

協働ロボットアームのためのハンズフリー制御手法の提案

木村 拓己^{1,a)} 土田 修平^{1,b)} 寺田 努^{1,c)} 塚本 昌彦^{1,d)}

概要:近年、産業分野において作業者と同一空間で連携して作業する協働ロボットアームの導入が進められており、作業者が作業を進めつつロボットアームを操作できれば、作業効率の向上が期待できる。しかし、作業者の身体動作の制約とロボットアーム動作への割り当て方法を体系的にまとめた研究は筆者らの知る限りなく、作業の種類によってはかえって作業者の行動を制限してしまう可能性がある。作業者が多様な状況下でロボットアームを自由に操作するためには、作業者を取り巻く環境や作業者自身が取りうる動作から作業者の身体が受ける制約を考慮した上で、作業者を取り巻く状況ごとに適したロボットアームの身体動作を用いた制御システムを設計するための指針を確立する必要があるといえる。本論文では、作業者を取り巻く状況ごとに適したロボットアームの制御システムの設計指針の確立を目指すために、特に工場での作業に着目し、その特徴や作業者の身体動作が受ける制約について検討した上で、身体動作を用いたロボットアーム制御システムを設計・実装し、ロボットアームを制御して与えられたタスクを完了するまでにかかる時間の測定および各身体部位の動作を用いたロボットアームの制御のしやすさに関する評価を行った。

1. はじめに

近年、筋電義手やパワーアシストスーツをはじめとするロボティクス技術の実生活への導入が進められ、人間とロボットの協力の形についてさまざまな視点から検討されはじめている。ロボティクス技術の応用範囲は多岐にわたり、医療分野における手術補助や身体障害者の行動支援、産業分野における作業支援などがその例として挙げられる。とりわけ産業分野においては、作業者と同一空間で連携して作業するロボットである協働ロボット(協調ロボット)の導入が進められ [1]、生産効率を向上させる工夫がなされている。例えば協働ロボットの導入により作業空間の削減やロボット起動に要する時間の短縮が可能となる [2]。また作業者は、ロボットと協力して部品の組み立てや製品の出し入れ・受け渡し等の作業を行える [3] ため、労働による負担を軽減できる。

協働ロボットの具体的な活用例として、工場でのロボットアームを用いた作業が考えられる。例えば、はんだづけや製品の組み立て作業において、ロボットアームを用いることで部品を様々な角度・位置で把持したり、手の届かない箇所から部品をピックアップできる。このように作業者

が作業を進めつつ同時にロボットアームを自由に操作できれば、作業効率の向上が期待できる。

ロボットアームの制御手法として、これまで筋電位 [4] や足の動作 [5] を用いた手法などが提案されてきた。しかし、作業者の身体動作の制約とロボットアーム動作への割り当て方法を体系的にまとめた研究は筆者らの知る限りなく、作業の種類によってはかえって作業者の行動を制限してしまう可能性がある。作業者が多様な状況下でロボットアームを自由に操作するためには、作業者を取り巻く環境や作業者自身が取りうる動作から作業者の身体が受ける制約を考慮した上で、作業者を取り巻く状況ごとに適したロボットアームの身体動作を用いた制御システムを設計するための指針を確立する必要があるといえる。

そこで本論文では、作業者を取り巻く状況ごとに適したロボットアームの制御システムの設計指針を確立するために、特に工場での作業に着目し、その特徴や作業者の身体動作が受ける制約について検討した上で、身体動作を用いたロボットアームの制御手法を検討する。具体的な制御手法としては、状況に応じてロボットアームの多様な制御方法を選択できるウェアラブルユーザインタフェースを活用する。ウェアラブルユーザインタフェースの利点としては、様々な身体部位に装着したセンサデバイスを用いた入力方法を検討できること、小型かつ軽量であるため持ち運びしやすいこと、起立時・着席時などにおいてもインタフェースを利用できること、ハンズフリーでインタフェースの操

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University
a) takumi-kimura@stu.kobe-u.ac.jp
b) tuchida@eedept.kobe-u.ac.jp
c) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp
d) tuka@kobe-u.ac.jp

作ができることなどが挙げられる。本論文では工場内での利用に適したウェアラブルユーザインタフェースについて検討するために、まず工場内で作業者の身体が受ける制約および作業の種類ごとに利用できる身体部位を整理する。次にその中で特にデスク作業での利用を想定し、起立時および着席時に実施できる作業者の身体動作をセンサデバイスで認識し、4種類のロボットアーム動作を制御するシステムを実装した。本システムを利用するにあたり、ロボットアーム制御時の作業者の姿勢によってロボットアームの制御のしやすさは変化し、タスク完了にかかる時間に差異が生じると予想できる。そこで制御時に作業者が取りうる姿勢のうち、起立状態および着席状態に焦点を当て、双方の状態において本システムを利用した場合にタスク完了までにかかる時間やロボットアームの制御のしやすさに差異が生じるかを検証するため評価実験を行った。

本論文は次の通り構成される。2章で関連研究を紹介する。3章で提案手法を実現するために必要な想定環境を検討し、4章で身体動作の制約を作業内容および身体動作を認識するセンサデバイスの観点から検討する。5章で提案システムについて説明し、6章で評価実験とその結果に対する考察および議論を行う。最後に7章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

2.1 ロボットアームの制御手法に関する研究

人間の身体動作や生体情報を用いたロボットアームの制御手法に関する研究が進められている。Saraijiらは、装着者とは別の操作者がロボットアームを遠隔操作する手法を提案している [6]。しかし装着者と操作者の意思疎通を図るのが困難であるため、装着者の意図しないロボットアーム動作が発生する可能性がある。Sasakiらは、靴下型ユーザインタフェースを用いてユーザの足首・足指の動作によりロボットアーム・ハンドを制御する手法を提案している [7]。しかしユーザが制御とは異なる目的の行動を取る際にもこれに基づいて動作する可能性があり、実生活での利用に適していない。Penalozaらは、脳波を用いてロボットアームを動作させる手法を提案している [8]。しかし実生活で利用する場合は、ユーザの意図しない脳波の発生に基づく動作を行う可能性がある。

これらのことから、ロボットアームの制御手法に関する研究は数多くされており、人間とロボットの協力の形について検討する上で人間の身体動作や生体情報を用いてロボットアームを制御する手法は有用であるといえる。しかし、ユーザを取り巻く環境やユーザ自身が取りうる行動からユーザの身体が受ける制約を考慮しているものは少ない。実社会で利用するには、利用環境の特徴を明確化し、想定される制約を十分に把握・吟味した上で各利用状況に対応

した制御手法を構築する必要がある。本論文は、利用環境として工場での作業を想定し、作業状況や作業者の姿勢によって利用できる身体動作を明らかにしたうえでこれらをロボットアーム制御に用いる点で先行研究とは異なる。

2.2 ウェアラブルユーザインタフェース技術に関する研究

センサデバイスを身体に装着して利用するウェアラブルユーザインタフェース技術に関する研究が進められている。Wittらは、ユーザがHMDおよび手の回転を認識するグローブを装着し、ハンズフリーでメニューの選択を行う手法を提案している [9]。しかし、手の動きを用いるために、両手を使う作業と並行して利用することはできない。檜山らは、 piezofilm を用いてユーザの顔の動きを検出し、計算機への入力を行う手法を提案している [10]。佐藤らは、カメラを用いてユーザの口唇の動きを検出し、その特徴を用いてコマンドを識別処理する手法を提案している [11]。真鍋らは、ユーザが電極を備えたヘッドホンを装着し、EOG法に基づいて視線入力を行う手法を提案するとともに、その有効性および音楽プレーヤ操作への応用が可能であることを確認している [12]。しかし、いずれもユーザの意図しない顔の動きによる誤入力が発生する可能性がある。小川らは、ユーザがカメラと加速度センサを搭載したHMD(Head Mounted Display)を装着し、カメラを注視している間のみ首振りによって計算機への入力を行う手法を提案するとともに、ユーザの意図と異なる誤入力の発生頻度が少なくなることを確認している [13]。これにより、ユーザは頭部動作を用いて必要なときだけ意のままにハンズフリーで計算機に入力することができる。堀江らは、ユーザ自身が置かれている状況に応じて身体に装着した加速度センサを2つ選択し、これらと連動して動く直線の交点を用いてポインティングを行う手法を提案している [14]。山本らは、あらかじめ日常生活における制約を想定した上で状況ごとに適した身体動作をウェアラブルセンサで認識し、ハンズフリーで情報端末への入力を行う手法を提案している [15]。具体的には、ユーザを取り巻く状況の変化も考慮しながら手と足に装着した加速度センサを用いてユーザの自然なジェスチャを認識することにより情報端末への入力を行う手法を提案している。これにより、ユーザは自身が置かれている状況に応じて入力方法を変更し、手足を用いて必要な時だけ意のままにハンズフリーで情報端末への入力およびその操作切り替えを行うことができる。これらはいずれも利用環境下でユーザが受ける制約を考慮した上で提案された手法であるため、実生活での利用が想定されているといえる。

これらのことから、ウェアラブルユーザインタフェースを用いてハンズフリーで情報端末を利用する手法は数多く提案されていることがわかる。今日ではさまざまな種類の

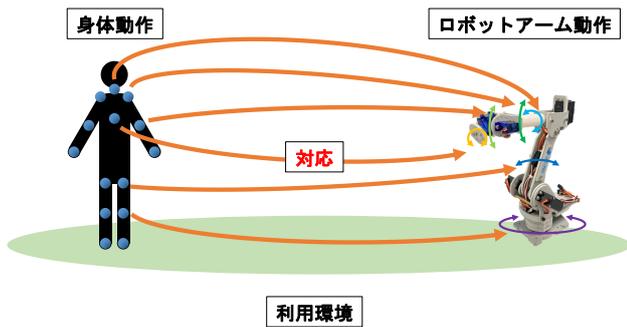


図 1 身体動作とロボットアーム動作の対応

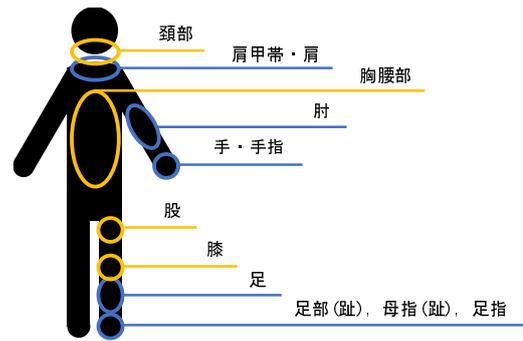


図 2 測定対象の身体部位

表 1 測定対象の身体部位の分類

上肢	肩甲帯, 肩 (肩甲帯の動きを含む), 肘, 前腕, 手
手指	母指, 指
下肢	股, 膝, 足, 足部(趾), 母指(趾), 足指
体幹	頸部, 胸腰部

ウェアラブルユーザインタフェースが存在するが、その多くが加速度センサをはじめとするセンサデバイスを搭載しており、これらを通じて取得できる人間の身体動作に関するセンサデータを用いてハードウェアやソフトウェアを利用することができる。特に、利用環境に応じてインタフェースを装着する位置および装着するインタフェースの種類を選択することができるため、利用環境の制約を考慮した身体動作認識を行うための一有効手段であると考えられる。

以上のことから、本論文ではまず利用環境として工場内での作業を想定し、このときに作業者の身体が受ける制約について検討する。次に、この制約の下で利用可能な身体動作をウェアラブルユーザインタフェースで認識し、ロボットアームを制御する手法を提案する。

3. 動作の対応

本章では、身体動作を用いたロボットアームの制御システムを構築するために、身体動作、ロボットアーム動作、利用環境の特徴を把握する(図1)。

3.1 身体動作

身体動作は、骨格のつながり目としての役割を果たす関節の運動に基づいて行われる。米本ら [16] によると、関節可動域測定とその表示で使用する関節運動は計 14 種類存在し、身体部位ごとに行える運動の種類は異なる。また、測定対象の身体部位は主に上肢、手指、下肢、体幹に大別され、さらに表 1 および図 2 に示す通り細分化される。以上のことから、身体動作はその種類の豊富さからロボットアーム制御への多種多様な割り当てを検討できるといえる。なお、本論文ではこれらのうち頸部、胸腰部、股、膝の動作の利用を想定する。

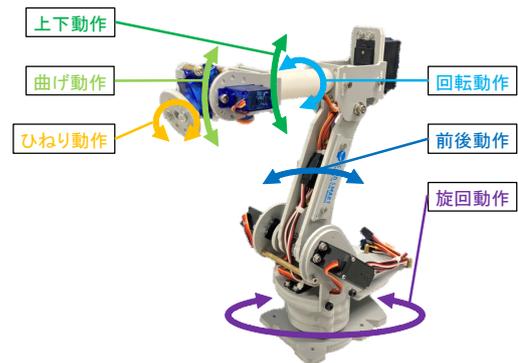


図 3 6 軸ロボットアームとその動作

3.2 ロボットアーム動作

ロボットアームは、産業用ロボットアームとして多く用いられている 6 軸ロボットアーム [17] の利用を想定する。ここで、6 軸ロボットアームが行える動作を図 3 に示す。

3.3 利用環境

ロボットアームの利用環境の例としては医療現場での手術補助、身体障害者の行動支援、工場内での作業などが挙げられる。本論文では、このうち工場内での作業時における利用を想定する。

4. 身体動作の制約

身体動作はその種類の豊富さからロボットアームの制御方法に対する割り当て方を数多く検討できるが、利用できる身体部位は作業者の状態に応じて変化する。本章では、作業者が両手で作業を行うという仮定のもとで、工場内での作業のための身体動作を用いたロボットアームの制御手法を提案する上で必要な制約の検討を行う。

4.1 作業対象と作業者の視線の関係による制約

頸部の屈曲・伸展動作および回旋動作は、作業対象から一時的に視線を外す動作にあたる。したがって、これらの動作を用いるにあたり、一時的に視線を外しても問題がない作業とそうではない作業を分類し把握しておく必要がある。以下、前者の作業をアクティブタスク、後者の作業をパッシブタスクとしてそれぞれ定義し、議論する。

表 2 アクティブタスクおよびパッシブタスクの分類

タスクの種類	具体例
アクティブタスク	はんだづけ デスクでの製品の組み立て 製品の運搬・積み込み・積み下ろし
パッシブタスク	ラインでの製品の組み立て

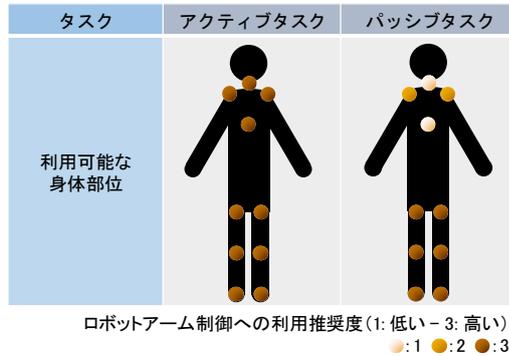


図 4 タスクに対する利用可能な身体部位とロボットアーム制御への利用推奨度

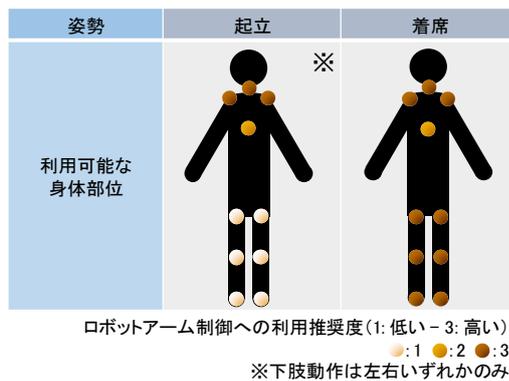


図 5 姿勢に対する利用可能な身体部位とロボットアーム制御への利用推奨度

アクティブタスクとは、はんだづけやデスクでの製品の組み立てなど環境が変化しない状況下において作業員自身が製品に対して施す作業のことであり、作業員のペースにあわせて作業を進めることができるために、作業対象から一時的に視線を外しても問題がない作業であると考えられる。パッシブタスクとは、ラインでの製品の組み立てなど環境が変化する状況下において作業員自身が製品に対して施す作業のことであり、ベルトコンベアの駆動をはじめとする作業員とは別のファクターにしたがって作業が進むために、作業対象から視線を外すのが好ましくない作業であると考えられる。したがって、このとき感覚器の多くが集中している頸部およびこれと接続している胸腰部は用いないほうがよい。

以上の検討をもとに、列挙した作業の具体例をアクティブタスクおよびパッシブタスクに分類したものを表 2 に、タスクに対する利用可能な身体部位とロボットアーム制御への利用推奨度を図 4 にそれぞれ示す。また、本論文では

これらのタスクの違いにより生じる影響について検証していないが、今後検討すべき重要な制約の一つであると考えている。

4.2 作業員の姿勢による制約

工場内で作業員がとる姿勢の種類に起立、着席がある。起立状態では、頸部、肩、胸腰部を自由に動かすことができる。また、作業員の体勢の維持に支障をきたさない範囲で左右いずれかの下肢のみを動かすことができる。着席状態では、頸部、肩、胸腰部、下肢を自由に動かすことができる。

以上のことから、姿勢ごとに身体が受ける制約が異なることがわかる。なお、作業員の状態は随時変化するため、利用可能な身体部位の動作のすべてがロボットアーム制御に適しているとはいえない。例えば着席状態においては左右いずれの下肢動作もロボットアーム制御に適している一方で、起立状態において下肢は作業員の体勢を支える重要な部位となるため、下肢動作はなるべく用いないほうがよい。また胸腰部は感覚器の多くが集中している頸部、肩、下肢と接続している重要な部位であり、身体動作や知覚に対して十分に注意を払う必要のある状況などでは用いないほうがよい。以上の検討をもとに、姿勢に対する利用可能な身体部位とロボットアーム制御への利用推奨度を図 5 に示す。

5. 提案システム

5.1 設計

着席状態で行うアクティブタスクでの利用を想定する。なお、身体動作や知覚に対して十分に注意を払う必要のある複雑な製品を組み立てる作業や危険物質を取り扱う作業などでの利用ではなく、はんだづけや簡単な部品を組み立てる作業などでの利用を想定している。本想定内容を踏まえ、図 4 および図 5 のいずれにおいても利用推奨度が高い頸部の側屈動作、胸腰部の屈曲・伸展動作、膝の屈曲・伸展動作、股の外旋・内旋動作をセンサデバイスそれぞれ認識し、ロボットアーム制御に用いる。なお、作業員の状態は随時変化するため、必要に応じてロボットアーム動作を切り替えられるようにする必要がある。

5.2 実装

提案システムの構成を図 6 に示す。提案システムはウェブカメラ (Microsoft LifeCam Cinema) と加速度センサ (秋月電子通商製 3 軸加速度センサモジュール KXR94-2050, 以下加速度センサ) が取り付けられた HMD (MOVERIO [18]), 加速度センサが取り付けられたベルトおよび左足スリッパ, PC (Lenovo ThinkPad E490), Arduino Nano [19], QR コードが貼り付けられた 6 軸ロボットアーム [20] で



図 6 提案システムの構成

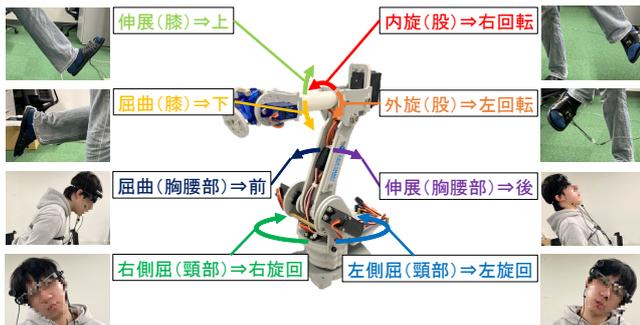


図 7 身体動作とロボットアーム動作の対応

構成される。なお、QRコードはロボットアームの回転動作サーボモータの表面に貼り付けられている。また、すべての加速度センサとサーボモータおよびPCはArduino Nanoと、ウェブカメラはPCとそれぞれ有線で接続されている。

作業者はまずウェブカメラを用いてQRコードを一定時間見つめ読み取ることにより、ロボットアームの動作要求を行う。これは作業者は好みのタイミングを指定してロボットアームを制御できるようにし、なおかつ作業者が制御とは異なる目的の身体動作を行った際にロボットアームが動作するのを防ぐための機能である。読み取りが完了すると、作業者の身体動作が加速度センサにより認識されるようになる。ロボットアームは、作業者の身体動作の加速度センサデータに基づいてサーボモータを制御することにより動作する。これらの動作原理により、作業者は好みのタイミングを指定し、なおかつハンズフリーでロボットアームを制御できる。

5.3 身体動作に基づくロボットアーム制御

身体動作とロボットアーム動作の対応を図7に示す。本システムでは、作業者の頸部の側屈動作をロボットアームの旋回動作に、胸腰部の屈曲・伸展動作をロボットアームの前後動作に、膝の屈曲・伸展動作を上下動作に、股動作の内旋・外旋動作を回転動作にそれぞれ対応させる。また、運動1種類につきサーボモータが1つ割り当てられるため、センサデータの処理とサーボモータの制御が運動別に独立して行われる。具体的には、HMDの加速度センサから得られる z 軸加速度センサデータ a_{z1} を旋回動作サー

ボモータの角度制御に、胸に装着したベルトの加速度センサから得られる z 軸加速度センサデータ a_{z2} を前後動作サーボモータの角度制御に、左足スリッパの加速度センサから得られる x 軸角速度センサデータ a_{x3} を上下動作サーボモータの角度制御に、 y 軸加速度センサデータ a_{y3} を回転動作サーボモータの角度制御にそれぞれ用いる。これは、加速度センサの装着状態を考慮したためである。なお、すべての加速度センサは電源電圧としてDC3.3Vを入力することにより駆動する。また、制御対象のサーボモータはすべてTower Pro製MG996 55Gサーボであり、電源電圧としてDC6Vを、制御信号としてArduino Nanoから生成される度数法に基づく出力角度信号をそれぞれ入力することにより制御できる。

5.3.1 加速度センサデータ処理とサーボモータ制御

はじめに加速度センサデータの初期値、オフセット値およびサーボモータ出力角度の初期値をそれぞれ設定する。ここで、上下動作サーボモータの出力角度の初期値を0、旋回動作サーボモータの出力角度、前後動作サーボモータの出力角度、回転動作サーボモータの出力角度、ひねり動作サーボモータの出力角度の初期値を90、曲げ動作サーボモータの出力角度の初期値を50とする。なお、本システムにおいて曲げ動作サーボモータおよびひねり動作サーボモータには電源電圧としてDC5Vを、制御信号としてArduino Nanoから生成される度数法に基づく出力角度信号の初期値をそれぞれ入力し続ける。

次にQRコードの読み取りによる動作要求が完了している場合は加速度センサデータを読み取り移動平均処理を施したものを、完了していない場合はオフセット値 a_o を変数 a に代入する。

最後に、 a が閾値 T_{a-} より小さい場合はサーボモータの角度 θ をデクリメント(パターン1)もしくはインクリメント(パターン2)し、閾値 T_{a+} より大きい場合はその逆の処理を行う。なお、サーボモータの制御パターンを2種類に分けたのは、身体動作とロボットアーム動作を図7の通りに対応させるためである。ここで、ロボットアームの各動作に対するサーボモータの制御パターンの分類を次に示す。

- パターン1: 前後動作, 上下動作
- パターン2: 旋回動作, 回転動作

以上の処理が終了すると、再び同じフローで加速度センサデータ処理およびサーボモータ制御を行う。なお、サーボモータの角度が最大値である180および最小値である0にそれぞれ達した場合はこれらの値を保持する。各動作に対して設定した a の閾値を次に示す。

- 旋回動作
 - 右旋回: $T_{a_{z1+}} = a_{z1o} + 80$

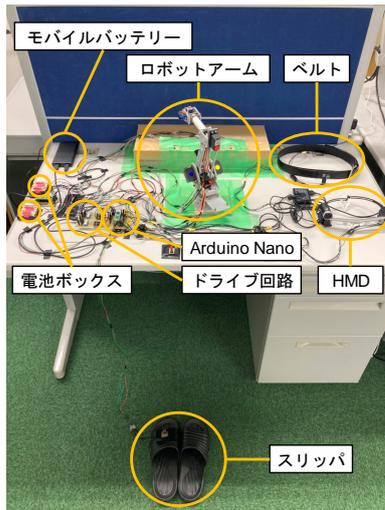


図 8 実験環境

- 左旋回: $T_{a_{z1-}} = a_{z1o} - 80$
- 前後動作
 - 後: $T_{a_{z2+}} = a_{z2o} + 30$
 - 前: $T_{a_{z2-}} = a_{z2o} - 30$
- 上下動作
 - 下: $T_{a_{x3+}} = 475$
 - 上: $T_{a_{x3-}} = 280$
- 回転動作
 - 左回転: $T_{a_{y3+}} = 450$
 - 右回転: $T_{a_{y3-}} = 300$

5.3.2 QR コードの読み取りによる動作切り替え

QR コードは回転動作用サーボモータの表面に貼り付けられており、作業者はカメラを用いて読み取る。なお、QR コードの読み取りには Github で提供されている Processing [21] 用ライブラリ ZXingP5 [22] を用いる。また、カメラ画像および QR コードの読み取りに関する情報は HMD に投影される。ロボットアームを動作させる際にはカメラで QR コードを読み取り、動作要求を行う。読み取りが完了すると Arduino Nano がセンサデータの読み取りを開始し、ロボットアームが動作するようになる。

6. 評価実験

構成したシステムのうち、5.3 節で述べた身体動作を用いたロボットアームの制御システムについて評価する。提案システムを用いてロボットアームを制御し、与えられたタスクを完了するまでにかかる時間の測定および各身体部位の動作を用いたロボットアームの制御のしやすさの調査を通して、制御時の被験者の姿勢（起立および着席）の違いにより生じる差異について検討する。なお、5.3.2 節で述べた QR コードの読み取りによる動作の切り替え機能は検証対象に含まれないため、本実験では用いない。



図 9 起立状態の様子

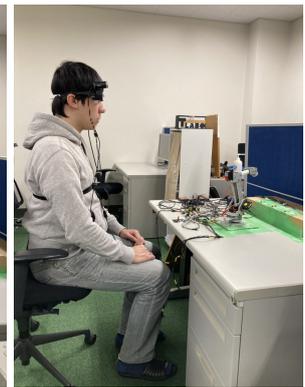


図 10 着席状態の様子

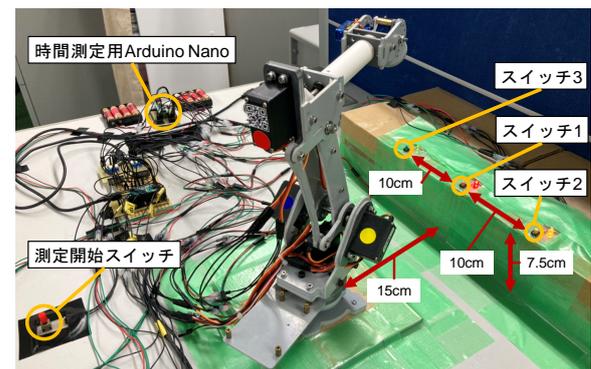


図 11 スイッチの配置

6.1 実験方法

実験環境を図 8 に示す。被験者はまず実験に関する説明を受け、HMD、ベルト、スリッパを装着する。なお、HMD は頸部からの落下防止のために双方の耳掛けをゴムバンドで接続している。また、被験者は加速度センサが取り付けられていない右足スリッパも装着する。次に起立状態（図 9）での制御もしくは着席状態（図 10）での制御を指示され、ロボットアームの操作練習を 5 分間行う。操作練習が終わり次第、被験者が手元の測定開始スイッチを押下してからロボットアームの先端が前方に設置された 3 つのスイッチをすべて押下し終えるのにかかる時間を連続で 3 回測定する。ここで、スイッチの配置を図 11 に示す。時間測定は各スイッチの接続先にあたる Arduino Nano が Processing と連携して行う。なお、押下するスイッチの順番は図 11 に示した数字の順にしたがう。測定が終わると 5 分間の休憩が与えられるとともに実験に関するアンケートに回答する。次に前述と同じ手順で起立状態での制御を行った被験者は着席状態での制御を、着席状態での制御を行った被験者は起立状態での制御をそれぞれ指示され、前述と同様の操作練習と測定を行う。測定が終わると再度実験に関するアンケートに回答し、実験は終了する。

被験者は 20 代の男性 6 名で A から F とし、起立状態での制御および着席状態での制御の順序効果を考慮するために次のグループに分けて実験を行った。

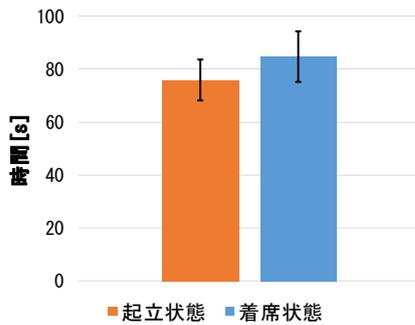


図 12 タスク完了にかかった時間の平均

- グループ 1(起立状態⇒着席状態): A, B, C
- グループ 2(着席状態⇒起立状態): D, E, F

また、すべての被験者に対し、休憩中および実験終了後にアンケートに回答させた。具体的には、「頭の動きを用いたロボットアームの制御はしやすかった」、「足の動きを用いたロボットアームの制御はしやすかった」、「胸腰の動きを用いたロボットアームの制御はしやすかった」の3種類の評価項目について、それぞれ「全く同意できない」を1、「非常に同意できる」を5とする5段階で回答させた。

6.2 結果と考察

6.2.1 実験結果

測定開始スイッチを押下してからロボットアームの先端で3つのスイッチを押下し終えるタスク（以下、タスク）を完了するまでにかかった時間データの差異を、姿勢の違いで比較する。全被験者のタスク完了までにかかった時間の平均値をグラフ化したものを図 12 に示す。なお、エラーバーは標準誤差を示している。

図 12 から着席状態と比較して起立状態のほうがタスク完了にかかった時間が約 10 秒短いことがわかる。実際にアンケートの自由記述では「起立状態のほうが下肢動作を用いた制御がしやすかった」、「起立状態と比較して着席状態では胸腰部動作を用いた制御がしづらかった」など、起立状態における制御のしやすさに関する回答を複数得られた。その一方で、「着席状態と比較して起立状態では膝の伸展動作を用いた制御がしづらかった」、「左足ではなく利き足である右足の動作を用いた制御が良かった」などの回答も得られたため、タスク完了にかかった時間および制御のしやすさともに個人差が影響している可能性があると考えられる。なお、図 12 の結果について被験者内 t 検定を行った結果、有意差は見られなかった。

6.2.2 アンケートの回答結果

頭、足、胸腰の各動きを用いたロボットアームの制御のしやすさに関するアンケートの回答結果を図 13 に示す。なお、エラーバーは標準誤差を示している。各アンケート

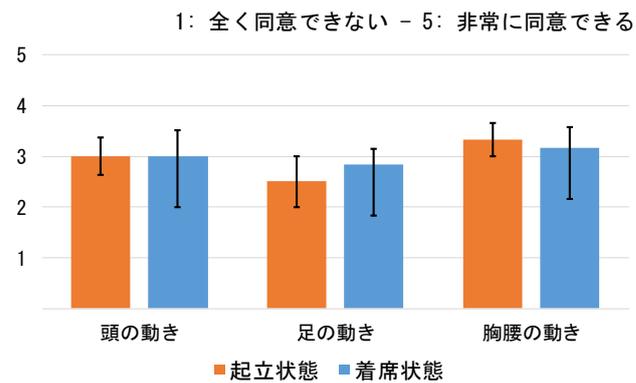


図 13 頭、足、胸腰の動きを用いたロボットアームの制御のしやすさの回答結果

の回答結果について被験者内 t 検定を行った結果、いずれも制御時の被験者の姿勢の違いによる有意差は見られなかった。このことから、制御時の被験者の姿勢と各身体動作を用いたロボットアームの制御のしやすさには相関がない可能性がある。また、評価の平均値はいずれも3前後であったことから、提案システムにおけるロボットアームの制御に対する各身体動作が必ずしも適しているとはいえないため、別の新たな身体動作を用いたロボットアームの制御手法に関して検討の余地があると考えられる。

6.3 議論

本実験の結果から、制御時の姿勢の違いによる提案システムを用いたスイッチ押下のタスクを完了するまでにかかる時間および頸部、胸腰部、膝、股の各動作を用いたロボットアームの制御のしやすさに有意差が生じないことがわかった。図 5 にまとめた通り、起立状態と比較して着席状態のほうがロボットアーム制御への利用推奨度の高い身体部位が多く、とりわけ下肢は起立状態のときよりも利用しやすいといえるが、本実験では着席する椅子の脚および机が下肢動作を行う範囲を制限し、これを妨げたと考えられる。また、机の天板により被験者は自身の下肢動作を視認できないために、これとロボットアーム動作の対応を一切確認できない状態でロボットアーム制御を行った可能性がある。以上のことから、4.2 節で想定したものとは異なる制約が着席状態での実験において生じたことにより、姿勢の違いに起因する有意差が生じなかったと考えられる。

本論文で提案した身体動作とロボットアーム動作の対応パターンは一種類のみであったが、3.1 節でも述べた通り、身体動作はその種類の豊富さからロボットアーム制御への多様な割り当てを検討できる。また、本実験とは別のタスクや実際の利用環境を準備した場合には、本論文では検討できなかったより複雑な身体動作の制約が生じる可能性が高く、これらに対応できるロボットアームの制御手法を構築するためには、複数の身体動作とロボットアーム動作の対応パターンおよび複数のタスクを準備した上で比較

検討を行い、身体動作およびタスクの観点から最適な対応パターンを明らかにする必要がある。

アンケートの自由記述では「回転動作はあまり利用しなかった」という回答を複数得られた。このことから、ロボットアームの各動作の利用頻度は、作業の種類によって大きく変化する可能性があるといえ、したがって作業の種類に対するロボットアームの各動作の利用頻度を把握する必要がある。また、「ロボットアーム動作を目的の位置で停止させるための微調整が難しく感じられた」、「身体動作に対してロボットアームが遅れて動作した」などの回答も得られたことから、提案システムにおける身体動作の認識精度を向上させる必要がある。

7. まとめ

本論文では工場での作業に着目し、その特徴や制約について検討した上で、身体動作を用いたロボットアームの制御手法を提案した。評価実験ではロボットアームを制御して与えられたタスクを完了するまでにかかる時間の測定および各身体部位の動作を用いたロボットアームの制御のしやすさに関する調査を行い、すべての評価項目において制御時の被験者の姿勢(起立および着席)の違いによる有意差が生じないことを確認した。

今後は、提案システムには含まれない他の身体動作も用いた6軸ロボットアームの制御手法を確立するとともに、本提案手法を含めた複数の手法を比較検討することにより、利用環境や作業内容ごとに適した制御手法および身体動作を明らかにしていく。また、作業者が必要に応じてロボットアームの制御に用いる身体部位を切り替えられるシステムを構築する。そしてロボットハンドの制御手法についても検討し、人間の手腕と変わらないロボットアーム・ハンドの制御手法を確立する。

謝辞 本研究の一部はJST CREST(JPMJCR16E1, JPMJCR18A3)の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] オムロン制御機器: ロボティクスライブラリ 協調ロボットとは, https://www.fa.omron.co.jp/product/special/robotics/collaborative/collaborative_outline/ (Accessed on 01/30/2021).
- [2] オムロン制御機器: ロボティクスライブラリ 協調ロボットの良さ, <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/robotics/collaborative/strength.html> (Accessed on 01/30/2021).
- [3] 安川電機: 協働ロボットとは?, <https://www.yaskawa.co.jp/product/robotics/collaborative> (Accessed on 01/30/2021).
- [4] 内田雅文, 井出英人, 横山修一: 筋電によるロボットアームの制御, 電気学会論文誌 C, Vol. 115, No. 3, pp. 445-451 (Feb. 1995).
- [5] M. Y. Saraiji, T. Sasaki, K. Kunze, K. Minamizawa, and

- M. Inami: MetaArms: Body Remapping Using Feet-Controlled Artificial Arms, *Proc. of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '18)*, pp. 65-74 (Oct. 2018).
- [6] M. Y. Saraiji, T. Sasaki, R. Matsumura, K. Minamizawa, and M. Inami: Fusion: Full Body Surrogacy for Collaborative Communication, *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies (SIGGRAPH '18)*, No. 7, pp. 1-2 (Aug. 2018).
- [7] T. Sasaki, M. Y. Saraiji, C. L. Fernando, K. Minamizawa, and M. Inami: MetaLimbs: Multiple Arms Interaction Metamorphism, *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies (SIGGRAPH '17)*, No. 16, pp. 1-2 (July 2017).
- [8] C. I. Penalzoza and S. Nishio: BMI Control of a Third Arm for Multitasking, *Journal of Science Robotics (Sci. Robot)*, Vol. 3, pp. 1-6 (July 2018).
- [9] H. Witt, T. Nicolai, and H. Kenn: Designing a Wearable User Interface for Hands-free Interaction in Maintenance Applications, *Proc. of the 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom '06)*, pp. 655-659 (Mar. 2006).
- [10] 檜山 敦, 上岡 玲, 広田光一, 廣瀬通孝: ウェアラブルコンピューティングのためのハンズフリー入力インタフェースの研究, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 25, No. 38, pp. 61-64 (June 2001).
- [11] 佐藤慶幸, 景山陽一, 西田 真: 口唇の動き特徴を用いた非接触コマンド入力インタフェースの提案, 電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 10, pp. 1865-1873 (Oct. 2009).
- [12] 真鍋宏幸, 福本雅朗: ヘッドホンを用いた EOG 法による視線入力インタフェース, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 4, pp. 1515-1526 (Apr. 2011).
- [13] 小川樹幸, 塚本昌彦, 義久智樹, 西尾章治郎: カメラと加速度センサを用いたポインティング方式の設計と実装, ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告, Vol. 1, No. 1, pp. 78-85 (Mar. 2005).
- [14] 堀江達矢, 所 洋平, 片山拓也, 寺田 努, 塚本昌彦: Xangle: ウェアラブルコンピューティングのための加速度センサを用いたポインティング手法, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 15, No. 4, pp. 443-456 (Nov. 2013).
- [15] 山本哲也, 寺田 努, 塚本昌彦: ウェアラブルコンピューティングのための手足を使った状況依存ジェスチャ入力手法, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 14, No. 2, pp. 131-140 (May 2012).
- [16] 米本恭三, 石神重信, 近藤 徹: 関節可動域表示ならびに測定法(平成7年4月改訂), リハビリテーション医学, Vol. 32, No. 4, pp. 207-217 (Apr. 1995).
- [17] 川崎重工業株式会社 XYZ: <https://robotics.kawasaki.com/ja1/xyz/jp/1804-03/> (Accessed on 01/30/2021).
- [18] MOVERIO, <https://www.epson.jp/products/moverio/bt35e/> (Accessed on 01/30/2021).
- [19] Arduino Nano, <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano> (Accessed on 01/30/2021).
- [20] sainsmart-jp: <https://jp.sainsmart.com/products/6-axis-desktop-robotic-arm-assembled> (Accessed on 01/30/2021).
- [21] Processing.org, <https://processing.org/> (Accessed on 01/30/2021).
- [22] GitHub, <https://github.com/enkatsu/ZXingP5> (Accessed on 01/30/2021).
- [23] 井樋栄二, 吉川秀樹, 津村 弘, 田中 栄, 高木理彰: 標準整形外科学 第14版, 医学書院 (Jan. 2020).