

フリースローにおける人の運動の感度解析と設計

Sensitivity Analysis and Design of Human Motion in Free-throw of Basketball

正 岡田昌史 (東工大) 非 田中尚義 (東工大)
正 土方 亘 (東工大)

Masafumi OKADA, Tokyo Institute of Technology
Hisayoshi TANAKA, Tokyo Institute of Technology
Wataru HIJIKATA, Tokyo Institute of Technology

Free-throw in basketball is extremely dynamic and sensitive to the error of the joint angle through the motion. The purpose of this research is to design a trajectory which is robust against the initial error of the joints using inverse dynamics analysis and sensitivity analysis of motion capture data of free-throw. For those analyses, the dominant joint angle for free-throw is identified. The free-throw data of some participants are acquired, and they are evaluated and classified as novice or expert. The sensitivity of the experts shows small value comparing novice one, and a trajectory which has lower sensitivity is designed for the novice.

Key Words: Sensitivity analysis, Free-throw, Human dynamics

1 はじめに

フリースローの成否はバスケットボールにおいて勝敗を決める極めて重要な要素である。フリースローの成功率はバスケットボールの熟練者の中でもばらつきがあり、プロのプレイヤーでも成功率が高い人は9割以上、低い人は5割以下と個人差が大きい。多くのプレイヤーはフリースローの成功率を上げるために、フリースローの練習に多くの時間を費やしている。

フリースローは動作時間が1秒程度と極めて短い動的な運動である。また、常に一定の距離・高さのゴールをねらうため、毎回一定の軌道・速度で投擲することが望ましい。しかし、人の動作には初期姿勢、またはリリース時の各関節角度・角速度やボールの投擲角度・速度等のわずかな誤差がありこの影響を強く受ける。そのため、誤差の影響を小さくするような投げ方をすることは重要であり、誤差に関する感度の小さい、すなわち、誤差に関してロバストな投擲運動の設計を行い、実践することが有効であると考えられる。

フリースローに関する研究は大きく2つに分類される。1つは、フリースローを行うプレイヤーの複数のデータを取得し、成功する人の身体動作の条件を探索する[1]~[3]。主に肘や膝の関節角度に注目した運動学的な考察が中心となるが、身体動作の投擲されたボールの軌道への力学的な影響が分かりにくく統計的な処理に留まる。一方、投擲されたボールの軌道に言及する研究では、Chauら[4]はフリースローにおける最適なリリースの条件を、リリースされたボールがゴールに入るまでの軌道を動力学シミュレーションすることで手から放つ際の最良の条件を示している。しかし、適切なフリースローの軌道を研究するためには、人の身体動作と投擲されたボールの軌道は統合して解析することが望ましい。そのため、人の身体動作から投擲されたボールの軌道まで一貫した解析が望ましく、そのためには人の身体も含めた動力学解析が必要となる。

我々は、低自由度ロボットの投擲運動を対象として、ロボットの運動の軌道上におけるダイナミクスの線形化、離散化を用いることで順動力学の解を求め、投擲されたボールの軌道の着地点における誤差の感度を導出した[5]。本研究ではこの手法を多自由度な人のリンクモデルに拡張し、フリースローを行う人と投擲されたボールの解析を行うことで、フリースローにおける人の最適な投擲軌道を設計することを目的とする。そのために、モーションキャプチャを用いて複数の参加者のフリースローのデータを取得し、ゴール率から各プレイヤーをレベル分けする。次に、人間のリンクモデルを求め、モーションキャプチャで得られた各関節位置データから逆運動学解析によって各関節角度の推移を得る。

そして、逆動力学解析によって関節トルクを求め、感度解析を行うことで熟練者の運動は投擲されたボールの着地位置に関する感度が小さいことを示す。最後に、最適投擲軌道を設計し、初心者の感度が小さくなることを示す。

2 感度解析手法

まず、参考文献[5]における、初期姿勢に関するボールの着地点の感度解析手法について述べる。いま、フリースローを行う人をFig.1のリンク系でモデル化する。足からボールを10リンク

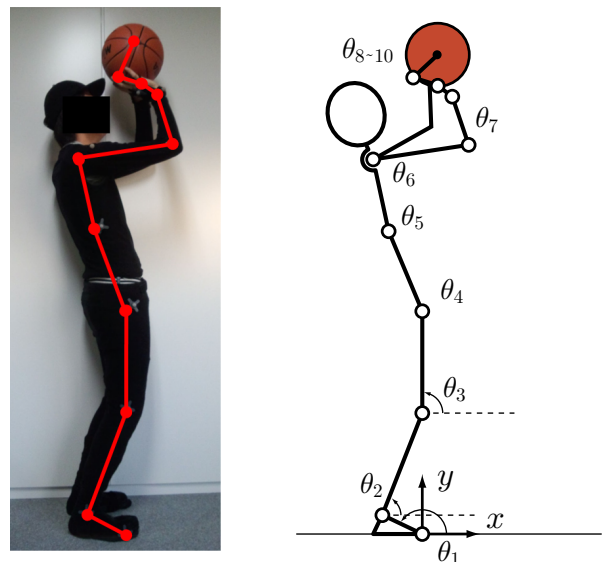


Fig.1 Link model of free-throw

で表し、各リンクの絶対角を θ_i ($i = 1 \sim 10$) とする。また、各関節が発生するトルクを τ_i とする。なお、左手および頭部は胴体に固定された1つのリンクとみなす。このリンク系に対して運

動方程式を求め、これが

$$\dot{q} = f(q) + g(q)\tau \quad (1)$$

$$q = [\theta^T \quad \theta^T]^T \quad (2)$$

で表されるとする。なお、 θ は各関節角度、 τ は各関節トルクを並べたベクトルである。これをある与えられた q_k 、 τ_k 周りで線形化することで、

$$\dot{q}_k = A_k^c q_k + B_k^c \tau_k + C_k^c \quad (3)$$

$$A_k^c = \frac{\partial f(q_k)}{\partial q} + \left[\frac{\partial g(q_k)}{\partial q} \tau_{k1} \quad \dots \quad \frac{\partial g(q_k)}{\partial q} \tau_{k,10} \right] \quad (4)$$

を得る。ただし、 B_k^c 、 C_k^c についても A_k^c と同様に得られる。これを離散化して

$$q_{k+1} = A_k q_k + B_k \tau_k + C_k \quad (5)$$

が得られ、初期姿勢の関節角度・角速度 q_1 と関節角度・トルクの時系列データを用いた再帰計算により、リリース時の関節角度・角速度 q_N は

$$q_N = A q_1 + B [\tau_1^T \quad \dots \quad \tau_{N-1}^T]^T + C \quad (6)$$

として得られる。これより、リリース姿勢の初期姿勢に関する感度は、

$$\frac{\partial q_N}{\partial q_1} = A \quad (7)$$

となる。なお、

$$A = \prod_{k=1}^{N-1} A_k \quad (8)$$

であり、 B 、 C も同様に得られる。さらに、初期姿勢 q_1 に関するボールの到達位置 x_ℓ の感度は次式により得られる。

$$\frac{\partial x_\ell}{\partial q_1} = \left(\frac{\partial x_\ell}{\partial x_N} \frac{\partial x_N}{\partial q_N} + \frac{\partial x_\ell}{\partial \dot{x}_N} \frac{\partial \dot{x}_N}{\partial q_N} \right) \frac{\partial q_N}{\partial q_1} \quad (9)$$

ただし、リリース姿勢 q_N に関するリリース時のボールの位置 x_N 、速度 \dot{x}_N の感度 $\partial x_N / \partial q_N$ 、 $\partial \dot{x}_N / \partial q_N$ はリンク系の運動学から容易に求められる。また、リリース時のボールの位置 x_N 、速度 \dot{x}_N に関するボールの到達位置 x_ℓ の感度 $\partial x_\ell / \partial x_N$ 、 $\partial x_\ell / \partial \dot{x}_N$ は投擲されたボールの軌道が放物線となることから容易に得られる。

3 人のフリースローの感度解析

3.1 モーションキャプチャを利用した運動計測

フリースローの動作を次の2つのフェーズに分ける。

Phase1 動作の開始から膝の屈曲角が最大になるまで

Phase2 膝の伸展の開始からリリースするまで

膝の屈伸までの動き、すなわち Phase 1 終了までの動作は個人差が大きい。特に、意識的に身体を動かしたりリズムを調整するいわゆる個人に依存したルーチン動作をとる場合が多い。一方、Phase 2 ではフィードフォワード的な制御を行い膝の伸展、腕での投球を一気に行っていると考えられる。そこで本研究では、個人の随意運動が現れにくい Phase 2 のみを対象とする。今後、初期姿勢とは Phase 2 の開始時の姿勢を指すものとする。

モーションキャプチャシステムを用いてバスケットボールのフリースローの計測を行った。ノビテック社の VENUS3D を使用し、フレームレート 120fps、計測時間 5 秒程度とした。モーションキャプチャシステムは参加者には Fig.2 のようにフリースローラインに立って構ってもらい、合図ののち参加者の自由なタイミングでフリースローを行ってもらった。各参加者に対して 20 回行ってもらい、参加者の申告によって適宜休憩を設けた。参加者には実験開始前に実験の概要について十分に説明を行い、すべて



Fig.2 Experimental setup

の参加者から同意を得た。また、本実験は東京工業大学人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を受け実施された。

本実験の参加者は東京工業大学の大学生・大学院生 17 名で、全員が健康な右利き手の男子である。参加者の中には上級者（バスケットボール部所属）や初心者が含まれるが、計測における 20 回のフリースローを観察し、Augste らの 5 段階評価 [6] を用いて各ショットのスコアをつけ、各プレイヤーの技能レベルを評価した。なお、一度もゴールに入らなかった参加者 2 名と、他の参加者に比べ極端に動作時間が長かった参加者 1 名は、他の参加者と比較が困難であることから解析の対象外とした。この結果から、5 名を上級者、9 名を初心者と分類した。

得られたデータを 2 次元平面へ射影し、さらに、逆運動学解析によって関節角度を求めた。得られた関節角度の時系列データを時間の 8 次関数

$$\theta_i = a_0 + a_1 t + \dots + a_8 t^8 \quad (10)$$

でフィッティングし、これを微分することで角速度、角加速度とした。さらに、逆運動学解析により、各時刻における関節トルクを求めた。ただし、身体のリックパラメータは参考文献 [7] に基づき、身長・体重で比例配分することで定めた。なお、求めたトルクは式 (3) の線形化に用いられる。計測された上級者、初心者の動きをそれぞれ Fig.3, 4 に示す。上級者と初心者で動きに大

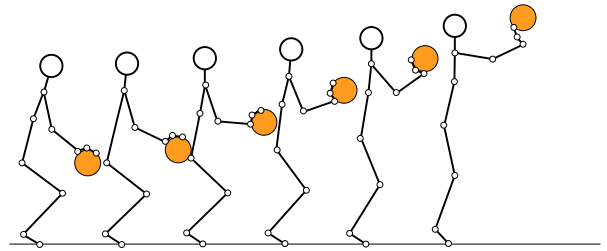


Fig.3 Free-throw motion of an expert

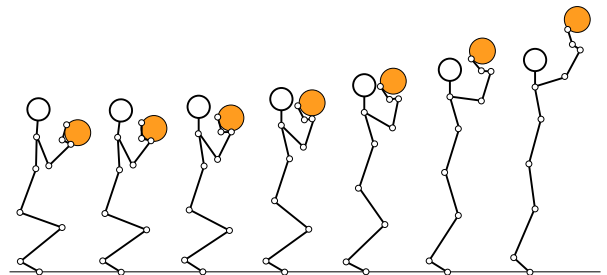


Fig.4 Free-throw motion of a novice

きな差があることが理解できる。

3.2 初期姿勢のばらつき

ボールの着地点のばらつきは、初期誤差のばらつきと感度の積で表される。そこでまず、初期姿勢とリリース姿勢における各参加者の各関節の絶対角度のばらつきを調べる。初心者と上級者における各個人の標準偏差の平均を Fig.5 に示す。ただし、関節番号は Fig.1 にある、つま先から指先までを 1 から 10 と設定した。この結果から以下の 2 つが考察される。

1. 初心者、上級者ともに下半身（関節番号 1～5）に比べ、上半身（関節番号 6～10）の方が初期姿勢においてばらつきが大きい。特に肘関節（関節番号 7）より上の関節のばらつきが著しい。
2. 初期姿勢において上級者の方が関節角度のばらつきが大きい。リリース姿勢においては上級者の方が小さい。このことから、上級者は毎回定まった初期姿勢をとるのではなく、初期姿勢の誤差の影響を受けにくいような投げ方、すなわち、投球姿勢の初期姿勢に関する感度が小さい投げ方をしていると考えられる。

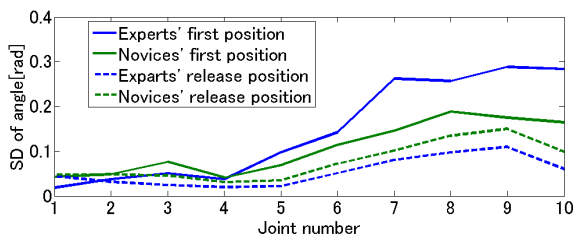


Fig.5 Standard deviation of each joint angle of novices and experts in initial and release posture

3.3 感度解析結果

次に、それぞれの運動に関して感度解析を行った。ただし、感度解析はある基準となる運動に対してばらつきが加わった場合の感度を求めているが、モーションキャプチャから得られた出たはずではばらつきを含んでいる。そこで、ゴールに入った投球のみを解析の対象とした。感度解析結果を Fig.6 に示す。下半身の関

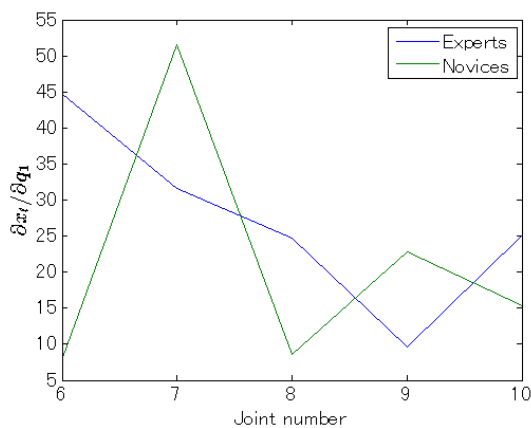


Fig.6 Sensitivity of x_l with respect to a perturbation of the initial posture

節角度はばらつきが上半身に比べ大変小さいため、上半身の関節角度に関する感度のみを示している。この結果から、上級者の投球運動においては、初期姿勢における肘関節（関節番号 7）の角度のばらつきに関するボールの到達位置の感度が小さいことがわかる。

4 運動の設計

4.1 関節軌道の設計

前節の結果は以下にまとめられる。

1. 初心者、上級者ともに初期姿勢のばらつきは同程度である。上半身のばらつきが大きい。特に初心者においては肘関節のばらつきが大きい。
2. 上級者は初期姿勢の誤差を投球までに吸収し、投球時のばらつきが小さくなっている。これは、投球姿勢の初期姿勢に関する感度が小さいことを意味する。
3. 上級者では初心者に比べ、肘関節のばらつきに関する感度が小さい。

これらを考慮して、初心者に対して適切な関節の軌道の設計を行うことを考える。対象とする初心者に対し、肘関節角度 θ_7 の変位を上級者に近づけ、それ以外の関節は設計前と同様の動きを行うように設計する。まず、次のような要件を満たす θ_7 の時系列データ $\hat{\Theta}_7$ を用意する。

1. 動作の開始から終了までの時間長さが対象者と等しい。
2. リリース時における関節角度が対象者と等しい。
3. 角度変位がお手本となる上級者と等しい。

次に、リリース時の関節角度 θ_7 と関節角速度 $\dot{\theta}_7$ が設計前と等しく、 $\hat{\Theta}_7$ に近い変位となる Θ_7 を作成する。式 (10) を

$$\theta_7 = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1(t - t_N) + \dots + \tilde{a}_8(t - t_N)^8 \quad (11)$$

のように書き換える。 t_N はデータの時間長さを変更するパラメータである。 \tilde{a}_0, \tilde{a}_1 は条件 1, 2 から決定される。さらに、条件 3 のために、以下の最小二乗問題の解として新たな係数 \tilde{a} を得る。

$$\tilde{a} = [\tilde{a}_0 \quad \tilde{a}_1 \quad \tilde{a}_{2\sim 8}] \quad (12)$$

$$\tilde{a}_{2\sim 8} = (\hat{\Theta}_7 - [\tilde{a}_0 \quad \tilde{a}_1] T_1) T_2^\# \quad (13)$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & 1 \\ t_1 - t_N & \dots & t_{N-1} - t_N & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} (t_1 - t_N)^2 & \dots & (t_{N-1} - t_N)^2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (t_1 - t_N)^8 & \dots & (t_{N-1} - t_N)^8 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

これを用い、新たな関節角時系列データは

$$\hat{\Theta}_7 = \tilde{a} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

により得られる。

4.2 設計軌道の評価

設計対象を初心者の中で最も初期姿勢の肘関節に関する感度の大きかった参加者とし、お手本とする上級者は最も感度の小さかった参加者とした (Fig.3, 4 と同一者)。設計対象者の肘関節の設計前と設計後の軌道を Fig.7 に示す。リリース時の関節角

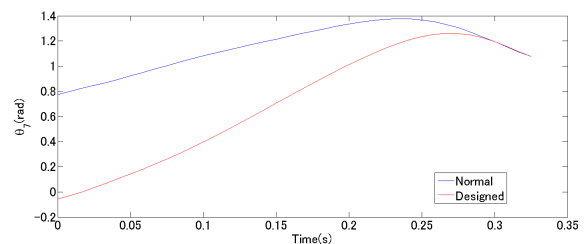


Fig.7 The trajectories of designed and no designed elbow angle

度、速度は元の動きと一致している。初期角度は上級者の動きに

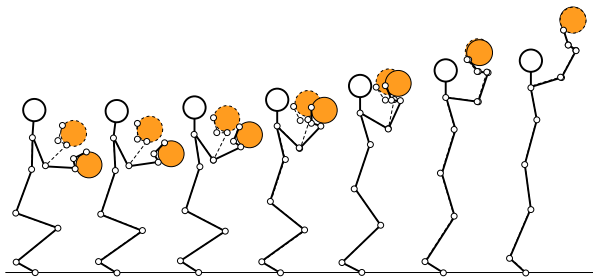


Fig.8 Designed motino

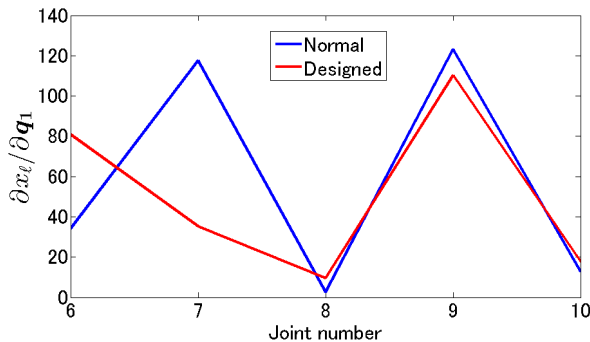


Fig.9 The result of sensitivity analysis for the designed trajectories

合わせて変化している．設計した動きを Fig.8 に示す．なお，鎖線は Fig.4 にある元の動きを示している．また，設計後の軌道に感度解析を行った結果を Fig.9 に示す．設計前に比べ，設計後は初期姿勢の肘関節（関節番号 7）する感度が著しく小さくなった．肩関節と肘関節の関節トルクの変化をそれぞれ Fig.10, 11 に示す．設計前に比べ，設計後の方がやや小さくなったが，人が再現可能な範囲であり，実現可能な運動である．なお，これ以外の関節トルクはほとんど変動しなかった．以上のことから，肘関節に着目した指導が有効であると言え，この初心者コーチングの際には，初期姿勢において前腕をもっと下げ，肘を早く振るとを指導することが良いと考えられる．

5 おわりに

本研究ではバスケットボールのフリースローを対象とした感度解析を行い，初心者の投擲軌道の設計を目的とした．以下に成果を示す．

1. モーションキャプチャにより複数の参加者のフリースローデータを取得し，また参加者の技能レベルを評価した．
2. データのばらつきを調べ，上級者と初心者では初期姿勢に対するばらつきに差はないが，リリース時に上級者の関節角のばらつきが著しく小さいことを示した．
3. 複数の参加者に対して逆運動学解析，感度解析を行い，上級者の初期姿勢の肘関節に関する感度が小さいことを示した．
4. 解析結果をもとに初心者の投擲軌道の設計を行い，感度が下がることを示した．

今回の初心者の軌道設計では定性的な考察により行った．この最適化手法を開発する必要があると共に，得られた運動の教示法，さらに，その運動を実現することでスコアが向上することを検証する必要がある．

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤 C）「運動の誤差感度解析に基づく投擲の最適化と教示」の支援を受けた．

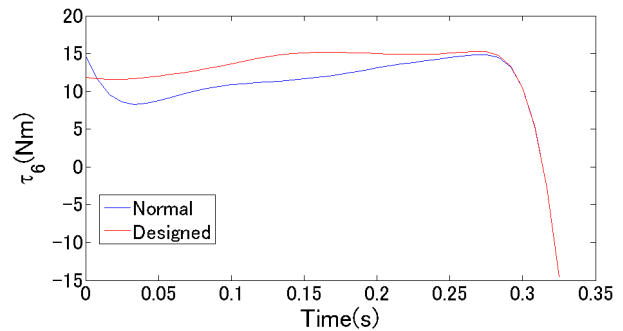


Fig.10 The torques of shoulder joint designed and original motion

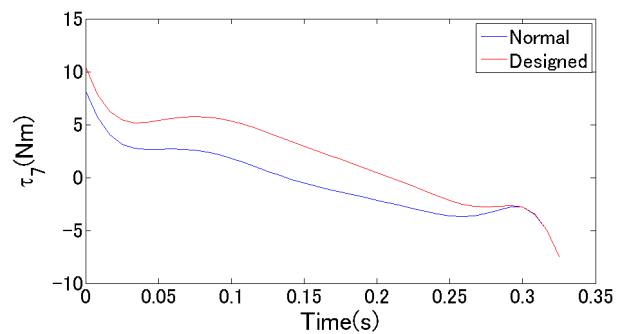


Fig.11 The torques of elbow joint designed and original motion

参考文献

- [1] Achraf Ammar, Hamdi Chtourou, Osama Abdelkarim, Anthony Parish and Anita Hoekelmann, Free throw shot in basketball: Kinematic analysis of scored and missed shots during the learning process, Sport Sciences for Health, Vol.12, pp.27-33, 2016
- [2] Pawel Pakosz, EMG Parameters and Kinesthetic Differentiation during the Free-throw of Basketball Players with Varous Levels of Athletic Experience, Central European Journal of Sport Sciences and Medicine Vol.2, pp.31-38, 2013
- [3] F. Martijn Verhoeven and Karl M. Newell, Coordination and control of posture and ball release in basketball free-throw shooting, Human Movement Science 49, pp.216-224, 2016
- [4] Chau M. Tran and Larry M. Silverberg, Optimal release conditions for the free throw in men's basketball, Journal of Sports Sciences 26:11, pp.1147-1155, 2008
- [5] Masafumi Okada, Alexander Pekarovskiy and Martin Buss, Robust Trajectory Design for Object Throwing based on Sensitivity for Model Uncertainties, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3089-3094, 2015
- [6] Augste, C. and Lames, M., Performance diagnostics in basketball: A new target shooting test, Flensburg University Press, pp.288-291, 2006
- [7] R.E.Herron, J.R.Cuzzi and J.Hugg, Mass Distribution of the Human Body using Biostereometrics. National Technical Information Service, 1976