

テーマ2 モーションキャプチャーで人の動きを見てみよう

岡田 英孝

電気通信大学大学院 情報理工学研究科／脳科学ライフサポート研究センター

概要

本講義では、はじめに、光学式 3 次元モーションキャプチャシステムを使用して物体の運動を計測し、質点モデル、剛体モデルを用いて解析する。次に、ヒトの身体に再帰性反射マーカを貼付し、マーカの 3 次元位置座標を計測する。複数のマーカの位置座標を用いて身体セグメント上に移動座標系を定義し、運動中の身体各部の振る舞い（キネマティクス）や力・トルク・パワー発揮（キネティクス）を解析する方法について学ぶ。

1. はじめに

身体運動を記述する方法の一つに映像を用いた動作の計測があげられる。従来、映画撮影法や VTR 撮影法が用いられてきたが、近年ではこれらに加えて光学式モーションキャプチャシステムが発展、普及している。本テーマでは、以下の実験を通じて、光学式 3 次元モーションキャプチャシステムを用いた身体運動の計測と解析方法について学ぶことを目的とする。

- 1) ボールの放物運動（位置）の計測・解析
- 2) 円柱体の放物運動（位置と姿勢）の計測・解析
- 3) ヒトの垂直跳動作の計測・解析

2. 身体運動の記述（運動計測）

2.1 二人の先駆者

映像を用いた運動の記述はいつ頃から行われてきたのであろうか。古くは 500 年以上前に Leonardo da Vinci(1452-1519)が動物を力学的法則の適用できる機械として記述したそうであるが、その方法は専ら観察とスケッチによるものであった。映像を用いて運動が客観的に記録されたのは 19 世紀の後半である。写真技師であったイギリス人の Eadweard Muybridge(1830-1904)は 12 台のカメラを走路に平行に並べ、疾走する馬の連続撮影に成功した。動画のない当時としては画期的であり、この連続写真が映画の誕生につながった。また、同時期に生理学者であったフランスの Étienne-Jules Marey(1830-1904)はクロノフォトグラフィーという手法を用いて棒高跳び選手の動作の撮影に成功した。また、クロノフォトグラフィックガンという装置の開発も行っており、これは映画撮影のはしりともいえる。この二人は映像を用いた運動記述の先駆者であり、現在のバイオメカニクス研究、とりわけ

動作分析の礎を築いたともいえる。

2.2 運動計測のための映像技術の変遷

映画撮影が登場した 19 世紀後半から 1980 年代までは、映像を用いた運動計測はフィルムを使った映画撮影法により行われてきた。この撮影法では、カメラに 16mm フィルムをセットし、モーターで送られたフィルムを露光することによって像を得る。映画撮影法では、分析に耐えうる画像を得るためにカメラに対する専門知識を必要とした。また、フィルムを現像するまで撮影された映像を見ることができないことやフィルム代、現像代などの費用がかさむことが難点であった。

フィルム撮影に代わる映像技術として、1950 年代半ばにビデオ撮影が登場した。ビデオの登場により、撮影にかかる手間（カメラセッティングなど）や映像の取得に至るまでの時間と費用が劇的に短縮された。映画撮影やフィルム撮影で取得した映像から身体標点の座標値を得るにはディジタイズ（マウスなどを用いて分析点の座標値を取得する作業）を行う必要がある。これには多大な人的労力と時間がかかり、また、分析の精度は作業者の力量に依存するものであった。

1980 年代に光学式モーションキャプチャシステムが開発され、これによりマーカの位置座標の読み取りが自動化できるようになった。一般的な光学式モーションキャプチャシステムでは、測定点に貼付した再帰性反射マーカに赤外線カメラのレンズ周辺に配置した LED から赤外線を照射し、その反射光を複数台のカメラで撮影する（図 1）。

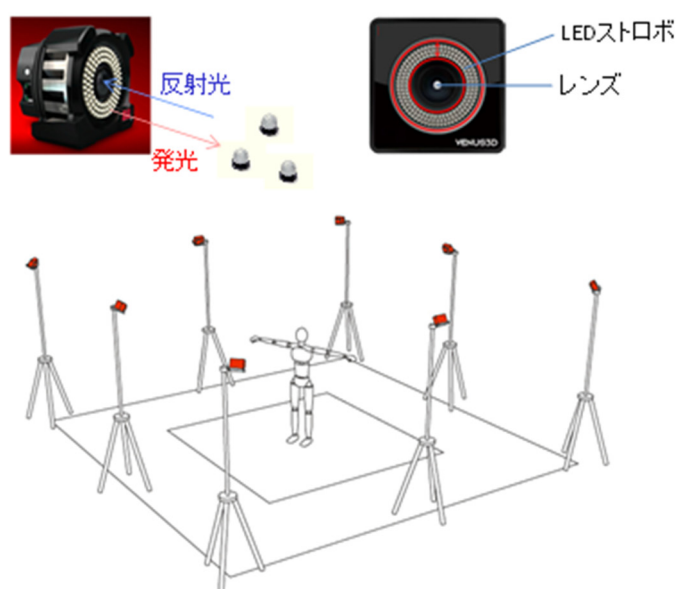


図1 光学式モーションキャプチャシステムにおける赤外線カメラとカメラ配置の例

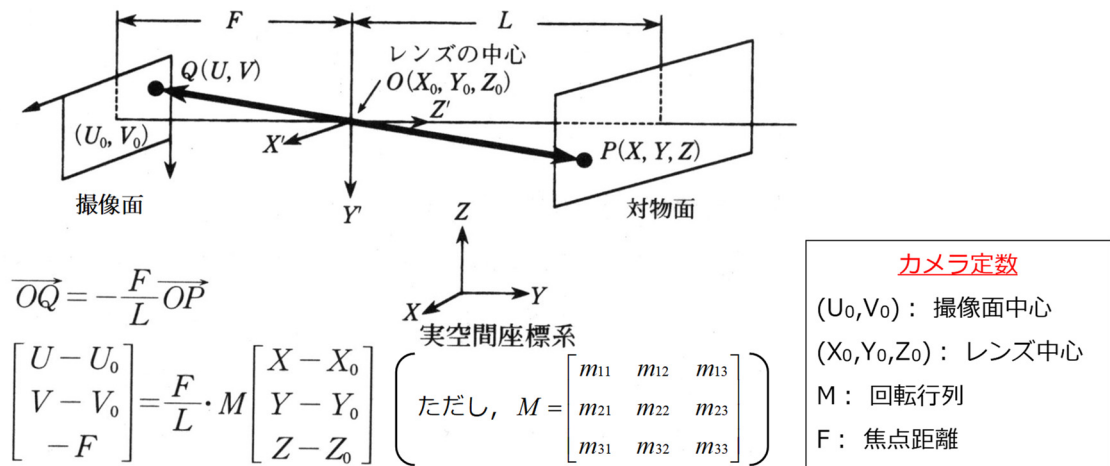


図2 実空間における点の3次元座標とカメラの撮像面上に投影された2次元座標との関係

3. 運動の計測と解析

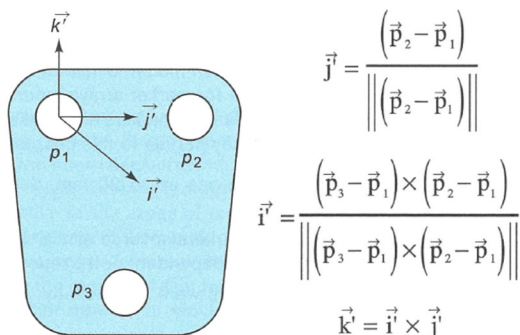
3.1 計測の準備 (カメラ定数と実験室座標系の定義)

実世界における身体運動は全て 3 次元であるが、映像機器からの画像を分析して得られる位置情報は 2 次元である。物体や身体の運動を 3 次元的に計測するには、複数の画像から得られた 2 次元位置情報より 3 次元位置情報を再構築する必要がある。そのため、①計測したい点の全てが常に 2 台以上のカメラに映っていること、②空間におけるカメラの位置、姿勢、焦点距離などの情報(カメラ定数)が既知であること、が必須条件となる(図 2)。通常、②のカメラ定数は未知であるため、カメラ定数に相当する情報を得るためにキャリブレーションを必要とする。キャリブレーションによりカメラ定数が得られた後、原点および直交する 3 軸(X 軸, Y 軸, Z 軸)を定めることで実験室座標系(計測空間)が定義される。

3.2 点の位置の計測

カメラ定数と実験室座標系が定義された後、計測空間内で運動する反射マーカを複数台のカメラで撮影することでマーカの時々刻々の位置(3 次元座標)を取得できる。マーカの形状は球であり、実際には大きさをもつが、質点として扱われる。質点とは、力学上の概念(モデルを記述するための理想概念)であり、質量をもつが、大きさ、形をもたない。真の質点は実在しないが、反射マーカの運動のように質点とみなして考察できる現象は多々ある。大きさをもたないため、質点の振る舞いを記述するのに必要な情報は位置のみであり、その自由度は空間内の運動の場合は 3 つ(X 座標, Y 座標, Z 座標)、平面内の運動の場合は 2 つ(例えば, X 座標, Y 座標)である。

マーカの各軸方向の位置(変位)が得られた後、変位を時間微分することでマーカの速度を得ることができる。さらに、速度を時間微分(変位を二階微分)することでマーカの加速度を得ることができる。



剛体の移動座標系は剛体上の非共線上の3点の位置座標から求める

図3 物体(剛体)上に貼付したマーカー座標を用いた移動座標系の定義

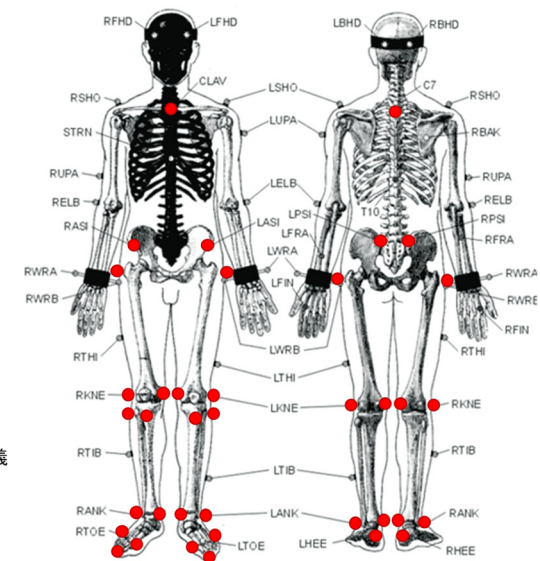


図4 標準的なマーカーセット
(●は本演習で用いるマーカー)

3.3 物体の位置と姿勢の計測

大きさや形をもった物体を計測するには、物体を剛体として扱い、剛体の振る舞いを記述する。

剛体とは、質量と大きさ、形をもち、どんなに力を加えても変形も破断もしない力学上の概念である。剛体の振る舞いを記述するのに必要な情報は位置（重心もしくは剛体上のある点の位置）と姿勢で、その自由度は空間内の運動の場合は6つ（X座標、Y座標、Z座標、姿勢を表す3つの角度）、平面内の運動の場合は3つ（例えば、X座標、Y座標、姿勢を表す1つの角度）である。空間における剛体の振る舞い（位置と姿勢の変化）を3次元的に記述するには、その剛体上にあり同一直線でない（非共線の）最低3点の3次元位置座標を必要とする。この3点を用いて剛体上に移動座標系を定義し（図3）、移動座標系の原点位置と軸の方向により剛体の位置と姿勢を記述する。

剛体の姿勢角（角変位）が得られた後、角変位を時間微分することで角速度を得ることができる。さらに、角速度を時間微分（角変位を二階微分）することで角加速度を得ることができる。

3.4 ヒトの身体運動の計測

身体運動の力学的解析では、大腿、下腿、足などの各身体部分（セグメント）を剛体とみなし、対象とする身体全体（もしくはその一部）を剛体系（剛体リンクモデル）とみなす。各剛体の振る舞いを3次元的に記述するために、各セグメントに3点以上のマーカーを貼付する（図4）。実験室に固定した固定座標系（実験室座標系）におけるマーカーの3次元座標を取得し、マーカー座標より、各セグメントに移動座標系（セグメント座標系）を定義する（図5）。実験室座標系における各セグメント座標系の振る舞いより、キネマティクスおよびキネティクスを算出する。

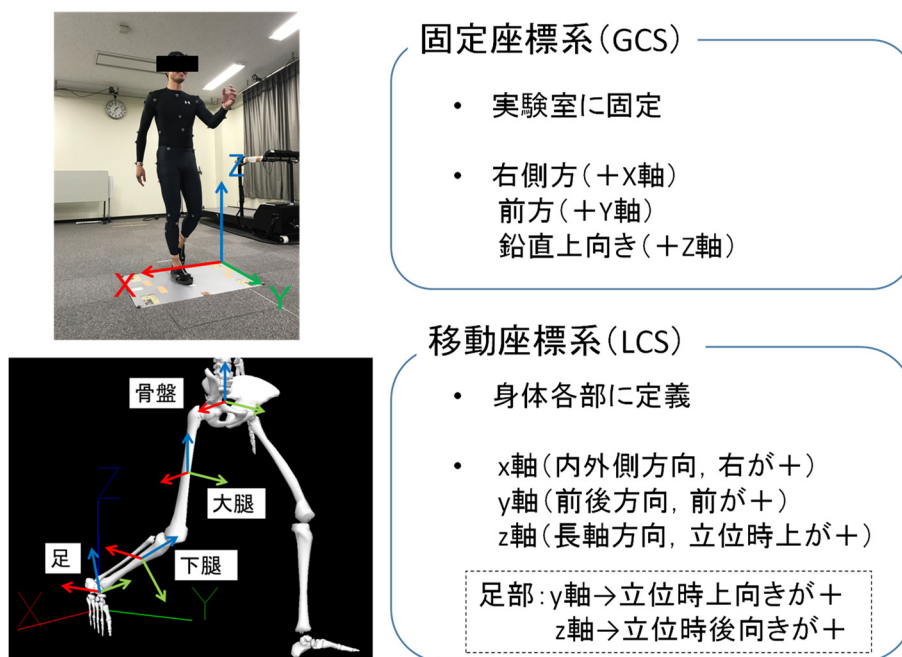


図5 固定座標系と移動座標系

3.5 キネマティクス

キネマティクスとは運動の原因となる力やトルクとは関係なく、動き自体（四肢の姿勢やその変化）を扱う領域のことである。キネマティクスにおける力学量として、変位、速度、加速度、角変位、角速度、角加速度がある。

実験室座標系と各セグメント座標系の関係より、各セグメントの空間における姿勢（部分角度）を算出することができる。また、隣接するセグメント座標系間の関係より関節角度が得られる。部分角度・部分角速度、関節角度・関節角速度、関節点および重心の位置・速度などをキネマティクス変数と呼び、これらに基づき、剛体系である身体の運動について分析することをキネマティクス分析という。

3.6 キネティクス

キネティクスとは運動の原因となる力やトルクを扱う領域のことである。キネティクスにおける力学量として、力、トルク、力積、角力積、パワー、仕事、力学的エネルギーなどがある。

キネマティクスに加え、運動中の外力が既知であれば、逆動力学的解析手法を用いて生体内力（関節力、関節トルク）を算出することができる（図 6）。また、関節トルクと関節角速度の積により、関節トルクパワー（関節トルクによるパワー）を得ることができる。さらに、関節トルクパワーを時間で積分することにより、関節がなした仕事が算出される。

これらは身体運動中の筋の機能や特性、エネルギー利用の有効性などを評価するのに用いられる。

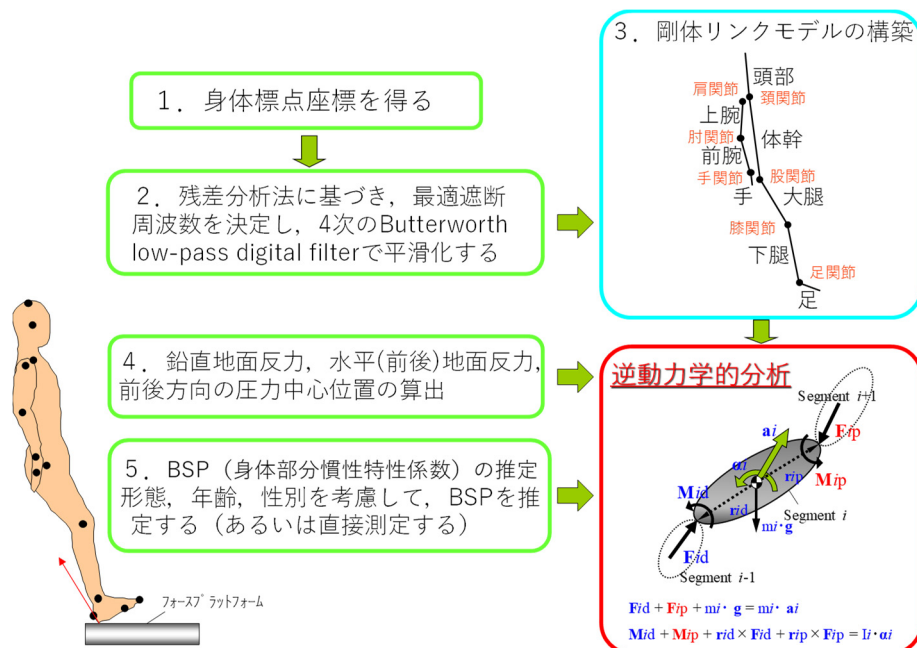


図6 逆動力学的分析による生体内力（関節力、関節トルク）の算出

4. 実験と課題

4.1 実験

- 1) 投射されたボールの位置を計測し、速度、加速度を算出する。
- 2) 円柱体に反射マーカを貼付し、回転させながら投射する。反射マーカの位置を計測し、円柱体の重心の位置、速度、加速度、姿勢角、角速度、角加速度を算出する。
- 3) 身体標点に反射マーカを貼付し、2種類の垂直跳（SQJ：スクワットジャンプ、CMJ：カウントームブメントジャンプ）を行う。同時にフォースプラットフォームにより踏切中の地面反力を計測する。反射マーカの位置を計測し、下肢のキネマティクス変数を算出する。また、地面反力から跳躍距離および重心の振る舞いを算出する。さらに、キネマティクス変数および地面反力より、キネティクス変数を算出する。

4.2 課題

- 1) 投射されたボールの初期値と重力加速度から得られるボール変位、速度、加速度の理論値と計測された値を比較してみよう。
- 2) 回転されながら投射された円柱体の重心変位、速度、加速度とボールの変位、速度、加速度を比較してみよう。
- 3) 垂直跳の実験から得られたキネマティクス変数およびキネティクス変数から、反動動作が跳躍パフォーマンスに及ぼす影響や下肢関節の出力について考察してみよう。