

滞留型飛翔体に搭載したスードライトによる 航法測位システムについて

辻井利昭、張替正敏（航空宇宙技術研究所）

河口星也、イワン・ペトロフスキー（DXアンテナ）

Chris Rizos, Jinling Wang（ニューサウスウェールズ大学）

3.2.1 はじめに

近年、GPSは簡便で高精度な航法測地システムとして、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。ところが、運用中のGPS衛星の数は限られているため、時間帯や地域によっては必要な数の衛星が観測できない場合がある。また都市部や山間地では遮蔽物のために衛星が必要数観測できない、または精度が不十分ということがしばしば起こる。航空分野、たとえば着陸航法に使用するためには、安全のために突発的なGPS衛星の故障なども考慮に入れてシステムを設計する必要があり、GPSのみ使用した航法では安全基準を達成できず、他のセンサとの複合化が必要とされる。測地学の分野では、現状のGPSでセンチメートル・レベルの測位が可能であるが、水平方向に比べて垂直方向の精度が足りないことが問題となっている。さらに、移動体の精密測位、いわゆるキネマティックGPSでは、衛星数が少ない場合に最高精度を得るまでに長時間を要することがある。このような状況から、何らかの方法でGPS信号を増強することが、様々な分野で必要となってきた。

一方、現在日本では成層圏にプラットフォームを滞在させて、通信・放送や地球観測に利用しようというプロジェクトが、文部科学省と総務省を中心として進行している。本プロジェクトでは、約20kmの高度に複数の成層圏プラットフォーム(Stratospheric Platform, SPF)を滞在させて日本のほとんどの地域で利用可能とする計画である¹⁾。本稿では、SPFや高々度無人機、ヘリコプタ等の滞留型飛翔体にGPS衛星と同様の信号を発する、いわゆる疑似衛星(Pseudolite, PL)を搭載して地上、海上および対流圏内のユーザにサービスを提供する新しい航法測位システム(以下、GPS/PLシステム)を提案する(図3.2.1)。本システムにより、既存のGPSの機能を大幅に増強することができると考えられる。また、GPS衛星を使用せずに飛翔体上PLのみによる航法測位システムも構成可能である。

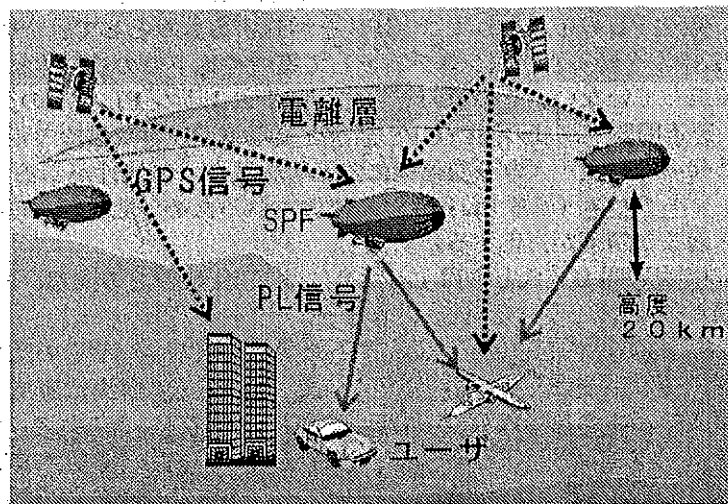


図3.2.1 滞留型飛翔体に搭載した疑似衛星による航法測位システム

3.2.2 滞留型飛翔体による航法測位システムの位置付け

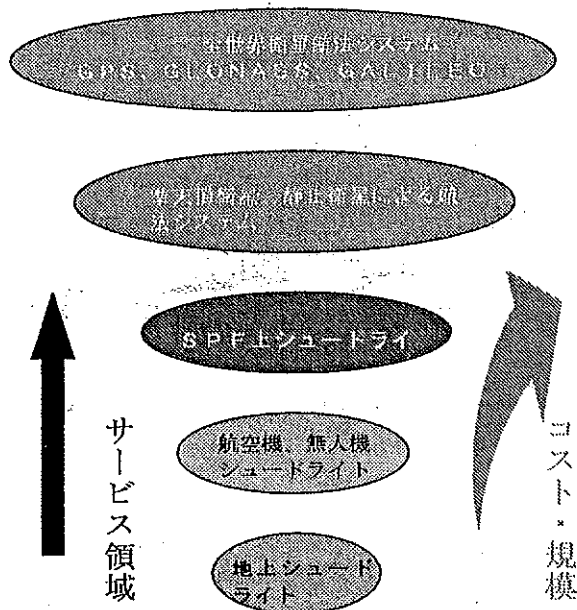


図 3.2.2 航法測位システムのサービス領域と規模

現存する衛星航法システムと将来構築されると予想される航法測位システムのサービス領域およびコスト・規模を図 3.2.2 に示す。現在は米国の GPS とロシアの GLONASS が運用されている。また、EU も 2007 年の運用開始を目指して GALILEO という衛星航法システムの開発を開始した²⁾。日本で独自の全世界測位システムを開発するのはコスト上困難なため、現在宇宙開発事業団等が準天頂衛星と静止衛星を使って、日本のみ又は日本とアジアをサービス領域としたシステムを検討している³⁾。

SPF による航法測位システムは基本的なサービス領域は衛星システムより狭まるものの、衛星開発やロケット打ち上げ費用が不要なため低コストという利点がある。また、4 機以上の飛翔体を使用することにより、GPS が使用できない等の非常時に GPS と独立した航法測位システムとして機能する。さらに、成層圏プラットフォームの優れた運用性により、高精度高信頼の測位情報が必要な領域および期間のみを対象とすることが可能である。また、有人無人の航空機やヘリコプタに搭載し

たスードライトを使用したシステムも考えられる。その場合、対象領域が更に狭くなるので災害等の非常時の航法援助手段や、ダム、橋梁等の大型設備建造支援等の利用が考えられる。その他、地上設置型のスードライト測位システムも歩行者支援等に有用である。

本稿では、以下滞留型飛翔体の例として成層圏プラットフォームをとりあげ、その技術課題や予備実験について述べる。

3.2.3 成層圏プラットフォーム搭載疑似衛星の特徴

現在、PL の応用としては、GPS を増強するものとして航空機の着陸航法や露天掘り鉱山での機械制御、PL のみを使った航法システムとして室内や地下での移動体航法などが研究されているがまだ実用段階には至っていない。その原因として、以下のような PL 特有の欠点が考えられる。

遠近問題 (高度の高い GPS 衛星と異なり PL と受信機の距離は数 m から数十 km に変化するため、信号強度の変化が大きく受信機に悪影響を及ぼす可能性がある)

マルチパス (通常 PL は地上に設置されるため、地面や建造物などで反射した電波により多重受信を引き起こし精度が劣化する)

時刻同期 (GPS と併用する場合には GPS 時刻との同期、PL のみ使用するときには PL 同士の時刻同期が必要)

SPF は高度約 20 km に滞在するため、地上のユーザとの距離は 20km~100km で、その変化は地上設置の疑似距離に比べて遙かに小さく、遠近問題の解決は容易である。また上空からの信号となるため、マルチパスの影響は GPS 衛星のそれと同程度と考えられる。さらに、SPF には自身の航法のために GPS 受信機が搭載されるため、GPS 受信機から時刻信号を受け取ることで PL を GPS 時刻に同期させることは可能である。このように、PL 特有の技術課題は、SPF においては地上 PL ほど問題にはならない。

3.2.4 GPS/PL システムの構成例 (広域型)

計画当初、日本全域をカバーするために SPF は 200 機程度を運用する予定であった。この場合 SPF の平均間隔は 50km 程度となる。現在はコストの問題から見直しが進められているが、ユーザの多い地域や地殻変動、火山活動の活発な地域に集中的に SPF を配置することは運用上可能である。そこで、広

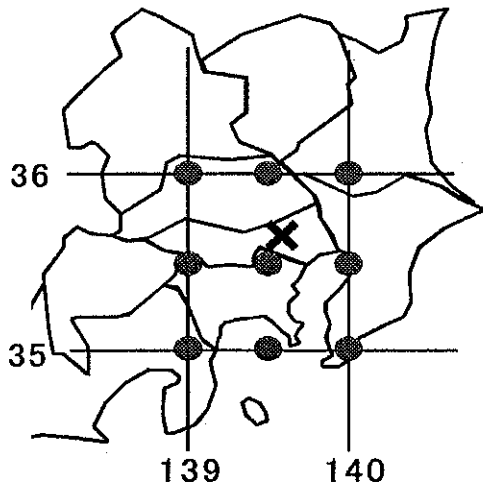


図 3.2.3 GPS/PL 航法測位システムの構成例
(● : SPF、× : ユーザ位置)

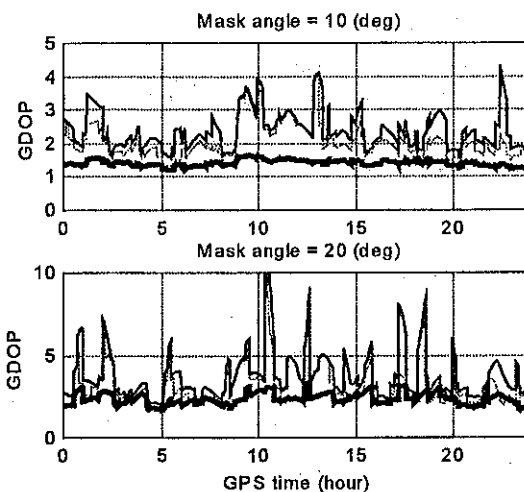


図 3.2.4 GDOP の変化 (太線 : GPS/PL、中太線 : GPS、
細線 : GPS/GLONASS)

域をカバーする GPS/PL システムの例として、首都圏上空、高度 20km に 0.5 度 (約 55 km) 間隔で 9 機の SPF を配置する場合を想定した (図 3.2.3)。ここでは、測位精度を与える指標として GDOP (geometrical Dilution of Precision) の値を評価する。図 3.2.4 は、2001 年 1 月 12 日、東京都調布市 (北緯 35 度 40 分、東経 139 度 33 分、図 3.2.3 の × 印) における GDOP の変化を示している。マスク角は上図で 10 度、下図で 20 度としている (スケールに注意)。GPS のみ (中太線) では時間的な変動が大きいが、GPS/PL (太線) では常時安定した精度が得られることが明らかで、その傾向はマスク角 20 度の場合に顕著である。GPS を補完するシステムとしては、GLONASS がよく研究され、実用受信機も市販されている。そこで、GPS/GLONASS の場合も計算した (細線)。1 月 12 日現在、GLONASS 衛星は 7 機しか運用されていないため、GPS/GLONASS は明らかに GPS/PL に劣る。

3.2.5 GPS/PL システムの構成例 (補強型)

GPS は中緯度地域を主なサービス対象とし、衛星の軌道傾斜角が約 55 度としているため、両極に近くなるほど可視性が低くなる。図 3.2.5 は、2002 年 7 月 15 日、北海道大樹町 (北緯 42 度 30 分、東経 143 度 26 分) で観測した GPS 衛星の軌道であるが、北側に衛星が観測できない領域が広く存在することがわかる。

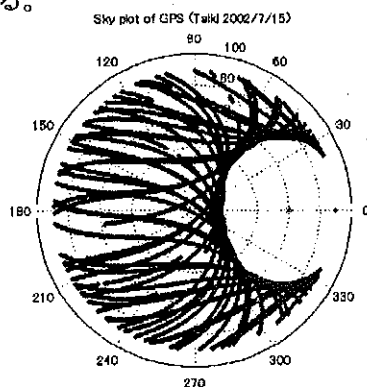


図 3.2.5 北海道大樹町における GPS 衛星の軌道

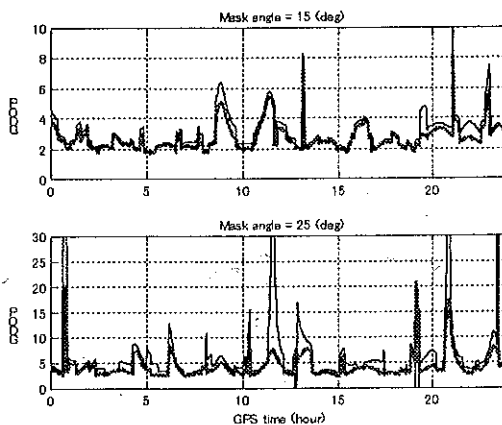


図 3.2.6 GDOP の変化 (太線 : GPS/PL、細線 : GPS)

そこで、真北、仰角 30 度の方向に成層圏プラットフォームを配置することを考える。図中の赤いアスタリスク (*) がプラットフォームの位置を示している。この場合の、観測地点における GDOP の変化を図 3.2.6 に示す。

マスク角は上図で 15 度、下図で 25 度としている (スケールに注意)。GDOP の改善は、マスク角 15

度の場合、あまり顕著ではないが、25 度の場合は大幅に改善しているのがわかる。マスク角 25 度で GPS のみの場合、図では GDOP が 0 に表示されている時間帯が 2 回みられるが、これは観測衛星数が 4 個未満になった時間帯で、この期間 GPS のみで測位を行うことは不可能となっている。

GALILEO、準天頂衛星、静止衛星など人工衛星を使うシステムでは、図 3.2.5 のような衛星の空白領域が生じることは軌道設計上避けられないと考えられる。一方、成層圏プラットフォームは必要な場所に必要な期間だけ配置するといったような柔軟な運用ができるので、有効に既存航法システムを補強できると考えられる。

3.2.6 SPF 軌道暦の生成

成層圏プラットフォームによる航法測位システムを実現するための最重要課題は SPF 上 PL アンテナ位置（軌道暦）の精密決定とユーザへの提供法である^{4,5)}。

GPS では衛星は軌道運動をしているためユーザは軌道パラメータから衛星の位置を計算で、パラメータの更新頻度は一時間に一回程度でよい。しかし、SPF は成層圏の強風の中をプロペラ推進で運動しており、位置予測は難しく、SPF の位置を高頻度にユーザに提供する必要がある。リアルタイムサービスのためには、SPF の運動と要求精度を考慮して放送軌道暦を更新する必要がある。センチメートル・レベルの軌道暦が必要なキネマティック GPS/PL ユーザに対しては、少なくとも毎秒更新することが必要であろう。一方、オフライン・ユーザに対しては、IGS (International GPS Service) の GPS 精密軌道暦のような精密 SPF 軌道暦を作成しユーザに公開する方法が有効と考えられる。

軌道暦の更新頻度に加え、暦の精度も本システムでは重要となる。これは、SPF の高度が約 20km と、GPS のそれ（約 2 万 km）に比べて格段に低いため、基準局とユーザ間で観測データの差分をとっても PL の位置誤差が相殺されないからである⁶⁾。したがって、PL の送信アンテナの位置を如何に精密に測定するかが、相対測位とくに搬送波相対測位サービスのための課題となる。GPS の精密軌道決定と比較して、電離層遅延誤差は SPF からの信号には含まれないので有利となるが、逆に対流圏遅延誤差、特に湿潤大気遅延誤差の影響は大きくなる^{4,7)}。大気遅延誤差の軽減には、地上 GPS ネットワークでの対流圏遅延推定値や数値気象データの利用が有効である⁸⁾。

SPF 上 PL アンテナの精密測位法としては、逆 GPS 法が有効と考えられる^{4,5)}。SPF 下部搭載 PL の信号を、地上に置いた複数の GPS レシーバで受信して距離情報を得、PL 位置を推定する。他に、SPF 機体上部に取り付けた GPS アンテナの位置をキネマティック GPS で求め、機体の姿勢角を用いて機体下部の PL アンテナ位置を推定する方法があるが、逆 GPS 法は PL アンテナ位置を直接計測するため複雑な誤差補正が不要という利点がある。

図 3.2.6 は航法メッセージ生成システムの概念図である。地上に GPS/PL 受信機を 5 台以上設置して地上観測局網を構築する。これら観測局で得られた信号は高速通信回線で基地局に送られ、基地局は PL

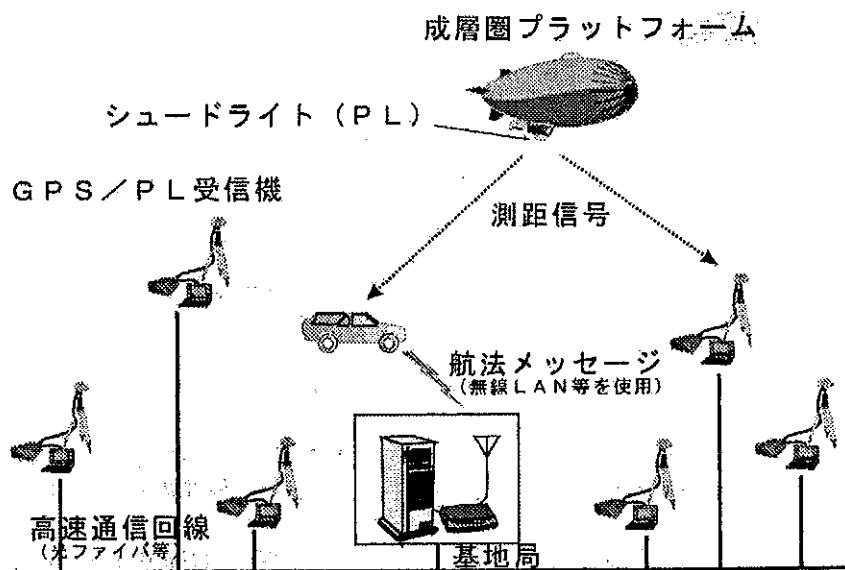


図 3.2.6 逆 GPS 法による航法メッセージ生成システム

アンテナの位置を逆 GPS 法によりセンチメートル・オーダーで推定する。こうして得られた SPF の位置は無線 LAN 等の回線を使って航法メッセージとしてユーザに送られる。ユーザは自身で受信した PL 信号と SPF の位置を用いて自分の位置を推定する。SPF の高精度位置推定のため、SPF は航法センサ、機体・環境センサと高精度運動ダイナミクスからなる航法フィルタを搭載しており、フィルタの出力した SPF の位置予測情報も基地局を通して航法メッセージとしてユーザに送信される。

3.2.7 逆 GPS 法による測位実験(静止実験)

逆 GPS 法による PL アンテナ位置推定の有効性を検証するために、図 3.2.7 のような地上実験システムを構築し、2001 年 12 月に測位実験を行った⁹⁾。本実験は豪州ニューサウスウェールズ大学と共同で行った。

建物の屋上に GPS レシーバを 6 台設置し、測位対象の移動 PL アンテナは二本のピラーに渡した木製の長い板に設置した。PL アンテナの上には GPS アンテナを設置し、その位置を基準位置として PL アンテナの測位結果を評価した。PL と GPS アンテナのマウントは木製の板上をスライドでき、静止実験の他にキネマティック実験も実施した。PL は IntegriNautics 社の IN200C を使用し、GPS レシーバは CMC 社 Allstar を用いた。

本研究で行った逆 GPS 法では、二つの電波発信源と二つのレシーバで 2 重差を作成して計算処理するため、移動 PL の他に基準の電波発信源を必要とする。基準の電波発信源として GPS 衛星を使用する場

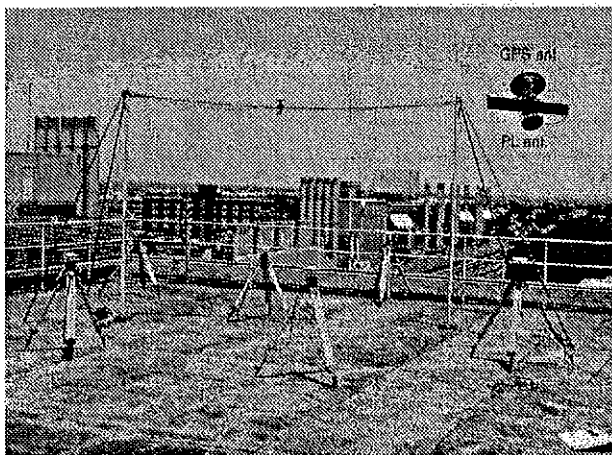


図 3.2.7 逆 GPS 法の地上実験システム

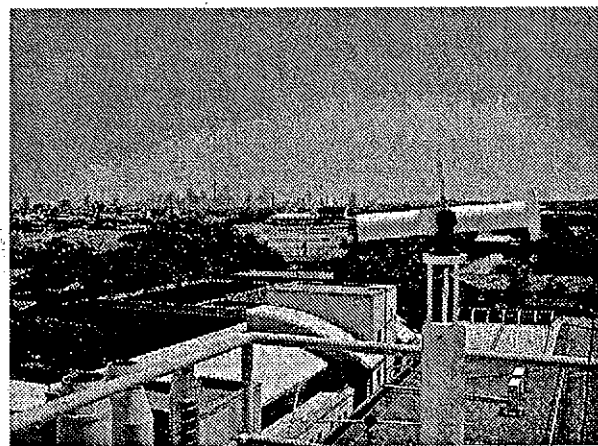


図 3.2.8 基準 PL アンテナ

合を混合モード、地上の PL を用いる方法を PL-based モードと称する。PL-based モードでは、図 3.2.8 のような基準 PL をレシーバから約 60m 離れた、仰角約 6 度の地点に設置した。

図 3.2.9、3.2.10 に、混合モードおよび PL-based モードの測位精度を示し、表 1 に標準偏差をまとめる。本実験では屋上にマルチパスの原因となる物体が多く、また移動 PL アンテナの上の GPS アンテナもマルチパスの発生源と考えられる。地上の 6 個の GPS アンテナと、基準および移動 PL アンテナの位置はあらかじめ GPS 測量で高精度に決めておいたため、マルチパスの大きさはこれらの既知の位置情報を用いて計算できる。静止測位では計算したマルチパスを観測量から差し引いてから逆 GPS による PL アンテナ測位を行った。従って図 3.2.9、3.2.10 における誤差の平均値はゼロであり、測位性能としては標準偏差を評価した。

混合モードでは高度方向のばらつきが大きく、誤差の時間変動が大きい。これは、基準の GPS 信号に含まれる電離層遅延や、衛星が移動することによるマルチパスの変動が原因と考えられる。PL-based モードでは基準の地上 PL が移動しないのでマルチパスは一定である。

次にキネマティック逆 GPS 実験を行った。移動 PL を動かすとマルチパスの変動が大きく、静止モードのように事前に解いた値を使用することはできない。従って本実験でキネマティック測位解を得ることはできなかった。

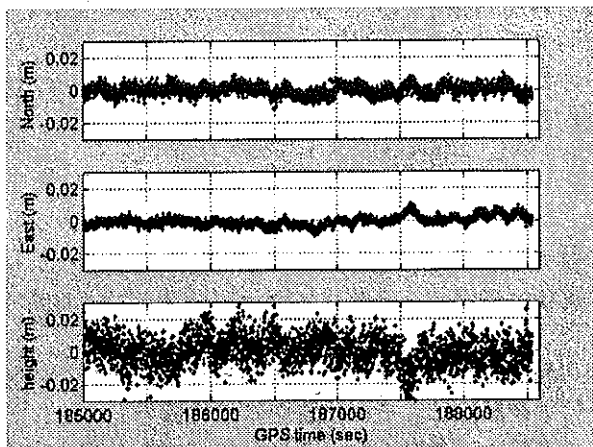


図 3.2.9 静止測位の誤差 (混合モード)

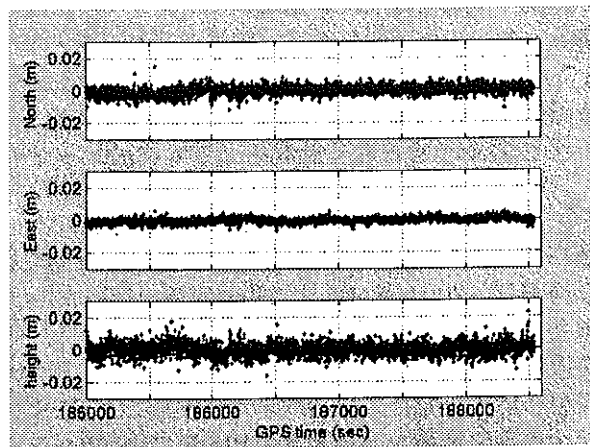


図 3.2.10 静止測位の誤差 (PL-based モード)

表 3.2.1 逆 GPS 法による静止測位の精度

軸	混合モード	PL-Based モード
	標準偏差 (cm)	標準偏差 (cm)
南北	0.31	0.25
東西	0.27	0.14
高度	0.86	0.38

3.2.8 逆 GPS 法による測位実験 (キネマティック実験)

マルチパスを軽減してキネマティック逆 GPS を行うため、再度図 3.2.11 のような地上実験システムを構築し、2002 年 8 月に測位実験を行った。実験場は四方を建物に囲まれており、マルチパスの多い環境であるが、高性能アンテナを使うことでマルチパスの軽減を行った。PL は IN400 を移動側と地上基準として使用した。移動側 PL アンテナは図 3.2.11 の左上に示すようにモータで回転させることができる。また、木製のアンテナにはアンテナ取り付けようの穴をいくつか開けており、回転半径を変更することができる。受信機は古野電気社製 PL-10 を 6 台地上に配置し、チョークリングアンテナ 3 個、Ashtech Geodetic IV アンテナ 3 個と接続した。図 3.2.12 に受信機と PL アンテナのモーション・コントローラ、を示す。観測データ (5Hz) は、LAN に接続した 2 台のラップトップ PC で記録した。

表 3.2.2 にキネマティック逆 GPS 法の試験ケースをまとめ、例としてケース 2 における移動 PL の位置、速度、PL をトラッキングした受信機の数を図 3.2.13 に示す。



図 3.2.11 キネマティック逆 GPS の地上実験システム

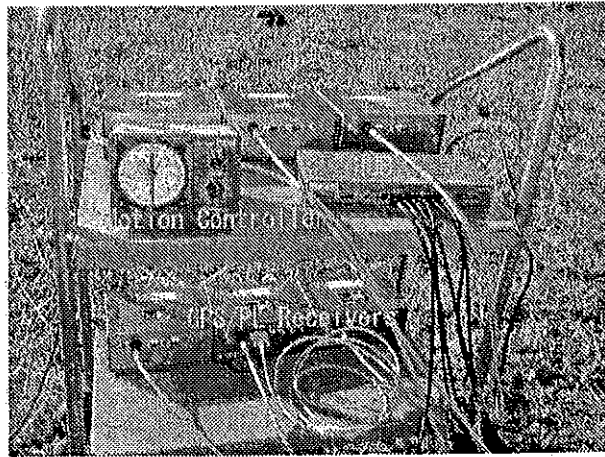


図 3.2.12 GPS/PL 受信機等地上機器

表 3.2.2 キネマティック逆 GPS 法の試験ケース

Case	半径 (cm)			
1	24	低速回転 CW&CCW	中速回転 CW&CCW	高速回転 CW&CCW
2	24	低速回転 CW&CCW	Stop&Go 10 度間隔, CW	Stop&Go 45 度間隔, CCW&CW
		低速回転 CCW&CW	中速回転 CCW&CW	高速回転 CCW&CW
3	35	低速回転 CCW&CW	中速回転 CCW&CW	高速回転 CCW&CW
4	19	低速回転 CCW&CW	中速回転 CCW&CW	高速回転 CCW&CW

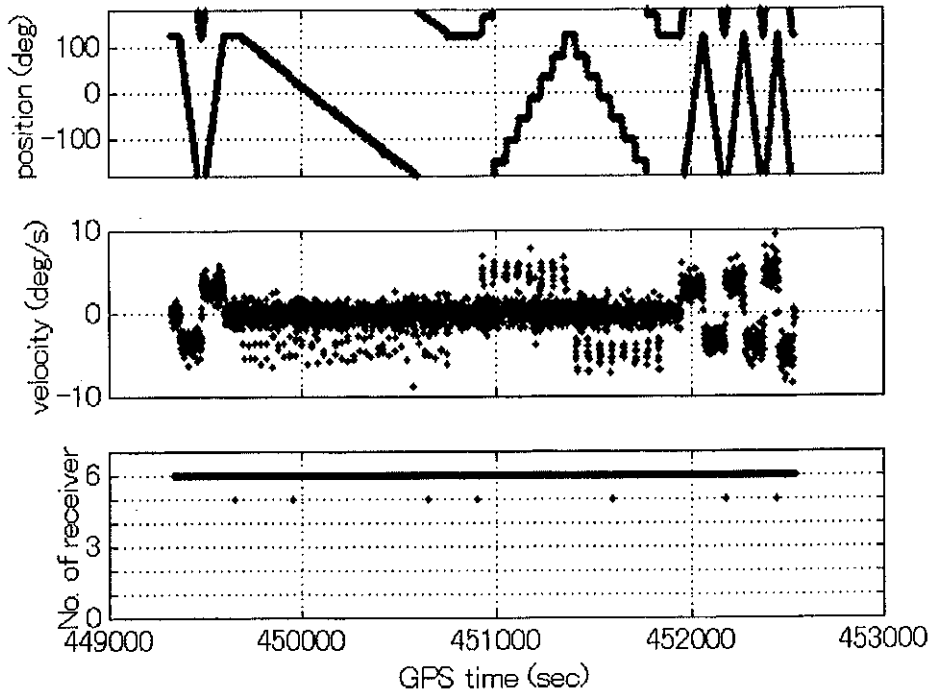


図 3.2.13 キネマティック逆 GPS 実験の例 (Case2)
(上から、移動 PL の位置、速度、PL をトラッキングした受信機の数)

図 3.2.13 の下図で、データのロスが若干見られるが、これはデータ転送のエラーと判明しており、PL-10 のトラッキング性能は本実験では十分であった。図 3.2.14 にケース 2 で得られた移動 PL の軌道を示す。この図は 11 回転した PL の軌道の重ね合わせであり、十分よく重なっていることからアンビギュイティは正しく求めることができたと考えられる。ただし、若干円の形がいびつな部分があり、これは高性能 GPS アンテナでも除去できなかったマルチパス誤差が原因と考えられる。

本試験では、精度評価の基準となる移動 PL 位置の計測を行わなかったため、真の位置精度評価はできない。そのかわりに、各エポックで推定した回転半径と既知の半径の値を比較した (表 3.2.3)。結果は、3 種類の設定半径いずれの場合でも 5mm 以下であり、高精度測位が実現できたことがわかる。

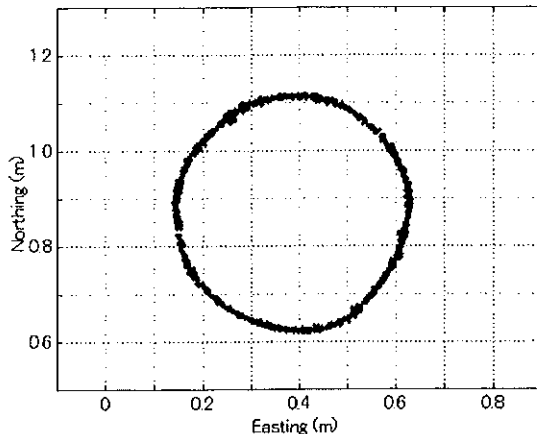


図 3.2.14 キネマティック逆GPSによる移動 PL 軌道 (ケース 2)

表 3.2.3 キネマティック逆GPSの地上実験システム

Case	半径 (cm)	データ数	標準偏差 (cm)
1	24	763	0.52
2	24	3217	0.48
3	35	1159	0.46
4	19	1472	0.41

3.2.9 おわりに

本稿では、成層圏プラットフォーム等の滞留型飛翔体に搭載した疑似衛星による新しい航法測位システムを提案し、その技術課題を検討した。精密測位サービス実現のための最重要課題は、飛翔体下部の PL 位置を精密に決定することで、その方法として逆 GPS 法が有力であり予備実験を開始した。地上静止実験では各軸 1cm 以上の精度で PL アンテナの測位に成功した。また、キネマティック実験でも回転する PL の半径を 5mm の精度で計測することができた。

これら一連の地上実験により、滞留型飛翔体の軌道層作成のための基本技術が確立できたと考えられる。今後、航空機やヘリコプタを使用した飛行実験を行い、さらに技術の検証・改良を行う予定である。

参考文献

- /1/ 横幕良生, 日本における成層圏プラットフォーム飛行船システムの研究開発, 第 2 回成層圏プラットフォームワークショップ講演前刷集, 東京, pp.15-23, 2000 年 9 月 21-22 日.
- /2/ Weber T., H. L. Trautenberg, and C. Schafer, GALILEO System Architecture - Status and Concepts -, 14th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Salt Lake City, Utah, 11-14 September, pp.1264 - 1272, 2001.
- /3/ 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, Vol. J84-B, No. 12, pp.2092-2100, 2001.
- /4/ 辻井利昭, C. Rizos, J. Wang, L. Dai, 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, Vol. 50, No. 576, pp.36-39, 2002.
- /5/ Tsujii T., C. Rizos, J. Wang, L. Dai, C. Roberts & M. Harigae, A navigation/positioning service based on pseudolites installed on stratospheric airships, 5th Int. Symp. on Satellite Navigation Technology & Applications, Canberra, Australia, 24-27 July, paper 49, CD-ROM proc., 2001.
- /6/ Wang, J., Tsujii, T., Rizos, C., Dai, D. and Moore, M., Integrating GPS and pseudolite signals for position and attitude determination: Theoretical analysis and experiment results, Proceedings of ION-GPS-2000, Salt Lake City, US, September 19-22, pp.2252-2262, 2000.
- /7/ Dai, L., Zhang, J., Rizos, C., Han, S., and Wang, J., GPS and pseudolite integration for deformation monitoring applications, Proceedings of ION-GPS-2000, Salt Lake City, US, September 19-22, pp.1-8, 2000.
- /8/ Tsujii, T., Wang, J., Rizos, C., Dai, L., Harigae, M., Inagaki, T., Fujiwara, T., & Kato, T., A technique for precise positioning of High Altitude Platforms System (HAPS) using a GPS ground reference network, 14th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Salt Lake City, Utah, 11-14 September, pp.1017- 1026, 2001.
- /9/ Tsujii, T., Harigae, M., Barnes, J., Wang, J., & Rizos, C., A preliminary test of the pseudolite-based inverted GPS positioning in kinematic mode. 2nd Symp. on Geodesy for Geotechnical & Structural applications, Berlin, Germany, 21-24 May, pp.442-451, 2002.
- /10/ Tsujii, T., Harigae, M., Barnes, J., Wang, J., Rizos, 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, 24-27 September, 2002.