

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12642

研究課題名(和文) 高速スポーツ動作生成メカニズムの即時提示システムの開発

研究課題名(英文) Development of a showing system for generating mechanism of high-speed sports motion

研究代表者

小池 関也 (KOIKE, Sekiya)

筑波大学・体育系・准教授

研究者番号：50272670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：高速スウィング動作では、キネマティクスあるいはキネティクスの情報だけでは、その動作生成メカニズムを明らかにすることは困難である。そこで、走動作の遊脚運動を対象として、下胸部および下肢各節に貼付した慣性センサの情報から、動作を推定するための方策を考案した。すなわち、各センサの加速度および角速度出力が満たす加速度関係式から、各セグメントの姿勢パラメータを推定するための非線形方程式を導出することによって、各セグメントの姿勢推定を可能とするとともに、推定された動作に対して、多体系の運動方程式から動作生成のメカニズムを定量化する動力学的分析を行い、スウィング動作生成のしくみを定量化可能とした。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study were 1) to develop a portable posture analysis system, using inertial sensors, that estimates configuration of limbs during swing motion (e.g. running motion), and 2) to quantify the functional roles of joint torques in generating the motion based on multi-body dynamics, for immediate feedback in coaching field utilization. The swing leg motion during running was measured using IMUs attached to the lower trunk, thigh, shank and foot segments. In order to obtain the configuration of limbs, the error of the estimated hip joint acceleration from IMU of the lower trunk and the acceleration from IMU of the foot segment was minimized to identify 9 parameters of initial coordination system of the segments through a partial differential method. The results of dynamic contribution analysis using the estimated motion data show almost good agreements with those obtained with a motion-capture system in terms of generating mechanism of knee joint angular velocity.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：動力学的貢献 提示 即時フィードバック 動作生成メカニズム 高速スウィング動作 慣性センサ

### 1. 研究開始当初の背景

従来の慣性センサ情報を用いたスポーツ動作の分析では、主に身体動作のキネマティクスあるいはキネティクス情報の獲得とその精度向上に主眼が置かれており、比較的低速な関節運動における身体各セグメントの姿勢計測精度の向上や、高速スウィング動作についても打具や上肢についての部分的な情報の獲得が主として行われている。

高速スウィング動作では、キネマティクスあるいはキネティクスの情報だけでは、その動作生成メカニズムを明らかにするには不十分であり、対象とする系の運動方程式を利用した動力学的な分析を行う必要がある。また、これらの知見は、モーションキャプチャーを用いた大規模な計測システムを使用して得られる知見であるため、スポーツの現場においてその有用性を展開しようとしても、コスト、人員、時間等が大きな制約となってしまう、有効な知見を手軽に広く活用してもらうことが非常に困難となっているのが現状であった。

### 2. 研究の目的

スポーツ動作において頻出する高速スウィング動作を主な対象として、モーションキャプチャーを使用して高速スウィング動作の生成メカニズムを定量化するとともに、高速スウィング動作を行っている主要な節からなる多体系を対象として、身体各節に貼付した小型・軽量の慣性センサの情報から動作を推定する手法を考案したのちに、対象とする多体系の運動方程式から動作生成のメカニズムを定量化する動力学的分析を行い、動作生成のしくみを明らかにする「スウィング技術の見える化」を実現する。なお、対象とする動作については、走動作とし、対象とする動きとしては、高速なスウィング動作が発現しているスウィング脚（遊脚）の膝関節屈曲伸張軸運動とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 疾走動作の動力学的分析

ここでは、高速スウィング動作の発現メカニズムを明らかにするために、陸上短距離選手による疾走時スウィング脚動作の発現メカニズムを詳細に定量化する。

#### ・系の運動方程式の導出

まず、対象とする系の各セグメントの重心速度ベクトルおよび角速度ベクトルからなる一般化速度ベクトルを用いて、各セグメントの単体の並進および回転の運動方程式を全セグメント分、行列形式にまとめる。

次に、隣り合うセグメントが関節により連結されるための幾何学的な連結拘束式を、全身の関節について一般化速度ベクトル  $V$  を用いて行列形式にまとめる。

さらに、各関節における受動的な関節軸自由度を考慮するための幾何学的拘束式を、全身の関節について一般化速度ベクトル  $V$  を用いてまとめる

ここで、受動的な関節軸自由度を考慮した場合、関節作用モーメントは能動的発揮トルクと受動的発揮トルク(拘束トルク)に分けて表すことができる。これらの行列形式の式として得られたものを連立することによって、系の運動方程式は

$$\begin{aligned} & \text{加速度ベクトル (回転・並進, 全節)} \\ & = (\text{関節トルク項}) + (\text{運動依存項}) \\ & \quad + (\text{重力項}) + (\text{モデル化誤差項}) \end{aligned}$$

と表すことができる。ここで、モデル化誤差項として、全身のセグメントの伸縮成分による誤差、そして、主に慣性パラメータ誤差に起因する関節モーメントおよび関節力の残差などを考慮している。

#### ・運動依存項の生成要因の特定および関節運動の生成メカニズムの定量化

系の運動方程式と加速度の差分近似式を連立することにより、一般化速度ベクトルに関する漸化式を得る。この速度漸化式により、運動依存項を関節トルク項および重力項へと変換でき、運動依存項の生成要因を特定することが可能となる。このため、股関節および膝関節の屈曲伸張運動の生成メカニズムを定量化するために、この速度漸化式を用いて各関節角速度に対する各関節トルクの動力学的な貢献を算出した。

#### ・疾走動作データ取得実験

被験者は男子短距離選手 8 名で、試技は 60m 全力疾走とした。被験者には、100m 走のレースを想定して、クラウチングスタートからスタートを行わせた。光学式 3 次元自動動作分析装置 (Vicon Motion System 社製、VICON-MX, 250Hz) により被験者の身体代表点に貼付した反射マーカの 3 次元座標を、フォースプレート (Kistler 社製、1000Hz) により地面反力をそれぞれ測定した。

#### (2) 慣性センサを用いた運動生成メカニズムの定量化

ここでは、スウィング脚動作の発現メカニズムを慣性センサ情報から定量化する手法について示す。

#### ・身体モデル化

図 2 に示すように、下肢を 3 つのセグメントから構成される多体系の剛体リンクモデルとして扱う。

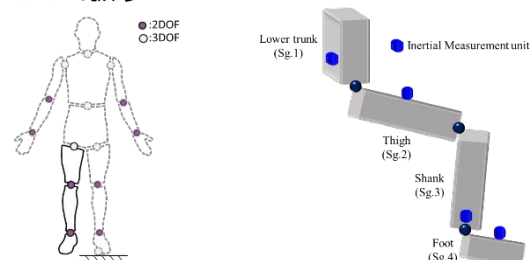


図 1. 慣性センサを利用した動作分析におけるモデル図

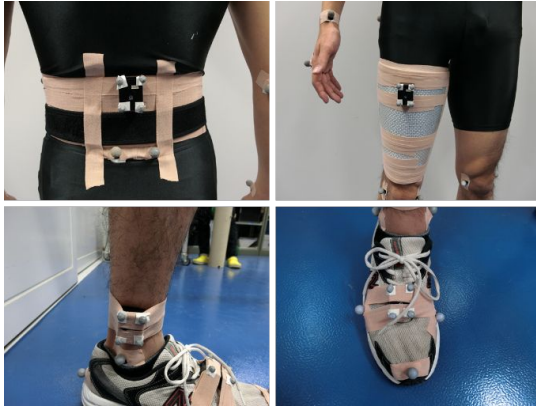


図2. 慣性センサ貼付の様子

・慣性センサ間の加速度関係式

下胴と足部に貼付した慣性センサ間の加速度関係式は、各セグメント重心位置からそのセグメントに固定されているセンサまでの位置ベクトル、および各セグメントの姿勢行列を用いて表すことができる。

・各セグメントの姿勢変化の算出

遊脚の各セグメントの姿勢は時々刻々変化する。各セグメントに貼付した慣性センサが出力する角速度を用いて分析開始時からの各セグメントの姿勢変化分を算出することができる。このため、各セグメントの初期姿勢パラメータが推定できれば、各時刻のセグメント姿勢を求めることができる。

初期姿勢パラメータの推定については、下胴に貼付した慣性センサの加速度および角速度出力により計算される股関節の加速度と、大腿および下腿に貼付した慣性センサの角速度出力に加えて足部に貼付した慣性センサの加速度および角速度出力から計算される股関節の加速度の残差ノルムが最小になるように、姿勢パラメータ(ロール・ピッチ・ヨー角)に関する変分式に基づく偏分反復法を用いて、各セグメントの初期姿勢パラメータの推定を行った。その際、偏分反復法にて算出されるパラメータの変化分をそのまま用いてパラメータを更新するのではなく、多体系の強い非線形性に対応するために1より小さな値をかけて更新することとする。このように、初期姿勢パラメータ(ロール・ピッチ・ヨー角)に関する繰り返し計算により、そのパラメータが求まり、その結果、各時刻の各セグメント姿勢の推定が可能となる。

・走動作データ取得実験

慣性センサを用いた動力的分析の有効性を検証するための実験において、被験者は健康な成人男性で、試技は30m走とした。被験者には、スタンディングスタートからスタートを行わせた。光学式3次元自動動作分析装置(Vicon Motion System社製、VICON-MX、

250Hz)により被験者の身体代表点に貼付した反射マーカの3次元座標を、下胴、大腿、下腿、足部に貼付した慣性センサ(スポーツセンシング社製、50G/1500dps × 3台、50G/6000dps × 1台)により貼付位置の加速度および角速度をそれぞれ測定した。

4. 研究成果

(1)短距離疾走動作の動力的分析

図3および図4に、短距離疾走動作の最大速度局面における遊脚の膝関節屈曲伸張角速度に対する関節トルクの貢献(即時的効果)、その運動依存項の生成要因(累積的效果)の結果をそれぞれ示す。なお、結果は被験者8名分の平均値および標準偏差を示している。

遊脚期を通して遊脚の股関節屈曲伸張トルクが屈曲角速度に貢献し、逆脚の股関節屈曲伸張トルクは伸張角速度に貢献していた。

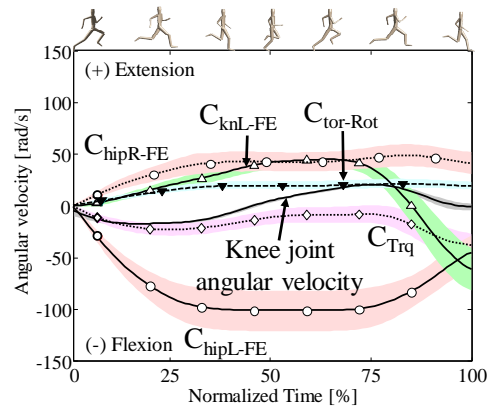


図3. 遊脚膝関節の屈曲伸張角速度生成に対する各関節軸トルクの即時的な動力的貢献。図中記号の説明、C:貢献, hip:股関節, kn:膝関節, tor:体幹仮想関節,  $C_{Trq}$ :関節トルクの貢献の総和, L(左脚,遊脚側), R(右脚,反対脚), FE:屈曲伸張, rot:内外旋

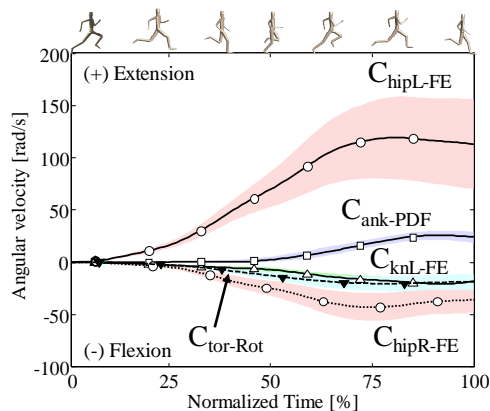


図4. 遊脚膝関節の屈曲伸張角速度生成に対する各関節軸トルクの累積的な動力的貢献。図中記号は図3と同様。ただし, ank:足関節, PDF:底背屈

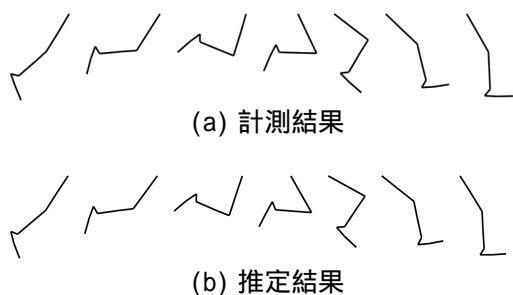
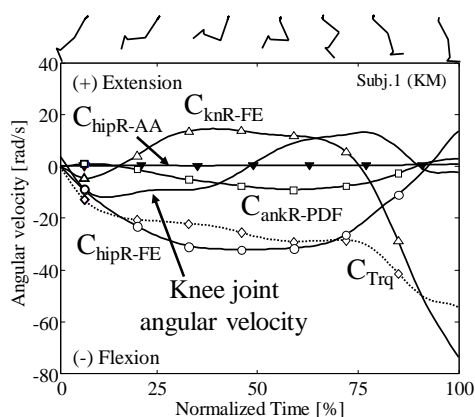
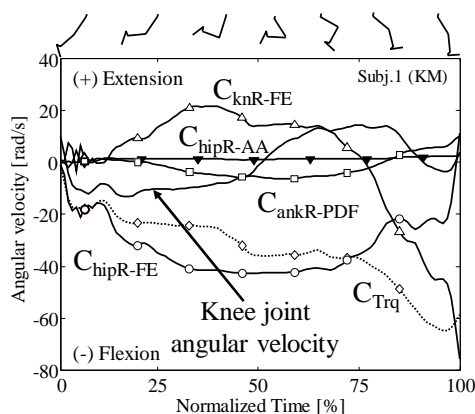


図5.慣性センサを用いたセグメント姿勢の推定



(a) モーションキャプチャーデータからの算出結果



(b) 推定データからの算出結果

図6.慣性センサを用いた遊脚膝関節角速度生成メカニズムの定量化. 図内記号は, 図3,4と同様

遊脚期中盤 40% ~ 60% で遊脚および逆脚の股関節屈曲伸展トルクの貢献は最大値を示した. 加えて, 遊脚の膝関節屈曲伸展トルクは遊脚期中盤 70% まで伸展角速度に貢献し, その後, 接地に向けて屈曲角速度に貢献していた. 遊脚の股関節屈曲伸展トルクは, 遊脚期終盤 80% ~ 100% で累積的效果が最大値を示し, 運動依存項の大半を生成していた. ま

た, 遊脚の膝関節屈曲伸展トルクおよび逆脚の股関節屈曲伸展トルクは運動依存項を打ち消すような役割を果たしていた. そのため, 遊脚の膝関節屈曲伸展動作は股関節の屈曲伸展動作に起因して生成されていると考えられることがわかった.

## (2) 慣性センサを用いた分析

まず, 図5に, 定速走における実験データと推定データにおける遊脚各セグメント姿勢の様子を示す. 同図から, 矢状面内運動については, 動作の推定が可能であることがわかる. つぎに, 図6には, 同じく実験データと推定データによる, 膝関節屈曲伸展角速度に対する関節トルクの貢献(即時的効果)の結果を示す. 同図から, 実験データと推定データにおける股関節屈曲伸展トルク, 膝関節屈曲伸展トルクの貢献の様相は同様であるものの, 貢献のタイミングおよび値が若干異なっていた. 今後, 慣性センサの精度向上, 貼付方法および揺動低減方法の検討を行うことにより, 推定データの結果は実験データの結果に近づくと考えられる.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

小池 関也, 須藤 慎吾: 慣性センサを用いた高速スウィング動作における身体姿勢推定. 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017 講演論文集 USB, 2017. 査読無

小池 関也, 須藤 慎吾: 慣性センサを用いた遊脚動作生成メカニズムの定量化. 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集 USB, 2017. 査読無

Sekiya KOIKE and Shingo Sudo: Main contributors to hip joint motion in swing leg during maximal velocity phase in sprint. Proceedings of the 34th International Conference on Biomechanics in Sports, 715-718, 2016. 査読有

[学会発表](計6件)

小池 関也, 須藤 慎吾: 慣性センサを用いた遊脚動作生成メカニズムの定量化. 日本機械学会 2017 年度年次大会, 埼玉大学(さいたま市, 埼玉県), 2017.9.4.

小池 関也, 須藤 慎吾: 慣性センサを用いた高速スウィング動作における身体姿勢推定. 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017 講演会, 愛知大学(愛知県・豊橋市), 2017.8.30.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小池 関也 (KOIKE, Sekiya)  
筑波大学・体育系・准教授  
研究者番号: 50272670