

長基線基準局を用いた DGPS における測位精度改善

田中 敏幸^{*a)}, 川村 景太^{*}

Improvement of Measurement Accuracy with Long Baseline Reference Stations in DGPS

Tohiyuki TANAKA^{*}, Keita KAWAMURA^{*}

あらまし GPS (Global Positioning System, 全地球測位システム) の差分補正を行った DGPS の測位精度は, 基準局とユーザ受信機との基線長に依存している. 著者等が長基線の DGPS 測位実験を行ったところ, 基線長が長くなるにつれて衛星-基準局間と衛星-ユーザ局間の電波伝搬遅延量の差が大きくなり, 測位精度・確度共に悪化する. ユーザ局における水平方向の測位分布は, ユーザ局の真の位置に対して基準局から遠ざかるように変位していくことが確認された. そこで, ユーザ局を囲むような複数の長基線基準局を同時に用い, 各基準局からの擬似距離補正值に基準局の基線長・方位角に依存する重み付けを適用することで, 新たな擬似距離補正值を算出する手法を提案する. 短基線の基準局を確保できないような地域でも精度の高い測位を実現することを目的として, シミュレーションを行っている.

Abstract In DGPS, measurement accuracy belongs to baseline. We performed simulations about long baseline DGPS in order to make sure the relation between a position of a reference station and measurement accuracy. We confirm that as baseline became longer, error average and 2drms became larger. Especially, 2-dimensional position of error average is located at opposite direction of the reference station. Thus we find that measurement accuracy belonged to not only baseline, but also azimuth of reference station in DGPS. We propose a new method using multiple reference stations in DGPS. We use three reference stations that surround user position in the latitudinal and longitudinal direction. In this method we use correction data of pseudorange from each reference station and calculate new correction data that belong to baseline and azimuth of reference stations. We focus DGPS and aimed at realizing high accuracy measurement where a reference station does not exist at a short distance.

キーワード GPS, DGPS, 基線長, 基準局

Keyword GPS, DGPS, baseline, reference stations

1. まえがき

GPS の測位方法は, 単独測位と相対測位に大別される. 単独測位を利用する場合, ユーザは衛星から送られてくる情報のみを用いて測位を行うことができるが, 相対測位に比べて精度は落ちる. 相対測位は, 基準局でのコードを用いた補正情報による DGPS (Differential GPS) と, 搬送波位相を用いた干渉測位に分けられる. 干渉測位は基準局とユーザ局の間の距離(基線長)が 10km を越えると測位解が収束しにくくなるという欠点があり, 基準局のインフラの整っていない地域での利用は困難である. 本研究では DGPS に着目し, 基準局を十分に確保できないような地域でも精度の高い測位を実現することを目的とする.

GPS 測位における誤差を引き起こす要因は, GPS 衛星に関する誤差要因と擬似距離に関する誤差要因の 2 つに大きく分類される. GPS 衛星に関する誤差は, 実際の GPS 衛星位置と衛星軌道情報を利用して計算した位置が異なることによって生じる. 擬似距離に関する誤差には, 電離層, 対流圏による伝搬遅延誤差や, GPS 信号が建築物等に反射し, 直接波干渉を起こすマルチパスの伝搬経路誤差がある. 本研究で用い

る DGPS 測位は, 既知点である基準局側の擬似距離補正データを利用し, 電離層・対流圏等による伝搬遅延誤差, 衛星に起因する誤差などを相殺することによって, 測位精度を向上させている.

DGPS の精度は, 基準局とユーザ局の間の距離に依存している. 著者等が長基線の DGPS 実験を行い精度劣化の傾向を調べたところ, 基準局の基線長だけではなくユーザ局から見た基準局の方位角にも依存し, 30 秒ごとに 24 時間計測したユーザ局の平均位置は基準局から遠ざかるように変位している. 本研究では各長基線基準局の位置(基線長・ユーザ局から見た方位角)を考慮した擬似距離補正值を適用することにより測位精度を改善する手法を提案する. 複数の短基線基準局を用いることの有用性は先行研究により示されている[1][2]. 本研究ではユーザ局を囲むような複数の長基線基準局を用い, バイアス成分の軽減を図っている.

2. DGPS の測位原理

DGPS における一般的な擬似距離補正方式では, 座標点の既知である基準局と衛星の座標から, 2 点の正しい距離を求め, 図1に示すように正しい距離と受信した擬似距離との差を各衛星の補正值(擬似距離補正值)としてユーザ局側に送る. ユーザ局側では測定された擬似距離に補正值を適用し, 補正した擬似距離を用いて単独測位と同様の計算を行っている. ユーザ局側の擬似距離補正方式は, 次式のように表すことが

^{*}慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科

〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

Department of Applied Physics and Physico-Informatics, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8522

a) tanaka@appi.keio.ac.jp

できる.

$$\rho'(t) = \rho(t) + PRC(t_0) + RRC(t_0) \times (t - t_0) \quad (1)$$

ここで t は観測時刻, t_0 は補正データの算出時刻, ρ' はユーザ局側で補正された擬似距離, ρ はユーザ局側で測定された擬似距離である. PRC は擬似距離補正值, RRC は擬似距離補正值の変化率である. 補正データの算出時刻と観測時刻との時刻差が大きい場合, 基準局における補正值とユーザ局において補正すべき値との差が大きくなり, 相殺効果が減少する.

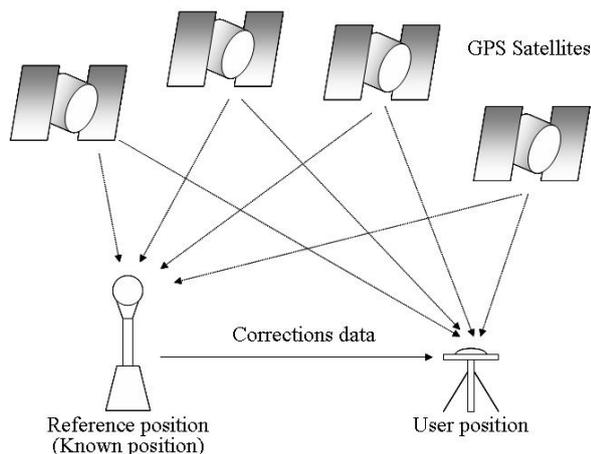


図1 DGPS のモデル
Fig.1 Model of DGPS

測位計算のための擬似距離 ρ は, 次式のように表すことができる.

$$\rho_n = r_n + c(\delta t_{u,n} - \delta t_s) + I_n + T_n + \varepsilon_n \quad (2)$$

上式で, r は衛星-ユーザ局間の正確な距離, c は光速, δt_u は受信機の時計誤差, δt_s は衛星時計誤差, I は電離層遅延, T は対流圏遅延, ε はマルチパス等のその他の誤差である. 添え字の n の値は基準局とユーザ局を表しており, $n=1$ のとき基準局における計算式, $n=2$ のときユーザ局側の計算式となる. また, 高精度測位にて得られた距離を r_1 とすると, 基準局で作成される擬似距離補正值 PRC は, $r_1 - \rho_1$ で表されて, 次式のようなになる.

$$PRC = -[c(\delta t_{u,1} - \delta t_s) + I_1 + T_1 + \varepsilon_1] \quad (3)$$

ユーザ側では PRC を同衛星から測定された擬似距離 ρ_2 に加える. 補正された擬似距離 ρ_2' は, 次式のようなになる.

$$\begin{aligned} \rho_2' &= \rho_2 + PRC \\ &= r_2 + c(\delta t_{u,2} - \delta t_s) + I_2 + T_2 + \varepsilon_2 - [c(\delta t_{u,1} - \delta t_s) + I_1 + T_1 + \varepsilon_1] \\ &= r_2 + c(\delta t_{u,2} - \delta t_{u,1}) + (I_2 - I_1) + (T_2 - T_1) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)において, 衛星時計誤差 δt_s が消えていることがわかる. 衛星時計誤差の項は基線長にかかわらず消去できる. また理想的な短基線の場合, $I_1=I_2$, $T_1=T_2$ となり, 電離層遅延の項,

対流圏遅延の項が消去され,

$$\rho_2' = r_2 + c(\delta t_{u,2} - \delta t_{u,1}) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (5)$$

としてユーザ局側の擬似距離は補正される. 式(5)の誤差項は受信機時計の誤差, マルチパス等のノイズ誤差の項のみとなる. さらに受信機時計の誤差は単独測位計算の未知数の1つとして算出されるので, DGPS 測位結果にはマルチパス等のノイズ誤差の影響しか受けない. 基線長が長くなることにより, 式(4)に電離層, 対流圏遅延の項が消去されずに残ることで測位精度の劣化が起こる[3].

本稿では, まず DGPS においてユーザ局と1つの基準局の位置関係(基線長, ユーザ局の真の位置から見た基準局の方向)が測位精度にどのような影響を与えるかを調べるための実験を行う. 次に, 得られた位置関係による依存性と3つの基準局の位置関係を考慮した測位誤差補正方法を提案する. 最後に, 1つの基準局を用いた場合と複数基準局を用いた場合の比較を行い, 本研究の有効性を示す.

3. DGPS 測位実験

3.1 ユーザ局側の装置 本研究における測位実験では, ユーザ側の GPS 受信機として NovAtel 社製の RT-2 を用いている. 受信機及びアンテナの仕様を表1に示す.

表1 利用した受信機の仕様

Table 1 Specifications of receiver used in our study

| | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Receiver | RT-2 |
| Manufacture | NovAtel |
| Antenna | NovAtel L1/L2 GPS Antenna Model 702 |
| Receiving frequency | 1575.42/1227.6MHz |
| Chasing code | C/A code |
| Elevation cut-off angle | 0~90 [degree] |
| Output interval | ~20Hz |
| Weight | 1.0 kg |
| Size | L185×W160×H71 |

RT-2 は2つの周波数(L1/L2)を受信でき, さらに搬送波を用いた測位も可能である. この受信機には状況に合わせて仰角マスクの設定や利用する衛星番号を指定することなども可能である. また, 一般の受信機での出力である衛星の仰角・方位角, 受信機位置の緯度・経度表示だけでなく ECEF (Earth Centered Earth Fixed: 地球中心地球固定)座標系での衛星位置や受信機位置, 計測された擬似距離, 測位計算に用いた擬似距離の補正項(電離層伝搬遅延・対流圏伝搬遅延・衛星時計)など様々なデータを出力することが可能である. 本研究では, BESTPOS, BESTXYZ, SATXYZ, TRACKSTAT を ASCII フォーマットで取得し, シミュレーションを行っている.

3.2 基準局側の装置 基準局側の受信機には、国土地理院によって設置されている電子基準点を用いる。電子基準点は、国土地理院によって全国約 1200 ヶ所に設置された GPS 連続観測地点である。国土地理院の GEONET(GPS 連続観測システム)で得られた電子基準点観測データと解析結果値は、インターネットを利用してユーザに提供されている[4]。

3.3 単一基準局による DGPS ここでは長基線 DGPS において、ユーザ局と基準局の位置関係(基線長, ユーザ局の真の位置から見た基準局の方向)が測位精度にどのように影響するかを調査するための測位実験を行う。実験のための測位条件を以下に示す。

3.3.1 測位条件 図 2 に、基準局として用いた電子基準点を○で、ユーザ局(矢上)を◎で示す。図(a)は北海道から中部地方までの広域図であり、図(b)は関東地方の拡大図である。これらの基準局の基線長, ユーザ局を基準とした方位角を表 2 に示す。方位角は、北方を 0°として時計回りを正の方向とし、-180°~180°の範囲で示す。これらの基準局をそれぞれ用いて、DGPS 測位シミュレーションを行う。データは、2006 年 7 月 3 日~7 月 4 日(GPS タイム:122640s~208620s)の約 24 時間 30 秒毎のデータを用いる。電子基準点のデータは、擬似距離や搬送波の測定値とエフェメリスデータの標準フォーマットである RINEX (Receiver Independent exchange format) 形式が用いられている。RINEX ファイルには、観測データ、航法メッセージ、気象観測の 3 種類がある。観測データは O ファイル (Observation Data File), 航法メッセージは N ファイル (Navigation Data File), 気象観測は M ファイル (Meteorological Data File) と呼ばれる。本研究では O ファイルを用いている。

O ファイルは大きく分けて、ヘッダ部とデータ部に分けられる。ヘッダ部の終わりには「END OF HEADER」のコメントが書かれており、読み込みではこのコメントでヘッダ部とデータ部の区別を行う。ヘッダ部の「TYPES OF OBSERV」のコメントの行にデータ部のデータの並び順と種類等が記載されている。データの種類には、【C1】(L1(C/A コード)の擬似距離 [m]), 【L1】(L1 の搬送波位相 [cycle]), 【P2】(L2(P コード)の擬似距離 [m]), 【L2】(L2 の搬送波位相 [cycle])があり、この順番でデータが並んでいることがわかる。データ部は測定間隔(エポック)ごとに記載されている。各エポックの先頭にはエポック時刻と衛星数、衛星番号が 1 行目に記載される。2 行目からは衛星数に相当する行数分測定値が記載されている。衛星番号の前に【G】と記載されている。これは GPS 衛星であることを示している。他にロシアの衛星 GLONASS を【R】、静止衛星を【S】と表現している。なお、電子基準点の RINEX データは全て 30 秒間隔であるため、本研究で用いる RT-2 のデータも全て 30 秒毎に統一した。



(a) GPS の基地局：広域情報

(a) Reference stations : Wide area



(b) GPS の基地局：関東領域情報

(b) Reference stations : Narrow area

図 2 GPS 測位のための基地局

Fig.2 Reference station for GPS measurement

表 2 研究に用いた基地局情報

Table 2 Information of reference stations

| Reference station | Number | Baseline [m] | Azimuth [degree] |
|-------------------|--------|--------------|------------------|
| Kanagawa-Kawasaki | (1) | 1916.050 | 62.856 |
| Nerima | (2) | 22623.821 | -2.643 |
| Chiba-Ichikawa | (3) | 26097.528 | 59.270 |
| Iruma | (4) | 37726.069 | -43.748 |
| Moriya | (5) | 52517.819 | 35.522 |
| Kuki | (6) | 59017.917 | -1.560 |
| Tiba-Ohara | (7) | 74847.864 | 117.363 |
| Higata | (8) | 93149.589 | 74.395 |
| Tochigi | (9) | 94130.667 | 3.927 |
| Fuji | (10) | 94793.196 | -116.283 |
| Nirasaki | (11) | 109308.142 | -82.763 |
| Inawashiro1 | (12) | 226324.569 | 9.396 |

| | | | |
|----------|--------|------------|--------|
| Asahi | (13) | 337545.774 | 2.623 |
| Tamayama | (14) | 494902.704 | 15.151 |
| Namioka | (15) | 577369.175 | 7.872 |
| Hakodate | (16) | 702194.325 | 7.444 |
| ErimoI | (17) | 777368.009 | 21.946 |
| Onbetsu | (18) | 893354.766 | 23.036 |

| | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| (11) | 0.667 | 1.375 | 0.450 | 0.965 |
| (12) | 0.997 | 1.969 | 1.092 | 1.456 |
| (13) | 1.490 | 2.570 | 0.604 | 1.930 |
| (14) | 2.202 | 3.369 | 0.619 | 2.466 |
| (15) | 2.660 | 3.815 | 0.690 | 2.832 |
| (16) | 3.050 | 4.420 | 0.842 | 3.201 |
| (17) | 3.192 | 4.739 | 0.623 | 3.289 |
| (18) | 3.616 | 5.174 | 0.612 | 3.582 |

3.3.2 単一基準局を用いた結果 表 3 に単独測位(SAP)結果と、DGPS の水平方向の誤差平均[m], 平面上の2drms[m], 高さ方向の誤差平均[m], 高さ方向の標準偏差[m]を示す。また、水平方向の誤差平均, 高さ方向の誤差平均, 平面上の 2drms, 高さ方向の標準偏差と基線長との関係を図 3～図 6に、ユーザ局の真の位置から見た DGPS の測位結果の方位角とユーザ局の真の位置に関して基準局と点対称位置の方位角との差と、基線長との関係を図 7 に示す。

図 3～図 6 より、緯度経度方向については、基準局の基線長が長くなるにつれて誤差平均, 2drms とともに増加しているため、DGPS の測位精度が悪化していることがわかる。また表 3 より、緯度経度方向の誤差平均は、基準局「千葉大原」(基線長:74847.864m)より基線長が長い基準局を用いた場合において、2drms は、基準局「玉山」(基線長:494902.704 m)より基線長が長い基準局を用いた場合において、単独測位結果よりよい結果が得られず、十分な補正が行われていない。高さ方向については、基線長が長くなるにつれて標準偏差は増加しているが、誤差平均は標準偏差に比べて基線長に対する顕著な変化はみられない。また、図 7 より、ユーザ局の真の位置から見た DGPS の測位結果の方位角とユーザ局の真の位置に関して基準局と点対称位置の方位角との差は、基線長が長くなるにつれて一致していく傾向があることがわかる。これらのシミュレーションより、DGPS 測位結果は、基線長が長くなるにつれてユーザ局の真の位置から基準局と逆の方向に離れていく傾向があることがわかる。

表 3 DGPS による測位結果
Table 3 Result of DGPS

| Number | Horizontal error average [m] | Horizontal 2drms [m] | Vertical error average [m] | Vertical Standard deviation [m] |
|--------|------------------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------|
| (SAP) | 0.437 | 2.722 | 0.840 | 1.829 |
| (1) | 0.106 | 1.193 | -0.193 | 0.811 |
| (2) | 0.136 | 1.229 | -0.167 | 0.903 |
| (3) | 0.117 | 1.054 | -0.053 | 0.697 |
| (4) | 0.265 | 1.070 | 0.069 | 0.689 |
| (5) | 0.243 | 1.135 | 0.027 | 0.752 |
| (6) | 0.264 | 1.133 | 0.028 | 0.763 |
| (7) | 0.477 | 1.237 | -0.142 | 0.876 |
| (8) | 0.537 | 1.247 | 0.113 | 0.924 |
| (9) | 0.481 | 1.340 | 0.114 | 0.936 |
| (10) | 0.515 | 1.308 | 0.087 | 0.934 |

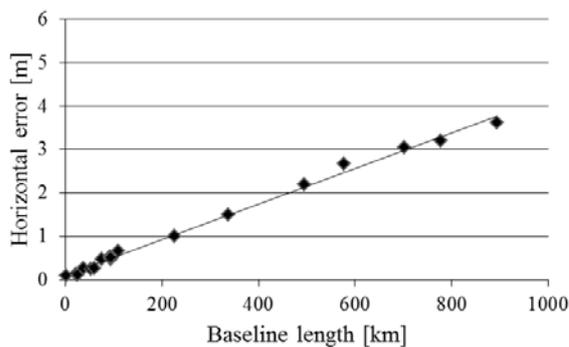


図 3 水平方向の誤差と基線長との関係
Fig.3 Relation of horizontal error and baseline length

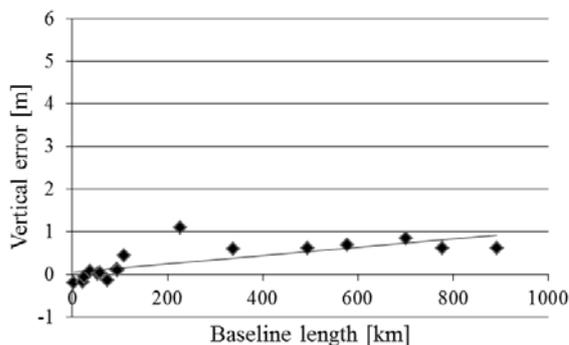


図 4 高さ方向の誤差と基線長との関係
Fig.4 Relation of vertical error and baseline length

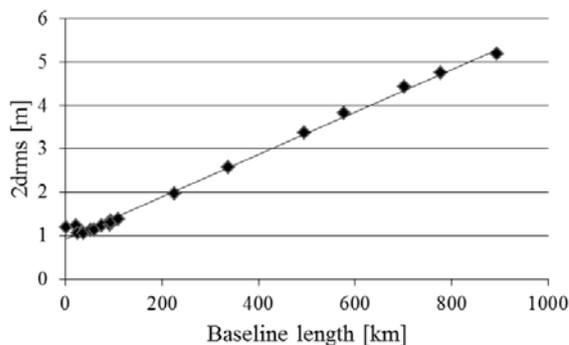


図 5 水平方向の 2drms 基線長との関係
Fig.5 Relation of horizontal 2drms and baseline length

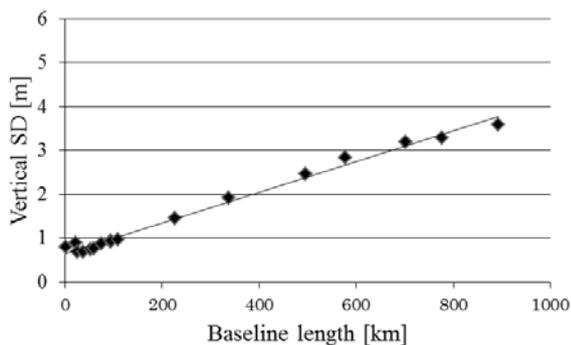


図6 高さ方向の標準偏差と基線長との関係

Fig.6 Relation of vertical standard deviation and baseline length

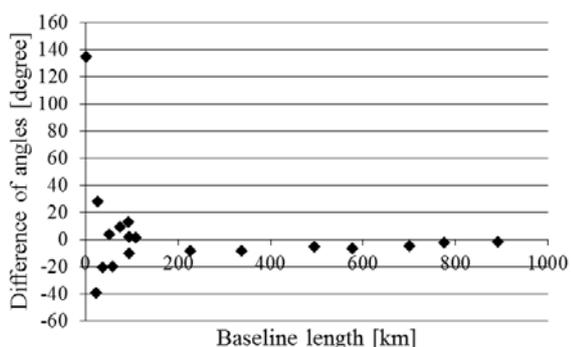


図7 基線長と2つの方位角の差

Fig.7 Difference of direction angles to base length

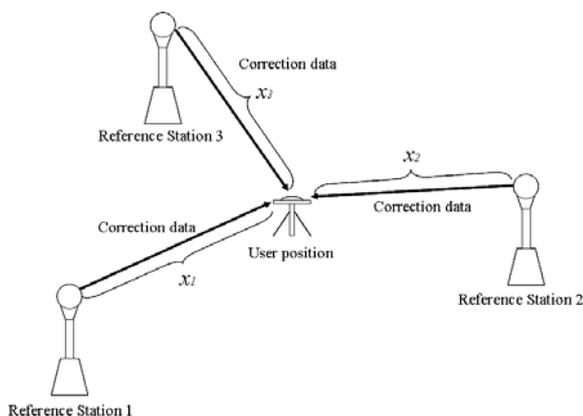


図8 複数基準局を用いた DGPS のモデル

Fig.8 Model of DGPS with plural reference stations

3.4 長基線 DGPS の測位精度改善

3.4.1 提案手法 前節で示した方法により基線長、方位の異なる様々な基準局を用いて DGPS 測位実験を行った。その結果はいずれもユーザ局と基準局との基線長が長くなるにつれて、ユーザ局の真の位置から基準局と逆の方向に離れていく傾向を示した。このことから、DGPS の測位精度は基線長・方位角に依存していると判断できる。特に、水平方向の測位

精度については、基準局の配置されている方向に依存し、測位位置が基準局から遠ざかるにしたがって悪化していく。そこで、この傾向を利用し、複数の基準局を同時に用いて DGPS 測位を行うことで、水平方向の測位精度を改善する方法を提案する。まず、複数基準局を用いる DGPS の概略図を図8に示す。図のように、ユーザ局を囲むような3つの基準局を用いる。図中の x_i は各基準局の基線長を表している。ユーザ局を囲むような複数の基準局を用いることで、衛星-ユーザ局間及び衛星-基準局間の擬似距離誤差の差を補正することができ、測位分布が真の位置に近づくと考えられる。本研究では、基準局を短基線で確保できない地域での高精度な DGPS 測位を目指すため、できるだけ使用する基準局の数は少なくする。また、長基線の基準局を用いるため、日本では4つ以上の基準局でユーザ位置を囲むような基準局を確保することが難しいので、複数の基準局を用いる場合、3局を利用する方法を提案している。

通常の単一短基線 DGPS では、式(5)に示されているように電離層・対流圏遅延誤差を消去できるので、複数基準局を用いることで各基準局のマルチパス等の影響も軽減することができる。長基線 DGPS では電離層・対流圏遅延誤差を軽減することができないので、複数基準局を用いてこれらの誤差の軽減を図る。つまり、短基線 DGPS と長基線 DGPS では複数基準局を用いることの目的が異なる。

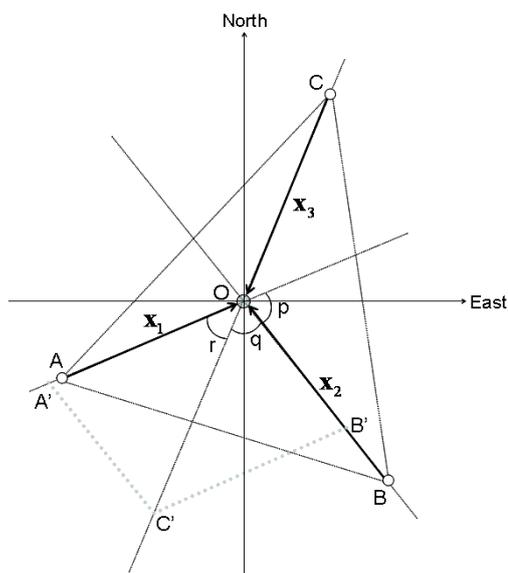


図9 基準局の誤差ベクトルモデル

Fig.9 Error vector model of reference stations

次に、複数の基準局を用いて補正をする方法を説明する。補正方法は、通常の DGPS と同じ擬似距離補正方式であるが、式(3)で示した各基準局の擬似距離補正值 PRC_i を用いて、次のような新しい擬似距離補正值 PRC' を算出する。

$$PRC' = \sum_{i=1}^3 \alpha_i PRC_i \quad (6)$$

上式で、 α_i は各擬似距離補正值の重み係数である。こ

の重み付け手法について、次の基線長・方位角依存型の方法を提案する。この方法では、各基準局がユーザ位置の測位結果を遠ざける方向の誤差ベクトルを持っていると見なし、ユーザ位置におけるそれぞれの誤差ベクトル和が0となるように考える。図9に提案手法の模式図を示す。図のように、3つの基準局をA, B, Cとし、それぞれの方位角を a, b, c [degree]とする。原点Oはユーザ位置を示す。そのとき角 p, q, r [degree]は次式のように表される。

$$\begin{cases} p = 180 + b - a \\ q = 180 + c - b \\ r = a - c - 180 \end{cases} \quad (7)$$

\mathbf{X}_3 を相殺するベクトルを他の2つのベクトルと平行なベクトルを用いて作るため、Oを中心にCと点対称な点C'をとり、そこから2つのベクトルとお互いに平行な線を書いて図9のようにA', B'をとる。このとき、ベクトルA'O, B'Oの大きさは、

$$|\mathbf{A}'\mathbf{O}| = |\mathbf{x}_1| = \frac{|\mathbf{x}_3| \sin q}{\sin p} \quad (8)$$

$$|\mathbf{B}'\mathbf{O}| = |\mathbf{x}_2| = \frac{|\mathbf{x}_3| \sin q}{\sin p} \quad (9)$$

となり、 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$ のベクトル和は0となる。この3つのベクトルの大きさの割合は基線長に依存せず基準局の方位角に依存するので、長基線の基準局を用いた場合ほど補正がされにくいという事実を反映させるため、

$$\begin{cases} D = \frac{|\mathbf{x}_1|}{|\mathbf{x}_1|} + \frac{|\mathbf{x}_2|}{|\mathbf{x}_2|} + 1 \\ \alpha_1 = \frac{1}{D} \frac{|\mathbf{x}_1|}{|\mathbf{x}_1|} \\ \alpha_2 = \frac{1}{D} \frac{|\mathbf{x}_2|}{|\mathbf{x}_2|} \\ \alpha_3 = \frac{1}{D} \end{cases} \quad (10)$$

とする。このように基線長を用いることで、厳密にはベクトル和は0にはならないものの、基準局の基線長、方位角両者を考慮した方法である。

この提案手法を評価するため、次の3つの重み付け手法を用いてシミュレーションを行い、検討している。

① 平均化

3つの基準局からの擬似距離補正值の重みを全て同じと見なし、次のようにする。

$$\alpha_i = \frac{1}{3} \quad (11)$$

② 基線長依存型

長基線基準局の擬似距離補正值の影響を小さくするた

め、基線長に反比例するような重み付けをし、次のようにする。

$$\alpha_i = \frac{1}{x_i} \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} \right)^{-1} \quad (12)$$

③ 基線長・方位角依存型 (上述)

先に述べた基線長・方位角依存補正方法を利用する。

3.4.2 測位条件

図10に基準局として用いた電子基準点を○で、ユーザ局の位置を◎で示す。これらの基準局の基線長、ユーザ局を基準とした方位角を表4に示す。長基線の基準局としては、DGPSでの測位結果が単独測位と同程度の2drmsとなった長基線基準局の小松・青ヶ島・牡鹿を用いた。またこれらの基準局よりも十分に基線長が長く、単一ではディファレンシャル補正が不可能な基準局である根室1・母島・玉之浦を併せて用いた。長基線DGPSと比較するための短基線の基準局としては、横浜泉を用いた。



図10 基準局
Fig.10 Reference stations

表4 基準局情報

Table 4 Reference stations

| Reference station | Number | Baseline [m] | Azimuth [degree] |
|-------------------|--------|--------------|------------------|
| Yokohama-Izumi | (19) | 19324.250 | -141.435 |
| Komatsu | (20) | 308846.983 | -71.511 |
| Aogashima | (21) | 343097.007 | 178.271 |
| Oshika | (22) | 346204.344 | 27.812 |
| Nemuro1 | (23) | 994207.775 | 28.609 |
| Hahajima | (24) | 1016367.300 | 165.737 |
| Tamanoura | (25) | 1066703.490 | -104.512 |

3.4.3 3基準局を用いた DGPS 3つの基準局を用いた DGPS として、前節で示した3種類の手法について次の3つの組み合わせで DGPS 測位シミュレーションを行う。

- (i) 根室1・母島・玉之浦
- (ii) 小松・青ヶ島・牡鹿
- (iii) 小松・青ヶ島・根室1

(i), (ii) はそれぞれ同程度の基線長の組み合わせであるが、同程度の基線長の基準局が確保できなかった場合を想定して、(iii) のように大きく基線長の異なる組み合わせでも DGPS 測位シミュレーションを行う。また、これらの測位結果と比較するため、短基線長である横浜泉(19)を用いた単一基準局 DGPS 測位シミュレーションを行う。測位シミュレーションに用いたデータは、先に示した実験と同様に2006年の7月3日～4日(122640s～208620s)の約24時間30秒毎のデータを用いている。月日はいずれもUTCを基準とし、括弧内はGPS時間を示している。表5に単独測位(SAP)とDGPSの水平方向の誤差平均[m], 2drms[m]を示す。

表5 提案手法による測位結果
Table 5 Result by our proposed method

| Reference station | Method | Error average [m] | 2drms [m] |
|-------------------|--------|-------------------|-----------|
| (SAP) | - | 0.437 | 2.722 |
| (19) | - | 0.185 | 1.095 |
| (i) | ① | 0.282 | 1.667 |
| | ② | 0.257 | 1.627 |
| | ③ | 0.259 | 1.572 |
| (ii) | ① | 0.231 | 1.032 |
| | ② | 0.280 | 1.046 |
| | ③ | 0.091 | 1.019 |
| (iii) | ① | 0.785 | 1.569 |
| | ② | 0.291 | 1.186 |
| | ③ | 0.060 | 1.170 |

3.4.4 検討

(1) 単一基準局と複数基準局による平面誤差比較

単一基準局によるDGPSと複数基準局によるDGPS結果例として、根室1・母島・玉之浦をそれぞれ用いたDGPS測位点と、それらを併用した(i)の条件で手法①の平均化を用いたDGPS測位結果として、誤差平均と2drmsの結果を表6に示す。このように、各基準局を単独で用いたDGPSの場合は、真の位置から大きくずれているが、これらの基準局を同時に用いてDGPSを行うことで、誤差平均、2drmsともに補正することができた。これは、用いる基準局の組み合わせ、擬似距離補正値の重み付けによらず、全ての方法で補正することができた。

表6 基準局を単独で用いたときの測位結果

Table 6 Result by individual reference station

| Reference stations | Method | Error average [m] | 2drms [m] |
|--------------------|--------|-------------------|-----------|
| (23) | - | 3.842 | 5.475 |
| (24) | - | 4.463 | 5.552 |
| (25) | - | 4.071 | 5.749 |
| (i) | ① | 0.282 | 1.667 |

(2) 擬似距離誤差補正値の重み付け手法の評価

擬似距離誤差補正値の重み付け手法の違いによる測位精度を比較すると、2drmsには顕著な違いは現れなかったが、誤差平均は、(ii)・(iii)の基準局で③の基線長・方位角依存型が最も良い結果となった。(iii)のような基線長が大きく異なる基準局の組み合わせの場合、補正値を平均化すると、根室1のような最も大きな誤差ベクトルを持つ基準局(最も遠い位置にある基準局)の影響を打ち消すことができず、ユーザ局に対して基準局と反対の方角に誤差成分が残ってしまった。また、(ii)のような組み合わせでは、基線長の影響だけを考慮した②の方法よりも補正値を平均化した①の方法のほうがよい結果となっているため、300km程度の基線長の基準局を複数用いた場合では、基線長の影響よりも基準局の方位角成分を考慮することが重要であるといえる。逆に、(i)のような組み合わせでは、③の方法が最も悪い結果となっている。つまり、1000km程度の非常に長い基線長の基準局を用いる場合は、基準局の方位角成分の影響よりも、基線長成分の影響が強いと考えられる。

(3) 単独測位と複数基準局 DGPS の比較

測位の精度面では、基準局の組み合わせによる測位条件、擬似距離補正値の重み付け手法の違いに関わらず、2drmsは単独測位よりよい結果が得られ、ディファレンシャル補正が機能していることが確認できた。測位の確度面では、(ii)・(iii)の基準局において、③の基線長・方位角依存型は単独測位より誤差平均が小さくなった。このように、単独測位との比較でも提案手法である重み付けが有用であることがわかる。

(4) 短基線 DGPS と複数基準局 DGPS の比較

短基線 DGPS は単独測位より高精度であるため、単独測位より精度の悪かった複数基準局 DGPS は必然的に短基線 DGPS より精度・確度は悪くなる。測位の精度面では、(i)の条件での2drmsは短基線 DGPS より悪くなったが、(ii)の条件で③を用いた場合の2drmsは、短基線 DGPS より良い結果となった。つまり、基線長300km程度の基準局が3つ確保できれば、提案手法である基線長・方位角を考慮した重み付け手法を用いることで通常の DGPS と同程度、もしくはそれ以上の精度の測位が可能であるといえる。測位の確度面では、誤差平均は、(ii)・(iii)の条件で③を用いた場合、短基線 DGPS より良い結果となった。

つまり、基線長 300km 程度の基準局を 3 つ確保できず、基準局の分布が偏った状況でも、提案手法の重み付け手法を用いることで短基線 DGPS と同程度、もしくはそれ以上の精度の測位が可能であるといえる。

4. むすび

本研究では、単独測位に比べ高精度な DGPS に着目し、基準局を十分に確保できないような地域でも精度の高い測位を実現することを目的としている。まず、基準局の位置が DGPS にどのような影響を及ぼすか調査した。その結果、基線長が長くなるにつれて水平方向の誤差平均, $2drms$ ともに増加し、DGPS の測位精度が悪化することがわかった。その際、誤差平均の分布は基準局のある方向から遠ざかるように変位し、真の位置から離れていく傾向があることがわかった。これらの結果より、DGPS の測位精度は、基準局の基線長・ユーザ局から見た方位角に依存していることが示された。そこで、複数の長基線の基準局を同時に用いて DGPS 測位を行うことで、水平方向の測位精度を改善する手法を提案した。この手法は、基準局がユーザ局方向の誤差ベクトルを持っているとみなし、ユーザ局を囲むような 3 つの基準局を用いて、この誤差ベクトルの和を小さくするものである。具体的には、各基準局の擬似距離補正值に基線長・方位角に依存する重み付けを適用することで、新たな擬似距離補正值を算出し、測位精度改善を試みた。その結果、単一基準局による DGPS では補正が不可能な基線長 300km 程度の基準局を用いた場合、単独測位結果より精度・確度共に改善することができ、同程度の基線長の基準局が確保できなかった状況を想定した実験でも、精度・確度共に改善することができた。また、短基線 DGPS と比較した場合でも、300km 程度の基準局を用いた場合、精度・確度共に改善することができた。本研究の提案手法は、DGPS において水平方向の測位精度改善に有用であるといえる。

(平成 22 年 7 月 10 日受付, 9 月 15 日再受付)

文 献

- [1] 坂井丈泰, 惟村和宣, “複数の基準局を用いた場合の DGPS 測位精度”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.99, No.248, pp.57-62, 1999.
- [2] 福島荘之介, 斉藤真二, “多基準による狭域 DGPS の測位性能評価”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J84-B, No.12, pp2212-2219, 2001.
- [3] Bradford W.Parkinson, James J.Spolker Jr., “Global Positioning System: Theory and Applications Volume II”, PartIII, AIAA, 1996.
- [4] 電子基準点データ提供サービス,
<http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>. (平成 22 年 7 月 9 日確認)

著者紹介

田中 敏幸 (正員) 1982 年 3 月慶應義塾大学工学部計測工学科卒. 1989 年 3 月同大学大学院理工学研究科博士課程了. 工学博士取得. 1989 年 4 月慶應義塾大学理工学部計測工学科助手. 1993 年専任講師. 1995 年～1996 年ドイツ・アーヘン工科大学客員研究員. 2003 年 4 月物理情報工学科助教授(2007 年 4 月より准教授). 2009 年 4 月教授. 現在に至る. 医用画像処理, GPS とその応用, 音声信号処理等の研究に従事. 計測自動制御学会, 電気学会, 電子情報通信学会, IEEE, ION などの会員.

川村 景太 (非会員) 2005 年 3 月慶應義塾大学理工学部物理情報工学科卒. 2007 年 3 月同大学大学院理工学研究科修士課程了. 大学学部, 大学院を通じて GPS の測位精度改善に関する研究に従事. 2007 年 4 月ソニー入社. 現在に至る.