

モーションキャプチャを用いた 居合道の熟練度に関する定量化

崔 雄*¹ 関口 博之*¹ 八村 広三郎*²

立命館大学 衣笠総合研究機構*¹

立命館大学 情報理工学部*²

概要: 本研究の目標は、モーションキャプチャによる身体動作データを用いて居合道の熟練度を定量的に分析することである。居合道の熟練度を比較するために、切りおろし動作を対象にして被験者の身体動作データを収録した。データ分析には多変量解析(主成分分析, クラスタ分析)を用いて身体動作データから抽出した身体の特徴量を定量化した。その結果, 切りおろし動作に対する居合道の熟練度は身体重心と切り下ろしの速度, 身体の安定性で分類できることがわかった。

Quantitative Analysis of *Iaido* Proficiency by Using Motion Capture

Woong Choi*¹, Hiroyuki Sekiguchi*¹, and Kozaburo Hachimura*²

Kinugasa Research Organization,
Ritsumeikan University *¹
College of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University*²

Abstract: The purpose of this research is to make a quantitative analysis of *Iaido* (the Japanese martial art of using the Japanese sword) proficiency with multivariate data analysis. We carried out experiments of motion capture on *Kirioroshi* (a straight overhead slash) movement of *Roppon-me* (a sword thrust using two hands) in *Iaido*. We can analyze the proficiency of an *Iaido* practitioner by conducting PCA (Principal Components Analysis) and cluster analysis of parameters of body movement. In addition, it is expected that our research will help *Iaido* practitioners and masters with *Iaido* training through giving new information on *Iaido* movements.

1. まえがき



図1. 六本目 (切り下ろし)

最近では、モーションキャプチャを用いて武道の動作解析を定量的に行う研究が盛んに行われている。しかしながら、さまざまな計

測データをもとに、体系的に居合道の動作解析をする研究はあまり行なわれていない。居合道とは、日本刀を用い、抜刀から納刀、および諸作法を通し技能の修練のみならず人格の涵養なども含めた各自による自己修練のことである。現在、座った状態で、鞘から刀剣を抜き放ち、さらに納刀に至るまでをも含めた技術を、一つの独立した武道と成している国は、全世界でも日本のみで、実は非常に稀有なものである。

身体動作の計測を用いた武道の動作解析に関する研究には、カンフー動作の特徴[1]、太極拳のトレーニングシステム[2]や足づかいの解析[3]が挙げられる。しかしまだ、モーショ

ンキャプチャによる身体動作データを用いた居合道の熟練度を定量的に分析する研究は行われていない。

そこで本研究では、全日本剣道連盟居合の六本目にある切り下ろし動作に注目して動作解析を行う。全日本剣道連盟居合とは居合道各流派の基本的な技や動作を総合し、剣道人のための居合道入門用の型として全日本剣道連盟が制定したものである。

特に六本目の切り下ろし動作を行うには、居合道の練習者に身体の保持と移動量などの速度と安定性を抑制するための適切なトレーニングが必要である(図1)。

本研究の目標は、モーションキャプチャによる身体動作データをもとに多変量解析(主成分分析、クラスター分析)を用いて身体動作データから抽出した身体の特徴量に基づいて、居合道の熟練度を定量的に分析することである。

2. 実験方法

本研究では、モーションキャプチャを用いて六本目の切り下ろし動作に対して収録実験を行った。

2.1 被験者

表 1. 被験者の居合道の経歴

被験者	性別	居合道の経歴	段
初心者 C	男	0 年	0
初心者 S	男	0 年	0
経験者 A	男	3 年	2
経験者 M	男	3 年	2
経験者 T	男	4 年	2
経験者 K	男	5 年	3

本研究の被験者は六人(年齢 = 24.2 ± 4.9 年, 身長 = 167.7 ± 5.3 cm, 体重 = 57.8 ± 5.7 kg, 経歴 = 2.5 ± 2.1 年, 流派: 伯耆流)が対象になった。四人の被験者(A, M, T, K)は3~5年間の居合道のトレーニング経験があり、ほかの二人の被験者(C, S)は居合道の初心者である(表1)。経験者 A はモーション収録の前に、3ヶ月間、居合道のトレーニングを休んでいた。

2.2 収録の演目

本研究で対象とする収録の演目は、全日本剣道連盟居合の中の「六本目」である。六本目(諸手突き)は前進中、前後三人の敵の殺気を感じ、まず正面の敵の右斜め面に抜き打ちし、さらに諸手でみぞおちを突き刺す。つぎに、後ろの敵を真っ向から切り下ろす。続いて正面からくる次の敵を真っ向から切り下ろして勝つという構成を持っている。

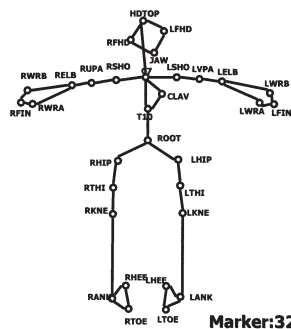


図 2. マーカセット

2.3 モーションキャプチャによる身体動作の収録

本研究では、被験者の体に、モーションキャプチャのために 32 個のマーカを貼付した(図2)。

モーションキャプチャのサンプリングレートは 60Hz で設定し、カメラ 14 台でモーションデータを収録した。被験者には、演目に対して同じ切り下ろしを 3 回ずつ行ってもらった。

2.4 データ分析

表 2. パラメータの定義

No.	パラメータ	定義
1	身体重心	身体の19個のバッチャールマーカ
2	右手の速度	右手のマーカ
3	腰の角度	腰の重心から見た胸と頸部間の角度
4	頸部の角度	頸部の重心から見た頭と胸間の角度
5	右腸骨の角度	右腸骨の重心から見た右肩と左腸骨間の角度
6	左腸骨の角度	左腸骨の重心から見た左肩と右腸骨間の角度

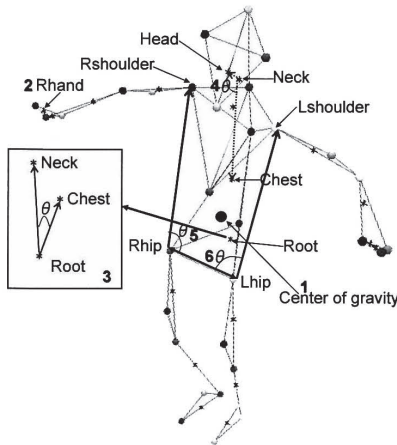


図3. 各パラメータの定義

詳細なパラメータの定義は表 2 に要約されている。各パラメータの位置は図 3 に示す。各パラメータを計算するための収録したデータは切り下ろし動作を解析する前に、正規化する。

本研究で、主成分分析は定義したパラメータから被験者の熟練度を決定する特徴パラメータの多次元データを低次元に削減するために用いる。我々は主成分分析から抽出された特徴パラメータを用いて被験者の熟練度をグループ分けするためにクラスター分析を用いる。

3. 実験結果と考察

本研究では、収録したモーションデータから特徴パラメータを計算して被験者の熟練度を定量的に比較する。次の節から、六本目の切り下ろしの分析結果を述べる。

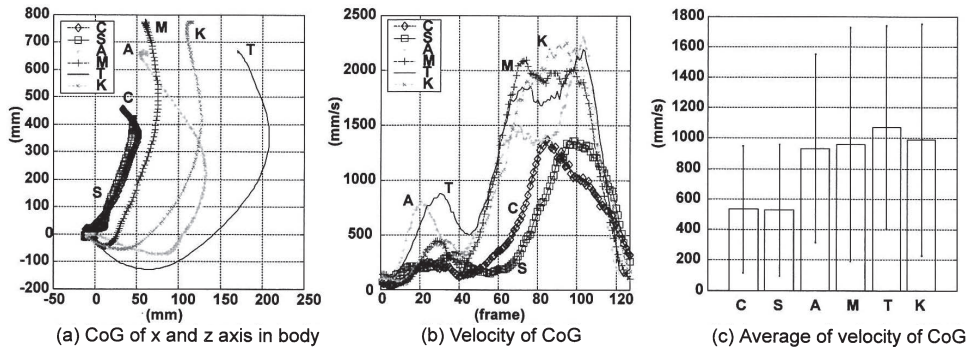


図5. 身体重心(切り下ろし)

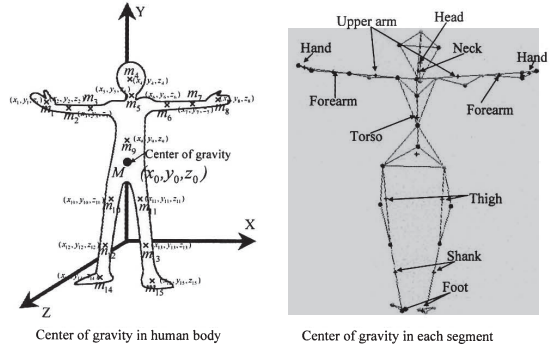


図4. 身体重心

3.1 身体重心

最初に、切り下ろしを行うときの各被験者の身体重心(Center of gravity: CoG)の比較を行う。身体重心を調べることで、切り下ろし動作を演じる際の身体の保持と移動量の比較ができる。図 4 の左の身体重心 (x_0, y_0, z_0) は下の式で計算する[4].

$$x_0 = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + m_nx_n}{M}$$

$$y_0 = \frac{m_1y_1 + m_2y_2 + \dots + m_ny_n}{M}$$

$$z_0 = \frac{m_1z_1 + m_2z_2 + \dots + m_nz_n}{M}$$

$(x_1, y_1, z_1) \dots (x_n, y_n, z_n)$ は各身体部位の重心位置を示す。各身体部位の重心位置は松井[5]の身体各部分質量比および重心位置のデータを用いて計算する。図 4 の右は被験者の各身体部位の重心位置を計算した結果を示す。 M

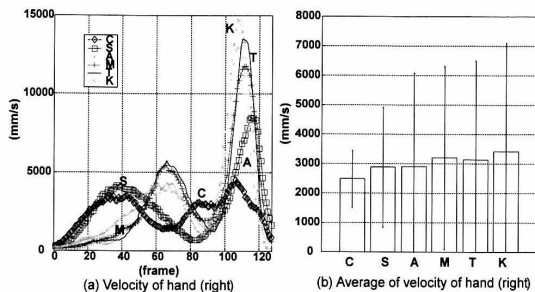


図 6. 右手の速度(切り下ろし)

は身体の質量を示す。 M は各身体部位の質量の和に等しく、 $M = m_1 + m_2 + \dots + m_n$ である。 今回の身体各部分質量比は被験者が男子のため、男子の質量比を用いた。

六人被験者の六本目に対する切り下ろし動作の身体重心の速度と位置変化を図 5 に示す。 図 5 では一つのグラフに六人被験者の解析結果を同時に表示する。 図 5 の(a), (b)と(c)はそれぞれ各被験者の身体重心の移動量, 身体重心の速度, 平均と標準偏差の速度を示す。

経験者の被験者は初心者 C と S に比較して 2 倍程度身体重心の移動量が大きいことがわかる(図 5 (a))。 一方、初心者 C と S は切り下ろし動作のときに身体の移動量が少ないことがわかる。 図 5 の(b)と(c)では、経験者は初心者 C と S に比較して約 600mm/s 以上の身体重心の移動速度をもっていることを示している。 切り下ろし動作を行うとき、経験者は初心者 C と S に比較して約 2 倍の身体重心の移動量と速度を持っている理由は「序破急」という居合道の技術を習得しているからである。 居合道の序破急とは「始めはゆっくり、段々早さを増して、最後は爆発的な勢いで終局に至る」という三部構成のことである。 居合道の経験者は序破急の技術を用いて、最初はゆっくり切り下ろしの動作を始め、最後は爆発的な速度で切り下ろしを行っていることがわかる。 特に、図 5 の(b)のように経験者は約 100 フレームの前後で最大速度に到達することがわかる。

初心者 C と S は序破急の技術を持たないことと、刀を利用した切り下ろしトレーニングを十分に行っていないため、経験者に比較して身体重心の移動量と速度が少ないことがわかる。

以上の考察から、我々は身体重心のパラメータは居合道の熟練度を分離するために、利用できることがわかった。

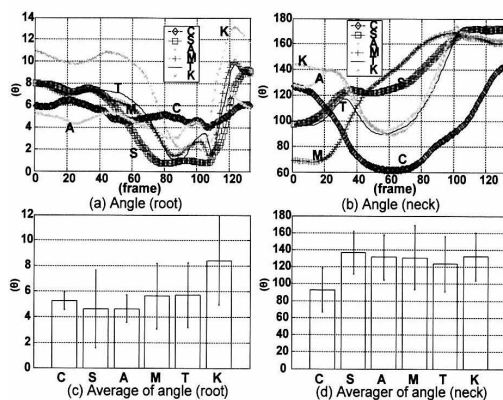


図 7. 腰と頸部の角度(切り下ろし)

3.2 右手の速度

次に、切り下ろしたときの各被験者に対する右手の速度変化を比較する。 右手は切り下ろしのとき、刀の動きを制御する。 左手はそのとき、刀を支える。 その切り下ろし方法は切り下ろしの瞬間、刀の先端に最大の速度を与える。 なお本実験では、被験者の安全を確保するために、500g の木刀を使用した。

図 6 の(a)と(b)はそれぞれ各被験者の右手の速度, 平均と標準偏差の速度を示す。 経験者の被験者は初心者 C と S に比較して約 1.5 倍程度の右手の速度が大きいことがわかる(図 6 (a))。 切り下ろしのとき、経験者は初心者と比較して、約 5000mm/s 以上の右手の速度変化がある。 すなわち、経験者は約 3000mm/s の平均速度で切り下ろしを行い、初心者は約 2500mm/s の平均速度で切り下ろしを行う(図 6 (b))。 経験者と初心者の右手速度の差は居合道の経歴と刀を用いたトレーニング時間に関係していると考えられる。

これによって、我々は右手の速度のパラメータは居合道の熟練度を分離するために、用いることができると考える。

3.3 腰と頸部の角度

次に、切り下ろしのときの各被験者に対する腰と頸部の角度変化を比較する。 腰と頸部の角度変化は切り下ろしのときの上半身の安定性を示す。

図 7 の(a), (b), (c)と(d)はそれぞれ各被験者の腰の角度, 頸部の角度, 腰の平均と標準偏差の角度, 頸部の平均と標準偏差の角度を示す。 各被験者の腰の角度変化量は約 4~8° 程

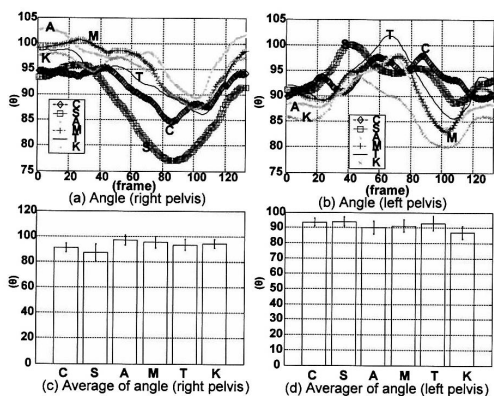


図 8. 両腸骨の角度(切り下ろし)

度で変化量がそれほど大きくない(図 7 (c)). 初心者 C は切り下ろしのときに身体重心の速度と右手の速度が小さいことから他の被験者に比べ、腰の角度の変化も少ない(図 7 (a)). 経験者は約 130° の頸部の平均角度をもつ。しかし、初心者 C と S はそれぞれ 93° と 137° の頸部の平均角度をもつ(図 7 (d)). 特に、初心者 S は切り下ろしのときに他の被験者に比べ、頸部の角度の変化が大きいがわかる(図 7 (b)). この結果から、初心者 C と S は切り下ろしのときに上半身の動きが不安定になることがわかった。

3.4 両腸骨の角度

次に、切り下ろしのときの各被験者に対する右腸骨と左腸骨の角度変化を比較する。両腸骨の角度変化は切り下ろしのときの下半身の安定性を示す。図 8 の(a), (b), (c)と(d)はそれぞれ各被験者の右腸骨の角度、左腸骨の角度、右腸骨の平均と標準偏差の角度、左腸骨の平均と標準偏差の角度を示す。初心者 C と S は右脚の遊脚期に経験者に比べ、右腸骨の角度変化が $5\sim 10^\circ$ 以上大きいことがわかる(図 8 (a)). 図 8 (c)しかし、右腸骨の平均角度が経験者に比べ、小さいことが確認できる。切り下ろしの際に、体の支持を左足だけで行っている時、初心者 C と S の左腸骨の角度変化が $5\sim 10^\circ$ 程度、大きいことがわかる(図 8 (b)). 図 8 (d)でも、左腸骨の平均角度が経験者に比べ、大きいことがわかる。その結果から、両腸骨の角度のパラメータも居合道の熟練度を分離するために、利用できることがわかった。

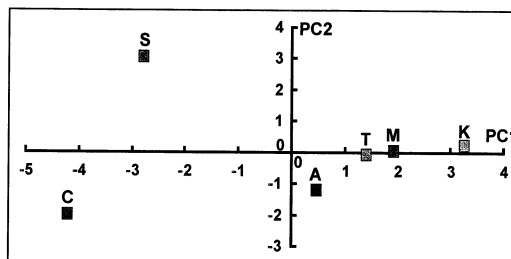


図 9. 主成分分析の結果

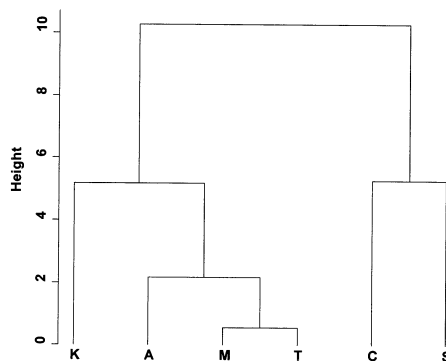


図 10. クラスタ分析の結果

3.5 主成分分析

本研究では、定義したパラメータから被験者の熟練度を決定する低次元の特徴パラメータを抽出するために主成分分析を用いる。各被験者に対する表 2 の定義したパラメータの平均と標準偏差のデータをサンプルデータとして利用した。定義したパラメータの単位が異なる理由で、サンプルデータの標準化を行った。

各被験者の第 1, 2 主成分得点散布図を図 9 に示す。第 1, 2 主成分で累積寄与率が約 80% になった。散布図には各被験者に対して第 1, 2 主成分得点のみを表示した。

第 1 主成分の大きな主成分負荷量を占有しているパラメータは身体重心の速度の標準偏差と右手の速度の標準偏差である。第 2 主成分の大きな主成分負荷量を占有しているパラメータは右腸骨の角度の標準偏差と腰の角度の標準偏差である。第 1 主成分は切り下ろし動作に対する身体の前向き速度と関係があり、第 2 主成分は身体の安定性と関係があった。

この結果から、切り下ろしのときに被験者の熟練度は身体重心の速度と右手の速度のパラメータ、右腸骨の角度と腰の角度のパラメ

一タによってグループ分けすることが可能であることがわかった。

3.6 クラスタ分析

最後に、主成分分析から計算した第1, 2主成分得点を用いて、各被験者の熟練度をグループ分けするためにクラスタ分析を行った。各被験者のデータ間の距離はユークリッドで計算し、クラスタ分析の方法としてはウォード法を用いてコーフェイン行列を求め、コーフェイン行列をもとに樹形図を作成した。

各被験者のクラスタ分析の樹形図を図10に示す。ここから被験者は二つのグループに分かれることがわかる。初心者CとSは二番目のグループに、経験者は一番目のグループに分かれる。経験者のグループでも、居合道のトレーニング経歴と段によって分かれることがわかる。経験者A, M, Tはほぼ同じ熟練度を持っているが、経験者Aは今回のデータ収録の前に、3ヶ月間トレーニングを行っていないことから被験者MとTのグループと離れていることが図9からわかる。被験者Kは六人の被験者の中で一番居合道のトレーニング経歴と段が高く、図9でも、被験者A, M, Tと離れていることがわかる。

以上の分析結果から、切り下ろしに対する被験者の熟練度は身体の色度と安定性の特徴パラメータを用いてグループに分けることができることがわかった。

初心者は居合道に適した体になっておらず、安定した切り下ろしを行うために刀を使った居合道のトレーニングが上手にできない。本研究では、主成分分析とクラスタ分析によって分かった熟練度の特徴パラメータをもとに初心者と経験者を比較することで、熟練度判別が可能であることを示した。その情報は切り下ろしのトレーニングのための適切な結果を出していると思っている。特に、安定性に関しては、居合道でも指導者からよく指摘されることであるため、安定性の情報が得られることで、指導者のいるトレーニングと近い効果を得ることができると考えている。

4. まとめ

本研究では、モーションキャプチャによる身体動作データに多変量解析(主成分分析, クラスタ分析)を用いて身体動作データから抽

出した身体の特徴量に基づいて居合道の熟練度の分析を定量的に行った。その結果から、切り下ろしのときに経験者は初心者に比べ、身体重心の色度と右手の色度が速く、右腸骨の色度と腰の色度の身体の色度を持っていることがわかった。それによって、我々は主成分分析から抽出された特徴パラメータのデータにクラスタ分析を用いることで各被験者の熟練度がグループ分けできることが分かった。

謝辞: 本研究は文部科学省 21 世紀 COE プログラム「京都アート・エンタテインメント創成研究」、グローバルCOEプログラム「日本文化デジタル・ヒューマニティーズ」と文部科学省オープンリサーチセンター補助事業および科学研究費補助金基盤研究(B)19300031, (C)20500105の支援により行われた。データ収録・編集に関しては向田翔氏を含め、八村研究室諸氏には多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] E. A. Heinz, K. S. Kunze, M. Gruber, D. Bannach, and P. Lukowicz, "Using wearable sensors for real-time recognition tasks in games of martial arts – An initial experiment", CIG 2006, 2006, pp. 98–102.
- [2] P. T. Chua, R. Crivella, B. Daly, etc, "Training for Physical Tasks in Virtual Environments: Tai Chi", Proceeding of the IEEE Virtual Reality, 2003, pp. 87-94.
- [3] D. W. Mao, Y. Hong and J. X. Li, "Characteristics of foot movement in Tai Chi exercise", Physical Therapy, 86(2), 2006, pp. 215-222.
- [4] David A. Winter: "Biomechanics and Motor Control of Human Movement", Wiley Interscience (1990).
- [5] 松井秀治: "運動と身体の色心-各種姿勢の色心位置に関する研究-", 体育の科学社, (1958).