

5.5 仮想基準局方式を用いた 高精度位置インフラへのアプローチ

河口星也 (DXアンテナ) 笹野耕治 (テレビ朝日)

藤井健二郎 (日立製作所) 近藤雅信 (NTT コミュニケーションズ)

羽田久一 (WIDE プロジェクト・奈良先端大)

5.5.1 はじめに

近年、GPS を利用した高精度測位が様々な分野において実用化されつつあり、特にリアルタイムで cm 精度の位置決定を行うことが可能である RTK-GPS (リアルタイムキネマティック GPS、以下 RTK) は土木、建設、測量、GIS 等の分野において利用され、着実に成果を挙げている。その一方で、RTK においては DGPS のように国内全域をカバーするインフラがまだ整備されておらず、そのため通常は利用者が独自に基準局を設置するとともに基準局-移動局間の通信手段を確保する必要があるなど利用者から見た場合に制約が多く、いまだ幅広い分野において普及しているとは言い難い。

また、技術的な観点から RTK を見た場合に、RTK 本来の cm 精度 (FIX 解) を維持できるエリアが基準局から概ね 10km 程度と限定されるため、“狭い範囲で高精度”が要求されるアプリケーションにおいて利用が進む一方で、“広い範囲で高精度”を要求されるアプリケーションには不向きとされてきた。例えば移動体を対象とするような広域かつシームレスな測位を要求されるアプリケーションを実現するためには、非常に高い密度で基準局を設置してやる必要があり、基準局-移動局間の通信手段確保の難しさと相まって、事実上このようなアプリケーションを実現することは不可能であった。

このような現状を踏まえて、昨年より、「仮想基準局 (VRS)」という新たなキーワードが登場し注目を浴びつつある。この仮想基準局方式とは、これまで原理的に不可能であった長距離の RTK を実現する新しい RTK の手法であり、広域を対象とした高精度位置インフラの構築に向けて必要不可欠な技術であると位置付けられている。

また一方で RTK 測位時に不可欠な基準局と移動局間の通信手段に関して、既に全国にわたって普及している TV 放送を利用する試みが数年前より実施されている。主要都市での TV 放送はいずれも大電力で放送されているため電波の到達距離が大きく、利用者はこの音声信号の副搬送波 (Audio Subcarrier Channel: ASC) を利用したデータ放送を受信することにより、広域にわたって安定して RTK の補正データを受信することが可能となる。仮想基準局方式により原理的に長距離の RTK が実現したとしても、そのメリットを享受するためには広域のユーザーに対して補正データを提供する伝送手段を確立する必要があるため、この ASC 方式を用いた放送システムは非常に有効である。

SA が解除され、また既にインフラとして確立している 1m 精度の DGPS の次に求められるのは、より高精度な cm 精度の測位をシームレスに実現する RTK のインフラではないだろうか。本稿では RTK をより広域において実現するために不可欠なこの 2 つの要素技術を説明するとともに、新たな高精度位置インフラの構築に向けての歩みを紹介する。

5.5.2 仮想基準局 (VRS) 方式を用いた RTK

従来の RTK においては、基準局において生成される基準局データ (補正データ) を移動局に向かって、例えば特定小電力無線等を用いて送信し、移動局側において測位計算を行うという方式が一般的

である。この時、GPS 衛星から到達する電波は、電離層および対流圏を通過する際に遅延（大気遅延）を生じる。この伝播遅延量は受信機の上空に広がる大気の状態変化に応じて増減しており、基準局と移動局間の距離が大きくなるに伴い、一般的に相関は小さくなる。つまり基線長が短ければ基線の両端における大気遅延量は物理的にほぼ同一と考えられ、測位計算時に上手く相殺処理されるが、基線長が長くなるとともに相殺効果が減少するため、結果として測位解に誤差を生じるか、あるいは FIX 解を得ること自体が難しくなる。特に電離層の影響は季節や時間帯、また太陽の周期的な黒点活動にも左右され、一般的に基線長が概ね 10km 以上になると、通常の RTK で安定した測位を行うことは難しいのが現状である。また、こうした実際の環境を踏まえて、通常の RTK 受信機は基線長が長くなるとともに計算アルゴリズムを最適化させ、“無理には FIX 解を求めない”方向で計算を行う傾向がある。すなわち物理的な意味での「距離」が従来の RTK における事実上の制約条件であり、広域において安定した RTK 測位を実現するためには、単純に考えても 20km 程度の間隔で基準局を設置していく必要がある。

一方、仮想基準局（Virtual Reference Station: VRS）方式はこの距離的な限界を、その名の通り、移動局の近傍に“仮想的な”基準局を作成することにより解決する新しい手法である。カルガリ大学の Department of Geomatics Engineering において 1996 年にスタートしたこの研究は、複数の基準局のデータをネットワーク処理し、エリア内における電離層・対流圏遅延誤差、および軌道誤差をモデル化し補正計算を行うことで、結果として特に長基線における RTK 測位精度が向上するという点に着目したものである。この研究はその後ノルウェーの SATREF と呼ばれる基準局ネットワークにおいて数年間にわたって検証され、その効果が実証されている。その手順は大まかに以下の通りである。

(1) 基準局データの収集

対象とするエリア内には、30km~100km 程度の間隔で基準局を設置する。この基準局間隔は期待する精度に応じて設計されるが、電離層や対流圏の地域的な不均質を上手く補正することが可能となるよう配置する必要がある。各地点に配置された基準局のデータは、ISDN 回線や専用線、またはインターネット等のリアルタイム通信手段を用いて、次の制御局に収集される。

(2) 制御局におけるデータ処理

制御局に収集された各基準局データはサーバ（仮想基準局用ソフトウェア）において処理され、それらのデータをもとにエリア内の電離層・対流圏遅延および軌道誤差がモデル化される。具体的には、エリア内に複数の格子点を設定し、その格子点における各誤差量

（補正量）が推定され（補正グリッドデータ）、ある特定の基準局データとともに移動局に向けて送信される。

(3) 移動局における仮想基準局計算

制御局から受け取った補正グリッドデータをもとに、移動局座標における補正量が改めて計算される。さらに計算された移動局補正量と制御局から受け取った基準局データをもとに、移動局座標における“仮想的な”基準局データが再構築される。この再構築されたデータは実際の基準局のデータではな

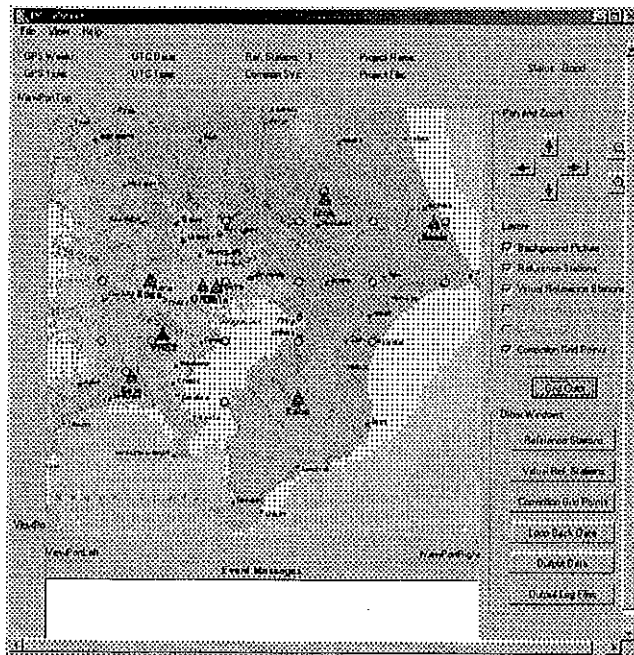


図 5.5.1 MultiRef 画面

いため“仮想基準局”データと呼ばれる。仮想基準局データは移動局受信機に入力され、ここからは通常のRTK計算が行われる。

結果として、実際の基準局との距離が10km以上ある場合でも、移動局においてはあたかも近傍に基準局があるかのようにRTK計算を行うことが可能となるわけである。図5.5.1にカルガリー大学によりそのアルゴリズムを開発された仮想基準局用のソフトウェアMultiRefの画面例を示す。

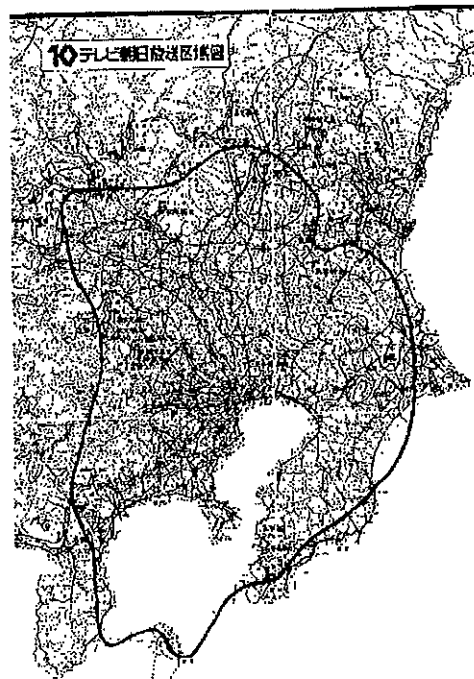
5.5.3 TV放送を用いた補正データ配信サービス

地上テレビ放送の最大の特徴は、全国あまねくサービスが得られることである。また主要都市でのTV放送はいずれも大きな電力で放送されている。したがって電波の到達距離が大きい。

テレビ朝日の東京タワー送信所は、海拔高約300m、音声出力電力12.5KW、映像出力50KW、TV10chである。八木アンテナで受信した時の受信エリアは図5.5.2の黒枠の通りである。北は栃木県宇都宮市100km、東は千葉県佐原市55km、南は大島70km、西は埼玉県秩父市70km付近まで受信が可能である。一方手持ちの携帯アンテナで受信すると、東京タワーを中心に約30~50kmが受信限界になる。特にRTKのFIX解を維持するためには安定した受信レベルが必要となるため、場合によっては信号増幅用のブースターを使用する必要がある。

一般的にRTK測位においては、利用者が独自に基準局を設置するとともに、基準局からの補正データ伝送手段をも確保する必要がある。この際に無免許で利用できる特定小電力無線を用いたり、また携帯電話、PHS等を用いるケースがほとんどであるが、前者は有効範囲が非常に限定されること、また後者は時間に応じて通信費を課金されることから、連続的に運用するには必ずしも有効な手段であるとはいえないのが現状である。

また、これまでは近くの三角点や電子基準点等を利用してまず基準局の座標値を決定してやる必要があったが、大電力のテレビ電波を利用することにより、FIX解を得られる範囲においては新たに基準局の座標を決定する必要がなくなり、結果としてRTK測量作業開始時における手間を格段に省くことが可能となる。



5.5.3.1 ASCの特徴

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。画像の隙間を利用したデータ放送はADAMS、BITCAST、ITビジョンで実用化されている。図5.5.2 テレビ朝日のサービスエリア
しかし車の中でテレビを見ると画像が乱れるので、これらの方式では移動時における受信が難しい。しかしASCは音声の隙間に乗せるデジタル信号なので、例えば時速200kmの新幹線においても受信が可能である。すなわちRTKサービスのみならず車など移動体向けのサービスも実現可能である。

5.5.3.2 ASC 信号の技術仕様

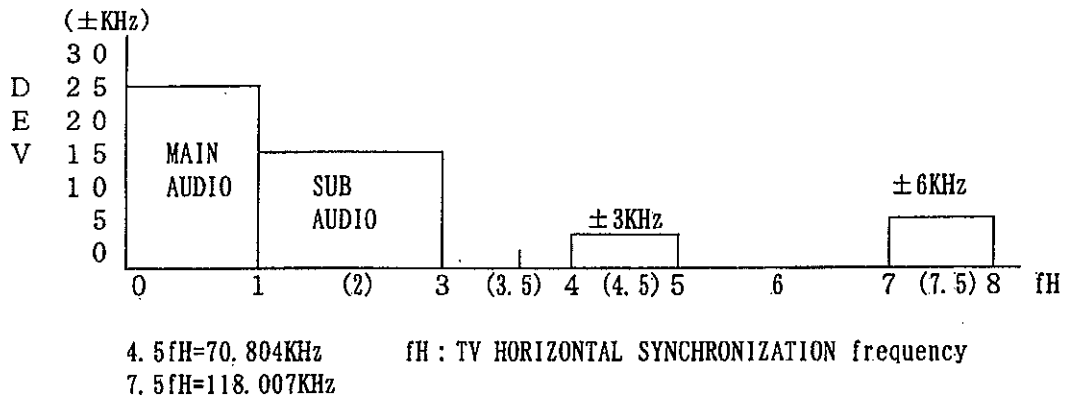


図 5.5.3 TV 音声のスペクトル

TV 音声のスペクトルを図 5.5.3 に示す。TV 音声の上にある隙間に 2 つのデータチャンネル副搬送波を設定している。技術諸元の概要は以下の通りである。

- ①実行伝送速度 9.6KBPS (1 波当たり)
- ②伝送速度 16,000kbps
- ③副搬送波周波数 4.5fH : 70,804kHz 7.5fH : 118,007kHz
- ④主搬送の周波数偏移 4.5fH : ±3KHz、7.5fH : ±6KHz
- ⑤副送波の変調方式 DQPSK

fH は TV 画像同期信号周波数

ここで $n \times fH$ は TV 画像同期信号の高調波であり、画像信号から音声帯域への回り込みによる妨害である。データチャンネル副搬送波 1 波あたり 9.6kbps の伝送容量なので、合計 19.2kbps となる。

5.5.3.3 RTK を可能にする少ない信号遅延時間

図 4 にフレーム構成を示す。信号の 1 フレームは 16 ビットのフレーム同期信号 + 288 ビット × 32 パケットとなっている。これをビットインターリーブして送出している。1 フレームの伝送時間は 0.577 秒と非常に少ない。これが遅延時間に大きく精度を左右される RTK を可能としている理由である。

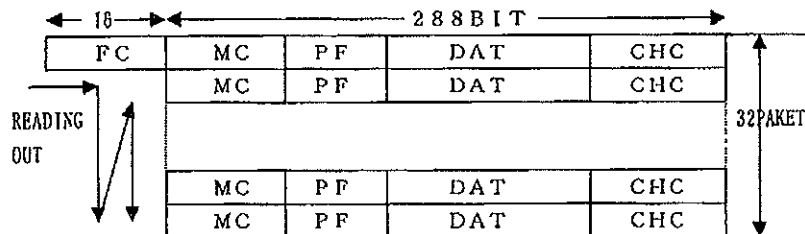


図 5.5.4 フレーム構成

5.5.4 仮想基準局方式を用いた実験システム

本年 5 月より、TV 朝日、日立製作所、および WIDE プロジェクトの技術協力のもと仮想基準局方

式の検証を目的とした実験システムを構築し、試験運用を行っている。この実験システムは基準局部、制御局部、送信局部、そして移動局部の4つのサブシステムから構成されており、それぞれ今回の仮想基準局方式を実現する上で不可欠な要素となっている。今回の実験システムの構成を図 5.5.5 に示す。

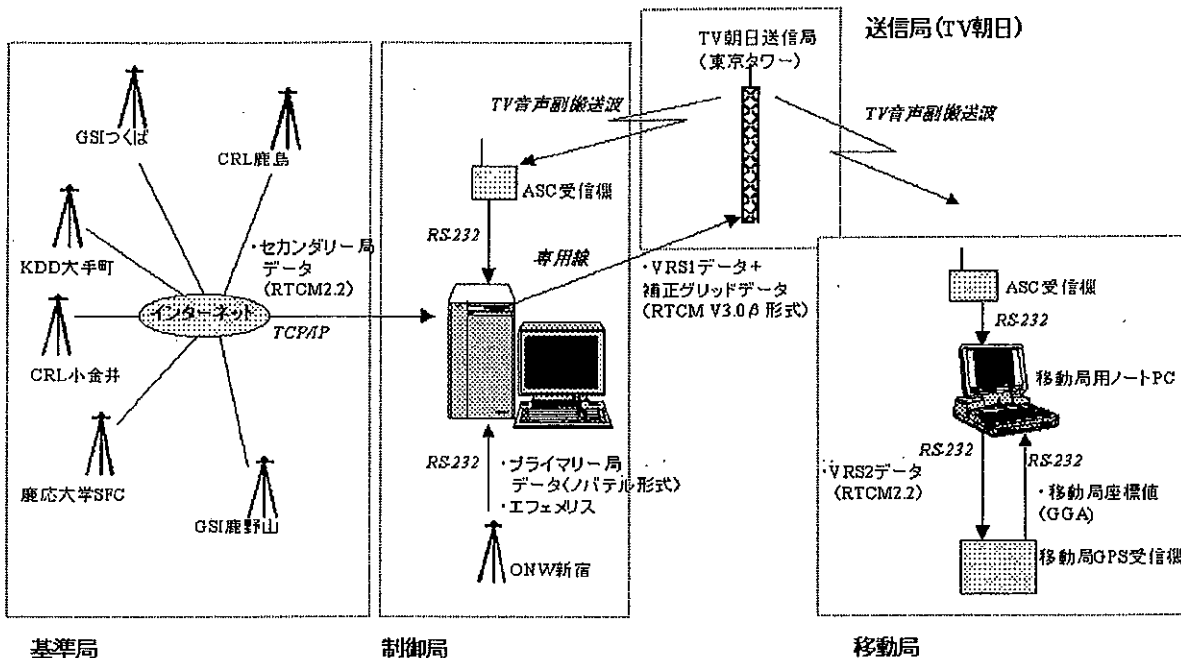


図 5.5.5 実験システムの構成

5.5.4.1 基準局部

本システムでは、基準局間距離が最大で 100km 程度に達する合計 7 局の基準局を利用している。各基準局には 2 周波 GPS/GLONASS 受信機であるマゼラン社 Z18 受信機および高精度のチョークリングアンテナが設置され、1 秒間隔で RTCM V2.2 フォーマットにおけるタイプ 3（基準局座標）、タイプ 18（搬送波位相測定値）、およびタイプ 19（擬似距離測定値）の 3 種類のメッセージを出力している。これらのメッセージは通常の RTK において基準局から送信されているいわゆる“補正データ”と全く同じデータである。出力されたデータは RS-232C 経由で基準局サーバ（グローバル IP アドレスを割り当てられた FreeBSD マシン）に入力され、今回開発されたプロトコルに基づきインターネット用のデータ形式に変換された上で、次章で述べる制御局サーバに対して送信される。なお、制御局サーバや通信回線にアクシデント等があり通信が一旦切断された場合、基準局サーバは 5 分間ごとに制御局サーバへの接続をリトライするように設定されている。

特にコスト面と拡張性（汎用性）という観点から考えた場合、インターネットは基準局—制御局間の通信手段として非常に有効である。仮想基準局方式においては、基準局と制御局間が常時接続されている必要があるが、通常の公衆回線を利用した場合、そのコストは非常に大きなものになる。また、専用線を利用する場合はその通信距離に応じてコストが左右されるため、より広域の RTK を実現しようとするほどコストがかさむ結果となる。今回の実験システムにおいては設置個所の LAN 経由でインターネットに接続しているためこの通信部分のコストを実質的に 0 に抑えている。仮にこの LAN 接続方式が不可能であるとしても、近くのインターネットへのアクセスポイントを利用することで回線使用料を削減することは可能である。

また、拡張性という観点から言えば、インターネットを利用することで、例えば複数のアドレスに同時に基準局データを送信することも可能になる。これは将来的に制御局を追加した場合に基準局デー

データの送信先を複数指定することで容易に実現が可能である。一方で将来的に基準局を追加した場合データの受け側である制御局においては、インターネットへの接続さえ確立していれば特に物理的に機器を追加する必要がないことを意味する。

さらに基準局サーバが IP アドレスを持っていることで、基準局の制御を世界中どこからでも容易に行うことが可能になる。実際に今回のシステムにおいては基準局の設定変更を複数の異なる場所から行っている。なお、このインターネットを用いた基準局データ収集システムは WIDE プロジェクト、慶応大学 SFC 研究所インターネット自動車コンソーシアム、および奈良先端科学技術大学院大学の技術協力により構築されたものである。

5.5.4.2 制御局部

制御局には基準局と同様にグローバル IP アドレスを割り当てられたサーバが設置されており、ソケットサーバと呼ばれるプログラムにより各基準局からインターネット経由でのデータをリアルタイムで受信する。受信された各基準局データは本実験システムの心臓部とも言うべき MultiRef (仮想基準局用ソフトウェア) に受け渡され、エリア内の電離層・対流圏遅延誤差および衛星軌道誤差がモデル化される。

基準局は実はその役割から 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。今回は制御局にも基準局受信機を設置しており、その測定データを RS-232C 経由で直接制御局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。このプライマリー局データは最終的に移動局側において作成される仮想基準局データ “VRS2” の原型となるデータであり、“VRS1” と呼ばれている。一方で、残りの基準局はセカンダリー局と呼ばれ、電離層・対流圏遅延誤差および衛星軌道誤差モデル (補正グリッドデータ) を作成するために利用される。これらの誤差要因は時間的な変化がそれほど急激ではないため、現実的には伝送遅延が 1 秒～30 秒程度あったとしても最終的な測位精度には影響を及ぼさない。今回セカンダリー局との通信にインターネットを利用することで、時間帯等により多少伝送時間を要する場合でも、結果的には何ら問題は生じておらず、インターネットの有効性が証明されている。

なお、制御局において作成された VRS1 データおよび補正グリッドデータは専用線により次の送信局部に伝送される。

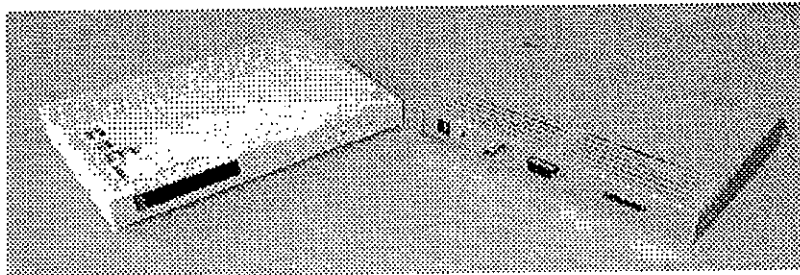
5.5.4.3 送信局部

今回のシステムにおいては移動局への補正データ伝送手段として前述の TV 朝日により開発された特許技術である ASC を利用している。制御局において生成された VRS1 データは、専用線により TV 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を容易にカバーしている。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) に対してまだ余裕があるため、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と考えられる。

5.5.4.4 移動局部

移動局には、上記 ASC 方式に対応した受信機 (図 5.5.6)、最終的な仮想基準局作成のためのソフトウェア (移動局用 MultiRef ソフトウェア) をインストールしたノート PC、および RTK 対応 2 周波 GPS 受信機を利用している。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出力し、この座標値における補正量が受信された補正グリッドデータから改めて補間計算される。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されることにより最終的な仮想基準局データである VRS2 データが再構築される。このデータは通常の RTK 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 計算が行われることになる。
 図 5.5.6 ASC 対応受信機



5.5.4.5 補正データのフォーマット

実際に制御局から送信されるメッセージは、基準局データ（搬送波位相、擬似距離）に関しては現在 RTCM 委員会において策定中である RTCM V3.0 7th Draft 形式に準拠している。また補正グリッドデータのフォーマットに関しては、ネットワーク RTK における標準フォーマットとして V3.0 において採用されるよう RTCM 委員会に対して提案を行っている。以下に提案されたタイプ 301、302、303 の詳細を示す。これらのメッセージが将来的に RTCM V3.0 において正式に採用され、市販の受信機が対応することになれば、移動局における仮想基準局計算が全て受信機内ファームウェアで行われることとなり、移動局側の機器構成が非常にシンプルになることが期待される。

表 5.5.1 タイプ 301 グリッド定義メッセージ

Data Item	# bits	Units/scale	Range
Message Number	16		
Grid ID	8	dimensionless	0 - 255
Correction Type	4	dimensionless	0 - 15
Correction Type	4	dimensionless	0 - 15
Correction Type	4	dimensionless	0 - 15
Spare	4		
Latitude of SW corner	24	0.00005 degrees	+/- 1800000 (+/- 90 deg)
Longitude of SW corner	24	0.00005 degrees	+/- 3600000 (+/- 180 deg)
North step size	16	0.0001 degrees	0 - 65535 (0.65535 deg)
East step size	16	0.0001 degrees	0 - 65535 (0.65535 deg)
Maximum east step	16	dimensionless	0-65535
Number of grid points	16	dimensionless	0-65535
Grid point ID 1	32	dimensionless	0 - 4294967295
Grid point ID 2	32	dimensionless	0 - 4294967295
-	-	-	-
Grid point ID N	32	dimensionless	0 - 4294967295
Total:	152	+ 32* N	

表 5.5.2 タイプ 302 補正メッセージ

Correction Header:

Data Item	# bits	Units/scale	Range
Message Number	16		
Grid ID	8	dimensionless	0 - 255
Correction Type	4	dimensionless	0-15 (See Table 2)
Spare	4		
IODÉ	8	dimensionless	0 - 255
Epoch time (TOW)	30	milliseconds	0 - 604800000
SV ID	6	dimensionless	0 - 63 (Prn -1)
Maximum Latency	12	seconds	0 - 4096
Total:	96		

Correction Message

Data Item	# bits	Units/scale	Range
Correction	16	mm	+/- 32768 mm
Standard Deviation	8	2 mm	0 - 510 mm
Total:	24		

表 5.5.3 タイプ 303 衛星座標メッセージ

Data Item	# bits	Units/scale	Range
Message Number	16		
SV ID	8	dimensionless	0 - 63
Valid period	8	seconds	0 - 255
Epoch time (TOW)	16	15 seconds	0 - 40320
Iode	8	dimensionless	0 - 255
OmegaDot	32	2e-38 semi-circles	0 - 65535
Satellite X coordinate	64	metres	
Satellite Y coordinate	64	metres	
Satellite Z coordinate	64	metres	
Satellite clock correction (Af0)	32	1/(C*10e4) seconds	
X velocity	32	1/(3*10e5) m/s	
Y velocity	32	1/(3*10e5) m/s	
Z velocity	32	1/(3*10e5) m/s	
T velocity	32	1/(C*3*10e5) s/s	
X acceleration	32	1/(4.5*10e6) m/s/s	
Y acceleration	32	1/(4.5*10e6) m/s/s	
Z acceleration	32	1/(4.5*10e6) m/s/s	
T acceleration	8	1/(C*4.5*10e6) s/s/s	
X jerk	16	1/(4.5*10e7) m/s/s/s	
Y jerk	16	1/(4.5*10e7) m/s/s/s	
Z jerk	16	1/(4.5*10e7) m/s/s/s	
Total	592		

5.5.4.6 これまでの実験結果例

上記実験システムに基づき得られた予備実験結果の一例を図 5.5.7 に示す。最も近い基準局までの距離は約 30km で、1 時間静止状態で RTK を行った際の測位解の水平成分のばらつきを示しているが、従来の短基線の RTK とほぼ遜色ないと考えられる結果 (2drms=2.4cm) が得られていることがわかるであろう。今後さらに実験を継続するとともに精度検証を行っていく予定である。

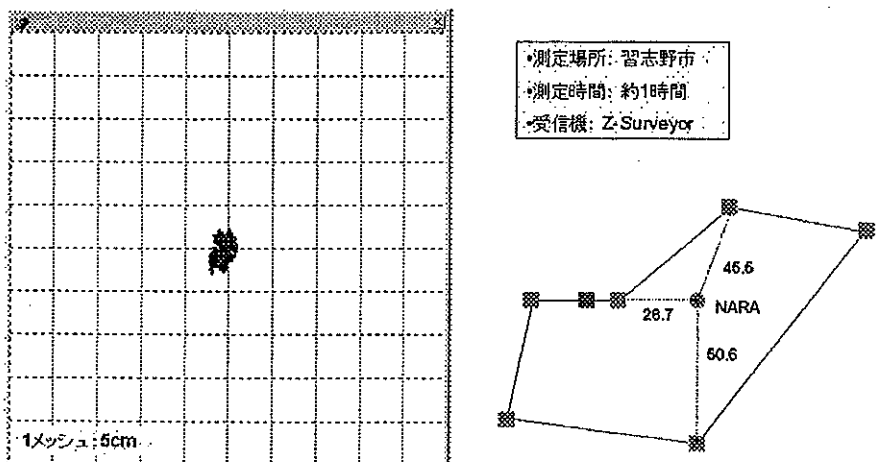


図 5.5.7 実験結果例

5.5.5 おわりに

今後本実験システムの検証作業を行っていくとともに、現実的なインフラ整備に向けての準備を推進していく予定である。高精度位置インフラを構築することにより、移動体のナビゲーション、個人向けのマンナビゲーション、都市部における GIS、またその他様々な分野において RTK が手軽に利用可能になることを期待している。

謝辞 本実験システムを構成する基準局の設置にあたって、建設省国土地理院、郵政省通信総合研究所の関係者各位には多大なご協力を頂きました。ここに改めて感謝の意を表します。