

高精度測位チャレンジ 2024 3rd place solution

高野瀬 碧輝

Method

GNSSとIMUのタイトカップリング

- ルーズカップリング(LC)だと… 測位解が外れ値の場合は有効なGNSS観測値も除去されてしまう
- タイトカップリング(TC)では、GNSS観測値を直接に制約条件として考慮可能になる
 - 衛星が少ない環境でも十分な制約条件になる
 - GNSS観測値単位で外れ値除去が可能

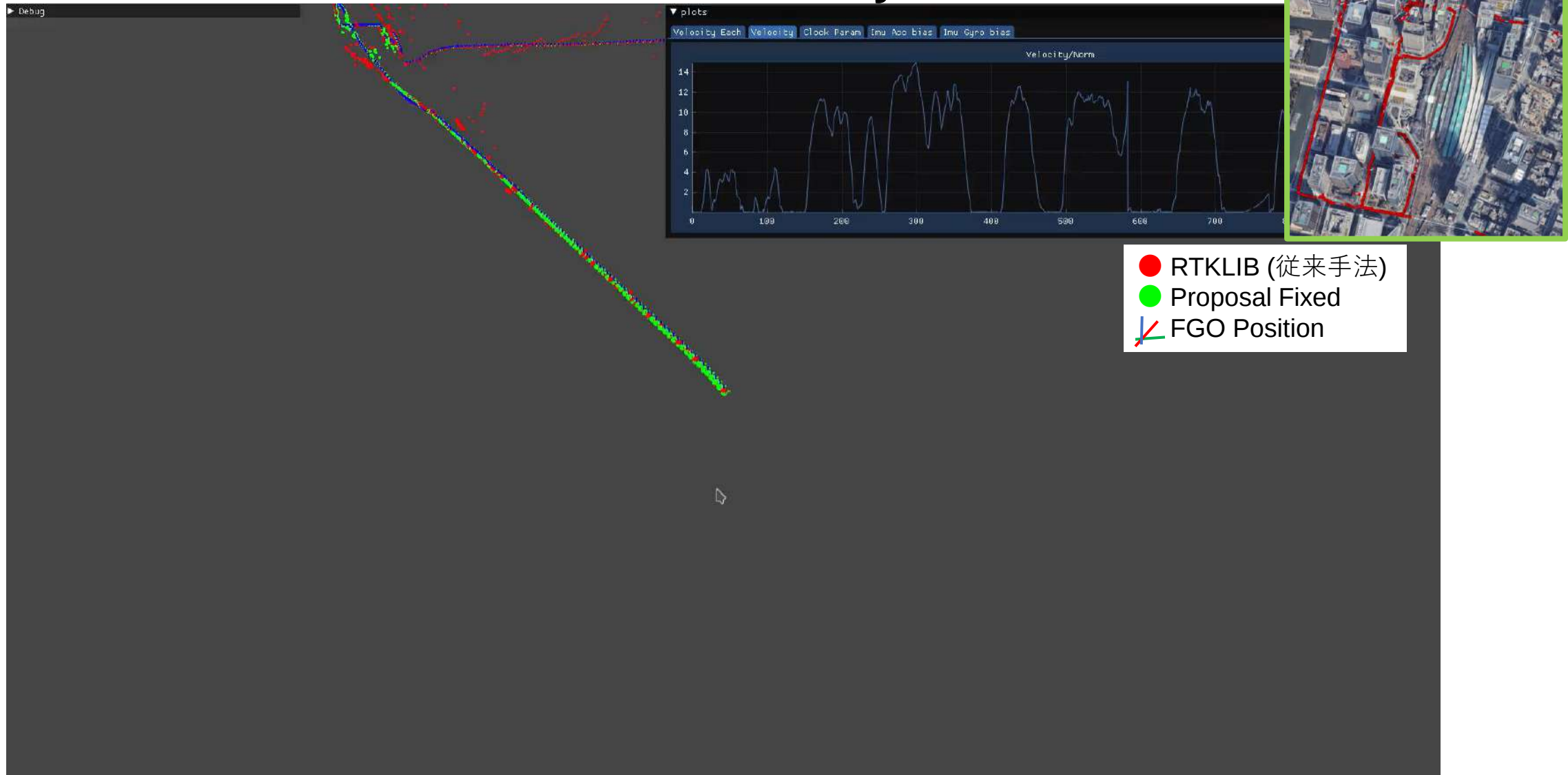
ファクターグラフ最適化

- GTSAMによる実装
 - iSAM2によるリアルタイム性の確保
 - 外れ値対策としてM-Estimator (Huber Loss)を利用

サンプリング法による搬送波位相の整数アンビギュイティの事後分布推定

- 3次元空間上のサンプリングによって尤もらしい整数アンビギュイティを決定する手法
- LAMBDA法/Ratio-Testの欠点であるfloat解への精度依存問題を解消しFix率の向上に寄与
- TCとして組み込むことで整数アンビギュイティが決まったGNSSのみを制約条件に追加する

位置推定の様子(tokyo1)



ファクターグラフ最適化 (FGO)

状態変数: $X_t = [x_t, v_t, b_t, d_t]$, $x_t \in SE3 \Rightarrow x_t = [R_t, \mathbf{t}_t]$
位置情報

最適化: $\chi_t = \underset{X_{t_0:t}}{\operatorname{argmin}} e(X_{t_0:t})$

目的関数: $e(X_{t_0:t}) =$

GNSS observation factors

$$+ \sum_{x_i \in X_{t_0:t}} \rho\{e^P(\mathbf{t}_i)\} + \sum_{x_i \in X_{t_0:t}} \rho\{e^C(\mathbf{t}_i)\} + \sum_{v_i, b_i \in X_{t_0:t}} \rho\{e^D(v_i, b_i)\}$$

DD Pseudorange factor DD Carrier phase factor Doppler factor

IMU observation factors

$$+ \sum_{x_i \in X_{t_0:t}} e^{IMU}(x_{i-1}, v_{i-1}, x_i, v_i, b_i)$$

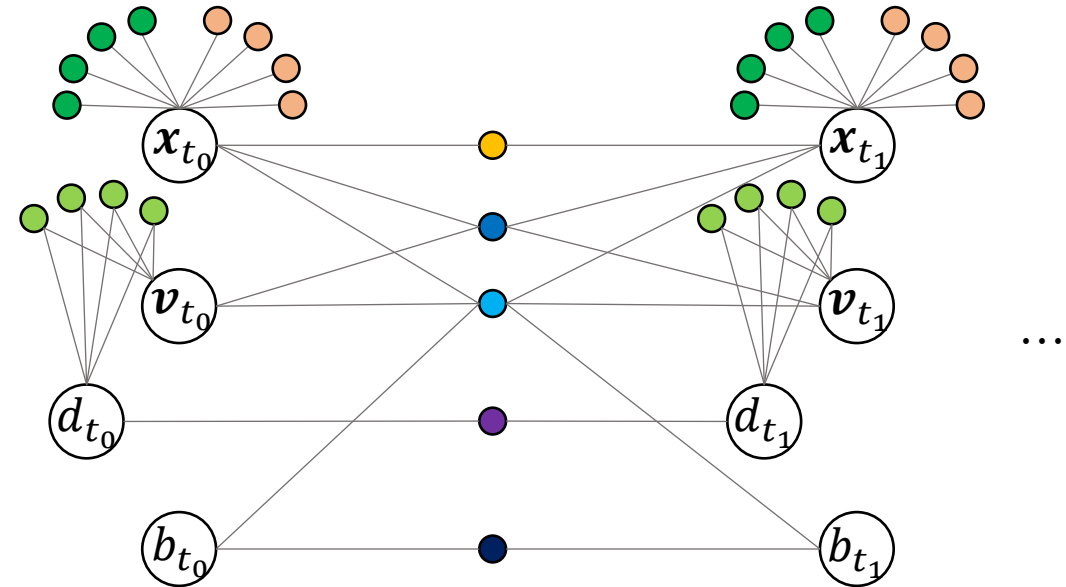
IMU factor

State Transition Factors

$$+ \sum_{x_i \in X_{t_0:t}} e^M(\mathbf{t}_{i-1}, \mathbf{t}_i) + \sum_{x_i \in X_{t_0:t}} e^H(\mathbf{t}_{i-j}, \mathbf{t}_i) + \sum_{b_i \in X_{t_0:t}} e(b_i) + \sum_{d_i \in X_{t_0:t}} e(d_i)$$

Motion factor Height smooth factor Between factors

※ $\rho\{\}$ はHuber Lossによるロバストカーネル



variable



x : Pose v : Velocity b : IMU bias d : Clock drift

factor



●: DD Pseudorange factor ●: Height smooth factor
●: DD Carrier phase factor ●: Motion factor ●: Between factor
●: Doppler factor ●: IMU factor ●: Between factor

サンプリングによる整数アンビギュイティの事後確率分布推定

概要

• Ambiguity function method (AFM)の応用

- 位置空間上で尤度を計算し，周辺化によって整数アンビギュイティの尤度分布を取得する

特徴

• サンプリングによる柔軟な確率分布表現

- 整数アンビギュイティの確率分布を推定 & **正規分布仮定の排除**
- 大枠はベイズの定理を用いたフィルタリングによって推定

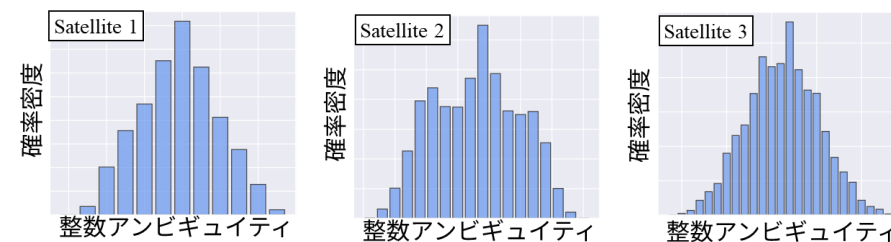
- 整数アンビギュイティの状態遷移を確率モデルとして定義可能 → サイクルスリップなどに柔軟に対応できる

• GPU活用による広範囲かつ高密度な探索を実施

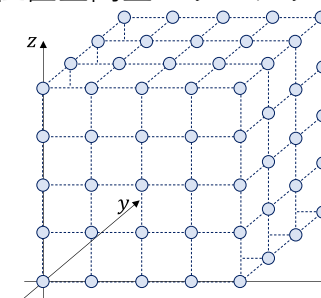
- 位置空間:各軸1m×100マス → $100^3 \approx 100$ 万個，N空間:解候補10個/衛星 → 10^k 個
- 提案手法は位置空間上を $100^3 \sim 500^3$ まで処理可能
- 今回のチャレンジは各軸4m×100マスを2箇所

※ $500^3 \approx 1.25$ 億個
分解能を0.05mとすると
1軸あたり25m探索が可能

整数アンビギュイティの事後確率

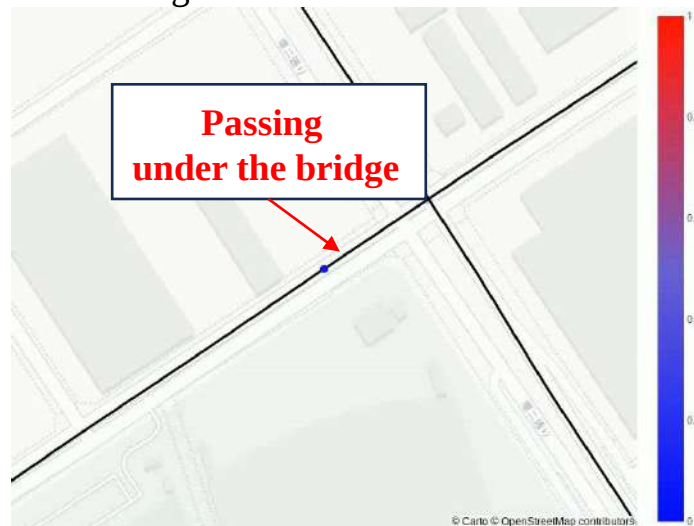


位置空間上のサンプリング

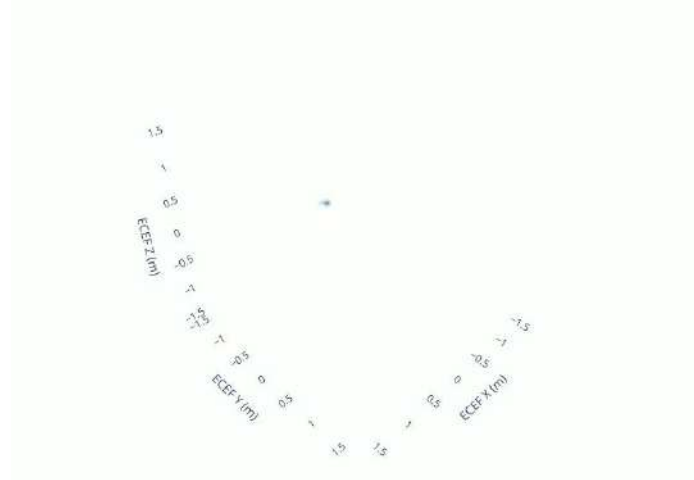


Urban area

Positioning results



Positional likelihood field



Integer ambiguity posterior distributions



<https://www.youtube.com/watch?v=bcodMoeX0SE>

工夫した点

- サンプリングの初期位置問題
 - 基本的にはRTKLIBのFloat解を利用
- FGOの最新値 + 予測値でいいのでは？
 - IMU積算が長いと正しいFix解が求まらない
- 今回のチャレンジは**Float解とFGO予測値の両方を探索範囲**に設定
両方の探索範囲から尤もらしい整数アンビギュイティを推定



整数アンビギュイティ
探索範囲

整数アンビギュイティ
探索範囲

整数アンビギュイティ
探索範囲

Ground truth

トンネル

反省点

- 整数アンビギュイティを状態変数としてFGOに組み込みたかった 状態変数: $X_t = [x_t, v_t, b_t, d_t] \Rightarrow X_t = [x_t, v_t, \mathbf{n}_t, b_t, d_t]$
 - 整数アンビギュイティが求まったとして Carrier phase factor で処理されている
 - 整数アンビギュイティの誤差が考慮されないモデルになっている
- 整数アンビギュイティ推定にマルチパスが全く考慮されていない
 - NLOSの除去でさらにFix率の向上の見込みあり
 - 今後の研究課題
- GTSAM上でIMU積算がうまくいかない箇所が点在している
 - 原因不明, GNSSが受信してない環境で頻発している模様
 - 解決すればあと数ポイントは向上した見込みあり

