



博士学位論文

ロボットアーム付き電動車いすを対象とした
操作インターフェースに関する研究

Operating Interfaces of
Electric Wheelchair Mounted Robotic Arm

三重大学大学院工学研究科システム工学専攻

氏 名 楊 来 郡

主 査 矢 野 賢 一 教 授

副 査 池 浦 良 淳 教 授

副 査 小 竹 茂 夫 教 授

副 査 加 藤 典 彦 准教授

2023年7月

ロボットアーム付き電動車いすを対象とした 操作インターフェースに関する研究

楊 来郡

三重大学大学院システム工学専攻

要旨

現在日本では、事故や疾病などにより身体機能の一部に不自由があり、日常生活に制約がある身体障害者が数多くいる。肢体不自由者の疾患例として、脊髄損傷、脳性血管障害、脳性麻痺、筋ジストロフィー、ALSなどが挙げられる。特に、疾患例の中で脊髄損傷は、現在日本に10万人以上の患者があり、さらに毎年約5千人が新たに増加すると推定されている。脊髄損傷は、主として脊柱に強い外力が加えられることにより脊椎を損傷し、脊髄に損傷を受ける病態である。受傷原因は交通事故、高所からの転落、転倒と言った順に症例が多く、損傷レベルC5付近の患者が多い。C5患者の主な動作筋は三角筋と上腕二頭筋で、運動機能として肩関節屈曲・外転・伸展、肘関節屈曲、前腕回外が可能である。しかし、胸から下のほぼ全体に麻痺が生じるため、移動の際は電動車椅子やハンドリムを工夫した車椅子を用いる。こういった機能障害のために日常生活の多くの場面で介助を必要とする。このような、重度機能障害を持った頸髄損傷者の生活の質を向上させることは重要となる。

頸髄損傷者の生活支援として、ロボットアーム付き電動車いすが注目されている。このようなロボットは、移動手段である電動車いすにロボットアームを取り付けられ、C5レベル頸髄損傷者の腕の代わりに用いられる。ロボットアームを使うことで幅広い動作支援ができるため、障害者自身が介助者なしにできることが増え、生活の質の向上につながる。このロボットを操作するためには、様々なインターフェースが用いられる。例えば、一般的にジョイスティックやスクリーン上の仮想ジョイスティックなどが挙げられる。しかしながら、これらのインターフェースは対象者の指拘縮などの症状により使用できない場面も存在する。

この問題を解決するために、近年、障害者の症状により様々な電動車いすとロボットアームの操作インターフェースが提案されました。電動車いすの操作インターフェースについて、主に自動走行の手法を用いて操作者の負担を軽減する。例えば、GPS信号により電動車いす自動走行システムが開発された。このインターフェースは操作者の操作負担を大幅に軽減することができたが、GPS信号の精度により、室内環境での使用は困難となった。また、2D/3D LiDARにより空間マッピングを作成し、自動走行する手法もある。このような手法は、事前に空間マッピングを生成する場合で利用が限定的になった。また、リアルタイムの空間マッピングを生成する場合で通信遅延などの問題が避けられない。ロボットアームの操作インターフェースに関して、近年に障害者を対象とした自動や半自動操作インターフェースに関する研究が進んでいる。例え

ば、ロボットアームに深度センサや複数台のカメラを搭載し、画像処理による目標物を認識し、操作者のコマンドで目標物を自動把持するインターフェースがある。しかしながら、複数台のカメラを使用するため、操作方式により使用できる場面も限定的になる。また、音声やジェスチャーにより、ロボットアームを操作するインターフェースも提案されました。しかしながら、このようなインターフェースは事前にコマンドを登録する必要があるため、利用可能な場面が限定的になってしまう。

これらの問題に対して、本研究では、頸髄損傷者が自立することを目指し、電動車いす及びロボットアーム操作インターフェースを提案した。提案手法では、電動車いすの操作について、先ず、本研究では頸髄損傷者の症状に対応するスクリーン上の仮想ジョイスティック操作インターフェースを提案した。提案手法で操作者の手ぶれによって生じる蛇行走行を防ぐために入力補正システムを導入した。また、操作者の負担を軽減するために、本研究で電動車いすに搭載された1台のカメラにより目標物に貼り付けたAR マーカーを認識し自動走行を行う操作インターフェースも提案した。また、自動走行中に生じる走行誤差の問題に対して、回帰分析の手法を用いて電動車いすのリアルタイムの位置情報から走行誤差を予測するモデルを構築し、予測した誤差に基づいて、電動車いすへの指令値の補正係数を計算できる入力補正システムを開発した。

ロボットアームの操作について、本研究でタッチパネル上での仮想ジョイスティック、手の3次元動作によるロボットアームの操作システムおよび床上物体把持のための視覚情報に基づく電動車いす搭載型ロボットアーム用操作インターフェースを提案した。提案された仮想ジョイスティックはC5レベル頸髄損傷者の腕の残存機能を用いて、スマホやタブレットから簡単にロボットアームに接続し、操作することが可能となる。また、タッチパネルでの誤操作を避けるために、誤操作防止フィルタの開発も行った。提案した手の3次元動作による操作インターフェースは、操作者の手の動きを読み取ることで、3次元的なアームの操作が可能となり、操作回数、つまり動作が切り替わる回数を減らすことができる。それ以外に、床上に落ちた物体を拾う場合に対して、視覚情報に基づくロボットアーム用操作インターフェースを提案した。具体的には、ロボットアームの手先に1台カメラを搭載し、操作者が視覚情報に基づいて指示することで、床上物体の探索および把持を可能とする。

提案手法の有効性を検証するために、C5レベルの頸髄損傷者の方を対象に、日常生活環境を再現した操作実験を行った。電動車いす走行実験で、提案したスクリーン上の手動インタフェースは操作完了時間の面から操作性の向上が確認した。また、電動車いす自動走行システムにおいて、走行軌道と電圧指令値の比較により、提案した走行誤差補正システムの有効性を示した。ロボットアーム操作の実験で、タスク完了まで手先の移動軌道の比較により、提案したスクリーン上の手動インタフェースと誤操作防止システムの有効性を示した。また、提案した手の3次元動作による操作インターフェースでは、従来のジョイスティックと比較実験を行い、操作時間および操作回数の比較により操作性の向上を確認した。最後に、視覚に基づくロボットアーム操作インタフェースにおいて、従来手法との比較で操作完了時間と操作回数の減少により、操

作負担を軽減することを確認した．また，アンケート評価においても高い結果を得られ，提案手法により簡易に床上物体を把持することが可能であると示した．したがって，開発したインタフェースを使用することで，頸髄損傷患者のような体幹機能障害のある患者が自立支援動作が可能となり，日常生活における QOL や ADL の向上が期待される．

Operating Interfaces of Electric Wheelchair Mounted Robotic Arm

Laijun Yang

The Division of Systems Engineering, Graduate School of Engineering, Mie University

ABSTRACT

There are currently many people with physical disabilities in Japan who face limitations in their daily lives. Spinal cord injuries, cerebrovascular disease, cerebral palsy, muscular dystrophy, and ALS are some of the diseases that cause physical disabilities. Particularly, there are currently over 100,000 patients in Japan, with an estimated increase of 5,000 patients (40 per 1 million people) each year. The spinal cord is injured primarily when a strong external force is applied to the spinal column. The majority of such injuries are caused by traffic accidents and falls from great heights. Meanwhile, the majority of patients were injured at the C5 level.

The deltoid and biceps brachii muscles are the primary motion muscles of C5 patients. These muscles are capable of shoulder joint flexion, abduction and extension, elbow joint flexion, and forearm supination as motor functions. However, because paralysis affects almost the entire body from the chest down, individuals need assistance with many aspects of daily life. Mobility, for example, is provided by a motorized wheelchair or a wheelchair with a hand-rim device. Because of trunk dysfunction, individuals have difficulty sitting and require assistance grasping objects in front of them. Particularly, the assistance of picking up objects from the floor is necessary. They also have difficulty in such activities like opening and closing their hands, grasping, drinking, and opening doors due to motor dysfunction in the upper limbs. The difficulty of these activities not only reduces the individual's quality of life, but also places a significant burden on caregivers. For these reasons, it is critical to improve the quality of life of these severely functionally impaired cervical cord injury patients.

Recently, Electric wheelchairs with robotic arms have gained popularity as a life support system for people with cervical spinal cord injuries. A robot like this is attached to an electric wheelchair and used in place of the arm of patients with C5-level cervical spinal cord injury. It is possible to support a wide range of motions with a robot arm, increasing the number of things that people with disabilities can do without assistance, resulting in an improvement in their quality of life. This robot is controlled by a variety of interfaces. Common joysticks and virtual joysticks on screen are two examples. However, in some cases, these interfaces cannot be used due to symptoms such as the subject's finger contracture.

To address this issue, various electric wheelchairs and robot arm operation interfaces have been proposed in recent years based on the symptoms of disabled people. In terms of the electric wheelchair operation interface, we primarily use the automatic driving method to reduce the operator's burden. GPS signals, for example, have been used to develop an automatic driving system for electric wheelchairs. Although this interface significantly reduced the operator's operational burden, it was difficult to use in an indoor environment due to the accuracy of the GPS signal. There is also a method for automatically creating a spatial map using 2D/3D LiDAR and driving. When spatial mapping is generated in advance, such methods are limited in their application. Furthermore, issues such as communication delays cannot be avoided when producing real-time spatial mapping. Research on automatic and semi-automatic operation interfaces for handicapped people has advanced in recent years. For example, there is an interface that loads a depth sensor and multiple cameras onto a robot arm, recognizes the target through image processing, and automatically grasps the target in response to an operator command. However, due to the use of multiple cameras, the situations in which it can be used are limited depending on the operation method. A voice and gesture interface for manipulating the robot arm was also proposed. However, because such an interface necessitates the registration of commands in advance, the situations in which it can be used are limited.

In this study, we proposed the electric wheelchair and a robot arm operation interfaces to solve these problems, with the goal of making the cervical spinal cord injured person independent. for the wheelchair operation, we first proposed a virtual joystick operation interface on a screen that corresponds to the symptoms of people with cervical spinal cord injury in the proposed method. An input correction system is introduced in the proposed method to prevent the meandering motion caused by the operator's shake. On the other hand, in order to reduce the operator's burden, we also proposed in this study an operation interface that recognizes the AR marker attached to the target by one camera mounted on the electric wheelchair and runs automatically. Furthermore, to address the issue of running errors that occur during autonomous driving, we used regression analysis to create a model that predicts running errors based on real-time positional data from electric wheelchairs. Following that, we introduced an input correction system that can calculate the command value's correction coefficient based on the predicted error.

For the robotic arm operation, in this study, we proposed a virtual joystick on a touch panel, a robot arm operation system based on 3D hand movements, and a visual information-based operation interface for a robot arm equipped with an electric wheelchair. The proposed virtual joystick can be easily connected to the robot arm from a smartphone or tablet and operated using C5 level cervical spinal cord injury

patients' residual arm function. We also introduced an erroneous operation prevention filter to prevent erroneous touch panel operations. The proposed 3D hand motion operation interface enables 3D arm operation by reading the operator's hand motion and can reduce the number of operations, which reduces the operation completion time. In addition, we proposed a visual-based operation interface for the robot arm to pick up an object that had fallen on the floor. One camera is mounted on the hand of the robot arm, and the operator can search for and grasp objects on the floor by giving visual instructions.

To verify the efficacy of the proposed method, we carried out an operation experiment that mimicked the daily living environment of C5 level cervical spinal cord injury patients. It was confirmed in an electric wheelchair running experiment that the proposed on-screen manual interface improved operability in terms of operation completion time. In addition, the effectiveness of the proposed running error correction system in the electric wheelchair automatic driving system was demonstrated by comparing the running track and the voltage command value. For the robotic arm operation experiment, the effectiveness of the proposed on-screen manual interface and erroneous operation prevention system was demonstrated in an experiment of operating a robot arm by comparing the movement trajectory of the hand until task completion. Furthermore, we performed a comparison experiment with a conventional joystick and confirmed the improvement in operability by comparing operation time and number of operations with the proposed 3D hand motion interface. Finally, it was demonstrated that the vision-based robot arm operation interface reduces operation burden by reducing operation completion time and the number of operations when compared to the conventional method. Furthermore, high results were obtained in the questionnaire evaluation, demonstrating that the proposed method can easily grasp objects on the floor.

目次

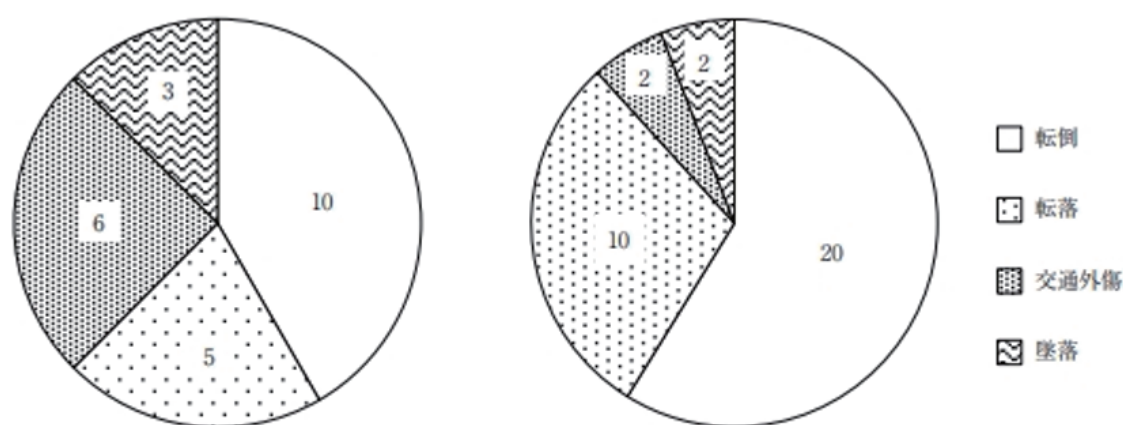
第1章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.2	車いす利用者の生活支援	4
1.3	既存のインターフェース	7
1.4	電動車いすインターフェースに関する従来研究	8
1.5	ロボットアームインターフェースに関する従来研究	9
1.6	研究目的	10
1.7	論文構成	11
第2章	電動車いす操作システムの開発	13
2.1	本研究で使用する装置	13
2.1.1	電動車いす	13
2.1.2	システムの構成	14
2.2	電動車いす手動インタフェース	17
2.2.1	作成したインタフェース	17
2.2.2	入力値補正	18
2.2.3	実機実験	19
2.2.4	実験結果と考察	21
2.3	電動車いす自動走行システムの開発	23
2.3.1	AR マーカーを用いた位置の取得	23
2.3.2	電動車いすの停止条件	24
2.3.3	操作インターフェース	28
2.3.4	予備実験と考察	29
2.3.5	誤差の予測	32
2.3.6	モデルの精度	33
2.3.7	速度指令電圧補正	34
2.3.8	提案手法	35
2.3.9	実機実験	37
2.3.10	実験の結果と考察	39
2.4	まとめ	43
第3章	ロボットアーム手動操作インターフェース	45
3.1	本研究で使用するロボットアーム	45

3.1.1	基本構造	45
3.1.2	システムの構成	46
3.2	Udero の運動学	47
3.2.1	Udero の順運動学	47
3.2.2	Udero の逆運動学	50
3.2.3	指定座標は動作範囲を超える場合	52
3.2.4	実装と改善	53
3.3	予備実験	57
3.4	タッチパネル上仮想ジョイスティックインターフェース	59
3.4.1	操作システムの構成	59
3.4.2	操作手法	62
3.4.3	制御系設計	62
3.4.4	動作確認	65
3.4.5	誤操作防止フィルタの導入	66
3.4.6	実機実験	67
3.4.7	実験の結果と考察	68
3.5	赤外線カメラを用いた手の 3 次元動作によるロボットアームの操作	71
3.5.1	操作手法	71
3.5.2	実機実験	72
3.5.3	実験の結果と考察	74
3.6	まとめ	76
第 4 章	ロボットアームの自動操作インターフェースの開発	77
4.1	本研究で使用するロボットアーム	77
4.2	視覚情報に基づくインターフェース	78
4.3	操作手法	78
4.4	スクリーン座標から目標座標の計算	82
4.5	実機実験	86
4.5.1	実験概要	86
4.5.2	実験の結果と考察	93
4.6	まとめ	95
第 5 章	結言	97
5.1	まとめ	97
5.2	今後の展望	99
図 目 次		112
表 目 次		116

第1章 緒言

1.1 研究背景

現在，日本では事故や疾病などにより身体機能の一部に不自由があり，日常生活に制約がある身体障害者が数多くいる．厚生労働省の調査では，平成 30 年における身体障害者は 436 万人であると推計されている^[1]．これは平成 25 年の 366 万 3 千人と比較すると，5 年間で約 19 % 増加している^[2]．その身体障害者の約 44 % に相当する 193 万人は肢体不自由者であるとされている．一方，中国における肢体不自由者はおよそ 1812 万人いるとされており，障害者の 29 % の割合を占めている^[3]．肢体不自由者の内訳は，下肢 49 %，上肢 37 %，体幹 10 %，脳原生運動機能障害 4 % となっている．肢体不自由者の疾患例として，脊髄損傷，脳血管障害，脳性麻痺，筋ジストロフィー，ALS などが挙げられる．疾患例の中で脊髄損傷は，現在日本に 10 万人以上の患者がおり，さらに毎年約 5 千人（人口百万人あたり年間 40 人）が新たに生まれると推定されている^[4]．脊髄損傷は，主として脊柱に強い外力が加えられることにより脊椎を損傷し，脊髄に損傷を受ける病態である．受傷原因は，Fig. 1.1 で示すように，交通事故，高所からの転落，転倒といった順に症例数が多く，日常生活を送っている中で誰しもが起こりうる可能性があるといえる^[5]．



“当院救急外来におけるSCIWORETの検討”により引用

Fig. 1.1 Proportion by cause of spinal cord injury

Fig. 1.2 に示すように，脊髄の損傷高位は頸髄が最も多く，全体の 8 割程度の症例数を占めており，次いで胸腰椎移行部，胸髄，腰仙髄の順となっている^[5]．頸髄損傷とは，脊髄の中で脳から一番近い首の部分の頸髄と呼ばれる神経を損傷した患者のこと

である．

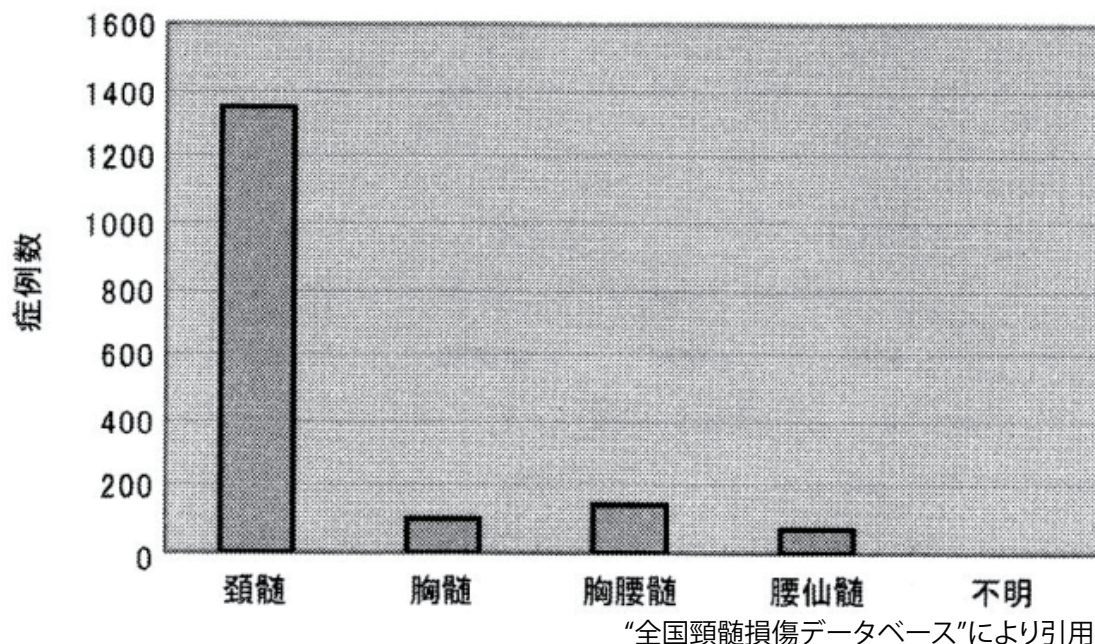


Fig. 1.2 Percentage incidence of spinal cord injury by case

脊髄を損傷すると、脳と体の間の情報が伝達されなくなり、運動機能や知覚、自律神経による機能など、様々な麻痺が生じる。麻痺は損傷部位から下側に生じ、頸髄損傷の場合、胸から下に麻痺が生じるが、頸髄の損傷部位により、肩・腕（指）には麻痺の有無が生じる。Fig. 1.3 に示すように、頸髄は8対の脊髄神経からなり、もっとも頭側のものを第1頸髄神経（1st cervical nerve）と称し、C1と略称される。頸髄では順にC2、C3からC8まで、8対の脊髄神経を出している。

頸髄損傷はその神経の損傷部分や損傷の程度によって症状が異なる^[6]。損傷の程度により個人差はあるが、頸髄の損傷部分ごとに運動機能の麻痺をFig. 1.4にまとめる。基本的に手先の運動機能には麻痺が生じ、損傷部分が脳に近いほど上肢機能が麻痺するため、多くの動作に制限がかかることが分かる。

Fig. 1.5は1997年4月から2000年3月までに全国の労災病院等に入院した初発脊髄損傷患者で労災病院脊髄損傷統計センター（RSCISC）に登録された421名（男性356名、女性65名、平均年齢 47.8 ± 17.3 歳）を対象に行った損傷レベルの集計結果である。また、患者を60歳以下の若年者群304名と61歳以上の高齢者群117名の2群に分け比較している^[7]。Fig. 1.5より頸髄損傷者の中では損傷レベルC5付近の患者が多いといえる。したがって、本研究では損傷レベルC5の頸髄損傷者を対象とする。C5患者の主な動作筋は三角筋と上腕二頭筋で、運動機能として肩関節屈曲・外転・伸展、肘関節屈曲、前腕回外が可能である。しかし、胸から下のほぼ全体に麻痺が生じる。そのため、移動の際は電動車椅子やハンドリムを工夫した車椅子を用いる。こういった機能障害のために日常生活の多くの場面で介助を必要とする。例えば、体幹機能障害のた

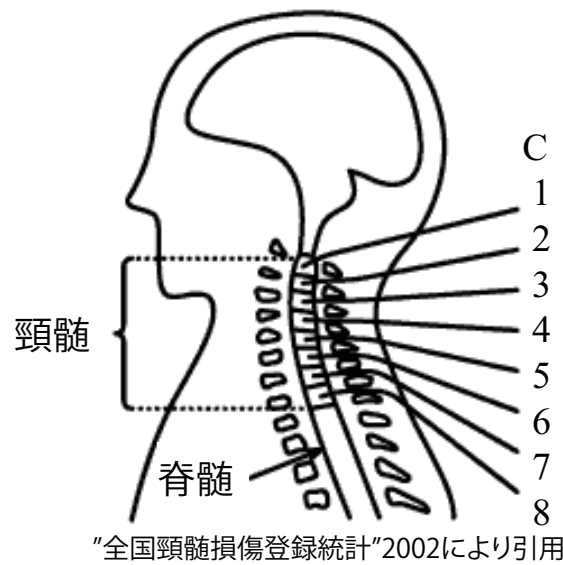


Fig. 1.3 Cervical spinal cord

×：麻痺あり／△：不定（損傷の程度による）／○：麻痺なし

運動機能	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
肩をすくめる	×	△	△	△	○	○	○	○
横隔膜呼吸	×	×	△	△	△	○	○	○
腕を上げる	×	×	×	×	△	△	○	○
肘をまげる	×	×	×	×	△	△	○	○
手首を動かす	×	×	×	×	×	△	△	△
指をのばす	×	×	×	×	×	×	△	△
肘をのばす	×	×	×	×	×	×	△	△
指をまげる	×	×	×	×	×	×	△	△

Fig. 1.4 Having paralysis or not of the exercise function

めに座位を保つことが難しく、前方にある物体の把持や落ちたものを拾うといった動作ができない。その他にも、上肢の運動機能障害のために手の開閉ができず、把持動作や飲み物を飲むといった動作や、扉を開ける動作が困難であることなどが挙げられる。このように自立動作の多くが困難であるということは、介助者の負担が大きいだけでなく、介助される側の QOL の低下にもつながる。本研究では、このような重度機能障害を持った頸髄損傷者の QOL を向上させることが必要であると考えられる。

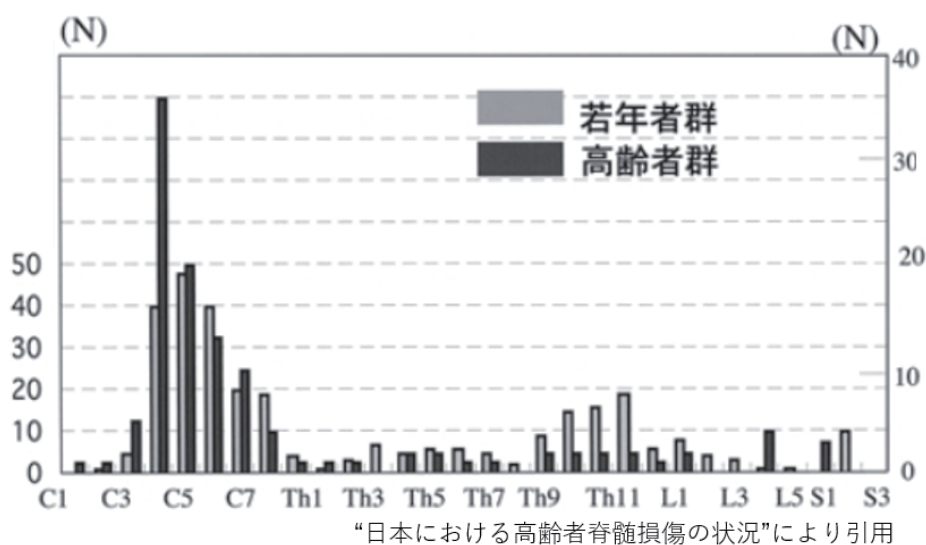


Fig. 1.5 The number of patients according to the damage level

1.2 車いす利用者の生活支援

車いすを利用する際、利用者は下肢障害によって立ち上がることが困難であるために、高い位置にあるものや車いすから離れた位置にあるものを把持・取得することが困難である。また、頸髄損傷者は上肢にも障害を持っているため、物体を把持することが困難である。車いす利用者者の生活支援として、自助具による支援がある。例えば、Fig. 1.6のようなマジックハンドを用いることで、車椅子から物が落ちた際に拾う動作を支援することができる。しかし、頸髄損傷者のように指の動かない場合には握る動作が難しいため、使用に工夫が必要である。また、支援できる動作がものを拾うことに限定されており、生活支援としては不十分であるといえる。

そこで、麻痺の残る腕の代わりに自身の腕の代わりに利用する上肢支援用ロボットアームが注目されている^{[8][9]}。上肢支援用ロボットアームとは、上肢機能障害者が自らの意思で操作し利用することで、自立した生活を支援するための小型軽量のロボットアームのことである。既存の製品として、Fig. 1.7に示す Kinowa Robotics 社の「JACO」や Fig. 1.8に示す産業技術総合研究所の「RAPUDA」などがある。このようなロボットアームは、移動手段である電動車いすに動作手段として取り付けられ、上肢機能障害者の腕の代わりに用いられる。ロボットアームを使用することで、前方にある物体の把持や運搬、電気などのスイッチのON/OFF操作、ドアや引き出しの開閉、床上に落ちた物体を拾うといった動作を行うことが可能である。また、単に落ちた物や前方にある届かないものを拾う動作だけでなく、ペットボトルを開ける際に固定しておくというような、ものを保持する動作も可能である^[10]。このように、ロボットアームを使うことで幅広い動作支援ができるため、障害者自身が介助者なしにできることが増え生活の質の向上につながる^[11]。



Fig. 1.6 Magic hand



Fig. 1.7 JACO(Kinowa Robotics)



Fig. 1.8 RAPUDA(AIST)

1.3 既存のインターフェース

電動車いす搭載ロボットアームシステムを操作するためには様々なインタフェースが用いられている．例えば，一般的に電動車いすの運転のために普段使用することの多いジョイスティックやスクリーン上の仮想ジョイスティックなどが挙げられる^[12]．これらのインタフェースは，レバーによる方向入力が行えるという特徴があり，ロボットアームの操作だけでなく様々な分野で用いられているため，使用方法が分かり易く，実績も多い．手や指での操作はもちろんのこと，足や顎といった部分でも操作可能である^[13]．

ジョイスティックによる操作は，レバーの各入力方向に対しロボットアームのエンドエフェクタの前後方向・左右方向・上下方向と操作が対応しており，エンドエフェクタ姿勢や開閉などは，ジョイスティックの押し込みなどにより，動作モードを切り替えることで操作することが可能である．しかしながら，これらのインタフェースによるロボットアームの操作は，一般的に操作者がロボットアームと把持する物体を確認しながら操作する．そのため，上肢機能障害者が床上に落ちた物体を拾う場合，電動車いすの足元や机などの下に入り込んでしまうと，操作者が落ちている物体を視認することができず，物の拾う動作が困難となる．また，ジョイスティックを用いて電動車いすを操作のとき，ロボットアームの可動範囲内に車いすを停止する必要があるため，上肢機能不足者に対して電動車いすの微調整が不可欠となっていて，身体的な負担が大きくなる^[14]．

次いで，一般的なインターフェースとして挙げられるのはスイッチである．動作パターンをあらかじめ決めておくことで，簡単にロボットアームを操作することができる．ボタンの形状は，Fig. 1.9 や Fig. 1.10 に示すようなシングルスイッチやキーパッドなど様々な種類が存在する．また，ジョイスティックとスイッチを併用して操作することも多い．これらのインターフェースによる操作として，ジョイスティックによる操作は，ロボットアームの水平方向の操作と上下方向の操作，ハンドの開閉操作などを動作モードを切り替えることで使い分けている．そのため，現在の動作モードが何に設定されているか常に把握しておく必要があり，必要に応じて切り替えて操作しなければならず，操作者への認識負荷が大きくなり，目標達成までにかかるロボットアームの操作時間が長くなってしまう．

また，ボタンによる操作は，前後，左右，上下，ハンドの開閉などをボタンに割り振る必要があり，その分だけボタンの数が増加してしまう．そのため，複数のボタンの機能を把握しておく必要があり，動作に応じて選択しなければならず，細かな操作を必要とするため，操作者の負担が大きくなり，目標達成までにかかるロボットアームの操作時間が長くなってしまう^[15]．



Fig. 1.9 Single switch



Fig. 1.10 Key Pad

1.4 電動車いすインターフェースに関する従来研究

障害者の自立支援を実現するために、様々な電動車いす操作インターフェースを提案した。例えば、重度上肢機能障害者に対して、脳波、筋電また眼球追従などの生体信号を用いて電動車いす操作インターフェースがある^{[16][17][18]}。これらのインターフェースを利用することで、電動車いすの操作が上肢機能不全の患者にアクセス可能になる^[19]。しかし、床や机から物を拾うことを目的としたロボットアームが取り付けられた電動車いすの利用場面を考えてみよう。このタスクは 2 つの主要な部分に分けることができる。まず、ユーザーは車椅子を目標物の近くの適切な位置に移動する必要がある。次に、利用者はロボットアームを操作し手元に目標物の把持と移動が必要となる。このタスクでは、ロボットアームのエンドエフェクタの姿勢は把持タスクによって異なっていて、目標物に手が届きやすい適切な位置に電動車いすを移動することが必要である。一方、ロボットアームを伸ばした状態での電動車いすの微調整は容易ではなく、特

に四肢麻痺などの患者にとって大きな身体的負担となる^[20]。手動インターフェースで電動車いすを操作する場合で、広いスペースで目標位置に簡単に到達できる。ただし、非ホロノミックシステムとして、電動車いすは横方向に移動できないため、位置を微調整する場合でもジョイスティックの微小操作を繰り返す必要がある^[21]。一方、電動車いすの動きに合わせてキャスターを逆回転させた場合、車いすの移動方向は操作者の意図とは異なってしまい、健常者であっても対象物の近くで車いすの位置を微調整することは困難である。特に上肢機能障害のある患者の場合、同じ操作を達成するには、操作頻度の増加とより多くの身体的負担が必要である。

これらの問題に解決するために、近年、自動走行技術を電動車いすに導入した。電動車いすが対象物の近くにある場合、自動走行によりロボットアームの適切な位置に車いすを確実に停止できるだけでなく、操作者が身体的な緊張を軽減することもできる。例えば、2D/3D マッピングを基づく自動走行システムがある^{[22][23][24]}。このようなシステムでは、電動車いすに搭載された 2D/3D LiDAR によって取得された情報から 2D/3D マップが構築される^[25]。自己位置推計は行列変換で推定することができる^[26]。そして、走行した経路によって得られた中間点から自動運転の経路を生成することができる^[27]。しかし、これらのマッピングシステムは通常、ルートが最初に行われたときの手動操作のパス追跡によって構築された^[28]。GPS 信号に基づく自動運転システムも提案された^{[29][30]}。これらのシステムは屋外環境では良好に機能しましたが、狭い室内環境では GPS 信号の精度は不十分である。最近では、VR 技術も自動走行システムで使用された^[31]。これらのシステムは、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) デバイスを使用してリアルタイム 3D マッピングを構築し、既存のソフトウェアライブラリを利用して障害物を回避する^[32]。しかし、HMD デバイスを常に装着することは実際の使用において操作者にとって身体的な負担となる^[33]。

一方、より簡単に実現可能な方法として、AR マーカー認識に基づく位置推定システムが最近広く使用されている。この技術は、電動車いすの自動走行にも応用された^{[34][35]}。しかし、これらのシステムでセンサーの位置が固定されているため、このようなインターフェースでは使用中に AR タグがセンサーの視野から出る問題がある。この問題を解決するために、車椅子モデルに基づく位置予測システムも提案されている。しかし、単純化された車椅子のモデル化は実用には不十分であり、位置予測に失敗することがある^[36]。

1.5 ロボットアームインターフェースに関する従来研究

ロボットアームの操作は、一般的に操作者がロボットアームと把持する物体を確認しながら操作する。そのため、上肢機能障害者が床上に落ちた物体を拾う場合、電動車いすの足元や机などの下に入り込んでしまうと、操作者が落ちている物体を視認することができず、物の拾う動作が困難となる。

この問題に対して、近年、カメラや視覚センサを作業空間に設置し、視覚情報から作

業環境の探索と把持を行う遠隔操作手法の提案が進んでいる^[37]。作業空間におけるカメラやセンサの設置は作業空間中の固定位置に設置する方式と車いすやロボットに設置する方式がある。作業空間中の固定位置にカメラや視覚センサを設置する場合、操作者に第3人称視点を提供し、作業空間を全体的に把握することが可能だが、室外環境でセンサを設置していない場所で利用できない問題やロボットが目標物を隠すなどの問題により使用できる場面が限定的になる^[38]。ロボットアームのエンドエフェクタに視覚センサを設置する方式では、ロボットアーム自身の状態は把握困難だが、ロボットアームの操作次第で広い視野を実現できる。このようにジョイスティック操作式ロボットアームの手先に2Dカメラを設置することで、操作者の視野を広げ、床上から物を拾う操作が可能となるインタフェースが提案されている^[39]。また、産業用のロボットアーム遠隔操作インタフェースも多く開発されている。しかしながら、これらのインタフェースは健常者を対象とするため、細かな操作が必要であり、操作者の負担が大きくなってしまふ^{[40][41]}。そのため、近年に障害者を対象とした自動や半自動操作インタフェースに関する研究が進んでいる。例えば、ロボットアームに深度センサや複数台のカメラを搭載し、画像処理による目標物を認識し、操作者のコマンドで目標物を自動把持するインタフェースがある^{[42][43][44]}。しかしながら、複数台のカメラを使用するため、操作方式により使用できる場面も限定的になる。Dingらはロボットアームの手先に搭載したカメラから目標物に貼り付けたARマーカー認識により半自動操作インタフェースを提案した^[45]。

1.6 研究目的

近年、上肢機能障害者の生活の質を改善するために、電動車いす搭載型ロボットアームが介護現場に導入されている。しかしながら、一般的な操作インターフェースはキーボードやジョイスティックなどのインターフェースを用いて操作する。これらのインターフェースは操作負担が大きく、操作時間もかかってしまう。この問題を解決するために、様々な研究が行われている。しかしながら、近年開発したインターフェースは頸髄損傷者や指の拘縮患者などの重度機能障害を持っている方に対して、使えない場面も存在する。その原因として、画像認識を用いるインターフェースは外部センサーを用いることにより、使用環境に制限がかかってしまう。また、マウス操作が必要のため、指が拘縮の患者に対応することが困難である。音声やジェスチャー認識によりロボットアームを操作するインターフェースは、事前にデータを登録することが必要のため、実行動作に制限がかかる。そこで、本研究で操作負担を軽減し、障害者の自立支援を実現することを目的にするスマートフォンを用いた電動車いす及びロボットアームの操作システムの開発を行う。

1.7 論文構成

本論文の構成は、Fig. 1.11 に示す。

第1章では、研究背景、従来研究、本論文の主題と目的、および本論文の構成について述べる。

第2章では、頸髄損傷者を対象とした電動車いす手動、自動操作インターフェースを提案し、操作性の向上を評価する。

第3章では、頸髄損傷者を対象としたスクリーン上の仮想ジョイスティックおよび3次元動作による操作インターフェースを提案し、C5レベルの頸髄損傷者において、操作負担の軽減を評価する。

第4章では、C5レベルの頸髄損傷者を対象する床上物体把持のための視覚に基づく電動車いす搭載型ロボットアーム操作インタフェースを提案し、C5レベルの頸髄損傷者において、アームの把持操作を評価する。

第5章では、結言として本論文のまとめを行うとともに、ロボットアーム付き電動車いすに関して今後の展望を述べる。

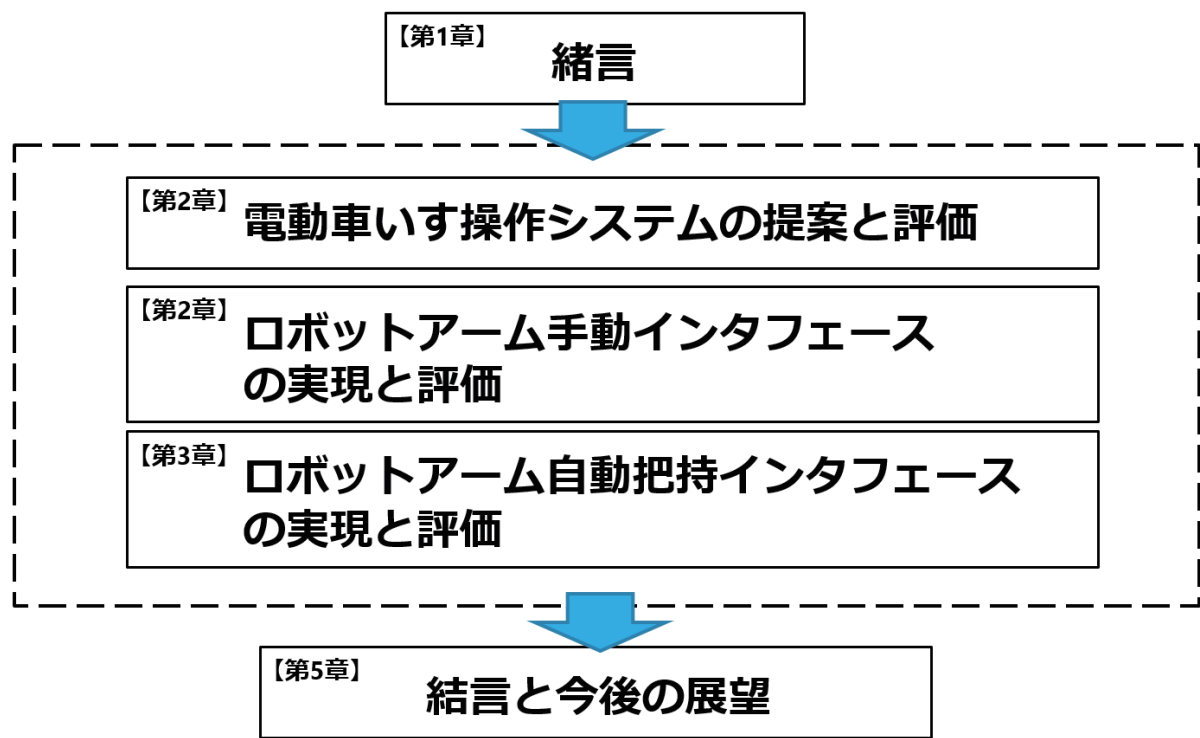


Fig. 1.11 Organization of this work

第2章 電動車いす操作システムの開発

2.1 本研究で使用する装置

2.1.1 電動車いす

本研究では株式会社今仙技術研究所の EMG270 を用いた．Fig. 2.1 に本研究で使用する電動車いすを示す．電動車いすの仕様を Table 2.1 に示す．こちらの電動車いすは前後左右共に 0.0-5.0 [V] の速度指定電圧の幅を持っており，後ろと左が 0.0 [V]，前と右が 5.0 [V] の電圧値を指令電圧として入力することでモーターを駆動させる．また，オフセット電圧は前後共に約 2.5 [V] である．



Fig. 2.1 EMG270 Powered-Wheelchair

Table 2.1 Configuration of electric wheelchair

長・幅・高さ [cm]	101.0・59.8・95.0
重量 [kg]	83.5
駆動方式	前輪キャスター後輪駆動直接駆動型
駆動モーター	30 分定格出力
バッテリー	SER38-12
溝乗越幅 [cm]	10.0

2.1.2 システムの構成

本研究の以前の電動車いす操作システムの場合，Raspberry Pi 内のソフトウェア WebIOPi を用いて電動車いす操作に必要なシステムを起動し，Raspberry Pi とスマートフォンを Wi-Fi ルーターを介して無線通信を行っていた．そのため，仲介を行う Wi-Fi ルーターの通信可能範囲外では電動車いすを操作することが出来ないという問題があった．この問題について Arduino に Bluetooth モジュールを取り付け，スマートフォンと電動車いすに搭載した Arduino で直接 Bluetooth 接続を行うことで解決を試みる．新たな電動車いす操作システムを Fig. 2.2 に示す．また，以前のシステムではブラザを用いて平面型ジョイスティックの GUI を表示させていたが，今回はスマートフォンアプリによって GUI を表示させた．これは Bluetooth 接続を可能にするためであり，スマートフォンアプリはゲーム開発エンジン Unity を用いて開発を行った．

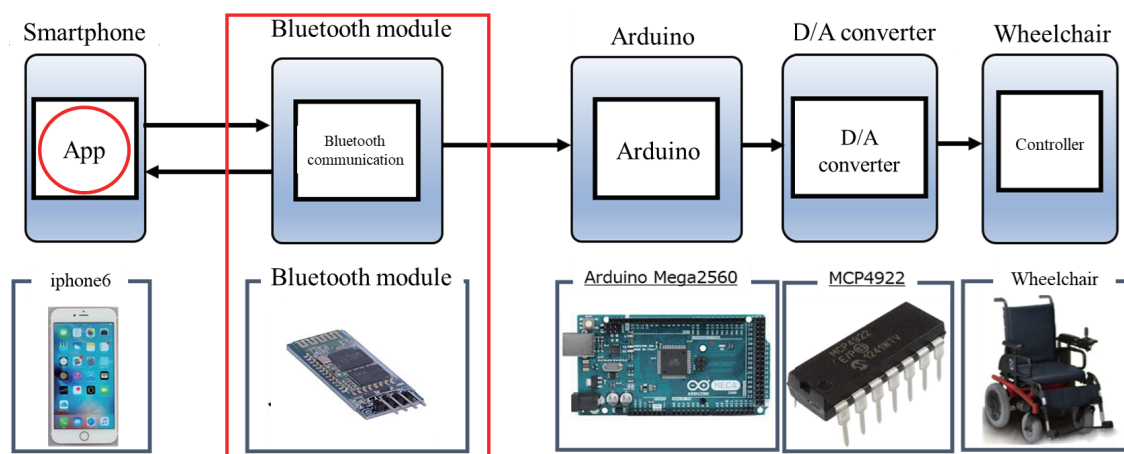


Fig. 2.2 Configuration of the hardware system

本研究では Arduino に Bluetooth モジュールを取り付け，スマートフォンと電動車いすに搭載した Arduino で直接 Bluetooth 接続を行うことで解決を試みる．Bluetooth モジュールの様子と仕様は Fig. 2.2 と Table 2.2 に示す．

本研究で Bluetooth モジュールから送信された速度指令電圧に基づいて電圧の変更を

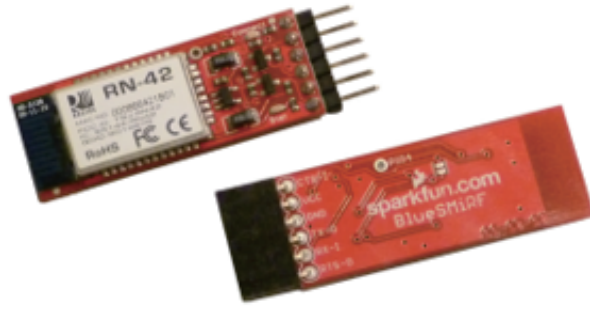


Fig. 2.3 Bluetooth module

Table 2.2 Configuration of Bluetooth module

通信距離 [m]	30.0
電源電圧 [V]	5.0
消費電流 [mA]	8-50
アンテナ	トレースパターン型
USB コネクタ数	16

行うことで電動車いすの操作を行う．本研究では Fig. 2.3 に示すように Arduino Mega 2560 を用いた．Arduino Mega 2560 の仕様を Table 2.3 に示す．

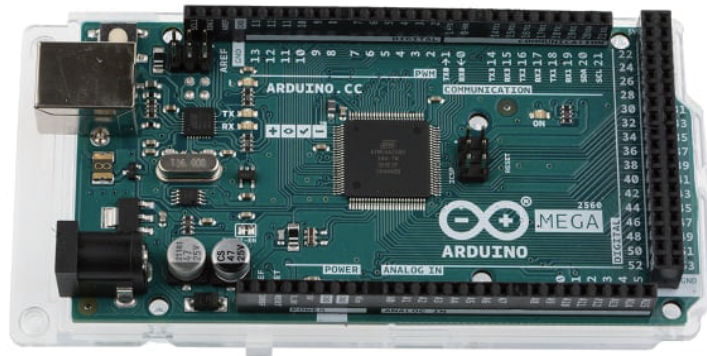


Fig. 2.4 Arduino

Arduino からのデジタル信号をアナログ信号に変換して電動車いすの速度指令として与える．本研究では Fig. 2.5 に示すように MCP4922 を用いた．また，MCP4922 の仕様を Table 2.5 に示す．

Table 2.3 Configuration of Arduino Mega 2560

マイコン	ATmega2560
動作電圧 [V]	5
入力電圧（推奨） [V]	7.0-12.0
入力電圧（限界） [V]	6.0-12.0
デジタル入力出力ピン数	54
アナログ入力チャンネル数	16

Table 2.4 Configuration of MCP4922

解像度 [bit]	12
チャンネル数	2
供給電圧 [V]	2.7-5.5
コンバータ数	2

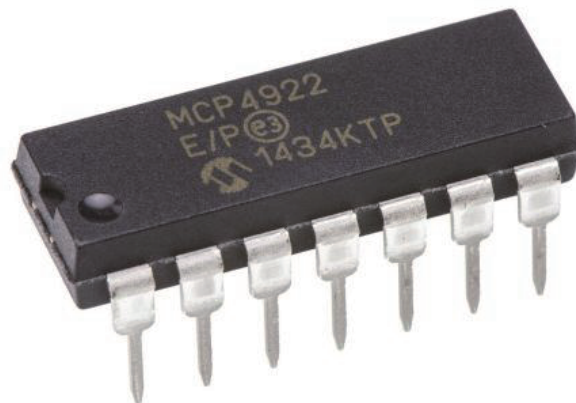


Fig. 2.5 MCP4922

2.2 電動車いす手動インタフェース

頸髄損傷者は前述の通り，手関節の拘縮により手指の関節の可動域が制限されているため，指先でのタッチができず，小指の第二関節を用いてタッチ操作を行う．そのため Fig. 2.6 に示すようにタッチ点の目視が困難であり，操作の際に想定したタッチ点と実際のタッチ点との偏差が発生する．この偏差により意図した操作が行えないという問題がある．そのため頸髄損傷者にとって快適な操作を可能にするインターフェースを設計する必要がある．そこで本研究では，手関節の拘縮した頸髄損傷者のための画面注視を要しない電動車いす操作用インターフェースの開発を行う．



Fig. 2.6 Operation by the person with cervical cord injury

2.2.1 作成したインタフェース

上記の問題を解決するために，Fig. 2.7 に示すインタフェースを開発した．操作者が最初にタッチした点を原点 O として，ドラッグ操作によって操作し，ドラッグ操作中のその時点のタッチ点 $T = (x, y)$ の座標を入力信号として用いる．一度タッチパネルから手を放し，再度タッチすることで，原点を更新する．

電動車いすの動作について，タッチ点 T の x 座標が負の値の時に前進し，正の値の時に後退する．また， y 座標が負の値の時に左旋回し，正の値の時に右旋回する．

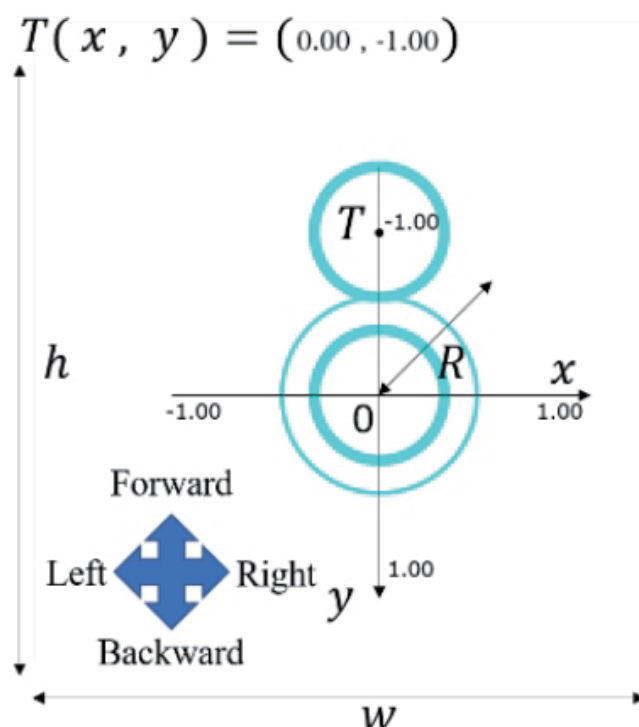


Fig. 2.7 Manual operation interface

2.2.2 入力値補正

操作者の手ぶれによって生じる蛇行走行を防ぐために操作画面の入力範囲である円の領域を N 分割し、タッチ点 T が N 分割された領域のいずれかに入っているかを判別することによって、入力値の座標を補正する入力値補正を考案した。また、予備実験の結果から、今回は $N = 16$ として 16 分割された領域内で判別を行う。

Fig. 2.8 を例として示す。ある時点でのタッチ点座標 $T_j(x_j, y_j)$ について Eq. (2.1) と Eq. (2.2) で角度 θ と原点からの距離 r を算出する。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_j}{x_j} \quad (2.1)$$

$$r = \sqrt{x_j^2 + y_j^2} \quad (2.2)$$

以下の条件のもと、Eq. (2.3) で補正した角度 θ_i を算出し、Eq. (2.4) で補正後の座標 $T_c(x_c, y_c)$ を求める。

$$\frac{\pi(i - \frac{1}{2})}{8} < \theta \leq \frac{\pi(i + \frac{1}{2})}{8}, \quad \theta_i = \frac{\pi}{8}i \quad (2.3)$$

$$x_c = r \cos \theta_i, \quad y_c = r \sin \theta_i \quad (2.4)$$

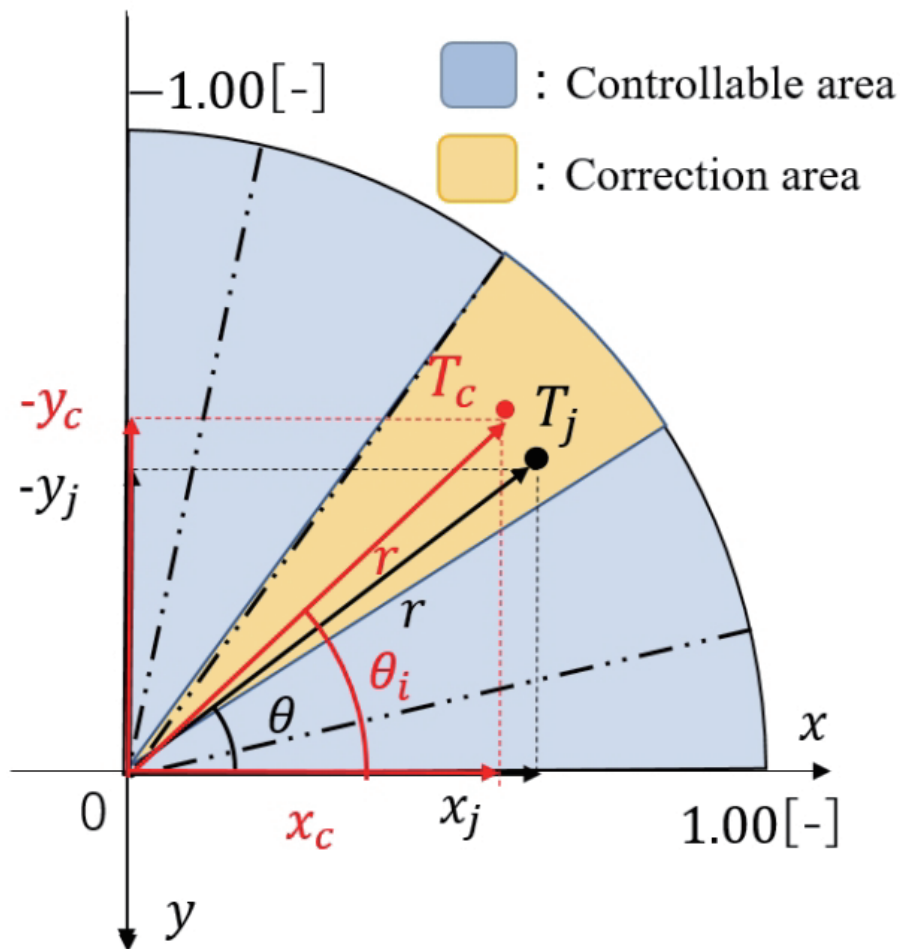


Fig. 2.8 Input value correction method

T_c を入力値として用いることでドラッグ操作時の入力値の補正を行い，走行方向について制限を持たせることで蛇行走行を防ぐ．

2.2.3 実機実験

Fig. 2.9 と Fig. 2.10 にそれぞれ従来手法，提案手法の操作画面を示す．従来手法では，一般のジョイスティックを模擬するために，操作画面の中央を操作原点として設定した．一方，提案手法では，最初のタッチした点を原点とする．また，いずれも前節に示した入力値補正を行っている．

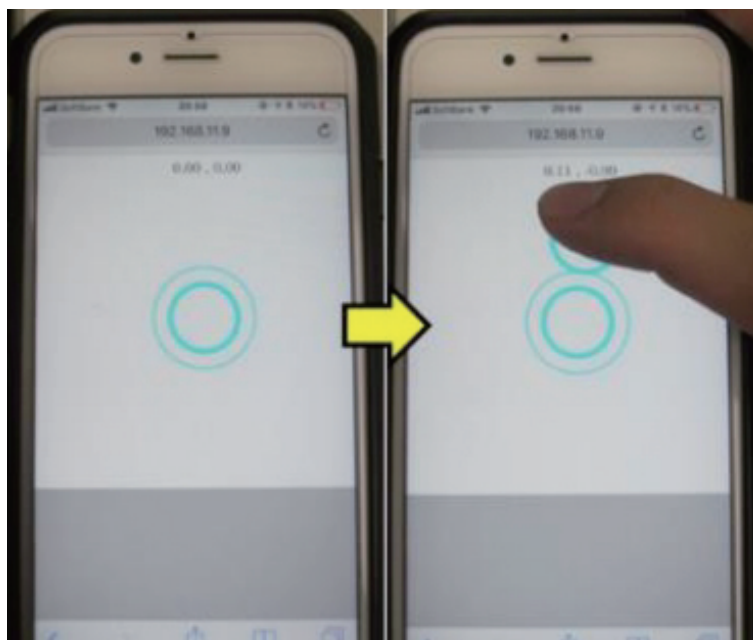


Fig. 2.9 Operation screen of conventional method

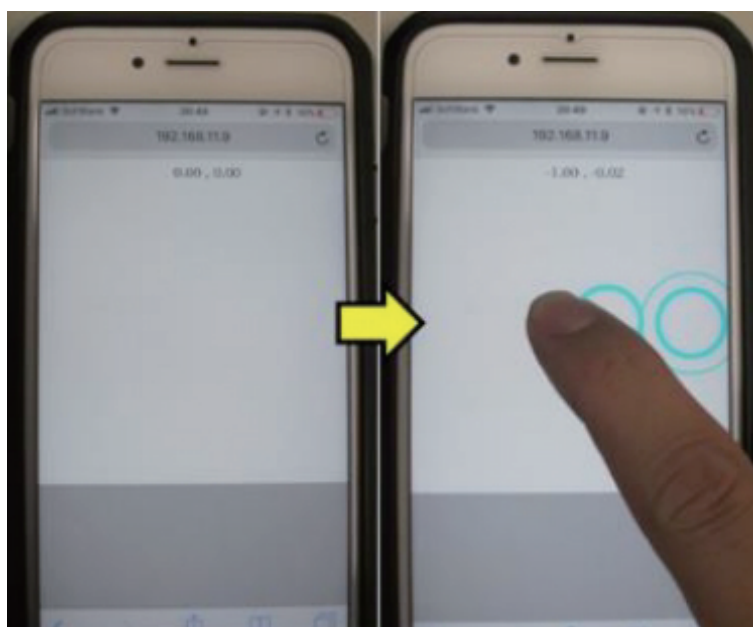


Fig. 2.10 Operation screen of proposed method

実験は Fig. 2.11 に示す走行コースのスタート地点からゴール地点までの電動車いすによる走行を各 3 回行った．その際の操作時間と操作入力座標を測定する．被験者は 3 名の健常な成人男性である．また，操作条件として頸髄損傷者のスマートフォン操作を模擬するために操作画面を目視せず，膝の上にスマートフォンを置いた状態で小指の第 2 関節を用いて操作を行う．また，いずれも操作に十分に慣れた状態で実験を行い，実験の手順としては従来手法の実験を行った後に提案手法による実験を行った．

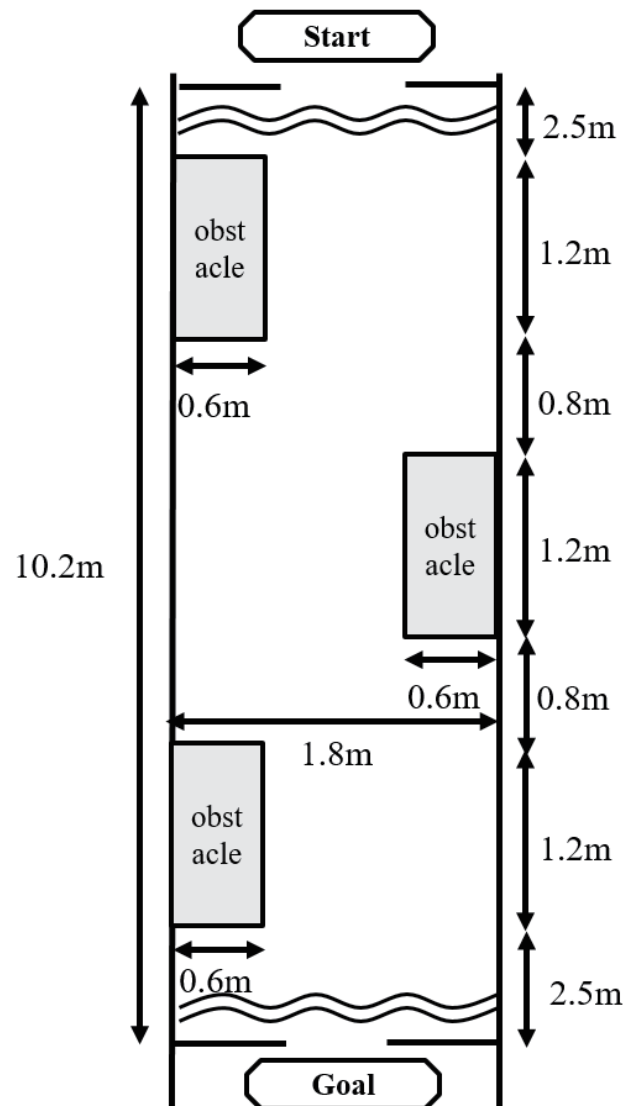


Fig. 2.11 Experimental driving course

2.2.4 実験結果と考察

Table 2.5 に従来手法の操作時間を Table 2.6 に提案手法の操作時間を示す．いずれの被験者についても 10.7 [s] ~ 20.1 [s] の操作時間の短縮が見られた．また，Fig. 2.12 に

Table 2.5 Operation time[s] of conventional method

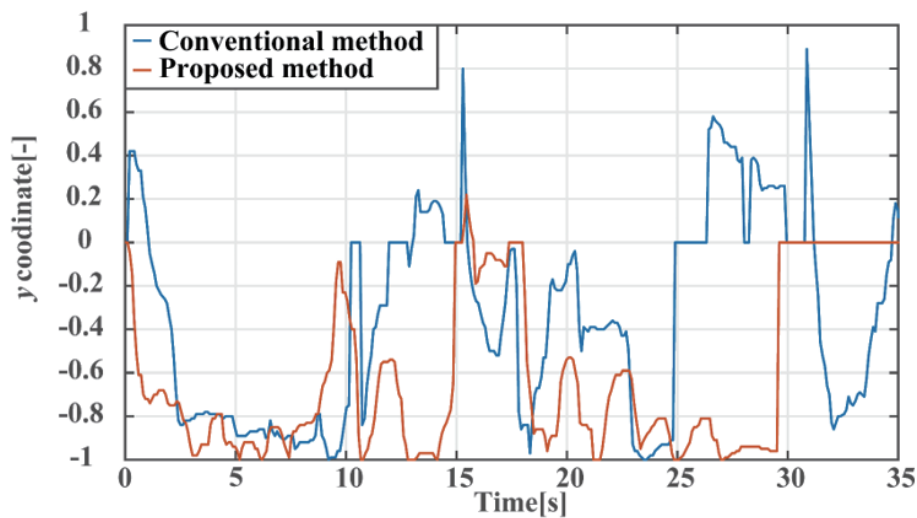
	1 回目	2 回目	3 回目	平均値
被験者 A	46.5	35.8	45.0	42.4
被験者 B	62.4	58.7	50.8	57.3
被験者 C	44.6	44.4	51.6	46.9

Table 2.6 Operation time[s] of proposed method

	1 回目	2 回目	3 回目	平均値
被験者 A	26.7	29.7	27.1	27.8
被験者 B	28.6	38.8	44.3	37.5
被験者 C	35.3	33.5	40.0	36.2

実験の際のタッチ点 y 座標のグラフを示す．従来手法の場合 0 [s] ~ 2 [s] , 15 [s] , 27 [s] ~ 32 [s] 付近で y 座標が正の値を示し，後退していることが確認できる．

頸髄損傷者などの上肢機能障害を持つ人々は身体に残っている麻痺や拘縮のために日常生活で多くの支援が必要である．本研究では，頸髄損傷者の小指の第二関節を用いてスマートフォン操作を行うため，タッチ点の目視が困難という点から操作者自身が想定したタッチ点と実際のタッチ点との偏差によって意図した操作が行えないという問題を取り上げた．その問題を解決するために最初のタッチ点を原点とする GUI と入力値の補正方法を考案し，実験を行った．実験結果において，操作時間の面から操作性の向上，本研究の有効性を示した．

Fig. 2.12 Input signal series for y coordinate in the comparative operation experiment

2.3 電動車いす自動走行システムの開発

ロボットアーム搭載型の電動車いすを操作し、床や机上の対象物を掴み、ユーザーの元に持ってくることを取ることを考えると、ロボットアームのエンドエフェクタの姿勢は、対象物の形状等によって異なるため、はじめにロボットアームが対象物に到達しやすい適切な位置まで電動車いすを移動させることが重要である。ここで、もっとも一般的な電動車いす用インターフェースであるジョイスティックでの操作を考えると、広いスペースにおいて目標位置に対する操作は容易である。しかしながら、電動車いすのような非ホロノミックなシステムでは、横移動ができないため、少し位置を変更したい場合ではジョイスティックを微小量だけ傾動させる操作を何度も繰り返し行う必要がある。また、電動車いすのキャスターの向きが進行方向とは異なる場合、操作者が意図した方向とは異なる方向に進んでしまう。したがって、把持する対象物の付近で停止位置を微調整することは健常者に対しても非常に難しく、特に上肢に障害を抱える人に対しては、操作回数が増加してしまうこと、力の微調整を必要とすることがより難しさを与えてしまう。以上のことから、操作には難しさがあるため、本研究で AR マーカー認識による電動車いす自動走行システムの開発を行った。

2.3.1 AR マーカーを用いた位置の取得

本研究では ARToolKit という AR マーカーの姿勢と位置を計測するソフトウェアライブラリを用いる。ARToolKit はマーカーのカメラ座標系における位置姿勢を単眼カメラの映像から算出することにより、拡張現実空間を容易に構築できる計測システムである。そのメリットは正方形の平面マーカーの位置姿勢計測ができ、導入が非常に容易である。本研究で使用した AR マーカーを Fig. 2.13 に示すように、AR マーカーの長と幅はそれぞれ 18.0 [cm] である。また、使用したウェブカメラは Fig. 2.14 に示す。カメラの画角制限は 60.0 [deg] である。

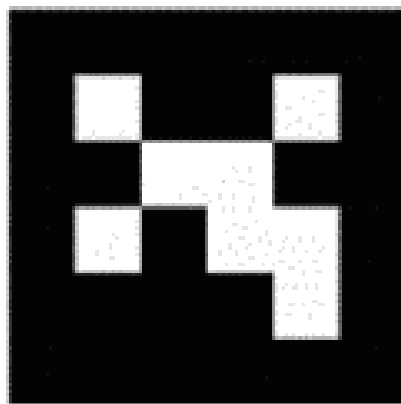


Fig. 2.13 AR-marker in this research

2.3.2 電動車いすの停止条件

電動車いすの自動運転の停止条件について説明する．電動車いす上でのロボットアームの搭載位置と搭載方式は Fig. 2.15 で示す．また，ウェブカメラの設置位置については，Fig. 2.16 に示す．そのため，カメラと AR マーカーの相対位置は分かっているので，ロボットアームと AR マーカーの相対位置が座標変換で計算することができる．本研究で主に電動車いすの自動走行部分を注目するため，自動走行システムの停止条件はロボットアームの最大作業範囲の半分を指定する．



Fig. 2.14 Web camera used in this research

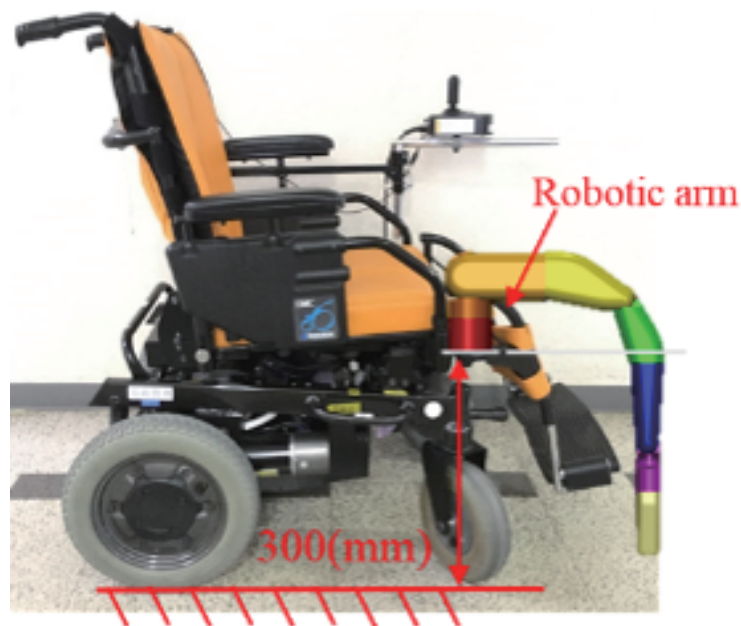


Fig. 2.15 Robtoic arm mounted on the wheelchair

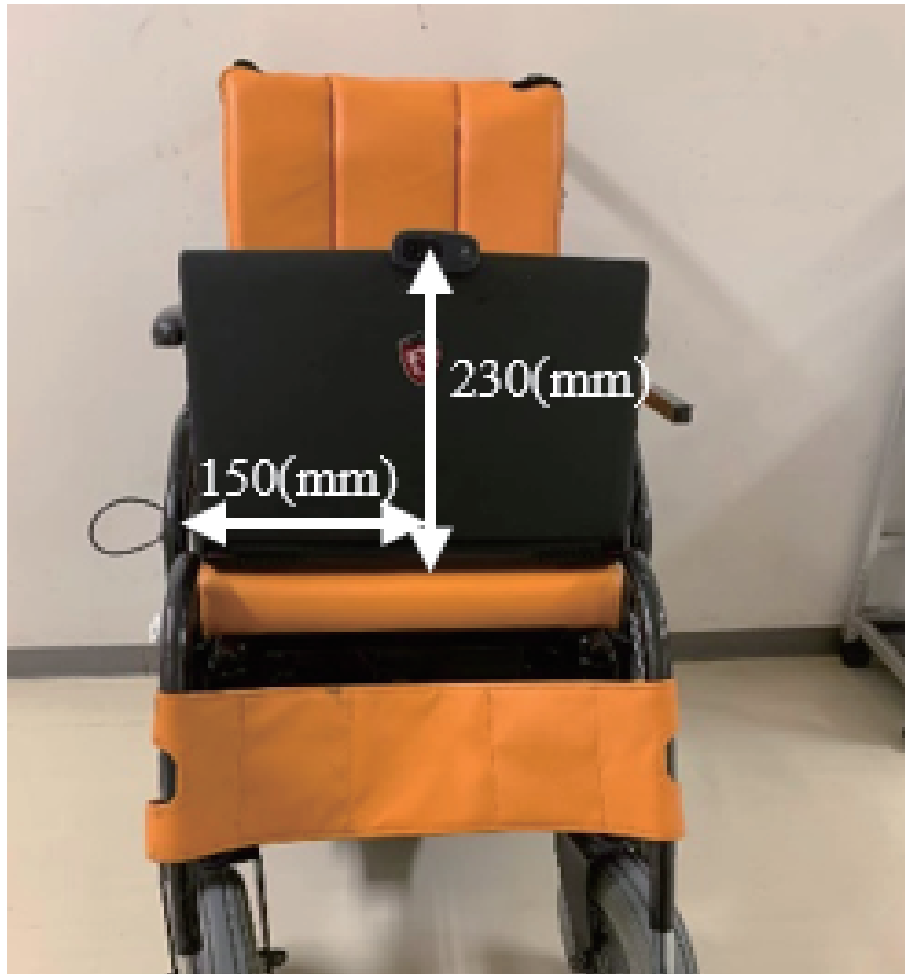


Fig. 2.16 Position of webcam on wheelchair

Fig. 2.17 でロボットアームの作業範囲を示す．アームの構造により，作業可能な範囲は上半部と下半部の2つ部分に分けられる．操作中に操作者がアームとの衝突を避けるために，Fig. 2.18 に示すように，水平面内のロボットアームの動作範囲を $\psi_{min} < \psi < \psi_{max}$ の条件を追加する．ここで， $\psi_{min} = -30$ [deg]， $\psi_{max} = 90$ [deg]．そのため，水平面上のアームの範囲を考慮すると，アームの設置位置はAR マーカーより高い場合で，電動車いすの停止条件が Eq. (2.5) で計算することができる．

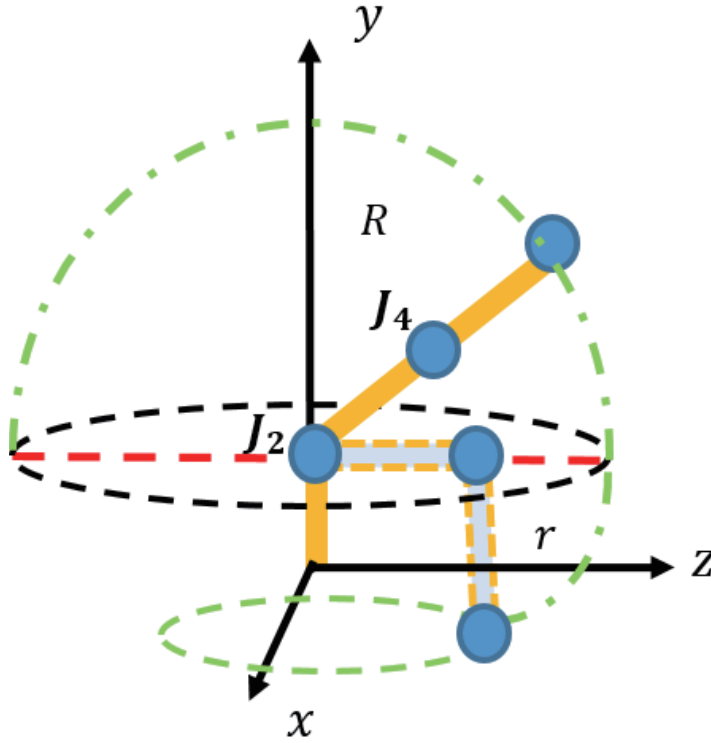


Fig. 2.17 Working range of the robotic arm

$$\sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2} < \frac{R}{2} \quad (2.5)$$

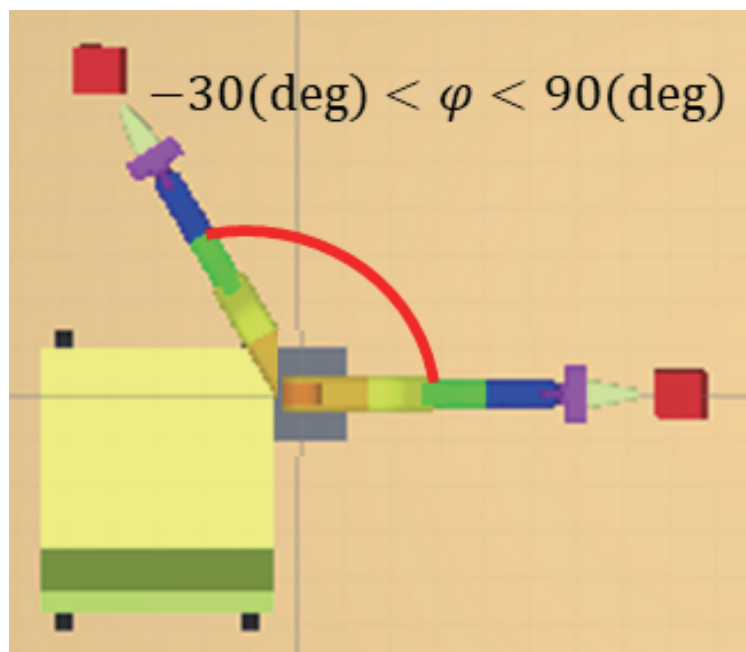


Fig. 2.18 Specified working range in the horizontal plane

2.3.3 操作インターフェース

本研究では、電動車いすが手動操作と自動走行を両方の手法で操作可能なハイブリッド操作インターフェースを提案する。手動操作の部分は前節で述べたジョイスティックインターフェースと同じである。また、本研究で Unity を用いてインターフェースの開発を行う。開発した GUI は Fig. 2.19 に示す。操作者がインターフェースを操作する同時に周囲の環境を把握できるように、背景は電動車いすに搭載した単眼カメラでリアルタイムに撮った画面をインターフェースの背景に設定した。操作方式に関して、Fig. 2.19 に示すように、画面上にある CONNECT ボタンを押すことでインターフェースと電動車いすの間に通信可能となる。手動操作の場合で、操作者がインターフェース画面をタッチすれば、最初のタッチ位置を原点としてジョイスティックが現れる。操作者はこの仮想ジョイスティックをドラッグすることで電動車いすを操作可能となる。一方、電動車いすは搭載した単眼カメラが目標位置に貼り付けた AR マーカーを認識できる範囲に入る際に、インターフェース画面に目標位置を指示する仮想の正方体を現わし、システムが自動的に自動走行モードに切り替える。このとき、操作画面の下部にある MOVE ボタンを押し続けることで、電動車いすは目標位置まで自動走行を行う。

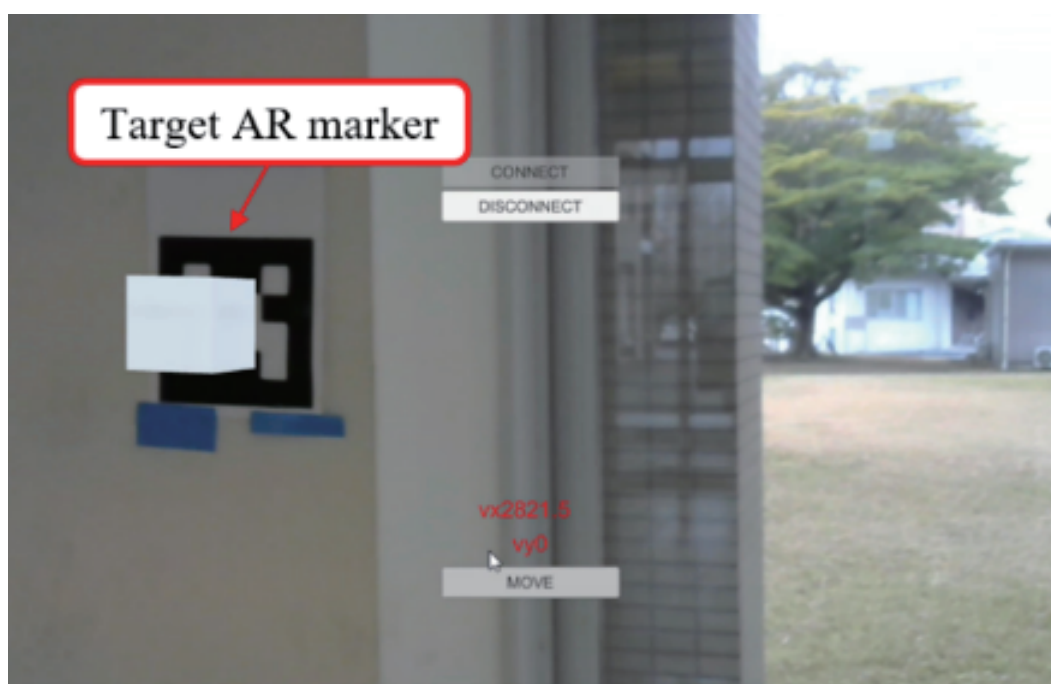


Fig. 2.19 Proposed GUI

2.3.4 予備実験と考察

開発したインタフェースの走行特性を検証するために、AR マーカーが認識できる任意の位置から電動車いすの自動走行を行った。

実験の環境を Fig. 2.20 に示す。実験配置を Fig. 2.21 に示す。図の中で、赤色の点が目標位置を表し、黒の点が全ての初期位置を示した。今回の実験で電動車いすの初期位置は搭載したカメラが AR マーカーを認識できる範囲内の任意位置に合計 30 回を実行した。実験で電動車いすと目標位置の間の距離と角度を計測した。初期方向の角度と距離は実際に測った角度でなく、インターフェースから読み取ってカメラとマーカーの相対位置から算出したものである。

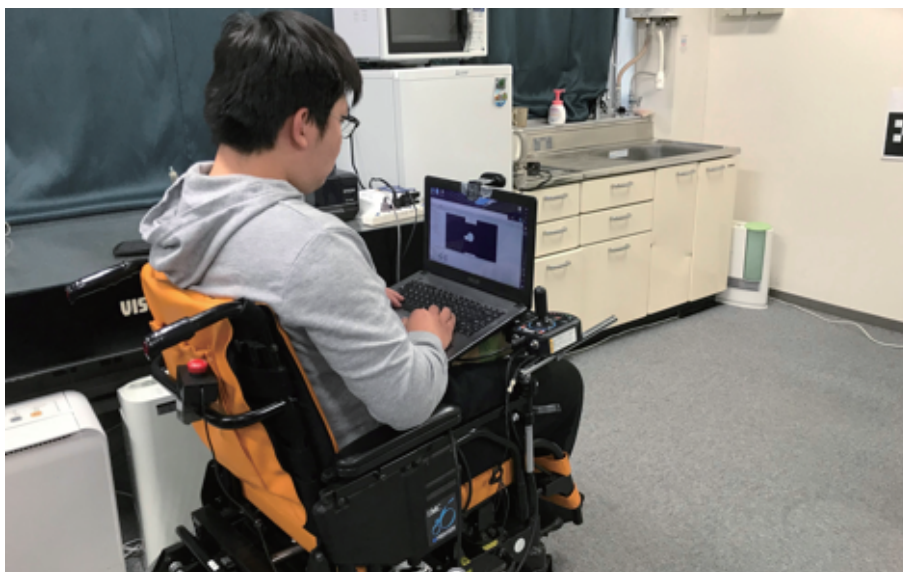


Fig. 2.20 Experiment environment

実験で電動車いすと目標位置の間の相対距離、角度によって自動走行中に目標 AR マーカーがカメラの視野外に出て、自動走行を完成できない問題があることを確認した。この問題の原因として、主に 2 つがあると考えられる。

- AR マーカーによる位置推計は誤差が生じる。
- 電動車いすが制御信号を受信する際の時間遅延であると考えられる。

そこで、AR マーカー認識による位置推計の精度を確認した。その結果は Fig. 2.22 に示す。図の中で、青色の点と黒の点はそれぞれ目標位置と実際のカメラ設置位置を表わす。また、赤色の点は AR マーカー認識による位置推計の座標を示す。結果として、距離が遠くなるほど位置推定の誤差が大きくなることが確認したが、平均の位置ずれは約 0.03 [m] のため、マーカーが認識可能の範囲と比べて許容な範囲と考える。

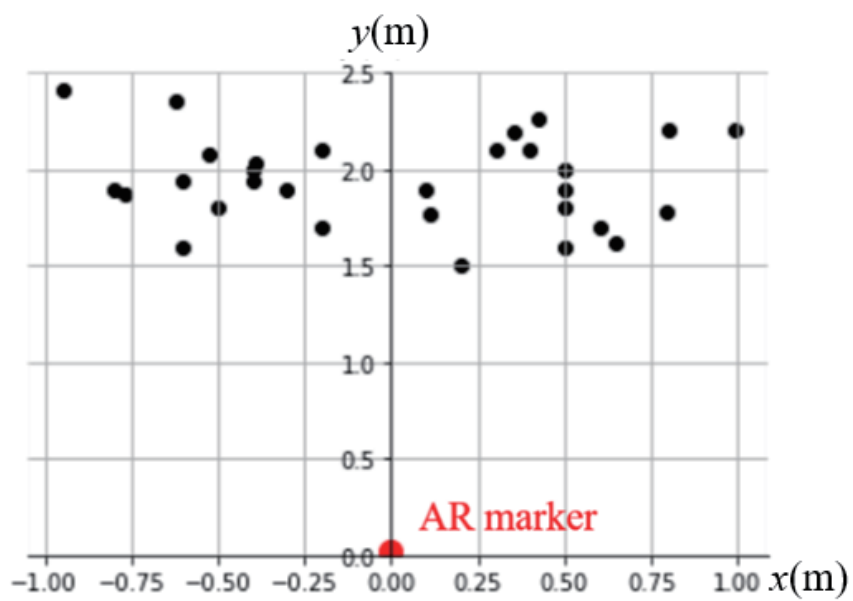


Fig. 2.21 Experimental task

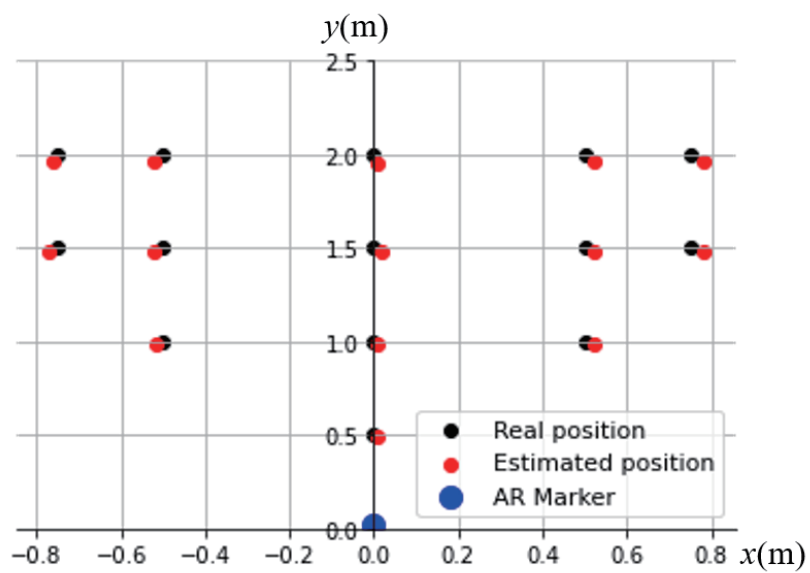


Fig. 2.22 Accuracy of position estimation by AR marker

電動車いすの自動走行誤差の定義として、Fig. 2.23 に示すように、 P は目標位置、 A は電動車いすの初期位置である。電動車いすの初期位置と AR マーカーのなす角度は θ とする。電動車いすは初期位置 A からマーカーを認識して自動走行が始まる。位置 B に到達するときにマーカーがカメラの視野から外れて認識されなくなる。マーカーがカメラの画角から外れた後、電動車いすはそのまま直進し C に x 軸と交叉する。その時の目標位置からの距離 e を誤差という。ここでの dx は理想の左右移動量である。そのため、誤差 e [mm] は Eq. (2.6) を用いて計算することができる。また、こちらの $B(x_b, y_b)$ は AR マーカー外す位置の座標である。一方 V_x と V_y は位置 B の時の速度指令電圧値を表わす。 V_{mx} と V_{my} は速度指令 0 (停止) の場合の電圧指令値である。

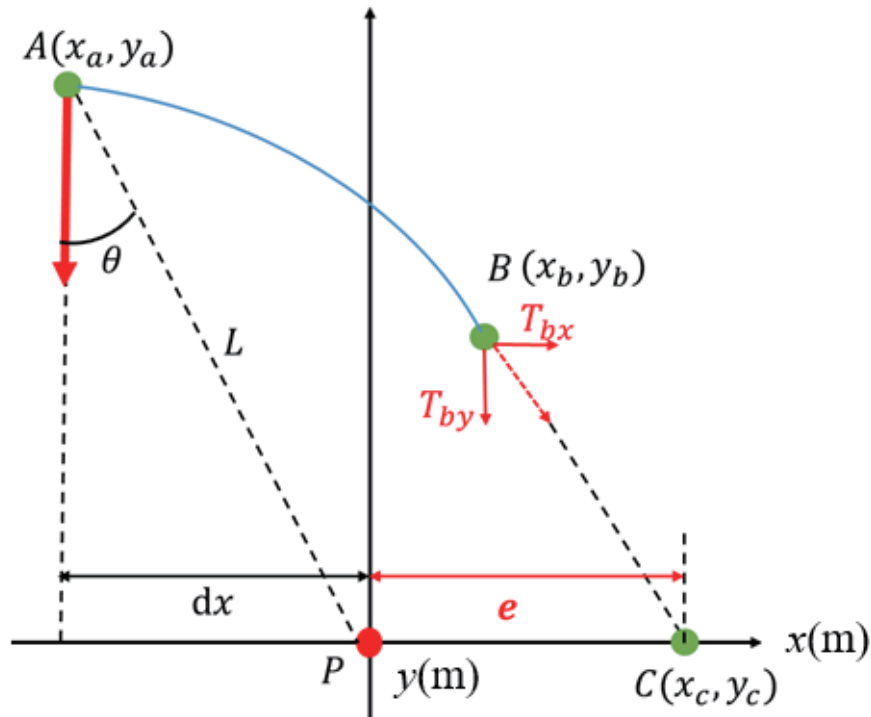


Fig. 2.23 Definition of moving error

$$e = (y_b - y_0) \times \frac{V_x - V_{mx}}{V_y - V_{my}} + (x_b - x_0) \quad (2.6)$$

Table 2.7 Relationship between error and initial angle

	Degrees	Error
Degrees	1.00	0.82
Error	0.82	1.00

2.3.5 誤差の予測

前節の実験結果により，単回帰分析を行った，それぞれ誤差と距離，誤差と方向の回帰直線を Fig. 2.24 と Fig. 2.25 に示す．また，相関関係を調べると，Table 2.7 に示すように，初期方向と走行誤差の相関係数 $P=0.820$ であるため，正の相関関係があることがわかる．それ以外に，Table 2.8 に示すように，距離と誤差の線形相関係数 $P=0.538$ なので関係性が弱い．しかし，実験データを見ると，初期角度が一定の場合で，距離と走行誤差は正の相関関係があった（相関係数 $P=0.91$ ）．このように，初期距離と初期角度は共に走行誤差に影響を与えていることが確認した．そのため，本研究では重回帰分析の手法を用いて誤差予測モデルを作成する．詳細は次の節で説明する．

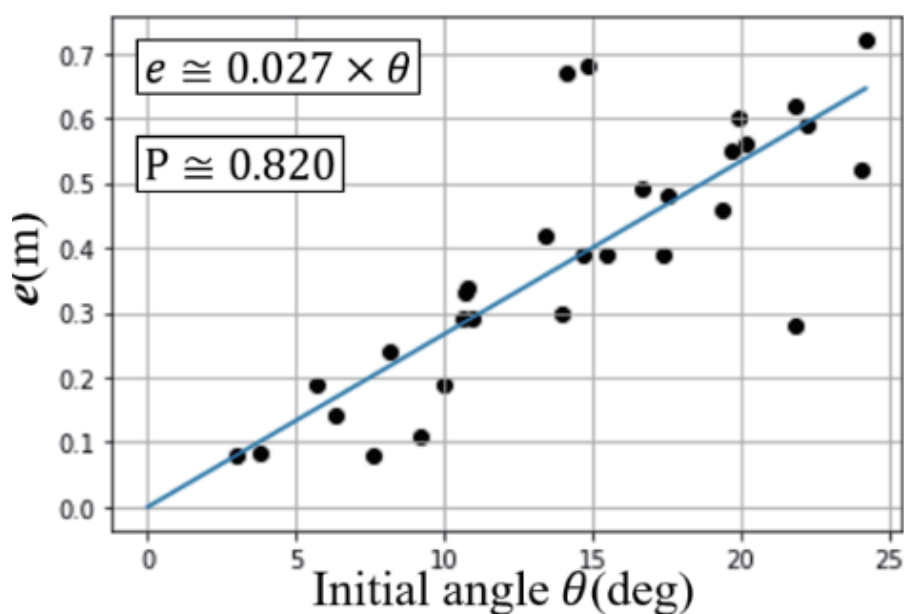


Fig. 2.24 Relationship between error and initial angle

Table 2.8 Relationship between error and initial distance

	Distance	Error
Distance	1.00	0.54
Error	0.54	1.00

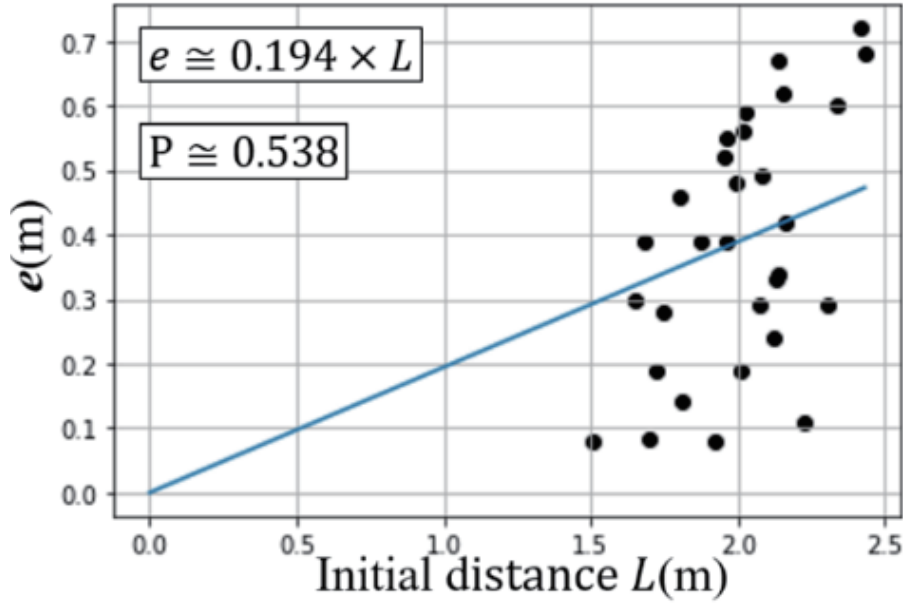


Fig. 2.25 Relationship between error and initial distance

走行誤差に対しては、初期角度 a と距離 d の2つの変数があるため、本研究は重回帰分析手法を用いて回帰分析を行った。推定した重回帰モデルを Fig. 2.26 に示す。

$$e \cong 0.244 \times d + 0.024 \times a + 0.779 \quad (2.7)$$

2.3.6 モデルの精度

誤差予測モデルを評価するために、決定係数と平均二乗誤差を用いてモデルの精度を調べた。決定係数 (R^2 係数) は計測した値と予測した値の相関係数を表わし、Eq. (2.8) で求めることができる。計算結果により、決定係数は0.874のため、実際の測量値と予測モデルが強い相関関係があることがわかる。一方、平均二乗誤差 (RMSE) は平均化された誤差の値を表し、Eq. (2.9) で求められる。計算結果を見ると、平均二乗誤差は0.004のため予測モデルの精度が高いことがわかる。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(e_i - e_p)^2}{\sum(e_i - \bar{e})^2} \cong 0.874 \quad (2.8)$$

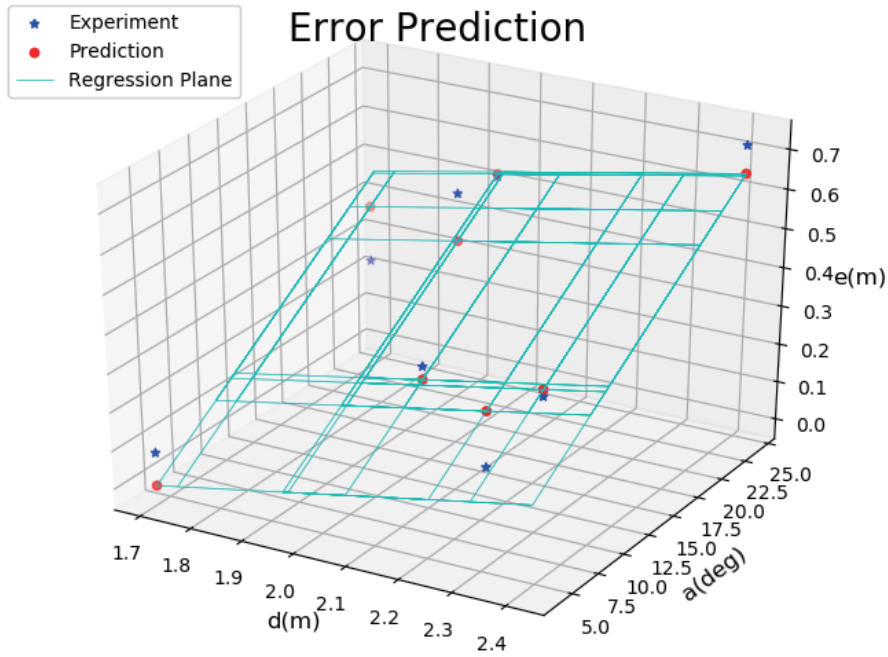


Fig. 2.26 Error prediction model

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (e_i - e_{p(i)})^2}{n}} \cong 0.004 \quad (2.9)$$

2.3.7 速度指令電圧補正

前節に述べたように，走行誤差モデルを通じて電動車いす状態から誤差の予測が可能であるため，誤差 e がわかる．そのため，Fig. 2.27 に示すように，理想的な走行距離は $dx[m]$ であるが，実際の走行は $dx+e[m]$ となる．したがって，Eq. (2.10) で与えられる速度指令電圧補正係数 K_v を導入する．

$$K_v = \frac{|dx_t|}{|dx_t| + e_t} \quad (2.10)$$

$dx_t[m]$ はある時刻における理想的な移動距離， $e_t[m]$ はある時刻における走行誤差である．算出した電圧値補正係数 K_v をインターフェースの電圧入力値に導入すると，補正した横方向の速度指令電圧は Eq. (2.11) で求められる．

$$V_x = -K_v \times P_x \times G + V_{mx} \quad (2.11)$$

G は電圧ゲインである．今回実験の安全性を考慮し，電動車いすの走行速度を抑えるために， $G=1000$ と設定した． V_{mx} は電動車いすの横方向のオフセット電圧である．

2.3.8 提案手法

本研究では，電動車いすが自動走行中にカメラの視野外に出るという問題に対して，重回帰分析の手法を用いて走行誤差をモデル化にして誤差補正モデルを提案する．予測誤差と電動車いす姿勢・位置の関係を分析し，電圧補正係数を計算する．その後，電圧補正係数を位置制御による左右電圧指令に導入し，自動走行中に電動車いすの走行誤差を補正する．システムの流れは Fig. 2.28 に示す．

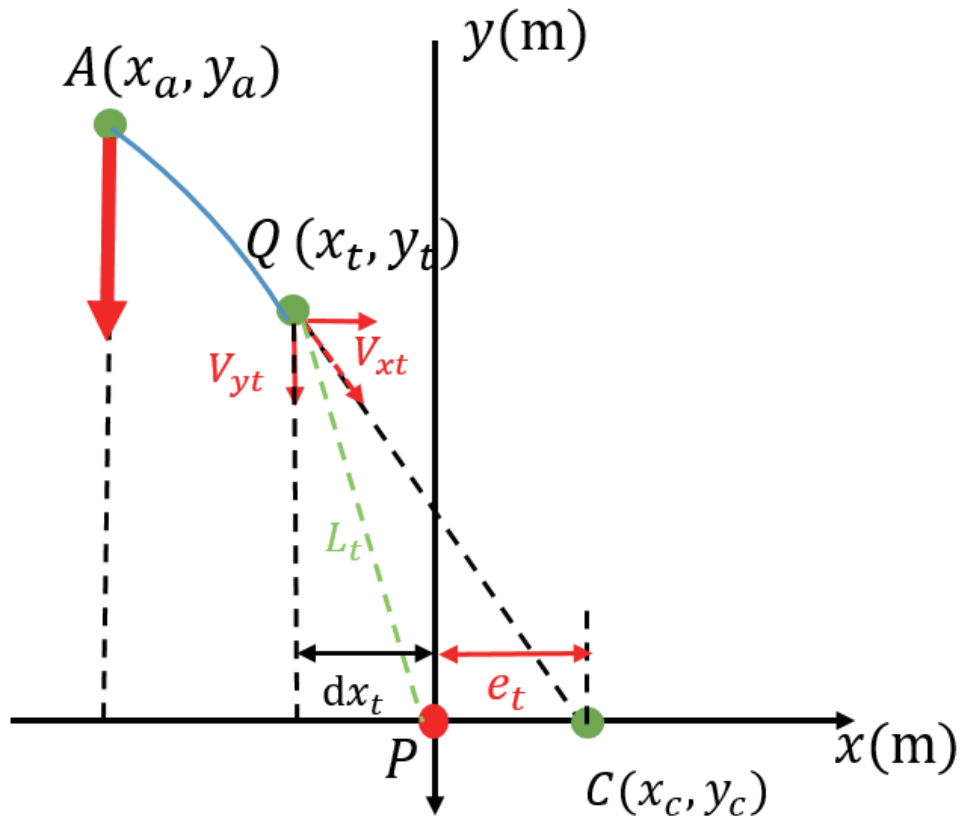


Fig. 2.27 Input voltage correction coefficient

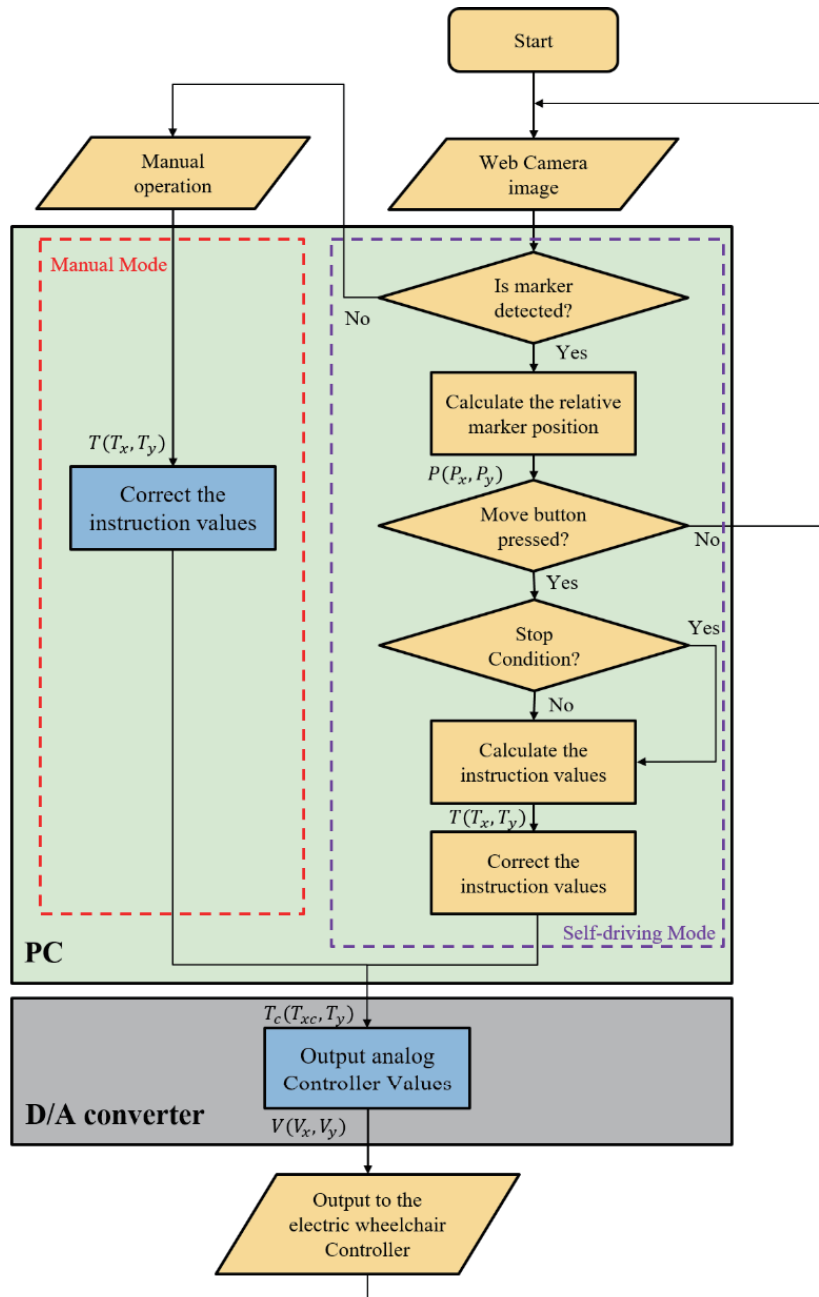


Fig. 2.28 Configuration of the whole system

2.3.9 実機実験

ここまでの提案手法を用いて、実験を行った。Fig. 2.29 は実験の様子を示す。被験者は電動車いすに乘坐、ウェブカメラとノートパソコンを接続し、電動車いすに搭載した。AR マーカーをはっきりと認識できるように、電動車いすとマーカーの距離の上限は 2.5[m] であると設定した。電動車いすは補正前後の走行軌道の比較を通じて提案手法の有効性を検討する。異なる初期状態で電動車いすの補正前後の自動走行の軌道を検証するために、今回の実験はランダム位置の 3 つの走行コースで実施した。また、横方向の電圧指令値と電動車いすの移動軌跡を用いて有効性を評価する。



Fig. 2.29 Experimental view

今回の実験は 3 つのコースを実施した。コース A で電動車いすが AR マーカーの真正面に設置する。電動車いすの自動走行の際に進行方向は直進である。コース A の概略図は Fig. 2.30 に示す。コース A で電動車いすの初期位置と目標 AR マーカーの間の初期角度 $\theta = 0$ [deg]、初期距離は 2.0 [m] と設定した。コース B で Fig. 2.30 に示すように、電動車いすの初期位置はマーカーと一定の角度がある。コース B で電動車いすの初期位置と目標 AR マーカーの間の初期角度 $\theta = 25$ [deg]、初期距離は 2.2 [m] と設定した。コース C で Fig. 2.32 に示すように、認識されたマーカーはインターフェース画面端にある。コース C で電動車いすの初期位置と目標 AR マーカーの間の初期角度 $\theta = 15$ [deg]、初期距離 $L = 2.5$ [m] と設定した。

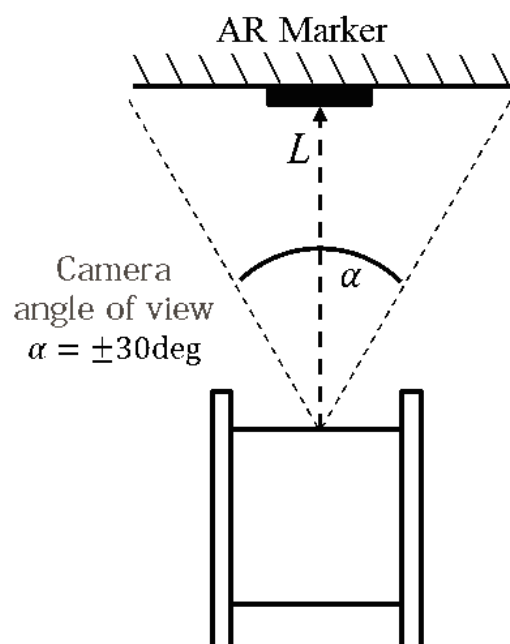


Fig. 2.30 Running course A

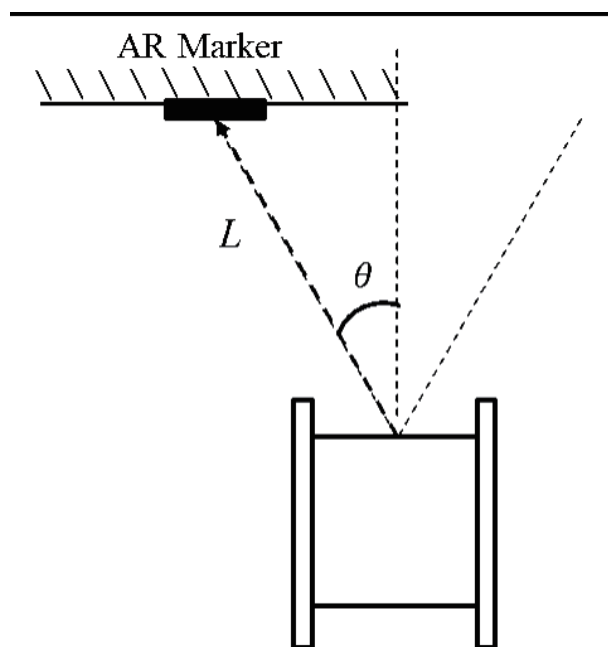


Fig. 2.31 Running course B

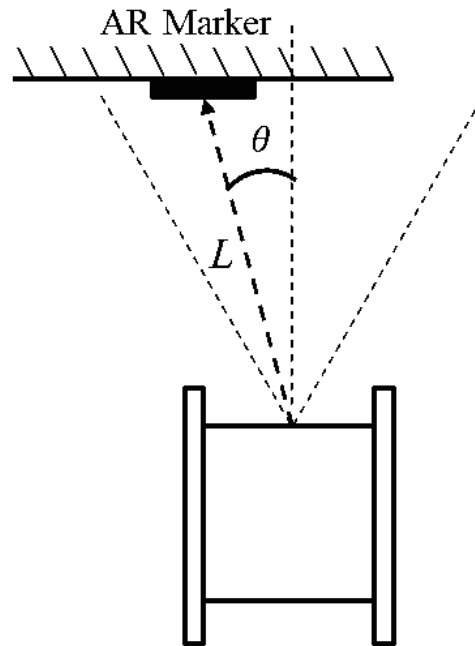


Fig. 2.32 Running course C

2.3.10 実験の結果と考察

横方向の電圧指令値に関して、今回の実験で横方向指令電圧値の結果は Fig. 2.33, Fig. 2.34 と Fig. 2.35 に示す。グラフの中で、赤い曲線は補正モデルなしシステムの横方向指令電圧値を表し、青い曲線は補正モデルありシステムの水平方向指令電圧値を表している。Fig. 2.33 に示すように、走行コース A の場合で、横方向の距離は小さいため、補正ありとなしシステムの電圧指令の変化は著しくない。コース A の場合で、補正あり、なしシステムでの電圧指令値は中央値に収束することが確認し、自動走行が完成することが分かった。

走行コース B の場合で、Fig. 2.34 の結果により、補正後のシステムは横方向の初期電圧指令値は予測した走行誤差によって大幅に抑制することを確認した。このことにより、電動車いすの横方向の初期移動速度を抑える。また、補正前のシステムでは、3[s] のときから目標の AR マーカーが車いすに搭載したカメラの視野から出るため、自動走行が中断することを確認した。一方、補正後のシステムで電圧指令値の変化が穏やかにすることと最後に目標までの走行を確認した。このことにより、AR マーカーが電動車いす走行中に搭載したカメラの視野から外さないように自動走行を完成することを確認した。

走行コース C の場合で、補正後は補正前より、横方向の電圧指令値は電動車いす停止の中央値になることが明らかにした。Fig. 2.35 の結果により、提案システムで電圧指令値を抑えることと横方向電圧指令値の変化が穏やかにすることを確認した。

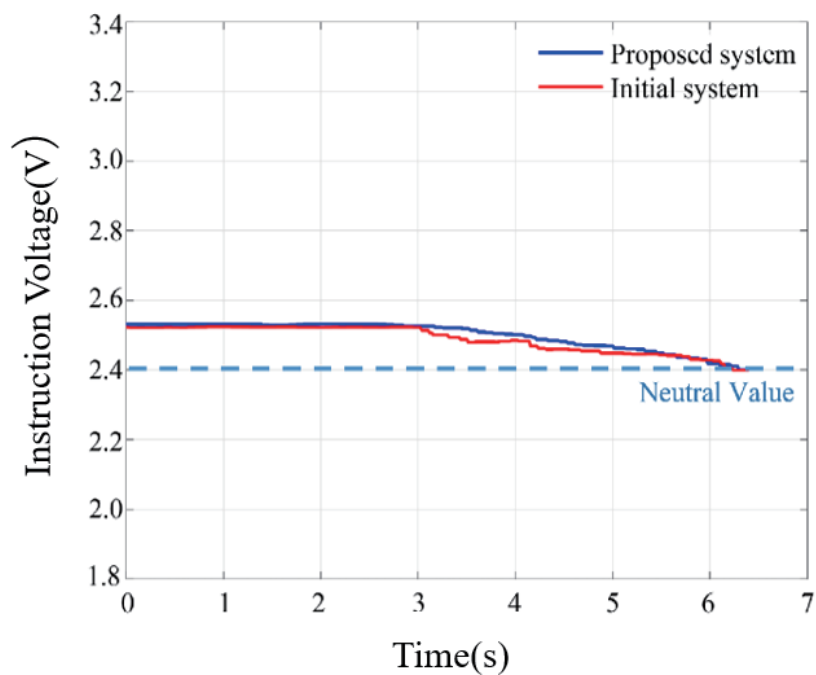


Fig. 2.33 Comparison of the velocity command voltage in course A

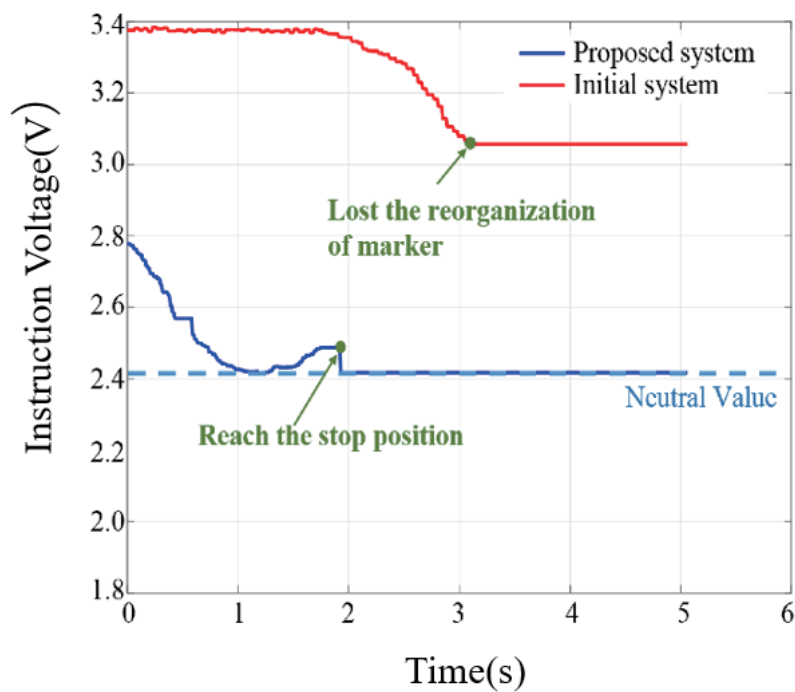


Fig. 2.34 Comparison of the velocity command voltage in course B

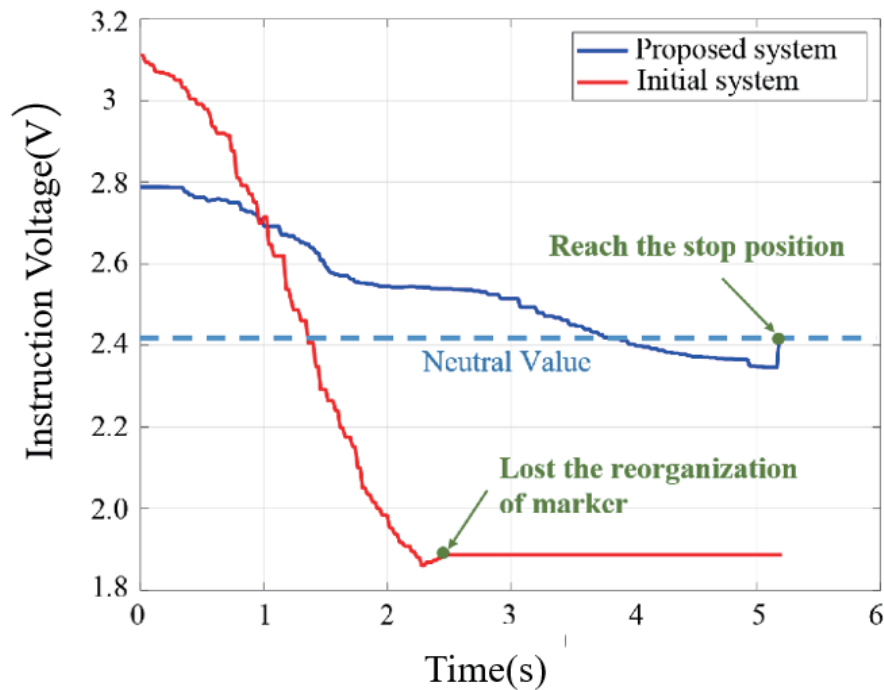


Fig. 2.35 Comparison of the velocity command voltage course C

一方、電動車いすの移動軌跡は以下にグラフに示す。グラフの中で、青い曲線は補正なしの軌道、赤い曲線は補正ありの軌道、黄色の破線は理想の軌道を表している。コース A の結果は、Fig. 2.36 に示すように、電動車いすはマーカの真正面にある場合には、インターフェースに横方向の指令電圧値が小さいため、補正前後の軌道の変化は著しくない。補正ありとなしシステムとも目標位置に到達した。しかしながら、Fig. 2.37 と Fig. 2.38 に示すように、コース B とコース C の場合、電圧値補正係数を導入すると、補正なしの場合より、理想の軌道に接近すると明らかにした。これにより本提案手法の有効性が示されたといえる。特にコース C、すなわち、認識されたマーカはインターフェース画面端にある場合で、補正なしシステムは途中で AR マーカが外れて、目標位置に到達できなくなってしまう。それに対して、補正モデル導入したシステムで理想の軌道に近い軌跡で目標位置に達成したことがわかる。

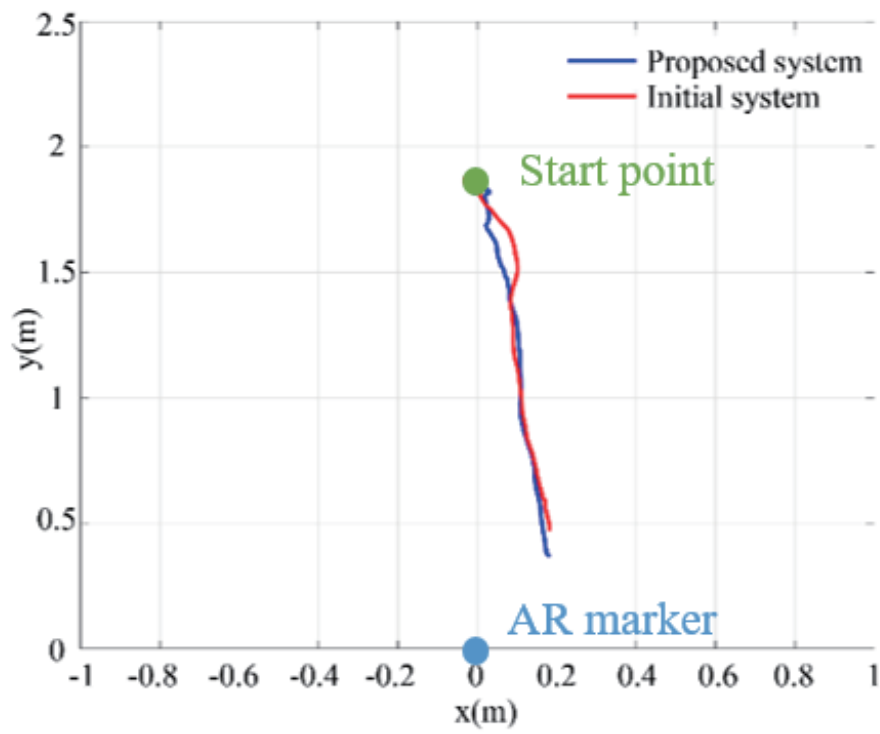


Fig. 2.36 Comparison of the moving trajectory in course A

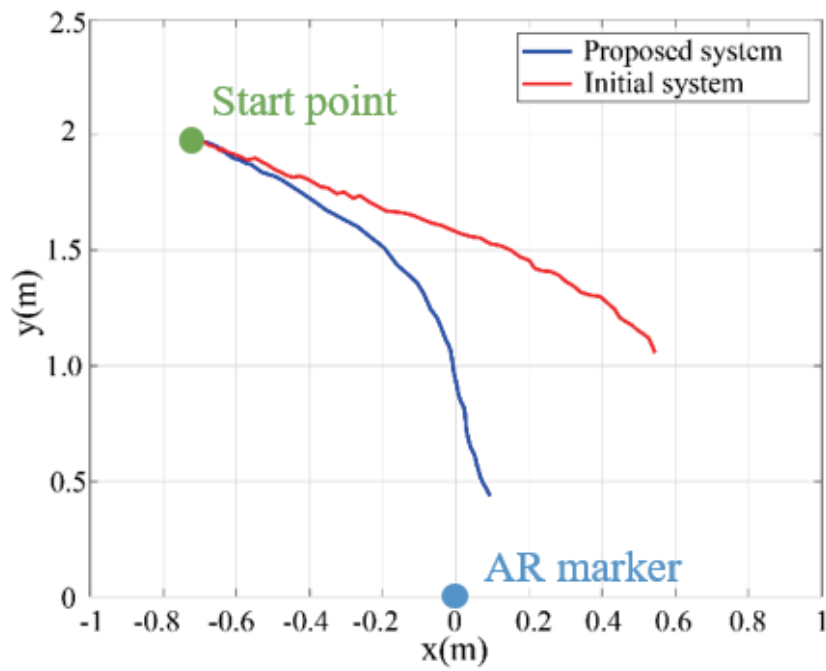


Fig. 2.37 Comparison of the moving trajectory in course B

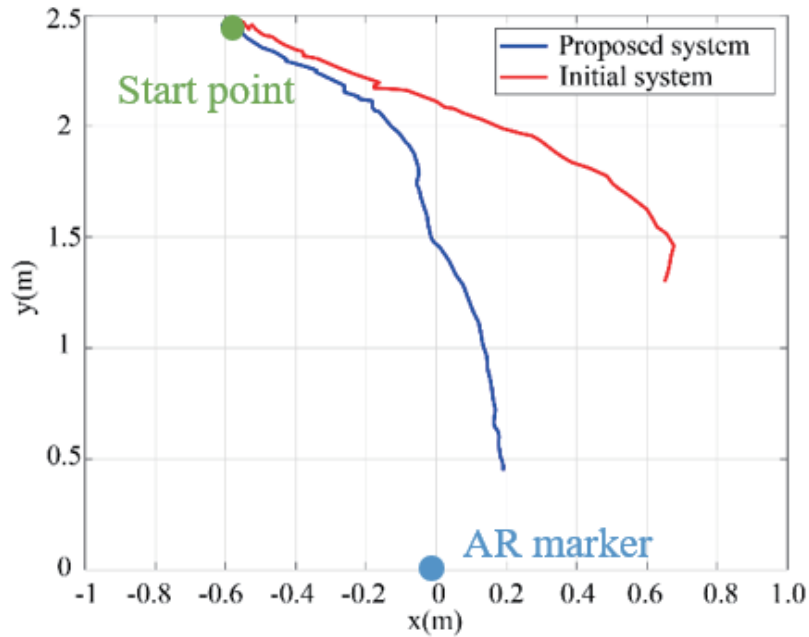


Fig. 2.38 Comparison of the moving trajectory in course C

2.4 まとめ

本章では頸髄損傷者を対象とした電動車いす操作システムを提案した．提案の手動インタフェースでは，頸髄損傷者の小指の第二関節を用いてスマートフォン操作を行うため，タッチ点の目視が困難という点から操作者自身が想定したタッチ点と実際のタッチ点との偏差によって意図した操作が行えないという問題を取り上げた．その問題を解決するために最初のタッチ点を原点とする GUI と入力値の補正方法を考案し，実験を行った．実験結果において，操作時間の面から操作性の向上，本研究の有効性を示した．また，提案した AR マーカー認識による電動車いす自動走行システムでは，視角が限定されるセンサーで目標物を認識しながら自動走行を行うとき，目標物をセンサーの視野から外れる場合自動走行を完成できない問題を取り上げた．その問題を解決するために，重回帰分析の手法を用いて走行誤差をモデル化にして誤差補正モデルを構築した．予測誤差と電動車いす姿勢・位置の関係を分析し，速度指令電圧を補正する方式を提案した．この補正を行った速度指令電圧を電動車いすの速度指令として与えることにより，自動走行中の際に電動車いすの走行誤差を補正した．最後に，提案システムあり・なし電動車いすの比較走行実験を行い，電圧指令値および走行軌道の結果により提案手法の有効性を示した．

第3章 ロボットアーム手動操作インターフェース

3.1 本研究で使用するロボットアーム

3.1.1 基本構造

本研究で用いるロボットアームを Fig. 3.1 に示す．基本的な仕様を Table 3.1 に示す．

Table 3.1 Specification of the robot arm Udero

DOF	4 (Arm) + 3 (Wrist) + 1 (Hand)
Max. Reach	88.5 cm
Max. Total weight	6.0 kg
Max. Payload	1.0 kg
Max. Movement speed	20.0 cm/s

このロボットアームは，電動車椅子に取り付けられるように根元部分をコンパクトにし，周囲からの違和感のないデザインとなるように，人間の腕のように根元から手先にかけて細くなるような構造となっている．ロボットアームの仕様とし節軸が互いに直交する S-R-S 型のロボットアームであり，根元の関節から順に J_1, J_2, \dots, J_7 とする．このような関節構造は，第 1 関節から第 3 関節を肩関節，第 5 関節から第 7 関節を手関節として，球関節のように置き換えられ，第 4 関節は肘関節に置き換えられる．ロボットアームの関節可動域は Fig. 3.2 に示すように物理的干渉が起きない領域で，人間よりも大きな関節可動域を保証している．

リンクの長さは，人間手（手首から指先），前腕（上腕と前腕を 90 度に曲げたときの肘先から指），上肢（腕を鉛直下方向に伸ばしたときの肩先から指先）の長さの平均値を参考に設計されており，ハンド先端から $J_{(1,2,3)}, J_4, J_{(5,6,7)}$ までの長さをそれぞれ，19.0 [cm]，47.0 [cm]，75.0 [cm]，全長は 88.5 [cm] となっている．

また，テーブル上や床のものを拾い自分の元に搬送できることを前提に設計されており，500.0 [ml] のペットボトルやコップなどの搬送を想定しているため，可搬重量は最大リーチ時に 1.0 [kg] となっている．ロボットアームの上腕リンクと前腕リンクが同一直線上にある場合，肘関節は 2 つのリンクと直交する回転軸を持つため，リンクがお互いに干渉しやすく，可動域が小さくなってしまう．そのため，本研究で用いるロボットアームでは，上腕リンクと前腕リンクの間にオフセットを設け，肘関節の屈曲角が 180.0 [deg] まで動作することが可能である．これにより，ロボットアームは全方

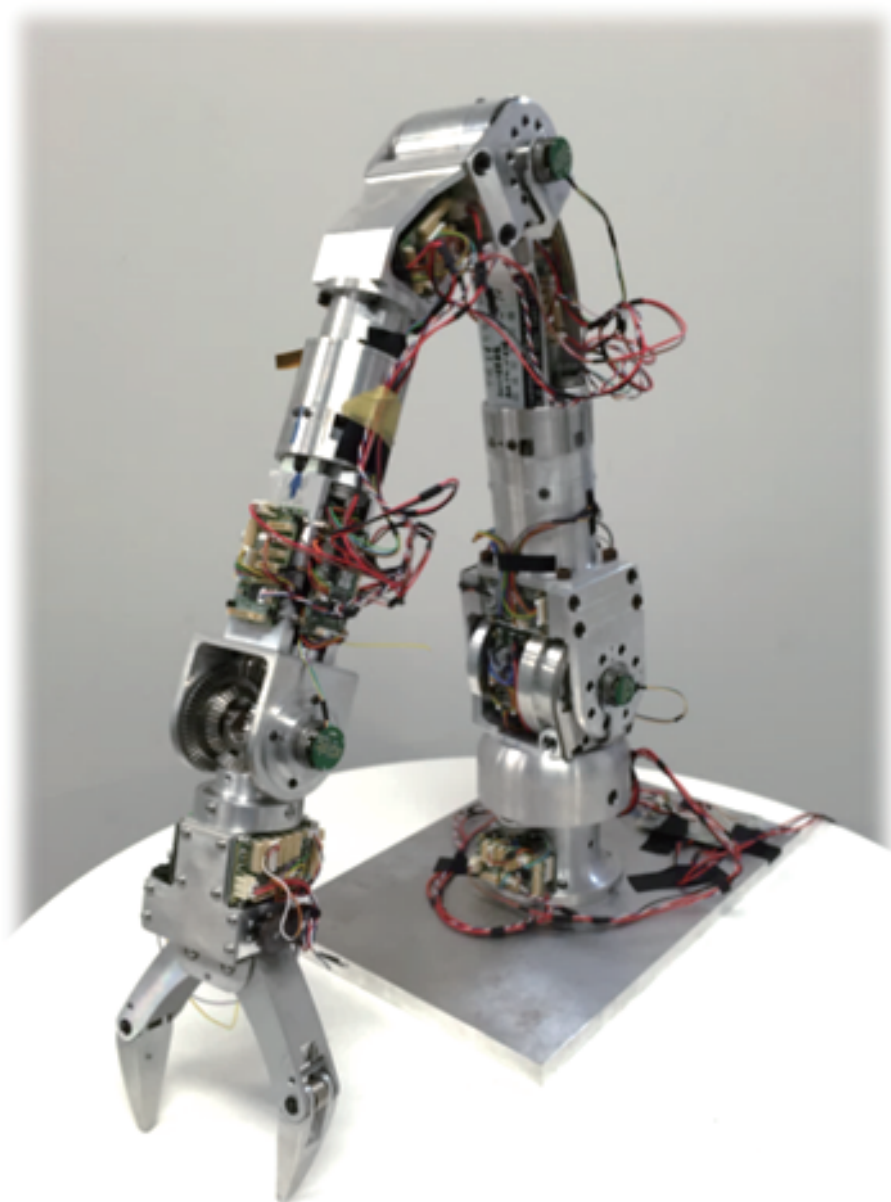


Fig. 3.1 7-DOF robot arm Udero

向から見ても，スリムな形状に見えるだけでなく，Fig. 3.3 に示すように，コンパクトに折りたたむことができる．また， 180.0 [deg] 曲がることによって省スペース化を図るだけでなく，ロボットアームの根元にあるものを拾いやすい構造となっている．

3.1.2 システムの構成

ロボットアームのシステムの構成を Fig. 3.4 の様になっており，CAN-USB を用いることでロボットアームと PC をシリアル通信で接続している．

ロボットアームには各関節ごとに DC モータ，モータドライバ，コントローラ，エン

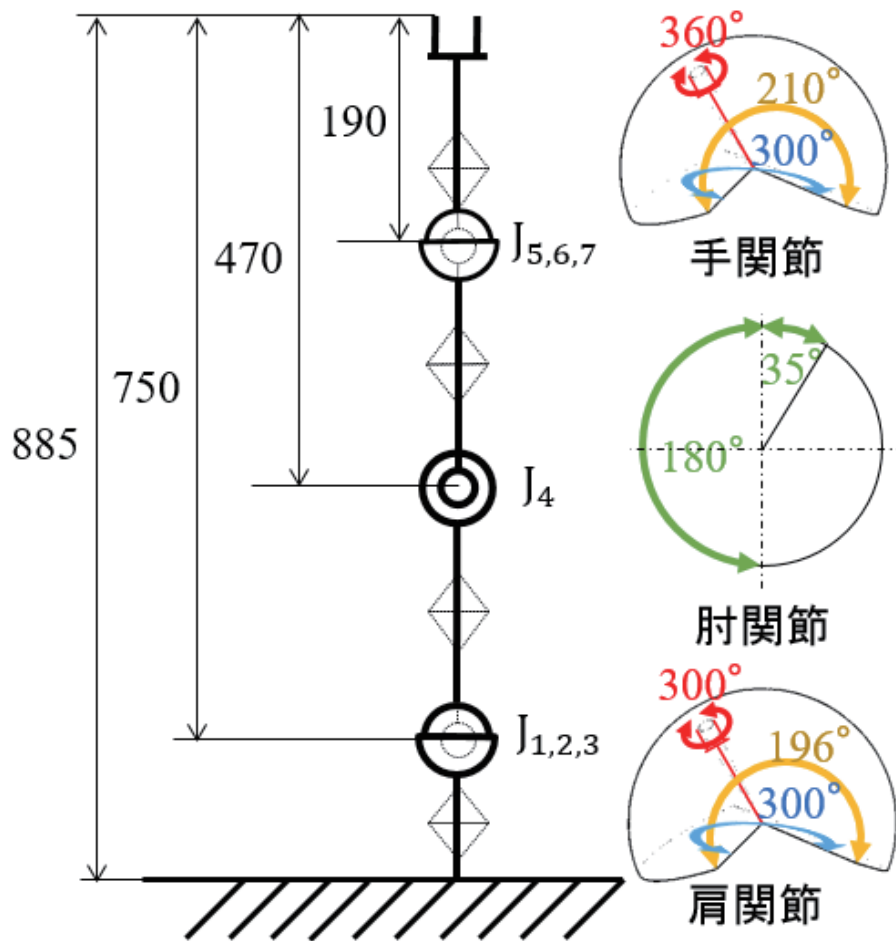


Fig. 3.2 Structure of the robot arm

コードが取り付けられている。モータには moxon motor 製のブラシレス DC モータを使用し、モータへの電源供給は 24.0 [V] のバッテリーを用いる。コントローラには HiBot 製の TITech M4 Robot Controller を使用し、コントローラへの電源供給は 5.0 [V] バッテリーを用いる。動力学モデルシミュレータとして、オープンソースの GUI ソフトウェアの Choreonoid を用い、ロボットアームの姿勢状態や動作を確認する。インターフェースは、例としてジョイスティックとボタンを搭載したゲームパッドなどがある。

3.2 Udero の運動学

3.2.1 Udero の順運動学

ロボットアームの基本仕様として、関節の自由度は、ハンドを除いて、合計 7 自由度である。アーム長は最大 89.0 [cm] とした。ロボットアームの重量は 6.0 [kg]、可搬質量は、腕を伸ばした状態で 1.0 [kg]、最大回転速度は、従来のロボットアームの製品を参考に、10.0 [rpm] とした。ロボットアームの要求事項として、ペットボトルやコッ

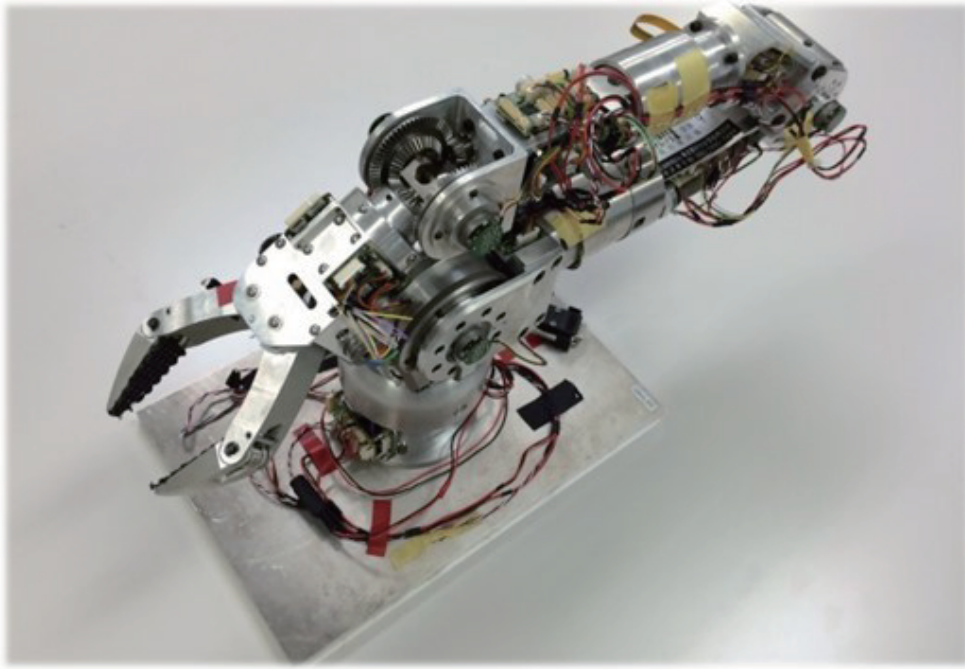


Fig. 3.3 Folding state

Table 3.2 D-H parameter of Udero

i	θ_i [deg]	α_i [deg]	d_i [cm]	a_i [cm]
1	θ_1	-90	d_1	0
2	θ_2	90	d_2	0
3	θ_3	-90	d_3	0
4	θ_4	90	d_4	0
5	θ_5	-90	d_5	0
6	θ_6	90	d_6	0
7	θ_7	0	d_7	0

ブなどのものを拾い，操作者の手元に搬送することを想定して設計を行う．

ロボットアームの関節可動域は，物理的干渉が起きない領域で，人間よりも大きな関節可動域を保証できるように設計をする．リンクの長さは，人間の手（手首から指先），前腕（上腕と前腕を 90 [deg] に曲げたときの肘先から指先），上肢（腕を鉛直下方向に伸ばしたときの肩先から指先）の長さの平均値を参考にしする．

Denavit-Hartenbreg 法より Udero の D-H パラメータは Table 3.2 に示す．

ロボットアームの手先位置・姿勢は絶対座標系 Σ_0 から見た手先座標系 Σ_7 の位置・姿勢として表すことができる．いま，絶対座標系から見た手先座標系の原点位置を x_{0-7} ，姿勢を R_{0-7} とすると，通常の順運動学解析より，次の関係式が得られる．

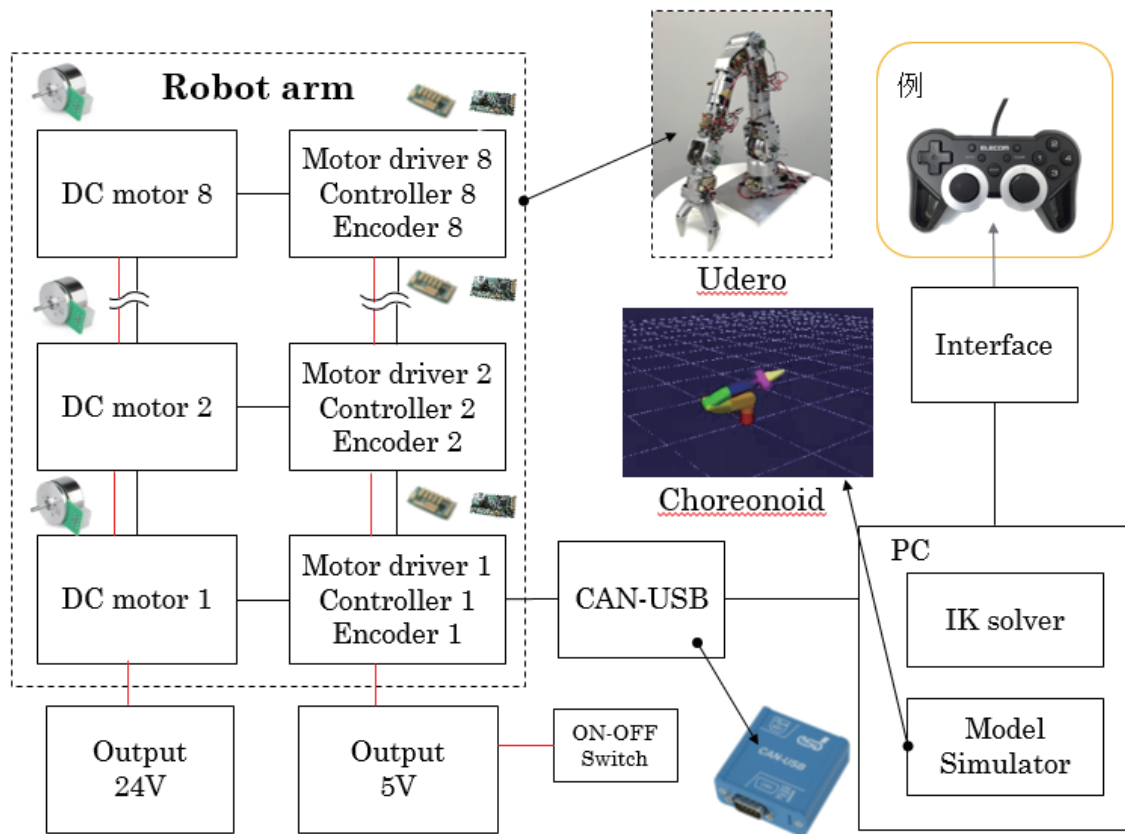


Fig. 3.4 System configuration

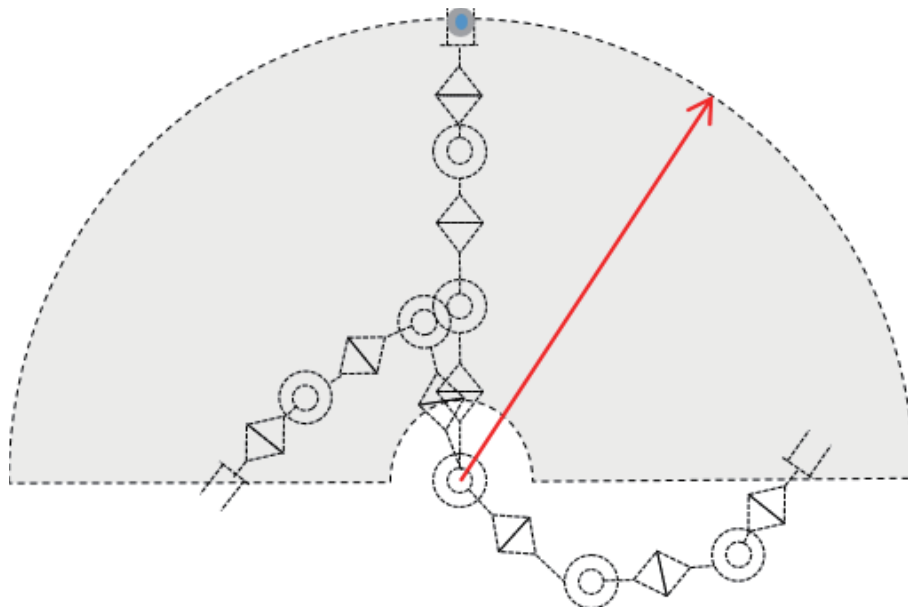


Fig. 3.5 Working range of Udero

$$x_{0-7} = l_{0-bs} + R_{0-3}[l_{3-se} + R_{3-4}(l_{4-ew} + R_{4-7}l_{7-wt})] \quad (3.1)$$

$$R_{0-7} = R_{0-3}R_{3-4}R_{4-7} \quad (3.2)$$

座標系 Σ_{i-1} と座標系 Σ_i の間の回転行列 R は次式のように求められる．

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix}$$

l_{0-bs} , l_{3-se} , l_{4-ew} , l_{7-wt} は、それぞれ、絶対座標系原点から肩位置までのベクトル、肩位置から肘位置までのベクトル、肘位置から手首位置までのベクトル、および手首位置から手先位置までのベクトルである．手先位置・姿勢が指定された場合、 x_{0-7} と R_{0-7} は一定となるため、Eq. (3.3) より得られる次のベクトル、

$$x_{0-sw} = x_{0-7} - l_{0-bs} - R_{0-7}l_{7-wt} = R_{0-3}(l_{3-se} + R_{3-4}l_{4-ew}) \quad (3.3)$$

は固定ベクトルとなる．Eq. (3.3) の右辺は、肩から手首までの位置ベクトルに相当する．

3.2.2 Udero の逆運動学

Udero の関節数が冗長であるため、いずれかの関節角度を任意とし、他の角度をそれに依存して決定する必要がある．今回、冗長関節は第3関節を設定にする．ロボットアームの目標手先位置・姿勢が x_{0-7} および R_{0-7} で指定されたとする．前節の解析結果に基づいて、各関節変位は以下のように計算できる．

θ_4 の計算

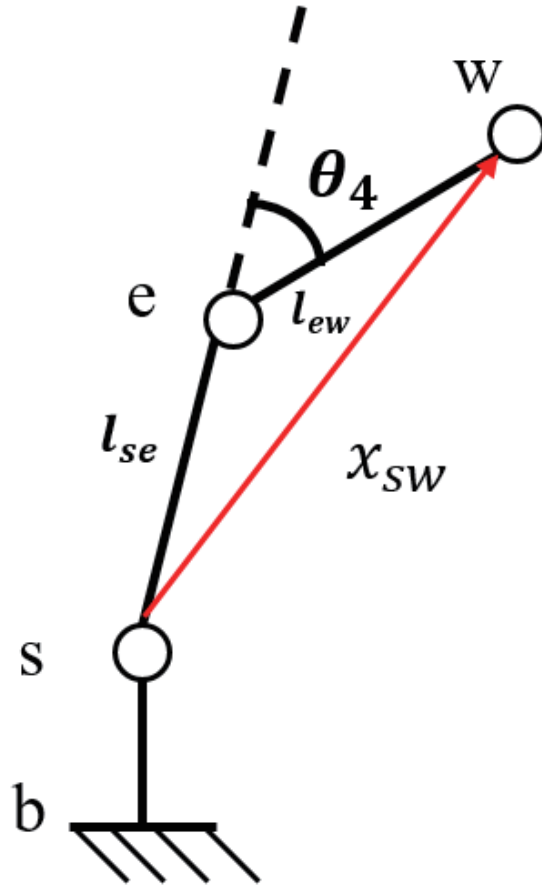
はじめに、肩から手首までのベクトル x_{0-sw} を Eq. (3.4) より計算する．Eq. (3.5) で両辺のノルムの二乗和を計算し、 $\sin \theta_4 = \sqrt{1 - \cos \theta_4^2}$ を代入すると、肘関節変位は Eq. (3.7) より求めることができる．

$$x_{0-sw} = R_{0-3}(l_{3-se} + R_{3-4}l_{4-ew}) \quad (3.4)$$

$$|x_{0-sw}|^2 = |l_{3-se}|^2 + |l_{4-ew}|^2 + 2(l_{3-se}^T R_{3-4}l_{4-ew}) \quad (3.5)$$

$$\cos \theta_4 = \frac{|x_{0-sw}|^2 - |l_{3-se}|^2 - |l_{4-ew}|^2}{2|l_{3-se}||l_{4-ew}|} \quad (3.6)$$

$$\theta_4 = \arctan(\sin \theta_4, \cos \theta_4) \quad (3.7)$$

Fig. 3.6 Calculation of θ_4

$\theta_{1, 2}$ の計算

$\theta_3=0$ を Eq. (3.3) に代入すると, Eq. (3.8) になる,

$$x_{0-7} - l_{0-bs} - R_{0-7}l_{7-wt} = R_1R_2R_{3(\theta_3=0)}(l_{3-se} + R_4l_{4-ew}) \quad (3.8)$$

Eq. (3.8) を計算すると, 右辺は,

$$\begin{pmatrix} a \sin \theta_2 \cos \theta_1 & b \sin \theta_2 \sin \theta_1 & c \cos \theta_2 \end{pmatrix}$$

となる. ここで, a , b と c はそれぞれ目標位置によって決められるスカラーである. 全部のパラメータが分かるため, 左辺は簡単に計算することができる. 今回は,

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \end{pmatrix}$$

と表記される. 右辺と左辺を比較すると,

$$a_{11}^2 + a_{12}^2 = a^2(\sin \theta_2)^2 \quad (3.9)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{a_{13}}{a} \quad (3.10)$$

以上より, θ_2 は Eq. (3.11) で計算することができる. θ_1 は同様に算出することができる.

$$\theta_2 = \arctan 2(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \quad (3.11)$$

$\theta_5, 6, 7$ の計算

Eq. (3.2) より, Eq. (3.12) の関係が得られる,

$$R_{4-7} = R_{3-4}^T R_{0-3}^T R_{4-7} \quad (3.12)$$

Eq. 3.12 を計算すると, 左辺は

$$R_{4-7} = \begin{pmatrix} - & - & \cos \theta_5 \sin \theta_6 \\ - & - & \sin \theta_5 \sin \theta_6 \\ -\sin \theta_6 \cos \theta_7 & \sin \theta_6 \cos \theta_7 & \cos \theta_6 \end{pmatrix}$$

となる. ここで, “ - ” で示されている成分が不要のため省略した. 一方, 右辺は

$$r = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

となる. 以上より,

$$\cos \theta_6 = r_{33} \quad (3.13)$$

$$(\sin \theta_6)^2 = r_{31}^2 + r_{32}^2 \quad (3.14)$$

したがって, θ_6 は Eq. (3.15) で計算することができる. θ_5 と θ_7 は同様の流れで算出することができる.

$$\theta_6 = \arctan(\sin \theta_6, \cos \theta_6) \quad (3.15)$$

3.2.3 指定座標は動作範囲を超える場合

Udero を操作するとき, 指定する目標位置はロボットアームの伸びる範囲を超える場合も存在する. このとき, 前節で述べる関節変位の計算方法は使えなくなってしまう. Fig. 3.7 のように, 目標位置はロボットアームの伸びる範囲を超える場合, 関節 J_3 から J_7 までのリンクは最大伸展にし, $\theta_{1,2}$ は目標位置によって変化することが分かりやすい. $\theta_{1,2}$ は三角関数で簡単に計算することができる.

$$\theta_1 = \arctan \frac{x}{y} \quad (3.16)$$

$$\theta_2 = \arccos \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - L_0 - L_1)^2}} \quad (3.17)$$

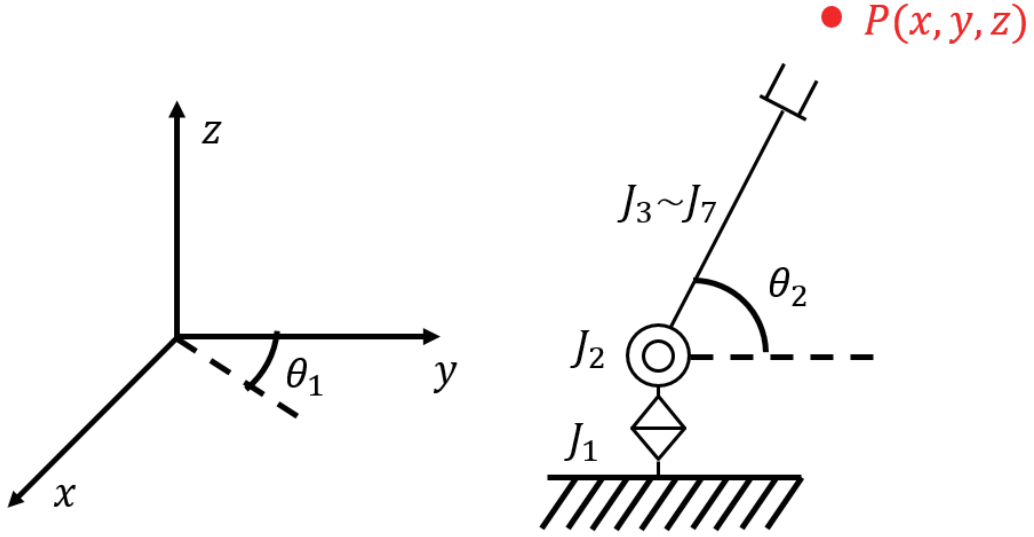


Fig. 3.7 The specified coordinates exceed the movable range

3.2.4 実装と改善

今回、逆運動学のソルバを C シャープで作成し、Unity で Udero 動きのシミュレーションを行った。シミュレーションの結果より、開発した逆運動学ソルバの有効性を検証した。しかしながら、シミュレーションの際に、開発したソルバはいくつか問題が反映している。この節で、これらの問題に対し、説明と解決策を討論する。

ずれる量の修正

Unity で Udero の動きをシミュレーションする際に、一直線の形で Udero のモデルを作成する。しかしながら、実際には、Udero 前腕と上腕は同一直線上の場合で、前腕リンクと上腕リンクの間に物理的な干渉を起こさないために、Fig. 3.8 に示すように、第 4 関節にオフセットを設計する。この原因より、これまでに想定した一直線のモデルを使うときずれが発生してしまう。

この問題を解決するために、オフセットを考慮する L_{se} と L_{ew} の補正と角度の補正が必要となる。 L_{se} と L_{ew} の長さは Eq. (3.18) と Eq. (3.19) より得られる、

$$L_{se} = \sqrt{(L_2 + L_3)^2 + (L_{offset})^2} \quad (3.18)$$

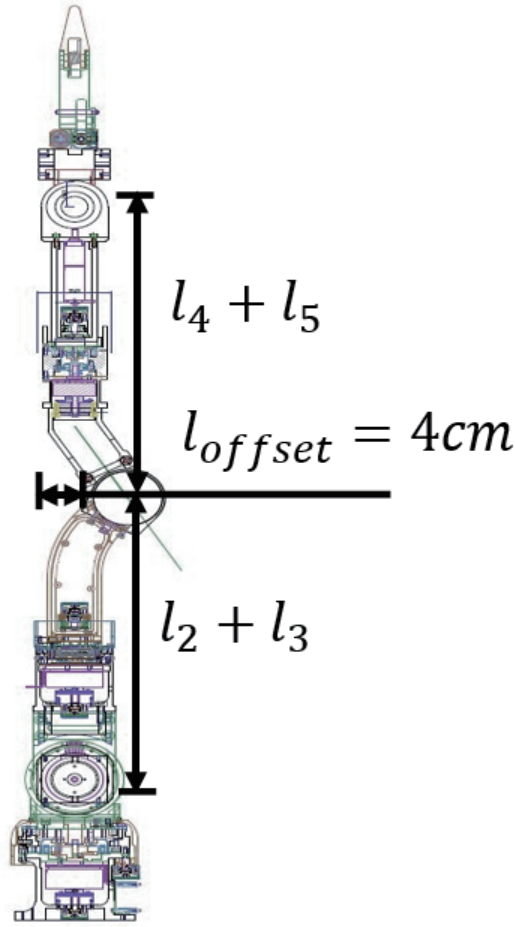


Fig. 3.8 Offset in the 4th Joint

$$L_{ew} = \sqrt{(L_4 + L_5)^2 + (L_{offset})^2} \quad (3.19)$$

角度の補正については、第2関節から第4関節を結ぶ線の垂直からずれる角度 θ_{24} がEq. (3.20)で計算することができる。同様に、第4関節から第6関節を結ぶ線の垂直からずれる角度 θ_{46} がEq. (3.21)で計算することができる。

$$\theta_{24} = \arctan \frac{L_{offset}}{L_2 + L_3} \quad (3.20)$$

$$\theta_{46} = \arctan \frac{L_{offset}}{L_4 + L_5} \quad (3.21)$$

そのため、補正した θ_2 と θ_4 はEq. (3.22)とEq. (3.23)で計算することができる。

$$\theta_{2c} = \theta_2 - \theta_{24} \quad (3.22)$$

$$\theta_{4c} = \theta_4 + \theta_{24} + \theta_{46} \quad (3.23)$$

補正した結果として，Unity でシミュレーションしを実行し，ずれる量を回避することを確認した．

第 6，7 関節実際出力の計算

Udero 実機の第 6 と第 7 関節の構造は Fig. 3.9 に示す．これはモデルに設定した関節結構と同じではない．実機では，2 つかさ歯車の共同作用でモデルの第 6，7 関節の回転を実現する．そこで，実機を動く際に，直接に第 6，7 関節モーターにモデルの θ_6 と θ_7 の値を渡すことがいけない．

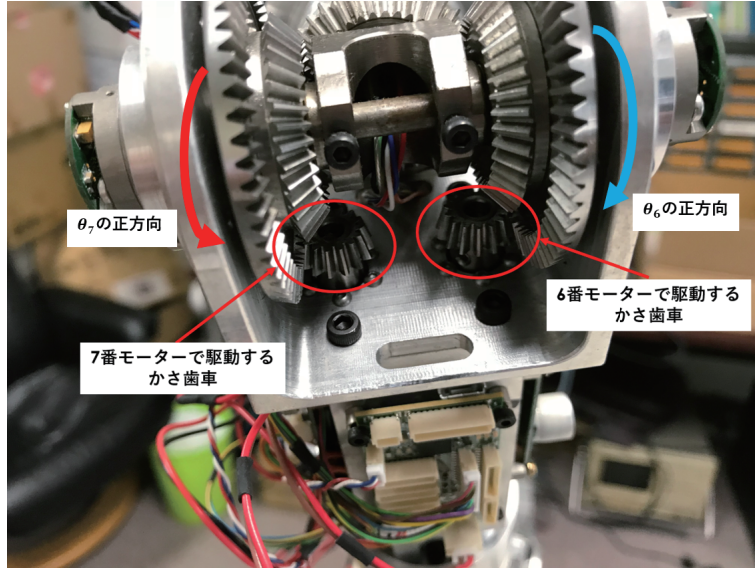


Fig. 3.9 Structure of 6th and 7th joint

実機の J6，J7 のモーターの回転角度をそれぞれ ϕ_6 と ϕ_7 にし，差動ギア原理より，モデルで第 6 関節の回転角度が θ_6 ，第 7 関節の回転角度が θ_7 の場合で，Eq. (3.24) と Eq. (3.25) で計算することができる．Eq. (3.24) と Eq. (3.25) を連立すると， ϕ_6 と ϕ_7 は Eq. (3.26) と Eq. (3.27) で計算することができる．

$$\theta_6 = \frac{-(\phi_7 - \phi_6)}{2} \quad (3.24)$$

$$\theta_7 = \frac{(\phi_7 + \phi_6)}{2} \quad (3.25)$$

$$\phi_6 = \theta_6 + \theta_7 \quad (3.26)$$

$$\phi_7 = \theta_7 - \theta_6 \quad (3.27)$$

アーム動きの調整

Unity で Udero のシミュレーションを行う際に、アーム動きが不自然の問題を確認しました。Table 3.3 にロボットアームは初期位置 $(0, 1, 0)$ から目標位置 $(0, 0.5, 0)$ まで移動する際の関節回転角度とかかる時間を示す。また、初期位置 $(0, 1, 0)$ から目標位置 $(1, 1, 0)$ まで移動する際の関節回転角度とかかる時間を Table 3.4 に示す。この2つ表から、ロボットアームが移動するとき、関節の回転角速度はほぼ同じで $8.8[\text{deg/s}]$ となる。また、このアーム動きが不自然になる原因として、初期位置と目標位置による各関節の回転角度が異なる、しかし、関節の回転速度は同じであるため、目標位置に到達するまでかかる時間が異なる。

Table 3.3 Movement of J_2 and J_4

関節	角度偏差 [deg]	時間 [s]	角速度 [deg/s]
J_2	54.5	6.4	8.5
J_4	114.4	12.9	8.8

Table 3.4 Movement of J_1

関節	角度偏差 [deg]	時間 [s]	角速度 [deg/s]
J_1	90.0	10.3	8.7

この問題の解決策として角度変化量が大きな関節の回転角速度を抑えると考える。第6, 7関節は姿勢を指示するために、今回第1, 2, 4三つの関節だけ考える。具体的な、まず、初期位置の J_1 , J_2 と J_4 関節の角度はそれぞれ $\theta_{1(t=0)}$, $\theta_{2(t=0)}$, $\theta_{4(t=0)}$, 目標位置の角度がそれぞれ $\theta_{1(t)}$, $\theta_{2(t)}$, $\theta_{4(t)}$ と設定すると、初期位置から目標位置までの角度変化量は以下のように計算できる。

$$\Delta\theta_1 = |\theta_{1(t)} - \theta_{1(t=0)}| \quad (3.28)$$

$$\Delta\theta_2 = |\theta_{2(t)} - \theta_{2(t=0)}| \quad (3.29)$$

$$\Delta\theta_4 = |\theta_{4(t)} - \theta_{4(t=0)}| \quad (3.30)$$

また、初期位置から目標位置までかかる時間は以下のように計算できる。

$$t_1 = \frac{\Delta\theta_1}{\omega_n} \quad (3.31)$$

$$t_2 = \frac{\Delta\theta_2}{\omega_n} \quad (3.32)$$

$$t_4 = \frac{\Delta\theta_4}{\omega_n} \quad (3.33)$$

ω_{1i} , ω_{2i} と ω_{4i} は初期回転角速度を表している． ω_n は初期回転角速度で， $9[\text{deg/s}]$ である． t_1 , t_2 と t_4 を一致し，関節の角速度制限を超えないために， J_1 , J_2 と J_4 関節の角速度 $\omega_{1, 2, 4}$ は下の式で計算できる．

$$\omega_i = \frac{\Delta\theta_i}{\max(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_4)} \times \omega_n (i = 1, 2, 4) \quad (3.34)$$

そこで， J_1 , J_2 と J_4 の角度は以下のように計算することができる．

$$\theta_{1(t)} = \omega_1 \times t + \theta_{1(t=0)} \quad (3.35)$$

$$\theta_{2(t)} = \omega_2 \times t + \theta_{2(t=0)} \quad (3.36)$$

$$\theta_{4(t)} = \omega_4 \times t + \theta_{4(t=0)} \quad (3.37)$$

3.3 予備実験

予備実験として，一般のジョイスティックとボタンによる操作でのコップの搬送実験を行った．被験者として，30代男性の頸髄損傷者1名にご協力いただいた．インターフェースとして Fig. 3.10 の様なジョイスティックとボタンを搭載したゲームパッドを用いた．



Fig. 3.10 Existing interface

操作方法として，右側のジョイスティックは，ロボットハンドの位置を地面と平行な水平面上を動作させるために使用し，傾けている間その方向にロボットハンドが移動

する．左側のジョイスティックは，ロボットハンドの位置を上下に動作させるために使用し，ジョイスティックの前後の傾きがロボットハンドの上昇下降に対応している．右側にある2番と3番のボタンは，それぞれロボットハンドの開閉に対応している．

実験環境は Fig. 3.11，Fig. 3.12 の様な配置となっており，ロボットアームの根元を原点とし 35.0 [cm] 前方の位置から右方向に 13.0 [cm] 離れた地点を A 地点とし，コップの初期位置とした．A 地点から左方向に 26.0 [cm] 離れた地点を B 地点とし，A 地点から B 地点へのコップの運搬を行う．コップは高さ 8.0 [cm]，上部直径 7.3 [cm]，底部直径 5.0 [cm] の物を使用する．

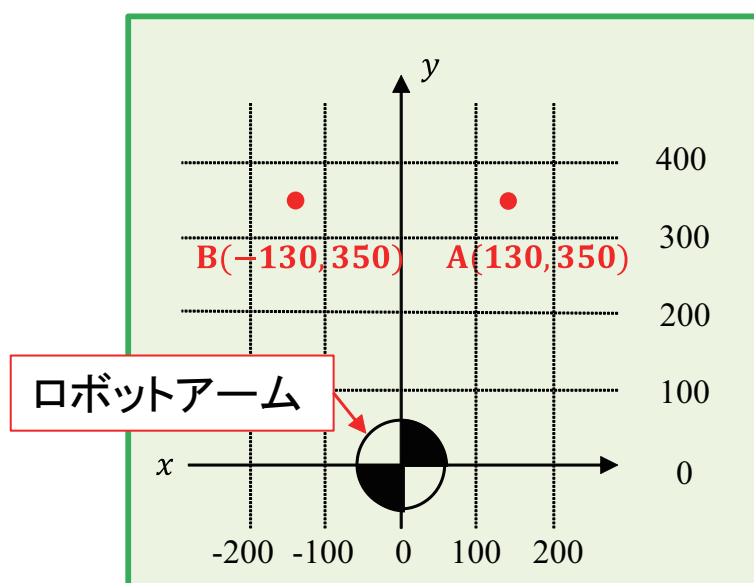


Fig. 3.11 Arrangement of preliminary experiment

操作者はロボットアームの左後方に位置し，安全のためロボットアームの届かない位置で操作を行う．目視によってロボットアームとコップとの距離を把握したうえで操作を行い，目標達成までの操作回数と時間を確認する．ここで操作回数とは，ロボットアームの動作が切り替わる操作を行った回数のことであり，ロボットアームが動きを止めてから次の動作に切り替わるタイミングで1回操作を行ったとカウントする．ジョイスティックとボタンによる操作の場合，操作回数はインターフェースから手が離れた回数に相当する．

実験結果として，単純なコップの運搬動作であっても操作回数が21回と，多くの操作が必要となってしまう，操作時間は約30[s]もかかってしまった．この結果から，ジョイスティックとボタンによる操作では，動作の切り替え操作が必要なために操作回数が増えてしまうことが確認できた．また，指が使えないため片手操作では2つ同時に入力することが困難であることが確認できた．

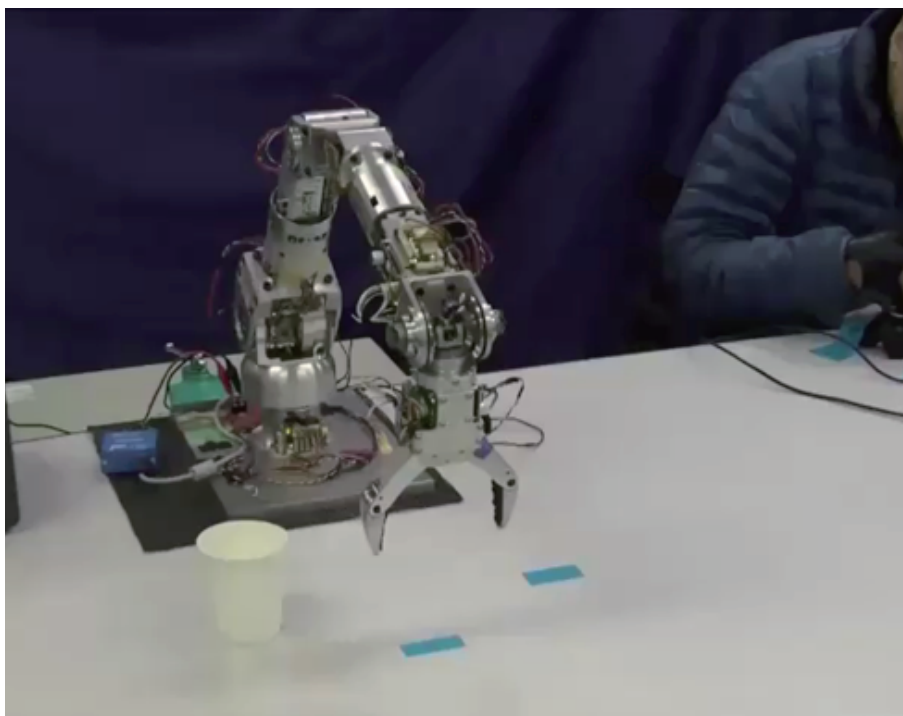


Fig. 3.12 Preliminary experiment

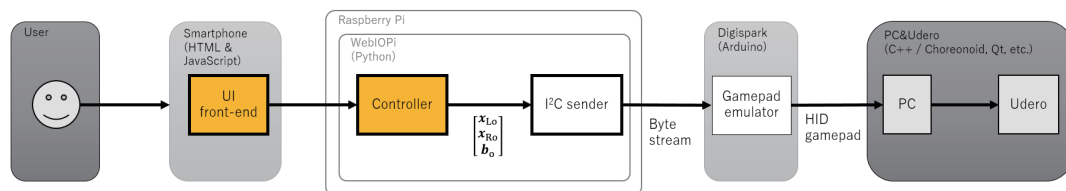


Fig. 3.13 Structure of operate system

3.4 タッチパネル上仮想ジョイスティックインターフェース

一般的なロボットアームはキーボードやジョイスティックなどのインターフェースを用いて操作する．しかしながら，上肢機能障害の状態によってはこれらのインターフェースを使用することが困難な場合がある．本研究では，上肢機能障害者を対象として，タッチパネル上仮想ジョイスティック操作インターフェースを開発する．

3.4.1 操作システムの構成

今回設計した操作システムは Fig. 3.13 に示すように，スマートフォン，RaspberryPi3B，Digispark と PC から構成される．スマートフォンを入力インターフェースと

して利用する利点はいくつかある。まず，スマートフォンは静電容量方式のタッチパネルを用いることにより，触ることだけで入力を認識できる。前腕機能不足患者や指が動かない患者にも対応することができる。また，従来のインターフェースと比べて，スマートフォンはロボットアームを操作することだけではなく，様々な装置のインターフェースとしても利用可能である。例えば，スマートフォンは車いすの操作インターフェースとしても利用できる。

さらに，スマートフォンには情報通信端末の一種として，近年急速に普及してきており，約 78 % の普及率に達した。この背景の下で，スマートフォンを入力装置として利用することにより，別の入力インターフェースをインストールする必要性が特になし，機材コストの低減を実現する可能となる。

スマートフォンから入力した値は RaspberryPi に送信する。RaspberryPi は，手のひらに載るほどの小さなコンピューターである。Fig. 3.14 に示す RaspberryPi に搭載する WebIOPi というソフトウェアを経由してスマートフォンと RaspberryPi の間の IoT（モノのインターネット）通信が実現する。WebIOPi の場合は，ブラウザから入出力を行う。ブラウザのボタンから GPIO を操作したり，逆に GPIO から値を取得して表示したりといったやりとりが簡単に実現できる。WebIOPi の詳細機能は Fig. 3.15 に示す。また，RaspberryPi3B 基本的な仕様を Table 3.5 に示す。

Table 3.5 Specification of RaspberryPi3B

CPU	Broadcom BCM2837
メモリ	1 GB
Bluetooth	BluetoothRV4.1
電源定格	DC 5.0 V
外形寸法	約 86.0(W) x 57.0(D) x 17.0(H) mm
動作温度範囲	0.0 ~ 70.0
質量	45.0 g

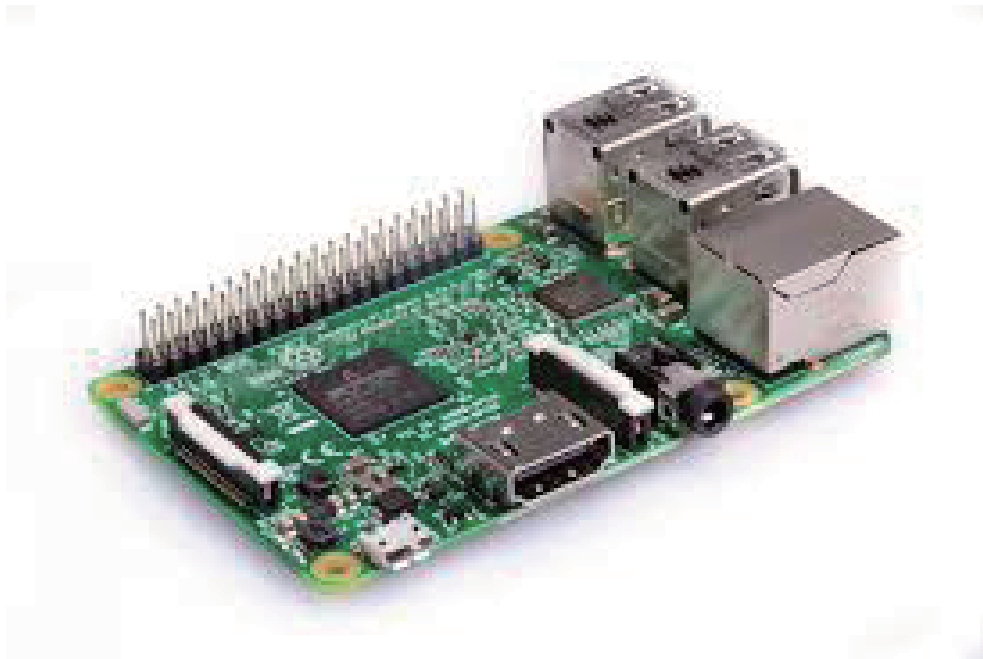


Fig. 3.14 RaspberryPi3B



Fig. 3.15 Function of webiopi

次に，WebIOPi の I2C 機能を用いて，タッチパッドのボタンの座標をシリアル信号に転換して Fig. 3.16 に示す Digispark に送信する．Digispark は AVR マイクロコントローラー Atmel Attiny85 を搭載しており，小さいながらも Arduino IDE（開発環境）を使用し，プログラミングを行うことができる．Arduino のプログラムを書き込むと，Digispark に搭載するゲームパッドエミュレータでロボットアームの操作を実現する．

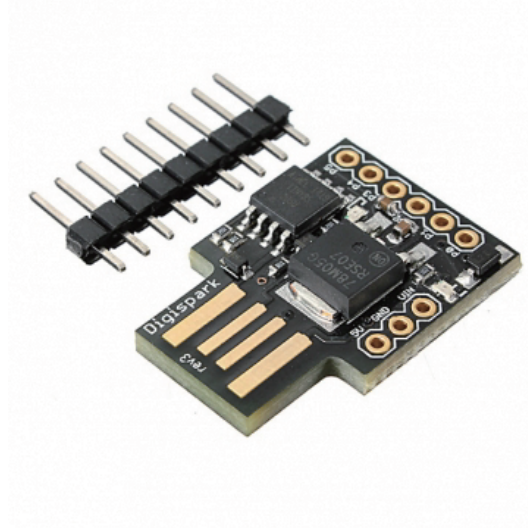


Fig. 3.16 Digispark

3.4.2 操作手法

スマートフォンの操作画面は Fig. 3.17 に示す．操作画面は RaspberryPi にストレージする Html 言語，JavaScript 言語を用いて作るウェブサイトのインターフェースである．スマートフォンは RaspberryPi と同じネットワークを使う際に，スマートフォンから画面を開くことができる．画面の真ん中にある円形ボタンはジョイスティックのようなトラックパッドであり，その上部にはトラックパッドのシリアル出力値 (1-255) が表示されている．このボタンを操作することにより，ロボットアーム水平面上の移動速度を指示でき，同時にトラックパッドの移動量によって値も更新される．画面の下にあるスライダー R_z を操作することにより，ロボットアームの手先の上下を調整できる．また，手先の姿勢を調整する場合に，スライダー Y_{aw} を使用する．また，ロボットアームの手先の開閉や，各初期姿勢の設定は画面の下にあるチェックボックスの操作により行う．

3.4.3 制御系設計

本研究では，基本的な PID 制御による位置制御を行う．ロボットハンドの位置制御を行うブロック線図は Fig. 3.18 のように示される．

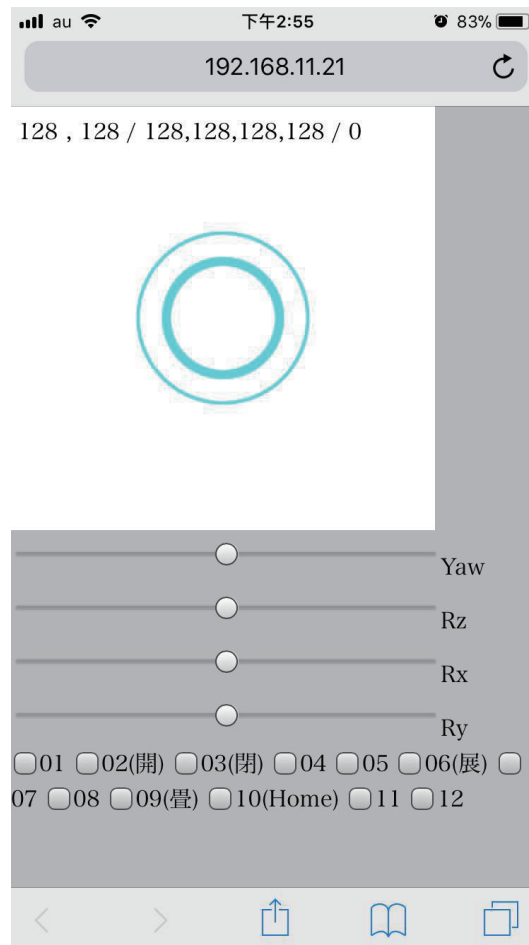


Fig. 3.17 Operate interface

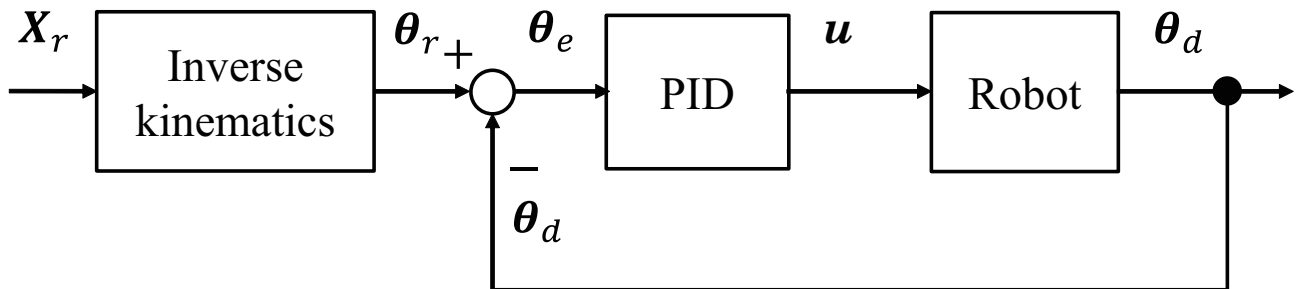


Fig. 3.18 Block diagram of control system

X_r はロボットハンドの目標位置, θ_r [deg] はロボットアームの各関節の目標角度, $u(t)$ [mv] はロボットアームへの指令電圧, θ_d [deg] はエンコーダによって検出されたロボットアームの各関節の角度, θ_e [deg] はロボットアームの各関節の目標角度と検出角度の偏差である. ロボットアームへの指令電圧 $u(t)$ [mv] は Eq. (3.38) で表される. ただし, K_P は比例ゲイン, K_I は積分ゲイン, K_D は微分ゲインである.

$$u(t) = K_P \theta_e(t) + K_I \int_0^t \theta_e(\tau) d\tau + K_D \dot{\theta}_e(t) \quad (3.38)$$

ロボットアームの作業空間におけるロボットハンドの位置決めを行う場合，ロボットハンドの位置からロボットアームの各関節を逆運動学で求めなければならない．

Fig. 3.19 にロボットアームの各関節の目標角度の出力までのブロック線図を示す． x はトラックパッドから読み取ったジョイスティックの座標と各ボタンの状態である． x_i は誤操作防止フィルタが濾過した入力座標である． $V_{joy}[\text{mv}]$ はロボットアームへの速度指令， $\Delta X_r[\text{cm}]$ はロボットハンドの移動量を表している．また， X_n はロボットハンドの現在の位置で， X_r が目標位置である． G_1 は濾過した入力座標をシリアル入力値に変換するスカラーゲインで， G_2 はロボットアームの速度ゲインである．トラックパッドの座標を取得と更新する式は Eq. (3.39) で表される．ただし， ΔX はジョイスティックのボタンの変位置で， R はジョイスティックのボタンの可動半径である．

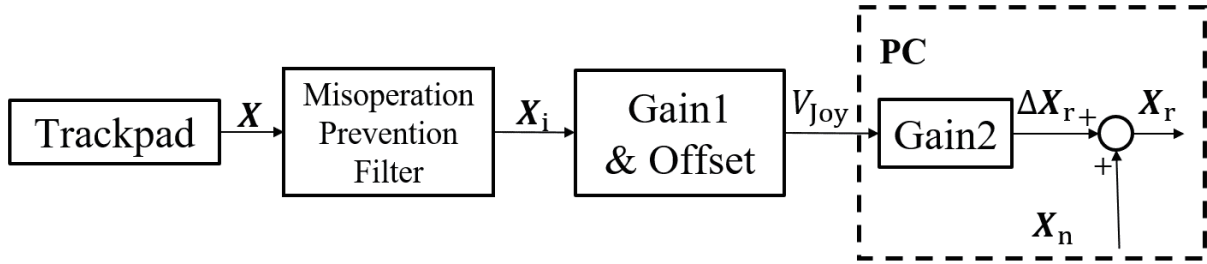


Fig. 3.19 Conversion of target position

$$x_i = 100 \times \frac{\Delta X}{R} \quad (3.39)$$

また，トラックパッド読み取られる座標から PC の入力値 x_l に変換する式は次式で表される．この式でトラックパッドの入力値 (1 – 100) はシリアルの入力値 (1 – 255) に変換することができる．ただし， X_o はジョイスティックの入力範囲 (1 – 255) の原点である．

$$x_l = x_i \times (X_o - 1) \times 0.01 + X_o \quad (3.40)$$

ロボットアームの手首の位置から各関節角度に変換するために逆運動学を解く．手首位置から関節角度を求めるために，ヤコビ行列を用いた数値的解法を行う．ロボットアームの各関節角度を決定するためには，ロボットハンドの位置と姿勢を決定する必要があり，位置決定のために 3 自由度，姿勢決定のために 3 自由度，合計 6 自由度必要である．本研究で用いるロボットアームは，人間の腕と同様に関節が 7 自由度持っており冗長性を有する．そのため，ヤコビ行列が正方行列ではなく逆行列の解が一意的に

定まらない．そこで，擬似逆行列を用いることで，関節角変位の二乗和を最小化するように拘束条件を与える．また擬似逆行列の計算は，SVD 法（特異値分解法）を用いて求める．

3.4.4 動作確認

スマートフォンで操作し，トラックパッドの座標をロボットハンドの目標座標に変換するような操作方法で動作確認を行った．Fig. 3.20 のように，トラックパッドを操作すると，ロボットハンドは指定する方向に従って移動することを確認した．しかしながら，スマートフォンのタッチパネルをタッチする開始の際に，操作画面の中央にあるボタンは可動範囲内の任意位置にタッチを検出すれば，インターフェースの座標更新を行い，ロボットアームの誤動作が起こってしまう．そのため，タッチ開始の点の座標を認識でき，閾値を超える点を取り除くフィルタを操作システムに導入することが必要となる．

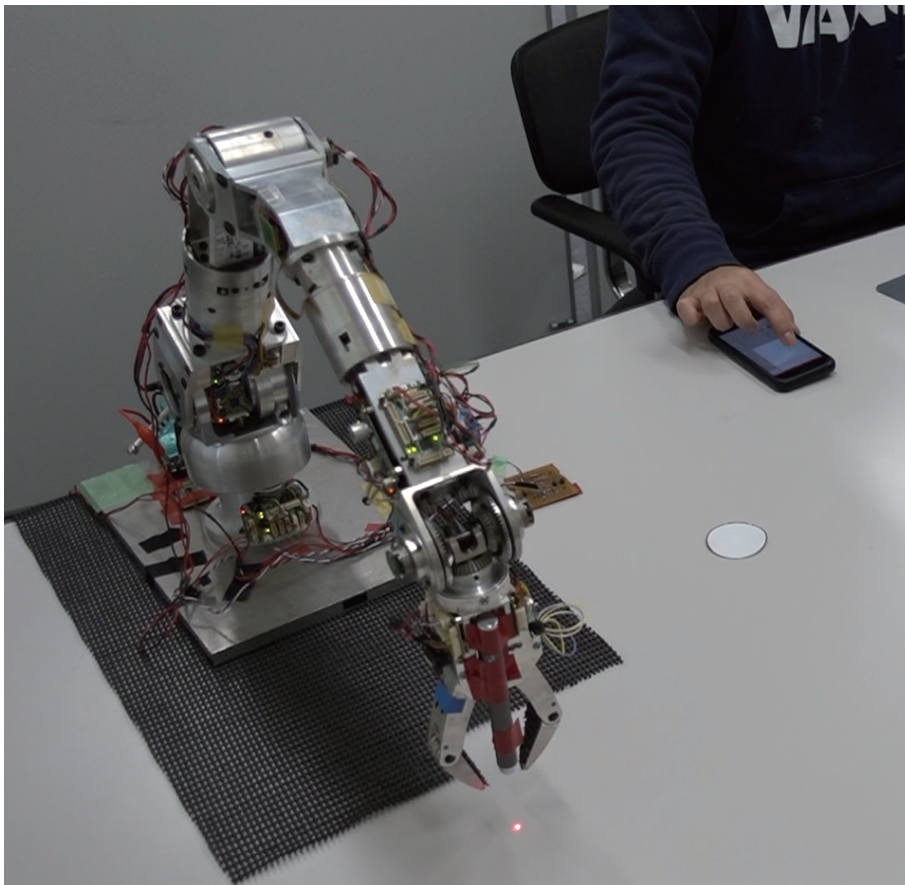


Fig. 3.20 Validation of operate

3.4.5 誤操作防止フィルタの導入

実際にスマートフォンでロボットアームを操作する際に、トラックパッドの可動域内にボタンを押すとロボットアームはすぐ移動する．このことにより、もしトラックパッドを意図しない画面に触れてしまう際に、ロボットアームの誤動作を起こすことも存在する．このような意図せずなタッチにより発生した誤動作は操作者の安全面に大きい影響を与える．そこで、トラックパッドの誤操作防止するために、本研究で設計した操作システムに誤操作防止フィルタを導入する．誤操作防止フィルタの構成は Fig. 3.21 に示す．

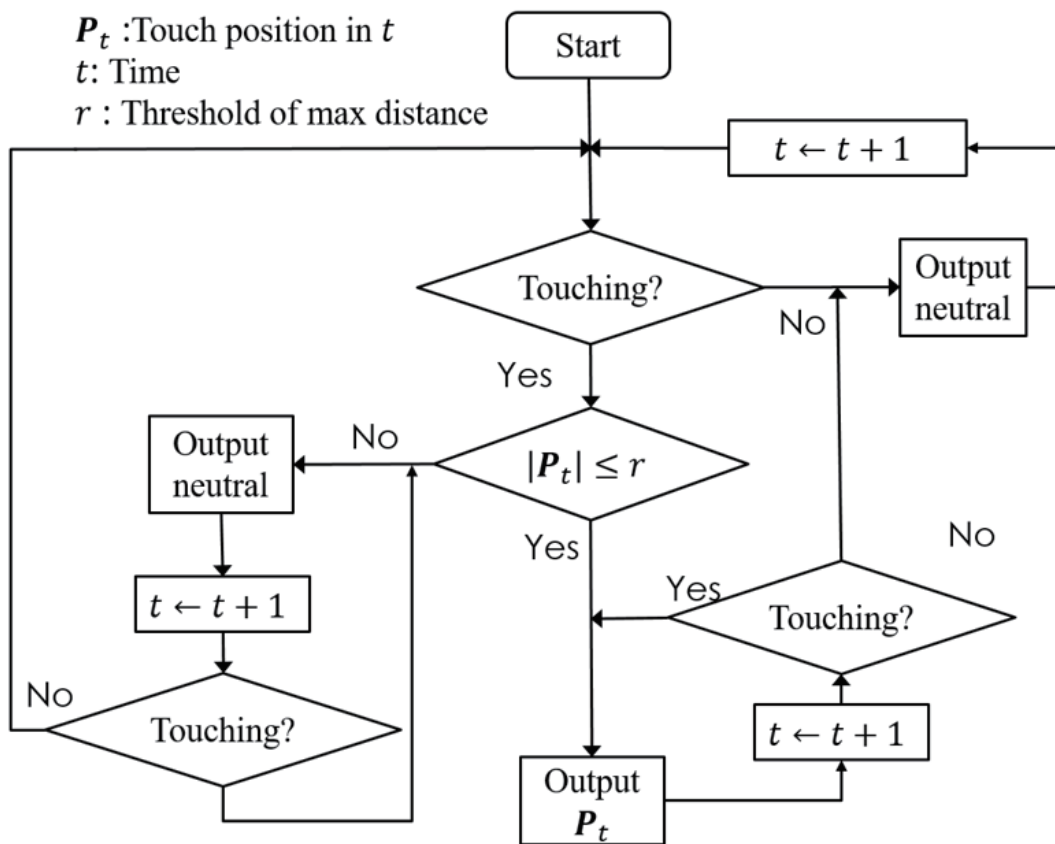


Fig. 3.21 Maloperation prevention system

誤操作防止フィルタのアルゴリズムは、まず、操作者がトラックパッドをタッチする開始の点の位置座標を取得し、この取得した位置座標とトラックパッドの移動範囲の座標原点の間の距離を計算する．その後、前のステップに計算した距離とトラックパッドの可動域の半径を比較し、もしタッチ開始の点と座標原点の距離は可動域半径の一定の範囲を超えると、座標を更新しないようにする．この誤操作防止フィルタの使用により、不意なタッチを回避することができる．

3.4.6 実機実験

本研究の有効性を示すために、誤操作防止フィルターが導入した操作システムと誤操作防止フィルターなし操作システムの操作比較実験を行った。本研究で開発した防止フィルターは二次元空間の水平面上の移動だけ考えるため、実験の課題としてロボットアームの手先を A 地点から B 地点へ移動する動作を設定した。

実験環境は Fig. 3.22 のような配置となっており、ロボットアームの根元を座標原点とし、400 [mm] 前方の位置から地点を A 地点とし、A 点から右方向に 300 [mm]、後方に 200 [mm] 離れた地点を B 点とし、A 点から B へロボットアームの手先の移動を行い、A 点から B 点にある直径 50 [mm] の円形の印の中に移動する。また操作者は、予備実験と同様にロボットアームの左後方に位置し、安全のためのロボットアームの届かない位置でロボットアームの操作を行う。

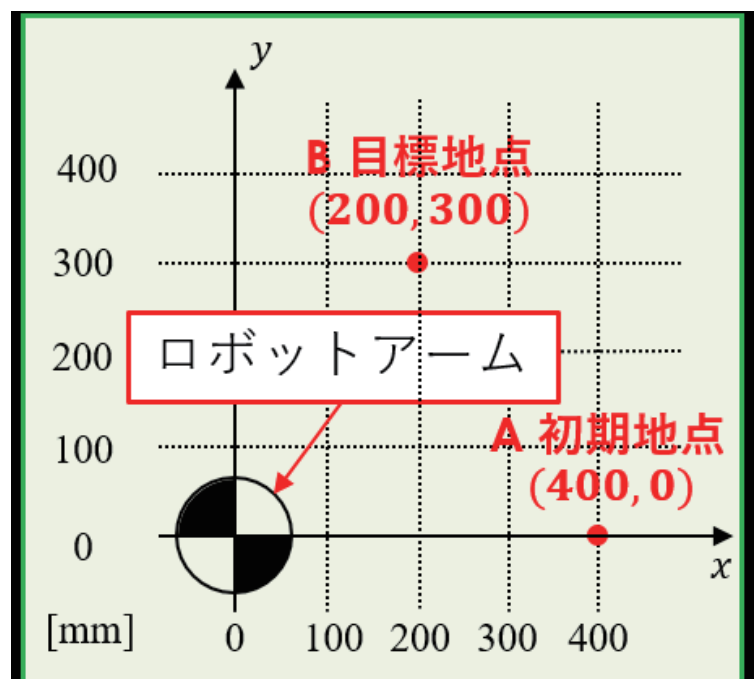


Fig. 3.22 Outline of experiment

実験手順は、まず、スマートフォンによる操作練習を行う。操作練習は運動シミュレーター Chorenoid を用いたシミュレーションによる練習と、実機を用いた練習を順に操作に慣れるまで行う。その後、誤操作防止フィルターなし操作システムの操作実験を行う。誤操作防止フィルターある操作システムの操作実験も同様の手順で操作練習、実験の順に行う。意図せずなタッチを再現するために、被験者はインターフェースを操作する際にスマートフォンの操作画面を見ないでロボットアームを操作する。今回の実験では被験者として、頸髄損傷の男性 1 名にご協力いただいた。実験課題として、A 地点から B 地点へロボットアームの手先の移動を各インターフェースごとに 3

回行った．Fig. 3.23 は誤操作防止フィルタを搭載するインターフェースによる操作実験風景である．

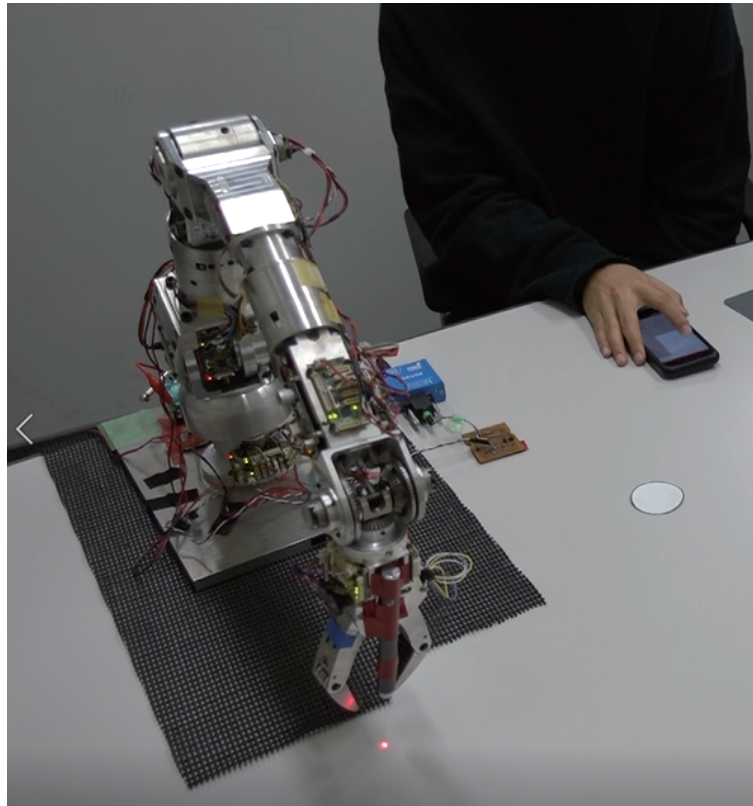


Fig. 3.23 Image of experiment

3.4.7 実験の結果と考察

本研究で，開始位置 A から目標位置 B までのロボットアームの手先の座標変化を評価することにより，誤操作防止フィルタの有効性を検証する．操作比較実験を 3 回行った．結果を Fig. 3.24 ～ Fig. 3.26 に示す．図の中の茶色の線は誤操作防止フィルタがない場合のロボットアームの手先の移動軌道である．青い線は誤操作防止フィルタがある場合のロボットアームの手先の移動軌道である．赤い線は理想の軌道である．Fig. 3.24，Fig. 3.25，Fig. 3.26 から，本研究で提案した誤操作防止フィルタを用いることで，全ての被験者において目標位置まで不意なタッチにより起こしてしまう誤動作を回避が確認された．

ロボットアームの誤動作が減少した要因として以下のことが考えられる．誤操作防止フィルタなし操作システムに対して，被験者のタッチを検出した任意位置でも座標更新を行い，ロボットアームの移動動作を開始する．しかしながら，被験者は操作画面を見ない場合に，タッチする開始の位置を把握しにくくなるため，ロボットアームの移動軌道を不安定になってしまう．誤操作防止フィルタあり操作システムに対して，

操作画面にタッチ開始の位置も把握しにくいであるけれど、検出したタッチする位置は閾値を超える際にロボットアームが反応しないにする．このことにより、被験者は自分でトラックパッドの中心位置を判断できる．そして、操作者意図以外な移動を回避することができる．

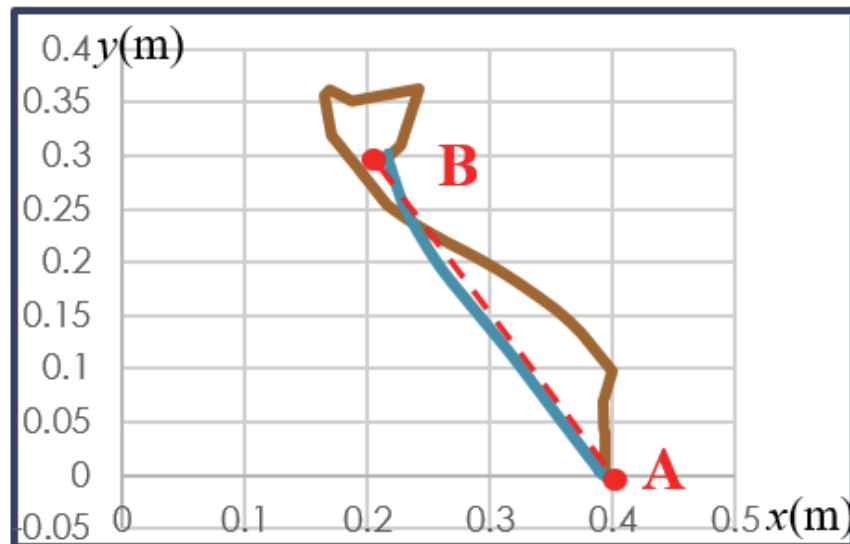


Fig. 3.24 The first comparative experiment of operation

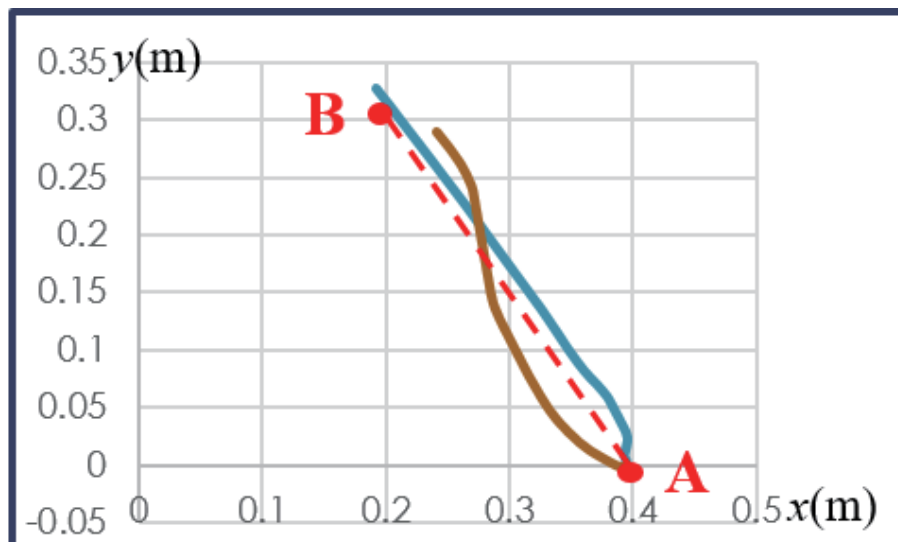


Fig. 3.25 The second comparative experiment of operation

以上の結果より、本研究で提案した操作手法と誤操作防止フィルタの有効性を検証され、上肢機能障害者への適用が期待できると考えられる．

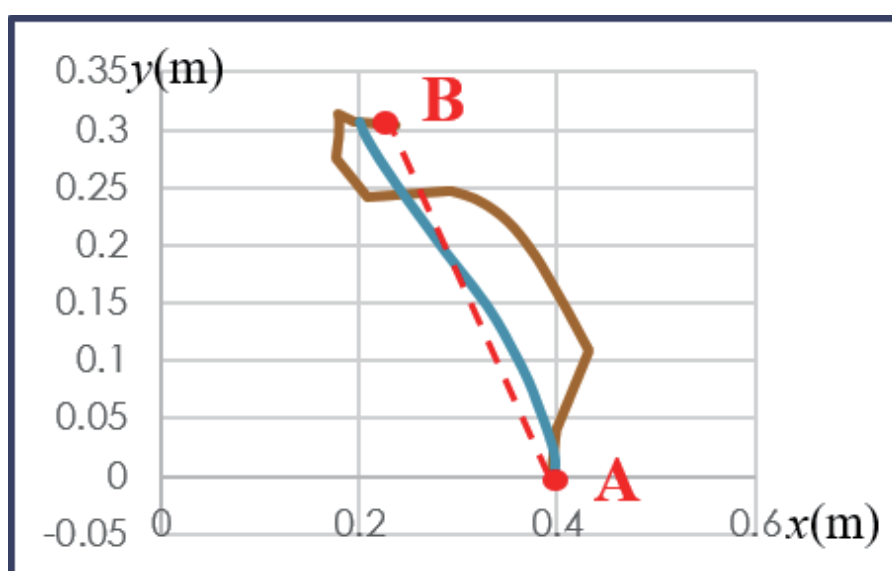


Fig. 3.26 The third comparative experiment of operation

3.5 赤外線カメラを用いた手の3次元動作によるロボットアームの操作

画面上の仮想ジョイスティックのようなインターフェースで操作の簡易化を実現していますが，それに伴い，ロボットアームでマニュアル操作を行う場合，仮想ジョイスティックに対応する動作の把握やモードの切り替え操作などによる，操作者の負担が大きくなり，簡単な日常動作においても目標達成までに時間がかかってしまうという問題があります．そこで，本研究では，赤外線カメラを用いた手の3次元動作によるロボットアームの操作手法を提案する．手の動きを読み取ることで，3次元的なアームの操作が可能となり，操作回数，つまり動作が切り替わる回数を減らすことができる．これらにより，目標達成までの操作時間の短縮を図る．本研究で Fig. 3.27 に示す Leap Motion を入力インターフェースとして使用する．

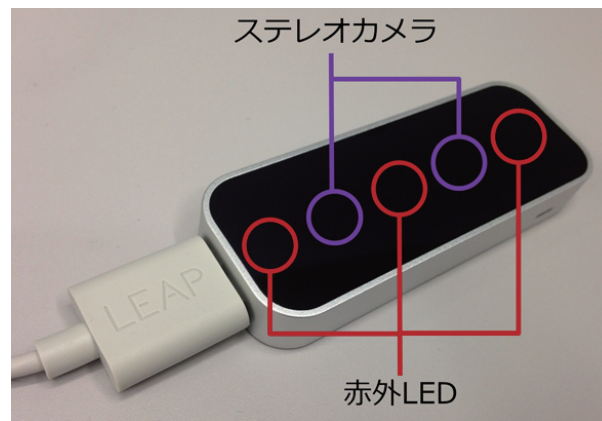


Fig. 3.27 3D camera Leap Motion

3.5.1 操作手法

ロボットアームの操作方法として，Leap Motion から読み取った手のひら中心の初期座標 X_0 と，現在の手のひらの座標 X_i との偏差を閾値 ϵ で判別する．閾値よりも偏差が大きい場合，ロボットハンドの目標位置 X_r は，偏差のベクトル方向に速度 v で動作する．このとき，ロボットアームの目標位置 X_r は Eq. (3.41) で計算することができる．

$$X_r = X_p + X_v v dt \quad (3.41)$$

X_p はロボットアームの現在位置であり， $X_v v dt$ の変位で移動する． $v = 0.05 \sim 0.08 [\text{m/s}]$ はロボットアームの手先の移動速度である． X_v は正規化された偏差の方向ベクトルであり，Eq. (3.42) で計算することができる．この流れは Fig. 3.28 に示す．

$$X_v = \frac{X_i - X_0}{|X_i - X_0|} \quad (3.42)$$

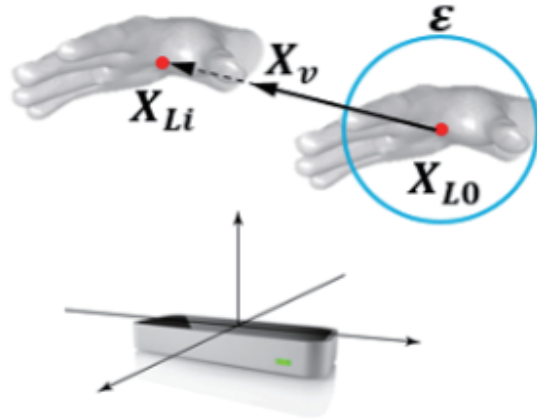


Fig. 3.28 Position operation

また, $|X_i - X_0| \leq \epsilon$ の場合で, ロボットハンドの位置は変化しない. このとき, Fig. 3.29 に示すように, 手の傾きとロボットハンドの開閉動作を対応じる.



Fig. 3.29 Endeffector operation

3.5.2 実機実験

提案手法の有効性を検証するために, 一般のジョイスティック操作と Leap Motion による操作の比較実験を行った. 実験タスクは, 目標物を A 地点から B 地点に運搬操作を各インターフェースで 3 回行った. 地点 A は, ロボットアームの根元から 250 [mm] 前方, 左 160 [mm] の位置に設置した. 地点 B は地点 A より 150 [mm] 上, 前方 100 [mm], 右側 300 [mm] の位置にした. 実験対象は 20 代の健常者 3 名である.

実験は以下の手順で行う.

1. 実験内容の説明をスライドにて行う.

2. 操作説明用スライドを使用し各インタフェースの操作方法を説明する．
 3. 提案手法とジョイスティックで、ランダムな位置に設置した物体にて操作練習を行う．
 4. 操作者自身が操作に慣れたと判断し練習を終了した後、実験内容を再度説明する．
 5. それぞれ提案手法とジョイスティックを用いて実験を行う．
- 実験風景は Fig. 3.30 と Fig. 3.31 に示す．

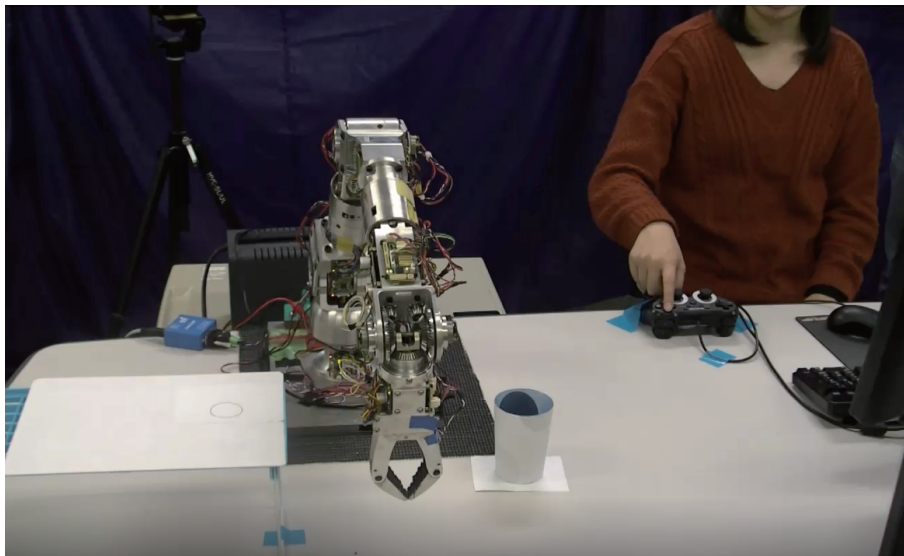


Fig. 3.30 Experimental setup of joystick and button

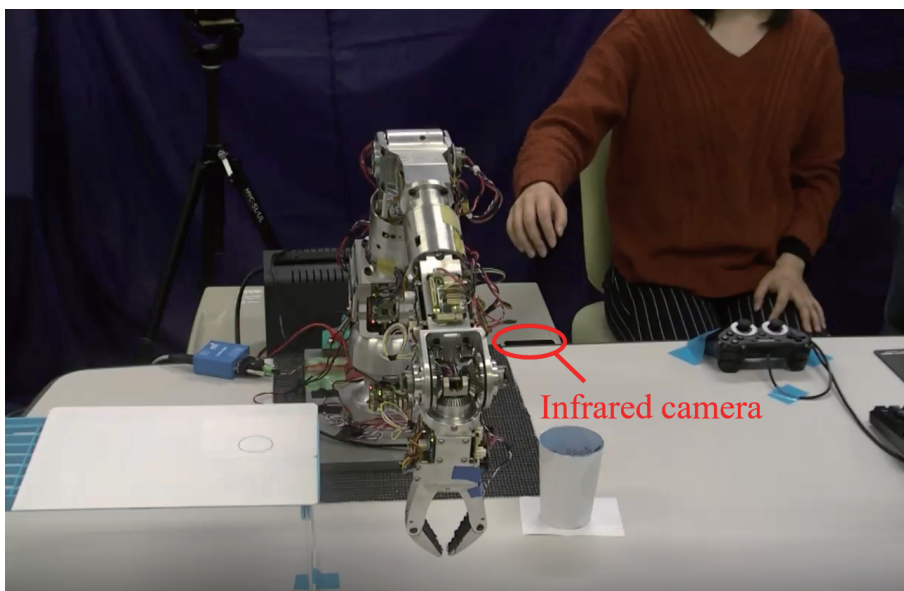


Fig. 3.31 Experimental setup of infrared camera operation

3.5.3 実験の結果と考察

Fig. 3.32 と Fig. 3.33 でそれぞれジョイスティックと提案手法の操作完成時間を示す。Fig. 3.32 に示すように、各被験者は平均で 22.6 [s]、20.6 [s] および 22.6 [s] の時間で操作を完了した。一方、Fig. 3.33 に示すように、各被験者は平均で 18.3 [s]、17.6 [s] および 14.6 [s] の時間で操作を完了した。この結果から、提案した操作手法を用いることで、すべての被験者は操作完了時間が短縮されることが確認された。ジョイスティックでの操作では、操作者がロボットアームの上下操作と x-y 平面上の操作を切り替える必要がある。一方、提案手法では、操作者の手の動きでロボットアームを操作するため、ロボットアームを三次元的に操作することが可能である。したがって、操作者はロボットアームの動作を容易に認識することができる。これが稼働時間が短縮された一因と考えられる。

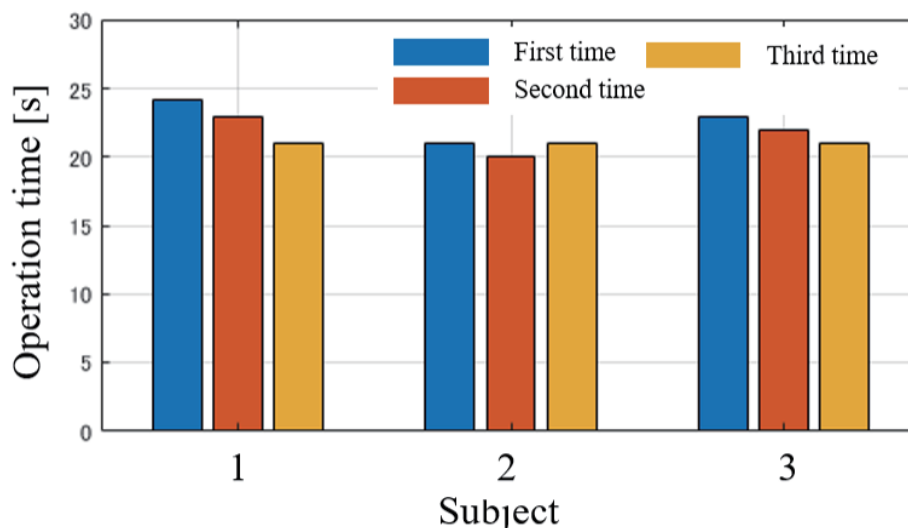


Fig. 3.32 Operation time with joystick and button

また、ジョイスティック操作と提案手法での操作の操作回数の比較を行った。Table. 3.6 に示すように、ジョイスティック操作の場合で、各被験者はタスク完了までかかる平均操作回数はそれぞれ 11.7 回、11.3 回および 13.7 回となった。一方、Table. 3.7 に示すように、提案手法の場合で、全ての被験者に対して平均操作回数は 10 回以内になった。このことから、提案手法で操作回数が減ったため、操作時間が短縮されたと考えられる。本研究の結果により、提案手法は操作完了時間の短縮につながると考えられ、上肢機能障害への適応が期待できることを示す。

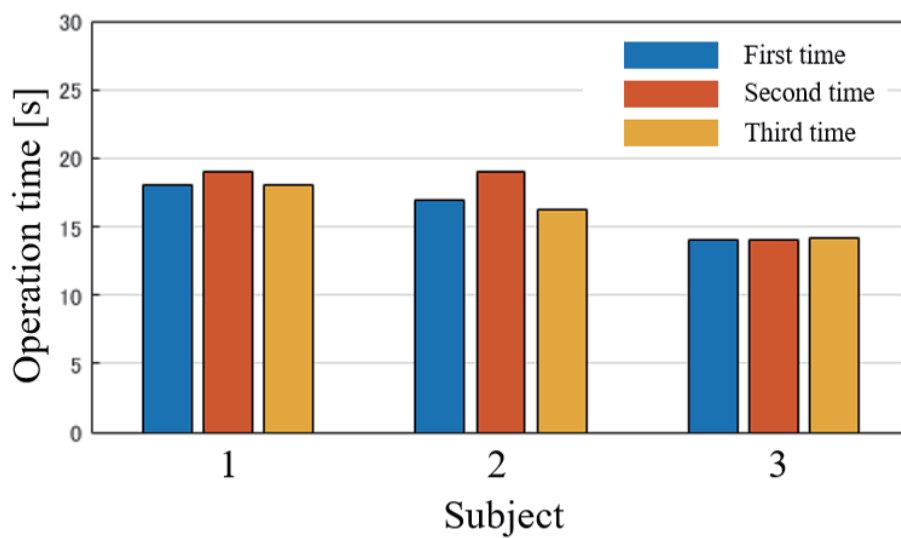


Fig. 3.33 Operation time with Leap Motion

Table 3.6 Numbers of operations with joystick

	1st operation	2nd operation	3rd operation	Average
Subject A	11	14	10	11.7
Subject B	11	11	12	11.3
Subject C	15	14	12	13.7

Table 3.7 Numbers of operations with leap motion

	1st operation	2nd operation	3rd operation	Average
Subject A	9	8	9	8.7
Subject B	8	7	8	7.7
Subject C	5	5	5	5.0

3.6 まとめ

本研究で頸髄損傷者を対象としたロボットアーム手動インタフェースを提案した。まず、スマートフォンを入力装置として使用して新型のロボットアーム操作システムの開発を行った。スマートフォン用のウェブサイトの操作画面を開発し、画面にあるジョイスティックボタンの座標を読み取って、この座標をロボットアームの手先の位置座標を変換し、入力することでロボットアームを操作する方法を提案した。また、スマートフォンのトラックパッドは意図せずにタッチなどの誤操作が起こしやすい問題に対して、誤操作防止システムを導入した。本提案手法の有効性を検証するために、現在の位置から目標位置までかかる時間を比較し、目標位置を達成するまで生成した軌道の比較と評価をすることで、誤操作防止を実現できるかの検証を行った。結果として、ロボットアームを車いすに搭載して開発したインターフェースの有効性を確認した。次に、赤外線カメラを用いた手の3次元動作によるロボットアームの操作について、提案手法ではLeap Motionによる手の動きを読み取ることで、3次元的なアームの操作が可能となり、動作が切り替わる回数を減らすことができる。従来手法との比較実験により、提案手法を使用することで操作完了にかかる時間の減少が確認された。

第4章 ロボットアームの自動操作インターフェースの開発

4.1 本研究で使用するロボットアーム

本研究で使用するロボットアームは，Fig. 4.1 に示す Elephant Robotics 社の my-Cobot280M5 である．基本的な仕様は Table 4.1 に示す．myCobot280M5 ロボットアームは6軸の可動域を持つ．重量850[g]となり，ペイロードは最大250[g]である．myCobot本体とアームの先端には M5Stack Basic と ATOM Matrix を搭載している．UJFlow によるブロックプログラミングや ROS，Arduino に対応している．本体下部とアームの先端には Lego 互換のコネクタがあり，ベースを使った固定やエンドエフェクタの機能の拡張に使用できる．

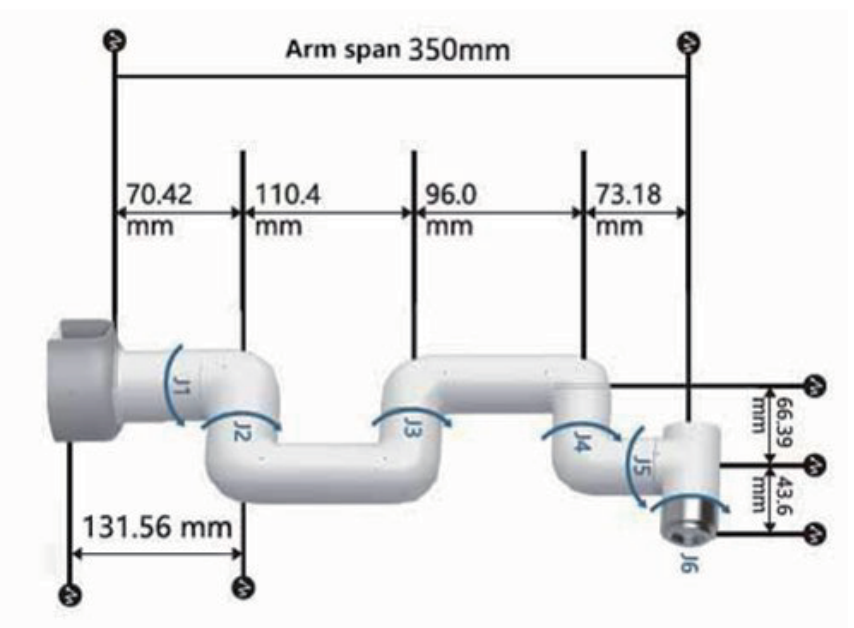


Fig. 4.1 Robotic arm myCobot280m5

Table 4.1 Specification of the robot arm myCobot

DOF	6 (Arm) + 1 (Hand)
Max. Reach [cm]	28.0
Max. Total weight [kg]	1.0
Max. Payload [kg]	0.3

4.2 視覚情報に基づくインターフェース

本研究の対象とする頸髄損傷者の中でも特に C5 レベルの患者は上肢に残る麻痺のために、手が拘縮し手指関節を使用したインタフェースの操作が困難である。そのため、ジョイスティックを手に持った状態で操作することができない。このことから、操作デバイスにはジョイスティック以外の握る必要のないものが望ましいと考えられる。そこで、本研究ではスマートフォンやタブレット型端末などのタッチパネルを使用する。スマートフォンやタブレット型端末は普段から多くの人に使用されている。また、C5 レベルの頸髄損傷者であっても握る必要がないため操作することが可能であり、日常生活の中で普段から使用しているものであるため、操作に慣れているといえる。その他にも、ロボットアームのハンドに取り付けカメラからの画像をタッチパネル上に表示することができ、新たにディスプレイやその他のデバイスを用意する必要がないことや、電動車いすの操作においても、タッチパネルによる操作が研究開発されており、インタフェースを1台のデバイスに統合することが可能であるという利点もある。

タッチパネルを用いたインタフェースには、ハンドに取り付けられたカメラからの映像を映し、手先方向の状況を確認することが可能である。これにより周囲の環境の把握や床上に落ちた物体などの探索を行う。操作方法として、Fig. 4.2 に示すような操作画面上でラインを引くことで目標物を指定する。タッチパネル上には、ロボットアームを操作するために必要なボタンを複数設置した。これらは、カメラからの映像をなるべく遮らないように画面の中央を避けて配置した。

4.3 操作手法

具体的な操作方法として、まず手先を移動させることで床上に落ちた物体の探索を上方から行う。画面の左側には上下方向の矢印ボタンを配置し、画面に対して手先が作業空間の x-y 平面方向の移動を行うことができるようにした。上方向のボタンは前進、下方向のボタンは後退にそれぞれ対応している。一方、画面の右側に配置した矢印ボタンは手先が左右方向の移動に対応する。その際、ハンドの初期位置はロボットアームの設置位置から高さ 20.0 [cm]、前方に 19.0 [cm] の位置となっている。これは、ロボットアームの第3関節が 90.0 [deg] 折れ曲がっている状態であり、手先は床面に対して垂直になっている状態である。

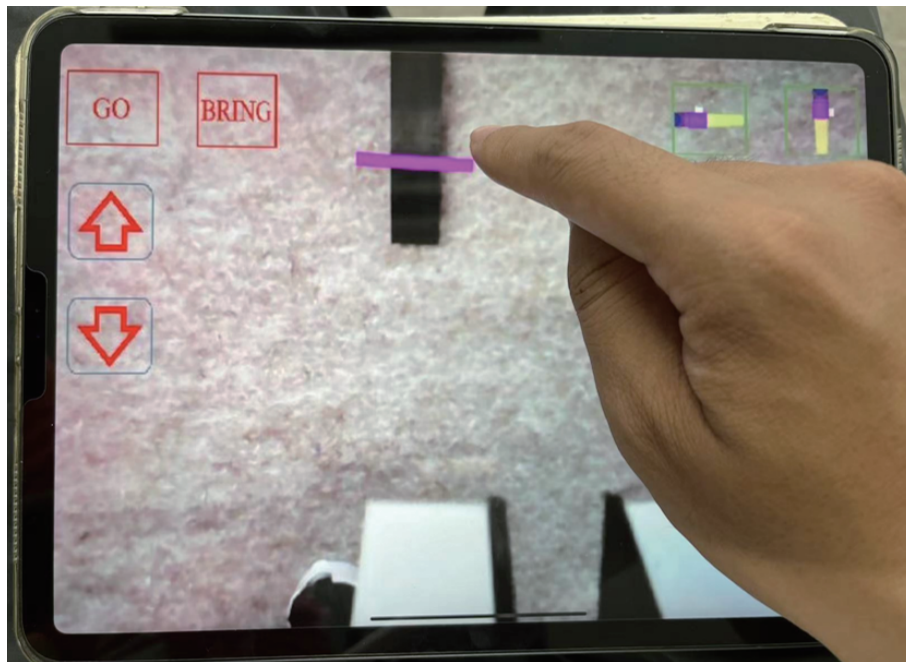


Fig. 4.2 Proposed user interface with the input device of the iPad

探索により床上物体を発見した後は、Fig. 4.3 に示すように目標の手先位置を指定するために画面上でラインを引く。ボタンの配置されていない画面上のエリアは、目標手先位置を指定するために引くラインの描画可能エリアとなっている。ラインを引いた後、今度は把持姿勢を指定する。把持姿勢は画面右上にある2つボタンで行うことができ、左からそれぞれ目標物に対して横から掴むか、上から掴むかの姿勢を指定することができる。これにより、画面上に引いたラインとボタンによる角度指定から目標位置・姿勢が決定される。本提案手法は画面上に引いた線により目標位置を決めるため、操作者の手先の残存機能により引いた線が画面上に映した目標物と位置誤差が生じる可能性があると考え、そのため、次いで Fig. 4.4 の示すように画面左上にある GO と書かれた動作ボタンを押すことで、ロボットアームの手先は目標位置から一定の距離が離れた位置へ移動する。この際に、操作者がインタフェース画面上に映した手先と目標物の相対位置関係を目視にて確認し、必要があれば操作画面の左右に配置したボタンでロボットアームの手先位置の微調整を行う。最後に、Fig. 4.5 に示すように隣にある BRING と書かれたボタンを押すことで、ロボットアームは目標物まで移動し、自動的に目標物を把持した後に操作者の手元に戻る動作を行う。動作ボタンを押している際、ロボットアームが周囲の物体との衝突の危険があった場合、ボタンを離すことでロボットアームの動作を止めることができる。衝突を回避するために停止させた後は、移動ボタンによる操作でロボットアームを衝突の危険があった物体から遠ざけ、再度動作ボタンを押すことでロボットアームの軌道を変え衝突の危険を回避する。

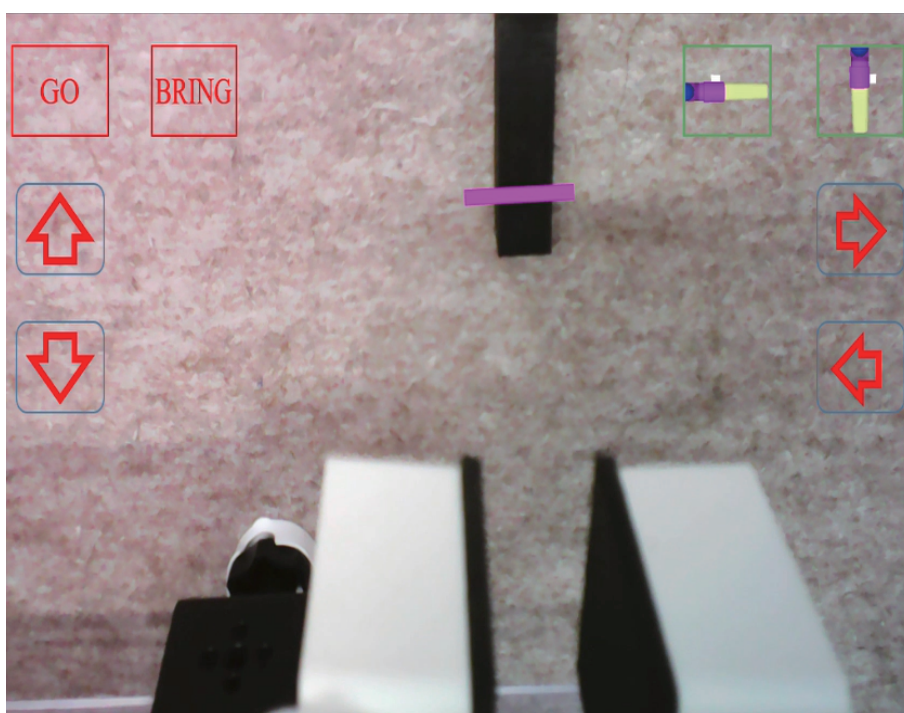


Fig. 4.3 The 1st operating procedure

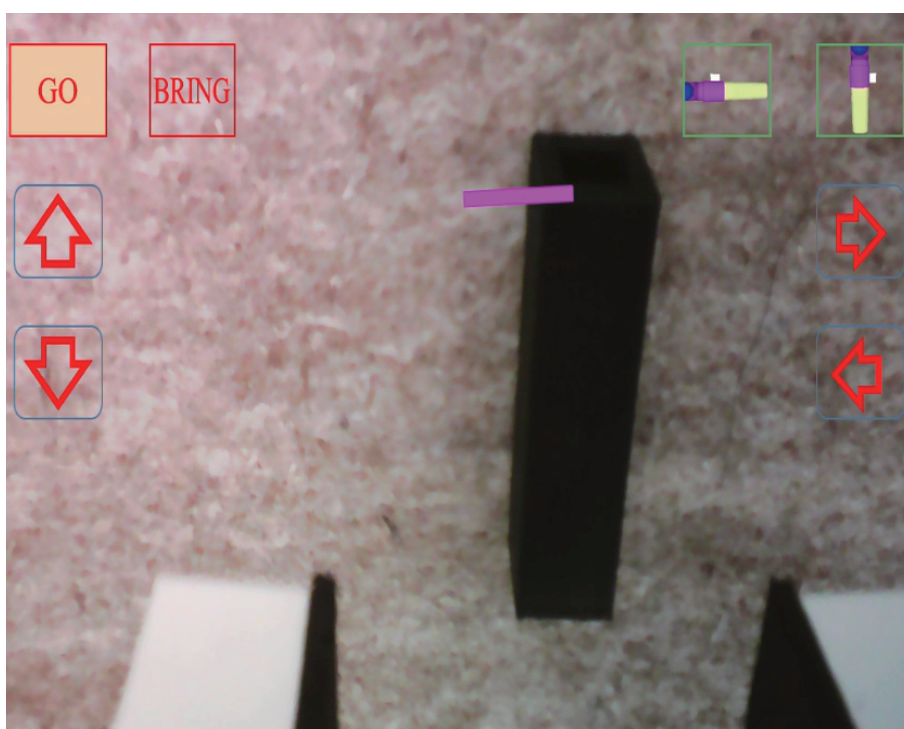


Fig. 4.4 The 2nd operating procedure

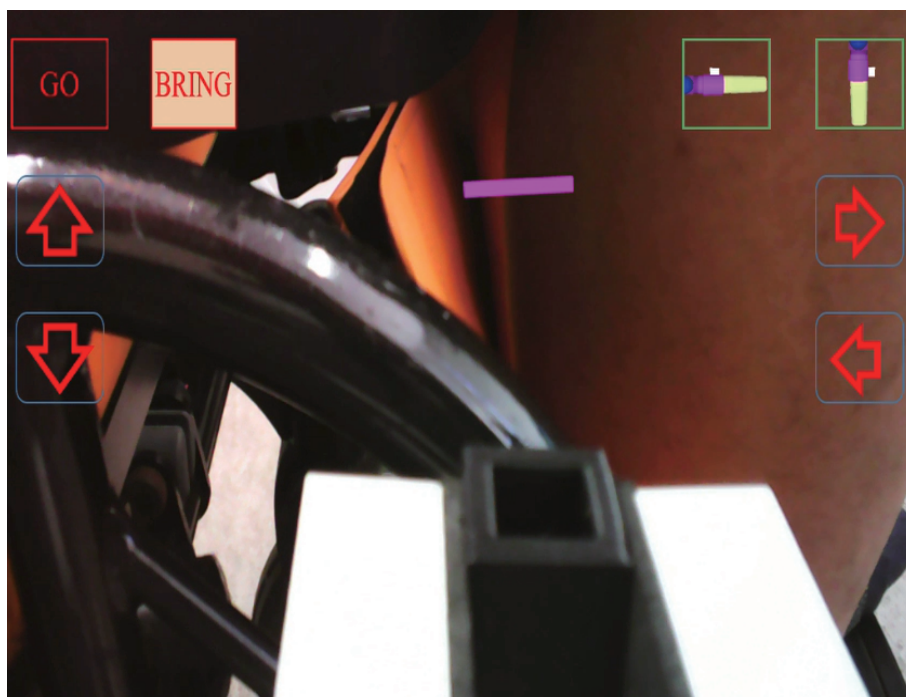


Fig. 4.5 The 3rd operating procedure

4.4 スクリーン座標から目標座標の計算

2次元のスクリーン座標 $p_s(x_s, y_s)$ から一定の距離が離れた3次元空間中にあるオブジェクトの車いす系におけるワールド座標 $p_o(x_o, y_o, z)$ への変換はまず、3次元空間上に設置されたカメラが基準とした目標ベクトル x_c を計算する．カメラを下に向けた状態が標準と仮定し、カメラ正面が z 座標負方向とした場合で、スクリーンの幅 w_s 、高さ h_s とカメラの水平画角 ϕ を用いて、Eq. (4.1) で計算することができる．

$$x_c = [x_c, y_c, z_c]^T = \left[\left(\frac{2x_s}{w_s} - 1 \right) \sin \frac{\phi}{2}, \left(\frac{2y_s}{h_s} - 1 \right) \frac{h_s}{w_s} \sin \frac{\phi}{2}, -\cos \frac{\phi}{2} \right]^T \quad (4.1)$$

今回の提案手法は床上にある物体を対象とする前提で対象の高さは床面とほぼ同一とする．車いす座標系におけるカメラの位置は P_c 、姿勢は回転行列 R_c で表されるものとする．カメラ座標系における目標物への方向ベクトルを $v_c(v_c = \frac{x_c}{|x_c|})$ とすると、Fig. 4.6 に示すような床上の点の変換は Eq. (4.2) で計算することができる．実際の使用環境で設定した座標系は Fig. 4.7 に示す．

$$p_o = \frac{z_c}{z_v} R_c v_c + p_c \quad (4.2)$$

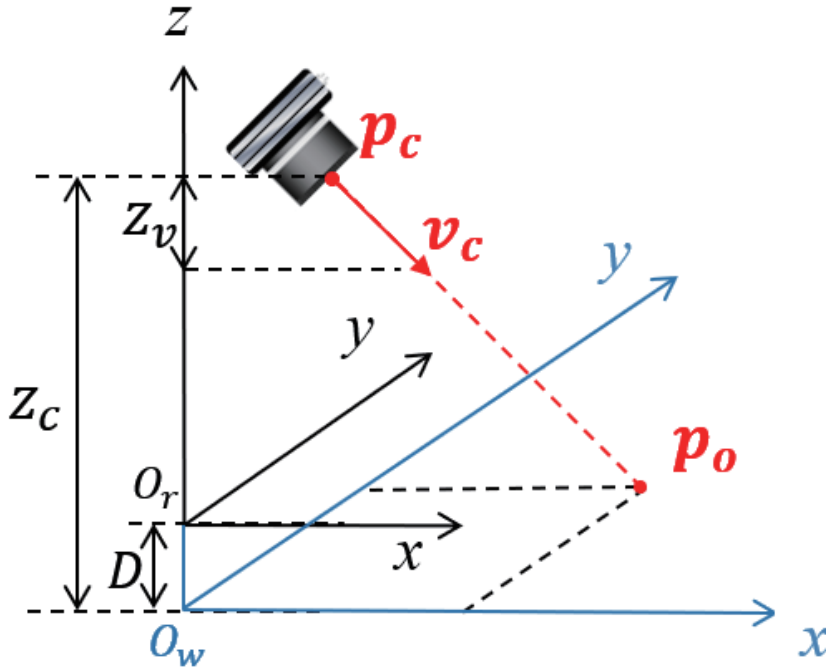


Fig. 4.6 Calculate the position in 3D space with a 2D touch coordinate

操作者がロボットアームの手先と目標物の相対位置を確認するために、ロボットアームの目標位置は引いた線の中点から一定の距離が離れた位置に設定した．引いた線の

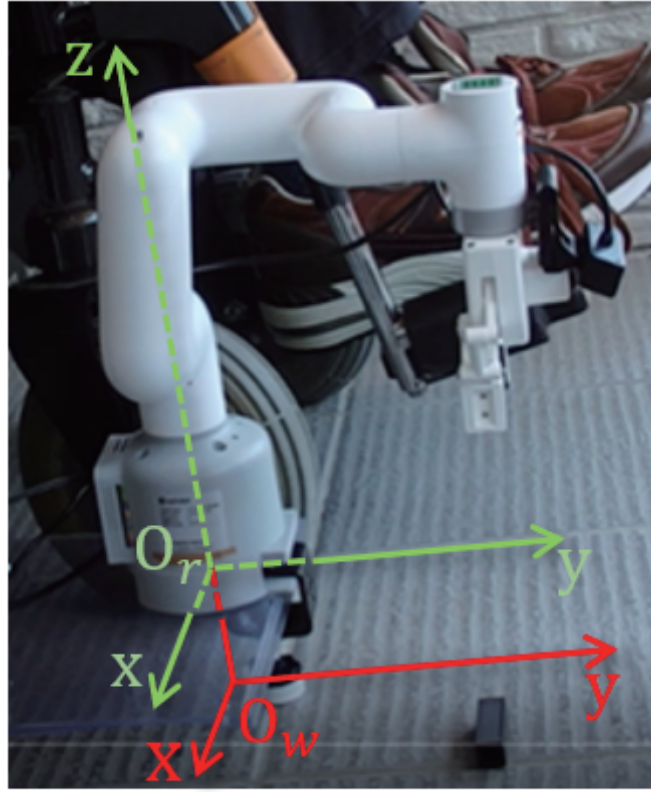


Fig. 4.7 Coordinate settings in real-system

始点のワールド座標 p_{o1} と終点のワールド座標 p_{o2} を用いて、中点の座標 p_{om} を計算することができる。水平把持の場合で、目標位置 P_r は Fig. 4.8 に示すように、指定した位置から距離 d 離れた床上の位置とする。この場合で、中点 p_{om} を通り引いた線に対して直交する $x-y$ 平面に平行な正規化されたベクトルを n とすると、ロボットアーム手先の目標位置は Eq. (4.3) で計算することができる。

$$P_r = -dn + p_{om} \quad (4.3)$$

一方、垂直方向把持の場合で、目標位置 P_r を Fig. 4.9 に示すように、指定した位置から高さ $h(6.0[\text{cm}])$ 離れた位置とする。この場合で、ロボットアーム手先の目標位置は Eq. (4.4) で計算することができる。

$$P_r = [0, 0, h]_T + p_{om} \quad (4.4)$$

ロボットアーム手先の回転角度 θ は、Fig. 4.10 に示すように、引いた線の始点のワールド座標 p_{o1} と終点のワールド座標 p_{o2} を用いて Eq. (4.5) で計算することができる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4.5)$$

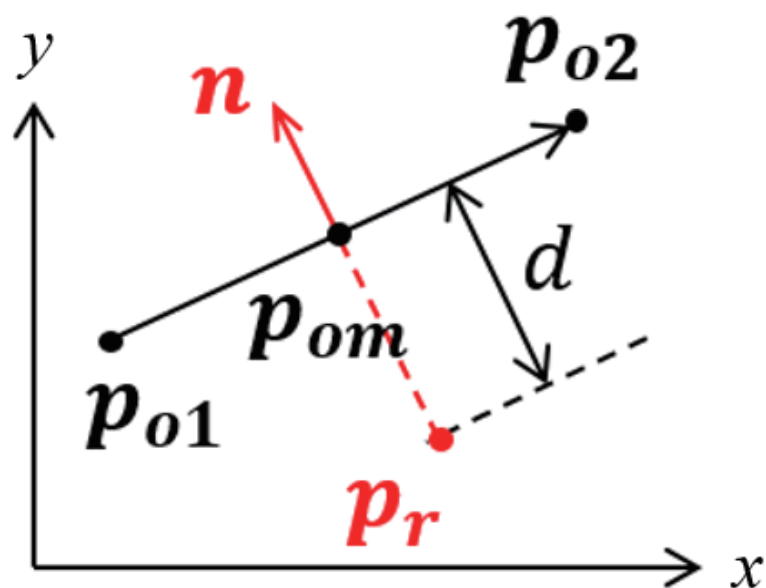


Fig. 4.8 Horizontal grip

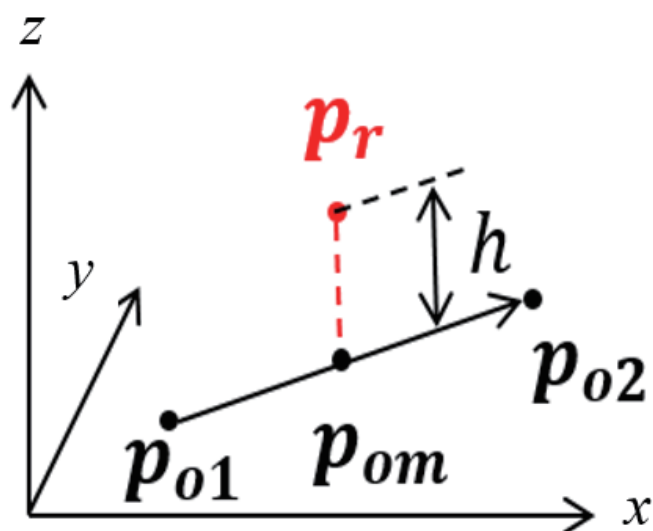


Fig. 4.9 Vertical grip

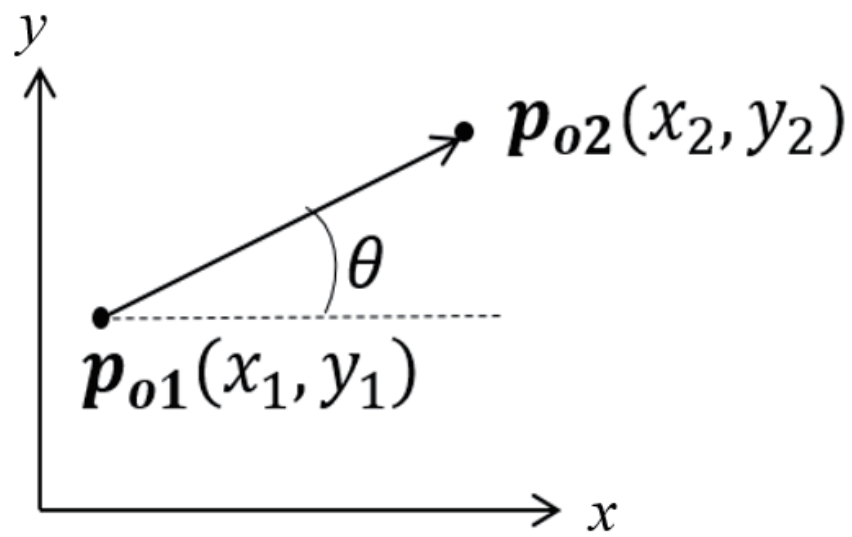


Fig. 4.10 The calculation of rotation angle in end-effector

4.5 実機実験

4.5.1 実験概要

実験で使用する装置を Fig. 4.11 に示す．実験で使ったロボットアームは Elephant Robotics 社の myCobot280M5 である．電動車いすは株式会社今仙技術研究所製の電動ティルティング式普通型電動車いす EMC-250T を使用した．ロボットアームの手先にカメラの設置方式は Fig. 4.12 に示す．



Fig. 4.11 Experimental devices

提案手法の有効性を検証するために、操作比較実験を行う．比較の対象として、Fig. 4.13 に示すように、スクリーン上の仮想ジョイスティックを作成した．操作方法として、ロボットアーム手先の $x-y$ 平面上の移動は画面上に示すジョイスティックによる操作する．操作者の視野を隠さないために、最初のタッチを検出すれば、ジョイスティックがタッチした位置に現し、このタッチ位置を操作原点と設定する．手先の回転は画面の左側に配置した矢印が書かれているボタンによる操作する．一度タッチパネルから手を放し、再度タッチすることで、原点を更新できる．また、画面の右側に配置した矢印が書かれているボタンは手先の z 軸方向の移動に対応する．手先の開閉は、画面の上に設置した Open/Close ボタンによる操作することができる．最後に、物体の把持を確認後画面の下に設置した Back ボタンを押すと、手先が操作者の手元に戻る．

実験内容として、実験は C5 頸髄損傷男性 1 名を対象に、Fig. 4.14 に示すような目標物を 4 パターンの位置に設置し、それぞれ提案インターフェースと仮想ジョイスティックでロボットアームを操作し目標物を拾う操作を行う．実験対象は手関節の拘縮によ



Fig. 4.12 Webcamera mounted on end effector

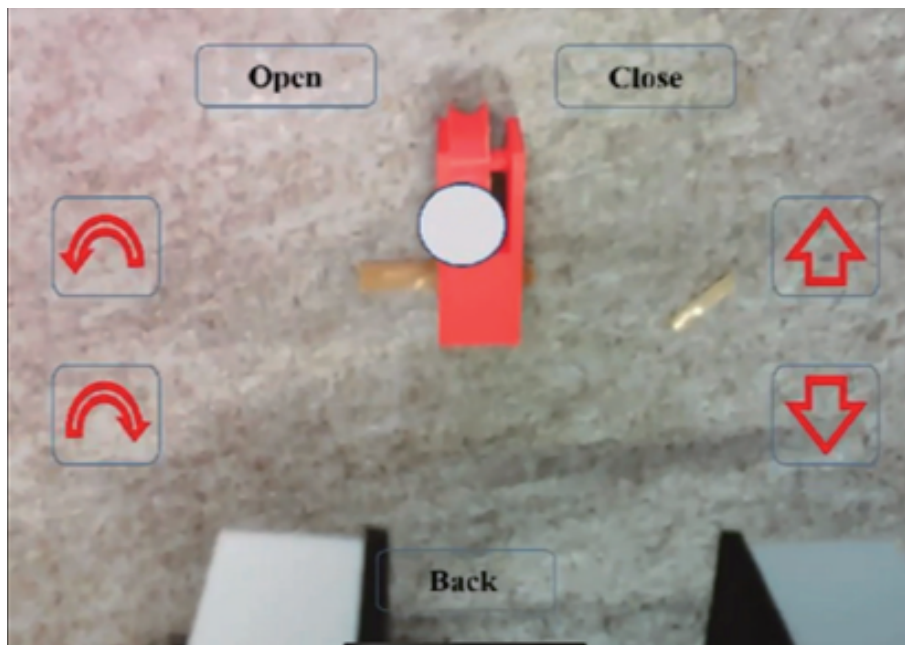


Fig. 4.13 Comparative interface

り Fig. 4.15 に示すような小指の第二関節を用いてタッチスクリーンを操作する．また，4.16 に操作の様子を示す．実験で使用するロボットアームの手先の幅は最大 4.0 [cm] という制限があるため，把持する目標物を長さ，幅と高さはそれぞれ 4.0 [cm]，1.5 [cm] と 1.5 [cm] の直方体を使用する．

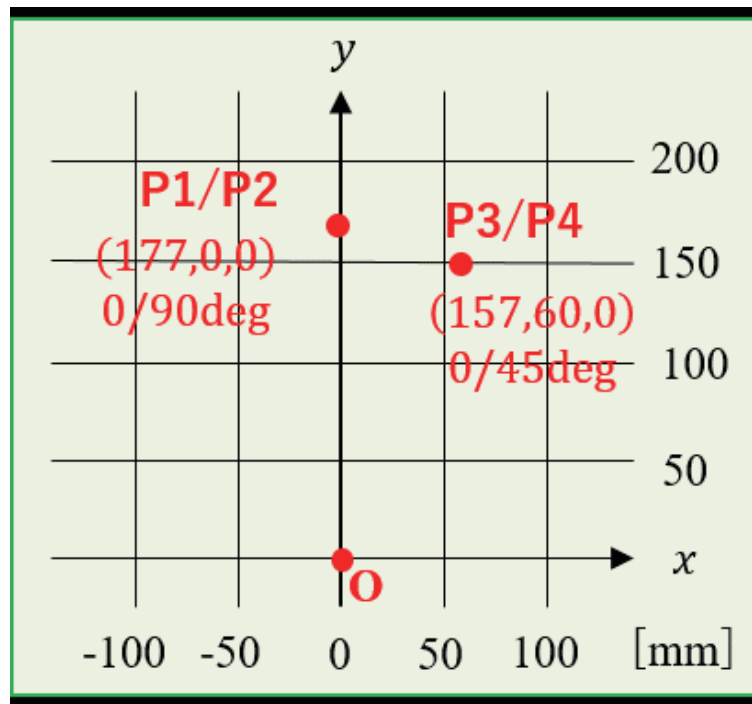


Fig. 4.14 Experimental task



Fig. 4.15 Operation with the second joint of little finger



Fig. 4.16 Operation with scene

続いて各把持パターンについて説明する．Fig. 4.17 に示すように，把持パターン 1 では，目標物はロボットアームの手先と垂直し，手先の真下にある．このパターンを完成するために，操作者がアームの手先を z 軸方向に移動し，手先の開閉操作を行う必要がある．Fig. 4.18 に示すように，把持パターン 2 では，目標物を把持パターン 1 と同じ初期位置に設置しますが，姿勢が手先と平行する．そのため，このパターンでパターン 1 の操作を完成した上で，手先の回転操作も必要となる．把持パターン 3 で，Fig. 4.19 に示すように，目標物は操作画面の右側に設置するため，手先を x - y 平面上の移動， z 軸の移動と手先の開閉操作を行うことで操作が完成できる．最後に，Fig. 4.20 に示すように，把持パターン 4 はパターン 3 の必要操作に加えて，手先の開閉操作も必要となる．そのため，他のパターンと比べて，操作パターン 4 で最も複雑な操作が必要となる．

実験の手順は以下の手順で行う．

1. 実験内容の説明をスライドにて行う．
2. 操作説明用スライドを使用し各インタフェースの操作方法を説明する．
3. 仮想ジョイスティックと提案したインタフェースで，ランダムな位置に設置した床上物体にて操作練習を行う．
4. 操作者自身が操作に慣れたと判断し練習を終了した後，実験内容を再度説明する．
5. 仮想ジョイスティックと提案したインタフェースで，Fig. 4.14 のように配置された床上物体にて実験を行う．パターン 1 と 3 では，先に提案手法で操作を完了した後に，仮想ジョイスティックで操作を行う．パターン 2 と 4 では，先に仮想ジョイスティックで操作を完了した後に，提案手法で操作を行う．

実験では操作を完了するまでの操作回数，操作時間および 5 段階評価のアンケートによる評価を行う．

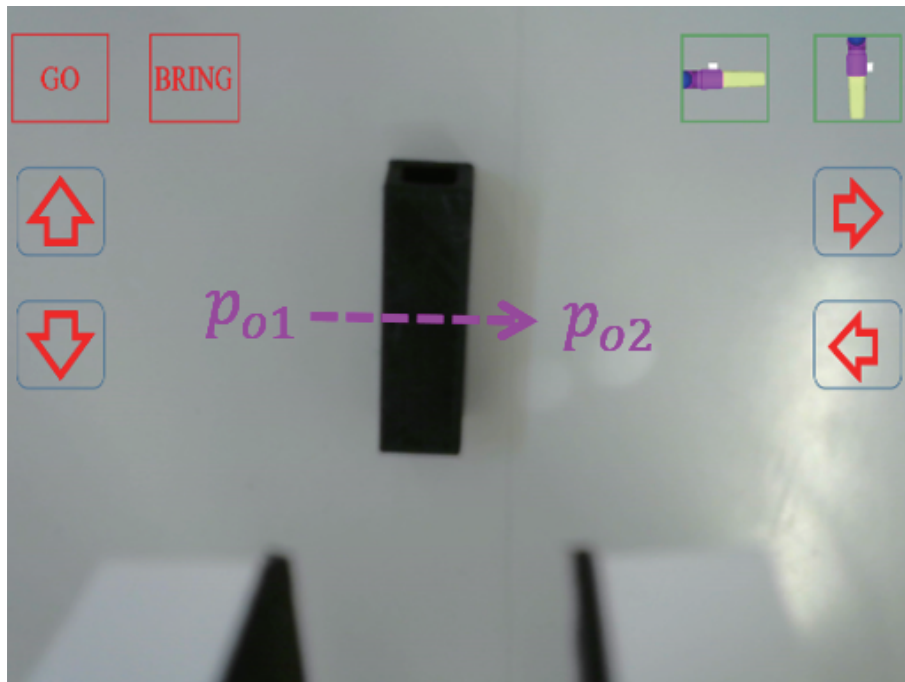


Fig. 4.17 Operation pattern 1

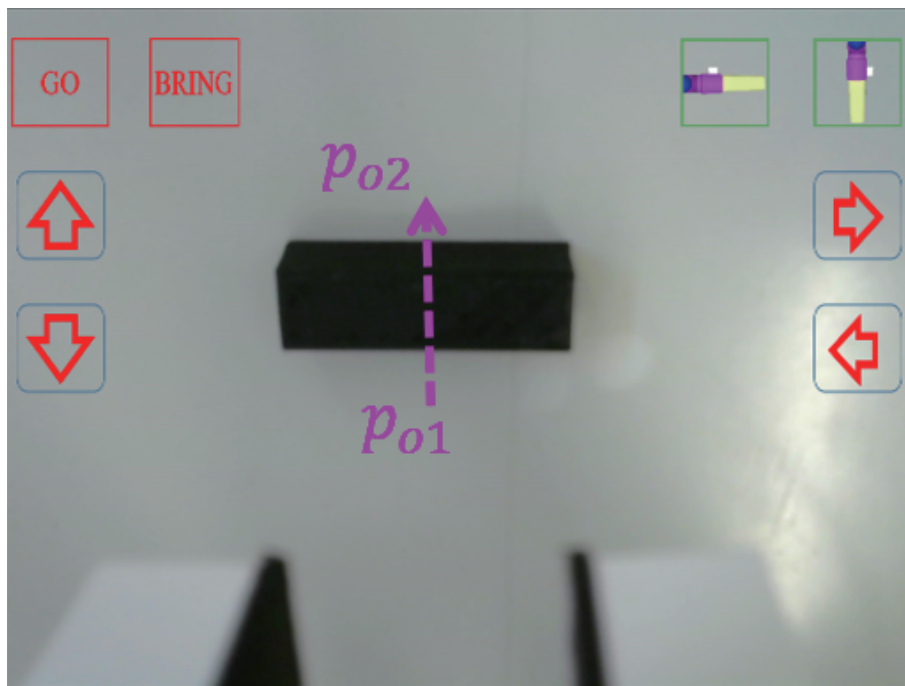


Fig. 4.18 Operation pattern 2



Fig. 4.19 Operation pattern 3

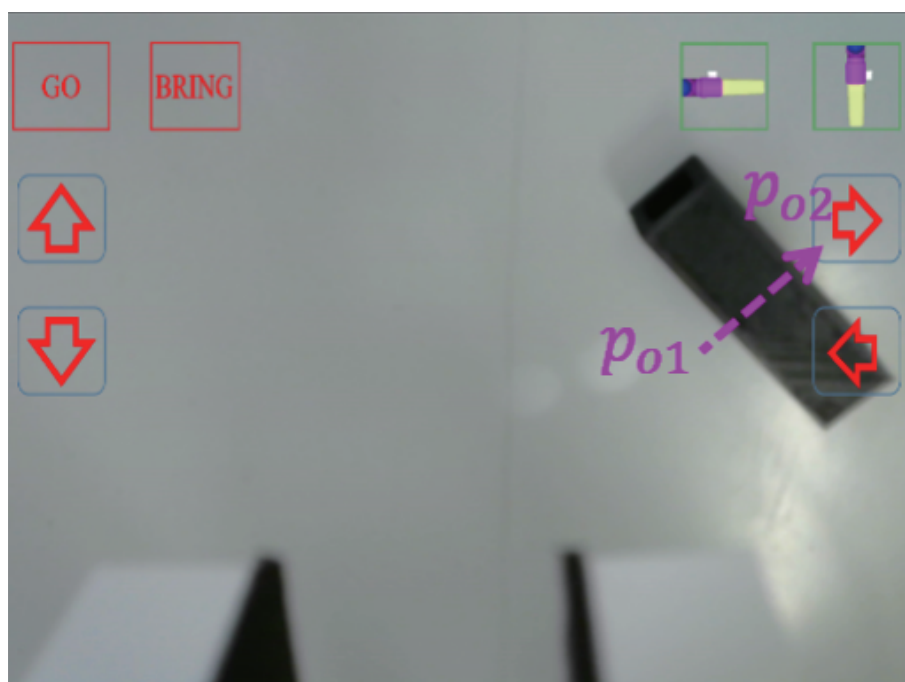


Fig. 4.20 Operation pattern 4

Table 4.2 Comparison of operation numbers between proposed interface and on-screen joystick

On-screen Joystick	Operation task	Proposed interface
10	Pattern 1	4
21	Pattern 2	4
15	Pattern 3	4
17	Pattern 4	4
15.8	Average operation time	4.0
4.6	Standard deviation	0.0

4.5.2 実験の結果と考察

提案インタフェースと仮想ジョイスティックで床上物体を把持し持ち上げるまでの操作回数を Table 4.2 に示す．仮想ジョイスティックでいずれの操作においても 10 回以上の操作回数を費やしていると同時に，操作の複雑さにより操作回数は増加することが確認した．一方，提案インタフェースでの操作はいずれも 4 回の操作でタスクを完了できることが確認された．

各パターンで完了するまでにかかる操作時間と平均操作時間を Fig. 4.21 に示す．図に示すように，仮想ジョイスティックで平均 60 [s] 以上の時間がかかると同時に，提案インタフェースで操作時間は平均 30 [s] 程度かかることが確認された．一方，提案インタフェースと比べて仮想ジョイスティックは操作の複雑さにより操作完了時間は増加することが確認された．パターン 1 であまり差が見られなかったことについては，把持する状況が床上物体を床面に対して垂直な方向から把持する場合であったため，初期姿勢がもともと垂直な姿勢をとっていることから，ロボットアームのハンド姿勢を操作する上で必要な操作が少なく，仮想ジョイスティックによる操作が複雑にはならなかったことが考えられる．また，Table 4.2 によると，パターン 1 で操作完了時間の差は著しくないが，操作回数の差が大きいことが確認された．

被験者のアンケート結果を Table 4.3 に示す．アンケート結果において，操作方法の理解はどちらの手法についても比較的の高い結果を示しているが，思った通りに操作できるかについては，仮想ジョイスティックによる操作では低い結果を示しており，操作方法は理解できるがうまく扱うためには慣れや経験が必要になってくると考えられる．また，提案手法においては思った通りに操作できるかについても高い結果を示しており，はじめて使用する操作方法であっても問題なく意図した操作を行うことができたといえる．タスク完了の容易さについては，パターン 2, 3, 4 について提案手法による操作が高い結果を示している．

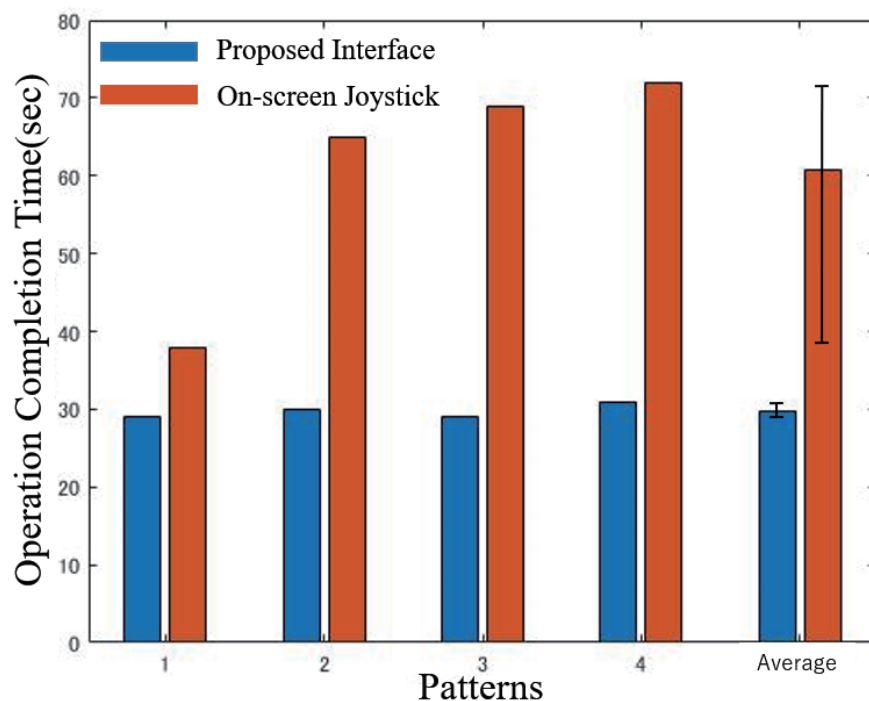


Fig. 4.21 The operation time for both the proposed method and the on-screen joystick for each pattern

Table 4.3 Questionnaire results for the experimental subject

On-screen Joystick	Questions	Proposed interface
4	操作方法はすぐに理解できたか	4
4	自分の思った通りに操作できたか	5
5	タスク1の容易さ	5
2	タスク2の容易さ	5
4	タスク3の容易さ	5
3	タスク4の容易さ	5
4	日常的に利用できそうか	4

提案インタフェースで操作完了時間と操作回数の減少により，操作負担を軽減することを確認した．また，アンケート評価においても高い結果を得られ，提案手法により簡易に床上物体を把持することが可能であると示した．したがって，開発した引いた線により手先目標を指定するインタフェースを使用することで，頸髄損傷患者のような体幹機能障害のある患者が容易に床上に落ちた物体を拾うことなど自立支援動作が可能となり，日常生活における QOL や ADL の向上が期待される．

4.6 まとめ

本研究では操作者の目視による確認とロボットアームのハンドに取り付けられた 1 台のカメラからの画像によって周囲を把握し，床上の物体把持を行うことのできるインタフェースを検討した．床上物体を把持するために簡易に操作できる手法として，新たにロボットアームの手先目標を指定するタッチパネル用インタフェースを提案した．本研究の有効性の検証のため，C5 レベルの頸髄損傷患者を対象として，4 パターンの把持位置でタッチパネル上の仮想ジョイスティックと提案インタフェースの操作比較実験を行った．提案インタフェースで操作完了時間と操作回数の減少により，操作負担を軽減することを確認した．また，アンケート評価においても高い結果を得られ，提案手法により簡易に床上物体を把持することが可能であると示した．したがって，開発した引いた線により手先目標を指定するインタフェースを使用することで，頸髄損傷患者のような体幹機能障害のある患者が容易に床上に落ちた物体を拾うことなど自立支援動作が可能となり，日常生活における QOL や ADL の向上が期待される．

第5章 結言

5.1 まとめ

現在，日本では事故や疾病などにより身体機能の一部に不自由があり，日常生活に制約がある身体障害者が数多くいる．肢体不自由者の疾患例として，脊髄損傷，脳性血管障害，脳性麻痺，筋ジストロフィー，ALSなどが挙げられる．特に，疾患例の中で脊髄損傷は，現在日本に10万人以上の患者があり，さらに毎年約5千人が新たに増加すると推定されている．脊髄損傷は，主として脊柱に強い外力が加えられることにより脊椎を損傷し，脊髄に損傷を受ける病態である．受傷原因は交通事故，高所からの転落，転倒と言った順に症例が多く，損傷レベルC5付近の患者が多い．

C5患者の主な動作筋は三角筋と上腕二頭筋で，運動機能として肩関節屈曲・外転・伸展，肘関節屈曲，前腕回外が可能である．しかし，胸から下のほぼ全体に麻痺が生じるため，移動の際は電動車椅子やハンドリムを工夫した車椅子を用いる．こういった機能障害のために日常生活の多くの場面で介助を必要とする．このような，重度機能障害を持った頸髄損傷者の生活の質を向上させることは重要となる．頸髄損傷者の生活支援として，ロボットアーム付き電動車いすが注目されている．このようシステムは，移動手段である電動車いすにロボットアームを取り付けられ，C5レベル頸髄損傷者の腕の代わりに用いられる．ロボットアームを使うことで幅広い動作支援ができるため，障害者自身が介助者なしにできることが増え，生活の質の向上につながる．このようなシステムを操作するためには様々なインターフェースが用いられる．例えば，一般的に電動車いすの運転のために普段使用することの多いジョイスティックやスクリーン上の仮想ジョイスティックなどが挙げられる．しかしながら，これらのインターフェースは対象者の指拘縮などの症状により使用できない場面も存在する．それ以外に，これらのインターフェースによるロボットアームの操作は，一般的に操作者がロボットアームと把持する物体を確認しながら操作する．そのため，上肢機能障害者が床上に落ちた物体を拾う場合，電動車いすの足元や机などの下に入り込んでしまうと，操作者が落ちている物体を視認することができず，物の拾う動作が困難となる．

この問題を解決するために，近年，障害者の症状により様々な電動車いすとロボットアームの操作インターフェースが提案されました．電動車いすの操作インターフェースについて，主に自動走行の手法を用いて操作者の負担を軽減する．例えば，GPS信号により電動車いす自動走行システムが開発された．このインターフェースは操作者の操作負担を大幅に軽減することができたが，GPS信号の精度により，室内環境での使用は困難となった．また，2D/3D LiDARにより空間マッピングを作成し，自動走行する手法もある．このような手法は，事前に空間マッピングを生成する場合で利用が

限定的になった．また，リアルタイムの空間マッピングを生成する場合で通信遅延などの問題が避けられない．ロボットアームの操作インターフェースに関して，近年に障害者を対象とした自動や半自動操作インターフェースに関する研究が進んでいる．例えば，ロボットアームに深度センサや複数台のカメラを搭載し，画像処理による目標物を認識し，操作者のコマンドで目標物を自動把持するインターフェースがある．しかしながら，複数台のカメラを使用するため，操作方式により使用できる場面も限定的になる．また，音声やジェスチャーにより，ロボットアームを操作するインターフェースも提案されました．しかしながら，このようなインターフェースは事前にコマンドを登録する必要があるため，利用可能な場面が限定的になってしまう．

そこで，電動車いすの操作について，本研究では頸髄損傷者の症状に対応するスクリーン上の仮想ジョイスティック操作インターフェースを提案した．提案手法で操作者の手ぶれによって生じる蛇行走行を防ぐために入力補正システムを導入した．また，電動車いすに搭載された1台のカメラにより目標物に貼り付けたARマーカーを認識し自動走行を行う操作インターフェースを提案した．自動走行中に生じる走行誤差の問題に対して，回帰分析の手法を用いて電動車いすのリアルタイムの位置情報から走行誤差を予測するモデルを構築し，予測した誤差を基づいて，電動車いすへの指令値の補正係数を計算できる入力補正システムを開発した．従来の研究と比較して，提案手法は，実際には達成が困難な複雑な車椅子のモデリングの構築を回避することで走行中誤差を補正可能となる．提案手法の評価について，3つの走行コースで比較実験を行い，それぞれ横方向の電圧指令値と自動走行の軌跡を比較することで提案手法の有効性を示した．

ロボットアームの手動操作について，本研究でタッチパネル上での仮想ジョイスティックの開発と手の3次元動作によるロボットアームの操作システムの開発を行った．提案された仮想ジョイスティックはC5レベル頸髄損傷者の腕の残存機能を用いて，スマホやタブレットから簡単にロボットアームに接続し，操作することが可能となる．スマートフォンのトラックパッドは意図せずにタッチなどの誤操作が起こしやすい問題に対して，誤操作防止システムを導入する．本提案手法の有効性を検証するために，現在の位置から目標位置までかかる時間を比較し，目標位置を達成するまで生成した軌道の比較と評価をすることで，誤操作防止を実現できるかの検証を行った．手の3次元動作によるロボットアームの操作システムにおいて，操作者の手の動きを読み取ることで，3次元的なアームの操作が可能となり，操作回数，つまり動作が切り替わる回数を減らすことができる．

最後に，床上に落ちた物体を拾う場合に対して，本研究で視覚情報に基づくロボットアーム用操作インターフェースを提案した．操作者の目視による確認とロボットアームのハンドに取り付けられた1台のカメラからの画像によって周囲を把握し，床上の物体把持を行うことのできるインタフェースを検討した．床上物体を把持するために簡易に操作できる手法として，新たにロボットアームの手先目標を指定するタッチパネル用インタフェースを提案した．本研究の有効性の検証のため，C5レベルの頸髄損

傷患者を対象として、4 パターンの把持位置でタッチパネル上の仮想ジョイスティックと提案インタフェースの操作比較実験を行った。提案インタフェースで操作完了時間と操作回数の減少により、操作負担を軽減することを確認した。また、アンケート評価においても高い結果を得られ、提案手法により簡易に床上物体を把持することが可能であると示した。したがって、開発した引いた線により手先目標を指定するインタフェースを使用することで、頸髄損傷患者のような体幹機能障害のある患者が容易に床上に落ちた物体を拾うことなど自立支援動作が可能となり、日常生活における QOL や ADL の向上が期待される。

5.2 今後の展望

世界における高齢少子化問題は避けられず、介護現場の労働力不足の問題による肢体不自由者の自立や QOL の向上に向けたロボットアーム付き電動車いすの開発が不可欠であるといえる。本研究で開発したロボットアーム付き電動車いす操作インターフェースは、普段から多くの人に使用されているスマートフォンやタブレット型端末を入力インターフェースとして使用しているため、操作に慣れているといえる。その他の対象者を考えるうえでも、タッチパネルを使用したものであれば、筋力低下などの症状を持った方に対しても柔軟に対応させることが可能である。しかしながら、本論文で開発したインターフェースにも多分に改善の余地がある。具体的には、電動車いすとロボットアーム操作インターフェースの統合、電動車いすが障害物回避アルゴリズムの導入などが考えられる。これらを達成することで、実際に使用中の便利性及び安全性を向上することが可能となる。

今後、開発したロボットアーム付き電動車いす操作インターフェースのより多くの方々への臨床実験の実施を通じたインターフェースの改良や実用化が期待される。そして、頸髄損傷者の日常生活における活動の幅の拡大への展開も期待できる。

謝辞

本論文は平成 31 年 4 月から令和 5 年 2 月までに遂行された研究を中心にまとめたものであり、多くの先生方の御指導と多くの方々のご協力の賜物であります。ここに感謝の意を表します。

指導教員である三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 矢野賢一教授には、2015 年から現在に至るまでの 8 年間、大変お世話になりました。8 年という長い年月でしたが、変わらずご指導いただいたこと、まずは深く感謝申し上げます。研究テーマとしては、多くの企業との共同研究という形で、本当に世の中で必要とされている理論や技術を開発するという非常に高度でやりがいのあるテーマを用意して下さい、また、それを遂行するに十分な研究環境を与えて下さいました。本研究を遂行するにあたって、常に適切なご指導を下さり、また、3 度の国際会議をはじめ多数の学会発表、幾度の企業とのプロジェクト会議など多くの社交や議論の機会を与えて下さいましたことを心より感謝申し上げます。

大変ご多用であるにも関わらず、本論文の審査委員を務めていただき、有益なご助言を下さいました三重大学大学院工学研究科機械工学専攻池浦良淳教授、小竹茂夫教授に厚くお礼申し上げます。

当研究室の教員であり、同じく本論文の審査委員を務めていただきました加藤典彦准教授は、ミーティングのなかで様々な視点で物事を捉え、客観的に自分の研究を見直すことの必要性や研究者としての心構えや社会貢献の意義など研究者としての考え方もご指導いただきました。

三重大学工学研究科の松井博和助教には、研究会等を通じて多くの有益なご助言をいただき、また普段の研究活動においてもご指導、ご支援を賜りました。ここに深くお礼申し上げます。

また、三重大学医学部附属病院の坂本良太助教には、6 年間非常にやりがいのある福祉分野の研究の中で、制御系の設計やこれまであまり学んでこなかったプログラミングや電気回路について丁寧にご指導いただきました。また、毎週のミーティングの中で最新の情報や貴重なご意見をいただき誠に感謝しております。

本研究における被験者としてご協力いただき、様々ご意見をいただきました大石武司様に深くお礼申し上げます。

研究の遂行にあたり、研究を行いやすい環境を作って頂いた三重大学大学院工学研究科機械工学専攻知能ロボティクス研究室 秘書 熊谷早織様、一村佳世様に厚く感謝申し上げます。

本論文の執筆および研究の遂行にあたり、三重大学大学院工学研究科機械工学専攻

知能ロボティクス研究室の修了生，卒業生および現役生の皆様には大変多くのご支援とご協力をいただきました．特に同じ研究グループとしてともに協力し合い研究を進めてきた水谷直人先輩，大野航平先輩，伊丹琢先輩，田中栄人先輩，田申先輩，勝村一優氏，市川智也氏，森本竜弘氏，津野貴哉氏，宮脇優斗氏，郭楠氏，小澄怜未氏，斉松氏，竹内良緒氏に感謝の意を表します．

最後に，これまでの 30 年間もの長い高等教育の間，温かく見守ってくれた祖父母，両親，妻に深く感謝申し上げます．そして，これまでの研究活動，学生生活を送る上でご支援，ご協力いただきましたすべての皆様に感謝の意を表するとともに，これまで培ってきた知識，経験，技術をもとに博士として社会に貢献していくことを決意して，謝辞とさせていただきます．

参考文献

- [1] 内閣府，令和 4 年版障害者白書，障害者状況，pp. 213，2021．
- [2] 内閣府，平成 30 年障害者白書，障害者の全体的状況，pp. 1，2011．
- [3] China Disabled Persons Federation, National Sampling Survey on Impairment, 2015.
- [4] NPO 法人日本せきずい基金，日本における脊髄損傷疫学調査，1990～1992．
- [5] 柴崎啓一，全国脊髄損傷登録統計 2002 年 1 月～12 月，日本脊髄障害医学会雑誌，Vol. 18，2005．
- [6] KOMPAS，脊髄損傷のリハビリテーション，
<http://kompas.hosp.keio.ac.jp/contents/000159.html>（参照：2023 年 2 月 15 日）．
- [7] 住田幹男，杉原勝宣，徳弘昭博，真柄彰，内田竜生，元田英一，日本における高齢者脊髄損傷の状況，日職災医誌，Vol. 52，pp. 17-23，2004．
- [8] 永田和之，脇田優仁，山野辺夏樹，安藤慶昭，OpenRTM-aist による生活支援ロボットのためのロボットアームおよびマンマシンインタフェースの RT コンポーネント開発，日本機械学会論文集 C 編，76 巻 766 号，pp. 1419-1426，2010．
- [9] 尹祐根，脇田優仁，山野辺夏樹，上肢に障害のある人の生活を支援するロボットアーム RAPUDA による自立支援，バイオメカニズム学会誌，Vol. 37，No. 2，pp. 100-104，2013．
- [10] Vogel. J, Leidner. D, Hagenruber. A, Panzirsch. M, Bauml. B, Denninger. M, Hillenbrand. U, Suchenwirth. L, Schmaus. P, Sewtz. M, Bauer. A, Hulin. T, Iskandar. M, Quere. G, Albu-Schaffer. A, Dietrich. A, An Ecosystem for Heterogeneous Robotic Assistants in Caregiving: Core Functionalities and Use Cases, IEEE Robotics Automation Magazine, Vol. 28, Issue 3, pp. 12-28, 2021.
- [11] 山口純，井上剛伸，我澤賢之，木下崇史，木之瀬隆，中山剛，小林庸子，樋口智和，前野崇，肢体不自由者用ロボットアームの臨床評価，日本デザイン学会第 59 回研究発表大会，2012．

- [12] Chung. C, Ka. H, Wang. H, Ding.D, Kelleher. A, Cooper. A, Performance Evaluation of a Mobile Touchscreen Interface for Assistive Robotic Manipulators: A Pilot Study. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 23(2), pp. 131-139, 2017.
- [13] 国立身体障害者リハビリテーションセンター , 電動車いす適合・操作練習マニュアル , pp. 8 , 2006 .
- [14] P. Abolghasemi, R. Rahmatizadeh, A. Behal, L. Boloni, A Real-Time Technique for Positioning a Wheelchair-Mounted Robotic Arm for Household Manipulation Tasks, the Workshop Program of the Association for the Advancement of Artificial Intelligences Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence, WS-16-01, pp. 2-7, 2016.
- [15] 萩澤孝 , ロボットアームのユーザー評価と新しい機器を生活に取り入れる難しさ , 第 30 回リハ工学カンファレンス in おきなわ , 2015 .
- [16] K. Lee, W. Chang, S. Kim, C. Im, Real-Time Eye-Writing Recognition Using Electrooculogram (EOG), *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 25, Issue 1, pp. 37-48, 2016.
- [17] C. Ishii, Control of an Electric Wheelchair Based on EMG, OG and EEG, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 83, pp. 1006-1009, 2017.
- [18] C. Han, Y. Kim, D. Kim, S. Kim, Z. Nenadic, C. Im, Electroencephalography-based endogenous brain-computer interface for online communication with a completely locked-in patient, *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, 16:18, 2019.
- [19] W. Chen, S. Chen, Y. Liu, Y. Chen, C. Chen, An Electric Wheelchair Manipulating System Using SSVEP-Based BCI System, *MDPI Biosensors*, 2(10), 2022.
- [20] P. Abolghasemi, R. Rahmatizadeh, A. Behal, L. Boloni, A Real-Time Technique for Positioning a Wheelchair-Mounted Robotic Arm for Household Manipulation Tasks, The Workshop Program of the Association for the Advancement of Artificial Intelligence Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence, WS-16-01, pp. 2-7, 2016.
- [21] J. Wang, T. Wang, C. Yao, X. Li, C. Wu, Active Tension Control for WT Wheelchair Robot by Using a Novel Control Law for Holonomic or Nonholonomic Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014.

-
- [22] Y. Yasumuro, S. Kusakabe, H. Dan, 3D Barrier-Free Verification for Wheelchair Accsee, Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, pp. 564-571, 2013.
 - [23] K. Tobita, Y. Shikanai, K. Mima, Study on Automatic Operation of Manual Wheelchair Prototype and Basic Experiments, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 33, No. 1, pp. 69-77, 2021.
 - [24] M. A. Shamseldin, E. Khaled, A. Youssef, D. Mohamed, S. Ahmed, A New Design Identification and Control Based on GA Optimization for an Autonomous Wheelchair, MDPI Robotics, 11(5), 2022.
 - [25] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, Probabilistic Robotics, The MIT Press, 2005.
 - [26] Y. Mori, K. Nagao, Automatic Generation of Multidestination Routes for Autonomous Wheelchairs, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 32, No. 6, pp. 1121-1136, 2020.
 - [27] C. Gao, M. Sands, J. Spletzer, Towards Autonomous Wheelchair Systems in Urban Environments, Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 62, pp. 13-23, 2010.
 - [28] H. Grewal, A. Matthews, R. Tea, K. George, LIDAR-based autonomous wheelchair, IEEE Sensors Applications Symposium, 2017.
 - [29] M. Yokozuka, O. Matsumoto, Accurate Localization for Making Maps to Mobile Robots Using Odometry and GPS Without Scan-Matching, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 27, No. 4, pp. 410-418, 2015.
 - [30] W. Rahiman, Z. Zainal, An Overview of Development GPS Navigation for Autonomous car, IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 1112-1118, 2013.
 - [31] N. Yokoya, Mixed Reality: Merging Real and Virtual Worlds: I Introduction, Systems Control And Information, Vol. 49, Issue 12, pp. 489-494, 2005.
 - [32] N. Matsunaga, Y. Takeuchi, H. Okajima, A Construction Method of Obstacle Avoidance System for Welfare Vehicle by Spatial Mapping of Driving Environment using Mixed Reality, Transactions of the JSME, Vol. 87, No. 894, pp. 1-16, 2021.
 - [33] T. Mizunami, Y. Sakamura, A. Tomita, K. Inoue, I. Kitahara, E. Harada, Reduction of Anxiety for an Autonomous Vehicle by Augmented Visual Information, The 82nd Annual Convention of the Japanese Psychological Association, 3EV-056, 2018.

- [34] H. Otsuka, R. Yajima, K. Nagatani, D. Kubo, Localization of a Small Multirotor UAV Using Dropping AR Markers, The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics, 2A2-G02, 2015.
- [35] F. Sato, T. Koshizen, T. Matsumoto, H. Kawase, S. Miyamoto, Y. Torimoto, Self-driving system for electric wheelchair using smartphone to estimate travelable areas, 2018 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 298-304, 2018.
- [36] J.Kato, G. Deguchi, J. Inoue, M. Iwase, Improvement of Performance of Navigation System for Supporting Independence Rehabilitation of Wheelchair-Bed Transfer, Journal of Physics: Conf. Series 1487 (2020) 012041, 2020.
- [37] 並木明夫, 多眼視覚ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 40, No. 5, pp. 387-392, 2022.
- [38] Hashimoto. S, Ishida. A, Imani. M, Igarashi. T, Touch Me: An Augmented Reality Interface for Remote Robot Control, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 25 No. 3, pp. 529-537, 2013.
- [39] Driessen. B, Liefhebber. F, Kate. T, Van Warden. K, Collaborative Control of the Manus Manipulator, Universal Access in the Information Society, pp. 165-173, 2005.
- [40] Hebert. P, Ma. J, Borders. J, Aydemir. A, Bajracharya. M, Hudson. N, Shankar. K, Karumanchi. S, Douillard. B, Burdick. J, Supervised Remote Robot with Guided Autonomy and Teleoperation (SURROGATE): A Framework for Whole-Body Manipulation, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015.
- [41] Soares. J, Vale. A, Ventura. R, A Multi-Purpose Rescue Vehicle and a human-robot interface architecture for remote assistance in ITER, Fusion Engineering and Design 98-99, pp. 1656-1659, 2015.
- [42] Tsui. K, Kim. D, Behal, A, ontak. D, Yanco. H, I want that: Human-in-the-loop control of a wheelchair-mounted robotic arm, Applied Bionics and Biomechanics 8, pp. 127-147, 2011.
- [43] 杉本和也, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一, 遠隔操作ロボットのための複数 R-GBD センサを用いた半隠消映像のオンライン生成, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 12, pp. 1185-1192, 2015.

-
- [44] Jiang. H, Zhang. T, Wachs. J, Duerstock. B, Enhanced control of a wheelchair-mounted robotic manipulator using 3-D vision and multimodal interaction, Computer Vision and Image Understanding 149, pp. 21-31, 2016.
 - [45] Ding. D, Styler. B, Chung. C, Houriet. A, Development of a Vision-Guided Shared-Control System for Assistive Robotic Manipulators, Sensors Journal, Vol. 22, Issue 12, pp. 1-14, 2022.
 - [46] 宮脇優斗, 楊来郡, 坂本良太, 加藤典彦, 矢野賢一, 島田真太郎, 画面注視を要しない電動車いす操作作用インタフェースの開発, 日本機械学会東海支部第 68 期総会・講演会, 68 巻, No. 193-1, 2019 .

研究業績

学術論文

1. L.Yang, T.Ichikawa, Y.Miyawaki, R.Sakamoto, N.Kato, K.Yano and S.Shimada, Maloperation Prevention Filter for Touchscreen Used in Robot Arm, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1267, No. 012075, pp. 1-6, 2019.
2. L.Yang, N.Guo, R.Sakamoto, N.Kato and K.Yano, Electric Wheelchair Hybrid Operating System Coordinated with Working Range of a Robotic Arm, Journal of Robotics and Control, Vol.3, Issue 5, pp. 679-689, 2022.
3. L.Yang, R.Sakamoto, N.Kato and K.Yano, Vision-based Robot Arm Control Interface for Retrieving Objects from the Floor, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.35, No.2, pp501-509, 2023.

査読付き国際会議論文

1. T.Ichikawa, K.Yano, T.Shimada, L. Yang, R.Sakamoto, S.Shimada and P.Min Yong, Gesture-based Operation System for Robot Arm and Electric Wheelchair, Proc. of ISIET (International Symposium on Innovative Education and Technology), pp.36-42, Thanyaburi, Thailand, 16-17 July 2018.
2. Y.Miyawaki, L. Yang, R.Sakamoto, N.Kato, K.Yano and P.Min Yong, Electric Wheelchair Control System without Gazing the Operation Screen, Proc. of ICoME (The 9th TSME International Conference on Mechanical Engineering), Paper No.2017-0105, Phuket, Thailand, 11-14 December, 2018.
3. L.Yang, T.Ichikawa, Y.Miyawaki, R.Sakamoto, N.Kato, K.Yano and S.Shimada, Maloperation Prevention Filter for Touchscreen Used in Robot Arm, Proc. of AIACT (the 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Automation and Control Technologies), pp.1-6, Xi'an, China, 25-27 April, 2019.

4. Y.Miyawaki, T.Ichikawa, L. Yang, R.Sakamoto, N.Kato, K.Yano, S.Shimada and P.Min Yong, Interface Using a Touch Panel for Gripping an Object on the Floor that Designates the Hand of the Robot Arm, Proc. of The 4th International Conference on Innovative Education and Technology, Pataya, Thailand, July 11-14, 2019.
5. L.Yang, T.Ichikawa, R.Sakamoto, N.Kato, T.Itami, K.Yano and S.Shimada, Robot Arm Operating Interface Using a Touch Panel for Gripping an Object on the Floor by Designating the End Effector, Proc. of SII (IEEE/SICE International Symposium on System Integration), pp.401-404, Honolulu, USA, 12-15 January, 2020.
6. I.Hirahata, L.Yang, K.Yano and K.Torii, "Standing Support Robot for Recovery of Lower Limb Function and Evaluation of Caregiver's Burden by Measuring Biological Signals", Proc. of BIBM (IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine), pp.3813-3814, Las Vegas, USA, 6-9 December, 2022.
7. L. Yang, T.Ichikawa, R.Sakamoto, N.Kato, T.Itami, K.Yano and S.Shimada, Robot Arm Operating Interface Using a Touch Panel for Gripping an Object on the Floor by Designating the End Effector, Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Honolulu, Hawaii, USA, 12-15 January, 2020.
8. Y.Taniguchi, Y.Ogata, M.Katsumura, L.Yang, K.Yano, T.Nakao and K.Torii, "System for Operating Electric Wheelchairs Using Only the Remaining Functions of the Thumbs of Muscular Dystrophy Patients", Proc. of EMBC (43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine Biology Society), Guadalajara, pp.4753-4756, Mexico (Online), October 31-November 4, 2021.

国内学術講演会における発表

1. 楊来郡, 市川智也, 宮脇優斗, 坂本良太, 加藤典彦, 矢野賢一, 島田真太郎, ロボットアーム操作用タッチスクリーンのための誤操作防止フィルタの開発, 日本機械学会東海支部第 68 期講演会, 岐阜, 2019 年 3 月 7-8 日.
2. 宮脇優斗, 楊来郡, 坂本良太, 加藤典彦, 矢野賢一, 島田真太郎, 画面注視を要しない電動車いす用インターフェースの開発, 日本機械学会東海支部第 68 期講演会, 岐阜, 2019 年 3 月 7-8 日.
3. 楊来郡, 坂本良太, 加藤典彦, 矢野賢一, 島田真太郎, ロボットアーム操作用タッチスクリーンのための誤操作防止フィルタの開発, 三重大学北勢サテライト第 6 回健康福祉システム開発研究会, 四日市, 2020 年 1 月 17 日.

4. 楊来郡，市川智也，坂本良太，伊丹琢，加藤典彦，矢野賢一，島田真太郎，床上物体把持を目的とした電動車いす搭載型ロボットアーム用操作インターフェースの開発，日本機械学会東海支部第 69 期講演会，名古屋，2020 年 3 月 10-11 日．
5. 楊来郡，斉松，勝村一優，坂本良太，加藤典彦，矢野賢一，目標位置に対する誤差を逐次補正する電動車いす用自動走行システムの開発，日本機械学会東海支部第 71 期講演会，オンライン開催，2022 年 3 月 9-11 日．
6. 楊来郡，坂本良太，加藤典彦，矢野賢一，床上物体把持のための視覚情報に基づく電動車いす搭載型ロボットアーム用操作インターフェースの開発，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023，名古屋，2023 年 6 月 27 日-7 月 1 日．

目 次

1.1	Proportion by cause of spinal cord injury	1
1.2	Percentage incidence of spinal cord injury by case	2
1.3	Cervical spinal cord	3
1.4	Having paralysis or not of the exercise function	3
1.5	The number of patients according to the damage level	4
1.6	Magic hand	5
1.7	JACO(Kinowa Robotics)	6
1.8	RAPUDA(AIST)	6
1.9	Single switch	8
1.10	Key Pad	8
1.11	Organization of this work	11
2.1	EMG270 Powered-Wheelchair	13
2.2	Configuration of the hardware system	14
2.3	Bluetooth module	15
2.4	Arduino	15
2.5	MCP4922	16
2.6	Operation by the person with cervical cord injury	17
2.7	Manual operation interafce	18
2.8	Input value correction method	19
2.9	Operation screen of conventional method	20
2.10	Operation screen of proposed method	20
2.11	Experimental driving course	21
2.12	Input signal series for y coordinate in the comparative operation exper- iment	22
2.13	AR-marker in this research	23
2.14	Web camera used in this research	24
2.15	Robtoic arm mounted on the wheelchair	24
2.16	Position of webcamra on wheelchair	25
2.17	Working range of the robotic arm	26
2.18	Specified working range in the horizontal plane	27
2.19	Proposed GUI	28
2.20	Experiment environment	29

2.21	Experimental task	30
2.22	Accuracy of position estimation by AR marker	30
2.23	Definition of moving error	31
2.24	Relationship between error and initial angle	32
2.25	Relationship between error and initial distance	33
2.26	Error prediction model	34
2.27	Input voltage correction coefficient	35
2.28	Configuration of the whole system	36
2.29	Experimental view	37
2.30	Running course A	38
2.31	Running course B	38
2.32	Running course C	39
2.33	Comparison of the velocity command voltage in course A	40
2.34	Comparison of the velocity command voltage in course B	40
2.35	Comparison of the velocity command voltage course C	41
2.36	Comparison of the moving trajectory in course A	42
2.37	Comparison of the moving trajectory in course B	42
2.38	Comparison of the moving trajectory in course C	43
3.1	7-DOF robot arm Udero	46
3.2	Structure of the robot arm	47
3.3	Folding state	48
3.4	System configuration	49
3.5	Working range of Udero	49
3.6	Calculation of θ_4	51
3.7	The specified coordinates exceed the movable range	53
3.8	Offset in the 4th Joint	54
3.9	Structure of 6th and 7th joint	55
3.10	Existing interface	57
3.11	Arrangement of preliminary experiment	58
3.12	Preliminary experiment	59
3.13	Structure of operate system	59
3.14	RaspberryPi3B	61
3.15	Function of webiopi	61
3.16	Digispark	62
3.17	Operate interface	63
3.18	Block diagram of control system	63
3.19	Conversion of target position	64

3.20	Validation of operate	65
3.21	Maloperation prevention system	66
3.22	Outline of experiment	67
3.23	Image of experiment	68
3.24	The first comparative experiment of operation	69
3.25	The second comparative experiment of operation	69
3.26	The third comparative experiment of operation	70
3.27	3D camera Leap Motion	71
3.28	Position operation	72
3.29	Endeffector operation	72
3.30	Experimental setup of joystick and button	73
3.31	Experimental setup of infrared camera operation	73
3.32	Operation time with joystick and button	74
3.33	Operation time with Leap Motion	75
4.1	Robotic arm myCobot280m5	77
4.2	Proposed user interface with the input device of the iPad	79
4.3	The 1st operating procedure	80
4.4	The 2nd operating procedure	80
4.5	The 3rd operating procedure	81
4.6	Calculate the position in 3D space with a 2D touch coordinate	82
4.7	Coordinate settings in real-system	83
4.8	Horizontal grip	84
4.9	Vertical grip	84
4.10	The calculation of rotation angle in end-effector	85
4.11	Experimental devices	86
4.12	Webcamera mounted on end effector	87
4.13	Comparative interface	87
4.14	Experimental task	88
4.15	Operation with the second joint of little finger	89
4.16	Operation with scene	89
4.17	Operation pattern 1	91
4.18	Operation pattern 2	91
4.19	Operation pattern 3	92
4.20	Operation pattern 4	92
4.21	The operation time for both the proposed method and the on-screen joystick for each pattern	94

表 目 次

2.1	Configuration of electric wheelchair	14
2.2	Configuration of Bluetooth module	15
2.3	Configuration of Arduino Mega 2560	16
2.4	Configuration of MCP4922	16
2.5	Operation time[s] of conventional method	22
2.6	Operation time[s] of proposed method	22
2.7	Relationship between error and initial angle	32
2.8	Relationship between error and initial distance	33
3.1	Specification of the robot arm Udero	45
3.2	D-H parameter of Udero	48
3.3	Movement of J_2 and J_4	56
3.4	Movement of J_1	56
3.5	Specification of RaspberryPi3B	60
3.6	Numbers of operations with joystick	75
3.7	Numbers of operations with leap motion	75
4.1	Specification of the robot arm myCobot	78
4.2	Comparison of operation numbers between proposed interface and on-screen joystick	93
4.3	Questionnaire results for the experimental subject	94