



# 投擲運動を支援する人間機械協調動作システムにおける搭載型センサのみによる位置推定手法

正野脩登<sup>1)</sup>, 松原晟都<sup>1)</sup>, 前川和純<sup>2)</sup>, 檜山敦<sup>3)</sup>, 稲見昌彦<sup>3)</sup>  
Naoto SHONO<sup>1)</sup>, Seito MATSUBARA<sup>2)</sup>, Azumi MAEKAWA<sup>3)</sup>,  
Atsushi HIYAMA<sup>4)</sup> and Masahiko INAMI<sup>4)</sup>

- 1) 東京大学 工学部 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, lemon-san@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)  
2) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, matsubara@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)  
3) 東京大学 工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)  
4) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

**概要:** 人間と機械が協調して動作するシステムは両者の一体感を創出し、人間が達成感を得られる。人間と機械の協調運動には人間動作の高度な計測が必要であるが、設置型の機器では場所の制約が問題となる。そこで本研究では手持ち装置に付けた IMU センサのみを用いて人間動作の計測を行い、腕の動きに従って投球の瞬間を制御するシステムを構築した。投擲精度の検証実験の結果、落下地点の分布が目標とする飛距離ごとに異なることが確認された。

**キーワード:** 人間拡張, 身体動作計測, 投擲運動

## 1. はじめに

人間と機械が協調して動作を行うことで、パフォーマンスの向上と自分が動作を行った感覚を両立させることにより身体感覚の拡張を実現することができる。そこでは動作を完全に機械に行わせるのではなく、人間と機械が一体となって動作を行うようなシステムの開発が求められる。また、AR や VR などの技術において身体感覚の拡張の実現は一つの目標である。この実現のためには、人間動作の推定とそれに合わせた刺激の提示が必要になり、人間と機械の協調運動の知見が重要になる。このような人間と機械を組み合わせたシステムを用いて、人間の身体能力を超えて競い合う超人スポーツが提案されている。

本研究では、このようなシステム構築のための一歩として、人間の動作を高精度に計測・推定し、ロボットと人間の運動の両方をアクチュエータとして利用する人間機械協調動作システムを提案する。

先行研究として投擲運動を支援する人間機械協調動作システムが提案されている [1]。このシステムはリリースタイミングのみを制御する手持ち型のデバイスを用いている。デバイスの位置、軌道を光学式モーションキャプチャと IMU センサによって計測し、リリースタイミングを制御することで投擲運動を実現している。

しかしモーションキャプチャを使用することは主に 2 つの問題点がある。1 つ目は照明条件や遮蔽物の有無を考慮するなど設置の手間が大きいことである。2 つ目は屋外などといった設置が難しい場所ではシステムの使用が困難なことである。そこで本研究ではモーションキャプチャを使用せ

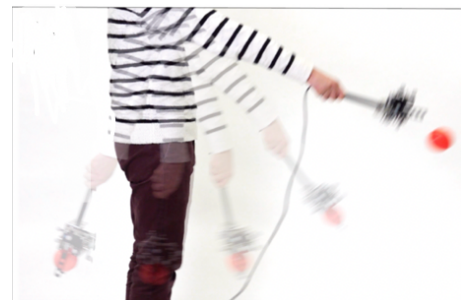


図 1: 手持ちデバイスによる投擲運動の様子

ず、手持ちデバイスに搭載された IMU センサのみで位置を推定するシステムを提案する (図 1)。これにより屋外など、様々な場所で使用できるシステム構築の一助となることが期待される。

本研究では、本システムのプロトタイプを用いて投擲運動の精度検証を行った。

## 2. システムの概要について

本システムの概要を図 2 に示す。本システムは手持ち型デバイス及びデバイスを制御するマイコンとドライバから成る。

### 2.1 手持ち型デバイス

使用した手持ち型デバイスは先行研究 [1] のデバイスからモーションキャプチャのマーカーを除いたものを用いた (図 3)。デバイスの挙動の計測のため、加速度計とジャイロセンサを搭載した IMU センサを搭載した。持ち手部分に

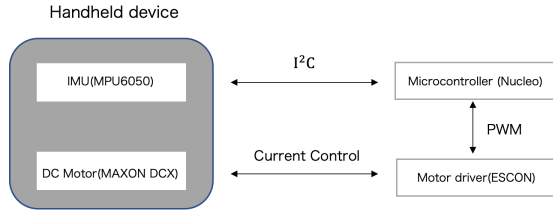


図 2: 開発した投擲運動のためのシステムの概要

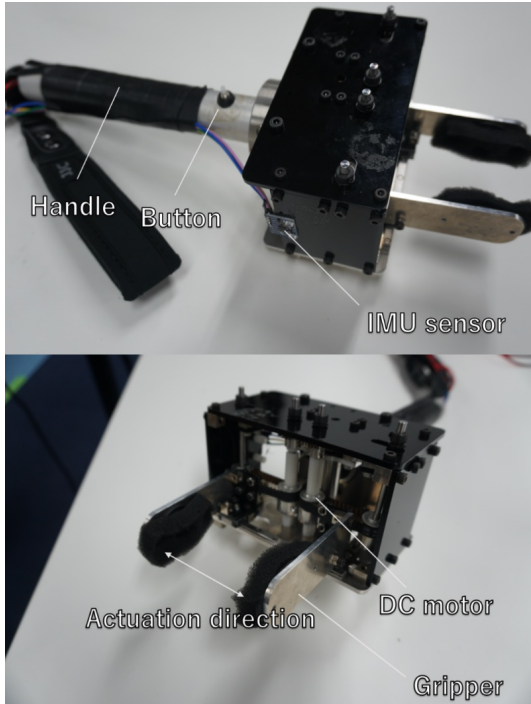


図 3: 手持ち型デバイス。IMU センサ・ボタン・DC モータは有線で制御器に接続した。

ボタンを導入し、手動でグリッパの開閉を制御して把持物体をグリッパで掴めるようにした。電源の供給と信号の送受信のため、IMU センサ・ボタン・DC モータを有線で制御器に接続した。デバイスの重さは約 1kg であり、本デバイスを手をもって投擲運動を行う。

## 2.2 制御手法

本システムの位置計測には IMU センサを用い、約 2000 Hz でのリリースタイミング制御を行った。IMU センサには MPU6050 を用いて、計測された加速度と角加速度データはマイクロコントローラ (STM32Nucleo-767ZI) に送信される。後述するアルゴリズムによってリリースすると判断された場合、モータドライバに信号が送られ、手持ち型デバイスの DC モータを駆動して把持物体がリリースされるようになっている。

## 2.3 位置計測アルゴリズム

本システムでは先行研究と比較してモーションキャプチャが存在しない。そのためモーションキャプチャによる位置の更新が行えず、IMU センサの誤差の影響を受けやすい。例えば IMU センサは静止している場合に誤差が大きくなる傾向があり、静止した状態でも動いているように位置推定を



図 4: 初期姿勢。この姿勢をした時点で初期化を行う

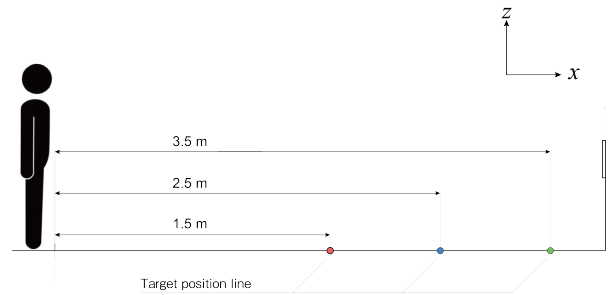


図 5: 座標系。鉛直上方向が  $z$  軸、正面方向が  $x$  軸になるよう設定した。

行ってしまふ。そこで、手持ち型デバイスを図 4 のように鉛直下向きに持った状態を初期値として、そこから投擲動作を開始させた。腕を振り始める瞬間を加速度センサの値から検出し、それまでは位置推定を行わないようにした。

また、モーションキャプチャによる位置の更新がないため、加速度センサの値を積分して得られた位置は、時間がたつにつれて誤差が増幅してしまう。そこで前述の振り上げの瞬間を検出してから 0.8 秒以上経つと把持物体をリリースできないようにした。

投擲運動の全体のアルゴリズムの手順を述べる。本システムにおける座標系は図 5 のように、鉛直上方向が  $z$  軸、正面方向が  $x$  軸になるように設定した。

まず手持ち型デバイスを鉛直下向きに持った瞬間を加速度センサの値から検出し、そこで位置、速度、姿勢の初期化を行った。初期位置、速度をそれぞれ  $\mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0$ 、姿勢をロール、ピッチ、ヨーで表しそれぞれ  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$  と表すと初期値はそれぞれ下式のように計算された。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_0 &= (x_0, y_0, z_0) = (0, 0, h) \\ \mathbf{v}_0 &= (v_{x,0}, v_{y,0}, v_{z,0}) = (0, 0, 0) \\ (\alpha_0, \beta_0, \gamma_0) &= (0, \pi/2, -\pi/2) \end{cases}$$

ここで  $h$  は手持ち型デバイスを鉛直下向きに持った時のデバイスの地面からの距離で、事前に計測した (図 4 参照)。手持ち型デバイスを鉛直下向きから正面に振り上げ始める瞬間から位置推定を始めた。各フレームごとに、IMU センサから得られたデバイス座標系の加速度をグローバル座標系

に変換して加速度  $\mathbf{a}$  を得た。IMU センサから得られた値を Madgwick フィルタ [2] を用いて初期状態からのロール、ピッチ、ヨーの値を推定した。  $i$  フレーム目の位置・速度をそれぞれ  $\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i$  とする。フレーム間の時間を  $\Delta t$  として、位置・速度を下式のように計算した。

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i &= \mathbf{a}\Delta t + \mathbf{v}_{i-1} \\ \mathbf{x}_i &= \mathbf{v}_i\Delta t + \mathbf{x}_{i-1} \end{cases}$$

手持ち型デバイスの現在の位置の推定を行った時点から、モータドライバに信号が送られ、実際にモータが動作し、把持物体がリリースされるまでには約 15 ミリ秒のタイムラグが生じる。このタイムラグの間は等加速度と仮定して位置推定を行った。リリースする時の手持ちデバイスの位置・速度を  $\mathbf{x}_{predict}, \mathbf{v}_{predict}$  とし、タイムラグの時間が  $N = 30$  フレーム分あるとして

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{predict} &= \mathbf{a}N\Delta t + \mathbf{v}_i \\ \mathbf{x}_{predict} &= \frac{1}{2}\mathbf{a}N^2\Delta t^2 + \mathbf{v}_iN\Delta t + \mathbf{x}_i \end{cases}$$

と計算した。

リリースされた後の物体はニュートンの第二法則に従って落下するとして、推定された手持ちデバイスの位置・速度から落下地点を計算した。落下地点を  $\mathbf{P}_{reach}$ 、標的の座標を  $\mathbf{P}_{target}$ 、許容誤差を  $\epsilon$  として、下式が満たされた場合に把持物体をリリースするようにした。

$$\|(\mathbf{P}_{target} - \mathbf{P}_{reach})\| < \epsilon$$

リリース後の把持物体には重力のみが作用するとし、空気抵抗は無視した。また、手持ちデバイスを持つ人と標的との距離は既知であるとした。

3. 検証実験

本実験では開発したシステムを用いた投擲運動の精度検証、先行研究との比較、および今後のシステム改良のための課題発見を目的とする。本実験は先行研究 [1] の実験を参考にして行った。

3.1 準備

健康男性被験者 4 名が実験に参加した。4 人とも右利きであった。

標的  $x_{target}$  は被験者の位置を原点として、標的は被験者から前方 1.5, 2.5, 3.5 m、高さ 0 m の位置にあるとした。初期姿勢は気を付けの姿勢で前方にむかって投げもらうように指示した (図 4 参照)。各標的の前後方向の許容範囲  $\epsilon$  はすべて 40 mm に設定した。左右方向の誤差に関しては本実験では考慮しないものとし、許容範囲  $\epsilon$  は 1000 mm に設定した。被験者は 3 つの標的のうちどこに把持物体が落下するかを把握していない。把持物体としては、ゴム製の球 (直径 68 mm、重さ 170 g) を用いた。

3 つの標的に対し 5 回ずつ投擲を行い、計 15 回を 1 セットとし、各被験者 2 セットの試行を行った。

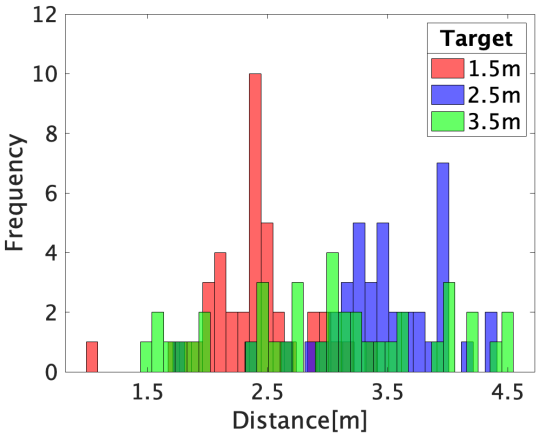


図 6: 本研究での落下地点の分布。被験者 4 人、30 球ずつ、計 120 球。

表 1: 設定した標的と落下地点の平均値・標準偏差

標的との距離	平均値 (m)	標準偏差 (m)
1.5m	2.4	0.44
2.5m	3.5	0.52
3.5m	3.0	0.87

3.2 結果

図 6 に本研究での落下地点の分布、表 1 に落下地点の平均値と標準偏差を示す。図 7 に先行研究での落下地点の分布を示す。

Kruskal-Wallis 検定を行ったところ、分布間に有意差が確認された (有意水準は 5% とした)。その後多重比較検定を行うと、3 つのうちの全ての組みで平均に有意差が確認された。

1.5 m, 2.5 m の場合、リリースタイミングが遅れて約 1m 遠くに落ちる傾向があった。

3.5 m について、軌道が山なりになり、手前に落ちる場合が多かった。こちらも同様に約 1 m 遠く飛ぶ傾向があるとする、リリースタイミングが遅れて 4.5 m に落ちるように投げることになる。これによりリリースタイミングが遅れて装置の方向が上向いてしまい、軌道が山なりになって手前に落ちてしまうと考えられる。

4. 考察

本実験で得られた課題として、モーションキャプチャを使用した先行研究と異なり、リリースタイミングが遅れ、遠くに飛ぶ傾向があることがあげられる。この原因に関して 4 つのことが考えられる。

1 つ目の原因は腕を振り始める瞬間が正しく検出できていないことがあげられる。腕を振り始める瞬間を実際よりも遅れて検出してしまうと、その分位置の更新が遅れてしまい、遠くに飛んでしまう原因になる。

2 つ目は姿勢推定の誤差により生じる重力加速度のオフ

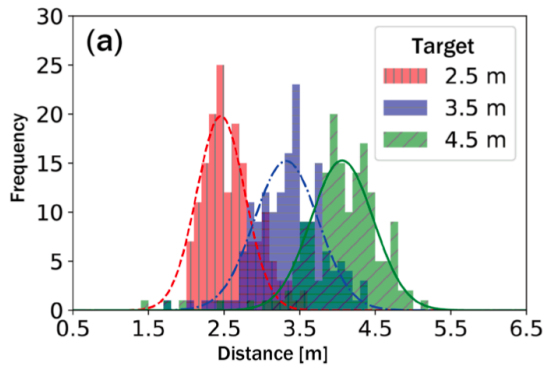


図 7: 先行研究での落下地点の分布 ([1] pp. 6 より引用). 被験者 7 人, 108 球ずつ, 計 756 球.

セット処理の問題である。本システムでは加速度センサから得られた手持ちデバイスに固定された座標系での加速度の値を、ジャイロセンサから得られた姿勢を用いてグローバル座標系へ変換している。その後グローバル座標系での  $z$  方向の加速度から重力加速度の値を引いている。しかしジャイロセンサから得られる姿勢の値の誤差が大きいと、 $x$  方向にも重力加速度の一部が残ってしまう。この  $x$  方向の余分な加速度の影響で速く落ちてしまうと考えられる。

3 つ目の原因は手持ち型デバイスの現在位置の推定を行った時点から、モータドライバに信号が送られて手持ち型デバイスの把持物体がリリースされるまでのタイムラグ中における位置・速度推定のモデルの問題である。このタイムラグの間は等加速度運動を仮定して、リリースする瞬間の位置・速度 ( $x_{predict}$ ,  $v_{predict}$ ) の推定を行っている。本研究でも先行研究と同じく、ゆっくり投げるよりも速く投げる方が速くに落ちる傾向が見られた。人が物を投げる際、腕の各関節のトルクは時事刻々と変化しており、物をリリースする直前はトルクが線形に増加している [3]。よって人間が物を投げている間の腕の運動は等加速度ではないことが予想される。このタイムラグの間は加速度が線形に増加する簡素化したモデルを想定して位置推定を行ってみると精度が改善される可能性がある。

4 つ目の原因は、グリップとリリース後の把持物体が接触し、重力以外の外力が外乱として物体に働いてしまうことである。この外力の存在は把持物体が速くに落ちてしまう原因になると考えられる。しかし先行研究でもこの外力について考慮していなかったが、速くに飛ぶという傾向は強くなかった。したがってこれは本研究の検証実験において 1m 速くにリリースされる主要な原因ではないと考えられる。

また、対応できる投げ方に関しても課題がある。本研究で開発したシステムはデバイスを鉛直下向きに持った時に位置、速度、姿勢の初期化を行っているので、投げ上げるような投擲動作になってしまう。手持ちデバイスに取り付けたボタンなどを押すことによって初期化を行うシステムを開発すれば様々な投擲動作を実現できると考えられる。また、手持ちデバイスを鉛直下向きに持った時のデバイスと

地面との距離や、自分と標的との距離を既知としている点がある。これに対しては手持ちデバイスに距離センサを取り付け、これらの距離を計測する方法が考えられる。

さらに今後の更なる開発としては、システムのポータブル化があげられる。デバイスにバッテリー、マイクロコントローラ、モータドライバを搭載してポータブル化することで、手間が減少して様々な場所で気軽に使用することが可能になる。また標的との距離のトラッキングや人間の移動速度を考慮することで、歩いたり走りながらシステムを使用することが可能になると期待される。

本システムの超人スポーツへ応用として、ドッジボールのように相手にボールを当てるようなゲームが考えられる。これを実現させるためには先に述べたようなポータブル化や、移動しながら投擲できるような開発が求められる。

また、特に身体感覚の拡張についてはまず精度の向上が必要である。しかし精度は良すぎると自分が動作したという感覚が弱くなる場合がある。自分が投げたという感覚を出すためには標的に当たるように設計するだけでなく、投げる強さを計測して落下地点が不自然にならないようにすることが必要になる可能性がある。

## 5. おわりに

本研究では投擲運動を支援する人間機械協調動作システムにおいて、設置の手間・場所の制約の問題に対応するために、手持ちデバイスに搭載した IMU センサのみによる位置推定手法を提案した。投擲運動の精度検証の実験の結果、落下地点の分布が目標とする飛距離ごとに異なることが確認された。今後の課題として速くに落ちる傾向の改善があげられる。さらに今後の更なる開発としてシステムのポータブル化が挙げられる。これにより、様々な場所で気軽に使用できるようになったり、デバイスを持って移動しながら使用することが可能になる。

謝辞 本研究は JST ERATO JPMJER1701 の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Azumi Maekawa, Seito Matsubara, Sohei Wakisaka, Daisuke Uriu, Atsushi Hiyama, Masahiko Inami "Dynamic Motor Skill Synthesis with Human-Machine Mutual Actuation" ACM ISBN 978-1-4503-6708-0/20/04
- [2] Sebastian Madgwick. 2010. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. Report x-io and University of Bristol (UK) 25 (2010), 113–118.
- [3] Masaya Hirashima, Kazutoshi Kudo, and Tatsuki Ohtsuki "Utilization and Compensation Interaction Torques During Ball-Throwing Movements" J Neurophysiol 89:1784-1796, 2003