

## 2025年度若手研究者共同研究プロジェクト実施報告書

法政大学総長 殿

以下のとおり研究実施報告書を提出します。

基 本 情 報	研究課題名：投運動における到達位置のばらつきを抑える協調性評価枠組みの構築と協調性方略獲得メカニズムの解明
	研究代表者氏名：松田凌汰
	【在籍者】 研究科・専攻・学年：スポーツ健康学研究科博士後期課程3年 【修了者】 所属・職種：
	指導教員（所属・職・氏名）：スポーツ健康学部専任講師 木村新 （※在籍者のみ記入）
	共同研究者（所属・職・氏名）： （※指導教員と同人の場合は記入不要）
	その他 研究分担者： スポーツ健康学研究科博士後期課程4年 馬越惇 スポーツ健康学研究科修士課程2年 小松颯太 スポーツ健康学研究科修士課程2年 石浩傑 スポーツ健康学研究科修士課程2年 三木一真 スポーツ健康学研究科修士課程1年 並松大輔
研究期間： 2025 年度 ～ 2026 年度（※研究終了年度を記載）	

※研究計画の進捗状況を中心に今年度の研究実施状況を記載してください。

プロダーツ選手がブル(的の中心)へ投げ続けるように、熟練者は狙った位置へ正確に投げることができる。到達位置はリリースパラメータ(投げた瞬間の投射物の位置・方向・速さ)で力学的に決まり、これらはリリースに至る身体動作で決まる。そのため、毎回同じ動作を繰り返すと、リリースパラメータも同じ値となり、同じ位置に到達する。しかし、ヒトは全く同じ動作を繰り返すことはできず[Faisal et al., 2008]、一流選手でも個々の関節動作がばらつく中で到達位置のばらつきを抑えている。例えばダーツでは、肘が過度に伸展しても、手首の背屈で補えば到達位置は変動しない。このようなばらつきを互いに補い合う関係を**協調**といい、熟練者は**関節間を協調させることで到達位置のばらつきを抑えている**[Verhoeven and Newell, 2016]。一方、リリースパラメータに着目すると、毎回同じ位置から同じ方向に同じ速さで投げる、つまり各パラメータの再現性を高めて到達位置のばらつきを抑える者もいれば、各パラメータがばらついていてもパラメータ間の協調により同様の結果を得る者もいる[Nasu et al., 2014]。すなわち到達位置のばらつきを抑えるには、**関節間の協調でリリースパラメータの再現性を高める方略**(図 1①)と**関節間に加えリリースパラメータ間も協調させる方略**(図 1②)の 2

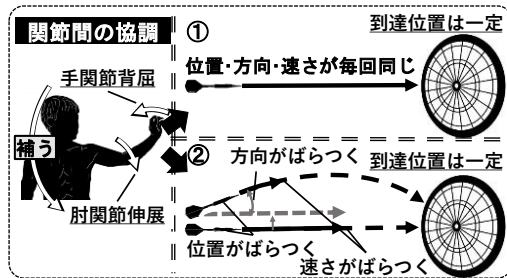


図 1. 熟練者の協調性方略

つが考えられる。

他方で、このような方略の存在が示唆されているものの、なぜ同じ運動目的でも人によって異なる方略に至るのかは明らかではない。この問いは、個々に適した指導や練習法の設計といった実践的課題に加え、運動方略はいかにして形成されるのかという理論的課題にも繋がる。しかし、従来は関節間の協調関係とリリースパラメータ間の協調関係が別々に評価され、関節間の協調関係が方略間でどう異なるのか比較することができなかった。このような方法論的制約を解決するには、**身体動作とリリースパラメータを包括し、方略間の協調関係の違いを定量的に比較できる評価枠組みを構築する必要がある**。その上で、なぜ人によって異なる方略に至るのかという問いを解くには、**こうした評価枠組みに基づき習熟過程を縦断的に分析し、協調性の獲得メカニズムを明らかにする必要がある**。

そこで本研究は、**投射物の到達位置のばらつきを抑える協調性評価枠組みを構築し、協調性の獲得メカニズムを明らかにする**ことを目的とする。具体的には以下の 4 つの研究課題の目的を達成することで、本研究の目的を目指す。なかでも、2025 年度は、上記 4 つの研究課題のうち、研究課題 (1) および (2) に取り組んだ。

- (1) 方向も含めた投射物の到達位置のばらつきを抑える協調性評価枠組みの構築
- (2) 身体運動からリリースパラメータを導出する数理モデルの構築
- (3) 熟練競技者における投射物の到達位置のばらつきを抑える協調性の解明
- (4) 投射物の到達位置のばらつきを抑える協調性獲得メカニズムの解明

### 研究課題 (1)

近年、投運動における協調性の評価手法として、Covariation Randomization(CR)法が用いられている[Kimura et al., 2020]。この手法は、まず運動方程式を用いてリリースパラメータ(位置・方向・速さ)から到達位置を算出する。そのうえで、リリースパラメータの組み合わせを試行間でランダムにシャッフルし、パラメータ間の共変動を取り除く。これにより、共変動があった元のデータと比べて到達位置の標準偏差が増加すれば、パラメータ間の共変動が到達位置のばらつきの抑制に寄与していた、すなわち協調的に機能していたと評価できる。

CR 法の評価指標となる標準偏差は、方向性を持たないスカラー量であるため、ばらつきの大きさが等しければその方向が異なっても、同じ協調関係と解釈される。しかし、到達位置が縦長にばらつく場合と横長にばらつく場合では、その大きさが同じでもリリースパラメータ間の補い合い方は異なる。このように、ばらつきの方向は協調関係の違いを反映しているが、CR 法ではこの違いを適切に評価することができない。そのため、どのような協調関係で到達位置のばらつきを抑えているのかを明らかにするには、ばらつきの大きさと方向を包括した評価手法が必要となる。そこで研究課題 (1) では、**到達位置のばらつき分布を精**

年  
間  
の  
研  
究  
実  
施  
概  
要

円で近似し、機械学習分野で物体検出に用いる Intersection over Union (IoU) を応用して、シャッフル前後の楕円の重なり度合いを定量化する手法を開発した (図 2)。この手法は、楕円の重なりが小さいほどパラメータ間の協調度合いが高いことを意味し、ばらつきの大きさと方向を包括して評価できる。この研究成果の一部は、International Society of Biomechanics in Sports 2025 で発表し、その内容が高く評価され Student Travel Grant を獲得した。

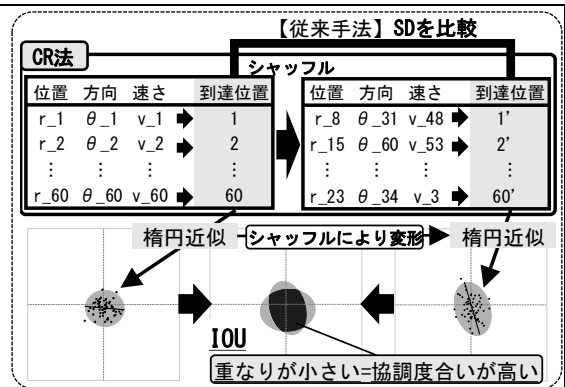


図 2. 協調性の評価方法

## 研究課題 (2)

到達位置はリリースパラメータにより力学的に決まる。同様に、身体運動も力学モデルを用いることで肩・肘・手関節の運動から手部の運動を求めることができる。しかし、リリースの瞬間に身体と投射物は分離し、投射物は手部と独立した運動が生じる。この際、身体からダーツへ作用する力の測定は容易でないため、手部の運動からリリースパラメータを力学的に一意に定めることが困難となる。このため、従来は、手部のばらつきを抑える関節間の協調関係 [Kimura et al., 2020] と、投射物の到達位置のばらつきを抑えるリリースパラメータ間の協調関係 [Kudo et al., 2000] が、別々に評価されてきた。しかし、リリース直前まで投射物は手部に接しており、身体運動とリリースパラメータには密接な関係が想定される。したがって、身体運動情報からリリースパラメータを推定することができれば、身体運動を起点として到達位置を求めることができ、身体運動とリリースパラメータを包括した協調性を評価することが可能となる。そこで研究課題 (2) では、**身体末端部の運動情報からリリースパラメータを導出する数理モデルを構築**した (図 3)。

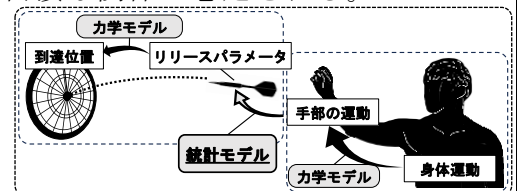


図 3. 研究課題 (2) の提案手法

具体的には、ダーツを把持した手が前方スイングを開始した時点からリリースするまでの区間で時間正規化した 76-100% 時間における手部の姿勢と示指の位置と速度を入力変数とし、ダーツのリリース位置と速度の 6 次元を出力するモデルの構築を目指した。このような機械学習モデルを構築するには、訓練データとテストデータが必要となる。そこで、本研究では研究課題 (4) にも用いる実験データの取得を以下 (**実験データの取得**) のようにして実施し、モデルの構築を行った。

その結果、線形モデル、非線形モデルともに、リリース位置は高精度で推定できたものの、リリース速度の推定には課題が生じた。その要因として、リリースパラメータと示指や手部の関係が一様ではないのではないことが考えられる。例えば、同じリリース位置でリリース速度を生み出すにしても、指を開きながらリリースする方法もあれば、押し出すようにリリースする方法もある。このようにリリースパラメータに対する示指や手部姿勢の重みが異なる関係のデータを統合して一つのモデルを作ろうとしていた可能性がある。そこで本研究では、大規模言語モデルなど深層学習分野で近年使用される混合専門家モデル (MoE) を使用することでこの問題の解決に試みた。これは、各クラスタにモデルを設計する専門家モデルとどの専門家モデルに割り当てられるかの重みを乗じるゲーティング関数の積和から予測される。このモデルを活用することで、リリース位置に加えリリース速度の推定精度が高まり、身体運動からダーツ到達位置を一意に定める分析枠組みが構築された。

なお、本研究課題 (2) の成果は、European College of Sports Science 2026 にて発表することが既に決まっている。

## 実験データの取得

本研究では、ダーツ初心者 41 名 (20.44 ± 1.97 歳、174.26 ± 7.18cm、70.51 ± 10.27kg) を対象とした。被験者には実験に際して、事前に研究内容の説明を口頭及び書面にて行い、参加の同意を得た。なお、本研究は法政大学大学院研究倫理委員会の承認を得て行った (2025\_10)。

測定は、座位でのダーツ投げとした(図4)。被験者が座る位置からダーツ盤までの距離は2.44mとし、被験者にはブル(ダーツ盤の中心;直径4.4cm)を狙って投じるよう教示を与えた。試技の際には、被験者の解剖学的特徴点とダーツ、ダーツ盤に反射マーカを貼付した。60投の投擲を1セットとし、1日に5セットを10日間実施した。各試技は、被験者に疲労がないことを口頭で確認してから実施した。なお、セット間は約15分の休息を与えた。

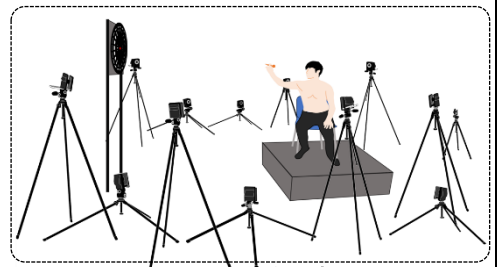


図4. 実験環境

成果発表（学会・論文・研究会等）		
学会・論文・研究会等の別	タイトル	発行または発表年月
International Society of Biomechanics in Sports 2025	FORMATION OF COORDINATION AMONG RELEASE PARAMETERS FOR THE SHAPE OF VARIABILITY IN ARRIVAL POSITIONS OVER PRACTICE	2025年11月
研 究 業 績	<p>その他（アピールすることがあればご記入ください。）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ International Society of Biomechanics in Sports 2025にて、発表内容が高く評価され、Student Travel Grant を獲得</li> <li>・ European College of Sports Science 2026 のアブストラクトが既にアクセプトされており、研究課題（2）の発表が予定されている。</li> </ul>	