

準天頂衛星による測位システムの構築

齋藤雅行* 岡本文史*
 瀧口純一**
 矢尾 彰*

Establishment of Regional Navigation Satellite System Utilizing Quasi-Zenith Satellite System

Masayuki Saito, Junichi Takiguchi, Akira Yao, Takeshi Okamoto

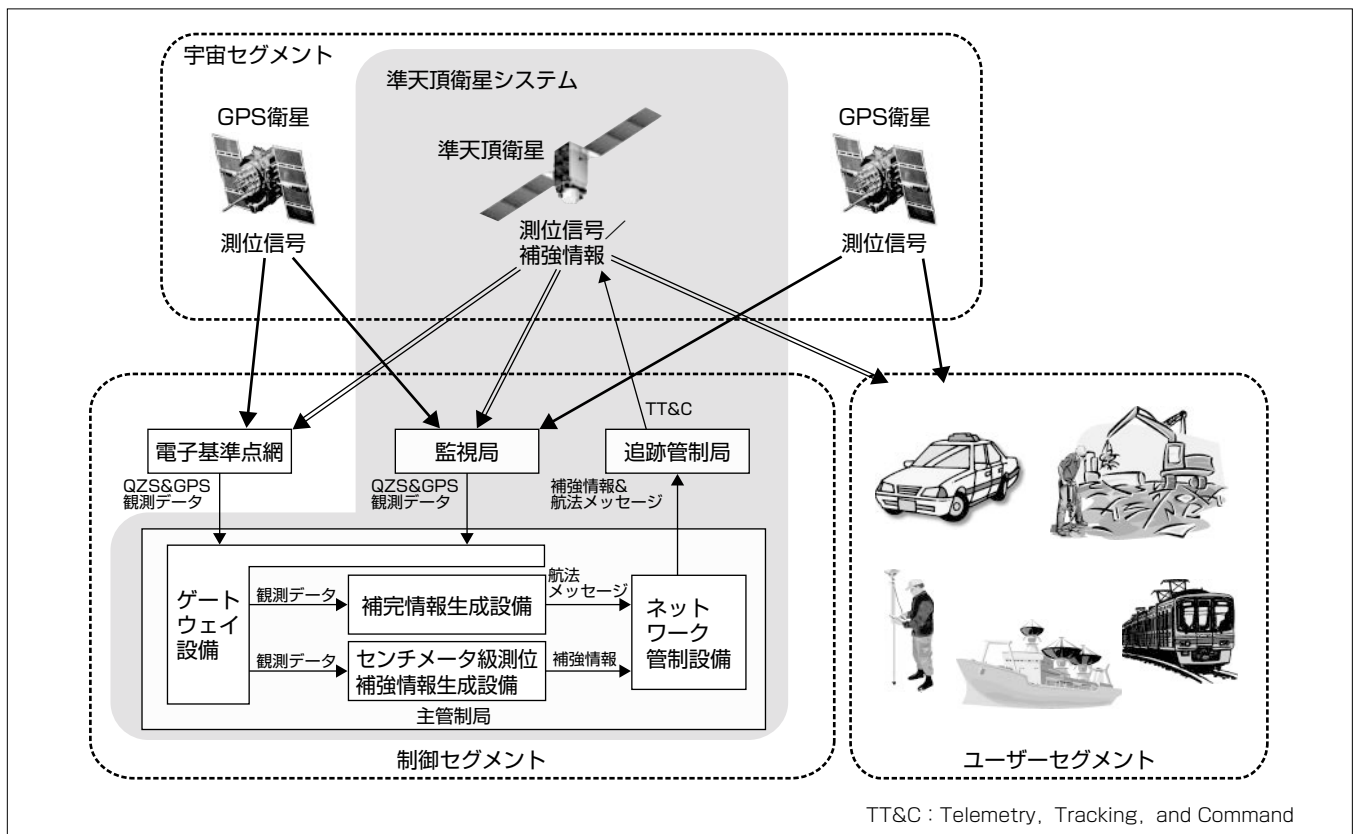
要 旨

現在、GPS(Global Positioning System)測位はカーナビゲーションなどで広く使われているが、都市部では、高層ビルなどによって測位信号が遮られて、測位率が著しく劣化する。また、電離層や対流圏での電波特性の変化によって電波伝搬(でんぱ)の遅延が生じる。これによって、GPS衛星と受信機までの距離の測定誤差が生じ、測位精度が劣化するため、自動車、鉄道などの各種移動体の位置管理システムを現状のGPS衛星だけで構築するには問題がある。

準天頂衛星は、常時高い仰角にある測位衛星として、GPS衛星と同様の測位信号を放送することによって、GPS衛星と組み合わせて、幾何学的配置(PDOP)が改善される。同時に、準天頂衛星から高精度の補強情報を放送すれば、いつでもどこでも高精度測位サービスが受けられるようになる。

本稿では、4機で構築される準天頂衛星による測位システムについて述べ、都市部として代表的な東京丸の内、移動体を用いた実証実験を行い、補完機能及び補強機能を確認した。その結果、補完と補強の相乗効果によって、GPS衛星だけの測位結果に対して、準天頂衛星を1機追加することによって、測位率が約1.7倍に改善した。さらに、準天頂衛星による改善結果に対してINS(Inertial Navigation System)複合させることによって、GPS衛星だけの測位結果の3.5倍の測位率を確認した。また、レーンナビゲーションの判断基準となる車線幅の1/2(1.75m)以下の測位精度を確認した。

今後、準天頂衛星システムを利用することによって、位置情報利用に関する多種多様なサービスが期待される。



準天頂衛星による測位システム

主管制局では、監視局と電子基準点網からの準天頂衛星やGPS衛星の観測データを基に、補完情報生成設備によって航法メッセージを、センチメートル級測位補強情報生成設備によってセンチメートル級測位補強情報を作成する。航法メッセージとセンチメートル級測位補強情報は、準天頂衛星を介してユーザーへ放送され、高精度測位が実現できる。これを準天頂衛星の補完・補強と呼び、これによって多種多様な測位サービスが実現できる。

*鎌倉製作所 **同製作所(工博)

1. ま え が き

衛星測位システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)は、複数の測位衛星が位置などの情報を含む航法メッセージを重畳した測位信号を地上に向けて電波送信(放送)し、その測位信号を受信した受信機が自己の位置を求めるもので、位置と時刻が正確に管理された測位衛星群(宇宙セグメント)とそれらを管制する幾つかの地上局(制御セグメント)及び利用者側の受信機を含むアプリケーションシステム(ユーザーセグメント)から構成される。

衛星測位システムとして、米国のGPSが一般にも良く知られているが、そのほかに、ロシアのGLONASS(Global Navigation Satellite System)が現在実運用中で、日本の準天頂衛星システム、欧州のGalileo、中国のBeiDou、インドのIRNSS(Indian Regional Navigational Satellite System)が開発中である。衛星測位システムは、現在、身近にはカーナビゲーションに広く使われているほかに、船舶や航空機の航法支援、測量や地盤監視等に用いられ始めている。

本稿では、4機によって構築される衛星測位システムとしての準天頂衛星システムについて述べる。そして、このシステムの最も特長な効果として、都市部における移動体を用いた実証実験結果について述べる。

2. 衛星測位システムの課題と解決策

衛星測位システムにおける位置測定の原理は、測位衛星から放送される測位信号を測定点においた受信機で受信して、測位衛星と測定点との正確な距離を求め、三角測量の原理で測定点の位置を求めるものである。測位信号の搬送波を用いて高精度な測位を実現するには、測定点の座標値(x, y, z)と受信機時計誤差及びアンビギュイティと呼ばれる観測する測位信号に含まれる波長の整数倍の波数を未知数として求めるため、通常5機以上の測位衛星が必要となる。GPSは、6つの軌道面に各々4機配置の合計24機の測位衛星と予備の測位衛星が地球を周回しているが、時間帯によって日本上空での可視衛星数が減少し、測位精度に影響する測位衛星の幾何学的配置(Position Dilution of Precision: PDOP)が劣化する場合があります、高精度でかつ安定な測位がすべての時間帯でできないのが現状である。

さらに、高層ビル、高架、樹木や歩道橋等、測位衛星との見通しを遮蔽する建造物が多々ある都市部では測位率が著しく劣化する。また、測位衛星から受信機まで電波が到達する経路には、電離層や対流圏での電波特性の変化によって電波伝搬の遅延が生じる。これによって、測位衛星と受信機までの距離の測定誤差が生じ、測位精度が劣化する。そのため、自動車や鉄道などの各種移動体の位置管理システムを現状のGPS衛星だけで構築するには問題がある。

その解決策として、準天頂衛星システム(QZSS: Quasi-Zenith Satellite System)は、常に天頂付近にあるもう1機のGPS衛星としての役割とともに、測位精度を向上させるための補強情報を日本全国及びその近海の利用者に放送する役割を併せ持つ。前者を、補完機能、後者を補強機能と呼ぶ。特に、日本の都市部では、高層ビルに遮られて捕捉可能なGPS衛星が制限される。常時高い仰角にある測位衛星があれば遮られることがないため、いつでもどこでも高精度測位サービスが受けられるようになる。準天頂衛星システムは、この補完機能とともに高精度の補強機能を合わせ持つことが特長である。

3. 準天頂衛星システム

3.1 準天頂衛星システムの概要

衛星測位システムとしての準天頂衛星システムの構成を図1に示す。準天頂衛星システムは、制御セグメントに対応する地上システムと宇宙セグメントに対応する衛星システムで構成される。衛星システムは、これから新規に開発・整備する2機の準天頂軌道衛星と1機の静止軌道衛星に、2010年9月に打ち上げられた準天頂衛星1号機(みちびき)(以下“みちびき”という。)を加えたものである。

準天頂軌道衛星は、昇降点赤経が“みちびき”と±135度の位置関係を持ち、離心率0.075、近地点引数270度、軌道傾斜角47度以下、軌道長半径42,164km(平均)の楕円(だえん)軌道をとる。この軌道によって、日本から見ると、約1日で軌跡が元に戻る非対称8の字軌跡となり、複数機構成で日本上空で常に高仰角が確保できる。図2は、準天頂衛星の地表面上の軌跡である。図3は、“みちびき”と今後打ち上げ予定の2機の準天頂軌道衛星と1機の静止軌道衛星の合計4機を組み合わせた場合の東京から見た準天頂衛星の仰角を示す。東京では、24時間常時どれか1機の仰角は70度以上を確保できる。静止軌道衛星は、東経90度から180度のいずれかの位置に配置することになっているが、東経135度付近になった場合には、常に仰角48度付近に見ることができる。

地上システムの監視局は、準天頂衛星とGPS衛星の測位信号を常時モニタし、準天頂衛星とGPS衛星からの観測データを主管制局に伝送する。主管制局では、補完情報生成設備によって、各衛星の軌道決定や時刻管理を行い、航法メッセージを作成する。

一方、電子基準点は、日本に約1,200点あるが、そのうち日本本土と近海をカバーするセンチメートル級測位補強情報を生成するには約300点程度が必要となる。センチメートル級測位補強情報生成設備では、監視局と電子基準点網で取得した準天頂衛星とGPS衛星の測位信号の観測データを入力し、補正情報の生成とその補正情報の2 kbpsへの圧縮、及び、インテグリティモニタによる異常監視と補正情

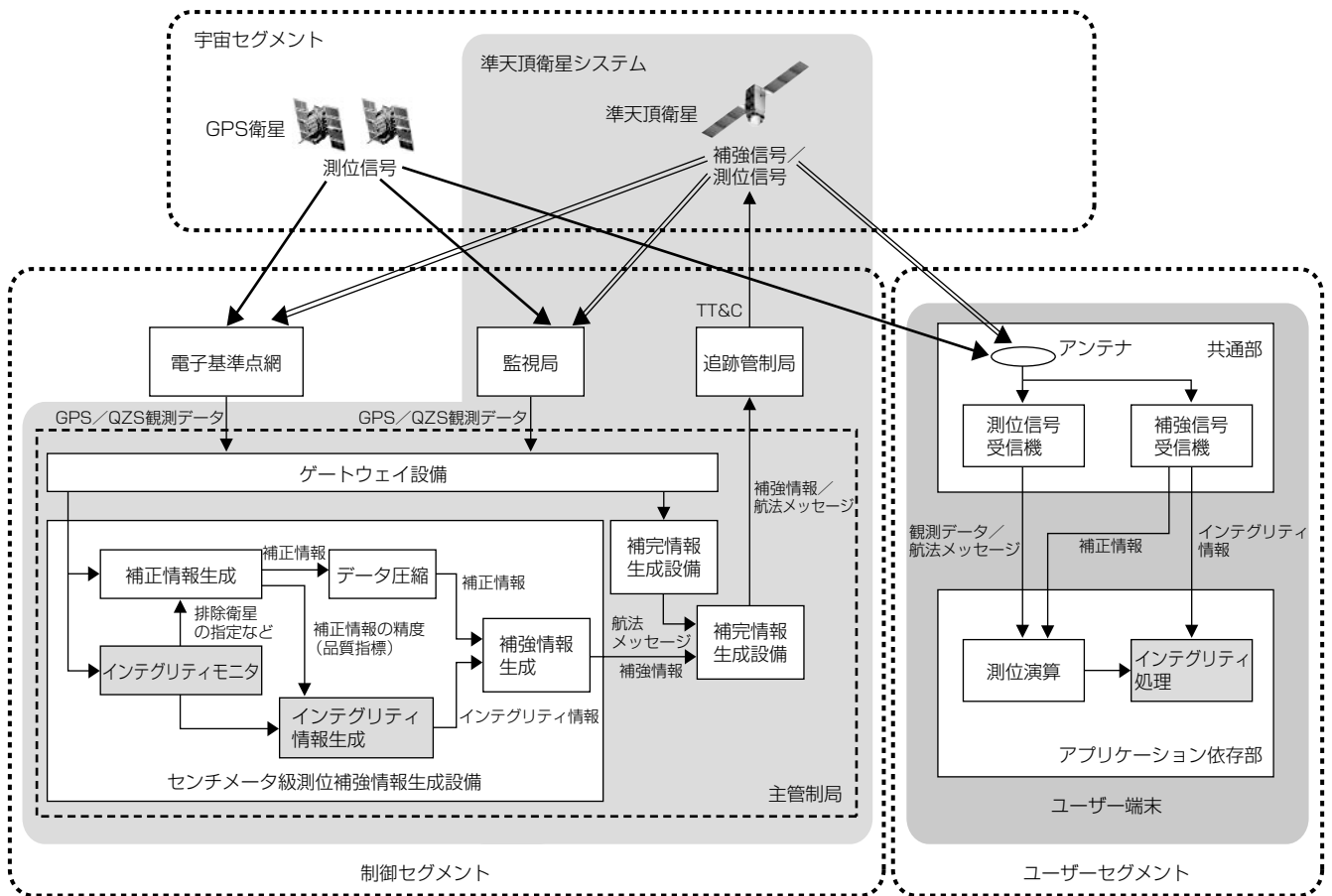


図1. 準天頂衛星による測位システムの構成

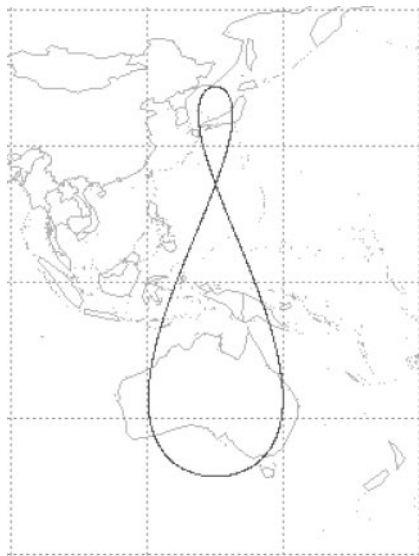


図2. 準天頂衛星の地表面上の軌跡(IS-QZSSから⁽¹⁾)

報の品質を表す指標となるインテグリティ情報の生成、及び放送用の補強情報(補正情報、インテグリティ情報及びその他の情報)の生成を行う。

航法メッセージとセンチメートル級測位補強情報は、主管制局から追跡管制局を経由して準天頂衛星へ向けてアップリンクされる。準天頂衛星では、センチメートル級測位補強情報は、L6b信号によって日本全国へ放送される。航法

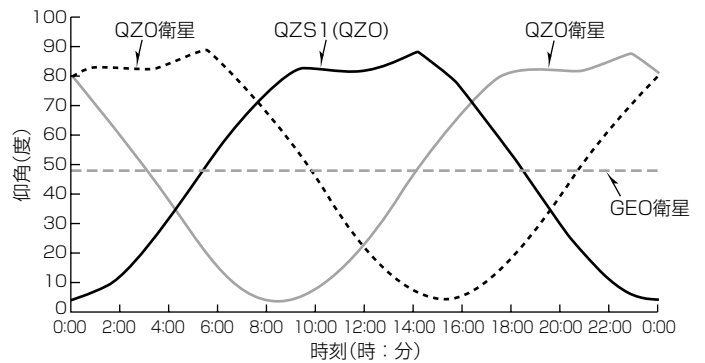


図3. 東京から見た準天頂衛星の仰角

メッセージは、各種補完信号に重畳されて準天頂衛星から放送される。ユーザー端末は、準天頂衛星からの補強情報と準天頂衛星とGPS衛星等からの測位信号を用いて測位演算を実施し、位置情報を出力する。同時に、ユーザーは補強情報のうちのインテグリティ情報を用いて、得られた位置情報の信頼度をリアルタイムに確認することができる。

準天頂衛星システムは、2018年4月から運用を開始することになっている。

3.2 補完・補強信号

準天頂衛星のGPS補完サービスは、米国が運用するGPS衛星と組み合わせ、準天頂軌道を利用して衛星のPDOPを改善することによって、都市部や山間部における測位可能

表1. 準天頂衛星の補完・補強信号仕様

搬送波	信号名称	チャネル	PRNコードと拡散方式		信号の内容
L1 1575.42MHz	L1-C/A信号	-	L1-C/A信号と同一の符号系列, BPSK (1)		GPS衛星のL1-C/Aと同様の測位信号, 50bps/50sps
	L1C信号	L1CD	L1C信号と同一の符号系列, BOC/MBOC		GPS衛星のL1Cと同様の測位信号, 50bps/100sps
		L1CP			データレス
	L1S信号	L1Sa	L1-C/A信号と同一の符号系列, BPSK (1)		サブメータ級測位補強情報, 250bps/500sps
		L1Sb	未定		測位技術実証プラットフォーム提供用(GEO衛星)
L2 1227.60MHz	L2C信号	-	L2C信号と同一の符号系列, BPSK (1)	L2C(CM)コード	GPS衛星のL2Cと同様の測位信号, 25bps/50sps
				L2C(CL)コード	データレス
L5 1176.45MHz	L5信号	Iチャネル	L5信号と同一の符号系列, BPSK (10)		GPS衛星のL5と同様の測位信号, 50bps/100sps
		Qチャネル	L5信号と同一の符号系列, BPSK (10)		データレス
	L5Sa及びL5Sb信号	Iチャネル	未定		測位技術実証プラットフォーム提供用(QZO衛星)
		Qチャネル	未定		測位技術実証プラットフォーム提供用(GEO衛星)
L6 1278.75GHz	L6b信号	Qチャネル	Kasami系列, BPSK (5)		センチメータ級測位補強情報, 2,000bps/250sps

PRN : Pseudo Random Noise, BPSK : Binary Phase Shift Keying,
 BOC : Binary Offset Carrier, MBOC : Multiplexed BOC,
 SBAS : Satellite-Based Augmentation System,
 GEO : GEostationary Orbit, QZO : Quasi-Zenith Orbit

エリア及び時間を拡大させることを目的とする。

準天頂衛星から放送するGPS補完に関する測位信号は、近代化GPSとの共存性、相互運用性を確保するため、近代化GPS信号をベースとする。したがって、測位信号には、L1C/A信号、L1C信号、L2C信号、L5信号を用い、その信号仕様に関しては、近代化GPSからの仕様変更を最小限に抑えることとしている。

測位補強に関する信号としては、サブメータ級測位補強情報がL1Sa信号に、センチメータ級測位補強情報がL6b信号(“みちびき”では独自の実験用信号であるLEX信号に対応)に割り当てられる。L6b信号は、2kbps(補強情報の実質伝送容量は1,695bps)の伝送容量を持つ。1メッセージ/秒で、メッセージはメッセージタイプIDやアラート情報などを含むヘッダと補強情報を含むデータ部及び誤り訂正符号として256ビットのリードソロモン符号で構成される。

表1に準天頂衛星の補完・補強信号の仕様を示す。

3.3 補強機能

3.3.1 センチメータ級測位補強情報

“みちびき”では、センチメータ級測位補強システムにSSR(State Space Representation)方式⁽²⁾を採用し、LEX信号(準天頂衛星システムではL6bに対応)を用いて移動体対応のセンチメータ級測位補強情報を全国に放送し、利用実証を進めている⁽³⁾。センチメータ級測位補強情報生成設備で、電子基準点網のGPS観測データに基づいて状態空間モデル(SSM: State Space Modeling)と呼ばれる広域の動的誤差モデルを使用し、このモデルから算出した衛星時計誤差、衛星軌道誤差、電離層遅延、対流圏遅延、シグナルバイアス等の各誤差量をSSRとして生成する。さらに、このSSRをLEX信号に対応させるために各誤差の物理的特性を利用して2kbpsに圧縮し、センチメータ級測位補強情報(コーデッドSSRメッセージ)としてLEX信号を介して、日本全国に放送するものである。ユーザーは、このセンチ

No	網の名称
1	北海道西
2	北海道東
3	東北北
4	東北南
5	関東
6	北陸
7	中部
8	関西
9	中国
10	四国
11	九州北
12	九州南



図4. センチメータ級補強情報の網構成例

メータ級測位補強情報をデコードして、測位計算に使用する。

3.3.2 網構成

センチメータ級測位補強情報は、衛星に対応する衛星時計誤差と衛星軌道誤差及びシグナルバイアスに対する補正情報、位置に依存する電離層遅延と対流圏遅延に対する補正情報に大別できる。位置に対応する補正情報は、全サービスエリアに対して約60km間隔でグリッドとして配置する。サービスエリアを日本本土と近海と想定し、日本全土をくまなくカバーするため、12網に分割した網構成例を図4に示す。

4. “みちびき”による効果の検証

4.1 評価システム(ユーザーセグメント)

準天頂衛星からの測位信号が受信できる受信機(LEX信号受信機)を搭載した高精度GPS移動計測装置(Mobile Mapping System: MMS)を用いて、高層ビルを含む繁華

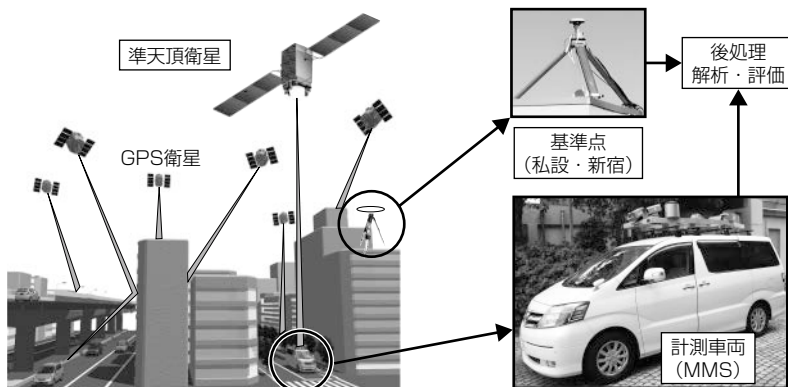


図 5. 評価システム

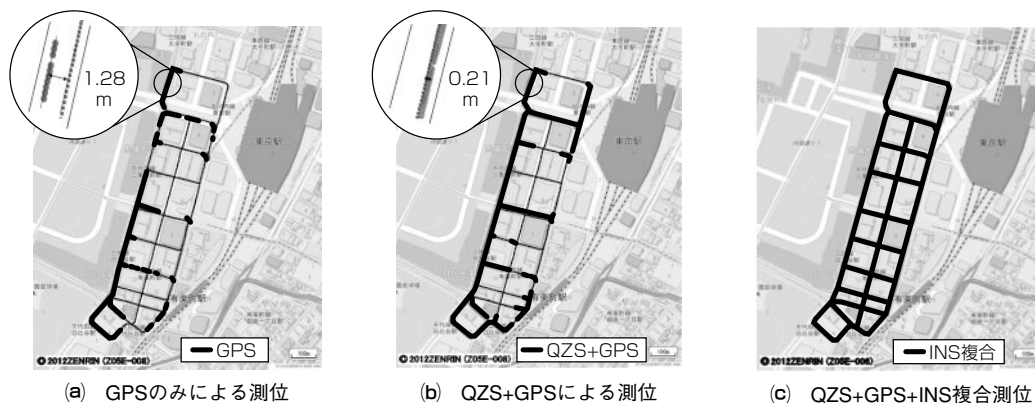


図 6. 測位結果

街である東京丸の内にて測位精度・測位率を測定する実験を実施した。MMSを用いた評価システムの構成を図5に示す。MMSは、屋根に準天頂衛星とGPS衛星の信号を受信する測位信号受信アンテナや測位信号と複合して測位精度を改善し、かつ、測位信号を受信できないときも継続して測位計算を実施するINS及び画像情報を取得するためのビデオカメラやレーザスキャナを搭載し、車内に取得データを処理し記録する制御装置を搭載している。実験では、丸の内をMMSで走行し、“みちびき”とGPS衛星の測位信号及びセンチメートル級測位補強情報を受信し記録する。同時にINSのデータも記録する。受信した準天頂衛星とGPS衛星の測位信号及びセンチメートル級測位補強情報及びINSのデータを使用して、後処理によって、①GPS衛星だけによる測位計算、②準天頂衛星+GPS衛星による測位計算、③準天頂衛星+GPS衛星による測位計算結果とINSとの複合計算、を実施した。真値は、測定地域の丸の内から約5km離れた新宿に私設の基準点を設置して、移動体測量として公的に認められている方式であるFKP (Flaechen Korrektur Parameter) 方式とINSとの複合測位計算を後処理で実施した結果とした。なお、測定日は2012年6月21日、測位は5Hzで実施している。

4.2 準天頂衛星による測位率改善

丸の内を走行し測位計算した結果を図6と表2に示す。

表 2. QZSによる効果

No	処理内容	測位率		精度rms (cm)		
		FIX率	改善度	水平	高さ	3D
1	GPSのみによる測位	28.60%	-	133	104	169
2	QZS+GPSによる測位	47.30%	1.7倍	35	27	45
3	QZS+GPS+INS複合測位	100%	3.5倍	-	-	-

図6は、測位計算結果を地図上にプロットしたもので、それぞれ測位信号としてGPS衛星だけによる測位結果、準天頂衛星とGPS衛星を用いた測位結果、さらに、準天頂衛星とGPS衛星の測位信号にINSを複合させて測位計算した結果を示す。図中の黒線は、真値を示す。表2にそれぞれの測位率(FIX率)を示す。GPS衛星だけの測位結果に対して、準天頂衛星を1機追加することによって、28.6%から47.3%へ、約1.7倍に改善した。さらに、INS複合させることによって、100%(GPS衛星だけの測位結果の3.5倍)の測位率を達成できた。図7に各測位地点における準天頂衛星とGPS衛星のスカイプロットを示す。準天頂衛星とGPS衛星の測位の場合、合わせて5機以上の場合で測位可能となるのに対して、GPS衛星の場合は、GPS衛星だけで5機以上ないと測位解が得られず、測位率が減少していることが分かる。

4.3 補完と補強の相乗効果

表2にGPS衛星だけの場合と準天頂衛星+GPS衛星の場合の測位精度を示す。明らかに準天頂衛星を加えることに

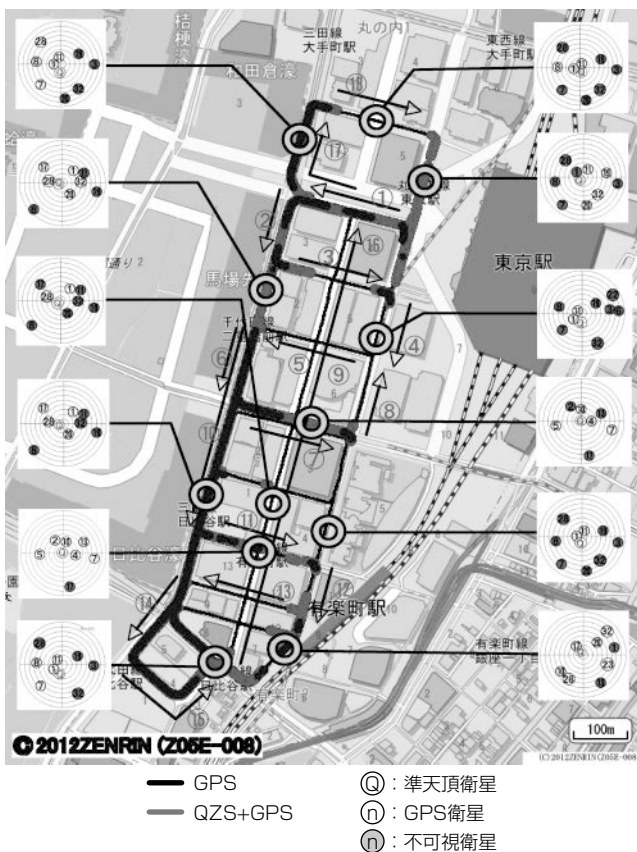


図7. 走行位置による測位に使用した衛星配置

よって測位精度が向上している。また、図8にINS複合時の測位精度(QZS補完あり/なし)を、真値として用いているFKP方式とINSとの複合測位計算結果と比較した時間推移を示す。GPS衛星に加え、準天頂衛星の補完・補強信号の双方を測位演算の対象とすることで、測位精度の向上が確認できる。これは、FIX率が向上したことで、複合時の航法フィルタにおける観測更新頻度が増大したことによるものである。また、GPS衛星だけを用いたときに現れていたマルチパスの影響による最大2.5m程度の誤った測位結果も、その誤差が低減できたことを確認できる。これは、準天頂衛星の高仰角特性によるマルチパスが少ない信号によって、測位演算で、マルチパスを含むGPS信号による影響を効果的に低減できたことによるものであり、準天頂衛星の補完と補強の相乗効果である。

この補完と補強の相乗効果によって、車線幅の1/2である1.75m以下が出せる領域の拡大を確認した。これらの結

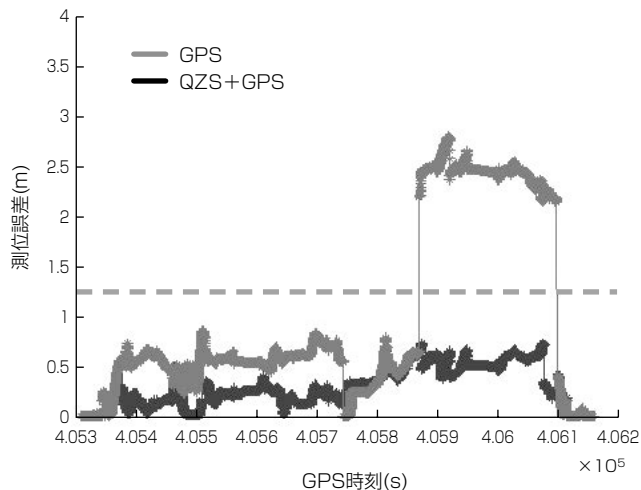


図8. マルチパス低減による精度向上

果は、自動運転などで、車載カメラやレーザなどの他の搭載センサへの負荷が軽減できることを意味し、この側面からも、準天頂衛星の利用は、自動運転システムなどの中で有効に働くものと期待される。

5. む す び

準天頂衛星の補完機能と補強機能を評価した。補完機能は、GPS衛星だけの場合に比べ、準天頂衛星を組み合わせることによって、測位率が大幅に改善できた。また、補強機能は、従来の測量で用いられている方式と同等の性能を確認できた。さらに、補完・補強の相乗効果によって、車両の自動運転の可能性を示した。

今後、測量、情報化施工、IT農業や高精度レーンナビゲーション等の多種多様なサービスが期待される。

参 考 文 献

- (1) 宇宙航空研究開発機構：準天頂衛星システムユーザインタフェース仕様書(IS-QZSS) 1.5版 (2013)
- (2) Wuebbena, G., et al.: PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks, the 18th International Technical Meeting, ION GNSS_05 (2005)
- (3) Saito, M., et al.: Centimeter-class Augmentation System Utilizing Quasi-Zenith Satellite System Performance Verification, ION GNSS Conference (2011)