

Wi-Fi ドップラー観測に基づく速度推定の基礎検討

SATテクノロジー・ショーケース2026

■はじめに

近年、自律移動ロボットの分野で、高精度な位置推定技術の重要性が増している。GNSS(Global Navigation Satellite System)が有効であるが、都市部や屋内、地下などの受信困難な環境では精度が大きく低下する。このような環境では、LiDARやIMUを用いたSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)が広く活用されている。しかし、視界不良や点群の縮退が発生する状況での精度低下が課題である。一方、電波を利用した測位は、視界に依存せず情報を取得できるため、このような環境における補完手法として有望である。特に、ドップラーエフェクトは、送受信機の相対運動により受信周波数が偏移する物理現象であり、レーダーや無線通信分野で活用されている。

本研究では、電波のドップラーシフト情報を観測として用い、ファクタグラフ最適化によりロボットの位置・速度と送信源の位置を同時に推定する枠組みを構築し、シミュレーションで有効性を検証する。

■活動内容

1. ドップラーシフトの検出手法

本研究ではWi-Fi送信源を前提に、ベースバンド複素信号 $y[n] = Ae^{j\phi[n]} + \eta[n]$ に対して、ドップラーシフト f_D を位相の回転速度

$$f_D(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (1)$$

として推定する。短時間窓内で位相列の傾きを求める。具体的には $\phi[k] = \text{unwrap}(\arg y[k])$ を計算し、時間に対して、局所線形回帰の傾き \hat{s} から $\hat{f}_D = \hat{s}/(2\pi T_s)$ を得る。なお、 T_s はサンプリング間隔である。

2. CARLA Simulatorでの実験

本研究では、ロボットの位置、速度、及び送信源の位置をファクタグラフ最適化の状態変数としてモデル化し、観測量として、送信源とのドップラーシフトを用いる。これにより、ロボットの位置推定精度向上を図る。シミュレーションにはCARLA Simulatorを用い、ロボットの位置及び速度の真値を取得した。このデータを基に、観測量であるドップラーシフト量 \hat{f}_D を以下の式に従って仮想的に生成した。

$$\hat{f}_D = \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{r}|} \cdot \frac{f}{C} + \eta \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{r} はロボットと送信源の位置ベクトルの差、 \mathbf{v} はロボットの速度ベクトルであり、 $\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}/|\mathbf{r}|$ はロボットと送信源間の相対速度を表す。また、光速 C 、搬送波周波数 f 、クロックバイアス誤差 η を考慮した。本シミュレーションでは送信源

位置を $(50, 30, 50), (30, -70, 50), (-30, 40, 50), (-80, -60, 50)$ に固定し、送信源の数は既知とした。なお、シミュレーションでは、CARLAから取得できるデータはロボットの x, y, z 座標のみであり、電波シミュレーションは行っていない。

3. 結果と考察

図1、図2より、推定は全区間で真値によく一致し、急な加減速や旋回を含む区間でも外れ値は確認されない。Model fidelityは0.93であり、仮定した観測モデルとデータの整合は妥当と評価できる。

一方で、送信源配置が一方向に偏る環境では、視線方向と近い成分の感度が相対的に低下し、進行方向に沿った微小な残差が生じやすい。これはドップラーシフトが視線方向の観測であるという性質に依存するためである。

■関連情報等(特許関係、施設)

該当なし

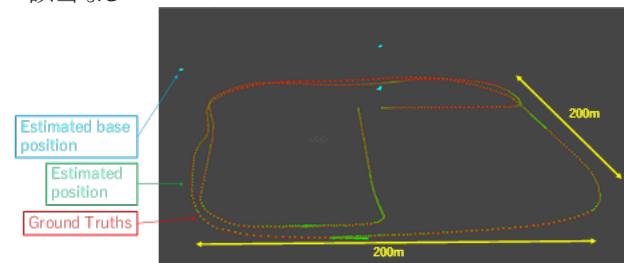


図1 ロボット及び送信源のドップラーシフト利用による位置推定結果



図2 各軸方向の真値速度(青)と最適化速度(橙)。上からx方向、y方向、z方向。

代表発表者 池野 航太(いけの こうた)
所 属 東北大学大学院工学研究科
航空宇宙工学専攻 宇宙ロボット研究室
問合せ先 〒980-0845 仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-01
TEL: 080-8948-0684
Email: ikeno.kota.q@dc.tohoku.ac.jp

■キーワード: (1) 自己位置推定
(2) SLAM
(3) 通信