

# インターネットを基盤とした高度衛星測位環境

戸辺 論<sup>†</sup> 和泉 順子<sup>†</sup> 浅子 正浩<sup>††</sup>  
石井 真<sup>††</sup> 植原 啓介<sup>†††</sup> 砂原 秀樹<sup>††††</sup>

E-mail: †{osamu-to,michi-i}@is.naist.jp, ††{asako,ishii}@gnss.co.jp,  
†††kei@wide.ad.jp, ††††suna@wide.ad.jp

† 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科  
†† 測位衛星技術株式会社  
††† 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科  
†††† 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学センター

## 概要

移動体の測位には Global Navigation Satellite Systems (GNSS) が有効であるが、さまざまな誤差要因により、GNSS 単独で得られる位置情報の精度には限界がある。この精度を向上させるためには、あらかじめ精密な位置が求められている基準点で衛星からの電波を観測し、そのデータから誤差を補正する情報を生成して測位を行う者に配信することが有効である。

本稿では、衛星からの電波を観測したデータの収集および補正情報の生成・提供をインターネット上で行うシステム (Internet-Based Augmentation System for GNSS : IBAS) の有用性について述べ、実証実験と実運用を行うために構築したテストベッドについて報告する。そして、今後のシステムのさらなる性能向上について検討する。

## 1 はじめに

近年の技術進歩により、パーソナルコンピュータや Personal Digital Assistance (PDA)、携帯電話などの小型化・高性能化が進展している。また、携帯電話や Personal Handyphone System (PHS)、無線 Local Area Network (無線 LAN) を利用したインターネットへの接続も一般的になっている。これらの動向を背景としてモバイル・コンピューティングというコンピュータの利用形態が普及しつつあるが、このモバイル・コンピューティングの最大の特徴は、端末の位置が移動するという点にある。

移動体の測位を行う場合、測位手段は携帯電話や PHS の基地局を利用する方法、赤外線や電波の発信機を利用する方法など様々なものが考えられる。その中でも、アメリカによる Global Positioning System (GPS) [1][2] をはじめとする Global Navigation Satellite Systems (GNSS) には以下のような特徴がある。

- 地球上全体での利用が可能である。
- 位置情報が緯度・経度・高度で取得可能である。
- 利用のために事前の手続きが不要である。

したがって、移動体の測位において GNSS の果たす役

割は非常に大きいといえる。しかし、さまざまな誤差要因により、GNSS 単独での測位精度には限界がある。そこでこの問題に対し、精密な位置が既知である基準点において衛星からの電波を観測し、その結果から誤差に対する補正情報を生成し、移動体に配信することによって測位精度を向上させる技術が開発されている。

現在、移動体に補正情報を提供するサービスには、主として FM 多重や中波ビーコンによる電波放送が利用されている [3][4]。しかし既存のサービスには、サービス範囲や利用者に対する柔軟性・利用手段といった点で問題がある。

我々はこれらの問題に対し、衛星測位補正システムの構築においてインターネットを利用することに着目し、インターネットを基盤とした衛星測位補正システム (Internet-Based Augmentation System for GNSS : IBAS) の提案を行ってきた [5][6][7]。

本稿では、改めて 2 章で電波放送による既存サービスの問題点を指摘し、続く 3 章でインターネットを基盤としたシステムの有用性について述べる。4 章では、これまでに行ってきた設計に基づき構築した、6 ヶ所の基準局からなる IBAS について紹介し、5 章では自動車での移動中に IBAS から Differential GPS (D-GPS) [8] 補正情報を受信して測位を行った結果について報告する。

6章では、IBASによる測位精度の高精度化と信頼性の向上を目指して現在行っている研究について述べ、最後に7章で本稿のまとめを行う。

## 2 既存システムの問題点

ここでは、主にカーナビゲーションシステム向けに提供されているD-GPS補正情報配信サービスを例に挙げ、既存のシステムが持つ問題点について整理する。

カーナビゲーションシステム向けに構築された補正情報配信システムは、FM多重による電波放送を利用している[3]。電波放送によるサービスの特長は、同時に多くの利用者をサポートできる点にある。しかし、このサービス形態には以下のような欠点がある。

- サービスの提供範囲  
既存サービスの提供範囲は、電波の到達範囲内に限られる。FM放送局は都市部に設置されているため、郊外部ではFM放送の電波が到達せず、サービスを受けることができない。また、たとえ電波の到達範囲内であっても、ビルの谷間など電波の遮蔽物がある場所では受信感度が悪く、FM音声放送は利用できてもFM多重放送は利用することができない場合がある。
- 利用者に応じた補正情報の配信  
放送による配信では、サービス提供側から利用者への一方向の通信となる。したがって、利用者の位置や要求に応じたきめ細かい補正情報の提供を行うことは難しい。
- 通信方式依存  
既存のサービスは、FM多重放送でのみ提供されている。同様のサービスとして、海上船舶向けに提供されている中波ビーコンを利用したものがあがる[4]、それぞれ異なる通信方式が採用されているため、利用者はサービスごとに利用手段を用意しなければならない、利用者がこれらのサービスをシームレスに利用することは不可能である。また現在のサービスが利用している通信方式ではデータの帯域が限られており、将来の衛星数の増加や新しい補正方式の登場に対応するのは難しいと予想される。

これらの問題を解決するため、広域性・双方向性・利用手段の多様性という特長を持つ、インターネットを基盤とした衛星測位補正システムを構築することが有効であると考えられる。

## 3 インターネットを基盤としたシステムの特長

2章で指摘した問題を解決するため、これまでに我々は、インターネットを基盤とした衛星測位補正システ

ム(Internet-Based Augmentation System for GNSS: IBAS)を提案し、IBASに求められる機能要件やシステムを構築する際の問題点を整理し、システムの設計を行ってきた。

IBASの持つ特長として、以下の3つが挙げられる。

- 広域性  
インターネットには世界中のネットワークが接続されており、その利用は国境、電波到達範囲などにとられない。したがって、インターネットを利用してサービスを提供すれば、世界中どこからでも利用することが可能である。
- 双方向性  
インターネットは双方向の通信が可能であり、放送と異なり1対1でのデータの送受信ができる。したがって、利用者と補正情報を配信するサーバとの間でメッセージを交換できるシステムを構築すれば、利用者ごとの位置や要求に応じた補正情報を提供することが可能である。
- 利用手段の多様性  
インターネットを利用する際に、その接続手段は利用者が選択することが可能である。現在モバイル・コンピューティングにおいて最も広く利用されているのは携帯電話やPHS、無線LANなどであるが、今後専用狭域通信(Dedicated Short Range Communications: DSRC)や赤外線など新たな接続手段が広く利用されることも予想される。インターネットを利用してサービスを提供すれば、これら複数の接続手段を同時にサポート可能であり、利用者はそれぞれの環境に応じた接続手段でサービスを利用することが可能となる。サービス提供者にとっても、補正情報の配信のために大規模な放送設備を準備する必要がなく、基準局やサーバの設置場所の地理的条件に応じた接続手段を選択することができるという特長がある。

## 4 IBASテストベッドの構築

現在までに我々が提案してきたIBASの実証実験を行い、実運用に入るために、我々はIBASテストベッドの構築を行った。ここでは、IBASテストベッドの概要を述べる。

### 4.1 システム概要

IBASを構成する計算機には、主として以下の5つがある。

- 「観測サーバ」：基準局のGNSS受信機から出力される観測データを受信し、収集サーバへ送信する。



図 1 基準局の配置 (首都圏)



図 2 基準局の配置 (関西)

- 「収集サーバ」: 「観測サーバ」から送信される観測データを収集する。
- 「計算サーバ」: 「収集サーバ」から観測データを受信し、補正情報を生成して「配信サーバ」へ転送する。
- 「配信サーバ」: 「クライアント」からの要求を受け付け、補正情報を配信する。
- 「クライアント」: 「配信サーバ」へ補正情報の配信要求を送信し、補正情報を受信して GNSS 受信機に供給する。

観測データから補正情報を生成する計算は複雑であるため、計算機に対する負荷が高い。したがって、1つのサーバが補正情報を生成しながら同時に多数のクライアントに対し補正情報を配信することは難しいと考えられる。そこで、観測データから補正情報を生成するサーバと、クライアントに対し補正情報を配信するサーバを分離している。計算サーバと配信サーバを分離することにより、負荷の原因に応じて柔軟にサーバを増強することが可能になる。

#### 4.2 基準局の配置

各組織の協力により、首都圏では東京湾を取り囲む形で5ヶ所、関西で1カ所、インターネットに接続された基準局を設置した。首都圏、関西における基準局の配置を、それぞれ図1、図2に示す。首都圏では、複数の基準局における観測データを制御局で収集し補正情報を生成する、仮想基準点方式による Realtime Kinematic GPS (RTK-GPS) [9] 補正情報の提供を視野に入れ、隣あった基準局間の距離が 30-40km 以内となるよう基準局の配置を考慮した。制御局は、東京海洋大に設置している。

#### 4.3 基準局における機器構成

図3は、基準局における IBAS の機器構成を示している。基準局の GNSS 受信機は、GPS/GLONASS 受信機を中心に利用している。その理由として、今後

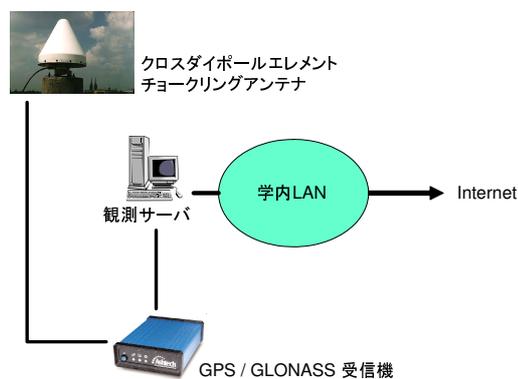


図 3 基準局における機器構成

GNSS による測位においては、GPS、GLONASS [10]、GALILEO [11]、そして日本の準天頂衛星など複数の衛星システムが同時に利用され、高精度・高信頼性を実現するために、基準局ではハイブリッド受信機の利用が主流になると予想されるためである。仮想基準点方式による RTK-GPS 補正情報を提供するため、奈良先端大以外の基準局における GNSS 受信機は、観測データの RAW データを出力しており、観測サーバはこれらのデータを RS-232C 経由で受信している。観測サーバは学内 LAN やフレッツ ISDN を経由してインターネットに接続されており\*1、東京海洋大に設置された制御局の収集サーバに観測データを定期的に送信している。また、全基準局の GNSS 受信機で RTCM SC-104 type1 フォーマット [12] による D-GPS 補正情報を出力しており、これらの補正情報は観測サーバから奈良先端大に設置された2台の配信サーバへ転送されている。D-GPS 補正情報に関しては、観測サーバは計算サーバに近い役割も果たしているといえる。

\*1 日立製作所に設置された基準局は、フレッツ ISDN を利用してインターネットに接続されている。

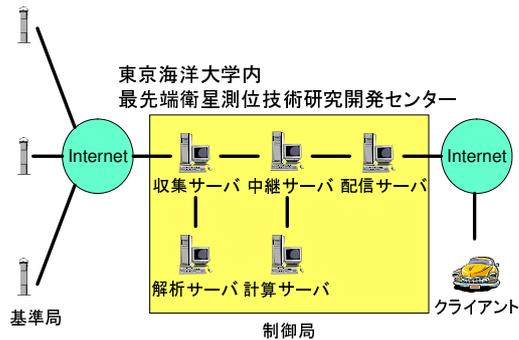


図 4 制御局における機器構成

#### 4.4 制御局における機器構成

図 4 は、制御局における IBAS の機器構成を示している。首都圏に設置した 5ヶ所の基準局における観測データは、インターネットを通じて制御局内の収集サーバに集約され、計算サーバで仮想基準点方式による RTK-GPS 補正情報を生成し、配信サーバから補正情報がクライアントに配信される。解析サーバについては 6 章で述べる。

#### 4.5 処理の流れ

D-GPS 測位を行うクライアントは、まず Hyper Text Transport Protocol (HTTP) によって基準局の位置や配信サーバアドレスなどのシステム情報を取得する。その後、単独測位による現在位置から最も近い基準局を、参照する基準局として設定し、適切な配信サーバを選択し補正情報を受信する。参照する基準局および配信サーバは、一定時間ごとに再設定することにより、クライアントと基準局との間の距離の増大による測位精度の劣化を抑える。

仮想基準点方式による RTK-GPS 測位を行うクライアントは、単独測位による現在位置を制御局の配信サーバに送信すると、その位置に応じた RTK-GPS 補正情報が計算サーバで生成され、配信サーバを経由してクライアントに送信される。

### 5 IBAS による D-GPS 測位結果

移動体における IBAS による測位実験は、計算機と GNSS 受信機・アンテナを自動車に搭載し、計算機を DDI ポケット株式会社による AirH<sup>TM</sup>\*2を利用してインターネットに接続し、配信サーバから D-GPS 補正情報を受信することにより行った。この実験は、奈良先端大周辺で行ったため、参照先の基準局および配信サーバは、クライアントソフトにより自動的に奈良先端大のものに設定された。

\*2 [http://www.ddipocket.co.jp/p\\_s/service/air\\_h/index.html](http://www.ddipocket.co.jp/p_s/service/air_h/index.html)

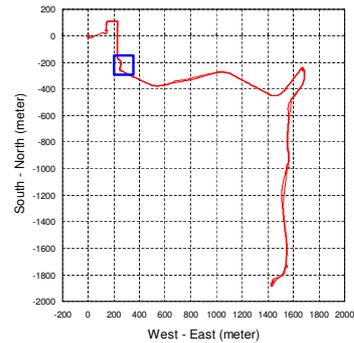


図 5 一般道路走行中における D-GPS 測位結果

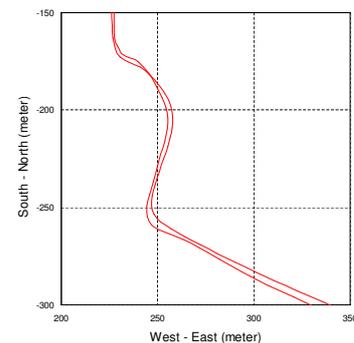


図 6 一般道路走行中における D-GPS 測位結果 (拡大)

日常と同様に一般道路を走行しながらインターネットによる D-GPS 測位を行った結果を図 5 に、図 5 中の太枠部の拡大図を図 6 に示す。走行範囲は奈良先端大を出発点・終着点とした往復約 8km であり、最高時速 50km 程度で往路と復路で同じ道路を走行した。また、実験中のクライアントと配信サーバ間の Round Trip Time (RTT) と、補正情報の遅延時間の推移を図 7 に示す。この図における補正情報の遅延時間は、GNSS 受信機から出力される Z-Count を利用した。Z-Count は、測位時刻と使用した補正情報に含まれるタイムスタンプの差から計測され、その値は 1 秒単位で出力される。

今回走行した道路の大部分は片側 1 車線であったが、図 6 の示す通り、走行した車線の区別が可能な程度の精度を得られたことが確認できる。実験を行った範囲は、FM 多重放送による D-GPS 補正情報配信サービスのサービスエリア外であり、こういった地域であっても GPS の測位精度を向上させることが可能であるという点で、IBAS は非常に有用であるといえる。

しかし、走行中の AirH<sup>TM</sup> による通信はやや不安定であり、RTT の平均は約 605 ミリ秒、最大 6.6 秒、パケットロス率は 5% で、補正情報の遅延時間の最大は 11 秒であった。図 7 によると、RTT の増大に追従して補正情

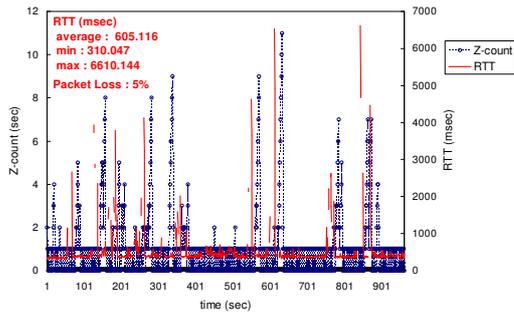


図7 一般道路走行中のRTTと補正情報の遅延

報の遅延時間も増大しているが、RTTの増大やパケットロスからの復帰は速やかであった。これは、クライアントと配信サーバとの通信には、コネクションを必要とせず、パケットの再送処理を行わない User Datagram Protocol (UDP) を利用することを選択したためと考えられる。UDPを採用したのは、本システムにおけるクライアントのインターネットへの接続形態は多岐にわたる予想され、移動中は接続も不安定になりかねないこと、クライアントのIPアドレスが変化する可能性があることを考慮したためである。

## 6 IBASの性能向上のための検討

ここでは、現在我々が検討している、IBASの性能向上の方向性について述べる。

### 6.1 高精度化・信頼性向上の必要性

GNSSにおける測位誤差の要因には、観測データに含まれる以下の要素による誤差成分が挙げられる。

- 衛星の軌道誤差
- 衛星の時計誤差
- 電離層および対流圏における電波伝搬遅延誤差
- マルチパスによる電波干渉
- 受信機ノイズ

このうち、衛星の軌道誤差および時計誤差については、同時刻に受信している基準局と移動局の観測値内に同じ誤差が含まれているので、相殺することが可能である。しかし、電離層遅延・対流圏遅延といった伝播経路上での遅延誤差は、基準局と移動局が近傍の場合は同じ影響を受けていると近似できるが、距離が離れている場合には、電離層や対流圏の影響量は場所によって異なるため、その誤差量も異なってくる。マルチパスや受信機ノイズについては、各基準局ごとに固有の誤差要素である。特にマルチパスの影響は、基準局の設置環境によって異なり、その誤差量は衛星位置と反射面との相対関係によって刻々と変化する。

従来の衛星測位補正システムでは、これらの相殺することができない誤差成分を含んだままの観測データから補正情報が生成され、利用者に提供されてきた。しかし、より高精度かつ高信頼性を実現するシステムを構築するためには、各基準局における観測データに含まれる誤差成分がその要因ごとに監視・除去され、生成される補正情報の完全性を確保する必要がある。

### 6.2 観測データからの誤差成分の除去

我々は、4章で紹介したインターネット基準局網で収集される観測データを利用し、利用者の測位における高精度・高信頼性に直接関与する観測データについて、含まれている誤差成分をその要因ごとに切り分け、除去するアルゴリズムについて検討している。

これまで制御局では、各基準局から収集された観測データは、中継サーバを経由して直接計算サーバに送信されていた。ここで、図4に示しているように新たに解析サーバを設置する。解析サーバは、観測データが計算サーバに渡される前に各誤差成分を解析・除去する。そして、誤差成分が除去された観測データが計算サーバに渡され、補正情報が生成される。

誤差成分をその要因ごとに切り分け除去するアルゴリズムの具体的手法に関しては、長期的な統計的観測手法に基づき、観測データの定常状態をモデル化することを検討している。

### 6.3 仮想基準点方式 D-GPS

誤差成分が除去された観測データから、仮想基準点方式を利用し、D-GPS補正情報を生成することを検討している。仮想基準点方式は、これまで主にRTK-GPS測位に対して利用されてきた。RTK-GPS測位は測量向けの技術であり、cmオーダの測位精度を可能にするものの、可視衛星数の変化や補正情報の欠落・遅延に弱く、補正情報を受信してから補正状態に入るまでに時間がかかるといった欠点がある。したがって、衛星からの電波の受信状態やデータ通信が不安定であることが予想され、さらに測位結果のリアルタイム性が要求される、移動体の測位には適していない。

そこで、仮想基準点方式を利用し、前述の手法によって誤差成分が除去された観測データからD-GPS補正情報を生成することで、移動体のより高精度な測位を実現することを目指している。

## 7 おわりに

移動体が高精度な位置情報を取得するには、GNSSとその測位誤差を補正するシステムを利用することが有効である。我々はこれまで、モバイル・コンピューティング、ユビキタス・コンピューティングといった計算機の利用形態の普及をふまえ、インターネットを基盤とする衛星測位補正システム (IBAS) を提案し、広域性・双方向性・利用手段の多様性といった、既存のシステムには

ない特長をもつシステムの設計を行ってきた。

本稿では、IBAS の実証実験および実運用のためのテストベッドの構築について報告した。予備実験の結果、自動車が IBAS を利用した D-GPS 測位によって、走行車線の区別が可能な程度の測位精度を得られることを確認した。

IBAS が衛星測位補正システムに対する高精度かつ高信頼性といった要求を満たし、次世代のモバイルコンピューティングにおける基盤となるべく、今後は本システムにより収集される観測データを利用して、観測データからの誤差成分の除去技術と、誤差成分が除去されたデータによる仮想基準点方式 D-GPS に関する研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、WIDE Project [13] GNSS ワーキンググループの活動の 1 つとして行われています。研究にあたって貴重なご意見をいただいたワーキンググループのメンバーの皆様、および基準局の設置にご協力をいただきました各組織の皆様にご心より感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins : GPS Theory and Practice, Springer-Verlag, New York, 2000.
- [2] Bradford W. Parkinson, James J. Spilker Jr. : Global Positioning System: Theory and Applications, the American Institute of Aeronautics and Astronautics, SW, Washington, DC, 1995.
- [3] (株) 衛星測位情報センター : “GPex ホームページ”, <http://www.gpex.co.jp/>.
- [4] 海上保安庁 : “ディファレンシャル GPS”, <http://www.kaiho.mlit.go.jp/syukai/soshiki/toudai/dgps/index.htm>.
- [5] H. Hada, K. Uehara, H. Sunahara, J. Murai, I. Petrovski, H. Torimoto, S. Kawaguchi, “New Differential and RTK Corrections Service for Mobile Users, Based on the Internet,” Proc. of Institute of Navigation (ION)’99 pp519–528, Nashville, USA, Sep, 1999.
- [6] Y. Kawakita, H. Hada, K. Uehara, I. Petrovski, S. Kawaguchi, H. Torimoto, S. Yamaguchi, J. Murai, “Design of Internet Based Augmentation Network,” Proc. of GNSS2000, Edimburgh, UK, May, 2000.
- [7] O. Tobe, H. Hada, Y. Kawakita, H. Sunahara, “Design of the Server Selection Mechanism for the Internet-Based Correction System,” Proc. of GNSS2003, Graz, Austria, Apr, 2003.
- [8] 土屋 淳, 辻 宏道, やさしい GPS 測量, (社) 日本

測量協会, 東京, 1997.

- [9] 浪江 宏宗, 萩原 述史, 新田 信治, 芝原 芳信, 齊藤雅行, 金井 嘉伸, 金 学進, 安田 明生, “仮想基準局 (VRS) 方式による RTK-GPS の評価,” 信学論 (B), Vol. J84-B, no.12, pp.2160–2168, Dec, 2001.
- [10] Russian Federation Ministry of Defence : “GLONASS HOME PAGE”, <http://www.rssi.ru/SFCSIC/>.
- [11] Europe Union : “GALILEO HOME,”, [http://www.europa.eu.int/comm/energy\\_transportengal.en.html](http://www.europa.eu.int/comm/energy_transportengal.en.html).
- [12] Radio Technical Commission For Maritime Services : RTCM RECOMMENDED STANDARDS FOR DIFFERENTIAL GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS) SERVICE VERSION 2.2, RTCM Special Committee No. 104, VA, USA, 1998.
- [13] WIDE Project : “WIDE Home Page,” <http://www.wide.ad.jp/>.

## Copyright Notice

Copyright: (C) 2004 by the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE). This paper was originally published in TECHNICAL REPORT OF IEICE ITS2004-15, pp.45–50, Jul, 2004.