

Wi-Fi ドップラー観測に基づく速度推定の基礎検討

○池野航太(東北大), 小出健司(産総研), 高野瀬碧輝(産総研), 大石修士(産総研),
横塚将志(産総研), 宇野健太朗(東北大), Shreya Santra(東北大), 吉田和哉(東北大)

背景

月面・火星探査ローバーの自律化に向けたSLAM

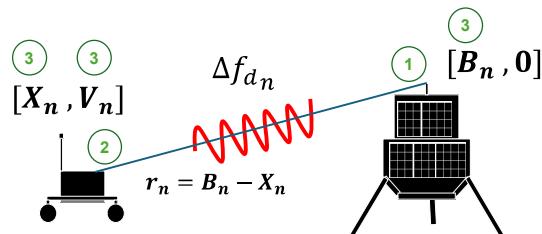
特徴量が少ない環境で位置推定精度が劣化

電波のドップラー効果による速度情報を応用して頑健化を目指す



提案手法

Radio Doppler Aided SLAM



- ① ローバー・ランダー間通信、他ミッションでの通信、その他電波
- ② 観測量：ドップラーシフト (Δf_d)、加速度、点群(位置観測)
- ③ ファクタグラフ最適化によるローバー位置 (X_n)、ローバー速度 (V_n)、ランダー位置 (B_n) の推定

誤差 = 推定値($f(X, V, B)$) – 観測量 → 最適化

ドップラーシフト推定の誤差関数

$$residual = \frac{\mathbf{r} \cdot v Freq}{|\mathbf{r}|} - \tilde{dop}$$

r : ローバーと基地局の相対位置
 v : ローバー速度

1. 地図座標系

$$\mathbf{r} = \mathbf{b} - \mathbf{p}$$

b : 基地局位置
 p : ローバー位置



近くの基地局の方
が信頼できる

2. Inverse Depth

$$\mathbf{r} = \left(\mathbf{a} + \frac{\mathbf{w}}{\rho} \right) - \mathbf{p}$$

a : 基準位置
 w : 基準位置からの基地局方向
 ρ : 逆深度(1/depth)

電波信号処理の例

各エポックの位相平均をとることでドップラーシフトの観測を取得。以下のように定式化。

$$\tilde{dop}_i = \frac{\Phi_i(t_{j-1}) - \Phi_i(t_{j+1})}{2\Delta t}$$

$$\lambda\Phi_i = d_i + c\delta t_b - c\delta t_u + \lambda N_i + \eta$$

d : geometrical distance

δt_b : basestation clock bias

δt_u : receiver clock bias

N : integer ambiguity

η : multipath and receiver noise

ρ_i : pseudorange

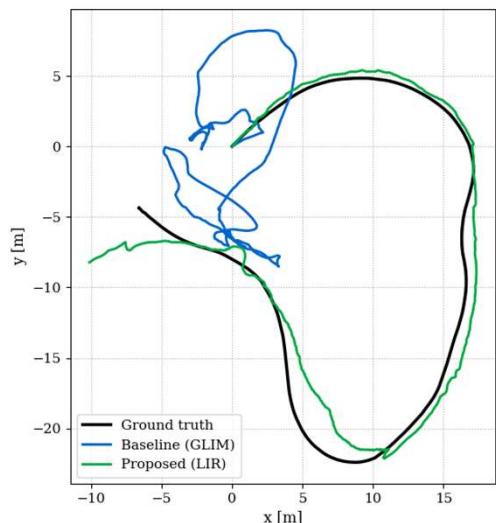
ϵ_{ρ_i} : observation error

信号処理にはSDRを利用し、デジタルコンバートされたrawデータである信号を直接処理することによりこれを実現する。なお、SDRは以下のようない信号処理機器で、FPGAが組み込まれている。

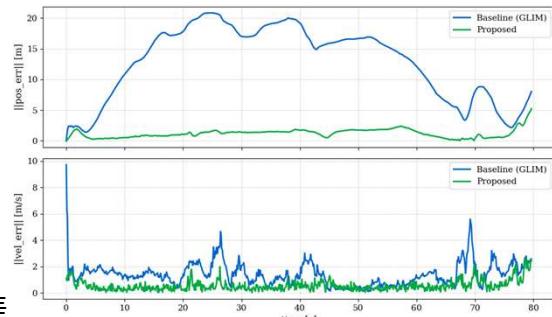


結果

Isaac Simを利用してアルゴリズムの検証

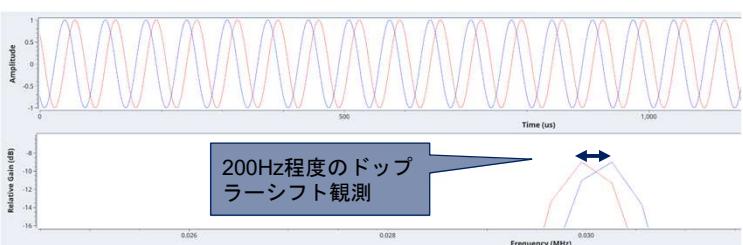


ローバー軌跡



真値との誤差

SDRでのドップラーシフト観測



※なお、上記はドップラーシフト済み生成信号をSDR(TX)から送信し、SDR(RX)にて受信した様子

今後の展望

実環境での検証

電波のマルチパスや干渉などの影響を評価し、ロバストなアルゴリズムの開発を進める

リアルタイム処理の最適化

実装の効率化やハードウェア性能の最適化を進める

信号処理アルゴリズムの最適化

あらゆる信号に対する基盤的な信号処理アルゴリズムではなく、信号の特徴をうまく利用した手法に切替

<参考文献>

- [1] Hsu, Li-Ta, et al. "UrbanNav: An open-sourced multisensory dataset for benchmarking positioning algorithms designed for urban areas." Proceedings of the 34th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS+ 2021), 2021.
- [2] Barbieri, Luca, et al. "UWB localization in a smart factory: Augmentation methods and experimental assessment." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 70 (2021): 1-18.
- [3] Li, Jun, et al. "A novel UWB-based indoor localization system." Conference on robot learning, PMLR, 2017.
- [4] Sun, Rui, Yeying Dai, and Qi Cheng. "An adaptive weighting strategy for multisensor integrated navigation in urban areas." IEEE Internet of Things Journal 10.14 (2023): 12777-12796.
- [5] GNURadio, "PLL Frequency Detector", GNU Radio Wiki, 2-Oct-2023, <https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=PLL%20Frequency%20Detector>. [Accessed: 4-Mar-2025]