

6. 4. 2. 5 パラメータ推定精度の検証

実際に任意のマルチパスをシミュレーションで発生させて（0.025チップごとに誤差推定を行う）、本手法でどの程度マルチパス誤差を低減できるのかを示す。いずれも遅延距離の短い領域をターゲットにし、任意のマルチパス波として6つのシナリオを設定した。シナリオ1から4は全体の推定精度を見るものであり、シナリオ5は、複数のマルチパス波が到来したときの推定精度を見るものである。シミュレーションで生成する相関波形は、帯域幅を20MHzとし、相関値のノイズを考慮して（信号強度とコードループのバンド幅で考慮。コリレータ幅は0.1とした）計算した。遅延距離を推定する目盛りの細かさは、0.1チップの640分の1（約45.8cm）とした。またマルチパス波の振幅比を推定する目盛りの細かさは0.01とした。

シナリオの概要

- 1) マルチパス波は1つ。マルチパス波の振幅比（0.1、0.25、0.5）を一定にして遅延距離（0mから75m程度まで）を変動させた場合の推定精度。実際に推定した振幅比と遅延距離の精度についても示す。コードノイズが小さいとき（10cm未満：50dB-Hz）を想定。
- 2) マルチパス波は1つ。マルチパス波の振幅比（0.1、0.25、0.5）を一定にして遅延距離（0mから75m程度まで）を変動させた場合の推定精度。実際に推定した振幅比と遅延距離についても示す。コードノイズが大きいとき（20cm程度：35dB-Hz）を想定。以下のシナリオは全てコードノイズが大きいときを想定している。
- 3) マルチパス波は1つ。マルチパス波の振幅比（0.495から0.499まで0.002ずつ変化。推定誤りの場合も試す）を一定にして遅延距離（0mから75m程度まで）を変動させた場合の推定精度。このシナリオは、振幅比を推定する際に、推定最小目盛りより細かい場合の誤差解析と、推定を誤った場合の誤差解析である。
- 4) マルチパス波は1つ。遅延距離（約7m、約15m、約29m）を一定にしてマルチパス波の振幅比を変動させた場合の推定精度。このシナリオは、実際に壁近傍にアンテナを設置し、鏡面反射を受ける環境を想定している。
- 5) マルチパス波は2つ。1つ目は遅延距離が約15m。2つ目は遅延距離が約4m。マルチパス波の振幅比は任意に変動（位相差で）。1つの建物と地面からの反射を想定。

任意のマルチパス波を発生させて直接波+マルチパス波の相関波形を生成する手順を以下に簡単に示す。

- ・ 帯域を考慮した衛星の自己相関関数を利用して相関波形を生成する。
- ・ この相関波形より、直接波とマルチパス波を生成する。マルチパス波の生成時には、設定したマルチパス波の振幅比を使用する。双方の相関波形を生成する際に、ランダムに設定したノイズ（コードトラッキングにおけるノイズを利用して計算）を加える。
- ・ マルチパス波の遅延距離を0.025チップずつずらして、直接波と加算し、各遅延距離の相関波形を生成しておく。
- ・ 生成した直接波+マルチパス波の相関波形に対して、本手法を適用し、直接波とマルチパス波を推定する。この時、計算時間とのバランスを考慮して、遅延距離方向にずらす目盛りの細かさは約0.46m、振幅比方向にずらす目盛りの細かさは0.01とした。

1つ目のシナリオの結果

1つ目のシナリオの結果を図6.35から6.37に順番に示す。比較のために、同じ条件でのストロボコリレータとナローコリレータの結果を載せている（以降のシナリオは全て同様）。図の上が遅延距離とマルチパス誤差の関係図で、下の2つが本手法で推定した遅延距離と振幅比の推定精度を表している。マルチパス波を生成した際にその振幅比と遅延距離が既知なのでその値との差を推定精度として示している。

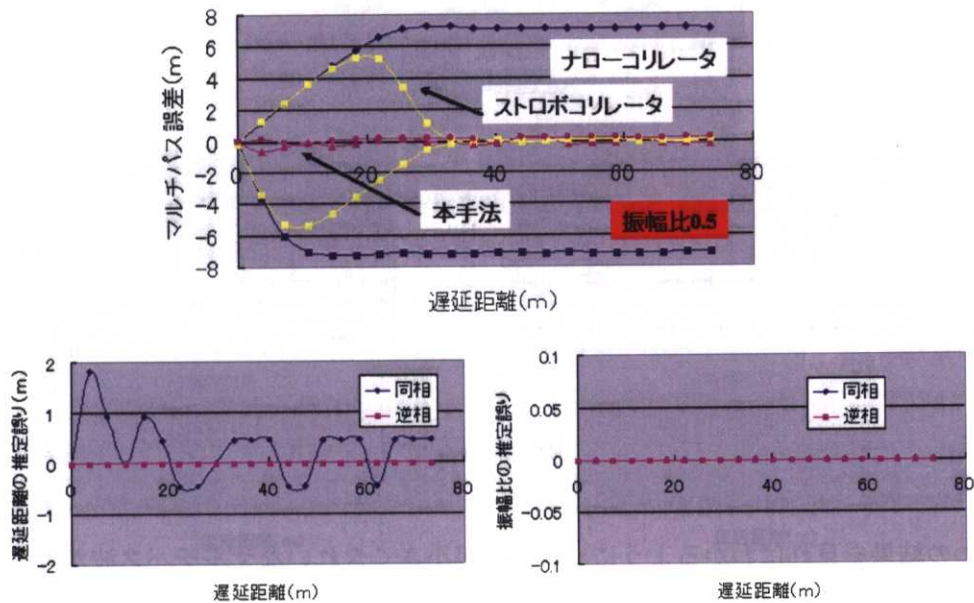


図6.35 遅延距離とマルチパス誤差の関係と推定精度（ノイズ小、振幅比0.5）

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

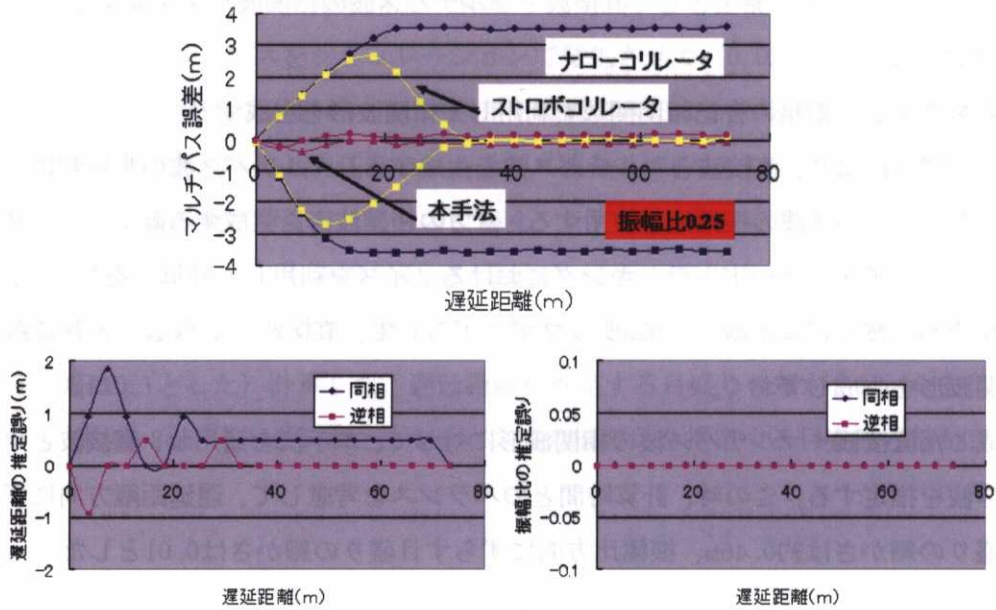


図 6. 3 6 遅延距離とマルチパス誤差の関係と推定精度 (ノイズ小、振幅比0.25)

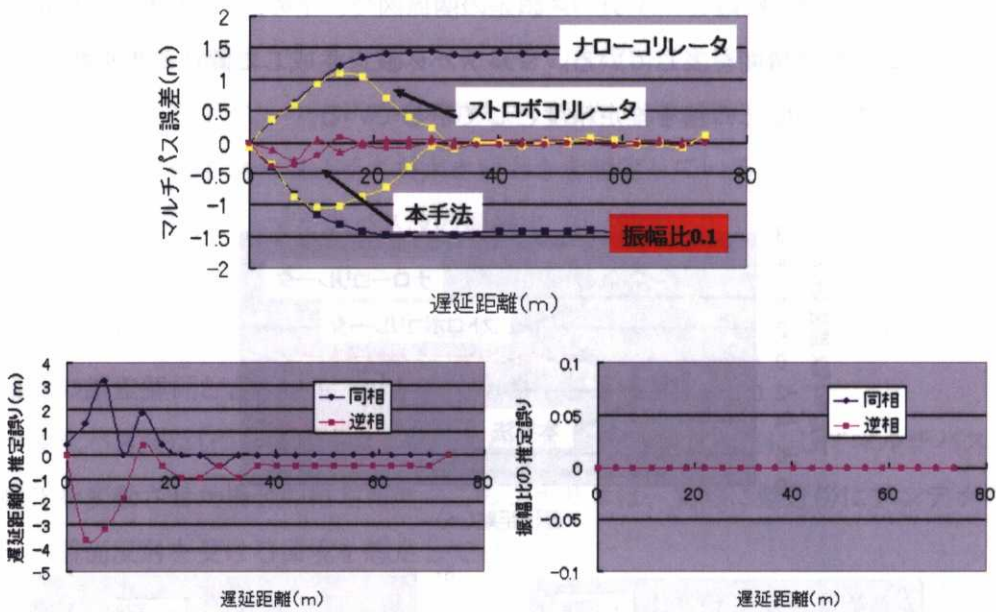


図 6. 3 7 遅延距離とマルチパス誤差の関係と推定精度 (ノイズ小、振幅比0.1)

上の3つの結果を見ればわかるように、ノイズが小さくきれいなマルチパス波が混入する場合は、遅延距離の短い領域でも本手法でマルチパス誤差を低減することが十分に可能である。遅延距離の推定精度を見ると、マルチパス波の振幅比が小さくなると推定精度がやや

悪くなっているが、5m未満程度で推定できればマルチパス誤差を十分に低減できていることがわかる。マルチパス波の振幅比に関しては完全に推定されている。

2つ目のシナリオの結果

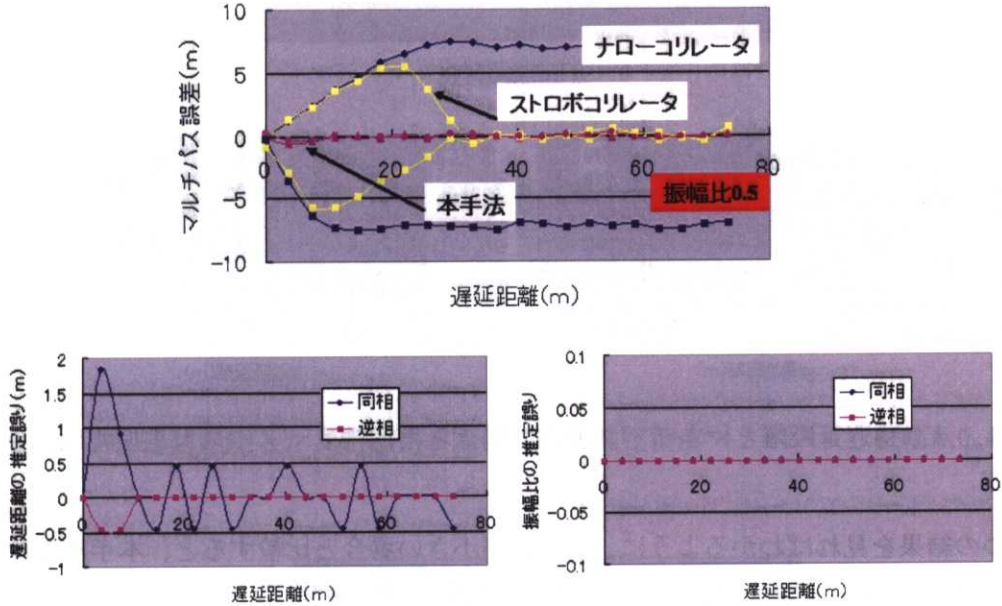


図6. 38 遅延距離とマルチパス誤差の関係と推定精度 (ノイズ大、振幅比0.5)

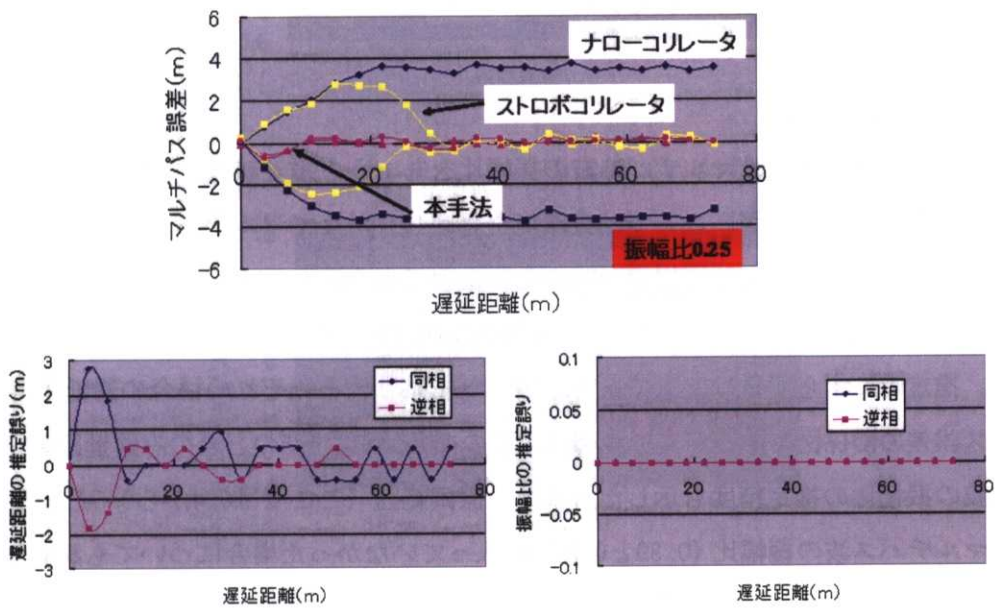


図6. 39 遅延距離とマルチパス誤差の関係と推定精度 (ノイズ大、振幅比0.25)

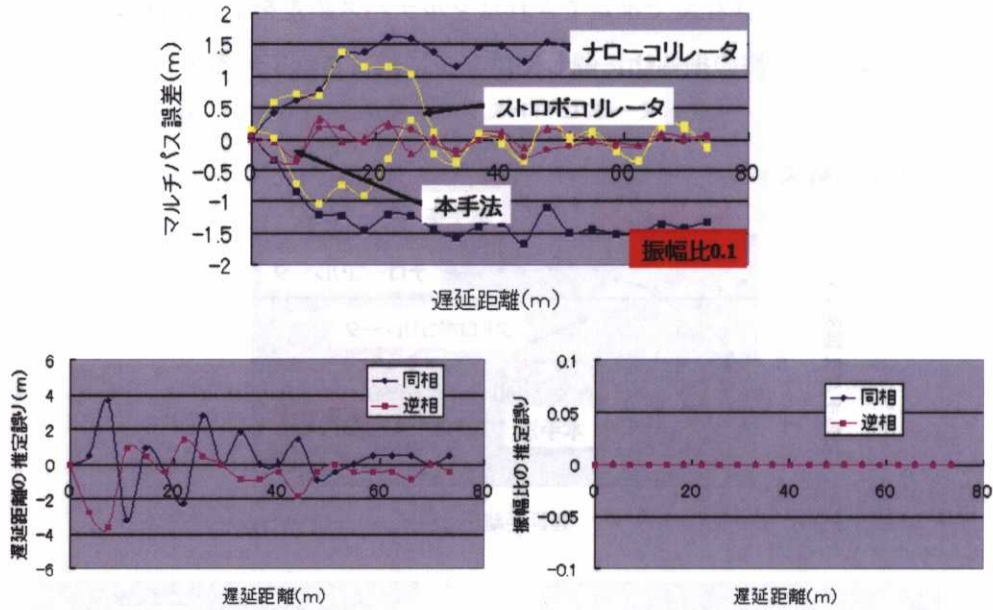


図 6. 40 遅延距離とマルチパス誤差の関係と推定精度（ノイズ大、振幅比0.1）

上の3つの結果を見ればわかるように、ノイズが小さい場合と比較すると、本手法だけでなく他のコリレータの結果もばたついている。マルチパス誤差の大きさは、ノイズが小さい場合と同様に、本手法により1m未満に低減されている。遅延距離の推定精度にも多少ばらつきは見られるが、その推定誤差は5m前後に収まっていることがわかる。マルチパス波の振幅比はここでも完全に推定されている。

3つ目のシナリオの結果

これまでのシナリオは、マルチパス波の振幅比をちょうど推定時にずらす目盛りと一致するように設定していたが、ここでは実環境を想定し、あえてマルチパス波の振幅比を推定目盛りに合わないようにして推定を試みた。よって完全にマルチパス波の振幅比を推定することは不可能である。マルチパス波の振幅比は0.495から0.499まで0.002ずつ変化させている。推定時にずらす量は0.01である。示した結果は、それぞれの場合の遅延距離とマルチパス誤差の関係図であるが、マルチパス波の振幅比が0.495のときのみ遅延距離とマルチパス波の振幅比の推定精度も示した。また、探索範囲（ここでは0.4から0.5とした）に実際のマルチパス波の振幅比（0.39と0.51）が入っていなかった場合についても調査した。

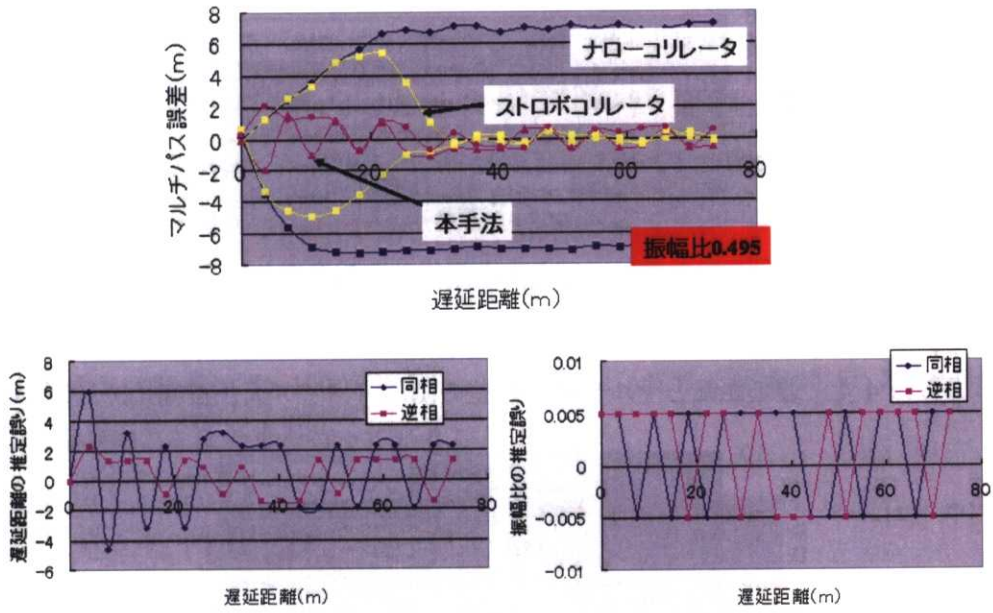


図6. 4 1 遅延距離とマルチパス誤差の関係と推定精度 (ノイズ大、振幅比0.495)

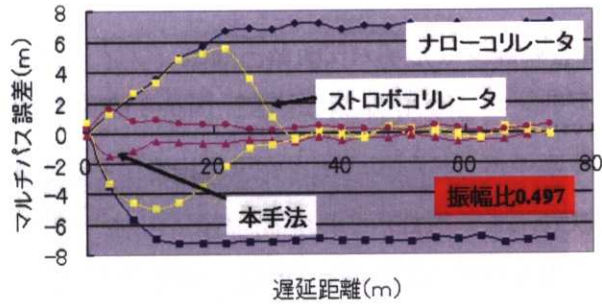


図6. 4 2 遅延距離とマルチパス誤差の関係 (ノイズ大、振幅比0.497)

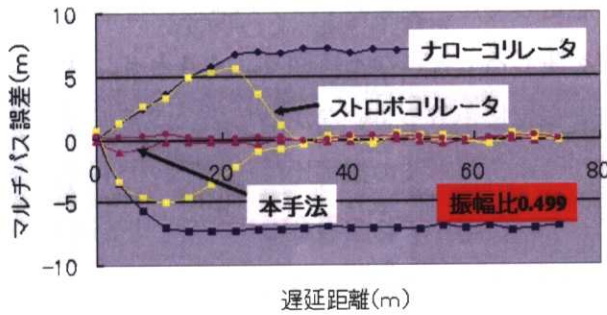


図6. 4 3 遅延距離とマルチパス誤差の関係 (ノイズ大、振幅比0.499)

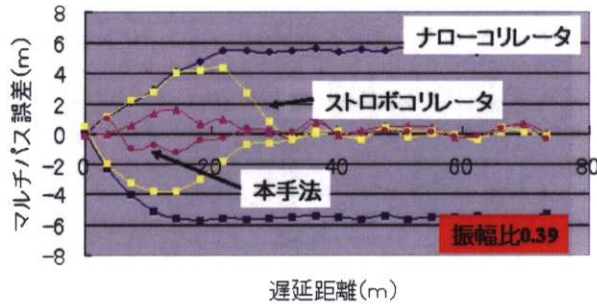


図 6. 4 4 遅延距離とマルチパス誤差の関係 (ノイズ大、振幅比0.39)

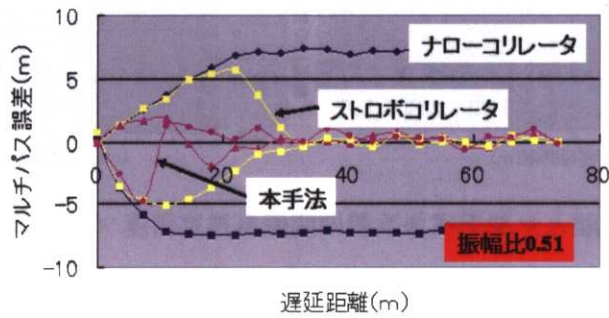


図 6. 4 5 遅延距離とマルチパス誤差の関係 (ノイズ大、振幅比0.51)

図 6. 4 1 を見ると、マルチパス波の振幅比を完全に推定することが不可能なため、その分マルチパス誤差に反映されていることがわかる。ただし、他のコリレータと比較すると、依然としてその誤差は低減されていることもわかる。実際に遅延距離とマルチパス波の振幅比の推定精度を見てもシナリオ 1 や 2 では見られない大きな誤差となっている。後で解析する実データにおいても、本手法ではマルチパス波の振幅比を 0.01 の間隔で推定しているため (実時間処理を想定して)、実際のマルチパス波の振幅比と比較して、最大で 0.005 まで、このような誤差を生じることになる。図 6. 4 4 と 6. 4 5 は、振幅比の探索範囲に実際のマルチパス波の振幅比が入っていなかった場合の結果である。0.4 から 0.5 で探索を行ったため、推定したマルチパス波の振幅比はそれぞれ 0.4 と 0.5 であった。よって 0.01 誤った場合の結果になっている。いずれの場合もマルチパス誤差は増大するものの、ストロボコリレータよりは優位であることがわかった。ただし、マルチパス波の振幅比を大きく誤って推定した場合には、ストロボコリレータやナローコリレータよりもマルチパス誤差が増大することに注意しなければならない。

4つ目のシナリオの結果

遅延距離（約7m、約15m、約29m）を一定にしてマルチパス波の振幅比を変動させた場合の推定精度。このシナリオは、実際に壁近傍にアンテナを設置し、鏡面反射を受ける環境を想定している。アンテナは静止しているため、壁とアンテナ間の距離が10m程度であれば、遅延距離は数分で1波長程度（L1帯で約19cm）しか変化しない。よって、遅延距離を固定したときに振幅比だけ位相に応じて変化する状況に良く似ている。以下の結果の図で、横軸はマルチパス波の振幅比の変動に対応している。横軸の数値で0が振幅比0、40が振幅比0.5、80が0、120が-0.5、160が0である。ちょうどsin波形（振幅は0.5）の1周期分を160等分した振幅比ごとに計算を行っていることになる。

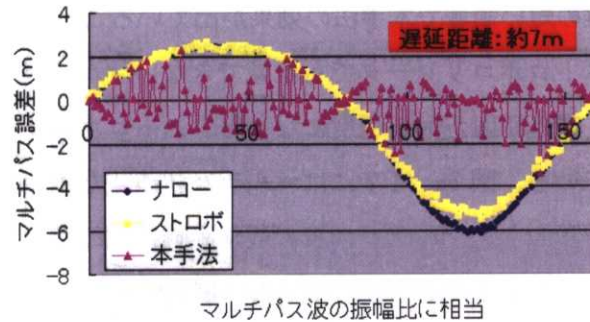


図6. 4.6 振幅比が変動した時（遅延距離は約7m）のマルチパス誤差との関係

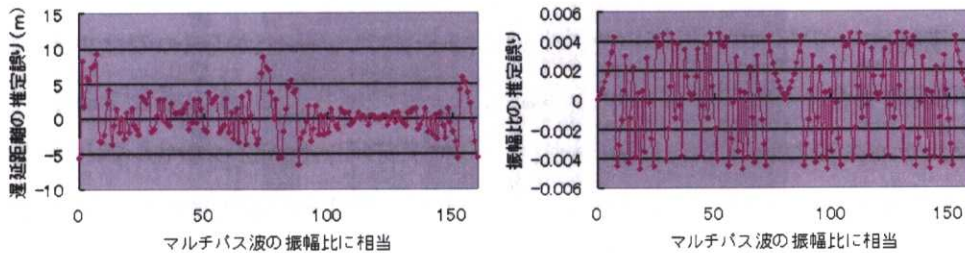
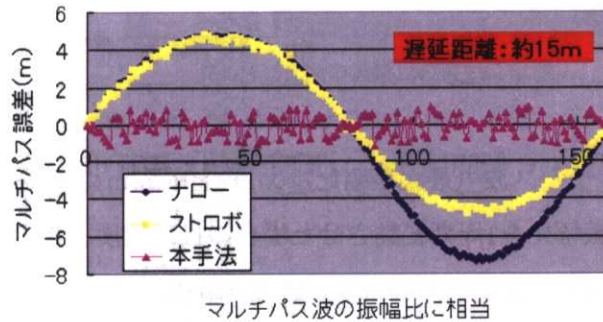


図6. 4.7 振幅比が変動した時（遅延距離は約15m）のマルチパス誤差との関係
遅延距離と振幅比の推定精度も含む

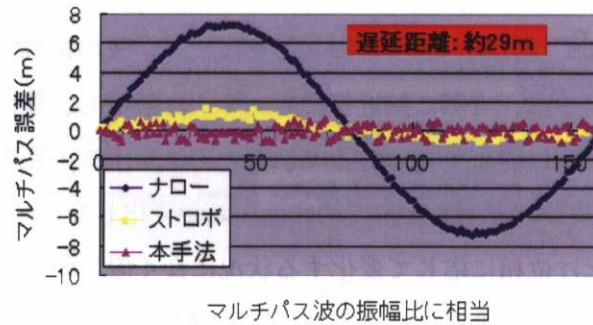


図6. 48 振幅比が変動した時（遅延距離は約29m）のマルチパス誤差との関係

上の結果より、遅延距離の短い領域で本手法の効果が出ていることがわかる。遅延距離が7mや15mにおいては、ストロボコリレータでも低減できないマルチパス誤差を十分に低減していることがわかる。遅延距離が30m程度になると、ストロボコリレータもマルチパス誤差を十分に低減できている。図6. 47にはマルチパス誤差だけでなく、遅延距離と振幅比の推定精度の結果も示した。マルチパス波の遅延距離に関しては、10m程度まで誤って推定することがあるが、マルチパス誤差にはそれほど影響を与えていないことがわかる。これは同時に推定している直接波の推定に影響を与えていないことを意味している。マルチパス波の振幅比に関しては、推定が目盛りが0.01なので、その目盛り以下では十分に推定できていることがわかる。

5つ目のシナリオの結果

遅延距離が約4mのマルチパス波（最大振幅比は0.1）と約15mのマルチパス波（最大振幅比は0.25）を想定し、振幅比を1周期変動させた場合の推定精度。このシナリオは、実際に壁近傍にアンテナを設置し、壁からの鏡面反射と地面からの強い反射を同時に受けている状況を想定している。2つのマルチパス波の位相を変化させて解析を行った。以下の結果の図で、横軸はマルチパス波の振幅比の変動に対応している。上から2つのマルチパス波の位相差が0度の場合、45度の場合、90度の場合、135度の場合、180度の場合である。実際に加えたマルチパス波の簡単なイメージを図6. 49に示す。図は2つのマルチパス波の位相差が180度の場合のものである。それぞれのマルチパス波はその最大振幅比の範囲で位相差を保ちながら変動することになる。横軸は1.0チップで約293m。

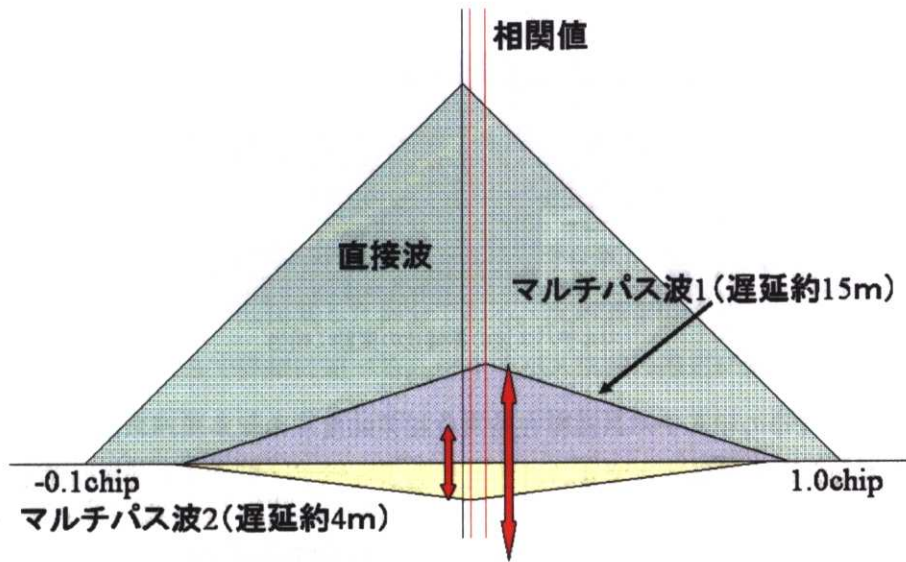


図6. 49 加えたマルチパス波のイメージ図

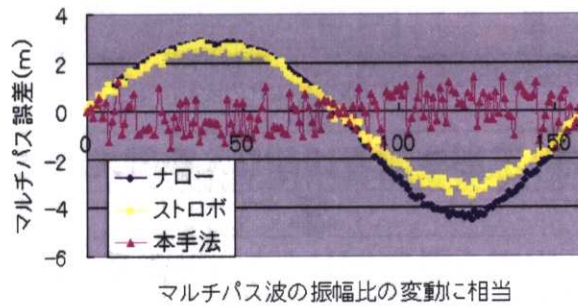


図6. 50 2つのマルチパス波存在時(位相差0度)のマルチパス誤差との関係

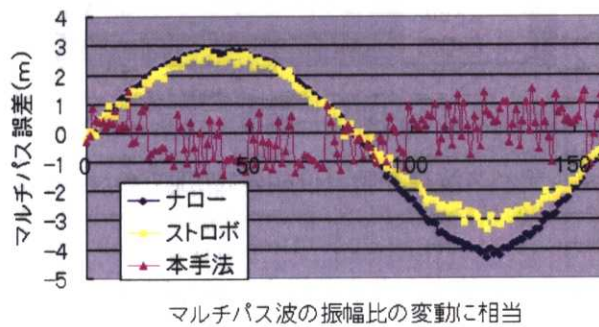


図6. 51 2つのマルチパス波存在時(位相差45度)のマルチパス誤差との関係

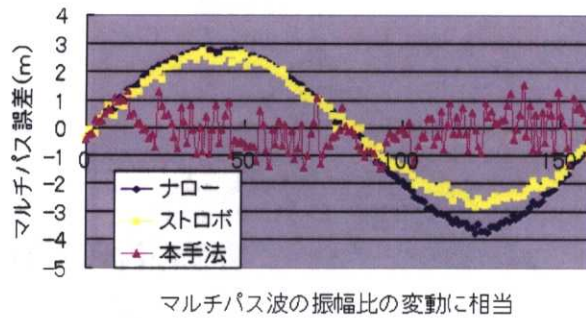


図6. 5 2 2つのマルチパス波存在時（位相差90度）のマルチパス誤差との関係

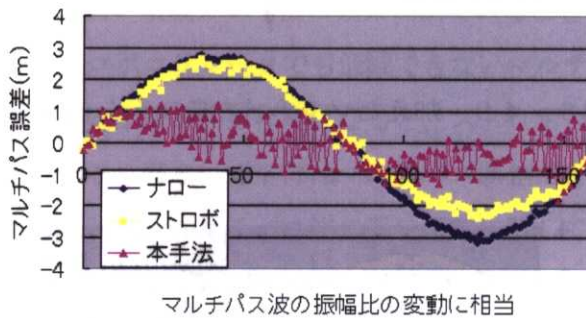


図6. 5 3 2つのマルチパス波存在時（位相差135度）のマルチパス誤差との関係

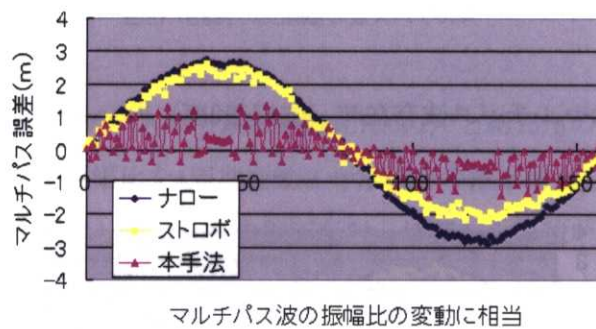


図6. 5 4 2つのマルチパス波存在時（位相差180度）のマルチパス誤差との関係

上の結果より、2つのマルチパス波が存在する場合（15m程度と4m程度の遅延）でも、本手法によりマルチパス誤差が低減できることが示された。いずれの位相差の場合でも最大1.5m程度にマルチパス誤差が抑制されている。支配的なマルチパス波1つを推定することによる効果を示すことができた。

6.5 実データによる評価

6.5.1 実データで用いた低減手法の流れ

マルチパス環境でGPSデータを取得し、これまでに提案してきた手法でどの程度マルチパス誤差を低減できたかを以下に示す。ここでは、これまでに説明してきたマルチパス誤差低減手法の実データでの使用の流れを簡単に示す。図6.55に全体の流れを示した。赤で強調している箇所が今回提案した部分である。反射波を強く受信している衛星の検知については、6.5.3で詳細に述べる。マルチパス誤差の推定に関しては、図6.56に示した。なお、反射波を強く受信している衛星の検知に関しては、静止や歩行データだけでなく車等のデータも利用して行ったので、それらも含めて報告する。

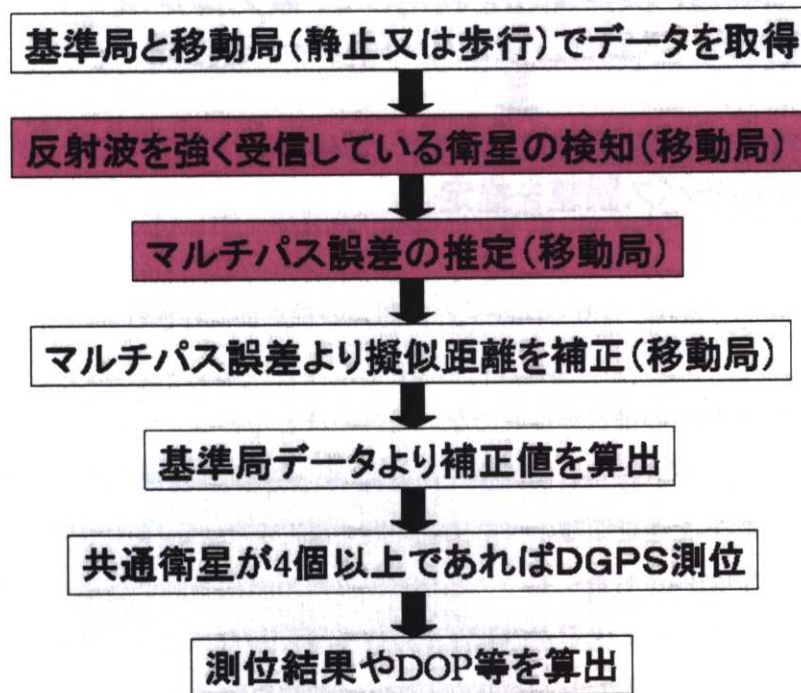


図6.55 実データ評価の全体の流れ

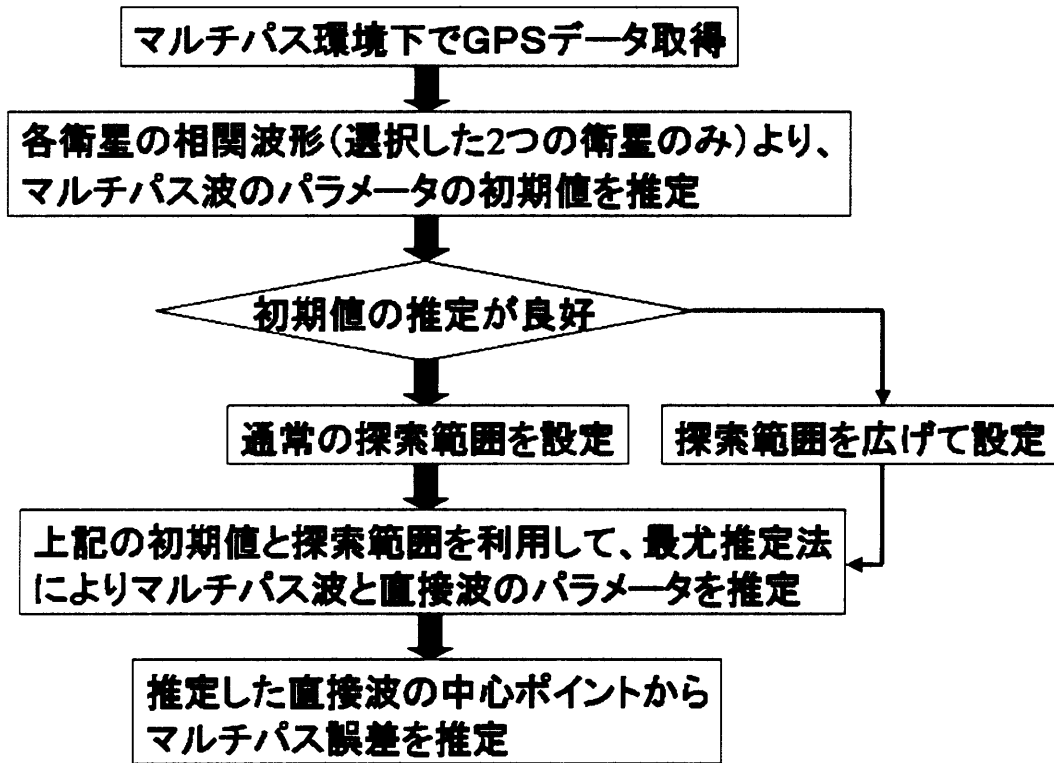


図 6. 5 6 マルチパス誤差の推定部分の流れ

上記の流れで、初期値の推定が良好でない場合のほとんどは、マルチパス波の振幅比が非常に小さく（マルチパス誤差自体が小さい場合）、遅延距離の推定が困難な時が挙げられる。この時、推定した遅延距離のまま探索範囲を設定すると、最小二乗法の部分で大きく誤った解になる可能性がある。そのことを避けるために回避処理として付加している。マルチパス波の影響が少なく推定が困難な場合に、ストロボコリレータでトラッキングする代替案も考えられる。しかしながら、マルチパス波の影響が少ない場合は、最小二乗法の部分でマルチパス波の遅延距離の推定を10m程度誤ったとしても、直接波の推定を誤るケースはほとんど見られていないため（6. 4. 2. 5で検証。実データにおいても検証）、今回の実データ処理では、全てのデータに対して最小二乗法を用いてマルチパス誤差を推定している。

6. 5. 2 近接に大きな建物が存在する場合

6. 4. 2 項で説明した相関波形を利用したコードマルチパス誤差削減手法の評価をここで行う。遅延距離の短いマルチパス波を受ける場所として、東京海洋大学内の大学院棟横を選択した。周囲は5階建ての建物2つと2階建ての図書館に囲まれている。アンテナ設置

場所は、図6. 3と同様である（各実験で場所は若干移動。高度方向の真値は約41.0mである）。魚眼レンズによるアンテナ上方の写真と概観を図6. 57に示す。10m以内の近接に大学院棟、それから数10m離れて第4実験棟と図書館が存在することがわかる。アンテナを車の屋根の真ん中に設置することにより、地面からの反射波を受けない状態にした。使用した受信機は、0.1チップナローコリレータを有するOEM3受信機とストロボコリレータの性能を有するOEM4、そしてマルチコリレータの機能を有するSQM受信機である。アンテナはGPS702とした。基準局は研究室屋上に設置したので、基線長は100m以内である。ゆえに、DGPS測位結果は大部分がノイズとマルチパス誤差によるものである。

表6. 2にデータ取得概要を示す。マルチコリレータ受信機は、取得できる衛星のチャンネルが2チャンネルに限られているため、大学院棟に反射している衛星のみを選択してデータを取得している。

表6. 2 近接に大きな建物が存在する条件でのデータ取得概要

実験	日付	取得時間	SQMの選択衛星
1	2004年12月10日	21:00-22:00	10, 17
2	2004年12月10日	23:00-24:00	26, 29
3	2004年12月11日	10:30-11:00	1, 3





図6. 57 アンテナ周囲の状況

上が概観で下が魚眼レンズによるもの（アンテナは青の車の屋根に設置）

実験1の結果

ここでは、10番衛星のマルチパス誤差の推定手順を説明しながら結果を示すことにする。取得時間内の0チップ（トラッキングポイント）における相関値を図6. 58に示す。0チップ付近は基本的に最も相関値の高い部分である（信号強度に比例）。この相関値は通常は信号強度をあらわすものなので、上下の変動が大きいことから、大きなマルチパス誤差を受けていることは明らかである。縦軸方向の相関値の大きさが、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（受信機の相関値を出力する内部処理に応じて異なる）。2～3分程度の間隔の平均値を用いて上下の変動を振幅比として算出したものを図6. 59に示す。

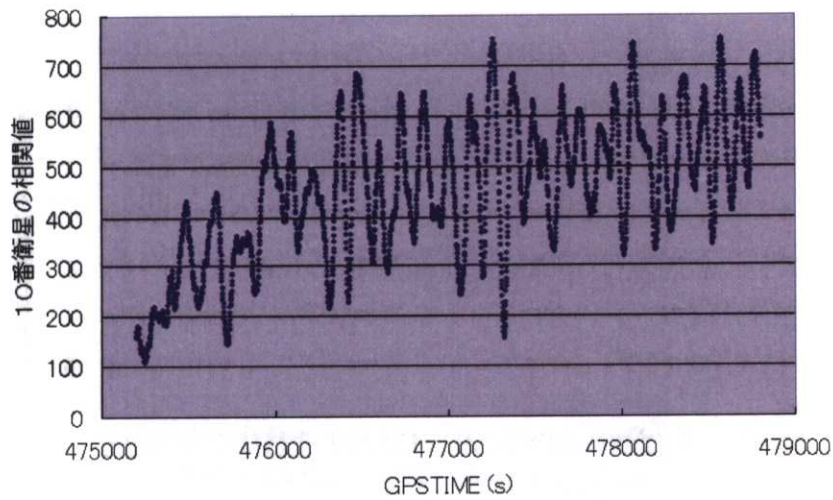


図6. 58 トラッキングポイントにおける相関値の推移

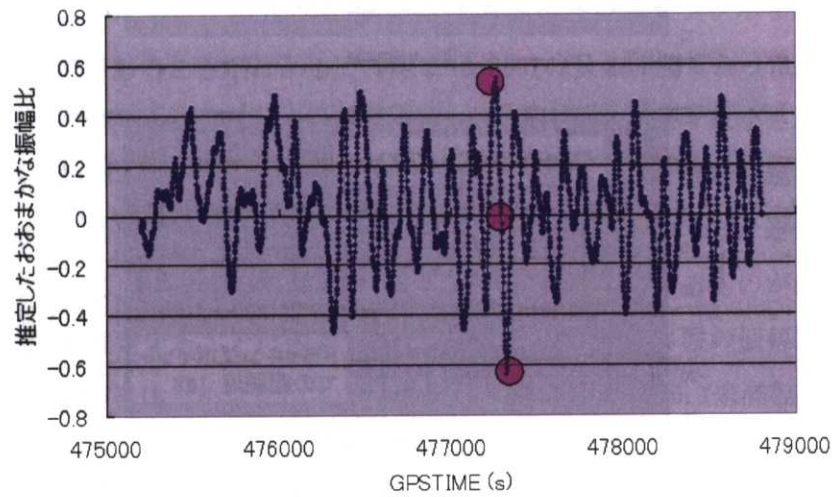


図6. 59 推定した振幅比（初期値として利用）

図6. 59の推定した振幅比を見ればわかるように、非常に強い反射を受けていることがわかる。これは、10番衛星がこの時間帯にちょうど近接の大学院棟の壁の反対側に位置し、直接波と強い鏡面反射を同時に受けていることによるものである。

次に遅延距離のおおまかな推定を相関値の変化率を利用して行う。図6. 60にちょうど推定した振幅比の大きさが最大付近、0付近、最小付近のとき（図6. 59の赤で示した部分）のGPS時刻の相関波形右側の変化率の値を示す。ポイントの間隔は約0.025チップ（約7.5m）である。

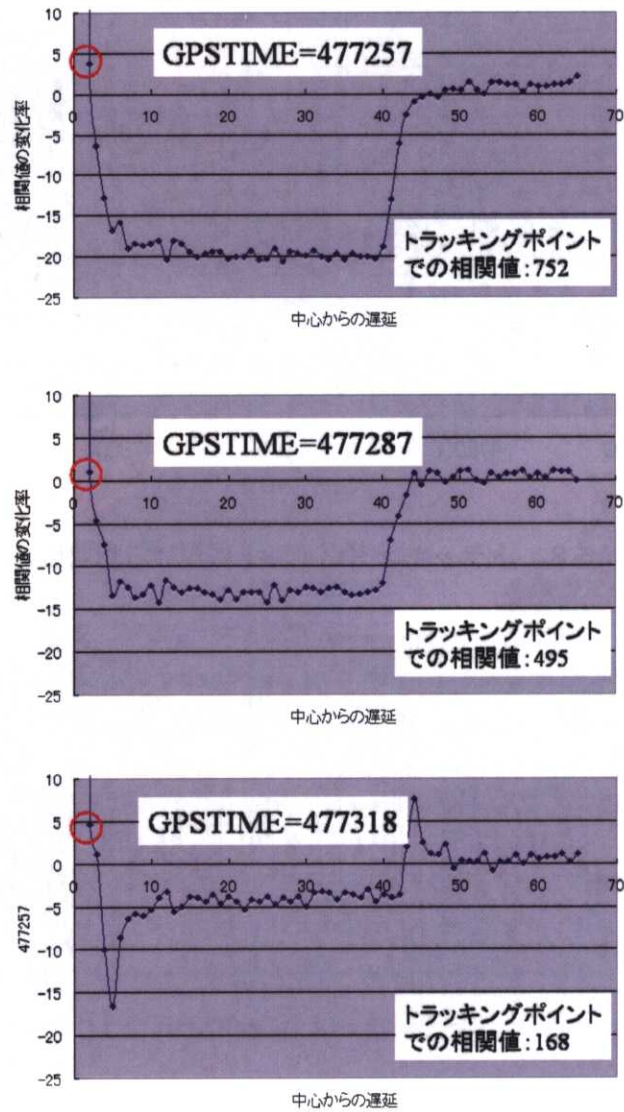


図 6. 6 0 各時刻の相関波形右側の変化率

トラッキングポイントを0とすると、赤丸はちょうど0の相関値から1つ左側のポイントの相関値を引いた値を示している。図を見ればわかるように、トラッキングポイントの相関値の値に比例して変化率が平らな部分の値が変化していることがわかる。そこで、横軸をトラッキングポイントでの相関値、縦軸を平らな部分の相関値の変化率とした場合の関係を示したものを図 6. 6 1 に示す。

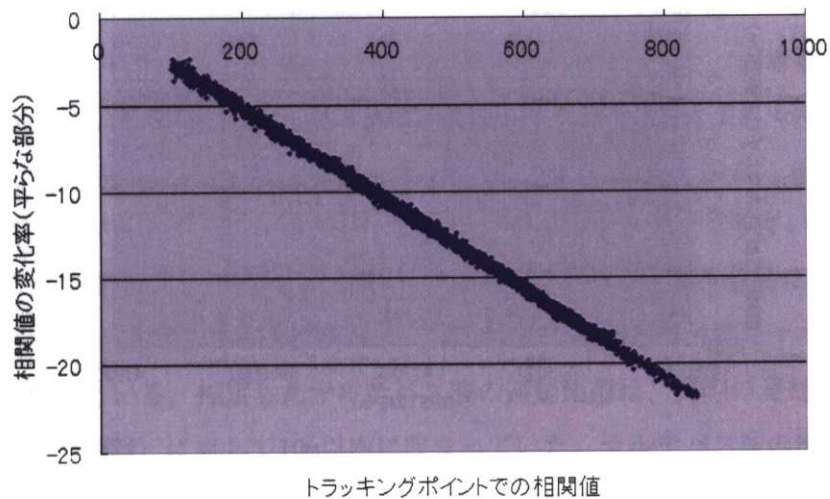


図6.61 トラッキングポイントの相関値と相関値の変化率の関係

この図より、明らかに平らな部分の相関値の変化率と、トラッキングポイントでの相関値との強い負の相関があることがわかる。実際に -0.9991 の負の相関であった。支配的なマルチパス波の遅延距離は、相関値の変化率が変化した後に変動が徐々に小さくなる場所の直前であることがわかっている。その特徴を利用して、おおまかな遅延距離を推定することは困難ではない。この手法では、マルチパス波の振幅比が大きいほど、遅延距離を推定することは容易である。逆に振幅比が小さいと、傾きは直接波によるものがほとんどで一定なので遅延距離を推定することは困難である。ただしマルチパス波の振幅比が小さいと、マルチパス波の影響自体が小さくなる。マルチパス波の振幅比が 0.1 未満程度では、推定がうまくできなかったとしても、マルチパス誤差が 1m を超えることはない。実際の幾何学的配置からは、解析した時間帯での遅延距離は約 15m 程度であった。ここで 0.1 チップナローコリレータによるトラッキングポイント自体もずれているので、その前後数 m の遅延距離であると想定される。

これまでに推定した振幅比と遅延距離を初期値として、一定の範囲（振幅比は ± 0.1 程度、遅延距離は $\pm 20\text{m}$ 程度）を探索し、推定した直接波とマルチパス波の合成波が最も実際の相関波形に近づく部分を、最小二乗法を用いて見つける。この計算で得たマルチパス波の振幅比と遅延距離を解とする。これらの解を利用して推定した直接波より、最初のトラッキングポイントからのずれを計算する。この値を本手法により推定したマルチパス誤差とした。このずれは、受信機の最初のトラッキングで生じたマルチパス誤差を補正するものである。

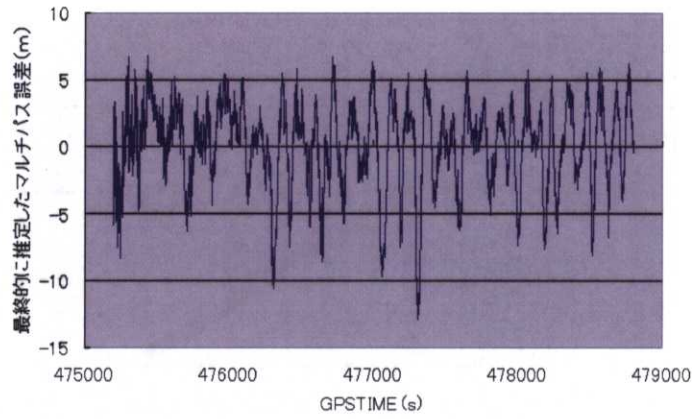


図 6. 6 2 最終的に推定した10番衛星のマルチパス誤差

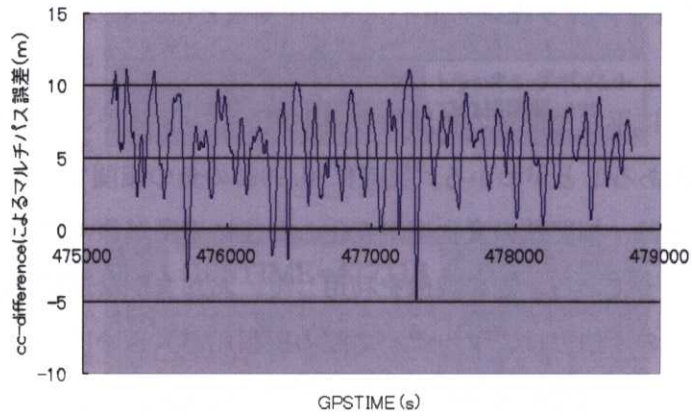


図 6. 6 3 cc-differenceにより求めた10番衛星のマルチパス誤差

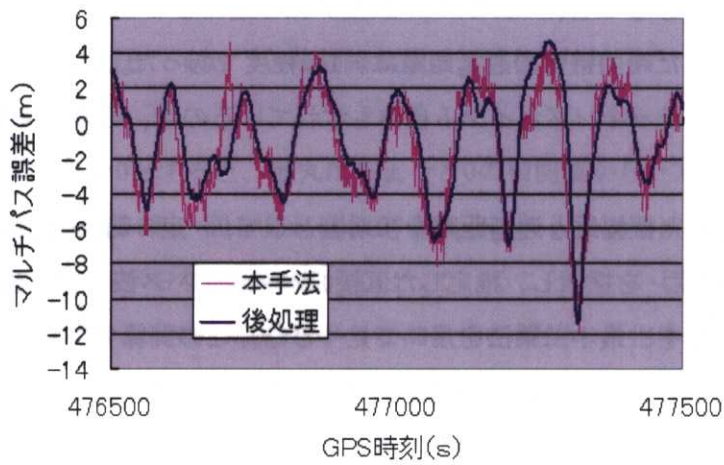


図 6. 6 4 両者の1000秒間の比較

(青がcc-differenceの後処理によるもの、赤が本手法によるもの)

図6.62に実際に推定した10番衛星のマルチパス誤差を示す。図6.63には、これまでも使用した、cc-difference値によるマルチパス誤差を示した。両者を比較するために1000秒間抜き出したものを図6.64に示す(cc-difference値によるマルチパス誤差は平均値にバイアスが存在するので比較用にオフセットしている)。図6.64を見ると、ノイズはやや大きいですが、正確にマルチパス誤差の大きな変動を推定できていることがわかる。本手法により推定したマルチパス誤差を擬似距離に還元すれば、容易に数mの誤差を低減できることがわかる。またcc-differenceによる手法では推定不可能なマルチパス誤差の平均値も推定できている。推定したマルチパス波の遅延距離は、実際の遅延距離（アンテナ壁間の幾何学的距離）に対して10m以内に収まっていた。マルチパス波の振幅比は実際のデータを取得することが困難なので比較は行っていない。本手法でも取り除くことができない誤差として、上記に挙げた相関波形のノイズによる影響と複数の大きなマルチパス波が混在した場合が想定される。ノイズの低減と2つ以上のマルチパス波への対応は今後の課題であるが、実環境において、2つの大きなマルチパス波が受信されることはまれである。また2つのマルチパス波が受信された場合でも、既存のストロボコレータよりは、測位精度が改善されることは既にシミュレーション（6.4.2.5）で示した。

実際に本手法で推定した10番衛星と17番衛星のマルチパス誤差を擬似距離に対して補正しDGPS測位を行った。水平方向の結果を図6.65、高度方向の結果を図6.66に示す。比較のため、補正を行わない場合の結果も重ねて示す。

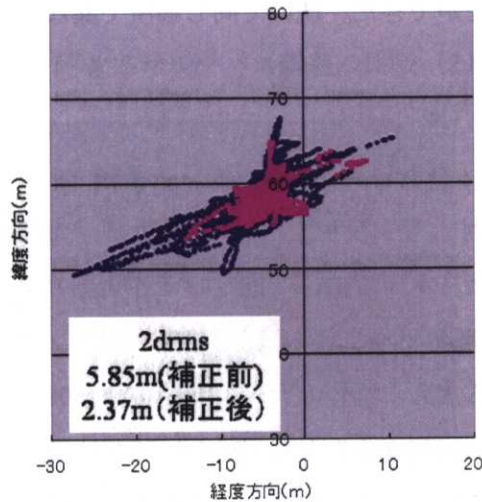


図6.65 水平方向のDGPS測位結果（青：補正前 赤：補正後）

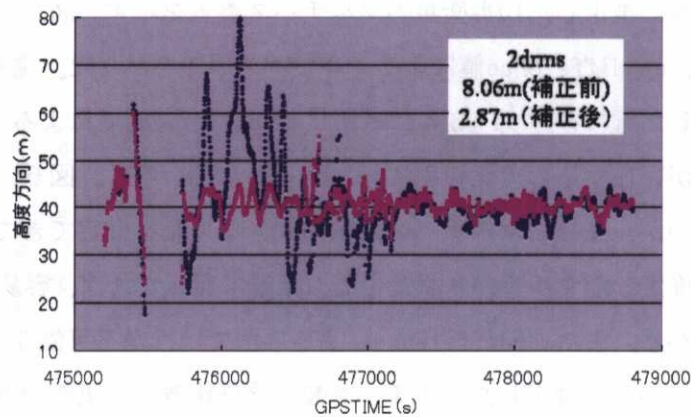


図6. 6 6 高度方向のDGPS測位結果（青：補正前 赤：補正後）

できるだけマルチパス誤差によるDGPS測位への影響を観測するために、HDOPが5以上の時間帯は除いている。上の結果を見ると、明らかに補正後の測位誤差が大幅に削減されていることがわかる。標準偏差の値を見ても、水平、高度方向ともに約50%以上削減されている。高度方向の最初の時間帯で、補正後にも大きな誤差があるが、これは10番と17番以外の衛星による影響であり、2チャンネルのみしか補正できないという制約がなければ削減可能である。今回は近接の壁（遅延距離20m以内程度）によるマルチパスの影響が大部分なので、現在市販されている高性能のGPS受信機を用いても削減できていない誤差を、本手法により削減できることを示すことができた。続いて同じ場所で異なる時間帯に取得した実験2と3の結果を示す。

実験2の結果

実験2の結果を以下に示す。壁に反射していると思われた26番衛星と29番衛星を選択してマルチパス誤差を推定した。本手法により推定した各衛星のマルチパス誤差とcc-differenceによる後処理値（バイアス値を調整）を比較したものを図6. 6 7、6 8に示す。比較を見やすくするために誤差の大きい時間帯の1000秒程度を抜き出した。さらにマルチパス誤差補正前のDGPS測位結果と補正後のDGPS測位結果の比較を水平方向と垂直方向に分けて図6. 6 9、7 0に示す。各衛星のマルチパス誤差の推定値を見ると、ノイズは大きいがおおよそ1-2m程度の誤差まで低減されていることがわかる。測位結果を見ると、実験1と同様に大幅にマルチパスによる誤差が削減されていることがわかる。

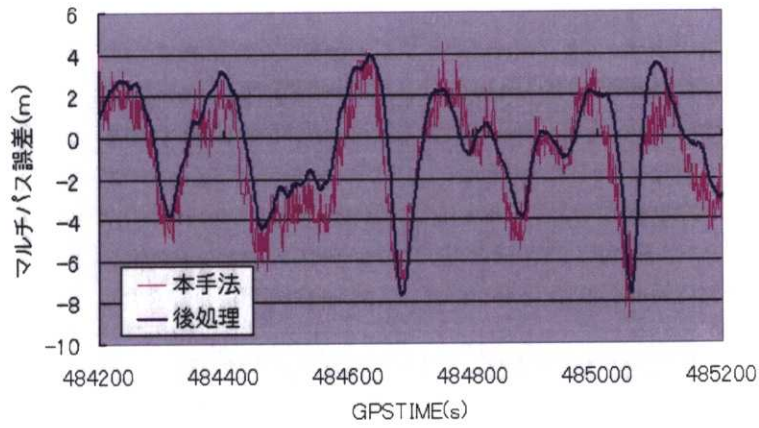


図6. 67 両者のマルチパス誤差の比較 (26番衛星)

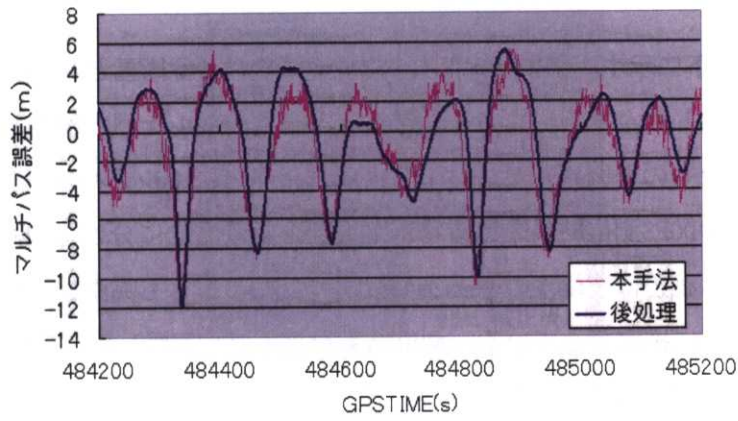


図6. 68 両者のマルチパス誤差の比較 (29番衛星)

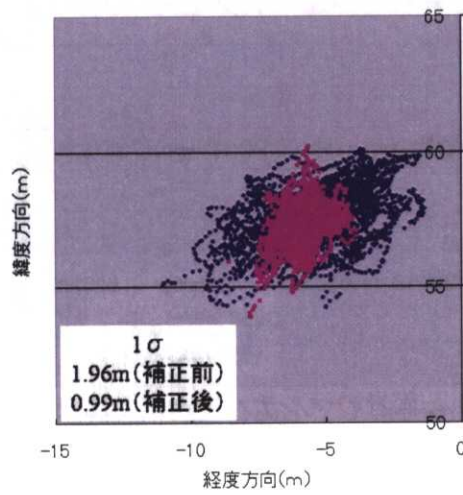


図6. 69 水平方向のDGPS測位結果 (青：補正前 赤：補正後)

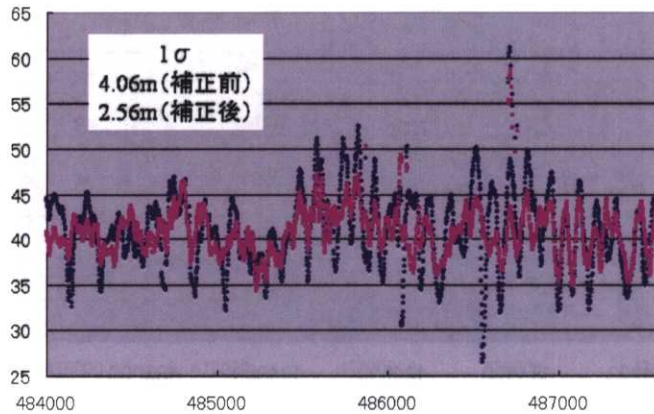


図 6. 7 0 高度方向のDGPS測位結果 (青：補正前 赤：補正後)

実験3の結果

実験3の結果を以下に示す。壁に反射していると思われた1番衛星と3番衛星を選択してマルチパス誤差を推定した。本手法により推定した各衛星のマルチパス誤差とcc-differenceによる値を比較したものを図 6. 7 1、7 2 に示す。さらにマルチパス誤差補正前のDGPS測位結果と補正後のDGPS測位結果の比較を水平方向と垂直方向に分けて図 6. 7 3、7 4 に示す。マルチパス誤差は後処理の値と2m前後ずれているときも見受けられるが、それでも大きな変動を十分に推定できている。測位結果を見ると、実験1,2と同様に大幅にマルチパスによる誤差が削減されていることがわかる。

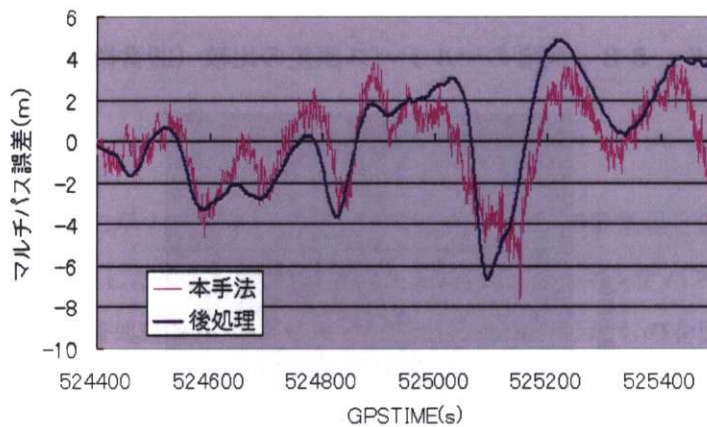


図 6. 7 1 両者のマルチパス誤差の比較 (1番衛星)

第6章 提案するコードマルチパス誤差削減手法

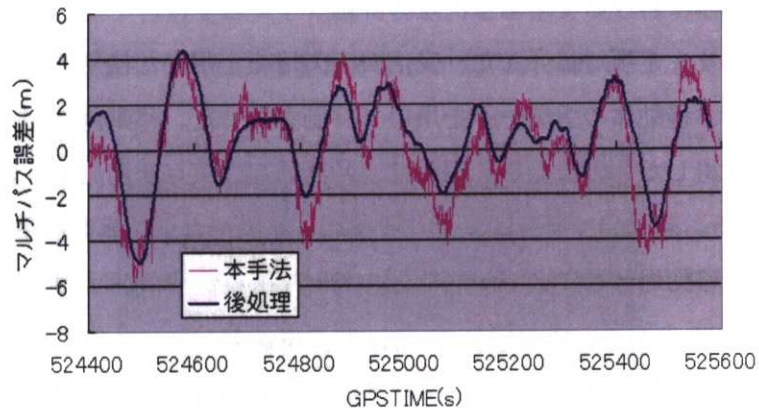


図6.7.2 両者のマルチパス誤差の比較 (3番衛星)

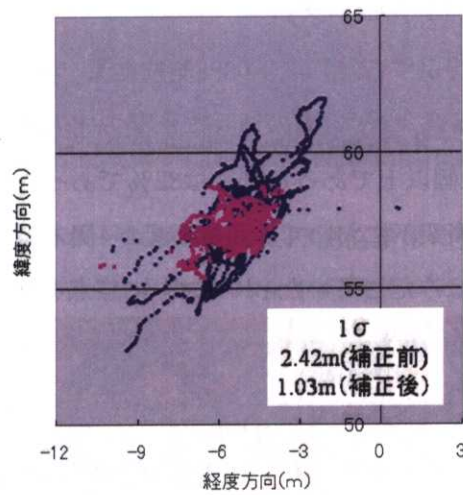


図6.7.3 水平方向のDGPS測位結果 (青:補正前 赤:補正後)

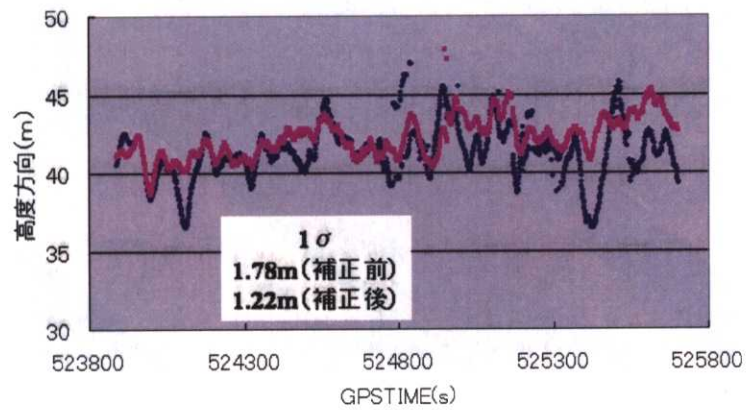


図6.7.4 高度方向のDGPS測位結果 (青:補正前 赤:補正後)

6. 5. 3 移動体における使用衛星決定の評価

本項では、6. 4. 1項で紹介した、受信機出力情報を用いた使用不可衛星の検知手法の妥当性について、移動体の生データを用いて評価を行った。移動体のデータは2004年秋から冬にかけて取得したものである。場所は、月島周辺、東京駅前周辺、銀座周辺、豊洲周辺の4箇所である。基準局は研究室屋上に設置し、移動局として車を利用した。使用した受信機は基準局、移動局ともにノバテル社製のOEM4であり、アンテナはGPS702である。データ取得レートは2Hzとした。各コースは、片側2,3車線で、コースの大部分で高い建物（5階以上）に囲まれており、ところどころに高層ビルも見られた。以下では、代表的改善例をあげながら使用不可衛星の検知手法の妥当性について示した。

提案する検知手法での結果（月島コース）

マルチパスによる影響を特定するために、DGPS測位結果のうち、HDOPが5以上の結果をのぞいている。図6. 75に月島コース1周の地図に水平方向のDGPS測位結果をプロットしたものを示す。可視衛星数が4個以上であった割合は82%であった（HDOPで排除しない場合は92%）。高層ビル付近と、高架下において、可視衛星が4個未満であった。ここで、DGPSの測位結果が道路より大きくはみだしていたAポイントに焦点をあてた。



図6. 75 水平方向のDGPS測位結果

図6. 76は、Aポイント付近を拡大した図である。この図を見ればわかるように、車は南西方向に一定の速度で進んでいたにもかかわらず、下記のGPS時刻で大きくレーンからはずれていることが明らかである。このずれは、マルチパスの影響によるものである。

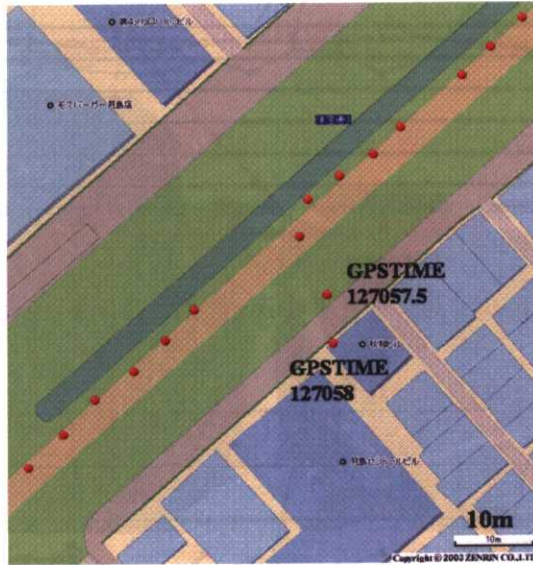


図6. 76 水平方向のDGPS測位結果の拡大図

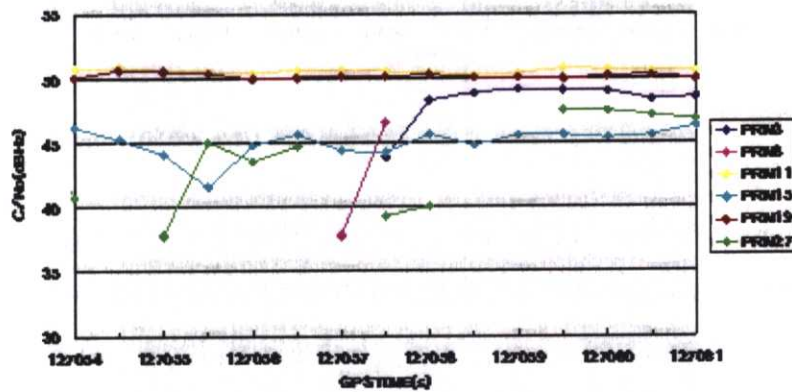


図6. 77 車載GPS受信機における信号強度の変化

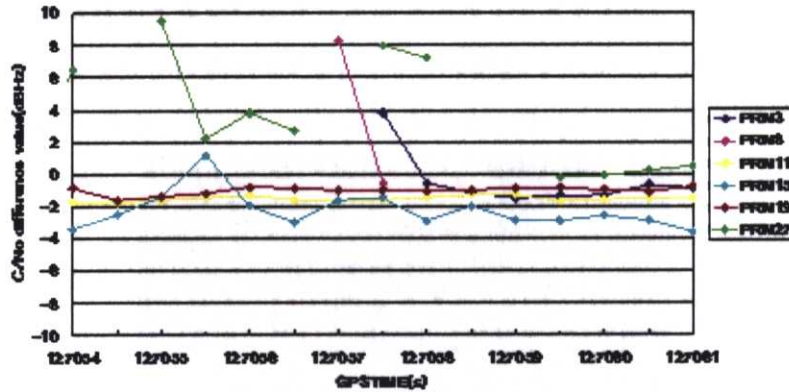


図 6. 7 8 基準局と車載GPS受信機での信号強度の差

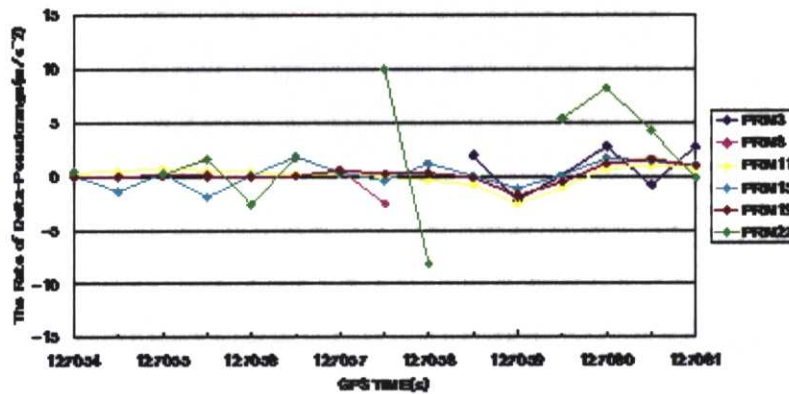


図 6. 7 9 擬似距離変化率の変化率

図 6. 7 7 に、このときの車に積まれている GPS 受信機の信号強度の変化を示す。また、図 6. 7 8 に基準局における GPS 受信機と車載 GPS 受信機での、信号強度の差を示す。さらに、図 6. 7 9 に擬似距離変化率（デルタ擬似距離と呼ばれている）の変化率を示す。水平方向の位置が大きくずれた GPS 時刻において、27 番衛星の移動局の信号強度は、基準局よりも 5dB 以上低かった。さらに、デルタ擬似距離の変化率を見ると、一定の速度であるにも関わらず、大きく飛んでいることがわかる。水平位置が大きくずれていない GPS 時刻において、信号強度が大きく低下している時があるが、そのときのデルタ擬似距離の変化率は比較的小さい値であった。同様に、他の衛星で信号強度が大きく低下しているものが見られるが、デルタ擬似距離の変化率は小さい値であった。より信頼性を保って、マルチパスを強く受けている衛星を検知するために、信号強度の値だけでなくデルタ擬似距離の変化率の値もチェックすることが必要であることがわかる。

ここで、27 番衛星のマルチパスの状況を確認するために、3D 地図を利用して 27 番衛星の

信号の到来方向を確認した。図6.80に、Aポイントにおける概観を3D地図で示す。なお、高さ方向の値は実物とは大きく異なることに注意しなければならない。

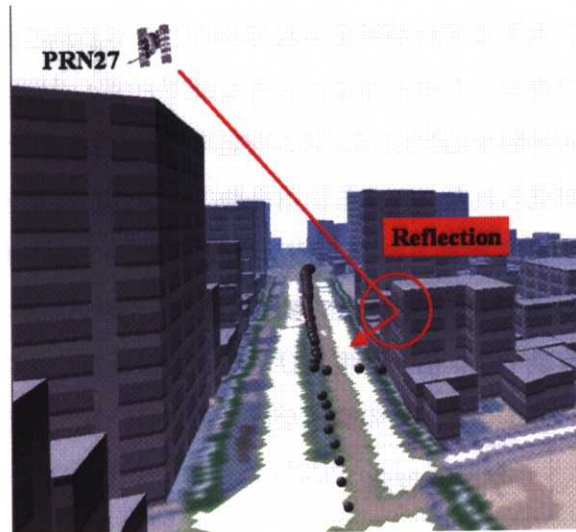


図6.80 Aポイントの概観図

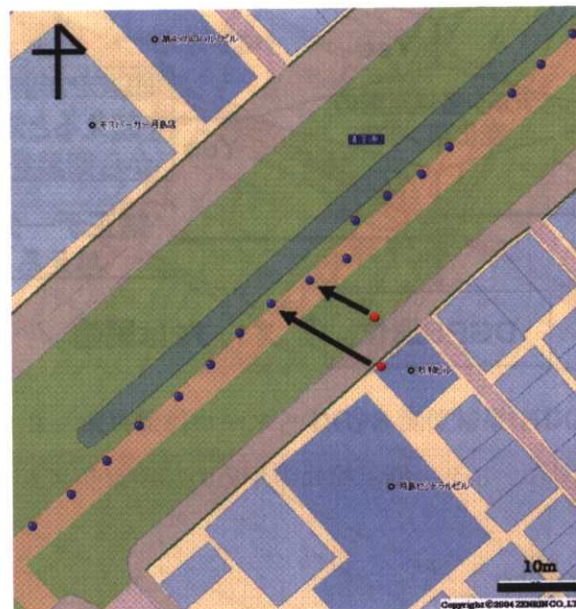


図6.81 27番衛星排除後のAポイントにおけるDGPS測位結果

Aポイントにおける、車の両側はビルで囲まれており、車とビル間の距離は15m以内であった。よって直接波に対するマルチパス波の遅延距離は30mを越えることはなく、OEM4受信機でも低減することはできていないと考えられる。もしくは、直接波の信号が回折により非

常に低下し、強い反射波のみ受信された可能性も考えられる。Aポイントにおけるずれを補正するために、明らかにマルチパスの影響を受けている27番衛星を測位からはずすことにした。図6. 81にそのときの水平方向のDGPS測位結果を示す。

図6. 81を見ると、大きなずれが補正されていることがわかる。月島コースの他のデータに対しても、上記で提案した信号強度の大きな低下とデルタ擬似距離の変化率が大きいときに、同様に衛星を排除するアルゴリズムを組み込むと、いくつかのポイントにおいて、大幅な精度の改善が見られた。ただし、信号強度で検知できた場合以外に、デルタ擬似距離の変化率で検知する場合はほとんど見られなかった。よって本提案では、信号強度による検知をメインとし、デルタ擬似距離の変化率による検知はあくまでも補助的なものとした。月島コースの実験では、信号強度及びデルタ擬似距離の変化率の閾値は、それぞれ5dB、10m/s*sとした。アルゴリズムの簡単な流れを図6. 82に示しておく。

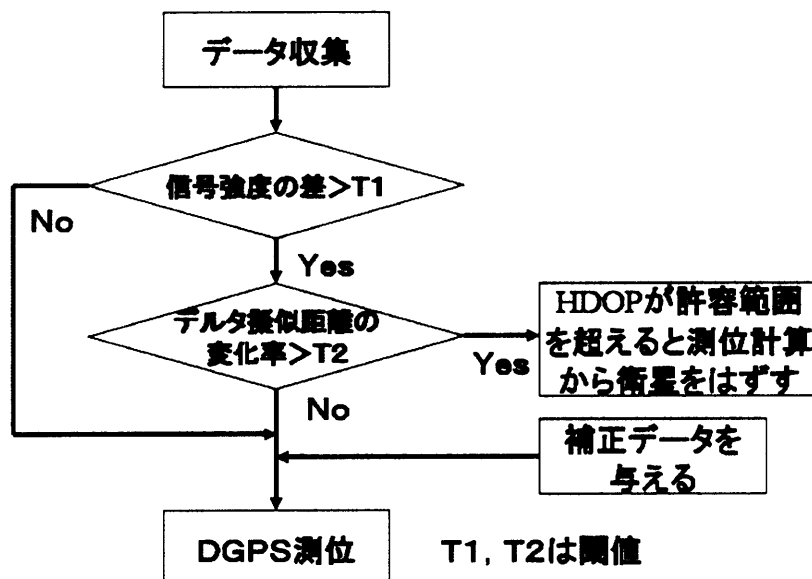


図6. 82 衛星検知のためのアルゴリズム

閾値の妥当性の検証

次に設定している閾値についての妥当性について検証した。デルタ擬似距離の変化率については、信号強度の補助的な役割を果たすものなので、信号強度の閾値の妥当性についてのみ検証した。月島コースに比べて周辺環境が悪い東京駅前の道路を往復し、本検知法を適用して、信号強度の差の閾値がどの程度であれば、測位結果が最も改善されるのか調査を行う。

図6. 83に東京駅前コースの全体と、コースを往復したときの HDOP5 以下である

DGPS 測位結果をプロットしたもの(赤い点)を示す。東京駅前では、往復の所要時間は信号待ちにより停車した時間を含めて 5 分程度で測位率は約 93.9%であった。このコースは、月島コースに比べて高いビルが道路の両側に沿って立ち並んでいるため、測位結果が道路からずれているなど測位誤差が大きい場所が多く、測位できずにプロットされない場所もあり、全体として測位精度は悪かった。

このコースにおいて、特に測位結果が悪かったところをそれぞれ、A ポイント、B ポイント、C ポイントと設定し、これら 3 つの場所に着目しマルチパス検出プログラムを用いて、測位結果の改善について調査を行った。その際に適切な閾値についても調査した。

図 6. 8 4 に A、B、C ポイントの拡大図を示す。A、C ポイントでは、それぞれ 70 秒間、40 秒間停車した場所であり、B ポイントでは、一定のスピードを保ったまま、直進していた場所である。3 つの場所とも 10m 程度から 10m 以上の測位誤差があり、地図上の対向車線上にプロットされたり、道路から外れていたりにしていた。

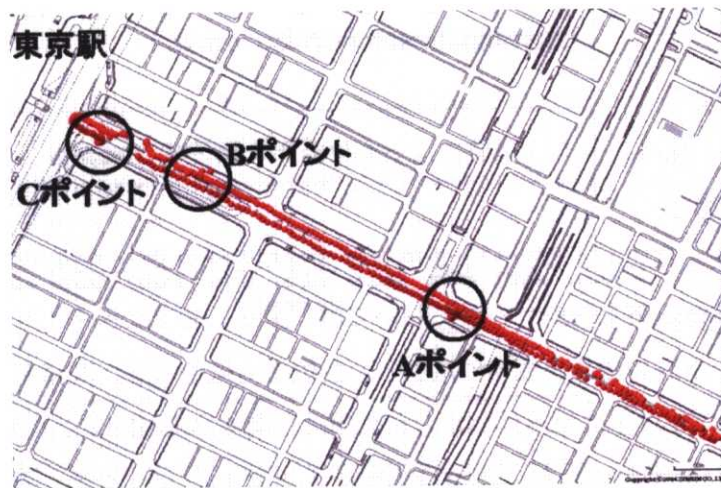


図 6. 8 3 東京駅前コースと DGPS 測位結果(HDOP5 以下)

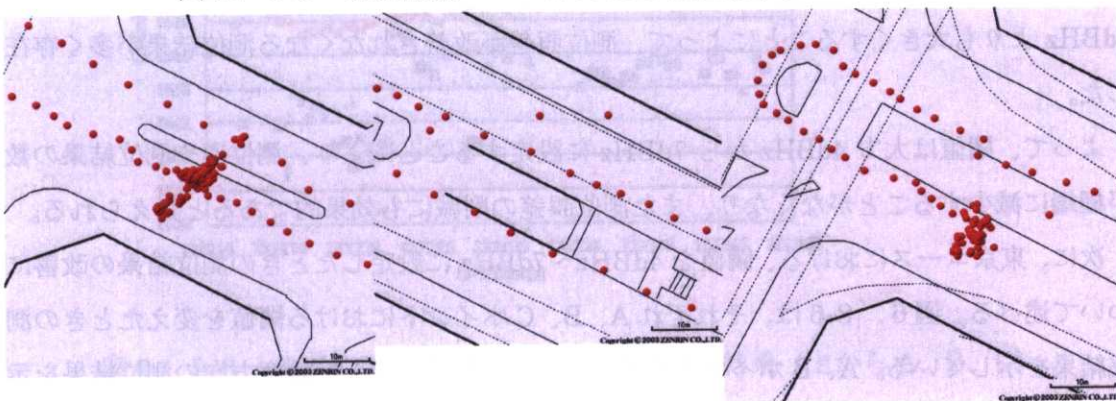


図 6. 8 4 A、B、C ポイントの拡大図

このコースにおいて提案した手法を適用する。設定する閾値によっては、測位結果が変化した。閾値を 1dBHz から 10dBHz まで 10 個の値に設定し、その測位結果について比較を行った。図 6. 8 5 に、閾値を変えたときの測位率、衛星が排除されたことによる測位結果の減少数を示す。

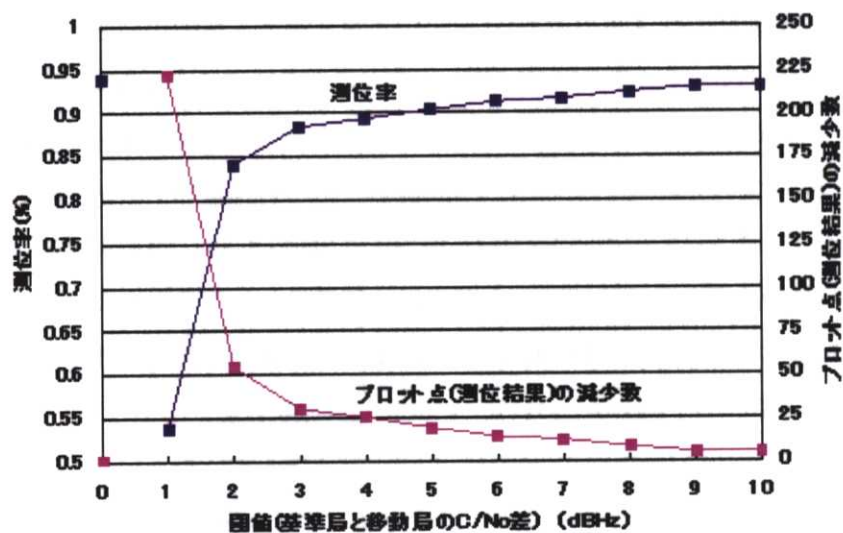


図 6. 8 5 閾値による測位結果の測位率と減少数

閾値を上げることにより、プロット点の数や測位率が大きくなるが、測位結果が改善されるかが問題である。東京駅前コースにおいては、図 6. 8 5 に示すように、閾値が 2 以下であるとプロット点の個数が極端に減少し、測位率も低くなる。閾値が 3 であっても、HDOP の平均値が 5 以上になっていた。また逆に、閾値が 7dBHz よりも大きくなると、測位結果減少数がわずかになり、測位率もほとんど変わらなくなる。閾値が 9dBHz と 10dBHz では、測位率が同じであった。さらに、先に述べた月島コースにおいては、閾値を 7dBHz よりも大きくすることによって、測位誤差が改善されなくなる測位結果が多く存在した。

よって、閾値は大方 4dBHz から 7dBHz に設定することにより、測位率や測位結果の数が極端に減少することがなくなり、また測位誤差の削減にも効果的であると考えられる。

次に、東京コースにおける、閾値を 4dBHz～7dBHz に設定したときの測位結果の改善について述べる。図 6. 8 6 は、それぞれ A、B、C ポイントにおける閾値を変えたときの測位結果を示している。A、B ポイントは経度方向の、C ポイントは緯度方向の測位結果を示している。

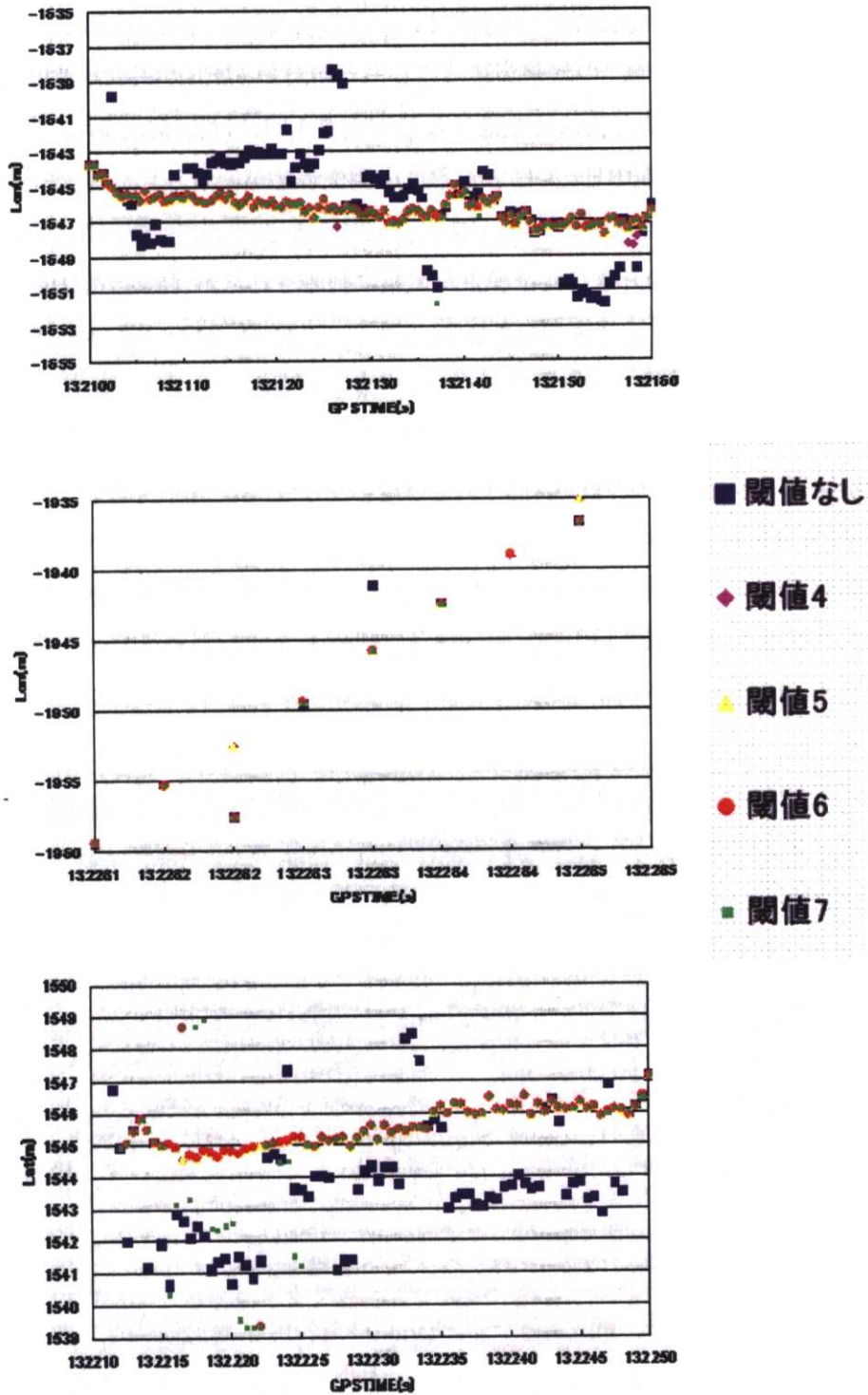


図6. 86 各ポイントにおける閾値による測位結果 (上から A、B、C)

図6. 86よりAポイントで停車中、閾値を4から7dBHzに設定することにより、測位誤差が大幅に削減され、測位結果が改善された。しかし閾値が4dBHzのとき、大幅に誤差が削減されるものの1, 2mの誤差が残ってしまう時があった。さらに、閾値が7dBHzのときには、誤差が改善されず1m程度悪くなる時刻が1つだけあった。Bポイントで直進しているとき、閾値が4, 5dBHzでは5m程度の測位誤差が低減されたが、6, 7dBHzでは、測位結果は閾値なしのときと変わらず測位結果は改善されなかった。Cポイントで停車中でも、閾値が4, 5dBHzのときは測位誤差が大幅に削減されたが、特に7dBHzのときは、改善されない時刻も多く、また逆に測位結果が悪くなる時刻も存在した。6dBHzでも2点ほど測位結果が改善されなかった時刻があった。衛星排除によって測位結果が改善されず悪くなる場合、これはマルチパスの影響を受けている衛星すべてを排除できなかったためや、衛星排除によってDOPの値が大きくなってしまったためと考えられる。

以上より、東京駅前コースにおいては閾値を5dBHzに設定することによって、測位数や、測位率を大幅に減少させることなく(測位数19個減少、測位率3%低下)、測位計算においてマルチパスの影響を強く受けている衛星を検知、排除することができ、プロット点がずれているところの測位誤差を大幅に削減して測位結果を改善することが分かった。

図6. 87に、東京駅前コース(A、B、Cポイント)における閾値なしと5dBHzに設定したときの測位結果の改善を示す。赤いプロット点が閾値なし、青い点が閾値5dBHzである。図6. 87に示すように、どのPOINTにおいてもプロット点のずれが小さくなり、測位結果は改善された。

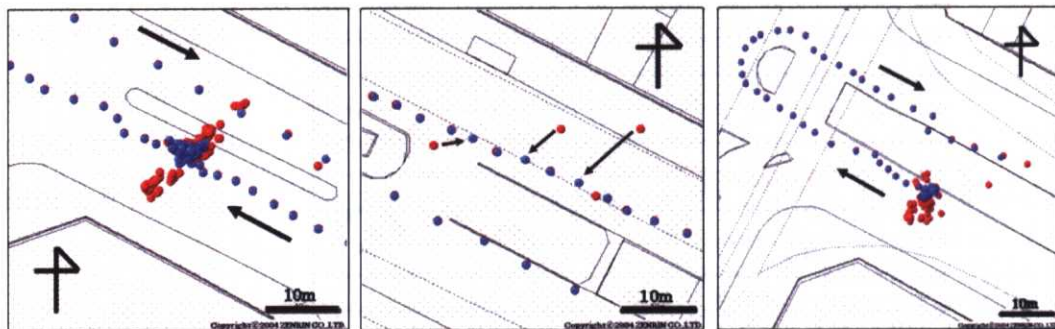


図6. 87 東京駅前コースにおける測位結果の改善例

測位結果改善例の統計データ

本提案プログラムを適用して、具体的にどの程度測位精度の改善がなされたのか調査した。衛星排除の閾値は5dBHzに設定し、これまでに述べた月島コース、東京駅前コースに加えて、銀座、豊洲、築地付近のコースの結果を集計してまとめた（各コースとも10分程度のデータを利用している）。図6.88にそれら5つのコースと基準局の位置関係を示す。5つのコースとも基線長は3km以内である。これらのコースを走行したときの測位数、測位率、平均使用衛星数を表6.3に、測位精度が改善されたかどうかを示すものを表6.4に示す。表6.4で「測位誤差が大きい」基準は、経路からはみ出していたかどうかを基準にしている（ただし、地図自体に1.2m以内程度の誤差が存在する）。

表6.5の結果より、全てのコースで85%以上の改善率となり本手法における効果を示すことができた。さらに改善されなかった場合についても、元の測位結果よりも精度が劣化することはなかった。この手法は、反射波のみ、もしくは、大きなマルチパス誤差を与える衛星を排除するのに適しているといえる。ただし、衛星を排除後に可視衛星数が4個未満になる場合や、衛星配置が大きく劣化する場合は、本手法を適用することはできない。GPSの近代化により可視衛星数が増加したときは、有益なアルゴリズムになる可能性がある。

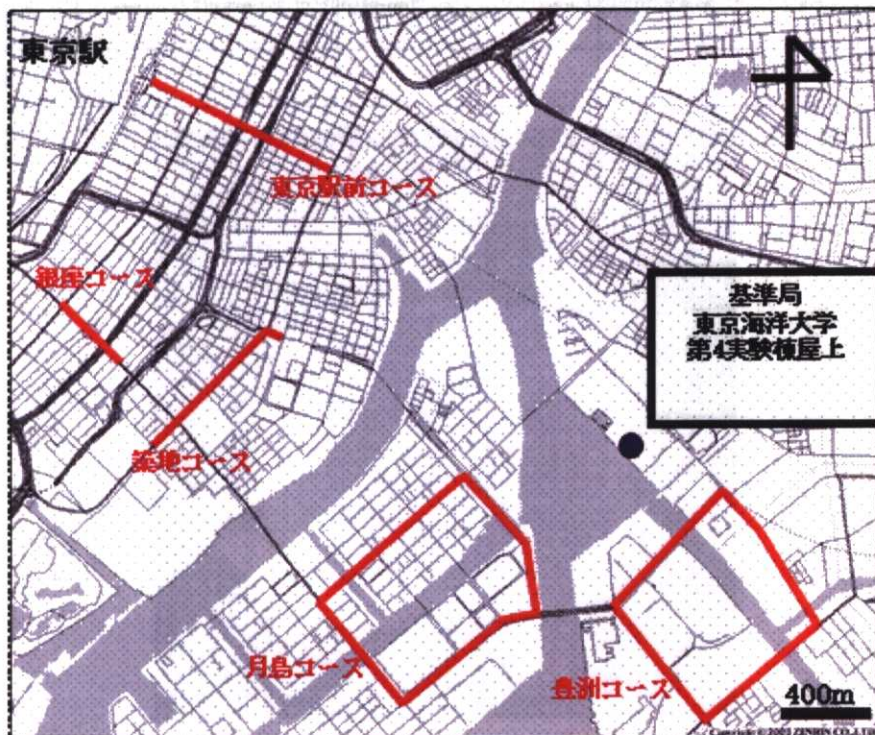


図6.88 4つのコースと基準局の位置関係

表 6. 3 測位率と平均使用衛星数

コース	測位率 (閾値なし)	測位率 (閾値 5dBHz)	衛星数平均値 (閾値なし)	衛星数平均値 (閾値 5dBHz)
月島	82.15	80.58	5.69	5.24
東京駅前	93.86	90.43	6.65	5.93
銀座	72.35	66.57	7.05	6.6
築地	97.95	96.61	7.65	7.27
豊洲	87.8	83.87	7.03	6.78

表 6. 4 測位精度の改善率

	測位誤差が大きい 測位数	改善された 測位数	改善されなかった 測位数	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

(改善されなかった位置については、元の位置より測位精度が劣化することはなかった)

6. 5. 4 他のマルチパス環境での評価

ここでは、さらに他のマルチパスを受けやすい環境においてデータを取得し、マルチパス誤差の低減化を図った例を示す。ここでは静止データだけでなく歩行速度での移動体データも含めた。場所は東京海洋大学内とした。

表6. 5に取得したデータの一覧を示す。

表6. 5 取得データの一覧

実験	日付	取得時間	SQMの選択衛星
静止1	2004年12月15日	13:30-14:00	8, 15
静止2	2004年12月15日	14:30-15:00	3, 19
静止3	2004年12月15日	15:00-15:30	27, 28
歩行1	2004年6月22日	17:30-17:40	14, 22
歩行2	2005年1月30日	19:10-19:15	26, 27

東京海洋大学越中島会館前広場（静止データ）

図6. 89にアンテナ上空の天空写真を示す。アンテナを設置した場所は、80%以上の方位が、仰角30度から45度程度まで遮られている。またアンテナと障害物との距離は、10mから20m以内と近接である。周囲が囲まれているため、回折の影響も受けやすいといえる。

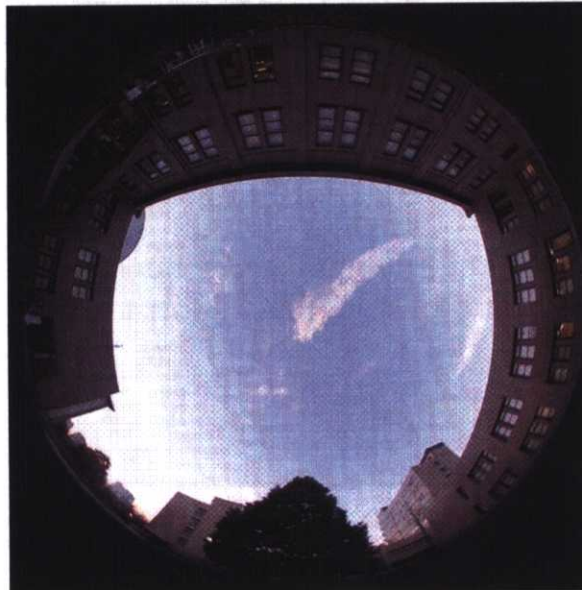


図6. 89 東京海洋大学越中島会館前広場の天空写真

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

使用した受信機は、0.1チップナローコリレータを有するOEM3受信機とストロボコリレータの性能を有するOEM4、そしてマルチコリレータの機能を有するSQM受信機である。アンテナはGPS702とした。基準局は研究室屋上に設置したので、基線長は100m程度である。ゆえに、DGPS測位結果は、大部分ノイズとマルチパス誤差によるものである。SQM受信機は、取得できる衛星のチャンネルが2チャンネルに限られているため、近接の障害物に反射していると予想される衛星のみを選択してデータを取得している。途中、14時から14時30分の間、SQM受信機でデータを取得することができていないが、他の受信機は取得している。

図6. 90に受信機の出力する生データをそのまま用いた場合の水平方向のDGPS測位結果を示す。同様に高度方向も図6. 91に示す。OEM3受信機とOEM4受信機の結果を同時に載せている。HDOPが5未満の結果のみである。

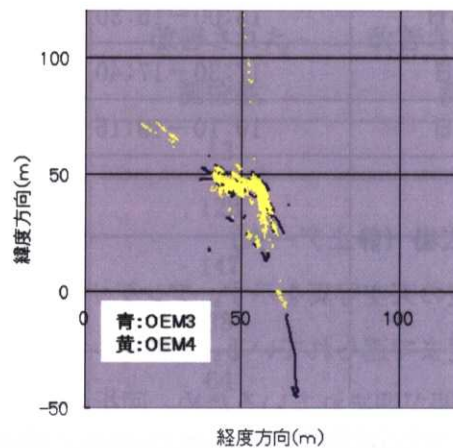


図6. 90 水平方向のDGPS測位結果 (OEM3とOEM4)

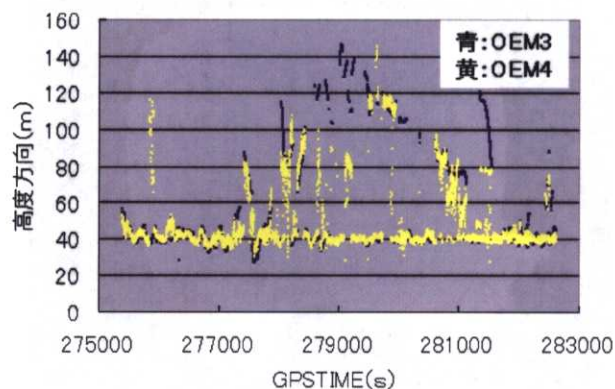


図6. 91 高度方向のDGPS測位結果 (OEM3とOEM4)

上の結果より、50mを越す非常に大きな測位誤差が高度方向（高度方向の真値は約40m）だけでなく、水平方向にも見られる。これは衛星配置の影響だけでなく、他の原因と考えられる。そこで移動体に適用している反射波のみのマルチパス波を検知する手法を用いて、再度計算してみると以下のようになった。基準局と移動局で、同じ衛星の信号強度の差が5dB以上開いている場合、その衛星を測位計算には使用していない。図6.92と図6.93にそれぞれ水平方向と高度方向のDGPS測位結果を示す。

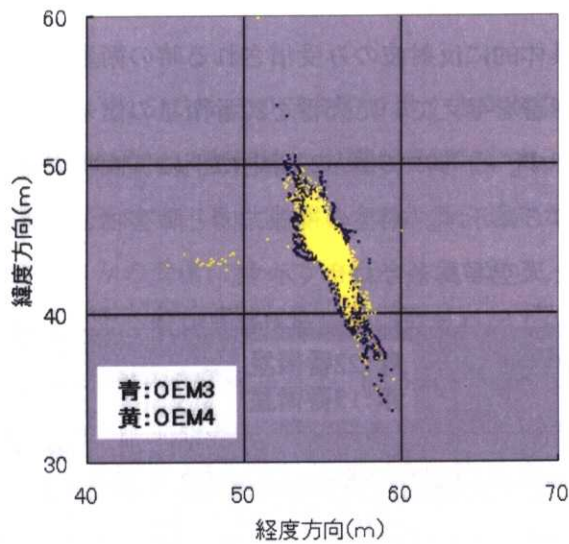


図6.92 衛星検知後の水平方向のDGPS測位結果 (OEM3とOEM4)

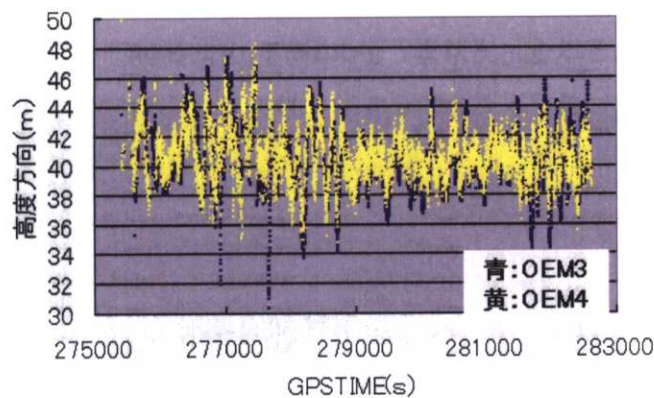


図6.93 衛星検知後の高度方向のDGPS測位結果 (OEM3とOEM4)

上の結果より、反射波のみのマルチパス波を検知する手法を用いてDGPS測位を行うと、10mを越すような大きな飛びが大幅に削減されていることがわかる。このときの測位率は、衛星検知前と検知後では97.2% (6996/7200) で変わらなかった。よって、反射波のみの衛星の検知が有効に働き、可視衛星数も最低の4個が確保されていたことがわかる。なおOEM3とOEM4受信機で測位結果に大きな差が現れていないのは、障害物が近接に存在するために、マルチパス波の遅延距離が20m程度に満たないものが多かったためである。前の実験と同様に、20m前後の遅延距離の短いマルチパス波に対しては、両受信機ともに同程度のマルチパス誤差を受けていることがわかる。

これまでの結果で、具体的に反射波のみ受信される時の衛星の特徴を明らかにするために、測位誤差に大きな影響を与えていた15番と22番衛星の信号強度の時間変化をプロットしたので図6. 94に示す。さらに15番と22番とは別に、回折の影響を受けていた16番衛星の信号強度も図6. 95に示す。衛星の視線方向と障害物との位置関係を示すため、図6. 96に水平の地図と天空写真を合わせて示す。

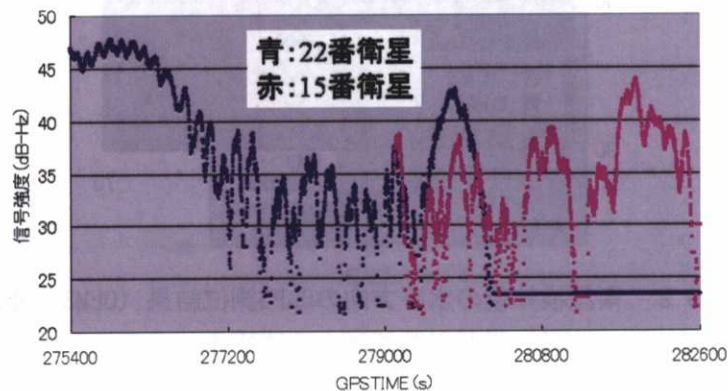


図6. 94 2つの衛星の信号強度

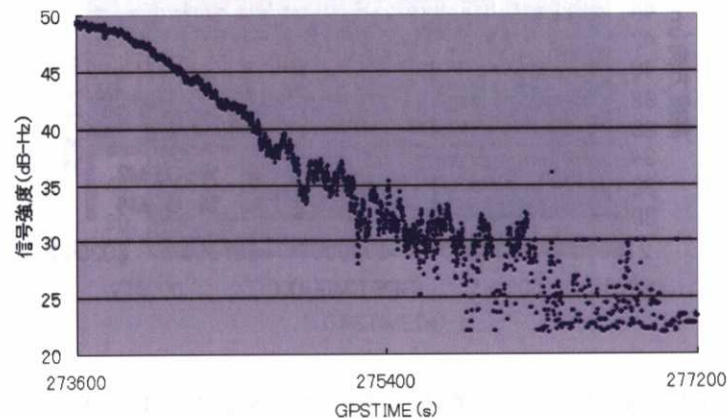


図6. 95 16番衛星の信号強度

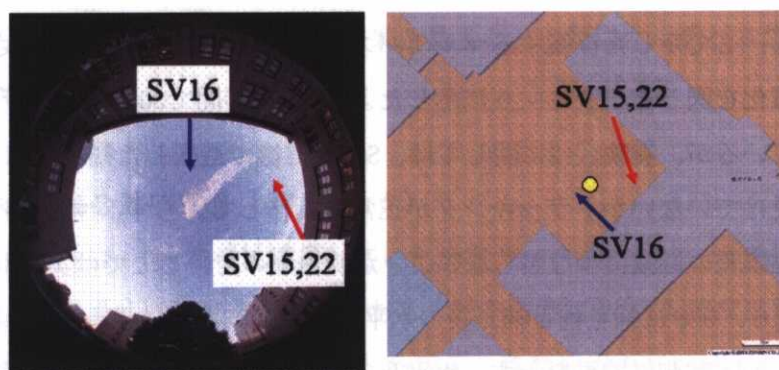


図6.96 広場の天空写真と水平地図

最初に選択した2つの衛星は、図6.96の赤矢印で示す方向から入射されていた衛星で、位置関係より回折の影響だけでなく、反射波の影響も受けていた。信号強度を見ても、回折だけでなく、反射の影響を受けていることがよくわかる。途中からは、回折波の信号は非常に小さくなり、反射波のみの受信に移っていると考えられる。一方、図6.96の青矢印で示す方向から入射されていた16番衛星は、強い反射を生み出す障害物が存在しないため、回折のみの影響を受けていると考えられる。図6.95の信号強度の変化を見ても、激しい振動はなく徐々に減衰していることがわかる。15番や22番衛星のように、反射波のみの受信になると、測位計算に利用する擬似距離の値は、容易に10m以上ずれることになり、測位結果も当然大きくずれる。よって、6.3.1で示したように、反射波のみの（ここでは回折+反射）影響を受ける衛星を検知し、測位計算から除外することは非常に重要であることがわかる。一般の環境において、反射波のみの受信時に、反射波だけでなく、回折の影響を受けることが多い理由は、図6.97に示すとおりである。ビル街を走行中、車はどちらかの車線によっているため、下図のような状況になると、回折波の信号強度は非常に小さくなり、反射波の信号強度のほうが十分に大きくなる。ただし、反射波も反射の減衰により、通常の直接波より信号強度は減衰している。

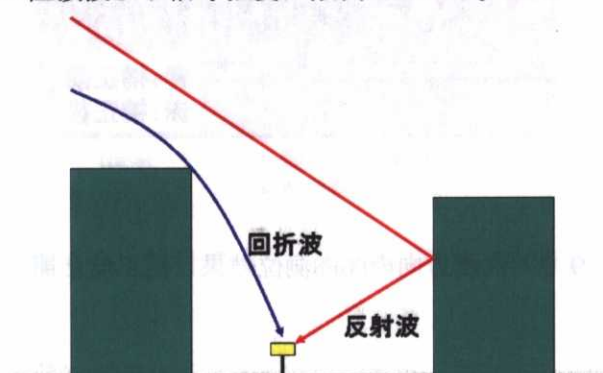


図6.97 回折+反射の状況

次に、6. 4. 2で示した提案するマルチパス誤差低減技術を利用して、さらにマルチパス誤差の低減化を図った。表6. 6に示したように、2時間で30分間隔のデータを3回に分けて取得しているが、実験1と2に関しては、SQM受信機で選択した衛星がほとんどマルチパスの影響を受けていないかトラッキングが正常に動作しておらず、マルチパス誤差推定を行っても測位誤差の低減につながらないことが明白なので、ここでは実験3の場合のみ推定を行った。図6. 98に補正前と補正後の水平方向のDGPS測位結果を示す。同様に図6. 99に高度方向のDGPS測位結果を示す。水平及び高度方向ともに、補正前の結果は、OEM4受信機の生データを利用して計算しており、反射波のみの衛星を検知かつ排除した後の結果である。

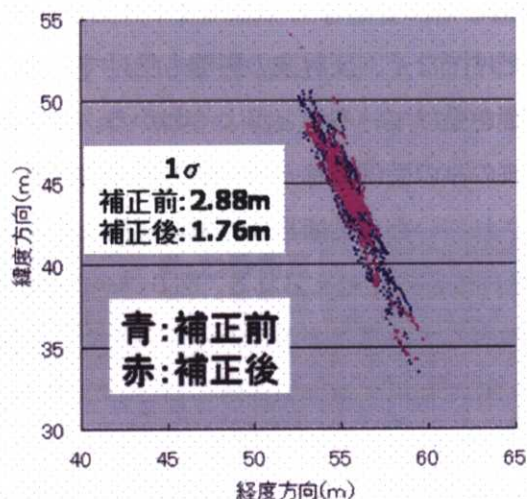


図6. 98 水平方向のDGPS測位結果（補正前と補正後）

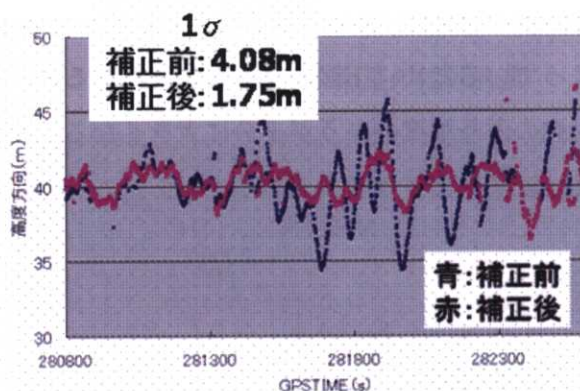


図6. 99 高度方向のDGPS測位結果（補正前と補正後）

上の結果より、特に高度方向のDGPS測位結果を見ると、大幅にマルチパス誤差を低減できていることがわかる。

東京海洋大学越中島会館前広場（歩行データ）

上にも書いたように、6月22日に取得していた歩行データを用いて、本手法による低減効果を確認した。使用受信機等は全て同じである。越中島会館から10m程度はなれた場所（図6.96に示された図の場所）を、直線で15m程度、移動局用のアンテナを持って歩いた。なお直線15mを7等分として各ポイントで30秒ほど静止した。SQM受信機で選択した2つの衛星が強いマルチパス波を受けている時間帯を選んで効果をチェックした。本手法で推定したマルチパス誤差を補正する前と補正した後のDGPS測位結果を図6.100に示す。横軸は経度方向、縦軸は緯度方向である。図6.96と照らし合わせると歩行した場所の環境を知ることができる。下図を見ると、明らかにマルチパス誤差が低減されていることがわかった。静止している時間帯だけでなく、歩行している時間帯もマルチパス誤差が推定されていた。

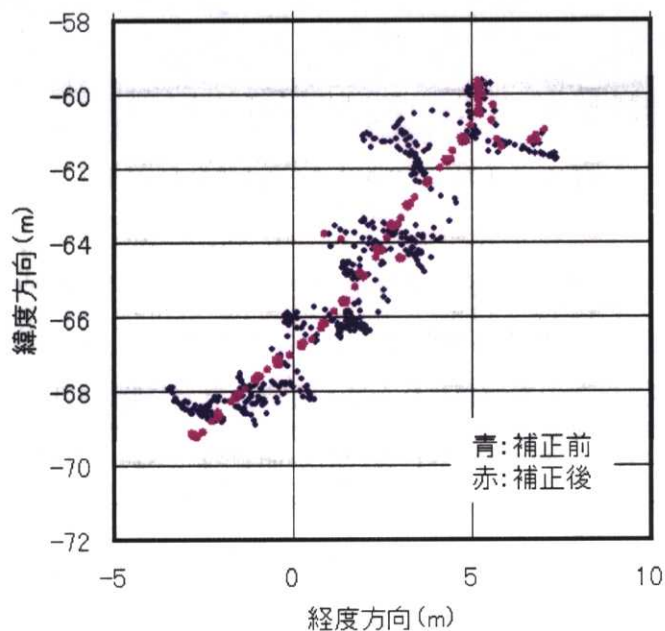


図6.100 歩行データによる水平方向のDGPS測位結果

東京海洋大学研究室周囲走行（車による歩行スピードでのデータ）

大学構内の研究室周囲を車で周回したときのデータを用いて本手法による低減効果を確認した。図6. 101に、そのときの水平図と後処理精密測位結果及びDGPS測位結果を合わせて示す。

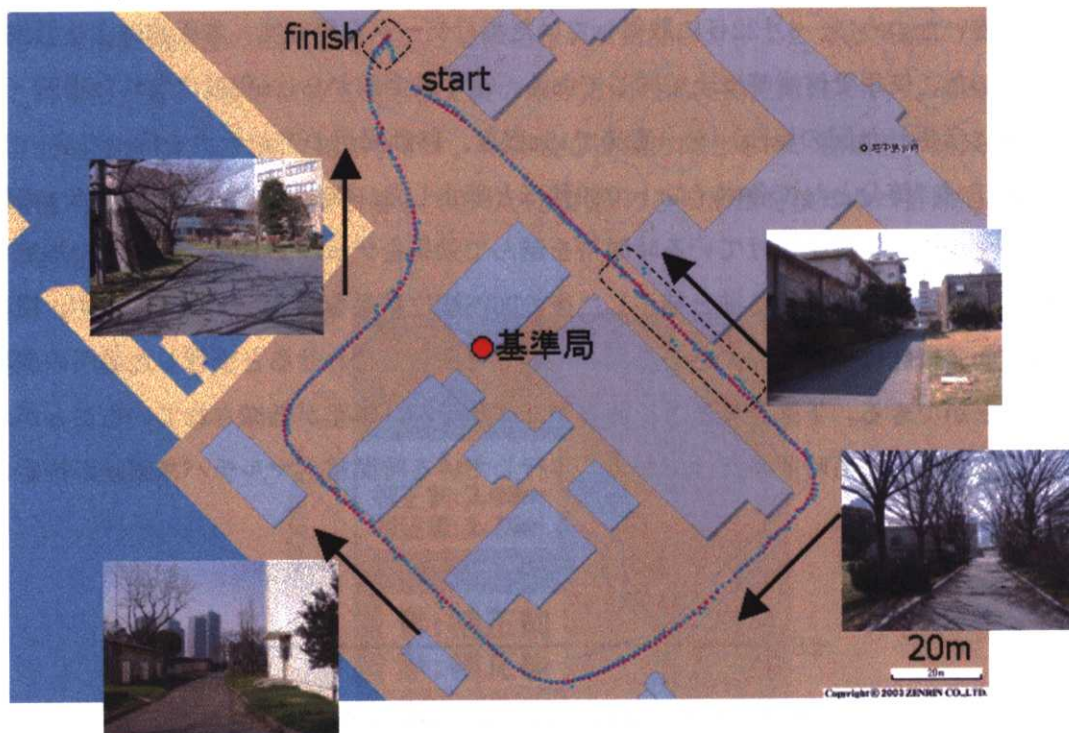


図6. 101 水平図と位置プロット図

上図で赤のプロットは後処理による精密位置を示している。本周回での可視衛星数は基準局では10個、移動局では4個から10個であったのでほぼ99%以上の時間帯において精密位置を決定することができた。青のプロットは、受信機出力の擬似距離を利用して計算したDGPS測位結果である。測位計算時のマスク角は10度、最低信号強度は32dBHzとしている。図からもわかるように、水平精度で5m以上飛んでいる箇所がいくつか見受けられた。

次に本手法を適用したときの精密測位とDGPS測位の水平方向のずれの結果を図6. 102に示す。補正前を青で、補正後を赤で示している。全体的に水平方向の精度が改善されていることがわかる。水平方向のずれの標準偏差と最大値を表6. 6にまとめた。この表を見ても明らかに水平精度が改善されていることがわかる。大きな飛びに関しては、信号強度の検知・排除で改善され、数秒間以上にわたるマルチパス誤差はマルチパス推定手法によって改善されていた。さらに、本手法の適用に際して初期値を求めることなく、探索範囲を十分に広くとった場合の水平方向のずれの結果を表6. 6に合わせて示した。探索

範囲を広くとったことにより計算時間は大きく増加した。初期値を利用した本手法と比較して、それよりも悪くなるケースは見られなかったため、大きな推定誤りはなかったと考えられる。また、初期値を利用した本手法と比較して、水平方向のずれはほとんど同じであった。この理由は2点考えられ、1点目は、図6. 102（赤のプロット）で低減しきれない誤差の原因が、SQM受信機で取得した2つの衛星（マルチパス波推定に利用）以外の誤差によるものであること。2点目は、いずれの手法においても、十分な信号強度が得られていない時間帯では、相関値のノイズが大きいため、1秒程度の移動平均でノイズを低減することができないため、最小二乗法による推定がうまく作用していないことによるものである。

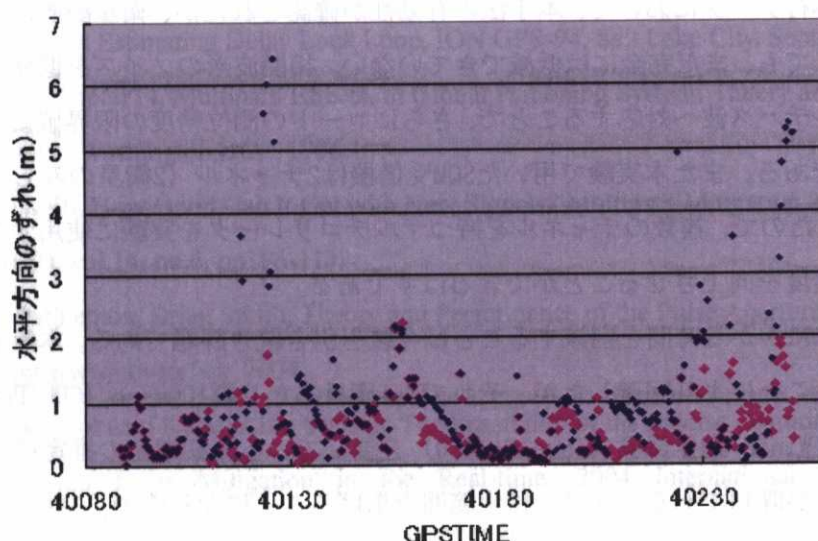


図6. 102 補正前と補正後の水平方向のずれ

表6. 6 水平方向のずれの評価値

	改善前	改善後	改善後（全探索）
水平ずれの標準偏差 (m)	1.05	0.41	0.40
水平ずれの最大値 (m)	6.44	2.24	2.24

6. 6 6章のまとめ

6章では、本論文で提案するコードマルチパス誤差低減化手法について、シミュレーションと実データを利用してまとめた。最初に、実環境での実際のマルチパス誤差による影響を確認した。各種コリレータによるマルチパス誤差推定シミュレーションソフトを開発す

ることにより、様々なマルチパス波に対する影響を事前に把握できるようになった。受信機出力情報を用いた使用不可衛星の検知手法では、静止データ及び移動データにおいて、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みの検出に有効であった。相関波形を用いたコードマルチパス誤差削減手法では、静止及び歩行データにおいて、現存する最高性能のGPS受信機よりも、コードマルチパス誤差を低減することが可能であることを示すことができた。遅延距離で10mから20m程度のマルチパス波に対して有効であった。

6章における今後の課題を以下に列挙する。

- ・ 静止及び歩行データにおいて、本手法の有効性が確認されたが、衛星配置による精度劣化を考慮しても、まだ完全には低減できていない。相関波形のノイズを低減することと複数のマルチパス波へ対応することで、さらにコードの測位精度の限界値まで近づくことが可能である。また本実験で用いたSQM受信機は2チャンネル（2衛星のみしか推定できない）だったので、複数のチャンネルを持つマルチコリレータを実験に使用することにより、更に精度を向上させることができるはずである。
- ・ 最小二乗法にかかる時間を削減することは今後も引き続き課題である。本手法では初期値を与えることにより回避したが、それでも1衛星あたり数100msec（CPU:Pentium4 2.8GHz OS:WinXP 動作環境:VisualC++6.0）を要している。初期値の推定精度が思わしくないことが既知であるときは、探索範囲を広げることになるので、1秒以上要することになる。
- ・ 車等の移動体においては、マルチパス環境が瞬間で変化するので、大きな反射を持つマルチパス波がトラッキンググループに混入しない可能性が高い。トラッキンググループとマルチパス波の関係を明らかにすることが必要である。移動体の場合、速度情報が既知なので、速度情報でマルチパス対策手法を切り分けることも考えられる。

参考文献

- 久保信明、安田明生：単独測位におけるマルチパスの評価と精度改善方法、信学論 (B), Vol. J84-B NO. 12, pp. 2123-2131, 2001年12月
- 久保信明、安田明生：定点測位におけるコードマルチパス誤差の削減について、信学論 (B), Vol. J86-B NO. 1, pp. 104-112, 2003年1月
- 久保信明、安田明生、鈴木崇史：衛星測位におけるマルチパス誤差の削減と高精度

- 化への可能性について、信学技報 ITS2004-8, pp. 7-12, 2004年8月
- 電波伝搬ハンドブック編集委員会：電波伝搬ハンドブック、リアライズ社、1999年1月
- Van Dierendonck, A.J., Fenton, P. and Ford, T., Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver Navigation, Journal of the Institute of Navigation, USA, Vol.39, No.3, Fall 1993, pp.265-283.
- B. Townsend, P. Fenton, A Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a L1 GPS Receiver, ION GPS-94, Salt Lake City, September 1994.
- L. Garin, Dr. F. van Diggelen, J.M. Rousseau, Strobe & Edge Correlator - Multipath Mitigation for Code, ION GPS-96, Kansas City, KS, September, Part1, pp.657-664.
- B. Townsend, D.J van Nee, P. Fenton, and K. Van Dierenconck, Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop, ION GPS-94, Salt Lake City, September 1994.
- Braasch, M.S., Chapter14, Multipath Effects, in Global Positioning System: Theory and Applications AIAA, Washington,DC, 1996.
- Lawrence R. Weill, How Good Can It Get with New Signals? Multipath Mitigation, GPS World (2003), vol.14, no.6, pp106-113.
- Jason Jones, Pat Fenton, Brian Smith, Theory and Performance of the Pulse Aperture Correlator, <http://www.novatel.ca/> 2004.
- Takashi Suzuki, Nobuaki Kubo, Akio Yasuda, The Possibility of the Precise Positioning and Multipath Error Mitigation in the Real-time, 2004 International Symposium on GNSS/GPS Sydney, Australia 6-8 December 2004

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