

GPS測位における マルチパス誤差の低減化と 高精度測位の可能性について

東京海洋大学
久保信明



研究の背景

- GPS近代化と日本の準天頂衛星、欧州のガリレオ開発に伴い、**衛星測位分野の高精度化**が図られている。現在までに国内においても、地殻変動測定やカーナビ、航空管制等、様々な分野での利用が試みられている。
- しかしながら、**リアルタイムで積極的にナビゲーション(精度とサービスの継続性が要求される)**を行うツールとしては、まだ発展途上の技術である。大きな技術的課題の1つに**マルチパス誤差**が挙げられる。

GPS測位における誤差の概要

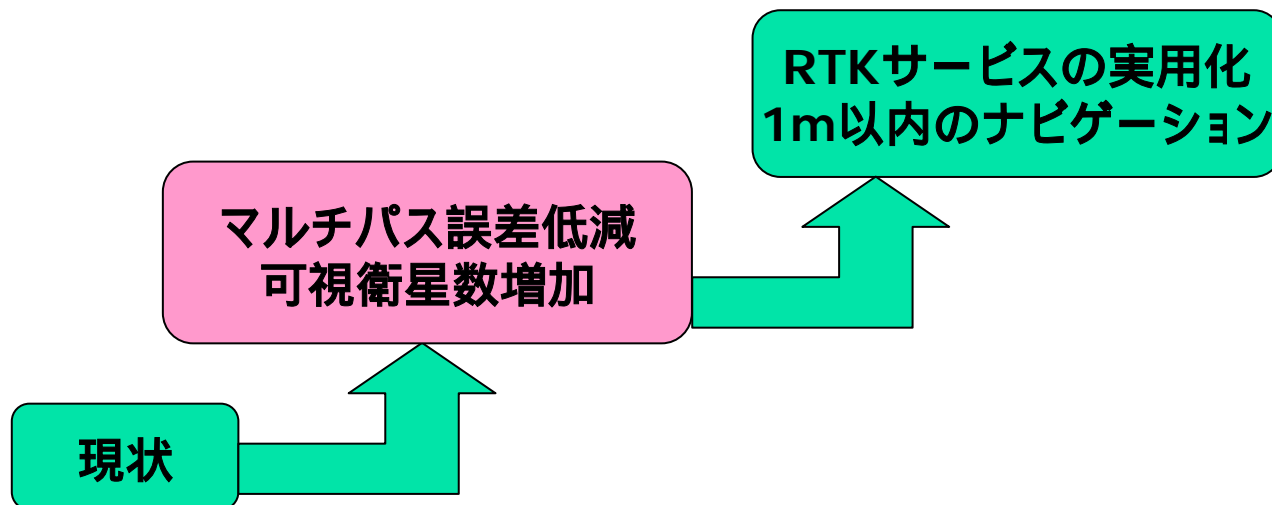
誤差要因	潜在的な誤差の大きさ	誤差の低減と残差 (DGPS)
衛星時計のモデル	クロックモデリング誤差: 2m(rms)	DGPS: 0.0m
エフェメリス予測値	視線方向に沿ったエフェメリス予測値の誤差: 2m(rms)	DGPS: 0.1m
電離層遅延	天頂方向の遅延量は2mから10m程度で、太陽活動や仰角に依存。	2周波受信機で補正: 1m (rms)、 DGPS: 0.2m (rms)
対流圏遅延	海面での天頂方向の遅延量はおよそ2.3mから2.5m; 仰角に依存	モデルを使用: 0.1mから1m、 DGPS: 0.2m (rms) 程度
マルチパス	マルチパス環境良: コード: 0.5-1m マルチパス環境悪: コード: 1-10m	アンテナ間相関なし。設置場所、アンテナ・受信機の設計で低減
受信機雑音	コード: 0.25 - 0.5m (rms)	DGPS: 0.1m (rms)

マルチパスのみアンテナ間の相関がないためDGPSによる低減は期待できない

実際の誤差 = 上記の誤差 × 衛星配置による係数 (DOP)
(水平DOPは通常1程度。ビル街では1を超える)

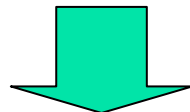
マルチパス誤差低減による メリット

- 市販の高精度受信機を用いた場合、衛星配置が良く、十分にマルチパス誤差を低減できれば、常時1m以内の精度も不可能ではない(新たなナビゲーションサービスの可能性)。
- 大きな飛びやマルチパス誤差を低減することにより、**リアルタイム精密測位(数cm)**の利用可能性が向上する(同じく新たなサービスの可能性)。



マルチパス誤差低減対策

- 空間的なアプローチ(アンテナ)で低減
 - ・アンテナ下方向から入射される反射波の抑制
(Groundplane Antenna)
 - ・GPS衛星から発射される右旋円偏波受信用アンテナ
 - ・直接波のみを受信するように設計された、衛星方向のみにビームをしばるアンテナ
- 搬送波位相を利用する低減(キャリアスムージング)
- 受信機内部または出力情報による低減 **本研究の課題**

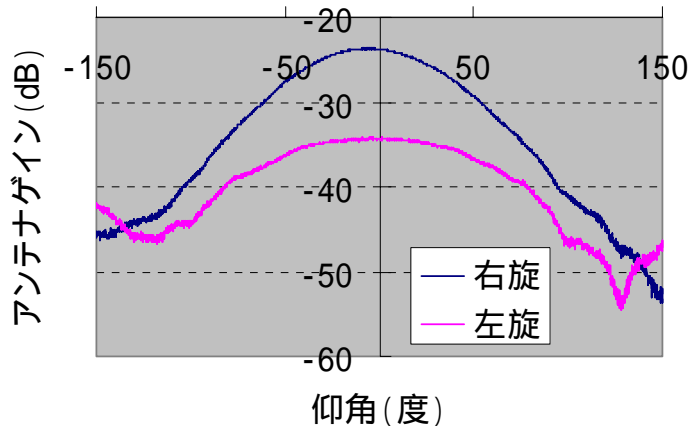
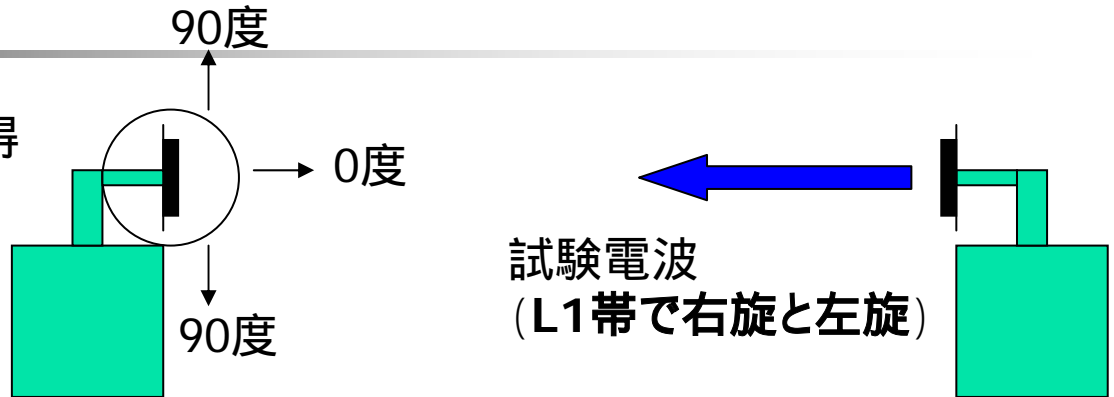


良いアンテナの使用やスムージングは、マルチパス誤差低減に有益であるが、実用的な場所で要求される精度まで低減するには、受信機内部での処理が必須である。

アンテナによる効果例 (パターン測定からわかること)

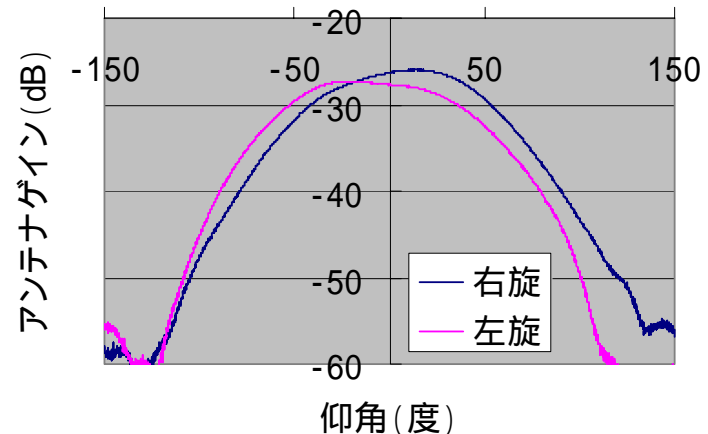
電子航法研究所の電波暗室にて取得

試験を受ける側
1. Pinwheel
2. Chokering



pinwheel技術によるパターン
左旋の受信強度を抑制

(本研究の実験で使用するアンテナ)



chokering技術によるパターン
アンテナ下方向からのゲインを抑制

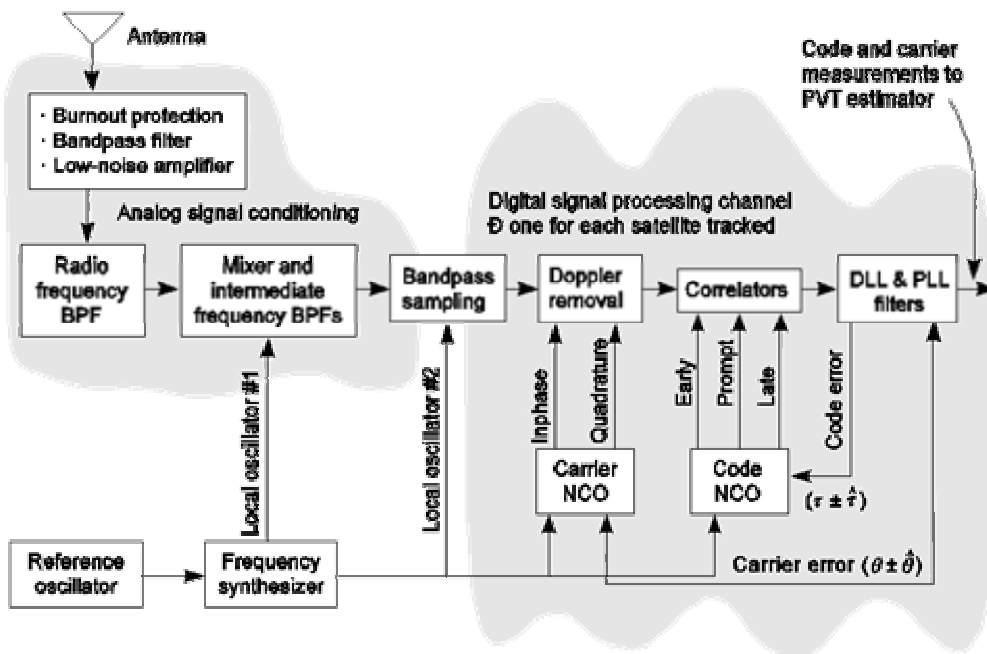
搬送波位相を利用する低減 (キャリアスムージング)

- GPS衛星からの電波が途切れることなく届く場合は、キャリアスムージングが有効である。例えば、数十秒程度の周期のマルチパス誤差であれば、100秒のスムージングで大部分が除去される。
- 搬送波位相の支援があると、非常に精度の高い推定値(変化率)を得ることができるため、コードループの帯域幅を狭くしてもループの応答を損ねることがない。よって白色雑音を低減できる。

問題点

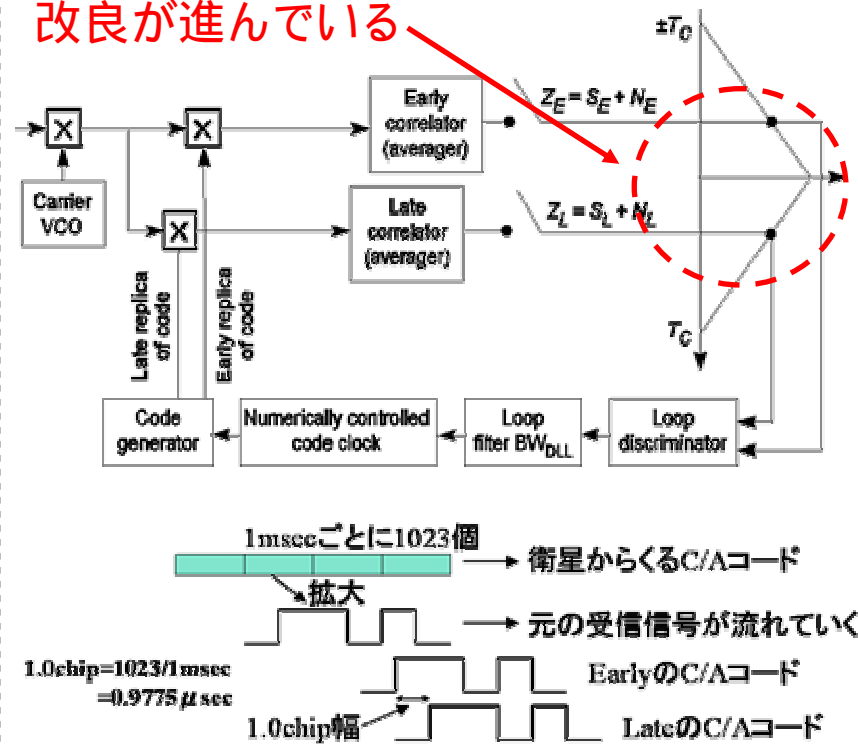
実際に擬似距離と搬送波を利用したスムージングでは、サイクルスリップの度(電波が途切れる度)に高度なソフト処理を必要とする。よって移動体でのサービスでは利用できない。

GPS受信機内部の概要 (全体とDLLによるコード測定部)



GPS受信機の構成

この部分(コリレータ)の改良が進んでいる



DLLの構成

左側のRF部から受信した信号を、随時1msecごとのデータとして右側で処理される。

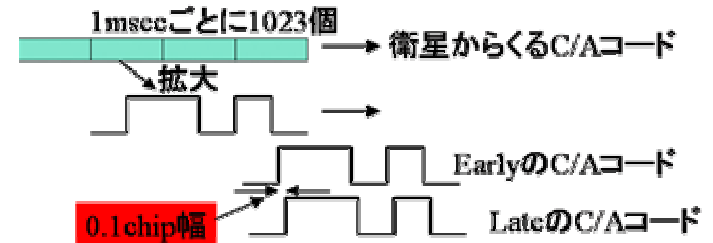
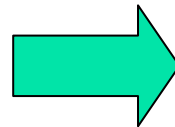
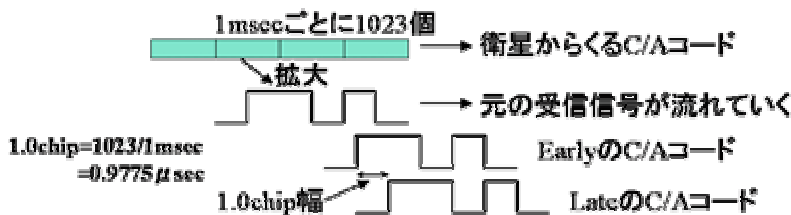
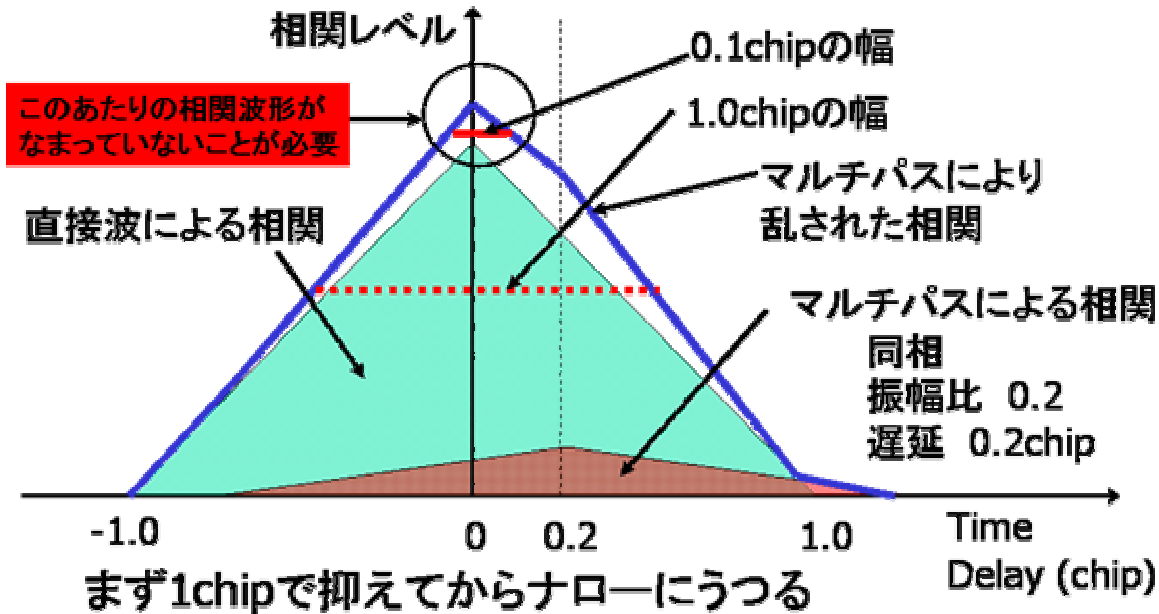


現在までのコリレータによるマルチパス誤差低減手法の紹介

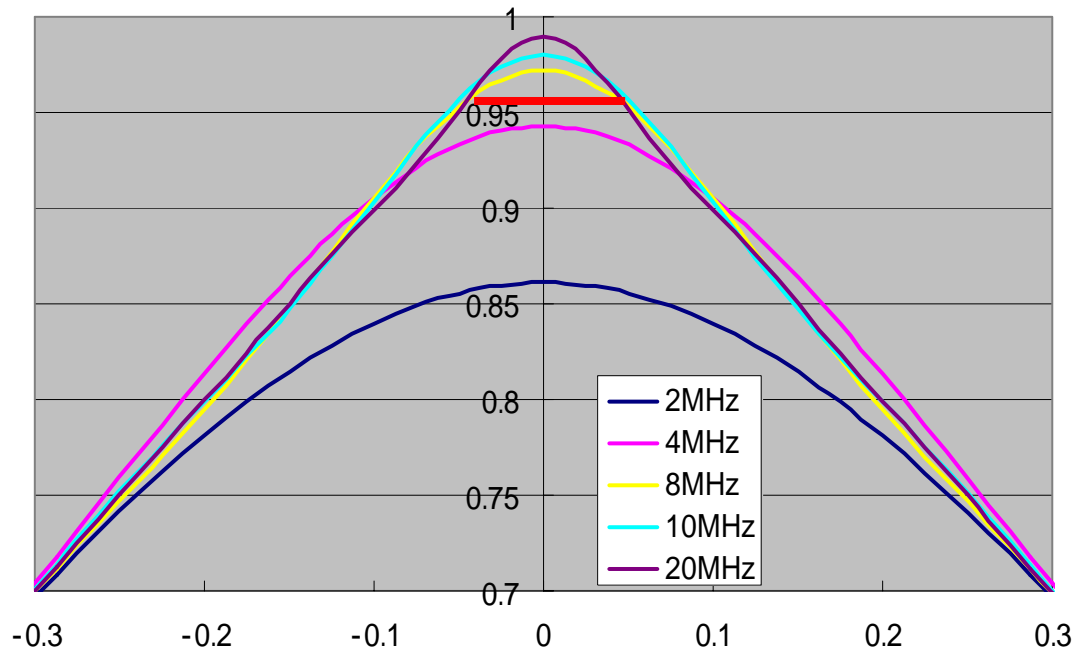
- ナローコリレータ(1990年代初頭)
- ストロボコリレータ(1990年代中頃)
- マルチパス波を推定するもの(1990年代後半)

以上の3つの技術について簡単に説明を行う

ナローコリレータ (earlyとlateのチップ幅を狭める)



ピーク付近の相関波形の鋭さが が必要な理由について



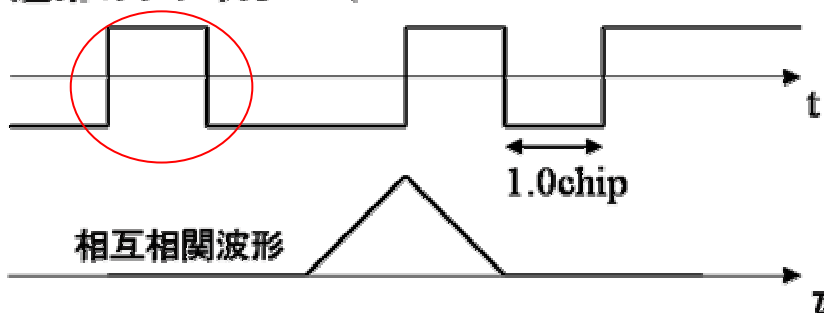
この結果は、MATLABで受信機のフィルターを設計して解析したもの

相関波形は、**受信機内部の帯域幅**によって異なることが知られており、例えば、**0.1chipのナローコリレータ**を有効に動作させるには、**少なくとも8MHz程度以上の帯域幅が必要**。

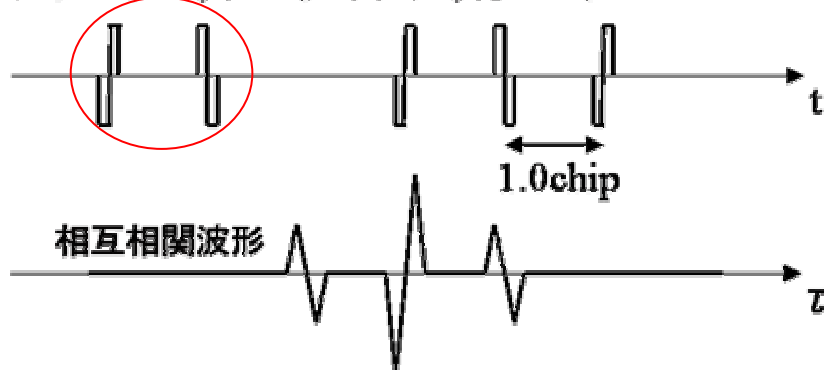
以下の解析では、特に断りのない限り、帯域を20MHz確保しているものとする。

ストロボコリレータ (レプリカのコード自体を变形)

通常のレプリカコード



ストロボコリレータのレプリカコード



- 左図を見ればわかるように、通常のレプリカでは、 -1.0 から 1.0 chipまでマルチパス波に対して影響を受ける。
- 一方、ストロボコリレータでは、レプリカコードを変更することにより、大部分の領域でマルチパス波の影響を受けていない。
- 結果として、遅延距離、誤差ともに、10分の1程度の影響しか受けていないことがわかる。

マルチパス波を推定する方法

MEDLL(multipath estimating delay lock loop)

マルチパス存在下において、GPS受信機が受信した信号は以下のように表される。

$$r(t) = \sum_{i=0}^M a_i p(t - \tau_i) \cos(\omega t + \theta_i) + n(t)$$

ここで、Mは到来信号の数、tは時刻、n(t)は白色雑音、 a_i は信号の振幅、 τ_i は信号の遅延、 θ_i は信号の位相を表す。

GPSの場合において重要なパラメータは直接波の**振幅、遅延、位相**である。
MEDLLは**最尤推定理論**に従って、以下の式にある平均二乗誤差が最小になるように、マルチパス信号のパラメータを推定している。

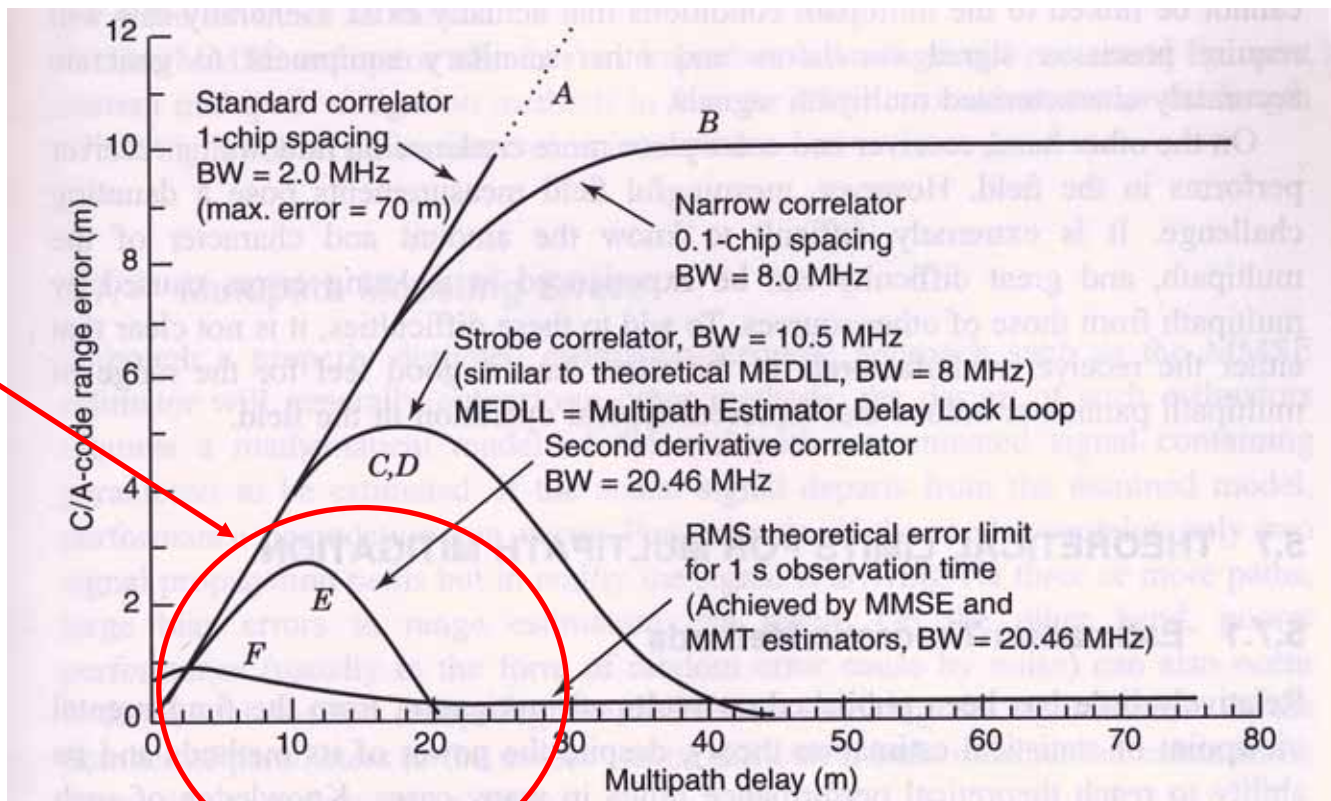
誤差評価式

$$L(\hat{a}, \hat{\tau}, \hat{\theta}) = \int_{t-\tau}^t [r(t) - s(t)]^2 dt$$
$$s(t) = \sum_{i=0}^M \hat{a}_i p(t - \hat{\tau}_i) \cos(\omega t + \hat{\theta}_i)$$

$r(t)$ が実際に観測した波形。
 $s(t)$ は反射波を含んだ観測波形をパラメトリック表現したもの。

各種コリレータの性能比較

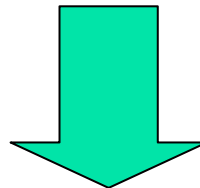
赤丸で示す
遅延距離の
短い領域が
現在の課題



各種コリレータによる、マルチパス波の振幅比が0.5のときの、マルチパス誤差と遅延距離との関係図(同相のみ)

現在までの技術による実環境での主な問題点

- MEDLLは、理論上最適な技術であるが、唯一市販されているMEDLL受信機の性能は、**ストロボコリレータと同等もしくはそれ以下**であることが知られている。
- いずれの技術も、反射波の強さが直接波よりも小さいことを前提としているため、ビル街等で、反射波が支配的な環境において、非常に大きな誤差を発生する。



上記の問題点を改善することが本研究の目的。

- 1. 遅延距離の短い領域の誤差の低減**
- 2. 強い反射波を受信している衛星の検知・排除**

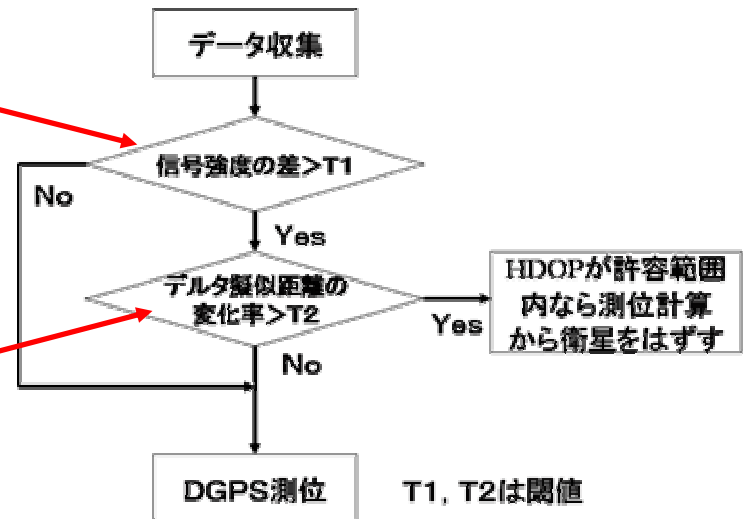
本研究で提案するマルチパス 誤差低減手法

- 本研究で提案する手法は大きく2つ
 - ・ 強い反射波を受信している衛星の検知・排除 主に信号強度を利用
 - ・ 遅延距離の短い領域の誤差の低減
マルチパス波を推定

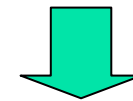
マルチパス波の推定に際しては、相関値の情報を最大限に利用して、マルチパス波の特徴を求めている。本手法により、最尤推定の初期値をある程度正確に与えることができ、かつ計算量も少なくすることができた。

強い反射波の検知に信号強度を利用する手法

- この手法は、特に周囲が建物で囲まれている環境において、主に**信号強度(移動局と基準局の差)**を利用して反射波を強く受信している衛星を検知するものである。鏡面反射波のみの受信時、**少なくとも信号強度が5 dB程度減衰**することを利用。
- デルタ擬似距離とは、擬似距離の時間軸での変化率のこと。又は、**衛星-アンテナ間の加速度**を指している。反射波のみ受信された場合、急激に飛ぶことが多い。



衛星検知のためのアルゴリズム



通常の都市部の走行データでは、決定した閾値(4 ~ 7dB-Hz)で、多くの場合効果を発揮している。

通常のデルタ擬似距離の値:

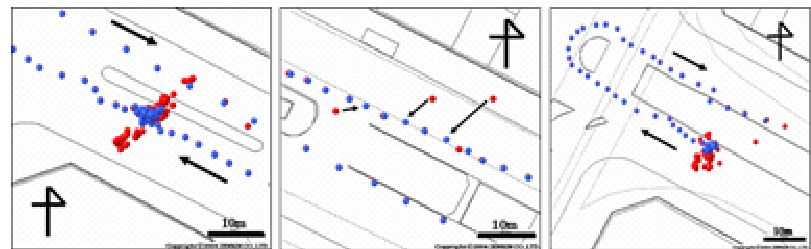
1. 静止または等速運動している場合 0.2m/(s*s)以下
2. 通常の車程度の加速・減速の場合 2.0m/(s*s)以下
3. 車での急加速・急減速の場合 10m/(s*s)以下

閾値の妥当性を評価する統計データ

- ビル街を走行し、20分程度の移動体データを数回取得。場所は、右記のとおり。
- 信号強度の閾値を4～7dB程度に設定すると効果が見られた。さらに5dB程度の時が測位率(可視衛星4個以上)と反射波のみによる大きな飛びの削減を最も両立していることがわかった。

	測位誤差大の回数	改善された回数	改善されなかった回数	改善率
月島	13	13	0	100
東京駅前	130	128	2	98.46
銀座	172	147	25	85.47
築地	42	38	4	90.48
豊洲	75	64	11	85.33

- ・改善されなかったケースで、元の位置より精度が劣化することはなかった。
- ・測位誤差大の回数は実際の経路からはみ出しているものをカウント(地図精度は1-3m)。



実際の改善例(東京駅前通り)
青:改善後 赤:改善前

マルチパス波を推定することによる メリット(最尤推定法について)

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m p(t - \tau_m) \cos(\omega t + \theta_m) + n(t)$$

← 実際の受信信号

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \hat{a}_m p(t - \hat{\tau}_m) \cos(\omega t + \hat{\theta}_m)$$

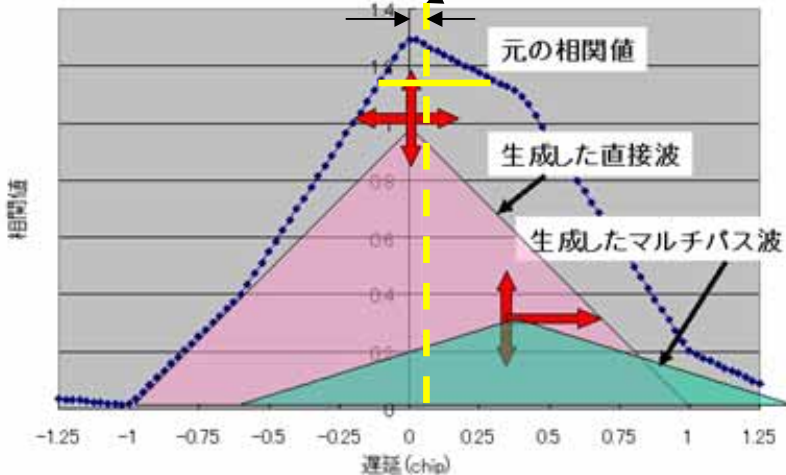
← 推定されるモデル化された信号

$$L(\hat{a}_m, \hat{\tau}_m, \hat{\theta}_m) = \int_{t-T}^t [r(t) - s(t)]^2 dt$$

← Lが最小になるように推定

M : 信号の数
 t : 時刻
 $p(t)$: コード
 $n(t)$: 白色雑音
 a_m : 信号の振幅成分
 τ_m : 信号の遅延成分
 θ_m : 信号の位相成分
 T : 積分時間

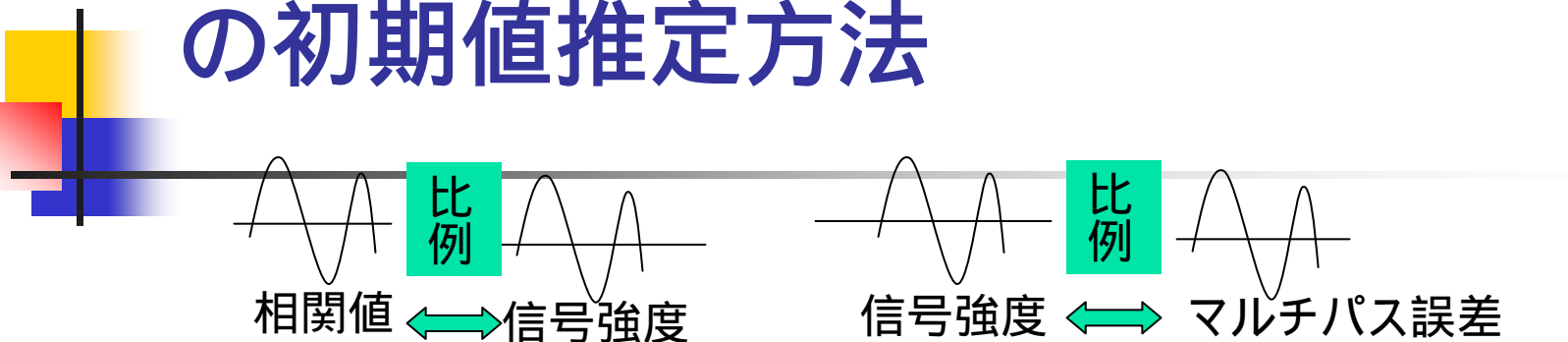
元の相関値による誤った
トラッキングポイント



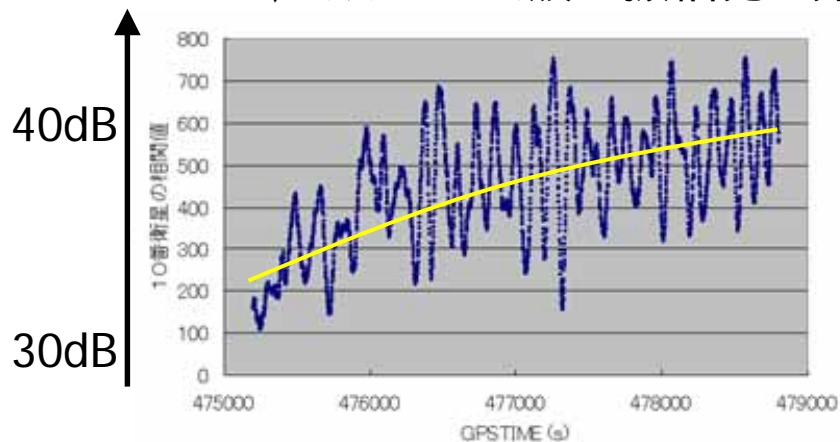
マルチパス波の影響を相関波形から一部でも排除し、直接波を復元すれば、より正しい擬似距離を得ることができる。

ここで、マルチパス波の振幅比と遅延距離をすべてにわたって探索するのではなく、より正しい初期値を与えて探索範囲を狭めることが重要なポイントである。

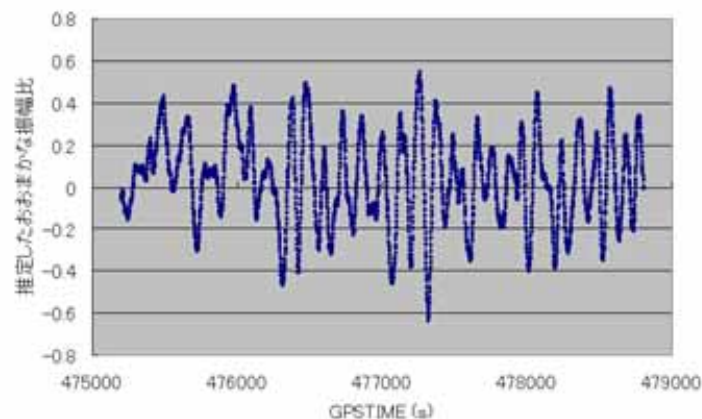
本手法におけるマルチパス波の振幅比の初期値推定方法



- 0チップ付近の相関値は、信号強度(マルチパス誤差)に比例。
- 相関値の大きさが、信号強度に変換すると、どの程度の値になるかは前もって把握しておく(受信機の相関値の出し方に応じて異なる)
- 一定間隔の平均値を用いて上下の変動分を振幅比の初期値として算出する。または、仰角に応じた直接波の相関値の統計データを基に、マルチパス波の振幅比を算出することも可能。



実際の相関値(0chip)

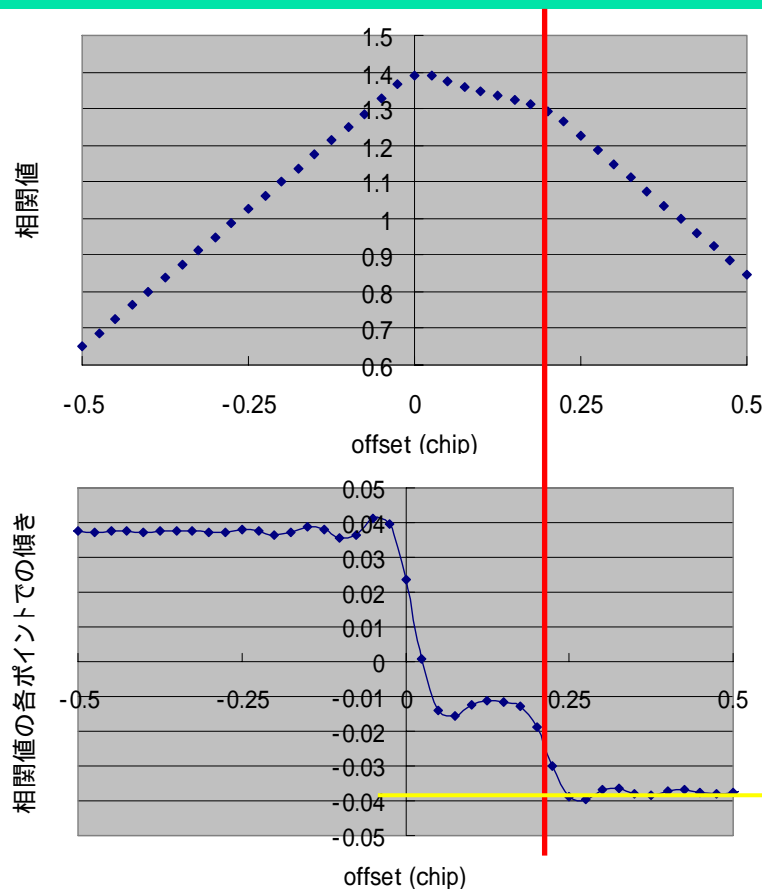


初期推定したマルチパス波の振幅比

本手法におけるマルチパス波の遅延距離の初期値推定方法

- 相関波形の各ポイントでの隣同士の傾き(右図の上が相関値で下が各ポイントでの傾き)より、どのくらいの遅延距離で支配的なマルチパス波が混入しているか予測
- 10m程度の精度で把握。マルチパス波の振幅比が非常に小さい場合、無理に推定することはしない。 **振幅比が小さい場合、もともとマルチパス誤差が非常に小さいので問題にはならない**
- **相関値の各ポイントでの隣同士の傾きが一定になる直前(右図の赤線付近)を、支配的なマルチパス波の遅延距離の初期推定値とする。**

0.2chip遅れの大きなマルチパスが存在



本手法での マルチパス波推定の流れ

支配的なマルチパス波1つを想定

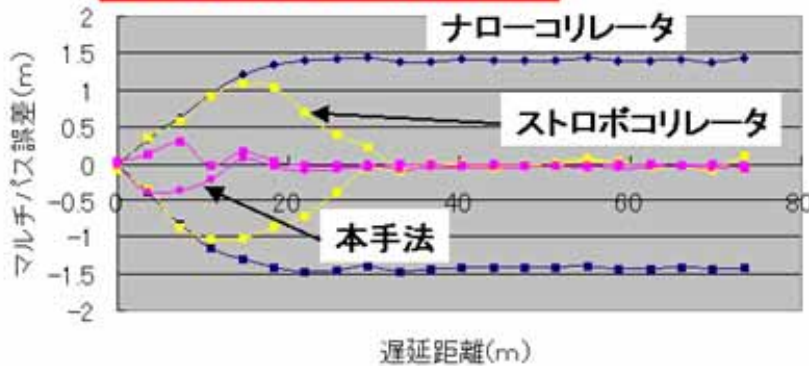
- 0チップの相関値より振幅比の初期値を推定
- 相関値の各ポイントの傾きより遅延距離の初期値を推定
- 推定した初期値を中心に探索(振幅比で0.1程度、遅延距離で30m程度)し、最も可能性の高い支配的なマルチパス波を最尤推定法を用いて推定する。
- 推定したマルチパス波を除いた相関波形(推定した直接波に相当する)に基づいてマルチパス誤差を計算し、擬似距離を再計算。

本手法とMEDLLとの差

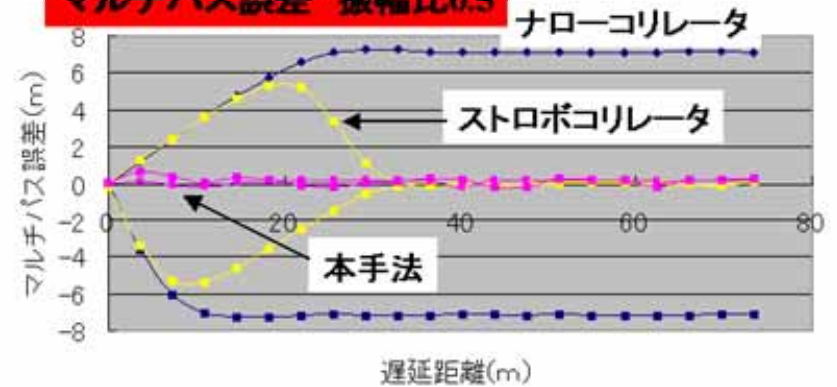
MEDLLの説明では、最尤推定法を用いてマルチパスパラメータを推定すると書いてあるが、実際の処理方法については示されていないため、比較することができない。実際の性能については本手法が勝っている。

本手法を用いた場合の性能 シミュレーション(遅延距離を変動)

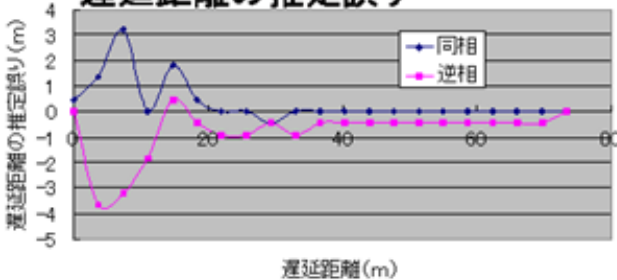
マルチパス誤差 振幅比0.1



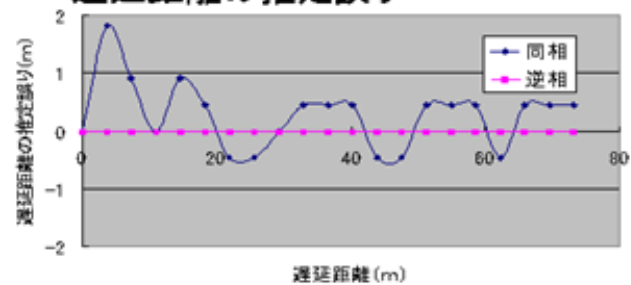
マルチパス誤差 振幅比0.5



遅延距離の推定誤り

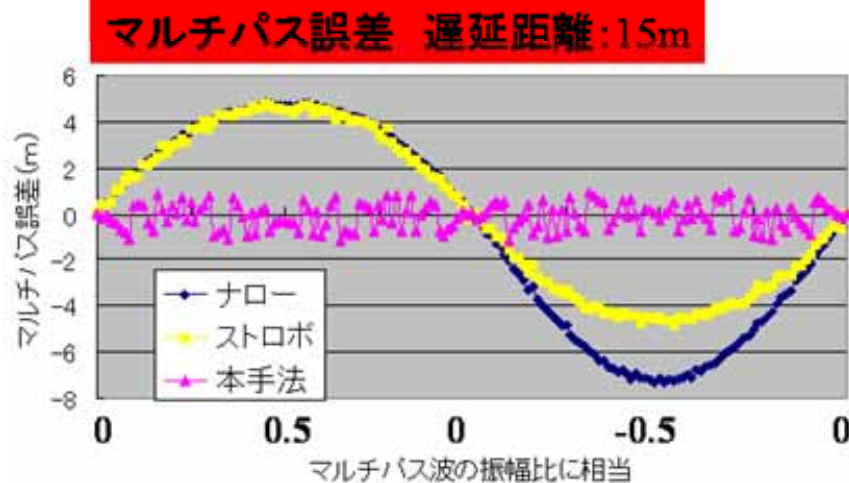


遅延距離の推定誤り



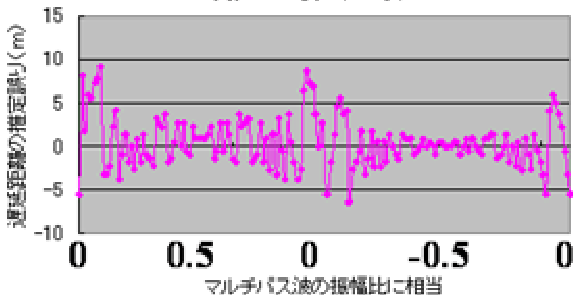
1つのマルチパス波を想定したシミュレーションで、マルチパス誤差を1m以内に低減。遅延距離の推定精度は数mであるが、実際のマルチパス誤差推定に重要な直接波の推定精度は1m以内である。

本手法を用いた場合の性能 シミュレーション(振幅比を変動)

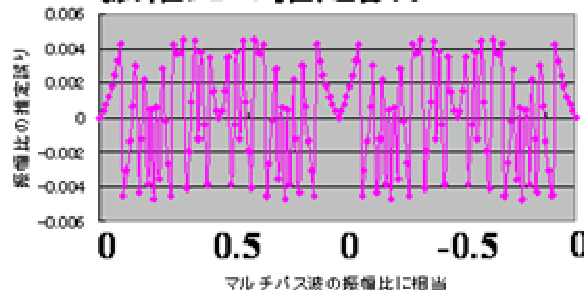


- 実際に近接に大きな壁が存在する場合を想定したケース(振幅が位相に応じて1周期分変動している)。
- 既存の手法で低減できない遅延距離の短い領域のマルチパス誤差を1m程度まで低減。
- 遅延距離と振幅比の推定誤りも同時に示した。

遅延距離の推定誤り



振幅比の推定誤り



実データによる本手法の評価

複数の相関波形と擬似距離を同時に出力する受信機が市販されていないため、通常の実受信機と、相関波形を出力する受信機の両方を利用して計算する。



+



0.1chipナローコリレータ受信機
内部の白色雑音低減時定数(2-20秒)

SQM受信機(128ポイントの相関値、0.025chip)
相関値を出力できる衛星数は2衛星のみ
内部の白色雑音低減時定数(わずか)

ナローコリレータ受信機で出力する擬似距離 +
SQM受信機の相関値から推定したマルチパス誤差(2衛星のみ)
= 実際に使用する擬似距離

実際のマルチパス誤差推定

基準局と移動局(静止又は歩行)でデータを取得

反射波を強く受信している衛星の検知・排除(移動局)

マルチパス誤差の推定(移動局)

マルチパス誤差より擬似距離を補正(移動局)

共通衛星が4個以上であればDGPS測位

測位結果やDOP等を算出

全体の流れ

マルチパス環境下でGPSデータ取得

各衛星の相関波形(選択した2つの衛星のみ)より、マルチパス波のパラメータの初期値を推定

初期値の推定が良好

通常の探索範囲を設定

探索範囲を広げて設定

上記の初期値と探索範囲を利用して、最尤推定法によりマルチパス波と直接波のパラメータを推定

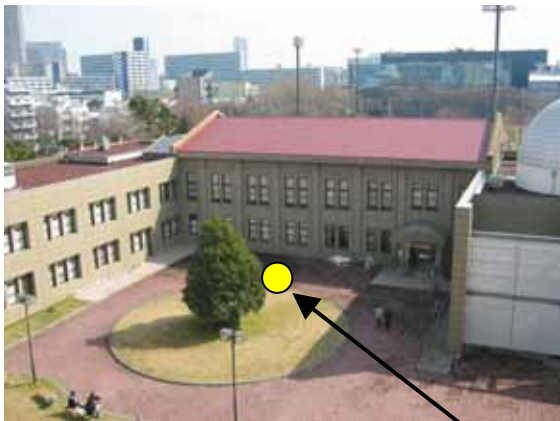
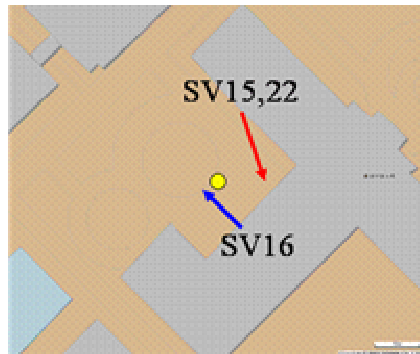
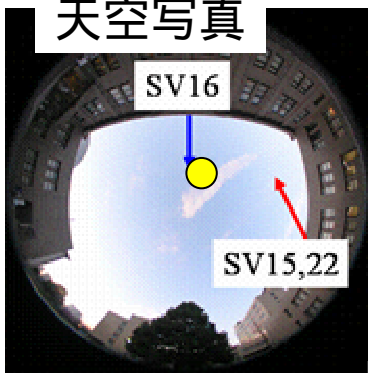
推定した直接波の中心ポイントからマルチパス誤差を推定

マルチパス誤差推定部分

基準局は屋上で周囲が十分に開けた場所である。

実データを用いたマルチパス 誤差低減例(実施場所1)

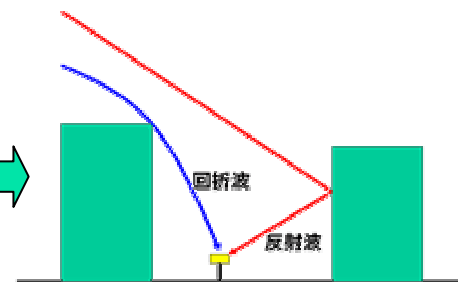
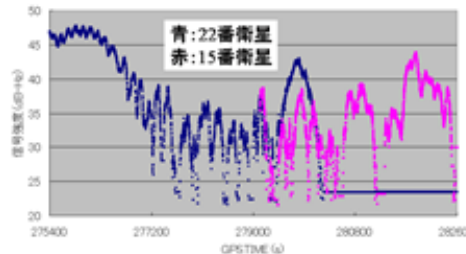
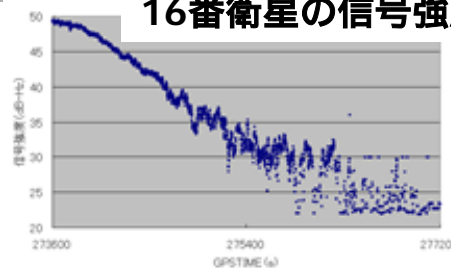
天空写真



上方前方からの写真

アンテナ設置場所

16番衛星の信号強度(通常の回折)



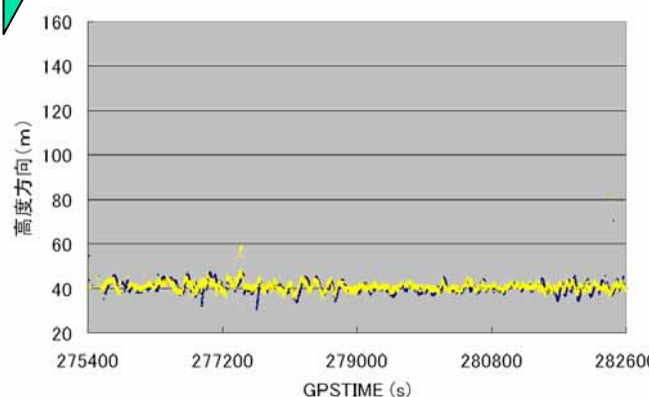
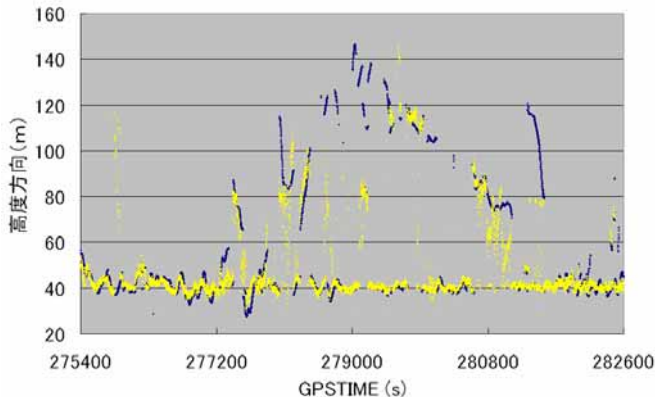
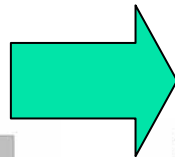
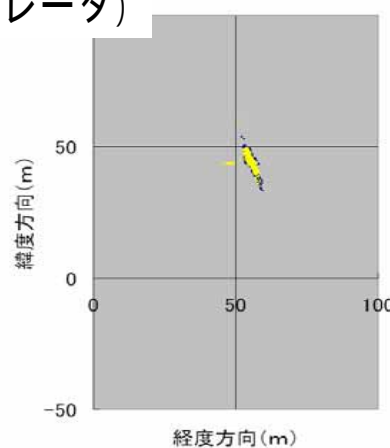
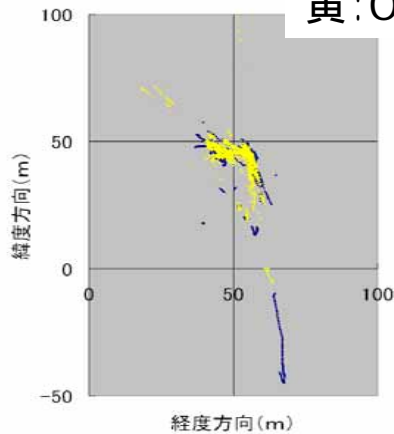
15番と22番は明らかに回折と反射の影響を同時に受けている。16番衛星は通常回折のみ影響。反射波のみになる状況では、最初回折の影響を受けている場合が多い(下図)

周囲が囲まれている場所でデータ取得。
取得日は2004/12/15。

実データでのDGPS測位結果 (信号強度での検知・排除による効果)

青: OEM3 (ナローコリレータ)

黄: OEM4 (ストロボコリレータ)

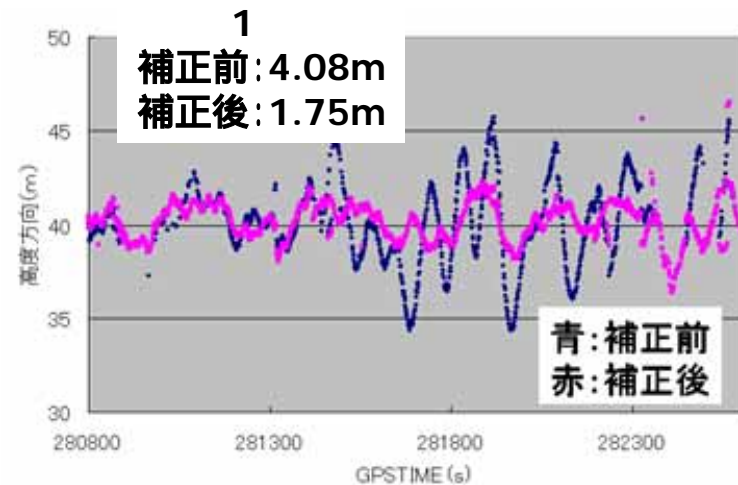
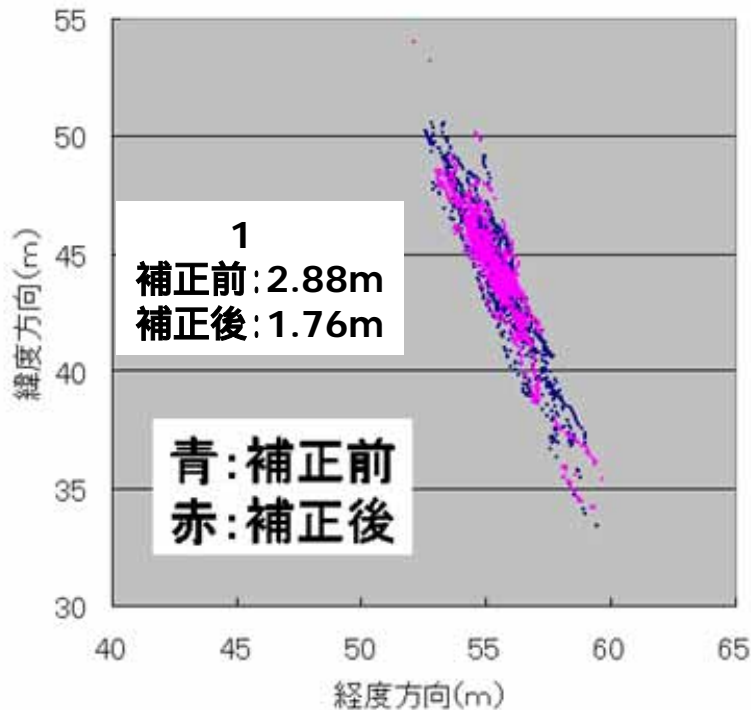


受信機出力データでの
DGPS測位結果

信号強度で検知・排除
した結果

受信機出力の生データでは、水平、高度方向ともに非常に大きく飛んでいることがわかる。明らかに支配的な反射波の影響や回折の影響を受けている。信号強度による検知・排除を行うだけで大きな飛びが大幅に削減されていることがわかる。OEM3とOEM4で差がない理由は遅延距離が短いため。

実データでのDGPS測位結果 (マルチパス誤差推定による効果)



両者のDGPS測位結果と見ると、OEM4(ストロボコリレータ相当の受信機)でも低減できないマルチパス誤差を低減できていることがわかる。

実データを用いたマルチパス 誤差低減例(実施場所2)

アンテナ上方の天空写真



- ・約1時間のデータを2回に分けて取得
(2004/12/10)
- ・左の写真のように、壁から約10mの場所にアンテナを設置。
- ・ナローコリレータ受信機とSQM受信機の両方でデータを取得
- ・基準局も同時に取得し、DGPS測位を行う
- ・SQM受信機で取得した相関波形を用いてマルチパス誤差の低減化を図る

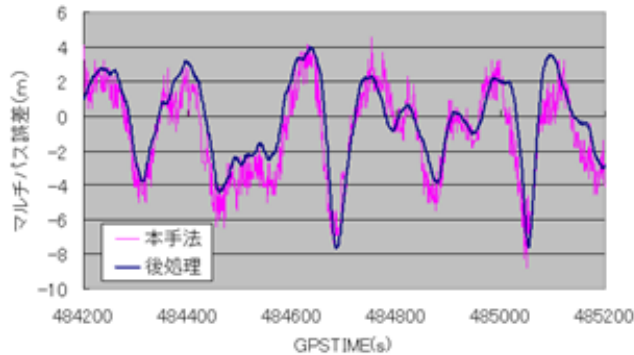
上方から見た写真



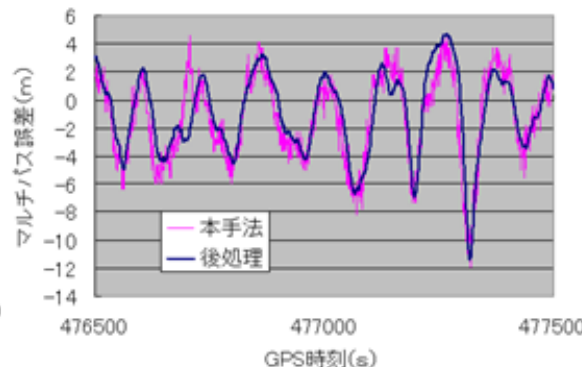
アンテナ設置場所

本手法によるマルチパス誤差推定の精度検証

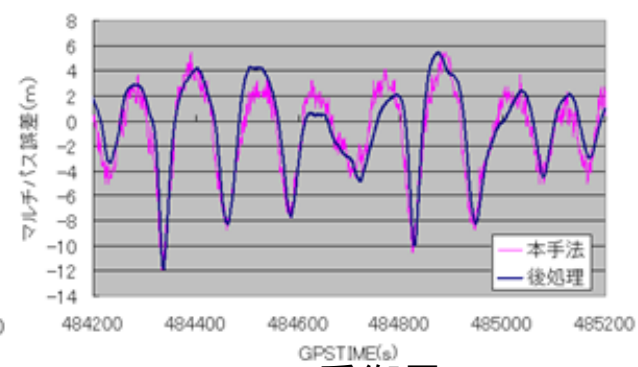
下の3つの例は壁に強く反射していた衛星を選択



10番衛星



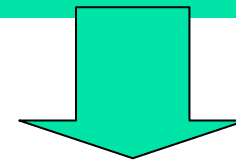
26番衛星



29番衛星

赤: 本手法で求めたマルチパス誤差 (SQM受信機の相関値より)
青: 別の手法で後処理で求めたもの (コードと搬送波の差より)
変動は非常に正確に算出可能
バイアスが存在するのでオフセット。

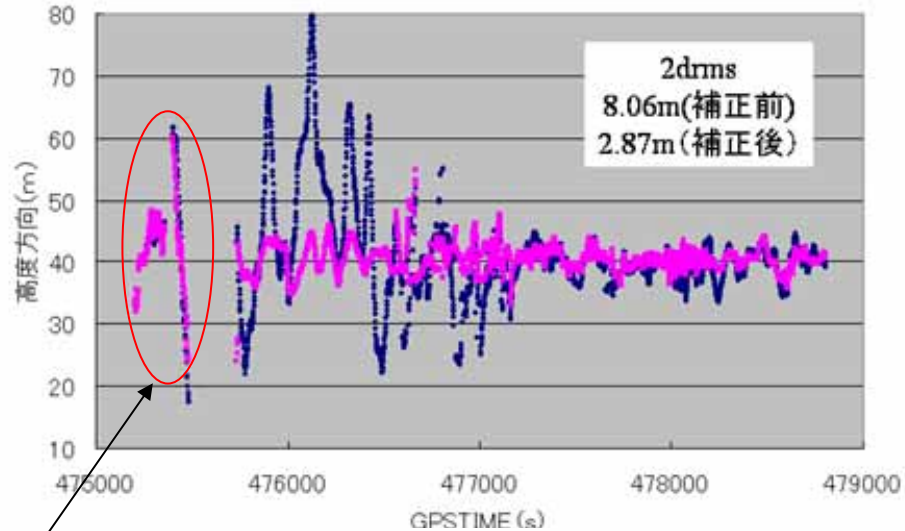
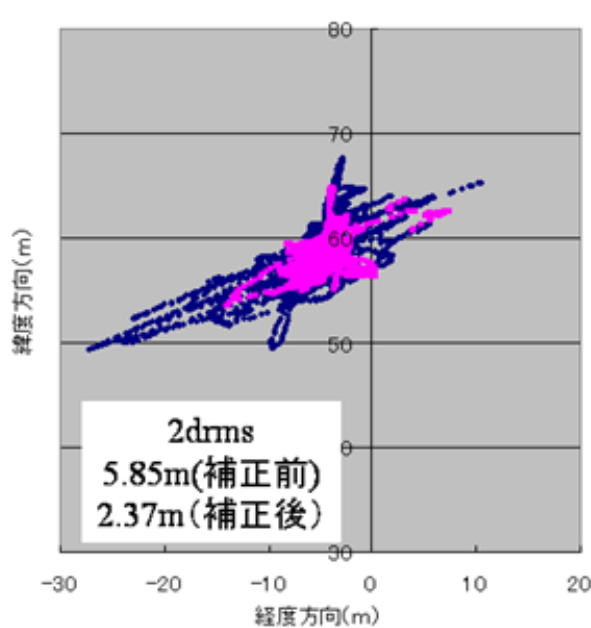
本手法の推定により、ノイズはやや大きいですが、マルチパスの変動をリアルタイムでとらえることができています。



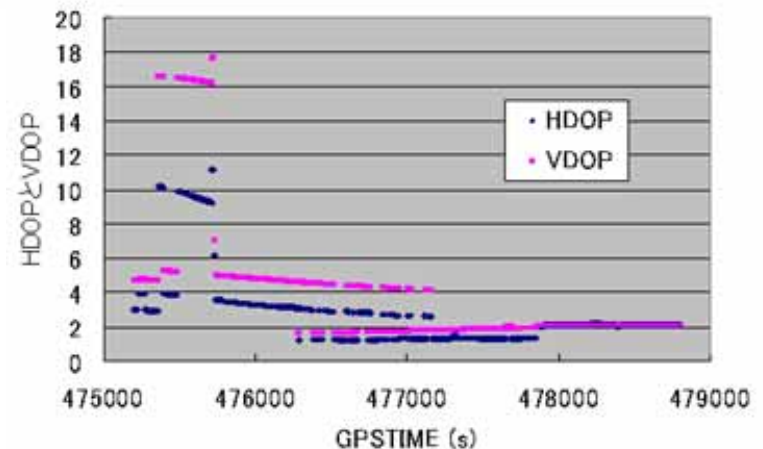
実際に推定したマルチパス誤差を
擬似距離に考慮してDGPS測位を実施

DGPS測位結果改善例(1回目)

青が補正前、赤が補正後の結果(HDOPが5以上は排除)

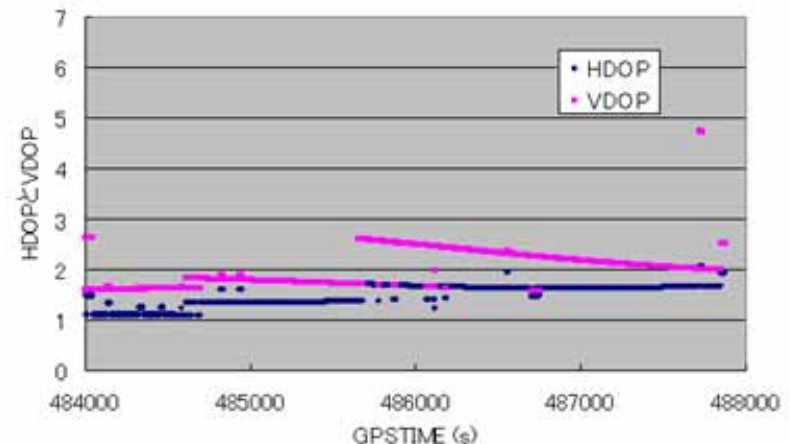
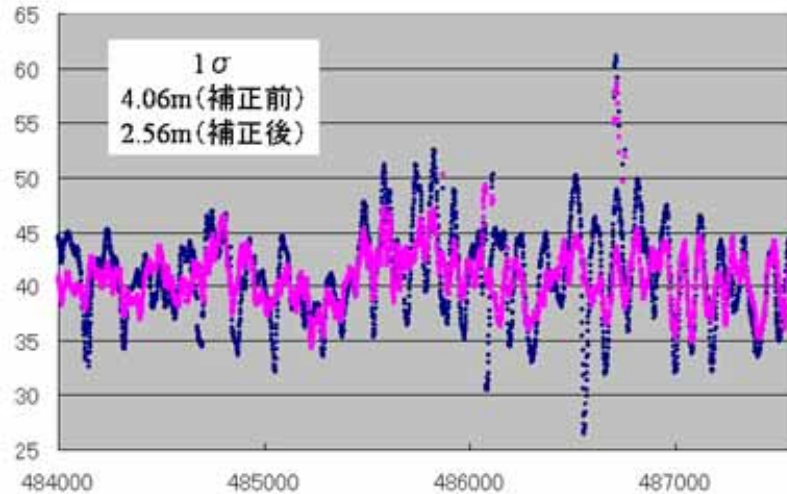
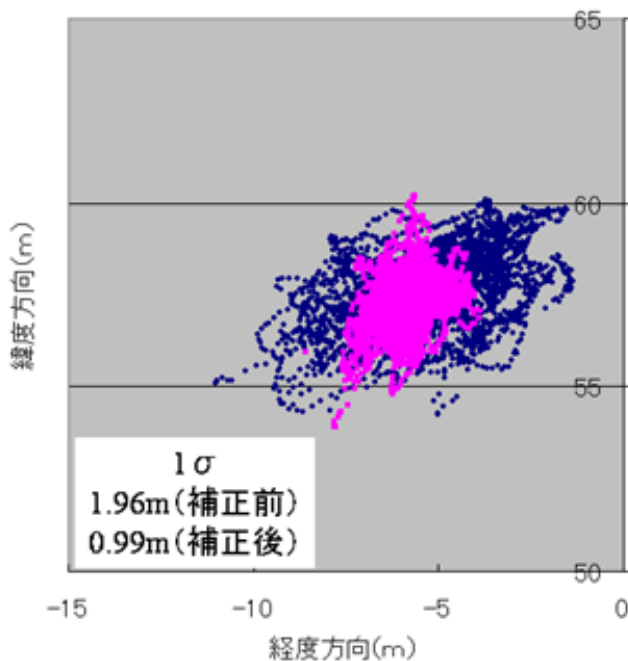


最初の時間帯で高度方向の誤差が改善されていない理由は、推定していない衛星によるもの(2チャンネルの制限)。全体的に高度方向の誤差が大きいのはVDOP(2-5)によるものである(右図参照)



DGPS測位結果改善例(2回目)

青が補正前、赤が補正後の結果(HDOPが5以上は排除)



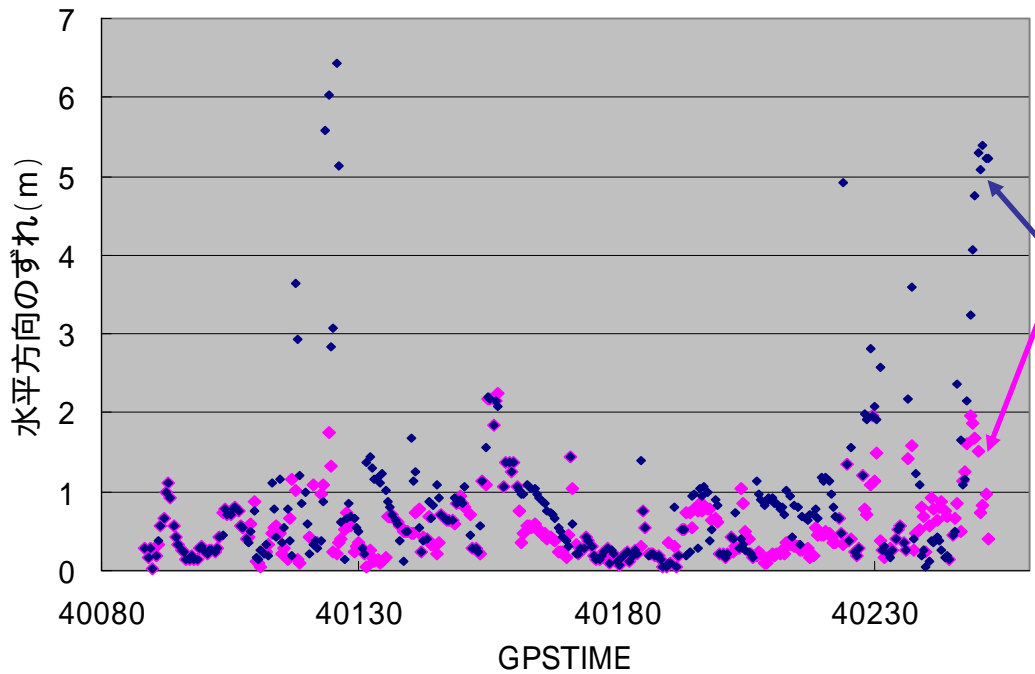
全体的に高度方向の誤差が大きいのはVDOP(2 - 3)によるものである(右図参照)。低減後のマルチパス誤差が2m程度であっても、VDOPにより4m-6mの振幅を持つようになっている。

実データを用いたマルチパス 誤差低減例(歩行スピード)



2005/1/30
海洋大校舎内
歩行スピード
2Hzデータ
赤:後処理精密位置
青:通常のDGPS
可視衛星数:4~10
(基準局は常に10)

本手法による改善 (後処理精密測位との水平方向ずれ)



信号強度による検知とマルチパス誤差推定を行った後の結果が赤

受信機出力をそのまま計算したものが青

両者とも測位率は同じ。

数秒間にわたる数箇所の時間帯ではマルチパス誤差推定が作用し、大きな飛びについては信号強度による検知・排除が作用している。

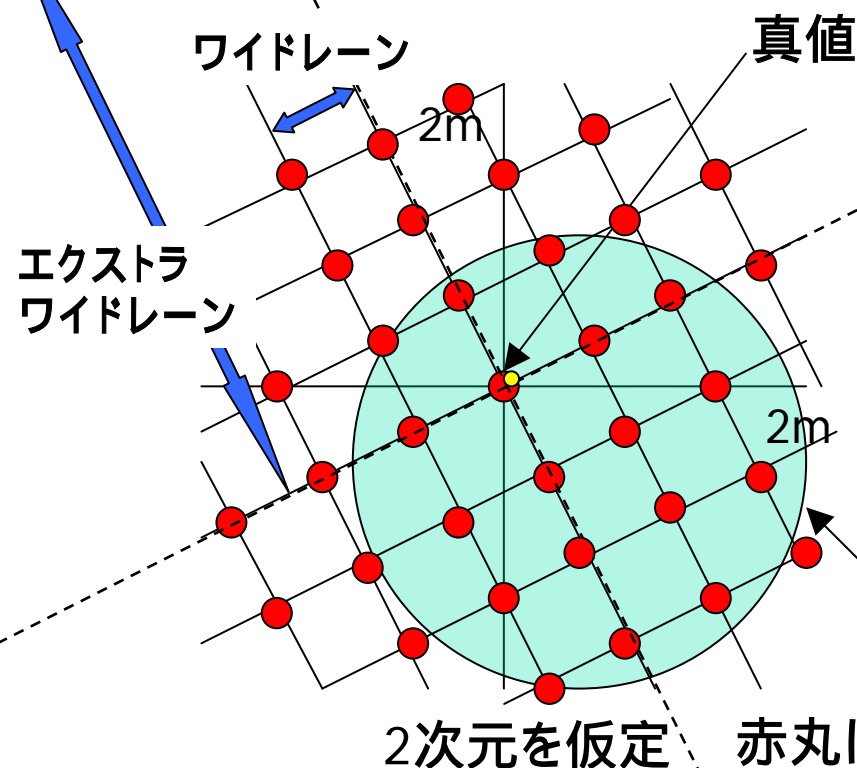
	改善前	改善後
1	1.05m	0.41m
最大値	6.44m	2.24m

マルチパス誤差低減による 高精度測位への効果

- これまでの結果(静止と歩行データ)より、本手法を用いれば、悪い環境でも**水平方向の1m程度**が**数mから1m程度**(衛星配置も影響)まで低減されることがわかった。
- 搬送波位相を利用したリアルタイム精密測位(RTK測位)では、アンビギュイティを高速かつ正確に決定するためには、上記のコードによる測位精度を**1m程度まで**低減しておくことと**大きな飛びを防ぐ**ことが非常に重要である(次のスライドで簡単に説明)。
- では、本マルチパス誤差低減手法により、どの程度RTK測位のサービスが向上するのかを、独自に開発した精密測位シミュレーションソフトで解析することにした。

マルチパス誤差とリアルタイム精密測位 (RTK) との関係

- RTK測位を実施するには、搬送波位相の整数値アンビギュイティを決定する必要があり、決定すると精度(1cm程度まで)が飛躍的に向上する。



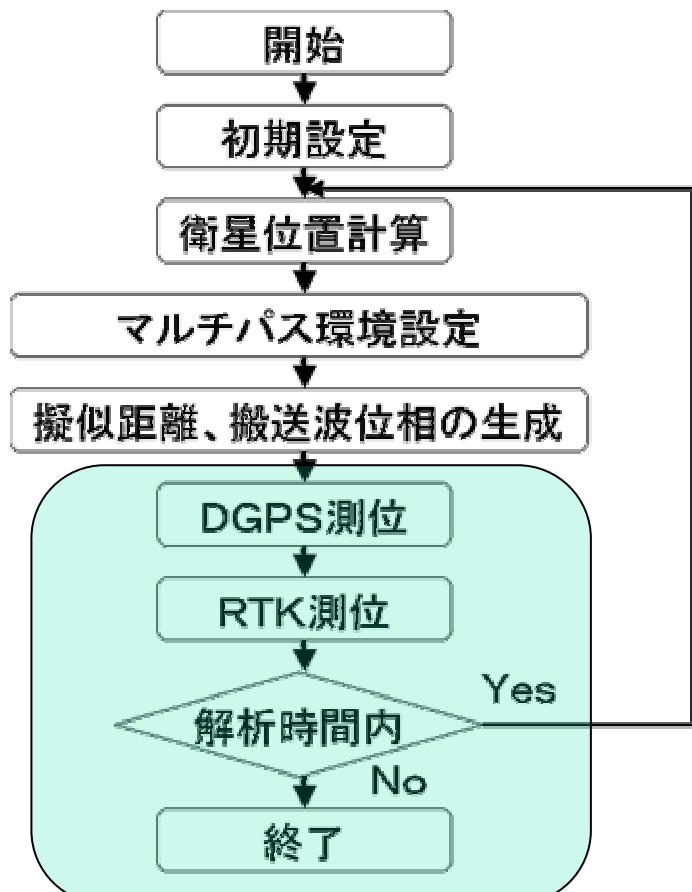
上記の整数値アンビギュイティを解く際に、DGPS測位結果を中心にしたある程度の範囲を探索することになる。もしDGPS測位結果が大きくずれていると探索範囲に入らないことがある。探索範囲を大きくとりすぎると、計算が膨大になりかつ誤ったアンビギュイティを解く確率が大きくなる

- ・波長(左図の格子点同士の間隔)について
- L1-L2(約86cm) ワイドレーン
- L2-L5(約5.8m) extraワイドレーン

通常時のDGPS測位による誤差分布

シミュレーション全体の流れ

シミュレーションの概要

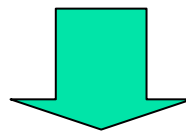


実環境のソフトと同じ

- 基線長が短い場合を想定(衛星位置、電離層そして対流圏による遅延は無視)
- 衛星はGPSとQZSS
- 信号はL1、L2そしてL5
- 衛星位置はYUMAアルマナックを利用
- マルチパス環境としては、仰角と方位角に応じて、鏡面反射、回折(減衰効果)のみを設定
- 擬似距離と搬送波位相のノイズは教科書掲載の計算式より算出
- 全てC言語で開発
- **受信機コリレータの切り替え機能**
(既存の技術と提案した手法を比較するため)

シミュレーションにおける仮定と 実際の測位との違い

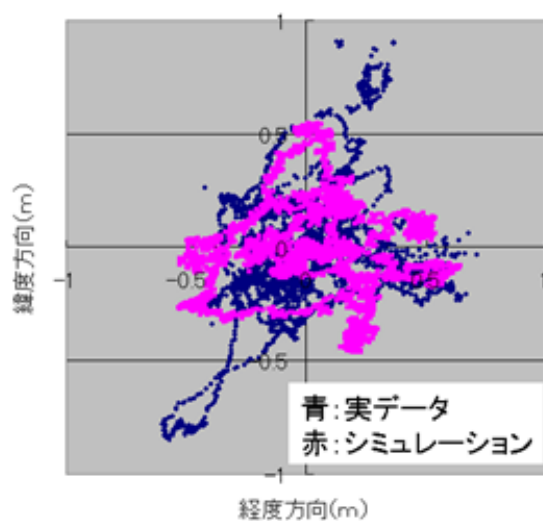
- **衛星の位置誤差**: アルマナックにより算出した衛星位置を正しい位置として利用しているため、実際にエフェメリスを利用して計算したときに生じる衛星の位置誤差は無視されている。実際には、1 分で約2 - 3m程度の誤差が生じている。
- **衛星及び受信機の時計誤差**: 時計誤差を無視している。実際には、衛星及び受信機ともに、GPS時刻からずれており、測位計算時にそれぞれ修正を行っている。
- **電離層及び対流圏による誤差**: 大気圏における遅延効果は無視している。実際には、電離層及び対流圏において、数mから数十mの誤差が生じることが知られている。



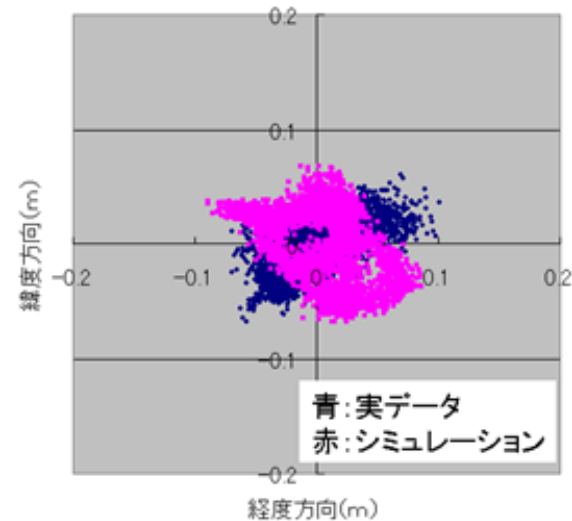
ただし、基準局データを利用したDGPSやRTK測位を行う場合は、上記の全ての誤差について、短基線(数十km以内)では、無視できる程度に削減される。

マルチパスの少ない環境での実結果とシミュレーションの比較

場所は、東京海洋大学第4実験棟屋上を想定(周囲は開けている)
データ取得日時:2004年11月22日午後8時から午後9時
使用受信機はストロボコリレータ相当のOEM4。
実際のOEM4による結果とシミュレーションによる結果の比較



DGPS測位結果



RTK測位結果

細かい測位結果の変動は一致していないが、おおよその測位誤差は一致していることがわかる。

周囲が建物で囲まれた環境での実結果とシミュレーション結果

- 場所は、5階の建物に近接している場所(移動局1)、10階程度のビルが両側に並んでいる道路(移動局2)の環境で、各種マルチパス誤差低減技術ごとにシミュレーションを行った。
- **前者の環境については、東京海洋大学内の大学院棟横をモデルとしたので、実データとの比較結果も示す。**
- 解析日時は移動局1、移動局2ともに12月10日の**24時間**。ただし**実データとの比較は12月10日の1時間のみ**。1Hzで解析。
- 結果はDGPS測位(水平、高度方向)とRTK測位(FIX率)で評価した。



移動局1

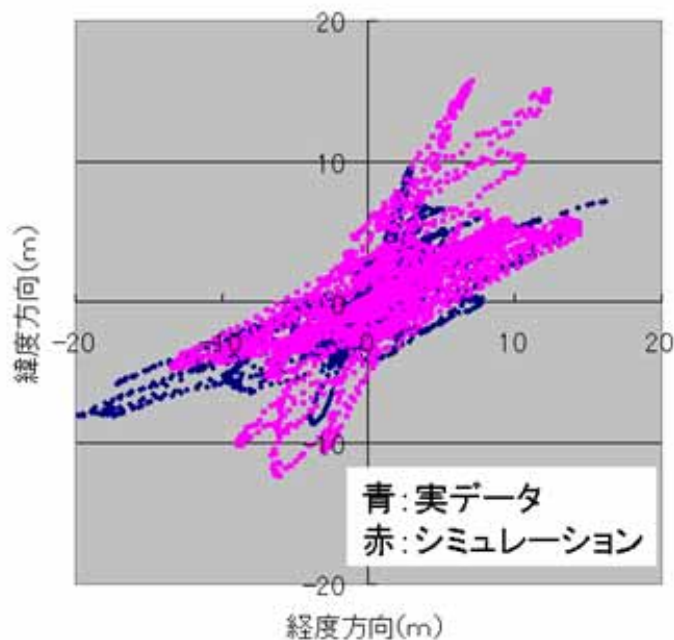
5階の建物に近接している場所



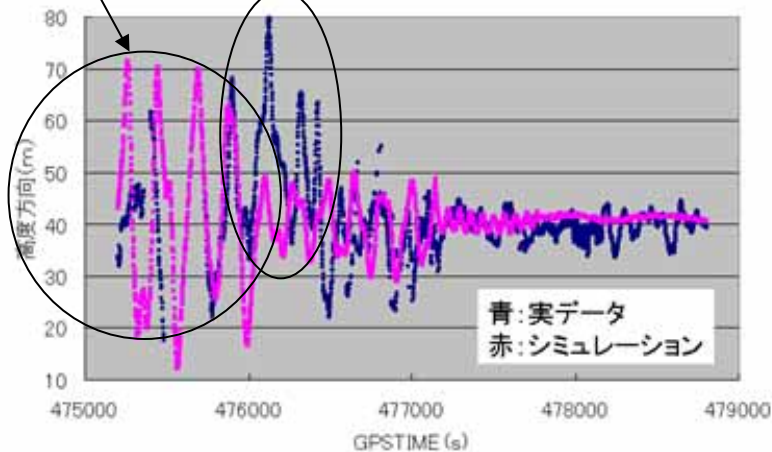
**移動局2: 10階程度のビルが
両側に並んでいる道路**

移動局1でのナローコリレータでの DGPS測位結果 (実データとの比較)

30m以上離れた建物による反射の影響

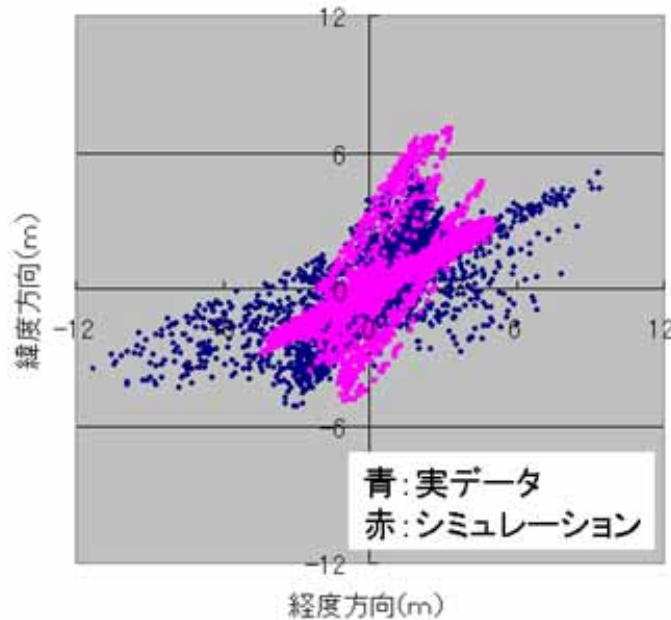


シミュレーションと実結果で、可視性の判定を誤ったためにVDOPが大きく異なった。



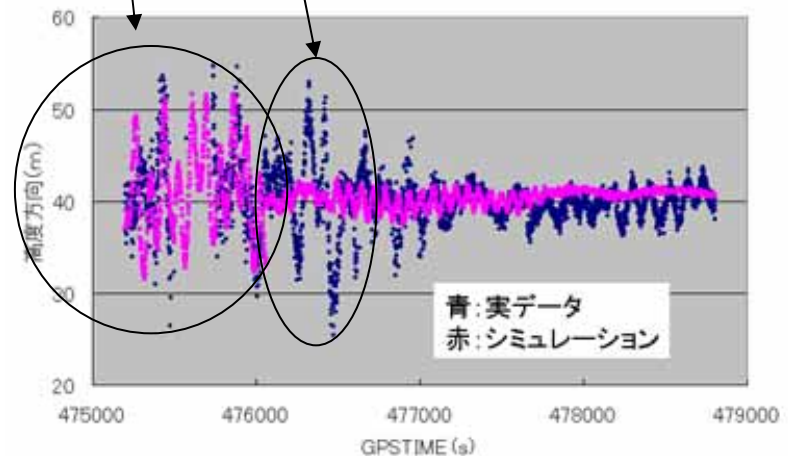
水平方向、高度方向ともずれはあるものの、測位精度の概要を把握するには良好なシミュレーション結果が得られている。

移動局1でのストロボコリレータでの DGPS測位結果 (実データとの比較)



ナローコリレータで見られた影響が大幅に低減されている(遅延距離が長いマルチパスのため)。

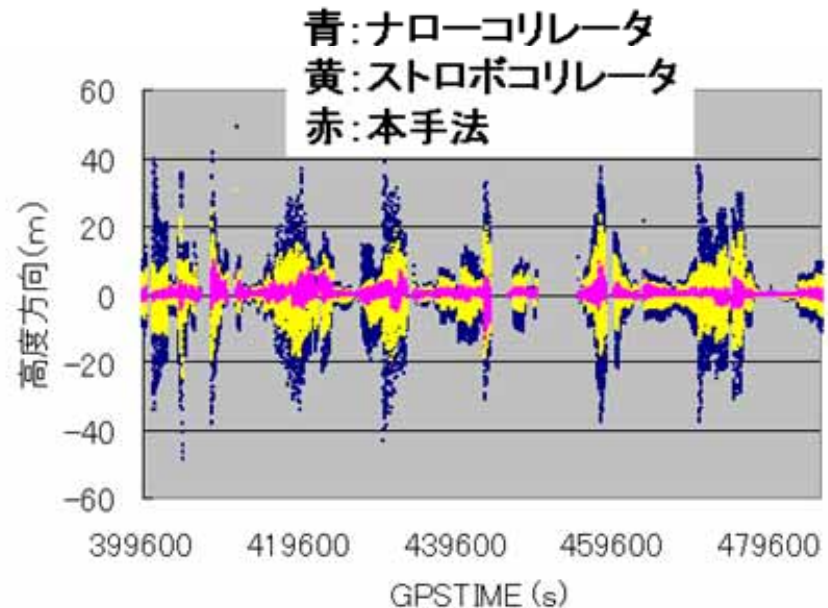
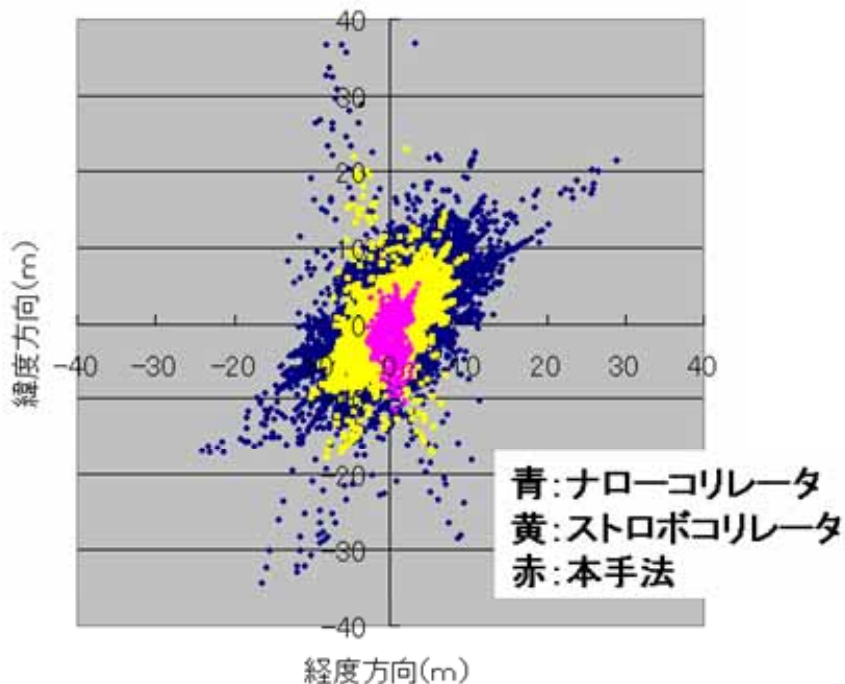
前スライドと同様の理由



前スライドと同様に、シミュレーションの妥当性を確認することができたので、次に**実際の目的である提案した手法による効果とGPS近代化による効果を解析するためのシミュレーションを行いました。**

移動局1でのDGPS測位結果 (24時間シミュレーション)

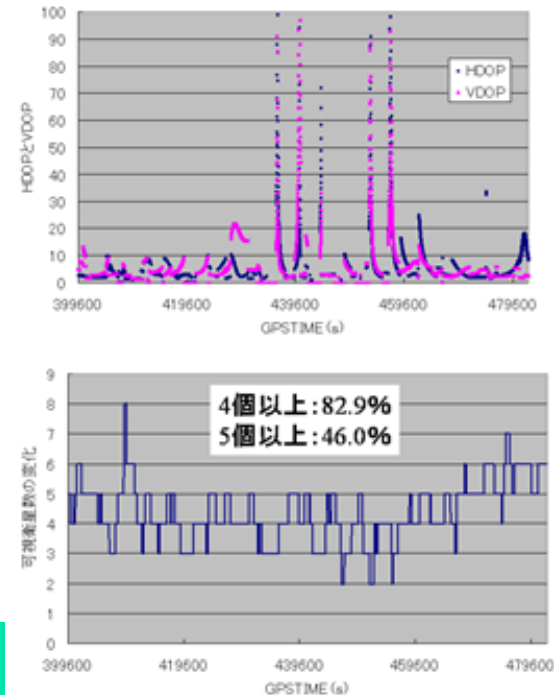
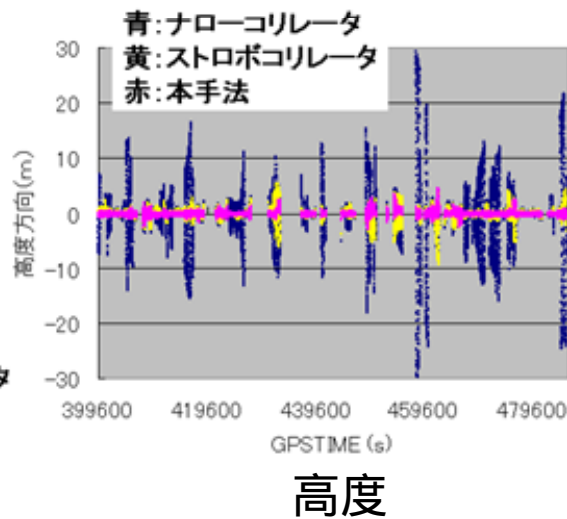
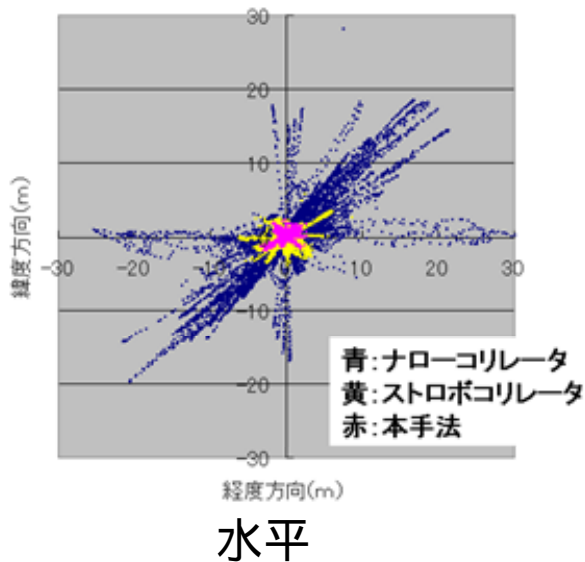
2つのコリレータと提案した手法の比較
HDOPは5、可視衛星数4で制限



マルチパス対策手法による測位誤差の違いが見られる

移動局2でのDGPS測位結果 (24時間シミュレーション)

2つのコリレータと提案した手法の比較
HDOPは5、可視衛星数4で制限



マルチパス対策手法による測位誤差の違いが見られ、
衛星配置による劣化も避けられないことがわかる

24時間RTK測位結果 (GPSのみ L1+L2)

FIX率計算の説明

150秒ごとにアンビギュイティを初期化。
24時間の解析(1Hzで)なので、全て正しくFIXした場合は576回。
FIX率=FIXした回数/576

括弧内は可視衛星数が5個以上の場合を分母としたときの結果。

	ナローコリレータ	ストロボコリレータ	提案した手法
移動局1での FIX率	19.6% (30.2%)	27.2% (42.0%)	41.5% (63.9%)
移動局2での FIX率	17.5% (38.1%)	21.9% (47.5%)	22.6% (49.1%)

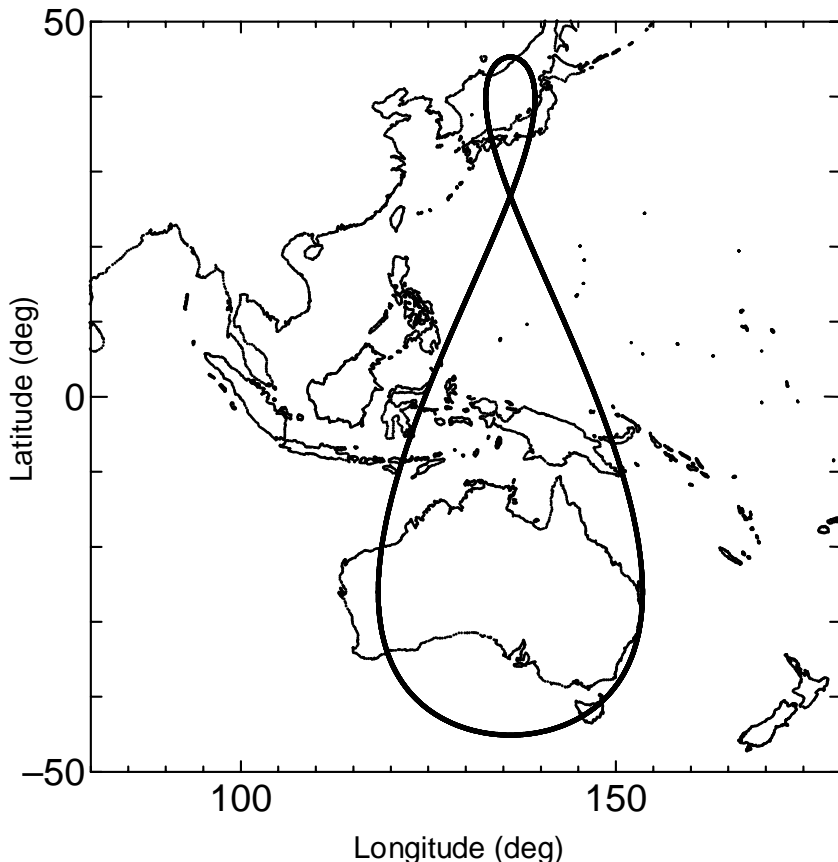
- 提案するマルチパス誤差低減技術により、ストロボコリレータよりも、さらにマルチパス誤差を削減可能となり、特に近接に大きな建物が存在する場合(基準局1のような状況)は、その効果が大きい。その結果、RTK測位のFIX率が向上していることがわかる。



GPS近代化に伴う効果

- QZSSの概要
- GPS + QZSSによる精密測位の可能性
- GPS + QZSS + L5周波数(第3番目の周波数の追加)による精密測位の可能性

シミュレーションに使用した QZSSの概要



QZSSの衛星配置は決定していないので、最も可能性の高い性能が出ると見込まれている配置を利用することにした。左図にその配置による軌道を示す。衛星の軌道傾斜角は45度で、3機軌道に投入することにより、常に最低1機の衛星が日本でおおよそ仰角70度以上に存在することになる。衛星の離心率は0.099、近地点での衛星の高さは約31,612km、遠地点での高さは約39,960kmである。QZSSの信号のパラメータは全てGPSと同じとした。

24時間RTK測位結果 (GPS+QZSS L1+L2)



	分類	GPS (L1+L2)	GPS+QZSS (L1+L2)
移動局1	ストロボコリレータ (FIX率)	27.2%	34.0%
	提案した手法 (FIX率)	41.5%	55.7%
	5個以上の可視衛星 (可視率)	64.9%	75.3%
移動局2	ストロボコリレータ (FIX率)	21.9%	31.1%
	提案した手法 (FIX率)	22.6%	32.1%
	5個以上の可視衛星 (可視率)	46.0%	61.1%

QZSSが加わることによる性能の向上が見られる。5個以上の衛星の可視率は、移動局1及び移動局2において10%以上の向上が見られ、それに伴い、FIX率も全ての場合において、7%から15%程度向上している。この結果より、**可視衛星数の増加が、精密測位のサービス向上には不可欠であることがわかる。**

24時間RTK測位結果 (1epoch率含む) (GPS+QZSS L1+L2+L5)

括弧内は1epochでのFIX率

	分類	GPS (L1+L2)	GPS+QZSS (L1+L2+L5)
移動局1	ストロボコリレータ (FIX率)	27.2%	40.1% (96.1%)
	提案した手法 (FIX率)	41.5%	71.5% (99.0%)
	5個以上の可視衛星 (可視率)	64.9%	75.3%
移動局2	ストロボコリレータ (FIX率)	21.9%	57.6% (100%)
	提案した手法 (FIX率)	22.6%	60.4% (100%)
	5個以上の可視衛星 (可視率)	46.0%	61.1%

FIX率は全ての場合において向上している。可視率に対するFIX率の向上も大きい。括弧内の1epochでFIXした割合を見ると、第3周波数のL5が加わることにより、100%に近い確率で1epochのFIX解が得られている。本結果より、**第3周波数の追加は、アンビギュイティ決定を高速に求めかつFIX率を高めている**ことを確認することができた。

結論1 (提案したマルチパス誤差の低減化手法)

- シミュレーションと実データ(静止及び低速データ)を利用して、本手法で支配的なマルチパス波を推定することにより、擬似距離の精度が、現存する最高性能の受信機よりも向上を確認することができた。
- 既存の受信機と比較して、マルチパス誤差で約80%、実際の測位結果で約50%程度の改善が見られた。
- 最尤推定法を用いる際に、マルチパスパラメータの初期値をできるだけ正解に近い値として代入することにより、探索時間を削減できた。
- マルチパス誤差の低減により、RTK測位での探索範囲を狭めることが可能となった。
- 受信機出力情報を用いた使用不可衛星の検知手法では、静止データだけでなく、移動体データにおいても、そのアルゴリズムが有効であることがわかった。特に大きな誤差の原因となっていた反射波の支配的な衛星検出に有効であった。

結論2 (精密測位サービスシミュレーション)

- 精密測位サービスシミュレーションでは、1点の静止データではあるが、GPS近代化を想定した日本の準天頂衛星の追加と第3周波数の追加による効果を示すことができた。
- 第3周波数の追加により、都市部の環境を想定しても、現在まで数秒から数十秒以上要していたアンビギュイティ決定がほとんど1エポックで決定されることがわかった。
- コードマルチパス誤差がどのように精密測位サービスに影響を与えているのかを示すことができた。本研究で提案したマルチパス誤差低減技術を用いた場合に、精密測位サービスが向上することを確認することができた。

課題1 (提案したマルチパス誤差の低減化手法)

- 提案した手法でもマルチパス誤差を理論上の限界値まで削減できない場合もあった。 **2つ以上のマルチパス波の推定を行う。相関値におけるノイズの低減手法の確立。**
- 車等の高速移動体ではマルチパス波を推定することが困難(現在1Hzで計算)。高速で移動している場合、短時間でマルチパス成分が変化するため、コード追尾の応答の度合いにより平均化され、誤差として目立たない場合が多いためである。 **車等の移動体で実験を重ね、静止の場合とのマルチパスの特徴の違いを更に調査することが必要。**
- 受信機出力情報を用いた使用不可衛星の検知手法が有効であることが示された。 **更に複数の受信機において効果があることを確認する。**

課題2 (精密測位サービスシミュレーション)

- アンテナ周囲の障害物の環境をビルのみとした **ビルだけでなく、他の影響も考慮する。**
- 障害物の判定に、水平地図と天空写真を用いた **より精度の高い地図を用いる必要がある(現在作業中)。**
- 1点のみの解析を実施した **実際のサービスの性能を評価するには、面的な解析を行う必要がある。そうすることにより、移動体データとしてのサービスも同時にチェックできる(現在作業中)。**