

# VRS 実用化に向けての課題

河口 星也<sup>○</sup> (DX アンテナ)・藤井 健二郎 (日立製作所)・笹野 耕治 (テレビ朝日)  
植原 啓介 (WIDE プロジェクト)・川喜田 佑介 (WIDE プロジェクト)

## 1. はじめに

実時間で数 cm 精度の位置決定を可能とする RTK-GPS は既に様々な分野において実用化されているが、複数の基準局の観測データを同時利用することによって従来は困難であった長基線における RTK-GPS を実現する有力な手法として、仮想基準局方式 (以下 VRS と略) が非常に注目されてきている。基準局において取得された搬送波および擬似距離観測量をリアルタイムで制御局へ収集し、電離層や対流圏、衛星軌道といった空間的に相関する誤差要因をモデル化し補正するとともに、移動局の近傍における仮想的な観測量を生成し、通常の補正情報と同じ方法で入力してやることにより、移動局受信機において“仮想的な短基線”における測位計算が行われる。この手法の有効性はこれまで主に海外の研究や実験において実証されてきたが、国内においても昨年度初めて国土地理院による電子基準点を利用した実験 (以下、リアルタイム測位実験) が実施され、その有効性が検証された。本稿ではこのリアルタイム測位実験において当グループが検証を行った実験システムの概要を説明するとともに、今回の実験を通じて明らかになった技術的課題を示し、今後の実用化に向けての対応策を検討する。

## 2. VRS の概念

### 2. 1 相対誤差の補正

あるエリア内における大気の状態は空間的に不均質であるため、電離層や対流圏誤差も電波を受信する場所に応じて相対的に変化する。RTK-GPS では二重位相差を観測量として計算に用いるため絶対量は問題ではなく、基準局と移動局間の誤差の差分 (相対誤差) が問題となってくる。これは軌道誤差についても同様であり、従来の RTK-GPS においては基準局が 1 局であったため、基準局から離れるとともに移動局における相対誤差が大きくなり、アンビギュイティの決定が困難であった。

一方、複数の基準局において観測されたデータをリアルタイムで処理することにより、エリア内の相対誤差をモデル化し、補正することが可能である

受信機 a と b および衛星 x と y に対する二重位相差は次式で与えられる。

$$\nabla \Delta \phi_{ab^{xy}} = \phi_{a^x} - \phi_{a^y} - (\phi_{b^x} - \phi_{b^y}) \quad \text{①}$$

それぞれの位相測定値は衛星と受信機間の真の距離とすべての誤差成分 (電離層、対流圏、

マルチパス等)の和である。一方で基準局の座標が正確で、かつ衛星座標も正確にわかっているならば、それぞれの受信機とそれぞれの衛星間の正確な距離が求められると仮定できる。ここで(1)と同様に距離の二重差をとれば、“測定値マイナス距離”の二重差という観測量を求めることができる。

$$\nabla\Delta\Phi_{ab^{xy}} = \nabla\Delta\phi_{ab^{xy}} - \nabla\Delta r_{ab^{xy}} \quad \textcircled{2}$$

ここで $\nabla\Delta r_{ab^{xy}}$ は距離の二重差を表している。この“測定値マイナス距離”の二重差は基準局間誤差の直接の測定値であり、以下の式で書き換えられる。

$$\nabla\Delta\Phi_{ab^{xy}} = \nabla\Delta I + \nabla\Delta T + \nabla\Delta\delta p + \nabla\Delta m + \nabla\Delta v + \nabla\Delta N \quad \textcircled{3}$$

ここで、 $\nabla\Delta I$ 、 $\nabla\Delta T$ 、 $\nabla\Delta\delta p$ はそれぞれ相対的な電離層、対流圏、衛星位置誤差を表し、 $\nabla\Delta m$ および $\nabla\Delta v$ はマルチパスとノイズの二重差、そして $\nabla\Delta N$ はアンビギュイティの二重差(整数値となる)である。よって、このアンビギュイティを決定することができれば、この“測定値マイナス距離”という観測量が基準局間の相対的な二重差の誤差を表すことになる。また、位相測定値においてマルチパスやノイズはその他の電離層、対流圏、衛星位置といった空間的に相関のある誤差と比較すると小さいため、相関のある誤差(電離層、対流圏、衛星位置)が支配的であると仮定される。そして各基準局間の二重位相差に含まれる誤差をもとに、その空間的な相関を決定し、最小二乗コロケーション法を用いて内挿を行い、エリア内の任意の地点における相対誤差を推定する。

この手法を用いることにより約30~100km程度の間隔で基準局を配置することが可能となるが、これは従来のRTK-GPSと比較しておよそ1.5~3倍程度のカバレッジを実現することになる。図1にその概念図を示す。

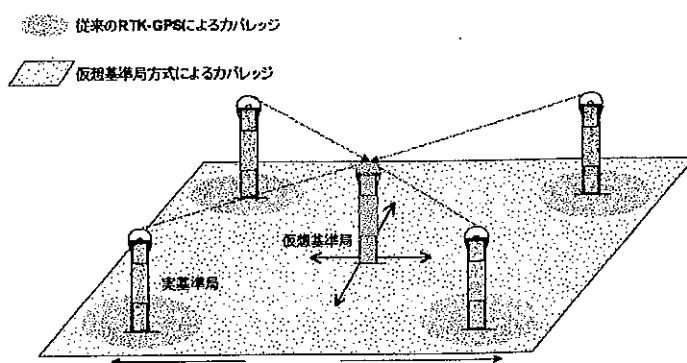


図1 VRSによるカバレッジの概念

## 2.2 仮想基準局の作成

一般的なRTK-GPS受信機は基準局からの距離に応じて測位計算アルゴリズムを変化さ

せている。そのため、相対誤差を補正し実質的に基準局からの距離による影響を取り除いたとしても、受信機がそれを認識しない限り基準局からの距離に応じた計算アルゴリズムを用いて測位を行う。つまり相対誤差のない理想的な条件であるにも関わらず、最適な計算アルゴリズムが適用されない結果となる。

これを回避するために、仮想基準局という概念を利用する。移動局の近傍に仮想的な基準局（座標と仮想観測量）を作成し、実際の測位計算は“短距離の RTK-GPS “としてあくまで仮想基準局と移動局間で行う。

以上述べたように、従来の基地局 1 局を利用する RTK-GPS に対して、複数の基準局をネットワーク化して利用することにより、少ない基準局数でより広いサービスエリアを実現するとともに、システムとしての信頼性の向上、そしてより高精度な測位が可能となる。なお、この手法は 1996 年からカルガリー大学において研究されてきたもので、MultiRef と呼ばれている。

### 3. 実験システムの構成

リアルタイム測位実験において当グループが構築した実験システムの構成を図 2 に示し、それぞれの構成に関して以下簡単に説明する。

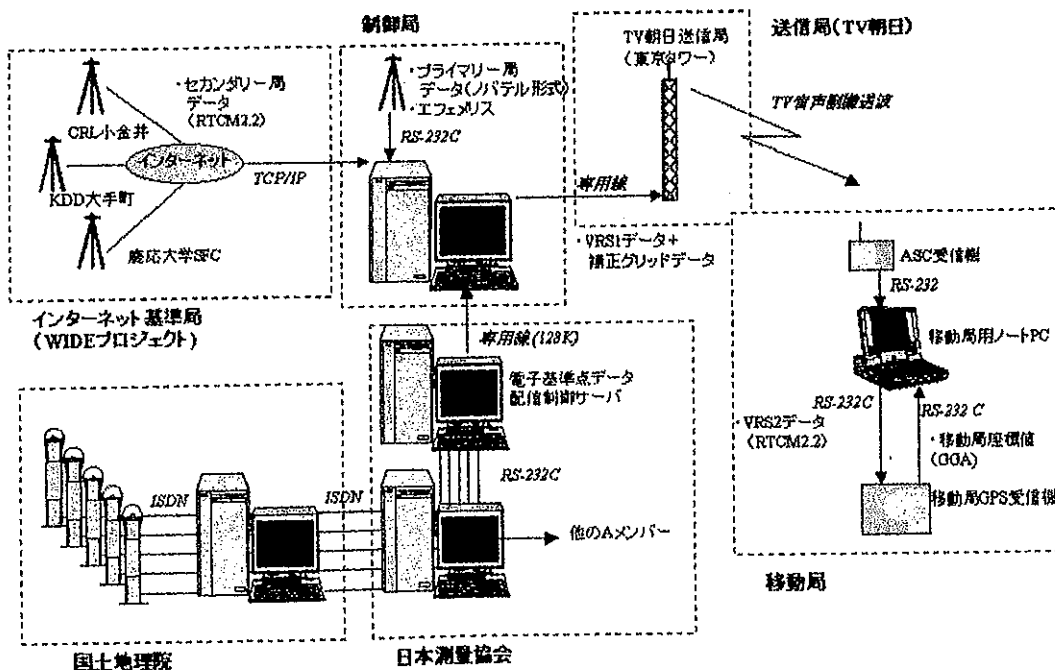


図 2 リアルタイム測位実験におけるシステム構成

#### 3. 1 基準局

本実験では、電子基準点 5 局、独自に設置した基準局 1 局、および評価用として WIDE プロジェクトが運用するインターネットに常時接続された基準局（以下 WIDE 基準局）を 3 局利用した。基準局配置を図 3 に示す。

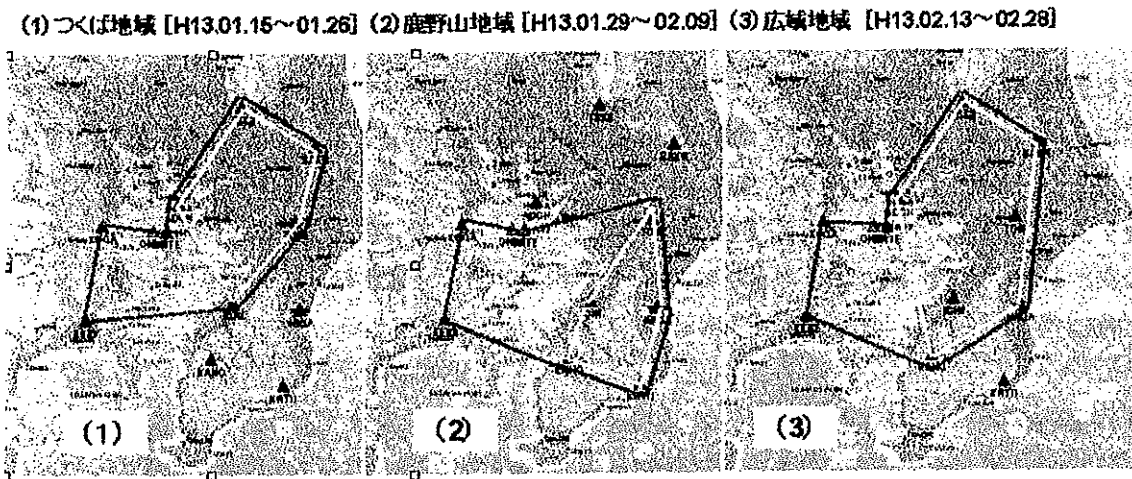


図 3 実験期間内における基準局の配置

今回利用した電子基準点のデータは日本測量協会のサーバから各 A メンバーに対して電子基準点毎に別々のシリアルポートから提供された。そのため当グループでは、日本測量協会内にデータ配信用のサーバを設置し、各電子基準点のデータを専用線（128K）にて新宿の制御局に転送した。データのフォーマットはトリンプル社の RT-17 が用いられた。

また、評価用に運用していた WIDE 基準局はそれぞれ 2 周波受信機とグローバル IP アドレスを割り当てた配信制御用のサーバから構成されており、これらはインターネット経由で制御局に対して常時 RTCM V2.2 フォーマットでデータを転送するよう設定した。

### 3.2 制御局

制御局には WIDE 基準局と同様にグローバル IP アドレスを割り当てたサーバを設置し、各基準局データをリアルタイムで受信した。受信した各基準局のデータはサーバ内で運用されている MultiRef ソフトウェアにより処理を行い、エリア内の相対誤差を推定し、補正グリッドを作成する。

データ処理の観点から見た場合、基準局はその役割から 2 種類に分類される。ひとつはプライマリー局と呼ばれる基準局で、データの伝送遅延が確実に 1 秒以下であることを前提としている。制御局内にはプライマリー局として受信機を 1 台設置しており、RS-232C 経由で直接サーバに取り込むことで伝送遅延を最小限に抑えている。これは最終的に作成される仮想基準局の原型となるデータ（VRS1）であり、伝送遅延がそのまま補正情報とし

での遅延に効いてくる。一方で、残りの基準局はセカンダリー局と呼ばれ、エリア内の電離層、対流圏および衛星位置誤差をモデル化し、補正量を計算するために利用される。これら空間的に相関のある誤差は比較的ゆっくりとした変動を示すため、伝送遅延が30秒程度あったとしても最終的な測位精度にはほとんど影響を及ぼさないことが報告されている。

なお、制御局において作成された VRS 1 データおよび補正グリッドデータは専用線により次の送信局に伝送される。

### 3.3 送信局

今回のシステムにおいては移動局への補正情報伝送手段として前述のテレビ朝日により開発された特許技術である ASC を利用した。制御局において生成された VRS1 データおよび補正グリッドデータは、専用線によりテレビ朝日の放送施設に伝送され、東京タワーから音声信号の副搬送波に乗せて放送されることとなり、今回のシステムが対象とするエリア全体をカバーする (図 4)。

また、現状のシステムにおいてグリッドデータを含む合計のデータ量が毎秒 3000~4000 ビット程度に抑えられており ASC の伝送速度 (9600bps) に対して余裕があるため、将来的には GLONASS、Galileo 等他の衛星測位システムのデータを同時に放送することも可能である。



図 4 ASC 受信エリア

### 3.4 移動局

移動局には、上記 ASC に対応した受信機、最終的な仮想基準局作成計算のためのソフトウェアをインストールしたノート PC、および RTK-GPS 対応 2 周波 GPS 受信機を用意する。GPS 受信機はまず受信地点における単独測位位置をソフトウェアに対して出力し、ソフトウェア側では受信した補正グリッドデータから、この座標値における補正量を内挿する。一方 VRS1 データをもとにこの座標値における仮想的な基準局データが計算され、求められた補正量を加味することにより最終的な仮想基準局データである VRS2 データを作成する。このデータは通常の RTK-GPS において利用されている RTCM V2.2 フォーマットのタイプ 3、18、および 19 メッセージとして移動局受信機に入力され、受信機内において通常の RTK-GPS 計算が行われることになる。なお、最終的に RTCM V2.2 フォーマットを用いるため、現在市販されているほとんどの受信機はそのまま利用可能である。

将来的には移動局における仮想基準局計算は全て受信機内のファームウェアにおいて行われることが望ましい。そのため RTCM 委員会に対して次の V3.0 フォーマットにおいて

正式にネットワーク RTK メッセージをサポートするよう標準化の提案を行っている。

#### 4. 実用化に向けての課題

今回リアルタイム測位実験においては、2月に入るまで主に通信面においてのトラブルからシステムとしての体制を整えられず、その後も運用しながら様々な調整および VRS ソフトウェアの改良等を行ってきたが、結果的に実験終了日である 2 月末日（および追加実験の 3 月 12、13 日）までに十分な時間がとれず、満足のいく結果を得ることができなかった。そこで、以下に今回の実験の中で得られた結果を踏まえた上での今後の対策を述べる。

##### 4. 1 システムの信頼性

利用者側から見た VRS というシステムは、通常の RTK-GPS とほぼ同じ感覚で利用することが可能であるが、運用する立場から見れば最終的に得られる位置情報が様々なプロセスの相互作用の上に成り立っていることがわかる。つまり最終的な測位結果はシステムが正常に機能しているかを確認するための重要な指標の一つであるが、期待された結果が出ない場合にその原因を特定するためには、システムを構成する各要素について検証を行っていく必要がある。

その一方で最終的な測位結果が良い場合でも、それがあある特定の好条件下において偶然得られた結果であり、システムとして見た場合には依然何らかの不具合を抱えている可能性がある。これはすなわち利用者において得られた“良好な結果”が必ずしもシステムとしての信頼性やインテグリティを保証している訳ではないことを意味する。例えば精度達成の指標である FIX 解を得た場合に、その得られた座標値が正確であるかどうかは既知点において検証が可能であるが、それは必ずしもシステムが正常に機能していることを証明するわけではない。言い換えればシステム内のある条件やパラメータ、または計算ルーチンに何らかの問題がある場合でも、ある状況下では良い結果が得られるケースがある。

##### 4. 2 アンビギュイティの決定

MultiRef においては、第 2 章で説明したように基準局間の二重位相差に含まれるアンビギュイティを正確に決定する必要がある。アンビギュイティの決定は NetAR というアルゴリズムにより行われるが、このアンビギュイティが正確でなければ、式③からわかるように誤差の推定が不正確となり、結果としてエリア内の補正量を誤って推定することになる。図 5 および図 6 は、仮想基準局を実際の基準局の真上に作成して、残差を計算したものである。この残差が小さいほどエリア内の誤差の推定が正しいと言えるが、図 5 におけるピンクの衛星については間違ったアンビギュイティの影響により、結果として作成された仮想基準局データに誤差が含まれていることを示している。一方で図 6 ではアンビギュイティが正確に決定されているものと考えられる。

L1 Carrier Double Difference Residuals, Inba, Corrected VRS vs. Raw Data

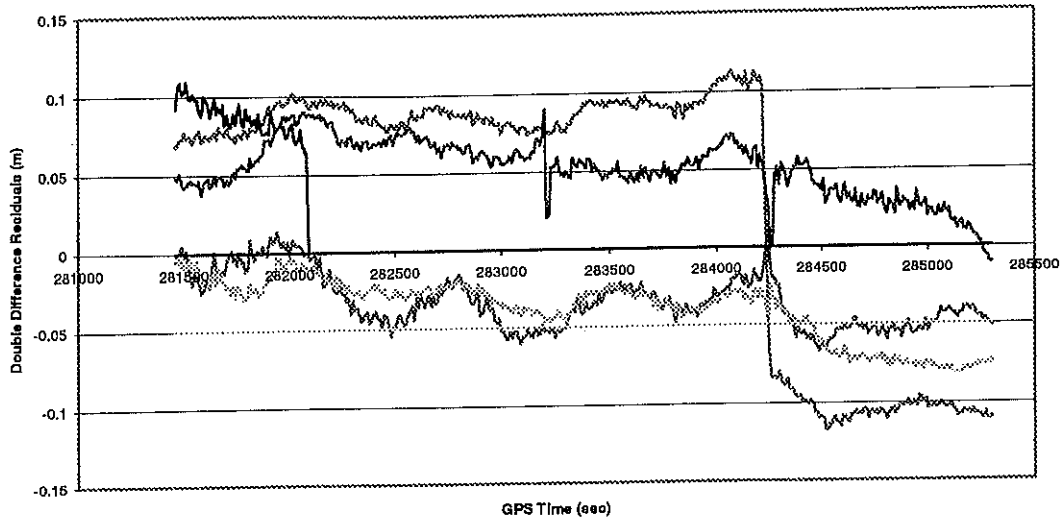


図5 アンビギュイティが正確に決定されていない場合

L1 Carrier Double Difference Residuals, Aoba, Corrected VRS vs. Raw Data, Feb. 13, 2001

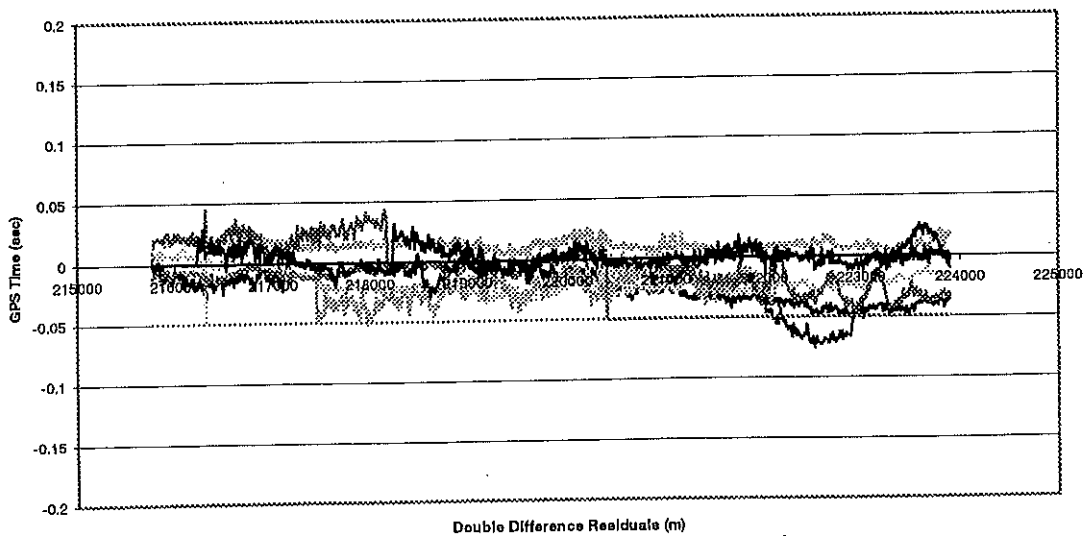


図6 アンビギュイティが正確に決定されている場合

基準局間のアンビギュイティが正確に決定されているかどうかは、Bernese 等の既の実績のある基線解析ソフトウェアにより基準局のデータを解析することによって比較することが可能であり、独立して NetAR の検証を行う上で今後必要な作業であると考えている。ま

た、基準局間のアンビギュイティは衛星が新たに地上から昇ってくる場合、またサイクルスリップが起きた場合などに新たに決定しなおされるが、常に正確にアンビギュイティが決定されていることを監視する仕組みがシステム内に必要であると考えられる。

#### 4.3 誤差要因の排除

その他に、アンビギュイティの決定時に影響を及ぼす誤差要因として、またはアンビギュイティが正しく決定された場合でも補正量推定に誤差を与える主要な要素として、

- (1) 基準局座標の精度
- (2) マルチパスの影響
- (3) アンテナ位相特性

があると考えられる。(1)に関しては計算の中で正しいものと仮定しており、また(2)については各基準局において固有の誤差であり、計算の中では基本的に“ない”ものとして仮定されている。つまり実際にこれらに基づく誤差が存在する場合には推定された補正量が誤差を持つことになり、最終的な測位精度にも影響を及ぼすことになる。マルチパスの影響を極力受けないようなサイトおよび設置方法を検討するとともに、座標の決定は正確に行うよう細心の注意が必要である。

同様に(3)についても今回の実験において独自の基準局を利用した結果、アンテナ位相特性の違いが誤差要因となった可能性が考えられる。異なる位相特性を補正するための仕組みを取り入れるか、あるいは極力同じアンテナを利用するという現実的な方法も選択肢となるであろう。

いずれにしてもこれらはVRSソフトウェアというエンジンに入力する素材である。いかにエンジンが正常に機能していようとも、これら素材に問題があれば、望ましい結果を得ることは難しい。実験を行う前の準備段階として、これら誤差要因の排除には細心の注意を払う必要があると考える。

#### 5. まとめ

現在、6月末を目標として、新たにテストサイトを構築中である。リアルタイム測位実験において得られた結果と教訓をもとに、VRSというシステムを実用化する上で必要となる検証実験を引続き行っていきたいと考えている。また、これらの実験を通じて、より信頼性の高いシステム構築と運用のためのノウハウを身に付けていくことが必要であると考えている。