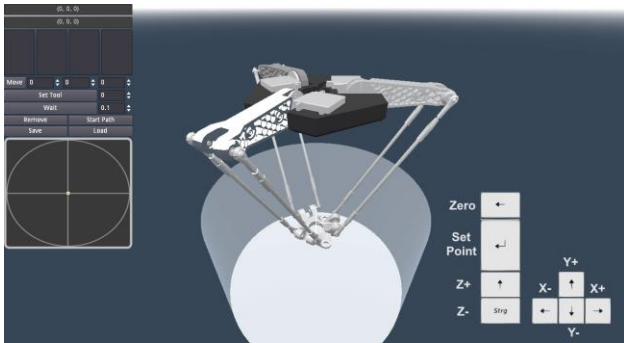


Bild 7 Oberfläche zur Steuerung mittels Maus und Tastatur als auch für die Touchscreenbedienung

4.3 Controller

Die manuelle Eingabe kann wie bei der bereits erwähnten 6D-Mouse mit einem Steuerknüppel (Stick) erfolgen. Dessen Auslenkung wird dann in inkrementelle Schritte in Richtung der dafür definierten Achse des Bezugskordinatensystems umgesetzt. Um alle drei Achsen des Delta-Roboters zu bedienen, sind mindestens ein Dreiachs-Stick oder zwei Zweiachs-Sticks erforderlich. Deshalb und aufgrund seiner hohen Kompatibilität mit diversen Computersystemen wurde der Xbox360 Controller der Fa. Microsoft ausgewählt. Die Ansteuerung der einzelnen Achsen ist in **Bild 8** zu sehen. Vorteilhaft ist hierbei, dass die Geschwindigkeit, mit der der TCP inkrementell verändert wird, proportional zur Auslenkung gesteigert oder verringert werden kann. Dies erlaubt bei großen Auslenkungen des Sticks eine schnelle Verfahrbewegung und bei kleineren Auslenkungen eine präzisere Ansteuerung von Punkten. Des Weiteren besitzt dieser Controllertyp zwei integrierte Vibrationsmotoren mit unterschiedlichen Schwungmassen, womit verschiedene Vibrationen erzeugt werden können.



Bild 8 Xbox360 Controller der Fa. Microsoft

4.4 Leap Motion

Um eine intuitive Steuerung mittels Handgesten zu ermöglichen, werden vorrangig optische Trackingsysteme eingesetzt. Eines davon, welches speziell für die Erfassung der Handpose entwickelt wurde, ist die sogenannte Leap Motion der Fa. Leap Motion. Diese besteht aus drei

Infrarot-LEDs, dessen Reflexionen mit zwei Infrarot-Kameras erfasst werden. Der Aufbau und die Funktionsweise sind hinreichend bei Weichert et al. (2013) und Marin et al. (2014) beschrieben [22], [23]. Alle gelieferten Hand- und Knöchel-Positionen beziehen sich auf den Mittelpunkt des Leap Motion Controllers, der zwischen den beiden IR-Kameras liegt, direkt über dem zweiten IR-Sender (siehe **Bild 9**). Deshalb wird zur direkten Eingabe des TCP der Ortsvektor des Handmittelpunktes in den Arbeitsraum des Delta-Roboters skaliert übertragen und mit einem Verfahrbefehl als Soll-Position angesteuert. Ein solches System wurde beispielweise bereits von Basily et al. (2014) umgesetzt [24].

Da die Leap Motion auch Informationen über die Fingerposen liefert, können bestimmte Gesten wie bspw. das Schließen und Öffnen der Hand erkannt werden [23]. Diese werden beim Teach-In-Prozess in „Set Point“-Befehle umgesetzt. Das Vibrationsfeedback erfolgt über das Vibrationsarmband.

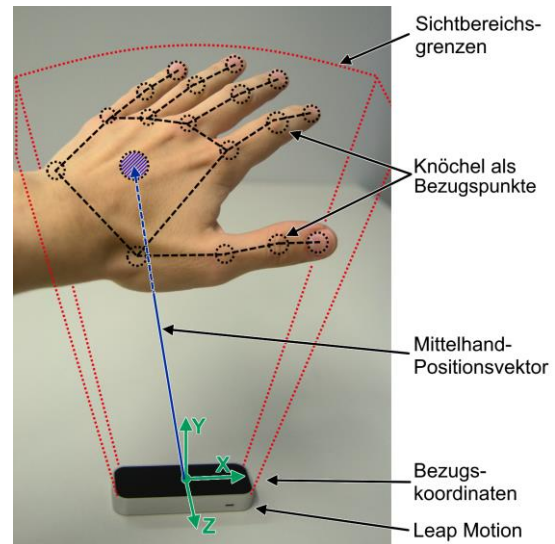


Bild 9 Leap Motion der Fa. Leap Motion (Darstellung nicht maßstabsgerecht)

4.5 Robot Glove

Eine weitere Variante eine Handgestensteuerung zu ermöglichen bietet der Robot Glove der Fa. Lobot. Dieser kostengünstige Handschuh basiert auf einem Arduino kompatiblen Board, welches einen Inertialsensor (IMU), ein Gyroskop, ein Bluetooth-Modul und ein Potentiometer je Finger vereint und somit die Grundvoraussetzungen für die Übertragung der Handpose auf ein Robotersystem erfüllt (siehe **Bild 10**). Die Eingabe von Verfahrbefehlen kann hierbei sowohl über die Beschleunigungswerte der IMU oder durch die Orientierung des Gyroskops erfolgen. Das Vibrationsfeedback wird hierbei ebenfalls über das Armband bereitgestellt, jedoch wäre es möglich der Fingerbewegung mit zusätzlichen Motoren entgegenzuwirken und somit ein kinästhetisches Feedback zu implementieren.

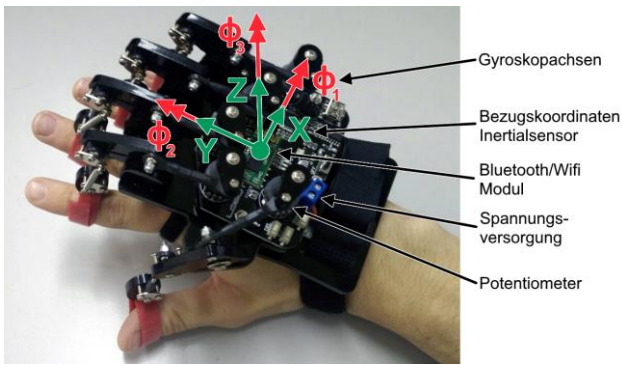


Bild 10 Robot Glove der Fa. Lobot

5 Versuchsdurchführung

Um einen Vergleich der vorgestellten Konzepte zu ermöglichen, wird mit jedem Bediengerät ein vordefinierter Teaching-Prozess durchgeführt (siehe **Bild 11**). Hierbei sollen drei Testpunkte angefahren werden bis ein Kontakt zwischen Werkzeug und Objekt zu Stande kommt, bei dem eine Mindestbelastung von 0.15 N/mm^2 erreicht wird. Da die Andruckkraft entlang der Z-Achse des Delta-roboters ausgeübt werden soll, müssen Zwischenposen angefahren werden, bei denen der TCP über den Testpunkten liegt. Des Weiteren ist auf Kollisionsfreiheit zu achten. Die Versuche werden für jedes Bediengerät zehn Mal durchgeführt, wobei die benötigte Zeit gemessen und anschließend über alle Versuche gemittelt wird, um entstandene Lern- und Trainingseffekte mit einzubeziehen.

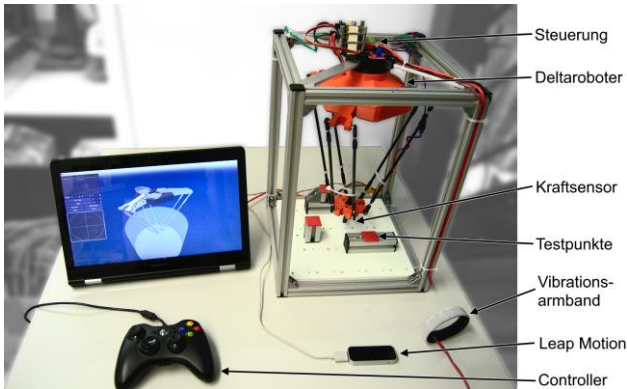


Bild 11 Versuchsaufbau mit einigen Eingabegeräten

Für eine Bewertung des Komforts bzw. die Quantifizierung der dabei auftretenden Beanspruchungen eines Bediensystems können neben objektiven Verfahren wie bspw. EMG, EKG und Gelenkwinkelmessungen auch subjektive Verfahren Verwendung finden. Eine subjektive Beurteilung des Komforts erfolgt am einfachsten durch den Einsatz von Fragebögen oder Interviews mit Probanden, wobei die Borg-Skala ein simples und gleichzeitig vielseitiges Belastungsbewertungsverfahren darstellt. Eine etablierte Variante, die für diese Untersuchung Anwendung findet, ist die für den Gesamtkörper verwendete RPE-Skala, welche aus 15 Anstrengungswerten von 6 („sehr, sehr locker“) bis 20 („sehr, sehr anstrengend“) besteht. [25]

6 Ergebnisse

Die über alle Versuche ermittelten Zeiten sind in **Tabelle 2** zusammen mit den Bewertungen des Komforts aufgelistet. Im Folgenden soll auf einzelne Punkte bei den Untersuchungen eingegangen werden.

Tabelle 2 Vergleich nach benötigter Zeit und subjektiv bewerteter Ergonomie nach Borg (Werte gemittelt über alle Versuche)

	Zeit [mm:ss]	Ergonomie [Borgskala]
Maus und Tastatur	02:20	10
Touchscreen	02:51	9
Xbox360 Controller	01:22	9
Leap Motion	00:48	7
Haptic Hand	-	14

Inkrementelle Eingaben mit der Tastatur können lediglich in der eingestellten Schrittweite getätigt werden. Eine Anpassung der Verfahrensgeschwindigkeit je nach Positionierungssituation ist somit nicht möglich. Dasselbe gilt für die Bedienung mittels Touchscreen, wobei dies durch den Einsatz von Drucksensitivitätsstufen erreicht werden könnte. Des Weiteren war die haptische Rückmeldung eines Tastendrucks beim Tippen auf den Bildschirm nicht gegeben, wodurch Nicht- oder Fehleingaben stattfanden. Hier zeigt sich der Vorteil einer physischen und somit haptisch erfahrbaren Eingabeschnittstelle.

Die Präzision und Wiederholgenauigkeit des Leap Motion Sensors wurden durch Weichert et al. (2013) und Guna et al. (2014) untersucht und bereits kritisiert [22], [26]. Der relativ kleine Erkennungsraum (120°) und auftretende Probleme bei Verschmutzungen sind ebenfalls wahrnehmbare Störfaktoren, die einem alltäglichen Einsatz im Wege stehen. Befindet sich die Hand in einer ungünstigen Lage, z. B. zum Teil hinter einem Gegenstand, so wird deren Position nicht zuverlässig erkannt. Diesen Problemen des optischen Trackings kann mit Systemen aus mehreren Sensoreinheiten entgegengewirkt werden, was bspw. Jin et al. (2016) untersucht haben [27]. Nichtsdestotrotz bietet die Leap Motion eine schnelle und kalibrierungsarme Möglichkeit die Handpose kontaktlos tracken zu lassen.

Ursprünglich sollte der in der Robot Glove verbaute Berschleunigungssensor Verwendung finden. Aufgrund der hohen Messabweichungen und der entstehenden Drift bei Inertialsensoren ist eine Umsetzung in Bewegungsbefehle nicht ausreichend genau möglich. Abhilfe schaffen könnte hierbei ein System, welches auf sensor fusion basiert und optische Messungen mit den Daten der IMU kombiniert. [28]–[30] Die Nutzung des Gyroskops als inkrementelle Steuerungseinheit ist kontraintuitiv und führte zu keiner ausreichend genauen Positionierung des TCP im Testfeld, weswegen keine Zeiten ermittelt werden konnten. Diese Sensordaten könnten stattdessen in weiteren Untersuchungen für die Anpassung der Orientierung bspw. bei einem Hexapoden verwendet werden.

Aufgrund der intuitiven Bedienung und der regelbaren Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Positionierungssituationen fallen Zeiten und subjektive Bewertungen des Komforts beim Xbox360 Controller und der Leap Motion deutlich besser aus als bei den anderen Geräten. Diese Steuerungskonzepte haben demnach ein großes Potential die etablierte Touchscreen- oder Tasteneingabe bei der TCP-Positionierung zu ergänzen.

7 Zusammenfassung

Es wurden verschiedene Bediengeräte für die absolute Eingabe und inkrementelle Veränderung des TCP eines Roboters für die Teach-In-Programmierung verglichen. Diese wurden hinsichtlich ihrer Bedieneigenschaften gegenübergestellt und in einem Testszenario im Bezug auf Ausführungsgeschwindigkeit und Komfort untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die haptische Interaktion im Allgemeinen und die vibrotaktile Wahrnehmung im Speziellen durchaus Vorteile bei der Steuerung eines Robotersystems bieten.

Optische Trackingsysteme wie die Leap Motion haben ein großes Potential eine Ergänzung zu einem klassischen Bedienpanel zu werden. Die Positionierung mit der Hand ist intuitiv und schnell. Probleme hinsichtlich Robustheit und Genauigkeit der Gestenerkennung müssten jedoch noch adressiert werden.

Das implementierte Vibrationsfeedback erlaubte bei allen Steuerungsarten eine schnelle Rückmeldung über einen Kontakt mit einem Objekt. Die dabei verwendeten kostengünstigen Drucksensoren bieten für Greifsysteme aufgrund ihrer Größe und der benötigten Auswerteelektronik viele Möglichkeiten ein haptisches Feedback zu implementieren.

Weitere Untersuchungen sind nötig, um diese anfänglichen Ergebnisse zu verifizieren. Hierbei stellen sich auch Fragen wie beispielsweise die gemessenen Zeiten mit umfangreicheren Teach-In-Aufgaben skalieren und wie Nutzer die Ergonomie nach einer längeren Anwendung bewerten. Optische Tracker und haptische Handschuhe könnten neue Möglichkeiten der Interaktion mit einem Roboter eröffnen und die Bedienung intuitiver und komfortabler gestalten.

8 Literatur

- [1] B. Matthias, „Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage“, S. 13.
- [2] T. Bauernhansl, M. Ten Hompel, und B. Vogel-Heuser, Hrsg., „Mensch-Maschine-Interaktion“, in *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 509–523.
- [3] S. Wischmann, „Arbeitssystemgestaltung im Spannungsfeld zwischen Organisation und Mensch-Technik-Interaktion – das Beispiel Robotik“, in *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*, A. Botthof und E. A. Hartmann, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 149–160.
- [4] M.-A. Weber und S. Stowasser, „Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung unter Einsatz kollaborierender

- Robotersysteme: Eine praxisorientierte Einführung“, *Z. Für Arbeitswissenschaft*, Bd. 72, Nr. 4, S. 229–238, Dez. 2018.
- [5] W. Weber, „Roboterprogrammierung“, in *Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung*, 3. Aufl., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, S. 106–122.
- [6] M. Grunwald, Hrsg., „Anatomy of receptors“, in *Human haptic perception: basics and applications*, Basel: Birkhäuser, 2008, S. 85–92.
- [7] Hatzfeld und Kern, „Motivation and Application of Haptic Systems“, in *Engineering haptic devices*, New York: Springer, 2014, S. 3–28.
- [8] A. M. Okamura, J. T. Dennerlein, und R. D. Howe, „Vibration feedback models for virtual environments“, in *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, Leuven, Belgium, 1998, Bd. 1, S. 674–679.
- [9] A. M. Okamura, M. R. Cutkosky, und J. T. Dennerlein, „Reality-based models for vibration feedback in virtual environments“, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, Bd. 6, Nr. 3, S. 245–252, Sep. 2001.
- [10] M. A. Goodrich und A. C. Schultz, „Human-Robot Interaction: A Survey“, *Found. Trends® Hum.-Comput. Interact.*, Bd. 1, Nr. 3, S. 203–275, 2007.
- [11] J. Tegin und J. Wikander, „Tactile sensing in intelligent robotic manipulation – a review“, *Ind. Robot Int. J.*, Bd. 32, Nr. 1, S. 64–70, Feb. 2005.
- [12] P. Galambos, „Vibrotactile Feedback for Haptics and Telem Manipulation: Survey, Concept and Experiment“, *Acta Polytech. Hung.*, Bd. 9, Nr. 1, S. 25, 2012.
- [13] A. Corradini und H.-M. Gross, „Camera-based gesture recognition for robot control“, in *Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN 2000. Neural Computing: New Challenges and Perspectives for the New Millennium*, Como, Italy, 2000, S. 133–138 Bd.4.
- [14] K. Qian, J. Niu, und H. Yang, „Developing a Gesture Based Remote Human-Robot Interaction System Using Kinect“, *Int. J. Smart Home*, Bd. 7, Nr. 4, S. 6, 2013.
- [15] O. Rogalla, M. Ehrenmann, R. Zollner, R. Becher, und R. Dillmann, „Using gesture and speech control for commanding a robot assistant“, in *Proceedings. 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Berlin, Germany, 2002, S. 454–459.
- [16] M. A. Srinivasan und C. Basdogan, „Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges“, *Comput. Graph.*, Bd. 21, Nr. 4, S. 393–404, Juli 1997.
- [17] J. T. Dennerlein, P. A. Millman, und R. D. Howe, „Vibrotactile Feedback for Industrial Telem Manipulators“, S. 7.
- [18] D. S. Pamungkas und K. Ward, „Tele-operation of a robot arm with electro tactile feedback“, in *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced In-*

telligent Mechatronics, Wollongong, NSW, 2013, S. 704–709.

- [19] A. Ajoudani u. a., „Exploring Teleimpedance and Tactile Feedback for Intuitive Control of the Pisa/IIT SoftHand“, *IEEE Trans. Haptics*, Bd. 7, Nr. 2, S. 203–215, Apr. 2014.
- [20] S. Scheggi, F. Morbidi, und D. Prattichizzo, „Human-Robot Formation Control via Visual and Vibrotactile Haptic Feedback“, *IEEE Trans. Haptics*, Bd. 7, Nr. 4, S. 499–511, Okt. 2014.
- [21] A. E. Sklar und N. B. Sarter, „Good Vibrations: Tactile Feedback in Support of Attention Allocation and Human-Automation Coordination in Event-Driven Domains“, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, Bd. 41, Nr. 4, S. 543–552, Dez. 1999.
- [22] F. Weichert, D. Bachmann, B. Rudak, und D. Fissler, „Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller“, *Sensors*, Bd. 13, Nr. 5, S. 6380–6393, Mai 2013.
- [23] G. Marin, F. Dominio, und P. Zanuttigh, „Hand gesture recognition with leap motion and kinect devices“, in *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Paris, France, 2014, S. 1565–1569.
- [24] D. Bassily, C. Georgoulas, J. Güttler, T. Linner, T. Bock, und T. München, „Intuitive and Adaptive Robotic Arm Manipulation using the Leap Motion Controller“, S. 7, 2014.
- [25] G. A. Borg, „Psychophysical bases of perceived exertion“, *Med. Sci. Sports Exerc.*, Bd. 14, Nr. 5, S. 377–381, 1982.
- [26] J. Guna, G. Jakus, M. Pogačnik, S. Tomažič, und J. Sodnik, „An Analysis of the Precision and Reliability of the Leap Motion Sensor and Its Suitability for Static and Dynamic Tracking“, *Sensors*, Bd. 14, Nr. 2, S. 3702–3720, Feb. 2014.
- [27] H. Jin, Q. Chen, Z. Chen, Y. Hu, und J. Zhang, „Multi-LeapMotion sensor based demonstration for robotic refine tabletop object manipulation task“, *CAAI Trans. Intell. Technol.*, Bd. 1, Nr. 1, S. 104–113, Jan. 2016.
- [28] J. Hol, T. Schon, F. Gustafsson, und P. Slycke, „Sensor Fusion for Augmented Reality“, in *2006 9th International Conference on Information Fusion*, Florence, 2006, S. 1–6.
- [29] A. Martinelli, „Vision and IMU Data Fusion: Closed-Form Solutions for Attitude, Speed, Absolute Scale, and Bias Determination“, *IEEE Trans. Robot.*, Bd. 28, Nr. 1, S. 44–60, Feb. 2012.
- [30] E. Arkenbout, J. de Winter, und P. Breedveld, „Robust Hand Motion Tracking through Data Fusion of 5DT Data Glove and Nimble VR Kinect Camera Measurements“, *Sensors*, Bd. 15, Nr. 12, S. 31644–31671, Dez. 2015.

Vergleich von haptischen Steuerungsvarianten zur manuellen Bedienung von Robotersystemen

Wabnitz, Philipp; Heine, Andreas; Berger, Maik

In: IFToMM D-A-CH Konferenz / Fünfte IFToMM D-A-CH Konferenz 2019

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt.

Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: <https://doi.org/10.17185/duepublico/48198>

URN: <urn:nbn:de:hbz:464-20190222-110045-5>

Link: <https://duepublico.uni-duisburg-essen.de:443/servlets/DocumentServlet?id=48198>

Lizenz:

Sofern nicht im Inhalt ausdrücklich anders gekennzeichnet, liegen alle Nutzungsrechte bei den Urhebern bzw. Herausgebern. Nutzung - ausgenommen anwendbare Schrankenregelungen des Urheberrechts - nur mit deren Genehmigung.