

主成分分析による無回転フリーキック動作時の
ヒト下肢挙動の解明

Clarification of lower limb behavior while non-rotational shot
using principal component analysis

○中村太秋*, 高木基樹*, 佐藤翔太*, 鎌田安久*, 小林吉之**, 三好 扶*
○Taisyu Nakamura*, Motoki Takagi*, Shota Sato*,
Yasuhisa Kamada*, Yoshiyuki Kobayashi**, Tasuku Miyoshi*

*岩手大学, **産業技術総合研究所

*Iwate University, **National Institute of Advanced Industrial Science & Technology

キーワード : 主成分分析(principal component analysis), 無回転フリーキック(non-rotational shot),
サッカー(soccer), モーションキャプチャ(motion capture)

連絡先 : 〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5 岩手大学 工学部 機械システム工学科
三好研究室 三好扶, TEL: 019-621-6357, E-mail: tmiyoshi@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

サッカーではインパクト技術の向上により, 一部の選手は意図的にボールに回転をかけずに蹴り出す, 無回転フリーキック(以下, 無回転FK)を蹴る. 無回転で飛翔するボールは, ボール後方に形成される渦により複雑な挙動をとる¹⁾. このため, 相手ゴールキーパーはシュートコースの予測が困難となり無回転FKは得点の確率が高いといわれている²⁾.

無回転FK時の身体運動の解析を行った先行研究の多くは足部挙動について記述^{2),3)}されている. 例えば, 新海ら²⁾は, 無回転FKではインパクトに伴う回転モーメントを減じる必要があるため, インパクト局面全体を通して足部からボールに作用するカベクトルがボール重心を通っている必要があるとしている. また, Hongら³⁾は無回転FKにおけるインパクト中の蹴り脚足部は, インステップキック, カーブキックと比較して直線運動に

近い挙動を示すことを報告した. 一方, 無回転FKにおける足関節より近位の下肢関節や骨盤挙動について詳細な解析を行った研究⁴⁾は少ない. しかしながら, 足部は下肢の末端であるためボールに対する足部の姿勢や軌跡は足部より近位の関節および骨盤の協調運動によって決定される. そのため, 無回転FK時の骨盤および下肢関節の挙動に先行研究^{3),4)}で報告されているような足部挙動を達成するための戦略が表れると予想される. このことから, 我々は無回転FK時の骨盤の回転角度および矢状面内の蹴り脚各体節の重力軸に対する角度を対象に評価を行った⁵⁾. しかし, より詳細に足部挙動とそれを決定づける骨盤および下肢関節運動との関連を調査するために, 支持脚各関節挙動や前額面内の下肢挙動など, より多数の運動学的パラメータを使用した複合的な評価が望まれた. 近年, 多種パラメータの時系列データを主成分分析(principal component analysis, 以下, PCA)

により少数のパラメータに縮約することで動作の時系列特徴を定量的に評価する研究が行われている。例えば、歩行分析ではPCAを用いて変形性膝関節症患者⁶⁾や、歩行中の転倒リスクが高いヒト⁷⁾などを対象に歩容の特徴が記述されている。また、性別、速度、靴の違いによる走動作パターンの違いを識別する研究においてもPCAが使用されている⁸⁾。このように、PCAを用いることで様々な被験者群、実験条件における動作の特徴や差異が記述されていることから、無回転FKにおける骨盤および下肢の運動学的特徴を評価できると予想される。

そこで本研究では、サッカーにおいて一般的なキック技術であるインステップキックと無回転FKの動作を計測し、PCAによる解析を適用することで無回転FKにおける骨盤および下肢の運動学的特徴を記述することを目的とした。特に、先行研究で報告されている足部挙動^{2,3)}との関連を本研究の焦点とした。

2. 方法

2.1 実験

本研究は岩手大学倫理審査委員会によって承認されており、被験者には実験の意義について十分に説明を行ったうえで、実験参加の同意を得た。被験者は、大学サッカー部の指導員により、無回転FKの技術を有すると判断された大学のサッカー部員3名（年齢：20.3±0.58[歳]，身長：170±5.2[cm]，体重：60.7±5.1[kg]，競技歴：14.3±0.58[年]，mean±S.D.）とした。なお、全被験者が右脚でのキックを得意としていた。実験は屋内にて実施した。被験者は、各自持参したフットサルシューズを履いた状態で、ボール位置から前方1.6[m]，高さ0.75[m]に設置された的に向け、全力のインステップキックおよび無回転FKを、それぞれ5本行った。

キック動作は3次元リアルタイムモーション計測システム（VENUS3D-N250，（株）ノビテック）を用い、サンプリング周波数は

250[Hz]にて記録した。また、動作計測用の反射マーカを被験者身体左右の肩峰，上前腸骨棘，上後腸骨棘，大転子，大腿重心，外側大腿骨骨頭，下腿重心，外踝，踵骨後面，第五中足骨骨頭の計20点に貼り付けた。なお、足部の反射マーカはシューズの上から貼り付けた。大腿，下腿重心は，重心位置を矢状面上の体表に投影した点とした。踵骨後面の反射マーカは地面からの高さが，地面から第五中足骨までの高さと同しくなるよう貼り付けた。加えて，ボール挙動を計測するため，ボール表面に3つの反射マーカを正三角形の配置で貼り付けた。

2.2 データ解析

PCAを実施するため、運動学的パラメータを導出した。導出には筋骨格シミュレーションソフト（AnyBody Modeling System, AnyBody Technology Inc.）を使用し、計測した座標データを各被験者の体格に合わせた骨格モデルにフィッティングすることで導出した。導出したパラメータは、実験座標系に対する骨盤の座標，ロール，ピッチ，ヨー角，両脚の股関節屈曲/伸展，内/外転，内/外旋，膝関節屈曲/伸展，足関節底/背屈である。実験座標系の原点は，地面にボール重心を投影した点とし，x軸は原点からの指すベクトルを地面に投影した軸，y軸は地面から鉛直上向きの軸，z軸はx-y平面に垂直な軸とした（右手系）。下肢関節の角度は，近位の体節に対する遠位体節のオイラー角として導出した。解析区間はインパクト（Time=50[%]）前200[ms]（Time=0[%]）からインパクト後200[ms]（Time=100[%]）とした。

次に，これらのデータから30試行×1616変数（16運動学的パラメータ×101フレーム）の行列を作成した。さらに，すべての変数を，式(1)に示すz-scoreを用いて標準化し，PCAへの入力とした。

$$z_t = (X_t - \mu_t) / \sigma_t \quad (1 \leq t \leq 1616) \quad (1)$$

ここで、 z_t はパラメータ t の標準化後の値、 X_t はパラメータ t の実測値、 μ_t はパラメータ t の加算平均、 σ_t はパラメータ t の標準偏差である。

PCAは、統計解析ソフトウェア (IBM SPSS Statistics Version 21.0, SPSS Inc., Chicago, IL) を用いて行った。PCAによって得られた各主成分 (principal component vector, 以下, PCV) でインステップキック、無回転FKにおける主成分得点 (principal component score, 以下, PCS) の比較を行った。あるPCVで有意差が検出された場合、そのPCVが無回転FKの特徴を表す。検定にはt-検定を使用した。

最後に、Kobayashiら⁷⁾と同様の手法を用いて、運動学的パラメータを時系列データへ再構築した。再構築後の時系列データと体節のリンク長さを用いて順運動学を解くことにより、PCVで再構築した時の骨盤および下肢の動作をスティックピクチャで表した。これ

を観察することで各主成分の表す特徴を確認した。体節のリンク長さは、Winter⁹⁾の方法を用いて被験者の平均身長から導出した。また、あわせて再構築後のパラメータの波形を確認することで、主成分が表す特徴についてより詳細に検討した。

本稿で用いたデータセットは、変数に対して被験者数が少なく、解析結果の頑健性が懸念される。そこで、ジャックナイフ法によって30の疑似データセット (29×1616) を作成し、それらすべてに対し再度PCAを行うことで、実際のデータセットを入力した際と同様の結果が得られるか確認した (以下, sPCA)。

3. 結果

表1にPCAの結果を示す。PCAの結果、7つのPCVで動作の91.1%を説明できることが明らかとなった。また、PCV2, PCV3, PCV5のPCSでキックの違いによる有意差が確認

Table 1 Results of PCA

	PCV1	PCV2	PCV3	PCV4	PCV5	PCV6	PCV7
Explained variance [%]	41.67	20.16	13.40	7.01	4.38	3.05	1.42
Cumulative [%]	41.67	61.83	75.23	82.24	86.62	89.67	91.10
IK: mean (SD)	-0.1611±1.101	0.6044±0.2781	-0.5152±0.7737	-0.1815±0.9169	-0.4395±1.113	-0.1906±1.014	-0.01643±1.142
NR shot: mean (SD)	0.1611±0.8963	-0.6044±1.101	0.5152±0.9507	0.1815±1.077	0.4395±0.6470	0.1906±0.9535	0.01643±0.8759
p Value	0.3869	0.0008161	0.002956	0.3287	0.01327	0.3047	0.9302

Table 2 Results of the surrogate PCAs

	sPCA 1			sPCA 2			sPCA 3			sPCA 4			sPCA 5		
PCV revealed significant differences between IK and NR shot	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5
p Value	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	*
	0.002	0.001	0.042	0.001	0.002	0.022	0.001	0.002	0.020	0.001	0.003	0.014	0.002	0.001	0.028
	sPCA 6			sPCA 7			sPCA 8			sPCA 9			sPCA 10		
PCV revealed significant differences between IK and NR shot	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5
p Value	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	**
	0.000	0.003	0.014	0.000	0.003	0.014	0.001	0.002	0.011	0.000	0.004	0.015	0.000	0.003	0.008
	sPCA 11			sPCA 12			sPCA 13			sPCA 14			sPCA 15		
PCV revealed significant differences between IK and NR shot	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5
p Value	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	†
	0.000	0.002	0.027	0.001	0.003	0.023	0.000	0.002	0.044	0.001	0.002	0.027	0.000	0.001	0.076
	sPCA 16			sPCA 17			sPCA 18			sPCA 19			sPCA 20		
PCV revealed significant differences between IK and NR shot	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5
p Value	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	*
	0.000	0.006	0.013	0.000	0.004	0.012	0.000	0.010	0.012	0.000	0.013	0.009	0.000	0.015	0.012
	sPCA 21			sPCA 22			sPCA 23			sPCA 24			sPCA 25		
PCV revealed significant differences between IK and NR shot	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5
p Value	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	*	**	**	*
	0.001	0.002	0.015	0.002	0.001	0.014	0.001	0.003	0.013	0.001	0.002	0.011	0.001	0.005	0.008
	sPCA 26			sPCA 27			sPCA 28			sPCA 29			sPCA 30		
PCV revealed significant differences between IK and NR shot	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5	PCV 2	PCV 3	PCV 5
p Value	**	*	*	**	*	*	**	**	*	**	**	†	**	**	*
	0.000	0.015	0.013	0.000	0.015	0.017	0.000	0.009	0.011	0.000	0.051	0.023	0.000	0.018	0.009

†: p<0.1 *: p<0.05 **: p<0.01

された。

同様に、sPCAでは30の内28のsPCAで3つのPCVに有意差が見られた(表2参照)。残り2つのsPCAでは、2つのPCVに有意($p<0.05$)、1つのPCVで有意傾向($p<0.1$)の差が示された。よって、本稿で使用したデータセットの頑健性は担保されているといえる。

PCV5のPCSにおいて、キックの違いによる有意差が検出された。しかしながら、寄与率は4.38%と低かった。よって、本稿ではPCV5を除き、PCV2およびPCV3に対して以降の解析を行うこととした。

図1に、PCV2において再構築した骨盤および下肢の挙動をスティックピクチャで表した。なお、図中の丸はボール初期位置を表している。x-y平面で見たスティックピクチャの様子から、無回転FKでは骨盤に対してより前方でインパクトを行っており、ボールに対する骨盤位置が後方にあることが観察された。また、y-z平面から観察すると、無回転FKでは、インステップキックと比較して蹴り脚を地面に垂直に近い状態で振っていた。ここで、前額面における大腿リンクと地面とのなす角度は骨盤ロール角および蹴り脚股関節の内/外転角度に支配される。以上からPCV2では、骨盤の前後位置、ロール角、蹴り脚股関節の外転角度の3つのパラメータに無回転FK時の特徴が表れると予想されたため、再構築後の波形の比較を行った。図2は、これら3つのパラメータをPCV2において再構築した波形である。図2から、無回転FKではインステップキックと比較して常に骨盤がボールの後方に位置していることがわかった。また、インパクト近傍ではキックの違いによる骨盤ロール角の差は小さく、無回転FKにおける蹴り脚股関節の外転角度はインステップキックと比較して常に0[deg]に近いことが明らかとなった。

図3に、PCV3において再構築した動作をスティックピクチャで表した。PCV3の再構築後の動作をy-z平面から見ると、PCV2と同様に、地面に対して蹴り脚を垂直に近い状態で

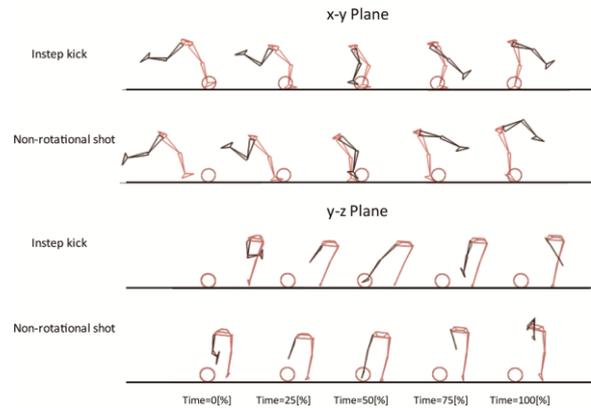


Fig.1 Motion recombined from the PCS of PCV2

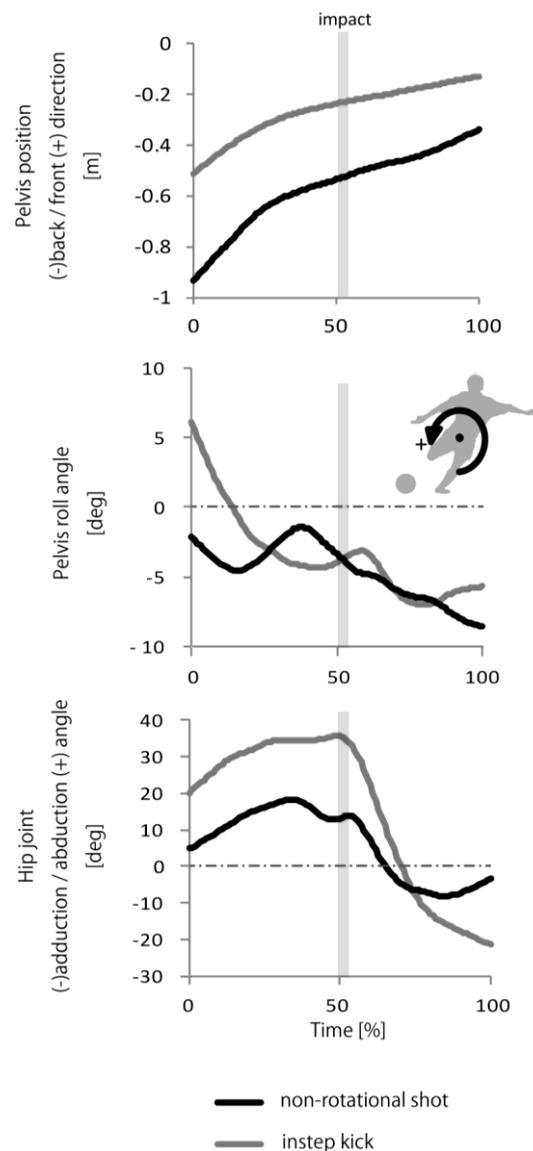


Fig.2 Pelvis and Hip joint kinematics recombined from the PCS of PCV2

振っていることが確認された。よって、PCV3においても、骨盤ロール角、蹴り脚股関節の内/外転角度の2つのパラメータに無回転FKにおける特徴が表れると予想されたため、再構築後の波形を比較した。図4に、PCV3においてこれら2つのパラメータを再構築した時の波形を示した。図4から、無回転FKのインパクト近傍では骨盤ロール角が0[deg]に収束し、蹴り脚股関節の外転角度が減少していることが明らかとなった。

4. 考察

4.1 ボールに作用するカベクトルと骨盤前後位置との関係

再構築後の波形において、無回転FK時の骨盤位置はインステップキックと比較して後方に位置していた(図2)。無回転FK達成には、インパクト局面全体を通して足部からボールに作用するカベクトルがボール重心を通っている必要がある²⁾。加えて、ボールを的の方向に飛ばすにはボールと足部の接触面が的の方向を向いている必要があると考えられる。この時、ボール重心と的を結ぶ直線および、ボールと足部の接触面は垂直となる。今回の実験条件から、ボール重心と的を結ぶ直線は、水平より上向きとなる。インパクトにおいて足関節は底屈位にあるため、カベクトルを上向きにするためには骨盤の前方でインパクトし、足部とボールの接触面を上向きにする必要がある。これを満たすためには、ボールに対する骨盤の位置が後方になる。再構築後の波形において、無回転FK時の骨盤位置がインステップキックと比較して後方にあったのは、足部からボールに作用するカベクトルをボール重心に通すための戦略が表れたためであると考えられる。

4.2 水平面における足部軌跡と蹴り脚股関節および骨盤ロール角との関係

無回転FKにおいて、インパクト中の足部は直線に近い軌跡をとることが報告されている³⁾。脚を地面に対して完全に垂直に振っ

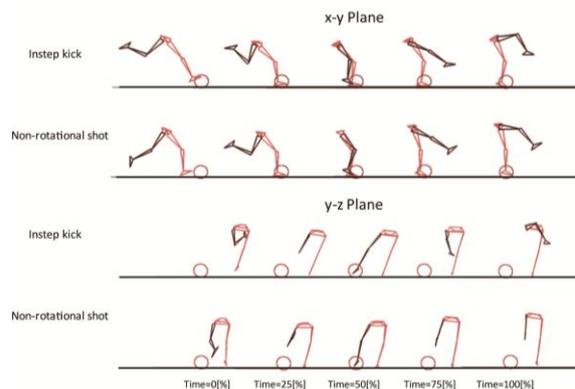


Fig.3 Motion recombined from the PCS of PCV3

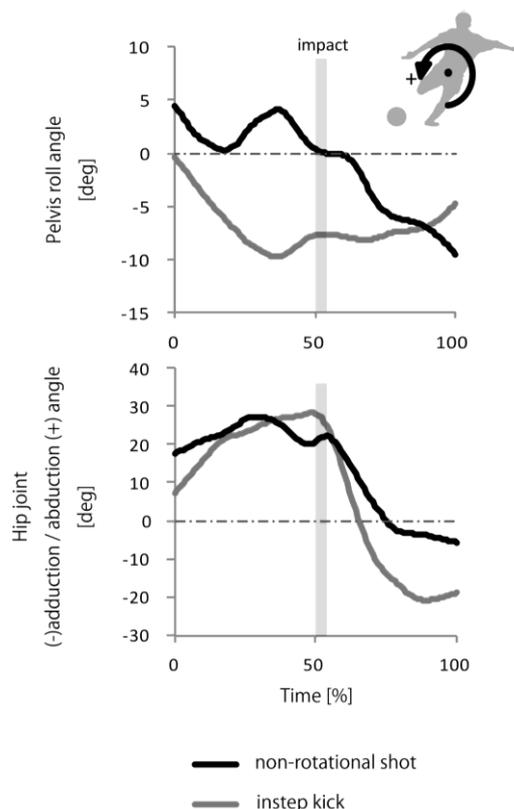


Fig.4 Pelvis and Hip joint kinematics recombined from the PCS of PCV3

た時の足部軌跡を頭上から見ると、その軌跡は直線となることが予想される。PCV2、PCV3における再構築後の骨盤ロール角および蹴り脚股関節外転角度の波形から、無回転FKではインステップキックと比較して地面に対する蹴り脚大腿の振りが垂直に近い状態であったと解釈できる。このことから、無回転FKでは、蹴り脚股関節の外転角度および骨盤ロール角を0[deg]に近づけることで

水平面内での足部軌跡を直線に近づけていたと考えられる。

5. おわりに

本稿では、無回転FK動作時の骨盤および下肢挙動の特徴を記述することを目的とし、PCAを用いて解析を行った。その結果、PCV2、PCV3において無回転FK時の特徴が表れた。PCV2では、骨盤の前方でインパクトすること、蹴り脚股関節の外転角度を0[deg]に近づけることにより、蹴り脚を地面に対して垂直に振るといった特徴が見られた。また、PCV3では、インパクト近傍の骨盤ロール角を0[deg]近づけることで、蹴り脚を地面に対して垂直に振るといった特徴が表れた。以上から、無回転FKでは、骨盤の前でインパクトすることで、足部からボールに作用する力ベクトルをボール重心に向けていること、インパクト近傍で、骨盤のロール角、蹴り脚股関節の外転角度の両者を0[deg]に近づけることで水平面内の足部軌跡を直線としていることが示唆された。

参考文献

- 1) Asai, T. et al. Flow visualization on a real flight non-spinning and spinning soccer ball., *The Engineering of Sport* 6, (2006), pp327-332.
- 2) 新海宏成 ら, 無回転ブレ玉キックのボールインパクト, *バイオメカニクス研究* Vol.12, No.4, (2008), pp252-258
- 3) Hong, S. et al. Ball impact dynamics of knuckling shot in soccer, *Procedia Engineering* 34,(2012), pp200-205
- 4) Analysis of the swing motion on knuckling shot in soccer, *Procedia Engineering* 13, (2011), pp176-181
- 5) 中村太秋 ら, 無回転フリーキック動作時の骨盤による補償動作, [No.14-40] シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス

2014, C-13

- 6) Federolf, P.A. et al., Application of principal component analysis in clinical gait research: Identification of systematic differences between healthy and medial knee-osteoarthritic gait, *Journal of Biomechanics* 46, (2013), pp2173–2178
- 7) Kobayashi, Y. et al., Key joint kinematic characteristics of the gait of fallers identified by principal component analysis, *Journal of Biomechanics* 47, (2014), pp2424–2429
- 8) Maurer, C et al., Discrimination of gender-, speed-, and shoe-dependent movement patterns in runners using full-body kinematics, *Gait & Posture* 36, (2012), pp40-45
- 9) Winter, A. D., *Bio mechanics and motor control of human movement* second edition, John Wiley & Sons, Inc., (1990), pp51-52