高高度飛翔体による準天頂衛星測位システムの補強について^{*1}

Augmentation of Quasi-Zenith Satellite Positioning System Using High Altitude Platforms Systems (HAPS)

辻 井 利 昭^{*2}・張 替 正 敏^{*2}
Toshiaki TSUJII and Masatoshi HARIGAE

Key Words: Quasi-Zenith Satellite, Positioning System, HAPS, Pseudolite, GPS

Abstract: Recently, some feasibility studies on a regional positioning system using the quasi-zenith satellites and the geostationary satellites have been conducted in Japan. However, the geometry of this system seems to be unsatisfactory in terms of the positioning accuracy in north-south direction. In this paper, an augmented satellite positioning system by the High Altitude Platform Systems (HAPS) is proposed since the flexibility of the HAPS location is effective to improve the geometry of satellite positioning system. The improved positioning performance of the augmented system is also demonstrated.

1. は じ め に

米国によって開発、運用されている GPS は簡便で高精度な航法測位システムとして、日本でも自動車や船舶の航法をはじめ航空宇宙や地球科学の分野で広く利用されている。米国以外ではロシアが GPS と独立の衛星航法システムとして GLONASS を運用しており、欧州では GALILEO が開発中である。また日本でも、衛星測位システムが国民生活に重要な社会インフラであることから、静止衛星や準天頂衛星を用いた独自の測位システムの研究が進められている¹⁾。このシステムは、サービス領域を日本と近隣諸国に限ることにより GPS 等の大域測位システムに比べて 3 分の 1 以下の衛星数で構成可能なこと、準天頂衛星が常に高仰角に観測できることから建造物の多い都市部でも常時信号が受信できること等の利点がある。

一方、高度約 20 km に滞在する成層圏プラットフォーム (Stratospheric Platform, SPF) の研究開発が欧米や日本、中国、韓国で進行している。その主目的は通信・放送や地球観測であるが、航法測位への利用も提案されている²⁻⁵⁾。SPF や高高度無人機などの高高度飛翔体 (High Altitude Platforms Systems, HAPS) を測位に利用した場合、その配置の自由度が大きいこと、打ち上げのコストが衛星に比べて低いこと、回収が容易なため機器の更新が容易なこと等の利点がある。本論文では、HAPS が準天頂衛星や静止衛星からなる測位システムの測位精度を向上させるのに有効であることを示し、衛星と HAPS で構成される日本独自の測位システムを提案する (第 1 図)。

2. 衛星および HAPS の配置と測位誤差指標 (GDOP)

日本および近隣諸国を対象とする衛星測位システムの衛星軌道配置は様々なものが考えられるが、本論文では準天頂衛星 3 機、静止衛星 5 機の計 8 機で構成されるシステムを例とする¹⁾。第 2 図で、5 個の丸印は静止衛星、実線は準天頂衛星の東京から見た方位および仰角を示す。3 機の準天頂衛星は同じ軌道を通るため図では重なって見えるが、位相間隔が 120 度で配置されており地上からは常時 2 機が観測できる。この衛星配置は一見して南側に偏っており、南北方向の測位精度が東西方向に比べて劣ると推測される。測位精度は衛星の配置によって決まる GDOP (Geometrical Dilution of Precision) という指標を用いて見積もることができるが、GPS では通常上下方向の測位精度が悪いので、水平方向の指標 HDOP と上下方向の指標 VDOP に分けることがある。さらに、精密測量では南北方向、東西方向での測位精度が問題になることがあり、それぞれの成分に分けて示すことがある (以下それぞれ NDOP, EDOP と表す)。たとえば、橋梁の変位を精密に測定する場合に南北方向の精度が不足するため、その方向に GPS と同様な信号を発信するシュードライトを設置して測位精度を向上させる研究も行われている⁶⁾。

第 3 図に 8 機の衛星で構成される測位システムにおける観測衛星数、NDOP, EDOP, VDOP を示す (細線)。測位誤差は DOP 値に測距誤差を乗じて見積もられるため、DOP 値が大きいほど測位誤差が大きい。本システムでは、衛星配置からの推測通り NDOP は EDOP の約 75% 増となっている。そこで、南北方向の非対称性を緩和するために高度 20 km の HAPS を北側に配備することを考える。ここでは、第 2 図のように仰角 30 度、方位角 45 度および 315 度に配置した (四角印)。その場合の DOP 値を第 3 図

^{*1} © 2003 日本航空宇宙学会

平成 15 年 5 月 29 日原稿受理

^{*2} 独立行政法人航空宇宙技術研究所

第1図 衛星と HAPS による航法測位システム

第2図 準天頂衛星，静止衛星，および HAPS の方位と仰角

第3図 観測機数（細線：衛星のみ，太線：衛星および HAPS）と測位誤差の指標（南北，東西，上下方向）

に太線で示す．NDOP が約 35%改善し，EDOP に近い値となった．また，VDOP も改善されている．ただし DOP 値で正確に評価できるのは誤差が正規分布に従う場合であり，代表的な測位誤差の電離層遅延や対流圏遅延誤差には，ランダム誤差に加えて系統的な成分があるので次項で検討する．

第1表 GPS および HAPS の誤差源と単独測位誤差

誤差源	1 σ 誤差 (m)	
	GPS	HAPS
軌道歴	2.1	0.1
衛星時計	2.1	2.1
電離層遅延	4.0	0
大気遅延	0.7	0.7
マルチパス	1.4	1.4
受信機ノイズ	0.5	0.5
測距誤差	5.3	2.7
測位誤差 (1 σ)	15.9	8.1
GDOP=3 の場合		

3. 系統的測距誤差と測位誤差

GPS 測距信号における誤差源を第1表にまとめる⁷⁾．ここで，受信機時計や衛星時計の誤差は差分航法により除去できる．またマルチパス誤差や受信機ノイズは高機能レーザやアンテナを用いることで軽減可能である．さらに電離層遅延は，二周波受信機を用いれば消去できるので，多くの応用分野で対流圏遅延が最大誤差源とされている．そこで，本論文では系統的測距誤差の例として対流圏遅延を取り上げ，その測位誤差への影響を検討する．第1表では比較のため HAPS における誤差量の見積もりも行った．HAPS は電離層よりも下に位置するため，電離層遅延量を含まないことが大きな特徴である．軌道歴は地上に設置した受信機で観測した HAPS からの測距信号を用いていわゆる逆 GPS 法により高精度に生成される³⁾．逆 GPS 法の地上実験では精度数 cm の精密軌道歴の作成に成功しており³⁾，高高度でもデシメートルレベルが達成できると考えている．

対流圏遅延量は気圧，気温，湿度等の気象データをもとに推定できるが，気象観測装置をもたない移動局等では標準値（気圧 1013.25 mbar，気温 18℃，相対湿度 50%）や，日時と観測地の座標から平均的な気象値を計算できる大域モデルを用いる．例えば UNB4 モデル⁸⁾を用いると，2003 年 8 月 1 日 12 時（JST）の東京では，気圧 1013.5 mbar，気温 29℃，相対湿度 26%となり，天頂遅延量は 2.54 m となる．これに対し，非常に高温多湿な状態（気圧 1013.5 mbar，気温 34℃，相対湿度 100%）を想定すると天頂遅延量は 2.81 m となってモデル値よりも 27 cm 大きくなる．本論文ではこの値を天頂遅延推定誤差とし，各衛星，HAPS に対する遅延量は仰角にのみ依存すると仮定して天頂遅延に $1/\sin(el)$ (el : 仰角) を乗じて計算し，結果的に生ずる測位誤差を見積もった．第4図に，対流圏遅延に起因する測位誤差（南北，東西，上下方向）を示す．細線は衛星のみの場合で，東西方向がほぼゼロに対して南北方向に約 15 cm のバイアス誤差が生じており，衛星配置の非対称性の影響と考えられる．一方，HAPS を二機使用した場合には南北，東西両方向で測位誤差はほぼゼロになっており，配置の対称化の効果が大きいことがわかる．すなわち，HAPS の使用でランダム誤差は縮小されるのに対し，系統誤差は大部分相殺されており，全体的な測位誤差の見積もりには通常行われている DOP 値の評価のみでは不十分なことがわかる．

第 4 図 対流圏遅延による測位誤差

4. ま と め

準天頂衛星および静止衛星で構成される測位システムは、衛星軌道の性質上ユーザの南側に偏っており、南北方向の測位精度の劣化が予想される。そこで HAPS を北側に配置して測位システム全体の対称化を行い測位精度の変化を見積もった。その結果、ランダム誤差の影響を示す DOP は南北方向で約 35% 改善した。また、系統的誤差である対流圏遅延に起因する測位誤差は、HAPS を使用することにより南北方向で大幅に縮小されることが明らかとなった。

HAPS は衛星と異なり配置の自由度が大きいので、測位

システムの幾何学的性質の改善に有効である。準天頂衛星等と複合することにより、日本独自の高精度な領域測位システムを構成することができると考えられ、今後研究開発を進めていく計画である。

参 考 文 献

- 1) 河野 功：準天頂衛星と静止衛星による衛星測位システム，電子情報通信学会論文誌 B，J84-B (2001)，pp. 2092–2100.
- 2) 辻井利昭，Rizos, C., Wang, J., Dai, L., 張替正敏：成層圏プラットフォームを用いた疑似 GPS 衛星による航法測位サービスについて，日本航空宇宙学会論文集，50 (2002)，pp. 36–39.
- 3) Tsujii, T., Harigae, M., Barnes, J., Wang, J. and Rizos, C.: Experiments of Inverted Pseudolite Positioning for Airship-Based GPS Augmentation System, 15th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Portland, Oregon, 2002, pp. 1689–1695.
- 4) DAVIS, F., Mulassano, P. and Dumville, M.: The Stratospheric Concept: Design of a Stratospheric Pseudo-Satellite for Galileo, 15th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Portland, Oregon, 2002, pp. 347–355.
- 5) 辻 宏之，三浦 龍，張間康秋：ヘリコプタ上のアレーアンテナを使用した無線局位置推定実験，第 4 回成層圏プラットフォームワークショップ講演前刷集，2003，pp. 233–239.
- 6) Meng, X., Roberts, G., Dodson, E. and Cossier, E.: The Use of Pseudolites to Augment GPS Data for Bridge Deflection Measurements, 15th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Portland, Oregon, 2002, pp. 851–862.
- 7) 安田明生：GPS とその応用，GPS シンポジウム 2001 テキスト，2001，pp. 193–216.
- 8) Collins, J. P., Langley, R. B. and LaMance, J.: Limiting Factors in Tropospheric Propagation Delay Error Modelling for GPS Airborne Navigation. 52nd ION Annual Meeting, Cambridge, Mass, 1996, pp. 519–528.