

## 投球速度の変化に応じた関節間の協調関係

木村新<sup>1</sup>、吉岡伸輔<sup>2</sup>、大村玲音<sup>2</sup>、深代千之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国立スポーツ科学センター、<sup>2</sup>東京大学大学院総合文化研究科、<sup>3</sup>日本女子体育大学

### 1. はじめに

野球の投球動作では、一定の速度でボールを投げ続けることは少なく様々な速度でボールを投げており、どのような速度条件下であっても目的とする場所へ正確にボールを投げることが要求される。その際、投球に関与する関節の動作の変動を減らすことができれば、ボール到達位置の安定性は向上すると考えられる。しかしながら、熟練者であったとしても個々の関節の動作には変動が生じている (Fleisig et al., 2009)。このような状況において、熟練者はどのようにしてボール到達位置を安定させているのか。この問題を解決するための糸口となるのが、「関節間の協調」である。つまり、熟練者ではボール到達位置を一定にするような関係性を維持しながら関節の動作同士が協調している。これにより、個々の関節の動作にはばらつきが生じていながらも、ボール到達位置は安定している。

この関節間の協調は、例えば肩関節と肘関節の屈曲伸張角度にしか運動の自由度がない水平面上でのリーチング動作の場合、つまり運動の自由度が2つの場合は容易に捉えることができる。しかしながら、運動の自由度が3つ以上の場合、関節間の協調を捉えることは運動の自由度が2つの時と比べて困難となる。そのため、これまでの研究では関節間に協調が存在するか否かを示してきた。Müller & Stemad (2003) は、運動の自由度が3つであるリーチング動作を対象とし、実測における手部の最終到達位置のばらつきと、全ての関節の動作を独立にした場合における手部の最終到達位置のばらつきを比較した。その結果、実測における手部の最終到達位置のばらつきと比べて、全ての関節の動作を独立にした際のばらつきの方が大きかったことから、関節間で手部速度の最終到達位置のばらつきを抑えるような協調が存在していたと結論づけている。

以上のような背景を踏まえ、本研究では投球動作を対象に多自由度な運動における関節間の協調を特定するための方法を考案する。そして、提案した手法を用いることで異なる投球速度における関節間の協調を検討する。投球動作において目標とする場所へ正確に投げるためには、ボールリリース時における手部速度を精緻に調節する必要がある (Hore et al., 1996)。そのため、ボールリリース時の手部速度を調節するために各関節の動作同士がどのように協調しているのかを調べることにした。

### 2. 研究方法

#### 2.1. 被験者

本研究では、野球経験のある右投げの健常成人男性14名(身長:  $1.71 \pm 0.04$  m、体重:  $69.2 \pm 7.8$  kg、年齢:  $22.4 \pm 2.8$  歳、競技歴:  $11.4 \pm 3.1$  年)を被験者とした。被験者には実験に際して、事前に実験内容の説明を口頭および書面にて行い、参加の同意を得た。なお、本節の研究は東京大学大学院総合文化研究科ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会により実験手順の承認を得て行った。

#### 2.2. 実験試技

実験試技は、各条件 (Slow 条件、Medium 条件、Fast 条件) における座位での投球とした。被験者が座る位置からの (高さ: 0.5 m、幅: 0.5 m) までの距離は 4 m とし、被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後に、試技を行わせた。試技の際には、被験者の解剖学的特徴点とボールに反射マーカを貼付し、被験者には体幹部を動かさずに投球するよう教示を与えた。的に当たった試技を成功試技とし、成功試技が 20 試技取得できるまで行わせた。疲労による影響を除くために、各試技間で十分な休憩 (60 秒) を与えた。

### 2.3. データ収集・分析

身体動作のデータ収集には赤外線カメラ 18 台を含む光学式三次元動作分析装置 (Motion Analysis Corporation, USA) を使用した (図 1)。投球方向を Y 軸の正方向、鉛直上向きを Z 軸の正方向、Y 軸と Z 軸の外積によって得られる軸を X 軸の正の方向とする右手系の直行座標系を、実験室内における絶対座標系として定義した。図 2 は、分析基準点として被験者に貼付した反射マーカを位置を示したものであり、マーカの 3 次元位置座標データをサンプリング周波数 200 Hz で収集した。

反射マーカの 3 次元位置座標データは、残差分析により遮断周波数を各分析点それぞれについて決定し (Winter, 2009)、4 次の位相ずれのない Butterworth low-pass digital filter により平滑化を行った。実際に用いた遮断周波数は、6 Hz から 18 Hz の間であった。

本研究では、人体を 4 つの剛体 (上腕、上腕、前腕、手部) が 3 つの関節 (肩関節、肘関節、手関節) により連結された剛体リンクモデルとしてモデル化した。手関節、肘関節は関節の内外に貼付した 2 個のマーカの中心をそれぞれの関節中心とした。肩関節中心は、上腕骨小結節と肩峰角の中心として推定した。身体各セグメントの慣性係数や移動座標系は先行研究の定義にならぬ定義し (Dumas et al., 2007a, 2007b, 2015)、各セグメントに設定した移動座標系から各関節の角度と角速度を算出した。

ボールリリース時の手部速度 ( $v_{hj}$ ) は、ボールリリース時の関節角度 ( $\theta$ ) と関節角速度 ( $\omega$ ) を変数とする関数として表すことができる。

$$v_{hj} = f(\theta_j, \omega_j) \quad (i = 1-7, j = 1-7) \quad (1)$$

関節の自由度は肩関節が 3 (屈曲/伸展、内転/外転、内旋/外旋)、肘関節が 2 (屈曲/伸展、回内/回外)、手関節が 2 (掌屈/背屈、橈屈/尺屈) とした。そして上式を用いて、20 試行分の全ての変数を試行間でランダムにシャッフルし、新しい変数間の組み合わせを作成した。その組み合わせを用いて 20 通りの手部速度を算出したのち、標準偏差を算出した。その後、結果の偶然的な偏りを無くすために、新しい変数の組み合わせを作成し手部速度の標準偏差を算出する手順を 1000 回繰り返すことにより平均することで、全ての変数を試行間でランダムにシャッフルにした場合における手部速度の標準偏差を求めた。最後に、この標準偏差を実測における手部速度の標準偏差で除することにより相対比を算出し、これを関節間の協調度合いとした。実測での手部速度の標準偏差に比べ全ての変数をランダムにシャッフルにした際の標準偏差の方が大きかった場合、つまりこの相対比が 1 を超えた場合は、手部速度のばらつきを抑えるような関節間の協調が存在していたことを意味する (Kudo et al., 2000; Müller & Sternad, 2003; Verrel et al., 2010; Verrel, Lövdén, et al., 2012; Verrel, Pradon, et al., 2012)。

どの関節間が協調しているのかを検討するために、全ての変数ではなく 1 つの変数のみを試行間でラン

ダムにシャッフルすることで、新しい変数間の組み合わせを作成した。その組み合わせを用いて 20 通りの手部速度を算出したのち、標準偏差を算出する手順を 1000 回繰り返した。そして、これらの標準偏差を平均することで、1 つの変数のみシャッフルした場合における手部速度の標準偏差を求めた。最後に、この手部速度の標準偏差を実測での手部速度の標準偏差で除することで相対値を算出し、これを各関節の動作の協調度合いとした。

各関節の動作のばらつきが手部速度に与える影響 ( $E_\theta, E_\omega$ ) を、以下の式から算出した。

$$E_i = \frac{\partial v_{ha}}{\partial \theta_i} \cdot \sigma \theta_i \quad (i=1-7) \quad (2)$$

$$E_j = \frac{\partial v_{ha}}{\partial \omega_j} \cdot \sigma \omega_j \quad (j=1-7) \quad (3)$$

$\frac{\partial v_{ha}}{\partial \theta_i}$  と  $\frac{\partial v_{ha}}{\partial \omega_j}$  は、それぞれ手部速度を角度と角速度で微分した際の偏微分係数を示しており、 $\sigma \theta_i$  と  $\sigma \omega_j$  はそれぞれ角度と角速度の標準偏差を示している。ここでは、具体例として肩関節の水平屈曲伸展軸まわりの角度 ( $\theta_1$ ) のばらつきが手部速度に与える影響について説明する。 $\frac{\partial v_{ha}}{\partial \theta_1}$  は  $v_{ha}$  を  $\theta_1$  の関数として表した際の、ボールリリース時における接線の傾きを示していることになる。この傾きと  $\theta_1$  の標準偏差の積を取ること、 $\theta_1$  が 1 標準偏差増大した際の手部速度への影響を算出することができる。

#### 2.4. 統計解析

各速度条件における関節間の協調度合いが 1 より高いかどうかを判断するために、1 標本の t 検定を行った。すべての比較の有意水準は、 $p < 0.05$  とし、多重比較にはボンフェローニ補正を行った。統計解析には R (version 3.3.1 for Windows) を用いた。

### 3. 結果

図 3 は、各速度条件における関節間の協調度合いを示したものである。Slow 条件における関節間の協調度合いは  $1.68 \pm 0.37$ 、Medium 条件では  $1.72 \pm 0.41$ 、Fast 条件では  $1.68 \pm 0.33$  であった。

図 4 は、各速度条件における各関節の動作の協調度合いを示したものである。Fast 条件では、肩関節の内旋軸まわりの角度 ( $\theta_3$ ) の相対比が、全ての被験者において 1 を超えていた ( $\theta_3$  の相対比の平均値:  $1.49 \pm 0.48$ )。また、この相対比は速度が遅くなるにつれ低下していった (Fast 条件:  $1.49 \pm 0.48$ 、Medium 条件:  $1.22 \pm 0.23$ 、Slow 条件:  $1.15 \pm 0.27$ )。Medium 条件では、肩関節の水平屈曲伸展軸まわりの角速度 ( $\omega_1$ ) の相対比が、全ての被験者において 1 を超えていた ( $\omega_1$  の相対比の平均値:  $1.36 \pm 0.19$ )。一方、Slow 条件では、全ての被験者において相対比が 1 を超える関節の動作は存在しなかった。

図 5 は、各速度条件における各関節の動作のばらつきが手部速度に与える影響を示したものである。肩関節の内旋角度のばらつきが手部速度に与える影響の絶対値は、速度が低下するにつれて低下していった (Fast 条件:  $-0.71 \pm 0.22$  m/s、Medium 条件:  $-0.42 \pm 0.11$  m/s、Slow 条件:  $-0.24 \pm 0.09$  m/s)。肩関節の水平屈曲角速度のばらつきが手部速度に与える影響の絶対値は、Fast 条件と Medium 条件では大きく変わらず、Slow

条件で低下した (Fast 条件:  $0.15 \pm 0.07$  m/s、Medium 条件:  $0.24 \pm 0.09$  m/s、Slow 条件:  $0.24 \pm 0.08$  m/s)。

#### 4. 考察

本研究では、異なる投球速度における関節間の協調を検討した。その結果、Fast 条件では肩関節の内外旋軸まわりの角度と他の動作が、Medium 条件では肩関節の水平屈曲伸展軸まわりの角速度と他の動作が協調していた。一方で、Slow 条件ではどの関節の動作を独立にしたとしても、全ての被験者において相対比が1を超える関節の動作は存在しなかった。これらの結果は、投球速度に応じて手部速度のばらつきを抑える関節間の協調は異なることを示している。

各速度条件において関節間で協調が存在するか否かを検討したところ、全ての速度条件において関節間で手部速度のばらつきを抑える関節間の協調が存在した (図3)。しかしながら、手部速度のばらつきを抑える関節間の協調が存在していたとしても、個々の関節間の共変動が全て手部速度のばらつきを抑えることに対して作用に働いているとは限らない。そのため、関節間の協調関係が全ての速度条件で存在していたとしても、手部速度のばらつきを抑える作用をもつ個々の関節間の共変動が全ての速度条件で同一とは限らない。この点を調べるために、各速度条件における各関節の動作との協調度合いを算出した。

Fast 条件では、肩関節の内外旋軸まわりの角度が全ての被験者で相対比が1を超えていた (図4)。このことから、Fast 条件では肩関節の内外旋軸まわりの角度と他の動作との共変動が手部速度のばらつきを抑える上で協調していると考えられる。また Medium 条件では、肩関節の水平屈曲伸展軸まわりの角速度が全ての被験者で相対比が1を超えていた (図4)。このことから、Medium 条件では肩関節の水平屈曲伸展軸まわりの角速度と他の動作との共変動が手部速度のばらつきを抑える上で協調していると考えられる。一方で、Slow 条件では全ての被験者において相対比が1を超える関節の動作は存在しなかった (図4)。以上のことから、手部速度のばらつきを抑える作用をもつ個々の関節間の共変動は、速度条件に応じて異なると考えられる。

各関節の動作の協調度合いが速度条件に応じて異なる理由を説明するために、各関節の動作のばらつきが手部速度に与える影響を算出した。その結果、Fast 条件において肩関節の内旋角度のばらつきが手部速度に与える影響は、他の関節の動作に比べて大きかった (図5)。加えて、投球速度が低下するにつれて、肩関節の内旋角度のばらつきが手部速度に与える影響の絶対値も低下していた (図5)。したがって、Fast 条件においては肩関節の内外旋軸まわりの角度が他の動作と協調する必要があるのに対して、Medium 条件や Slow 条件では肩関節の内外旋軸まわりの角度が独立にふるまったとしても、手部速度のばらつきに与える影響は少なかったと考えられる。

各関節の動作のばらつきが手部速度に与える影響を検討することで、関節間の協調が存在する理由についておおそ説明することはできるものの、中にはこれだけでは説明がつかないものもある。Fast 条件では、肩関節の水平屈曲伸展軸まわりの角速度が全ての被験者で1を超えていなかったのに対して、Medium 条件では全ての被験者1を超えていた (図4)。一方で、水平屈曲角速度のばらつきが手部速度に与える影響の絶対値は、Fast 条件と Medium 条件ではほとんど変わらなかった (図5)。この結果は、いかんにして説明されるだろうか。1つは、実測での Medium 条件における水平屈曲伸展軸まわりの角速度の独立性が低かったことが考えられる。つまり、肩関節の水平屈曲伸展軸まわりの角速度は他の動作との共変動が多く存在していたため、肩関節の水平屈曲角速度のばらつきが手部速度に与える影響は小さかったものの、肩関節の水平屈曲伸展軸まわりの角速度が独立にふるまうと手部速度のばらつきが増大すると考えられる。

これまでに用いられてきた方法 (Kudo et al., 2000; Müller & Sternad, 2003; Verrel et al., 2010; Verrel, Lövdén, et al., 2012; Verrel, Pradon, et al., 2012) を適用することにより、各速度条件において関節間で協調関係が存在するか否かは示すことができる。しかしながら、この方法では各速度条件でどの関節間が協調しているのかを示すことはできない。そこで、本研究ではこの問題を解決するための方法を考案した。その結果、速度変化に応じて関節間の協調が異なることが示された。このことから、本研究によりこれまで示されなかった速度変化に応じた関節間の協調が検討可能になったと言える。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人ミズノスポーツ振興財団に厚く御礼を申し上げます。

## 参考文献

- Dumas, R., Chèze, L., & Verriest, J. P. (2007a). Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters. *Journal of Biomechanics*, 40(3), 543–553.
- Dumas, R., Chèze, L., & Verriest, J. P. (2007b). Corrigendum to “Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters” [*J. Biomech.* 40 (2007) 543–553]. *40(7)*, 1651–1652.
- Dumas, R., Robert, T., Chèze, L., & Verriest, J. P. (2015). Thorax and abdomen body segment inertial parameters adjusted from McConville et al. and Young et al. *International Biomechanics*, 2(1), 113–118.
- Fleisig, G., Chu, Y., Weber, A., & Andrews, J. (2009). Variability in baseball pitching biomechanics among various levels of competition. *Sports Biomechanics*, 8(1), 10–21.
- Hore, J., Watts, S., & Tweed, D. (1996). Errors in the control of joint rotations associated with inaccuracies in overarm throws. *Journal of Neurophysiology*, 75(3), 1013–1025.
- Kudo, K., Tsutsui, S., Ishikura, T., Ito, T., & Yamamoto, Y. (2000). Compensatory coordination of release parameters in a throwing task. *Journal of Motor Behavior*, 32(4), 337–345.
- Müller, H., & Sternad, D. (2003). A randomization method for the calculation of covariation in multiple nonlinear relations: Illustrated with the example of goal-directed movements. *Biological Cybernetics*, 89(1), 22–33.
- Verrel, J., Lövdén, M., & Lindenberger, U. (2010). Motor-equivalent covariation stabilizes step parameters and center of mass position during treadmill walking. *Experimental Brain Research*, 207(1–2), 13–26.
- Verrel, J., Lövdén, M., & Lindenberger, U. (2012). Older Adults Show Preserved Equilibrium but Impaired Step Length Control in Motor-Equivalent Stabilization of Gait. *PLoS ONE*, 7(12).
- Verrel, J., Pradon, D., & Vuillerme, N. (2012). Persistence of Motor-Equivalent Postural Fluctuations during Bipedal Quiet Standing. *PLoS ONE*, 7(10), 1–8.
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley & Sons.

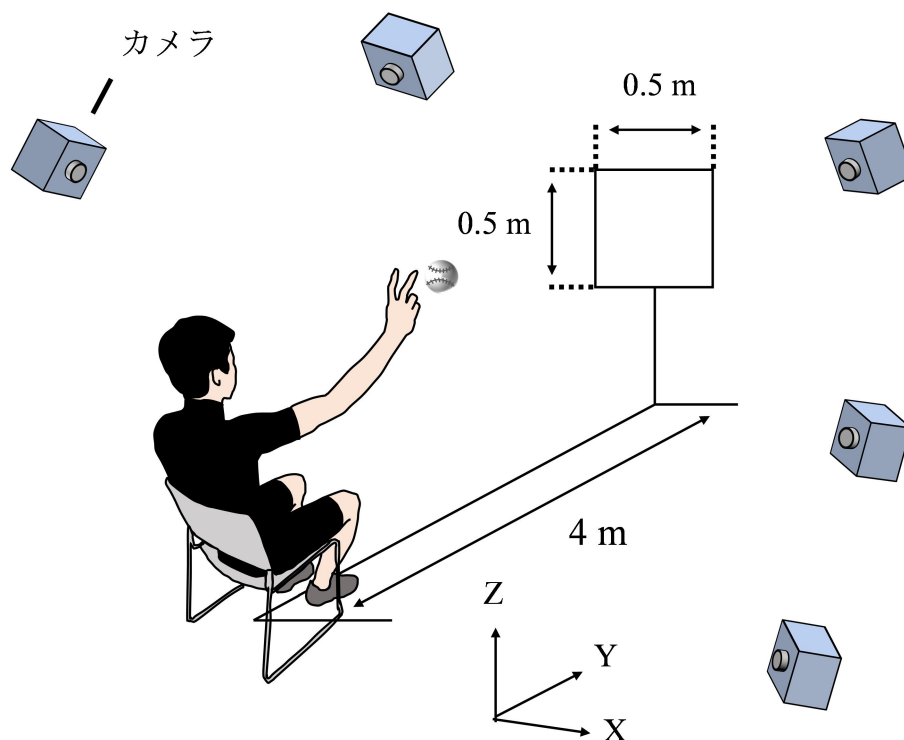


図1 実験環境図

実験試技は、座位にて体幹部を固定した状態での4m前方の的(高さ: 0.5 m、幅: 0.5 m)への投球とした。被験者の解剖学的特徴点とボールに反射マーカを貼付し、赤外線カメラ18台を含む光学式三次元動作分析装置(Motion Analysis Corporation, USA)にて反射マーカ位置座標を取得した。実験室内における絶対座標系は、投球方向をY軸の正方向、鉛直上向きをZ軸の正方向、Y軸とZ軸の外積によって得られる軸をX軸の正方向とする右手系の直行座標系とした。

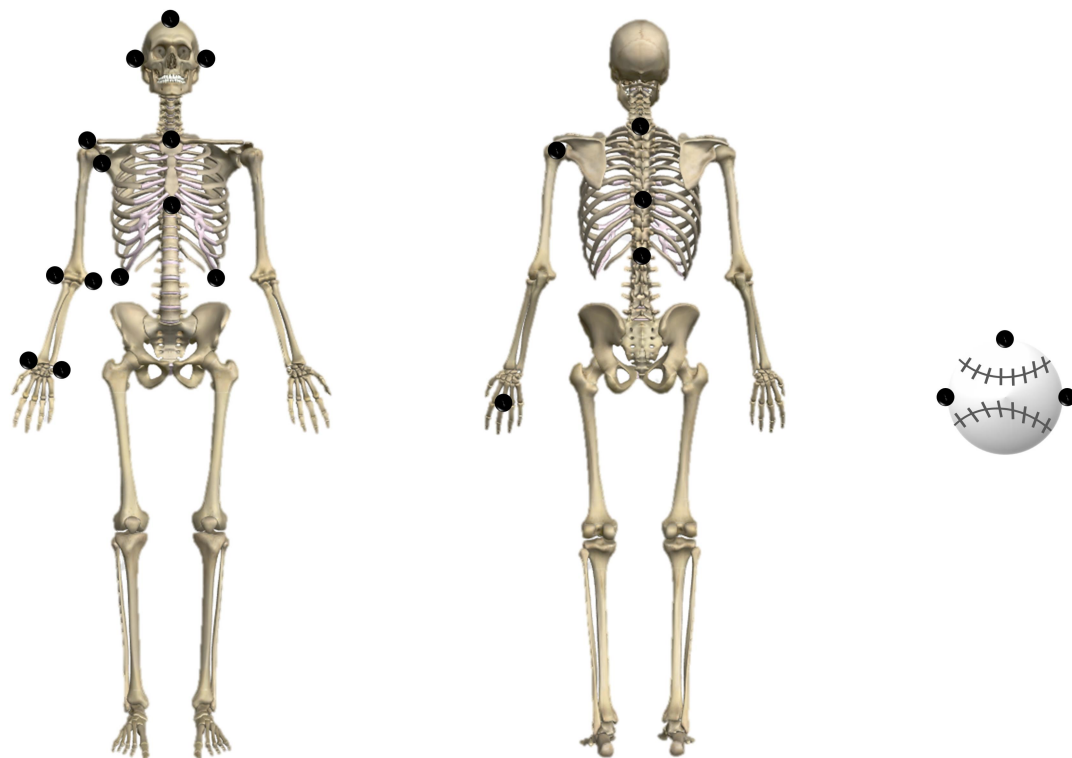


図2 反射マーカの貼付位置

身体には、右の第3中手骨、尺骨茎状突起、橈骨茎状突起、上腕骨内側上顆、上腕骨外側上顆、上腕骨小結節、肩峰、肩峰角、左右の耳珠、肋骨下端、頭頂、胸骨上縁、第7頸椎、剣状突起、第8胸椎、第12胸椎に反射マーカを貼付した。ボールには、左右と頂点に反射マーカを貼付した。

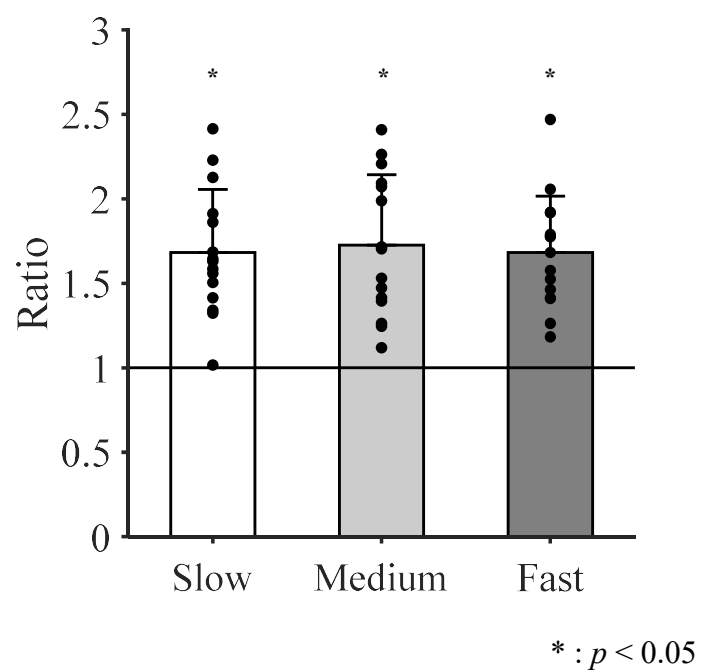


図3 各速度条件における関節間の協調度合い

アスタリスク (\*) は、1標本のt検定を行った結果、統計的に有意 ( $p < 0.05$ ) であったことを示している。

黒丸は各被験者の値を示している。



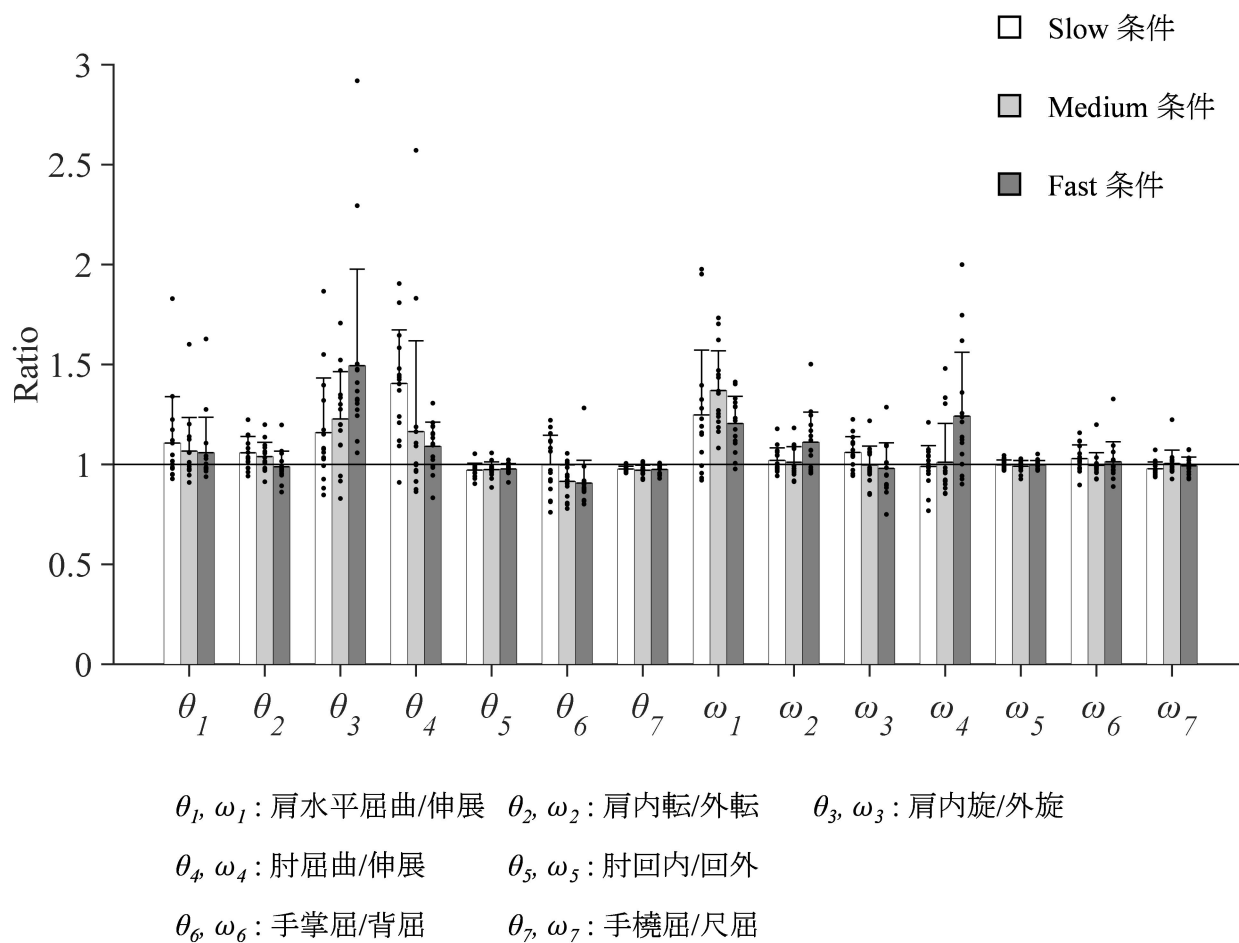
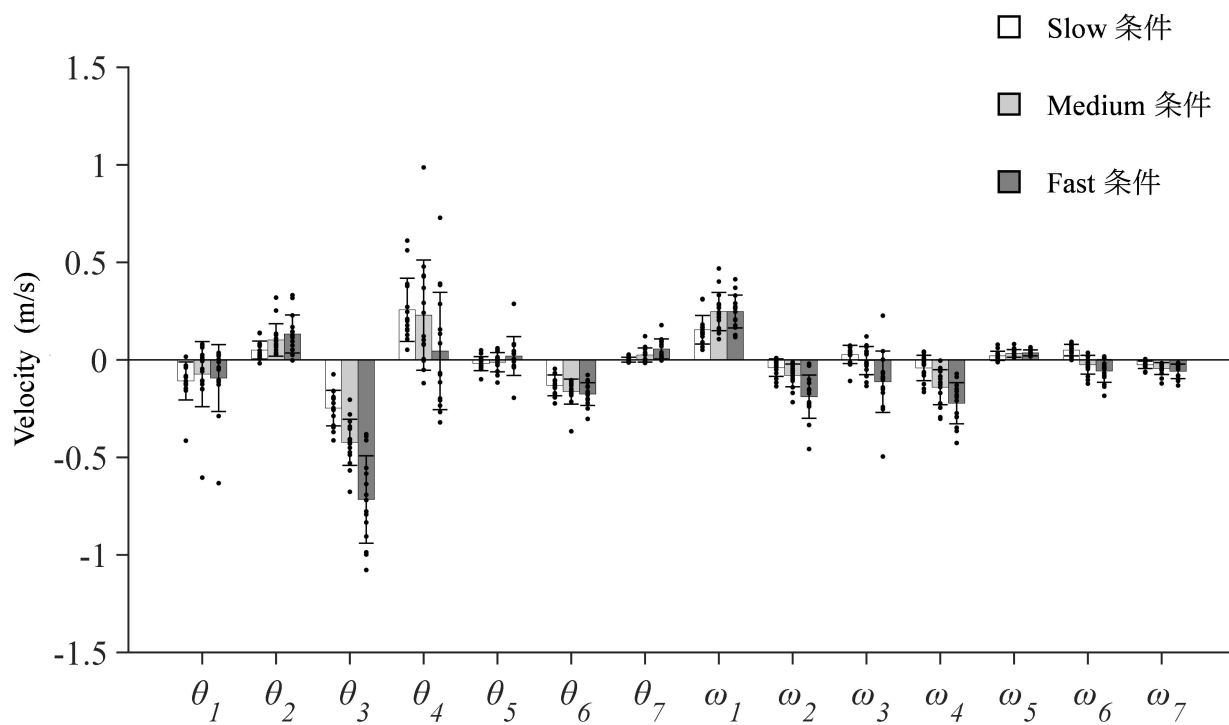


図4 各速度条件における各関節の動作との協調度合い

相対比が1を超えた場合は、実測での手部速度の標準偏差と比べて各関節の動作を独立にふるまわせた場合の標準偏差の方が大きいことを示している。黒丸は各被験者の値を示している。



$\theta_1, \omega_1$ : 肩水平屈曲/伸展     $\theta_2, \omega_2$ : 肩内転/外転     $\theta_3, \omega_3$ : 肩内旋/外旋  
 $\theta_4, \omega_4$ : 肘屈曲/伸展         $\theta_5, \omega_5$ : 肘回内/回外  
 $\theta_6, \omega_6$ : 手掌屈/背屈         $\theta_7, \omega_7$ : 手橈屈/尺屈

図5 各関節の動作のばらつきが手部速度に与える影響

各関節の動作を凡例として示されている方向へ1標準偏差だけ増大させた際の、手部速度への影響を示している。黒丸は、各被験者の値を示している。