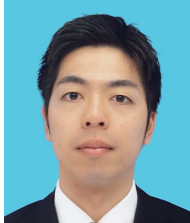


[研究助成 (C)]

運動技能獲得支援に向けた共収縮の機能の解明 —高速性と正確性のトレードオフへの挑戦—

2237005



研究代表者
(助成金受領者)

共同研究者

東京大学
大学院新領域創成科学研究科

東京大学

東京大学

法政大学

鹿屋体育大学

産業技術総合研究所

東京大学

産業技術総合研究所

博士後期課程

助教

特任研究員

専任講師

特任助教

研究チーム長

准教授

主任研究員

須 藤 佑 介

飯 野 要 一

川 本 裕 大

木 村 新

鈴 木 智 晴

村 井 昭 彦

吉 岡 伸 輔

鷲 野 壮 平

[研究の目的]

近年の我が国の少子化の進行を鑑みるに、熟練技能者の持つワザの伝承が途絶え、完全に失われてしまう恐れが高まっている。そのため、技能習得を支援するシステムの開発が求められているが、それには熟練技能者のもつ巧みな技能がいかなる身体運動の制御メカニズムで実現されているかを明らかにすることが重要である。そこで、あらゆる工芸、技芸、スポーツ等で重要となる、上肢をダイナミックに力強く動かす動作に焦点を当てる。本研究では、球速と投球位置の正確性の両方が求められる野球のピッチング動作を対象の動作とし、投球スピードによって投球位置の正確性が変化するメカニズムの解明を目的とした。

[研究の内容、成果]

・ 背景

多くの場合、動作の高速性と正確性を両立させることは難しい。動作を高速にするほど動作

の正確性は低くなるため、正確性を高めるために人は動作スピードを落とす必要がある。この関係は Speed-accuracy trade-off (SAT; e.g. Fitts 1954) と呼ばれており、リーチングやポインティング（指差し）課題などの比較的単純な動作では普遍的にみられる関係である。

ところが、上手投げの動作では必ずしも SAT が成立しない。上手投げでの投擲を調べた先行研究では SAT を報告する研究 (Etnyre, 1998; García et al., 2013) もある一方で、投球スピードと投球位置の正確性の間に関係がないとするもの (García et al., 2013; Van Den Tillaar & Ettema, 2003, 2006; Urbin et al. 2012) や、投球スピードと投球位置の正確性の間に逆 U 字の関係性を報告するもの (Indermill & Husak, 1984; Freeston et al., 2007; Freeston & Rooney, 2008) もある。特に速さと正確性の逆 U 字の関係を示す、すなわち高速投球時だけでなく低速投球時にも投球位置の正確性が低下するという事実は、SAT の原則から逸脱するものである。本研究では投球スピードと投球位置の正確性の間に逆 U 字の関係が生じるメカニズムの

解明を目指す。先行研究で逆U字型の関係が示された動作はクリケットの投球であるが、本研究では実験参加者の募集の兼ね合いから、投球距離やスピードが似ている野球のピッチングを対象動作とした。

・分析枠組み

人がターゲットに向かって投球したとき、ターゲットを含む面（ターゲット面）上にボールが当たる位置（投球位置）はボールが手から離れた瞬間（リリース時）に決まっている。これは、手から離れたボールはリリース時のボール位置や速度などの運動学的変数（リリース変数）を初期条件として重力や空気抵抗、揚力などに力学的な要因に従って運動するためである。したがって、ボールをターゲットに投球するということは、ターゲットに当たるようにリリース変数を調整することにはほかならない。

この事実に基づくと、リリース変数と投球位置の正確性の間の関係性は数式を用いて表現できる。まず、リリース変数（ z ）と投球位置（ y ）の関係を関数 f を用いて次のように表せる。

$$y = f(z).$$

この関数を局所線形化した際、誤差伝播の関係式は次のように表せる。

$$\Sigma_y = J \Sigma_z J^T.$$

ただし Σ は添え字の分散共分散行列を表し、 $J (= \delta f(z) / \delta z|_{\bar{z}}; \bar{z}$: リリース変数の平均値) はヤコビ行列を表す。

この式より、投球位置のばらつき方（ Σ_y ）は、リリース変数のばらつき方（ Σ_z ）と、リリース変数と投球位置を結び付ける関数の性質（ J ）により決まることがわかる。以下では平均的な投球位置はターゲットから逸脱していない状況、すなわち投球位置がターゲットを中心としてばらついている状況を考える。

この式より、投球位置の正確性を決める要因は、物理的には以下の三つの要因に分解できる。

- ①ボールが手指から離れる（リリース）瞬間のボールの位置や速度（リリース変数）のばらつきの大きさ
- ②リリース変数の誤差がボール到達位置の誤差に与える影響の大きさ（変換比:幾何学的感度）
- ③リリース変数間の共変動による相殺効果

これら3つの効果を直感的に理解するためにゴルフパッティングを例にとる（図1）。打球位置とホールを結ぶレーンの両側が下り斜面であるような場合には、わずかな射出角度のずれが大きな到達位置の誤差を生む（図1左下）。反対に打球位置とホールを結ぶレーンに向かって斜面が下っている場合は、射出角度に多少のずれがあってもレーンに押し戻されるため最終的なボール到達位置の誤差は小さくなる（図1右下）。この例が示すように、ボール射出変数（この例では射出角度）の誤差が同じであっても、その「変換比（幾何学的感度）」の様相によっては、ボール到達位置の誤差は変化する。また、内向きの斜面の場合、まっすぐに打ち出すほかに、左右に射出角がずれても射出スピードを適切に調整する（共変動させる）ことで誤差を相殺し、カップインさせることもできる。このように、ゴルフではボールの打ち出しのば

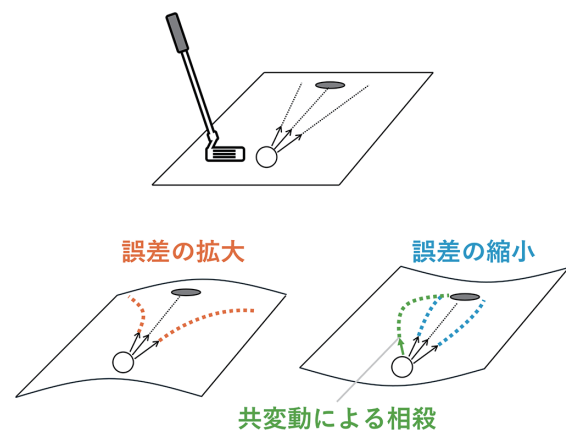


図1 ゴルフのパッティングにおける打ち出し誤差への幾何学的感度や共変動の例。平坦な地形（上）の場合に比べて、地形によっては打ち出した角度のずれの影響は増幅されたり（左下）、縮小されたり（右下；青点線）する。また、打ち出しスピードと角度を共変動させることで互いの誤差を相殺することもできる（右下；緑点線）。

らつきだけでなく、誤差の変換比（幾何学的感度）や、共変動による誤差の相殺も、到達位置の正確性を決める要因である。野球のピッチングの場合においても同様に、リリース変数のばらつきだけでなく、誤差の変換比（幾何学的感度）や、スピードと投げ出し角度の間の共変動も投球位置の正確性を決める要因である。本研究では、これらの三要素の組み合わせから、野球ピッチングにおいて高速時だけでなく低速時にも投球の正確性が低下するメカニズムの説明を試みる。

・実験方法

アマチュアの硬式野球投手 13 名（男性；身長： 177 ± 6 cm；体重： 76.7 ± 7.5 kg；年齢 19.7 ± 1.4 歳；野球歴： 11.4 ± 2.3 年；投手歴： 7.8 ± 3.0 年）による上手投げのピッチングを対象に、投球スピードと投球位置の正確性の関係を検証した。参加者は最大スピードの 50%、65%、80%、100% に相当する 4 条件でストレートを実際の投球を模した環境）にて投球し、モーションキャプチャ装置により全身運動とボールの運動を計測した（図 2a）。ターゲット面（図 2b）における投球位置を計測し、全誤差と左右（Y）・上下（Z）方向別の誤差を評価した。さらに、速度変数の幾何学的感度および標準影響度、速

度の三要素間の共変動指数を算出し、投球スピード条件間で比較した。

・結果

投球誤差の大きさは、規格化スピードに対して有意な二次関数関係を示し、約 80% のスピード条件で最小となる U 字型の関係が確認された（図 3）。この関係は上下方向（Z）の誤差に起因しており、左右方向（Y）では有意な二次項は認められなかった。各スピード条件における平均投球位置はいずれもターゲット近傍に維持されていたことから、スピードに伴う正確性の変化は主として試行間のばらつき（変動誤差）の変化によって生じていた。リリース変数のばらつきに関しては、リリーススピードや速度方位角の標準偏差に明瞭な条件差はみられなかった一方で、速度仰角の標準偏差は 50% 条件で 65、80、100% 条件より有意に大きかった（図 4）。

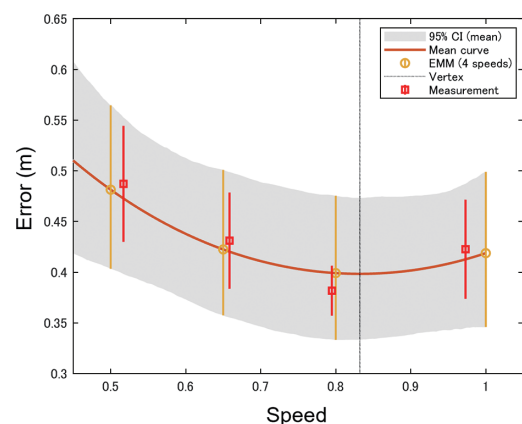


図3 標準化投球スピードと投球誤差の関係

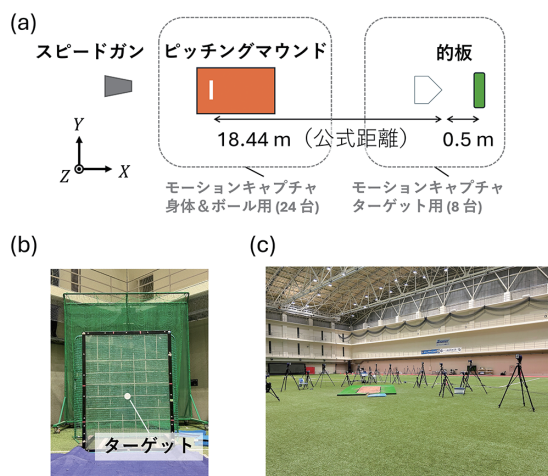


図2 (a) 実験環境俯瞰図 (b) 投球のターゲット面 (c) 実験場。

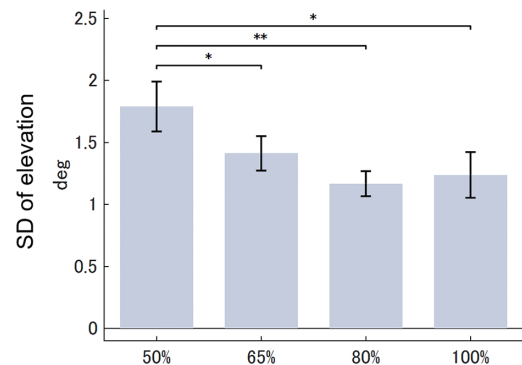


図4 スピード条件ごとのリリース角度のばらつきの大きさ。

幾何学的感度の解析 (Sudo et al., 2026) では、上下方向の投球位置に対するリリーススピードの感度が低速条件ほど大きく、100% 条件に対して 50% 条件で約 8 倍に達すること、標準影響度も同様に低速条件で増大することが示された (図 5)。さらに、速度の各成分 (スピード・方位角・仰角) 間の共変動については、投球位置のばらつきを共変動が低減させた量を定量できる共変動指数 (Müller & Sternad, 2003) を算出した。その結果、スピードと仰角の間の負の相関の結果として低速条件における上下方向の投球位置のばらつきが最大で約 25% 低減し、投球スピードの上昇につれ共変動によるばらつきの低減効果は減少していった (図 6)。しかしながら、投球スピードと速度仰角の間の負の相関関係は低速条件だけでなく高速条件でも維持されていた (図 7)。

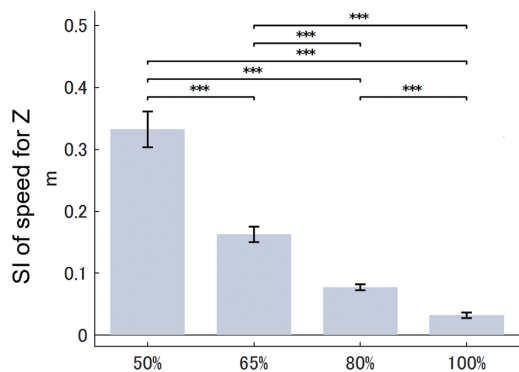


図5 スピード条件ごとの Z (鉛直方向) の感度 (標準影響度; SI)。

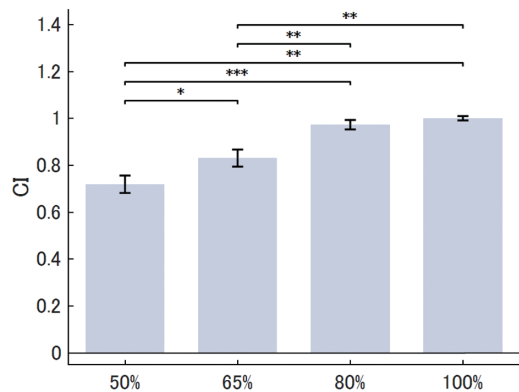


図6 スピード条件ごとの共変動指数 (CI)。1 より小さいほど共変動による投球位置のばらつきの低減効果 (相殺効果) が大きい。

・考察

これらの結果を統合すると、野球ピッチングにおける投球スピードと投球誤差の U 字型関係は、(1) 低速条件ではリリーススピードへの幾何学的感度が高く、かつ仰角のばらつきが大きいことによって誤差が増大する一方、(2) スピード-仰角の負の共変動が低速条件において誤差を部分的に打ち消すことで誤差を低減し、(3) スピードが増すにつれて幾何学的感度が低下する一方で共変動の誤差低減効果が弱まることにより、約 80% スピード付近で誤差が最小化されるというメカニズムによって説明される (図 8)。また、全力投球時の制球力が高い投手ほど、80% から 100% へのスピード上昇に伴う誤差の増大が小さいことから、制御の難しい高速投球においても射出変数のばらつきを抑制する制御能力の個人差が示唆された。

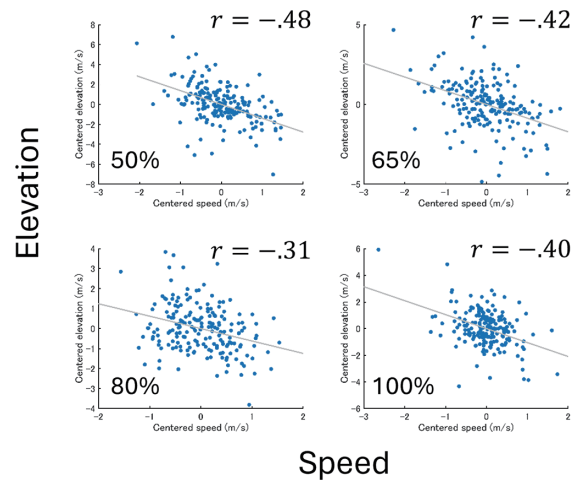


図7 スピード条件ごとの投球スピードと速度仰角の相関

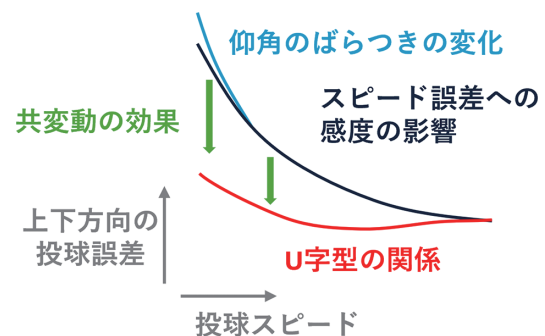


図8 投球スピードと投球誤差に U 字型関係が生じるメカニズムの概念図。

投球スピードと速度仰角の相関分析の結果からは、低速条件においてみられた共変動による相殺効果が必ずしも運動学習の成果ではない可能性が示唆された。共変動による相殺は、従来は運動学習の結果によって利用が高まると考えられてきた (e.g., Kudo et al, 2000)。しかしながら、投球スピードと速度仰角の負の相関はどのスピード帯にも同程度の大きさで観察された (図 7)。したがって、低速条件にて特異的に共変動が利用されたというよりも、あらゆるスピード帯において投球スピードと速度仰角は共変するが、高速になるほどスピードの変動の影響が小さくなることから (図 5)、高速条件において共変動による相殺がみられなくなったと解釈できる。

・参考文献

- Etnyre, B. R. (1998). Accuracy characteristics of throwing as a result of maximum force effort. *Perceptual and Motor Skills*, 86(3 Pt 2), 1211–1217.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381–391.
- Freeston, J., Ferdinands, R., & Rooney, K. (2007). Throwing velocity and accuracy in elite and sub-elite cricket players: A descriptive study. *European Journal of Sport Science*, 7(4), 231–237.
- García, J. A., Sabido, R., Barbado, D., & Moreno, F. J. (2013). Analysis of the relation between throwing speed and throwing accuracy in team-handball according to instruction. *European Journal of Sport Science*, 13(2), 149–154.
- Indermill, C., & Husak, W. S. (1984). Relationship between speed and accuracy in an over-arm throw. *Perceptual and Motor Skills*, 59(1), 219–222.
- 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, 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*.
- Urbán, M. A., Stodden, D., Boros, R., & Shannon, D. (2012). Examining impulse-variability in overarm throwing. *Motor Control*, 16(1), 19–30. <https://doi.org/10.1123/mcj.16.1.19>
- van den Tillaar, R., & Ettema, G. (2003). Influence of instruction on velocity and accuracy of overarm throwing. *Perceptual and Motor Skills*, 96(2), 423–434.
- van den Tillaar, R., & Ettema, G. (2006). A comparison between novices and experts of the velocity-accuracy trade-off in overarm throwing. *Perceptual and Motor Skills*, 103(2), 503–514.

[成果の発表, 論文など]

論文 (査読有)

Sudo, Y., Kawamoto, Y., Iino, Y., & Yoshioka, S. Mechanisms of speed-accuracy trade-off in tennis topspin forehand of college players. *Sports Biomechanics*, 25(1), 83–104, 2026.

国際学会における発表

Sudo, Y., Kawamoto, Y., Iino, Y., Yoshioka, S., Murai, A. “Exploring the Speed-Accuracy Relationship in Overarm Throwing: Minimizing the Impact of Ball Flight Dynamics”. The 29th Annual Congress of the European College of Sport Science, Scotland, July 2024.