

GPS/QZSS 測位の精度改善のための一手法

周 天宇^{1,a)} 中西 恒夫^{2,1,b)} 久住 憲嗣^{2,c)} 福田 晃^{2,d)}

概要: GPS ならびに QZSS による測位の精度を向上させるべく、捕捉した衛星の中から実際に測位に用いる衛星を選択するアルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムは捕捉した衛星の中から仰角が 1 番目と 2 番目に大きい 2 機、ならびに仰角が近く、方位角が 90° ずつ均等に空いている 4 機、計 6 機を選び出す。提案アルゴリズム「ファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズム」は、既存のファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムの拡張である。開空条件の良い場所でも悪い場所でも、測位精度を示す GDOP が同アルゴリズムよりも良い値を示した。また、QZSS を併用する場合としない場合とでは、併用する場合のほうが GDOP が良くなることも確認された。

キーワード: 測位, 測位精度, GPS, QZSS, GDOP

An Algorithm to Improve Accuracy of Positioning by GPS and QZSS

Abstract: The article proposes an algorithm to select a set of satellites used for positioning by GPS and QZSS out of visible satellites to improve positioning accuracy. The algorithm selects two satellites, ones with the first and second biggest elevation angles, and four satellites, ones whose direction angles are equally distributed. The algorithm is an extension of the existing *fuzzy selecting algorithm* which select four satellites. Evaluations under open and partially covered skys show that the algorithm records better GDOP, a metric for positioning accuracy, than the existing algorithm. Moreover, the algorithm also records a better GDOP when QZSS is combined with GPS than the case without QZSS.

Keywords: Positioning, Positioning Accuracy, GPS, QZSS, GDOP

1. はじめに

GPS (Global Positioning System) は車両の自律走行を実現する手段の一部として一般的によく利用されている。GPS で測位をするには最低 4 つの衛星からの電波が受信できなければならない。しかし、都市部や山間部など遮蔽物の多い場所では、十分な数の衛星が捕捉できなかったり、マルチパスの問題が起きやすく、測位精度が落ちがちである。2012 年 9 月に宇宙航空研究開発機構 (JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency) により準天頂衛星

システム (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) の初号機 QZS-1 が打ち上げられた。このシステムの衛星は日本の真上を飛ぶため日本国内では上述の問題が起きにくい。QZS-1 が日本上空を飛ぶのは 1 日数時間のみであり、現時点ではその時間帯のみしか QZSS の恩恵にあやかれないが、2010 年代後半を目途に 4 機の衛星が打ち上げられ、最終的には 7 機体制を目指す計画となっており、今後、24 時間持続的かつ安定して高精度の測位が可能となることが期待されている。

現在の一般的な GPS 受信機では 6~12 機程度の衛星が捕捉できる。GPS と上述の QZSS を組み合わせると将来的には十数機の衛星が捕捉できるようになる。一般的な GPS 受信機は捕捉した衛星すべてを測位に利用しているようであるが、衛星数の増加に伴って測位に要する計算時間も増えてくる。捕捉した衛星すべてを測位に利用することは、必ずしも測位精度があがることを意味しない。捕捉した衛星すべてを測位に利用するのではなく、測位精度の向上へ

¹ 九州大学大学院統合新領域学府

² 九州大学大学院システム情報科学研究院
Faculty of Information Science and Electrical Engineering,
Kyushu University

a) zhoutianyu1983@f.ait.kyushu-u.ac.jp

b) tun@f.ait.kyushu-u.ac.jp

c) nel@f.ait.kyushu-u.ac.jp

d) fukuda@f.ait.kyushu-u.ac.jp

の寄与が大きい衛星のみを測位に用い、計算時間（ひいてはリアルタイム性）と測位精度のバランスをとることが望ましい。

測位に用いる衛星と受信機の位置関係は測位精度に大きな影響を与える。この位置関係を反映した測位精度の尺度として、幾何学的精度劣化度（GDOP: Geometric Dilution of Precision）が広く用いられている。本稿では、GDOPで示される測位精度がよくなるよう、測位に用いる衛星群を選択するアルゴリズムを提案し、GPSとQZSSを併用のうえ評価する。

以下、本稿2節ではGPS/QZSSによる測位に関する基本概念を解説し、3節では既存の衛星群選択アルゴリズムを紹介する。4節でファジィ6機衛星群選択アルゴリズムを提案し、5節で実験によるその評価を行う。最後に6節で本稿を総括する。

2. GPS/QZSSによる測位の原理と精度

2.1 測位の原理

衛星による測位は衛星を用いた三角測量によって行われる。GPS/QZSS受信機が衛星から受信する航法メッセージに基づいて、当該航法メッセージを送った衛星の、当該航法メッセージを送った時の位置座標と時刻を算出することができる。衛星と受信機の距離は、衛星が航法メッセージを送った時と受信機が航法メッセージを受信した時の時間差 Δt をすると、 $c\Delta t$ として算出される。（但し、 c は電波の速さ、すなわち光速である。）以上のようにして得られる衛星の位置と衛星と受信機の距離から、原理上は3機以上の衛星から航法メッセージを受け取れば、三角測量によって受信機の座標 (x, y, z) を得ることができる。しかし、GPSには原子時計が搭載されているものの、受信機側で精度の良い時計を用意することは難しいため、衛星と受信機の距離を正確に求めることも難しく、上述の原理とおりの測位を正確には行えない。そこで実際には、4つの衛星の位置と距離を得て、受信機の時計の誤差を消去し、測位を行うことが行われている。結局、精度のよい測位を行うためには、現実的には最低4つの衛星が必要である。具体的な受信機座標の算出方法は文献 [1] を参照されたい。

2.2 GDOP

GPS/QZSSによる測位結果は、マルチパスをはじめとするさまざまな要因による誤差を多かれ少なかれ含んでいる。測位精度を決める要因として、衛星と受信機間の距離（観測値）、すなわち疑似距離の測定精度と、衛星と受信機の幾何学的な位置関係がある [1]。衛星や受信機の移動により衛星と受信機の幾何学的な位置関係は時々刻々と変化するため、測位精度も絶えず変化する。衛星と受信機の幾何学的な位置関係を表現する尺度があれば、測位精度の評価ができ、またその尺度を最小化するように測位に用いる

衛星を選択することも可能となる。

そのような尺度としてGDOPがある。その意味については他著 [1], [2], [3], [4] に譲るが、測距誤差にGDOPを乗じて測位誤差を得られることが知られている。すなわちGDOPは小さければ小さいほどよい値である。GDOPは以下の要領で算出できる。まず、測位に用いる4つの衛星の方向ベクトルを $\delta_i = (\delta_{i,x}, \delta_{i,y}, \delta_{i,z})$ ($1 \leq i \leq 4$) とし、

$$H = \begin{bmatrix} \delta_{1,x} & \delta_{1,y} & \delta_{1,z} & 1 \\ \delta_{2,x} & \delta_{2,y} & \delta_{2,z} & 1 \\ \delta_{3,x} & \delta_{3,y} & \delta_{3,z} & 1 \\ \delta_{4,x} & \delta_{4,y} & \delta_{4,z} & 1 \end{bmatrix}$$

とする。ここで δ_i と x 軸、 y 軸、 z 軸との夾角をそれぞれ α, β, γ とすれば、 H は以下のように記述できる。

$$H = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 1 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 1 \\ \cos \alpha_4 & \cos \beta_4 & \cos \gamma_4 & 1 \end{bmatrix}$$

δ_i の方位角を A_i 、仰角を E_i とすれば、図1より、 H はさらに以下のように記述できる。

$$H = \begin{bmatrix} \cos E_1 \sin A_1 & \cos E_1 \cos A_1 & \sin E_1 & 1 \\ \cos E_2 \sin A_2 & \cos E_2 \cos A_2 & \sin E_2 & 1 \\ \cos E_3 \sin A_3 & \cos E_3 \cos A_3 & \sin E_3 & 1 \\ \cos E_4 \sin A_4 & \cos E_4 \cos A_4 & \sin E_4 & 1 \end{bmatrix}$$

この H を用いてGDOPは次式により求められる。

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}([H^t H]^{-1})}$$

但し、 $\text{trace}(M)$ は行列 M の対角成分の総和を意味する。

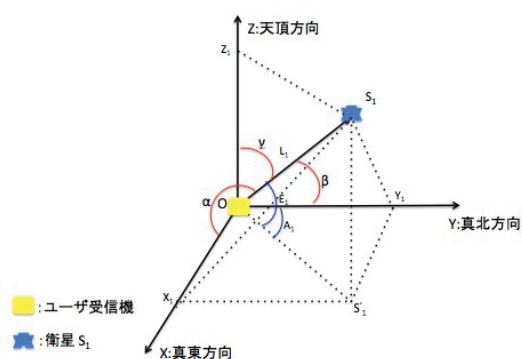


図1 仰角と方位角

3. 衛星群選択アルゴリズム

3.1 測位に用いる衛星群の選択

受信機の進歩により、昨今の受信機は数機から十数機の衛星を捕捉することができる。しかし、第2節で述べたように、最低4機の衛星を捕捉できれば、受信機の位置を求

めることができる。そこで可視衛星が4機より多い場合、実際に測位に用いる衛星を精度が最大化されるように選択することが行われる。具体的には、i) 信号受信強度の低い衛星を排除すること、ii) 仰角の低い衛星を排除すること、iii) 測位精度のよい幾何学的配置にある衛星群、すなわち GDOP 最小となる衛星群を選択することが行われる。

今日の衛星測位の主たる誤差要因はマルチパスである。受信信号の強度が弱い衛星は反射波の可能性があるので測位には用いない。仰角の低い衛星、具体的には仰角マスクと呼ばれる設定値よりも仰角の低い衛星も測位には用いない。仰角が低い衛星からの電波は仰角の高い衛星よりも長く大気中を伝搬するためマルチパスの問題を生じやすいためである。仰角マスクは一般に $5\sim 15^\circ$ の範囲で設定される。仰角マスクを適度に大きくすると測距精度が向上し、ひいては測位精度がよくなる。しかし、仰角マスクを過剰に大きくすると、測位に必要な4機の衛星を確保できなくなる可能性がある。そこまできなくとも、測位精度のよい幾何学的配置にある衛星群を除外してしまい、かえって測位精度が悪くなることもある。

自律走行車両における測位を考えた場合、自律走行車両では移動に伴って周囲の環境、特に建物や山、森林等の遮蔽物による開空状況が時々刻々変化し、それに合わせて捕捉できる衛星の数も変化する。そのため仰角マスクを固定値とするとこの変化に対応できず測位ができない場合も生じる。そのため、状況に応じて仰角マスクを設定するとともに、測位精度のよい幾何学的配置にある衛星群を選択し、リアルタイムに測位を行うことが重要となる。

3.2 従来の衛星群選択アルゴリズム

測位に用いる衛星群選択アルゴリズムは、捕捉した衛星の中から GDOP を最小化できる衛星群を選択するアルゴリズムである。既存のアルゴリズムとして最適 GDOP 法と最大四面体体積法がある [4], [5]。

最適 GDOP 法では、仰角マスクを 5° に設定し、まず仰角 5° の衛星を排除する。残った N 機の衛星の中から4機を一組とし、可能なすべての衛星の組み合わせについて GDOP を算出し、もっとも GDOP の小さかった組を測位に用いる衛星群として選択する。いわば総当たり法であり、 ${}_N C_4$ 回の GDOP 計算が必要である。

2 節に挙げた式を見ればわかるように、GDOP の算出には複雑な計算が必要であり、計算時間も要する。一方、4つの衛星群の四面体の体積が大きくなる程、GDOP の値が小さくなることが知られている。最大四面体体積法は GDOP のこの性質を用いて測位に用いる4機の衛星群を選択する。具体的には、第1の衛星として最も仰角の高い衛星をひとつ選ぶ。第2の衛星は北方にある衛星の中から、第3の衛星は東方にある衛星の中から選ぶ。第2、第3の衛星は、第1の衛星と第2の衛星を結ぶ線分と第1の衛星と第

3の衛星を結ぶ線分の夾角が最大となるように選択する。第2、第3の衛星は総当たり法で選ぶ。北方にある衛星の数を N_N 、東方にある衛星の数を N_E とすると、 $N_N N_E / 2$ 回の夾角計算が必要である。最後に第4の衛星は、すでに選んだ3機の衛星と作る四面体の体積が最大となるような衛星を残し $(N - 3)$ 機の衛星の中から選択する。四面体の体積計算は GDOP に比べれば軽い。また四面体の体積計算は $(N - 3)$ 回のみであり、最大四面体体積法は計算時間の点で最適 GDOP 法よりも有利である。しかし、精度の点では当然ながら総当たり法による最適 GDOP 法が勝る。

3.3 ファジィ4機衛星群選択アルゴリズム

Zhang らのファジィ4機衛星群選択アルゴリズムも GDOP が小さくなるように、測位に用いる衛星を4機選択する [6]。計算時間は最適 GDOP 法、最大四面体体積法のいずれよりも短く、GDOP は最適 GDOP 法よりは大きくなるものの、最大四面体体積法と同程度の小ささとなることが実験的に示されている。

アルゴリズムの概要は以下の通りである。

- (1) 仰角マスクを 5° に設定する。
- (2) 第1の衛星 S_1 として仰角の最も高い衛星を選ぶ。
- (3) 第2の衛星 S_2 として仰角の最も低い衛星を選ぶ。第2の衛星の仰角と方位角をそれぞれ E_2 , A_2 とする。
- (4) 第3の衛星 S_3 として方位角 $(A_2 + 120^\circ)$ 近辺の、 E_2 に近い仰角の衛星を選ぶ。
- (5) 第4の衛星 S_4 として方位角 $(A_2 + 240^\circ)$ 近辺の、 E_2 に近い仰角の衛星を選ぶ。

GPS の衛星は同じ高度で周回しているため、上述のように衛星を選択すると、 S_1, S_2, S_3, S_4 を頂点とする四面体は体積が最大化される正四面体に近い形状となり、ひいてはこれらの衛星で測位した場合の GDOP は最小の値となることが期待される。図2にファジィ4機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群の配置の一例を示す。

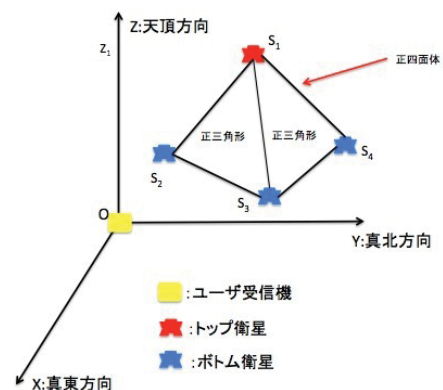


図2 4機の衛星で構成した正四面体

図3は受信機の天頂のGPS衛星の軌道よりも遠いとこ

るから地表面を鉛直に見下ろしたときの衛星の配置を表している。ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムにおいて、 S_1 と S_2 は一意に定まるが、第 S_3 と S_4 は衛星がかたまっていると一意には定めがたい。ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムでは、 S_3 , S_4 の選択にファジィ集合論を応用する。今、 N 個の衛星を捕捉しており、その中から S_1 , S_2 を除き、残りの衛星に $3 \sim N$ の番号を振り、番号 i ($3 \leq i \leq N$) の衛星の方位角を a_i , 仰角を e_i とする。第 3 の衛星が属するファジィ集合、第 4 の衛星が属するファジィ集合を考え、番号 3 から N の各衛星がどの程度これらの集合に属するか、すなわち各衛星がどのくらい第 3 の衛星 / 第 4 の衛星らしいかを以下のメンバシップ関数 $\mu_{i,\text{third}}$, $\mu_{i,\text{fourth}}$ で定義する。

$$\mu_{i,\text{third}} = p_1|a_i - (A_2 + 120^\circ)| + p_2|e_i - E_2|$$

$$\mu_{i,\text{fourth}} = p_1|a_i - (A_2 + 240^\circ)| + p_2|e_i - E_2|$$

演算の簡略化のため、一般的なメンバシップ関数の定義と異なり、これらのメンバ関数の値域は $[0, 1]$ とはなっておらず、また値が 0 に近いほどファジィ集合により帰属する定義となっている。 p_1 , p_2 は重み係数であり、 $p_1 + p_2 = 1$ となるように設定する。これらの重み係数は方位角の差と仰角の差をどの程度の割合で重要視するかを表している。

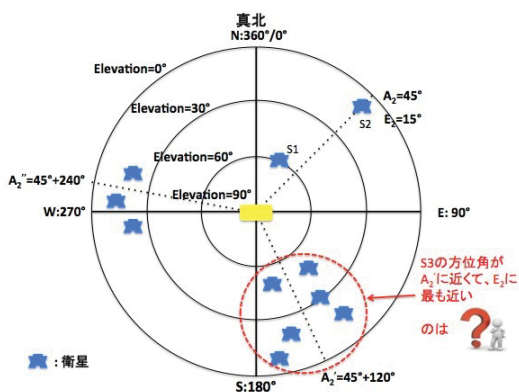


図 3 ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズム

4. ファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズム

測位に用いる衛星の数の増加に対して GDOP は減少傾向を示す [7]。しかし、その減少量は衛星数の増加とともに軟化し、衛星数が 6 機を超えた後は減少幅がかなり小さくなることが実験的に確認された。そこで本稿では、ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムを拡張し、計算時間はファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムよりは若干長くなるものの、最適 GDOP 法や最大四面体体積法よりは短く、GDOP はファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムより小さくなる、ファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムを提案する。

ファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムの概要は以下の通

りである。

- (1) 仰角マスクを設定する。
- (2) 第 1 の衛星 S_1 として仰角の最も高い衛星を選ぶ。
- (3) 第 2 の衛星 S_2 として仰角の 2 番目に高い衛星を選ぶ。
- (4) 第 3 の衛星 S_3 として仰角の最も低い衛星を選ぶ。第 3 の衛星の仰角と方位角をそれぞれ E_3 , A_3 とする。
- (5) 第 4 の衛星 S_4 として方位角 ($A_3 + 90^\circ$) 近辺の、 E_3 に近い仰角の衛星を選ぶ。
- (6) 第 5 の衛星 S_5 として方位角 ($A_3 + 180^\circ$) 近辺の、 E_3 に近い仰角の衛星を選ぶ。
- (7) 第 6 の衛星 S_6 として方位角 ($A_3 + 270^\circ$) 近辺の、 E_3 に近い仰角の衛星を選ぶ。

文献 [8] では、仰角の高い衛星を 2 機選択し、残りの衛星については仰角が近く、方位角の差が均等になるように選択すれば、GDOP が小さくなる傾向にあることが報告されており、ファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムはそれに倣った。

さらにファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムでは、仰角マスクは固定とせず、捕捉した衛星の数に応じて以下のように設定することとした。

- 捕捉衛星数が 6 機未満の場合：仰角マスクは慣習的な 5° に設定する。
- 捕捉衛星数が 6~7 機の場合：仰角マスクは 7.5° に設定する。これは米国連邦航空局 (FAA: Federal Aviation Administration) の推奨する設定である。
- 捕捉衛星数が 8~9 機の場合：仰角マスクは 10° に設定する。これは文献 [9] を参考に定めた設定である。
- 捕捉衛星数が 10 機以上の場合：仰角マスクは 15° に設定する。これも文献 [9] を参考に定めた設定である。

ファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムでは、 $S_1 \sim S_3$ は一意に定まるが、第 $S_4 \sim S_6$ は衛星がかたまっていると一意には定めがたい。そこでファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムと同様の原理で $S_4 \sim S_6$ を選択する。今、 N 個の衛星が可視とし、可視衛星の中から $S_1 \sim S_3$ を除き、残りの衛星に $4 \sim N$ の番号を振り、番号 i ($4 \leq i \leq N$) の衛星の方位角を a_i , 仰角を e_i とする。番号 3 から N の各衛星がどのくらい第 4~第 6 の衛星らしいかを以下のメンバシップ関数 $\mu_{i,\text{fourth}}$, $\mu_{i,\text{fifth}}$, $\mu_{i,\text{sixth}}$ で定義する。

$$\mu_{i,\text{fourth}} = p_1|a_i - (A_2 + 90^\circ)| + p_2|e_i - E_2|$$

$$\mu_{i,\text{fifth}} = p_1|a_i - (A_2 + 180^\circ)| + p_2|e_i - E_2|$$

$$\mu_{i,\text{sixth}} = p_1|a_i - (A_2 + 270^\circ)| + p_2|e_i - E_2|$$

5. 評価

本節では、ファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムとファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムとをさまざまな条件で比

較, 評価する。

5.1 開空状況が悪い場合 (GPSのみ)

林や小山に隣接する開空状況の悪い実験地に GPS 受信機を固定して測位を行い, 両アルゴリズムの測位精度を GDOP に基づいて比較した。測位は 2012 年 11 月 15 日 09:48:04 (日本時間) から 2012 年 11 月 16 日 09:47:57 (日本時間) のおおよそ 24 時間に渡って, 福岡市西区 (北緯 33 度 35 分 40.958 秒, 東経 130 度 13 分 10.671 秒; 世界座標系) で行った。この期間, 天候はおおよそ晴れであった。測位は毎秒行い, 標本数は 86,098 である。標本数が 24 時間分 (86,400) より若干少ないのは, 何かしらの理由で測位できていない時間帯があったためである。

図 4 にファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群を用いたときの GDOP ($GDOP_{Fuzzy6}$) とファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群を用いたときの GDOP ($GDOP_{Fuzzy4}$) の差 $GDOP_{Fuzzy6} - GDOP_{Fuzzy4}$ の時系列での変化を示す。差が負数となった時間は全体の 98.4% である。つまり, 24 時間中 23.6 時間は本稿で提案したファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムがファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムよりも小さな GDOP, すなわち高い精度の測位を行っていた。

表 1 に両アルゴリズムで選択した衛星群を用いたときの GDOP の諸統計量を示す。ファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群による測位は, ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群による測位の, おおよそ 1/2 の GDOP を安定的に示していることがわかる。

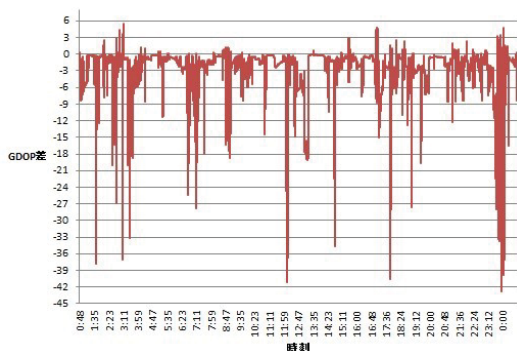


図 4 ファジィ 6 機/ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムの GDOP 差 (悪開空状況下)

表 1 ファジィ 6 機/ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムの GDOP 統計値 (悪開空状況下)

アルゴリズム	最大値	最小値	平均値	分散
ファジィ 4 機	46.7234	2.5109	6.0828	22.6463
ファジィ 6 機	12.6197	1.4575	3.2135	1.1233

5.2 開空状況が良い場合 (GPS+QZSS)

つぎに, 周辺に遮蔽物のない開空状況の良い実験地 (3 階建て立体駐車場の屋上階) に GPS+QZSS 受信機を固定して測位を行い, 両アルゴリズムの測位精度を GDOP に基づいて比較した。測位は 2013 年 1 月 26 日 10:20:25 (日本時間) から 2013 年 1 月 27 日 10:20:25 (日本時間) のおおよそ 24 時間に渡って, 福岡市西区 (北緯 33 度 35 分 53.881 秒, 東経 130 度 13 分 16.369 秒; 世界座標系) で行った。この期間, 天候は曇りであった。測位は毎秒行い, 標本数は 86,401 であり, 上述の期間のすべての測位に成功している。

図 5 にファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群を用いたときの GDOP ($GDOP_{Fuzzy6}$) とファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群を用いたときの GDOP ($GDOP_{Fuzzy4}$) の差 $GDOP_{Fuzzy6} - GDOP_{Fuzzy4}$ の時系列での変化を示す。差が負数となった時間は全体の 96.4% である。つまり, 24 時間中 23.4 時間は本稿で提案したファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムがファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムよりも小さな GDOP, すなわち高い精度の測位を行っていた。

表 2 に両アルゴリズムで選択した衛星群を用いたときの GDOP の諸統計量を示す。ファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群による測位は, ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群による測位の, おおよそ 1/2 の GDOP を安定的に示していることがわかる。

それぞれのアルゴリズムについて, 前小節の開空状況が悪い場合と比較してみると, GDOP は開空状況が良い今回のほうが, (天候がよくなかったにもかかわらず) GDOP のより小さい良い結果が得られている。

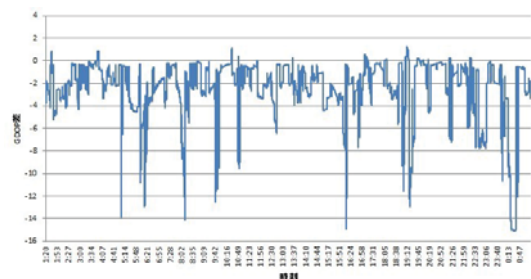


図 5 ファジィ 6 機/ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムの GDOP 差 (良開空状況下)

表 2 ファジィ 6 機/ファジィ 4 機衛星群選択アルゴリズムの GDOP 統計値 (良開空状況下)

アルゴリズム	最大値	最小値	平均値	分散
ファジィ 4 機	17.3932	2.0726	4.9761	7.3940
ファジィ 6 機	4.9181	1.2886	2.5920	0.3030

図 6 にファジィ 6 機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群を用いたときの GDOP の時系列での変化を示す。この期間, 準天頂衛星が実験地において仰角 70° 以上の位

置にあった時間帯は、05:00:06（日本時間）から14:19:13（日本時間）のおよそ9時間である。準天頂衛星の仰角が70°以上の時間帯と70°未満の時間帯に分けて、ファジィ6機衛星群選択アルゴリズムで選択した衛星群を用いたときのGDOPの諸統計量を表3に示す。準天頂衛星の仰角が高い場合と低い場合とでGDOPの平均値に大差はない。しかし、分散については準天頂衛星の仰角が高い場合のほうが小さくなっている。

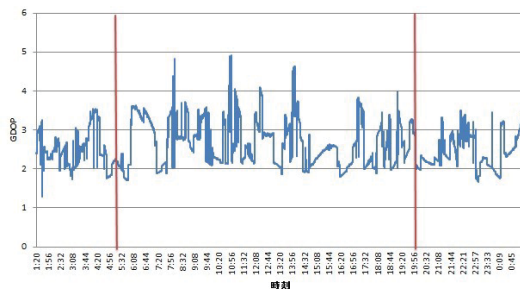


図6 ファジィ6機衛星群選択アルゴリズムのGDOP

表3 ファジィ6機衛星群選択アルゴリズムのGDOP統計値の準天頂衛星の仰角による違い

準天頂衛星の仰角	最大値	最小値	平均値	分散
70°以上	3.5522	1.2886	2.4539	0.1951
70°未満	4.9181	1.7045	2.6806	0.3515

最後に、図7に、ファジィ6機衛星群選択アルゴリズムでの衛星群の選択において、準天頂衛星を候補に入れて選択した衛星群を用いたときのGDOP ($GDOP_{QZSS+GPS}$)と、入れずに選択した衛星群を用いたときのGDOP ($GDOP_{GPS}$)の差 $GDOP_{QZSS+GPS} - GDOP_{GPS}$ の時系列での変化を示す。また、表4にそれぞれの場合のGDOPの諸統計量を示す。準天頂衛星を候補に入れて衛星群を選択したほうが、GDOPの平均値は若干小さく、また分散も小さい。

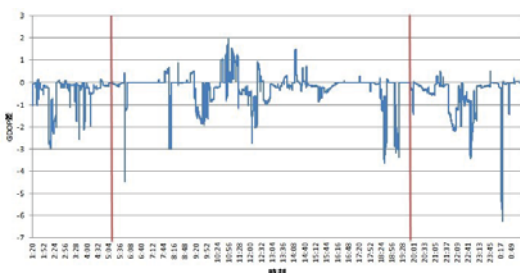


図7 QZSSを利用したときとしないときのGDOP値

表4 ファジィ6機衛星群選択アルゴリズムのGDOP統計値の準天頂衛星の仰角による違い

衛星選択対象	最大値	最小値	平均値	分散
GPS + QZSS	4.9180	1.2886	2.5920	0.3030
GPS	8.9051	1.7124	2.9021	0.8186

6. まとめ

本稿では、GPSならびにQZSSによる測位にあたって、(測位誤差を反映する)GDOPの値が小さくなるよう、捕捉した衛星の中から6機の衛星群を選択するアルゴリズムを提案した。同アルゴリズムは、既存のファジィ4機衛星群選択アルゴリズムを拡張し、同アルゴリズムと比べて若干の計算時間の増加を代償に、測位時のGDOPがより小さくなるような衛星群を選択する。GPSならびにQZSSを併用できる環境下で両アルゴリズムを比較したところ、開空条件が良いところでも悪いところでも、ファジィ6機衛星群選択アルゴリズムはGDOPをファジィ4機選択アルゴリズムのおよそ1/2にできることが確認された。また、QZSSをGPSと併用する場合、ファジィ6機衛星群選択アルゴリズムはQZSSを併用しない場合と比べて、GDOPを若干小さくできることも確認された。

参考文献

- [1] 坂井 丈泰, 『GPS技術入門』, 東京電機大学出版局, 2003年.
- [2] 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, 2007年.
- [3] 佐田 達典, 『GPS測量技術』, オーム社, 2003年.
- [4] Jian-Ping Yuan et al., *Satellite Navigation System: Principle and Application*, China Astronautic Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [5] Zhang Lu, et al., "An Improved Satellite Selection Algorithm Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method and the Entropy Method for Determining the Weight of Evaluation Indicators," *Proc. 4th IEEE Int. Conf. on Broadband Network and Multimedia Technology*, pp.652-655, Oct. 2011.
- [6] Chao Zhang and Tian-Qi Chen, "A New Selecting-Star Algorithm in GPS," *Experimental Science and Technology*, Vol.4, pp.25-27, Apr. 2006. (in Chinese)
- [7] Li Cong and Zhang-Zhong Tan, "Satellite Selection Algorithm to Improve Precision and Real-Time Performance of GPS Positioning," *Systems Engineering and Electronics*, Vol.30, No.10, pp.1914-1917, Oct. 2008. (in Chinese)
- [8] Rui-Xing Wu and Ti-Jing Cai, "An Satellites Selection Algorithm Based on Elevation and Azimuth," *Ship Electronic Engineering*, Vo.29, No.11, pp.73-75, Nov. 2009. (in Chinese)
- [9] 浪江 宏宗, Chun-Ming Fan, 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, Vol.J89-B, No.7, pp.1224-1232, 2006年7月.