

ばらつきの個人特性を考慮したロバストな投射パラメータの推定法

村田宗紀

鹿屋体育大学

国立スポーツ科学センター

キーワード: Solution Manifold, 最適化, 投射課題, シミュレーション, 冗長性

【要 旨】

標的をめがけて正確に物体を投射する課題は多くのスポーツで要求される。そのため、個人に応じた至適な投射角とスピードの組み合わせを具体的に提示することは、競技力向上に有益である。本研究では、個人の特性に応じた結果に対してロバストな投射パラメータを推定する方法を提案することを目的とした。具体的には、個人の動作のばらつきを測定して個人のばらつきを確率密度関数で表現し、個人のばらつきを考慮した投射シミュレータを構築した。次に、投射シミュレータを用いて最適化計算によって投射パラメータの最適解を求める。提案した手法の妥当性を確認するために、1名の熟練者のフリースロー課題から得たデータに適用したところ、概ね被験者のシュート成功率が再現された。本手法を応用することで、個人に合わせた至適な投射パラメータの組み合わせを具体的に提示するだけでなく、克服すべき課題が投射パラメータのばらつきの減少にあるか、パラメータの組み合わせを変えることにあるかを提示するなど、より具体的な個別フィードバックを提示することが期待できる。

スポーツパフォーマンス研究, 10, 364-373, 2018年, 受付日: 2018年11月2日, 受理日: 2018年12月13日

責任著者: 村田宗紀 〒891-2393 鹿屋市白水町1 mmurata@nifs-k.ac.jp

* * * * *

Method for estimation of robust release parameters that takes individual variability into account

Munenori Mutara

National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

Japan Institute of Sport Sciences

Key words: solution manifold, optimization, releasing an object, simulation, redundancy

[Abstract]

Many sports require athletes to release an object accurately toward a target. For that

reason, it is useful to suggest to individual players an optimal combination of releasing angle and speed in order to improve competitive power. The present study proposes a method of estimating robust release parameters that meet individual players' characteristics. Specifically, the variation of individuals' motions was measured and expressed as a probability density function, and a release simulator was created taking into account the variation across individuals. Next, the release simulator was used to calculate the optimal solution for the release parameter. In order to examine the validity of this method, it was applied to the free throw data of an experienced basketball player. The results of this simulation confirmed that the success rate of his shots was roughly reproducible. This method not only suggests an optimal combination of release parameters, but also identifies individual-specific problems that need to be overcome, such as a decreasing variation in the release parameter or a changing combination of parameters.

1. 緒言

標的をめがけて正確に物体を投射する課題は、多くのスポーツで要求される。特にバスケットボールのシュートやダーツスローなどでは、その正確性がパフォーマンスに直結するため、投射課題における結果のバラつきを小さくする要求は大きい。リリース後の物体に作用する力は重力と空力のみであることから、物体が手から離れる瞬間の投射パラメータ(リリース位置, 投射速度, 図 1)の再現性を高めようとすることは自然な戦略であろう。一方で、一定の力を発揮し続けるといった単純な課題においても、ヒトの運動には神経系ノイズなどが混入することから、完全に再現することは不可能であることが報告されている(阿部, 2011)。そのため、熟練者は解の冗長性を利用することで、結果に対してロバストな投射パラメータを選択していることが報告されている(Abe and Sternad, 2013)。例えば、バスケットボールのシュートをモデル化すると、ゴールを通過する解(簡単にするため、ここでは投射スピードと投射角の組み合わせとする)は無数に存在し、その解の集合を Solution Manifold(SM)という。図 2 の模式図のように SM は解空間上で曲線を描くため、熟練者はばらつきそのものを小さくする戦略のほか(図 2(a)), 結果がなるべく SM 上にばらつくような投射パラメータを選択することで(図 2(b)), 投射パラメータのばらつきが結果に与える影響を小さくする戦略を選択している。投射パラメータのばらつきは身体運動の再現性に依存することから、例えばダーツスローにおける手関節や肘関節の伸展のタイミングや大きさといった個人の動作特性(身体特性や運動の癖)を反映し、各個人に固有のものとなる。したがって、SM のどの部分を利用する事が至適であるかも個人毎に異なる。これまでも、バスケットボールのシュートについて、コンピュータシミュレーションを用い、投射パラメータのばらつきに対して、結果の応答を検討している報告は多数ある(Brancazio, 1981: Gablonsky and Lang, 2005: Hamilton and Reinschmidt, 1997: Okubo and Hubbard, 2006: Tran and Silverberg, 2008)。しかし、投射シミュレーションに個人の動作特性を組み込み、至適な投射パラメータを提示するには至っていない。そこで、本研究では、個人の特性に合わせた動作のばらつきに強い投射パラメータの推定法を提案し、その有効性を検証することを目的とする。

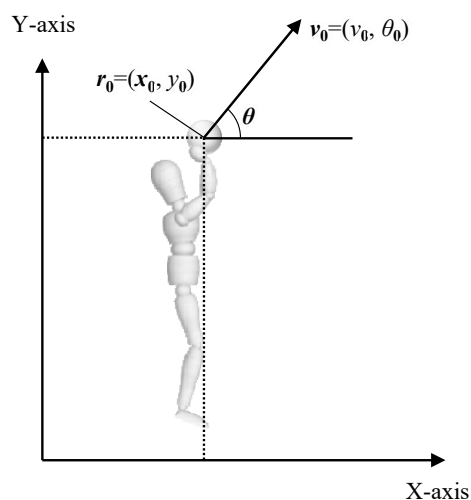


図 1: 投射パラメータ

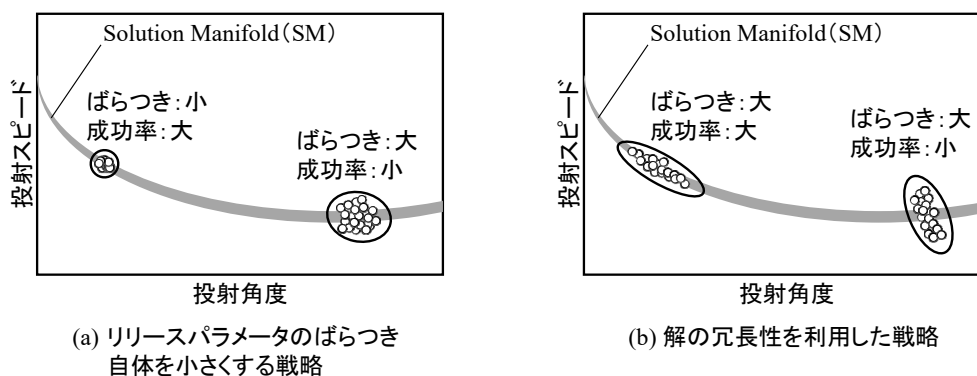


図 2: 結果の再現性を向上する戦略

II. 方法

ここでは、本研究で提案する個人の特性に応じた投射パラメータの推定法について説明すると共に、その過程で行う投射実験について述べる。本手法は、あらゆる投射課題への応用が期待できるが、本研究ではバスケットボールのシュート動作を課題とした。

1. 投射実験

詳細は後述するが、本研究で提案する手法では、個人の投射パラメータのばらつきを関数で表現する必要がある。そのため、跳躍を伴わないバスケットボールのシュート動作を課題とした実験を行った。本研究の目的は手法を提案することであるため、被験者は男子大学バスケットボール選手 1 名とした。様々な投射パラメータの組み合わせにおける、投射パラメータのばらつきを得るために、ゴール下 (0.75m) から 3 点ライン (7.45m) までを等間隔に 10 地点に分け、被験者にはフリースローに 1 番近い地点を除く 9 地点で 20 試技ずつ行わせた (9 地点 × 20 試技 = 合計 180 試技)。動作中のボールおよび身体の分析対象点の 3 次元座標を、光学式 3 次元自動動作分析装置 (Vicon Motion Systems 社製, VICON MX+システム, 500Hz) を用いて測定した。マーカの貼付位置は利き手の第 2 末節骨および第 3 末節骨とし、ボールには 16 点の反射シールをランダムに貼付した。被験者には、シュート地点が変更されるたびに十分に練習を行わせ、「同一地点から行う 20 試行が終了するまではシュートの軌道を調節することなく、毎回同じシュート軌道を再現する」こと、「ボードを使わず、リングに直接入るシュートを打つ」ことを指示した。本研究は、国立スポーツ科学センター倫理審査委員会より承認を受けて執り行われている。

2. 投射パラメータの算出

本研究では、以下の手順で各投射パラメータを求めた。まず、村田・藤井 (2014) と同様の方法でボール中心の座標、角速度、ボール速度を求めた。具体的には、ボール表面に貼付した分析対象点の座標から最小二乗法によってボール中心の座標を推定した。次に、ボール表面の分析対象点の座標と推定したボール中心の座標から、ボールの角速度を算出した。ボールの速度はボール中心の座標を時間微分することで求めた。

リリースのタイミングは利き手の第 2 末節骨および第 3 末節骨の座標とボール中心の距離が、それぞれ一定の閾値より大きくなった瞬間とした。被験者によって指の太さが違うことなどを考慮し、確実にリリ

ースしていないフレームで、第 2 末節骨および第 3 末節骨の座標とボール中心の距離の平均(20 フレーム分)を算出し、30mm を足した値を閾値とした。

3. 投射パラメータの推定法

本研究で提案する手法では、遺伝的アルゴリズム(GA:Generic Algorithm)の目的関数に投射パラメータのばらつきを組み込むことで、ばらつきに強い投射パラメータの組み合わせを推定する。したがって、実験から得たデータを基に目的関数に組み込む個人毎の動作のばらつきを関数化した。

(1) 遺伝的アルゴリズムによる投射パラメータの最適化

GA は、パラメータを操作することで解の収束性を容易に操作できる。図3は GA の概要を示した模式図である(図では簡単にするため、スピードと投射角の 2 変数とした)。GA は生物の進化を模した最適化計算手法であり、最適化したいパラメータのセットを個体とし、一定の基準(目的関数)に則って評価値(適応度)を算出して優秀な個体を選別する「選択」、選択された個体から次世代の個体を生成する「交叉」および「突然変異」を 1 つのルーティン(世代)とする。そして、計算の停止条件が満たされるまで繰り返し計算を行う。すなわち、目的関数が最終的に選択される解を支配している。本研究では、個人の特性に適した投射パラメータを選択するために、以下の手順で適応度を算出した。まず、個体の各投射パラメータに、個人の特性に応じたばらつきを付加する。そして、ノイズを付加した投射パラメータでシミュレーションを行い、シュートの成否を判定する。この操作を各個体につき 500 回行い、その成功率を評価量とした(図 4)。本研究では、個体を構成する変数を投射スピード、投射角、投射位置(X 座標:前後方向, Y 座標:鉛直方向)とした(図 1)。

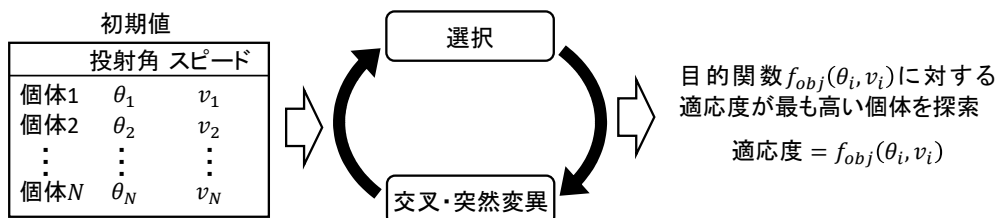


図 3: 遺伝的アルゴリズムの概要

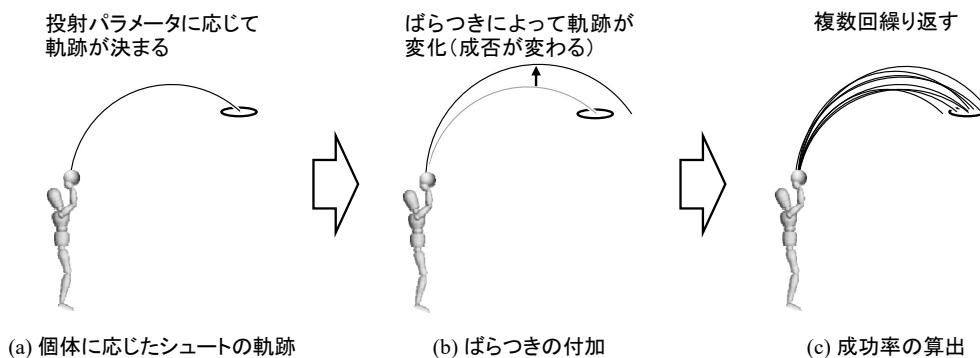


図 4: 評価量の概要

(2) 被験者のばらつきの関数化

各投射パラメータのばらつきが正規分布にしているかを Kolmogorov-Smirnov test によって、投射パラメータのばらつきと平均値に相関関係があるかを回帰分析によって確認したが、有意な関係は認められなかった。そこで、以下の手順に基づいて、各投射パラメータのばらつきの確率密度関数を求めた(図 5)。実験で得られた各投射パラメータについて、平均値との差をヒストグラム(横軸:平均との差, 縦軸:試技数, 階級数 20)で表した。次に、ヒストグラムを連続関数で表すために、Butterworth digital filter (5Hz)によって平滑化した後、3 次スプライン関数にフィットした。さらに、フィットした曲線と横軸が囲む面積が1となるように規格化することで、各投射パラメータのばらつきの確率密度を求めた。得られた確率密度と一様乱数を用いることで、投射パラメータを個人の特性に合わせてばらつかせることが出来る。

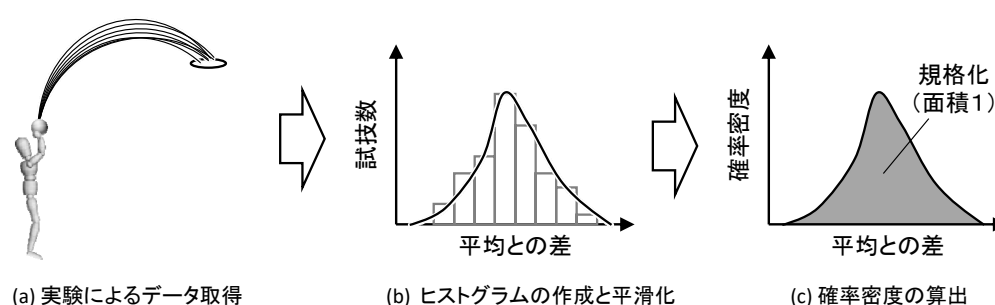


図 5: 投射パラメータのばらつきの確率密度関数の算出

(3) 投射シミュレーション

本研究で提案した手法では、各個体の適応度を算出するにあたり投射シミュレーションを行う必要がある。具体的には、対象動作を2次元平面での投射運動であるとし、各個体として与えられた初期条件のもと(リリース位置, 投射スピード, 投射角, 回転数), 運動方程式を数値的に解くことで各時刻のボールの座標を算出した。数値積分には4次のルンゲクッタ法を用い、刻み時間は1/1000secとした。ボールの揚力係数と抗力係数は、安田ら(2014)の手法を用いて実験データから推定した。また、リングに当たったシュートは、その後ゴールに入るかを判別することが難しいため、リングにあたることなくリングを通過したシュートのみを成功試技と定義した。具体的には、以下の条件を満たしている場合を成功試技とした。1)ボールがリングを通過すること(ボールの鉛直座標がリングと等しいとき、ボールの水平座標がリングの内側であること)。2)ボールがゴールを上から下に通過すること(ボールの鉛直座標がリングと等しいとき、ボールの鉛直速度がマイナス(鉛直下方)であること)。3)リングにボールがふれないこと(各時刻で、リングの両端からボール中心までの距離が、ボールの半径以下にならないこと)。

III. 結果および考察

本研究では、提案手法の妥当性を検証するため、被験者1名に提案手法を適用した。前述の9地点の他に、通常のフリースロー20試技を被験者に行わせた。そして、提案手法によって推定した課題の成功率と、実験より得た成功率を比較した。被験者への指示、マーカールの貼付位置、試技の成功条

件等は, 投射パラメータのばらつきを関数化する際に行ったものと同様である.

(1) 提案手法の適応

図 6 は, 被験者の各投射パラメータのばらつきの確率密度関数である. 全ての投射パラメータに共通して, 確率密度が最大値となる値はゼロよりもやや小さかった. 投射角度の確率密度は, マイナス方向に歪んでおり, その他の確率密度関数は, ややマイナス方向に歪んでいるものの, 概ね最大値を挟んで対称であった. これらの確率密度関数は, 例えば本被験者は投射角が水平方向にばらつきやすいなど, 被験者の投射パラメータのばらつきの特性を示している. したがって, これらの確率密度関数に基づいて投射パラメータをばらつかせることで, 被験者の投射を模したシミュレーションを行うことができる. GA の設定は, 個体数 500, 交叉率 0.8, 突然変位確率 0.05 とした). なお, 詳細は後述するが, リリース位置(x 座標)と回転数については個体を構成する変数に含めなかった.

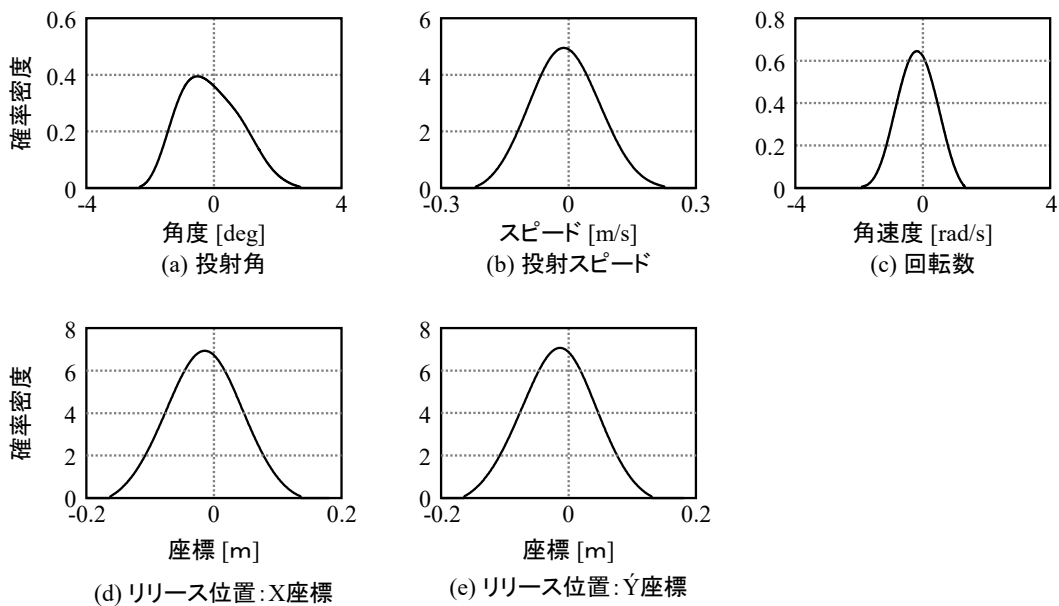


図 6: 投射パラメータのばらつきの確率密度

表 1 は, 提案手法を適用した推定値と, 実験値(20 試技の平均)を示したものである. 成功率は, 実験値(60.0%)と推定値(57.2%)で概ね一致していた. また, 投射スピードも実験値(6.83 m/s)と推定値(6.78 m/s)で概ね一致していた. 本研究に参加した被験者は, 試技の成功率は 60.0%であるが, リングに触れて入った試技も含めた成功率は 85.0%であり, 競技レベルが高い被験者であった. したがって, 投射パラメータは概ね至適な組み合わせを選択している可能性が高い. 成功率および投射スピードが概ね一致していることから, 提案手法によって被験者の投射パラメータの選択を概ね再現できていたと推察される. 一方, 投射角は実験値(52.6 deg)と推定値(48.7deg)に 4.0 deg 程度の差があった. この差が生じた要因には以下の理由が考えられる. まず, 実験では 20 試技しか行っていないことから, 1 試技当たりの重みが大きく, 仮にシミュレーションのように十分な試技数を重ねた場合, 大数の法則に則り推定値と同程度に落ち着く可能性がある. 次に, 本研究では空力係数の推定精度, ばらつきの関数化の正確性が結果に影響を与える. 今後, より多くの被験者に本手法を適用することで, 妥当性をさらに検証する必要がある.

表 1: 実験値と提案手法の比較

	実験値	提案手法
成功率 [%]	60.0	57.4
投射角度 [deg]	52.6	48.3
投射スピード[m/s]	6.83	6.79

(2) 本手法を用いた指導への示唆

前項では、被験者の実測データを基に提案手法を適用し、概ね実験値と一致することを確認した。一方、本手法は投射パラメータのばらつきの確率密度関数を変化させることで、被験者に指導への示唆を与えることが出来る。本項では本研究に参加した被験者を例に、本手法を用いた指導への示唆を示す。

まず、提案手法による推定値が実験値に比べて高い成功率を示した場合、動作の再現性を向上しなくても、推定した投射パラメータの組み合わせを採用することで、成功率が向上する余地があることを示している。よって、まずは自身にとって至適な投射パラメータを学習すべきである。本被験者の場合、前項で示したように概ね至適な投射パラメータの組み合わせを選択していた。したがって、成功率を向上するためには、動作の再現性を高める必要がある。そこで、投射角度と投射速度について、ばらつきの確率密度関数(図 6(a), (b))の横軸を 2 で除すことで(再度規格化した)、選手固有の確率密度関数の形状を変えることなく、仮想的に動作の再現性を向上させた。その結果、投射スピードのばらつきが半減した場合、成功率は 71.0%に向上した。一方、投射角度のばらつきが半減した場合、成功率は 58.8%であり、顕著な変化はみられなかった。したがって、本被験者の場合、投射スピードのばらつきを減少させることが有効であろう。さらに、本手法は、指導に役立つだけでなく、個人の特性を模していることから、シュート距離を変化させたときの成功率を予測することなども可能であると推察される。しかし、各投射パラメータのばらつきの確率密度関数は、指導によって形状も変化する可能性があるが、本手法ではその点については予測できない。また、動作のばらつきを減少させるための具体的な指導法を提示することなどは出来ないことなどにも留意する必要がある。

バスケットではゴールからの距離に応じて投射パラメータが変化する。そのため、本研究では被験者の動作のばらつきの特性を広い投射パラメータの範囲で測定することを目的とし、被験者に投射課題を 180 行わせた。しかし、ダーツスローなどの目標物との距離が固定されている課題ではより少ない試技数でも本手法を用いることができることが予想される。このように、投射パラメータのばらつきの関数化に必要な試技数や、試技数と精度の検証などは今後の課題であろう。なお、投射パラメータのばらつきを関数化することを目的とした測定では、あくまで被験者の投射パラメータのばらつきの特性を抽出することが目的であるため、試技の成否(ゴールに入ったか否か)はモデルの構築には関係しない。

(3) モデルの修正

本研究に参加した被験者は、投射角とリリース位置(X 座標)、投射スピードと回転数の間に強い相関関係があった(図 7)。そこで、回転数とリリース位置(X 座標)については、回帰式を用いて投射角と投射スピードに応じて決定されるものとし、最適化するパラメータには含めていない。このことは、最適

化における計算コストの削減に寄与するだけでなく、より個人の動作特性を再現したモデルに近づけることにつながる。たとえば、投射角とリリース位置(X座標)の関係に着目すると、投射方向は概ねリリースした瞬間の、ボール軌跡の接線方向である。そして、リリースに至るまでのボール軌跡は弧を描くことから、投射角が小さくなると、リリース位置はより前方になると予想される(図8)。このように、投射パラメータのばらつきと身体運動の間に相関関係を見出し、身体動作も含めたシミュレーションを行えば、個人のシュートフォームを含めて投射パラメータの最適化を行うことが出来ると推察される。よって、たとえば身体運動を同時に分析することで、本手法はより個人の特性に近いモデルに拡張でき、精度の向上が期待される。

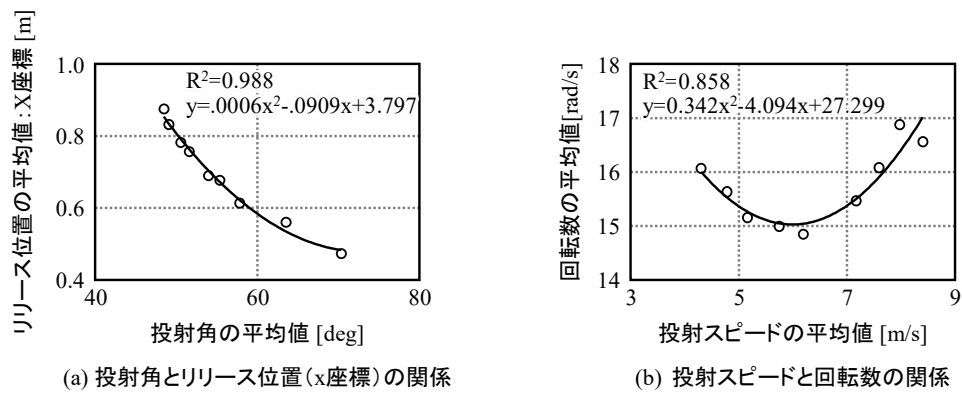


図7: 投射角とリリース位置(x座標)の関係

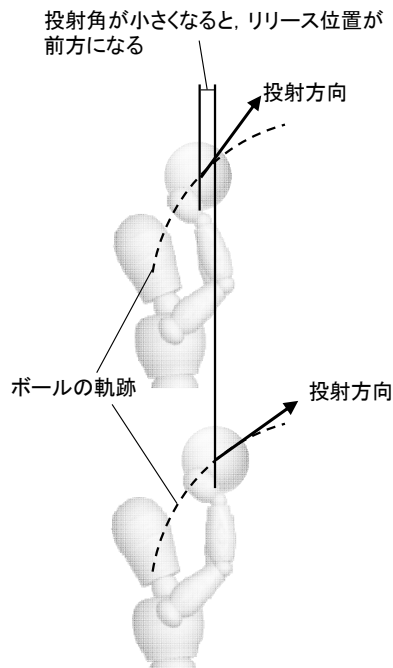


図8: 投射角とリリース位置(X座標)の関係

IV. まとめ

本研究では、個人の特性に合わせた動作のばらつきに強い投射パラメータの推定法を提案し、その有効性を検証することを目的とした。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 実験データから、個人の投射パラメータのばらつきを確率密度関数として表した。
2. GA の目的関数に、投射パラメータのばらつきを確率密度関数を組み込むことで、個人の特性に応じた投射パラメータを推定した。
3. 被験者 1 名に本手法を適用した結果、課題の成功率は実験値と推定値で良い一致を示した。

本研究で提案した手法には、トレーニングに伴う投射パラメータの確率密度関数の形状変化は予測できないなどの限界が存在する。しかし、「個人の特性に応じた投射パラメータの組み合わせを具体的に提示できる」こと、「選手が克服すべき課題が、投射パラメータのばらつきを減少させることにあるか、至適な投射パラメータの組み合わせを選択していないことにあるかを、具体的に提示できる」ことなど、現場に直接還元できる手法である。また、動作分析と組み合わせることや、投射パラメータの確率密度関数の推定法を修正することで、より個人の特性に近いモデルに拡張し、精度を高めることが今後期待できる。

参考文献

- ・ 阿部匡樹. パフォーマンスのばらつきを如何に減らすか—運動課題の冗長性を利用したストラテジー (特集 知覚・認知からみた身体運動の制御と学習—トレーニングへの示唆). トレーニング科学, 23(2): 105-111, 2011.
- ・ Abe, M. O., Sternad, D. Directionality in distribution and temporal structure of variability in skill acquisition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(225): 1-15, 2013.
- ・ Brancazio, P. J. Physics of basketball. *American Journal of Physics*, 49(4): 356-365, 1981.
- ・ Gablonsky, J. M., Lang, A. S. Modeling basketball free throws. *Siam Review*, 47(4): 775-798, 2005.
- ・ Hamilton, G. R., Reinschmidt, C. Optimal trajectory for the basketball free throw. *Journal of Sports Sciences*, 15(5): 491-504, 1997.
- ・ Okubo, H., Hubbard, M. Dynamics of the basketball shot with application to the free throw. *Journal of sports sciences*, 24(12): 1303-1314, 2006.
- ・ Tran, C. M., Silverberg, L. M. Optimal release conditions for the free throw in men's basketball. *Journal of sports sciences*, 26(11): 1147-1155, 2008.
- ・ 村田宗紀, 藤井範久. 上肢および上腕に着目したテニスサーブにおける回転の打ち分け. *体育学研究*, 59(2): 413-430, 2014.
- ・ 安田海人, 坪井一洋, 田中晃平, 宮寄武. 軌道の特徴量を用いたボールの空力係数の推定. *日本機械学会論文集*, 80(814): 1-10, 2014.