氏　名(本　籍)	太田　憲(北海道)
学位の種類	博　士(体育科学)
学位記番号	博　乙　第　1,119　号
学位授与年月日	平成7年7月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
審査研究科	体育科学研究科
学位論文題目	加速度計を用いた3次元運動計測方法の開発
主　査	筑波大学教授　理学博士　岡田守彦
副　査	筑波大学助教授　教育学博士　阿江通良
副　査	筑波大学助教授　中田英雄
副　査	筑波大学教授　工学博士　太田道男

論　文　の　要　旨

高速運動の計測はスポーツバイオメカニクスの中心的課題のひとつである。とくに運動時の角速度や角加速度の計測，およびこれにもとづく力学的諸測度の算出は基本的に重要である。これらの目的を達成するために，現在ひろく用いられている方法は，VTRや半導体カメラを利用した画像計測法である。VTR法は被験者に拘束を加えないので実際の競技場面を計測対象にできるメリットがあるものの，計測誤差や微分演算に基因する精度の問題，オンライン計測ができないなどの欠点がある。半導体カメラ法はオンライン計測に適するが，精度にはやはり問題があり，また高速運動の計測には適していない。

オンライン計測に適したいま一つの方法として被験者にセンサーを装着させる手法がある。しかし，高速運動における角速度，角加速度の計測に適したセンサーがないことから，スポーツバイオメカニクスでは実用化されるに至っていない。ここでセンサー法のひとつとして，加速度計を用いる方法がある。加速度計により検出される信号には，重力加速度，並進加速度，遠心加速度，角加速度が混入しているが，2個の加速度計を平行に装着することにより前二者をキャンセルし，回転運動成分のみを検出できる。本研究はこの原理を用いて，高速3次元運動における計測方法の開発を試みたものである。

方法と結果

本研究では一定の距離で平行にならべた2個の加速度計を，直交する3軸方向に合計6個装着する方法（以下これを「基本法」とよぶ）を基本とし，これに順次改良を加えることにより4つの方法を開発した。その際，各方法の特性や精度を評価するために，3軸方向の自由度をもつ振り子に加速度計を装着し，その出力を各軸中心にとりつけたポテンショメータ出力と比較検討した。

まず「基本法」は3次元運動時の角速度をオンラインで計測できるが，速度の方向が得られないこと，低速度での計測誤差が大きくなること等の問題がある。また，角加速度は得られない。しかしこの方法はゴルフスイング時のクラブの角速度など，比較的高速な運動の計測に適したものといえる。

つぎに6個の加速度計により角速度と角加速度が得られる「数値計算法」について検討した。この方法は加速度計各ペアの感度方向を互いに直交させ，得られる出力からルンゲ・クッタ法等の数値計算により精度良くこれらの測度を得ることができる。この方法はオンライン計測ができないことや，初期値が必要であったり，長時間

計測ではドリフトの影響を受ける等の問題があるが，ゴルフスイングのような静止状態からの短い運動の計測には適している。

上の２つの方法の問題点を解決するためには，システム的な計測方法が必要になる。そこでつぎに，動的な最小二乗法であるカルマンフィルタを導入して問題の解決をはかった（「カルマンフィルタ法」），すなわち３軸方向に各４個，合計12個の加速度計から得られる角速度信号および角加速度信号を用いた観測方程式と，角速度と角加速度を状態変数とした線形システムの組み合わせでカルマンフィルタに適用した。その際，状態方程式の予測モデルにより角速度の符号を得，また低角速度での誤差は観測信号のノイズ特性を考慮することによって解決した。これらの結果，「カルマンフィルタ法」が３次元運動の角速度，角加速度を精度良くしかもオンラインで推定できる方法であることが明らかになった。

しかしこの方法は12個の加速度計の装着を必要とするため，さらに加速度計を９個に減らし，角加速度信号の代わりに角加速度と遠心加速度の和の信号を用いた観測方程式との組み合わせでカルマンフィルタに適用する「拡張カルマンフィルタ法」について検討した。その結果，この方法は「カルマンフィルタ法」に較べ，少ない加速度計でほぼ同程度の精度が得られることがわかった。またこの計測方法の応用例として，熟練者と初心者のテニススイングにおける角速度，角加速度の比較を行い，両者の違いを明らかにすることができた。

つぎに，以上の４つの計測方法を対象として，計測時に生じるさまざまな誤差の影響をシミュレーションによって検討した。その結果，ペアで用いる加速度計間の距離を増すことにより計測精度が向上するが，５～10cm位の間隔があれば実用上の精度が得られること，両方の加速度計に等しい角度誤差が含まれる場合よりも，片方の加速度計だけに角度誤差が含まれるほうが計測精度が悪くなることがわかった。

最後に３軸方向に各４個，合計12個の加速度計を用いて，身体運動時の力とモーメントの推定を試みた。この方法の特徴は，力の推定にあたりニュートンの運動方程式の計算に必要な並進加速度と重力加速度の合成された加速度が直接計測できること，またモーメントの推定にあたりオイラーの方程式の計算に必要な遠心加速度を，直接計測することができることである。振り子を用いた実験の結果，加速度計による計測は画像計測法にくらべて推定精度も良く，またオンラインで逆動力学問題を解決するのに適した方法であることが示された。

結論

以上より，本研究により開発された加速度計を用いた運動計測法の特徴は以下のようにまとめることができる。１）運動座標系上の情報を微分演算することなく直接計測することができるので，良い精度が得られる。２）複数の加速度計を組み合わせることにより，角速度や角加速度などの多くの情報を得ることができる。３）スポーツのような高速の運動計測に適している。４）力やモーメントの推定のような逆動力学問題に適した計測方法である。５）ほとんどの計測方法においてオンライン計測が実現でき，トレーニング時のフィードバック情報として利用できるなど，その応用範囲が広い。

審　査　の　要　旨

運動時の角速度，角加速度の計測およびこれらにもとづく逆動力学的推定は，スポーツバイオメカニクスにおける基本的課題である。従来ひろく用いられている方法は画像分析によるものであるが，この方法は微分演算の繰り返しにともなう誤差やオンライン計測ができない等の問題がある。オンライン計測法としては半導体カメラを用いる方法があるが，微分演算誤差は免れず，また高速運動の計測に適していない。

本研究は市販の加速度計を利用して，これらの欠点のない運動計測法の開発を試みたものである。ペアの加速度計を平行に装着して重力加速度と並進加速度を消去する原理そのものは著者の創案ではないが，これらを組み合わせることにより３次元の角速度，角加速度を計測できる物理的システムを構築したこと，またこれらの測度

にカルマンフィルタ等の数理的処理を施すことにより高精度化を実現し得たことは独創的である。さらに力やモーメントを推定するための計算に不可欠なパラメータを，数値演算を介さずに直接得ることができたことは，スポーツバイオメカニクスに最適であるといえよう。

他方，多数の加速度計を生体に装着する際の技術的問題や誤差要因，装着による負担が運動自体に及ぼす影響などについて必ずしも十分な検討がなされていないことなど，今後に残された課題も指摘される。しかし，運動計測の新しい理論と技法の開発に成功した本研究のスポーツバイオメカニクスにおける意義は大きい。

よって，著者は博士（体育科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。