

ウェアラブルセンサを用いた動作計測実験における 機器装着バイアスの定量評価

河村知輝^{1,a)} 土田修平^{1,b)} 寺田 努^{1,c)} 塚本昌彦^{1,d)}

概要: 他人から注目を浴びると普段以上の成果を出そうとする心理効果をホーンソン効果と呼ぶ。ホーンソン効果は人の行動に良い影響を与える効果として主に挙げられている。例えば、医療の現場において他人から見られているといった状況から手指の消毒回数が増え、衛生施行状況が改善されたり、集中的に患者を治療すると症状が改善されたりする。しかし、これと似た効果がウェアラブルセンサを用いた動作計測実験においては大きな問題を引き起こしている可能性がある。具体的には、センサの装着自体が、実験者の「装着部位を動かして欲しい」といった期待を表し、それが被験者の動きに影響している可能性がある。もし、センサ装着位置の身体部位は大きさに動かしてしまう、などの影響が現れていけば、ウェアラブルセンサを用いてこれまで行われてきたあらゆる評価実験の信頼性に疑問が生じることになる。そこで本研究では、同じ動作をセンサ装着部位を変えながら行わせる実験をすることで、センサを装着すること自体が被験者のジェスチャ軌跡に与える影響を評価する。筆者らが行った先行研究では、センサ装着部位の違いによって動作が変化することを目視にて確認した。本稿では、被験者すべての映像を定量的に解析する。

1. はじめに

ホーンソン効果とは、他人から注目を浴びるとその期待に応えようとして、普段以上の成果を出そうとする心理効果の一つである [1]。例えば、Eckmanns ら [2] は、ドイツの大学病院において、他者からの注目によって周囲から見られているという心理が働き、手指消毒剤の使用回数が以前より改善されたと報告している。また、ホーンソン効果は治療法の有効性を証明する際に現れ、集中的に患者をケアすると症状が改善される。例えば、認知症を治療するための試験において頻繁に評価訪問を行うと、そうでない場合に比べて認知機能の改善が見られた事例がある [3]。

このようにホーンソン効果は人の行動や症状に良い影響を与えている。一方で、本研究ではホーンソン効果により意図しない問題が引き起こされている可能性について議論する。例えば、センサを用いたスポーツにおけるスキル評価や日常動作のジェスチャ認識での影響を考える。具体的には、Whiteside ら [4] によるテニスのスイングフォームの分析や、Ying-Wen Bai ら [5] による野球の投球フォームの分析、Ravi ら [6] による立つや歩くなどのジェスチャ認識

の研究では、センサを手首等に装着し、加速度や角速度の値から分析・評価を行っている。その他大量の関連研究において、動作計測のためにウェアラブルセンサが用いられているが、一般にウェアラブルセンサは実験者が計測したい部位に装着するため、被験者はセンサ装着部位に対しての期待感を感じ、装着部位の動作が大きくなるといった普段とは違う行動をしている可能性がある。また、ホーンソン効果のほかにも期待による行動変化が存在し、ある人が他人に期待するとその期待に応えようとして、他人が普段以上の成果を出そうとするピグマリオン効果の影響も考えられる [7]。もし、計測データがホーンソン効果やピグマリオン効果の影響を含んだものになっていた場合、認識モデル構築やスキル判定が不正確になったり、評価実験における結果が信頼できないものになる可能性があるなど、その影響は多岐にわたる。一方でホーンソン効果やピグマリオン効果はその効果を評価することが難しく、センサ装着時のそれら効果による影響を確かめた実験は筆者らの調べる限り存在しない。センサ装着時の心理的影響について、ホーンソン効果やピグマリオン効果を含むバイアス(本研究では機器装着バイアスと定義する)があると我々は考えている。

そこで本研究では、センサ装着場所による違いで人の意識やそれに伴う行動がどのように変化するかを検証することを目的とする。本稿ではその初期段階として、簡単なジェスチャをいくつか選び、センサ装着位置を変えながら

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Grad. School of Engineering, Kobe University
a) tomoki-kawamura@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

被験者には実験の目的を伝えずジェスチャを行わせることで、センサ装着位置がジェスチャに与える影響を定量的に評価する。

2. 関連研究

2.1 ホーソン効果について

心理学において、他人から注目を浴びるとその期待に応えようとして普段以上の成果を上げようとするホーソン効果がある [1]。ホーソン効果はウェスタン・エレクトリック (Western Electric) 社のホーソン (Hawthorne) 工場にて行われた実験から得られた結果である。ホーソンは 1924 年から 8 年間でインタビュー実験も含め 6 つの実験を行い、物的要因が人の作業量を増加させるのではなく、人間関係や社会的要因が影響することを明らかにした。また、ホーソン効果と似た心理効果にピグマリオン効果が存在する [7]。この効果は、ある人が他人に期待するとその期待に応えようとして、他人が普段以上の成果を出そうとする心理効果である。例えば、教師が生徒に対して抱く期待が、生徒の学業成績に影響を与えることが分かっている [8]。ホーソン効果は、一般に医療現場で重要な効果を示す。例えば、実験者に観察されていることによって、放射線技師が透視検査に用いる放射線の照射時間が短くなっていることが挙げられる [9]。不必要な放射線の照射は癌につながる可能性があるため、照射時間は短いほうが良いとされているが、測定時はホーソン効果の影響で照射時間が短くなり、通常時の被曝量が過小評価されている可能性があることを指摘している。また、ホーソン効果は医療分野以外にも人が他人から観察されていることを知っているときに効果を示す。例えば、Simons ら [10] は燃費効率の高い調理用コンロの使用頻度の評価において直接観察を行った結果、参加者は観察されることによって行動が変化したことを示している。そのため、医療以外の他分野においても人の本来の行動や選択を妨げないために、これらの効果を制御することが重要であると考えられる。

しかし、本研究で対象とするセンサ装着場所に関するホーソン効果とピグマリオン効果についての影響が日常動作の行動認識やスポーツにおける行動認識においてこれまでの研究では考慮されていることは無かった。また、これまでの結果はその影響を含めた結果としている可能性がある。本研究では、実験者が被験者に対してどのような期待を抱いているかを隠し、人からの注目ではなくセンサからの注目に置き換えることで、人の行動にどのような影響がでるのかを明らかにする。

2.2 加速度センサを用いたジェスチャ認識とスキル評価

加速度センサを用いたジェスチャの認識は数多くされている。村尾ら [11] は、被験者に与える指示の具体度によって、ジェスチャ動作が変化することを確認している。この

研究では、10 種類のジェスチャについて指示の具体度を文章、図、動画と変化させたとき、右手首に取り付けた加速度センサと実験環境を撮影した映像の記録から想定したジェスチャとの違いを指摘している。また、指示の具体度が上がると、ジェスチャの認識精度も上昇することが分かっている。Ravi ら [6] は、一つの加速度センサで立つ、ウォーキング、ランニング、掃除機をかける動作を含む 8 つのジェスチャ認識手法を提案している。加速度センサを用いたスポーツにおけるスキル評価も数多く行われている。Maglott ら [12] は、加速度センサを腕 (利き腕) に取り付けることによってバスケットボールにおけるシュート時の動きの評価をした。さらに、Wang ら [13] は、加速度センサをスパイク動作をする腕に取り付けることによって、さまざまなスキルレベルを持つバレーボール選手の違いを判別している。

これらの日常動作やスポーツにおけるジェスチャ認識の研究では認識に重要である部位に絞ってセンサが装着されていることが多く、そのことが機器装着バイアスを引き起こしている可能性があるが、この問題については考慮されていない。

3. センサ装着が行動に与える影響の評価実験

加速度センサを取り扱う研究において、従来は測定したい項目を中心にセンサの装着場所を決めていた。しかし、センサ装着場所によって人の行動が変化すると、測定結果に影響が生じてしまう。そこで本章では、センサ装着場所によって人の行動がどのように変化するかを確認するための実験を行った。

3.1 実験条件・環境

実験ではセンサ装着自体が行動に与える影響として、以下の 3 種類が挙げられる。(I) センサへの意識による行動の変化 (機器装着バイアス)、(II) 被験者のやる気や疲れ、慣れによる行動の変化、(III) 装着への違和感による行動の変化 (装着に対する不快感や重さ、センサが外れないように行動するなど)。(II) と (III) の影響をなるべく取り除き、(I) のみを抽出するための実験条件・環境を構築する。

腕など上半身にセンサを装着すると上半身の動きが、足など下半身にセンサを装着すると下半身の動きがそれぞれ期待されると被験者が感じ、行動が変化すると予想される。本実験ではセンサ装着のバリエーションが増えすぎのを避けるため、特に上半身の動きに注目し、装着場所を手首に限定した。被験者に実験の目的を推測されてしまう可能性を減らすため、本実験ではセンサ装着無しのパターンを実施しない。したがって装着は、右手首のみ、左手首のみ、両手首の 3 パターンで 3.2 節で述べるジェスチャ動作を分析する。

被験者には実験開始前に図 1 のように無線通信型の 3 軸

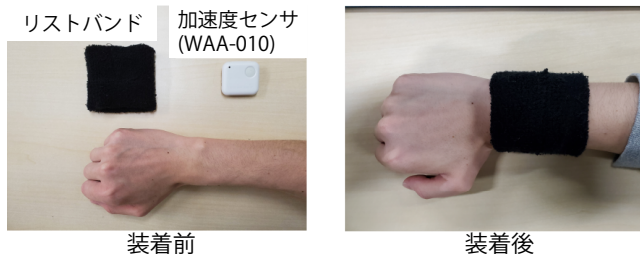


図 1: センサ装着の方法

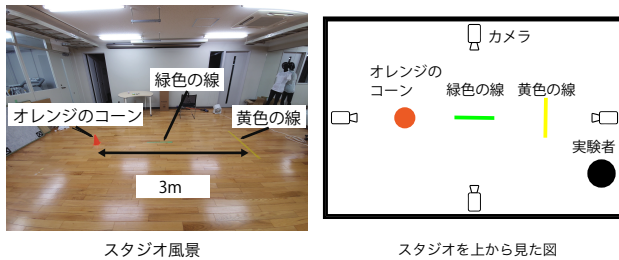


図 2: 実験環境

加速度・角速度センサ (ATR 社製, WAA-010, 重さ 20g, サイズ W:39mm,H:44mm,D:12mm) を装着し, 加速度および角速度を PC 上で取得すると説明した. (III) の影響を小さくするため, 動作に支障なくセンサを固定できる程度の締め付けがあるリストバンドを使用し, センサは小型のものを使用した. センサ装着場所は, 右手首だけのとき, 左手首だけのとき, 両手首のときの 3 パターンであるが, (II) の影響 (順序効果など) を避けるため, それぞれの被験者で実験順序を変えた. 被験者は実際にセンサを使用したことがある, またはセンサを使って加速度を計測できることを知っている研究室に所属する 20 代の男性 12 名である.

実験は, 図 2 左に示す研究室にあるスタジオで行った. ここで, 本実験ではセンサを装着していない箇所の動きを評価する必要がある (例えば, 右手にしかセンサをつけていないときに左手がどう動くかを計測する必要がある) ため, 装着した加速度センサのデータのみからは分析が行えない. したがって, スタジオ内にはあらかじめ小型のカメラ (GoPro 社製, HERO8) を 4 箇所に設置し (図 2 右), 実験風景を撮影し, 映像を解析することで動作評価を行った. 被験者には実験が終わるまで「このカメラは別の人が実験に使うため置いてある」とだけ伝え, カメラを意識させないようにした. カメラについて説明する際は, 実験環境にあるカメラ位置については伝えていない. 実験終了後, カメラで撮影していたことを明かし同意を得た上でデータの解析に用いた. 実験中の予期しない事態に備えて, 被験者になるべく影響が出ないように実験者はスタジオ内にて測定を行った. なお, この実験は神戸大学大学院工学研究科の研究倫理審査委員会の承認を得て行った.

3.2 ジェスチャ項目

本研究で実験の対象とするジェスチャについては以下のように決定した. さまざまなジェスチャは, センサへの意識による行動変化が起こりやすいものと起こりにくいものに分けられると考え, 以下の 4 つのカテゴリを含むようにジェスチャセットを作成する. (1) 誰がやっても同じ動作をするジェスチャ, (2) 個人のかなででは動作の形が決まっているジェスチャ, (3) 意識の違いで動作が変わりそうなジェスチャ, (4) 意識によらず毎回動作が変わりそうなジェスチャ. 本実験で扱うジェスチャは関連研究に挙げた論文を参考に決定した以下 11 種類である. (a) 座る/立つ動作, (b) 歩く動作, (c) 走る動作 (ジョギング程度), (d) ボタンを押して帰ってくる動作, (e) ボールをキャッチする動作, (f) 投げる動作, (g) ラケットを振る動作, (h) 物を拾う動作, (i) 字を書く動作, (j) 掃除機をかける動作, (k) 本をめくる動作. ジェスチャの詳細な内容に関しては先行研究 [14] で述べている.

また, 上記のジェスチャは 4 つのカテゴリから一つ以上選ぶように定めた. 具体的には, 誰がやっても同じ動作をするジェスチャは (a), 個人のかなででは動作の形が決まっているジェスチャは (b, c), 意識の違いで動作が変わりそうなジェスチャは (d, e, f, g, h, i), 意識によらず毎回動作が変わりそうなジェスチャは (j, k) である. また, 機器装着バイアスの影響を確かめるため, 指示内容は簡単に理解しやすいものにした. 例えば, ラケットを振る動作においては, ラケットを振るとだけ指示を出し具体的な体全体の動きを指定していない. 本研究において重要である「意識の違いで動作が変わりそうなジェスチャ」の項目は, 他の項目よりも多くのジェスチャを取り入れた.

3.3 実験手順

実験手順の概要を図 3 に示す. ジェスチャに関する指示は説明 1 のときに指示書を渡し, ジェスチャに関する質問は受け付けないようにした. 被験者にはセンサの装着場所を 3 パターン行うことは事前に伝えず, 予め実験者が決めた装着場所の順番で行った. センサ装着後, 指示書のジェスチャを上から順に行ってもらった. ジェスチャの順番は順序効果や慣れの影響を減らすため, 被験者毎にランダムな順番を用いた. 各ジェスチャを 10 セット (本をめくる動作は 10 ページ, 掃除機は約 30 秒間) 行ってもらい 10 セット内の動作はなるべく同じ動作を行ってもらった. 一つのジェスチャが終わるごとに準備を含め 1 分程度の休憩がある. 1 回目の測定が終了後, センサの装着場所を入れ替えて 2 回目の測定に移る. 2 回目の測定においてもジェスチャの種類は同じであるが, 順番は 1 回目とは異なる順番を指示した. 3 回目の測定においても同様である. 実験終了後にカメラで映像を撮っていたことを被験者に伝え, 許可が得られた場合のみ映像による解析を行った.

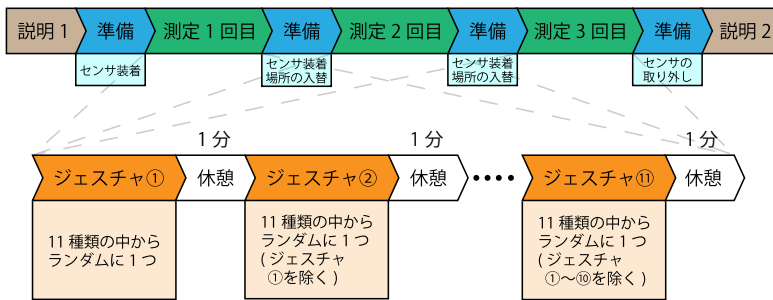


図 3: 実験手順

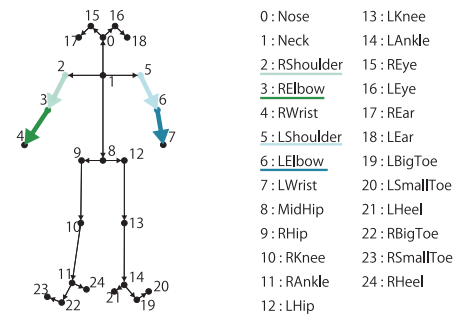


図 4: オープンポーズから得られる 25 の特徴点

3.4 解析手法

3.4.1 ジェスチャ動作の定量的な解析

映像中の人物の動作を定量的に解析する手法として、Kinect や RealSense の深度センサ付のカメラを用いた 3 次元モーション解析、Cao らが提案した深度データなしで映像を 2 次元モーション解析する OpenPose [15] がある。実験中、被験者はカメラを意識した動作をしなため、複数方向からの撮影が必要である。しかし、実験室内に多方向からの Kinect や RealSense などのカメラがあると、実験内容を推測される恐れがある。そのため、カメラの影響をなるべく取り除くために小型の RGB カメラ (GoPro 社製, HERO8) を用いて撮影を行い、OpenPose を用いた定量的な解析を行う。OpenPose とは深層学習を用いることによって、映像中の人物に対して図 4 のような 25 の特徴点 (2 次元 x, y 座標) を推定することができ、それらの点をつなぎ合わせることで骨格推定が可能である。特徴点にはそれぞれの点に対して信頼度 (0~1 の間の値を取る) が存在し、特徴点を抽出する際は信頼度が 0.75 以上になるように設定した。

実験終了後、被験者にカメラで映像を撮っていたことを明かした際、全員が「映像を取られていたことには気づかなかった」と述べていることから、被験者はカメラを意識した動作をせず、カメラに対して動作を行う位置が毎回変化しているジェスチャがあった。そのため、単純な特徴点の座標を比較できないので、取得した 25 点の特徴点を単位ベクトルに変換することによって基準を統一し、解析を行った。単位ベクトルに変換する部分は、座標の隣り合った 2 点を結んだ部分である。例えば、図 4 において左肩から左肘を結んだ線、左肘から左手首を結んだ線である。

単位ベクトルに変換後、単位ベクトルの x, y 座標それぞれに対して分散値をジェスチャ 10 試行分算出する。映像から被験者のジェスチャ 1 試行分を取り出す際、動画アニメーションツール ELAN を用いて第一著者が目視にて動作開始から終了までのラベル付けを行った。ラベル付けする際は、ジェスチャ開始時の被験者の姿勢を統一した。掃除機をかける、字を書く動作に関しては、連続した動作であるため定量的な解析は実施しなかった。右手首、左手首、

両手首の 3 パターンにおいて分散値に有意に違いが生じた場合、動きの違いが見られたと判定する。それぞれの装着パターンにおいて、ある部位の分散値を見る際、10 試行分の分散値の平均をその動作に対する動きの分散値とする。例えば、被験者 A のラケットを振る動作において右手首装着時に 10 回の振る動作が存在する。右肩から右肘の単位ベクトルの x 座標 (x -RS-RE) において 10 試行分のデータの分散値をそれぞれ算出し、平均をとることによって右手首装着時における x -RS-RE の分散値とする。

センサ取り付け位置を手首に限定しているため、解析に用いる骨格情報は上半身に絞りに、LeftShoulder-LeftElbow(左肩-左肘), LeftElbow-LeftWrist(左肘-左手首), RightShoulder-RightElbow(右肩-右肘), RightElbow-RightWrist(右肘-右手首) の 4 つに対して単位ベクトルの x, y 座標それぞれを解析した。以下、本文中では左肩から左肘までの単位ベクトルの x 座標を x -LS-LE, y 座標を y -LS-LE と表す。同様に、左肘から左手首、右肩から右肘、右肘から右手首までに関しても x -LE-LW, y -LE-LW, x -RS-RE, y -RS-RE, x -RE-RW, y -RE-RW で表す。

3.4.2 ジェスチャ動作の定性的な解析

定量的な評価より、各装着パターン間で有意差が見られた被験者の映像について、第一著者の目視で確認する。4 方向から撮影された映像をすべて確認し、分散値の差異が映像のどの部分で現れているのかを調べる。1 セット 10 試行の内同じ動きをしている回数が多いパターン (掃除機をかける、字を書く動作に関しては、10 秒以上同じ動き) を、そのセンサ装着場所でのジェスチャ軌跡とし、その軌跡が装着パターン間で異なると目視で違いありと判断した。

4. 実験結果と考察

4.1 定量的な解析と目視による確認

図 5 に各ジェスチャに対する定量的な解析と目視にて違いが確認できた被験者を示す。左から被験者毎に違いが確認できた数が多い順に示している。図 5 より、すべてのジェスチャにおいて違いが見られた。センサ装着場所の違いでジェスチャが変化した被験者の数が一番多かったのは、本をめくる動作で 12 人中 11 人であった。次に違いがある

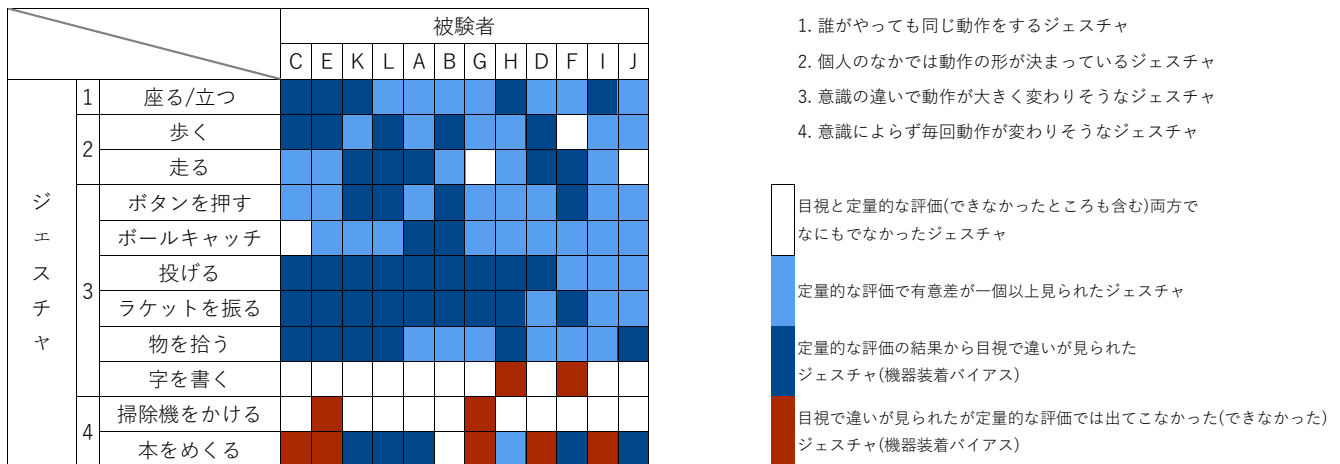


図 5: 違いが確認できた被験者のジェスチャ項目

被験者の数が多かったジェスチャは、ラケットを振る、投げる、物を拾う動作の順で 12 人中 9 人、9 人、8 人に違いが見られた。その他のジェスチャに関しては歩く、走る、ボタンを押す動作が 12 人中 6 人に違いが見られ、座る/立つ、掃除機をかける動作に関しては 12 人中 5 人、3 人に違いが見られた。ボールキャッチや字を書く動作に関してはそれぞれ 12 人中 2 人に違いが見られた。被験者 E 以外の被験者は全て右利きである。違いは定量的な評価から、センサ装着パターン間で有意差が見られた部分を中心に目視にて確認した。有意差が見られなかった部分に関しては、目視にて映像を全体的に確認した。本稿では違いが顕著に表れていたラケットを振る動作、物を投げる動作、物を拾う動作について説明する。

4.1.1 ラケットを振る動作

ラケットを振る動作において、違いが確認できた被験者 9 名のうち 1 名の解析結果を報告する。被験者 A について、OpenPose にて解析したデータを図 6 右上に示す。図 6 右上は各部位に対する単位ベクトルの分散値の 10 試行分の平均である。単位ベクトルの分散値は x 座標、y 座標それぞれに対して示している。図 6 右上のエラーバーはデータの標準偏差を示し、* は $p < 0.05$ で有意であることを示す。右手首、左手首、両手首の 3 条件で 10 試行分の単位ベクトル (x, y 座標それぞれに対して) を標本とした 1 要因分散分析を行った。分析の結果、 $x\text{-LS-LE}(F(2, 18) = 8.32, p < 0.01)$ 、 $y\text{-LS-LE}(F(2, 18) = 6.51, p < 0.01)$ 、 $x\text{-LE-LW}(F(2, 18) = 8.24, p < 0.01)$ 、 $y\text{-LE-LW}(F(2, 18) = 27.39, p < 0.001)$ 、 $x\text{-RS-RE}(F(2, 18) = 7.29, p < 0.01)$ 、 $x\text{-RE-RW}(F(2, 18) = 8.13, p < 0.01)$ 、 $y\text{-RE-RW}(F(2, 18) = 6.36, p < 0.01)$ で有意差が見られた。さらに、Shaffer の方法 (有意水準 5% 以下) を用いて多重比較を行ったところ左腕に関しては、 $x\text{-LS-LE}(MSe = 0.0038)$ 、 $y\text{-LS-LE}(MSe = 0.0002)$ 、 $x\text{-LE-LW}(MSe = 0.0146)$ 、 $y\text{-LE-LW}(MSe = 0.0011)$ において左手首、両手首装着時の分散値が右手首装着時に比

べて有意に大きかった。また、右腕に関しては、 $x\text{-RE-RW}(MSe = 0.0073)$ 、 $y\text{-RE-RW}(MSe = 0.0022)$ において右手首装着時より左手首、両手首装着時の分散値の方が有意に大きかった。

次にこれらの有意差がどの部分に現れているのか、第一著者が目視にて映像を解析した。図 6 下は、各装着パターンの 1 試行分を 10 フレームに分けたときの連続画像である。左手首 (図 6(LH)) や両手首 (図 6(BH)) 装着時は、右手首 (図 6(RH)) 装着時に比べてラケットを振る時の左腕の動きが 10 回とも大きくなっていった。

4.1.2 投げる動作

投げる動作について違いが確認できた被験者 9 名のうち 1 名の解析結果を報告する。被験者 G に関して、OpenPose で解析したデータを図 7 右上に示す。同様の 3 条件で 1 要因分散分析を行った結果、 $x\text{-LS-LE}(F(2, 18) = 2.82, p < 0.10)$ 、 $y\text{-LE-LW}(F(2, 18) = 3.97, p < 0.05)$ 、 $y\text{-RS-RE}(F(2, 18) = 3.83, p < 0.05)$ で有意傾向および有意差が見られた。さらに、Shaffer の方法 (有意水準 5% 以下) を用いて多重比較を行ったところ、 $x\text{-LS-LE}(MSe = 0.0117)$ において両手首装着時の方が右手首装着時の分散値より有意に大きかった。 $y\text{-LE-LW}(MSe = 0.0012)$ において両手首装着時の方が右手首、左手首装着時の分散値より有意に大きかった。右腕に関しては、 $y\text{-RS-RE}(MSe = 0.0015)$ において両手首装着時の方が右手首装着時の分散値より有意に大きかった。

第一著者が目視にて映像を解析すると右手首装着時 (図 7(RH)) は 10 回とも左腕が体の後ろの方まで振り切れているが、左手首 (図 7(LH)) や両手首装着時 (図 7(BH)) は左腕が胸の位置にそれぞれ 6 回、8 回あった。

4.1.3 物を拾う動作

物を拾う動作について違いがあった被験者 8 名のうち、1 名の解析結果を報告する。被験者 E に関して、OpenPose で解析したデータを図 8 右上に示す。同様の 3 条件で 1 要因分散分析を行った結果、 $x\text{-LS-LE}(F(2, 18) = 16.81, p < 0.01)$ 、

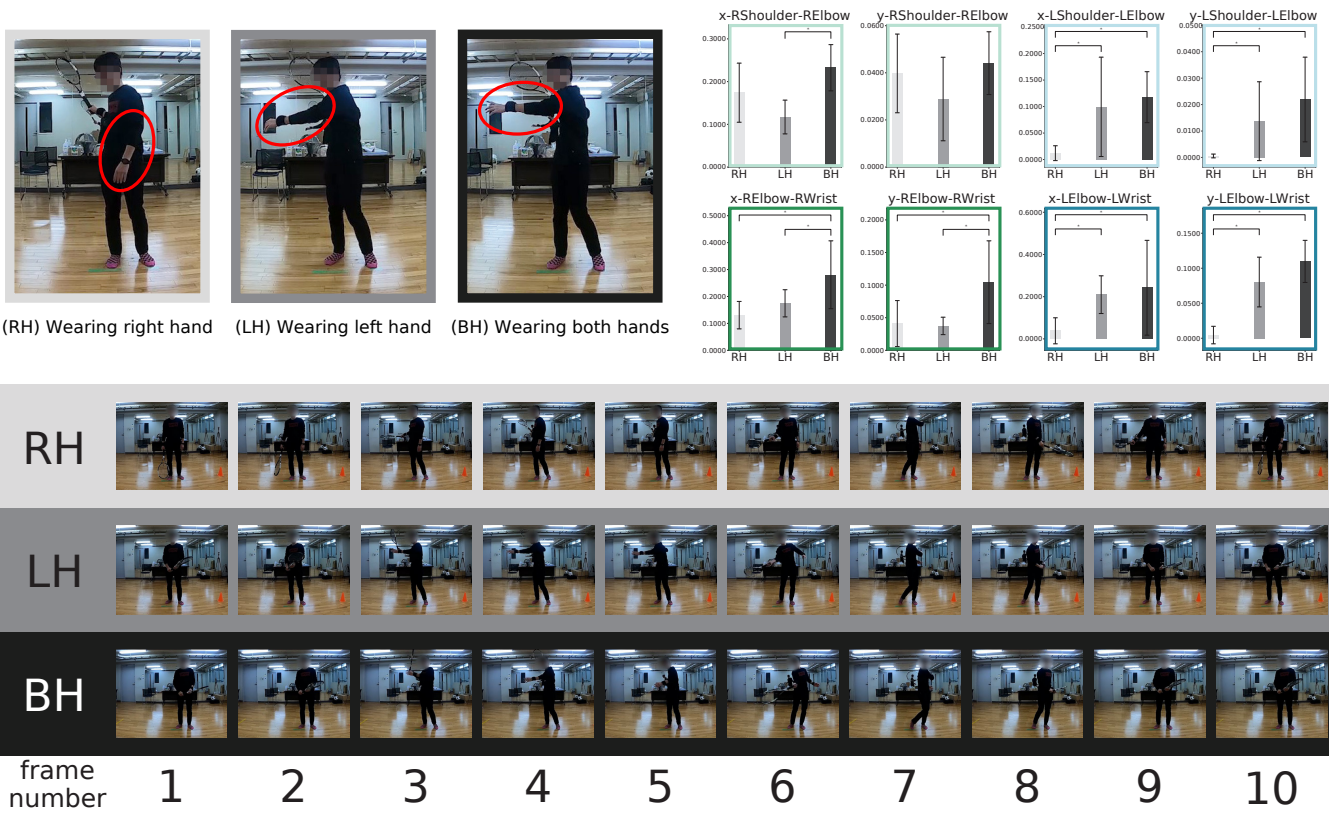


図 6: ラケットを振る動作 (被験者 A): (左上) 目視で確認できた各装着パターン間での違いを表した画像。

(右上) OpnePose の結果から算出した各部位の分散値の結果. (下) 1 試行を 10 フレームに分けた連続画像。

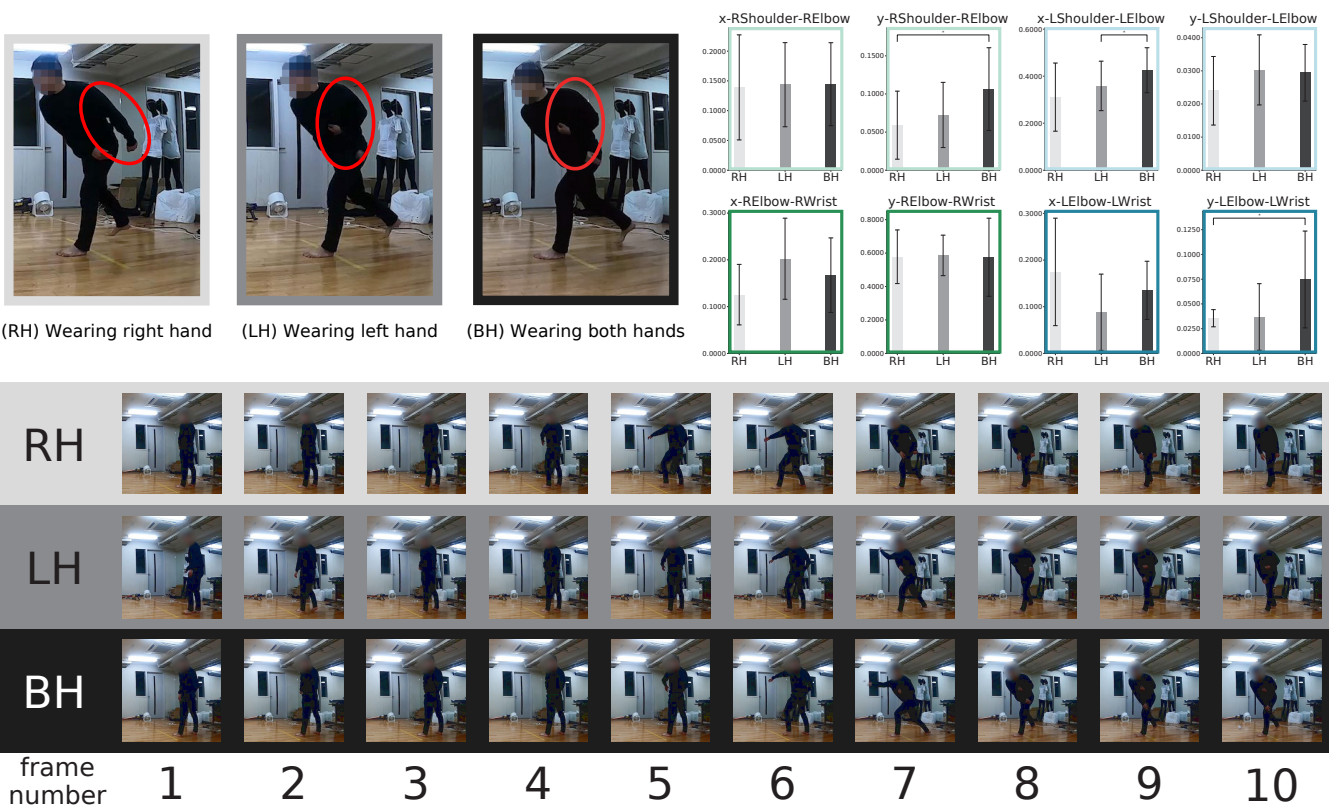


図 7: 投げる動作 (被験者 G)

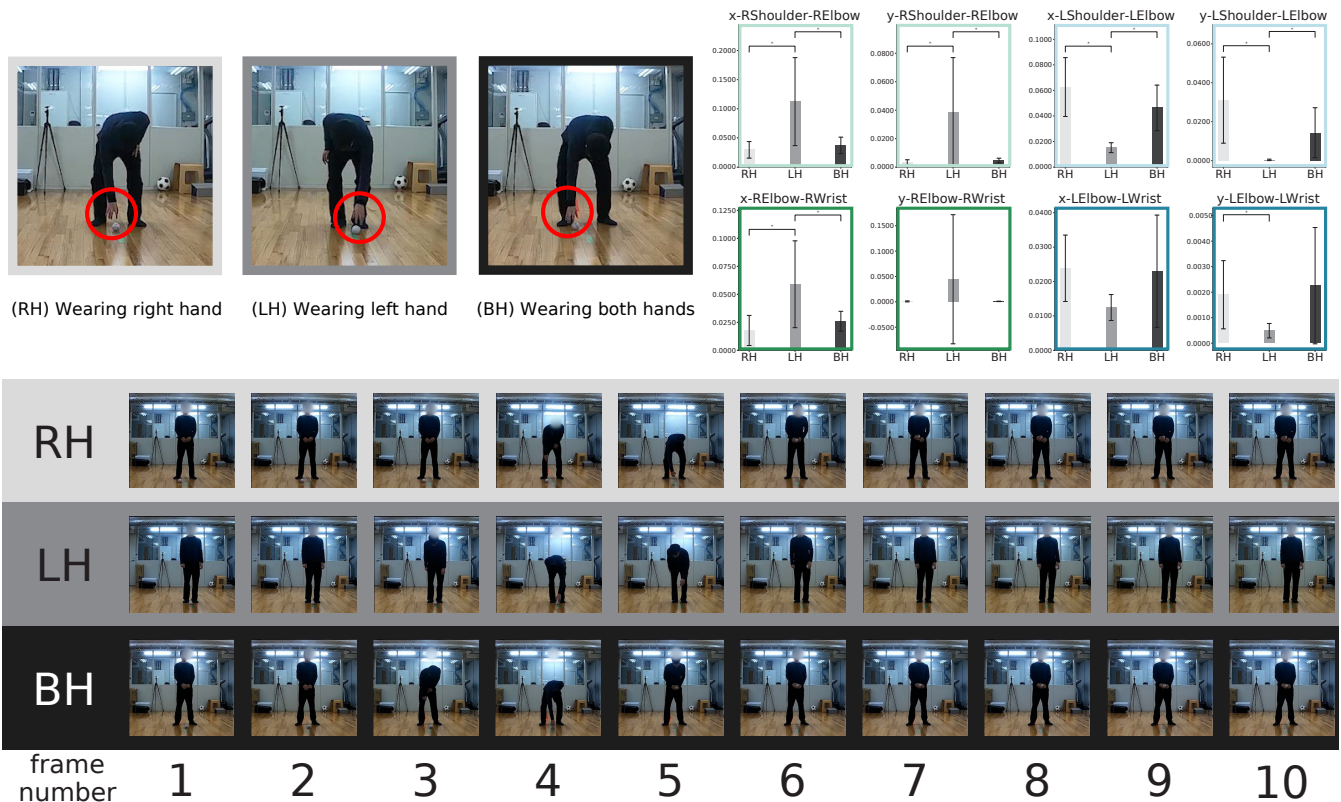


図 8: 物を拾う動作 (被験者 E)

y -LS-LE($F(2, 18) = 10.76, p < 0.01$), y -LE-LW($F(2, 18) = 4.47, p < 0.05$), x -RS-RE($F(2, 18) = 8.63, p < 0.01$), y -RS-RE($F(2, 18) = 7.31, p < 0.01$), x -RE-RW($F(2, 18) = 9.03, p < 0.01$) で有意差が見られた. Shaffer の方法 (有意水準 5% 以下) を用いて多重比較を行ったところ, 左腕に関して x -LS-LE(MSe = 0.0003), y -LS-LE(MSe = 0.0002) において左手首装着時の方が, 右手首, 両手首装着時の分散値より有意に小さかった. y -LE-LW(MSe = 0.0000) において右手首装着時は左手首装着時の分散値より有意に大きかった. 右腕に関しては, x -RS-RE(MSe = 0.0024), y -RS-RE(MSe = 0.0006), x -RE-RW(MSe = 0.0005) において左手首装着時の方が右手首, 両手首装着時の分散値より有意に大きかった.

第一著者が目視にて映像を解析すると右手首装着時 (図 8(RH)) は 10 回とも右手でボールを拾っており, 左手首装着時 (図 8(LH)) には 10 回とも左手でボールを拾っていた. また, 両手首装着時 (図 8(BH)) には 10 回とも右手でボールを拾っていた.

4.2 考察

それぞれのジェスチャについて考察する. 本をめくる動作は, 4つのカテゴリ内の4つ目である「意識によらず毎回動作が変わりそうなジェスチャ」の分類に入っているため, 意識によらず毎回動作が変化していると考えられるが, 被験者によってはセンサを意識した行動も見られた. 例え

ば, 被験者 C や E はセンサ装着をした腕でページをめくっていることからセンサを意識した動きになっていると考えられる. 同じカテゴリに入っている掃除機をかける動作に関してはランダムな動作が多いため, 定量的な評価ができず, 目視による変化もあまり見られなかった.

ラケットを振る動作は 4つのカテゴリの内の三つ目である「意識の違いで動作が変わりそうなジェスチャ」に分類されており, 被験者がセンサを意識したことで行動が変化したと考えられる. 被験者全員が右手でラケットを振っており, センサ装着によってラケットを持っていない左手の動きに違いが主に見られた. 特に被験者 A, C に関しては, OpenPose の解析結果から左手首にセンサを取り付けられると左腕全体の動作が大きくなっていることがわかり, 目視でも確認できた. また, 右手首, 左手首に装着されても動きに違いが見られなかったが, 両手首に装着されると全体の動きが大きくなる被験者もいたことから両手首装着に対しても機器装着バイアスの影響を受ける可能性がある.

次に投げる動作について違いが見られた被験者を説明する. 被験者 G に関して, 左腕にセンサを装着されるとセンサを意識した行動になり, 投球フォームが変化していた. 他にも, 被験者 E, A はセンサを装着されると腕の振りが大きくなっていた. センサ装着によって, これらの被験者のように投げる動作が変化すると, 投球フォームが崩れてしまい最適なフィードバックが得られない可能性がある.

次に多く違いが見られたのは, 物を拾う動作である. 被

験者 E では、左手首装着時のみ左手で物を拾っていることが目視にて確認できた。OpenPose の解析結果より、左手首装着時は右手首、両手首装着時に比べて左肩から左肘の分散値が小さいことがわかる。また、右手首、両手首装着時は右肩から右肘の分散値が小さいことがわかった。物を拾っている方の腕の分散値が小さくなった理由は、拾っている腕はカメラに対して直線で運動しているため動きの分散値が小さくなったと考えられる。

上記の結果より、センサを装着することによる影響が表れる人が存在し、機器装着バイアスの影響が見られた。そのため、今までのセンサを用いた実験環境における行動認識やスポーツにおけるスキル評価においてセンサ装着自体の影響を考慮する必要があると考えられる。例えば、特定の部位にだけセンサをつけて評価しているような研究はその結果の信頼性が足りない可能性が高い。センサ装着の影響は受けやすい被験者とそうでない被験者がいたため、被験者によってセンサ装着に対する影響の大きさには、個人差があると考えられる。また、違いが出やすいジェスチャに関しては本をめくる動作やラケットを振る動作など物を用いて行うジェスチャに関して出やすいことがわかった。

機器装着バイアスの影響をなくすためにどのような考慮が必要かというガイドラインに関しても今後考えていく必要がある。例えば、どのような実験を行う際であってもセンサを全身にくまなく装着することで部位の動作の偏りはなくすることができると考えられる。また、映像からの解析で十分な場合、ウェアラブルセンサは利用せず、小型のカメラ等を用いてあまり意識をさせずにデータを取得するといった工夫が有効である可能性がある。このような実験結果と考察をまとめることで、動作解析実験を行う際にホーン効果を含む機器装着バイアスを生じさせないためのガイドラインを作成する予定である。

5. まとめ

本研究では、センサを装着すること自体が被験者のジェスチャ軌跡に与える影響を調べるため、センサ装着場所を変えながら被験者の動作を計測する実験を行った。調査の結果、センサ装着の影響が現れる被験者が存在し、機器装着バイアスの影響が見られた。本稿では、OpenPose を用いて定量的な評価を行い事前に違いが現れそうな部分を把握した上で、第一著者の目視にて確認することにより機器装着バイアスの影響を確認した。この結果は、これまでの数多くの動作計測研究の評価における信頼性に疑問を投げかけるものであり、動作計測実験において考慮しなくてはならない新たな要素を示した貴重なものであると考える。今後のさらなる調査により、正しい動作計測実験を行うためのガイドライン作成が行える可能性がある。

謝辞 本研究の一部は、JST CREST (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] F. Roethlisberger and W. Dickson: *Management and the Worker*, Harvard Univ. Press, Cambridge, MA (July 1939).
- [2] T. Eckmanns, J. Bessert, M. Behnke, P. Gastmeier, H. Ruden et al.: Compliance with Antiseptic Hand Rub use in Intensive Care Units: the Hawthorne Effect, *Journal of Infection Control and Hospital Epidemiology*, Vol. 27, No. 9, pp. 931–934 (Aug. 2006).
- [3] R. McCarney, J. Warner, S. Iliffe, R. Van Haselen, M. Griffin, and P. Fisher: The Hawthorne Effect: A Randomised, Controlled Trial, *Journal of BMC Medical Research Methodology*, Vol. 7, No. 1, p. 30 (July 2007).
- [4] D. Whiteside, O. Cant, M. Connolly, and M. Reid: Monitoring Hitting Load in Tennis using Inertial Sensors and Machine Learning, *Journal of Sports Physiology and Performance*, Vol. 12, No. 9, pp. 1212–1217 (Jan. 2017).
- [5] Y. Bai and I. Hsieh: Using a Wearable Device to Assist the Training of the Throwing Motion of Baseball Players, *Proc. of Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pp. 1–6 (May 2019).
- [6] N. Ravi, N. Dandekar, P. Mysore, and M. L. Littman: Activity Recognition from Accelerometer Data, *Proc. of the American Association for Artificial Intelligence (AAAI)*, Vol. 5, pp. 1541–1546 (July 2005).
- [7] R. Rosenthal and L. Jacobson: Pygmalion in the Classroom, *Journal of the Urban Review*, Vol. 3, No. 1, pp. 16–20 (Sep. 1968).
- [8] G. Szumski and M. Karwowski: Exploring the Pygmalion effect: The role of teacher expectations, academic self-concept, and class context in students' math achievement, *Contemporary Educational Psychology*, Vol. 59, No. 101787, pp. 1–10 (Oct. 2019).
- [9] T. Vehmas: Hawthorne Effect: Shortening of Fluoroscopy Times During Radiation Measurement Studies., *The British journal of radiology*, Vol. 70, No. 838, pp. 1053–1055 (Oct. 1997).
- [10] A. M. Simons, T. Beltramo, G. Blalock, and D. I. Levine: Using unobtrusive sensors to measure and minimize Hawthorne effects: Evidence from cookstoves, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 86, No. 2017, pp. 68–80 (Nov. 2017).
- [11] M. Kazuya and T. Tsutomu: Evaluating Instructions for Gesture Recognition with an Accelerometer, *Journal of Human Interface Society*, Vol. 17, No. 1, pp. 73–84 (Feb. 2015).
- [12] J. C. Maglott, J. Xu, and P. B. Shull: Differences in Arm Motion Timing Characteristics for Basketball Free Throw and Jump Shooting Via a Body-Worn Sensorized Sleeve, *Proc. of 2017 IEEE 14th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*, pp. 31–34 (May 2017).
- [13] Y. Wang, Y. Zhao, R. H. Chan, and W. J. Li: Volleyball Skill Assessment Using a Single Wearable Micro Inertial Measurement Unit at Wrist, *Journal of IEEE Access*, Vol. 6, pp. 13758–13765 (Jan. 2018).
- [14] 河村知輝, 土田修平, 寺田努, 塚本昌彦: ウェアラブルセンサを用いた動作計測実験における機器装着バイアスの検証, *インタラクション 2021 論文集*, pp. 21–30 (Mar. 2021).
- [15] Z. Cao, G. Hidalgo, T. Simon, S. Wei, and Y. Sheikh: OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields, *Journal of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 43, No. 1, pp. 172–186 (Jan. 2021).