

Konstruktion und Programmierung eines LEGO-Greifarmes mit automatisierter Objektsuche

Lucius Naumann, Elektro- und Informationstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Zusammenfassung—Im Rahmen dieses Papers wird die Konstruktion und Programmierung eines stationären Greifroboters beschrieben, welcher Tracking- und Greifprozesse durchführen kann. Im Folgenden werden Probleme und Lösungen der Bereiche Hardware und Software präsentiert, speziell die Konstruktion und die Bildverarbeitung/ -analyse in MATLAB auf Grundlage des Blob Detection Bildanalysealgorithmus. Die Problematiken der Gewichtsverteilung und des Feintrackings erfordern das experimentelle Austesten des mit Lego Umsetzbaren. Die finale Version führt die Prozesse aufgrund der Kameraposition halbautomatisch aus, d.h. nach jedem Tracking muss die Kamera manuell entfernt werden. Der optimierte Algorithmus arbeitet mit einer Bildauswertung pro Sekunde und erlaubt schnelles und effektives Tracken. Der Greifroboter kann ein rotes Objekt auf einer festen Kreisbahn um den Mittelpunkt des Roboters suchen, anvisieren, greifen und nach einem akustischen Befehl wieder ablegen.

Schlagwörter—Greifarm, Kamera, Lego, MATLAB, Motor, Suchen

I. EINLEITUNG

Das Konzept des entwickelten Roboters ist für den Such- und Greifprozess optimiert. Die Aufgabe des Greifroboters besteht darin, ein rotes Objekt im Raum zu tracken und zu greifen, beziehungsweise nach einem akustischen Befehl das gegriffene Objekt abzulegen. Aufgrund der stationären Position des Greifroboters kann dieser das Zielobjekt greifen, wenn es sich auf einer Kreisbahn um den Mittelpunkt der Montierung befindet. Dabei muss der Radius der Kreisbahn der Länge des Greifarmes entsprechen. Für die Umsetzung dieser Funktionalität ist eine Bewegung des Greifroboters in zwei Freiheitsgraden notwendig. Der erste Freiheitsgrad stellt die Rotation des Greifarmes um eine vertikale Achse durch seinen Mittelpunkt dar. Die Bewegung im zweiten Freiheitsgrad ermöglicht das Heben und Senken des Armes. Neben den Motoren müssen eine externe RGB-Kamera für das Tracking, ein Farblichtsensor für die Lichtanzeige und ein Ultraschallsensor für akustische Befehle in die Konstruktion eingebunden werden. Die Trackingfunktion erfordert einen schnell arbeitenden Bildanalysealgorithmus, mit dem die zuverlässige Identifizierung einer roten Fläche im Bild möglich ist. Anschließend können aus der identifizierten Fläche Informationen über die Lage des Flächenmittelpunktes, d.h. des Objektmittelpunktes abgeleitet werden. Anhand dieses Informationsflusses sind eine schrittweise Motoransteuerung und Annäherung an das zu greifende Objekt möglich. Der anschließende Greifprozess beinhaltet das Ansteuern von zwei



Abbildung 1. Verwendung des Canadarm2 als Stützvorrichtung für den Astronauten Stephen K. Robinson während eines Reparationseinsatzes, 2005. (Quelle: NASA, 2005 August. Web. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_Servicing_System#/media/File:STS-114_Steve_Robinson_on_Canadarm2.jpg, 19.03.2021)

Motoren, wobei die jeweiligen Winkel- und Leistungswerte von der finalen Konstruktion und dem Gewicht des Zielobjektes abhängig sind. Diese Werte müssen experimentell bestimmt werden.

II. VORBETRACHTUNG

Als Vorlage für den Greifroboter dient das Space Station Remote Manipulator System, kurz Canadarm2, ein Multifunktionsroboterarm an Bord der Internationalen Raumstation (ISS). Der für den Einsatz im Weltall optimierte Greifarm deckt ein vielfältiges Aufgabenspektrum von Reparationen bis zum Greifen andockender Raumkapseln ab. Der Greifarm arbeitet unter den Bedingungen des Alls hochpräzise und bewerkstelligt auch das Greifen bemannter Raumkapseln, beispielsweise der Dragon Raumkapsel des U.S. Unternehmens SpaceX. In Abbildung 1 ist der Greifarm in Aktion dargestellt.

A. Design

Der Canadarm2 Greifarm besitzt eine Länge von 17 m und kann bei einer Eigenmasse von 1,497 t maximal 116 t in der Schwerelosigkeit bewegen. Die Verwendung von Kohlefaser-Thermoplasten garantiert eine hohe Stabilität des Greifarms bei geringer Eigenmasse. Mit sieben Freiheitsgraden ähnelt der Aufbau dem eines menschlichen Armes, wobei jedes Gelenk durch eine zusätzliche Rotationsfreiheit von 540° optimiert ist (Canadian Space Agency., 2019/ Wikimedia Foundation, Inc.,

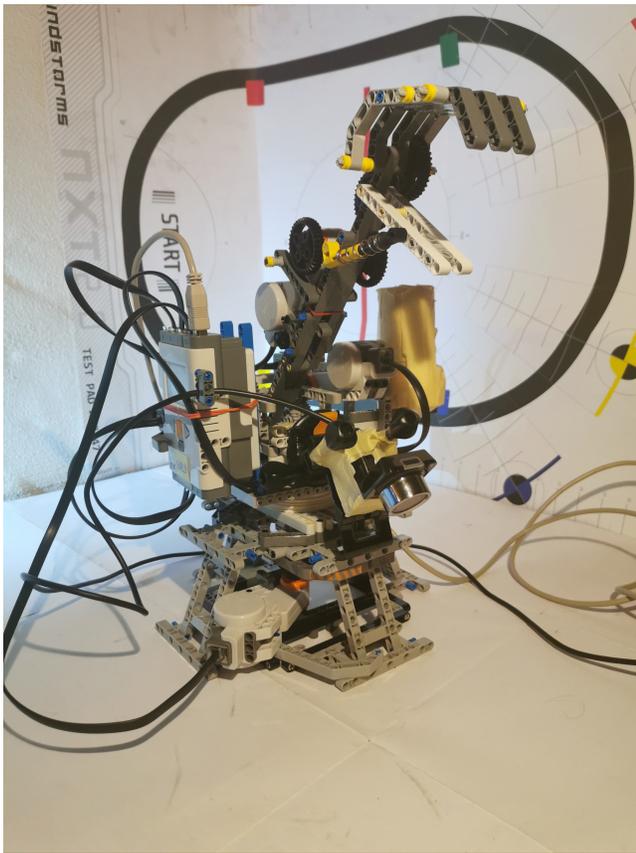


Abbildung 2. Die finale Version des Greifroboters.

2021, Februar 11). Aufgrund des Bauteillimits von 3 Motoren können am Legoroboter maximal 2 Freiheitsgrade abgedeckt werden; der dritte Motor wird für eine motorisierte Greifschaukel eingesetzt. Mit der Bewegung in 2 Freiheitsgraden ist eine Rotationsbewegung um die Basis und das Heben und Senken des Greifarmes realisierbar.

B. Kamera und Navigation

Insgesamt sind an dem Canadarm2 Greifarm 4 Farbkameras in unterschiedlichen Perspektiven verbaut, welche die Generierung von Tiefenrauminformationen ermöglichen. Basierend auf diesen Daten kann der Greifarm im Raum manuell navigiert werden. Die sich im Bau befindende Nachfolgerversion Canadarm3 soll basierend auf einer KI selbstständig navigieren und agieren können. Zusätzlich verfügt der Canadarm2 über Trägheitsmoment Sensoren an den Greifspitzen, um einen Tastsinn zu simulieren (CS, 2019). Aufgrund des Vorhandenseins von nur einer Kamera, stehen dem Legoroboter keine Tiefenrauminformationen zur Verfügung. Allerdings kann mit einer Kamera ein Objekt auf einer vorgegebenen Kreisbahn um den Roboter getrackt werden. Die Kreisbahn wird schrittweise abgefahren und Einzelframes analysiert, bis das gesuchte Objekt getrackt ist.

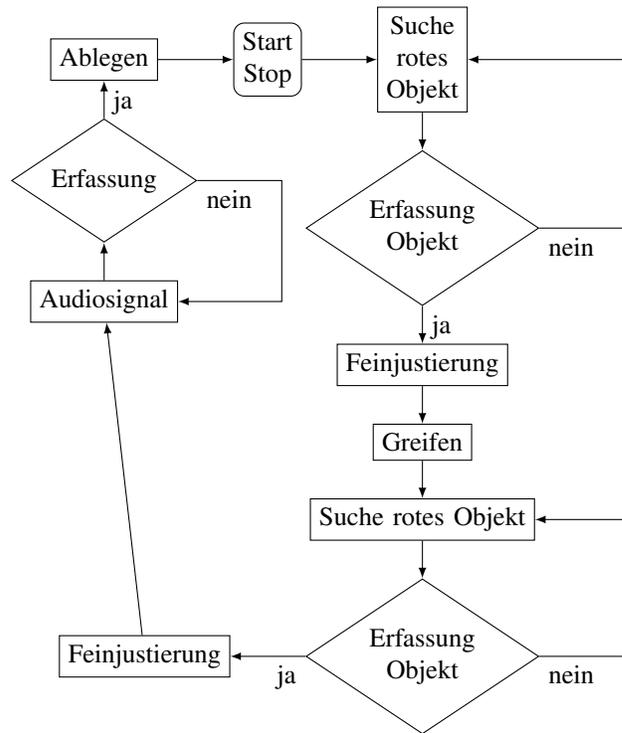


Abbildung 3. Zyklische Darstellung des Track-/ Greifprozesses in einem Programmablaufplan.

III. HARDWARE- UND SOFTWARELÖSUNGEN

A. Konstruktion

Der Greifroboter ist aus drei Segmenten aufgebaut: der Basis, dem Greifarm und dem Greifer. Die einfach motorisierte Basis ermöglicht die stabile Montierung des Greifarmes sowie die Rotation um die z-Achse. Aufgrund der Ungenauigkeit des Motors muss eine Zahnradübersetzung (beispielsweise 1:3) verbaut werden, damit für möglichst genaues Tracking auch kleine Winkelzahlen angesteuert werden können. Der Greifarm ist einfach motorisiert auf der Basis gelagert, wobei eine unsymmetrische Gewichtsverteilung durch Gegengewichte stabilisiert wird. Ein ebenfalls mit einer Zahnradübersetzung verbundener Motor ermöglicht das Heben und Senken des Greifarmes. Auf dem Greifarm sitzt der einfach motorisierte Greifer auf. Um die Gewichtsverteilung zu optimieren und den auf den Greifarm wirkenden Drehmoment zu minimieren, muss der Greifmotor nah an der Aufhängung gelagert werden. Die Distanz zum Greifer kann mit Zahnradern der Übersetzung 1:1 überbrückt werden. Die Verwendung von Zahnradern hat den Vorteil, dass sie sich bei ungewollter Bewegung verkeilen und diese blockieren. Diese bauliche Eigenschaft ermöglicht das Anheben eines Objektes, ohne den Motor dauerhaft unter Spannung zu setzen. Die Endversion des stationären Greifroboters ist in Abbildung 2 abgebildet.

B. Programmablauf und Sensoransteuerung in MATLAB

Die Softwareschnittstelle zwischen MATLAB und dem NXT Commando Baustein ist eine Bibliothek der RWTH Aachen. Über diese Bibliothek können die drei verbauten Motoren, der Farbsensor (Funktion: Farblichtlampe) und der Schallsensor

(Funktion: Akustischer Befehl für das Ablegen) in MATLAB angesteuert werden. Die Abfolge der Ansteuerungen der einzelnen Sensoren wird in dem Programmablaufplan in Abbildung 3 skizziert. Signifikant ist der zyklische Aufbau des Track-/ Greifprozesses, welcher in Kombination mit der entsprechenden Hardware mehrfach und vollautomatisch ausgeführt werden kann.

C. Bildverarbeitung in MATLAB

Den ersten Abschnitt des Greifprozesses stellt die Suchfunktion eines roten Objektes dar. Dafür rotiert der Greifarm um die z-Achse und sucht auf einer vorgegebenen Kreisbahn nach dem Zielobjekt. Der Radius der Kreisbahn entspricht der Reichweite des Greifarmes. Die Unterteilung der Suchfunktion erfolgt in drei Teilbereiche: Bildgenerierung, Bildauswertung und Tracking. Die Bildgenerierung beschreibt den Prozess der Erstellung eines Einzelframes mit einer externen Kamera. Über die Software Schnittstelle Image Acquisition Toolbox (IATB) kann das Einzelframe in MATLAB genutzt werden (The MathWorks, Inc., Image Acquisition Toolbox.). Anschließend werden in der Bildauswertung aus dem Einzelframe nutzbare Informationen gewonnen. Der verwendete Algorithmus orientiert sich an dem Bildanalysealgorithmus Blob Detection. Hierbei werden gesuchte Regionen innerhalb eines Frames aufgrund spezifischer Eigenschaften identifiziert (Wikimedia Foundation, Inc., 2021, Februar 22.). Das signifikante Alleinstellungsmerkmal des zu greifenden Objektes ist die rote Farbe, über welche das Objekt von anderen Frameregionen abgegrenzt wird. Praktisch wird das RGB-Frame in ein Mono-Frame konvertiert und der R-Kanal extrahiert. Die Verwendung der Computer Vision Toolbox in MATLAB minimiert durch vorgefertigte Analysemethoden den Programmieraufwand (The MathWorks, Inc., Computer Vision Toolbox.). Darauf folgend wird der Objektmittelpunkt errechnet und als Zahlenwertpaar bestehend aus Höhe und Breite in Pixeln in MATLAB nutzbar gemacht. Das Zahlenwertpaar repräsentiert die genaue Position des roten Objektes im Frame.

D. Tracking

Im Prozess des Trackings wird der Greifarm durch Motoransteuerungen des z-Achsen Motors auf das Objekt ausgerichtet. Dafür wird die Differenz zwischen der x-Koordinate des Objektmittelpunktes und der x-Koordinate des Framemittelpunktes berechnet. Nimmt diese Differenz den Wert 0 an, sind beide Mittelpunkte aufeinander ausgerichtet. Aufgrund der parallelen Montierung der Kamera auf der Greifachse, wird somit auch der Greifarm auf das Objekt ausgerichtet. Das Objekttracking ist in zwei aufeinanderfolgende Prozesse unterteilt. Im ersten Prozess wird das Objekt grob getrackt, d.h. der Roboterarm rotiert mit einer Winkelzahl von 20° ohne Feinabstufungen solange, bis das Zielobjekt am Framerrand erscheint. Anschließend wird das Objekt im zweiten Prozess fein getrackt, d.h. es findet mit einer feinen Abstufung an Winkelzahlen zwischen 10° und 2° eine Justierung mit einer Genauigkeit von bis zu 50 px statt. Die Genauigkeit beschreibt die tatsächliche Distanz zwischen Objektmittelpunkt und Framemittelpunkt.

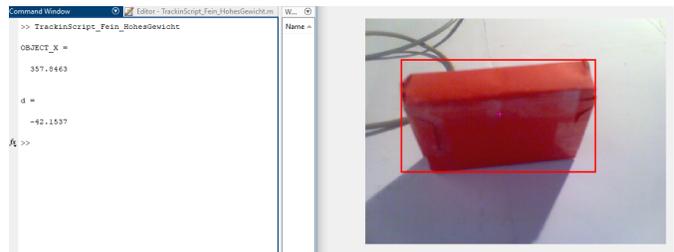


Abbildung 4. Trackinggenauigkeit von 0,1 px bei leichtem Aufbau (Kamera auf Rotationsachse, Aufbau Masse ca. 0,2 kg).

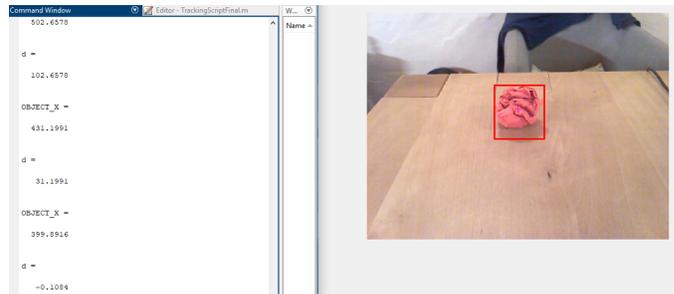


Abbildung 5. Trackinggenauigkeit von durchschnittlich 50 px bei schwerem Aufbau (Greifarm und Kamera auf Rotationsachse, Aufbau Masse ca. 1,5 kg).

Über die Differenzierung zwischen positiver und negativer x-Koordinaten Differenz kann Überdrehung korrigiert werden. Praktisch ist eine Analysegeschwindigkeit von ca. einem Algorithmusdurchlauf pro Sekunde möglich.

E. Optimierung der Trackinggenauigkeit

Die Trackinggenauigkeit ist von der Qualität der Einzelframes und Hardwarefaktoren abhängig. Probleme entstehen typischerweise beim Tracking in den Abendstunden. Aufgrund des Rotstiches trackt der Greifarm auch ungewollte orangene und braune Objekte. Mit Hilfe einer in die IATB integrierten Preview App kann der Rotstich manuell entfernt werden. Kritisch ist ebenfalls die sich bei der Rotation aufbauende Torsion in der Verbindungsachse zwischen z-Achsen Motor und Aufbau. Diese materielle Eigenschaft der Legoachse setzt der Trackinggenauigkeit ein Limit, da Winkelzahlen kleiner als 2° nicht übersetzt werden können. Die Trackinggenauigkeit ist somit abhängig von dem auf der z-Achse lagernden Gewicht und muss experimentell bestimmt werden. Eine Gewichtsoptimierung des Aufbaus erhöht die Trackinggenauigkeit. Die Dimension dieses Problems wird in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt.

IV. ERGEBNISDISKUSSION

Die finale Version des Greifroboters kann ein rotes Objekt auf einer festen, von der Länge des Greifarmes abhängigen Kreisbahn tracken und begleitet von Lichtsignalen greifen, beziehungsweise nach einem akustischen Befehl ablegen. Somit besitzt der Roboter alle Grundfunktionen, um den Such-/ Greifprozess halbautomatisch umzusetzen. Ein relevantes Hardwareproblem ist die ungleiche und unsymmetrische Gewichtsverteilung des Greifarms auf der Basis. Die Lösung beinhaltet das

experimentelle Ausbalancieren mit Gegengewichten in Form von Metallkugeln und Steinen. Ein weiterer Lösungsansatz ist die Verwendung von Gummizügen, welche allerdings bei zu hohem Gewicht leicht reißen. Des Weiteren ist es schwierig, die ideale Zugstärke mit alltäglichen Gummibändern zu erreichen. Für einen ausbalancierten Roboter kann eine zuverlässige Software entwickelt werden. Der finale Trackingalgorithmus basierend auf dem Bildanalysealgorithmus Blob Detection arbeitet zuverlässig und sehr effektiv. Anfängliche Probleme mit suboptimalen Lichtverhältnissen können durch gezielte Optimierungen behoben werden. Insgesamt weist die finale Version kein ungelöstes Problem auf und bietet viele Erweiterungsmöglichkeiten.

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die Konstruktion und Programmierung eines stationären Greifroboters mit automatisiertem Objekttracking erfordert eine aufeinander abgestimmte Planung der Hardware und Software. Der Greifroboter ist aus einer Basis, einem Greifarm und dem Greifer aufgebaut, wobei jedes Segment einfach motorisiert ist. Zwecks einer feineren Ansteuerung und größerer Stabilität sind alle Motoren mit einer Zahnradübersetzung zwischen 1:1 und 1:3 gelagert. Aufgrund einer unsymmetrischen und ungleichen Gewichtsverteilung ist ein ausgeklügeltes System aus Gegengewichten notwendig, um den Greifarm auszubalancieren. Ein schneller und effektiver Bildanalysealgorithmus ermöglicht das Grob- und Feintracking des roten Zielobjektes über eine externe Kamera. Eine erhöhte Trackinggenauigkeit kann durch die manuelle Behebung von ungünstigen Lichtverhältnissen erzielt werden. Allerdings wird der Trackinggenauigkeit aufgrund der Verformbarkeit der Legoverbindungsachse zwischen Basis und Greifarm eine Grenze von ca. 50 px, d.h. 2° Motoransteuerung bei schwerem Aufbau gesetzt. Die finale Version des Greifroboters kann den Prozess nicht vollautomatisch durchführen, da die Kamera im Trackingprozess unter dem Greifarm sitzt und vor dem Greifprozess manuell entfernt werden muss. In einem weiteren Optimierungsschritt kann die Kamera extern, d.h. abseits des gesamten Roboters gelagert werden. In Kombination mit einer zweiten Kamera in einer anderen Perspektive können somit Tiefenrauminformationen gewonnen werden, welche für eine umfangreichere Navigation des Greifarmes verwendet werden können. Ebenfalls kann ein weiteres motorisiertes Gelenk an dem Greifarm eingebaut werden. Dies vergrößert den Bewegungsapparat und ermöglicht komplexere Aufgaben. Für diese Anordnung muss eine neue Steuersoftware entwickelt werden, welche mehrere Motoren gegeneinander ansteuern kann. Weiterführende Probleme und Lösungen dieser optimierten Variante fallen in den Fachbereich der inversen Kinematik.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] The MathWorks, Inc. (o.J.). *Image Acquisition Toolbox*. Abgerufen 04.03.2021, von <https://de.mathworks.com/products/image-acquisition.html>
- [2] The MathWorks, Inc. (o.J.). *Computer Vision Toolbox*. Abgerufen 04.03.2021, von <https://de.mathworks.com/products/computer-vision.html>
- [3] Wikimedia Foundation, Inc. (2021, Februar 22). *Blob detection*. Abgerufen 04.03.2021, von https://en.wikipedia.org/wiki/Blob_detection
- [4] Wikimedia Foundation, Inc. (2021, Februar 11). *Canadarm2*. Abgerufen 04.03.2021, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Canadarm2>
- [5] Canadian Space Agency. (2019, Mai 20). *Canadarm, Canadarm2, and Canadarm3 – A comparative table*. Abgerufen 04.03.2021, von <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/canadarm2/canadarm-canadarm2-canadarm3-comparative-table.asp>