

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32503  
研究種目：若手研究  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20K19896  
研究課題名（和文）慣性計測装置を用いた運動計測に関する研究

研究課題名（英文）Study on inertial motion capture

研究代表者

入江 清 (Irie, Kiyoshi)

千葉工業大学・未来ロボット技術研究センター・主席研究員

研究者番号：90565433

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、慣性計測装置(IMU)を用いた運動計測技術の開発に取り組んだ。グラフ最適化に基づく状態推定方法を開発し、様々な誤差修正の手がかりを統一的に扱うフレームワークを開発した。この応用として、カメラによる画像情報とIMU情報の複合によりラケットスイングを計測するシステムや、両足に取り付けたIMUから歩行運動を計測するシステムを開発し、その効果を検証した。また、推定精度向上のため必要となる、IMUのキャリブレーションについて、既存の手法よりも簡単に行う方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人の運動を計測することはスポーツコーチングを始め、様々な応用があるが、一般的な光学式モーションキャプチャーシステムは高価であり、手軽に用いることはできない。これに対し、安価なIMUを用いた方法を開発することで、一般のスポーツ愛好家などにも利用可能なモーションキャプチャーを提供することに繋がる。IMUによる運動推定は従来、拡張カルマンフィルタを用いた時系列推定が用いられているが、本研究ではグラフ最適化を用いたパッチ推定という新しいアプローチで取り組んだ。この方法は様々な情報の統合により推定精度を高めることができ、拡張の余地がある。

研究成果の概要（英文）：In this research, we tackled the development of motion measurement technology using Inertial Measurement Units (IMUs). We developed a state estimation method based on graph-based optimization, and created a framework that uniformly handles various clues for error correction. As applications of this, we developed a system to measure racket swings through a combination of camera image information and IMU data, as well as a system to measure walking movements from IMUs attached to both feet, and verified their effectiveness. Furthermore, we developed a method for calibrating the IMU, which is necessary for improving estimation accuracy, in a way that is simpler than existing methods.

研究分野：ロボット工学

キーワード：慣性計測装置 グラフ最適化 モーションキャプチャ キャリブレーション

### 1. 研究開始当初の背景

現在、人やロボットの運動の計測に一般的に用いられるのは光学式モーションキャプチャシステムである。これは反射マーカと赤外高速カメラの組み合わせで運動を推定するものであるが、マーカは運動の妨げとなることがあり、また高速カメラは非常に高価である。これに対し、軽量・安価な IMU による運動推定が実現できれば社会的意義が大きい。

### 2. 研究の目的

IMU による運動推定には、従来拡張カルマンフィルタを用いた時系列推定が広く用いられている。これに対して本研究ではグラフ最適化によるバッチ推定という独自のアプローチを追求する。グラフ最適化とは、各時刻の IMU 状態をノード、ノードの状態の観測をエッジとしたグラフを構築し、重み付き二乗誤差最小化の枠組みで状態推定を行う方法である。この枠組みではカメラ観測など様々な誤差修正の手がかりとなる情報を統合することができる。本研究ではグラフ最適化を用いた運動計測の研究基盤の確立と具体的なアプリケーションの検討および推定精度向上や計測可能時間の延伸を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では以下の課題に取り組んだ：

- (1) グラフ最適化基盤ソフトウェア整備と高速化
- (2) IMU キャリブレーション(校正)手法の開発
- (3) 複数 IMU 統合手法の開発
- (4) 歩行運動計測手法の開発
- (5) 単眼カメラを利用した誤差修正方法の開発

### 4. 研究成果

- (1) グラフ最適化基盤ソフトウェア整備と高速化

従来の実装では処理時間が長いことが弱点であった。本研究では、従来の MATLAB 実装をネイティブ実装 (C++化) し、最適化計算にリー代数を用いることにより高速化を実現した。このソフトウェアは opt4imu という名前でオープンソースにて公開した。図 1 に 2 つのデータセットに対する処理時間の改善例を示す。処理時間が 10 分の 1 以下になっていることが確認できる。

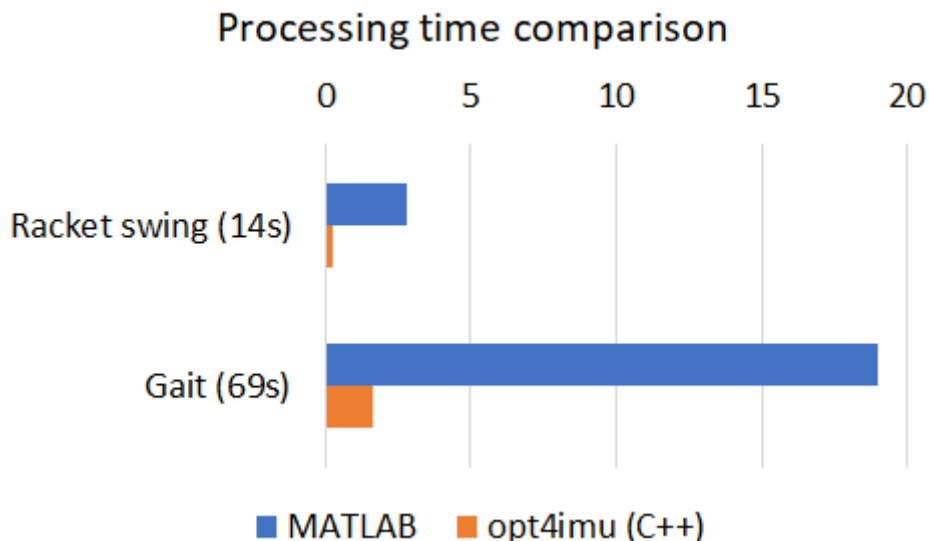


図 1: 開発した opt4imu と従来の MATLAB 実装の処理時間比較

## (2) IMU キャリブレーション(校正)手法の開発

IMU による運動推定の精度を高めるには IMU をキャリブレーション(校正)しておく必要がある。一般的な構成手法は高価な装置を用いるものであるが、これを特殊な装置を用いず一般のユーザーが行うことができれば有用である。開発した手法では、図 2 のように単眼カメラを配置し、その前で IMU を取り付けた物体を振り動かす動作を数秒間行うデータから IMU のキャリブレーションを行う。表 1 に示すように、従来手法に近い校正パラメータを少ないデータで得られることを確認した。



図 2: 開発した IMU キャリブレーション手法におけるデータ収集の様子

	Acc. scale	Acc. bias	Gyro scale	Gyro bias
提案手法	0.998236	-0.055686	1.000761	0.0071288
	1.001831	0.139516	0.998553	-0.00722944
	0.999461	-0.097083	1.000943	-0.00331744
従来手法	1.00162	-0.0639434	1.00302	0.008599
	1.00308	0.124338	1.00144	-0.008391
Tedaldi et al.	0.998748	-0.108967	0.998907	-0.002297

表 1: 従来手法との校正結果比較

## (3) 複数 IMU 統合手法の開発

複数の IMU 情報を統合し、精度を高める手法を 2 種類開発した。一つは剛体に搭載されている IMU 同士の情報を統合する方法であり、角速度と角加速度との関係性からグラフ最適化に基づいて誤差の修正を行う。図 3 に示すように個別に推定するのに比べて誤差が小さくなることが確認できた。

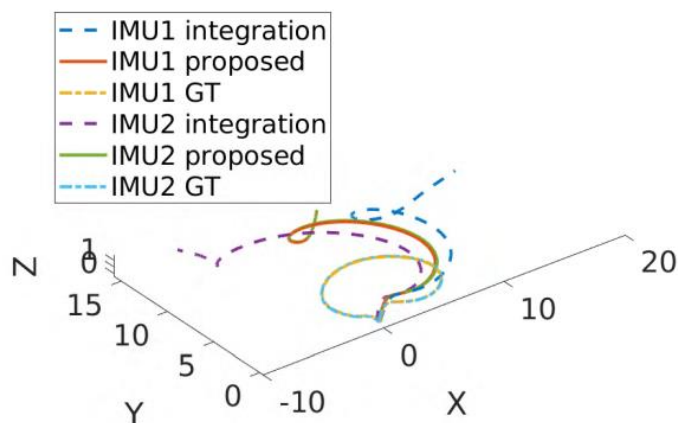


図 3: 複数 IMU 統合による推定誤差低減(シミュレーション例)

#### (4) 歩行運動計測手法の開発

IMU を靴に取り付けて歩行運動を計測する問題に取り組んだ。この問題には従来拡張カルマンフィルタなどによる時系列推定が用いられていたが、グラフ最適化を用いることにより、推定精度の向上やハイパーパラメータの調整ができることを示した。また、両足に装着し運動推定を行う拡張にも取り組んだ。左右の足の位置関係が歩行時に周期的に変化し、その分布が正規分布に従うと仮定することでグラフ最適化に統合する方法を開発した。実験により片足ずつ推定するよりも精度を高めることができ、また拡張カルマンフィルタを用いた従来手法に比べてより滑らかな推定結果が得られることを確認した。図 4 に推定結果の例を示す。

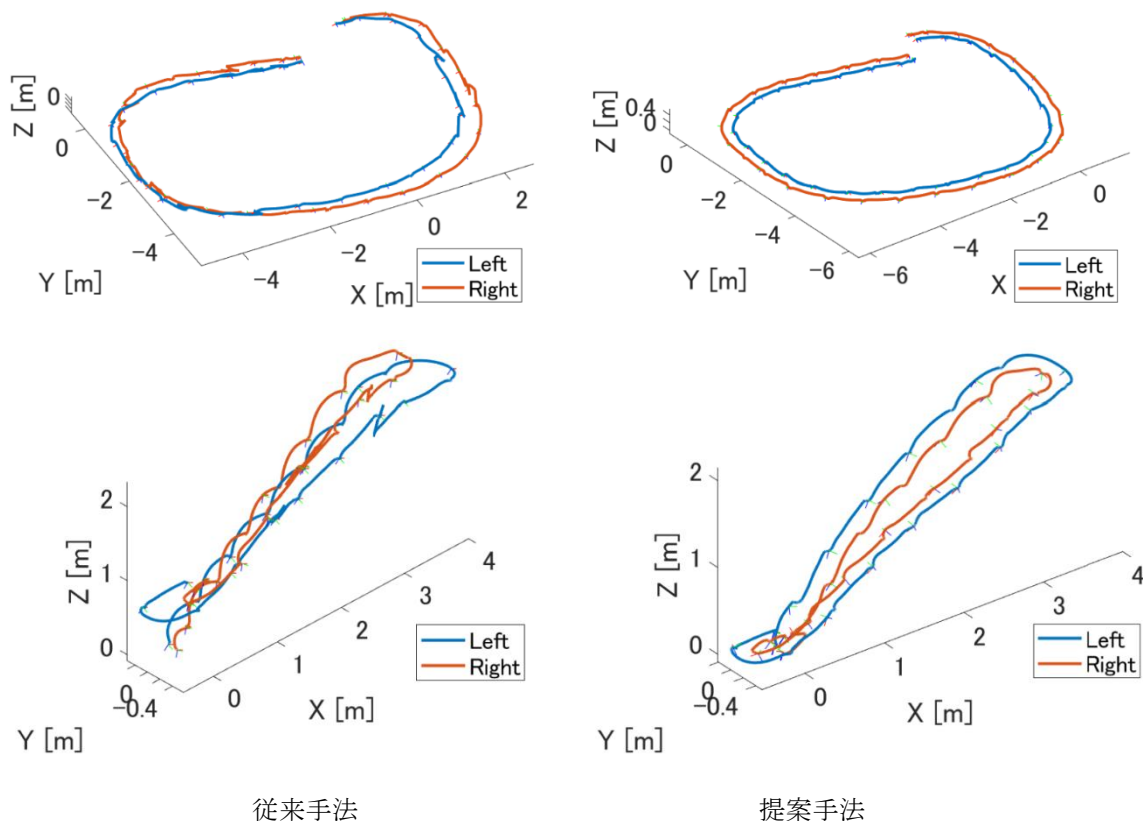


図 4: IMU2 つを両足に取り付けて歩行運動を推定した結果

#### (5) 単眼カメラを利用した誤差修正方法の開発

カメラによる外部観測を IMU データと統合しラケットスイングを計測する手法を開発した。従来手法では繰り返しの動作を対象として、同じ位置姿勢になったことを検出して誤差修正の手がかりとしていた。本研究では、深層学習を用いて画像から物体を検出し、さらに画像間における相対位置姿勢を推定する手法を開発した。図 5 に例示するように、ある程度の精度で統合の手がかりとなる相対位置が推定できることを確認した。



推定された相対位置 (-0.16, 0.11, 0.10) 真値との誤差0.1m

図 5: カメラ画像からの IMU の相対位置の推定結果の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 入江清
2. 発表標題 IMU-単眼カメラ複合モーションキャプチャシステムのためのIMU校正手法
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 入江清、大和秀彰
2. 発表標題 靴に装着したIMUを用いた運動推定: グラフ最適化 に基づくアプローチ
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入江清
2. 発表標題 複数 IMU を用いた最適化ベースの速度推定法
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮入恭祐、入江清、山崎公俊
2. 発表標題 慣性センサを用いた袖通し着衣における人の動作推定
3. 学会等名 計測自動制御学会中部支部シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入江 清, 葛西 陽喜, 山崎 公俊
2. 発表標題 両足に装着したIMUを用いた歩行運動推定
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 入江 清, 葛西 陽喜, 山崎 公俊
2. 発表標題 最適化アプローチに基づく両靴装着IMUからの歩行運動推定
3. 学会等名 ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 入江 清
2. 発表標題 opt4imu: グラフベース最適化による IMU 運動推定のソフトウェアライブラリ
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023 名古屋
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------