



# 頭部の向きと動きに基づくロボットアームの制御手法

木村, 拓己  
土田, 修平  
寺田, 努  
塚本, 昌彦

---

## (Citation)

マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム2020論文集:1388-1393

## (Issue Date)

2020-06

## (Resource Type)

conference paper

## (Version)

Version of Record

## (Rights)

ここに掲載した著作物の利用に関する注意 本著作物の著作権は情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。

Notice for the use of this material The copyright of this material is retained by th...

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90008763>



# 頭部の向きと動きに基づくロボットアームの制御手法

木村 拓己<sup>1</sup> 土田 修平<sup>1</sup> 寺田 努<sup>1</sup> 塚本 昌彦<sup>1</sup>

**概要:** 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、人間とロボットの共生および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ます。特に、製造業ではロボットアームの作業空間への導入が進められているが、従来手法ではロボットアームを動作させる際にユーザが定期的に関連機器の操作を行う必要があるため、作業時間の浪費や生産効率の低下につながっている。そこで、本稿では人間の動きを制限しないハンズフリーなロボットアームの制御手法を提案する。提案手法において、ユーザはウェブカメラと QR コードを用いてロボットアームの使用タイミングを指定し、頭部動作を用いてロボットアームをハンズフリーで制御できる。

## 1. はじめに

近年、ロボティクス技術の実生活への導入が進められ、人間とロボットの共生および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ます。特に、製造業ではロボティクス技術の導入により生産効率を向上させる工夫がなされている。これまで、製造業にロボットを導入するにはこれを設置するための広大な空間が必要とされてきた。また、安全柵を用いて作業者（以下、ユーザ）とロボットの利用空間を分割し、ユーザの安全を守らなければならないという課題もあった。このような中、ロボティクス技術や安全システム技術の発展に伴い、これらの課題を解決するためにユーザとロボットが同じ空間で連携して作業する、いわゆる協調ロボティクス技術の開発が進められるようになった [1]。製造業に関わる企業は、この協調ロボティクス技術の導入により作業空間の削減やロボットの協調モードによるユーザの保護（安全確保）、さらにはロボット起動に要する時間の短縮などのメリットを享受できる [2]。ここで、筆者らは製造業で多用されているロボットアームの協調制御手法に着目した。

従来手法では、ロボットアームを動作させる際にユーザが定期的に制御装置やタブレット端末をはじめとする関連機器の操作を行う必要があるため、作業時間の浪費や生産効率の低下につながっている。これに加え、ユーザは両手で作業することもあるため、ロボットアームをハンズフリーで動作させる手法が適していると考えられ、これまで筋電位による制御手法 [3] や第 3 者による遠隔制御手法な

どが提案されてきた。しかし、これらの手法ではユーザの意図しない筋電位信号の発生や装着者および遠隔操作者の 2 者間における意思疎通の困難性に起因する、意図しないロボットアーム動作の発生などが課題として挙げられる。

そこで、本稿では人間の動きを制限しないハンズフリーなロボットアームの制御手法を提案する。ユーザは、ロボットアームを使用する際にヘッドマウントディスプレイに搭載されたウェブカメラを用いてロボットアームに貼り付けられている QR コードを読み取る。ロボットアーム動作は QR コードに割り当てられている情報によって切り替えられ、読み取りが完了するとロボットアームがユーザの頭部動作に基づいて動作するようになる。これらの動作原理により、ユーザ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ため、ユーザ保護技術の発展に寄与できると考えられる。

## 2. 関連研究

センサ技術やロボティクス技術の発展に伴い、人間行動を利用し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 [4]。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、開発靴下型ユーザインタフェースを用いてユーザの足首・足指の動きによりロボットアームを制御する手法を提案している [5]。しかし、動作および停止の切り替え機能がなく、常にユーザの意のままに動作してしまうため、かえってユーザの行動を制限してしまう可能性が

<sup>1</sup> 神戸大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Kobe University

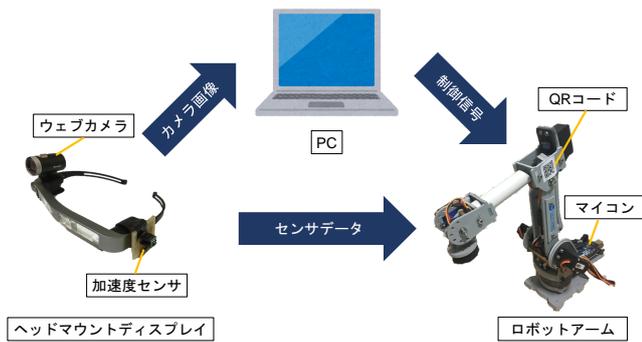


図 1 システム構成



図 2 ヘッドマウントディスプレイの外観

ある。特に、ユーザの足の動きによりロボットアームを制御する手法を実生活で利用する場合には、歩行時などにおける誤動作の発生も懸念される。Penaloza らは、脳波を用いてロボットアームを自動で動作させる手法を提案している [6]。しかし、これを実生活で利用する場合は、ロボットアームがユーザの意図と異なる動作を行い、かえってユーザの行動を制限してしまう可能性がある。

一方、ウェアラブルコンピューティング技術の一つとして、身体の動きを用いた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。小川らは、視線と首振りを用いて計算機への入力を行うシステムを提案している [7]。具体的には、ユーザがカメラと加速度センサを備えたヘッドマウントディスプレイを装着し、カメラを注視している間のみ首振りによって計算機に入力できるシステムを実現している。これにより、ユーザは視線と首振り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できる。ウェアラブルユーザインタフェース技術はその研究成果および開発技術の蓄積から今後もますます発展し、人々の実生活に浸透していく可能性のある技術の一つであると考えられる。

以上より、本稿では既存のロボットアームの制御技術およびウェアラブルユーザインタフェース技術によるハンズフリーな動作の切り替え技術を組み合わせ、ユーザがハンズフリーでロボットアームの使用タイミングを指定し、制御するシステムを提案する。

### 3. 提案システム

#### 3.1 システム構成

提案システムは図 1 に示す通り、ウェブカメラ（以下、カメラ）と加速度センサが取り付けられたヘッドマウントディスプレイ (MOVERIO[8])、PC、マイコン (Arduino Uno[9])、6 自由度ロボットアーム [10] で構成される。ここで、ヘッドマウントディスプレイの外観を図 2 に示す。ユーザはまずヘッドマウントディスプレイに取り付けられたカメラを用いてロボットアームに貼り付けられている QR コードを一定時間見つけ読み取ることで、ロボットアームの動作要求を行う。読み取りが完了すると、ユー

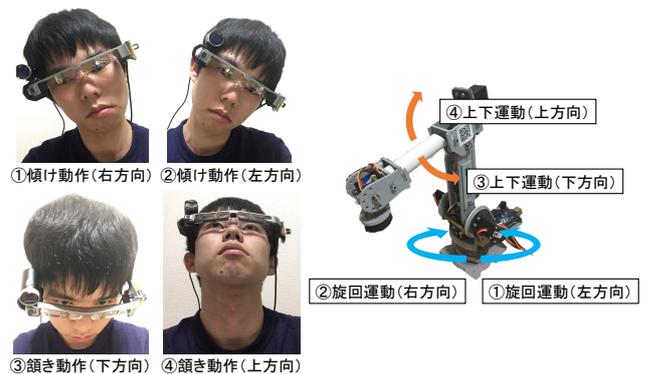


図 3 頭部動作とロボットアーム動作の対応

ザの頭部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、ユーザの頭部動作の加速度データ（以下、センサーデータ）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、ユーザ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。

#### 3.2 頭部動作に基づくロボットアームの制御

頭部動作とロボットアーム動作の対応を図 3 に示す。本稿では、ユーザの頭部動作を加速度センサにより認識し、そのセンサーデータに基づいてロボットアームの旋回運動および上下運動の計 2 種類の運動を制御することを目的としている。なお、旋回運動は頭部の傾け動作に、上下運動は頭部の傾き動作にそれぞれ対応している。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、センサーデータの処理とサーボモータの制御が運動別に計 2 パターン独立して行われる。具体的には、 $z$  軸センサーデータを旋回運動に対応するサーボモータ（以下、旋回運動用サーボモータ）の角度  $\theta_x$  の制御に、 $x$  軸センサーデータを上下運動に対応するサーボモータ（以下、上下運動用サーボモータ）の角度  $\theta_y$  の制御にそれぞれ用いる。これは、図 2 に示した加速度センサのヘッドマウントディスプレイへの装着状態を考慮したためである。なお、サーボモータは旋回運動、上下運動ともに Tower Pro 製 MG 996R サーボを用いた。いずれのサーボモータも、操作電圧として DC6V を、

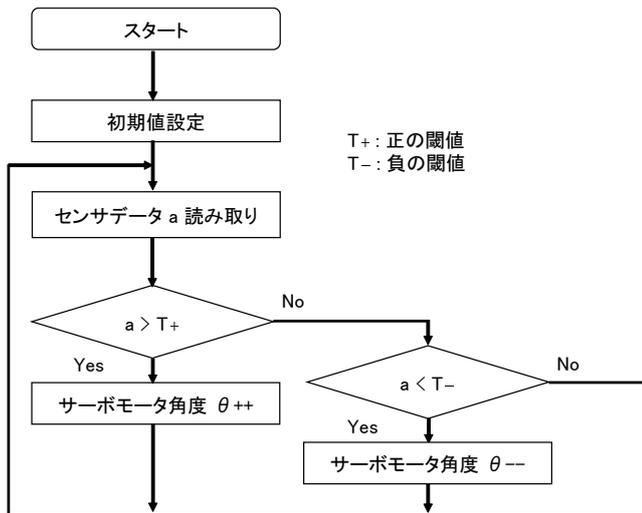


図 4 予備実験におけるセンサデータ処理およびサーボモータ制御のフローチャート

制御信号としてマイコンから生成される度数法に基づく角度をそれぞれ入力することにより制御できる。

本稿では、旋回運動においては頭部を右に傾けた際、すなわちロボットアームが正面から見て右方向に旋回する際に  $\theta_x$  の値を、上下運動においては頭部を下に振った際、すなわちロボットアームの先端が下方方向に移動する際に  $\theta_y$  の値をそれぞれ増加させるものとする。

### 3.3 QR コードの読み取りによる動作の切り替え

QR コードはロボットアームに貼り付けられており、ユーザはこれをヘッドマウントディスプレイ、カメラ、Processing[11] 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 用ライブラリ ZXingP5[12] 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ヘッドマウントディスプレイに投影される。

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。QR コードは 3 種類あり、ロボットアーム動作はその種類によって上下運動のみ、旋回運動のみ、上下および旋回運動の計 3 パターンの切り替えが可能である。読み取りが完了するとマイコンによるセンサデータの読み取りが開始され、ロボットアームが動作するようになる。

ロボットアームを停止させる際には再度カメラで QR コードを読み取り、停止要求を行う。読み取りが完了するとマイコンによるセンサデータの読み取りが中断され、ロボットアームが停止する。

## 4. 予備実験

構成したシステムのうち、3.2 で述べた頭部動作に基づくロボットアームの制御手法について評価するために予備実験を行った。

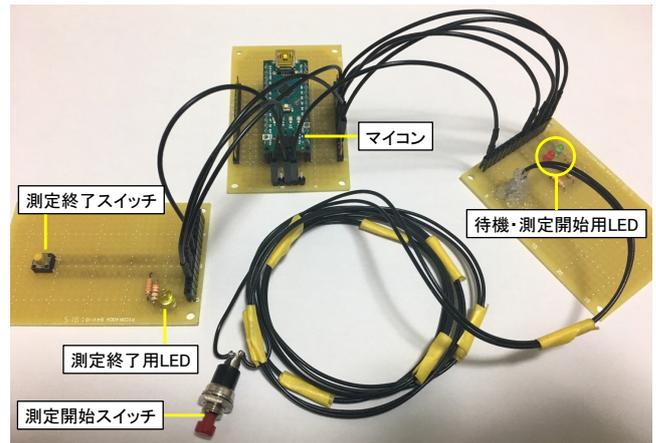


図 5 時間測定回路

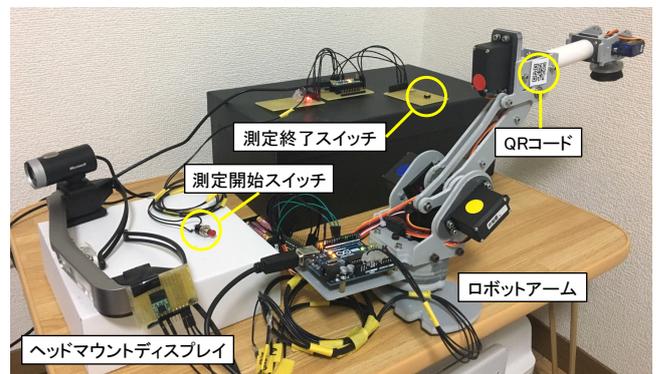


図 6 実験環境

### 4.1 実験方法

本実験で行うマイコンによるセンサデータ処理およびサーボモータ制御のフローチャートを図 4 に示す。まず、センサデータの初期値を設定する。次にセンサデータの読み取りを開始し、その値が閾値  $T_+$  より大きい場合はサーボモータの角度  $\theta$  をインクリメントし、閾値  $T_-$  より小さい場合はデクリメントする。以上の処理が終了すると、再び同じフローで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および最小値に達した場合はこれらの値を保持する。

本実験では、ロボットアームの可動域に含まれる任意の位置にスイッチを設置し、被験者がロボットアーム動作を開始させてからロボットアームの先端がそのスイッチを押すまでにかかる時間を測定する。

ここで、本実験に用いる時間測定回路を図 5 に、実験環境を図 6 にそれぞれ示す。被験者はまずヘッドマウントディスプレイを装着し、準備が整い次第、手元の測定開始スイッチを押す。このとき、マイコン (Arduino Nano[13]) が Processing と連携して時間測定を開始する。なお、時間測定が開始されている場合は図 5 中の右側の基板上にある緑色 LED が点灯し、待機状態にある場合はその隣にある赤色 LED が点灯する。次に被験者は頭部動作を用いてロボットアームを制御し、ロボットアームの先端で測定終

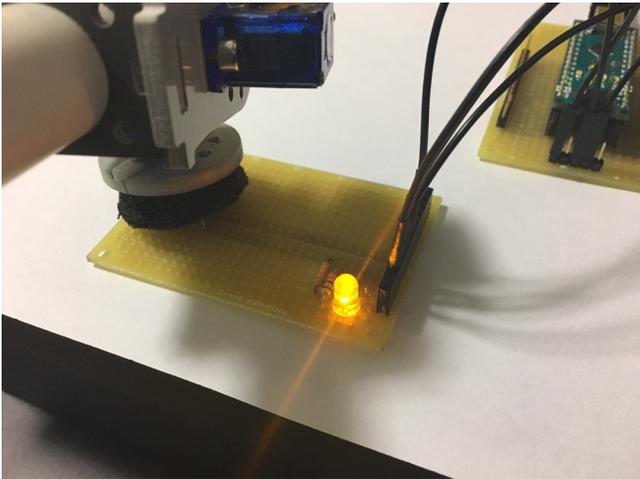


図 7 測定終了スイッチを押したときの様子

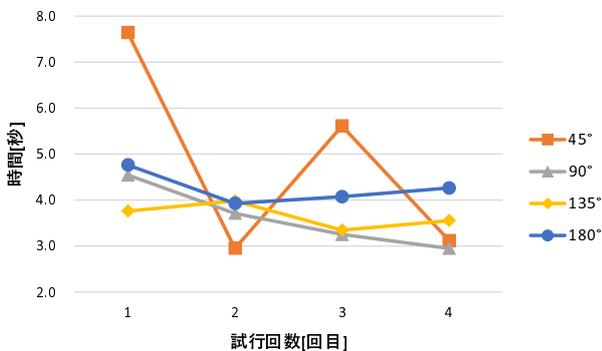


図 8 予備実験の結果

了スイッチを押す。このとき、マイコンが時間測定を終了するとともに、測定終了スイッチと同じ基板上にある黄色 LED が点灯する。ここで、測定終了スイッチを押したときの様子を図 7 に示す。

これらのシステムを用いて、ロボットアームの可動域のうち  $\theta_x$  がそれぞれ  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  のときに傾き動作（下方向）を行うことにより測定終了スイッチを押せるようにし、被験者がロボットアーム動作を開始させてからロボットアームの先端がそのスイッチを押すまでにかかる時間を設定角度ごとにそれぞれ連続で 4 回ずつ測定した。なお、被験者は 20 代の男性 1 名とし、 $\theta_x$ ,  $\theta_y$  の初期値および最小値はともに  $0^\circ$ 、最大値はそれぞれ  $180^\circ$ ,  $45^\circ$  とした。また、2 つの閾値  $T_+$ ,  $T_-$  は  $z$  軸方向,  $x$  軸方向ともにそれぞれ 400, 300 とした。

#### 4.2 実験結果と考察

予備実験の結果を図 8 に示す。4.1 で示した全 4 種類の設定角度のうち、 $135^\circ$  のときを除く 3 種類の設定角度において、測定終了までにかかる時間が 1 回目で最長となっていることがわかる。この傾向は、被験者の提案システムへの慣れが十分でなかったことに起因しているのではないかと考えられる。

また、設定角度が  $45^\circ$  のときを除く 3 種類の設定角度においては、2 回目以降の測定時間が短くなるもしくは安定する傾向にあることがわかる。これは試行を重ねるごとに被験者が提案システムを使い慣れてきたことに起因しているのではないかと考えられる。特に、設定角度が  $180^\circ$  のときは 2 回目以降の測定時間が比較的安定しているといえる。4.1 で述べた通り、 $180^\circ$  は  $\theta_x$  の最大値であり、すなわち  $\theta_x=180^\circ$  となった瞬間に頭部の傾け動作をやめなくともサーボモータは停止する。したがって、 $180^\circ$  は全 4 種類の設定角度の中で最も測定終了スイッチを押しやすい設定角度であったのではないかと考えられる。

そして、設定角度が  $45^\circ$  のときの測定結果のばらつきが最も大きくなっていることがわかる。本実験において、 $45^\circ$  は設定角度の最小値であり、すなわち旋回運動用サーボモータを停止させるタイミングが最も早い。そのため、測定時間が短かった場合については、頭部の傾け動作が一度で済んだ、すなわち  $\theta_x > 45^\circ$  とならなかったのではないかと考えられる。その一方で、測定時間が長かった場合については、最初の頭部の傾け動作により  $\theta_x > 45^\circ$  となり、これを補正するのに時間がかかったのではないかと考えられる。

### 5. 評価実験

QR コードの読み取りがロボットアームの制御プロセスに与える影響を調査するために、予備実験で用いたシステムに 3.3 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を加えたロボットアームの制御手法について評価するために実験を行った。

#### 5.1 実験方法

本実験で行うマイコンによるセンサデータ処理およびサーボモータ制御のフローチャートを図 9 に示す。まず、センサデータの初期値およびオフセット値を設定する。次に、カメラを用いた QR コードの読み取りを通してマイコンにロボットアームの動作要求が行われている場合にはセンサデータの読み取りを開始し、動作要求が行われていない場合にはオフセット値をセンサデータとして取り扱う。そして、センサデータの値が閾値  $T_+$  より大きい場合はサーボモータの角度  $\theta$  をインクリメントし、閾値  $T_-$  より小さい場合はデクリメントする。以上の処理が終了すると、再び同じフローで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および最小値に達した場合はこれらの値を保持する。

本実験では、予備実験で構成した実験環境（図 6）と同様にロボットアームの可動域に含まれる任意の位置にスイッチを設置し、被験者がカメラを起動させてからロボットアームの先端がそのスイッチを押すまでにかかる時間を測定する。被験者はまずヘッドマウントディスプレイを装着し、カメラの起動が終わり次第、測定開始スイッチを押

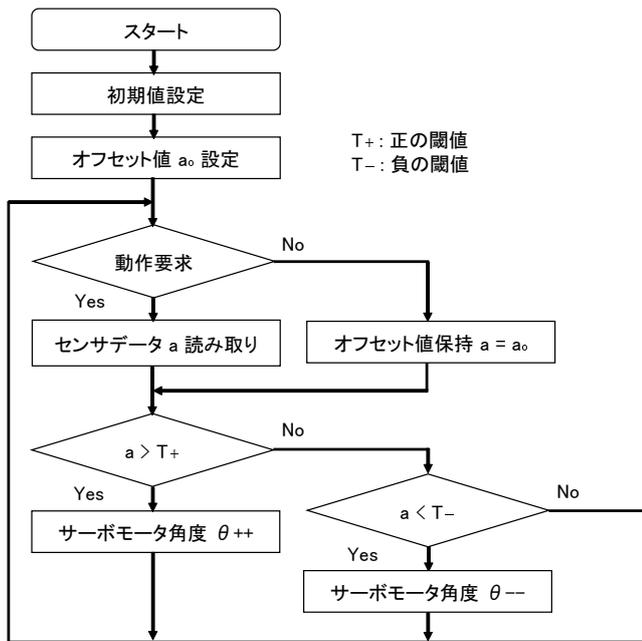


図 9 評価実験におけるセンサーデータ処理およびサーボモータ制御のフローチャート

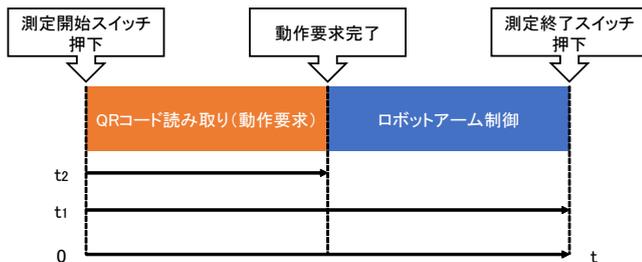


図 10 測定時間の種類

すことにより時間測定を開始する。以降は予備実験と同じ手順で被験者がロボットアームの先端で測定終了スイッチを押すまでにかかる時間を測定する。

これらのシステムを用いて、ロボットアームの可動域のうち  $\theta_x$  がそれぞれ  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  のときに領き動作（下方向）を行うことにより測定終了スイッチを押せるようにし、被験者がカメラを起動させてからロボットアームの先端がそのスイッチを押すまでにかかる時間、すなわち図 10 における  $t_1$  を設定角度ごとにそれぞれ連続で 4 回ずつ測定した。なお、被験者は 20 代の男性 1 名とし、 $\theta_x$ ,  $\theta_y$  の初期値および最小値はともに  $0^\circ$ 、最大値はそれぞれ  $180^\circ$ ,  $45^\circ$  とした。また、2 つの閾値  $T_+$ ,  $T_-$  は  $z$  軸方向、 $x$  軸方向ともにそれぞれ 400, 300 とした。

さらに、これと並行して被験者がカメラを起動させてから QR コードを読み取るまでにかかる時間、すなわち図 10 における  $t_2$  も設定角度ごとにそれぞれ 4 回ずつ、計 16 回測定した。なお、QR コードの読み取りのためにカメラが QR コードを認識し続けなければならない時間は約 0.5 秒とし、読み取る QR コードは上下および旋回運動用のみとした。また、測定終了後における QR コードの読み取りに

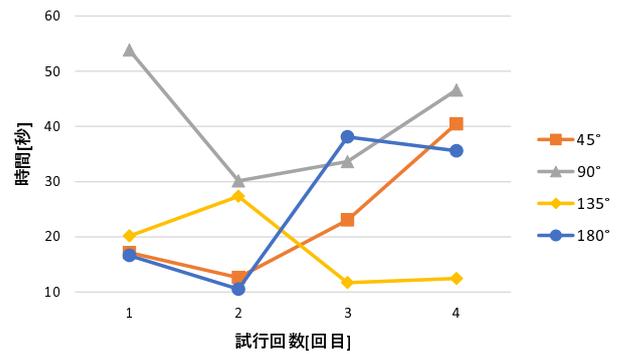


図 11 カメラを起動させてから測定終了スイッチを押すまでにかかった時間  $t_1$  の測定結果

表 1 QR コードの読み取りにかかった時間  $t_2$  の測定結果

種類	時間 [s]
平均値	17.5
最大値	31.7
最小値	6.51

よる停止要求は行わないものとした。

## 5.2 実験結果と考察

まず、被験者がカメラを起動させてから測定終了スイッチを押すまでにかかった時間  $t_1$  の測定結果を図 11 に示す。図 8 と比較すると、設定角度および試行回数に関わらず測定結果のばらつきが大きくなっており、なおかつすべての試行において測定終了までに 10 秒以上かかっていることがわかる。これは、動作要求のための QR コードの読み取りにかかった時間が影響しているのではないかと考えられる。

次に、QR コードの読み取りにかかった時間  $t_2$  の測定結果を表 1 に示す。QR コードの読み取りには平均 10 秒以上かかったことがわかる。また、最大値および最小値の差が 20 秒以上あること、計 16 回の測定結果の標準偏差が 9.63 であることから、読み取りにかかった時間にばらつきがあることもわかる。実際に本稿で用いた Processing のライブラリでは QR コードの認識に時間がかかるうえに、たとえそれを認識できたとしてもその状態を維持し、動作要求を行うのが難しい。これにはライブラリを構成するプログラムのアルゴリズムはもちろん、実験環境の明るさやユーザの頭部の傾け具合なども大きく影響している可能性があり、したがって 3.3 で提案したシステムを改善するとともに QR コードの読み取り精度を向上させる必要がある。

以上のことから、QR コードの読み取りにかかった時間には大きなばらつきがあり、したがってこれが図 11 の結果に影響していると結論づけた。ここで、図 11 の測定結果から QR コードの読み取りにかかった時間を差し引いた結果、すなわち被験者が QR コードを読み取ってから測定終了スイッチを押すまでにかかった時間  $t_1 - t_2$  の測定結

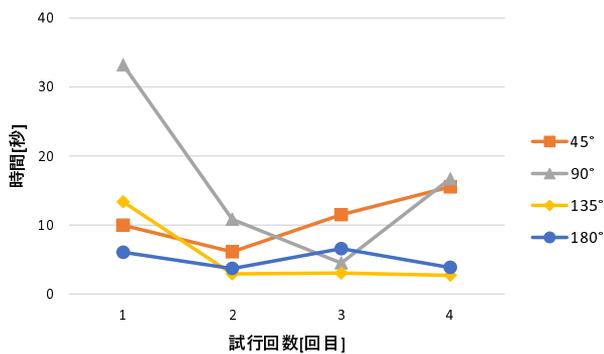


図 12 QR コードを読み取ってから測定終了スイッチを押すまでにかかった時間  $t_1 - t_2$  の測定結果

果を図 12 に示す。設定角度が  $135^\circ$  のときは 2 回目以降の測定時間が短くなり、安定していることがわかる。また、設定角度が  $180^\circ$  のときは全体的に測定時間が安定していることがわかる。

一方、設定角度が  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  のときは試行回数に関わらず測定結果のばらつきが大きくなっていることがわかる。これは、4.2 で考察した設定角度が  $45^\circ$  のときと同様に、測定時間が短かった場合については頭部の傾げ動作が一度で済んだ、すなわち  $\theta_x$  が設定角度を超えることがなかったのではないかと考えられる。その一方で、測定時間が長かった場合については、最初の頭部の傾げ動作により  $\theta_x$  が設定角度を超え、これを補正するのに時間がかかったのではないかと考えられる。

## 6. まとめと今後の課題

本稿では、ユーザの頭部動作を用いたロボットアームの制御手法を提案した。提案手法において、ユーザはヘッドマウントディスプレイに搭載されたカメラを用いてロボットアームに貼り付けられている QR コードを読み取ることで使用タイミングを指定し、頭部動作を用いてロボットアームの旋回運動および上下運動を制御できる。実験の結果、ロボットアームの先端を目的の位置に到達させるにはユーザの提案システムへの慣れが必要である可能性が示唆された。また、QR コードの読み取りによる動作の切り替えが可能であることを確認した。

今後の課題としては、まず提案システムにおける QR コードの読み取り精度およびロボットアームの制御アルゴリズムを向上させることが挙げられる。また、被験者を増やし、被験者ごとの測定結果の変化や差異について検討するとともに、ロボットアーム動作に対する満足度の調査を行う必要がある。さらに、ロボットアームを構成するすべてのサーボモータを制御対象とすることにより、ロボットアームの制御自由度そのものを向上させる必要もある。

提案システムの応用に対する展望としては、まず制御対象とするロボットアームの数を増やし、各々のロボット

アームに対して QR コードを用いてラベル付けを行うことにより、一人のユーザが複数台のロボットアームを同時に制御できる技術が確立することが挙げられる。また、提案システムに用いるセンサデバイスについて再検討することにより協調制御技術の新たな可能性を切り開くとともに、ウェアラブルロボットアームの協調制御技術の開発も視野に入れた提案システムの構築に取り組む必要がある。

## 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/](https://www.fa.omron.co.jp/product/special/robotics/collaborative/collaborative_outline/) (Accessed on 05/11/2020).
- [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 05/11/2020).
- [3] 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 (1995).
- [4] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Reo Matsumura, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami: Fusion: Full Body Surrogacy for Collaborative Communication, SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies, No. 7, pp. 1-2 (2018).
- [5] Tomoya Sasaki, MHD Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami: MetaLimbs: Multiple Arms Interaction Metamorphism, SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, No. 16, pp. 1-2 (2017).
- [6] Christian I. Penalozza, and Shuichi Nishio: BMI Control of a Third Arm for Multitasking, Science Robotics, Vol. 3 (2018).
- [7] 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 (2005).
- [8] エプソン: MOVERIO BT-35E / BT-30E, <https://www.epson.jp/products/moverio/bt35e/> (Accessed on 05/11/2020).
- [9] Arduino Official Store: Arduino Uno Rev3, <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3> (Accessed on 05/11/2020).
- [10] sainsmart-jp: 6 自由度ロボット・アーム, <https://jp.sainsmart.com/products/6-axis-desktop-robotic-arm-assembled> (Accessed on 05/11/2020).
- [11] Processing.org, <https://processing.org/> (Accessed on 05/11/2020).
- [12] GitHub: enkatsu/ZXingP5 QR Code library for Processing, <https://github.com/enkatsu/ZXingP5> (Accessed on 05/11/2020).
- [13] Arduino Official Store: Arduino Nano, <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano> (Accessed on 05/11/2020).