

GNSS 測位を用いた低速で移動するロボットにおける 移動ベクトルの高精度推定

A Method of Successive Moving Baseline Estimation of a Slow Speed Robot Based on GNSS Positioning

林 宏樹[†], 佐々本 奈緒[†], 小矢 美晴[‡], 久保 幸弘[†]

[†] 立命館大学 電気電子工学科

[‡] 神戸市立工業高等専門学校 電子工学科

Hiroki Hayashi[†], Nao Sasamoto[†], Yoshiharu Koya[‡] and Kubo Yukihiro[†]

[†] Ritsumeikan University

[‡] Kobe City College of Technology

Abstract 全世界衛星測位システム (Global Navigation Satellite System; GNSS) はさまざまな場面で使用されており, その測位精度に対する要求はますます厳しくなっている. 本研究ではイチゴ自動受粉ロボット (神戸市立工業高等専門学校で開発中) に焦点を当て, その移動ベクトル推定法 [1, 2] について研究を行っている. 本論文では 1 台の GNSS 受信機で得られる観測量を用いて, 連続する 2 つの観測エポック間の移動ベクトルを高精度に推定する方法を提案する. さらに, 移動ベクトルに含まれるバイアス誤差を推定する方法についても提案する. 実験を通して提案手法と相対測位法の精度を比較した結果, その誤差は 4.68 [cm] であった.

1 はじめに

GNSS はさまざまな場面で使用されており, その測位精度に対する要求はますます厳しくなっている. 本研究では低速で移動と停止を繰り返すイチゴ自動受粉ロボットに焦点を当て, その移動ベクトル推定法について研究を行う.

1.1 イチゴ自動受粉ロボット

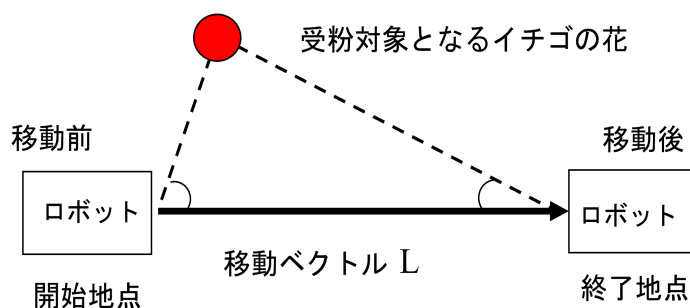


図 1: イチゴ自動受粉ロボット

図 1 にイチゴ自動受粉ロボットのイメージを示す. ロボットは, 受粉対象となる花を装備されているカメラで探し出し, ロボットアームを用いて自動で受粉を行う [2]. 精度よく受粉を行うためにはロボットに対する花の角度や三次元位置が必要である. ロボットには単眼のカメラが装備されており, 移動前と移動後で対象となる花の画像を 2 枚撮影する. ロボットに対する花の角度や三次元位置は, ステレオ法を 2 枚の画像に適用す

ること得られる [3]. ステレオ画像処理を正確に行うためには, ロボットの移動ベクトルを高精度に推定することが重要である. 本論文では 1 台の GNSS 受信機を用いて, ロボットの移動ベクトルを高精度に推定する方法を提案する.

1.2 提案手法の概要

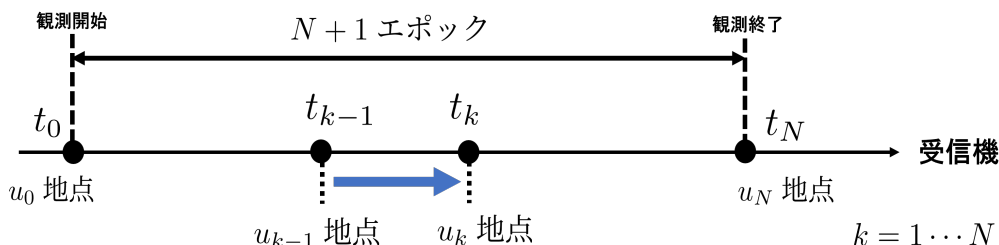


図 2: 提案手法の概要

本論文では, 1 台の GNSS 受信機で得られる観測量を用いて, 連続する 2 つの観測エポック間の移動ベクトルを高精度に推定する方法を提案する. 図 2 は観測開始から終了までの観測エポックとロボットの位置関係を示している. エポック k (時刻 t_k) における位置を u_k と表記し, ロボットは u_0 地点から u_N 地点まで動く. ここで, $t_k \equiv t_0 + k\Delta T$ であり, ΔT はデータ更新間隔を表している.

提案手法では, 1 台の受信機でエポック k と $k-1$ において得られる観測量の差に基づき, 2 つの連続するエポック間の移動ベクトル $u_k - u_{k-1}$ を推定する. また, 推定された移動ベクトルを加算することにより, 移動開始地点 u_0 からの相対位置を求める.

本提案手法の着想は, [4, 5] で提案された, Moving Base 法 (以下, MB 法) に基づいている. [4, 5] では, 移動する 2 台の受信機の相対位置が [mm]~[cm] レベルの精度で得られている. MB 法の原理は GNSS 測位でも精度の良い相対測位法 [6] に類似しており, 本論文では MB 法を 1 台の受信機の場合について拡張したものである. データ更新間隔が 5 [s] 未満といった十分短い場合に提案手法を適用すると, MB 法と同等の精度で移動ベクトルを推定できると予想される.

一方, 複数の GNSS 受信機を用いて相対測位法を適用すれば, 高精度に移動ベクトルを推定できることは周知の通りである. しかしながら, 周囲の環境により [mm] レベルの微小な誤差を含んでいる. この微小な誤差は主に周囲の環境や衛星配置の影響によって引き起こされ, 数分以内であればバイアス誤差としてみなすことができる. そこで本論文では, ロボット停止時の測位結果を利用してバイアス誤差を推定する方法も提案する. 最終的に, ロボット移動時に推定した移動ベクトルをロボット停止時に推定したバイアス誤差で補正する.

2 観測モデルと移動ベクトルの推定

以下に提案手法を GPS(Global Positioning System) の観測量に対して示すが [7, 8], 本提案手法は GPS 以外の衛星測位システムにも簡単に拡張可能である [9]. エポック k における, 衛星 p のコード擬似距離観測量を $\rho_i^p(k)$ とする. 下添え字 i はコード擬似距離の種類を表すインデックスであり, $i = 1$ が C/A コード, $i = 2$ が P(Y) コードを意味している. 同様に, 搬送波位相観測量を $\Phi_j^p(k)$ と表す. 下添え字 j は周波数帯を表すインデックスであり, $j = 1$ が L1, $j = 2$ が L2 帯を意味している [6, 10]. これらの観測量は次のように表現される.

$$\rho_1^p(k) = r^p(k) + c\{\delta t(k) - \delta t^p(k)\} + \delta I^p(k) + \delta T^p(k) + e_1^p(k), \quad (1)$$

$$\rho_2^p(k) = r^p(k) + c\{\delta t(k) - \delta t^p(k)\} + \frac{f_1^2}{f_2^2}\delta I^p(k) + \delta T^p(k) + e_2^p(k), \quad (2)$$

$$\Phi_1^p(k) = r^p(k) + c\{\delta t(k) - \delta t^p(k)\} - \delta I^p(k) + \delta T^p(k) + \lambda_1 N_1^p + \varepsilon_1^p(k), \quad (3)$$

$$\Phi_2^p(k) = r^p(k) + c\{\delta t(k) - \delta t^p(k)\} - \frac{f_1^2}{f_2^2}\delta I^p(k) + \delta T^p(k) + \lambda_2 N_2^p + \varepsilon_2^p(k), \quad (4)$$

ただし、 c ($\approx 2.99792458 \times 10^8$ [m/s]) は光速を表し、 f_1 ($= 1575.42$ [MHz]) および λ_1 は、それぞれ L1 帯の周波数、波長を表している。また、 f_2 ($= 1227.6$ [MHz]) および λ_2 は、それぞれ L2 帯の周波数、波長を表している。 δI^p 、 δT^p は、それぞれ電離圏、対流圏における伝搬遅延である。 N_j^p は衛星 p と受信機間における整数値バイアスを表し、コード、搬送波による観測雑音はそれぞれ e 、 ε で示している。 $\delta t(k)$ と $\delta t^p(k)$ はそれぞれ受信機時計誤差、衛星時計誤差を表している。

$r^p(k)$ は衛星 p と受信機間の幾何学的距離を表しており、 $r^p(k) \equiv \|u_k - s^p(k)\|$ である。 $u_k \equiv [x_k, y_k, z_k]^T$ 、 $s^p \equiv [x^p, y^p, z^p]^T$ はそれぞれ未知受信機座標と衛星位置を示している。

(1)–(4) 式において、受信機位置の 1 段予測値 $u_k = \hat{u}_k$ まわりでテーラー展開を行うと、次のような線形化された観測方程式を得る。

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_1^p(k) &= \rho_1^p(k) - r_{\hat{u}_k}^p(k) + g_{\hat{u}_k}^p \hat{u}_k \\ &= g_{\hat{u}_k}^p(k) u_k + c\{\delta t(k) - \delta t^p(k)\} + \delta I^p(k) + \delta T^p(k) + e_1^p(k), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_2^p(k) &= \rho_2^p(k) - r_{\hat{u}_k}^p(k) + g_{\hat{u}_k}^p \hat{u}_k \\ &= g_{\hat{u}_k}^p(k) u_k + c\{\delta t(k) - \delta t^p(k)\} + \frac{f_1^2}{f_2^2}\delta I^p(k) + \delta T^p(k) + e_2^p(k), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_1^p(k) &= \Phi_1^p(k) - r_{\hat{u}_k}^p(k) + g_{\hat{u}_k}^p \hat{u}_k \\ &= g_{\hat{u}_k}^p(k) u_k + c\{\delta t(k) - \delta t^p(k)\} - \delta I^p(k) + \delta T^p(k) + \lambda_1 N_1^p + \varepsilon_1^p(k), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_2^p(k) &= \Phi_2^p(k) - r_{\hat{u}_k}^p(k) + g_{\hat{u}_k}^p \hat{u}_k \\ &= g_{\hat{u}_k}^p(k) u_k + c\{\delta t(k) - \delta t^p(k)\} - \frac{f_1^2}{f_2^2}\delta I^p(k) + \delta T^p(k) + \lambda_2 N_2^p + \varepsilon_2^p(k), \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、(5)–(8) 式の要素は以下のように表される。

$$\begin{aligned} r_{\hat{u}_k}^p(k) &\equiv \|\hat{u}_k - s^p(k)\|, \\ g_{\hat{u}_k}^p(k) &\equiv \left[\frac{\partial r^p(k)}{\partial u_k} \right]_{u_k = \hat{u}_k}^T = \frac{\{\hat{u}_k - s^p(k)\}^T}{\|\hat{u}_k - s^p(k)\|}. \end{aligned}$$

2.1 衛星間一重差

衛星 q についても同様の観測量を得ると、それらの一重差を計算することにより、受信時計誤差や受信機ハードウェアバイアスなど受信機側に起因する誤差を消去することができる。この計算を衛星間一重差と呼び次のように定義する。

$$\rho_i^{pq}(k) \equiv \rho_i^p(k) - \rho_i^q(k), \quad (9)$$

$$\Phi_j^{pq}(k) \equiv \Phi_j^p(k) - \Phi_j^q(k). \quad (10)$$

線形化された (5)–(8) 式の表記を用いると、衛星間一重差は次のように計算される。

$$\begin{aligned}
\tilde{\rho}_1^{pq}(k) &= \tilde{\rho}_1^p(k) - \tilde{\rho}_1^q(k) \\
&= g_{\tilde{u}_k}^p u_k - g_{\tilde{u}_k}^q u_k + c(\delta t^q - \delta t^p) + \delta I^p - \delta I^q + \delta T^p - \delta T^q + e_1^p - e_1^q \\
&= g_{\tilde{u}_k}^{pq} u_k + c\delta t^{qp} + \delta I^{pq} + \delta T^{pq} + e_1^{pq},
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\rho}_2^{pq}(k) &= \tilde{\rho}_2^p(k) - \tilde{\rho}_2^q(k) \\
&= g_{\tilde{u}_k}^p u_k - g_{\tilde{u}_k}^q u_k + c(\delta t^q - \delta t^p) + \frac{f_1^2}{f_2^2}(\delta I^p - \delta I^q) + \delta T^p - \delta T^q + e_2^p - e_2^q \\
&= g_{\tilde{u}_k}^{pq} u_k + c\delta t^{qp} + \frac{f_1^2}{f_2^2}\delta I^{pq} + \delta T^{pq} + e_2^{pq},
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\Phi}_1^{pq}(k) &= \tilde{\Phi}_1^p(k) - \tilde{\Phi}_1^q(k) \\
&= g_{\tilde{u}_k}^p u_k - g_{\tilde{u}_k}^q u_k + c(\delta t^q - \delta t^p) - (\delta I^p - \delta I^q) + \delta T^p - \delta T^q + \lambda_1(N_1^p - N_1^q) + \varepsilon_1^p - \varepsilon_1^q \\
&= g_{\tilde{u}_k}^{pq} u_k + c\delta t^{qp} - \delta I^{pq} + \delta T^{pq} + \lambda_1 N_1^{pq} + \varepsilon_1^{pq},
\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\Phi}_2^{pq}(k) &= \tilde{\Phi}_2^p(k) - \tilde{\Phi}_2^q(k) \\
&= g_{\tilde{u}_k}^p u_k - g_{\tilde{u}_k}^q u_k + c(\delta t^q - \delta t^p) - \frac{f_1^2}{f_2^2}(\delta I^p - \delta I^q) + \delta T^p - \delta T^q + \lambda_2(N_2^p - N_2^q) + \varepsilon_2^p - \varepsilon_2^q \\
&= g_{\tilde{u}_k}^{pq} u_k + c\delta t^{qp} - \frac{f_1^2}{f_2^2}\delta I^{pq} + \delta T^{pq} + \lambda_2 N_2^{pq} + \varepsilon_2^{pq},
\end{aligned} \tag{14}$$

ただし、(11)–(14) 式の要素について、以下のように定義している。

$$\begin{aligned}
g_{\tilde{u}_k}^{pq} &\equiv g_{\tilde{u}_k}^p - g_{\tilde{u}_k}^q, \\
\delta t^{qp} &\equiv \delta t^q - \delta t^p, \\
\delta I^{pq} &\equiv \delta I^p - \delta I^q, \\
\delta T^{pq} &\equiv \delta T^p - \delta T^q, \\
N_j^{pq} &\equiv N_j^p - N_j^q, \\
e_i^{pq} &\equiv e_i^p - e_i^q, \\
\varepsilon_j^{pq} &\equiv \varepsilon_j^p - \varepsilon_j^q.
\end{aligned}$$

2.2 連続する 2 エポック間での一重差

同様の衛星間一重差がエポック $k-1$ についても得られたとする。ここで、以下のように連続するエポック k , $k-1$ 間で衛星間一重差のエポック間差分を計算する。

$$\begin{aligned}
\rho_i^{pq}(k, k-1) &\equiv \rho_i^{pq}(k) - \rho_i^{pq}(k-1) \\
&= \rho_i^p(k) - \rho_i^q(k) - \rho_i^p(k-1) + \rho_i^q(k-1),
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
\Phi_j^{pq}(k, k-1) &\equiv \Phi_j^{pq}(k) - \Phi_j^{pq}(k-1) \\
&= \Phi_j^p(k) - \Phi_j^q(k) - \Phi_j^p(k-1) + \Phi_j^q(k-1).
\end{aligned} \tag{16}$$

さらに, (15), (16) 式を $u_k = \hat{u}_{k-1}$ まわりで線形化すると (17)–(20) 式を得る.

$$\begin{aligned}\tilde{\rho}_1^{pq}(k, k-1) &= g_{\hat{u}_{k-1}}^{pq}(u_k - \hat{u}_{k-1}) + c\delta t^{qp}(k, k-1) + \delta I^{pq}(k, k-1) + \delta T^{pq}(k, k-1) \\ &\quad + e_1^{pq}(k, k-1),\end{aligned}\tag{17}$$

$$\begin{aligned}\tilde{\rho}_2^{pq}(k, k-1) &= g_{\hat{u}_{k-1}}^{pq}(u_k - \hat{u}_{k-1}) + c\delta t^{qp}(k, k-1) + \frac{f_1^2}{f_2^2}\delta I^{pq}(k, k-1) + \delta T^{pq}(k, k-1) \\ &\quad + e_2^{pq}(k, k-1),\end{aligned}\tag{18}$$

$$\begin{aligned}\tilde{\Phi}_1^{pq}(k, k-1) &= g_{\hat{u}_{k-1}}^{pq}(u_k - \hat{u}_{k-1}) + c\delta t^{qp}(k, k-1) - \delta I^{pq}(k, k-1) + \delta T^{pq}(k, k-1) \\ &\quad + \lambda_1 N_1^{pq}(k, k-1) + \varepsilon_1^{pq}(k, k-1),\end{aligned}\tag{19}$$

$$\begin{aligned}\tilde{\Phi}_2^{pq}(k, k-1) &= g_{\hat{u}_{k-1}}^{pq}(u_k - \hat{u}_{k-1}) + c\delta t^{qp}(k, k-1) - \frac{f_1^2}{f_2^2}\delta I^{pq}(k, k-1) + \delta T^{pq}(k, k-1) \\ &\quad + \lambda_2 N_2^{pq}(k, k-1) + \varepsilon_2^{pq}(k, k-1).\end{aligned}\tag{20}$$

ただし, $g_{\hat{u}_{k-1}}^p(k) \equiv \left[\frac{\partial r^p(k)}{\partial u_k} \right]_{u_k=\hat{u}_{k-1}}^T$ は 1×3 の既知ベクトルである. また, 衛星時計誤差のエポック間差分

$$\delta t^{qp}(k, k-1) \equiv \delta t^{qp}(k) - \delta t^{qp}(k-1),$$

電離圏屈折効果, 対流圏屈折効果のエポック間差分

$$\begin{aligned}\delta I^{pq}(k, k-1) &\equiv \delta I^{pq}(k) - \delta I^{pq}(k-1), \\ \delta T^{pq}(k, k-1) &\equiv \delta T^{pq}(k) - \delta T^{pq}(k-1),\end{aligned}$$

は短基線, 短い時間幅において無視できるものである. 整数値バイアスのエポック間差分

$$N_j^{pq}(k, k-1) \equiv N_j^{pq}(k) - N_j^{pq}(k-1)$$

は受信機が衛星の信号を連続して受信する限りゼロとなる. ゆえに, 提案手法の観測方程式は次のような簡単な形で表される.

$$\tilde{\rho}_i^{pq}(k, k-1) = g_{\hat{u}_{k-1}}^{pq}(u_k - \hat{u}_{k-1}) + e_i^{pq}(k, k-1),\tag{21}$$

$$\tilde{\Phi}_j^{pq}(k, k-1) = g_{\hat{u}_{k-1}}^{pq}(u_k - \hat{u}_{k-1}) + \varepsilon_j^{pq}(k, k-1),\tag{22}$$

ただし,

$$\begin{aligned}e_i^{pq}(k, k-1) &= e_i^{pq}(k) - e_i^{pq}(k-1), \\ \varepsilon_j^{pq}(k, k-1) &= \varepsilon_j^{pq}(k) - \varepsilon_j^{pq}(k-1),\end{aligned}$$

と定義している.

2.3 移動ベクトルの推定

ロボットは低速で移動するため、その速度を微小なガウス白色雑音として表現できると仮定すると、状態方程式は (23) 式のように表現できる。複数の衛星 ($p = 1, q = 2, \dots, n_s$) について、(21), (22) 式の観測量を y_i, y_j とベクトル表記し、観測方程式を (24) 式とする。カルマンフィルタを (23), (24) 式に適用し、移動ベクトル $u_k - \hat{u}_{k-1}$ を推定する [11, 12].

$$x(k+1) = x(k) + w(k), \quad (23)$$

$$y(k) = H(k)x(k) + v(k), \quad (24)$$

ここで、(23)–(24) 式の要素を以下のように表す。

$$y(k) \equiv \begin{bmatrix} y_i \\ y_j \end{bmatrix}, \quad H(k) \equiv \begin{bmatrix} G^{pq} \\ G^{pq} \end{bmatrix}, \quad v(k) \equiv \begin{bmatrix} \varepsilon_i^{pq}(k, k-1) \\ \varepsilon_j^{pq}(k, k-1) \end{bmatrix},$$

$$G^{pq} \equiv \begin{bmatrix} g_{\hat{u}_{k-1}}^{12} & g_{\hat{u}_{k-1}}^{13} & \dots & g_{\hat{u}_{k-1}}^{1n_s} \end{bmatrix}^T,$$

$$x(k) \equiv u_k - \hat{u}_{k-1}.$$

カルマンフィルタによる推定値 $\hat{x}(k|k)$ は、エポック k と $k-1$ 間の移動ベクトルの推定値である。ゆえに、図 1 での移動ベクトル L は、 $k = 1, \dots, N$ それぞれの場合について $\hat{x}(k|k)$ を推定し、加算していくことで得られる。

$$\hat{L}_N = \sum_{k=1}^N \hat{x}(k|k). \quad (25)$$

3 測位誤差の補正手法

GNSS 測位では、基線ベクトルは RTK (Real Time Kinematic) 法によって高精度に得られることがよく知られている [13]。一般的な受信機の仕様によると、RTK 法を適用して得られた水平方向の精度は二乗平均平方根 (RMS) で $0.6 + (0.5 \times 10^{-6} \times \text{baseline length})$ [cm] である [14]。

本論文の提案手法は RTK 法ではないが、短基線、短い時間幅では RTK 法と同様の原理が用いられており、連続するエポック間の移動ベクトル $\hat{x}(k|k)$ は RTK 法と同等の精度で推定されると考えられる。

しかし、一般的に RTK 法によって得られた測位解には微小な誤差が含まれており、主に建物などの周辺環境や衛星配置に依存することが知られている。この微小誤差は、周囲の環境と衛星配置が大きく変化しない数分間では一定のバイアス誤差とみなすことができる。提案手法では連続するエポック間の移動ベクトルを (25) 式のように加算していくことで、最終的な移動ベクトルを算出している。そのため、(25) 式で得られた移動ベクトルには上記のバイアス誤差の変動成分 (ドリフト誤差) が積算されている。それぞれの誤差は [mm] レベルで小さいが、その総和を計算する場合、数センチから数十センチと大きくなる。

この問題を解決するため、 $\hat{x}(k|k)$ に含まれる微小誤差の影響を軽減する方法を提案する。図 2 において、ロボットが時刻 t_0 から t_M まで停止し続け、位置 $u_0 = u_1 = \dots = u_M$ で $M+1$ エポック分の観測データを取得したとする。ただし、図 2 の N を M に置き換えている。取得したロボット停止期間中の観測データに 2 節のアルゴリズムを適用し、ロボット移動期間中と同様の操作を行うと、(25) 式のような移動ベクトルを推定することができる。ここで、停止期間中の観測データを利用して得られた移動ベクトルを $\hat{L}_{s,M}$ と表現する。ただし添え字の “s, M” はそれぞれ、ロボットの停止 (“s” topping) と、停止していたエポック数 M を意味している。

$$\hat{L}_{s,M} = \sum_{k=1}^M \hat{x}(k|k). \quad (26)$$

移動ベクトル $\hat{L}_{s,M}$ はロボットの停止期間中に推定された移動ベクトルのため、理論的にはゼロベクトルであるが、 $\hat{x}(k|k)$ に含まれる微小な誤差の影響によりゼロとならない。ここで、 $\hat{x}(k|k)$ に含まれる微小誤差が $M+1$ エポックの間は定数であると仮定し、 b と表すと、 b は以下のように推定できる。

$$\hat{b} = \frac{\hat{L}_{s,M}}{M}. \quad (27)$$

したがって、 \hat{b} を用いて、次式のように移動ベクトルを補正することでその影響を軽減することができる。

$$\hat{L}_{b,N} = \sum_{k=1}^N (\hat{x}(k|k) - \hat{b}). \quad (28)$$

4 実験と結果

実際の受信機データに提案手法を適用し、空が開けた環境下で実験を行った。表 1 に実験条件を示す。全観測エポックを通して衛星配置は同じであった。使用した全衛星数は 5 基 ($n_s = 5$) であり、2.1 節において仰角が最も高い衛星を基準衛星 $p = 1$ としている。

表 1: 実験条件

実験日時	2022 年 04 月 20 日
実験場所	立命館大学, びわこ・くさつキャンパス
観測時刻 (GPST)	09:35'00-09:50'00
アンテナ	ANN-MB-00-00(u-blox)
受信機	AsteRx-m2 UAS(Septentrio) FLEX6(NovAtel)
データ更新間隔	1 [s]
仰角マスク	30 [deg.]
観測量	C/A P(Y) code pseudorange L1 L2 carrier-phase
使用衛星	GPS

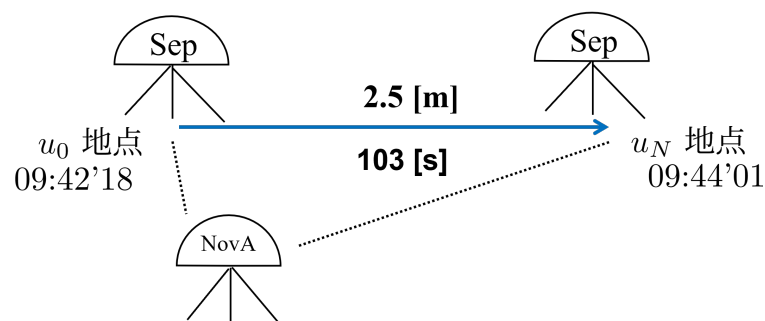


図 3: 実験状況

実験状況を図3に示す。ロボットは u_0 地点に5分間停止し、 $t_0 = 09:42'18$ から動き出し、 $t_N = 09:44'01$ まで103秒 ($N = 103$) かけて u_N に到達した。 u_0 地点から u_N 地点までの距離はメジャーによる測定で2.5 [m] であった。ここで、GNSS 受信機には Septentrio 社製の受信機 (AsteRx-m2 UAS) を用い、手で移動させた。さらに、提案手法を評価するために u_0 地点から約2 [m] 離れた場所に NovAtel 社製の受信機 (FLEX6) を設置し、同時刻で観測を行った。移動する受信機 (AsteRx-m2) と固定した受信機 (FLEX6) で相対測位を行った結果を基準とし、提案手法の精度を評価した。

受信機 (AsteRx-m2 UAS) を移動前に5分間固定した際に得られた観測データに基づき、推定された $\hat{x}(k|k)$ に含まれるバイアス誤差は $\hat{b} = [5.542, 0.004534, -3.058]^T \times 10^{-3}$ [m] であった。

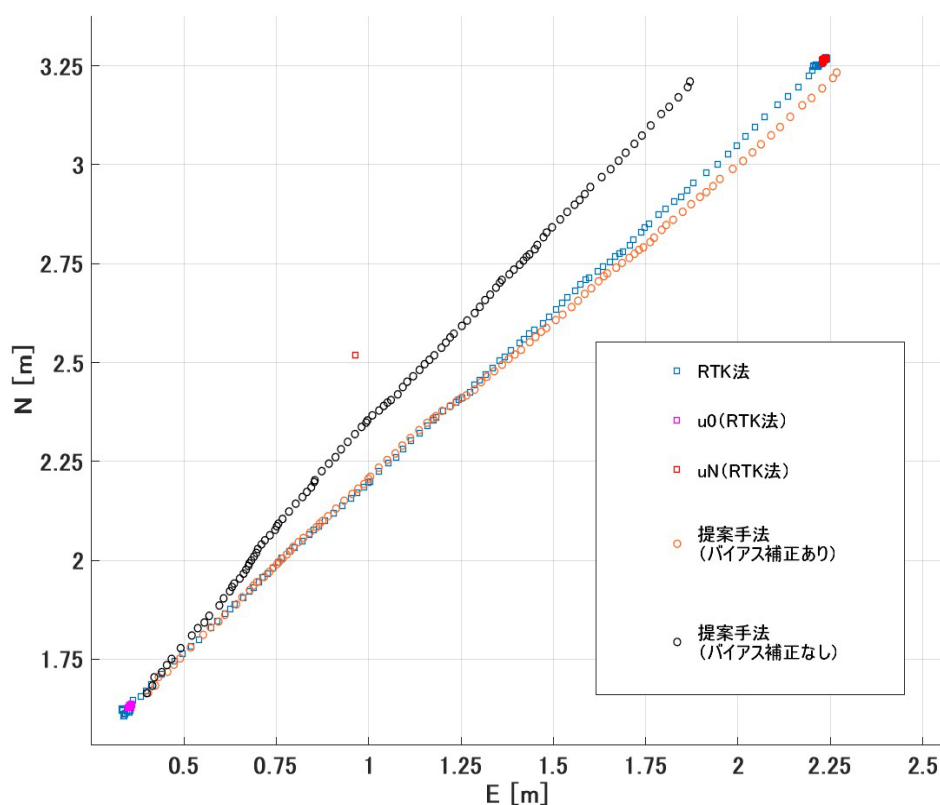


図4: 測位結果

図4は移動する受信機 AsteRx-m2 の水平方向の座標を示したものである。縦軸はN (北) 方向への座標、横軸はE (東) 方向への座標、原点は固定した FLEX6 受信機の座標としている。桃と赤色の四角プロットはそれぞれ事前に RTK 法で測位して得られた u_0 , u_N 地点を示している。また、青色の四角プロットは RTK 法による軌跡を示している。つまり、四角のプロットは提案手法の評価基準となる RTK 法の推定結果である。図4では、 $N = 1, \dots, 103$ について、バイアス誤差補正なしの提案手法によって得られた移動ベクトル \hat{L}_N を黒色の円プロットで示し、バイアス誤差補正ありの提案手法によって得られた移動ベクトル $\hat{L}_{b,N}$ を橙色の円プロットで示している。

移動終了地点 u_N に着目すると、バイアス誤差補正なしの移動ベクトル \hat{L}_{103} では36.5 [cm] であったが、バイアス誤差補正を考慮した移動ベクトル $\hat{L}_{b,103}$ では4.68 [cm] であった。この結果から3節で述べたバイアス誤差補正の手法が効果的に機能していることがわかる。

5 結論

本論文では、連続する2つのエポックにおいて、1台のGNSS受信機で得られる観測量を用いて低速で動くロボットの短い移動ベクトルを推定する方法を提案した。また、移動ベクトルに含まれる微小誤差の影響を軽減するアルゴリズムも提案した。

実験では2.5 [m]といったイチゴ自動受粉ロボットが動くプランターとしてはかなり長い距離を想定したが、実際は1 [m]程度の短い距離が予想される。その場合、RTK法との誤差は1 [cm]以内に抑えられているためイチゴ自動受粉ロボットに実装するには十分な精度が実現できていると考えられる。

今後、実際のロボットを用いた検証、衛星配置やバイアス誤差 b を推定するための時間を変化させるなど、様々な状況を想定して提案手法をさらに評価していきたいと考えている。

参考文献

- [1] 佐々本 奈緒, 林 宏樹, 赤堀 篤紀, 見永 大輔, 久保 幸弘, 小矢 美晴: イチゴ自動受粉ロボットにおける移動ベクトルの高精度推定, 第66回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.379-380, 京都, 5月, 2022.
- [2] 住山 和輝, 小矢 美晴, 久保 幸弘: イチゴの受粉ロボット, 令和2年電気関係学会関西連合大会講演論文集, pp.42-43, 滋賀, 11月, 2020.
- [3] 岡崎 彰夫: はじめての画像処理技術, 工業調査会, 東京, 2000.
- [4] Y. Dong, L. Zhang, D. Wang, Q. Li, J. Wu and M. Wu: Low-latency, high-rate, high-precision relative positioning with moving base in real time, *GPS Solutions*, Vol. 24, issue 2, Article 56, pp.1-13, April, 2020.
- [5] Z. Liang, L. Hanfeng, W. Dingjie, H. Yanqing and W. Jie: Asynchronous RTK precise DGNS positioning method for deriving a low-latency high-rate output, *Journal of Geodesy*, Vol. 89, issue 7, pp.641-653, July, 2015.
- [6] 杉本 末雄, 柴崎 亮介 (編): GPS ハンドブック, 朝倉書店, 2010.
- [7] E. D. Kaplan (Eds.): *Understanding GPS: Principles and Applications*, Artech House, Boston, 1996.
- [8] B. W. Parkinson and J. J. Spilker Jr. (Eds.): *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. I, II, AIAA, Washington, DC, 1997.
- [9] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and E. Wastle: *GNSS - GPS, GLONASS, Galileo and more*, Springer-Verlag, New York, 2008.
- [10] P. Misra and P. Enge: *Global Positioning System - Signals, Measurements, and Performance, Second Edition*, Ganga-Jamuna Press, Massachusetts, 2006.
- [11] 片山 徹: 応用カルマンフィルタ (新版), 朝倉書店, 東京, 2000.
- [12] A. Gelb: *Applied Optimal Estimation*, MIT Press, Massachusetts, 1974.
- [13] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins: *Global Positioning System Theory and Practice, Third, revised edition*, Springer-Verlag, New York, 1994.
- [14] The technical brochure of AsteRx-m2 UAS, Septentrio: <https://pdf.directindustry.com/pdf/septentrio-183002.html>, accessed on Sep. 15, 2022.