



ゴルフスイングの即時情報提示に向けた 高速光軸制御を用いた打具姿勢推定手法

川原田美雪¹⁾, 末石智大²⁾, 宮地力²⁾, 石川正俊²⁾

1) 東京大学 大学院学際情報学府 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, kawarada@hal.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, Tomohiro_Sueishi@ipc.i.u-tokyo.ac.jp)

概要: スポーツにおいて, 打具の挙動の正確な計測及びその即時情報提示は運動技術向上に役立つと期待されるが, 特に情報提示の即時性においては課題があった. 本稿ではゴルフに着目し, 回転ミラーに基づいて高速にカメラの光軸を制御する高速光軸制御技術を用い, 立体的なマーカーをゴルフクラブに付与することで, 高速なスイングの姿勢推定を行う手法を提案する. 静止状態及びスイング動作へのオフラインの解析において, 高い姿勢推定精度を実験的に確認できた.

キーワード: スポーツ, マーカー, 姿勢推定, 高速トラッキング, 再帰性反射

1. はじめに

スポーツにおいて, 自分の身体や用具がどのように動いているか正確に把握することは, 技術の上達において非常に重要である. 特に野球やゴルフのような高速にスイングする打具を用いるスポーツでは, 打具の正確な動きを瞬時に把握することは困難で, ユーザーは運動の十分なフィードバックを得ることができない. 本稿では, スポーツトレーニングに有効な情報をユーザーに対して即時フィードバックすることを目標として, 特にゴルフにおけるスイング動作という高速な現象の計測に着目する.

ゴルフクラブの姿勢推定に用いられる代表的な手法としては, 接触式の慣性センサ, マーカーを付与した非接触式の画像計測, そして非接触式のドップラーレーダーが挙げられる. Namらは T 字型の赤外 LED マーカーと慣性センサをゴルフクラブに装着し, ステレオカメラによるマーカー認識と慣性センサによる情報を統合してスイングの軌跡と姿勢を推定する手法を提案した [1]. しかし, 取り付けたマーカーがゴルフクラブに対してかなり大きくスイング自体を阻害する点や, 慣性センサは積分誤差が生じるという点が課題となっている. ゴルフクラブのヘッド部分にドットマーカーを付与した複数の高速カメラによる追跡・姿勢推定, いわゆるモーションキャプチャシステムも挙げられる [2]. このマルチカメラによる手法では角度, 距離ともに高い推定精度が得られるが, 大掛かりなシステムが必要で, またカメラ同士の正確な位置合わせも必要となるため, 一般に広く利用するのは困難である. ドップラーレーダーを用いることでゴルフスイングやボールの軌道や姿勢を高精度に計測する製品 [3] も存在するが, 計測情報をスイング後にタブレット等で確認する程度であり即時情報提示までは至っていない. ま

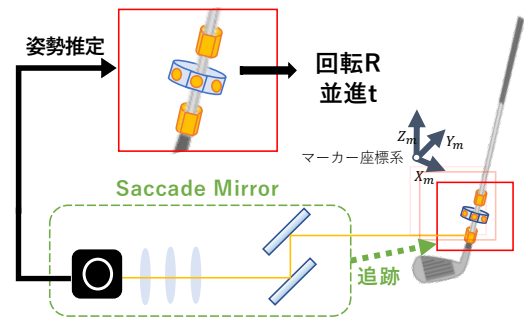


図 1: 高速光軸制御を用いたゴルフクラブのマーカーベース姿勢推定手法の概要

た, ドップラー効果を利用していることから, 静止状態や絶対位置の計測は困難と考えられる.

奥村らは, 2 枚の軽量の鏡を駆動することで, カメラの光軸を高速に制御することができる高速光軸制御系 (サッカードミラー) を実現した [4]. サッカードミラーを用いた高速ビジュアルフィードバックにより, 不規則な動的対象を継続的かつ高解像度に観察することが可能となる. 本稿ではゴルフクラブの高速スイングをリアルタイムで計測し情報提示することを最終目標とした上で, サッカードミラーと小型なマーカーを用いた正確な姿勢推定手法の確立を目指す.

2. 高速光軸制御とマーカーによるゴルフクラブ姿勢推定手法

2.1 提案手法の概要とシステム配置

提案するゴルフクラブの姿勢推定手法の概要を図 1 に示す. ゴルフクラブのヘッド付近のシャフトに再帰性反射材から構成されるドットマーカー (詳細は後述) を配置し, サッカードミラー [4] を用いて同一光軸に照明 (今回はプロジェ

Miyuki KAWARADA, Tomohiro SUEISHI, Chikara MIYAJI, and Masatoshi ISHIKAWA

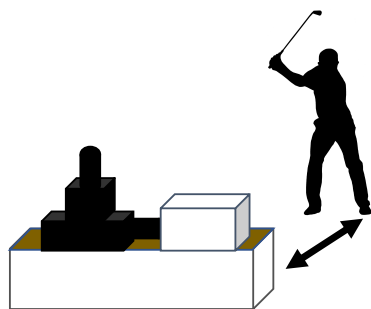


図 2: 計測システムの全体配置図

クタを利用)を導入したカメラの光軸をマーカーに向け続けることで継続かつ高解像度な画像計測を行う。そしてドットマーカーの見え方からゴルフクラブの位置・姿勢を推定する。照明と再帰性反射材は高速カメラにおける光量不足を補う目的で用いる。

また、姿勢推定時のシステム配置を図2に示す。スイング画像の取得はスイングを行う選手の真横から行うものとし、ゴルフクラブのヘッド部分が常にサッカードミラーの画角内に収まるように離れた位置(今回は光軸走査角が $\pm 30[\text{deg}]$ のため約2[m]の距離)でスイングを行う。

2.2 マーカー位置姿勢の幾何学的導出

ゴルフクラブに取り付けたマーカーの位置と姿勢は、マーカー座標系をカメラ座標系に変換する変換行列として求められる。

$[X_m, Y_m, Z_m]^T$ をマーカー座標系におけるマーカーの座標とすると、カメラ座標系におけるマーカーの3次元点を画像平面上に投影した点 $(X_i, Y_i)^T$ は、同次座標系を用いて式(1)のように書ける。

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f_x & 0 & p_x \\ 0 & f_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

焦点距離 (f_x, f_y) 、画像中心 (p_x, p_y) はカメラの内部パラメータと呼ばれ、事前のカメラ校正により既知とする。既知のマーカー三次元座標と画像処理によるマーカー検出二次元位置から、ゴルフクラブの位置姿勢である回転行列 R 、並進ベクトル t を求める。

なお、ここで推定した姿勢情報は光軸方向が動的に変化しているカメラ座標系のもので、世界座標系のものではない。世界座標系における姿勢情報はミラーの角度情報を統合することで算出可能であるが、本稿ではカメラ座標系における回転・並進を議論することとする。

2.3 マーカーの配置戦略

本稿で利用するマーカーの配置戦略に関し、立体性・視認性・追従性について検討した。ARマーカーに代表される平面マーカーではカメラと正対する場合の角度推定精度が十分ではないことが知られている [5] ため、ドットマーカー

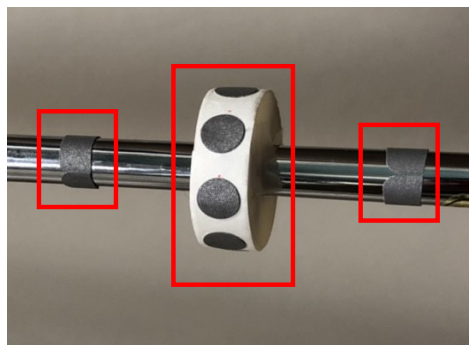


図 3: 提案するマーカー配置

を立体的に配置することで姿勢推定精度低下を回避する。また、再帰性反射材の性質からカメラに対してマーカー平面の傾きが大きいものは明度が不足し認識することができないため、角度推定に最低限必要な4点が常に視認できるように設計する。そして、高速光軸制御のための追従用マーカーも兼ねることとし、遮蔽による影響を受けにくい配置とする。

本研究で提案するマーカー配置を図3に示す。円柱上に等間隔に配置した8点と、シャフトに巻きつける2点の計10点の円形の再帰性反射マーカーからなる。本研究で推定するのはゴルフクラブのヘッド部分の姿勢推定であるが、ゴルフクラブのヘッドは種類によって形状が異なるため、あらゆるクラブに応用できるよう今回はシャフトに取り付けるマーカーを考案した。

マーカーを配置するのは十分クラブヘッドに近い位置とし、スイングによるしなりによってヘッドとシャフトの相対的な位置関係は変化しないものとする。また、シャフトに巻きつけるマーカーはスイング中に遮蔽によって認識できなくなることがないため、トラッキングマーカーとしての役割も兼ねる。

2.4 マーカー認識処理

本研究で提案するドットマーカーはARマーカーとは異なり符号情報がない。本稿では簡単のため、追従撮影後の動画へのオフライン解析を対象とし、手動で下記3ステップからなる各ドットへのID識別を行う。

登録 画像からドットマーカーを認識し、それぞれのマーカーにIDを手動で付与する。

探索 登録されたIDのマーカーの3次元座標と、認識した画像から検出されたマーカー座標から姿勢推定を行う。登録したIDのマーカーを識別するために、前フレームで登録されたマーカー座標を中心とした微小領域のみでマーカーの探索を行う。微小領域の探索と並行して画像全体においてもマーカーの探索を行い、新たなマーカーが認識できた場合には、追加のステップに移行する。

追加 探索の過程で新たなマーカーが認識できた場合に新たなマーカーにIDを付与する。マーカーの付与が完了したら探索のステップに戻る。

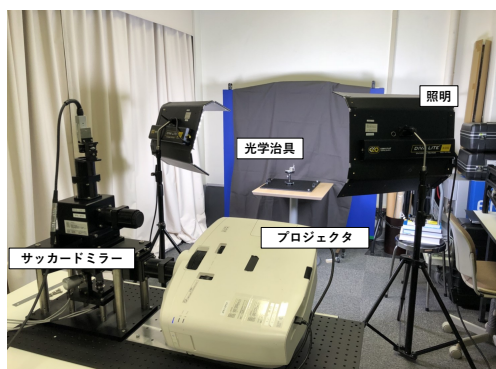


図 4: システム全体図

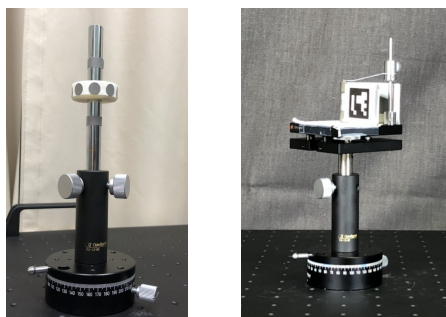


図 5: 回転治具とマーカー。(左: ドット, 右: AR)

3. 姿勢推定精度評価実験

3.1 評価実験装置

姿勢推定精度の評価実験装置全体を図 4 に示す。

評価実験に用いた装置として、まず高速光軸制御系について説明する。カメラレンズには、焦点距離 50[mm] の FUJINON HF50HA-1B を使用し、高速ビジョンには Photron 社の IDP Express R2000 (1,000[fps], 512 × 512 画素のベイヤーカラー) を用いた。高速な視線制御を実現するためのガルバノミラー (Novanta Japan, M シリーズ, M2) は DA 変換によって制御され、±3[V] の電圧に対して ±30[deg] の範囲での光軸制御が可能である。プロジェクタ (EPSON EH-TW7200) はサッカーミラーとの相対位置が常に一定となるように固定し、サッカーミラーと光軸を等しくするように配置した。ゴルフクラブにはパターを用いた (x-line SR XLP-121)。

次に、マーカーについて説明する。計測中の AR マーカー、ドットマーカーそれぞれの画像は図 5 に示す。AR マーカーは ArUco ライブラリ [6] を用いて作成し、蝶番に貼付した。回転角度によってマーカーの明度に差が出ないように、マーカーの前方左右から同じ光量の照明を当てて実験を行った。

3.2 同一姿勢に対する姿勢推定誤差の評価実験

姿勢を固定した状態でサッカーミラーから画像を取得し、同一姿勢に対する姿勢推定誤差を評価した。回転治具に固定した状態で回転治具を 5[deg] ずつ回転させ、それぞれの角度に対して 300 フレーム分の画像を取得し、それぞれの画像に対する姿勢推定結果の標準偏差を算出した。

カメラ座標系における x, y, z 軸それぞれに対する回転角、

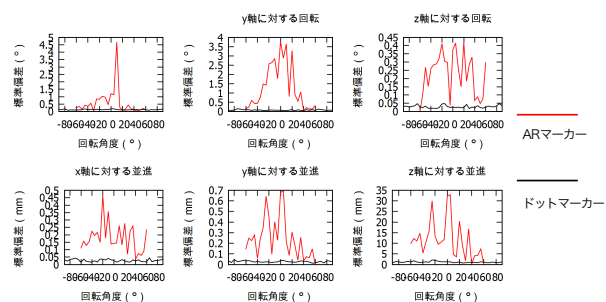


図 6: AR マーカーとドットマーカーにおける固定姿勢に対する姿勢推定の標準偏差

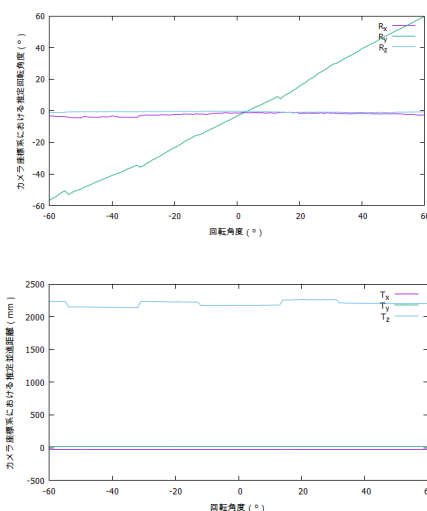


図 7: ドットマーカーを用いた回転姿勢推定結果

並進距離の 6 つの要素に対する姿勢推定結果の標準偏差を図 6 に示す。横軸の回転角度は世界座標系における回転治具の回転角度であり、カメラ座標系における回転角 R_y とは一致しない。また、回転角度が 0[deg] であるとき AR マーカーはカメラに対しておおよそ正対している。

AR マーカーの認識に関してはサブピクセル推定を入れるとさらに精度が上がると考えられるが、カメラに正対する場合の角度推定精度の悪化が構造上避けられないことを考慮すれば、精度が回転角に依存しないドットマーカーの方が安定して推定ができると考えられる。

3.3 回転に対する姿勢推定実験

ドットマーカーそれぞれを回転治具に固定した状態で 1[deg] ずつ回転させ、姿勢推定を行った結果を図 7 に示す。

滑らかにデータがとれているが、 z 方向の並進、すなわちカメラに対して奥行き方向の並進距離の推定では、マーカーを追加、削除するフレームで推定距離に大きな不連続性が生じている。

3.4 実際のゴルフスイングに対する姿勢推定実験

ドットマーカーを用いて実際のスイングに対する姿勢推定を行った。本実験で用いた駆動鏡面式視線制御光学系は最

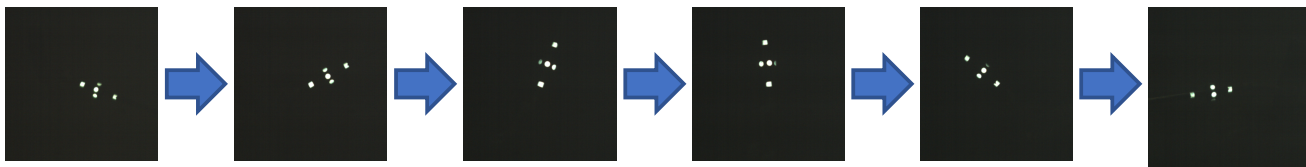


図 8: ドットマーカを用いた際のスイング画像

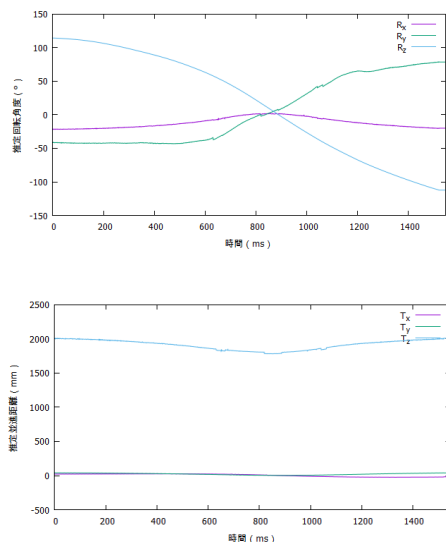


図 9: ドットマーカを用いたスイング姿勢推定結果

大鏡面走査角が ± 30 度であるため、スイング全体をカメラの画角内に収めるために光学系の中心に対して2,000[mm]前方を中心とした半径約1,160[mm]の範囲でスイングを行った。高速なスイングの姿勢推定を想定しているため最大の1,000[fps]で画像を取得し、オフラインでデータの解析を行った。

スイング中の画像を図8に、解析した姿勢推定結果を図9に示す。また、図8を見るとわかるように、常にトラッキングマーカーが中心となるような画像を取得しているため、 x, y 方向の並進距離はほとんど0に近似できる値となる。

4. 実験結果考察

同一姿勢に対する姿勢推定の標準偏差では、どの回転角度に対してもほぼ同等の推定精度で計測することができた。また角度の推定における標準偏差の値は0.2[deg]未満、並進距離の推定においては2[mm]未満に抑えられた。これは、複数カメラを用いて計測した先行研究[2]とほぼ同等であり、レーダーや加速度センサを用いた先行研究[1][3]よりも高い精度である。

回転やスイングに対する推定においても概ね滑らかな結果が得られたが、 z 軸方向、すなわち奥行き方向の推定結果には不連続性が見られた。これは、回転によって新たにマーカーを

検知し追加した場合に、実際には一部しか見えていないドットマーカーに関して見かけの重心位置と実際の三次元的な重心位置の差異があるためと考えられる。これはサッカードミラーによる高解像度性に起因する課題と考えられる。

5. 結論

本稿では、高速光軸制御系とシャフト部に付与した再帰性反射材から成るドットマーカーを用いて、ゴルフクラブの高速なスイングに対する高精度な姿勢推定手法を提案した。スポーツトレーニングにおける即時情報提示を目標とした計測手法であり、本稿ではオフラインによる解析によって、単眼カメラのみであっても複数カメラの場合と同等の高い姿勢推定精度を実験的に確認した。

今後の展望としては、認識ドットの遷移時における推定姿勢情報の不連続性の解消やドットマーカーの符号化が挙げられる。そしてリアルタイムの姿勢推定を実装し、スポーツトレーニングに向けた即時情報提示システムの確立を目指す。

参考文献

- [1] Cao Nguyen Khoa Nam, Hee Jun Kang, and Young Soo Suh: "Golf Swing Motion Tracking Using Inertial Sensors and a Stereo Camera," IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, Vol. 63, No. 4, pp. 943-952, 2014.
- [2] Nils F. Betzler, Stuart A. monk, Eric S. Wallace and Steve R. Otto: "Variability in clubhead presentation characteristics and ball impact location for golfers' drives," Journal of Sports Sciences, Vol.30, Issue 5, pp.439-448, 2012.
- [3] <http://trackmangolf.jp>(最終検索日:2018年7月26日)
- [4] 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊: "アクティブビジョンの高速化を担う光学的視線制御システム," 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 2, pp.201-211, 2011.
- [5] 田中秀幸, 角保志, 松本吉央: "正面からの観測でも高精度な姿勢推定が可能なARマーカー," 情報処理学会研究報告, Vol. 2012-CG-147 NO.3, 2012.
- [6] S.Garrido-Jurado,R.Munoz-Salinas,F.J.Madrid-Cuevas,M.J.Marin-Jimenez:"Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion," Pattern Recognition, Vol.47, Issue 6, pp.2280-2292,2014.