

A Study on Large-Scaled Signal Processing with Multiple Receivers for Diversity Receptions in GNSS Positioning

Kosuke KIYAMA*, Shinsuke IBI*, Takumi TAKAHASHI** and Hisato IWAI*

(Received July 7, 2021)

High-precision point positioning technology using GNSS (Global Navigation Satellite System) enables localization in the sub-meter or centimeter accuracy. On the other hand, there are problems in accuracy and reliability in multipath environments such as urban areas as well as mountainous areas. Positioning accuracy deteriorates due to the influence of obstacles between satellites and receivers in user equipment, for example, buildings and trees. The obstacles reduce the number of satellites in line-of-sight by blocking direct waves from satellites and cause multipath such as reflection and diffraction of direct waves from satellites. To address these issues, this paper proposes multi-dimensional signal processing for diversity receptions with the aid of multiple receivers for improving position estimation accuracy. The price of GNSS receivers has been reduced in recent years, so the installation of multiple receivers will be reasonable. In addition, we discuss the validity of the data selection criteria of satellite observations.

Key words : global navigation satellite system, large-scaled signal processing, diversity, position estimation, point positioning

キーワード : 全球測位衛星システム, 大規模信号処理, ダイバーシチ, 位置推定, 単独測位

GNSS 位置推定における複数受信機を用いた 大規模ダイバーシチ信号処理に関する検討

木山 滉介, 衣斐 信介, 高橋 拓海, 岩井 誠人

1. はじめに

衛星測位は米国の GPS (Global Positioning System) に代表される GNSS (Global Navigation Satellite Systems) により, 三次元の絶対位置情報が得られる技術である. GNSS による高精度測位技術ではサブメータ, センチメータ級での測位が可能である^{1,2)}. 近年では, 各国による独自の測位衛星が運用される動きが広がっている. 米国の GPS, ロシアの GLONASS の他, 中国では 2012 年 GPS に依存しない全地球衛星測位システム BeiDou の運用を開始し,

欧州連合による Galileo は衛星数を増加させている. 日本においては, GPS の補完と補強を目的とした地域航法衛星システムである準天頂衛星システム QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) が 2010 年に運用開始され, 将来的には 7 機体制での運用を計画している. このように測位衛星の数は増加の一途を辿っている³⁻⁵⁾. GNSS による位置推定法は大別して, 単独測位と相対測位に分類される. 単独測位では, 衛星の電波を移動局が受信し, 送信時刻と受信時刻の差異に基づき衛星から移動局までの距離を測定

* Department of Electronics, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6355, E-mail: sibi@mail.doshisha.ac.jp

** Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka

する。航法メッセージが載った電波を受信することで複数の衛星位置情報を事前に把握し、その衛星位置から測定した距離だけ離れた球面の交点として移動局の位置を推定する。一方、相対測位では、衛星が放送している電波を移動局だけでなく、予め位置座標が特定されている基準局でも受信する。基準局の観測データと正確な位置座標の関係を、移動局の位置推定の補正に用いる。この仕組みを利用した RTK (Real Time Kinematic) 測位はセンチメートル級の位置推定を可能とするため注目を集めている⁶⁾。

一方で、都市部・山間部などのマルチパス環境における測位では、精度・信頼性において課題が存在する。建造物や樹木などが衛星と受信機間の障害物となり、衛星からの直接波を遮断することによる可視衛星数の減少、および障害物による衛星からの直接波が反射、回折といったマルチパスの影響により測位精度が劣化する^{7,8)}。このような課題に対し、近年 GNSS 受信機の低価格化が進んでおり、今後は複数の受信機を一つのデバイスに搭載できると考えられることから、複数受信機を用いた大規模ダイバーシチ信号処理により単独測位における位置推定精度の改善を図る。

本検討では4つ受信機を利用することで、入手可能な衛星観測次元数を増加させて、マルチパス環境における可視衛星数が減少する課題に対処することを考える。また、障害物による電波の反射、回折の影響で測位精度が劣化する課題に対し、衛星観測データの取捨選択方法について検討する。測位計算で用いられる最小二乗推定解の分散は観測行列の状態によって雑音が増強される。そこで、最小二乗推定解の分散に影響する尺度の一つである行列の条件数をマスク値として設定することで、最小二乗推定解の分散を低減し、測位精度の改善を図る。また、既存のマスクとの併用により測位精度が改善する手法を検討する。

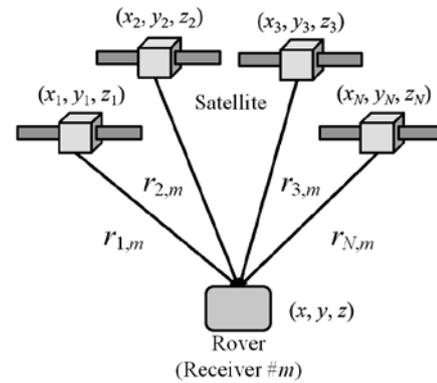


Fig. 1. Point positioning model of GNSS.

2. GNSS 測位方式

2.1 GNSS 単独測

Fig. 1 に GNSS 単独測位のモデルを示す。本検討では、 N 機の衛星から送信された信号を M 台の受信機を有する移動局にて受信し、測位するものとする。GNSS による測位では擬似距離を基にして位置を推定するが、擬似距離には衛星や受信機のクロック誤差が混入している。移動局の受信機の時計は、原子時計を利用している衛星の時計に比べて時刻の正確さが劣る。電波の伝搬速度は光速と同じであるため、受信機の時計と衛星の時計がわずかでもずれると、擬似距離に非常に大きな測定誤差が生じる。したがって、時刻の補正を行う必要があるため、移動局の位置座標に加えて、この受信機クロック誤差も未知数として解く必要がある。

$n \in \{1, \dots, N\}$ 番目の衛星と $m \in \{1, \dots, M\}$ 番目の受信機の間距離 (擬似距離) $r_{n,m}$ は、移動局位置を (x, y, z) 、衛星 n の位置を (x_n, y_n, z_n) 、受信機クロック誤差に起因する距離誤差 (以降、受信機クロック誤差) を s_m とすると、それらの関係は次式の連立方程式で表される。

$$\begin{cases} r_{1,m} = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + s_m \\ \vdots \\ r_{2,m} = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + s_m \\ \vdots \\ r_{N,m} = \sqrt{(x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 + (z_N - z)^2} + s_m \end{cases} \quad (1)$$

本検討では簡単のため、 M 台の受信機は同じ移動局座標 (x, y, z) に位置するものとしていることに注意されたい。また、受信機 m は N 機の衛星との擬似距離 $r_{n,m}$ ($n \in \{1, \dots, N\}$) を観測し、それを観測データとして収集する。

GNSS では衛星 n の位置座標が航法メッセージとして放送されており、それを正しく受信できた場合、式 (1) を未知変数 x, y, z, s_m について解くことで移動局位置と受信機クロック誤差が求められる。このとき、未知変数は 4 つであるので、最低でも 4 つの衛星観測データが必要となる。式 (1) は非線形の連立方程式であることから、逐次近似法により近似的に解を求めることになる⁴⁾。

まず、移動局位置 (x, y, z) と受信機 m のクロック誤差 s_m について適当な初期値 x^0, y^0, z^0, s_m^0 を定義する。この初期値に対応する擬似距離 $r_{n,m}^0$ を次式のように与える。

$$r_{n,m}^0 = \sqrt{(x_n - x^0)^2 + (y_n - y^0)^2 + (z_n - z^0)^2} + s_m^0 \quad (2)$$

次に、観測した擬似距離 $r_{n,m}$ に対して、残差 $\Delta r_{n,m} = r_{n,m} - r_{n,m}^0$ を求め、 x^0, y^0, z^0, s_m^0 をこの残差 $\Delta r_{n,m}$ に相当する分だけ修正する。このとき、次式に示す $r_{n,m}$ の x, y, z, s_m による偏微分を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_{n,m}}{\partial x} &= -\frac{x_n - x}{r_{n,m}}, & \frac{\partial r_{n,m}}{\partial y} &= -\frac{y_n - y}{r_{n,m}} \\ \frac{\partial r_{n,m}}{\partial z} &= -\frac{z_n - z}{r_{n,m}}, & \frac{\partial r_{n,m}}{\partial s_m} &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

移動局位置と受信機 m のクロック誤差の初期値 x^0, y^0, z^0, s_m^0 からの変化量を $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s_m$ と置くと、次式が得られる。

$$\Delta r_{n,m} = \frac{\partial r_{n,m}}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial r_{n,m}}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial r_{n,m}}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial r_{n,m}}{\partial s_m} \Delta s_m \quad (4)$$

ここで、 $\Delta \mathbf{x}_m = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s_m]^T$ 、 $\Delta \mathbf{r}_m = [\Delta r_{1,m}, \Delta r_{2,m}, \dots, \Delta r_{N,m}]^T$ と置くと、 N 次元から成る式 (4) を次式の行列表現に変換できる。ただし、 \cdot^T は転置を意味する。

$$\Delta \mathbf{r}_m = \mathbf{G}_m \Delta \mathbf{x}_m \quad (5)$$

ここで \mathbf{G}_m は観測行列であり、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_m &= \begin{bmatrix} \frac{\partial r_{1,m}}{\partial x} & \frac{\partial r_{1,m}}{\partial y} & \frac{\partial r_{1,m}}{\partial z} & \frac{\partial r_{1,m}}{\partial s_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_{n,m}}{\partial x} & \frac{\partial r_{n,m}}{\partial y} & \frac{\partial r_{n,m}}{\partial z} & \frac{\partial r_{n,m}}{\partial s_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_{N,m}}{\partial x} & \frac{\partial r_{N,m}}{\partial y} & \frac{\partial r_{N,m}}{\partial z} & \frac{\partial r_{N,m}}{\partial s_m} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{x_1 - x}{r_{1,m}} & -\frac{y_1 - y}{r_{1,m}} & -\frac{z_1 - z}{r_{1,m}} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{x_n - x}{r_{n,m}} & -\frac{y_n - y}{r_{n,m}} & -\frac{z_n - z}{r_{n,m}} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{x_N - x}{r_{N,m}} & -\frac{y_N - y}{r_{N,m}} & -\frac{z_N - z}{r_{N,m}} & 1 \end{bmatrix} \quad (6) \\ &\triangleq [\mathbf{G}_m^T, \mathbf{I}_N] \end{aligned}$$

ただし、 \mathbf{I}_N は N 個の 1 から成る列ベクトルを意味する。式 (6) を最小二乗 (LS: Least Square) 規範に基づき解くと、次式が得られる。

$$\Delta \mathbf{x}_m = (\mathbf{G}_m^T \mathbf{G}_m)^{-1} \mathbf{G}_m^T \Delta \mathbf{r}_m \quad (7)$$

上式より求めた $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s_m$ により、初期値 x^0, y^0, z^0, s_m^0 を次式により更新する。

$$\begin{aligned} x^1 &= x^0 + \Delta x, & y^1 &= y^0 + \Delta y, \\ z^1 &= z^0 + \Delta z, & s_m^1 &= s_m^0 + \Delta s_m \end{aligned} \quad (8)$$

式 (2) の初期値 x^0, y^0, z^0, s_m^0 を x^1, y^1, z^1, s_m^1 に更新して、この手順を $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s_m$ が十分小さくなるまで繰り返すことで移動局位置 (x, y, z) 、および受信機クロック誤差 s_m を知ることができる⁹⁾。

2.2 GNSS 複数受信機ダイバーシチ測位

2.1 節では、受信機 m 毎に個別の位置推定結果を得る方法を述べた。ここでは、 M 台の受信機で観測された擬似距離データを一括して信号処理するダイバーシチ受信法を述べる。

まず、 $\Delta \mathbf{x}_m$ と $\Delta \mathbf{r}_m$ の要素を接続した列ベクトルを次式のように定義する。

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{x} &= [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s_1, \dots, \Delta s_m, \dots, \Delta s_M]^T \\ \Delta \mathbf{r} &= [\Delta r_1^T, \dots, \Delta r_m^T, \dots, \Delta r_M^T]^T\end{aligned}\quad (9)$$

式 (5) に基づくと、 $\Delta \mathbf{x}$ と $\Delta \mathbf{r}$ の関係は次式で与えられる。

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{G} \Delta \mathbf{x} \quad (10)$$

ただし、観測行列 \mathbf{G} は、

$$\begin{aligned}\mathbf{G} &= [\mathbf{G}' \quad \mathbf{I}_M \otimes \mathbf{I}_N] \\ \mathbf{G}' &= [\mathbf{G}'_1^T, \dots, \mathbf{G}'_m^T, \dots, \mathbf{G}'_M^T]^T\end{aligned}\quad (11)$$

で与えられる。ここで、 \mathbf{I}_a はサイズが a の単位行列、 \otimes はクロネッカー積を意味する。式 (7) と同様に LS 規範を用いると、

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \Delta \mathbf{r} \quad (12)$$

を得る。式 (8) と同様に、逐次近似法に基づき繰り返し計算することで、移動局位置 (x, y, z) の高精度な推定が可能となる。

3. 観測データの選択方法

式 (10) の $\Delta \mathbf{r}$ には、衛星数 $N \times$ 受信機数 M の合計 MN 個の観測データが含まれている。この中には、精度の良い疑似距離もあれば悪いものも混在する。一般には、観測データに対して取捨選択の前処理を行うことで LS 推定解の分散を低減することができる。ここで、0 と 1 の要素を持つ次式のベクトルから成る重み対角行列 $\mathbf{W} = \text{diag}[\mathbf{w}]$ を定義する。

$$\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_i, \dots, w_{MN}], \quad w_i \in \{0, 1\} \quad (13)$$

ただし、 $\text{diag}[\mathbf{a}]$ はベクトル \mathbf{a} の要素を対角要素に持つ対角行列を意味する。 $\Delta \mathbf{r}$ の i 番目の要素を LS 推定に利用する場合には $w_i = 1$ とし、排除する場合には $w_i = 0$ とする。ここで、

$$\Delta \tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{W} \Delta \mathbf{r}, \quad \tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{W} \mathbf{G} \quad (14)$$

を定義すると、式 (12) に対応する LS 推定解は次式で与えられる。

$$\Delta \mathbf{x} = (\tilde{\mathbf{G}}^T \tilde{\mathbf{G}})^{-1} \tilde{\mathbf{G}}^T \Delta \tilde{\mathbf{r}} \quad (15)$$

3.1 仰角マスク

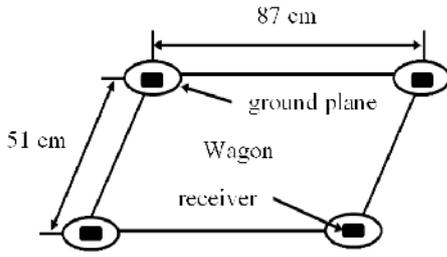
仰角マスクは移動局から見た衛星 n の仰角に対するマスク値を決定する。仰角 (Angle of Elevation) がマスク値を下回っていた衛星の取得した擬似距離の観測データ i を削除し ($w_i = 0$)、位置推定には用いない。仰角の低い衛星から届く信号はマルチパスの影響を受けやすいため、その影響を排除することで測位精度の改善が可能である。一方、過度にマスク値を高く設定すると、観測データ数が減少し測位精度が大幅に劣化する場合があるため注意が必要である。仰角マスクの設定値としては 5~15 度程度が一般的である。航空機や船舶の航法などの衛星との十分な見通し環境が期待できる場合には 5 度、測量や科学観測などの分野では時間をかけても測位精度を重視するため 15 度以上のマスク値を設定することが多い。また、マスク値を高く設定した場合、高仰角の衛星で測位計算を行うため、垂直方向の精度が劣化する傾向にある^{9,10)}。

3.2 信号強度マスク

受信信号の信号強度 (Signal Strength) として、搬送波対雑音電力比 (CNR: Carrier to Noise power Ratio) の情報が疑似距離データに付与されている。単位は dB/Hz である。信号強度が低い観測データはマルチパスにより反射・回折等の影響を受けた可能性が高いため、この信号から取得した疑似距離の信頼性は高くはない。したがって、信号強度マスクを設けて、マスク値を下回る疑似距離の観測データ i を削除し ($w_i = 0$)、位置推定には用いない方が有効である。ただし、仰角マスクと同様に、過度に高いマスク値を設定すると、位置推定に利用可能な観測データ数が不足し、測位精度が大幅に劣化する恐れがある。

3.3 条件数マスク

本検討では、一般的に用いられる上記の仰角マスクと信号強度マスクに加えて、条件数マスクを設けて測位精度の改善を図る。式 (15) 中の計画行列 $\tilde{\mathbf{G}}$



(a) Four GNSS receivers on rover wagon



(b) Placement of rover in Kyotanabe Campus

Fig. 2. Measurement environment.

の条件数は, LS 推定解の分散に影響する尺度の一つであり, 次式で与えられる.

$$\kappa(\tilde{\mathbf{G}}) = \frac{\lambda_{\max}(\tilde{\mathbf{G}})}{\lambda_{\min}(\tilde{\mathbf{G}})} \quad (16)$$

λ_{\max} と λ_{\min} はそれぞれ行列 $\tilde{\mathbf{G}}$ の最大固有値と最小固有値を意味する. 次式のように, この条件数を最小とする $\tilde{\mathbf{w}}$ を最適な選択ベクトルとすることで LS 推定解の分散の低減を期待できる.

$$\tilde{\mathbf{w}} = \arg \min_{\tilde{\mathbf{w}}} \kappa(\text{diag}[\tilde{\mathbf{w}}]\mathbf{G}) \quad (17)$$

しかし, 上式では MN の値が大きい場合, その探索にかかる演算量が膨大なものとなり, その最適解の取得は現実的ではない.

演算量増大の問題を解決するために, 本検討では下記の手順のランダム探索を適用する.

- i. 観測データ削除数の最大値を意味する条件数マスク Q を設定
- ii. 最大 Q 個のゼロ要素を持つ選択ベクトル $\tilde{\mathbf{w}}$ をランダムに U 個生成

Table 1. Comparison of 2DRMS [m].

	GPS only		GPS + QZSS + Galileo
	1 receiver	4 receivers	4 receivers
Open sky	2.3656	0.5621	0.4042
Multipath	8.2937	6.3549	2.6831

- iii. 式 (17) の $\tilde{\mathbf{w}}$ を U 個に制限して条件数の最小値を探索

4. 測位精度の評価

4.1 測位環境

移動局の複数受信機の配置環境を Fig. 2 に示す. 本検討では 4 つの受信機を用いた. 受信機の地面からの高さは 225 cm とした. また, 移動局は同志社大学京田辺キャンパス内のオープンスカイ環境①, マルチパス環境②に配置した. 2.2 節で述べた方法で単独測位を行い, 2DRMS (Twice the Distance Root Mean Square) で測位精度を評価する. 2DRMS は水平方向の放射状測位誤差の二乗平均の平方根の 2 倍を表す. 測位点の平均位置を中心の半径 2DRMS の円を描けば, その円の内側に全測位点の約 95% が含まれる. つまりこの値は小さい方が高精度であると言える¹¹⁾.

4.2 観測データ選択未適用時

ここでは, 観測データ選択を適用する効果を明らかにするため, まずは, 仰角マスク, 信号強度マスク, 条件数マスクは使用しない場合の測位精度を評価する. Table 1 に GPS の観測データのみを用いた場合と GPS, QZSS と Galileo の観測データを用いた場合の 2DRMS を示す. Table 1 より, GPS のみを用いた測位において, 4 受信機のダイバーシチ測位を適用することで, 2DRMS がオープンスカイ環境では 1.8035 m, マルチパス環境では 1.9388 m 改善した. また, GPS だけではなく QZSS と Galileo の観測データを併用することで, オープンスカイ環境ではさらに 0.1579 m, マルチパス環境では 3.6178 m

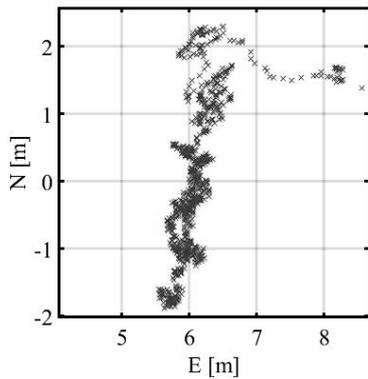


Fig. 3. Horizontal errors of GPS (1 receiver).

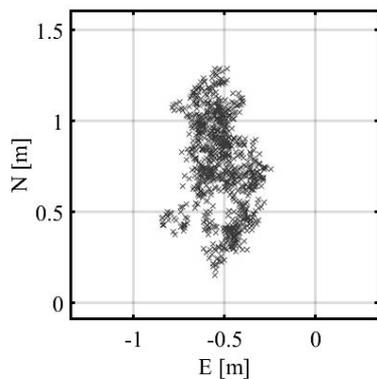


Fig. 4. Horizontal errors of GPS (4 receivers).

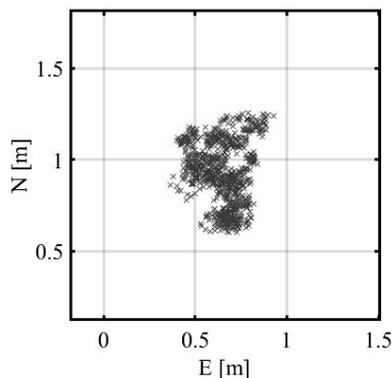


Fig. 5. Horizontal errors of GPS + QZSS + Galileo (4 receiver).

改善した。これらの結果、観測データの次元数を拡大することによって、ダイバーシチ測位の効果が高まることを確認できる。

Figs. 3, 4, 5 に、オープンスカイ環境において 1 受信機と 4 受信機を用いた GPS の水平誤差と 4 受信機を用いた GPS+QZSS+Galileo の水平誤差を例

として示す。Fig. 3 と Fig. 4 を比較すると、4 受信機を用いることで、南北方向において大きく測位精度が改善されていることが分かる。一方、Fig. 4 と Fig. 5 を比較すると、QZSS と Galileo を併用することで、測位結果のばらつきが抑えられていることを確認できる。

4.3 観測データ選択適用時

複数受信機ダイバーシチ測位 (GPS+QZSS+Galileo 使用時) で、同志社大学京田辺キャンパス内のオープンスカイ環境、マルチパス環境それぞれで各種マスクを使用した場合の測位精度を Table 2~5 に示す。Table 2 と 3 は仰角マスクと信号強度マスクを使用した場合の 2DRMS を示している。Table 2 より、仰角マスクの適用により 2DRMS は大幅に改善するわけではないことを確認できる。これは 4 つの受信機間の距離が数十 cm のため、各受信機において可視衛星の状況が変わらないからであると考えられる。一方、Table 3 に示す信号強度マスク使用時には、マルチパス環境において 2DRMS が最大で 2.1502 m 改善した。このことから、複数受信機ダイバーシチ測位では信号強度マスクが精度改善に有効であると言える。

Table 4 は条件数マスク $Q = 1 \sim 4$ 適用時のものである。このとき、ランダムベクトルの個数 U は 10000 としている。条件数マスク $Q=1$ では、オープンスカイ環境において信号強度マスクと同等の性能が得られたと言える。しかし、マルチパス環境では精度が改善されなかった。

Table 5 は信号強度マスクと条件数マスクを同時使用した場合の 2DRMS を示している。条件数マスク 1 と信号強度マスクの同時使用では、オープンスカイ環境、信号強度マスクが 37 dB/Hz において、信号強度マスク単独使用時の 2DRMS より 0.0284 m 改善され、各マスクの中で最小の 2DRMS 値が得られた。

Table 2. 2DRMS vs. angle of elevation.

	Open sky	Multipath
elevation mask [Degree]	2DRMS [m]	
0	0.4042	2.6831
5	0.4063	2.6831
10	0.3824	2.5058
15	0.3711	2.2588
20	0.6365	2.5655

Table 3. 2DRMS vs. signal strength.

	Open sky	Multipath
Signal strength mask [dB/Hz]	2DRMS [m]	
0	0.4042	2.6831
30	0.4058	0.7260
34	0.4107	0.5790
35	0.3973	0.5329
36	0.3864	0.5845
37	0.3697	0.6476
38	0.4259	0.8302
40	0.4578	0.8989

5. まとめ

本検討では、複数受信機ダイバーシチ測位法を提案し、その有効性を評価した。複数受信機を活用して観測データの次元数が増加することにより、単独測位の測位精度が改善した。GPSのみを用いた複数受信機ダイバーシチ測位ではオープンスカイ環境、マルチパス環境の両方において大きく精度が改善した。マルチパス環境ではGPS, QZSS, Galileoを使用する複数受信機ダイバーシチ測位により、マルチパスの影響を抑制できたと言える。

また、既存の観測データ選択法と提案方式である条件数マスクを複数受信機ダイバーシチ測位に適用し、測位精度の改善を試みた。仰角マスクでは各受信機の可視衛星状況が似ているため大幅に測位

Table 4. 2DRMS vs. condition number.

	Open sky	Multipath
Condition Num. mask Q	2DRMS [m]	
1	0.3706	2.6741
2	0.4164	2.6678
3	0.5243	2.7099
4	0.6211	2.7535

Table 5. 2DRMS vs. signal strength when $Q = 1$ and $U = 1000$.

	Open sky	Multipath
Signal strength mask [dB/Hz]	2DRMS [m]	
0	0.3706	2.6741
30	0.3731	0.7733
34	0.3961	0.5865
35	0.4083	0.5449
36	0.4215	0.5900
37	0.3413	0.6561
38	0.4881	0.7911
40	0.5616	0.9856

精度は改善しなかった。信号強度マスクではマルチパス環境において大幅に測位精度が改善した。この精度はオープンスカイ環境におけるGPSのみを用いた複数受信機ダイバーシチ測位の精度と同等であるため、複数受信機ダイバーシチ測位においては信号強度マスクが精度改善に有効であると言える。条件数マスクはオープンスカイ環境において、他のマスクと同等の性能を発揮し、信号強度マスクとの同時使用で各マスクの中で一番良い精度を得られた。しかし条件数マスクはマルチパス環境では精度が改善せず、効果を発揮しなかった。また、ランダムベクトルの個数により、推定位置が収束しない場合も存在するため、各条件数マスクで最適なランダムベクトルの個数を調査する必要がある。条件数マ

スクは今後調査・改善が必要である。

参考文献

- 1) G. Blewitt, “Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km”, *Journal of Geophysical Research*, **94**[B8], 10187–10203 (1989).
- 2) P. J. G. Teunissen, “The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: a Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation”, *Journal of Geodesy*, **70**, 65 - 82 (1995).
- 3) 久保信明, 図解よくわかる衛星測位と位置情報, (日刊工業新聞社, 東京, 2018).
- 4) 齋藤雅行, 山岸敦, 瀧口純一, 浅里幸起, “準天頂衛星による高精度測位システムの紹介”, *MSS 技報*, **26**, 1 - 8 (2016).
- 5) 白井友子, 久保信明, “都市部高精度測位における国産準天頂衛星の寄与について”, *信学論 B*, **J95-B**[2], 346 - 354 (2012).
- 6) 吉田紹一, “ナビの 100 倍高精度 センチ・メートル測位「RTK」”, *トランジスタ技術*, **56**[10], 47–48 (2019).
- 7) N. Kubo and A. Yasuda, “How Multipath Error Influences Modernized GNSS Ambiguity Resolution in Urban Areas”, *IAIN/GNSS 2006*, **2**, 131–136 (2006).
- 8) 久保信明, 安田明生, “単独測位におけるマルチパスの評価と精度改善方法”, *信学論 B*, **J84-B**[12], 2123–2131 (2001).
- 9) 坂井丈泰, *GPS のための実用プログラミング*, (東京電機大学出版局, 東京, 2007).
- 10) 浪江宏宗, 樊春明, 安田明生, “GPS 単独測位における最適な衛星マスク仰角に関する研究”, *信学論 B*, **J89-B**[7], 1224 - 1232 (2006).
- 11) 安田明, “GPS 技術の展望”, *信学論 B*, **J84-B**[12], 2082 - 2091 (2001).