

リアルタイム測位技術の現状と課題

DX アンテナ株式会社 河口 星也

1. はじめに

ここ数年、GPS から得られる位置情報の需要が高まりつつある。昨年末に au から発売された GPS 機能付き携帯電話の累計利用者数は今年 4 月末の段階で既に 100 万を突破したと発表され、位置情報に対するニーズの高さと、その潜在的な市場の大きさを裏付けている。米国でも E911 の後押しにより端末メーカーが同技術を導入しつつあり、いまや国内で 7000 万台を超える携帯端末において今後最も期待される機能は GPS を利用した位置検出機能であると言われている。また、いまや標準装備となりつつあるカーナビゲーションの出荷台数も年々増加しており、2002 年 3 月時点で総計 900 万台以上、2002 年度に限っても約 200 万台が出荷されている。これらを利用することで、ユーザは自分の位置情報を地図上でリアルタイムに確認するとともに、目的地への経路探索や付近の施設情報検索が可能となり、またこれら位置情報を活用したロケーションサービスやテレマティクス分野も広がりを見せつつある。このように「位置情報」は情報通信技術におけるキーワードとして各方面において大きな注目を集めつつある。

一方で、位置情報の根幹となる、GPS 測位技術もここ数年で大きな発展を見せている。従来不可能であった都市部や室内といった遮蔽空間における測位を可能とする技術として、インドア GPS、またはアシスト型 GPS (AGPS) と呼ばれる技術が開発され、一部は前述のように携帯電話において既に実用化されている。また、都市部における歩行者の安全な移動を目標とした歩行者 ITS 等のプロジェクトにおいて、GPS を補完しシームレスな測位環境を実現するための手段として、擬似的な GPS 信号を発生するスードライト (Pseudolite) 技術の検証が国内でも始まり、社会実験等を通じてその有効性が確認されている。この他にも、米国 JPL/NASA において開発された GDGPS (Global DGPS) が世界中どこでもシームレスに水平 10cm、鉛直 20cm 以下の測位精度を実現する手段として、RTK-GPS に続く高精度測位技術として注目を集めつつある。

このような市場における位置情報ニーズの高まりと測位技術の発展に平行して、国内における測位インフラの整備も進んでいる。現在国土地理院により設置・運用されている電子基準点 (947 点) のうち 200 点は既にリアルタイム化され、1 秒間隔で記録された観測データは常時接続回線 (IP-VPN) を通じて国土地理院に収集されている。このリアルタイムデータは平成 14 年 5 月 27 日より配信機関である日本測量協会を通じて民間会社への提供が開始されており、国内における高精度リアルタイム測位の基準局網としての役割を期待されている。本稿では「いつでも、どこでも、誰でも」正確な位置を知るための手段とし

て現在注目されつつあるリアルタイム測位技術を紹介するとともに、国内における高精度リアルタイム測位を実現するための有力な技術である仮想基準局方式に関して、平成 13 年度に実施されたリアルタイム測位実験を通じて得られた結果をもとに、今後の課題を述べる。

2. リアルタイム測位技術の現状

リアルタイム測位を“リアルタイムで利用者がその位置を知ることができる測位方式”と定義した場合、GPS を利用したいいわゆる単独測位、DGPS、そして RTK-GPS が挙げられる。ここでは単独測位の発展型ともいえるアシスト型 GPS (A-GPS)、全世界的に利用可能で、かつ RTK-GPS に近い高精度を実現するグローバル DGPS (GDGPS)、そして都市部や室内におけるシームレスな測位を支援するスードライト (Pseudolite) の 3 つの測位技術について紹介する。

2. 1 A-GPS

移動体通信網経由で各種アシストデータを送ることにより、従来の単独測位では不可能であった高感度、初期位置計算時間 (TTFF) の高速化、およびそれに伴う低消費電力化を実現するのがアシスト型 GPS (A-GPS) である。通常 GPS 測位においてはまず GPS 衛星からの信号を捕捉し、次に軌道情報を取得することで測位計算が可能となるが、都心部など遮蔽物の多い空間では GPS 信号を安定して受信することは難しく、結果的に軌道情報 (1 メインフレームあたり 30 秒) の取得に時間がかかるだけでなく、測位そのものが不可能なケースも多い。これに対して A-GPS では移動体通信網経由で軌道情報を取得する。(図 1)

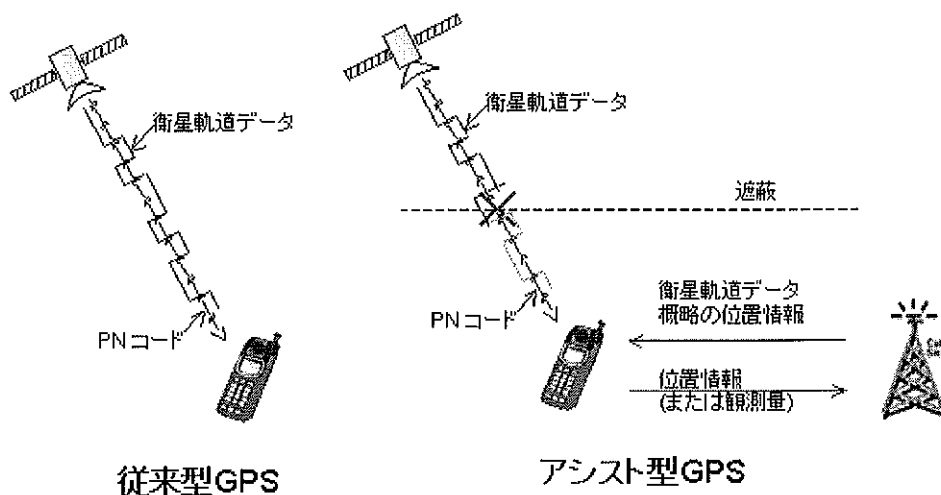


図 1 従来型 GPS とアシスト型 GPS (A-GPS)

A-GPS の有力開発メーカーのひとつである Global Locate 社の IndoorGPS™ 技術におい

ては世界各地に配置した独自の基準局網により作成した軌道モデルや、サーチ時間短縮のための概略位置等をアシストデータとして端末に提供する。端末側では 16000 個の相換器を備えた独自の GPS チップセット (図 2) を利用することで、電源投入後初期位置の決定までが通常条件下で 250m 秒という高速 TTFB と最大受信感度-158dBm という高い受信感度を実現している。(図 3) また、測位計算自体を端末側で行う端末測位モードと、サーバ側で行うサーバ測位モードがあり、端末測位モードではサーバ側との通信が確保できない状況になっても引き続き測位が可能であり、特に LTO と呼ばれる長期軌道モデルを用いることで最大 1 週間程度は測位が可能であるとされている。

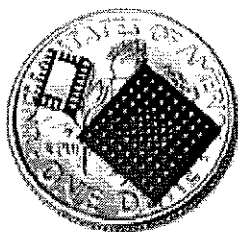


図 2 GL-16000 チップセット

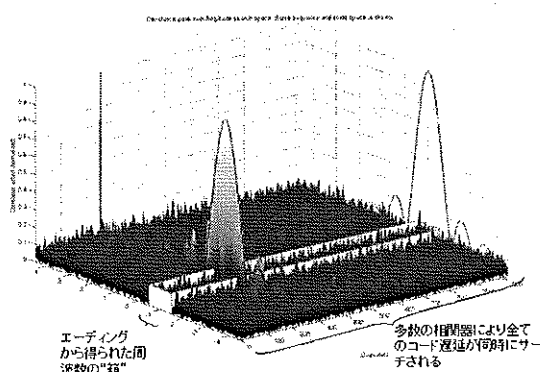


図 3 A-GPS における信号サーチ

なお、IndoorGPS™ の測位精度に関しては、各種環境条件によっても異なるが、市街地で 5-10m (CEP) 程度、建物内で 18m (CEP) という例が報告されている。現状では、より高い精度が求められるアプリケーションには不十分であるが、各種携帯端末への組込用として今後の普及が期待されるとともに、従来型 GPS では難しかったセキュリティ分野に関わるアプリケーションへの導入も予測される。

2. 2 GDGPS (グローバル DGPS)

米国 NASA/JPL により開発された、世界規模の DGPS システムで、全世界的に配置された基準局網 (23 局) からリアルタイムで収集された観測データをもとに、2 周波 GPS 受信機用の補正データを生成する。補正データの内容は主にクロック補正と衛星の軌道補正であり、ユーザ側で 2 周波受信機を使うことで、水平方向で 10cm (rms)、鉛直方向で約 20cm (rms) 以下の測位精度を実現している。

現在 NASA/JPL は上記 GDGPS のコア技術および基準局網の利用について米国 NAVCOM 社とライセンス契約を締結しており、上記 GDGPS に基づいた高精度 DGPS サービスが StarFire™ というサービス名で提供されている (図 4)。補正データはインマルサ

ット通信衛星経由で提供されており、対応受信機を利用することで日本を含むほぼ世界中どこでも高精度 DGPS が可能となる。図 5 は約 15 時間の静止測位結果であるが、水平成分の標準偏差約 5~6cm、鉛直成分の標準偏差で約 11cm と、RTK-GPS に近い精度の測位結果が得られている。従来の DGPS と RTK-GPS の間に位置付けられる技術として、高精度かつ安定性の要求される移動体ナビゲーション等の分野で普及が期待される。

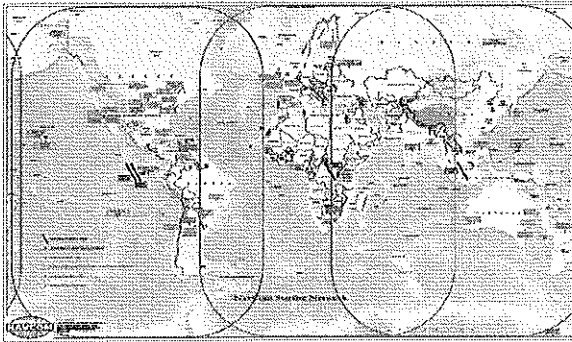


図 4 StarFire™ の基準局網とカバレッジ

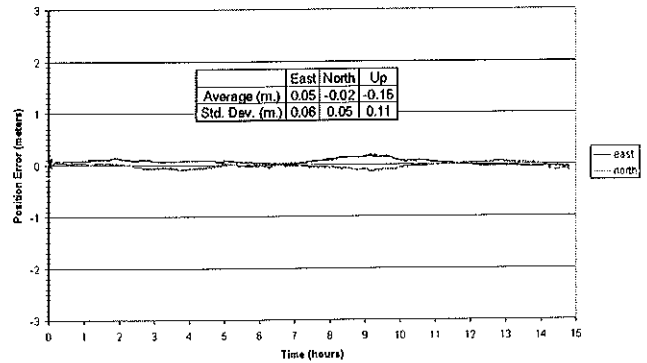


図 5 StarFire の測位精度例™

2. 3 スードライト (Pseudolite)

A-GPS が携帯端末での利用を想定し、アシストデータを利用することで厳しい環境条件下での測位を可能にする技術であるのに対し、スードライト (Pseudolite) はその名の通り地上に設置する擬似的な GPS 信号発生器であり、GPS 信号の届かない空間に設置することでシームレスな測位を可能にする。図 6 は建物により遮蔽される GPS 衛星を補完するために、屋上にスードライトアンテナを設置した例である。

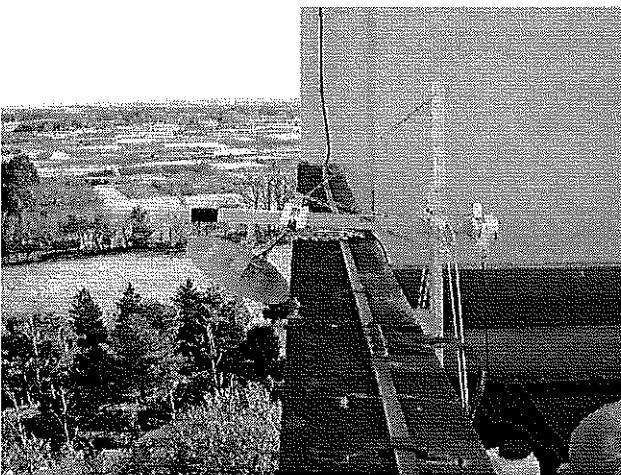


図 6 スードライトアンテナ屋上設置風景

スードライトの基本的な概念としては、GPS 衛星と同様に ICD-200 に準拠した測位コー

ドおよび搬送波位相が実際の GPS 信号とほぼ同じフォーマットで生成、送信し、受信機側でスードライト信号を受信することで利用する衛星数が増加するという利点がある。また、航空機などにおいては地上に設置されたスードライトを利用することにより VDOP が改善され、鉛直成分の測位精度が向上するという利点もある。各スードライトが実際の GPS 衛星のように同期していないため、基本的には基準局から移動局に対してデータを送信する相対測位方式を用いる。国内においては既に昨年度から実証試験が実施されており、実際の都市環境における検証も行われている。図 7 および図 8 は建物に GPS 信号が遮蔽される空間で、GPS のみで測位した場合と、GPS とともにスードライトを利用した場合の測位プロット例である。スードライトを利用した場合に測位が安定することがわかる。既に室内、車両をターゲットとした実験も始まっており、今後の進展に期待がもたれている。

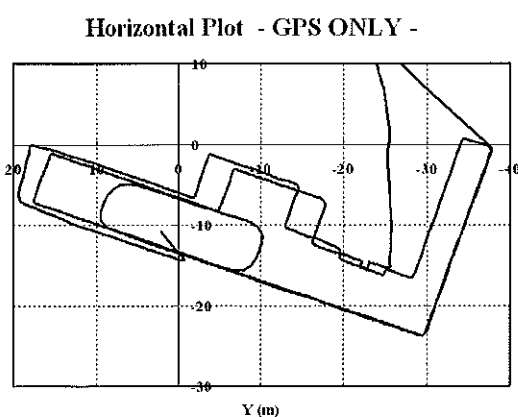


図 7 GPS のみで測位した場合

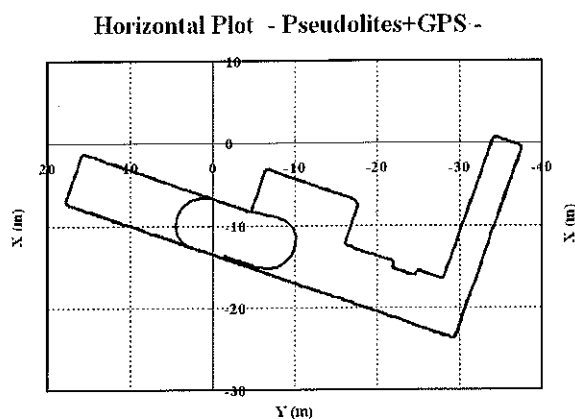


図 8 GPS+スードライトで測位した場合

3. 仮想基準局方式を用いた RTK-GPS

前節では主に単独測位～DGPS レベルでの測位について述べたが、cm の測位精度を要求されるアプリケーションにおいては既に RTK-GPS が実用化されており、様々な分野で活用されている。その一方で、従来の RTK-GPS では電離層および対流圏遅延の影響により、実質的に利用可能な範囲が基準局から半径 10km 程度と制限されるため、広域において RTK-GPS を利用することは技術的にも、またインフラ的にも難しかった。これに対して国土地理院では電子基準点のリアルタイム化を進めており、現時点で 200 点の電子基準点のリアルタイムデータが民間に開放される運びとなっている。このリアルタイムデータを提供する電子基準点というインフラと、仮想基準局方式を利用することで、広域における RTK-GPS 利用が可能となる。以下、仮想基準局方式の概念と、平成 13 年度に実施された電子基準点を用いたリアルタイム測位実験に関して述べる。

3. 1 仮想基準局方式の概念

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伝播遅延を生じる。

一般的に観測点間の距離が短ければ二重位相差計算時に相殺処理されるが、基線長が長くなるとともに相殺効果が薄れ、測位精度の劣化やアンビギュイティの決定ミスを生じる可能性が高くなる。特に電離層は空間的に 10km~数 10km のオーダーで不均一に分布しているとされており、季節や時間帯、また太陽の周期的な黒点活動にもよるが、基線長が概ね 10km 以上になると、通常の RTK-GPS では FIX 解を得ることが困難になるとされている。すなわち RTK-GPS を利用して数 cm 精度の測位を実現するためには、“基準局からの距離”が事実上の制約条件となり、広域においてシームレスな RTK-GPS を実現するためには、単純に考えて最低でも 20km 間隔で基準局を設置していく必要がある。

仮想基準局 (Virtual Reference Station: VRS) 方式とは RTK-GPS における距離的な限界を、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方式である。仮想基準局を作成するにあたって、複数の基準局 (基準局網) における観測量をもとにエリア内における相対誤差を補正することからネットワーク RTK とも呼ばれる。

3. 2 電子基準点を利用したリアルタイム測位実験

平成 13 年度、国土地理院による電子基準点を利用したリアルタイム測位実験が、岐阜および関東の両地区において実施された。実験で使用された電子基準点は岐阜地区で 4 点 (本巣、南濃、愛知大口、甚目寺)、関東地区で 8 点 (足立、つくば 3、富里、長生、鹿野山、横浜泉、千葉市川、市原 1) で、基準局間隔が 20~50km 程度のネットワークとなる。当グループが構築した実験システムの構成を図 9 に示す。それぞれの電子基準点から収集された 1 秒間隔のデータ (リアルタイムデータ) は大手町に設置されたデータサーバ経由で提供される。

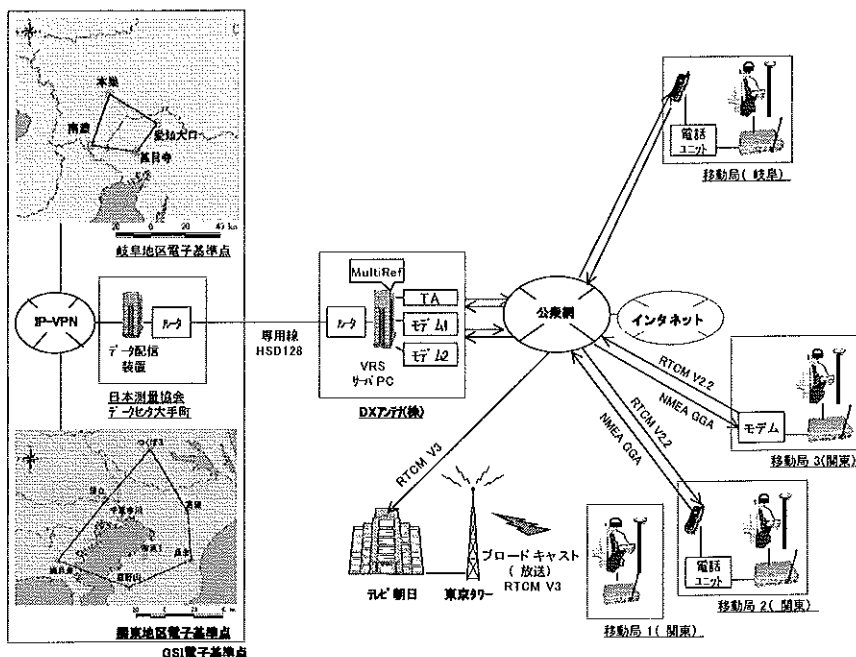
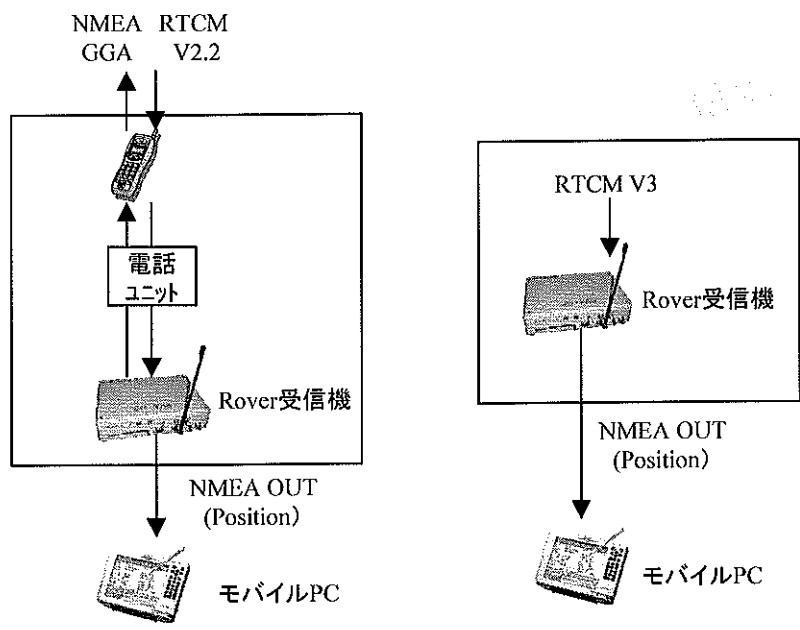


図 9 実験システムの構成

各電子基準点のリアルタイムデータは当社に設置したサーバ上で必要な計算処理を行い、生成した補正データをテレビ朝日の開発した ASC 方式に基づき音声の副搬送波に乗せて放送するとともに、公衆回線経由でも提供する仕組みを用意した。ユーザ側の機器構成を図 10 に示す。



移動局(岐阜地区実験/関東地区実験) 移動局(関東地区実験)

図 10 ユーザ側の機器構成

3. 3 技術的課題

ユーザから見た仮想基準局方式は通常の RTK-GPS とほぼ同じシステムであるが、実際には様々なプロセスの結果としてユーザに対する補正データが生成されており、期待された結果が得られない場合にその原因を特定するためには、システムの構成要素について切り分けて検証を行っていく必要がある。一方で、ユーザ側において良い結果が得られたとしても、各プロセスが必ずしも正常に機能しているとは限らない。つまり、収集した観測データの品質や、計算に利用する各種パラメータ、または計算ルーチンについて、それぞれ独立して検証を行っていくことが、信頼性の高い、かつ安定したシステムを構築する上で必要である。以下に仮想基準局方式を実用化する上で課題と思われるポイントを述べる。

3. 3. 1 アンビギュエティの決定

図 11 は当グループが導入している MultiRef と呼ばれる仮想基準局方式における計算の流れである。基準局から収集されたデータをもとにまず NetAR と呼ばれるアルゴリズムに

よりネットワークのアンビギュイティを決定し、この決定したアンビギュイティをもとに NetAdjust と呼ばれるアルゴリズムを用いてエリア内の補正量の計算を行いユーザに提供する。つまり NetAR において決定されたアンビギュイティが正確でない場合エリア内の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。

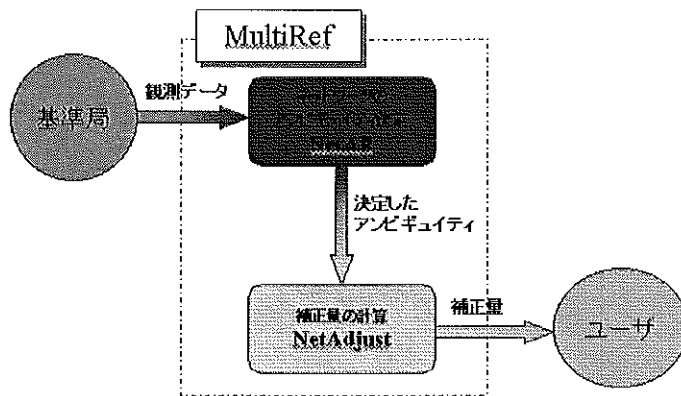


図 11 MultiRef の計算の流れ

MultiRef においてネットワーク補正および仮想基準局の作成が問題なく行われているかを確認するために仮想基準局と移動局間の二重位相差の残差 (DDR) を指標として用いた。L1 および L2 搬送波位相の DDR は以下の式により計算される。

$$DDR = \nabla\Delta R - \nabla\Delta\phi + \nabla\Delta N$$

- ここで、
- DDR = 二重位相差の残差
 - $\nabla\Delta R = (R(j,l) - R(j,k)) \cdot (R(i,l) - R(i,k))$
 - $\nabla\Delta\phi = (\phi(j,l) - \phi(j,k)) \cdot (\phi(i,l) - \phi(i,k))$
 - $\nabla\Delta N =$ 二重位相差のアンビギュイティ
 - R = 放送暦を用いて計算された衛星までの距離 (レンジ)
 - $\phi =$ 搬送波位相観測値
 - i, j = 衛星番号 (i: 基準衛星)
 - k, l = 基準局番号

基準局間一重位相差は衛星時計誤差、軌道誤差、および大気遅延誤差の大部分を取り除かれ、衛星間一重位相差により受信機の時計誤差が取り除かれる。よって二重位相差は残りのモデル化されていない誤差を表すこととなる。

図 12~図 15 は岐阜地区における実験 (2001 年 11 月 28 日) において、DDR をプロット

したものである。図 12 および図 13 は仮想基準局にネットワーク補正を行わなかった場合、図 14 および図 15 はネットワーク補正を行った場合を示す。これらのプロットから、ネットワーク補正を行った場合に DDR が明らかに改善しており、移動局における測位精度の改善が期待されることがわかる。この期間における測位結果例（岐阜地区、2001 年 11 月 28 日）を図 16 に示す。比較的安定した測位結果が得られており、図 14、図 15 と対応していることがわかる。

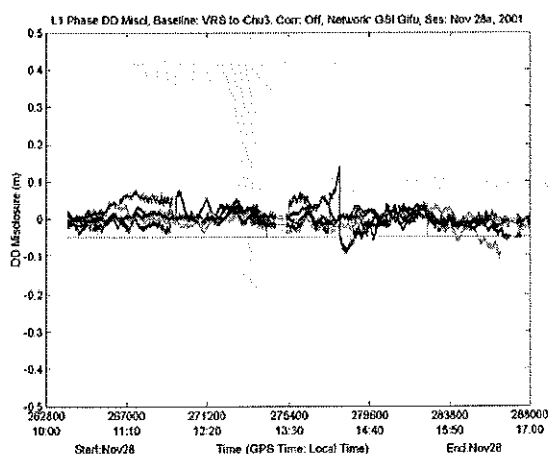


図 12 DDR (L1、ネットワーク補正なし)

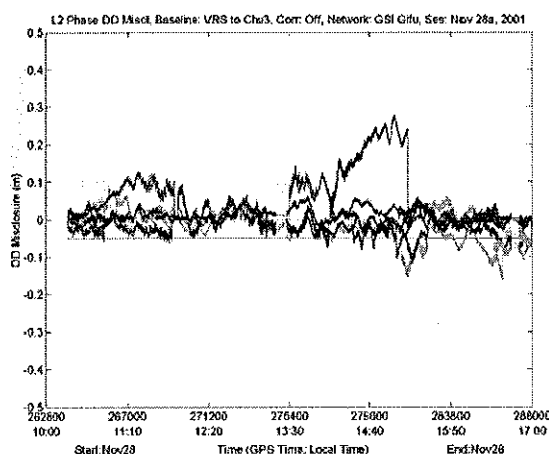


図 13 DDR (L2、ネットワーク補正なし)

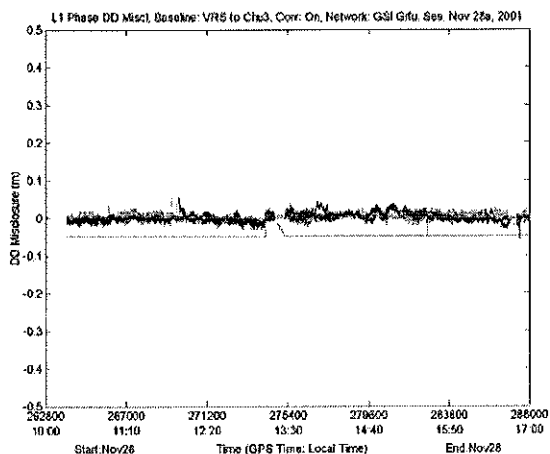


図 14 DDR (L1、ネットワーク補正あり)

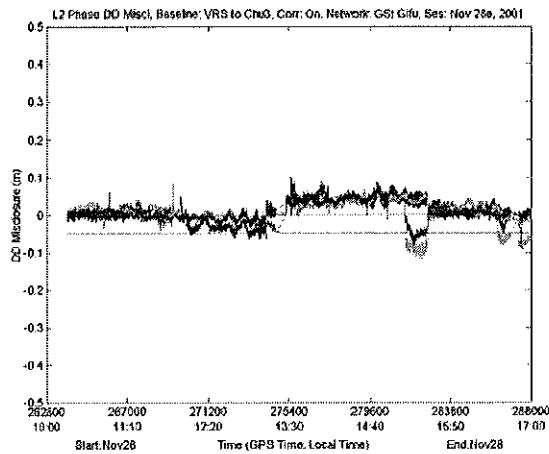


図 15 DDR (L2、ネットワーク補正あり)

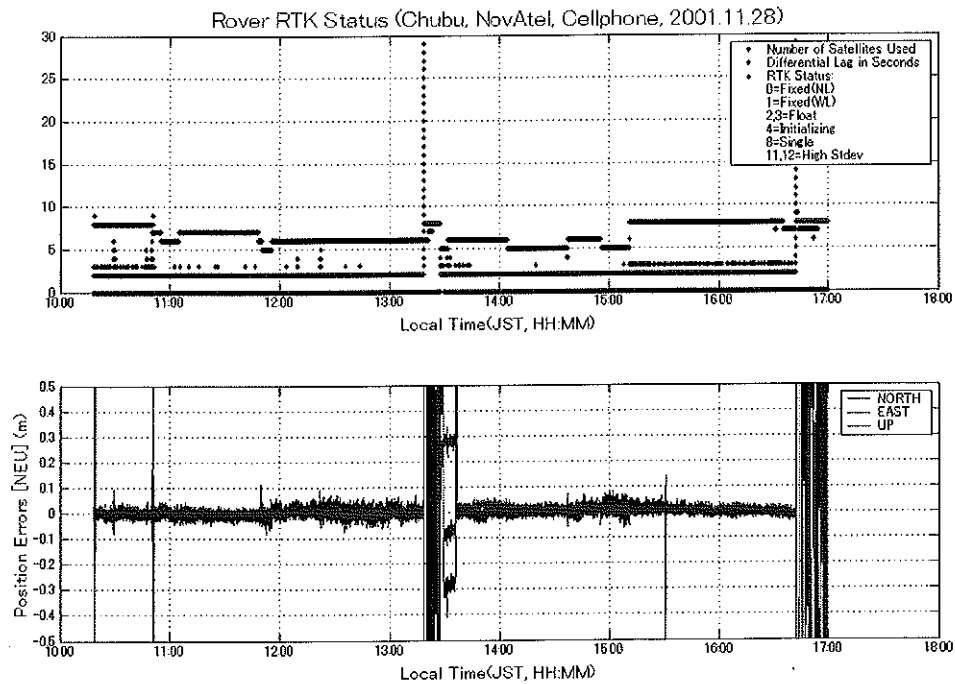


図 16 岐阜地区実験における移動局測位結果 (2001 年 11 月 28 日)

3. 3. 2 誤差要因

前節でアンビギュイティの決定が重要であることを述べたが、その際に入力する観測データそのものに誤差が含まれている場合、また入力するパラメータ自身に誤差がある場合にアンビギュイティを正確に決定することは難しくなる。アンビギュイティの決定に影響する誤差要因とその大きさはおよそ以下の通りだと考えられている。

空間的に相関のある誤差		サイト固有の誤差	
対流圏	<1ppm	マルチパス	2-20mm
電離層	<1-20ppm	受信機ノイズ	1-5mm
軌道誤差	<<1ppm	基準局座標	<10mm

これらの総和が相対誤差としてある一定以上になる場合、基準局間のアンビギュイティの決定が困難になるためこれらの要因を極力排除してやる必要がある。

(1) 設置環境

基準局は通常上空の見通しが良く、かつ周辺に構造物や障害物のないような建物の屋上等に設置することが多いが、特に都心部では建物が密集しているのに加え、施設の使用許

可や電源および通信回線の確保といった制限から理想的な環境を確保することはなかなか難しい。この場合特に問題となるのは周囲の障害物によるマルチパスやノイズによる信号対雑音比 (C/No) の低下、それらに伴うサイクルスリップ、データの欠損である。

仮想基準局方式では各基準局に共通の系統誤差は取り除かれるが、マルチパスの影響はサイト固有であり観測量に誤差として計上されることになる。現在市販されている受信機の中にはマルチパス軽減機能を搭載したものがあり、それらとマルチパス対策（グラウンドプレーン、チョークリング等）の施されたアンテナを組合せることである程度の影響を取り除くことは可能であるが、最も重要なのはアンテナを設置する際に極力マルチパスの影響を受けない場所を選定することである。通常は人間の目で判断するケースが多いが、影響が目に見えないだけに思わぬマルチパスを受けている可能性もある。

マルチパスの影響は L1 および L2 の擬似距離および搬送波を用いることにより推定することが可能であるが、この他にもノバテル社の特許技術である MEDLL を応用したマルチパス評価システム等もあり、これらを用いてより詳細にマルチパスの原因を検証することも可能である。いずれにしてもマルチパスによる測位誤差は観測データの品質に影響を及ぼすため、極力その影響を排除する対策が必要であると考えられる。

(2) 基準局座標の精度

基準局の座標が正確でない場合にもネットワークのアンビギュイティ決定に問題を生じる可能性がある。実験では、あらかじめ電子基準点のデータをダウンロードし、Bernese を用いて正確に座標の計算を行ったが、実際に長期的にシステムを運用する場合には一定期間毎に再計算を行い、常に最新の座標に更新・維持していく必要があると考えられる。今回の実験で使用した座標と国土地理院が提供している ITRF94 エポック 1997.0 に基づく座標値とを比較したところ、電子基準点によっては 5cm 以上のオフセットが見られた。

(3) 電離層の影響

相対誤差の中で最も影響の大きいものは電離層である。電離層の影響は 1 日の時間帯によっても大きく変化するが、太陽の黒点活動極大期では最大で 60ppm もの相対誤差が見られるケースがあり、アンビギュイティの決定に大きな影響を及ぼす。基準局間の距離を短くすることによってこの影響を緩和することは可能であり、状況によってはネットワークの組替えを行う、あるいは追加で基準局を用意するなどの対策が必要になってくるケースが考えられる。

(4) アンテナ位相特性

基準局で使用しているアンテナ同士が異なる場合、また基準局と移動局で使用しているアンテナが異なる場合の位相特性の問題も、今後考慮する必要があると考えられる。従来 RTK-GPS では基本的に利用者が独自に基準局を設置していたため同じ型式のアンテナを

利用するケースが多かったものと考えられるが、今後各電子基準点に設置されている各アンテナとの組合せで影響が出てくることが予測される。アンテナ位相特性の異なる組み合わせでそのまま基線解析を行った場合、高さ方向で最大 10cm 程度のオフセットを生じるケースもあるため、注意が必要であると考えます。

(5) その他

実際の運用システムを構築する上で、基準局データを安定して受信することは極めて重要な要素であるが、実験期間中、大手町データ提供サーバとの接続が切断されデータの欠落を生じるケースがあった。実験期間中は最大で 300 秒のデータ停止に対応できるように MultiRef を設定していたが、この閾値を超えるデータの停止も見られ、アンビギュイティの再決定が必要なケースもあった。この点についてはシステムを運用していく上で重要な要素となるため、より安定かつ信頼性の高い提供サーバの運用が望まれる。

4. おわりに

位置情報がキーワードと言われる昨今、リアルタイム測位技術は正確な位置情報をユーザに提供するための手段として、ますます重要性を増してきている。それぞれのユーザに最適な測位精度を提供するためのシステムを構築していくとともに、いつでも、どこでも、そして誰でも正確な位置を知ることができるシームレスな測位環境を実現するために、今後ともリアルタイム測位社会基盤の構築に向けて寄与していきたいと考える。

謝辞 なお、本件の実験およびシステムの構築にあたっては、以下の方々をはじめとして関係者各位の多大なご協力とご支援を頂きました。ここに改めて感謝の意を表します。

- ・ (株)日立製作所 恵比根氏、土肥氏、藤井氏、初本氏他
- ・ 全国朝日放送(株) 藤本氏、笹野氏他
- ・ 慶応義塾大学・WIDE プロジェクト 川喜田氏他
- ・ University of Calgary, Department of Geomatics Engineering Dr. Gerard Lachapelle and Dr. Elizabeth Cannon
- ・ Robertson Enterprises Ltd. Mr. Bryan Townsend