

NAIST-IS-DT9561034

博士論文

インターネットを用いた衛星測位システムの高精度化に関する研究

羽田 久一

2001年2月5日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

論文番号： NAIST-IS-DT9561034

提出者： 羽田 久一

審査委員： 山口 英 教授
山本 平一 教授
千原 國宏 教授
湊 小太郎 教授
砂原 秀樹 助教授
門林 雄基 助教授

提出日： 2001年2月5日

インターネットを用いた衛星測位システムの高精度化に関する研究*

羽田 久一

内容梗概

GPSにはシステム上不可避な誤差が存在するため観測点のみで測定を行う単独測位ではその精度は10m程度である。そこでより高精度な測位のために、あらかじめ測量によって位置を決定した基準局からの補正情報を元に移動局の位置を補正する相対測位が行われる。リアルタイムに相対測位を行うためには基準局からの情報をリアルタイムに伝える必要があり、現在は主に電波による放送を用いてサービスが行われている。放送を用いた補正情報配信は大規模ユーザを同時にサポートできるが、それぞれのユーザの要求に応じたサービスを提供することが出来ず、要求が高まっている高精度な補正サービスを構築することが難しい。

そこで本研究ではインターネットを用いた柔軟な補正情報配信システムを提案する。本システムは現在行われている方式では実現できないユーザの要求に応じた補正情報を提供する。RTK-GPSやD-GPSは位置が十分な精度で確定している基準局からの情報を利用して高精度な位置情報を得る手法であるが、基準局から移動局へ補正情報をリアルタイムで伝送する必要がある。インターネットを用いてRTK-GPSのような高度な補正に必要な大量のデータを供給することにより、電波による配布と比較し広範囲で高精度な測位を利用可能とする。

本研究ではインターネットを用いて補正情報を配布するシステムを構築し、その設計と実装について述べた。本システムでは基準局と移動局の間に配布サーバを導入し、規模の拡大やシステムの拡張、新機能の追加などを簡単に行える仕組みを設計し、そのプロトタイプを作成した。配布サーバは単に規模の拡大のためのみならず、情報の集約や再計算を行うことにより、ユーザにとってより高精度な測位が行えるようになっている。プロト

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 博士論文, NAIST-IS-DT9561034, 2001年2月5日.

タイプを実装し評価した結果、本システムではD-GPSにおいて50cm程度、RTK-GPSによって5cm程度の精度で測位をすることが出来た。

RTK-GPSは高精度な測位を行えるが、その有効範囲は基準局から10km程度と非常に狭く広域での利用には多くの基準局が必要となる。そこで複数の基準局を利用し基準局間隔20km以上であってもシームレスにRTK-GPSの測位を可能にする技術として仮想基準点方式が提案されている。この仮想基準点方式(Virtual Reference Station:VRS方式)のためには、広域に分散した複数の基準局からの情報をリアルタイムに収集する必要がある。そこで、インターネットを用いた基準局網によりVRS方式の補正を行うシステムを構築しその検証を行った。その結果もっとも近い基準局からの距離が25km以上という通常のRTKでは測位が不可能な状態であっても、本システムを用いることにより精度5cm以下での測位を行えることを示した。

これらの成果により、インターネットを利用したGPS補正を行うことにより高精度な補正を広域で行えることを示した。

さらに本研究の成果を元に広域でのGPS基準局網の構築を低コストかつ高機能に実現することが可能である。日本でも国土地理院の電子基準点を利用した広域GPS基準局網の計画がなされているが、本研究のような広域での利用を考慮したシステムを構築する手段は現在のところ提案されていない。

また、ユーザへのデータ配布手段としてインターネットを用いるためデータ量の多い高精度な補正情報にアクセスすることが可能になり、従来は独自の基準局など多くの準備が必要であった高精度なRTK-GPS測位を簡単に行えるようになる。

これらの成果から、日本国内はもちろん、あらゆる場所において高精度な衛星測位を行うための広域補正システムの構築を可能にし、社会基盤の整備や高度交通システム(ITS)に役立てることが出来ると考えている。

キーワード

衛星測位, 補正システム, 位置情報, 広域補強システム

Studies on Correction and Augmentation of Global Navigation Satellite Systems using the Internet*

Hisakazu Hada

Abstract

Recently, mobile computing has been getting popular because small computing and communication devices become available. In the mobile computing environment, information on geographical location where users are enables us to provide new style of information services. For example, there is a quite popular situation where we are looking for some good restaurant around us as strangers in some city. Once the information on geographical location is available, we can develop an information retrieval system, as user assistance service, to find out the navigation hints with the location. The more accuracy on the information we can use, the more sophisticated and elegant services we can make. Actually, some cellular phone companies are now trying to provide this kind of service for customers with the location information available from their cell management system, however, its accuracy is quite low, so few customers at this moment do find out the advantages of such kind of the services. Positioning with high-accuracy is a key to develop valuable services for us.

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) such as GPS is one of the best methods of positioning and/or navigation. Because GPS can provide accurate positioning at everywhere on this globe. Currently, many products using GPS such as automobile cruise assistance (“car navigation”) are available in the market and enhancing its functionality. However, in terms of the accuracy, it is still not enough for some precise applications such as survey, automatic driving and human navigation.

Differential GPS (D-GPS) and Real-Time Kinematic GPS (RTK-GPS) are available to provide high-accuracy positioning in real time, however these correction methods

*Doctor's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT9561034, February 5, 2001.

require real time communication channels between rover hosts and reference stations. Therefore, applications of these method are quite limited so far.

In my research, D-GPS/RTK-GPS correction system using the Internet is proposed. In this mechanism, instead of current existing radio broadcasting, the Internet is utilized as the real time communication channel for carrying the reference information for the rover hosts, since the available bandwidth for mobile Internet sites are usually much broader than one available through the radio broadcasting. Moreover, the information feed via Internet enables us to make customization on data which is delivered to the each rover host. Implementation and evaluation of its prototype system has been done through this research. The results from its evaluation shows that quite high accuracy on positioning such as less than one meter in D-GPS and 10 centimeters in RTK-GPS can be obtained. The level on the accuracy we can get through this proposed system is same as the conventional correction methods. This system also has many advantages; this system is based on open architecture and composed as one of services on the Internet so that we can achieve unification among several positioning services and provide better scalability.

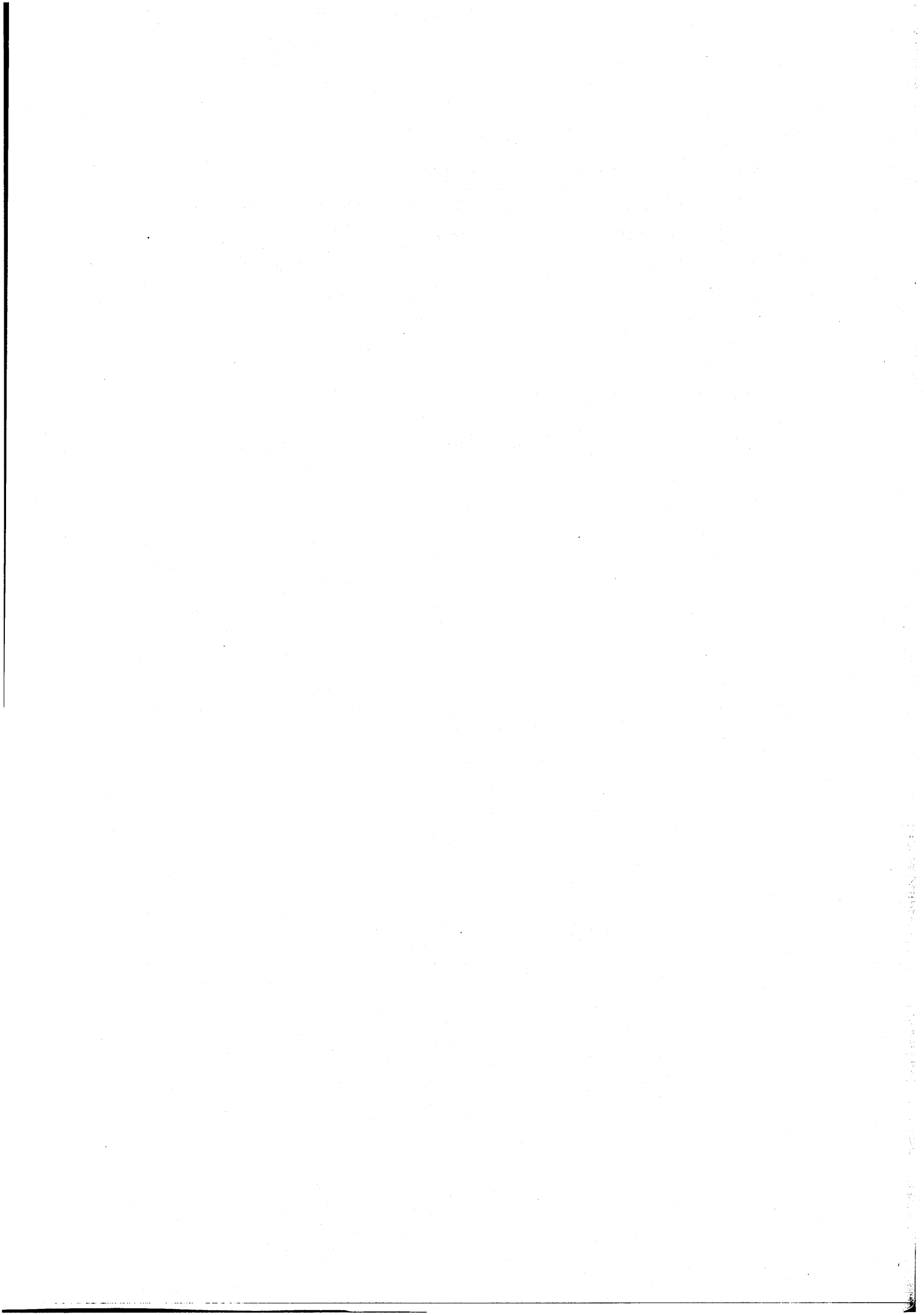
Current existing RTK positioning systems can only support very short baseline which is normally under 10Km, therefore, the huge number of reference stations should be required to cover huge area such as all over the nation. As its improvement, Virtual Reference Station (VRS) method is proposed in which a virtual reference station is logically created using information from two or more reference stations at the same time. With this VRS, we can make the baseline much longer than the RTK method, hence, VRS allows us to reduce the number of reference stations even in the case we try to provide this positioning system for nation wide. However, there is an significant issue remains. In the process of making VRS, we need the data collection system among the existing reference stations in real time. As one of important results in my research, the method for this data collection is proposed and implemented. This method employs the Internet as its communication path to create large area reference station network for VRS. Through my experiments of this system, its benefit has been confirmed. Even in the case that the shortest baseline is over 25km, which the ordinary RTK system does not support, the VRS system using the Internet mechanism can achieve RTK

correction and its positioning accuracy is 5cm or less.

My research is surely going to make large impact on the future design of the nation wide positioning system with high accuracy. My research promises low-cost installation of VRS even in the case of nation wide deployment. In the near future, high-accuracy positioning service using the Internet as its infrastructure will be available with the method this research proposed.

Keywords:

GNSS, Correction System, Location Information, Wide Area Augmentation



目次

| | |
|-----------------------------|----|
| 1 序論 | 1 |
| 1.1. モバイルコンピューティングと位置情報 | 1 |
| 1.2. 衛星測位システムの重要性 | 2 |
| 1.3. 本研究の意義および目的 | 3 |
| 1.4. 論文の構成 | 3 |
| 2 位置情報取得とその応用 | 5 |
| 2.1. 位置情報の取得 | 5 |
| 2.2. 衛星測位システムの概要 | 7 |
| 2.2.1 電波航法システムの発展 | 7 |
| 2.2.2 衛星測位 | 9 |
| 2.2.3 衛星測位システムの現状 | 10 |
| 2.3. 衛星測位とその補正 | 12 |
| 2.3.1 単独測位の原理 | 12 |
| 2.3.2 差動測位による補正 | 14 |
| 2.3.3 干渉測位における補正 | 15 |
| 2.3.4 RTK 測位による補正 | 15 |
| 2.3.5 GPS 補正情報の形式 | 16 |
| 2.4. 既存の GPS 補正サービス | 18 |
| 2.4.1 FM 文字多重放送による D-GPS 補正 | 18 |
| 2.4.2 中波ビーコンによる D-GPS 補正 | 18 |
| 2.4.3 港湾用 RTK-GPS サービス | 19 |
| 2.5. 実験的な補正サービス | 19 |
| 2.5.1 アルプス社インターネット補正実験 | 19 |
| 2.5.2 DGPS-IP | 19 |

目次

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| 2.5.3 | 電子基準点によるRTK補正情報提供サービス | 20 |
| 2.6. | 基準局ネットワークを利用するGPS補正 | 20 |
| 2.6.1 | Wide Area Differential GPS (WADGPS) | 20 |
| 2.6.2 | 広域補強システム(WAAS) | 21 |
| 2.6.3 | 仮想基準点方式によるRTK測位 | 21 |
| 2.7. | 位置情報利用アプリケーションとその要求精度 | 22 |
| 2.8. | 社会基盤としての衛星測位システム | 23 |
| 2.9. | まとめ | 25 |
| 3 | インターネットを用いたGNSS補正システム | 27 |
| 3.1. | はじめに | 27 |
| 3.2. | モバイルノードにおける通信 | 28 |
| 3.3. | 現在の補正情報配信システムの問題点 | 30 |
| 3.4. | 補正情報の特徴 | 31 |
| 3.5. | インターネットGPS補正システムの設計と実装 | 33 |
| 3.5.1 | インターネットを用いたGPS補正機構の提案 | 33 |
| 3.5.2 | 補正システムの設計 | 35 |
| 3.5.3 | 配布中継サーバを用いた補正情報の配信モデル | 37 |
| 3.5.4 | 補正情報配信プロトコル | 40 |
| 3.5.5 | 配布局および補正局の選択 | 45 |
| 3.5.6 | システムの設計と実装 | 46 |
| 3.6. | まとめ | 48 |
| 4 | インターネットを用いたD-GPS/RTK補正 | 51 |
| 4.1. | はじめに | 51 |
| 4.2. | インターネットによるD-GPS補正システム | 52 |
| 4.2.1 | システムの構成 | 52 |
| 4.2.2 | 補正情報の配信 | 53 |
| 4.3. | 実験および考察 | 54 |
| 4.3.1 | 静止点におけるD-GPS測定結果 | 54 |
| 4.3.2 | D-GPSにおける補正情報の鮮度 | 58 |
| 4.3.3 | 移動中の測位 | 59 |

| | | |
|----------|------------------------------------|-----------|
| 4.3.4 | インターネットを用いたRTK-GPS測位 | 64 |
| 4.4. | RTK測位による観測 | 64 |
| 4.5. | RTK-GPSを用いた移動体における測位 | 66 |
| 4.5.1 | D-GPSによる地図の作成 | 67 |
| 4.6. | 本章のまとめ | 68 |
| 5 | 広域基準局ネットワークの構築と仮想基準点方式による測位 | 73 |
| 5.1. | はじめに | 73 |
| 5.2. | 仮想基準点方式による測位 | 73 |
| 5.3. | インターネットを用いた基準局ネットワーク | 74 |
| 5.3.1 | インターネットを用いた双方向GPS補正 | 74 |
| 5.3.2 | インターネット基準局の構築 | 74 |
| 5.3.3 | サーバの設計と実装 | 75 |
| 5.4. | ASCを用いた補正情報配布 | 77 |
| 5.4.1 | TV音声副搬送波を用いたデータ放送 | 77 |
| 5.4.2 | ASCを用いたGPS補正情報配布 | 78 |
| 5.5. | 仮想基準点方式の実験 | 78 |
| 5.5.1 | ネットワークRTKシステムの構成 | 78 |
| 5.5.2 | 実験局配置 | 78 |
| 5.5.3 | 実験と結果 | 79 |
| 5.6. | まとめ | 80 |
| 6 | 結論 | 85 |
| 6.1. | 本研究の成果 | 85 |
| 6.1.1 | インターネットを用いたGNSS補正機構 | 85 |
| 6.1.2 | 基準局ネットワークの構築 | 86 |
| 6.2. | 今後の課題 | 86 |
| 6.2.1 | プロトコルの標準化と広域VRS網の構築 | 87 |
| 6.2.2 | 広域補強システムへの発展 | 87 |
| | 謝辞 | 89 |
| | 研究業績 | 95 |



図目次

| | | |
|------|---------------------|----|
| 3.1 | 補正情報配布ツリー | 39 |
| 3.2 | サーバ/ユーザ間データ転送 | 44 |
| 4.1 | システム構成 | 52 |
| 4.2 | 静止点における単独測位(SA有り) | 54 |
| 4.3 | 静止点における単独測位(SA無し) | 55 |
| 4.4 | 静止点におけるD-GPS測位 | 55 |
| 4.5 | D-GPS測位の時間変化 | 57 |
| 4.6 | 衛星状態の時間変化 | 57 |
| 4.7 | 補正情報遅延の時間変化 | 58 |
| 4.8 | ZBL実験システム | 59 |
| 4.9 | D-GPS連続観測(遅延0秒) | 60 |
| 4.10 | D-GPS連続観測(遅延30秒) | 60 |
| 4.11 | D-GPS連続観測(遅延120秒) | 61 |
| 4.12 | 遅延と精度の関係 | 61 |
| 4.13 | 移動体の単独測位(SA有り) | 63 |
| 4.14 | 移動体の単独測位(SAなし) | 63 |
| 4.15 | 移動体のD-GPS測位(SAあり) | 64 |
| 4.16 | インターネットによるRTK補正(藤沢) | 65 |
| 4.17 | インターネットによるRTK補正(東京) | 66 |
| 4.18 | 補正データの遅延時間(藤沢) | 67 |
| 4.19 | 補正データの遅延時間(東京) | 68 |
| 4.20 | RTK測位による移動体の計測 | 69 |
| 4.21 | D-GPS測位による道路地図の作成 | 70 |
| 4.22 | 移動中の測位と衛星配置の関連 | 71 |

図目次

| | | |
|------|-------------------|----|
| 4.23 | 移動中の測位と遅延時間の関連 | 72 |
| 5.1 | インターネット補正情報配信モデル | 75 |
| 5.2 | インターネット基準局 | 76 |
| 5.3 | ASCの放送システム構成 | 77 |
| 5.4 | VRS実験システム | 79 |
| 5.5 | 実験に利用した観測局配置 | 81 |
| 5.6 | VRSによる固定点観測(緯度) | 82 |
| 5.7 | VRSによる固定点観測(経度) | 82 |
| 5.8 | VRSによる固定点観測 | 83 |
| 5.9 | 固定点観測(高度)の時間による変化 | 83 |
| 5.10 | VRSによる固定点観測(高度方向) | 84 |

表目次

| | | |
|-----|----------------------|----|
| 2.1 | 電波航法システムの比較 | 8 |
| 2.2 | GPSとGLONASSの比較 | 11 |
| 2.3 | RTCM SC-104のメッセージタイプ | 17 |
| 2.4 | 位置情報の精度とその応用分野 | 24 |
| 3.1 | モバイルノードの通信方式 | 30 |
| 3.2 | 衛星数とRTCM補正データ量 | 32 |
| 4.1 | 単独測位とDGPS測位の比較 | 56 |
| 4.2 | D-GPS補正情報の鮮度と精度 | 62 |
| 4.3 | RTK-GPS補正の結果 | 65 |
| 5.1 | 利用した観測局 | 80 |
| 5.2 | VRS実験結果 | 80 |

第1章

序論

本章では本研究の位置付けおよび意義を明らかにする。最初に近年の衛星測位システムの現状および、モバイルコンピューティングやインターネットとの関連について述べる。

次に本研究の主題である、インターネットを用いた衛星測位の補正および補強について説明する。

最後に本論文の構成について述べる。

1.1. モバイルコンピューティングと位置情報

近年のデバイス技術や実装技術の進化により、携帯型の小型コンピュータの性能が劇的に向上しつつあり、広く一般にも認知されるようになってきている。また、携帯電話を始めとする移動体通信の分野においてもCDMAのような技術が一般化し高速かつ高帯域なネットワーク環境をあらゆる場所で利用できるようになってきている。

携帯型コンピュータやネットワーク環境の進歩はコンピュータを決まった場所で行うのではなく、必要な時に必要な場所でコンピュータを利用するモバイルコンピューティングを普及させる大きな原動力となっている。

このモバイルコンピューティングにおける通信手段としてはインターネットがもっとも広く利用されている。インターネットは地球上に広がる世界最大のコンピュータネットワークであり、簡単な手法でコンピュータを接続できるためビジネスや教育から個人間の通信にまで幅広く利用されている。現在では、通信技術およびコンピュータ技術の進化により、パーソナルコンピュータはもちろんのこと、PDAや携帯電話に至るあらゆる情報機器が接続されるようになってきている。

モバイルコンピューティングにおいて位置情報は特別な意味をもっている。これはモバイルコンピューティングを行う場所が一定ではないからであり、それぞれの場合に応

じた情報が必要とされるからである。

例えば、携帯端末は移動中に利用できるため、移動先や移動方法に関する情報を入手することは利用価値が高いと考えられる。しかしながら、これらに必要とされる地図や交通機関の案内といった情報はデータ量が多く更新が激しいため常時携帯するには向かない。さらに交通情報のように時々刻々と変化する情報の場合には、記憶容量にかかわらず携帯することが不可能である。カーナビゲーションやそれから発展した人間や物体のナビゲーションにもモバイルコンピューティングは利用されている。

これらは自分がどこにいるかという情報そのものが大きな価値を持つ例であり、今後は福祉、医療などの分野から物流管理まで幅広い応用が想定されている。これらの分野では、現在行われているような大まかな位置情報ではなく、人間の位置を特定できるような粒度の細かい位置情報が求められている。今後はさらにこのようなアプリケーションが増大すると考えられておりモバイルコンピューティングに対する位置情報の要求はますます増大している。そのため高精度な位置情報の提供は現在のモバイルコンピューティングにおける大きな課題の一つである。

1.2. 衛星測位システムの重要性

人工衛星を用いた測位システムである GPS(Global Positioning System)[1] は単独の測位では誤差が大きくおおまかな位置情報を利用するには十分であるが正確な位置情報を得ることができず、前述のような人間サイズでの位置情報の取得には向いていない。しかしながら、地球上での絶対位置を測定できることや、事前の調査やマーカ埋め込みなどの作業が必要ではないため今後は広範囲に利用が広がり、もっとも一般的な測位技術として利用されると考えられる。

現在の衛星測位システムとしては米国政府の運用する GPS のみが稼働しているが、EU の共同管理による GALILEO やロシアの運用する GLONASS なども稼働へむけて準備を進めており、これらを複合して利用することにより、システムの安全性を高めることが可能になる。

そこで、衛星測位システムの高精度化は将来的な位置情報の提供サービスに必須の機能であり、用途にもよるが数 cm から数 m 程度の精度の高い測位が求められており、高精度での測位を広域で利用するためのシステムが必須である。

1.3. 本研究の意義および目的

モバイルコンピューティングやITSでは高精度な位置情報を得ることは必須であるが、衛星測位以外の手法では、広範囲に高精度な位置情報を得ることは難しい。高精度かつ高信頼性をもった衛星測位システムには地上での定点観測を行う観測局とそこからの補正情報および健全性を知らせるメッセージが不可欠であり、観測局を広域に展開する必要がある。このような広域での観測を行う高精度GPS基盤を構築するためには、GPS観測局の動的かつ広範囲なネットワークを構成することが望ましい。よって本研究では将来的な衛星測位環境の高精度化を考慮にいたした補正情報配信システムを提案した。

位置情報の要求はその精度に差があるため、補正情報もさまざまな配信方法が利用されている。そこでインターネットを用いた高精度補正環境を構築することにより、ユーザの要求に応じた補正情報を提供できるシステムを構築する。このようなシステムは社会基盤として整備されることが望ましいが、現状のシステムでは大規模なユーザのさまざまな要求に耐えるシステムが構築できていない。

本システムを用いることにより、汎用の小型コンピュータや通信装置をGPS受信機と組み合わせることによりD-GPSやRTK-GPSといった高精度な補正を行った測位結果を得られる。インターネットを用いることにより高付加価値のあるシステムを少ない設備で構築することが可能であり、将来的な衛星測位システムや補正システムの進化にも対応が可能である。

本研究ではD-GPSおよびRTK-GPSのための基準局ネットワークの実用化を目的とし、インターネットを用いた伝送を行う場合の問題点や課題を明らかにし、インターネットを用いたD-GPSおよびRTK-GPSの実現に必要なシステムの開発やそのシステムの評価について述べる。

1.4. 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。まず2章では位置情報の取得に対する要求およびその手法について述べる。その中でも衛星測位技術とその補正について詳しくのべるとともに本研究の重要性について記す。さらに現在行われているいくつかのD-GPSサービスおよび計画されているRTKサービスについて述べ、それらの問題点について指摘する。それに続いて3章ではインターネットを用いたGNSS補正データの配送に関してその優位性を示し実現のためのプロトコル案を示す。さらに、システムの設計を行い、実装につ

いても述べる。

4章では前章で述べたシステムを利用して、D-GPSやRTK-GPSによる測位を行った結果を示す。まず、D-GPSの測位における遅延時間と測位精度の劣化の関連について考察し、インターネットを用いるシステムの問題点である遅延時間のバラつきについて考察する。その後、D-GPSの実験結果を他のD-GPS補正情報である中波ビーコンによる結果と比較しその優位性を示すとともに、移動体でのD-GPS測位やインターネットを用いた場合の利点、および問題点について述べる。また、これらのD-GPSによる測位結果に加え、RTK-GPSでの測位を行った結果を示し、RTK-GPSを行う上で必要になる帯域や遅延の問題について述べる。

さらに5章ではRTK-GPSを広域で展開する場合に有効な手法である仮想基準点を用いたRTK-GPS測位について述べ、これの基準局ネットワーク構築および測位実験について述べる。

その後、6章において今までの結果を元にしてGPS補正情報の配信プロトコルについての包括をのべるとともに本論文のまとめを行う。

第2章

位置情報取得とその応用

本章では新しいモバイルサービスに必須の技術である位置情報の取得手法とその応用について述べる。

位置取得手法にはさまざまなものが提案されているが、広域での利用を考慮し、マーカのような設備を必要としない衛星測位システムが広範囲に用いられると考えられる。現在完全運用が行われている GNSS(Global Navigation Satellite Systems) である GPS について述べるとともにその精度向上のための補正技術および、現在稼働している補正サービスについても述べる。

また、位置情報の応用例として現在想定されているいくつかのサービスについて述べるとともにそれらに必要とされる位置情報の要求について述べることにより本研究の位置付けを明らかにする。

2.1. 位置情報の取得

モバイルコンピューティングが通常の固定運用されたコンピューティングと決定的に違う点は空間的な広がりを考慮する必要がある点である。空間的な移動を伴うため、位置情報はモバイル環境の中で非常に重要な意味を持つ。

ユーザの位置が特定できる場合にはその時々において通信手段を適切に選択したり、その位置に従った特別の情報を得ることができる。逆にユーザの位置をリアルタイムに記録したり外部へ伝えることにより、外部からのモニタリングなどのサービスを行う新しいアプリケーションも開発されている。

また、位置そのものに関しては電子化された地図上などリアルタイムに位置を示す要求があり、カーナビゲーションなどに利用されている。

その他には、リアルタイムに高精度な位置を確認することにより社会的なデータの収

第2章 位置情報取得とその応用

集を容易にすることが可能となる。このような精度の高い位置情報を収集することは社会インフラの整備の遅れている地域や大地震などで被災した地域の測量といった用途があり、発展途上国や被災地などの復興に役立つと考えられる。

このように位置情報の取得は今後のモバイルコンピューティングにおいて非常に重要な課題である。モバイルコンピューティングに適したサイズのデバイスを利用して世界中で利用できる測位システムは現在のところGPSのみである。しかしながら、このGPSは単独で利用する場合には精度が100m程度と人間のサイズを単位とした測位を行うには不十分であり精度向上の手法が開発されている。

都市部など一部の地域における移動体端末の位置情報取得としていくつかの方法が提案されている。現在利用できる方法としては携帯電話のセルを利用する方法がある。その他には、赤外線を用いた方法やカメラを用いた画像認識による方法などが提案されている。

- **携帯電話/PHSのセルを利用する位置取得法**

携帯電話はその機構上基地局に自分の位置を登録する。どのセルにどの端末が存在するかという情報を知ることができるため、付加設備を必要とせず位置情報を取得することができる。しかしながらこの精度は都市部であっても数百mから数km、郊外の場合には10kmを越えることがある。そのため、複数の基地局からの電波を利用した測位などが提案されている。

PHSを利用した場合にも同様の原理で測位を行うことができるが、セルのサイズが最大でも半径500m程度と携帯電話に比べ小さいためそれだけ精度のよい測位を行うことができる。

- **赤外線発信機を利用する手法**

小型の赤外線送受信端末を利用して位置情報を得る方法であり、アクティブバッジ等の例が知られている。アクティブバッジでは部屋に設置された赤外線センサを用いることにより赤外線を送受信できるバッジをつけた人間がどこに存在するかを知ることができる。この場合精度は部屋あるいはそれぞれのオフィスにあるブースといった単位となる。位置を知るためにはそれぞれの場所に赤外線の発信および受信装置を取り付ける必要があるため広範囲での利用には向かず建物内部などでの利用に限られる。

- **ビデオカメラを利用する方法**

小型のビデオカメラを利用し、撮影した情報から位置を特定する。元となる画像の地図を与えてやる必要があることや、撮影環境が極端に変化するとマッチングがうまく行かないなどの問題があるため、主に室内で利用される。この場合には天井など特定の場所にマーカーを設置して測定精度の向上を計ることがある。決まった場所でしか利用できず、カメラを持つ必要があるためロボットの制御の応用が研究されている。

このように移動体の測位手法は多数開発されているものの、世界中で高精度な測位を実現することは難しい。ほとんどのシステムでは測位を行う場所になんらかの設備を用意する必要があるため、世界中で利用するためには多くの設備が必要となる。また精度がシステムごとに限られており向上させることは難しい。

2.2. 衛星測位システムの概要

本節では衛星測位システムの前身となった電波航法システム全般について述べ、さらに衛星測位システムの概要についても述べる。現在稼働中の衛星測位システムとしては米国政府のGPSがあり、稼働予定のシステムとしてはロシアによって配備中のGLONASSおよびEUによる共同開発が行われているGALILEOがある。

2.2.1 電波航法システムの発展

船舶や航空機の発展にともない、その安全を確保するために測位システムは航法システムとして発展を続けてきた。古来より航法システムは天体や方位磁石を用いたものであったが、20世紀に入り電波を用いたシステムが開発された。

第二次世界大戦で用いられた英国のDeccaシステムは電波を用いたもっとも初期の航法システムであり、連合軍のノルマンディ上陸作戦の際に艦艇の誘導に利用された。戦後は米国にてロランの開発が行われ、ロランAおよびロランCが実用化された。ロランAは中波を用いたシステムであり、ロランCは長波を用いたシステムである。これらの電波航法システムの問題点としては局からの有効距離に限られることにあり、地球すべてをカバーすることは難しい。

その後には長波を利用するオメガシステムが開発されている。オメガシステムは8局で世界中をカバーするシステムであり、水深10m程度までならば利用できるため潜水艦の航法にも利用された。これらのシステムの精度は理論上で数100mのオーダーであり、実

表 2.1 電波航法システムの比較

| 項目 | デッカ | ロランA | ロランC |
|---------|--------------------|----------------|-------------|
| 利用周波数 | 70~130kHz | 1750 ~ 1950kHz | 100kHz |
| 距離差測定方法 | 位相差 | 到着時間差 | 到着時間差と位相差 |
| 局の構成 | 主局と従局 | 主局と従局 | 主局と従局(2~4) |
| 最大有効距離 | 350海里(1海里 = 1852m) | 700~1400海里 | 1400~2300海里 |
| 測位精度 | 20~300m | 1/4~ 5海里 | 30~2000m |

| 項目 | オメガ | NNSS | GPS |
|---------|----------------|-----------|------------------|
| 利用周波数 | 10.2 ~ 13.6kHz | 150MHz | 1575MHz, 1227MHz |
| 距離差測定方法 | 位相差 | ドップラーシフト | 衛星からの距離 |
| 局の構成 | 8局間任意の組合せ | 人工衛星(6機) | 人工衛星(24機) |
| 最大有効距離 | 6000~ 8000海里 | 全世界 | 全世界 |
| 測位精度 | 1~3海里 | 0.1~0.3海里 | 30~ 100m |

際には数km程度で、当時の船舶用航法システムとしては高精度であったが現在は衛星を用いた測位システムにその座を譲っている。

人工衛星を利用した測位としては NNSS(Navy Navigation Satellite System) が60年代に開発された。NNSSは衛星からの直接波のドップラーシフトを利用して測位を行うシステムであり、6つの衛星により世界中をカバーした。NNSSでは衛星からの電波のドップラーシフトを観測することにより位置を決定する。そのため10分程度の長時間の観測が必要であり、船舶のような低速で移動する物体には利用できるが、航空機のような高速で移動する物体への応用は難しい。またNNSSは世界中での利用を可能にしたが、いつでも測位ができるわけではなく衛星が上空を通過する数時間に1回の割合でしか測位ができない。これらの問題点を踏まえ、現在運用されている衛星測位システムであるGPSは構築されている。

表2.1 に電波航法システムそれぞれの比較をまとめる。

2.2.2 衛星測位

GPSに代表される衛星測位システムでは利用者は衛星から連続的に発信されている電波を受信することにより、さまざまな用途に利用する。本研究では単独のGNSSシステムとして完全な運用状態にあるGPSを利用しているため、特に断りがないかぎりGPSについて述べる。

GPSによって得られる情報は大きくわけて時刻情報と位置情報であり、以下のような用途に用いられる。

- 測位：GNSSでは位置情報を知ることができる。その精度は単独測位の場合で20m程度であるが、補正を行うことで移動体においても数cmから数十cmの精度を得ることができる。そのため、カーナビゲーションや航空管制、船舶の航海といった航法の用途はもちろん、大型建設機械や農作業機器の自動制御、移動体の管理などに応用されている。今後は高度交通システム(ITS)のような分野での応用が期待されている。さらに機器の小型化および低価格化が進むにつれ携帯電話や小型情報端末などへの組み込みも行われてきており、人間に対応したサービスへの利用も見込まれている。

GPSを用いて定点を観測する場合には長時間の観測と後処理により、1cm以下の精度を得ることができる。そのため、GPSを利用した測量や地盤、火山の観測などへの応用がなされている。国土地理院では日本全国を網羅するGPS観測点網を構築し観測を行っている。

- 時刻同期：GNSSでは衛星からの電波に含まれるコードの到達時間を計測することにより、衛星からの距離を計測している。そのため、副産物として高精度な時刻を得ることができ、これはGPSシステム全体として遠距離であっても非常に正確に同期している。

この時刻同期は一般にはほとんど利用されていないが、コンピュータネットワークの分野ではGPS受信機を用いた時刻同期サーバ(NTPサーバ)の構築などに利用されている。また一部のCMDA方式の携帯電話基地局でも網の時刻同期のために利用されている。

2.2.3 衛星測位システムの現状

現在、運用あるいは計画が行われている全地球型航法衛星システム(GNSS)は以下の3つが存在する。

1. アメリカ国防総省(DoD)によって運営、管理が行われている GPS
2. ロシア軍を中心に運営されている GLONASS
3. EUを中心とし、官民共同で開発が行われている GALILEO(GNSS-2)

これらはどれも人工衛星から発射される電波を利用して測位を行うがそれぞれに特徴がある。GALILEOは現在のところ周波数割り当てが認められ、詳細の設計が行われている段階であり稼働状況にある衛星はまだ一つもない。しかしながら2008年の稼働を目指して開発が行われている。

GPSはアメリカ軍が中心となって開発したシステムであり、現在の衛星測位においてもっとも大きな位置を占めている。GPSはシステム上24機の低軌道衛星を利用しているが、現在のところ人工衛星の寿命の延長などにより、予備も含め27機の衛星が利用可能である。現在はBlock2Rと呼ばれる3世代目の衛星が利用されており、新しい民生用の周波数の追加が予定されている。

現在運用が行われている衛星測位システムはアメリカの運用するGPSとロシアの運用するGLONASSが存在する。このうちGLONASSのメンテナンスは十分に行われておらず、完全なシステムに必要なだけの人工衛星の数が確保できていない。そのため、現在のところ一般にはGLONASSはGPSの補助として利用されており、GLONASSのみの単独測位を行うことは少ない。

GPSとGLONASSそれぞれの諸元の比較を示す。

GPSは1960年代に実用化されたNNSS(Navy Navigation Satellite System)の後継として米国国防総省(Department of Defense:DOD)により1970年代から開発が始められた。1974年7月には最初のNAVSTAR衛星(Navigation System with Time and Ranging)が打ち上げられ実験が始まった。その後開発計画はスペースシャトル事故などの影響もあり、遅れが生じたが1993年には正式にシステムの完成が宣言された。2000年5月にはそれまで国防上の理由として行われていた民間用周波数の精度劣化処理である選択制御性(Selective Availability:SA)の廃止が宣言され、即日実行された。正式なシステムとしては24機の衛星が利用されるGPSであるが、2000年末には29機の衛星が軌道上を周回し、27機が運用状態にある。

表 2.2 GPS と GLONASS の比較

| 項目 | GPS | GLONASS |
|------------|----------------------------------|--|
| 衛星数 | 24 | 24 |
| 軌道面数 | 6 | 3 |
| 昇交点傾斜角 | 55 | 64.8 |
| 軌道半径 (km) | 26560 | 25510 |
| 周回周期 | 11時間 58分 02秒 | 11時間 15分 40秒 |
| 設計寿命 | 約 7.5年 | 約 5年 |
| 多重方式 | CDMA | FDMA |
| 搬送波周波数(L1) | 1,575.42 MHz (10.23MHz × 154) | $1.602 + 0.5625 \times N$ MHz ($-7 \leq N \leq 24$) |
| 搬送波周波数(L2) | 1,227.6 MHz (10.23MHz × 120) | $1,246 + 0.4375 \times N$ ($-7 \leq N \leq 24$) |
| コードの種類 | ゴールド符号 | M系列 |
| C/A コードレート | 1.023Mbps | 0.511Mbps |
| P コードレート | 10.23Mbps | 5.11Mbps |
| 測地系 | WGS-84 | PZ-90 |

第2章 位置情報取得とその応用

GPSは上空が開けているところなら地球上いつでもどこでも三次元測位を可能にするシステムとしてアメリカはもとより日本を始めとする世界中で利用されている。GPSの主要目的は移動体の測位や航法の支援であり、近年ではカーナビゲーションを主とする地上での利用が広がっている。

ロシアのGLONASSはGPSとほぼ同じ時期から開発が行われている同様の衛星測位システムである。GPSに対してGLONASSは民間利用に対して多くの情報を提供してこなかったため、広く利用されるにいたっていないが、近年ではGLONASS用の受信機やGPSとGLONASSを共用する受信機も利用されるようになってきている。1982年10月に最初のGLONASS衛星が打ち上げられ、1997年にはシステムの完成をみた。GLONASSはGPSと同様24機の衛星を想定したシステムであるが、その衛星寿命の短さと経済的な問題により人工衛星の補充が足りておらず、現在のところ周回軌道上に11機の衛星があり、そのうち9機が稼働状態にある。ロシア政府はGLONASSの運用を続けることを宣言しており、2004年には再度24機の衛星が揃う予定となっている。

GLONASSは当初よりGPSのSAのような精度劣化処理が行われていないため、単独測位での精度において有利であり、またその軌道面から高緯度での運用に向いていることが知られている。

これらの衛星に加え、静止衛星を利用した補強システムを用いることによりオーバーレイと呼ばれる疑似的なGPS衛星を追加することができる。将来のGNSSは衛星軌道上に72機の周回衛星および3機以上の静止衛星を複合して利用できるようになると考えられている。そのため、常時水平線以上に36機の衛星を確保でき、都心のビル密集地帯であっても測位が可能になる。しかしながらこのように多くの衛星が観測できる場合には、補正情報の量もそれにともない増大するため現在行われている放送によるGPS補正システムでは対応することができない。

2.3. 衛星測位とその補正

2.3.1 単独測位の原理

衛星測位において、観測地点のみで測位を行う方法を単独測位と呼ぶ。衛星からのコードを利用することにより測位を行う。実時間運用に向いている。GPSにおいては精度の違いによりC/Aコード(Clear and Acquisition, Coarse and Access Code)とPコード(Precise, Protect Code)の2種類のコードがある。

GPSは軍用に開発されたシステムであるが、一部を民生用に開放している。この民生用に公開された測位であるSPS (Standard Positioning Service)ではL1周波数帯に載せられたC/Aコードのみを利用する。

SPSには従来はSA(Selective Availability)と呼ばれる精度劣化処理が行われていたが、2000年5月2日に解除された。現在はSAなしの環境下で精度が約20m程度(2drms)である。SAは民生用に提供したGPSの精度が高すぎたために、国防総省が行った精度の劣化処理であり、GPS衛星の軌道情報に誤差を与える、あるいはC/Aコードの時刻にゆらぎを与えるものと推測されている。SAはブロックII衛星(実用機)から装備され、1990年の3月25日から開始された。

軍用にはPPS(Precise Positioning Service)と呼ばれるサービスが提供されている。これは民生用に開放されているC/Aコードのみならず、Pコードと呼ばれる軍用コードを利用することによって実現している。PコードはL1およびL2周波数帯の両方に載せられているため、これを利用して電離層による誤差を補正できる。

Pコードは誤って公開されたためさらに秘匿化が行われ、現在はAS(Anti Spoofing)と呼ばれる処理が行われたYコードが利用されている。ASではPコードにWコードと呼ばれる別系列のコードをかけあわせることにより、秘匿化を行っている。Wコードの詳細は明らかにされておらず、AS処理されたPコード(Yコード)は利用できない。

GPSでは衛星に積まれた原子時計により、正確な時刻とともに放射される電波を用いて測位を行う。GPS受信機において衛星からの信号を受信した時刻と、衛星から発進されている正確な軌道データ(エフェリメス)を元に衛星の位置を推測し、その到着時刻の遅れを元に衛星からの距離を算出する。3次元的にパラメータをとくために最低3つの衛星が必要となる。実際にはGPS受信機の時刻がGPS時刻と同期しているとは限らないため、時刻 t も未知数となり、最低4パラメータの式を解く必要があり、4つの衛星からの情報が必要となる。現在では処理速度の向上にともない、観測できる衛星全ての情報を用いて最小二乗法により最適解を求めるall-in-viewと呼ばれる方法が利用されている。このように、衛星測位では衛星と観測局の距離、および距離を計測するための時刻が大きな意味を持つ。

単独測位における誤差の要因としては以下のようなものが挙げられる。

Selective Availability (SA) SAはGPSの管理母体である米国政府によって行われているGPS信号の精度劣化処理のことである。SAではL1帯におけるC/Aコードの精度を意図的に劣化させることにより、測位精度の劣化処理を行っている。GPS

第2章 位置情報取得とその応用

における単独測位の精度はSAの存在する条件では約100m程度である。このSAは2000年5月の大統領令により解除が宣言されて以来行われていないが、将来的に行わないことが保証されているわけではない。

軌道情報誤差 GPSではC/Aコードに重畳され、放送暦(エフェリメス)が放送されている。この放送暦は高精度な暦であるが観測された情報を元につくられた予報暦である。

衛星時計の誤差 GPS衛星には高精度のセシウム時計および、予備のルビジウム時計が搭載されているがその誤差はnsオーダーではズレている。そのため、測位において数mの誤差を生じると考えられている。

電離層および対流圏伝搬誤差 電波が電離層や対流圏を通過する時にはその状態により遅延が生じる。この遅延は一定ではなく、電離層による遅延量はモデル係数で補正するが予測は困難である。L1周波数に加え、L2周波数を利用することにより、伝搬遅延を計測することが可能であるがこの機能は高精度な測量用GPS受信機などにしか搭載されていない。

その他の影響による誤差 受信機のノイズやアンテナ設置場所に起因するマルチパスなど受信機やそれに付随する設備から発生する誤差が存在する。特にマルチパスは精度劣化の大きな要因であるが、アンテナ設置場所や、アンテナ形状によりある程度防ぐことが可能である。

補正を行うことにより、これらの要因のうち伝搬遅延や軌道要素といった誤差を減少させることが可能であり、GPSの精度向上につながる。

2.3.2 差動測位による補正

あらかじめ位置の計測されている地点で測位の誤差を求め、それによって未知点での測位結果を補正して精度の改善を行う。これにより両地点での測定誤差のうち共通部分が相殺されて、結果として精度が改善される。実時間性に優れており、移動体への応用に向いている。SAの存在する環境下では受信機への負担が少なく、効果が大きかったため多くの受信機に採用された。算出された誤差はリアルタイムで観測局に伝達することにより、リアルタイム性を損なわずに精度の高い測位を行える。

D-GPSには以下に示すように2種類の測位方式がある。どちらもあらかじめ測量により位置を求めた基準局での観測を用いて移動局の位置を補正する。

- 測位位置補正方式: 基準局での測量上の位置と基準局で単独測位を行った結果を比較することにより3次元的位置の補正量を算出し、利用者局の測位結果にこの補正値を適用する。GPS単独測位での誤差傾向は基準局と移動局の距離が近い場合には同じ時刻では同様の傾向を示すことが多い。そのため、利用する衛星が同じ場合には少ない補正データ転送量で補正を行うことができるが、衛星が異なる場合には衛星固有の誤差を削減することができないためよい精度を得ることができない。
- 疑似距離補正方式: 基準局での位置を元に、衛星までの真の距離と実際に測定された疑似距離を比較することにより衛星毎の疑似距離補正値、およびその変化率を算出する。衛星毎の変化率を伝送するため測位位置補正方式にくらべ多くのデータ量を必要とするが、ユーザが測位に利用する衛星群が基準局で観測された衛星群に含まれていればよいと、衛星選択の自由度が大きい。近年では測位計算にall-in-viewと呼ばれるできる限り多くの衛星を同時に利用し、最小二乗法により解を求めることが一般的に行われるようになってきている。そこで多くの衛星を利用できる可能性の高い疑似距離補正方式が良いと考えられている。現在、一般的に行われている補正情報配信ではこの疑似距離補正方式に従い、疑似距離の補正値およびその変化率が伝送される。

現在では、疑似距離補正方式が一般的に利用されており、本研究でも疑似距離補正方式による差動測位を行っている。

2.3.3 干渉測位における補正

干渉測位では搬送波の位相を利用して測位を行う方法であり、理論上は波長の1/100程度の分解能が得られるため、高精度の測量や科学計測などに用いられている。GPS受信機からのデータを蓄積し、後処理で基準局からのデータと合わせることで処理を行う。この時、通常の測位で用いられる放送暦(エフェリメス)ではなく、観測によって作成されたより正確な暦である精密歴を利用する。そのため基線長が数百～数千kmに及んでも十分な精度を持った計測が可能である。世界的には地殻変動の観測にも使われており、日本でもプレート移動の観測や火山の観測などに利用されている。

2.3.4 RTK 測位による補正

リアルタイムで干渉測位を行う手法がRealTime Kinematic(RTK)法である。干渉測位と同様に搬送波の位相を利用するが、実時間処理を行う。アンビギュイティと呼ばれ

る波長の整数倍の誤差が発生するため、二重位相差を計測することによりこれを除去するが、そのため最初に解を出すまでに時間がかかることがある。

この最初の解を求めるまでの時間を短縮するために OTF(On The Fly)や Instant FIX とよばれる技術が利用される。これらの方法のためには、通常の測位に必要な数より多くの通常は6機以上の衛星が初期化のために必要となる。RTK-GPSではリアルタイムに測位を行うため放送暦を利用する。RTK-GPSにおける整数バイアスの決定に必要な計算が高速化したため、今後は移動体などの用途においても RTK-GPS の利用が見込まれている。

2.3.5 GPS 補正情報の形式

補正情報のフォーマットの中で、もっとも普及しているのが RTCM-SC104 Version 2.3 形式である。米国海上無線技術委員会(Radio Technical Commission for Maritime Services)の第104特別会議(Special committee No.104)による勧告であり、広く一般に利用されている。海上での利用で一般的につかわれていたが、現在では陸上用あるいは測量用などの受信機でもこのフォーマットを利用することが多い。RTCM-SC104形式は D-GPS はもちろん、RTK-GPS や GLONASS などにも対応する。現在、委員会は Version.3 の検討に入っている。

メッセージは意味別にタイプに分かれている。それぞれのタイプを表 2.3 に示す。D-GPS の場合には通常 TYPE 1 あるいは TYPE 9 が利用される。タイプ 1 では衛星毎の疑似距離の補正值および変化率を捕捉している衛星の数だけ列挙する。タイプ 9 では無線などのデータリンクに備え、3衛星ずつの補正值を列挙する。3つ以上の衛星を捕捉している場合にはタイプ 9 のメッセージをならべることによって表現する。

RINEX は Receiver Independent Exchange Format の略であり、ASCII形式での GPS 観測情報交換フォーマットである。RINEX はそのデータ量から主に後処理に利用されている。このフォーマットを用いることによりメーカーの違う受信機間での情報の交換や後処理用プログラムを利用することができる。一般に受信機専用のフォーマットと RINEX フォーマットのコンバータが提供されている。

CMR は米国の大手 GPS メーカーであるトリンプル社が採用している独自のフォーマットである。データ圧縮を行い、RTK-GPS に必要なデータを 2400bps 以下の伝送容量で送ることが可能である。同様の独自フォーマットはそれぞれの受信機メーカーが採用しているが、CMR はもっとも早くに規格化されたため、いくつかの受信機メーカーではサポート

表 2.3 RTCM SC-104 のメッセージタイプ

| TYPE NO. | STATUS | TITLE |
|----------|-----------|---|
| 1 | Fixed | Differential GPS Corrections |
| 2 | Fixed | Delta Differential GPS Corrections |
| 3 | Fixed | GPS Reference Station Parameters |
| 4 | Tentative | Reference Station Datum |
| 5 | Fixed | GPS Constellation Health |
| 6 | Fixed | GPS Null Frame |
| 7 | Fixed | D-GPS Radiobeacon Almanac |
| 8 | Tentative | Pseudolite Correction Set |
| 9 | Fixed | GPS Partial Correction Set |
| 10 | Reserved | P-Code Differential Corrections |
| 11 | Reserved | C/A-Code L1,L2 Delta Corrections |
| 12 | Reserved | Pseudolite Station Parameters |
| 13 | Tentative | Ground Transmitter Parameters |
| 14 | Tentative | GPS Time of Week |
| 15 | Tentative | Ionospheric Delay Message |
| 16 | Fixed | GPS Special Message |
| 17 | Tentative | GPS Ephemerides |
| 18 | Fixed | RTK Uncorrected Carrier Phases |
| 19 | Fixed | RTK Uncorrected Pseudorange |
| 20 | Tentative | RTK Carrier Phase Corrections |
| 21 | Tentative | RTK/Hi-Acc. Pseudorange Corrections |
| 22 | Tentative | Extended Reference Station Parameters |
| 23-30 | - | Undefined |
| 31 | Tentative | Differential GLONASS Corrections |
| 32 | Tentative | Differential GLONASS Reference Station Parameters |
| 33 | Tentative | GLONASS Constellation Health |
| 34 | Tentative | GLONASS Partial Correction Set |
| 35 | Tentative | GLONASS Radiobeacon Almanac |
| 36 | Tentative | GLONASS Special Message |
| 37 | Tentative | GNSS System Time Offset |
| 38-58 | - | Undefined |
| 59 | Fixed | Proprietary Message |
| 60-63 | Reserved | Multipurpose Usage |

を行っている。同様のメーカ独自フォーマットは、それぞれのメーカにおいて利用されている。

本研究では一般的なRTK-GPSおよびD-GPSのためのフォーマットとしてRTCM-SC104形式を採用する。

2.4. 既存のGPS補正サービス

SAの環境下において、高精度の測位を行うためには補正技術は必須であった。そのためいくつかの補正サービスが提供されている。現在提供されている補正サービスは大きくわけてD-GPSのための補正情報とRTK-GPSのための補正情報である。現在のところ主にD-GPSによる情報が配信されており、RTK-GPSのための情報を公共の社会基盤として広域で運用している例は数少ない。RTK-GPSや静止干渉測位を行う場合には、一般には独自に基準局を用意し、観測局との間を携帯電話やデジタル無線などを用いて通信することが一般的である。

2.4.1 FM文字多重放送によるD-GPS補正

FM放送の副搬送波を用いたD-GPSサービスは主にカーナビゲーションをターゲットとしたシステムであり、GPEX[2]が運営している。このシステムではDARCと呼ばれるFM文字多重放送に利用されているデータのエンコード方式を利用し、独自の符号化を加えている。FM電波を用いることにより、車載の場合にはカーラジオとアンテナを共有することが可能であるが、データの安定した受信を行える範囲が限られている。また、データ通信に利用できる帯域が限られているため、補正データの更新間隔が5秒間隔であり、データ内に時刻情報を持たないなど、データ削減が行われている。符号化の方式は公開されておらず、サービスを利用する機器を製作するためにはライセンス契約を結ぶ必要がある。

2.4.2 中波ビーコンによるD-GPS補正

主に海上での航法を目的とした中波ビーコンによるD-GPSの補正サービスが海上保安庁より提供されている[3]。

海上保安庁により運営される中波ビーコンを用いたD-GPSサービスは主に海上を航行する船舶で一般的に利用されており、沿岸部を主体とする陸上でも利用できる。

2.4.3 港湾用RTK-GPSサービス

横浜などの一部の港湾での作業用にRTK-GPSのサービスが提供されている。このサービスは携帯電話によるデータ通信(9600bps)を用いてRTK-GPSのための補正情報を提供する。このサービスは利用価格が非常に高価なため、多くのユーザを獲得するにはいたっていない。また、同システムによって多くのユーザをサポートするためには、基準局用のモデムなどの設備が大量に発生する。

2.5. 実験的な補正サービス

永続的なサービスではなく、補正そのものを実験的に行うために行われているサービスがいくつか存在する。インターネットを用いたD-GPSサービスや国土地理院の保有する電子基準点およびデジタルMCA無線を用いたRTK-GPSサービスがそれにあたる。これらは将来的なサービスを模索する意味では重要であるが、現在のところ広域かつ安定したサービスであるとは言えないため、実験的なサービスとして分類した。

2.5.1 アルプス社インターネット補正実験

実験的な補正サービスとしては、アルプス社が提供実験を行ったインターネットによるサービスが挙げられる[4]。この実験は1999年3月～2000年4月まで行われた。このサービスではRTCM-SC104形式TYPE1のデータをHTTPにより提供している。HTTPのGETメソッドを利用し、CGIプログラムを起動することにより、補正データを入手できる。HTTPを用いているため、データサイズに比べてヘッダが大きくなることがプロトコル上の問題点であり、システムとしては、CGIを利用しているため補正情報の要求がある度に新しいプロセスが作成されるなどのシステム上でのオーバーヘッドが大きいことが挙げられる。

2.5.2 DGPS-IP

インターネットを用いたD-GPS補正情報の配信システムとしてDGPS-IPがある[5]。このシステムは中波ビーコン受信機より得られたRTCM-SC104形式の補正情報をTCPあるいはUDPで転送する。現在利用できる基準局はアメリカ国内に3箇所であり、それぞれ1つのサーバ内で違うポートを用いてサービスされている。プロトコルは要求や応答といった文法を持たず、コネクションが確立すると自動的にRTCMSC-104タイプ9の

補正情報が自動的に配信される。現在のところTCPのみを利用しているが、UDPにも対応する用意があり、マルチキャストへの準備を行っているが運用は行われていない。

2.5.3 電子基準点によるRTK補正情報提供サービス

国土地理院では1999年度から一部の電子基準点を用いたRTK補正情報の提供実験を行っている。このRTK-GPS補正情報配信では、デジタルMCA無線を利用し、基準局からの情報を得る。全国で10点の基準点が選択され、利用することが可能である。

国土地理院の観測用電子基準点は全国に1000点ほど存在しているが、現在のところこれらに対しRTK測位に対応する予定はない。

現在の実験ではMCA無線のトランシーバの問題から、一つの基準点を同時に複数の人間が利用することはできない。また、DMCAはその免許上の制約から10分程度しか連続利用できないため、その度にサイクルスリップが起きる。よってその都度初期化が必要となり長時間の連続観測が行えない。

2.6. 基準局ネットワークを利用するGPS補正

近年はWADGPSや仮想基準点方式などのように、複数の基準局からの情報を利用することで広域において精度を確保する補正が提案されている。WADGPSは高度な航空管制を目標として開発が行われ、数千kmの範囲においてD-GPSとしての精度を確保するシステムである。仮想基準点方式はRTK-GPSの基線長が限られているという問題点を克服するために観測地近傍に仮想的な基準局を計算により設置する方法である。本節ではこれらの技術について述べる。

2.6.1 Wide Area Differential GPS (WADGPS)

広域でのD-GPSの補正精度を向上させるために、複数のGPS基準局を利用したネットワーク型の補正が提案されている。

広域でのネットワーク補正としては、主に航空機の管制を目的としてWADGPS (Wide Area Differential GPS) が利用されている。WADGPSは遠距離に存在する複数の基準局からの観測情報を元に、広域における電離層や大気圏での遅延パラメータを算出し、補正を行う。その有効範囲は数千kmに及んでいる。

2.6.2 広域補強システム(WAAS)

広域補強システム(Wide Area Augmentation System :以下 WAAS)はFAA(アメリカ航空局)が中心となって開発を進めている航空用の広域補正システムである[6]。WAASという単語を使う場合には、一般名詞としての広域補強システムである場合と、アメリカ大陸をカバー範囲に持つ広域補強システムそのものを挿す場合にわけられる。

同様のシステムは日本の運輸省が計画しているMSAS(MTSAT Satellite Augmentation System)[7]やEUを中心に計画がすすめられているEGNOS(European Geostationary Navigation Overlay Service)がある。MSASは1999年末のMTSAT1号機打ち上げ失敗によりスケジュールに大幅な遅延が生じている。MSASは日本を中心に西太平洋からオーストラリア、アジア地域をカバーする計画になっており、日本国外にも地上局を用意する予定である。

EGNOSは既存の静止衛星にGPS拡張の機能を組み込むことによって実現される。EGNOSでは3つの衛星(インマルサットIII AOR-EおよびIOR、ESAのArtemis)を利用する。EGNOSは欧州およびアフリカを中心として大西洋からアジア地域までをカバーする。

アメリカのWAASは南北アメリカ大陸をカバーする予定となっており、これら3つの広域補強システムをシームレスに利用することで世界中を航行する航空機の高度な航空管制が行える。

WAASはGPS電波を観測する複数の地上局と補正情報を送出する静止衛星、実際にWAASを利用する航空機から構成される。

2.6.3 仮想基準点方式によるRTK測位

RTKGPSでは高精度な測位を行うことが可能であるが、その適用範囲が基準局より10km程度に限られている。これ以上の基線長を持つ場合には安定した測定が不可能となり、精度のよい測位を行うことができない。そのため広域でのサービスを行うためには多くの基準局が必要となる。複数の基準局を切り替えて使う場合、それぞれの基準局からの補正情報は独立しており、基準局を切り替える場合にはそれぞれ固有の誤差が存在するので連続した測位が行えない。そのため、広域での移動体を対象としたRTK-GPS基準局は複数の基準局を用意するだけでは構築できない。

これらの欠点を補い、広域でのRTK測位を行うために複数の基準局を同時に利用する仮想基準点方式によるRTK測位が提案されている[8][9]。

仮想基準点方式では、複数の基準局からの情報を元に観測地点近傍において仮想的な基準局をおき、その基準局からの補正データをGPS受信機に与える。仮想的に基線長を短縮することが可能であり、従来のRTK-GPSでは不可能な範囲であっても高精度な測位が行える。

観測地点近傍にある基準局を計算するためには、現在の観測局の位置を元に基準局を計算する必要がある。通常の基準局からの情報とは異なり、2次元的な広がりをもつ必要があるため、通常のRT-KGPSの補正情報に比べ多くのデータを必要とする。

仮想基準点方式を用いたサービスはドイツやノルウェーでの実験が行われており、2001年3月までの期間で日本測量協会も電子基準点を利用した公開実験を行っている[10]。

2.7. 位置情報利用アプリケーションとその要求精度

位置情報を利用するシステムとしてもっとも一般的なものはカーナビゲーションや航法システムである。これらの要求のうちカーナビゲーションの場合には10m以下の精度が必要であるが、それに達しない場合にはマップマッチングやジャイロや加速度センサーを用いた慣性航法(INS)を用いることが多い。特に地図上の道路情報を利用するマップマッチングは位置情報を補正する手段としてメインに利用されており、カーナビゲーションでは車両位置は道路から出ることはない。しかしながら、狭い道路が2つ並んで存在するような場合や多方向への交差点の場合には間違った道路を選択することがあり、ナビゲーションの妨げとなっている。これらを防止するためには車幅の2倍程度である5m以下の精度が必要である。

船舶の航法システムの場合には、沿岸部においてD-GPSを用いて10m以下の精度を保つ必要がある。これはビーコンによる中波D-GPSの要求として定められている。

航空機の航法システムの場合には、上空を飛行中には主に慣性航法を利用し、GPS単独の測位精度でも問題がないが、着陸には高精度な測位が要求される。現在FAAにより開発が推められている空港近辺での補強システムとしてGBAS(Ground Based Augmentation System)の一つLAAS(Local Area Augmentation System)がある。着陸時における精密進入の種別によりカテゴリ1から3にわけられており、もっとも精度の低いカテゴリ1の場合には95%以上の確率で水平方向に16m 垂直方向に4mの精度が求められる。もっとも精密なカテゴリ3の場合には水平方向に3.9m 垂直方向に0.8mの精度が必要であるとされている。[11]

しかしながら、これらの船舶や航空機が洋上を航行している場合には、その精度は100m

程度のオーダで決まればよく、現在は高い精度を要求していない。今後は航空機の増加にともない洋上での管制を強化することによりより多くの航空機を安全に飛行させることが考えられており、これが広域補強システムの考え方に繋がっている。

ITS分野では高速道路を対象とした自動車の自動制御が考えられているが、自動車制御の場合には車両間隔を計測した場合に10cm以下の精度が必要になる。自動制御ではなく運転支援の場合にはカーナビゲーションと同等の精度である2ないし3m程度が判ればよい。

駐車場での駐車位置の確認や歩行者のナビゲーションといった用途も位置情報応用の重要な分野の一つである。これらの用途では人間と道路のサイズから考えて2~5m程度の精度が必要である。さらにナビゲーションの場合には移動しながらの利用を必要とするため、測位のリアルタイム性が重要である。

車両の自動制御[12]や精密農業[13]の分野ではさらに高精度な測位が必要である。この場合には自動車において5cm程度の精度が必要であるとされ、RTK-GPSおよびレーンマーカーの組み合わせのような方法でなければ不可能である。

もっとも高精度な用途としては測量が挙げられる。測量の場合には1点を測量するために静止し、しばらくデータを取ることが可能である。その精度要求は公共測量の場合には基線長が最大で500mと定められているため最大でも2cm程度の誤差である。RTK-GPSの場合には精密暦を利用できないため、その精度には限界があるが、この2cm程度の誤差での測位を行うことは可能である。

このように衛星測位を利用するアプリケーションにおいてもその精度はまちまちであり、要求は異なっている。これらの要求を大まかに4つの精度に分類したものを表2.4に示す。表のうち1から4の部分は現在のGPS単独測位およびD-GPS補正情報サービスで提供可能であるが、5から8の部分は現在のサービスでは精度が不足しており対応不可能である。本研究ではこの部分にも対応できるシステムを構築することを目標としている。

2.8. 社会基盤としての衛星測位システム

現在の日本において公共測量などに利用されている測地系は東京測地系と呼ばれるものである。この東京測地系は東京都にある日本水準原点を基準とし、三角測量を行った水準点によって構成される。しかしながら、この測量は明治時代に行われたものを基本としており、現在の天文観測や人工衛星からの測量によって構築された世界的な測地系とはずれが生じている。そこで、国土地理院では測地成果2000として新しい世界測地

表 2.4 位置情報の精度とその応用分野

| | 応用分野 | 精度(m) | リアルタイム性 | 必要な技術 | 現状 |
|---|----------------|-----------|---------|----------|----|
| 1 | 航法(洋上) | 20~50 | 必要 | GPS 単独測位 | 有 |
| 2 | タウンガイド | 10 | 必要 | D-GPS | 有 |
| 3 | 航法(沿岸) | 10 | 必要 | D-GPS | 有 |
| 4 | カーナビ | 10 | 必要 | D-GPS | 有 |
| 5 | 着陸補助(航空) | 3.9 | 必要 | D-GPS | 無 |
| 6 | 高精度ナビ (人,車) | 1~5 | 必要 | D-GPS | 無 |
| 7 | 自動運転 | 0.05~ 0.5 | 必要 | RTK-GPS | 無 |
| 8 | 測量 | 0.02 | 不要 | RTK-GPS | 無 |

系に基づいた測地系への移行を行っており、今後は測地成果2000に基づいた測地系を一般的に利用することになる[14]。

この世界測地系はGPSで利用されている測地系である WGS84とは最大でも数cm程度しか変わらないため、今後はGPSの観測によって得られる測位結果をそのまま利用することが可能となる。

そこで将来的にはGPSのような衛星測位システムは公共測量にも利用できる重要な社会基盤の一つになることが期待される。しかしながら現在のGPSではその精度に問題があるため、補正を行った上でなければ測量に利用できる精度を得ることができない。

国土地理院ではすでに高精度なGPS測位であるRTK-GPSを利用した公共測量について検証を行い、その成果として「RTK-GPSを利用する公共測量作業マニュアル」[15][16]という資料が公開されている。RTK-GPSを行うためには数多くの基準局の設置が欠かせないが、放送型サービスでは基準局の有効範囲と放送電波の到達範囲のミスマッチが起きるため、永続的な基準局として構築することが難しく、個々のユーザに対して必要な情報を提供できる仕組みが求められる。

2.9. まとめ

GPSに代表される衛星測位システムは地球上あらゆる場所でマーカなどの事前準備を必要とせずに絶対位置を得られるシステムであり、今後はますます広範囲での応用が期待される。しかしながら衛星測位は人工衛星からの電波を利用した測位であるため、その精度には限界がある。

衛星測位は現在の用途である航空機や船舶の航法などや地理的情報システム (GIS) といった分野で利用されている。今後は自動車や二輪車、歩行者のITS 応用や測量から農業にいたるまでさまざまな用途が考えられている。これらの応用にはそれぞれ必要とされる精度が違うが、現状の単独のGPSでカバーできるのは洋上での航法程度であり、それ以上の精度を求めるためには補正技術が必須である。

現在利用されている放送波を流用した補正技術では、比較的低精度な5~10m程度の部分をカバーするのみである。現状の補正技術は通信手段に依存しており、システムの変更はハードウェアの変更を伴うため、将来的なシステムの変化に対応できない。また専用のハードウェアは高価かつ大きなものとなり、二輪車や歩行者が持ち歩くためにはさらなる技術革新が必要である。

これらの欠点を補うために次章では汎用のコンピュータネットワークであるインターネットを用いて、衛星測位と同じ規模の全地球的な規模において衛星測位の補正を行うシステムを提案する。

第3章

インターネットを用いたGNSS補正システム

3.1. はじめに

GPSによる高精度な測位であるD-GPSやRTK-GPSを行うためには、基準局からの情報が不可欠である。基準局からの情報は補正データと呼ばれ、移動側のこの情報はリアルタイム性を必要とし、そのデータは通常の場合1秒に1回更新される。そのため何らかの通信手段を用いて補正データを転送する必要がある。現在、補正データの転送にはデジタルMCA(Multi Channel Access)無線を利用したものや、放送によるもの、携帯電話を利用するなどの手段がある。放送による補正情報の配布では、ユーザの要求に応じたデータの配布を行うことが難しい。また、予定されているシステムの拡張によるデータの増加に対応できず、現状のD-GPS補正データを送ることに特化しているものがほとんどである。放送システムをデジタル化などに変更するには、システム全体の変更が必要となりユーザはもちろんシステム側の負担も大きい。一方、GPS補正に関しても今後は衛星数が増加し、さらにサービスに関してもD-GPSに加えてRTK-GPSが一般的に行われると考えられる。しかしながら、現在行われているサービスではこれらの情報を提供することが困難である。

現在の日本で広域で利用可能なシステムとしては、中波ビーコンあるいはFM放送波に多重化して放送しているサービスが存在する。海上保安庁が運営する海上向け中波ビーコン波を用いたサービスはもともと海上向けに存在した中波ビーコン波にMSK変調によって補正データを多重化することによって行われている。2000年12月現在27の基準局によりネットワークが構成されており、一部の離島を除いた日本沿岸全域でサービスが提供されている。この中波ビーコンによる補正情報はビーコン局から200km程度のカ

バー範囲を持ち、海上はもとより陸上においてもD-GPS測位が可能である。

FM放送を利用したD-GPSサービスは(株)衛星測位センターが行っており、見えるラジオと同様のDARC形式でデータを変調して放送している。この方式ではデコード方法が公開されておらず、専用のデコーダを通さなければ補正情報を得ることができない。また、FM放送は一般に都市部のみのサービスとなっており、都市部であっても遮蔽物などの影響により小型のアンテナではデータのデコードに必要な電波を受けることが不可能な場合も多く、いつもD-GPSを利用できる訳ではない。

RTK-GPSに関してはこれらの局からのRTK-GPSのためのデータは提供されておらずごく一部の試験あるいは、限られた領域での利用に限られている。高精度な位置情報を得られるRTK-GPSは衛星数の増加によりその測位可能性や測位の速度が改善されることが見込まれており、今後は多くの需要が期待できる。RTK-GPSのためのインフラを構築するためには高帯域なデータ転送を広域で展開する必要があり、さらに狭いエリア毎に違う補正情報を提供する必要があるなど、キメの細かい情報サービスが要求される。

本章ではインターネットを用いた補正システムの提案を行い、既存のシステムとの比較やその特徴からシステムの有効性について述べる。まず最初にインターネットを用いたモバイル通信の特徴について述べ、ITSを始めとする実用分野におけるインターネットプロトコルの重要性および汎用性について述べる。次に高機能なGNSS補正サービスに求められる機能を示し、インターネットを用いた補正情報サービスの利点および欠点について述べる。さらに、これらを踏まえてインターネットを用いたGPS補正のシステムを提案し、設計および実装について述べる。

3.2. モバイルノードにおける通信

モバイルコンピューティングにおいて通信は非常に重要な要素となっている。携帯型端末は記憶容量やCPU速度の制限から、大規模なデータを内部に持つことが難しい。そこでデータを外部に蓄え、端末ではネットワークを通じてその情報を利用する手法が一般的である。このような機能は携帯電話をはじめ多くの携帯型端末で利用されている。これらの通信手段は有線での接続はもちろん、赤外線、無線LAN、携帯電話など多岐にわたる。現在の携帯型端末は複数の通信手段を有している。インターネットは世界最大のコンピュータネットワークであり、大型のサーバコンピュータから携帯電話、携帯端末に至るまであらゆるものが接続されている。将来は情報家電とよばれるコンピュータを内蔵した家電製品や自動車といったものまで接続が見込まれている。モバイル通信におい

でもインターネットは一般的に利用されており、無線、有線といった通信手段によらず、その内部ではインターネットプロトコルが利用されている。そのため、インターネットは今後の携帯端末を始めとする、可搬型コンピュータにもっとも適したネットワークであると考えられる。

モバイル通信やITS環境において、一つの通信手段のみならず複数の通信手段を利用することは、今後ますます盛んになると考えられる。無線によるLAN手段だけであってもIEEE802.11bのような高速なネットワークから、低速かつ近距離でしか利用できないが消費電力の少ないbluetoothのようなもの、あるいはPHSやIMT200のような次世代携帯電話を利用した通信まで複数のメディアが同居することが考えられる。ITSの場合にはさらに路車間通信や車車間通信における無線通信手段がいくつも提案されており、複数の通信メディアへの対応が重要な課題になる。

このような複数の通信手段を想定したシステムでは通信経路の仮想化が重要である。通信手段の仮想化により現在利用できるさまざまな通信デバイスは無線、有線を問わずに利用することが可能である。また今後でてくるであろう新しいデバイスに関してもアプリケーションの変更を行うことなく対応させることが可能になる。また複数のインターフェースをサポートし、その状況に応じて使い分ける事も可能となる。

インターネットを移動体環境で利用する場合の最大の問題点はその接続手段とともに経路制御の問題である。インターネットを動かしているIP(Internet Protocol)はそのネットワークが動的に変化することを想定していなかった。しかし現在ではmobile-IPなどの技術により、この経路制御の問題は克服されつつある。

現在、移動体環境で広範囲で利用できる通信手段は携帯電話あるいはPHSといった通信業者がサービスするものに限られており、これらは通信時間あたり、あるいは通信量あたりの課金となるため、移動中もつねに利用するのは難しい。しかしながら、無線通信サービスのコストも低減しており、今後もさらに低減が続くと考えられるため、将来的な問題になるとは考えがたい。すでに米国などでは通信量や通信時間に依存しない定額料金での無線ネットワーク接続サービスが行われており、日本でも同様のサービスが開始されることが期待される。これらをまとめたものを表3.1に示す。インターネットを利用することにより世界最大のコンピュータネットワークにそのまま直結することが可能である事も大きな利点である。現在利用しているコンテンツやシステムをそのままモバイルコンピューティングでも利用することが可能になることの利点は大きく、モバイル通信のコンテンツの発展も期待できる。インターネットに接続された端末は双方

| 名称 | 利用範囲 | 通信速度 | 課金 | 特記事項 |
|-----------|--------------|-----------|-------|--------|
| 携帯電話 | ほぼ全国 | ～28.8kbps | 利用量依存 | 高速移動可 |
| PHS | 都市部 | ～64kbps | 利用量依存 | 高速移動不可 |
| 無線LAN | 基地局設置場所付近 | ～11Mbps | 無料 | 独自の基準局 |
| デジタルMCA無線 | 基地局から20～30km | 8kbps | 一定料金 | 連続利用不可 |

表 3.1 モバイルノードの通信方式

向の通信が可能であり、一般のインターネットユーザから携帯端末へのアクセスが可能になる。そのため、動的な情報の取得が行えるなどの特徴を持つ。

これらの特徴により、通信手段の多様化、低価格化に従いインターネットはモバイルコンピューティングの分野においてももっとも普及する通信手段となることが期待できる。そこで本研究ではインターネットを用いた広域かつ高精度なGPS補正システムを提案する。

3.3. 現在の補正情報配信システムの問題点

現在のGPS補正システムは電波を用いた放送によって実装されている。放送を用いたGPS補正の特徴は大ユーザのサポートにある。一つの放送局の放送のエリア内では受信機を増やすだけでユーザを増やすことができる。ユーザ数がシステムによって制限されないため、多くのユーザをサポートできる。有効範囲はその放送形式により違うが、静止衛星を用いた放送の場合には、1つの放送システムで日本全域をカバーできる。補正情報の放送が行われている中波ビーコンの場合には、到達距離が200km程度であり海上ならばこの数値を満足するが、陸上の場合には遮蔽物などが存在するため、放送を受信できない、あるいは受信感度が悪い場合もある。FM放送の場合にはその有効距離は数十km程度であり、都市部に集中している。

これらのシステムには大規模な放送設備が必要であり、今後大きく展開する場合にはそのコストが大きなものとなる。地域ごとに放送用のアンテナが1つしか存在しない場合が多く、そのカバーエリアは完全ではない。

現在FM放送に多重化する形式で行われているGpexの場合には既存の放送局の設備を利用するが、FM放送の特性上都市部に集中しており、山間部などでの利用は難しい。またアンテナとDARCフォーマットの問題により、都市部であってもビル影などでは電波

の強度がデータのエコーに十分でない場合がある。このGPEXが運営するD-GPSサービスは主にカーナビゲーションを対象としており、現在では多くのカーナビゲーションシステムに内蔵されている。

さらに、現在提案されている航空機を対象としたサービスでは静止衛星を利用する場合にはその直接波を受信する必要があるため、観測地点において南の空がひらけている必要がある。また静止軌道は36000km上空にあるため、遅延時間が大きいことも高精度の補正情報配信では問題になる。

これらの放送型サービスでは、データの帯域が限られており多くの帯域を利用し多くの補正情報を提供するためには、放送のデジタル化を待つ必要がある。放送では帯域が増えてもそれぞれのユーザに専用の情報ではなく、いくつかの大きなユーザグループを想定したデータを提供することになるため、ユーザの位置にあわせたキメの細かい情報提供が困難である。そこで双方向通信手段を用いた、それぞれのユーザに適した補正情報を提供することが求められる。また、単一の形式の補正情報を用いる場合であっても、今後予定されている複数の通信方式はそれぞれ互換性がないため、何らかの形式で抽象化して扱う必要がある。特に自動車の分野ではITSとの関連で多くの種類の通信が提案されており、これらを統一的に扱うためにはInternet Protocolのようなデバイスの抽象化が必要であると考えられる。

次節では補正情報の特徴について考察することにより、新しい補正システムに求められる性能について議論する。

3.4. 補正情報の特徴

D-GPSやRTK-GPSに用いられる補正情報はその時々利用できる衛星数に応じて変化する。基準局は衛星ごとの補正値をユーザに転送する必要があるため、補足している衛星の数にデータ量が依存する。さらにD-GPS/RTK-GPSそれぞれでは利用する補正情報が異なるため、別の補正情報を必要とする。

補正情報を提供する基準局は観測局から物理的に近くにあることが望ましい。これは2点間での衛星の天空上での位置が近いため、大気や電離層の影響が近いと考えられるからである。D-GPSにおいては2点間の距離は通常200~500km程度であっても精度の大幅な劣化がみられないが、RTK-GPSの場合には2点間の距離が10km程度を越えると解が求まらず、精度のよい測位が行えなくなる。

補正情報のフォーマットとして一般的なRTCMは可変長のデータであり、タイプ毎に

表 3.2 衛星数と RTCM 補正データ量

| 衛星数 | D-GPS (ワード) | D-GPS (ビット) | RTK-GPS (ワード) | RTK-GPS (ビット) |
|-----|----------------|----------------|------------------|------------------|
| 3 | 7 | 210 | - | - |
| 4 | 9 | 270 | 19 | 570 |
| 5 | 11 | 330 | 23 | 690 |
| 6 | 12 | 360 | 27 | 810 |
| 7 | 14 | 420 | 31 | 930 |
| 8 | 16 | 480 | 35 | 1050 |
| 9 | 17 | 510 | 39 | 1170 |
| 10 | 19 | 570 | 43 | 1290 |
| 11 | 21 | 630 | 47 | 1410 |
| 12 | 22 | 660 | 51 | 1530 |

そのサイズは異なる。またそれぞれの衛星毎のデータを示す場合が多いので、捕捉できている衛星数に比例して増加する。RTCM 補正情報は1ワード30ビットで構成され、それぞれのメッセージ毎に2ワードのヘッダが付く。その後はメッセージタイプ毎に異なるデータが格納されるが、衛星毎のデータを格納するため、衛星数が増加するにつれメッセージの長さは増大する。表3.2に衛星数の増加にともなう、D-GPSあるいはRTK-GPS補正に必要なメッセージの長さを示す。通常の補正の場合には1秒間隔で1つのメッセージを送るため、この表に記述されるデータ量を毎秒伝送する必要がある。D-GPS用補正データはTYPE1を想定し、RTK-GPS用にはTYPE18を想定している。RTK-GPS測位に必要なTYPE19のデータサイズはTYPE18と同一となるため、RTK-GPSの場合にはこの表の2倍の量のデータが必要となる。表に示したようにRTK-GPSを行うためには、TYPE18および19のデータを伝送する必要があり、D-GPSに必要なデータ量の4倍以上のデータを伝送する必要がある。さらに通常のRTK-GPS運用ではTYPE18,19を用いた搬送波位相データの他に、D-GPSで利用するTYPE1およびTYPE3のデータを伝送することが多い。これはRTK測位が行えない場合や初期化段階においてGPS単独測位ではなく、D-GPS測位を行うためである。RTCMを用いたRTK-GPS測位ではRTK測位が不可能な場合には自動的にD-GPS測位へと切り替わる。そのため、実用上必要な

RTK-GPSでのデータ転送量はD-GPSの5倍を越える。

3.5. インターネット GPS 補正システムの設計と実装

3.5.1 インターネットを用いたGPS補正機構の提案

インターネットを用いることにより、高精度かつ高機能な補正サービスを行うことを目標としてシステムを提案する。本システムの目標は将来の衛星測位システムの拡張を考慮した補正システムを構築することである。本システムではユーザがそれぞれ、必要とする補正情報を要求できる仕組みを構築する。さらにプロトコルを拡張可能な形式で用意しておくことにより、今後の衛星測位システムの拡張に対応できるようにすることが必要である。

今後の衛星測位システムの拡張としては、ロシアの管理するGLONASSの利用が進むことが考えられる。EUが計画しているシステムであるGALILEOプロジェクトも進行している。米国政府によるGPSの新しい周波数の開放も予定されており、今後の補正情報は大きく増加することが考えられる。しかしながら、現在の補正システムはこれらのシステムの拡張を考慮しておらず、追従することが不可能である。

インターネットは世界中に広がるネットワークであり、誰もが自由に通信を行うことができるため、その上で構築されるサービスも同様にインターネットに接続されていれば、世界中どこからでも参照できる。このようなシステムの広域性は、今後の補正システムに求められる重要な機能の一つである。

また、今後の補正情報の配信に必要となる帯域はGNSSの拡大に伴い拡大することが明らかであり、基本的なシステムを変更せずにデバイスを進化させることで、追従できることは重要な要素である。

インターネットは双方向のコミュニケーションであり、放送などと違い、1対1の通信を行える。そのため、それぞれのユーザに特化した情報を与えることが可能であり、ユーザの位置によって違う補正情報を与えることが可能である。

インターネットを用いたGPS補正機構の特徴をまとめると以下のようになる。

1. **広域性:** 国境、電波到達範囲、政治、社会的問題などにとらわれない広域性を持つことができる。
2. **拡張性:** 今後GNSS環境はGPSのみならず、複数の測位システムを統合して利用

することが一般的になると考えられている。測位システムや衛星数の増加に対して対応することが可能である。

3. 双方向性: GNSS補正の方式は多岐に渡る。観測局の位置情報の概略を利用し、さらに高精度の補正情報を生成するシステムが開発されているが、これらに対応するためには双方向の補正機構が必須である。このような双方向性を持つ補正サービスは規模の拡大に耐えられないことがあるが、インターネットを用いることにより、多くのユーザが利用できる双方向サービスを提供できる。また、双方向通信を利用することにより、端末での計算処理を無くすことが出来る。端末においてデータ収集のみを行い、データをサーバ上で再計算することにより端末での負荷を減らすことができる。このような方法は端末のコストやサイズが限られる場合には有効であり、低コストな端末による動体管理が行える。また、サーバ上のアルゴリズムを変化させるだけで測位精度を向上できることも特徴となる。
4. 通信方式の多様化: 現在、モバイルコンピューティングでもっとも広く利用されるのは携帯電話やPHSといった通信手段であるが、今後はDSRCや赤外線、無線LANといったものを統合して利用することが考えられる。これらの複数の通信メディアをサポートし、ユーザの選択に応じた通信手段を利用した補正が行えることが重要である。

本研究では補正情報サーバとクライアントの間でメッセージを交換し、補正情報を伝達するような補正システムを提案する。

インターネットではさまざまな通信手段を用いることができるので、モバイルユーザの場所がどこであっても、それぞれの場合において最適な通信手段を利用できる。近隣に通信手段がある場合には、有線、あるいは無線LANを利用し、広域では携帯電話や無線インターネットサービスを利用することができる。モバイルユーザにおけるさまざまな通信が今後は仮想的にはインターネットに集約されることが予測できる。そのためインターネットを用いた補正システムは今後の補正システム構築において重要な役割を果たすことになる。

さらに、本システムは既存ユーザをサポートしたままの形で拡張や改造を行いやすく、過去のユーザと新しい機能を求めるユーザを同時にサポートすることができる。そのため、GALILEOなどの新しい衛星測位システムへの対応や、より進化した補正方法の登場に対し柔軟な対応を行える。

3.5.2 補正システムの設計

補正システムを設計するにあたり、インターネットを利用する場合に特有の問題点を解決する必要がある。インターネットを伝送路としてもちいる場合の問題点としては以下のようなものが挙げられる。

1. IP アドレスの動的な変更

モバイルノードにおいてIPアドレスは永続的なものではなく、常に変更がともなう。これはIPアドレスが物理的なネットワークに対してつけられているためであり、ネットワークを変更する度にIPアドレスが変更される。また、PPPの場合には一度切断されると同じアクセスサーバへ接続しなおしても同じIPアドレスが確保できるとは限らない。このような問題点を解決するためにMobile-IP[17]のような研究がなされているが現在のところ一般には利用されていない。そのためIPアドレスの動的な変更に対応できる必要がある。

2. 遅延時間の短縮

補正情報の鮮度は補正精度に影響を与える。鮮度が新しければ精度がよくなるため、遅延時間が短いことが重要である。インターネットでは経路の遅延時間は一定ではないが、起きうる遅延を最低限に抑えることが必要である。

3. データの消失

さらにインターネット特有の問題として、遅延やパケットロスの問題がある。遅延やパケットロスは現在のインターネットのバックボーンではほとんど影響を与えないが、ユーザとバックボーンを結ぶ回線の種類により大きな問題となることがある。例えば、携帯電話やPHSといったデータリンクを利用した場合には、電波の到達度合によってデータをロスする場合がある。また、データの保証が行われない場合にはデータの到着順序が変化する場合がある。そのような場合には古い補正情報が後から届くことが考えられる。

4. 大規模ユーザのサポート

社会基盤となるようなシステムを目標とするならば、多くのユーザが同時に補正情報を得ることができる必要がある。インターネット上のシステムでは多くのユーザが同時に一つのサーバにアクセスした場合にはシステム全体のパフォーマンスが低下し、データ遅延時間が大きくなる。そこで多くのユーザを同時にサポートするための機構が必要である。

5. 補正情報の分類と選択

補正情報をユーザの要求に従い選択するためには、ユーザは必要な補正情報を選択する必要がある。そのため要求メッセージに必要な補正情報の種類の選択を可能とする。不必要な補正情報の提供は帯域の消費のみならず、遅延の原因ともなるため除くことが望ましい。

6. FirewallやNATへの対応

基準局を構築する場合にその構築コストの削減やメンテナンス性の意味から、既存の組織内部に基準局を構築する意義は大きい。しかしながら組織内部のネットワークはインターネットに接続する場合にその接続を制限することが多く、FirewallやNATなどの方法を用いて外部との直接の接続性を制限することが一般的に行われている。そのため基準局から配布サーバへの補正情報配信においてはFirewallやNATに対応していることが望ましい。

7. 最適な補正情報サービスの発見

補正情報はその時に受信できる衛星に依存し、一つの補正情報サーバが世界中あらゆる場所で利用できる補正情報を生成することは不可能である。また、補正情報はその特性から移動局に近ければ近いほど補正精度がよくなることが知られている。そのためユーザは自分のいる場所の情報を元にしてもっとも近い位置にある補正情報サーバを選択する必要がある。

これらの問題点を克服するために基準局と移動局の間に配布サーバを設置するツリー構造のデータ配布方式を利用する。また、基準局と配布サーバ、配布サーバと移動局の間で異なったプロトコルを用いることによりそれぞれのネットワークの特性にあったシステムを構築する。

配布サーバを設置することにより多くのユーザからの要求を処理することができる。また、この配布サーバは複数の基準局からの補正情報を統合して、より高精度な補正情報を生成するシステムへの拡張にも適用できる。

基準局からのデータを配布サーバに伝送する場合にはそのネットワークは安定した有線ネットワークが想定できる。また、有線ネットワークは無線に比べ広帯域であることが多い。配布サーバはユーザの要求に答えるためには基準局からのデータをなるべく多く保持することが望ましい。基準局の設置をより簡略化するためには既存のLAN環境に統合できることが望ましい。しかしながら組織内部のLAN環境はセキュリティ上の問

題から外部との接続を制限することが多い。そのため、LAN 環境での外部との接続を考慮したプロトコルでなければならない。

一方、配布サーバと移動局の間の通信は携帯電話をはじめとする無線通信が主になると考えられ、その帯域は限られている。また移動局が必要とする補正情報は配布サーバが保持する情報のうち一部であると考えられるため、配布サーバから伝達する補正情報を選択することが重要である。

このように本システムの内部では基準局と配布サーバ間の上流と配布サーバと移動局間の下流では異なったネットワークが想定され、情報に対する要求も異なっている。そこで本システムでは上流と下流で違うプロトコルを利用する。

3.5.3 配布中継サーバを用いた補正情報の配信モデル

前節で述べた問題点を解決するために、配布中継サーバが受動的に動作するモデルである、受動的な中継点モデルおよび、複数の上流および下流を持つ配布ツリーを提案する。本モデルでは配布中継サーバに対して上流にあたる基準局および下流にあたる移動局がそれぞれ能動的に接続を行い、中間に位置する配布中継サーバはその接続を待つ。

データは上流においては基準局主導で転送され、下流においては移動局主導で行われる。これを配布中継サーバを合流点に見立て、合流点モデルとする。合流点モデルは上流と下流でそれぞれ異なったネットワークの性質を想定したモデルであり、それぞれの特徴に従って情報の伝達を行うことにより、上流、下流での異なった要求を満たす。以下に上流および下流の通信と中継点の特徴を示す。

- 基準局における通信(上流)

上流部分にあたる基準局の設置に関しては、電子基準点および専用線のように閉じた構成のシステムを想定することができるが、設置の負荷を低減するために既存の組織内部に設置することを考慮した設計を行う。このことによりネットワークのコストを低減させることができるが問題点として Firewall や NAT といったアクセス制御環境が挙げられる。そこで上流が合流点に対して主導権を持ち通信を行うことにより、アクセス制御された環境での通信を行う。

Firewall は外部から内部への侵入を防ぐことを目的としているため、外部である中継点(合流点)からの接続要求を組織内部に設置された基準局に対して行うことは困難である。そこで基準局から通信を行うことにより、Firewall を通過させることが出来る。このため、プロトコルとしてはサーバが主導権を持つサーバプッシュ方式

が望ましい。内部から外部に対するプロトコルはそのままあるいはポートを限って通過できる場合や、SOCKSなどのアプリケーションゲートウェイを利用した場合のみ通過できるといったことが行われている。本システムの上流部分ではSOCKSや制限されたポートに対応することが必要である。

- 移動体における通信(下流)

移動局がネットワークに接続するための手段としては携帯電話に代表される無線を用いたアクセスラインを用いることが多い。無線を利用したアクセスラインはその電波状況によりパケットの遅延やロスが発生しやすく、特に静止ではなく移動時の利用においてはその傾向は大きい。そこで、移動局と中継局との間の通信ではパケットロスや遅延時間の変動に対応しやすいUDPを利用したプロトコルが適していると考えられる。UDPを用いる場合のさらなる利点としてはコネクションを必要としないため、移動局のIPアドレスの変化に対応しやすいことが挙げられる。IPアドレスの変更があった場合には新しいアドレスを通知することにより、継続して補正情報を得ることが可能である。

- 中継点

中継配布サーバは受動的に動作し、上流からのデータ送信要求に対しては受信を行い、下流からのデータ受信要求に対してはデータを送信する必要がある。ここでは補正情報の蓄積、再配布、再計算を行うことにより規模の拡大や新しい補正情報の作成を行うことができる。中継点は複数の上流および下流を持つことが可能であり、下流からの要求に従い上流からのデータの一部あるいは全部を転送する。一つの中継配布サーバは複数の基準局からの補正情報を得ることができる。それにより移動局は一つの配布サーバに接続することにより、自分の要求にあった補正情報を得ることが可能である。

この中継点の特徴を元に具体的な配布構造となるツリーを想定する。図3.5.3において基準局(Base Station)はデータ収集用に設置したGPS受信機からのデータを元に補正情報を配布する役割を持つ。基準局は最低1つの配布サーバ(Propagation Server)あるいは移動局(Rover Station)を子とするツリーの頂点となる。

中継配布サーバ(中継局)は1つ以上の配布サーバ、あるいは移動局を下流ノードとして持つ。配布サーバは基準局からのデータを別の配布サーバ、あるいは移動局へと配布するために存在する。この配布サーバ上では配布局から伝達されたデータがすべて保持

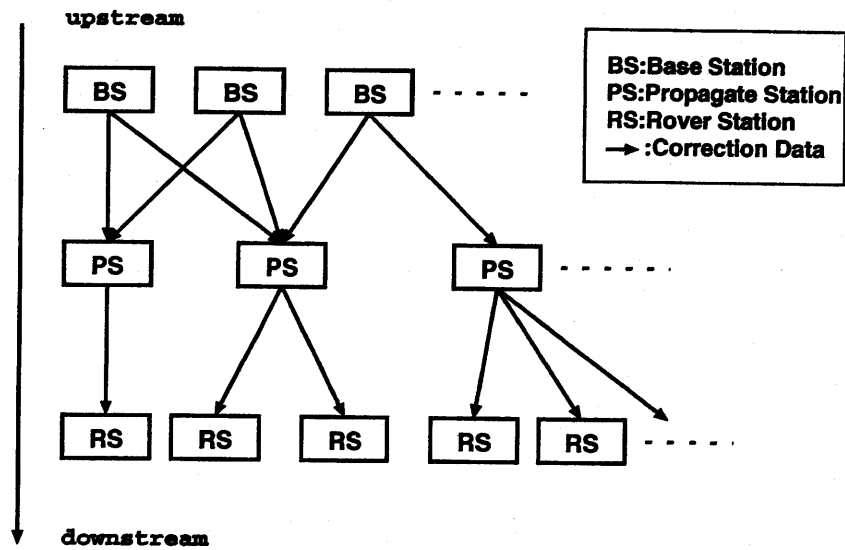


図 3.1 補正情報配布ツリー

されており、移動局からの要求に従い、必要なデータを配布する。

同様に基準局は複数の中継局に対して補正情報を配布することができる。同じ基準局からの情報を利用して複数の中継局や、再計算局を構築することが可能となる。そのため、サービスの種類や範囲に応じた配布局を容易に構築することが可能となる。

補正情報の特性から一つの配布局において補正情報の選択を行う場合、数千キロを越える遠距離の基準局からの情報は必要としないことが多い。基準局はそれぞれの配布局のカバー範囲を想定して補正情報を配布することにより地域毎の情報を持つ配布局を構築することができる。

複数の配布サーバを用いたデータの複製により、一つの配布サーバあるいは基準局の負荷を増加させずに、多くのユーザのサポートが可能になる。

全てのクライアントが直接基準局にアクセスする場合には非常に大きなトラフィックを生み出すことがある。このような場合にはネットワーク帯域やサーバ能力を使いきってしまいユーザの期待する補正情報が必要とされる時間内に届かない。

RTCMをそのままヘッダ無しに送ることを考えた場合、1.5Mbpsの帯域を利用すると仮定すれば以下のような試算が行える。表3.2より RTK-GPSを行うために場合には12衛星で4kbpsのデータが必要であり、同時に384本の接続を持つことが可能で

ある。この1/2程度のデータ量であれば、0.5秒以内に転送が終ると仮定し、必要な遅延時間を満足していると考ええる。この場合には一つの配布サーバがサポートできる量は192局である。よって理想的なサーバを構築した場合には1.5Mbpsの帯域を想定し、およそ200局の下流サーバへのデータ転送が行えると考えられる。D-GPSの場合には必要な帯域は1/5程度に削減されるため、1000局を1つのサーバからサポートすることが可能となる。

しかしながら基準局のネットワーク環境は基準局の設置場所に依存するため、多くのユーザをサポートできる広帯域のネットワークを利用できるとは限らない。そこで、基準局は広帯域のネットワークを利用できる場所に設置した配布サーバへデータを転送することとし、基準局が直接ユーザへのデータを転送しないようにすることで、このようなアクセスの集中による性能の劣化を防ぐ。前述の計算によれば配布サーバ10局にRTK-GPSのためのデータを伝送するためには40kbpsの伝送路が必要である。この帯域は現在一般的なデジタル通信であるISDNで利用できる64kbpsの帯域よりも小さい。

インターネットを用いた移動体環境での補正情報の取得を行う場合の問題点を解決するために配布中継サーバを用いた合流点モデルを提案した。次節では本モデルに従い、補正情報配信のための通信プロトコルを設計することにより問題点の解決を行う。

3.5.4 補正情報配信プロトコル

基準局(Base Station :BS)と配布サーバ(Propagation Server: PS)を結んだネットワークを構築する場合にはTCP[19]を用いたプロトコルを利用し、配布サーバ(PS)あるいは基準局(BS)と移動局(Rover Station :RS)の間を結ぶためのプロトコルとしてはUDP[20]を用いたものを利用する。これは、前述した通り基準局と配布サーバの間のネットワークとしては有線を利用したものが想定され、安定したリンクが提供できるからである。また、移動局のネットワーク接続は携帯電話など移動体通信を利用したものが想定され、そのリンクは不安定であり、移動によって切断される可能性もある。また、帯域も有線での接続に比べ限られていることが多い。そこで移動局への補正情報配布にはUDPをベースとしたプロトコルを構築した。

補正情報はその特性として、鮮度が重視されること、補正情報を生成する基準局と利用する移動局との距離が近ければ近いほどよいことが挙げられる。

1. 基準局 - 配布サーバ間プロトコル

基準局と配布サーバの間で利用するプロトコルであり、TCPをベースにしたサー

バプッシュ方式で補正情報を伝達する。

BSは基準局用の受信機とネットワーク接続を行う計算機から構成される。24時間の安定運用を行うため、BSはLAN上あるいは専用線で接続されることを想定している。そのため高速かつ安定した回線を利用できると考えTCPを利用する。

またBSを多くの場所に設置することを考慮して、組織内部のLANに接続することを考慮する。現在のインターネット環境では、セキュリティ上の観点から、組織外から内部に対しての直接の接続は行えないことが多い。また、組織内LANはインターネットと接続する場合にはFirewallとよばれるセキュリティ保護システムを使うことが一般的である。このFirewallを通過するためには特定の組織によって定められたポートを利用する、あるいはFirewall通過のためのアプリケーションゲートウェイを通過するといった必要がある。現在、もっとも一般的に利用されているFirewall用アプリケーションゲートウェイはSOCKS[21]である。SOCKSを利用することにより、組織内部から外部への接続を行うことが可能である。

そこでこれらの理由によりBS-PS間プロトコルでは組織内部に存在するBSからPSに対して情報を送るサーバプッシュを利用している。SOCKSに対応したシステムを構築し、サーバプッシュを利用することにより組織のインターネット接続の一部を利用して基準局を構築できる。さらに厳しいゲートウェイの場合にはゲートウェイ上に中継サーバを置くことにより中継することが可能となる。この場合中継サーバはサーバプッシュおよび要求受け付けのどちらの形態もとることが可能である。

BS-PS間のプロトコル(RSNP: Reference Station Network Protocol)を以下に示す。RSNPはTCPを用いた行指向のプロトコルであり、ASCII文字を用いた可読性の高いコマンド行とデータ行から構成される。

• HLO [PROTO] [TYPE] [STID]

HLOには基準局IDおよび配布データの種別を記述する。PROTOにはプロトコル名およびバージョンであるRSNP/1.0の文字列を入れる。TYPEフィールドはデータの種別を表すものであり、RTCM形式のデータをそのまま利用する場合にはRTCM/RAWという名前を指定する。現在他のデータ種別は存在しないが、今後のシステムの拡張とともに新しい種別を混在させることが可能である。STIDは基準局を示す整数列であり基準局毎に固有の数字を持つ。STIDと基準局の位置や能力、保持するデータの種類の対応は本プロトコ

ル外で解決するものとする。

- **OK [PROTO]**

HLOメッセージをうけた中継局はそのデータをうけとる場合にはOKメッセージを返す。OKメッセージをうけた基準局はデータの送信を開始する。データを拒否する場合にはTCP接続の切断を行う。PROTOフィールドは送られてきたHLOと同様のものが入る。

- **MSG [TYPE] [LEN]**

MSGメッセージは補正情報毎に付与されるメッセージである。OKメッセージをうけた基準局は補正情報をMSG行とともに受信側に伝送する。TYPEフィールドはHLOで利用するものと同様のものが記述される。RTCM/RAWの場合にはメッセージの終端が改行コードで区切られているが必要な場合にはメッセージのバイト数を記述することができる。メッセージのバイト数が記述されていない場合には改行コードまでを1つのメッセージとして読み込む。

コネクションが確立できない場合および切断された場合にはインターバルタイムを経た後に再度基準局からプロトコルをスタートする。連続してコネクション確立に不成功する数がシステム設定に記述された回数を越えた場合には基準局サーバは停止し、オペレータの操作を待つ。

2. 配布サーバ - 移動局 間プロトコル

配布サーバと移動局の間で利用するプロトコルでありUDPをベースにした要求応答方式で補正情報を伝達する。本システムではパケットロスによる遅延の増大を防ぐためユーザへのデータ配信プロトコルとしてデータグラム通信であるUDPを採用した。観測を行う移動局では主に無線を利用したデータリンクを使用することが想定される。携帯電話に代表される広域で利用可能な無線データリンクはノイズ等の影響を受けやすく、パケットロスを発生させやすい。UDPではパケットロスによる補正情報の欠落が起きるが、本システムでは補正情報の完全性よりも新鮮さを重視し、再送処理を行わずに次の補正情報を待つ。GPS受信機は通常の設定では、新しい補正情報が到達するまで最後に到着した補正情報を使い続けるので、サービス上の大きな問題は発生しない。

しかしながら、コネクションの確立などの処理が必要ないため、帯域の限られた、不安定なリンクでは有効である。特に携帯電話などでは、一度接続が切れた後、自

動的に復旧する場合に同じIPアドレスが割り振られるとは限らない。そのため、TCPを用いていると、データリンクが切断されるたびにTCPのコネクションを確立しなおす必要がある。UDPの場合には、データリンクが復旧した後に、再度リクエストを出すことにより、新しいアドレスに対してデータを送る。本プロトコルは以下のようなメッセージを持ち、サーバ、クライアント間での通信を行う。

- **LST [OPT]**

中継サーバが持つ基準局あるいは補正情報のリストを提供する。OPTには基準局IDを指定する。OPTを指定した場合にはその基準局が持つ補正情報のリストを返し、OPTを指定しない場合には配布サーバが持つ基準局のリストを返す。

- **GET [DATATYPE] [SVR] [OPT]**

補正情報メッセージを要求する時にクライアントがサーバに対して発行する。セッションの開始時に送られる。DATATYPEにより補正情報の種類を指定することができる。現在の実装ではRTCM/RAWが定義されている。SVRフィールドには基準局IDを挿入し、補正情報を持つサーバを選択する。RTCM/RAWの場合にはOPTIONフィールドに要求するRTCMメッセージのタイプと間隔を指定することにより必要な情報を選択することができる。SVRおよびOPTに記述がない場合にはそれぞれ、配布サーバの設定よりデータを提供する。タイムアウト時間がくる前に同じ要求を行うことによりタイマーをリセットすることができる。これを繰り返すことにより連続して補正情報を受け取ることができる。

- **DATA [TYPE] [SIZE]**

補正情報メッセージであり、次行に実際の補正情報を含む。GETメッセージを処理した後に発行され、一定のタイムアウト時間に達するまで自動的に送り続けられる。データのインターバルはユーザによる指定あるいはサーバ上の設定により決定する。TYPEフィールドにはデータタイプが入り、SIZEフィールドにはデータのサイズが含まれる。これは補正情報として行単位ではないデータが生じる可能性があるからである。

本プロトコルではRTCMメッセージはエンコード状態のまま送られる。これはRTCMメッセージの内部には補正情報の生成時間やシーケンス数が含まれるため

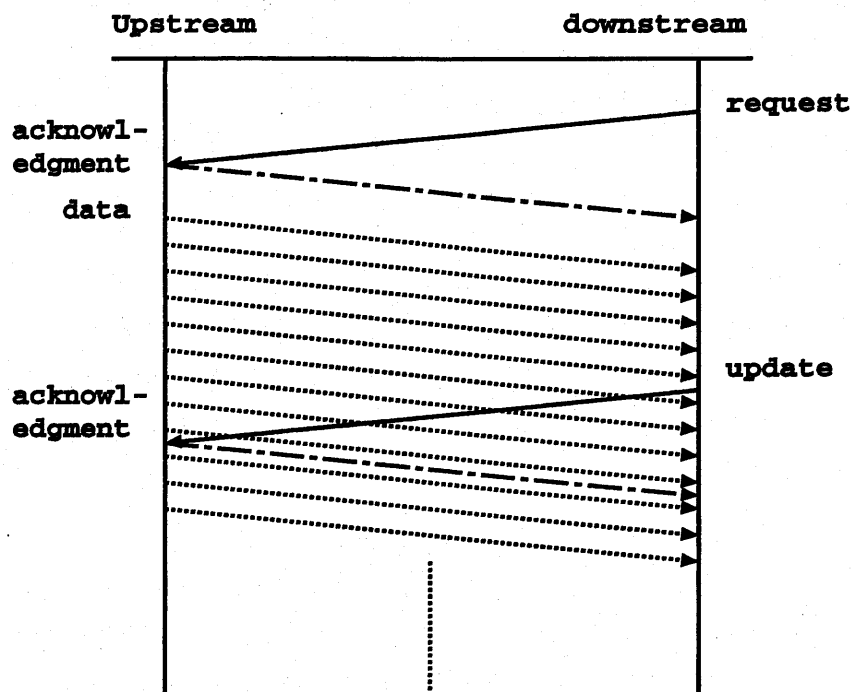


図 3.2 サーバ/ユーザ間データ転送

である。今後の拡張に伴い、他のデータタイプを転送する場合には RTCM 要求のメッセージではなく、他タイプを要求するメッセージを利用することにより複数の種類のメッセージが共存することを可能とする。

PS と RS 間のデータ転送シーケンスを図 3.2 に示す。本プロトコルでは最初にクライアント (RS) は上位のサーバ (PS) に対して転送要求の packets を送信する。サーバは転送要求を受けるとクライアントに対して 1 つの補正データを 1 packet とする形式でデータを送る。このときの補正情報の転送頻度はサーバ側で生成された補正情報に依存する。サーバ上ではクライアント毎にある一定のタイムアウト時間を設け、その時刻が来れば各々のクライアントに対する補正情報の提供を停止する。そのため、継続した補正情報を要求する場合には、クライアントはタイムアウト時間に達するまでに転送要求を送る必要がある。BS と PS 間や BS と RS 間においても同様の手順にてデータ送受信を行う。

タイムアウト時間を設けることにより、クライアントの接続しているネットワーク

に突然の切断が起きた場合にも、自動的にデータの転送が停止する。またクライアントが再度接続する場合に、ダイヤルアップ接続のやり直しや通信メディアの変化、ローミングによる接続セグメントの変化などでIPアドレスが変化した場合にも再度補正情報のリクエストを行うことにより追従できる。

以上のようなプロトコルを用いることにより、インターネットを補正情報の配信に用いた場合の問題点を解決することができる。基準局用のプロトコルとしてはFirewallを通過することを主眼としてTCPをベースにしたサーバプッシュ型のプロトコルを利用する。これにより基準局を別用途のために用意したLAN環境に統合することが可能となる。移動局用のプロトコルではUDPを基本としたタイムアウト処理を伴うプロトコルを設計した。基本プロトコルとしてUDPを用いることにより再送処理などを省くことができるため、回線状態の劣化にともなうパケットロスや遅延時間の増大に対応できる。またUDPを用いるためIPアドレスの変更があった場合にも新しい要求を行うだけで追従できるため、IPアドレスの変更が発生しやすい移動体通信環境においては有利であると言える。

3.5.5 配布局および補正局の選択

移動局は配布局および補正局を選択し、もっとも条件のよい配布サーバから補正情報を得ることが望ましい。補正情報は補正局と移動局間の距離である基線長の長さおよび補正情報の鮮度に従い劣化する。

そこで移動局では単独測位の結果をもとに補正局および配布サーバを選択する。この配布サーバの選択をおこなうためのリストは別途管理を行う必要があり、以下のようないくつかの方法が考えられる。

- 集中管理を行う方法

集中管理されるデータベースに対して基準局および中継配布サーバを登録する。このエントリを検索することによりもよりの基準局を知ることが可能である。データベースのコピーを自動的に作成し、複数のサーバでの検索を可能にすることにより対故障性や検索時間の短縮に役立てることができる。エントリを登録することが必須であり、データベースの規模が大きくなると検索時間が長くなることが問題である。

- 複数のデータベースを用いる方法

地理的あるいはネットワーク上の位置に基づき、データベースを分割する。それぞれ

れのマスターとなるデータベースの位置とその登録範囲に関する情報を交換することによりデータベースの検索速度を向上させることができる。複数のデータベースを横断的に検索する場合には検索時間が長くなる可能性がある。また、現在の位置やネットワークに適したデータベースを探すことが困難である。

- 分散型の検索を用いる方法

それぞれの配布サーバが情報を持つ基準局のリストを配布する。配布サーバ間での通信を行うことにより、ユーザは一つの配布局に到達することができれば、より適した配布局を知ることが可能となる。配布サーバが交換しなければならない基準局リストのデータが大きくなる可能性があることや、現在位置に応じたサーバの情報が接続している配布サーバ上には存在しない可能性がある。また、すべてのサーバを知っているという保証がないため、発見した配布サーバがそのシステム中で最適であるとは限らない。

これらの検索手法に共通の問題点はネットワーク上の位置と物理的な基準局の位置を対応付けることが困難である点であり、地理的な位置情報を検索キーとするデータベースの構築が必須である。本システムにおける補正情報提供サーバの発見やそのサーバ上で提供される補正情報の種類などの情報は別途データベースを検索することとし、本提案プロトコル内部では取り扱わない。

3.5.6 システムの設計と実装

以上の考察に基づき有効性を検証するために本システムの実装を行った。システムはオペレーティングシステムとしてFreeBSD(Version 3)を用い開発言語としてPerl(Version 5)を用いて実装を行っている。

基準局において補正情報を生成するためのGPS受信機はRTCM形式のデータを生成する必要があり、本実装では一つの制御ポートおよび一つのRTCM情報ポートを持つことを想定している。基準局でもっとも重要な点は補正情報として十分なRTCM情報を生成できることと、アンテナの設置環境である。可視衛星の数はアンテナの設置環境により変化するが、基準局で観測できない衛星は移動局においても補正に対して利用することができない。そのため、アンテナ設置場所の上空の見通しがよいことは基準局の設置上重要である。

受信局では主としてノート型パソコンを利用することを考慮し、GPS受信機はRTCMデータの入力ポートと測位結果の出力ポートを同一のものと想定している。そのため、こ

のような設定が行えない受信機は利用することができない。ほとんどのGPS受信機は設定によりこの制限を満たすことが可能であり、ノート型パソコンと小型のGPS受信機およびアンテナを利用することによって、自動車を始めとする移動体環境においても計測実験を行うことができる。

配布局はネットワーク上にのみ存在し、再計算などに必要な場合を除き、GPS受信機を必要としない。想定される下流クライアントの数に応じたネットワーク帯域を保持する必要があり、それに十分な性能の計算機が必要である。

本システムを実装するにあたり、以下のような点を考慮し実装を行った。

- **RTCMの連続性**

補正情報としてRTCMメッセージを利用する場合には、補正情報の連続性が問題となる。これはRTCMメッセージに含まれるパリティを生成するために、前の補正メッセージの最後尾の文字列を利用するためである。そのためデータが欠落した場合には、そのデータ分のみならず次回のデータに関してもパリティエラーとなり利用することができない。また、補正情報を選択的に利用する場合には、不連続なデータとなるためエラーが慢性的に生じてしまう。これらの問題に対応するため、前回のRTCMメッセージの最終文字列を保持し、到着データのパリティを再計算することによりパリティエラーを回避している。

- **IPアドレスの変化**

携帯電話を用いたPPP接続の場合には回線が再接続された場合には一般に、違うIPアドレスが割り当てられる。そのため補正情報を受けるためには再度の補正情報要求が必要である。自らのIPアドレスをチェックし、変更があった場合にはタイマの値に係わらず補正情報要求のメッセージを送り、新しいIPアドレスに対して補正データを要求する必要がある。そこで前述したようにタイマを用いた管理を行っている。本実装では配布サーバは20秒のタイマを持っており、クライアントは15秒おきに新規の補正情報要求を行うことにより連続的な補正情報の入手を可能にしている。

- **補正情報の選択**

前述したようにRTK-GPSとD-GPSとでは必要とされる補正情報の種類が違うことや補正情報の鮮度により精度が変化するため、ユーザは通信コストや回線の帯域幅を考慮した上で必要なデータの種類と間隔を指定することができる。この機能を

満たすためにはRTCMデータの内部構造からその種類を抽出する必要がある。

- **配布サーバと基準局の統合**

下流となる移動局の数が少なく、基準局が持つ帯域に対して大きな影響を与えない場合には、基準局用コンピュータに配布サーバの機能を統合することが可能である。この場合には基準局と配布サーバ間の遅延が短くなることが有利な点である。本研究においてもD-GPS補正およびRTK-GPS補正実験は統合された基準局を利用して実験を行っている。

- **配布局データベース検索**

配布局のデータベースおよびその検索はシステム規模の問題より本システム内部には含まない。今回の実装では設定ファイルを利用し、配布局の選択を行う。

以上のように実装をおこなったシステムを用いて実験を行った結果を次章以降に示す。

3.6. まとめ

本節ではインターネットを用いた補正情報配布システムの設計および実装について述べた。インターネットを用いた補正情報配布の利点は以下の通りである。

- 移動局のユーザは一般的な通信手段と一般的なモバイルコンピューティング手段にてアクセス可能であり、特殊なシステムを必要としない。
- データリンク技術の進化に対応できるため、将来的な通信手段の変化や衛星数の増加にともなう補正データ量の増大に対応できる。
- 現存するネットワーク技術であり、すぐに実用可能である。
- 双方向の通信手段として利用できるため、ユーザからの要求を伝えられる。そのため、補正情報の種類や頻度、現在位置に即した補正局の選択などを行える。また、観測データを移動体から基準局に伝送することにより、基準局上ですべての処理を行い、移動体側に必要とされるシステムを低減させることが可能である。このような方法を用いることで、多数のシステムを扱う移動体管理を行うことが可能である。
- 回線容量の許すかぎり大きなデータを送ることが可能である。そのため広域での補正局ネットワーク構築が容易かつ低コストで行える。

インターネットを利用した補正情報の配信における問題点を解決するために基準局と移動局の間に配布局を置く機構を提案した。さらに基準局 - 配布局間のプロトコルとしてTCPを用いたサーバプッシュ型のプロトコルを提案し、Firewallを通したデータ転送を行えるようにした。基準局や中継局といったサーバは有線による安定したネットワーク接続を想定できる。Ethernetに代表されるLAN技術は高速かつ高品質なデータリンク技術であり、情報のロスはないと考えてよく、TCPを用いたデータ転送に向いている。また、配布局 - 移動局間のプロトコルとしてUDPを用いたクライアント主導のプロトコルを提案し、ユーザからの要求に従った補正情報の入手を行えるシステムを構築した。現在の携帯端末でのインターネット接続は携帯電話やPHSといったサービスが主であり、これらの通信手段は通常のネットワーク接続に比較し、低帯域である。UDPは再送などの信頼性を保証する処理を行わないが、遅延時間が少なく、帯域の消費も少ない。そのため低帯域のネットワークでリアルタイム性を求めるアプリケーションに向いている。また補正情報の特性から、データが欠落した場合には再送を行うよりも次のデータを待つことがよいと判断したため再送を行わずに次に到着したデータのパリティを再計算して整合性をとっている。

同じデータを転送するために2種類のプロトコルを提案しているのはそれぞれの場合においてデータリンク層の品質や要求される情報の種類が異なるためである。基準局-配布局間の情報配布ではなるべく多くの情報を提供することが望ましいのに対し、配布局-移動局間の情報配布においては、移動局で必要なデータのみを配布することが望ましい。次章以降では、本システムを元にさまざまな実験を行った結果を示す。

第4章

インターネットを用いたD-GPS/RTK 補正

本章ではインターネットを用いた補正情報配信とその結果について述べる。また、これを利用した測位についての精度についても評価し、移動体への適用例も示した。

4.1. はじめに

GPSは簡単に位置情報を得られるためカーナビゲーションなどをはじめ広く普及しているが、その測位精度はSAの環境下では100m程度、SAの解除された状態においても長時間観測を行えば20mから50m程度となる。D-GPSはコード測位における疑似距離を補正する手法であり、受信機の対応が簡単であるにも係わらずSAの条件下では10倍以上の精度向上が望めたため、多くの受信機がその機能を搭載している。SAが解除された現在でも安定した測位結果が得られるため、その重要性は失われていない。

前述したようにD-GPSのサービスはFM副搬送波や中波ビーコンによって行われているが、これらのサービスが利用できる範囲は限られており、さらに専用のデータ受信装置が必要である。FMによるGpexサービスの受信機は基本的にカーナビゲーションが目的のサービスであるため単独の受信機としては手に入りやすく、ライセンス料が必要なため、同様のサービスであるFM文字放送受信機に比べて高価である。

また、中波ビーコンはライセンス料などは必要ないが、受信機が特殊であるため一般には手にはいりにくく、通常のカーナビゲーションなどで利用することは少ない。

インターネットを利用すれば、携帯電話やPHSといった一般に普及している通信手段を用いることにより誰もが補正情報にアクセスすることができる。サービスを提供するシステムにもユーザ数を考慮したモデムや無線機といった設備や、放送のための免許や

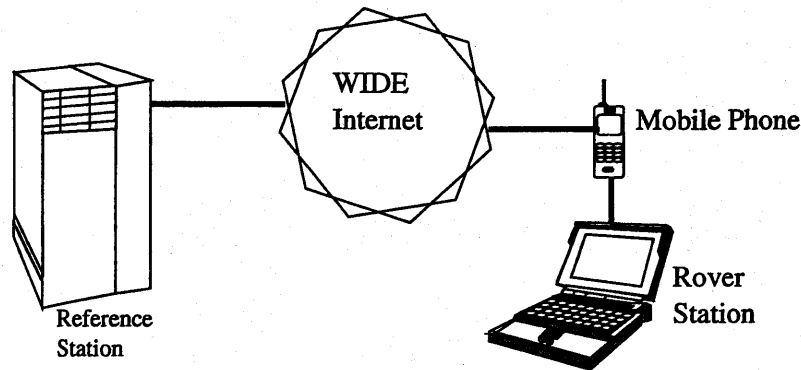


図 4.1 システム構成

放送設備といったものが必要なく、サービス提供のためのコストも低く押えることができる。また、中波ビーコンやFM副搬送波に比較してデータレートが高いため、補正情報の量を増やすことが可能であり、その遅延時間も減少することが期待できる。

4.2. インターネットによるD-GPS補正システム

4.2.1 システムの構成

本実験で用いたシステムの構成を図4.1に示す。システムはモバイルコンピューティングを行うユーザの移動局(Rover Station)と基準局(Reference Station)の2つで構成されている。本システムでは下流ノードからの要求に従い、上流ノードが補正情報を提供する。それぞれのノードの動作を以下に示す。

基準局(Reference Station) 基準局はあらかじめ測量されたGPS受信機を持つ。GPS受信機により生成した補正情報を下流ノードからの要求に従い転送する。下流ノードには配布局あるいは移動局が相当する。

移動局(Rover Station) 移動局は任意の配布局に対して自分の必要とするデータの要求を行う。ユーザは配布局より得たデータを用いて補正を行うことができる。

これらのシステム間では常に下流ノードからの要求によりデータの配信が行われる。配信要求を行うことで粒度の細かい補正情報の配信を可能にし、移動時の利用に適応す

る。下流ノードにあたる移動局からの要求に補正情報の種類や間隔を指定し、移動局毎に必要な補正情報のみを取り出すことが可能である。

移動局はノートパソコンおよびPC-UNIXの一種であるFreeBSDを利用している。ネットワークへの接続は主に携帯電話を用いたが、一部の実験ではPHSやEthernetも利用している。このように必要に応じて移動局が接続するネットワークを構築する媒体を変更できることは、提案するシステムの特徴の一つである。

補正情報は1秒間隔で基準局において生成され、要求に応じて提供される。移動局では測位結果を1秒間隔でハードディスクに記録した。

4.2.2 補正情報の配信

配信局はユーザからのリクエストを元に最適な補正情報を選択しリクエストされた方法で配布を行う。ユーザからのリクエストには補正前の位置情報や必要とするサービスの種類、補正情報の間隔などを含めることが可能である。リクエストに単独測位による位置情報を含むことにより、配布局は移動局のおおまかな位置を知ることができる。このおおまかな位置を利用することにより、配布局は最適な補正情報を選択し移動局へ配信することができる。また、リクエストには情報の配布間隔やD-GPSあるいはRTK-GPSといったサービスの種類を記述することにより、ユーザは自分の欲するサービスを選択することが可能になる。

これらの情報はインターネット上でのコネクションレス型通信方式であるUDPを用いて、通信を行っている。UDPはデータ到着の保証を行わないが、再送処理などを行わないためデータの処理にかかる時間が少ない。そのためリアルタイム性の必要とされるデータに向いている。基準局が提供する補正情報の形式は世界的な標準規格であるRTCM-SC104形式[22]を利用している。そのためユーザはモバイルコンピュータのシリアルポートに出力されるデータをそのまま一般的なGPS受信機の補正情報用シリアルポートへ入力することができる。

それぞれの通信では、データを要求する側がリクエストを出しそれに対して返答を一定時間の間行うこととする。デフォルトの設定ではリクエスト毎に1秒間隔で補正情報を30秒間転送する。移動局はタイムアウト以前に再度要求を行いタイマをアップデートすることにより連続して補正情報を得ることが可能となる。

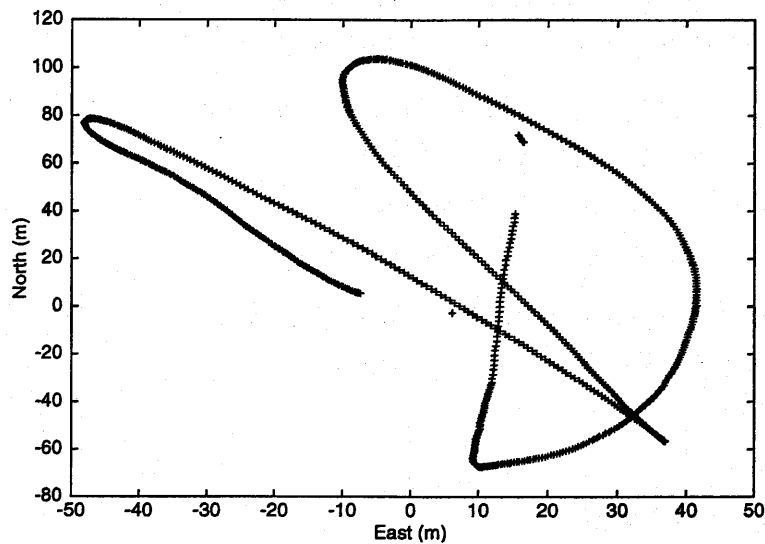


図 4.2 静止点における単独測位(SA有り)

4.3. 実験および考察

インターネットを用いたD-GPSサービスの実用性を検証するために実験を行った。本章ではその結果について述べ、さらに従来のサービスとの比較を行い、考察を行った。

4.3.1 静止点におけるD-GPS測定結果

慶応大学湘南藤沢キャンパス内(神奈川県藤沢市)に設置した基準局を利用し、奈良先端科学技術大学院大学キャンパス内(奈良県生駒市)でD-GPSの観測実験を行った。本実験における基準局と移動局の間の距離はおよそ350kmである。

インターネット接続としては先端大からWNOC-NARAを経由しWNOC-SFCに接続している。基準局はWNOC-SFC内部に設けられており、100Mbpsのイーサネット接続されている。

移動局は携帯電話あるいはPHSによって接続されており、それぞれ9.6kbpsあるいは32kbpsのスピードで奈良先端大内にあるアクセス回線へと接続している。

図4.2にSA解除前の静止点における単独測位の結果を、図4.3にSA解除後の静止点における単独測位の結果を、図4.4に静止点におけるD-GPS測位の結果を示す。観測時間はSA有りの単独測位が約10分、SA無しの単独測位およびD-GPS測位が約15分である。

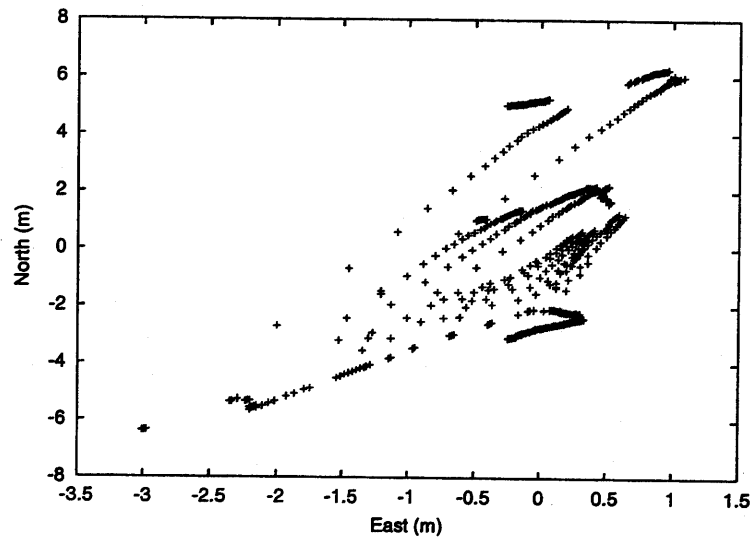


図 4.3 静止点における単独測位(SA無し)

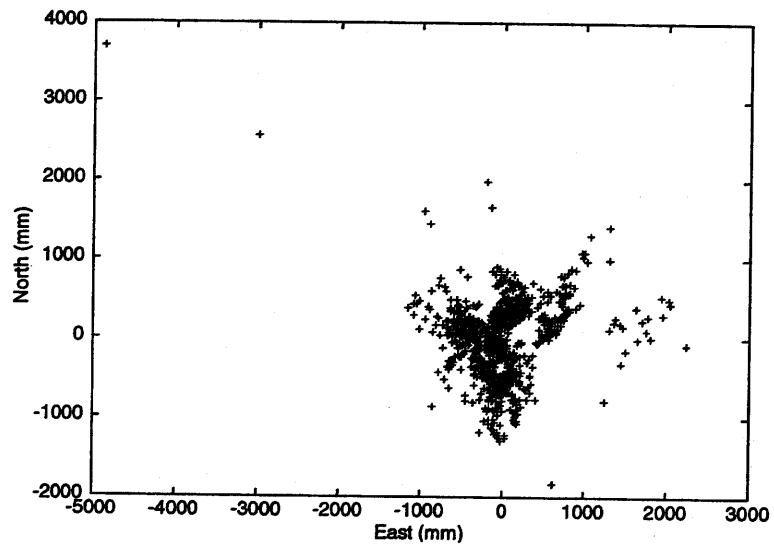


図 4.4 静止点における D-GPS 測位

| 状態 | 2drms |
|---------------|-------|
| 単独測位(SA有り) | 118.0 |
| 単独測位(SA無し) | 6.1 |
| D-GPS測位(SA有り) | 1.3 |

表 4.1 単独測位と DGPS 測位の比較

それぞれの2drmsでの評価を表4.1に示す。2drmsとはGPSの評価に用いられる値であり、測位結果の平均値を中心にこの半径の円を描くと95%以上の点が含まれる[23]。単独測位の場合には衛星の移動とともに観測点が徐々に移動しており、SAのある場合には15分の観測において118mの精度しか得られないのに対してSAがなくなった場合では6.1mが得られている。D-GPSによる測位を行った結果はSA存在下の基線長が350kmの条件で2drmsにおいて1.3mの結果が得られた。この結果によりD-GPSを用いることでSAの環境下では90倍以上の改善が見られ、SAのない場合であっても2drmsにおいて4倍以上の精度の改善が見られている。この結果によりインターネットを用いた補正を行うことにより表2.4における6までの部分で有効であることが判る。特に6のカテゴリに属する高精度なナビゲーション用の補正は現在提供されている補正情報では満足することが難しいが、本研究で提案するシステムでは実現が可能である。

D-GPS測位における時間との関連を図4.5に示す。この場合の衛星捕捉数の変化および、DOP(位置の精度低下率)の変化を図4.6に示す。さらに、図4.7D-GPS補正情報の遅延時間の分布を示す。遅延時間はGPS受信機の測位結果の出力より得られたZ-COUNTの値を利用している。Z-COUNTは測位時刻と補正情報に含まれるタイムスタンプの差から計測されており、1秒間隔で表示される。この値は基準局でのデータ生成時間およびデータ伝送時間、移動局でのGPS測位に必要な時間を含んでいる。

これらの3つのグラフから考察すると精度が大きく変化する場合にはDOPおよび補正情報の遅延時間が大きくなっていることが判る。400秒付近を観測することにより、補正情報の遅延時間よりもDOPの影響が顕著であることが示されが衛星の捕捉数はあまり影響されないことも判る。また、今回の実験において補正データの遅延時間は最大で14秒であった。次節ではこの補正データの遅延時間と誤差の関係について評価を行った。

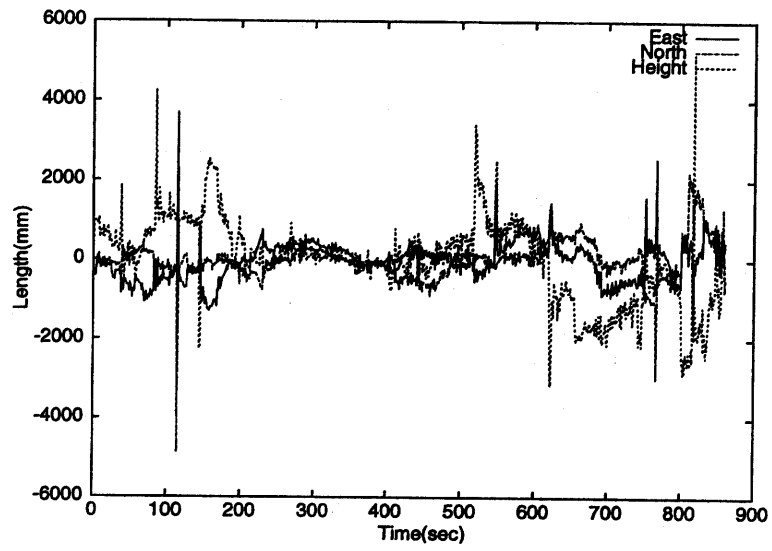


図 4.5 D-GPS測位の時間変化

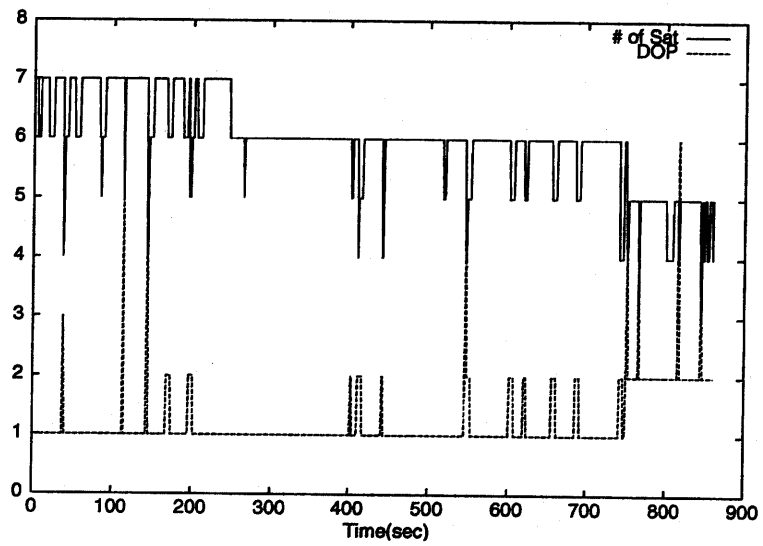


図 4.6 衛星状態の時間変化

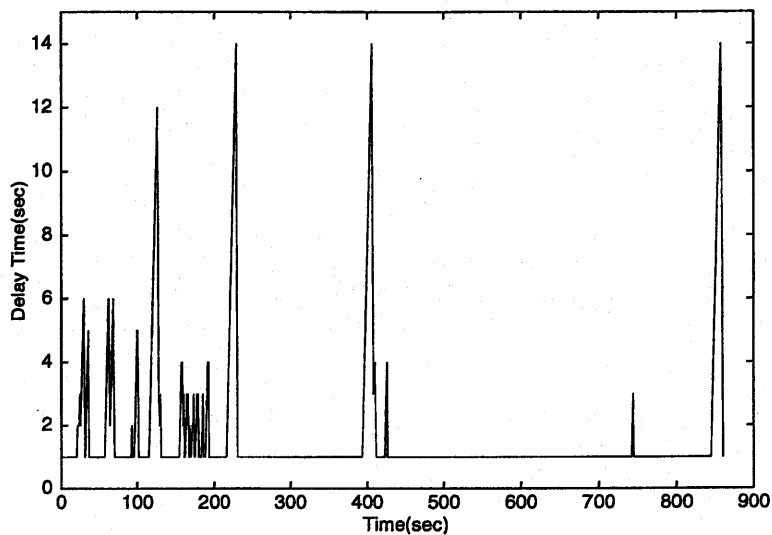


図 4.7 補正情報遅延の時間変化

4.3.2 D-GPS における補正情報の鮮度

ZBL(Zero Base Line)とは基準局と観測局に同一のアンテナからの電波を用いて測位を行う方法である。ZBLでは受信設備が一致するため基線長の延長にともなう精度の劣化がみられない。そこで補正情報の変化による測位精度の変化を観測することができる。本実験で利用したシステムを図4.8に示す。ここで利用したネットワークはHUBを介したEthernet接続であり、ネットワークの外乱はほとんどないと考えられるため、精度は主にシステムの精度による。精度に影響を与える要因としては受信機そのものの性能やアンテナ設置条件および衛星配置に依存するマルチパスが考えられるが、これらは衛星配置以外は同じである。

ZBLのシステムを用いて補正情報の鮮度と測位精度の関連を評価する。基準局サーバを改変し、過去の補正情報を提供することにより補正情報の鮮度を意図的に変更した。実験は基準となるもっとも新しい鮮度の情報および、それぞれ5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 150, 180秒の遅延をもったデータによる補正を行った。観測期間はそれぞれ24時間づつであり、これは衛星がほぼ2周する時間である。補正情報は1秒間隔で移動局へ送られるがこの時、設定に従い毎回同じ時間だけ遅延したデータを利用することにより、観測期間を通じて同じ時間での遅延データを利用しつづけることになる。

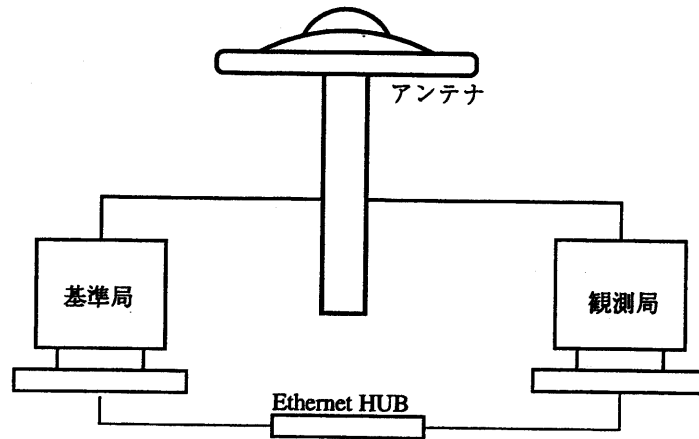


図 4.8 ZBL 実験システム

図 4.9 に毎秒もっとも最新の D-GPS 補正情報を用いて補正を行った結果を示す。24 時間の観測において 2drms で 1.48m の結果が得られている。遅延時間を 30 秒、120 秒とした実験結果をそれぞれ図 4.10、図 4.11 に示す。また、これらの結果をまとめたものを表 4.2 および図 4.12 に示す。

4.3.3 移動中の測位

D-GPS を用いて移動中の測位を行った。静止中の測位と同様に基準局は慶応大学 SFC におき、移動局は奈良先端大内部を自動車にて移動した。自動車の屋根にアンテナを設置し、走行中の測位を行った。実験データはそれぞれ同一のコースを連続して 3 周した結果である。

図 4.13 に SA が存在した時期に単独測位で測位した結果を、図 4.14 に SA の解除後に単独測位で測位した結果を示す。また、D-GPS 補正の結果として、図 4.15 に SA が存在した場合の結果を示す。

SA 存在下においては単独測位の場合には連続して周回したにもかかわらず、すべての結果にズレが生じている。また SA の解除により、3 周連続の走行を行ったにもかかわらず、大きなズレが生じないことがわかる。これは連続の測位の場合には衛星配置や大気、電離層の状態が大きく変化しないためである。しかしながら、1 周の結果は安定しているものの、SA のない条件下においても複数回走行した場合のズレが生じている。それに対して補正を行った場合には SA が存在する場合でもほとんどズレが発生していない。

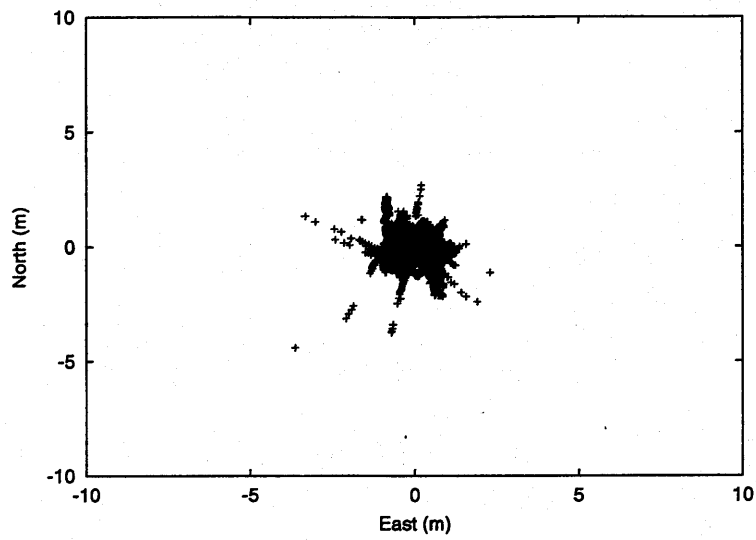


図 4.9 D-GPS 連続観測(遅延 0 秒)

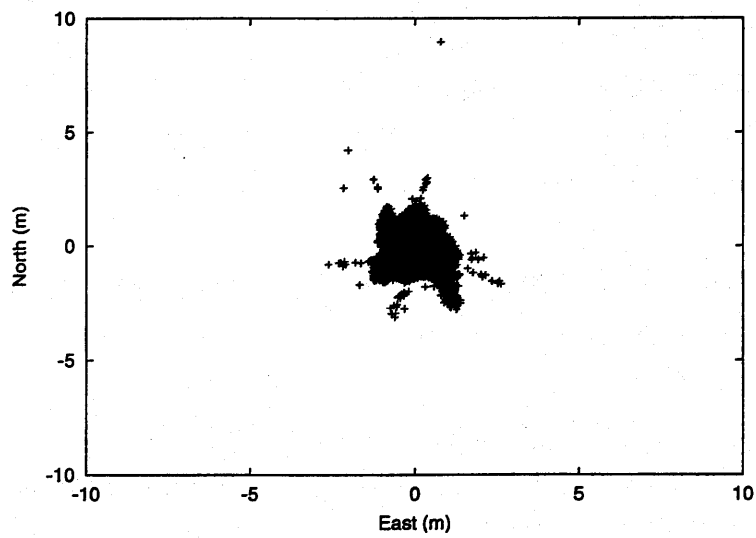


図 4.10 D-GPS 連続観測(遅延 30 秒)

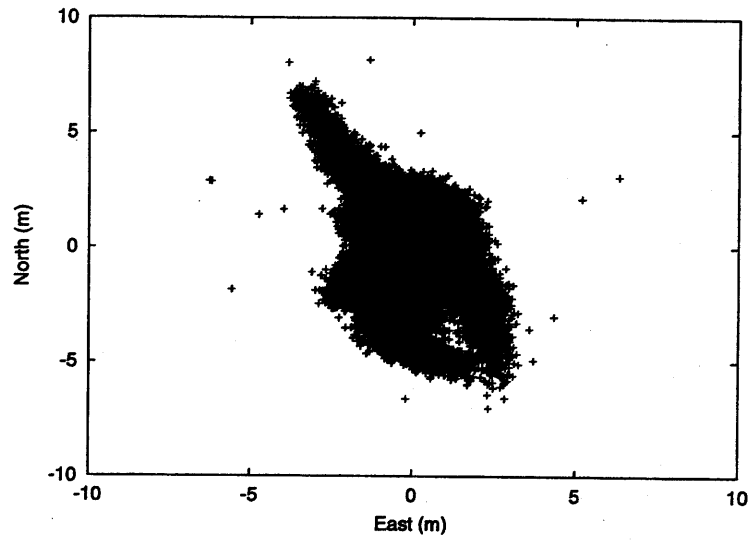


図 4.11 D-GPS連続観測(遅延 120 秒)

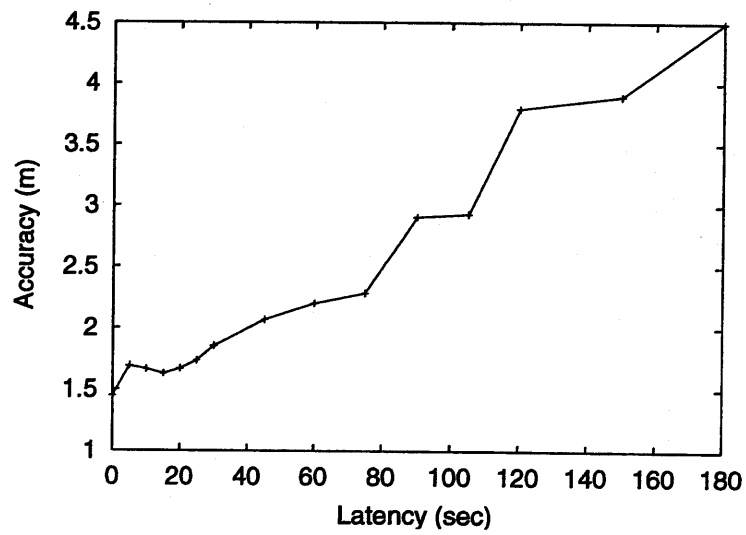


図 4.12 遅延と精度の関係

表 4.2 D-GPS補正情報の鮮度と精度

| 情報の遅延(秒) | 標準偏差 | | | 2drms(m) |
|----------|---------|---------|---------|----------|
| | 緯度方向(m) | 経度方向(m) | 高さ方向(m) | |
| 0 | 0.45 | 0.56 | 1.30 | 1.44 |
| 5 | 0.53 | 0.65 | 1.30 | 1.68 |
| 10 | 0.48 | 0.67 | 1.36 | 1.66 |
| 15 | 0.52 | 0.62 | 1.27 | 1.62 |
| 20 | 0.50 | 0.66 | 1.47 | 1.66 |
| 25 | 0.51 | 0.69 | 1.54 | 1.73 |
| 30 | 0.55 | 0.73 | 1.46 | 1.85 |
| 45 | 0.62 | 0.82 | 1.63 | 2.06 |
| 60 | 0.71 | 0.83 | 1.71 | 2.19 |
| 75 | 0.72 | 0.87 | 1.87 | 2.28 |
| 90 | 1.00 | 1.04 | 2.59 | 2.90 |
| 105 | 0.87 | 1.17 | 2.61 | 2.92 |
| 120 | 1.02 | 1.59 | 3.19 | 3.79 |
| 150 | 1.21 | 1.52 | 3.77 | 3.89 |
| 180 | 1.39 | 1.76 | 4.11 | 4.49 |

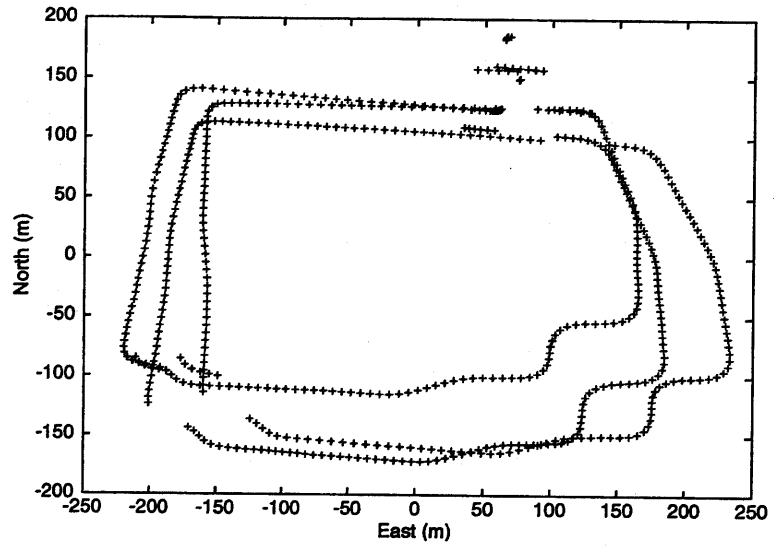


図 4.13 移動体の単独測位(SA有り)

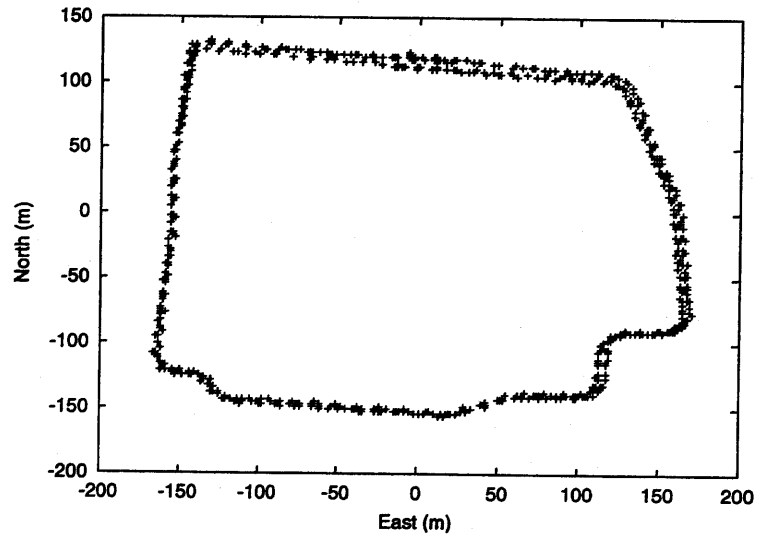


図 4.14 移動体の単独測位(SAなし)

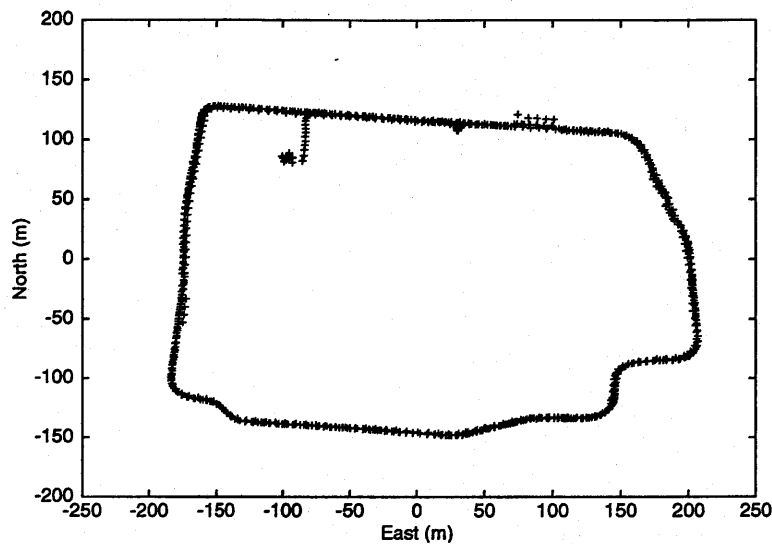


図 4.15 移動体のD-GPS測位(SAあり)

これは補正により安定した測位が行われているからであると考えられる。前述のようにD-GPSでの測位結果は安定して2drmsにおいて1.5m以下を維持しており移動体においても同様である。

4.3.4 インターネットを用いたRTK-GPS測位

本節では搬送波の位相を利用した測位であるRTK-GPSをインターネットによる補正情報配信によって実現した結果について述べる。RTK補正では補正データの新鮮さが重要な意味を持ち、補正に必要なデータ量もD-GPSに比べて多い。

RTK-GPSは必要とする補正情報の量が多いことや、遅延時間の許容範囲が狭いこと、基準局からの有効範囲がD-GPSにくらべ狭いことなどから、広くサービスとしては提供されていない。しかしながら、数センチメートルでの実時間測位が可能であり、今後はGPS補正の主流となると考えられる。

4.4. RTK測位による観測

まず神奈川県藤沢市慶応大学湘南藤沢キャンパス内部に基準局および移動局を設置し、RTK-GPSの測位実験を行った。この実験における基線長はおよそ100mである。次に

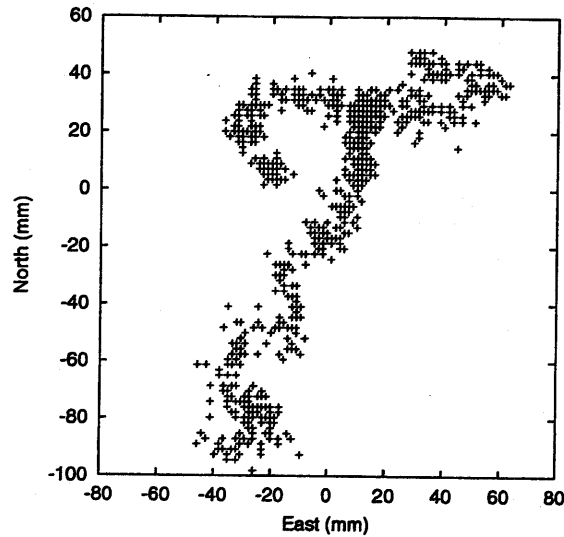


図 4.16 インターネットによる RTK 補正 (藤沢)

| 観測地点 | 基線長(km) | 2drms (mm) | 最大遅延(sec) | 平均遅延(sec) |
|---------|---------|------------|-----------|-----------|
| 東京(PHS) | 4 | 37.2 | 3 | 1.01 |
| 藤沢(PDC) | 0.1 | 93.6 | 3 | 1.04 |

表 4.3 RTK-GPS 補正の結果

東京都大手町に基準局を設置し、東京商船大学キャンパスに移動局を設置して、RTK-GPS の測位実験を行った。この実験における基線長はおよそ4kmである。東京商船大学での実験では通信にPHS(32kbps)を利用した。測位実験を行った結果を図4.16および図4.17に示す。それぞれの実験におけるデータの遅延時間をNMEA GGA メッセージ中のZ-COUNTにより評価した結果を図4.18および図4.19に示す。その結果を表にまとめ表4.3に示した。

PHSを用いた東京での実験では精度が37.2mmであり、基線長が数百mの藤沢の場合には93.6mmとなっている。

この精度はRTK-GPS フロート解において10cm以下という受信機のカタログスペックを満足しており、インターネットを用いた補正によりRTK-GPS測位を行うことが可能であることを示した。

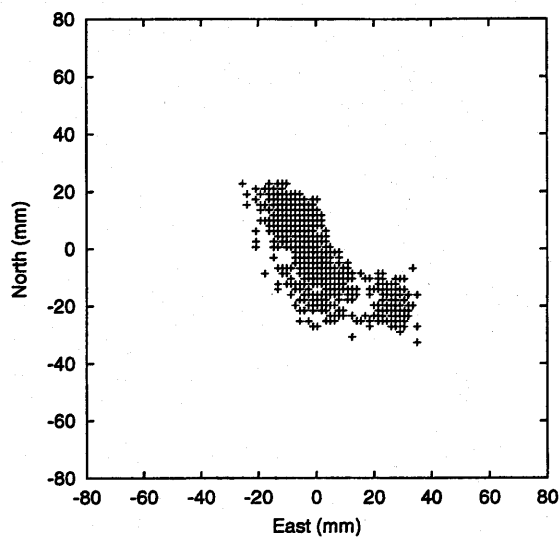


図 4.17 インターネットによる RTK 補正(東京)

RTK-GPSのための補正情報は、放送による基準局では提供されておらず、本システムの大きな利点である。インターネット接続のための帯域は、接続に用いる装置の変更により、容易に拡張できる。そのため、今後の衛星数や補正情報の増加に伴うデータ量の増加にも、対応することが可能である。

現在、RTK補正を行うために必要な基準局からの情報は、一般には公開されておらず利用者は独自の基準局を設置することが多い。独自の基準局からの情報の配信には、特定小電力無線を利用する場合はほとんどであり、利用できる範囲が無線の制限により数kmと限られている。しかしながら、インターネットを用いた基準局を構築することにより、広範囲で同時に多数の利用者をサポートできるRTK補正局を構築することができる。また、一般的にはRTK用の補正局はRTK用の補正情報のみを提供するが、本システムでは補正情報をタイプ別に選択することができるため、RTK補正情報とD-GPS補正情報を指定可能である。

4.5. RTK-GPSを用いた移動体における測位

移動中の携帯電話によるインターネット接続を持ちいて慶応大学の基準局からのデータによりRTK測位を行った。実験結果を図4.20に示す。実験は慶応大学藤沢キャンパス

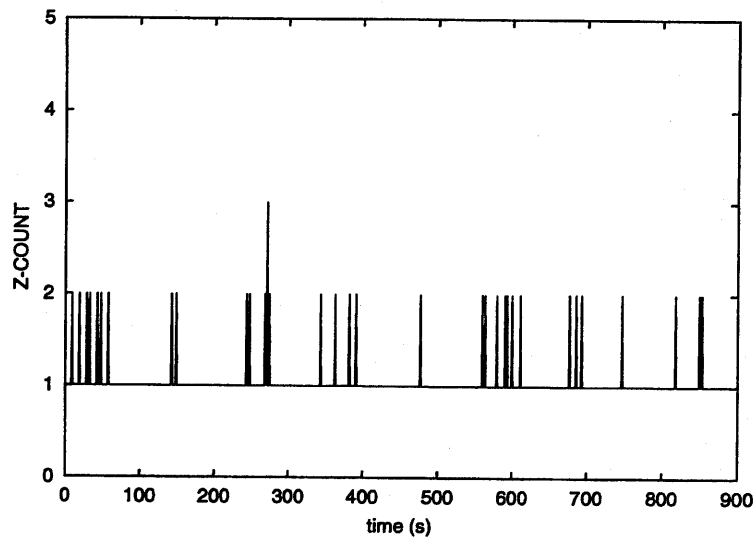


図 4.18 補正データの遅延時間(藤沢)

で行い、キャンパス外周道路を内まわり、外回りともに3周づつ周回した。

図4.20上での周回道路の内回りと外回りでの測定結果が違うことから、本システムを用いたRTK-GPS測位では移動体の車線の違いを判別可能な精度が得られている。しかしながら、RTK-GPS測位では衛星の捕捉状態が測位に大きく影響するため、一部の領域ではデータが乱れている。これは街路樹などにより衛星からの電波が遮られるためである。

4.5.1 D-GPS による地図の作成

インターネットを用いたD-GPS測位は2drmsにおいて1.5mの精度を得ることが可能であり、その精度は自動車の幅に比べ小さい。そこで自動車1台分の幅を十分に判別することが可能であり、双方向の道路や複数の車線を持つ道路を判別することができる。また、RTK-GPSと違い衛星からの電波が途切れても測位に影響が出ないため移動体での利用に向いている。

そこで、インターネットを用いたD-GPS測位を利用したアプリケーションの例として地図の作成を行った。D-GPS測位のための移動局を自動車に搭載し、日常利用する場合と同様に街中を走行し、データを収集した。走行範囲は奈良先端大を中心として、生駒

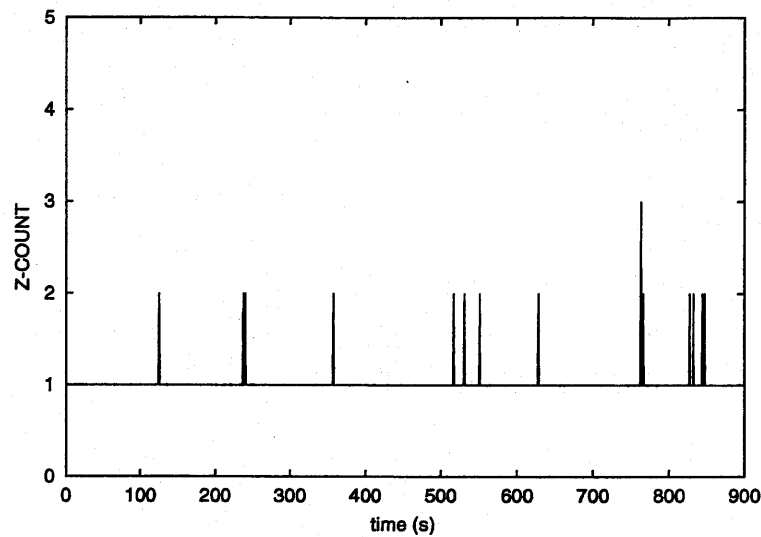


図 4.19 補正データの遅延時間(東京)

山から奈良公園にわたる範囲であり、計測は複数回にわけて行った。インターネットへの接続手段としては携帯電話を利用した。

図 4.21 に2次元で表現した地図を示す。遮蔽物や建物の近傍などの場合には測位が行えない、あるいは衛星の配置が悪いため精度が劣化することがある。図 4.22では地図のZ軸に衛星配置(DOP)を示す。これにより一部の区域ではDOPが大きくなっており、衛星配置が悪いため、精度が劣化している可能性があることを示している。

同様に図4.23には補正情報の遅れを地図のZ軸に示す。携帯電話をつかったネットワーク接続では走行区域により大きな遅延が発生する確率があることが判る。このような場合にはノイズなどの影響でパケットが破棄あるいは再送処理が行われていることが考えられる。これらの結果より、移動中に安定した測位を行うためには補正情報を配信するための安定したデータリンクが必要であると言える。

4.6. 本章のまとめ

インターネットを用いたRTK測位についての実験を行った。RTK測位では補正データの新鮮さが問題になることが判っている。そこで、RTK-GPS測位に必要な補正データを、現在一般的に利用されている通信手段である携帯電話およびPHSによるデータ通信

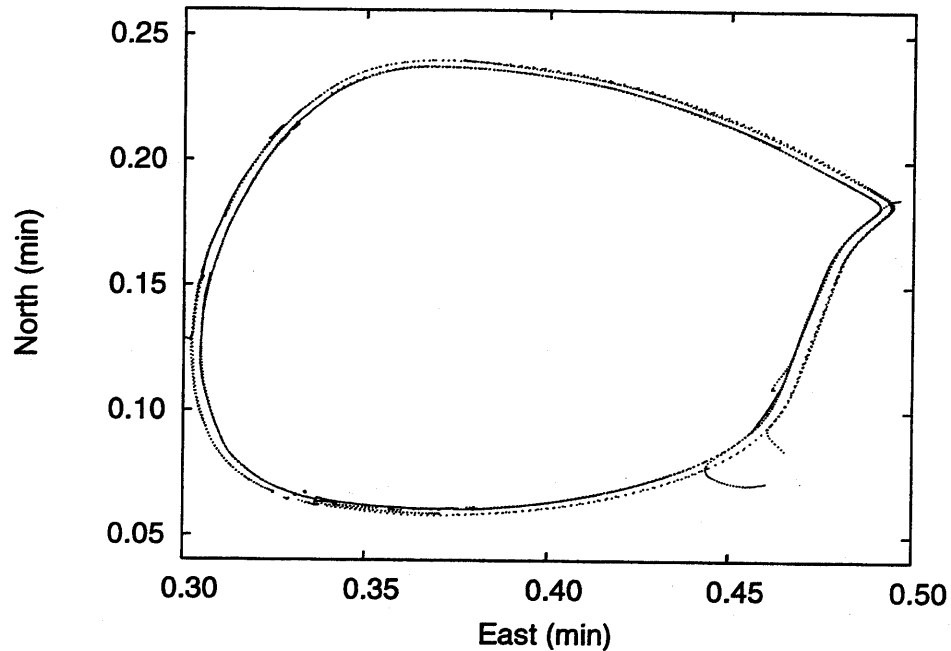


図 4.20 RTK 測位による移動体の計測

を利用して配布し、その比較を行った。データの遅延は携帯電話が平均で1秒程度大きいことになり、データリンクの帯域や通信方式によりデータの遅延が違ってくる。しかしながらどちらの方法での通信であっても問題なくRTK測位が行え、その精度は基線長に大きく依存するという結果が得られている。

また、移動体によるRTK-GPS測位を行った結果を示し、移動体への応用が可能であれば、自動車の場合には片道1車線の道路であってもどちらのレーンを走行しているかが判断できる精度が提供できることが判った。しかしながら、道路上空を街路樹などが遮った場合には、衛星からの電波が受信できず、RTK測位の精度が悪化することも判った。RTK測位のFIX解を得るためには初期化に時間がかかることが多いため、なんらかの方法でこれを高速化しなければRTK測位を用いた移動体の測位は難しい。

SAの解除にともない、D-GPSの相対的な役割は低下していると言えるが、本実験の結果によれば鮮度のよい補正情報を利用することで、1.5m以下の精度を安定して保つことが可能であり、その価値は大きいと考えられる。

また、D-GPSの特徴として、その解の収束にかかる時間が短いことがあげられる。そ

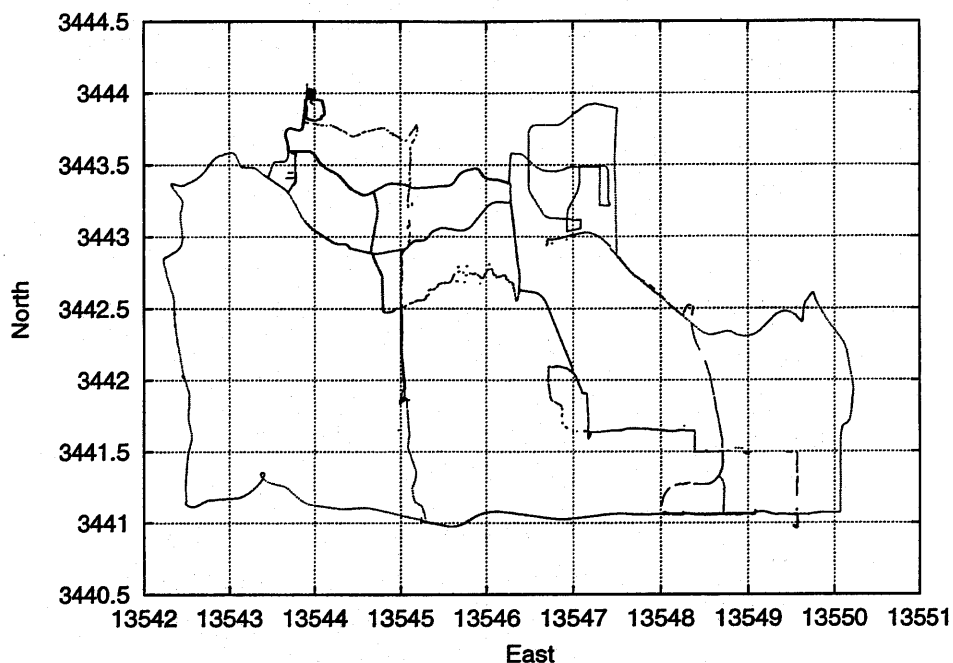


図 4.21 D-GPS測位による道路地図の作成

のため、移動体のように受信状態が刻々と変化する状態での測位では利用範囲が大きい。

また、D-GPSでは比較的長時間同じ補正情報を利用することが可能であることが知られている。そこで、SAの存在しない条件下で、古い補正情報を用いた補正による精度の劣化を評価した。その結果、0~2秒程度の一般に起きる遅延では2drmsで1.4m程度の精度が得られるが、遅延時間が60秒では2.1m 90秒では2.4mと2drmsの値が増加していく。120秒の遅延時間をもったデータを用いた場合では3.8mと急激に増加しており、精度と補正データの新鮮さの相関を得ることができた。

SAの存在する条件下での研究によれば、20秒前後で大幅に精度が劣化することが確認されている[24]。本システムを利用したZBLによる実験の結果、SAによるランダムな誤差の挿入が解除されたことにより、D-GPSの補正データ寿命が長くなっていることが判った。

また、移動中にD-GPS測位を行うことにより地図の作成を行った。その結果、DOPの問題や補正情報の遅延時間の問題が生じることがあるが、複数回にわたった測位であっても簡単な道路地図を構築することが可能であることが判る。

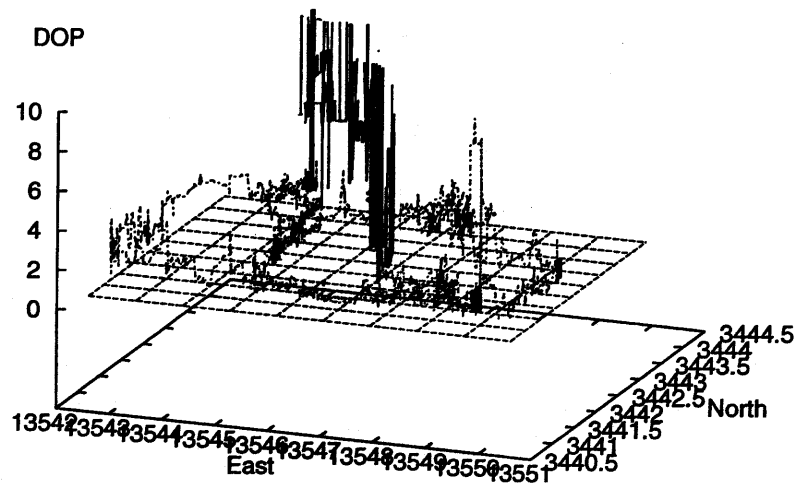


図 4.22 移動中の測位と衛星配置の関連

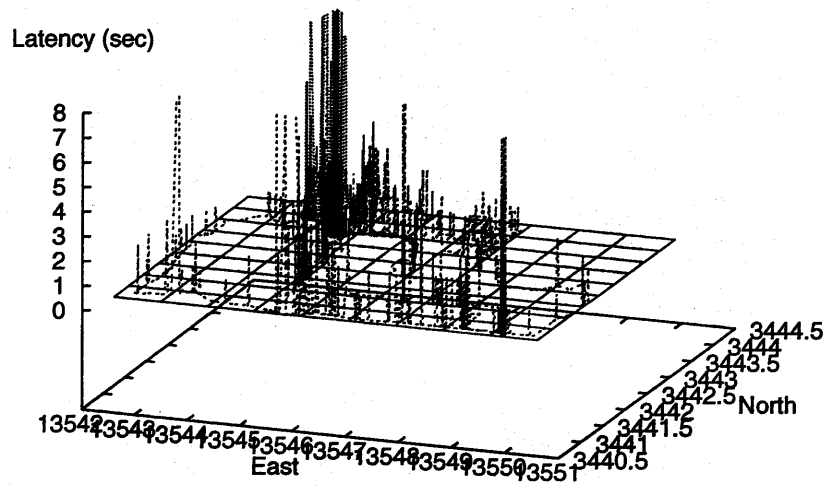


図 4.23 移動中の測位と遅延時間の関連

第5章

広域基準局ネットワークの構築と仮想基準点方式による測位

本章では広域に分散した基準局のネットワークを構築する手法について述べる。また、基準局ネットワークを利用した応用として、仮想基準点方式による測位の実験を行った結果を示す。

5.1. はじめに

RTK-GPSでは高精度な測位を行うことが可能であるが、その適用範囲が基準局より10km程度に限られている。これ以上の基線長を持つ場合には安定した測定が不可能となり、精度のよい測位を行うことができない。そのため広域でのサービスを行うためには多くの基準局が必要となる。複数の基準局を切り替えて使う場合、それぞれの基準局からの補正情報は独立しており、基準局を切り替える場合にはそれぞれ固有の誤差が存在するので連続した測位が行えない。そのため、広域での移動体を対象としたRTK-GPS基準局は複数の基準局を用意するだけでは構築できない。これらの欠点を補い、広域でのRTK-GPS測位を行うために複数の基準局を同時に利用するRTK-GPS測位が提案されている。このような複数の基準局を利用することにより、広域での補正精度の劣化を防ぐ提案がD-GPS/RTK-GPS近年なされるようになってきているが、その基準局網をどのように構築するかは課題となっている。

5.2. 仮想基準点方式による測位

仮想基準点方式では、複数の基準局からの情報を元に観測地点近傍において仮想的な基準局をおき、その基準局からの補正データをGPS受信機に与える。仮想的に基線長を

短縮することが可能であり、従来の RTK-GPS では不可能な範囲であっても高精度な測位が行える。

観測地点近傍にある基準局を計算するためには、現在の観測局の位置を元に基準局を計算する必要がある。通常の基準局からの情報とは異なり、2次元的な広がりをもつ必要があるため、通常の RTK-GPS の補正情報に比べ多くのデータを必要とする。

このような ネットワーク RTK を行うためには複数の基準局からの情報をリアルタイムに収集し、処理する必要がある。そこで我々はインターネットを用いた基準局ネットワークを構築することにより低コストかつ安定した広域基準局ネットワークを構築した。

5.3. インターネットを用いた基準局ネットワーク

インターネットを用いた GPS 基準局を構築するため、情報配布モデルと同モデルを用いたシステムの設計および実装について述べる。

5.3.1 インターネットを用いた双方向 GPS 補正

インターネットは世界でもっとも多く利用しているコンピュータネットワークである。インターネットは階層構造を持つプロトコルにより物理的な通信手段を仮想化することにより、さまざまな媒体を利用することが可能である。そのため物理的な通信媒体の進歩にあわせてネットワークを拡張することが可能であり、将来の通信技術の発展にも簡単に対応できる。

インターネットは双方向の通信であり、サーバからの情報伝達のみならず、個々のクライアントからの要求を伝えることが可能である。また、インターネット上の通信は端末間のみで行われるため独自にプロトコルを開発し実装することが容易である。インターネットを用いて基準局から情報を配布する場合には同時に多数の相手に対してサービスを行う必要がある。一つのサーバから提供できるデータの量には限界があるため、補正情報の利用者と基準局サーバの間に中継サーバをおきデータの再配布を行う。本システムでは図 5.1 に示すように双方向通信を利用し、利用者は自分の目的に適合した補正情報を選択することが可能である。

5.3.2 インターネット基準局の構築

我々の提案するシステムはユーザからのリクエストを元に配布する情報を決定する。このプロトコルでは基準局のリストや補正情報の種類といった情報を得ることが可能であ

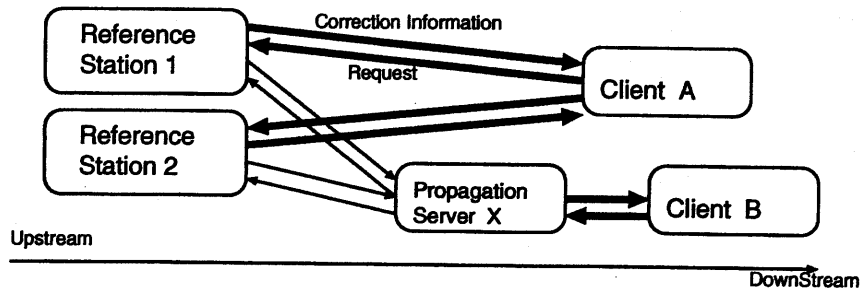


図 5.1 インターネット補正情報配信モデル

る。これらの情報を配布することにより、クライアントや下流の中継サーバは基準局情報の動的な変化に対応することができる。本プロトコルはインタラクティブに設計されており、コマンドとその返答で構成される。コマンドにより、基準局のリスト、補正情報のリストを閲覧できる。ユーザはこれらの情報を元に、自分の必要とする補正情報を決定し、要求コマンドを送付する。

補正情報の配信は信頼性のある双方向通信プロトコルである TCP を用いて実装されている。近年のインターネットではファイアウォールを構築することが多い。基準局を多くの場所に設置する場合には組織内部の場所を利用することを考慮し、サーバ側からコネクションを開始し、下流へとデータを送るサーバプッシュ型のプロトコルを採用した。さらに Socks と呼ばれるアプリケーションゲートウェイを用いたファイアウォールにも対応している。これらの方法により、組織ネットワークや企業ネットワークといったファイアウォールによって管理されている LAN から基準局情報を提供することが可能となる。

上流のサーバを発見するための方法は別途定義することとし、本プロトコル内部では扱わない。現在のシステムでは設定として記述する方法を用いているが、将来的にはディレクトリサービスなどを利用することを想定している。

5.3.3 サーバの設計と実装

我々はインターネットに接続することを考慮した基準局を設計した。図 5.2 にインターネット基準局のシステム模式図を示す。基準局はアンテナおよび受信機から構成される GPS 部と計算機によりデータの処理や通信を受け持つネットワーク部から構成される。ネットワーク部はインターネット接続用の UNIX サーバを構築し、シリアルポートを経由して受信機を接続している。シリアルポートは 2 つ接続されており、一つは基準局の

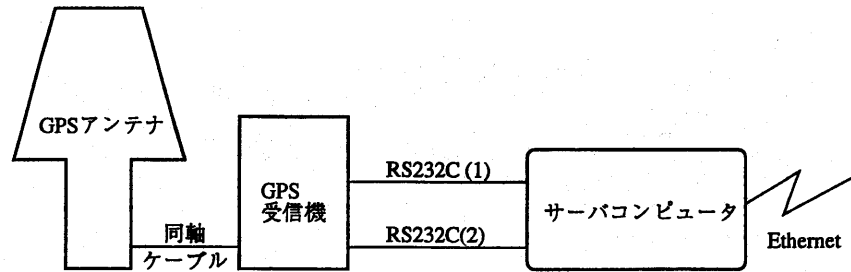


図 5.2 インターネット基準局

設定やモニタリングに利用し、他方を補正データの取り出しに利用している。そのため外部へのネットワーク接続を確保できる地点であれば、容易に基準局を構築可能であり、外部から設定や調整を行える。

GPS部はマルチパスを除去できる高精度測量用のアンテナおよび、RTKのためのデータを毎秒出力可能な測量用GPS受信機を用いる必要がある。サーバ上ではインターネットへの接続を受け持つ独自プログラムが動作しており、サーバプッシュ型で動作する。補正情報はRTCMの形式で入力され、RTCMのタイプ毎にプッシュすべきクライアントを判断する。ユーザは複数の補正情報の中から必要とする情報を選択し要求することができる。

インターネットは汎用のデータ通信手法であり、世界でもっとも多くユーザが存在するネットワークである。インターネットのプロトコルは階層構造を持ち、物理層に依存しない接続を実現できる。そのため、新しいデバイスへの対応が簡単に行える。インターネットは双方向の通信であり、放送のように単一方向ではない。そのため、ユーザからの要求をサーバに対して伝えることができる。サーバはユーザからの要求に応じたデータをそれぞれのユーザに対して通信することができる。また、新しいデータを配送することが必要な場合の対応を簡単に行うことができる。インターネットを用いた通信は基本的に一対一の通信を行う。多くのユーザをサポートするために中継サーバを利用する。中継サーバは基準局と移動体の間に置かれ基準局からのデータを再配布する。中継サーバは複数置くことができる。また、中継サーバ同士を接続することも可能であり、これらが複合してシステム全体はツリー構造を作ることができる。

クライアントが接続する中継サーバはディレクトリサービスなどの手法により発見する。これはインターネットが単一の通信のみならず別のサービスを同時に行うことが可能であるためである。このように、サービスを分類することにより一つのシステムが持

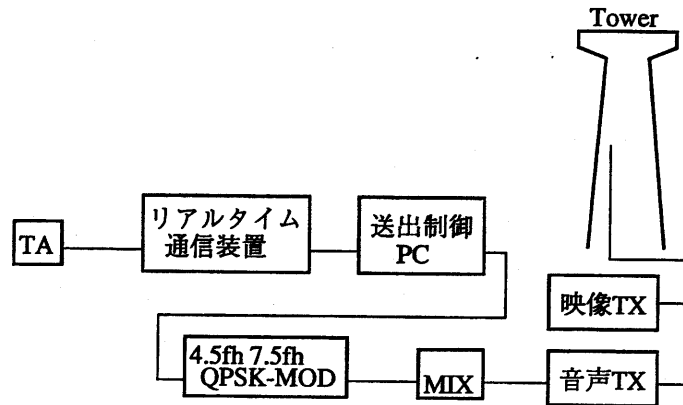


図 5.3 ASCの放送システム構成

つ必要のある機能を減らし、単純化することが可能になる。

5.4. ASCを用いた補正情報配布

本節ではTV放送の音声信号の隙間に多重したデータ信号(略称 ASC:Audio Subcarrier Channel)の概要とそれを利用した移動体へのRTK-GPS補正情報放送について述べる[25]。

5.4.1 TV 音声副搬送波を用いたデータ放送

アナログ地上波テレビのデータ放送には画像多重と音声多重の2種類がある。画像多重を利用したデータ放送はADAMS,BITCASTなどで実用化されている。しかしながら、画像多重の場合には移動体での受信が難しい。ASCはTV朝日が中心となって開発した音声副搬送波を利用したデータ放送であり、高速な移動体であっても受信が可能である。図5.3にASCの放送システムの構成を示す。ASCの電波を放送するには、既存のテレビジョン放送局の送信機、鉄塔などの放送設備の大部分を流用できる。さらにASC信号の多重には新たにASC用の変調器などを追加し、サービス用のコンピュータを設置して基準点からの信号を受信するなどの小規模な設備の変更で可能になる。

5.4.2 ASCを用いたGPS補正情報配布

基準局ネットワークにインターネットを用い、ユーザへの情報配信にASCを用いてRTK-GPS補正情報の配信を行った。本実験のシステムではRTK-GPSとしてネットワークRTK法を用いているため、通常のフォーマットであるRTCM-104 Version 2.2ではなくVersion3として提案している仮想基準点のためのフォーマットを利用している。[26]

本方式では通常の基準局の情報の他に、広域での補正を行うための情報をグリッドと呼ばれる形式で転送する。ASC受信器で取り出された補正情報はさらにGPS受信機からのデータを元に近傍に仮想の基準局を再計算し、その補正情報をGPS受信機で利用する。

5.5. 仮想基準点方式の実験

提案するシステムを実装し評価実験を行うことにより、本システムの有効性を検証した。特に基準局からの基線長が長い場合にはRTK-GPSではFIX解を得ることができないが、本システムの場合には解を求めることが可能である。また、インターネットを用いることにより広域での基準局が展開可能であり、ASCを用いることにより広範囲での補正データの受信も可能にしている。

5.5.1 ネットワークRTKシステムの構成

本システムはネットワークRTKのシステムを構成するために、最低1つの制御局と4つ以上の観測局から構成される。図5.4にシステム全体の構成を示す。

観測局はGPS受信装置およびインターネット接続用サーバから構成されており、それぞれEthernetを用いてLAN環境に接続されている。これらのシステムが接続されているLANはそれぞれの組織に既存のものである。制御局はコンピュータとGPS受信機、インターネット回線およびTV送信設備への通信回線から構成される。制御局ではGPS受信機からの補正情報とインターネットを通じて受信される観測局からの補正情報を元にグリッドデータと呼ばれる補正情報を構成する。再構築されたデータは専用回線を用いてTV送信設備に送られ、ASCデータへエンコードされ、東京タワーより放送される。

5.5.2 実験局配置

本実験では東京都新宿区に設置した制御局を含め、7つの観測局を配置した[27]。それぞれの局は表5.1のとおりであり、そのおおまかな位置を図5.5に示す。

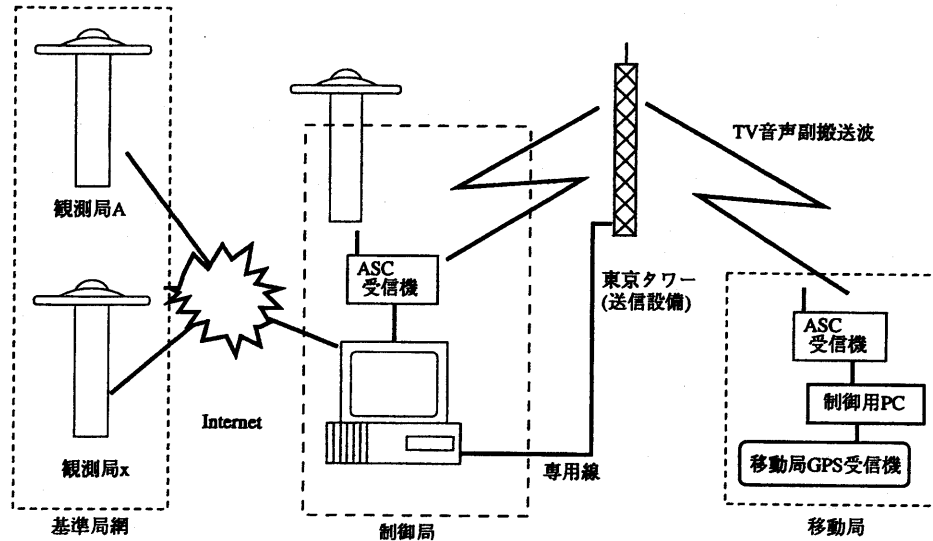


図 5.4 VRS 実験システム

観測局からの補正情報はインターネットを通して情報は制御局へあつまる。これらの補正情報と制御局が持つ受信機からの補正情報を利用してネットワークRTKのための補正情報が計算され、専用線を通じて東京タワーにある放送センターへと送られる。放送センターでは送られたデータをASCにエンコードし、TV音声に重ねて放送を行う。

移動局はホイップアンテナあるいは八木アンテナおよび専用のデコーダを搭載した受信機を持つ。受信機から出力された情報を用いて、観測地点に設置したコンピュータで観測地近傍の仮想的な基準局を計算し、GPS受信機へ送る。GPS受信機は観測地点にあわせて再計算された補正情報を元にRTK測位を行うことが可能であり、この場合には基準局からの基線長が問題となることはない。

5.5.3 実験と結果

本論文で提案するシステムを用い、RTKによる測位実験を行った。実験は日立製作所習志野工場内で行われた。利用したGPS受信機はAshtech社のGG24であり、チョークリング型のアンテナを利用している。観測地点は基準局からの距離が25km以上あり、通常のRTK-GPSではRTK測位による解を得ることができない。

水平方向の測位結果を図5.8に示す。図5.9に高さ方向の測位結果を時間とともに示す。水平方向の精度は2.4cm、高さ方向の精度は10cm以内であり、通常のRTK-GPSで得ら

表 5.1 利用した観測局

| 局番号 | 組織 | 場所 | 種別 |
|-----|-------------|---------|-----|
| 1 | オープンネットワーク社 | 東京都新宿区 | 制御局 |
| 2 | WIDE 大手町 | 東京都千代田区 | 観測局 |
| 3 | 慶応大学SFC | 神奈川県藤沢市 | 観測局 |
| 4 | 国土地理院 | 茨城県つくば市 | 観測局 |
| 5 | 国土地理院 | 千葉県鹿野山 | 観測局 |
| 6 | CRL 小金井 | 東京都小金井市 | 観測局 |
| 7 | CRL 鹿島 | 茨城県鹿島市 | 観測局 |
| 8 | 日立習志野 | 千葉県習志野市 | 移動局 |

表 5.2 VRS 実験結果
精度(2drms) 平均遅延(秒)

2.4 cm 1.98

れる精度と同等のものが得られている。本結果により我々の構築したシステムが遠距離でのRTK測位を可能にしていることを示すことができた。

本システムにおける通信の遅延時間を計測した。計測方法はGPS受信機より出力されるNMEA センテンスのZ-COUNTの値を利用した。結果によれば99%以上の場合において2秒以下の遅延となっている。この2秒の遅れは制御局での再計算および、電波としての伝送、観測局でのデータの再計算を含んだ遅延である。

5.6. まとめ

本論文では、モバイルを意識した広域RTK-GPSの基盤を提案し、その実験結果について報告した。本システムではインターネットを用いて基準局間の接続し、利用者へのデータ伝送をTV音声の副搬送波を利用したデータ放送を用いて行った。これらのシステムの組み合わせにより本システムでは、広域へのネットワークを容易に構築することができた。また、TV音声の副搬送波はその周波数帯域と出力からモバイルユーザへの

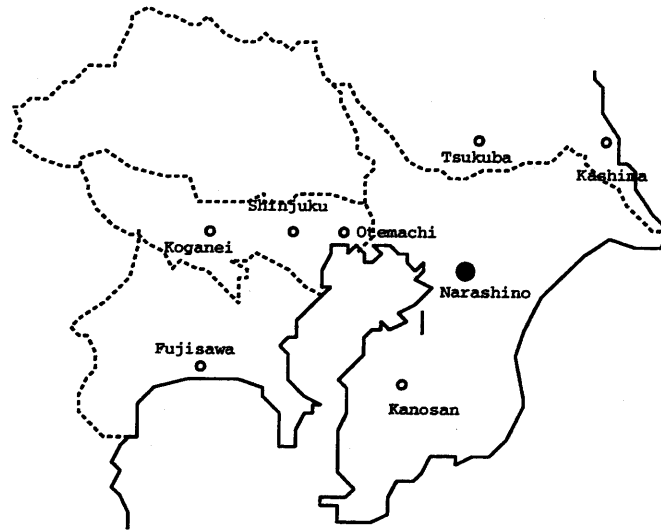


図 5.5 実験に利用した観測局配置

データ放送として優れていることが判っている。これらを利用することにより、数多くのユーザを同時にサポートすることの可能なシステムを構築することができた。

実験システムを構築し検証した結果、水平方向の精度が 2.5cm であり、補正データの遅延時間は受信機に到達するまでの時間で 2 秒以下である。これらの精度および遅延時間は RTK-GPS 測位を行う上で実用上十分であると言える。これらの結果により、我々はインターネットおよび ASC を用いた広域での RTK-GPS を行うための基盤を構築できることを示すことができたと考えられる。今後はこれらの補正を用いた新しいサービスやより広域でのサービスについて提案していくことを予定している。

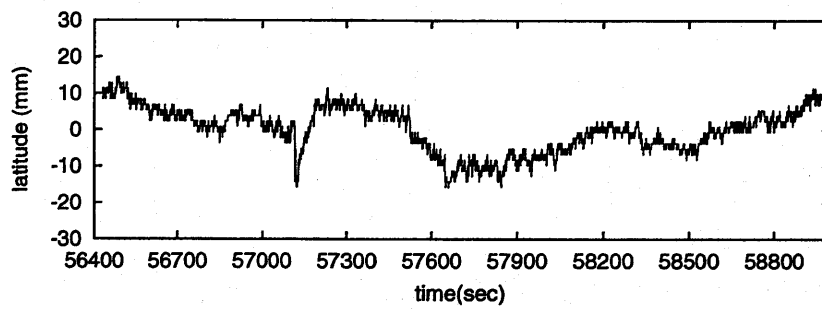


図 5.6 VRS による固定点観測(緯度)

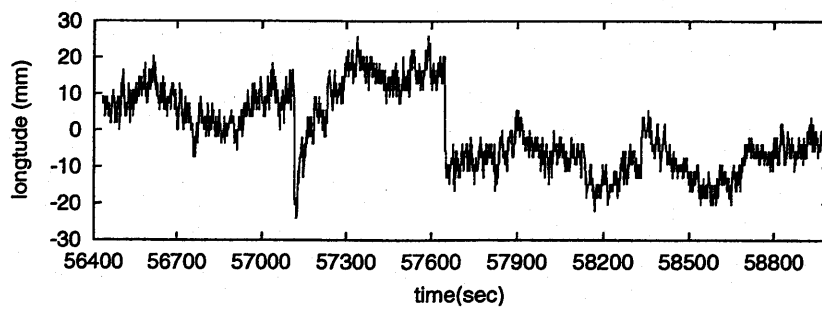


図 5.7 VRS による固定点観測(経度)

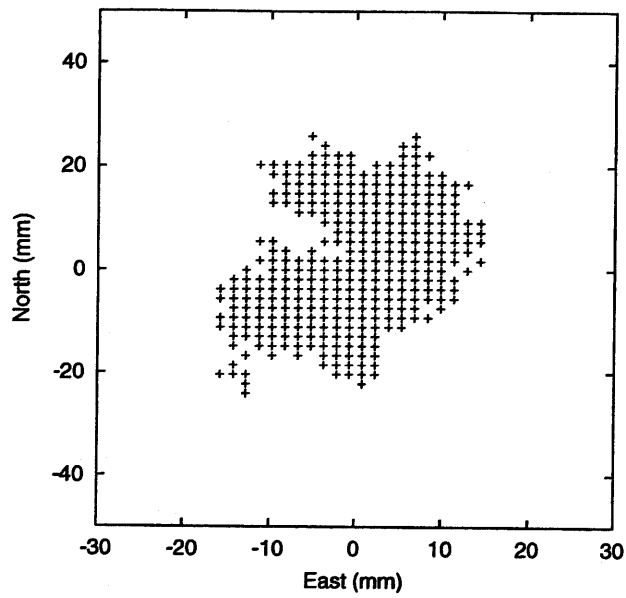


図 5.8 VRS による固定点観測

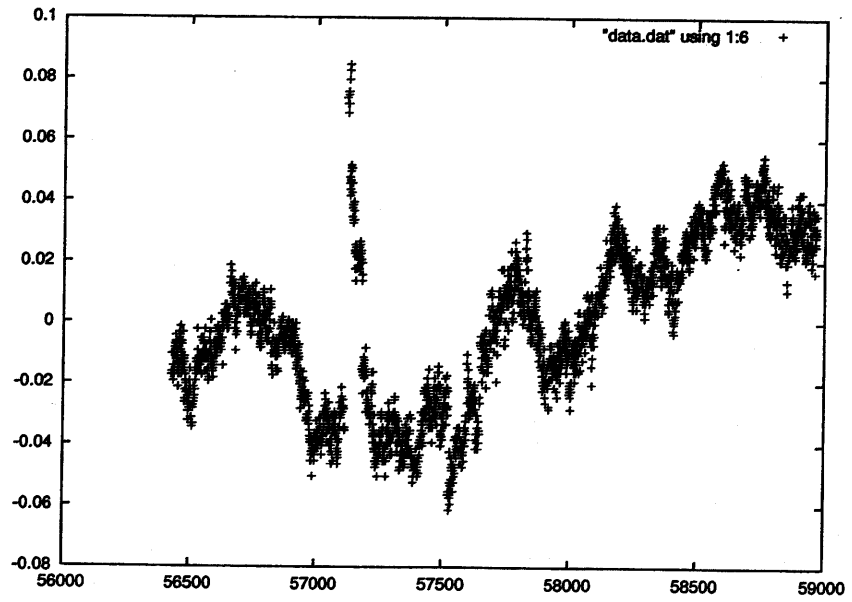


図 5.9 固定点観測(高度)の時間による変化

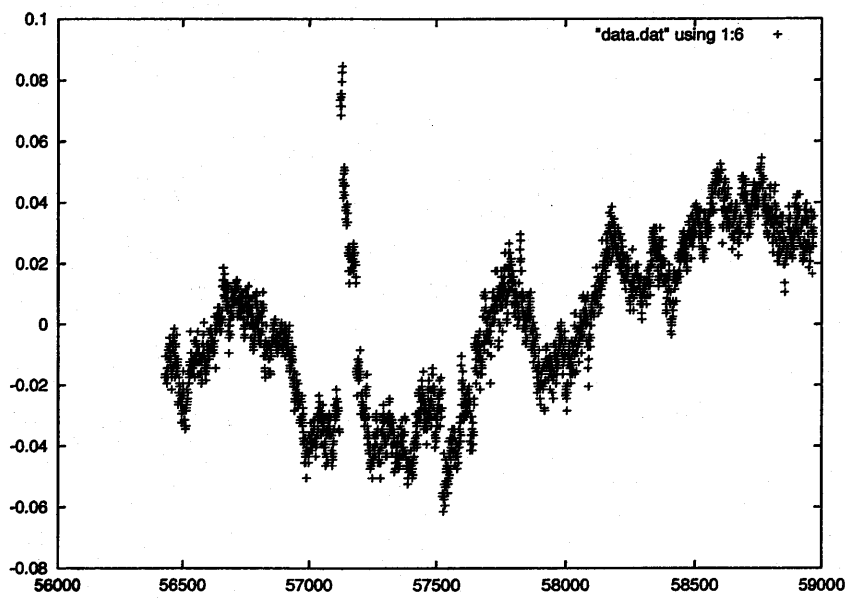


図 5.10 VRS による固定点観測(高度方向)

第6章

結論

まず、GPSをはじめとするGNSSによって得られる情報を整理し、これらの転送の必要性および、もとめられる性能について論議する。この論議を元にして、GNSS配布プロトコルを提案する。

そして、今回の研究によって得られた知見をまとめ、今後の課題についても述べることによって本論文を締めくくる。

6.1. 本研究の成果

6.1.1 インターネットを用いたGNSS補正機構

モバイルコンピューティングやITSといった位置情報と通信の統合されたシステムにおいて、通信手段としてのインターネットと位置情報を得るためのGPSは必須の手段であるが、その高精度化には補正機構が必要である。インターネットを用いた補正システムを提案した。特に双方向通信の特性を利用し、従来は不可能であったユーザからの要求に応じた補正情報の提供を行うことを可能とするシステムとして、補正情報を生成する基準局とそれを利用する移動局の間に中継局を置くシステムを提案した。さらにインターネットを補正情報の伝送路として用いる場合に生じる問題点である遅延の問題やIPアドレスの変更について解決策を示した。

さらに上記のモデルにおいて上流となる補正局と中継局と下流となる中継局と移動局のネットワーク特性が大きく違うことに着目し、上流ではTCPを用いたサーバプッシュ方式によるデータ転送プロトコルを用い、下流ではUDPを用いたクライアントプル方式のプロトコルを用いることを提案し、設計、実装、評価を行うことによりその有効性を示し、現在利用されている補正システムに対する優位性を示した。

そこでGPSの精度を向上させる補正情報の配信にインターネットを用いることで、現

在用いられている中波ビーコンを用いたD-GPSシステムと比較し同じD-GPSデータの配布を行った結果、10倍の精度を得ることが可能であることを示した。

また、SAのない状況下においてD-GPS補正情報の新鮮さと精度の劣化に関する実験を行い、2drmsで2mの精度を得るためには、60秒程度の遅延が許されることが判った。この結果はSAが存在する状況と比較し、2倍程度になっている。

本機構では一般に移動体の測位に利用されているD-GPSのみならず、測量などの分野で利用されており、今後の発展が見込まれているRTK-GPSによる数cmの測位に必要な補正情報を提供できる。多くのユーザを同時にサポートするRTK-GPS基盤は構築されておらず、社会的な意義も大きい。RTK-GPSによる測位では基線長が5kmの場合において2drmsが3cm程度の結果が得られている。また、移動体におけるRTK-GPS補正の実験も行い、徐行する車両でのRTK-GPS測位に成功し、その結果国内に一般的に存在する片側1車線の道路において、どちらの車線を走行しているか、また複数車線が存在する場合には車線内部でどのような挙動をしているかをモニタできるレベルにあることを示した。

6.1.2 基準局ネットワークの構築

既存の補正局からの情報を直接うけとる補正システムのみならず、複数の基準局からの情報を収集し利用する手法において本提案システムが有効であることを示すため、複数の組織内ネットワークに基準局を構築し、インターネットを用いて補正情報を収集し、再計算するシステムを構築することにより実証を行った。実証実験として複数基準局を想定する仮想基準点方式を利用し、インターネットを用いた基準局ネットワークを構築した。基準局ネットワークに利用する複数の基準局はそれぞれ設置場所に近い組織のLANに接続し、Firewallに対応したプロトコルを利用してGPS観測情報を提供した。本機構では一つの基準局と一つのネットワーク回線を利用して、多くの補正システムに対して情報を提供することができる。

本システムを利用することにより、全国に展開する基準局ネットワークを低コストかつ柔軟性をもって構築することができる。

6.2. 今後の課題

本研究に残された課題としては以下のようなものが挙げられる。

6.2.1 プロトコルの標準化と広域VRS網の構築

インターネットを用いたGPS補正機構はその広域性に特徴がある。しかしながら、インターネット上で利用するプロトコルが違っては複数のシステム間での協調動作が不可能になる。そこで、早期にプロトコルの標準を提案し標準化作業を進めたい。インターネットを用いたGPS補正は特に仮想基準点方式などの基準局構築の分野で日本のみならず世界中で注目されているが、具体的な研究を行っているものはすくない。本研究における現在までの実験結果を元に、標準化されたプロトコルを提案することが責務であると考えている。また、これらの情報を利用した、広域での運用に耐えうるシステムを構築することを目標にしたい。

6.2.2 広域補強システムへの発展

GNSSにおいて、測位のための補正のみならず衛星の健全性やエラー情報、オーバーレイなどによりGNSS全体の能力を発展させるのが、補強システムである。

現在、広域で利用可能な補強システムとしてはWAAS,EGNOS,MSASといった静止衛星を用いたシステムの開発が行われている。しかしながら、現在考えられている広域補強システムは静止衛星からの電波を受ける必要があるため、市街地での利用が難しく、航空管制をメインターゲットとしており、安全性や健全性に重点がおかれているがシステムのコストが高い。そこで、インターネットを用いて同様のシステムを構築することにより、完全に民生用の広域補強システムを構築することができると考えている。そこで、現在の補正システムを補強システムに展開するための研究を行いたいと考えている。

謝 辞

情報科学研究科計算機言語学講座の山口 英教授には本研究の全過程を通じて、終始懇切な御指導、御鞭撻を賜りました。心から厚く御礼申し上げます。学生の頃より長きにわたり御指導、御鞭撻を賜りました情報科学研究科情報ネットワーク講座の山本平一教授に深く感謝致します。また、数多くの貴重な御助言と御指導を賜りました奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科千原國宏教授、湊小太郎教授に深く感謝の意を表します。

砂原秀樹助教授、門林雄基助教授には学生生活および研究を行うにあたり、さまざまなお助言、御指導を頂きました。深く感謝致します。

本研究の一部はWIDEプロジェクト InternetCAR ワーキンググループにおける研究の一環として行われました。ワーキンググループ代表の植原啓介氏を始めとする InternetCAR-WG の皆様には実験や機材準備などにおいて協力をして頂きました。慶應義塾大学政策メディア研究科の川喜田佑介氏には機材設置、実験の遂行など実験全般にわたり多大な御協力を頂きました。

(株)DX アンテナには実験に利用した機材の提供をして頂きました。また、鳥本秀幸 GPS 事業部長ならびに イワンペトロフスキー博士を始めとする皆様には評価や共同実験等において御協力頂きました。株式会社日立製作所、全国朝日放送株式会社、オープンネットワーク株式会社の皆様には仮想基準点に関する共同実験を行って頂きました。

今給黎哲朗氏をはじめ建設省国土地理院の皆様および近藤哲朗氏をはじめとする郵政省通信総合研究所鹿島宇宙観測センターの皆様には本研究の実験に関して実験局の設置および運用に関してご協力を頂きました。ここに感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたりさまざま助力、助言を頂いた奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報ネットワーク講座助手の知念賢一氏および、同大学附属図書館研究開発室の皆様にも深く感謝致します。本研究に関して様々な分野での議論を行なってくださった、奈良先端科学技術大学院大学情報科学センターおよび同大情報科学研究科計算機言語学講座の皆様と WIDE プロジェクトの諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 土屋淳, 辻宏道: “GPS 測定の基礎”, 社団法人 日本測量協会, 1995.
- [2] 衛星測位情報センター: “Gpex ホームページ”. <http://www.gpex.co.jp/>.
- [3] 高橋敏男: “瀬戸内海におけるディファレンシャル gps”, 日本航海学会誌 Navigation, vol. 143, pp. 120–122, March 2000.
- [4] アルプス社: “ディファレンシャル GPS 補正情報のインターネット配信に関する公開実験の実施について”, November 1998. <http://www.alpsmap.co.jp/overview/letter/19981120/dgps.html>.
- [5] “DGPS over the Internet”. <http://www.wsrcc.com/wolfgang/gps/dgps-ip.html>.
- [6] FAA: “FAA Specification Wide Area Augmentation System (WAAS)”, U.S. Department of Transportation, 1999.
- [7] 島村淳: “MSAS(MTSAT Satellite-based Augmentation System)の展望”, GPS シンポジウム 1999 テキスト, pp. 55–60, November 1999.
- [8] M. Cannon, G. Lachapelle and B. Townsend: “RTK Positioning Using a Reference Network”, Proceedings of ION GPS 2000, Salt Lake City USA, p. in publishing, September 2000.
- [9] J. Raquit and G. Lachapelle: “Development and Testing of a Kinematic Carrier-phase Ambiguity Resolution Method Using a Reference Receiver Network”, Navigation, vol. 46, no. 4, pp. 283–296, Winter 1999 – 2000.
- [10] 日本測量協会: “リアルタイム方式による測位実験の参加者募集”. <http://www1e.mesh.ne.jp/J-Survey/realtime.html>.

参考文献

- [11] R. Swider, R. Braff, J. Warburton and V. Wullschleger: "Local Area Augmentation System(LAAS) update", 1999. <http://gps.faa.gov/Documents/updat.PDF>.
- [12] 藤岡健彦, 大前学: "ディファレンシャルGPSを利用した自動運転システムの研究", 車と情報, vol. 22, pp. 4-6, December 1999.
- [13] 行本修: "農業技術への応用 - 無人農業機械と精密農業への応用", GPSシンポジウム1999テキスト, pp. 153 - 164, November 1999.
- [14] 松村正一: "測地成果2000", GPSシンポジウム1999テキスト, pp. 75 - 78, November 1999.
- [15] 飯村友三郎: "RTK-GPS測量を利用した公共測量作業マニュアル(案)について", GPSシンポジウム1999テキスト, pp. 79 - 84, November 1999.
- [16] 国土省国土地理院: "RTK-GPSを利用する公共測量マニュアル", 国土交通省国土地理院, 平成12年. 国土地理院 技術資料 A.1-No.228.
- [17] C. Perkins: "IP Mobility Support", RFC 2002, Oct. 1996.
- [18] 坂井文泰, 惟村和宣: "複数基準局の利用によるgps測位精度の改善", 日本航海学会論文集, vol. 101, pp. 15-20, September 1998.
- [19] J. Postel: "DoD Standard Transmission Control Protocol", RFC 761, Jan. 1980.
- [20] J. Postel: "User Datagram Protocol", RFC 768, Aug. 1980.
- [21] M. Leech, M. Ganis, Y. Lee, R. Kuris, D. Koblas and L. Jones: "SOCKS Protocol Version 5", RFC 1928, Apr. 1996.
- [22] R. T. C. M. SC-104: "RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Service Version 2.2", Radio Technical Commission For Maritime Services, 1998.
- [23] 安田明生: "GPSの測位原理", GPSシンポジウム1999テキスト, pp. 191 - 215, November 1999.
- [24] 安田明生, 兪豊, 浪江宏宗: "D-GPSのデータ伝送遅延に対する測位精度評価", 日本航海学会論文集, vol. 93, pp. 7-10, 1995.

- [25] 浪江, 安田, 笹野: “RTK-GPSのテレビ音声多重放送をデータ伝送に利用した測位”, 日本航海学会第97回講演会, 10月平成9年.
- [26] B. Townsend, K. V. Dierendonck, J. Neumann, I. Petrovski, S. Kawaguchi and H. Torimoto: “A proposal for Standardized Network RTK Correction Messages”, Proceedings of ION GPS 2000, Salt Lake City USA, in publishing, September 2000.
- [27] I. Petrovski. et al: “New Flexible Network Based RTK Service in Japan”, Proceedings of ION GPS 2000, Salt Lake City USA, in publishing, September 2000.

研究業績

A. 本論文に関連する研究業績

学術論文誌 (査読付)

1. H.Hada, H.Sunahara, K.Uehara, J.Murai, I.Petrovski, H.Torimoto, S.Kawaguchi:
DGPS and RTK Positioning Using the Internet. GPS Solutions Vol.4, No.1, John
Wiley & Sons, Inc. Summer 2000

国際会議 (査読付)

1. H.Hada, H.Sunahara, K.Uehara, J.Murai, I.Petrovski, H.Torimoto and S.Kawaguchi
: New Differential and RTK Corrections Service for Mobile Users, Based on the
Internet, Proceedings of ION GPS-99 PP 519 – 528, Nashville, USA, September,
1999 (best paper award 受賞)
2. H.Hada, K.Uehara, H.Sunahara, J.Murai, I.Petrovski, H.Torimoto and S.Kawaguchi
: Differential and RTK Corrections for the InternetCAR Proceedings of GNSS
'99 part2 PP 661 – 666, Genoa, Italy, October, 1999
3. Y.Kawakita, H.Hada, S.Yamaguchi, J.Murai, I.Petrovski, H.Torimoto and S.Kawaguchi
: Design of Internet Based Augmentation System Proceedings of GNSS 2000, in
publishing, Edignbura, UK, May, 2000
4. Hisakazu HADA, Yuusuke KAWAKITA, Suguru YAMAGUCHI, Jun MURAI:
Design of Internet Based Reference Station Network for New Augmentation Sys-
tem: Proceedings of IONGPS 2000, in publishing, Salt Lake City, USA, September
2000

研究業績

5. I. Petrovski, S.Kawaguchi, M.Ishii, H.Torimoto, K.Fujii, K.Ebine, K.sasano, M.Kondo, K.shoji, H.Hada, K.Uehara, Y.Kawakita, J.Murai, T.Imakiire, B.Townsend :
New Flexible Network Based RTK Service in Japan: Proceedings of ION GPS
2000,in publishing, Salt Lake City, USA, September, 2000

国内会議(査読付き)

1. 川喜田佑介,植原啓介,羽田久一,村井純,”インターネットを介したGNSS補正情報配信プロトコルの設計”,インターネットコンファレンス2000 論文集 ,pp.113-pp.122.Nov
2000

研究会等、口頭発表

1. 羽田久一: Internet を用いた Differential/RTK 補正システムの構築, 日本航海学会
GPS 研究会講演会, 2000 年 5 月
2. 河口星也, 笹野耕治, 藤井健二郎, 近藤雅信, 羽田久一 仮想基準点方式を用いた高精度位置インフラへのアプローチ日本航海学会 GPS 研究会, GPS シンポジウム予稿
集, 2000 年 11 月
3. 羽田久一, 川喜田佑介, 砂原秀樹, 山口英, 村井純インターネットを用いた高精度衛星測位システム情報処理学会 高度交通システム (ITS) 研究会, 2000 年 11 月

その他

1. Hisakazu HADA, Hideki Sunahara, Keisuke Uehara, Yuusuke Kawakita, Jun Murai, Ivan Petrovski, Hideyuki Torimoto and Seiya Kawaguchi. ” The Internet, Cars, and DGPS Bringing Mobile Snsors and Global Correction Services On Line”
GPS World, May 2000, Vol 11, Number 5, pp38 - 43

B. その他の研究業績

国際会議 (査読付)

1. Masakazu IMAI, Chinatsu HORII, Hisakazu HADA, Naokazu YOKOYA and Kunihiro CHIHARA : "Design of a Digital University Library : Mandala Library", Proceedings of International Symposium on Digital Libraries 1995, pp. 119-124, Tsukuba, Japan, August, 1995
2. Masakazu IMAI, Syouhachi KAWATA, Chinatsu HORII, Hisakazu HADA, Naokazu YOKOYA and Kunihiro CHIHARA : "Construction of Mandala Library", Proceedings of 2nd Joint Workshop on Multimedia Communication, pp. 8-1-1 -pp. 8-1-8, Seika, Kyoto, Japan, October, 1995
3. H.Hada, K.Chinen, S.Yamaguchi, Y.Oie: Behavior of WWW Proxy Servers in Low Bandwidth Conditions, Work-in-Progress, 4th Web Cache Workshop, San Diego, USA, March, 1999

解説記事

1. 羽田久一: 特集: インターネットと医用工学震災レポート: インターネットと災害情報, 日本ME学会, BME, pp62-66, 1996年3月
2. 馬場始三, 羽田久一, 井上博之: 連載技術解説 インターネットとWWW技術(III) WWWサーバ技術, 画像電子学会, 画像電子学会誌, pp275-284, 1997年6月

国内会議

1. 羽田久一: 「災害情報とインターネット」, 日本ソフトウェア科学会 緊急チャリティシンポジウム, 「兵庫県南部地震のときインターネットで私達はどうか行動したか」報告書, 1995年3月
2. パネル討論「災害と情報システム」, ACM SIGMOD 日本支部, 第四回大会, 1995年6月

研究業績

3. 羽田久一: Mosaic 最初の一步, 日本 UNIX ユーザ会勉強会, 1995 年 7 月
4. 白崎博生, 羽田久一, 小林和真: 「UNIX とインターネット」, UNIX Magazine セミナー, 1995 年 10 月
5. 羽田久一: WWW サーバ各種, 日本 UNIX ユーザ会, WWW サーバ運用に関するワークショップ, 1997 年 5 月

研究会等、口頭発表

1. 今井正和, 羽田久一, 堀井千夏, 山口英, 佐藤宏介, 竹村治雄, 横矢直和, 千原國宏, 嵩忠雄: “曼陀羅図書館の構築の試み”, 電子情報通信学会パターン認識と理解研究会報告, PRU95-32, 名古屋, 1995 年 5 月
2. 羽田久一, 山口英: キーワードの位置情報を利用した情報検索技術の提案, 情報処理学会, 情報処理学会情報学基礎研究報告 96-FI-44, PP17-23, 1996 年 11 月
3. 今井正和, 羽田久一, 山口英, 佐藤宏介, 竹村治雄, 横矢直和, 千原國宏, 嵩忠雄: “大学附属図書館電子化の試み”, 電子情報通信学会全国大会, D-259 (pp. 6-267 / 6-268), 福岡, 平成 7 年 3 月
4. 八田成久, 新麗, 羽田久一, 今井正和, 砂原秀樹: “歌詞を用いた音楽フレーズ自動抽出の試み”, 電子情報通信学会全国大会, D-12-92, 広島, 平成 12 年 3 月

その他

1. 羽田久一. 大学図書館とデジタル図書館
勉誠社 人文学と情報処理, PP115-119, 1996 年 3 月

著書

1. 共著 (分担執筆): 「インターネット」情報生活入門, 技術評論社, 1994 年 10 月,
2. 羽田久一, 増田佳泰: 事典たのしくできるインターネット, 中央経済社, 1996 年 8 月