

インターネットを利用した GNSS 誤差補正情報配信システムの設計

戸辺 論[†], 羽田 久一[†], 川喜田 佑介[‡], 砂原 秀樹[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学

[‡] 慶應義塾大学

Design of Internet-Based Correction System for Global Navigation Satellite Systems

Osamu TOBE[†], Hisakazu HADA[†],

Yuusuke KAWAKITA[‡], Hideki SUNAHARA[†]

[†]Nara Institute of Science and Technology

[‡]Keio University

概要: モバイルコンピューティングの普及により, 端末の位置情報に対する関心が高まっている. 屋外での端末の測位には GNSS が有効であるが, その単独での精度には限界がある. そこで, 精密な位置が既知である基準局からの補正情報を端末に配信することで, 端末がより高精度な位置情報を得ることができる技術が開発されている. 従来の補正情報配信システムは, 電波を利用して補正情報を端末に配信してきた. しかし従来のシステムでは, 個々の端末に応じた異なる補正情報を提供することは不可能であり, サービスの提供範囲も電波の届く範囲に限られる. 本論文では, GNSS の誤差補正情報をインターネットを利用して配信するシステムを構築する場合に求められる機能要件を整理し, それを満たすシステムを提案する. そしてシステムの中でも特に端末と配信サーバとの通信に着目し, 端末による配信サーバ選択機構と, 端末と配信サーバの間で送受信される配信プロトコルを設計する. これにより, 最良の補正結果を得ることのできる補正情報を, 個々の端末ごとに提供できるシステムを構築することが可能となる.

1 はじめに

近年の技術進歩により, PC 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. またそれと並行して, 携帯電話や PHS, 無線 LAN を用いたインターネットへの接続も一般化しつつある. これらを背景とした, モバイル・コンピューティングにおける最も大きな特徴は, 端末の位置が固定で

ないという点にある. それゆえ, 端末の位置情報に対する関心も高まってきている.

端末の測位を行う場合, アメリカによる Global Positioning System (GPS) やロシアによる GLONASS[1], EU によって整備が進められている GALILEO[2] といった Global Navigation Satellite Systems (GNSS) が有効である. なぜなら, 屋外であれば全地球規模で絶対座標の取得が可能であり, またその利用に事前の手続き

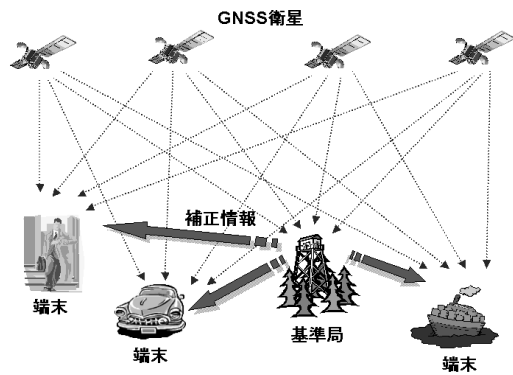


図 1: GNSS の誤差補正

や準備が不要で、受信機さえあれば即座に利用可能であるからである。しかし、様々な誤差要因から GNSS 単独での測位精度は 10m が限界であり、あらゆる分野から精度の向上が望まれている。

この問題に対し、精密な位置が既知である点(基準局)での観測結果を端末の観測データと合わせることで、測位精度を向上させる技術が開発されている。これらの技術のうち、差動(Differential)補正, Real-time Kinematic (RTK) 補正の 2 つは、実時間性に優れ、モバイルコンピューティングにおける測位への応用が可能である。両者の場合とも、基準局での観測データから誤差に対する補正情報を生成し、それを端末に対して配信することにより、端末はリアルタイムに高精度な測位結果を得ることができる。GNSS の誤差補正の概要を図 1 に示す。

現在、補正情報を配信するサービスは、電波放送を利用して提供されている。ここで新たにインターネットを利用した補正情報配信システムを構築することには、以下のような利点がある。

- 基準局と端末との間で End to End の通信が可能となるため、補正を受ける GNSS や参照する基準局、補正方式について複数ある中から利用者側で選択できる。
- 通信メディアに依存しないサービスが提供できる。これにより、電波の到達範囲にとらわれない、広域性のあるシステム

が構築できるとともに、利用者の選択に応じた通信メディアを利用した補正が行える。

本論文では、まずインターネットを利用した GNSS の補正情報配信システムを構築する場合に求められる機能要件を整理し、それを満たすシステムを提案する。次にそのシステムの中でも特に端末と配信サーバとの通信に着目し、端末による配信サーバ選択機構と、端末と配信サーバとの間で送受信される配信プロトコルを設計し、最良の測位結果を得るための補正情報を端末ごとに提供する方法を提案する。

2 既存研究

現在提供されている補正情報配信サービスは、FM 放送の副搬送波や中波ピーコンによる電波放送によって提供されている [3][4]。電波放送によるサービスの利点は、多くの利用者をサポートできる点にある。しかし、そのサービスエリアは電波の到達範囲内に限られ、たとえ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、受信感度が悪くサービスを利用できない場合がある。さらに、放送による配信では、利用者の位置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といった問題もある。これらの問題を解決するため、広域性・双方向性という特徴を持つインターネットを利用した補正情報配信システムを構築することが有効であると考えられる。

すでに、インターネットを利用して補正情報を配信するシステムは、アルプス社によるもの [5] や、DGPS-IP [6] などが存在している。これらは、利用者実際に提供されたという点で重要なものであるが、どちらもインターネットを単純に通信路として利用しただけのものであり、インターネットが持つ双方向性という特徴を生かしているとは言えない。

これに対し、端末と配信サーバとの間で双方向通信を可能にする、GNSS 補正情報配信プロトコルが提案されている [7][8]。さらに、複数の基準局をネットワーク化し、基準局での観測

データをインターネットを用いて収集することにより、複数の基準局を統括的に利用するモデルも提案されている [9][10] .

しかしこれまで、複数の基準局と配信サーバがある中で、端末が最良の測位結果を得るための補正情報をどう選択するか、といった点については具体的に検討されてきていない。そこで本論文では、全国に展開する基準局の観測データによる補正情報の中から、最良の補正結果を得ることのできるものを端末ごとに選択し、配信できるシステムを設計することを目的とする。

3 インターネットを利用した補正情報配信システムに求められる機能要件

本章では、インターネットを利用した補正情報配信システムを設計するに先立ち、システムに求められる機能要件を整理する。

3.1 システムの規模

現在、自動車に搭載されているカーナビゲーションシステムのほとんどは、FM の副搬送波による補正情報配信システムを利用している。新システムではこれに加え、PDA や携帯電話、ノート PC などを持った「人」も利用者として想定される。したがって、多数の利用者にも耐えうるシステム設計が必要である。

3.2 システムに対する信頼性

システムが、ロボットの自動運転や、お年寄り・目の不自由な人に対するナビゲーションなど、高い信頼性が要求される場面で利用される場合、サーバの停止やネットワークの障害は、これらの利用に大きな影響を与える。したがって、このような障害が発生した場合も、利用者が継続してサービスを利用し続けることができるようなシステム設計が必要である。

3.3 データの安全性

システムが確実な補正情報を提供するためには、第三者による補正情報の改竄を防がなくてはならない。そのためには、サーバのなりすましを防ぐとともに、送受信するデータについても完全性と正当性を保証しなくてはならない。

3.4 利用者のプライバシー保護

利用者の位置情報は、それ自体が重要なプライバシーとなる。したがって、システムの利用者の位置情報が、第三者に漏洩しないようなシステム設計が必要である。

3.5 システムの拡張性

GNSS のうち、現在運用されているのは GPS のみである。GLONASS はシステムとして必要な衛星数が確保されていない。また、GALILEO も 2008 年の稼働開始を目指し現在整備中である。しかし、10 年後には複数の GNSS を組み合わせる利用することが一般的になると予想される。また、新たな補正方式が開発される可能性もある。そこでシステムは、GNSS や衛星数の増加、新しい補正方式に対し、柔軟に対応可能であるべきである。

4 配信システムの設計

ここでは、前章で挙げた機能要件を満たす、インターネットを利用した GNSS 誤差補正情報配信システムの設計について述べる。これまで、利用者が GNSS の誤差の補正を受けるために、無線の受信装置など比較的大規模な装置が必要であった。しかし本システムにより、利用者はインターネットへの接続手段さえあれば、他に特別な装置の準備を必要とせずに補正を受けることができる。また、誤差の補正を受ける GNSS や参照する基準局、補正方式を利用者側で選択が可能となる。

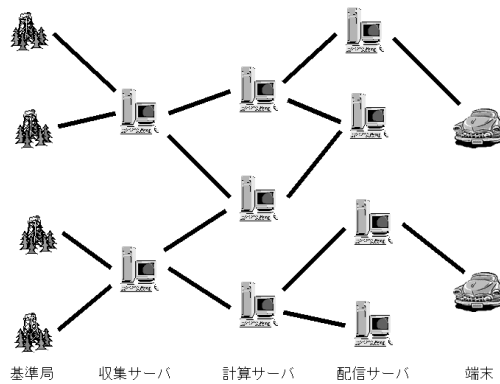


図 2: 配信システムの構成

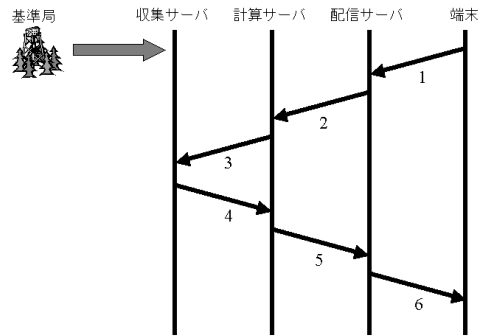


図 3: 補正情報の配信開始までの流れ

4.1 配信システムの構成

本システムの構成を図 2 に示す。

- 「基準局」
GNSS 衛星からの電波を観測する。
- 「収集サーバ」
基準局での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、補正情報を生成する。
- 「配信サーバ」
端末からの要求を受け付け、補正情報を配信する。

基準局での観測データから補正情報を生成する計算は複雑で、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利用者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、基準局での観測データから補正情報を生成するサーバと、利用者に対し補正情報を配信するサーバを分離した。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。また、新しい補正方式が登場した場合でも、その補正方式に対応した補正情報を生成できる計算サーバを新しく設置するだけで対応でき、拡張性のあるシステムを構築できる。

基準局は通常、GNSS 衛星からの電波を捕捉しやすい天空が開けた場所に設置される。そのため、山間部など必ずしも広帯域のネットワークを利用できるとは限らない位置に設置される場合もある。計算サーバが基準局に直接接続するモデルでは、ある基準局が狭帯域のネットワークしか利用できない場合、その基準局に接続できる計算サーバの台数が制限されてしまう。したがって、計算サーバと基準局の間に収集サーバを設置し、収集サーバをプロキシ的に利用することにより、この問題に対応する。

4.2 配信開始までの流れ

本システムにおける補正情報の配信開始までの流れを図 3 に示す。収集サーバは、常に基準局での観測データを収集し続けている。

1. 端末が、補正情報の配信を配信サーバへ要求する。
2. 配信サーバは、端末から要求された補正情報の生成を計算サーバへ要求する。
3. 計算サーバは、要求された補正情報を生成するために必要な観測データを収集サーバへ要求する。
4. 収集サーバは、要求された観測データを計算サーバへ返す。

5. 計算サーバは、補正情報を生成し配信サーバへ返す。

6. 配信サーバは、計算サーバからの補正情報を端末へ転送する。

端末からある補正情報を要求された配信サーバが、すでにその補正情報を別の端末に配信している場合、配信サーバはその補正情報の生成を新たに計算サーバに要求する必要はない。配信サーバからある補正情報の生成を要求された計算サーバが、すでにその補正情報を別の配信サーバのために生成中である場合も同様である。

4.3 端末による配信サーバ選択

端末が GNSS の誤差補正を行うには、基準局での観測データが必要となる。利用可能な基準局が複数存在する場合、利用する基準局によって補正結果は変動するため、端末は補正の際に動的に基準局を選択する必要がある。一般的に、端末から地理的に最も近い基準局の観測データを使用して補正情報を生成する方が、遠い基準局の観測データを使用する場合と比較して、得られる測位精度は高くなる。

本システムでは、端末は単独測位による現在位置から、参照する基準局を決定する。しかし、1つの配信サーバは、接続している計算サーバが生成可能な補正情報しか配信できず、全ての基準局の観測データによる補正情報が配信できない。したがって、端末はネットワーク上に分散している配信サーバの中から自分の要求している補正情報を提供できるものを選択しなくてはならない。さらに、それが複数存在する場合、端末はそこからできるだけ遅延が少なく、安定して補正情報の配信を受けることができるサーバを選択する機構が必要となる。

端末が配信サーバを選択する手順を以下に示す。

1. 現在利用可能な配信サーバの IP アドレスと、その配信サーバが提供可能な補正情報についての情報 (生成元となったデータが観測された基準局の ID・座標と、対応

する補正方式) が記述されているリストを入手する。

2. 要求する補正情報の提供可能な配信サーバをリストから複数抽出し、それらにユニキャストで配信問い合わせを送信する。

3. 最も早く応答が返ってきた配信サーバ (プライマリサーバ) に改めて配信要求を送信し、補正情報の配信を受ける。2番目に応答が返ってきた配信サーバ (セカンダリサーバ) は、何らかの原因でプライマリサーバから補正情報を受けることができなくなった場合、代替のサーバとして使用する。

端末が初めに入手するリストに記述されている情報は、頻繁に変更されるものではない。したがって端末は、補正情報の配信を受けるのではなく、ある一定期間ごとに HTTP や FTP などの手段で入手すれば十分である。

4.4 配信プロトコル

本システムを利用する端末のインターネットへの接続形態は、携帯電話や PHS、無線 LAN など、多岐にわたると予想される。また、移動中はその接続も不安定になりかねない。したがって、端末と配信サーバとの通信で送受信されるデータは、できるだけ小さく、またデータが欠落した場合にも対応可能な設計が必要である。

既存のいずれの補正情報配信システムも、配信の対象として RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) フォーマット [11] と呼ばれる補正情報の標準フォーマットを利用している。しかし、このフォーマットは、無線などの信頼性の低いメディアで配信されることを前提としており、インターネットで配信することを考えた場合、パリティ量の点などにおいて冗長度が高い。そこで本システムでは、RTCM フォーマットにこだわることなく、インターネットでの配信に適したプロトコルを新たに提案する。

端末は移動するため、端末と配信サーバとの

Version	Type	Length	Padding
Client ID			
Current Time			

図 4: ヘッダ部

間の通信状態は変動すること、また端末の IP アドレスが変化することがあることを想定しなければならない。したがって、この通信はコネクションを必要としない UDP で行うよう実装する。

端末と配信サーバとの間で送受信されるデータは、すべてヘッダ部とボディ部から構成される。

4.4.1 ヘッダ部

ヘッダ部の設計を図 4 に示す。

- Version
本プロトコルのバージョンを格納する。現在のバージョンは 1 である。
- Type
ボディ部のメッセージタイプを格納する。メッセージタイプには以下のものがある。
 - 補正情報要求
 - * 0x01 配信問い合わせ
 - * 0x02 配信の開始要求
 - * 0x03 配信の継続要求
 - * 0x04 配信の終了要求
 - 補正情報応答
 - * 0x10 OK
 - * 0x20 Data
 - * 0x30 Not Found
 - * 0x40 Bad Request
- Length
ボディ部を含む全メッセージ長を格納する。

- Client ID
端末、もしくは GNSS 受信機固有の ID を格納する。
- Current Time
協定世界時によるメッセージの生成時刻を、1970 年 1 月 1 日 00 時 00 分 00 秒からの経過秒数で格納する。

端末が補正情報を要求する場合、まず配信問い合わせを送信する。そして、最も早く補正情報応答 (OK) が返ってきた配信サーバに対し、改めて配信の開始要求を送信する。その後、端末はボディ部の Duration で記述した時間内に配信の継続要求を送信することにより、続けて補正情報を受信することができる。端末が補正情報の受信を能動的に停止したい場合は、配信の終了要求を送信する。なお、端末が配信の終了要求を送信しなくても、ボディ部の Duration で記述した時間内に配信の継続要求を送信しなければ、配信サーバからの補正情報の配信は停止される。

端末からの補正情報要求に対し、配信サーバは補正情報応答を返す。端末が要求する補正情報を提供できる場合は OK を、実際に補正情報を送信する場合は Data を返す。もし、要求された補正情報を提供できない場合は Not Found、要求そのものが不正なものである場合は Bad Request を返す。

4.4.2 ボディ部

ボディ部には、ヘッダ部の Type に従ったメッセージが格納される。

補正情報配信の問い合わせと、補正情報の開始要求のボディ部は同一である。これらのボディ部の設計を図 5 に示す。

- Interval
要求する補正情報の配信間隔を 1/10s 単位で格納する。
- Duration
要求する補正情報の配信期間を 1/10s 単位で格納する。

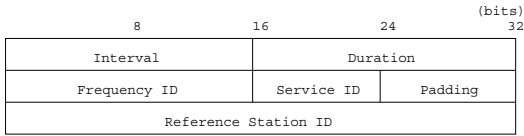


図 5: ボディ部 (問い合わせ・開始要求)

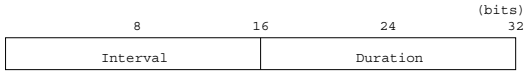


図 6: ボディ部 (継続要求)

- Frequency ID
補正を要求する GNSS の周波数帯を格納する (未定義) .
- Service ID
要求する誤差補正方式を格納する .
 - 0x01 Differential 補正
 - 0x02 RTK 補正
- Reference Station ID
補正情報の生成に使用したい基準局の ID を格納する .

補正情報配信の継続要求のボディ部の設計を図 6 に示す . 補正情報配信の終了要求は , ボディ部を持たない .

補正情報応答のうち , OK , Not Found , Bad Request はボディ部を持たない . Data のボディ部は , さらに 4 バイトのヘッダ部と , それに続く可変長のボディ部から構成される . 補正情報応答 (Data) のヘッダ部の設計を図 7 に示す .

- Sequence No.
本プロトコルは UDP 上で送受信されるため , TCP 上で送受信される場合と比較して信頼性が損なわれる . そこで配信サー

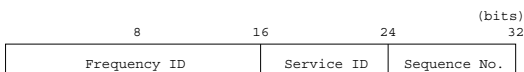


図 7: 補正情報応答 (Data) のヘッダ部

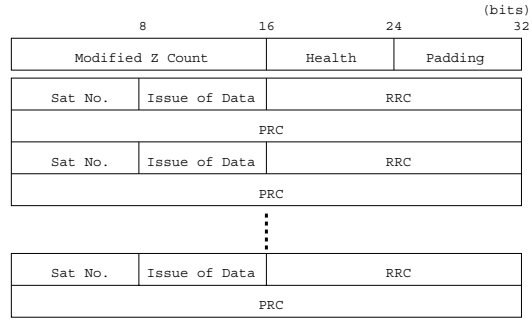


図 8: 補正情報応答 (Data) のボディ部 (Differential 方式の場合)

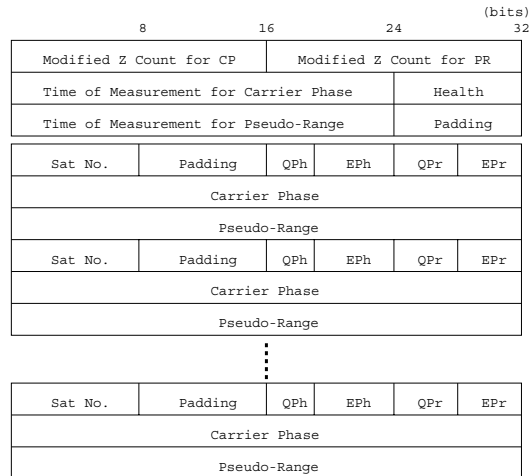


図 9: 補正情報応答 (Data) のボディ部 (RTK 方式の場合)

バは端末へ連続的に送信するデータに対してここにシーケンス番号を格納する . これにより , 端末は途中でデータが欠落したこと , あるいはデータの順序が前後して受信したことを判断する .

補正情報応答 (Data) のボディ部は , 前述の Service ID に従い , 要求された誤差補正方式に対する補正情報で構成される . Differential 補正の場合の補正情報応答 (Data) ボディ部の設計を図 8 に , RTK 補正の場合の補正情報応答 (Data) ボディ部の設計を図 9 に示す . いずれの場合も , 各フィールドには , RTCM メッセージで定義されているパラメータが格納されている .

表 1: RTK 補正の場合の補正情報量 (bit/s) 比較

衛星数	5	10	15	20
RTCM Ver-2.2	1890	3090	4290	5490
提案プロトコル	736	1216	1696	2176

4.4.3 RTCM フォーマットとの比較

提案プロトコルは、RTCM フォーマットのメッセージのうち、実際に誤差補正の際に必要なパラメータだけを抽出し再構築する形で設計している。その結果、同じ補正方式、同じ衛星数である場合補正に必要な情報量は、RTCM フォーマットと比較して大幅に削減することができた。RTK 補正を行う場合の 2 つのフォーマットの情報量の比較を表 1 に示す。

表 1 のように、提案プロトコルでは RTCM フォーマットと比較して、半以下の情報量で補正が可能である。したがって、提案プロトコルを利用した方が RTCM フォーマットを利用するよりも、端末は低通信コストで補正を受けることができる。また、配信サーバにとっても、提案プロトコルを利用することにより、同帯域でより多くの端末へ補正情報を配信することができる。例えば、配信サーバが 100Mbps でネットワークに接続しており、帯域の使用率が半分の場合までは大きな遅延が発生しないと仮定すれば、1 配信サーバあたり約 24,000 台の端末に 20 衛星分の RTK 補正情報を配信することができる。これは、2002 年のモバイルコンピューティング利用者数予測¹である約 323 万人に対し、およそ 140 台の配信サーバで補正情報を提供することができる計算になる。

5 プロトタイプシステムの構築

補正情報の配信システムのプロトタイプとして想定しているシステムの構成を図 10 に示す。基準局は、奈良県にある奈良先端科学技術大

¹モバイルコンピューティング推進コンソーシアム [12] の「移動体通信市場におけるモバイルコンピューティング複合利用者数予測」による。

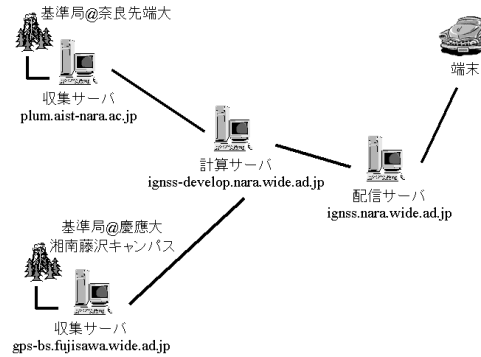


図 10: プロトタイプシステム

学院大学と、神奈川県にある慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスに設置し、それぞれの基準局に収集サーバを接続する。計算サーバと配信サーバは奈良先端科学技術大学院大学に設置し、Differential 補正と RTK 補正の 2 つの補正方式における補正情報を提供する。

実験は、端末のソフトウェアおよび配信サーバを広く一般に公開することにより、多くの利用者に利用してもらおう形で進めていく予定である。

なお、端末による配信サーバの選択機構や大規模利用下の配信サーバの性能、端末と配信サーバとの間の接続状態による GNSS の誤差の補正結果への影響といったものに関しては、シミュレータを利用して実験を行う予定である。

6 課題

6.1 配信サーバ選択アルゴリズム

本論文では、端末は補正情報の生成に際し、端末の現在位置に地理的に最も近い基準局を無条件に使用するように要求する設計をしている。また、配信サーバに関しては、端末は複数の配信サーバに配信問い合わせを同時に送信し、最も早く応答が返ってきた配信サーバがネットワーク的に最も近く、低負荷であると無条件に判断し、プライマリサーバとする設計をしている。

しかし、端末から地理的に最も近い基準局の

観測データを使用した補正情報は提供できないが、それ以外の補正情報を低遅延で安定して配信できるサーバが存在する場合、端末はその現在位置に関わらず、その配信サーバが提供できる補正情報を利用した方が、良い結果を得られることもありうる。

また、配信サーバの応答時間は、接続時のネットワーク負荷やサーバ負荷、経路の遅延などによって決定されるが、これによって長期的に安定した負荷の観測が行えるわけではない。

したがって、端末がより良い補正を行うためには、端末と基準局との物理的距離や端末と配信サーバとの間のリンクの信頼度、得られる補正情報の新鮮度を定量的にパラメータ化し、それらを総合して選択する機構を提案する必要があると考えられる。

6.2 セキュリティ

「データの安全性」「利用者のプライバシー保護」といった機能要件については現時点では未検討であり、これらについて具体的手法を検討しなければならない。

6.3 マルチキャストの利用

多数の利用者に対し同一の補正情報を配信する場合、マルチキャストの利用も有効であると考えられる。しかしマルチキャストが利用できる公衆網がまだ一般的ではないため、本論文ではユニキャスト通信を用いた設計を行っている。将来的にはマルチキャストの利用も視野に入れ研究を進める必要がある。

7 おわりに

本論文では、インターネットを利用したGNSS誤差補正情報配信システムを構築する場合に求められる機能要件を整理し、それを満たすシステムを提案した。そしてシステムの中でも、特に端末と配信サーバとの通信に着目し、端末による配信サーバ選択機構と、端末と配信サーバ

との間で送受信される配信プロトコルを設計した。これらにより、既存のシステムでは不可能であった、複数の補正情報の中から、最良の補正結果を得ることのできるものを端末ごとに選択し配信することが、より少ないサーバ数で可能になると考えられる。

参考文献

- [1] “GLONASS HOME PAGE”,
<http://www.rssi.ru/SFCSIC/>.
- [2] “GALILEO HOME”,
<http://www.europa.eu.int/comm/energy-transportengalen.html>
- [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/syoukai/soshiki/toudai/dgps/index.htm>
- [5] (株) 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開始について”,
<http://www.alpsmap.co.jp/overview/letter/19981120/dgps.html> (1998)
- [6] “DGPS over the Internet”,
<http://www.wsrcc.com/wolfgang/gps/dgps-ip.html>
- [7] H.Hada, K.Uehara, H.Sunahara, J.Murai, I.Petrovski, H.Torimoto, S.Kwaguchi, “New Differential and RTK Corrections Service for Mobile Users, Based on the Internet”, Proc. of ION'99 (1999)
- [8] 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 (2000).
- [9] 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 (2000)

- [10] 羽田 久一 : “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”, 奈良先端科学技術大学院大学 NAIST-IS-DT9561034 (2001).
- [11] RTCM SPECIAL COMMITTEE NO.104 : “RTCM RECOMMENDED STANDARDS FOR DIFFERENTIAL GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS) SERVICE VERSION 2.2”, Radio Technical Commission For Maritime Services (1998).
- [12] “モバイルコンピューティング推進コンソーシアム”, <http://club.pep.ne.jp/mcpchp/>.
- [13] NMEA0183 Standard For interfacing Marine Electronic Device Version 2.20, National Marine Electronics Association (1997)
- [14] 土屋 淳, 辻 宏道 : “やさしいGPS 測量”, 社団法人 日本測量協会 (1997).
- [15] 土屋 淳, 辻 宏道 : “GPS 測量の基礎”, 社団法人 日本測量協会 (1995).
- [16] “高精度測位社会基盤研究フォーラム 報告書”, 高精度測位社会基盤研究フォーラム (2002).