

# 両足甲部装着 IMU を用いた歩行運動推定における LiDAR オドメトリ融合

○葛西 陽喜 (信州大学), 入江 清 (千葉工業大学), 山崎 公俊 (信州大学)

## Combining LiDAR Odometry with Walking Motion Estimation Using Bilateral Instep-Mounted IMUs

○Haruki KASAI (Shinshu Univ.), Kiyoshi IRIE (Chiba Institute of Technology),  
and Kimitoshi YAMAZAKI (Shinshu Univ.)

Abstract: The authors have been continuously developing a method for estimating a person's walking motion using measurement data from IMUs mounted on the both insteps. In this paper, we propose a method to introduce data from a laser rangefinder mounted on a person's back for the estimation in order to improve the accuracy of estimation from the previous work and to improve the affinity with environment recognition. We show that the proposed method can estimate motion well for walking in relatively long-distance outdoor and in environment with large height differences.

### 1. 緒言

人の歩行運動では、右と左の足裏を交互に接地させ、地面をけり出すことによって身体の重心位置を移動させている。この歩行時の足の動きを把握することで、歩行環境や行動意図の推定、行動履歴の保存などの様々な展開が期待できる。

本研究の目的は、歩行運動を精度よく推定する方法の確立である。これに向けた先行研究として、筆者らの研究グループでは両足の甲に慣性計測ユニット (IMU) を取り付け、得られたデータから足部の軌跡を推定する手法を提案してきた[1]。この方式の利点の一つは、人を定点から観測する必要がないため移動環境や移動範囲に制限がないことである。しかしながら、推定された軌跡にはさらなる精度向上の余地があり、特に移動距離が長い場合に推定誤差が大きくなることが課題であった。そこで、人の背中にレーザ距離計を搭載し、そこから得られる点群データを用いてレーザ距離計のオドメトリ (以後、LiDAR オドメトリと称する) を算出する。そして、その結果も足部軌跡の推定に利用する。

足部 IMU のデータと LiDAR オドメトリを融合するときの問題は、それぞれの計測対象が違うことである。足部は地面に対して周期的に動くのに対し、腰部より上の体の動きは、平行移動と鉛直軸回りの回転の組み合わせ (若干の揺動を含む) である。そこで、足部と胴体の移動の関係を活用し、IMU データで求められる足部軌跡を LiDAR オドメトリで補正する方針を採る。これにより、数百 m 程度の比較的長距離の歩行運動を破綻なく推定できることを示す。

### 2. 問題設定とアプローチ

#### 2.1 問題設定

歩行運動は障害物や地面の凹凸などにより大きく影響を受けるが、本研究では平坦に整備された都市環境を想定し、そのような場所での一般的な歩行運動を対象とする。また、ぬかるみや氷上での歩行のように、地面に大きな変形が起きたり滑りが生じたりすることは想定しない。

本稿での歩行運動推定とは、左右それぞれの足の各時刻における 3 次元位置と 3 軸姿勢を推定することであり、一連の運動における全ての位置姿勢情報をまと

めて軌跡と呼ぶ。足部軌跡を推定するには、足部の運動に関するデータを計測できる必要がある。そこで、両足の甲に IMU を装着する。そして、歩行開始から終了までの一連の運動に関する全てのデータが揃ったあと、バッチ処理によって各時刻の IMU 姿勢、速度、位置をそれぞれ推定する。IMU は事前に校正されているものとし、バイアス誤差等の推定は行わず積分誤差の修正について検討する。

なお、先行研究[1]においては、数十メートル程度の短距離の歩行を対象に手法の評価を行いその効果を確認した。しかしながら、実用性という観点で見ると、さらなる計測時間の増加や長距離の歩行に対応することが望ましい。そのため、本稿では中長距離 (数百 m~1km) における歩行運動も対象とする。

#### 2.2 アプローチ

本研究は、先行研究[1]の手法を拡張する方針を採り、IMU データによる足部軌跡の推定に対し最適化ベースの手法を用いて累積誤差の修正に取り組む。この最適化の手法として用いるグラフ最適化は、適切な観測を追加すると精度が上がるということが知られており、[1]では複数の観測を導入している。しかしながら、足部のみの計測では世界座標系に対する高度や方位といった推定値の正確性において課題が生じた。

そこで、胴体の移動に着目したアプローチを考える。人が前に向かって歩く際、胴体は前方に移動し、片足は、地面に接地し身体を支え、もう片方は地面から離れた状態 (遊脚期) で進行方向に足が進む。一連の歩行運動全体において大域的な視点で考えると、片足の遊脚期では、どちらか一方だけが止まり続けることや動き続けることはなく、足が移動すると胴体も移動するという正の相関関係があると言える。この関係を簡易的にモデル化し、IMU データで求められる足部軌跡を胴体の移動に関するデータで補正する。

胴体の情報を観測に用いるためには、胴体の動作を計測する必要がある。そのため、レーザ距離計のオドメトリ (LiDAR オドメトリ) を用いる方針を採る。LiDAR オドメトリは、レーザ距離計から得られる点群データにより算出する。IMU データは、長時間の推定では累積誤差が大きくなる一方で、短時間の推定ではデータ

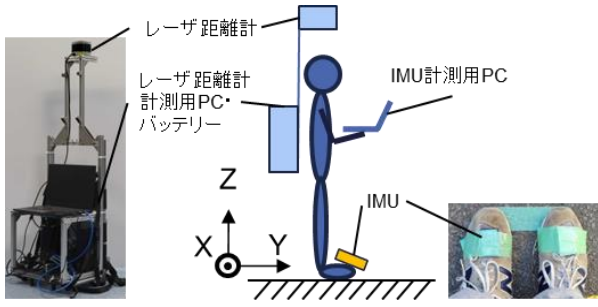


Fig.1. Walking data measurement method

取得頻度が高いため精度が良い。これに対して LiDAR オドメトリは、取得頻度が落ちる代わりに長時間の推定では比較的精度が保たれる。そのため、最適化の制約として、中長距離にわたって比較的精度の高い修正が期待できる。

LiDAR オドメトリで胴体の位置姿勢を推定するために、Fig.1 のようにレーザー距離計を背負子に固定する方式を採用。このとき、頭より上部に位置するように背負子固定することで、装置装備者によるオクルージョンのない計測を可能にする。

### 3. LiDAR オドメトリの最適化への組み込み

#### 3.1 手法の構成

提案手法の処理の流れを Fig.2 に示す。まず個別処理を行い、その後に両足の情報を統合する。この個別処理においては、IMU データから得られる加速度・角速度を数値積分により初期推定を行う (Fig.2 ①)。続いて、それぞれについて最適化を行い姿勢と速度における誤差修正を行う (Fig.2 ②)。そして、速度の積分により位置の初期推定を行い (Fig.2 ③)、左右それぞれの 6 自由度位置姿勢データを揃える。その後、個別処理における推定結果から両足の情報を統合し、各足 6 自由度位置姿勢を最適化し足部軌跡を得る (Fig.2 ④)。姿勢と速度および位置の最適化問題は、処理時間の削減のため段階的に推定する方法を採用している。

Fig.2 の②、④における最適化手法にはグラフ最適化を用いる。各時刻の状態をノード、ノード間の状態観測をエッジとみなしたグラフィカルモデルを考え、全ての観測が与えられた下での最も尤もらしい全時刻の状態を推定する。これは、SLAM におけるポーズ調整に倣い、事後確率最大化による推定を、観測誤差の最小二乗誤差問題に変換する定式化を用いて解くことができる [3]。本稿で用いる観測は、姿勢最適化 (Fig.2 ②) においては角速度の積分による逐次的な状態変化と重力方向に対する傾きの観測である。速度最適化 (Fig.2 ②) においては、加速度の積分による逐次的な状態変化と静止状態における速度ゼロ、および胴体速度と遊脚期 IMU 速度の対応関係の観測である。そして位置姿勢最適化 (Fig.2 ④) においては、左右の IMU 同士の位置関係を表す疑似観測と推定の初期値を与える疑似観測である。

これらの観測において、LiDAR オドメトリは IMU の速度最適化の制約として用いる。レーザー距離計と IMU の速度ベクトルは同じ方向を向いているとみなせるため、拘束条件としての導入が容易である。なお、速度で

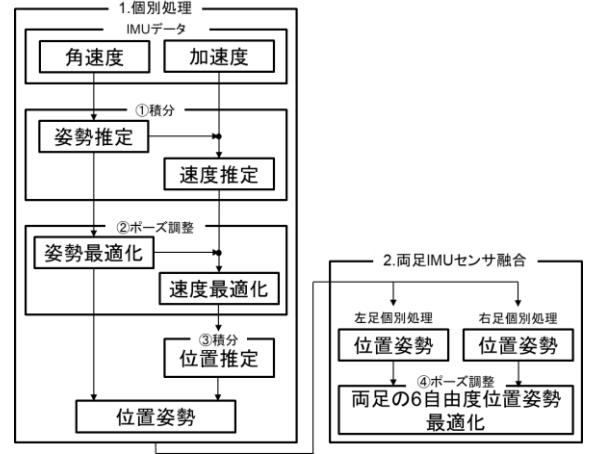


Fig.2. Overview of the method

はなく位置で拘束を行う方針も考えられるが、その場合は足部 IMU とレーザー距離計の位置関係を考慮する必要性が生じ、モデル化が複雑になる。また、提案手法のグラフ最適化は位置に累積した誤差は扱うことができない。理由は次のとおりである。グラフ最適化が対象としている誤差のモデルは平均 0 とした正規分布であり、IMU データの加速度の積分により速度に累積した誤差は、正規分布とみなすことが可能である。しかし、さらに速度を積分し位置に累積した誤差はバイアス誤差と同じ扱いになる。すなわち、この手法で扱える誤差ではなくなるため適切な効果が期待できない。以上の理由から、LiDAR オドメトリのうち速度の拘束として用いて最適化に式に追加する方針を採用。これにより、定式化を容易におこなうことができる。

#### 3.2 IMU 速度推定への LiDAR オドメトリ導入

LiDAR オドメトリの胴体速度への変換は、各時刻における位置の微分によって求めることができる。時刻  $i$  から  $n$  まで刻み時刻  $\Delta t'$  で得る時、レーザー距離計の 3 軸位置を  $\{p_i^0\}_{i=1}^n$ 、3 軸速度を  $\{v_i^0\}_{i=1}^n$  とすると、次式で表せる。

$$v_i^0 = \frac{p_{i+1}^0 - p_i^0}{\Delta t'} \quad (1)$$

時刻  $i$  から  $n$  まで刻み時刻  $\Delta t$  で得られる IMU 加速度  $\{a_i^F\}_{i=1}^n$  の積分により累積する誤差を低減するため、各時刻における IMU 速度を  $V = \{v_i^F\}_{i=1}^n$  とし、以下のような最適化問題として定式化する。

$$V^* = \min F(V), \quad (2)$$

$$F(V) := \sum_{i=1}^{n-1} e_i^{(a)T} \Omega_i^{(a)} e_i^{(a)} + \sum_{i \in C} e_i^{(s)T} \Omega_i^{(s)} e_i^{(s)} + \sum_{i \in C} e_i^{(d)T} \Omega_i^{(d)} e_i^{(d)}, \quad (3)$$

$$e_i^{(a)} := -(R_i^F a_i^F - g)\Delta t - v_i^F + v_{i+1}^F \quad (4)$$

Table.1 Estimation error of the final estimated position

	従来手法	比較手法	提案手法
Tile	0.93	0.84	1.12
Campus	61.23	11.70	9.22

$$\mathbf{e}_i^{(s)} := \mathbf{v}_i^F \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_i^{(d)} := \mathbf{v}_i^F - 2\mathbf{v}_i^0 \quad (6)$$

$\mathbf{R}^F$ は Fig.2 の②における片足 IMU の姿勢最適化から得られる 3 軸姿勢を回転行列に変換したものである。 $\mathbf{g}$ は重力ベクトルである。 $\mathbf{\Omega}$ は観測誤差の分散共分散行列の逆行列である。また、足の接地により IMU の速度がゼロになる静止時刻の集合を  $\mathcal{C}$  とし、 $\bar{c}$  を遊脚期とする。3 種類の誤差関数は、 $\mathbf{e}_i^{(a)}$  が IMU における時系列的な加速度観測に基づくものであり、 $\mathbf{e}_i^{(s)}$  が静止区間における IMU 速度がゼロであるとの仮定に基づくものであり、 $\mathbf{e}_i^{(d)}$  が胴体速度と遊脚期における IMU 速度の相対関係に基づくものである。これら 3 つの誤差関数を含む最適化問題は、非線形最小二乗問題となるが、目的関数のヘッセ行列が容易に計算できるため、Newton 法を用いて解くことができる。

この定式化における一つのポイントは、誤差関数  $\mathbf{e}_i^{(d)}$  において  $\mathbf{v}_i^0$  を 2 倍しているところである。これは、上体の速度が両足の速度のおよそ平均となり、支持脚の速度がゼロならば遊脚の足先速度は上体の 2 倍になるという考えに基づいている。

## 4. 手法の評価

### 4.1 実験の設定

2 台の IMU (スポーツセンシング DSP ワイヤレス 9 軸モーションセンサ) を左右それぞれの足の甲に取り付け、背負子上に搭載したレーザ距離計 (velodyne vlp-16) を背負い、歩行計測を行った。IMU からは 1000Hz で出力される加速度と角速度、レーザ距離計からは 10Hz で出力される点群データを記録した。LiDAR オドメトリの算出には文献[2]を利用した。実験には 2 つのデータセット (Tile, Campus) 用いた。Tile は、概ね平らなタイル状における周回経路で約 46m の歩行距離である。Campus は、信州大学工学部キャンパス敷地内のうちアスファルトやタイルで整備された場所で周回経路を歩くものであり、歩行距離は約 458m であった。

推定結果を 3 つの方法を比べることで評価した。1 つ目の方法はレーザ距離計を用いず両足の IMU のみで推定を行う従来手法[1]である。2 つ目は、レーザ距離計速度を 2 倍する効果を確かめるため、(6)式を  $\mathbf{e}_i^{(d)} := \mathbf{v}_i^F - \mathbf{v}_i^0$  に変更した手法 (以後、比較手法と呼ぶ)、3 つ目は提案手法である。評価値には、最終地点における位置の推定誤差を表す終端誤差を用いた。

### 4.2 実験結果

各手法による推定結果の終端誤差を表 1 に示す。従来手法と提案手法を比較すると、Tile データにおいては従来手法が歩行距離の 2.0%、提案手法が 2.4%と 0.4%増加する結果となった。一方で、Campus データを見てみると従来手法は 13.4%に対し、提案手法は 2.0%と

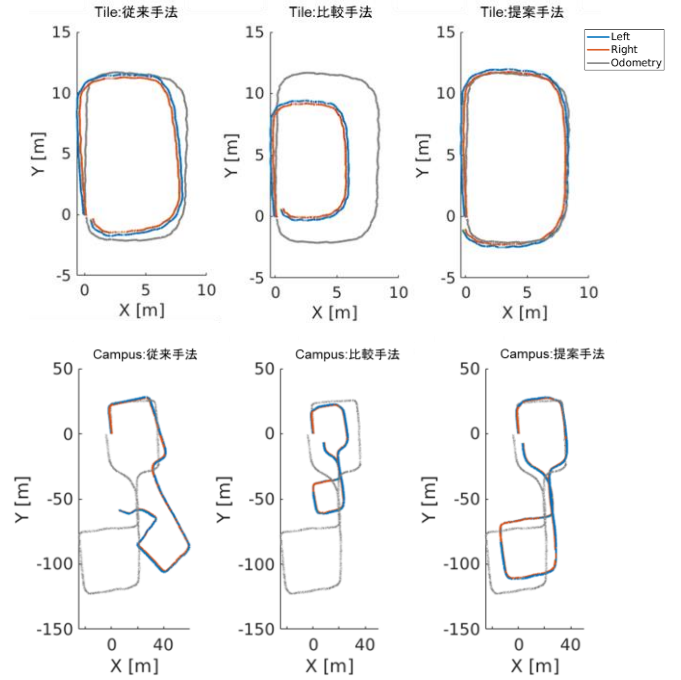


Fig.3. A view of the estimation results from above

10%以上低減する結果となった。

図 3 には、推定された足部の軌跡と、参考値として LiDAR オドメトリをプロットした。提案手法は他の手法に比べて LiDAR オドメトリの近くに軌跡が求められており、新たに追加した観測の効果が確認できる。比較手法による軌跡は提案手法と形状は似ているものの、全体的に縮小している。これは、胴体速度が 2 倍されていないことで誤差関数の値が本来よりも大きく算出され、最適化による速度推定値が小さくなったためと考えられる。

## 5. 結言

本稿では、足甲部に装着した IMU による中長距離の歩行運動を推定するため、先行研究に LiDAR オドメトリを追加する手法について述べた。実際に計測した歩行データにより軌跡推定実験をおこない、歩行距離が長いデータにおいて推定精度が向上することを確認した。今後は、歩容という観点に基づいて精度を高める軌跡推定を目指し改良をおこなっていく。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20K19896 および JST 【ムーンショット型研究開発事業】 グラント番号 【JPMJMS2034】 の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] 入江, 葛西, 山崎, 「最適化アプローチに基づく両脚装着 IMU からの歩行運動推定」, 第 28 回ロボティクスシンポジウム, pp. 68-70, 2023.
- [2] Koide et al., A Portable 3D LIDAR-based System for Long-term and Wide-area People Behavior Measurement, Advanced Robotic Systems, 2019.
- [3] Irie, A graph optimization approach for motion estimation using inertial measurement unit data. ROBOMECH J., Vol. 5, No. 1, p. 14, 2018.