

2021/09/15

デジタルマップを用いた 車両測位システムのための GNSSRAIMアルゴリズム

立命館大学院 理工学研究科
情報通信システム研究室
太田 良仁

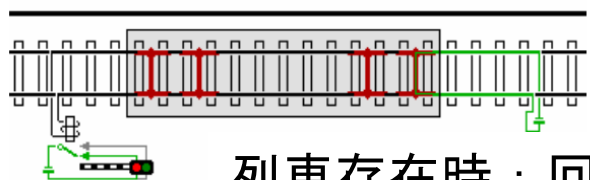
研究背景

現状

列車の位置

地上に設置した装置の上を
列車が通過することで把握

特定区間に列車の存在を検知



列車存在時：回路短絡

地上設備のメンテナンスに
膨大な労力と費用が掛かる



GPS：安価かつ小型の地上設備

測位手法

デジタル軌道マップの開発が進む
列車の特性：常に軌道上を移動



GNSS (Global Navigation
Satellite System) 測位：
この特性を用いた**拘束条件を付ける**
⇒未知数が減る

研究背景

車両の位置測位

高い安全性が求められる

課題

- ・ 測位精度の信頼性が担保されない
- ・ 電波を用いる特性上、通信情報の改竄が容易



RAIM
(Receiver Autonomous Integrity Monitoring)
を用いる
⇒信頼性の評価

提案手法

拘束条件を用いる

⇒未知数を減らす

RAIMを用いる

⇒観測残差を利用して信頼性を評価・確保

観測モデル

一周波

コード疑似距離

$$\rho_{CA,u}^p(t) = r_u^p(t, t - \tau_u^p) + c[\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p)] + \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + e_{CA,u}^p(t)$$

搬送波位相積算値

$$\begin{aligned}\Phi_{L1,u}^p(t) &= \lambda_1 \varphi_{L1,u}^p(t) \\ &= r_u^p(t, t - \tau_u^p) + c[\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p)] - \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + \lambda_1(N_{L1,u}^p + \phi_{L1,u}^p) + \varepsilon_{L1,u}(t)\end{aligned}$$

t : 受信機 u における真の受信時刻
 τ_u^p : 衛星 p から受信機 u への伝搬時間
 $r_u^p(t, t - \tau_u^p)$: 衛星 p と受信機 u との幾何学的距離
 c : 光速 ($= 2.99792458 \times 10^8$ [m/s])
 δt_u : 受信機時計誤差
 $\delta t^p(t - \tau_u^p)$: 時刻 $(t - \tau_u^p)$ での衛星 p の時計誤差
 δI_u : 電離層屈折効果
 δT_u : 対流圏屈折効果

f_i : L_i 帯の周波数 [Hz]
 λ_i : L_i 帯の波長 [m]
 $N_{L1,u}^p$: 整数値バイアス
 $\phi_{L1,u}^p$: phase wind up 効果
 $e_{CA,u}^p$: コード疑似距離観測雑音
 $\varepsilon_{L1,u}(t)$: 搬送波位相観測雑音

観測モデル

線路上の二点の座標

デジタル軌道マップ上の軌道敷設の中心線を形成する連続した二点の座標を

電車の座標

$$X_1 = (x_1, y_1, z_1) \quad X_2 = (x_2, y_2, z_2)$$

受信機座標を $X_u = (x_u, y_u, z_u)$

二点を通る直線上に受信機があるとする

x, yについてyをxを用いて表せる

$$\begin{aligned} y_u &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_u + y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 \\ &\equiv ax_u + b \end{aligned}$$

x, zについてzをxを用いて表せる

$$\begin{aligned} z_u &= \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} x_u + z_1 - \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} x_1 \\ &\equiv \alpha x_u + \beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_u^p(t, t - \tau_u^p) &= \sqrt{\{x_u(t) - x^p(t - \tau_u^p)\}^2 + \{ax_u(t) + b - y^p(t - \tau_u^p)\}^2 + \{\alpha x_u(t) + \beta - z^p(t - \tau_u^p)\}^2} \\ &= \sqrt{x_u(t)(1 + a^2 + \alpha^2) + \{x^p(t - \tau_u^p) - ay^p(t - \tau_u^p) + ab - \alpha z^p(t - \tau_u^p) + \alpha\beta\}} \end{aligned}$$

変数 X_u のみ

観測モデル

$$r_u^p(t, t - \tau_u^p) = \sqrt{x_u(t)(1 + a^2 + \alpha^2) + \{x^p(t - \tau_u^p) - ay^p(t - \tau_u^p) + ab - \alpha z^p(t - \tau_u^p) + \alpha\beta\}}$$

1 段予測値 $x(t) = \hat{x}$ まわりでテーラ一級数展開 (1次近似)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{r}_u^p}{\partial \hat{x}} &= [2(x^p - \hat{x}_u) + 2\{y^p - (a\hat{x}_u + b)\}(-a) + 2\{z^p - (\alpha\hat{x}_u + \beta)\}(-\alpha)] / 2\hat{r}_u^p \\ &= [\hat{x}_u(1 + a^2 + \alpha^2) + \{-x_p - ay^p + ab - \alpha z^p + \alpha\beta\}] / \hat{r}_u^p \end{aligned}$$

コード擬似距離

$$\rho_{CA,u}^p(t) = \frac{\partial \hat{r}_u^p}{\partial \hat{x}} (x_u - \hat{x}_u) + c[\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p)] + \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + e_{CA,u}^p(t)$$

搬送波位相積算値

$$\begin{aligned} \Phi_{L1,u}^p(t) &= \lambda_1 \varphi_{L1,u}^p(t) \\ &= \frac{\partial \hat{r}_u^p}{\partial \hat{x}} (x_u - \hat{x}_u) + c[\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p)] - \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + \lambda_1(N_{L1,u}^p + \phi_{L1,u}^p) + \varepsilon_{L1,u}(t) \end{aligned}$$

観測モデル

観測方程式

$$y_t = H_t x_t + v_t$$

$$\begin{bmatrix} \rho_{CA,u}^p - \hat{r}_u^p + \frac{\partial \hat{r}_u^p}{\partial \hat{u}} \hat{x}_u \\ \Phi_{L1,u}^p - \hat{r}_u^p + \frac{\partial \hat{r}_u^p}{\partial \hat{u}} \hat{x}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{r}_u^p}{\partial \hat{u}} & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ \frac{\partial \hat{r}_u^p}{\partial \hat{u}} & 1 & 1 & 1 & 1 & \lambda_{L1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ c\delta t_{\hat{u}} \\ c\delta t_{\hat{u}}^p \\ \delta I_u^p \\ \delta T_u^p \\ N_{L1,\hat{u}}^{\hat{p}_m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{CA,u}^{p_m} \\ \varepsilon_{L1,u}^{p_m} \end{bmatrix}$$

$$I \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad O \equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial \hat{r}_u^p}{\partial \hat{u}} \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{r}_u^1}{\partial \hat{u}} \\ \frac{\partial \hat{y}_u^2}{\partial \hat{u}} \\ \frac{\partial \hat{r}_u^2}{\partial \hat{u}} \\ \vdots \\ \frac{\partial \hat{r}_u^{n_s}}{\partial \hat{u}} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{1} \equiv [1, 1, \dots, 1]^T : n_s \times 1 \text{ vector}$
 $n_s : \text{使用する全衛星数}$

観測モデル

観測方程式 $y_t = H_t x_t + v_t$

最小二乗法

推定値

$$\hat{x} = [H^T R^{-1} H]^{-1} H^T R^{-1} y$$

観測残差

$$y - H \hat{x} = \nu$$

RAIMに用いる

RAIM

- ・ RAIMとは

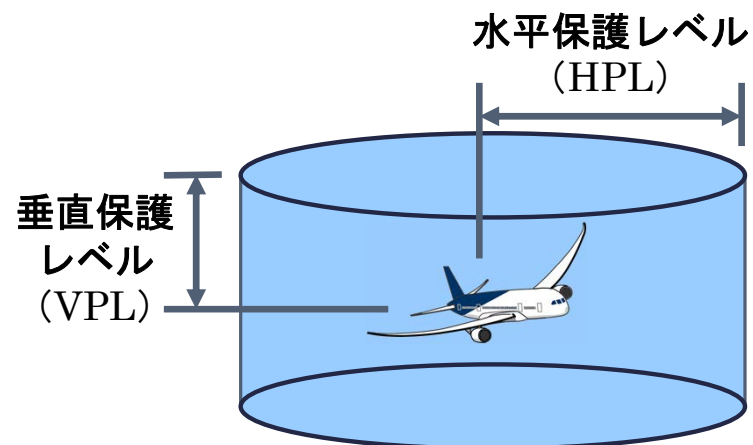
測位演算の過程において生成される観測残差を用いる
観測量の整合性を検証し、誤り検出を行う



その航法システムがどの程度信頼できるか評価

プロテクションレベル PL

測位結果の信用限界値
測位解が円筒の範囲を外れている可能性が
PになるようPLを求め、精度を保証する



RAIM

観測残差

$$y - H\hat{x} = \nu$$

共分散行列

$$\begin{aligned} \text{Cov}[y - H\hat{x}] &= \text{E}[(y - H\hat{x})(y - H\hat{x})^T] \\ &= \text{E}[(y - H[H^T R^{-1} H]H^T R^{-1}y)(y - H[H^T R^{-1} H]H^T R^{-1}y)^T] \\ &= \text{E}[(I - H[H^T R^{-1} H]H^T R^{-1})yy^T(I - H[H^T R^{-1} H]H^T R^{-1})^T] \\ &\equiv M \end{aligned}$$



検定統計量

$$\begin{array}{ll} \cdot \text{残差二乗和} & \cdot \text{検定統計量} \\ WSSE \equiv \nu^T M^{-1} \nu & T \equiv \sqrt{WSSE} \end{array}$$

RAIM

検定統計量 T を用いて観測量に誤りがあるか統計的に検定するため
以下の仮説を導入する

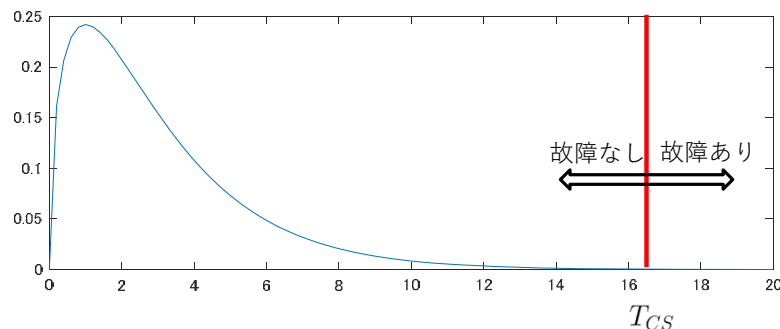
仮説

帰無仮説 H_0 : 観測に誤りはなかった
対立仮説 H_1 : 観測に誤りがあった

仮説に対して判定を行うためには、誤警報率 P_{FA} 与えて、 χ^2 検定の
閾値 T_{CS} を設定する

χ^2 検定

$P_{FA} = 0.001$ $\sigma_0 = 1$ [m] 自由度 3



T_{CS} : 正規化された閾値 $T_D = \sigma_0 \sqrt{T_{CS}}$
 T_D : T に対する閾値

$T_{CS} = 16.27$ $T_D = 4.03$

$T < T_D$ のとき, H_0 を採択

$T \geq T_D$ のとき, H_1 を採択

RAIM

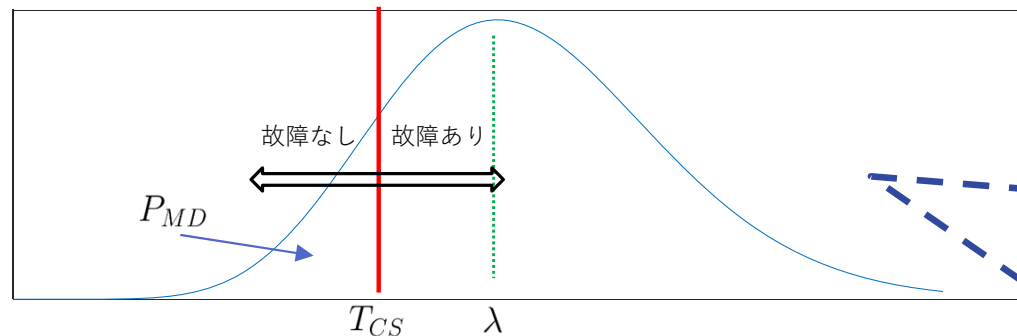
χ^2 検定 \longrightarrow 非心 χ^2 検定

確率変数

$$s = \frac{WSSE}{\sigma^2}$$

確率密度関数 (PDF)

$$p(s) = e^{-(\lambda+s)/2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k \cdot s^{k-1+n/2}}{2^{2k+n/2} \cdot k! \cdot \Gamma(k + n/2)}, \quad s > 0$$



T_{cs} より左側の面積：

不検出率： P_{MD}

T_{cs} より右側の面積：

検出率： $1 - P_{MD}$

この検出率で検出できる最小のバイアスを検出可能最小バイアス (MDB) という。

$$MDB \equiv \sigma_0 \sqrt{\lambda} = b$$

RAIM

水平方向の位置誤差の大きさは、
バイアスベクトル $\varepsilon = [b_{lat} \ b_{lon} \ b_{alt}]^T$ の要素の大きさによって違いがある



影響が一番大きい要素を調べるために ε が
それぞれの方向の単位ベクトルの場合を考える

水平方向のPL

$$\begin{aligned} HPL &= HSlope_{\max} T_{Bais} \\ &= HSlope_{\max} \sigma_0 \sqrt{\lambda} \end{aligned}$$

PLとALを比較



ALを超えるとエラー

完全性が満たされていない

警報限界 AL (Alarm Limit)
あらかじめ定義

実験

方法：電車を電子基準点、電子基準点を通る二点を線路と仮定し
提案する拘束条件と最小二乗法での測位結果を比較する

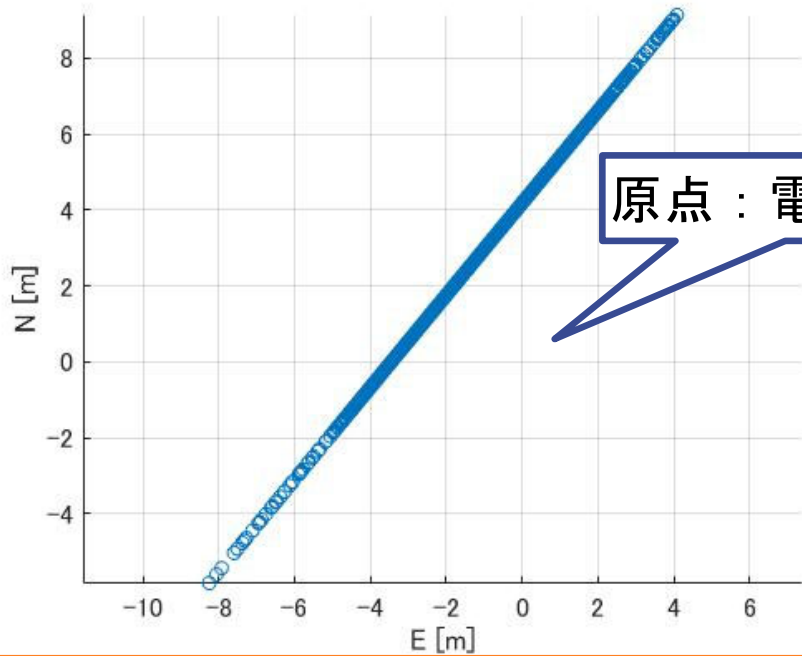
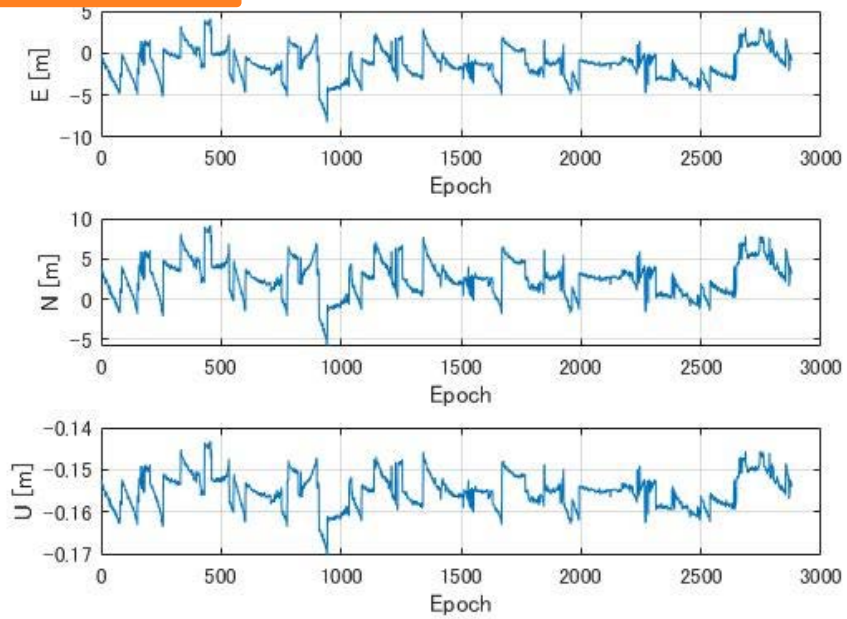
| | |
|-------------------|---------------------------------|
| 観測場所(役割：電車) | 電子基準点(大津2) |
| 観測時間 (GPSTime) | 2021年8月26日 00:01:00~23:59:30 |
| 衛星システム | GPS |
| 更新間隔 | 1データ / 30[sec] |



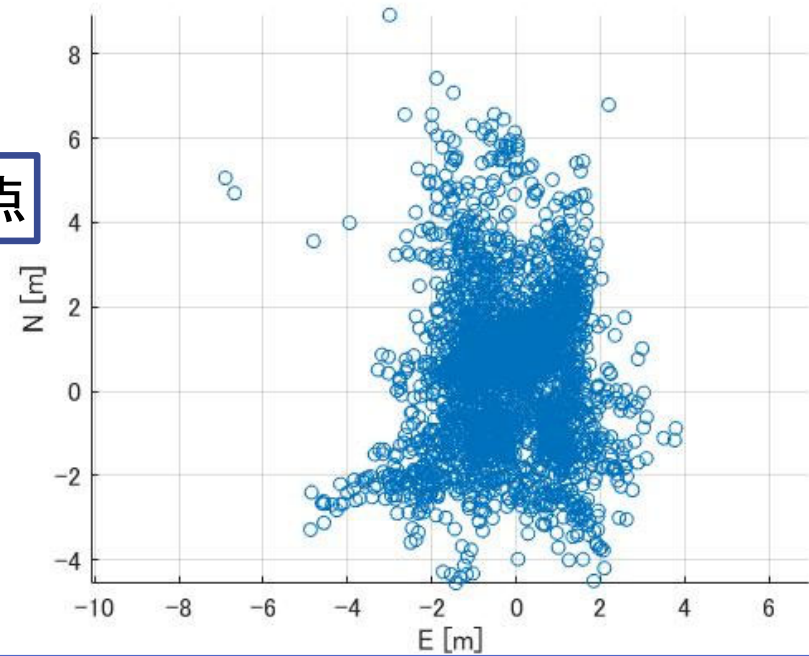
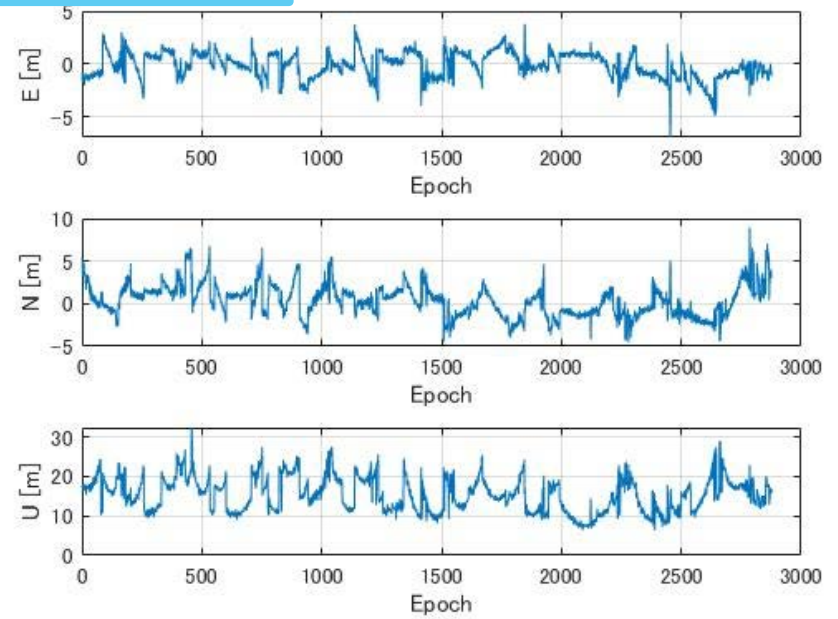
| 条件 | X | Y | Z |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 電子基準点 (大津 2) | -3.7593338022E+06 | 3.6422632533E+06 | 3.6324507784E+06 |
| 直線を形成する点 1 | - 3.759511635946152 E+06 | 3.641169858205933 E+06 | 3.633360184989581 E+06 |
| 直線を形成する点 2 | - 3.759150546602499 E+06 | 3.643364066615054 E+06 | 3.631538990822185 E+06 |



提案手法



最小二乘法



考察と今後の展望

実験結果

提案手法の測位結果は誤差E,N座標ともに15m程度であった



1車両の長さは20m程度であり、かつ線路の区間は数km単位であるため
本手法は有効である



測位結果の精度をRAIMを用いて判断する

今後の展望

- ・ 静止点での結果であるため移動体での実験
- ・ マルチGNSSへの応用