

# 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), 宇野健太郎(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

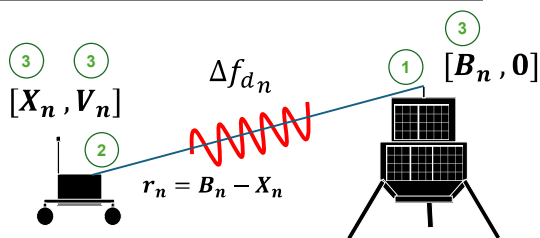
特徴量が少ない環境で位置推定精度が劣化

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** ( $\Delta f_d$ ), 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

$$residual = \frac{r \cdot v \cdot freq}{|r| \cdot c} - \tilde{dop}$$

$r$ : 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  
 $r = b - p$   
 $b$ : 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

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

$a$ : 基準位置  
 $w$ : 基準位置からの基地局方向  
 $\rho$ : 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。

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

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

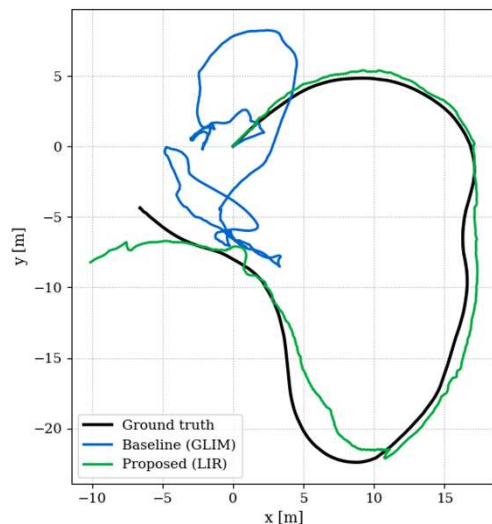
$d$ : geometrical distance  
 $\delta t_b$ : basestation clock bias  
 $\delta t_u$ : receiver clock bias  
 $N$ : integer ambiguity  
 $\eta$ : multipath and receiver noise  
 $\rho_i$ : pseudorange  
 $\epsilon_{\rho_i}$ : observation error

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。

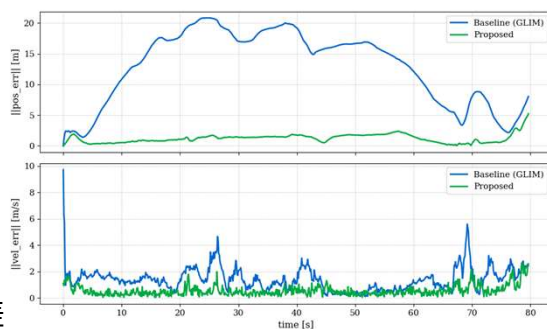


## 結果

### Isaac Simを利用したアルゴリズムの検証

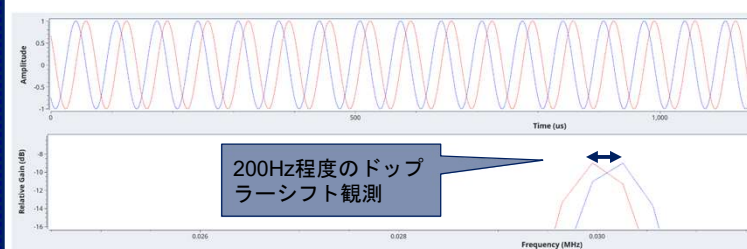


### ローバー軌跡



### 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のみ生成信号を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] Dosovitskiy, Alexey, et al. "CARLA: An open urban driving simulator." 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): 12777-12786.
- [5] GNURadio, "PLL Frequency Detector", GNU Radio Wiki, 2-Oct-2023, [https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=PLL\\_Frequency\\_Detector](https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=PLL_Frequency_Detector). [Accessed: 4-Mar-2025]