アンテナ高さ誤差がGPS測位精度に及ぼす影響

柿原 利治*・若木 毅**・柳川 三郎*

Effects of Antenna Height Error on the GPS Positioning Accuracy

Toshiharu KAKIHARA, Tsuyoshi WAKAKI and Saburo YANAGAWA

Abstract

In order to make a study of the effects of antenna height error on the two-dimensional positioning accuracy of the GPS, calculations of positioning errors were carried out by using assumed and actual allocation of three NAVSTAR satellites. As the results of these simulations, it was found that the positioning error indicates a certain tendency of dependence on the relative position of three satellites in observer's celestial hemisphere.

1. はじめに

スペースシャトルの事故以来 NAVSTAR 衛星の打上げ計画も延期され、システムの完成は数年先の見通しとなっている。現在は8衛星による測位を余儀なくされていることから、我が国周辺におけるGPS測位データの大半は二次元測位によるものとなっている。二次元測位は3衛星を利用して、受信点の緯度、経度、受信機の時計の三つの未知数を求める位置計算方法であるが、受信点の高さも未知数として取り扱う4衛星を使った三次元測位と異なり、二次元測位ではアンテナ高さを既知量として、これを受信初期設定時に与えてやる必要がある。本論におけるアンテナ高さとは、基準回転楕円体面からアンテナ位置までの距離をいうが、一般に市販受信機では機内で自動的にジオイド高を算出するタイプが多いので、ユーザーはアンテナ位置の標高を設定してやればよいことになっている。しかし、ユーザーが移動中の二次元測位の場合、陸上においては標高が大きく変化することが予想されるし、比較的アンテナ高さの変化が小さいと考えられる船舶においても潮汐、波浪による海面の昇降や船体の動揺、積荷による喫水の変化などがアンテナ高さ誤差の要因として掲げられる。更に、アンテナ高さの初期設定値の見積り誤差やジオイド高算出の精度などの点を考え合えると、アンテナ高さ誤差に起因する測位誤差傾向の把握をしておくことは必要であると思われる。この解析法として理論式⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾によるのが正当であるが、著者らは一つの試みとして架空の衛星配置を想定した場合と実際の衛星配置による場合の測位誤差のシミュレーション計算を行い、アンテナ高さ誤差がGPS二次元測位精度に及ぼす影響を検討したので報告する。

2. 架空衛星配置による測位誤差

2.1 シミュレーションの方法

図1に測位誤差計算の流れ図を示す。アンテナ高さ誤差 ($4h$) がGPS測位に及ぼす影響は、3衛星の三次元空間配置により異なることが予想される。今回のシミュレーションでは、アンテナ高さ誤差として+10mを基本におき、必要に応じて-10mと+20mを設定して、測者から見た衛星の方位分布や仰角分布を変化させて、それぞれのケースにおける測位誤差の緯度・経度成分、水平位置誤差、時間への吸収量およびHDOP値などを計算した。時間への吸収量は衛星・測者間の距離バイアス分に相当し、測位誤差量との単位の統一化を計る意味もあるので、本論では時間への吸収量を距離量として扱うことにする。測者はWG S—72測地系で定義される回転楕円体上にあり、その位置は東京 ($35^{\circ}37'.0N$, $139^{\circ}45'.0E$) とした。衛星軌道の離心率は衛星により若干異なる

* 正会員 東京水産大学 (〒108 東京都港区港南4-5-7)

** 正会員 海上自衛隊幹部候補生学校 (〒737-21 広島県安芸郡江田島)

が、約 0.002~0.01 程度の値であるから、衛星は地球中心から半径 26,560km の円軌道上にあるものと仮定した。

今、測者・衛星間の真の距離を ρ_{ti} とし、測者位置にアンテナ高さ誤差がある時の測者・衛星間の距離を ρ_{ci} とおけば、各衛星に対して次の観測方程式が成り立つ。 i ($i=1, 2, 3$) は衛星を指示するものとする。

$$\rho_{ti} = \rho_{ci} + \frac{\partial \rho_{ci}}{\partial \phi} \Delta \phi + \frac{\partial \rho_{ci}}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \Delta B \quad \cdots (1)$$

$\Delta \phi$, $\Delta \lambda$ は測者推測位置の緯度・経度成分の補正値を示し、 ΔB は時間への吸収量の補正値を示す。測位計算を行うに際して、測位地点の緯度、経度および時間への吸収量をそれぞれ近似値と補正値の和として表わし、補正値があらかじめ設定しておいた閾値以内に収束するまで計算を繰り返す。緯度、経度の近似値の初期値として 0.5° 測者真位置に対して離れた地点を与え、時間への吸収量の初期値は零とした。通常 3 回程度の繰返しで補正値は閾値以内に収束する。

2.2 3 衛星の仰角差が僅少の場合

まず、3 衛星の方位を固定して、仰角が僅かずつ異なる衛星配置を考え、それぞれの方位に対する仰角配置順序の入れ替えによる測位誤差の変化について述べる。1 番衛星 (SV1)、2 番衛星 (SV2)、3 番衛星 (SV3) の方位をそれぞれ 330° , 0° , 30° に固定し、それらの方位に 5° , 10° , 15° の三つの仰角の組合せの中のいずれか一つを当てはめる場合、その組合せ方法は全部で 6 通り存在する。表 1 にアンテナ高さ誤差を +10m に設定した場合の 6 通りの組合せに対する緯度 (D.lat.)・経度 (Dep.) 誤差、水平位置誤差 (HE), 時間への吸収量 (BIAS), HDOP 値等を示す。この表からいくつかの特徴が掲げられる。3 衛星の仰角差が 10° 以内の僅少値で、しかも方位がともに北方に片寄っているにもかかわらず、測位誤差は全象限に渡って分散しており、水平位置誤差も仰角分布の違いによって 1.7~11.9m までの大きな差異が生じている。この事は衛星の方位・仰角分布から測位誤差の方向性や絶対量を単

図1 測位誤差計算の流れ図

表1 仰角の組み合わせ方と測位誤差

elevation (degree) SV1—SV2—SV3	D. lat. (m)	Dep. (m)	HE (m)	BIAS (m)	HDOP
10 — 5 — 15	8.6N	0.7W	8.6	9.4	9.9
15 — 5 — 10	8.6N	0.7E	8.6	9.4	9.9
5 — 10 — 15	0.1N	1.7W	1.7	1.8	11.0
15 — 10 — 5	0.1N	1.7E	1.7	1.8	11.0
5 — 15 — 10	11.9S	1.0W	11.9	-8.9	13.8
10 — 15 — 5	11.9S	1.0E	11.9	-8.9	13.8

Satellite direction (degree) : SV1=330, SV2=0, SV3=30
antenna height error : $\Delta h=10\text{m}$

純に推定することの難しさを示している。また、衛星配置により時間への吸収量やHDOPも変化するが、測位誤差量と時間への吸収量、HDOP間に相関性は見られない。アンテナ高さ誤差が測位精度に及ぼす影響を論ずる場合、HDOPは測位精度を左右する重要な要因とはならないと思われる。

これまでは衛星仰角が相対的に低く、方位の北方への片寄りがある場合の例であったが、次に3衛星が僅少な仰角差を保ちつつ、相対的に仰角を高めていった場合について述べる。この時、それぞれの仰角分布に対していくつかの方位分布を考えた。まず、仰角はSV1, SV2, SV3の順序に高く設定し、SV1とSV2およびSV2とSV3の仰角差は等しく 5° とした。方位はSV2を常に 0° 方向に位置させ、SV1とSV3の方位はSV2を中心に方位差がそれぞれ左右対称に 30° , 120° , 150° になるような3通りの方位分布を考えた。図2にSV1—SV2—SV3の方位差が 120° である場合の方位分布 $240^\circ-0^\circ-120^\circ$ における仰角の変化に伴う衛星配置を示す。図は地平面図で描かれており、ドットが衛星位置、その横の数字が仰角を表わす。ドットを頂点とする三角形は一つの測位計算に使用される衛星の組合せを示す。図には例として、3衛星の仰角が相対的に低、中、高である三つのケースが描いてある。図3に前記衛星配置に従って計算した水平位置誤差、時間への吸収量、HDOPを示す。アンテナ高さ誤差は $+10\text{m}$ である。水平位置誤差は方位分布にかかわらず、各衛星の相対的仰角差の関係が一定であれば、仰角自体の高低に関わりなくほぼ同一の傾向を示した。時間への吸収量は方位分布に関わりなく高仰角になる程増加し、仰角分布が $80^\circ-85^\circ-90^\circ$ である天頂付近に位置すると、その量はアンテナ高さ誤差の $+10\text{m}$ に近づく。

衛星の仰角差が僅少な場合の特殊なケースとして仰角

図2 仰角の変化に伴う衛星配置例

図3 仰角の変化に伴う水平位置誤差、時間への吸収量、HDOPの変化

図4 3衛星の仰角が等しい場合の時間への吸収量とHDOP

差が零、すなわち3衛星の仰角が皆等しい場合が考えられるが、この時は仰角の高低および方位分布に関わりなく水平位置誤差は零となる。図4には3衛星の仰角が等しい場合の時間への吸収量およびHDOPが示してある。時間への吸収量は方位分布によらず同一のカーブを描き、図3の場合と同様に高仰角になるに従って、アンテナ高さ誤差に近づいてゆく傾向を示している。

2. 3 3衛星の仰角差が変化する場合

2. 3. 1 方位分布による影響

3衛星の方位分布を図3の例にならって方位差を 30° 、 120° 、 150° に設定し、仰角はSV1を常に 5° に固定し、SV2は最初 5° から 5° 刻みに仰角を高くしてゆき、SV3は 5° から 10° 刻みで高くなるよう設定すれば、SV1—SV2—SV3の仰角は $5^\circ-5^\circ-5^\circ$ から $5^\circ-45^\circ-85^\circ$ まで変化し、仰角差は 0° から 80° まで変化することになる。図5にこの例として、SV1—SV2—SV3の方位を $240^\circ-0^\circ-120^\circ$ に固定して仰角差を変化させていった場合の衛星配置を示す。図6に図5の例にならって衛星の各方位分布ごとに仰角差を変化させていった場合の水平位置誤差、時間への吸収量、HDOPを示す。アンテナ高さ誤差は $+10$ mとした。水平位置誤差において方位分布が $210^\circ-0^\circ-150^\circ$ で、仰角差が大きい時を除いて方位分布の

図5 仰角差の変化に伴う衛星配置例

図6 仰角差の変化に伴う水平位置誤差、時間への吸収量、HDOPの変化

図7 仰角差の変化に伴う測位誤差の変化

違いによる誤差量の大きな差異は見られず、いずれも仰角差と正の比例関係にある。図7に図6と同じ衛星配置を設定した場合の測位誤差の変化を示す。各方位分布ごとの測位誤差曲線において、真位置である原点から最も離れた所は仰角分布が 5° — 45° — 85° である仰角差が最大の測位点を示し、先ほど述べたように、仰角が 5° — 5° — 5° で仰角差が零の場合に測位点は全て原点に集まる。表1において、SV1—SV2—SV3の仰角の順序を入れ替えることによって、誤差の偏位方向は異なることを示したが、図7から各衛星の仰角の大きさの順序に変更がなければ、方位分布および仰角差の大小にかかわらず測位誤差はほぼ同一方向に偏位することがわかる。

3. 実衛星配置による測位誤差

現在システムの試験運用期間であるためか衛星からの信号が時折途絶えたりすることがある。そのため日によって測位に使用される衛星の組合せが異なるなどの問題があり、特定の衛星組合せによる場合をもって実衛星配置における測位誤差を論じることができないが、本論では東京において昭和62年7月に比較的長時間連続して測位可能であった衛星の組合せSV3—SV6—SV13とSV6—SV8—SV11の2通りについて述べる。測位時間はSV3—SV6—SV13で16時から17時30分までの90分間で、その間HDOPは2.9から3.1まで変化し、SV6—SV8—SV11は9時30分から11時10分までの100分間で、HDOPは13.9から2.1まで変化した。シミュレーション計算をするに当たっての衛星の三次元位置等は、放送軌道情報を用いて計算し⁽⁴⁾、アンテナ高さ誤差は $\pm 10\text{m}$ および $+20\text{m}$ の3通りで行った。図8と図9にSV3—SV6—SV13とSV6—SV8—SV11

図8 実衛星配置

図9 実衛星配置

図10 実衛星配置における測位誤差

V 8—SV 11の衛星位置の変化を示す。矢印は衛星の移動方向で、矢印位置が測位終了点を、ドットは測位開始位置を示す。図10と図11はそれぞれSV 3—SV 6—SV 13とSV 6—SV 8—SV 11の測位誤差の変化を示すもので、図中矢印は図8、図9の衛星位置変化に対応した測位誤差の変化方向を示している。測位時間経過に伴う測位誤差は、衛星の組合せにより全く異なった形のドリフト現象となって現われる。ここで注意すべき点はSV 6—SV 8—SV 11の組合せにおいて、衛星配置の変化に伴い $HE/\Delta h$ が0.4~2.4の値を示しており、衛星配置によってはアンテナ高さ誤差に対して2倍以上の測位誤差が生じる可能性のあることを示している。

4. ま と め

架空の衛星配置と現在稼動している衛星の実配置を使ったシミュレーション計算を行い、アンテナ高さ誤差がGPS二次元測位精度に及ぼす影響を調べた。結果は次の通りである。

- (1) 衛星の方位分布に関わりなく、3衛星の仰角差が大きくなるほどアンテナ高さ誤差による測位誤差は増加する傾向にある。また、3衛星の仰角が等しいとき測位誤差は零となる。
- (2) アンテナ高さ誤差により生じた測位誤差と時間への吸収量、HDOPとの間に相関は見られなかった。
- (3) 実衛星の場合、その配置の変化に伴い、測位誤差はドリフト現象となって現われ、配置によってはアンテナ高さ誤差の2倍以上の測位誤差を生ずることがある。

今回は一つの試みとしてシミュレーションによる誤差解析を行ったが、GPSの2次元測位において、アンテナの高さが測位誤差に及ぼす影響は理論式により求めるのが正当であり、また計算時間も速いので、今後は理論式による解析を行い、更にこの研究を進めてゆきたい。

また、GPSを実用する場合の誤差を考えると、今回のような一部の衛星配置のみについての誤差解析では不十分であるので、今後はGPS衛星の24時間の全軌道について、衛星位置をシミュレーションにより連続的に変化させて測位誤差の解析を行い、その統計値よりアンテナの高さ誤差が測位誤差に及ぼす影響を評価したい。

終りに、衛星の放送軌道情報を提供して下さった日本無線㈱の関係者各位に感謝の意を表します。

質 疑 応 答

西 周次：アンテナの高さがGPSの測位誤差に及ぼす影響はこのような面倒なシミュレーションによらずとも理論的に簡単な式により求められますが、その解析を行ってみましたか。

柿原利治：今回は理論式による方法で計算しておりませんが、御指摘の方法でも検討してみたいと考えております。

参 考 文 献

- (1) R. J. MILLIKEN and C. J. ZOLLER, Principle of Operation of NAVSTAR and System Characteristics, NAVIGATION, Vol. 25, No.2, 1978
- (2) 西周次, NAVSTAR/GPS (全世界測位システム) の紹介, 航海, 62号, 1979年
- (3) 西周次, フェイズII GPSの利用可能時間と測位精度の解析, 日本航海学会論文集, 66号, 1981年
- (4) GPS人工衛星による精密測位システム, 日本測地学会編著, 日本測量協会出版, 昭和61年

図11 実衛星配置における測位誤差