

社会基盤としての Pseudolite の可能性とアシストGPSについて

石井 真 (測位衛星技術株式会社)

高度測位社会基盤研究フォーラム

1.はじめに

GPSを応用したカーナビ、携帯電話、ロケーションサービスといったより大きな市場においてユーザ数が拡大しつつある。また、わが国においても準天頂衛星システムと称し独自測位衛星システムプロジェクトがスタートした。いまや衛星測位のインフラは一般ユーザを巻き込む測位の主流となり、今後ますますこの傾向は強くなりそうである。ただし、ほぼ全てのアプリケーションにおいてGPSをはじめとした衛星測位の利用が制限される最大の要因は、コードを用いた測位では最低4つ、搬送波位相を用いた測位では最低5つの衛星が必要とされる点である。

今日ではこの問題に対処するために大きく二種類の方法がある。ひとつの方法は別のGPS信号発生源を利用することであり、もうひとつの方法はGPS受信機それ自体の受信感度を高めることである。本稿では前者にあたるスードライトを利用した測位実験および検証結果と、その社会基盤としての可能性を示した社会実験の風景を示す。そして後者にあたる高感度GPS (アシストGPS) のその主な概要を示し、今後の測位の新しい潮流について述べる。

スードライトは地上に設置される擬似的なGPS信号発生源である。その歴史は古く、GPS衛星が利用される以前に米国国防総省が地上におけるGPS受信機開発のために利用していたという経緯がある。はじめて商用目的のスードライトを開発したのは米国Integrion社で、航空機の着陸用システムとして成功を収めている。

スードライトはコードおよび搬送波を利用する測位において、GPS衛星を補強する大変魅力的なシステムである。スードライトを利用することにより“GPS衛星”を追加することが可能となり、より良い衛星配置を実現することが可能である。搬送波位相を用いた測位を行う場合、ユーザから見た衛星配置を急激に変化させることでアンビギュイティを素早く決定することも可能となる。またスードライト信号に関しては、大気伝播遅延および軌道誤差は考慮する必要がない。さらにGPSと同一の周波数を用いるため、基本的には一般のGPS受信機のファームウェアを変更することでスードライトを利用することが可能となる。一方で、これがGPSとの電波干渉問題を引き起こす要因ともなる。スードライトに関する論文は多数発表されており、この技術が持つ利点および欠点が様々に論じられている (例えば1)。

スードライトは、都心のビル街や露天掘りのような、衛星視界が制限される場所で非常に有効である。さらに、駐車場やトンネルといった屋内においてもシームレスな測位を実現させる可能性を持っている。現在、日本でのスードライトに対する注目は大きい、その理由としては位置情報市場規模が拡大しつつあることと、必要十分な上空視界を得ることが難しいという日本の環境特性によるものと考えられる。2001年に「高度測位社会基盤研究フォーラム」が設立され、現在多数の大学・研究機関、および民間会社からの参加を得ているが、スードライトをはじめとした高精度測位のための社会基盤を構築するための研究や開発を推進するとともに、フォーラム活動の一環として、昨年度は実際にスードライトを設置し、屋外や屋内での基礎的な検証実験を行った2)。

2. 屋外におけるスードライトの利用と干渉

屋外でスードライトを利用する上で注意すべき点はGPS信号への干渉である。総務省から実験局の免許を取得するためには、一般のGPS受信機に対して干渉による影響がないことを証明する必要があり、当社ではスードライト信号とライブGPS信号、およびGPSシミュレータからの信号を組み合わせ、スードライト側の出力、周波数シフト、異なるduty cycleに基づくパルスング、複数スードライト信号のオーバーラップ等が受信機に及ぼす影響を検証した。実験構成を図1に示す。この実験の主題は、スードライトに対応していない一般のGPS受信機を用いて、スードライトの送信出力を最大に設定した上で、干渉の影響を受けない領

域を算出することである。実験ではいわゆる測量用の GPS 受信機とより安価な航法用の GPS 受信機を用いて、duty cycle を、20%、10%、5%と変化させその影響を調べた (図2)。この際に測量用 GPS 受信機について、最大感度 -130dBm と設定し、それぞれの受信機について下記の式を用いて、スードライト信号による干渉を受けない距離を算出した。

$$L=20\log(4\pi D/\lambda)$$

L: 自由空間伝播損失 (Free Space Spread Loss)、λ: 波長 (Signal Wavelength) である。その結果、スードライト信号による干渉を受けない“安全距離”はおおよそ 500m であるとの結果を得た。つまりこの距離以上離れば、スードライト側の出力を最大 (-34.7dBm) にしても測量用受信機が影響を受けることはないと言える。

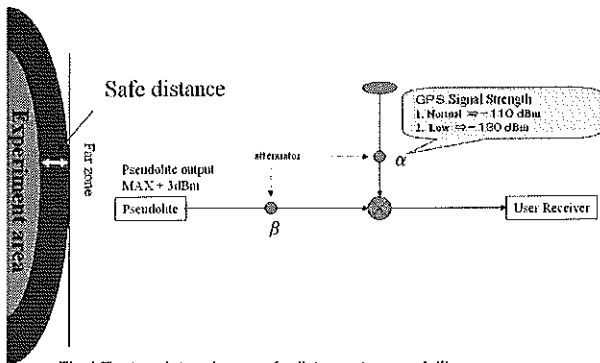


Fig.1 Test to determine a safe distance to pseudolite

図1 安全距離算出のための試験構成

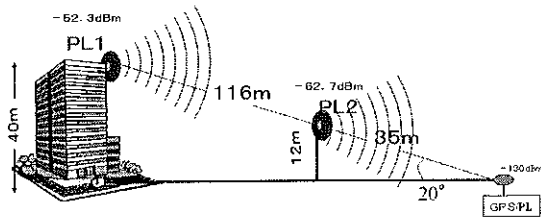


Fig.2 Pseudolite interference test layout

	Receiver FE	P.L. 1	IF distance	P.L. 2	F distance
CW	-97.3dBm	-52.3dBm	2.7m	-62.71dBm	0.82m
20%pulse	-95.7dBm	-52.3dBm	2.25m	-62.71dBm	0.67m
10%pulse	-83.0dBm	-52.3dBm	0.6m	-62.71dBm	0.18m
2.5%pulse	no interfered	-52.3dBm	N/A	-62.71dBm	N/A

Table 1

図2 出力/Duty Cycle と干渉距離の関係

3. 室内におけるスードライトの利用

歩行者 ITS のような歩行者支援を目的とするアプリケーションにおいてシームレスな測位環境を構築するためには、GPS 信号を全く受信できない場所、つまり室内での測位をいかに実現するかが次の課題となってくる。室内での測位についてはその技術的な課題も多く、例えば IntegriNautics 社が提供するシステムは原則的に屋外での利用を前提としており、そのままでは室内での測位に利用できない。そこで当社では新たに、スードライト測位演算用ソフトウェアとともに室内用プロトタイプシステムを構築した。システムの検証は IntegriNautics 社のスードライトおよび SPIRENT 社のシミュレータを用いて行った。

屋内での測位は多くの面で通常の GPS 測位とは異なる。大気遅延や軌道誤差といった誤差要因を考慮する必要はなく、一方で、マルチパスによる影響が非常に大きい。今回の実験場所がマルチパスの影響を受けやすい環境であったため、レンジ誤差が基準局側で 1m 程度、移動局側で 20m 程度見られた。また、同時にシステムの開発においては、屋内特有の様々な問題にも直面した。例えば受信機が信号源に近接していることから、非常に近いエリアに測位解が 2 つ生じてしまう。通常の GPS 衛星を利用する場合、2 つの解は互いに離れておりこのような問題は生じない。

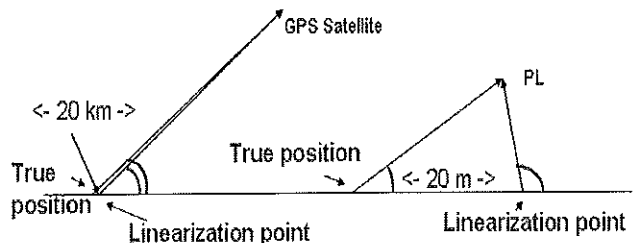


Fig.3 Algorithm sensitivity to error in initial position

図3 初期座標誤差の影響

さらに室内用測位演算ソフトウェアを開発する上でポイントとなるのは初期座標の問題である。つまり非線形の擬似距離方程式を真値近くで線形化する必要がある、従来の計算方法を使う限りは初期座標の精度が大きく影響する(図3)。

$$[\delta X] = ([A]^T [A])^{-1} [A]^T [\delta r]$$

$[\delta X]$: ユーザ位置および時刻誤差

$[A]$: 方向余弦行列

$[\delta r]$: 擬似距離のオフセット

非常に遠くにある GPS 衛星を利用する場合、方向余弦行列 $[A]$ が受ける影響は小さいが、近接するスードライトを利用する場合、初期座標誤差による方向余弦誤差は無視出来なくなり、行列 $[A]$ は初期座標の関数として大きく変化する (図 3)。

この問題は、既知点から測位を始めることで解決できるが、現実の世界においては常にこの方法が利用できるとは限らない。従って、初期座標の精度にさほど影響を受けない新たな測位アルゴリズムを考案する必要がある。室内での測位計算を行うため、我々は数学的な解と分析的な解の組み合わせを用いた。分析的な解の例として、 $T_R=0, Z=H$ の場合を図 7 に示す。室内での測位は通常それぞれの部屋における 2 次元の測位であると仮定され、 Z 座標は補正データの一部として提供することが可能である。補正データはスードライトの時計補正、スードライトの座標、部屋の概略座標を含む。実験ではスードライトの座標および PRN についてはソフトウェアのパネルから入力する形をとった (図 4)。

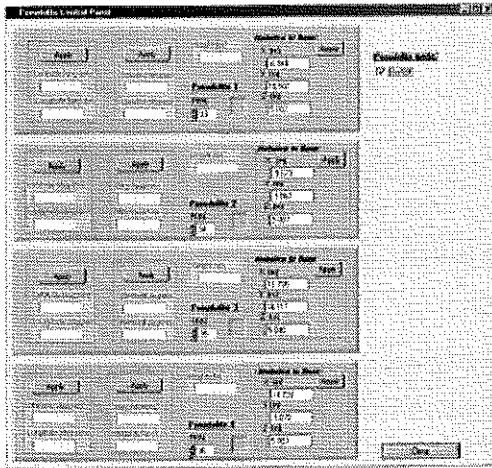


Fig.4 Software input panel

図 4 ソフトウェアの入力パネル

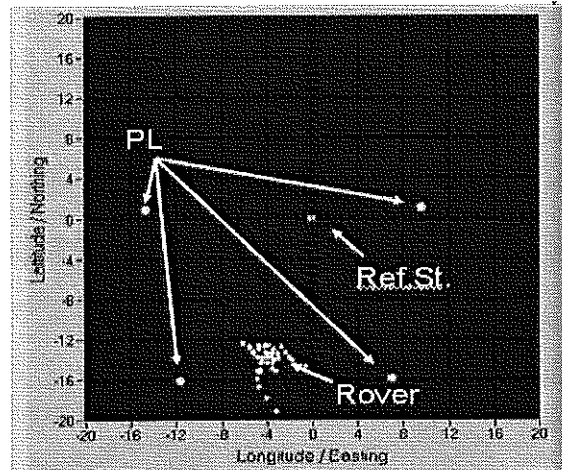


Fig.5 Indoor positioning. Software screenshot

図 5 室内での測位結果例

また、実験中はリピータを用いて室内へ GPS 電波を再放射し、受信機の時計誤差を補正した。こうしてコードによる 2 次元的な測位を 2 つのスードライトを用いることで実現した。ユーザの高さ、および屋外のアンテナ座標は補正メッセージの一部として送信することが可能である。観測方程式は以下ようになる。

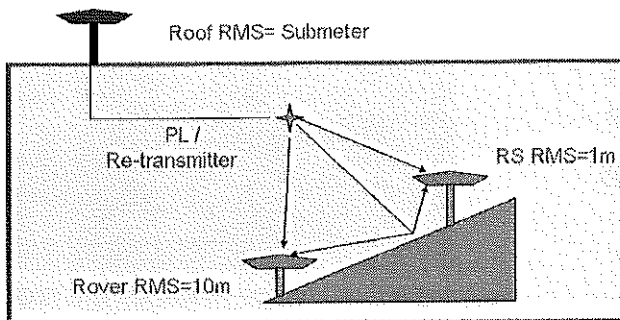


Fig.6 Layout of Indoor positioning experiment.

図 6 室内測位実験時の構成



Fig.7 Simplified analytical solution for $T_R = 0, Z = H$.

図 7 $T_R=0, Z=H$ における分析的な解

$$(X_{RA} - X_S)^2 + (Y_{RA} - Y_S)^2 + (Z_{RA} - Z_S)^2 + T_L + (X - X_{RT})^2 + (Y - Y_{RT})^2 + (Z - Z_{RT})^2 + T_R + T_A + T_S = P_0^2$$

$$(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 + T_R + T_{PL1} = P_1^2$$

$$(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 + T_R + T_{PL2} = P_2^2$$

$$Z = H$$

X、Y、Z：受信機座標

X_{1,2}、Y_{1,2}、Z_{1,2}：スードライト座標

X_{RA}、Y_{RA}、Z_{RA}：屋上のアンテナ座標

T_L：ケーブル伝播遅延（屋上アンテナ～再放射アンテナ）

T_R：受信機時計誤差に代表される共通誤差

T_{PL1,2}：スードライト時計誤差

T_A：大気伝播遅延および軌道誤差

T_S：衛星誤差

遅延誤差 T_{PL1}、T_{PL2} は、二重位相差により消去できる。遅延誤差 T_A、T_S は、屋上アンテナの座標が既知であることから消去できる。以上から 4 つの未知数 (X、Y、Z、T_R) に対し、4 つの方程式をたてることで、これらの解を得ることができる。

共通誤差 T_R がスードライトと GPS の場合で同じと見なせるかどうかは重要で、屋上アンテナを追加の外部信号源として測位に利用できるかどうかを決める上でのポイントとなるが、時計誤差についてのみ考えれば T_R は同じである。共通誤差の違いを論じるよりも、実験の中ではむしろマルチパスに起因する誤差の方が大きく、これは実験を行った場所のスロープや金属性の椅子などに原因があると考えられる (図 6)。実験結果としては、現在のアルゴリズムを用いればコード測位で数 m 精度 (図 5)、初期座標に対する相対測位精度はスムージング処理を用いることで 10cm 程度の精度が得られることがわかった。

4. 実験結果

室内での実験以外に 2 度の屋外実験を実施した。最初につくばで行った実験の目的は、衛星が 3 個またはそれ以下しか捕捉できないエリアも含め、あらかじめ決められたルートに沿ってシームレスな測位を行うとともに、システムの精度を検証することであった。この実験を通じて、上空視界が遮られ、かつ十分な衛星数を確保できない、例えばビル陰のようなエリアにおいても、スードライトを利用することによりシームレスな測位を実現できることを示した。また、測位精度も GPS のみを利用した場合と比べて改善され、10cm レベルの結果を得ることができた。

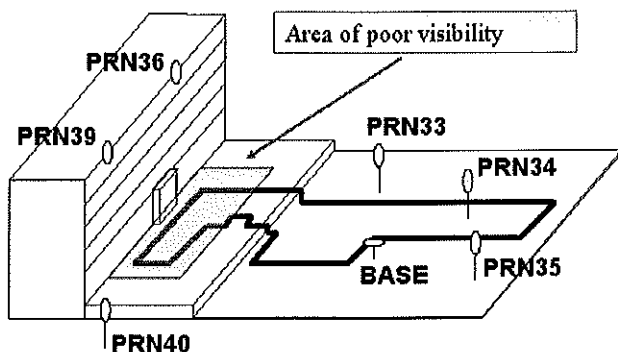


Fig.8 Tsukuba City Test

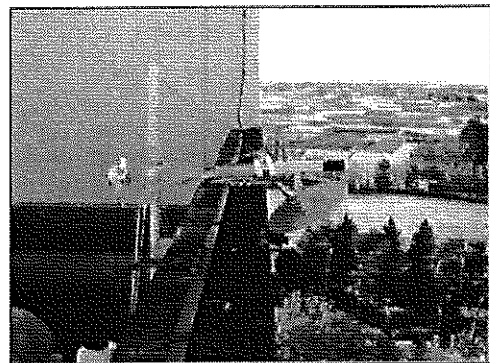


Fig.9 Pseudolites IN400 on the roof

図 8 つくば市（国土技術政策総合研究所構内）における実験ルート 図 9 屋上に設置したスードライトアンテナ

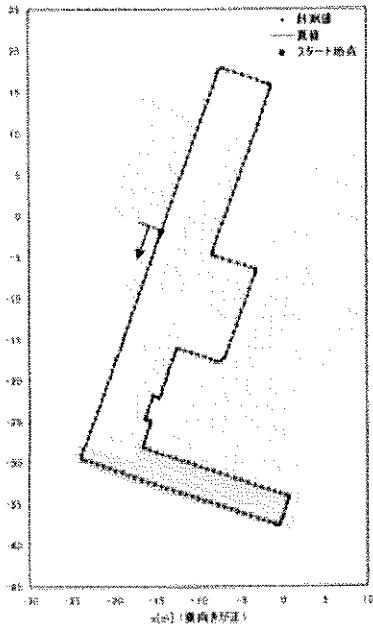


Fig.10 Receiver route

図 10 実験時の航跡例

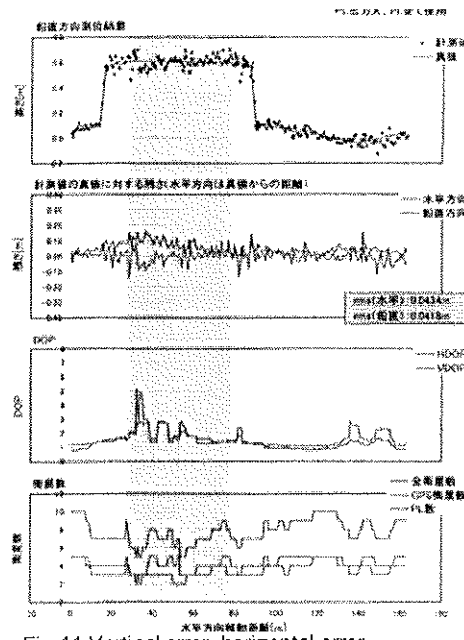


Fig.11 Vertical error, horizontal error, DOP, number of satellite and pseudolites

図 11 鉛直および水平誤差、DOP、衛星数

つくばでの実験においては、スードライト 6 式、基地局および移動局用受信機を各 1 式、データ通信用無線モデム 1 式を用いて実験を行った。設置状況については図 8 を参照されたい。図 9 はスードライトの送信アンテナをビルの屋上に設置した様子である。図 10 は移動局受信機の航跡を示している。図 11 は鉛直、水平成分の誤差、DOP 値、受信している GPS 衛星およびスードライトの数を示している。

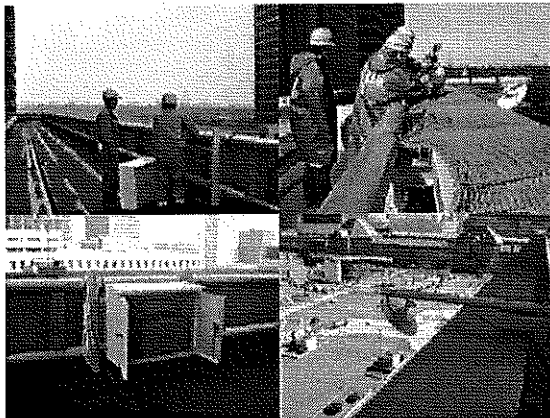


Fig.12 Pseudolite Installation on the top of the building In Tokyo downtown

図 12 丸の内におけるスードライトの設置

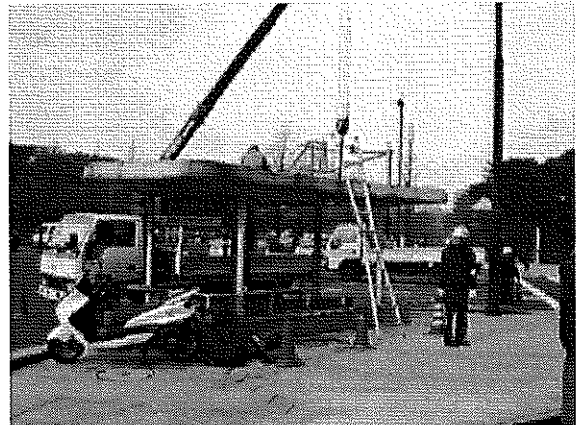


Fig. 13 RS Installation

図 13 基準局の設置

続いて実施された丸の内における社会実験の目的は、実際の市街地におけるシステムの有効性を検証することであり、完成したプロトタイプシステムを用いて評価実験が行われた。この社会実験は国土交通省国土技術政策総合研究所の歩行者 ITS プロジェクトにコンソーシアムを NTT コミュニケーションズ(株)、中日本航空(株)、富士電機(株)、三菱地所(株)、住友電機工業(株)、DX アンテナ(株) (測位衛星技術(株)) の各社で組み、参加したものである。このシステムは、単独の測位センサーとしての GPS/スードライト対応受信機のほかにも、グループメンバーが開発した音声認識装置、マップマッチングの装置などを組み合わせて構成されたものである。図 12 および 13 は、東京都心での実験に際しての、基地局およびスードライトの設置の様子である。図 14 および 15 は、実験の様子を示している。この実験では、障害者の方々へのガイダンスシステム

としての歩行者 ITS の可能性を十分に示したとともに、社会基盤としてのスードライトの可能性をも証明できたと考える。



Fig. 14 PITs Conceptual test in Tokyo downtown

図 14 丸の内における歩行者 ITS 実験風景(1)



Fig. 15 PITs Conceptual test in Tokyo downtown

図 15 実験風景(2)

現在は、公立はこだて未来大学にて、特に室内環境におけるロボットなどの測位を実現させる目的でスードライト環境を設置しており、今後、測位アルゴリズム研究開発や指向性アンテナの開発が行われる予定である。



図16 公立はこだて未来大学における指向性スードライトアンテナ設置状況

5. アシストGPSの概要

携帯電話組み込みGPSの世界では、このアシストGPS方式を超感度GPSとも称して導入が始まっている。その背景には、米国における緊急位置通報義務であるE911の法令化があり、ある一定の位置精度で携帯電話が発信された位置を通知する義務がある。この流れはヨーロッパでもあり、近い将来、わが国でも導入される可能性が高い。測位の方式として本稿で述べるアシストGPS (A-GPS) 方式とEOTD (Enhanced Observed Time Difference)と呼ばれる電波測位方式が各キャリアで検討されているが、コストその他の問題でA-GPSを採用するキャリアが多くなってきている。

それでは、このアシストGPSと呼ばれる方式の概略を示す。この方式は、超感度GPSとも称されることがあるように通常のGPSに比べて、さらに微弱なGPS信号を捕らえて測位できることからそう呼ばれている。通常GPSは、一般的に -130 dBm の信号レベルでの受信に比べて、アシストGPS方式では -150 dBm 以下、中には -160 dBm でも測位できる受信機も登場してきている。実際に -150 dBm という信号レベルは、壁1枚を画した室内環境を意味し、実際に室内での測位を実現している。

この基本的な原理は、次のようになる。まず、一般的なコード受信機は、GPS衛星から送出される 1.5 GHz に乗せられたノイズレベルのSS信号を受信し、 1023 chip のC/Aコードが 1 ms 周期で

繰り返されているのを読み取る。各GPS衛星は、ゴールドコードと呼ばれるコードパターンが決められており、受信機では、自分のもつレプリカのコードパターンと受信したコードとの相関を取って、トラベルタイムを計測し、それに光速を乗じて擬似距離を得る。しかし、この場合、衛星の軌道（エフェメリス）と正確な時間がわかっていればこそその結果である。この情報はナビゲーションメッセージと言われ、50bpsで送信され、30秒の長さになる。

C/Aコードはノイズレベルでも受信が可能であるが、ナビゲーションメッセージはそうはいかない。結果として両方をGPS衛星からの放送を受信しようとする先ほどのように-130dbmの信号強度が必要ということになるが、アシストGPS方式は、このナビゲーションメッセージに相当するものを遠く通信路をもって受信機に届ける。

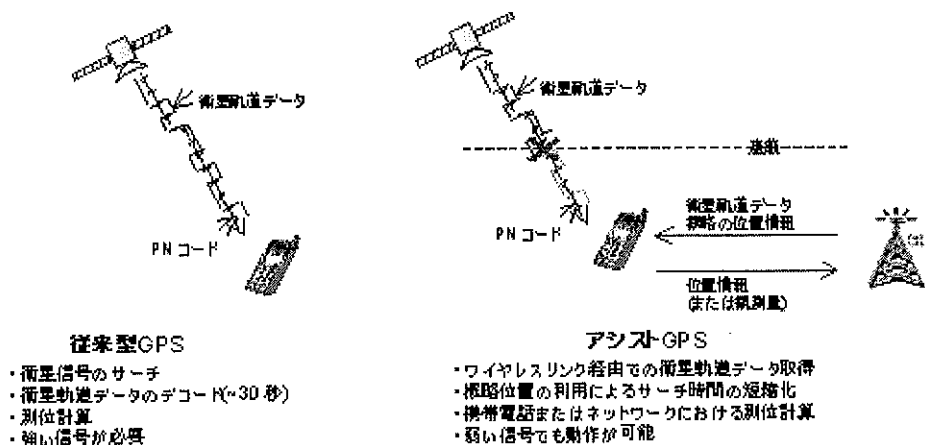


図17 アシストGPSの原理

結果として受信機は、携帯電話などの通信回線から50bpsに相当するナビゲーションメッセージを受け取ることになるので、自分の仕事はSS信号を受信しコードの相関を取ることだけとなる。現在、携帯電話ではSNAP TRACK方式のGPSが採用されている。この方式は、キャリアにまず、自分の概略の位置を通報し、その概略位置から見た衛星情報（衛星のドップラーシフト量他）を受け取り衛星を補足する。受信機では擬似距離のみを計測し、それをキャリア内の測位サーバーに送信する。測位サーバーでは、上空のナビゲーションメッセージを元に届いた擬似距離を使って測位計算し、移動体に測位結果を戻すというサーバー型の計算方式である。最近では、サーバー側からナビゲーションメッセージを送出し、移動体側で計算する方式も登場してきている。



8mm×8mm
の大きさのGPS

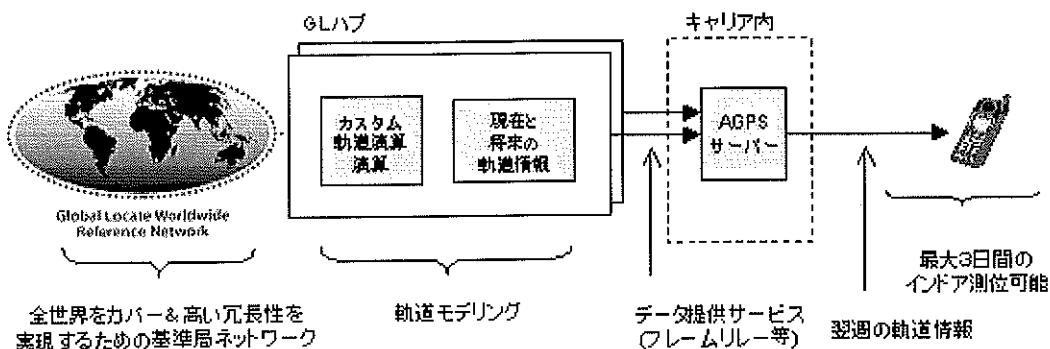


図18 移動体測位型アシストGPS

6. アシストGPSの測位能力



図-19

アシストGPSでは、図-19のような上空が遮断された従来のGPSでは、とても受信が不可能な場所でも測位できる。この写真は屋上から一段下がったフロアでの受信であるが、横からのマルチパスの入り込み以外にも床を透過して微弱なSS信号感度で信号が受信機に届いている(約-150dbm以下)。この場合は、受信機はあらかじめ、ナビゲーションメッセージを保有しており、SS信号のみを受信し、コード相関のみを行えばよいのでこのような測位ができるわけである。その他にもこの種の受信機では、通常は2つの相関器を用いてコード遅延を測定するのに対して、数千のコリレータを持つものが多くなっている。こ

こで紹介しているグローバルロケット社のGPSチップは、図-18のGPSチップ内に16000個の相関器をハード的に保有している。また、SS信号受信のみで測位できるメリットとしては、測位の速さである。各社いろいろなアルゴリズムを駆使しているが、乱暴にいとてしまうと予め保有しているナビゲーションメッセージと正確な時間を基に上空からの信号を受信する周波数シフトを予想し、そのエリアに対して積分処理して感度を上げるなどの工夫をしている。結果として電源をONしてからのコールドスタートでも1、2秒以内に測位を完了する。

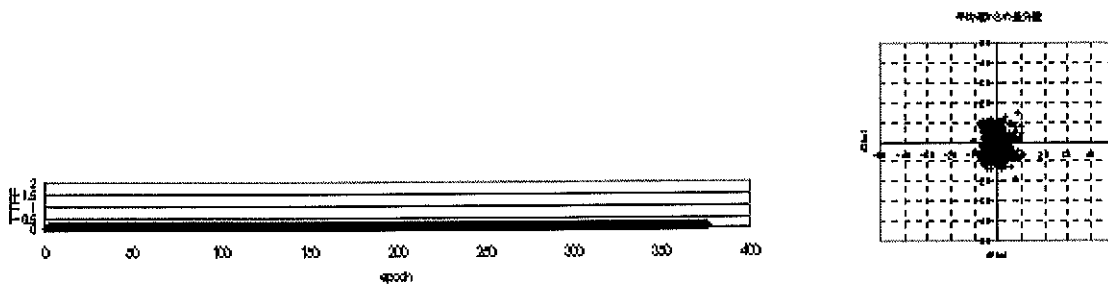


図-20

上図(図-20)に実際の固定点でのTTFと測位分布を示す。この測位は全てコールドスタートで行っている。全ての測位が0、2秒以内で完了している。

このような新しい可能性をもつアシストGPSの出現によってどのようなインパクトがあるのか考察してみる。まずは、先に説明した超感度受信が及ぼすインパクトとして都市部などで大幅に受信エリアが広がることが上げられる。ただし、この場合は、ビルに反射したマルチパスの影響を受けるので測位誤差は大きくなることは否めない。しかし、多数の相関器を保持していることは、最初のダイレクト波とマルチパスによる2次波の区別をすることは可能で技術的にはある程度対応できるものと考ええる。これから大きな市場となるLBS(位置情報サービス)で、都市部での測位は必須で十分に活用されるであろう。米国のE-911のような緊急位置情報通報義務が日本でもスタートした場合は、数千万人が測位機能を持つことになり、そこに新たなマーケットが創出することは容易に想像できる。また、最近のカーナビゲーションはテレマティックと称して双方向通信と外部とのDBやサービスと密接に組み合わせたトータルモバイルターミナルになってきている。この場合にもアシストデータを車側に容易に届けることができるので、超感度や瞬間測位などがカーナビの世界でも利用されることになる。そうなるとう駐車場内の位置や盗難対策など新たな利用サービスや活用方法が生まれ、ますます衛星測位と密接な関係になってくるだろう。

7. おわりに

これまで衛星測位の新しい流れとしてスードライトとアシストGPSの概要を紹介してきた。ヨーロッパでは、GPSに肩を並べるガリレオシステム、ロシアのGLONASSシステム、そして中国でも北斗と呼ばれる衛星測位システムが存在する。わが国では2008年を目標に初の衛星測位システム準天頂衛星シス

テムの研究フェーズがスタートした。今後、測位環境はますます充実してくる。

そこには、種々の衛星システムをハイブリッドで受信する受信機が早期に出現するであろうし、それによってまた、新たなアルゴリズムやハードウェアが出てくるであろう。そうなってくると都市部などのアーバンエリアでの測位やインドア測位もその能力を向上させることは容易である。しかし、唯一の問題はどちらにしても上空からの衛星信号を受けなければならない制約からは逃れられない。

高度情報社会やモバイル端末の普及などの流れはますます位置情報に対して要求が強くなっていく。

そこに「上空の衛星が最低3個見えること・・・」などの条件が付くのは問題である。そこで注目しているのがスードライトをはじめとした地上側での測位インフラ技術である。我々は、単独では対応できないこの大きなテーマに対して、「高度測位社会基盤研究フォーラム」を産官学の研究者、技術者が自主的に集まってフォーラムを組織している。今年度には、NPO化も予定している。また、東京商船大学には、衛星測位専門の研究開発センタ「先端測位衛星技術開発センタ」が、国内のこの分野における技術者育成を目的にスタートする予定である。中国では武漢大学にGPSセンターが5年前に設立され、この短期間に世界の技術供給元になるまでになっている。

衛星測位を中心とした測位の環境が大幅に向上しようとしているこの時期に組織の枠を超え、協力して日本の測位技術の基礎作りに少しでも貢献できればと願い、地上測位社会基盤構築をテーマにさらに技術開発を進めていく予定である。

本件の成果発表にあたっては、関係していただいた方々の多大なご尽力とご協力とご支援をいただいております。ここに改めて感謝の意を表します。

[参考文献]

1. H. S. Cobb, "GPS Pseudolites: Theory, Design, and Applications." A Ph.D dissertation, Stanford University, 1997.
2. 高精度測位社会基盤研究フォーラム報告書 2002