

IMU と単眼カメラによる簡便なスイング計測システム

入江清 (千葉工業大学)

A Low-cost, Easy-to-use Swing Measurement System using an IMU and a Monocular Camera

Kiyoshi IRIE (Chiba Institute of Technology)

Abstract : We present a novel approach to low-cost and easy-to-use sports swing measurement system. Our approach is to use an inertial measurement unit (IMU) attached to a sports equipment and an external monocular camera. The essential part of our system is correcting errors caused by double integration of inertial measurements. Our system detects loops in the target motion and correct estimation errors using the loop information. We evaluated the error correction method through a table tennis swing measurement experiment.

1. 緒言

スポーツの計測には VICON や Optitrack をはじめとする光学式モーションキャプチャが広く用いられている。このような製品は高精度な運動計測が可能である一方、弱点もある。まず、非常に高価であることが挙げられる。さらに、計測の前に校正などの手間がかかることや身体や用具などに反射マーカを取り付ける必要があり、競技者の運動を制限してしまう恐れがある。したがって、現在のところ光学式モーションキャプチャは一般的な練習・指導現場で手軽に利用できるものではない。

筆者らは、近年低廉化と性能向上が著しい慣性計測装置 (Inertial Measurement Unit, 以下 IMU) を用いることで安価で簡便に使用できるモーションキャプチャシステムの実現を目指しており、IMU をスポーツ用具に取り付けることで、スイング等の動作計測を行うシステムの開発に取り組んでいる。この分野の研究は過去にも数多く [1], ゴルフや野球を対象に市販されている製品も存在する [2]。

IMU による運動計測では一般に、観測される加速度と角速度を積分することで姿勢や速度、位置を計算するが、この方法は時間とともに誤差が急速に累積し、計測精度が低下するという問題がある。そのため、実用的な精度で計測できるのはごく短い時間の運動に限られる。

本研究では IMU と単眼カメラを組み合わせた誤差修正方法を開発することにより、より長い時間の計測を可能とするシステムを提案する。このシステムではラケット・バットスポーツの練習における使用を想定しており、競技者は類似した動作を繰り返すものと仮定する。この繰り返しパターンを検出および利用して推定軌跡の誤差修正を行う。

提案するシステムの概要を図 1 に示す。スポーツ用具に IMU を取り付け、加速度および角速度データを収集する。それと同時にスイングの様子を定点からスマートフォンのカメラで撮影する。撮影した動画からループ、すなわち IMU が概ね同じ状態である時点を検出する。これを用いて最適化手法により誤差修正を行い、結果をスマートフォン

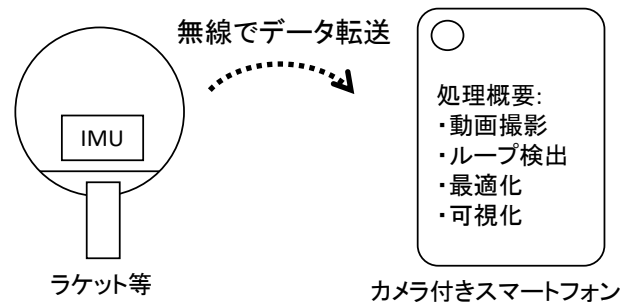


Fig. 1: 提案するスイング計測システムの概要

の画面でユーザに提示する。

本稿では、提案するシステムのコンセプトと誤差修正法の概要を述べ、また予備実験の結果を報告する。なお、本稿執筆時点ではシステム全体の実装は未完であるが、誤差修正法の詳細については [3] にて発表予定である。

2. 関連研究

IMU を用いた運動計測では、累積誤差の修正が重要である。ここでは従来用いられてきた誤差修正方法を振り返る。

加速度を用いて重力方向を検出することで、角速度のバイアス誤差を補正する手法は広く用いられている。カルマンフィルタなどの時系列フィルタを適用する方法が提案されている [4] [5]。この方法は運動の加速度が重力に比べて十分小さい場合に適用できる。

速度の累積誤差修正に適用できる手法としてよく知られている手法に ZUPT (Zero Velocity Updates) がある。ZUPT は、IMU の静止を検出することで、推定速度や角速度のバイアス誤差を補正するものであり、歩行動作の追跡などにおいて精度向上に有効であると知られている [6]。

上述の二種類のアプローチはいずれも、静止することなく速度変化が継続する運動には適用できない。異なるアプローチによる例として、佐川らは運動の初期状態と最終状

態を既知の状態に拘束することにより誤差を修正する手法を開発し、野球の投球動作計測に応用した [7]。この手法では、最終状態で累積誤差がゼロとなるように、時間とともに誤差を過去に遡って配分することで誤差の修正を行う。

初期状態と最終状態のみの情報では長時間の計測誤差修正には有効ではない。筆者らは、中間状態も含めた複数の観測を統合して誤差修正を行う手法を提案した [8]。この手法を実際のスポーツ計測に応用するには、中間状態をどのように観測するのが課題となる。IMU データから運動の繰り返しパターンを検出する方法も考えられるが [9]、運動に対する強い制約（もしくは事前知識）が必要となる。この制約の緩和が課題であった。

3. ループ検出を用いた慣性計測の誤差修正

これらに対し本研究では、IMU 観測と外部に配置したスマートフォンの単眼カメラによる観測とを [8] の枠組みで組み合わせる。カメラ観測から運動中の繰り返しパターンを検出し、誤差修正に用いることで、より制約が少なく、事前知識が不要なモーションキャプチャシステムを実現する。本章では提案システムの中核をなす誤差修正法について概略を説明する。

3.1 提案する誤差修正法の概要

提案システムでは、スイング全体が撮影できるようにスマートフォンを三脚などに固定し、IMU データと動画データを同時に収集する。誤差修正は下記の手順で行う。まず、動画の各フレームから用具を検出し、画像パッチを切り出す。画像パッチ同士をフレーム間で比較し、一致度の高いものを同じ状態、すなわち“ループ”であると判定する。IMU の時系列的推定による誤差と、ループによる誤差の重み付き総和が最小になるように最適化を行い、IMU の姿勢、速度、位置の 9 次元時系列軌跡を推定する。

この手法の利点と欠点を整理する。まず利点としては

- ・ スマートフォンのカメラを利用することで、必要となる追加機材のコストが小さい
- ・ IMU データだけでなく、動画も記録することで計測結果を解釈しやすくなる
- ・ ラケットなどにマーカーを取り付ける必要がなく、運動への制約が小さい
- ・ 動画からは繰り返しパターンを検出するだけであるためカメラ-IMU 間の外部キャリブレーションが不要である

が挙げられる。また欠点には

- ・ 最適化処理は全データが揃ってから行うため、リアルタイムでの計測はできない
- ・ 計測時間が伸びるほど処理時間が増大する

などがある。

3.2 物体検出に基づくループ検出

動画の各フレームに対して、深層学習に基づく物体検出器を用いてラケットなどの用具の画像中の位置を検出する。物体検出器が出力する物体の領域矩形を用いて追跡する物体を含む画像パッチを切り出す。画像パッチをフレーム間で比較してコサイン類似度を計算し、しきい値を超えた場合にループと判定する。

この手法は直接的に用具の三次元状態を観測するものではないが、カメラが動かない前提下で、物体が非常に類似して画像中に映る場合、三次元的な位置姿勢も概ね一致するとの仮定に基づいている。

3.3 最小二乗法に基づく最適化

IMU の 9 次元状態（姿勢、速度、位置）の時系列

$$\{x_i\}_{i=1}^n, x_i := \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ p_i \end{bmatrix},$$

を推定する問題を考える。入力としては IMU による 3 次元角速度 $\{a_i\}_{i=1}^n$ および 3 次元加速度 $\{\omega_i\}_{i=1}^n$ および検出したループ集合 \mathcal{L} である。これを、下記のように IMU 観測による時系列推定に関する誤差 $e_{i,i+1}$ とループに関する誤差 $f_{i,j}$ の重み付き二乗和を最小化する問題へと帰着させる。

$$\begin{aligned} X^* &= \min F(X), \\ F(X) &:= \sum_{i=0}^{n-1} e_{i,i+1}(X)^\top \Omega_e e_{i,i+1}(X) \\ &\quad + \sum_{\langle i,j \rangle \in \mathcal{L}} f_{i,j}(X)^\top \Omega_f f_{i,j}(X), \\ e_{i,i+1}(X) &:= \begin{bmatrix} (-\omega_i \Delta t) * (-u_i) * (u_{i+1}) \\ R_i a_i - g \Delta t - v_i + v_{i+1} \\ v_i \Delta t - p_i + p_{i+1} \end{bmatrix}, \\ f_{i,j}(X) &:= \begin{bmatrix} (-u_i) * (u_j) \\ -v_i + v_j \\ -p_i + p_j \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

ここで、 X は全ての状態変数をまとめたベクトルであり、 Ω_e, Ω_f は重みづけに用いる行列である。また、三次元姿勢



Fig. 2: 開発した無線 IMU モジュール

は回転ベクトルで表現し，回転の結合は $*$ 演算子で示し，回転ベクトル u_i の回転行列表現は R_i で示す． g は重力により観測される加速度， Δt は IMU のサンプル時間間隔である．

この非線形最小二乗問題は，Gauss-Newton 法などで解くことができるが，途中段階で大きな連立一次方程式を解く必要があるため，単純な方法では膨大な処理時間が必要となる．そのため，問題が疎であることを利用した一次方程式ソルバの利用と，三段階ループとじ込みによる手法 [9] を適用することで，処理の高速化を図る．

4. 予備実験

上述の誤差修正手法を実装し，卓球ラケットの素振り動作の計測を通してシステムの評価を行った．

4.1 無線 IMU モジュールの開発

IMU には小型で広ダイナミックレンジの TDK ICM-20649 を使用した．IMU の計測データを無線で伝送するため，WiFi 機能を搭載するマイコン Espressif ESP-WROOM-02 を使用し，IMU とマイコンとを搭載したモジュール（電子基板）を専用に開発した（図 2）．モジュールの外形は幅 20mm，長さ 52mm，高さ 5mm であり，図のように卓球ラケットのグリップ部を改造することでグリップ内部に埋め込むことができる．電源としては 3.7V，100mAh のリチウムポリマー電池を使用し，1 回の充電で約 3 時間の動作が可能である．

4.2 計測実験

図 3 に示す環境で卓球ラケットのフォアハンドスイング（素振り）を連続 10 回，継続時間約 15 秒間の運動を

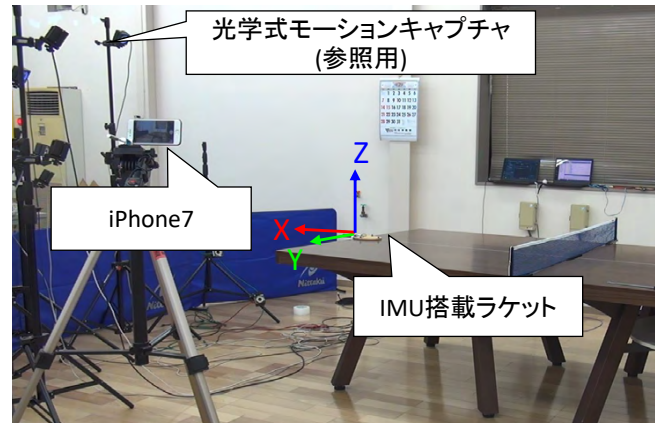


Fig. 3: 実験環境の外観

計測した．今回の実験では，IMU はグリップ内部ではなく，ラケットの片面に貼り付けて行った．また，ループ検出および最適化処理はスマートフォンではなく外部の PC で行った．

提案手法による推定結果を二種類の手法（単純な積分による推定，佐川らによる手法 [7]）と比較した．軌跡の精度を光学式モーションキャプチャによる軌跡との Frechet 距離の尺度で評価した結果，単純な積分では誤差が 2.3m，佐川らの手法では 0.25m であった一方，提案手法は 0.10m と良好な結果であった．また，提案手法の処理にはデスクトップ PC を用いて 16.8s を要した．

提案手法および比較手法により推定したスイング軌跡を図 4 に示す．また，図 5 には推定したラケットの位置姿勢を連続 CG で可視化したものを示す．この結果は撮影した動画とよく一致し，提案手法によるスイング計測が可能であることを定性的にも確認した．

5. 結言

本論文ではラケット等に取り付けた IMU とカメラ付きスマートフォンとを組み合わせた低コストで使用上の手間がかからないスイング計測システムを提案した．現段階の実装では処理の多くを PC 上にて行っており，これのスマートフォンへの組み込みが課題である．このためには処理の軽量化が必要となる．

ハードウェア面での課題としては，無線 IMU モジュールへの充電機能搭載が挙げられる．また，将来的にはグリップ部を改造することなく，既存のラケットにそのまま取り付けられる方法を検討したい．

参考文献

- [1] K. King, S. Yoon, N. Perkins, and K. Najafi. Wireless MEMS inertial sensor system for golf swing dynamics. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 141, No. 2, pp. 619–630, 2008.

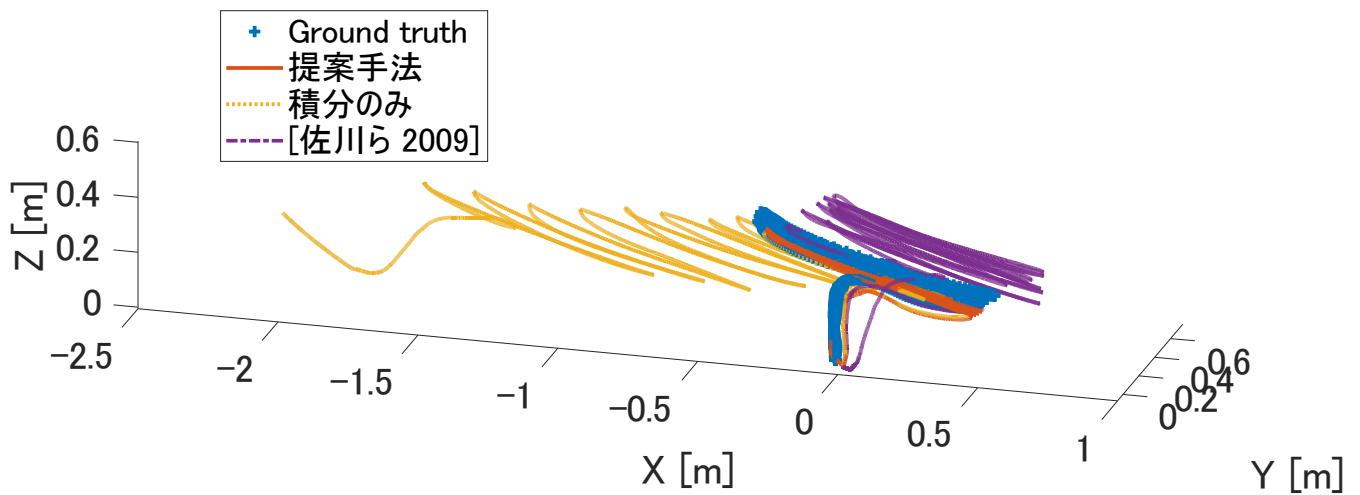


Fig. 4: 素振り動作計測結果 .

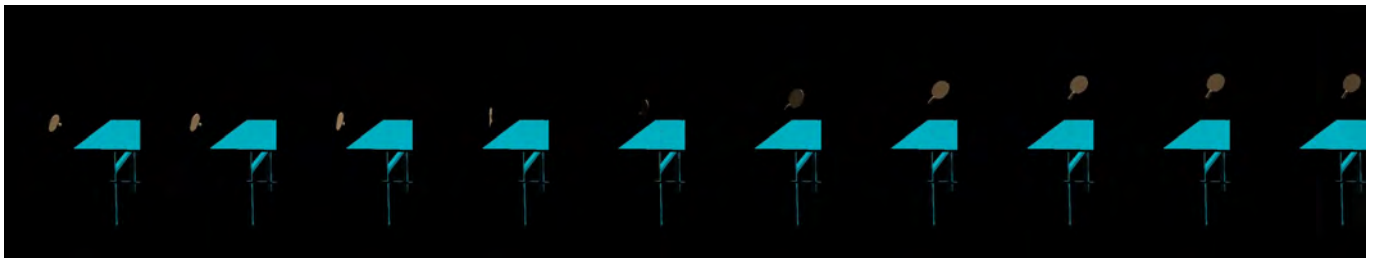


Fig. 5: 提案手法による計測結果の可視化例 .

- [2] Seiko Epson Corp. M-tracer — 製品情報. <http://www.epson.jp/products/msensor/>. [Accessed: 26- Oct- 2017].
- [3] K. Irie. A loop-closure-based inertial motion capture, with application to sports swing measurements. Submitted to SII2020 (under review).
- [4] X. Yun and E. R. Bachmann. Design, implementation, and experimental results of a quaternion-based kalman filter for human body motion tracking. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 6, pp. 1216–1227, 2006.
- [5] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison, and R. Vaidyanathan. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 1–7, 2011.
- [6] E. Foxlin. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 25, No. 6, pp. 38–46, 2005.
- [7] 佐川貢一, 阿保萩子, 塚本利昭, 近藤和泉. 装着型センサによる投球フォーム前腕の軌道推定. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 738, pp. 400–408, 2008.
- [8] K. Irie. A graph optimization approach for motion estimation using inertial measurement unit data. *ROBOMECH Journal*, Vol. 5, No. 1, p. 14, 2018.
- [9] 入江清. 三段階ループ閉じ込みによる慣性運動計測の誤差修正. 第 24 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 205–212, 2019.