

ボールキック運動における逆-順動力学解析環境の構築

浅井 武^{*1}, 坂本慶子^{*2}, 加藤克也^{*3}, 深津明生^{*3}, 洪性賛^{*1}

Development of an Analysis System for Ball Kicking Motion using Invers and Forward Dynamics

Takeshi ASAI^{*1}, Keiko SAKAMOTO^{*2}, Katsuya KATO^{*3}, Akinobu FUKATSU^{*3}, and Sungchan HONG^{*1}

^{*1} Tsukuba Univ., Inst. of Health and Sports Sciences
Tennodai 1-1-1, Tsukuba city, Ibaraki, 305-8574 Japan

^{*2} Doctoral Program of Tsukuba Univ., Inst. of Health and Sports Sciences
Tennodai 1-1-1, Tsukuba city, Ibaraki, 305-8574 Japan

^{*3} Cybernet Systems Co., Ltd.
FUJISOFT Bldg. 3 Kanda-neribeicho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0022 Japan

In studies dealing with body movement and sports techniques, a method that is commonly used involves analysing joint torque using inverse dynamics based on kinematic data obtained through motion capture systems. On the other hand, another analytic technique that has become increasingly common entails generating movements and performing simulations on the basis of the force data for joint torque and the like; this technique employs forward dynamics to calculate the kinematic data. In general, however, the inverse dynamics and forward dynamics analyses are performed independently, and there have been almost no studies in which analysis is conducted by combining the two analyses. Therefore, in this study, an analytic environment was constructed for analysing the motion of kicking a soccer ball, in which inverse dynamics and forward dynamics were combined; the environment was constructed by using a formula manipulation language based on a simple two-dimensional double pendulum model. The results showed that although the kinematic data obtained from the motion capture system did not completely match the kinematic data obtained from the simulation in which forward dynamics was used, adequate agreement was observed between the two sets of data. In this study, it was considered that the development of an analytic environment that combined inverse dynamics and forward dynamics enabled a more refined analysis of the motion of kicking a ball.

Key Words : Inverse Dynamics, Forward Dynamics, Double Pendulum, Joint Torque, Kick

1. 緒言

身体運動やスポーツ技術を研究する場合、モーションキャプチャシステムによる運動学的データを基に、逆動力学を用いて関節トルク等を分析する手法がよく用いられる⁽¹⁾⁽²⁾。一方、関節トルク等のフォースデータを基に、順動力学を用いて運動学的データを算出し、運動の生成やシミュレーションを行うことも重要な分析手法となっている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、逆動力学解析、または順動力学解析を、それぞれ独立して実施する機会が多く、その両方を関連、組み合わせて解析した研究はほとんどない⁽⁶⁾。その大きな原因として、逆動力学解析と順動力学解析では既知と未知のデータが全く逆であること、また、運動方程式の形が異なり、正確に、かつ効率よく運動方程式を生成、導出することが困難であること等があげられる。そこで本研究では、シンプルな2次元2重振り子モデルを基に、数式処理言語で形成された、サッカーのボールキック運動分析のための、逆動力学と順動力学を組み合わせた解析環境の構築を試みた。

^{*1} 正員, 筑波大学 (〒305-8574 つくば市天王台1-1-1)

^{*2} 学生員, 筑波大学大学院人間総合科学研究科

^{*3} 正員, サイバーネットシステム株式会社

E-mail: asai@taiiku.tsukuba.ac.jp

2. 方法

2.1 運動方程式

本研究では、2次元の2重振子モデル（図1）を対象に、MapleSim 6 (Cybernet Systems Co., Ltd.) におけるマルチボディダイナミクスシステムを用いて運動方程式を導出した（式 1-2）。また、運動方程式の整合性を確認するため、運動エネルギーと位置エネルギーから構成されるラグランジェ関数により、別途、2重振子モデルの運動方程式を導出した。運動方程式の導出には、数式処理言語の Maple 16.01 (Cybernet Systems Co., Ltd.) を用いた。運動の記述は、ボールキック運動を行う右下肢のみとし、膝関節、股関節の2重振子としてモデリングを行った。ボールキックの運動は、矢状面に平行な2次元平面で生起するものとし、股関節（振子の支点）は回転運動と共に並進運動も実現できるように定義した。

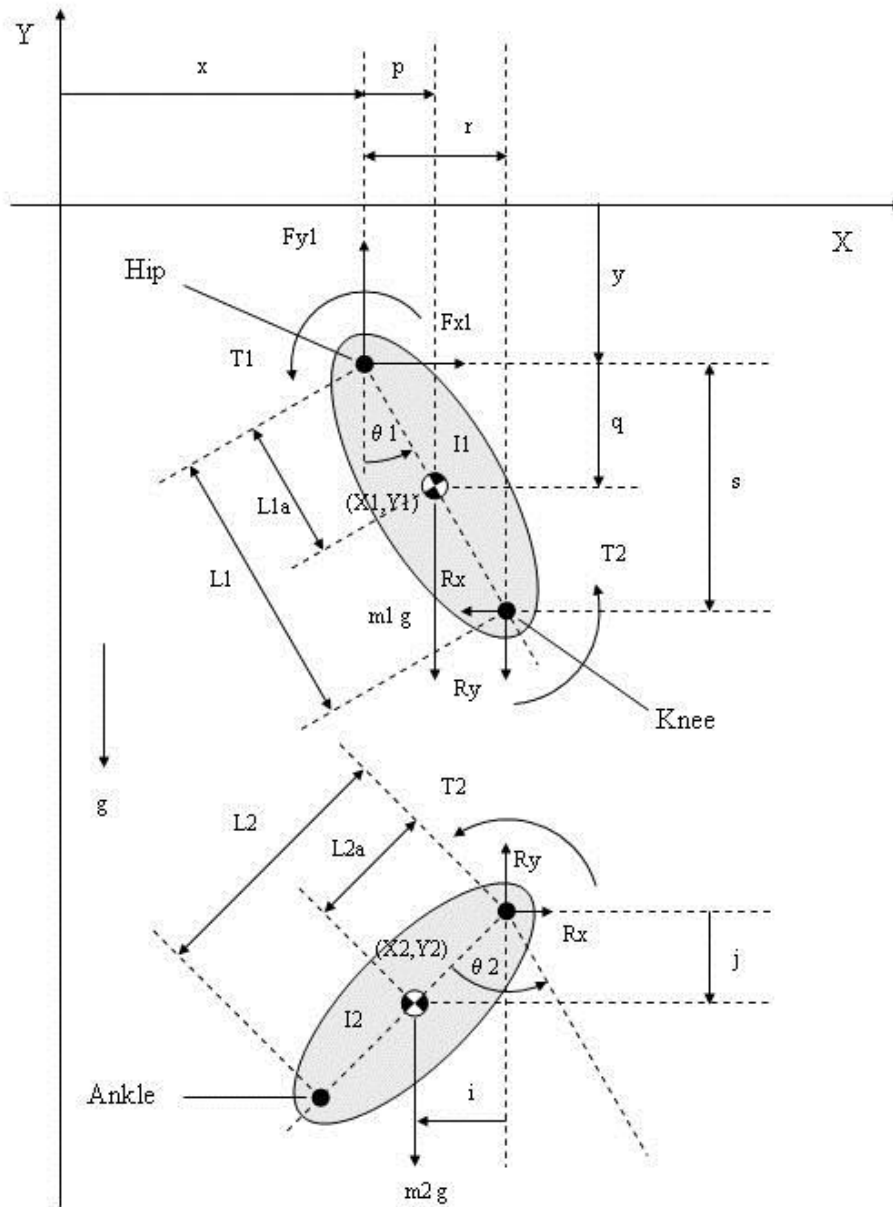


図1 2次元2重振子モデル

$$\begin{aligned}
T1(t) = & m2 L1^2 \ddot{\theta}_1(t) + m1 L1 a^2 \ddot{\theta}_1(t) + m1 L1 a \cos(\theta_1(t)) \ddot{x}(t) \\
& + m1 L1 a \sin(\theta_1(t)) \ddot{y}(t) + m2 \ddot{x}(t) L1 \cos(\theta_1(t)) \\
& + m2 \ddot{y}(t) L1 \sin(\theta_1(t)) + m2 g L1 \sin(\theta_1(t)) + m1 g L1 a \sin(\theta_1(t)) \\
& + m2 L2 a \cos(\theta_2(t)) \ddot{\theta}_2(t) L1 + 2 m2 L1 \dot{\theta}_1(t) L2 a \cos(\theta_2(t)) \\
& - m2 L2 a \sin(\theta_2(t)) \dot{\theta}_2(t)^2 L1 - 2 m2 L2 a \sin(\theta_2(t)) \dot{\theta}_1(t) \dot{\theta}_2(t) L1 \\
& + I1 \ddot{\theta}_1(t) + I2 \ddot{\theta}_1(t) + I2 \ddot{\theta}_2(t) + m2 L2 a^2 \ddot{\theta}_1(t) + m2 L2 a^2 \ddot{\theta}_2(t) \\
& + m2 \ddot{x}(t) L2 a \cos(\theta_1(t)) \cos(\theta_2(t)) \\
& + m2 \ddot{y}(t) L2 a \sin(\theta_1(t)) \cos(\theta_2(t)) \\
& + m2 \ddot{y}(t) L2 a \cos(\theta_1(t)) \sin(\theta_2(t)) + m2 g L2 a \sin(\theta_1(t)) \cos(\theta_2(t)) \\
& + m2 g L2 a \cos(\theta_1(t)) \sin(\theta_2(t)) - m2 \ddot{x}(t) L2 a \sin(\theta_1(t)) \sin(\theta_2(t))
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
T2(t) = & m2 L1 \dot{\theta}_1(t)^2 L2 a \sin(\theta_2(t)) + m2 L1 \ddot{\theta}_1(t) L2 a \cos(\theta_2(t)) \\
& + I2 \ddot{\theta}_1(t) + I2 \ddot{\theta}_2(t) + m2 L2 a^2 \ddot{\theta}_1(t) + m2 L2 a^2 \ddot{\theta}_2(t) \\
& + m2 \ddot{x}(t) L2 a \cos(\theta_1(t)) \cos(\theta_2(t)) \\
& + m2 \ddot{y}(t) L2 a \sin(\theta_1(t)) \cos(\theta_2(t)) \\
& + m2 \ddot{y}(t) L2 a \cos(\theta_1(t)) \sin(\theta_2(t)) + m2 g L2 a \sin(\theta_1(t)) \cos(\theta_2(t)) \\
& + m2 g L2 a \cos(\theta_1(t)) \sin(\theta_2(t)) - m2 \ddot{x}(t) L2 a \sin(\theta_1(t)) \sin(\theta_2(t))
\end{aligned} \tag{2}$$

2・2 モーションキャプチャ

サッカーのボールキック動作を対象に、光学式モーションキャプチャシステム（Vicon 370, Vicon Motion Systems Ltd.）を用いて、研究協力者（被験者）下腿の足関節、膝関節、股関節の位置座標を取得した。その位置座標より、各関節の速度、加速度を算出した。

2・3 逆動力学

モーションキャプチャで得られた運動学的データ（位置、速度、加速度）を基に、運動方程式を通して各関節トルク等を算出した。算出した範囲は、バックスイングからボールインパクト直前までの局面とし、ボールと足部の接触局面は計算されなかった。下腿の解剖学的データは、身体部分質量等⁽⁷⁾より求めた。

2・4 順動力学

運動方程式に関節トルク等の動力的データを入力し、各変位、各速度、各加速度を算出した。順動力学解析で算出された運動学的データの妥当性を検討した後、力データをパラメータとした順動力学的シミュレーションを実施した。本研究では、パイロットケースとして、股関節並進力の鉛直成分がスイング速度に及ぼす影響について検討した。

2・5 解析の手順

1. モーションキャプチャシステムにより、蹴り足側下肢の運動学的位置データを取得する。
2. MapleSim のマルチボディダイナミクスシステムにより、逆動力学運動方程式を生成する。
3. ラグランジェ関数法により、逆動力学運動方程式を導出し、MapleSim による運動方程式との整合性を確認する。
4. 運動学的位置データと逆動力学運動方程式から、各関節トルク等を算出する。
5. 各関節トルク等と順動力学運動方程式から、各関節の位置、速度、加速度を算出する。
6. 算出された運動学的データと、動力的データの妥当性や信頼性を検討する。

7. カデータを入力とした順動学的シミュレーションのパイロットケースとして、股関節並進力の鉛直成分がスイング速度に及ぼす影響について検討する。

MapleSim (モデルベース)

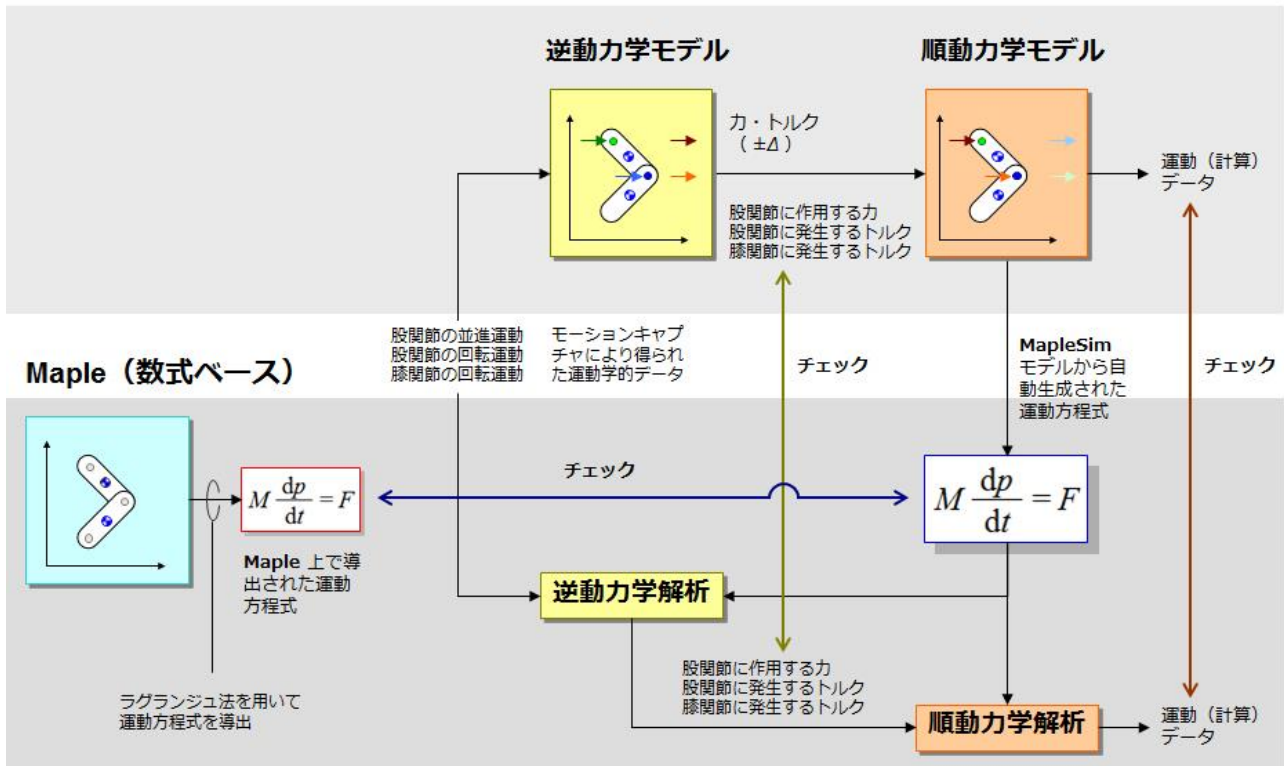


図2 逆動力学と順動力学を組み合わせたボールキック動作解析環境

3. 結果 及 び 考 察

モーションキャプチャデータにおけるインパクト直前の足関節速度は、約 23.1 m/s であり、先行研究⁽⁸⁾の約 23.8m/s と類似の値を示した。速度カーブも同様の傾向を示しており、妥当な範囲と判断して、以後の数値計算等に用いた。MapleSim のマルチボディダイナミクスにより得られた逆動力学運動方程式は、ラグランジュ法で導出された逆動力学運動方程式と、自明のことながら合致し、その妥当性、整合性が確認された。その逆動力学運動方程式を用いて求められた各関節トルクは、先行研究⁽⁸⁾と同様の値を示した。各関節トルク等と順動力学運動方程式を用いて算出した位置、速度、加速度は、モーションキャプチャデータによって得られた計測値と極めて近い値であったが、完全に合致してはいなかった。理論的には完全に合致するべきであるが、離散化誤差や計算スキームの誤差、データスムージングの影響等が、計算誤差の大きな原因の一つであると考えられる。順動力学シミュレーションとして、股関節並進力の鉛直成分がスイング速度に及ぼす影響をみると、鉛直成分が大きくなるほど、スイング速度も増加する傾向を示した(図 3-4)。このことから、インステップキック動作時に軸足を進展し、蹴り足の股関節を上方に加速することは、スイング速度を増大させると考えられ、ボール速度を増加させる一つの技術要素になることが示唆される。また、本研究では、順動力学を基にしたシミュレーションを実施しており、定量的な技術評価にも結び付くと思われる。本研究で試作された解析環境は、2次元2重振り子モデルを基にしたものであるが、3次元に拡張することは、数学的にも可能であり、実際の運動が3次元的に実行されていることを踏まえ、今後の重要な課題の一つであると考えられる。さらに、本システムは、数式処理言語を基に構築されており、従来、力学等の専門的知識が乏しく、運動方程式の正確な導出等に問題を抱えることが少なかった体育、スポーツ関係者に対しても、受け入れやすい解析環境として提案可能であると考えられる。

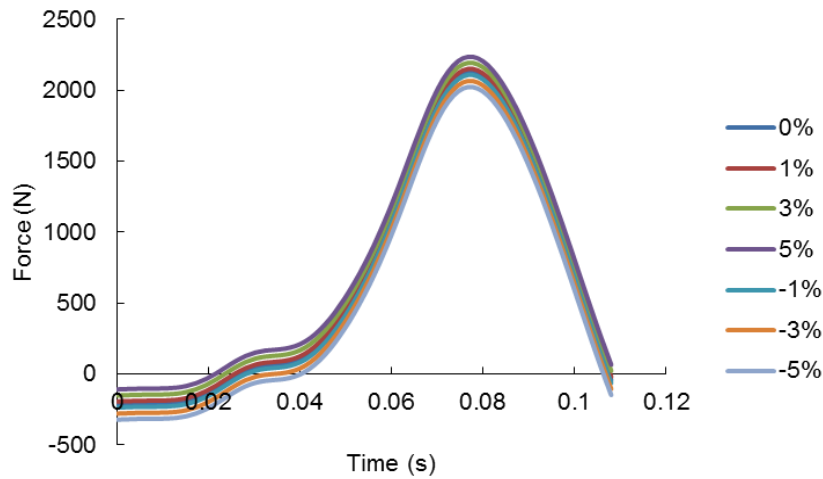


図3 順動力学シミュレーションにおける股関節鉛直方向力（入力データ）

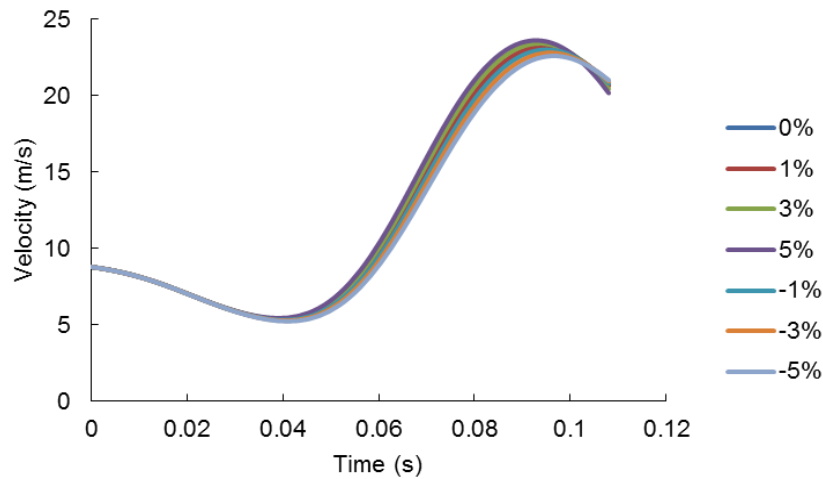


図4 順動力学シミュレーションにおける足関節水平方向速度（出力データ）

4. ま と め

本研究では、シンプルな2次元2重振り子モデルを基に、数式処理言語で形成された、サッカーのボールキック運動分析のための、逆動力学と順動力学を組み合わせた解析環境の構築を試みた。結果を以下に要約する。

1. 数式処理ベースのモデリングツール (MapleSim 6) を用いることにより、比較的簡便に逆動力学、及び順動力学の運動方程式を得ることができた。
2. 順動力学シミュレーションにおける、股関節並進力の鉛直成分がスイング速度に及ぼす影響では、鉛直成分が大きくなるほど、スイング速度も増加する傾向を示した。
3. サッカーのボールキック運動分析のための、逆動力学と順動力学を組み合わせた解析環境が試作された。

文 献

- (1) Fujii, N. and Hubbard, M., "Validation of a Three-Dimensional Baseball Pitching Model", Journal of Applied Biomechanics, 18, (2002), pp135-154.

- (2) Naito, K. and Maruyama, T., “Contributions of the muscular torques and motion-dependent torques to generate rapid elbow extension during overhand baseball pitching”, *Sports Engineering* 11(1) (2008), pp47-56.
- (3) 長谷和徳, 山崎信寿, “神経振動子と遺伝的アルゴリズムを用いた実2足歩行類似運動の生成”, 計測自動制御学会論文集, 33-5 (1997), pp448-454.
- (4) Hase, K., Kaya, M., Zavatsky, A.B., Halliday, S.E., “Musculo-skeletal loads in ergometer rowing”, *Journal of Applied Biomechanics*, 20 (2004), pp317-323.
- (5) Casius, L. J. R., Bobbert, M. F. and Soest A. J., “Forward Dynamics of Two-Dimensional Skeletal Models. A Newton-Euler Approach.”, *Journal of Applied Biomechanics*, 20 (2004), pp421-449.
- (6) 小池関也, “動作分析のための各種解析手法”, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集, 日本機械学会, 12-39, (2012) pp17-22.
- (7) 阿江通良, “日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数”, *Jpn. J. Sports. Science* 15 (1996), pp155-162.
- (8) Nunome, H., Asai, T., Ikegami, Y. and Sakurai, S. Three-dimensional Kinetic Analysis of Side-Foot and Instep Soccer Kicks, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2002, 34(12), 2028–2036.