

社会基盤としての Pseudolite の可能性と シームレスポジショニングについて

石井 真・イワン・ペトロフスキー（測位衛星技術株式会社）

3.1.1 はじめに

ここ数年 GPS を用いたさまざまなアプリケーションが急速に普及しつつある。測地、測量、航法、土木、建設といった専門分野だけでなく、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。ほぼ全てのアプリケーションにおいて GPS 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 信号発信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。後者には 2 つの制限がある。第一に、GPS の信号強度が弱すぎて衛星を捕捉できないケースや、あるいは完全に GPS 信号が遮断されてしまう空間は常に存在するという点である。第二に、現在この技術が適用できるのはコード測位に限られる点である。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。

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 IntegriNautics 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ですが、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「高精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、屋外での基礎的な検証実験を行った²⁾。また、現在国内では高度道路交通システム (ITS) 関連の様々なプロジェクトが展開されているが、その中のひとつの分野として歩行者 ITS があり、スードライトは重要な要素技術の一つとして期待されている。

3.1.2 歩行者 ITS

歩行者 ITS とは、ITS の主要開発分野の一つで、歩行者、車椅子使用者、自動車などに安全・快適・

利便を提供する道路システムのことである。今回多数の応募の中から採択された5つのプロジェクトは、NTTコミュニケーションズ、日立製作所、NEC、アステル中国、そして沖電気がそれぞれ率いるコンソーシアムにより提案されたもので、当社はNTTコミュニケーションズグループの一員として、富士電機(株)、住友電気工業(株)、中日本航空(株)、三菱地所(株)らとともに実験に参加し、スードライトを利用した測位システムの構築に携わった。この過程で総務省から実験局の免許を取得するためにスードライト信号の電波干渉試験を行い、最終的に屋外での実験について免許を得ることができた。実際の検証実権はまずつくば市内の土木研究所構内で実施し、今年3月には東京丸の内にて社会実験を行った。

3.1.3 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る。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に基づくパルシング、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。

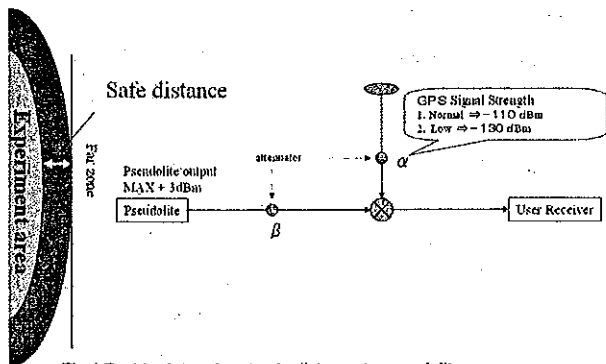


Fig.1 Test to determine a safe distance to pseudolite

図1 安全距離算出のための試験構成

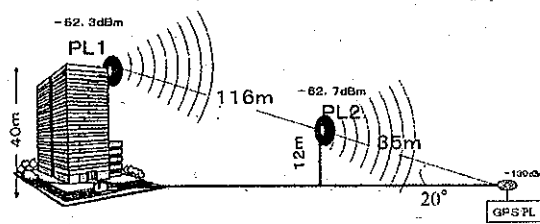


Fig.2 Pseudolite interference test layout

| | Receiver FE | PL1 | IF distance | PL2 | F distance |
|-----------|---------------|----------|-------------|-----------|------------|
| CW | -97.3dBm | -62.3dBm | 2.7m | -62.71dBm | 0.82m |
| 20%pulse | -95.7dBm | -62.3dBm | 2.25m | -62.71dBm | 0.67m |
| 10%pulse | -89.0dBm | -62.3dBm | 0.6m | -62.71dBm | 0.16m |
| 2.5%pulse | no interfered | -62.3dBm | N/A | -62.71dBm | N/A |

Table 1

図2 出力/Duty Cycle と干渉距離の関係

3.1.4 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。

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)。

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

ここに

$[\delta X]$: 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、がより大きくなり、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)。

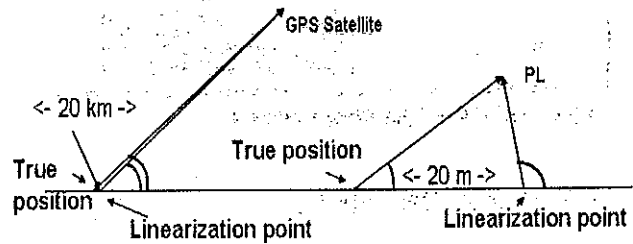


Fig.3 Algorithm sensitivity to error in initial position

図 3 初期座標誤差の影響

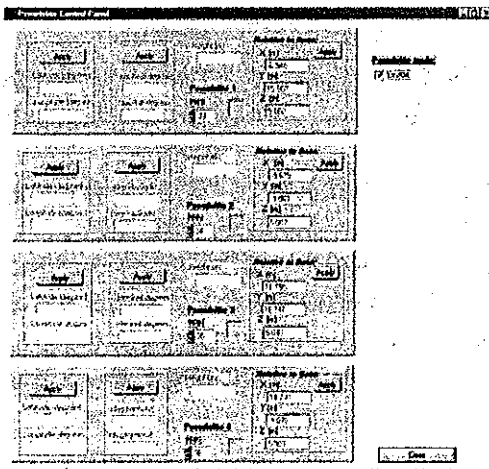


Fig.4 Software input panel

図 4 ソフトウェアの入力パネル

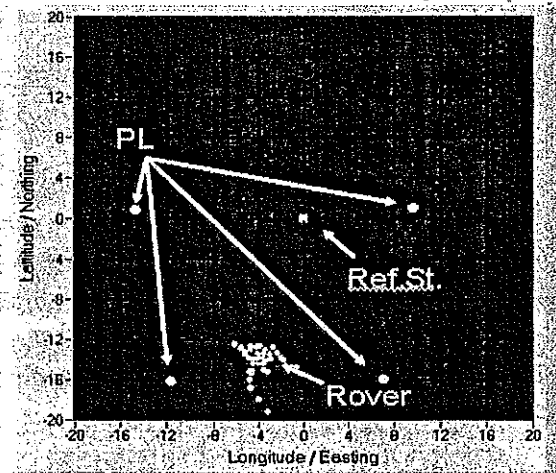


Fig.5 Indoor positioning. Software screenshot

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。観測方程式は以下になる。

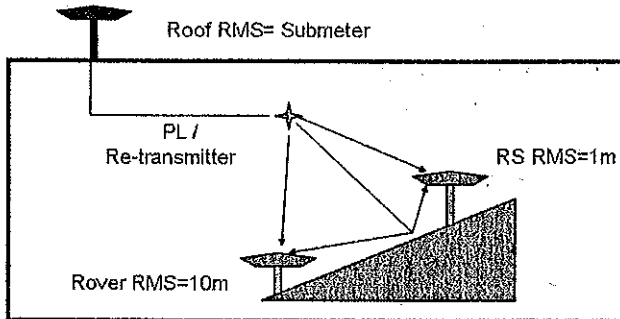


Fig.6 Layout of indoor positioning experiment.



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

図 6 室内測位実験時の構成

図 7 $T_R=0, Z=H$ における分析的な解

$$\begin{aligned} (X_{RA} - X_S)^2 + (Y_{RA} - Y_S)^2 + (Z_{RA} - Z_S)^2 + T_L + (X - X_{RT})^2 + (Y - Y_{RT})^2 + (Z - Z_{RT})^2 + T_R + T_A + T_S &= P_0^2 \\ (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 + T_R + T_{PL1} &= P_1^2 \\ (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 + T_R + T_{PL2} &= P_2^2 \\ Z &= H \end{aligned}$$

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_{PL2}, 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。

3.1.5 実験結果

室内での実験以外に、歩行者 ITS では 2 度の屋内実験を実施した。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。

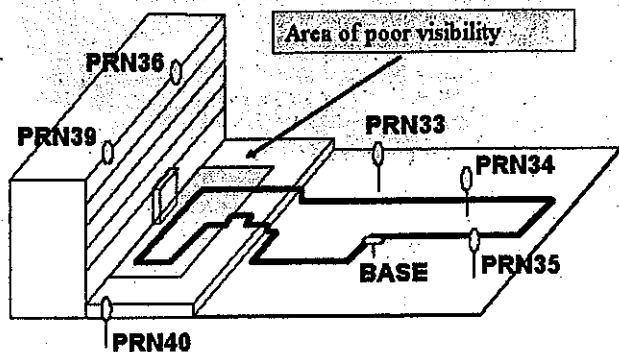


Fig.8 Tsukuba City Test

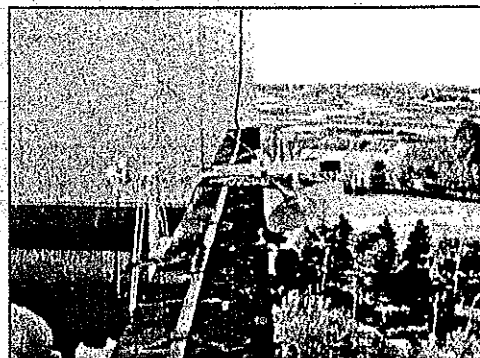


Fig.9 Pseudolites IN400 on the roof

図 8 つくば市（土木研究所構内）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

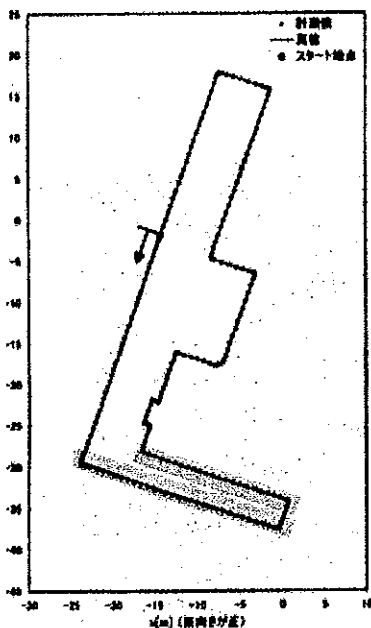


Fig.10 Receiver route

図 10 実験時の航跡例

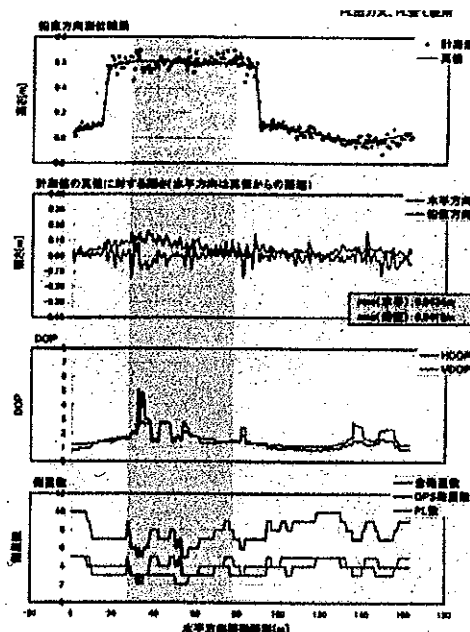


Fig.11 Vertical error, horizontal error, DOP, number of satellite and pseudolites

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。

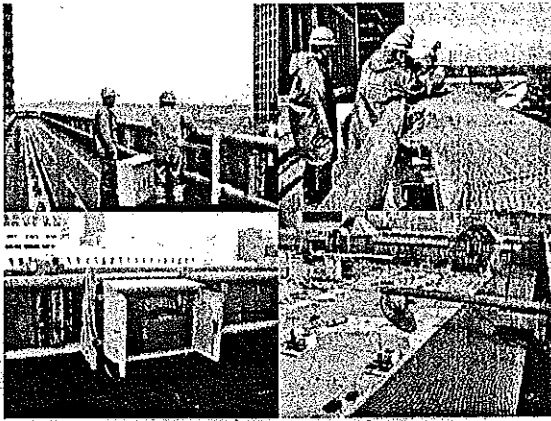


Fig. 12 Pseudolite Installation on the top of the building in Tokyo downtown

図 12 丸の内におけるスードライトの設置

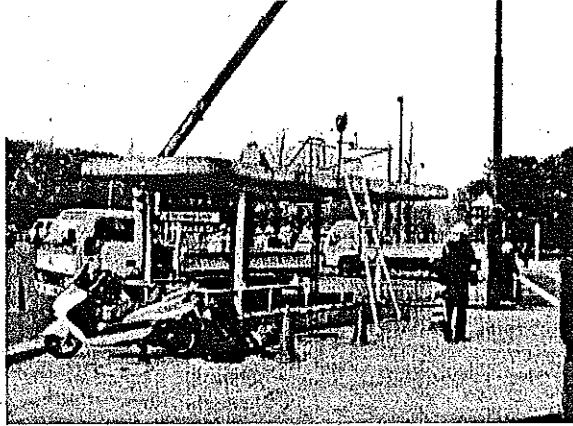


Fig. 13 RS Installation

図 13 基準局の設置

続いて今年 3 月に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。

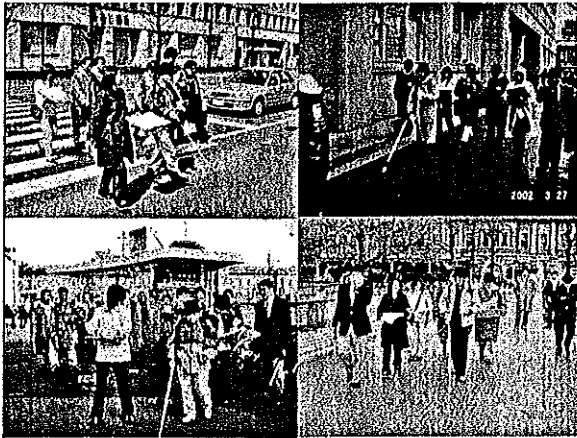


Fig. 14 PITS Conceptual test in Tokyo downtown

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)

[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