

# 論文の内容の要旨

## 正確な投運動のためのバイオメカニクスの調節機序

Biomechanical adjustment mechanism for accurate aimed throwing

氏名： 中野 信泰

### 1 章 序論

ヒトは様々な場面において狙った目標を達成するように運動することができる。これらの目標指向性運動における運動制御メカニズムは、主に腕到達運動などの単純な運動の観察やコンピュータシミュレーションを通して多く研究されてきた。しかし、単純な運動に基づいて得られた知見がすべてダイナミックな運動にも適用できるとは限らない。特にスポーツ動作などは、より良いパフォーマンスのために特化した運動制御であり、日常的な動作の制御とは異なると考えられる。本研究ではバスケットボールのシュート動作を対象に、正確な投運動のためのバイオメカニクスの調節機序を解明する。

ゴールに入れるという目標を達成するために、自分自身の位置に応じて適切にボール飛距離を調節する必要がある。この飛距離の調節には、およそ 4 m 飛ばすか 6 m 飛ばすかを調節するといったマクロなレベルでの調節と、4 m 飛ばすときにどれだけ正確に繰り返し 4 m に調節できるかといったミクロなレベルでの調節が存在する。また、シュートにおいて運動目標を達成するための解はボール軌道レベルでも身体関節運動レベルでも冗長性が存在する。このように無数に存在する解の中から、熟練者たちはどのように解を選択し、マクロ・ミクロの各階層で距離調節を実行しているのかを解明する。

## 2 章 異なる距離のシュートにおける距離調節機序

2 章の目的は、異なる距離のシュートにおける距離調節機序を解明することとした。大学競技チームでのバスケットボール経験を有する右利きの男子選手 10 名が実験に参加した。被検者たちは異なる 3 つの距離条件から各 3 試行ずつシュートを成功させた。モーションキャプチャシステムとフォースプラットフォームを用いて身体特徴点とボールに貼付した反射マーカの座標と床反力を計測した。リリース時刻におけるボール変数と、身体セグメント間の力学的エネルギーの流れを定量し、距離条件間で比較した。

シュート距離の増大につれて、ボールのリリーススピードは増大していることが分かった。シュート距離の増大につれて、肩関節を介して下肢と体幹からシュート腕に伝達されるエネルギー量は増大していることが分かった。しかし、シュート腕の関節仕事量（力学的エネルギーの発生量）に関して、シュート腕全体での合計の仕事量は距離条件間で有意な差は無かった。この結果から、下肢は必要なボールスピードを獲得するためにエネルギー出力を増大する役割を持ち、シュート腕はリリースのばらつきを低減するために運動を調節する役割を持つ可能性がある。様々な距離からシュートをするときにシュート腕の運動をおよそ一定に維持することが正確なジャンプシュートのために重要であることを示唆している。

## 3 章 同一距離のシュートにおける距離調節機序

3 章の目的は、同一距離のシュートにおける距離調節機序を解明することとした。正確な投動作のための方略として提案されている二つの仮説：(1) ターゲットに到達するために要求されるスピードを最小化する、(2) 期待されるパフォーマンスを最大化する、を検証した。8 名の男子大学バスケットボール選手と 1 名の男子プロ選手が実験に参加した。連続してそれぞれ 50 試行または 100 試行のフリースローシュートを行い、モーションキャプチャシステムにより身体とボールに貼付した反射マーカの座標を計測した。リリース時のボール変数（実行変数）とリングの高さでのボール到達位置（結果変数）間の関係性に注目して分析を行った。ボール軌道のシミュレーションを用いて実行変数の解の集合体を特定し、計測した実行変数を解の集合体と比較した。その観察された実行方略の選択を解釈するために、二つの異なるシミュレーションを行った。

個人のばらつきに基づいてシミュレーションされた最適な方略よりも最小スピード近傍の解が選択されていた。この最小スピード近傍の方略は、信号依存ノイズ自体を低減して成功率を高めるよりもリリース変数の誤差伝播を低減することに貢献することが明らかになった。したがって、フリースローにおける熟練者の方略は最小スピード近傍の方略であると同時に、最小誤差伝播の方略でもあることが示された。

## 4 章 同一距離のシュートにおける距離調節機序の個人間の差

4 章の目的は、同一距離のシュートにおける距離調節機序の個人間の差を解明することとした。3 章の男子大学バスケットボール選手は、通常通りの状態でシュートを行いパフォーマンス結果を確認できるフィードバックあり条件（FB 条件）と、シュートリリース後にパフォーマンス結果を確認しないフィードバックなし条件（NF 条件）を 50 試行ずつ行った。tolerance, noise, covariation (TNC) 解析 (Müller and Sternad,

2004) を用いて, (1) トップレベル選手のデータと各選手の FB 条件のデータ, (2) 各選手の FB 条件のデータと NF 条件のデータ, の二つの差を平均的な選択方略に由来する成分, 変動の大きさに由来する成分, 変数間の共変能力に由来する成分に分解して定量した. (1) はトップレベル選手を理想的なアクションと仮定しそれと比較して各選手の課題となる要素とその程度を特定すること, (2) は covariation のコストが試行間フィードバックを反映しているのかを特定することを目的とした.

フリースローにおける被験者間のリリースを比較すると, 変動の大きさである noise コストと変数間の相補的な共変動能力である covariation コストはパフォーマンス能力に関連していた. また, この covariation 能力は試行間のフィードバックに基づく能力ではなく, 試行内の身体的能力であることが示された.

## 5 章 同一距離のシュートにおける距離調節機序の個人内の成功失敗時の差

5 章の目的は, 同一距離のシュートにおける距離調節機序の個人内の成功失敗時の差を解明することとした. 被検者や計測は 3 章と同様である. 各関節のキネマティクスを算出し, 成功失敗間で比較した. また, vector coding (Tepavac and Field-Fote, 2001) と uncontrolled manifold (UCM) 解析 (Scholz and Schöner, 1999) を用いて, 関節間の協調関係についても定量し, 条件間で比較した.

フリースロー動作においてはリリース時の手関節と他の関節の関係の安定が熟練者に共通する動作であること, シュート腕の末端のシュート方向成分が他の方向やセグメント角度よりも制御されていることが明らかになった. しかし, 被検者内の成功試行と失敗試行を比較すると, 各関節のキネマティクスやその関節間の協調関係に差は認められなかった. ボールと身体とのダイナミクスがパフォーマンスの成否には重要な要素であることが示唆される.

## 6 章 総括議論

まず方略を決定する要因について考察する. ボール軌道を決定するリリースパラメータに関しては, 主にリリーススピードを調節することによりマクロな距離調節を達成しており, リリース角度やリリース位置に関しては明確な調節の違いは見られなかった (2 章). 同一距離でのフリースローに関しては, 最小リリーススピード近傍の解を利用しており, この方略の利点は信号依存ノイズを最小化することよりも, むしろリリース誤差のパフォーマンス結果への伝播量を最小化することに関連していることが示された (3 章). 3 章で示された最小スピード近傍の方略は, 2 章で検証されたすべての距離条件で概ね支持されている. 先行研究では最小スピード近傍の方略と, それ以外の方略の両方が報告されている. しかし, これは身体の発揮する力の大きさのみに基づいた方略の理解であり, 運動誤差の影響を低減する方略としても理解可能である. 本研究では, 神経運動ノイズ等の身体の特性的観点のみでは理解できない制御が, 解の集合体の形状で表現される課題の特性を踏まえることで理解できた. つまり, 正確性を必要とする運動においては身体の特性と課題の特性の両方を考慮することで方略を決定することが示唆される.

次に変数間の補償関係について考察する. ボールに関しては, パフォーマンスレベルが高いほどリリース変数間の共変動能力が高い傾向にあり, 一定の貢献をしているが, 再現性に関する能力の方が貢献量としては大きいという結果であった (4 章). フリースローのような一定の条件でのパフォーマンスをする上ではリリー

スパラメータ間の補償的な協調性よりも再現性の方が重要であるかもしれない。このような協調能力は外的な変動や適応的な運動により必要な能力だと考えられているので、防御者がいる状況などにおいて異なるボール軌道の方略を用いるためにはより重要となる可能性がある。身体に関しては、下肢は大まかに力発揮を調節し、上肢はボールのリリースを安定するように下肢からの伝達を補償的に調節することが示唆されていた（2章）。また、他の関節の運動に合わせた適切なタイミングでの手関節の協調が、シュート結果の安定性に重要であることが示唆されていた（5章）。これらから、先行研究で提唱された運動連鎖に沿って、近位の運動誤差を補償するように末端部位が協調的に働くことが支持される。この身体関節間の補償的な協調関係が、ボールリリースの再現性を高め、パフォーマンス向上に貢献していると考えられる。

## 参考文献

- Müller, H. and Sternad, D. (2004). *J Exp Psychol [Human Percept]*, 30(1):212–233.
- Scholz, J. P. and Schöner, G. (1999). *Exp Brain Res*, 126(3):289–306.
- Tepavac, D. and Field-Fote, E. C. (2001). *J Appl Biomech*, 17(3):259–270.