

[研究助成 (A)]

技能継承システム開発に向けた関節間の協調関係に関わる 技能の形式化

Identifying joint coordination related to skill for the development of skill transfer systems

2201007



研究代表者

国立スポーツ科学センター

研究員

木 村

新

[研究の目的]

スポーツの場面では、目的とする動作や狙った標的に対し極力誤差が出ないようにパフォーマンスの精度を高めることは重要である。そして多くの場合、その精度は競技成績に直結する。しかしながら、実際のパフォーマンスは常にばらつきを含み、決して一定になることはない。なぜなら、我々の身体は知覚情報の処理から運動の出力に至るまでのあらゆる階層において、神経系が伝達する電気的な信号によるノイズの影響を受けるため、意図に反した動作のばらつきが生じてしまうからである (Harris, & Wolpert, 1998)。このような状況下で、パフォーマンスの精度を高めるにはどうすればよいのかという疑問は、これまで多くの研究者の関心を集めてきた。

この問題を解決するための糸口となるのが「協調」である。つまり、ある関節の動作にずれが生じた際に他の関節の動作でそのずれを補うことにより、言い変えると関節同士が協調することによりパフォーマンスのばらつきが抑えられている。

関節間の協調関係に着目した研究は、これまでも行われてきた (Müller & Sternad, 2003; Scholz & Schöner, 1999)。これらの研究では、運動に関与する全ての関節の動作を一体として考え、関節間に協調関係が存在するか否かを検討していた。これに対し本研究では、個々の関

節運動に焦点を当てながら協調関係を検討する。なぜなら、運動に関与する全ての関節の動作を一体として考えた場合、どの関節の動作がパフォーマンスのばらつきを抑える上で重要なかを理解することが困難になるからである。

本研究では、投球動作を対象に各関節の動作の協調関係を検討するための方法論を構築し、実験的検証を行うことを目的とした。投球動作では、ボール到達位置のばらつきを抑えることが要求される。そのためには、ボールリリース時の手部速度のばらつきを抑えることが合理的であるとされている (Hore et al., 1996)。そこで、本研究ではどの関節の動作同士がボールリリース時の手部速度のばらつき、とりわけ上下方向の手部速度のばらつきを抑える上で協調しているのかを検討した。

[研究の内容、成果]

実験方法

被験者は、右投げの野球経験者 14 名とした (年齢: 22.4 ± 2.8 歳, 身長: 1.71 ± 0.04 m, 体重: 69.2 ± 7.8 kg, 競技歴: 11.4 ± 3.1 年)。実験課題は、座位にて 4 m 前方の的 (高さ: 0.5 m, 幅: 0.5 m) を狙った全力での投球とした (図 1)。実験課題を練習した後、参加者はボールが的に 20 回当たるまで試技を続けた。その際、被験者の解剖学的特徴点とボールに反射マーカーを貼り付け、3 次元動作解析装置を用

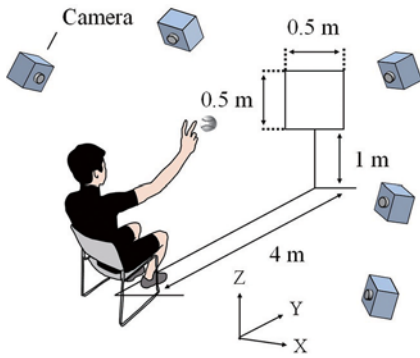


図1 実験環境図

いて反射マーカの位置座標データを取得した。

データ解析

3次元動作解析装置により得られた座標値を用いて、投球腕の関節角度と関節角速度（肩関節・肘関節・手関節）を算出した。ボールリリースは、ボール上のマーカと手部のマーカとの距離が2 cm以上離れた瞬間と定義した（Kimura, Yoshioka, & Fukashiro, 2020; Kimura, Yoshioka, Omura, et al., 2020）。

ボールリリース時の手先速度（ $\mathbf{v}_{ha}$ ）は、関節角度（ θ ）と関節角速度（ ω ）の関数として表すことができる。

$$\mathbf{v}_{ha} = f(\theta, \omega) \quad (1)$$

本研究では、投球腕が7つの自由度を持つものとした（肩関節水平屈曲/伸展，肩関節内転/外転，肩関節内旋/外旋，肘関節屈曲/伸展，肘関節回内/回外，手関節掌屈/背屈，手関節橈屈/尺屈）。例えば，実測で得られた1試行目の垂直手速（ $\mathbf{v}_{ha_1}$ ）は，1試行目の各関節角度と関節角速度を式（1）に代入することにより算出することができる。

そして，実測におけるボールリリース時の手部速度の標準偏差（ σv_{ha_actu} ）は，以下の式により求めることができる。

$$\sigma v_{ha_actu} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (v_{ha_k} - \overline{v_{ha}})^2} \quad (n=20) \quad (2)$$

$\mathbf{v}_{ha_k}$ と $\overline{v_{ha}}$ はそれぞれ，k回目の試行の手部速度と20回の試行における手部速度の平均値を示す。

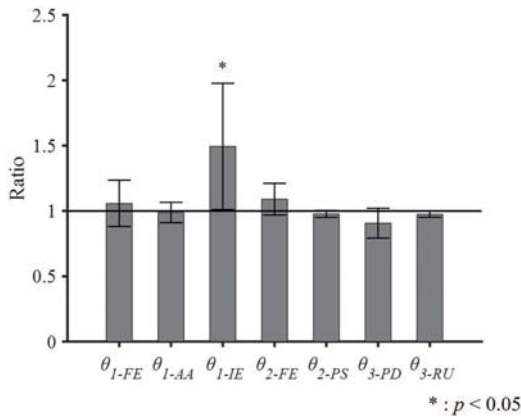
ある1つの変数（関節角度もしくは関節角速度）を試行間でランダムにシャッフルすることで，その変数と他の変数との間に相関がないデータセットを作成した。このデータセットを式（1）に代入し，新たに20個の手部速度とその標準偏差を算出した。データセットを作成し，手部速度の標準偏差を算出する手順を仮に1回しか行わなかった場合，標準偏差が偏りを持った値となる可能性がある。そのため，信頼性の高い標準偏差を得るためにこの手順を1000回繰り返し，標準偏差の平均値を算出した（ $\overline{\sigma v_{ha_shuf}}$ ）。最後に，シャッフルしたデータにおける手部速度の標準偏差（ $\overline{\sigma v_{ha_shuf}}$ ）を，実測の手部速度の標準偏差（ σv_{ha_actu} ）で除することで，協調性指数を算出した。そして，この協調性指数を全ての関節角度と関節角速度について算出した。

協調指数が1より大きい場合，すなわち， $\overline{\sigma v_{ha_shuf}}$ が σv_{ha_actu} より大きい場合は，ある変数と他の変数との相関を排除すると，手部速度のばらつきが増加したことを意味している。つまり，ある変数と他の変数との相関は手部速度のばらつきを抑える上で協調していることを意味している。

解析結果

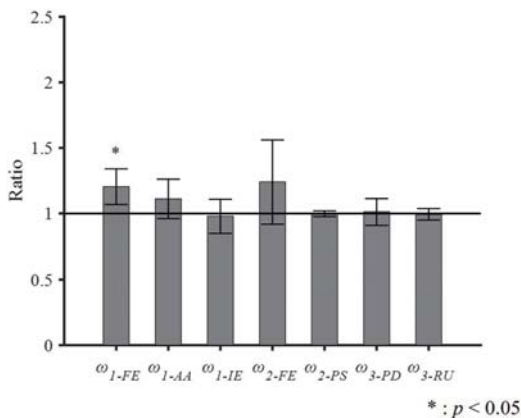
肩関節の内旋/外旋角度（ θ_{1-IE} ）と肩関節の水平屈曲/伸展角速度（ ω_{1-FE} ）の協調性指数は1より有意に高い値を示した（図2，図3）。 θ_{1-IE} と ω_{1-FE} の協調性指数は，それぞれ 1.32 ± 0.48 と 1.28 ± 0.13 であった。このことは，肩関節の内旋/外旋角度と他の関節の動作および水平屈曲/伸展角速度と他の関節の動作が上下方向の手部速度のばらつきを抑える上で協調していたことを示している。一方で，例えば，手関節の橈屈/尺屈角度（ θ_{3-RU} ）や肘関節の回内/回外角速度（ ω_{2-PS} ）の協調性指数は1に近い値で

あった (図 2, 図 3)。 θ_{3-RU} と ω_{2-PS} の協調性指数はそれぞれ 0.98 ± 0.02 and 0.99 ± 0.02 であった。このことは、手関節の橈屈/尺屈角度と他の関節の動作および肘関節の回内/回外角速度と他の関節の動作が、相対的には協調していなかったことを示している。



θ_{1-FE} は肩関節の水平屈曲/伸展軸まわりの角度, θ_{1-AA} は肩関節の内転/外転軸まわりの角度, θ_{1-IE} は肩関節の内旋/外旋軸まわりの角度, θ_{2-FE} は肘関節の屈曲/伸展軸まわりの角度, θ_{2-PS} は肘関節の回内/回外軸まわりの角度, θ_{3-PD} は手関節の掌屈/背屈軸まわりの角度, θ_{3-RU} は手関節の橈屈/尺屈軸まわりの角度をそれぞれ示している。

図2 各関節角度の協調性指標



ω_{1-FE} は肩関節の水平屈曲/伸展軸まわりの角速度, ω_{1-AA} は肩関節の内転/外転軸まわりの角速度, ω_{1-IE} は肩関節の内旋/外旋軸まわりの角速度, ω_{2-FE} は肘関節の屈曲/伸展軸まわりの角速度, ω_{2-PS} は肘関節の回内/回外軸まわりの角速度, ω_{3-PD} は手関節の掌屈/背屈軸まわりの角速度, ω_{3-RU} は手関節の橈屈/尺屈軸まわりの角速度をそれぞれ示している。

図3 各関節角速度の協調性指標

従来、関節の動作のばらつきは神経系が伝達する電気的な信号によるノイズのみに由来するものと見なされていた。故に、パフォーマンスの精度を高めるには動作のばらつきを抑える必要があると考えられていた。しかしながら、今

日において、関節の動作のばらつきはノイズのみに由来するものではなく、関節の動作同士の協調的な共変動に由来する成分も含まれているという見方が主流となっている。故に、個々の関節の動作がばらついていたとしても、関節の動作同士が協調していればパフォーマンスの精度を高めることができる。この関節間の協調は、自由度が小さい運動課題の場合、容易に検討することができる。例えば、肩関節と肘関節の屈曲/伸展のみを用いたリーチング動作では、手部の終点位置を一定に保つ肩関節と肘関節の角度の協調関係を容易に検討することが可能である。一方、自由度が大きい運動課題において、関節間の協調を検討することは容易ではない。そのため、自由度が大きい運動課題においては、関節間で協調が存在するか否かに関する知見にとどまっていた。本研究は、このような限られた知見を前進させ、自由度が大きい運動課題においてどの関節の動作同士が協調しているのかを明らかにした。

これまでの研究には、相関係数を用いて協調関係を明らかにしようとしたものもある (McDonald et al., 1989; Van der Meulen et al., 1990; Vereijken et al., 1992)。相関分析は、2つの変数間の関係の強さを評価することができる。しかし、相関分析だけではその関係が運動課題の達成に有益であるかどうかを示すには不十分である (Kudo et al., 2000)。協調性を示すためには、変数間の関係を示すだけでなく、その関係が運動課題の達成に有益であることを示す必要がある (Kimura et al., 2021)。相関分析と同様に、主成分分析も変数間の関係を分析することができるものの、その関係が運動課題の達成に有益であるかどうかはわからない。本研究で用いた手法は、こうした問題に対処するものであると言える。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、上下方向のボール到達位置のば

らつき抑える関節間の協調関係を検討した。しかしながら、投球動作では、ボール到達位置のばらつきは上下方向だけでなく、左右方向も小さくする必要がある。このように満たさなければならない機能要件が複数ある場合、ある機能要件を満たすのに有益な関節運動の関係が、別の機能要件を満たすのに無関係な場合がある。具体的には、 θ_{1-IE} と他の関節運動の関係、または ω_{1-FE} と他の関節運動の関係は、上下方向の手部速度のばらつきを抑える上では協調するが、左右方向の手部速度のばらつきを抑える上では協調していない可能性もある。今後は、複数の機能要件下における関節間の協調を検討してい

く必要がある。

[成果の発表, 論文等]

- ・ Kimura, A., Omura, L., Yoshioka, S., & Fukashiro, S. (2021). Identifying coordination between joint movements during a throwing task with multiple degrees of freedom. *Human Movement Science*, 77, 102799.
- ・ Kimura, A., Yokozawa, T., & Ozaki, H. (2021). Clarifying the Biomechanical Concept of Coordination Through Comparison with Coordination in Motor Control. *Frontiers in Sports and Active Living*, 290.