

衛星測位でのシミュレーション

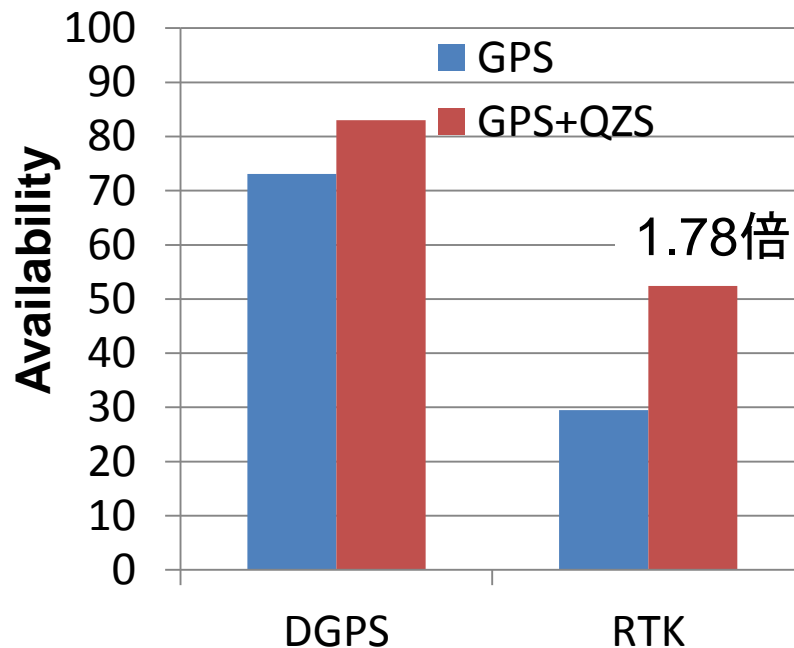
都内でのRTK実験(準天頂に焦点) (浅草から海洋大まで)



Test Route

Total period: 35 minutes

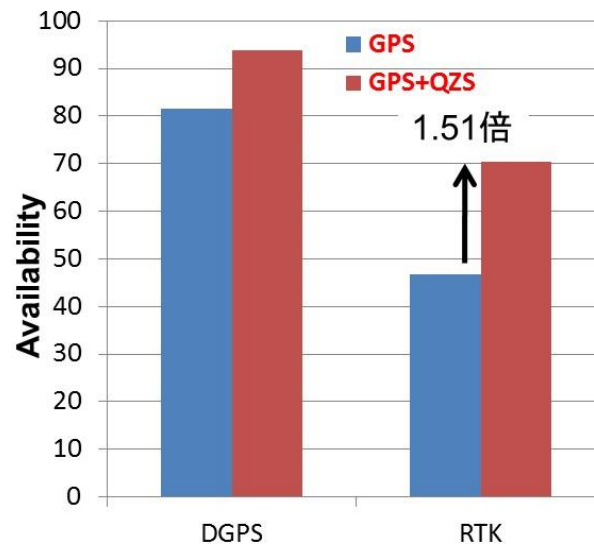
Total epochs: 10500 (35 min.)



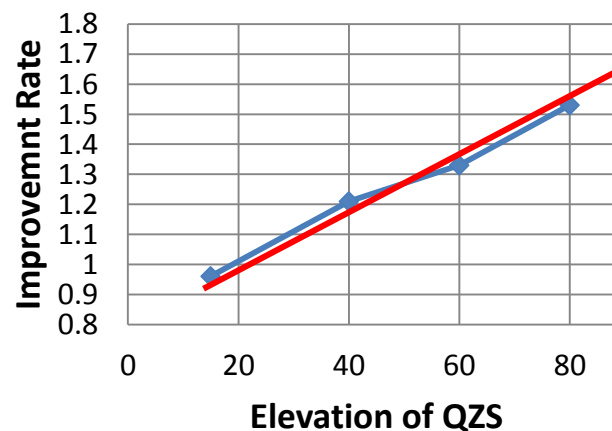
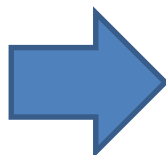
オープンスカイでのRTKに寄与は少ない
都市部RTKへの寄与は少なくない

都内でのRTK実験(準天頂に焦点)

(海洋大-丸の内 周回)



過去の月島、丸の内周辺のRTKの結果をベースに準天頂衛星によるRTKの改善率を仰角との関係で計算してみた
(GPS+QZSのケースのみ)



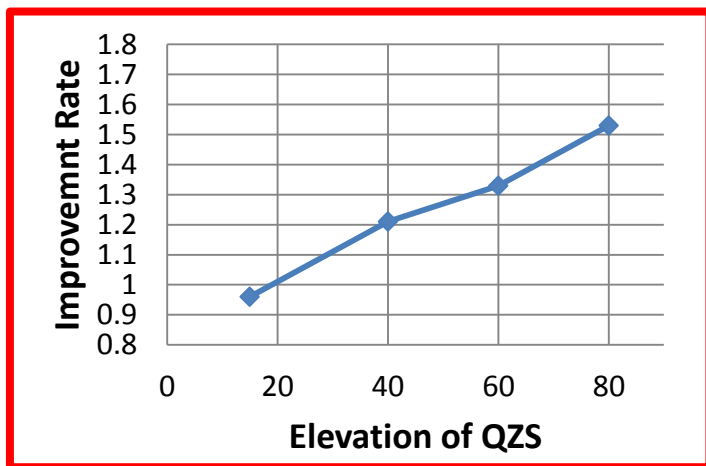
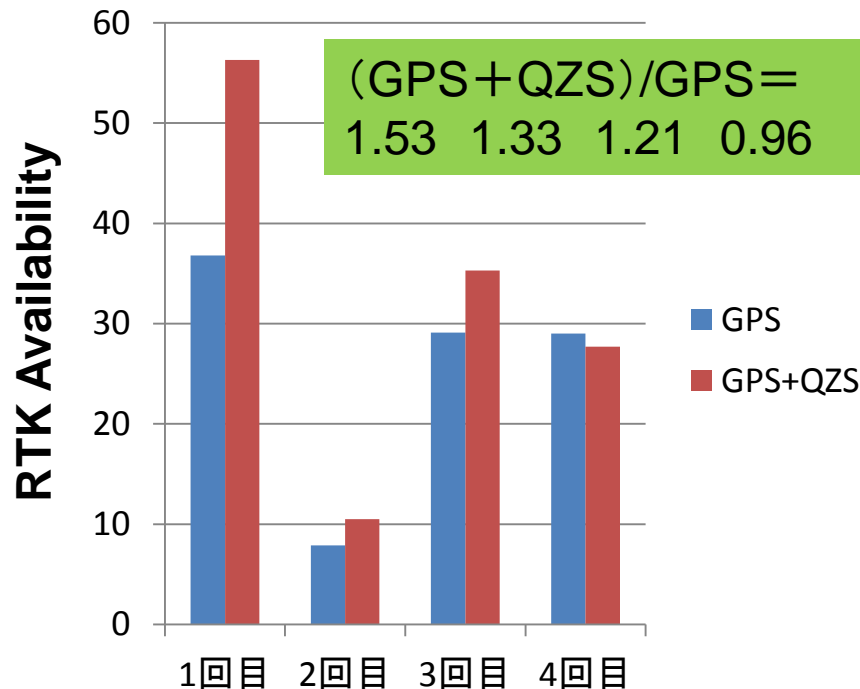
都内でのRTK実験(準天頂に焦点)

(月島-銀座 周回)



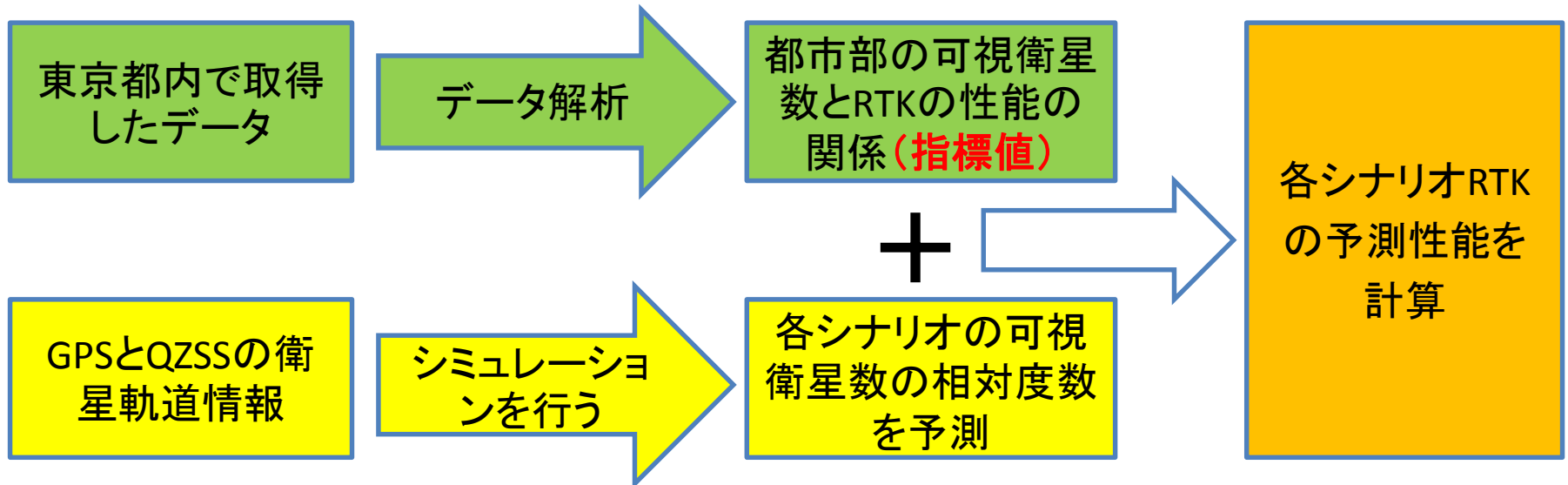
1周約25分 4回走行

RTKの結果をベースに準天頂衛星によるRTKの改善率(仰角との関係)
(GPS+QZSのケースのみ)



シミュレーションの目的

- 搬送波位相を利用するRTKは、都市部等のビル街でその性能が極端に低下することが認識されていた。その状況を改善するために、「可視衛星数の増加」が強く期待されていた。
- これまで蓄積してきた都市部でのRTKの統計結果を駆使した。具体的には、都市部走行のGPS観測データより、可視衛星数とRTKの性能の関係を数値情報としてまとめた。その情報をベースにして、RTKの性能がどの程度向上するのかシミュレーションを行った。



QZS3機体制でのシミュレーション (基礎データ)

- 都市部での複数の実験結果(2010年頃)より、使用衛星数毎のFIX率(実際にRatio3を越えた割合)と信頼度高くFIXした割合を計算(以下の通り)。**その結果よりシミュレーション用の指標値を生成**
- QZSの2機目、3機目の軌道は、アルマナックの昇交点赤経と平均近店離角を等間隔になるよう設定。GPSと193番のアルマナックはqg2011332.almを利用。**2011/11/28の86400エポックで計算**

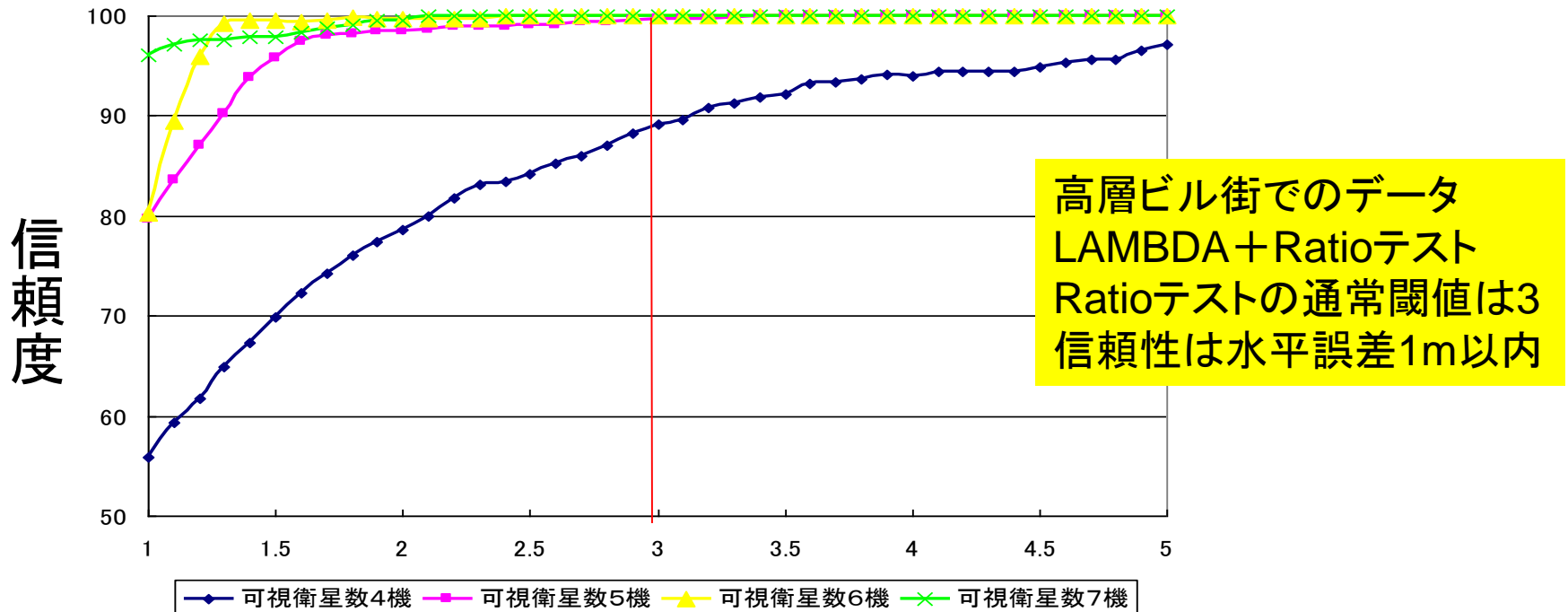
	4機	5機	6機	7機	8機	9機	10機
FIX率	70.4%	79.9%	81.8%	86.3%	89.0%	92.2%	
信頼性	89%	99%	99%	99%	99%	99%	
指標値	62.7%	79.1%	81.0%	85.4%	88.1%	91.3%	

10機以上は9機と同じとした

上記の指標値を利用して、マスク角をシンプルに変化させたときのGPS+QZS3機(静止1機)でのRTKの性能評価シミュレーションを行った
指標値→5機の約80%の意味は、たとえ利用可能な衛星が5機あっても、5回に4回しかFIX解がないという意味

都市部でのRTKの性能

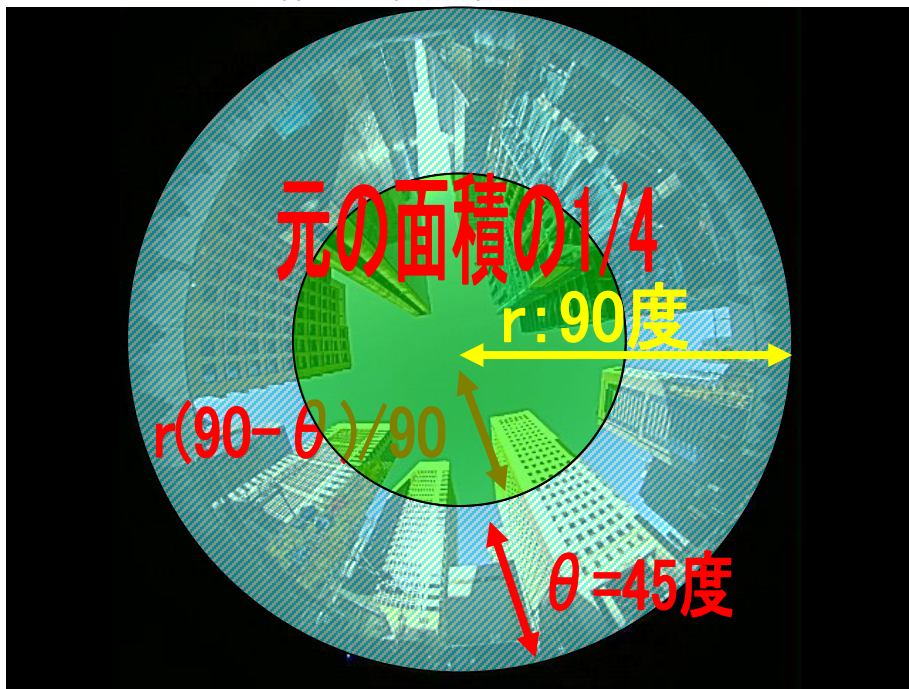
(利用衛星数とRTKの信頼度との関係)



- 利用衛星数が4機的时候は、FIX解を得たとしても1m以内の信頼性が90%に満たない。利用衛星数は5機以上必要

マスク角と平均天空率について

- 一定の仰角に満たない衛星を使用しないために設定する角度。高角に設定すると信号を遮断する建物が減る。
- 写真中央の位置が仰角90度となるので、マスク角を θ とすると、マスク角内部の面積は元の面積の $((90-\theta)/90)^2$ となる



	平均天空率
観測場所	
丸の内	32.0%
新宿	29.0%
月島	38.0%

例: 天空率25%=マスク角45度の内円の面積

準天頂衛星が3機体制になった場合の 都市部RTKのシミュレーション

各項目の結果は

- 左が86400秒のうち**使用衛星5機以上**の割合
- 右が**RTKが可能(左を分母)かつ信頼度高く達成できる割合**
(2つ前のスライドの指標値を使用)

マスク角と天空率	GPS	GPS+QZS1機	GPS+QZS3機	GPS+QZS4機
30度(44.4%)	77.6 / 62.4	84.9 / 69.7	100 / 85.6	100 / 88.4
35度(37.3%)	50.3 / 40.0	70.8 / 59.0	96.9 / 80.4	100 / 86.1
40度(30.9%)	22.5 / 17.8	45.8 / 36.5	86.4 / 70.1	98.5 / 82.5
45度(25.0%)	6.7 / 5.3	19.0 / 15.1	69.9 / 55.9	93.5 / 76.4
50度(19.8%)	2.1 / 1.6	6.3 / 5.0	41.4 / 32.9	41.4 / 32.9

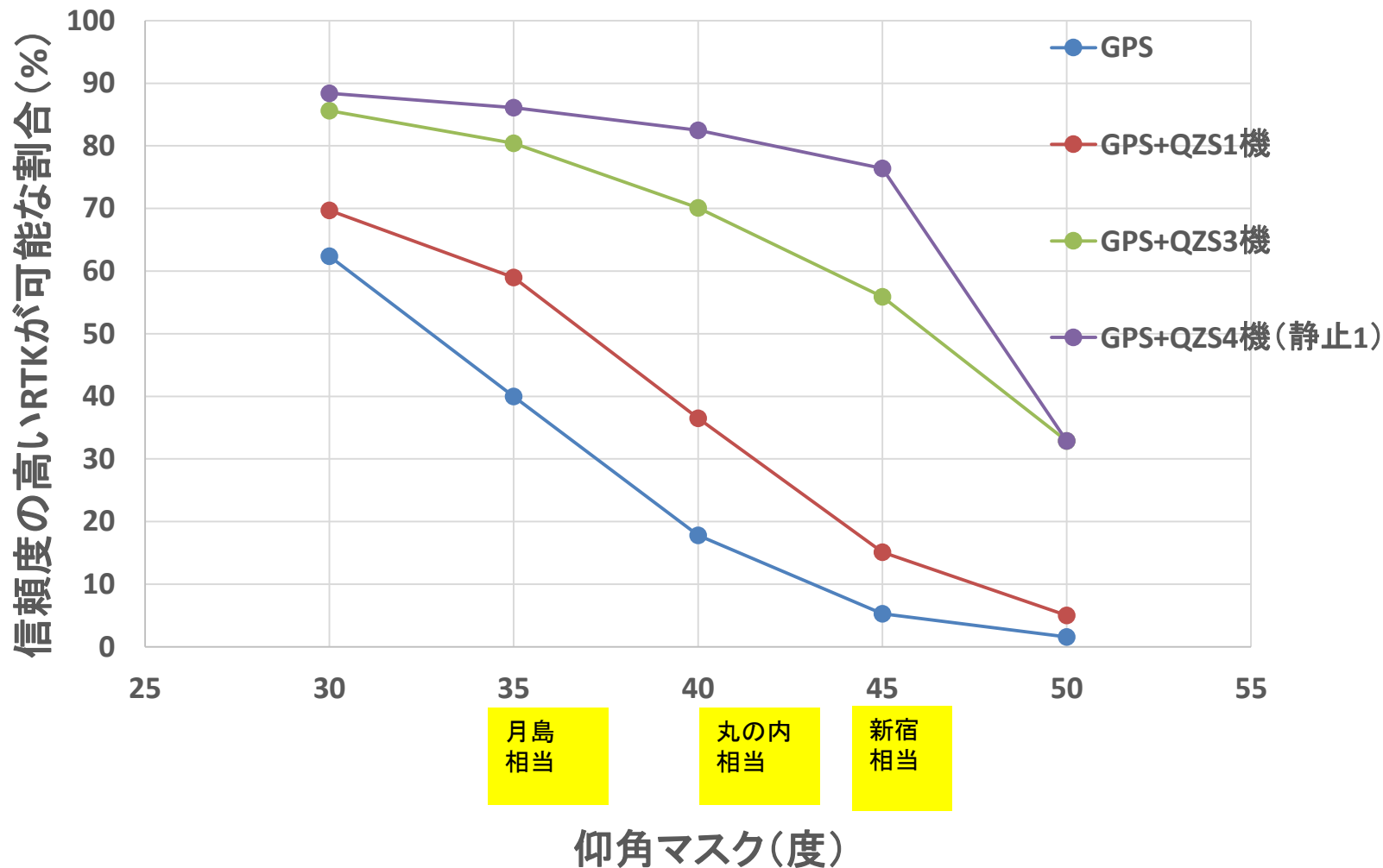
+ 静止1機

測位環境を厳しくするほど、+準天頂の効果が顕著になる

主な都内の天空率(丸の内:約32%、新宿:約29%、月島:約38%)

都市部RTKの性能比較(準天頂の効果)

(前スライドの図)



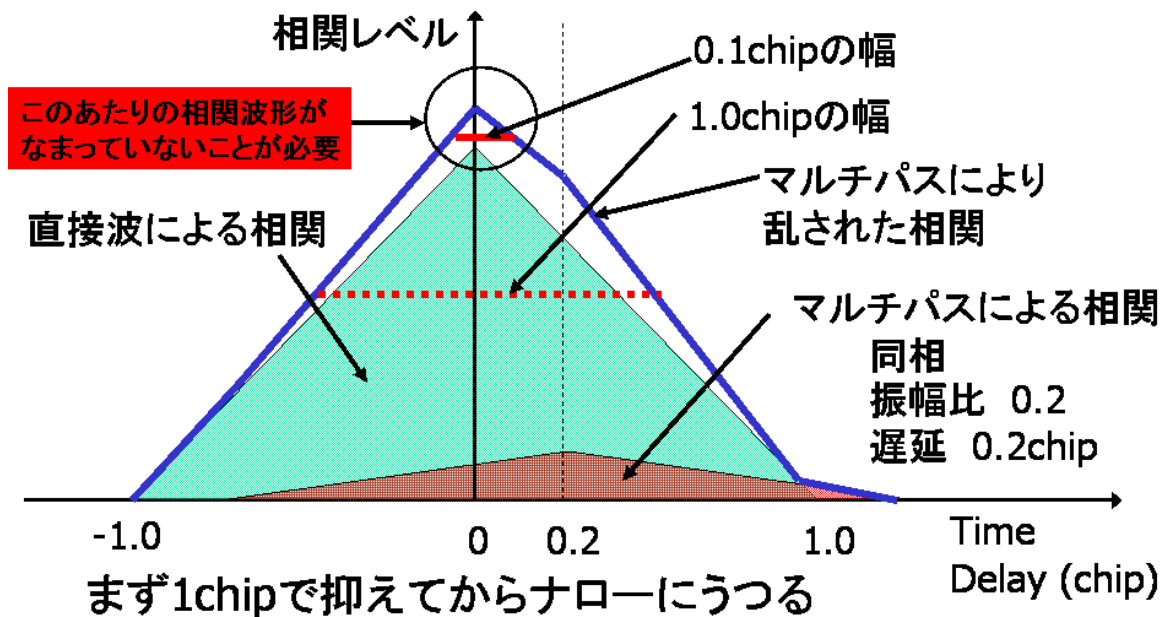
指標値の説明

	4機	5機	6機	7機	8機	9機	10機
FIX率	70.4%	79.9%	81.8%	86.3%	89.0%	92.2%	
信頼性	89%	99%	99%	99%	99%	99%	
指標値	62.7%	79.1%	81.0%	85.4%	88.1%	91.3%	

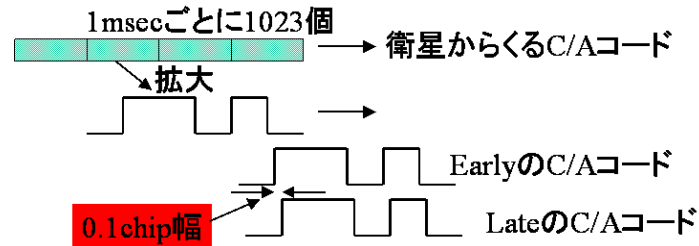
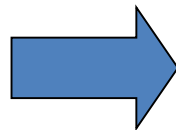
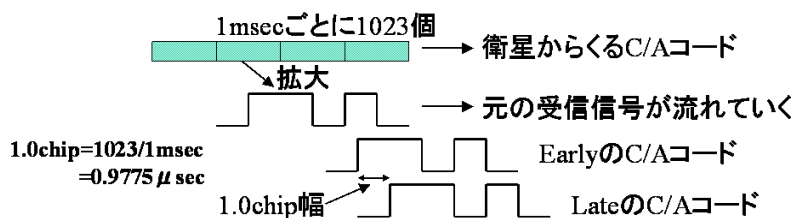
- 指標値が5機の約80%の意味は、たとえ利用衛星が5機あったとしても、5回に4回しかFIX解がでないという意味
- 今回の計算では、過去に蓄積したデータ(GPS+QZSのみ)を実際に研究室のソフトでRTKを行い計算
- この指標値計算においては、**同じソフト**(アルゴリズム)、**同じ受信機**を使用する必要がある
- 上記はGPS+QZSのRTKのFIX率の例。**BeiDou**や**GLONASS**を付加したときのFIX率は別。**若干性能が低下**するはず。ただ利用衛星数が倍増するため当然RTKの性能は向上している

マルチパス誤差について

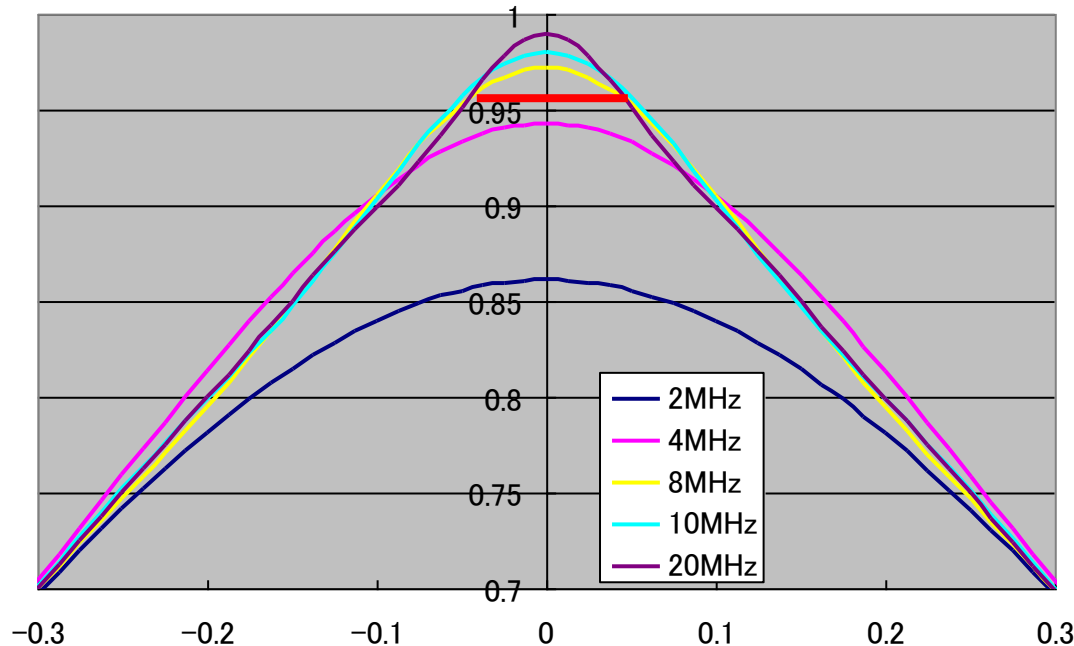
(earlyとlateのチップ幅を狭めるナローコリレータ)



まず1chipで抑えてからナローにうつる



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

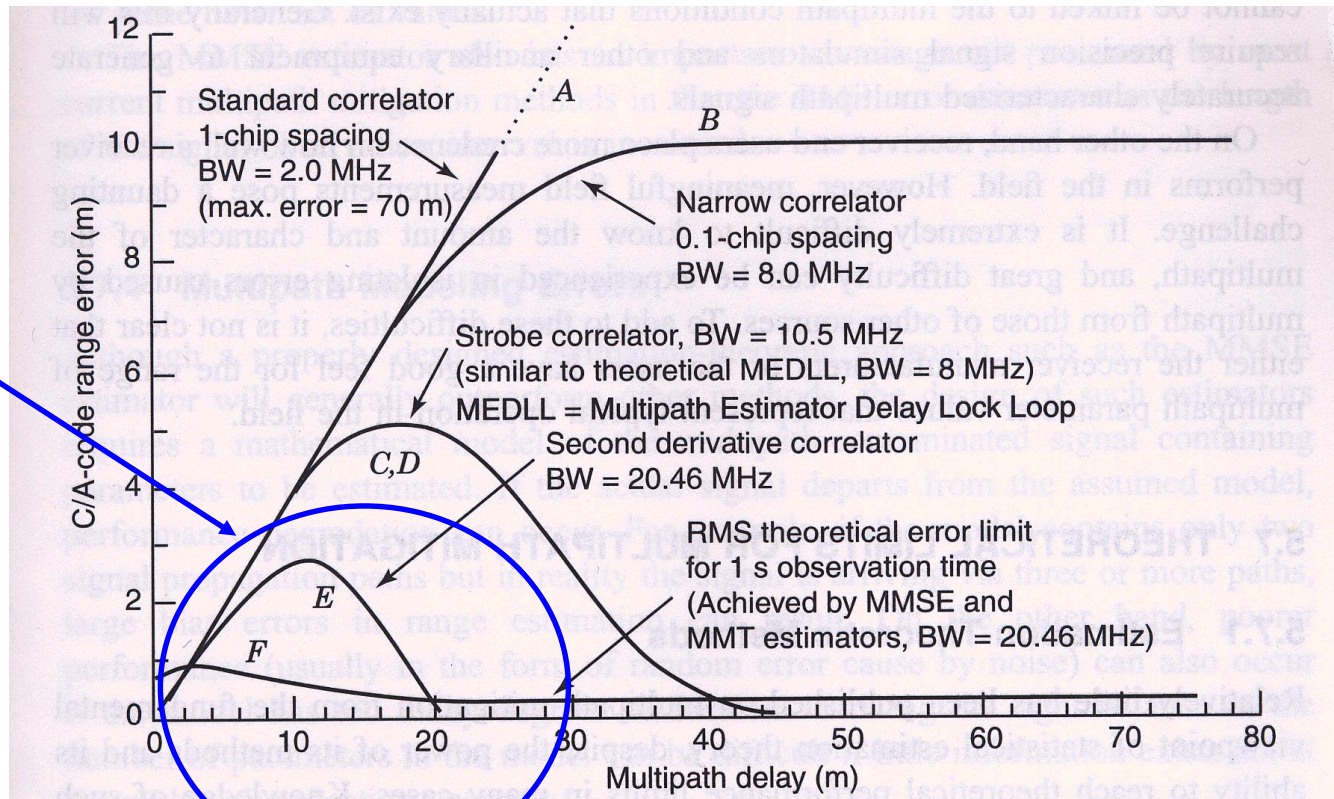
相関波形は、受信機内部の帯域幅によって異なることが知られており、例えば、0.1chipのナローコリレータを有効に動作させるには、少なくとも8MHz程度以上の帯域幅が必要。

測量受信機の帯域は20MHz程度確保されている
カーナビ等で利用されているGPS受信機は帯域が2MHz程度
帯域を大きくすることに技術的また予算的な困難はない？
ただし、妨害電波や雑音には注意を払う必要がある

各種コリレータの性能比較

10年以上前からこのコリレータ部の改善度合いがあまり変わっていない

赤丸で示す
遅延距離の
短い領域が
現在の課題

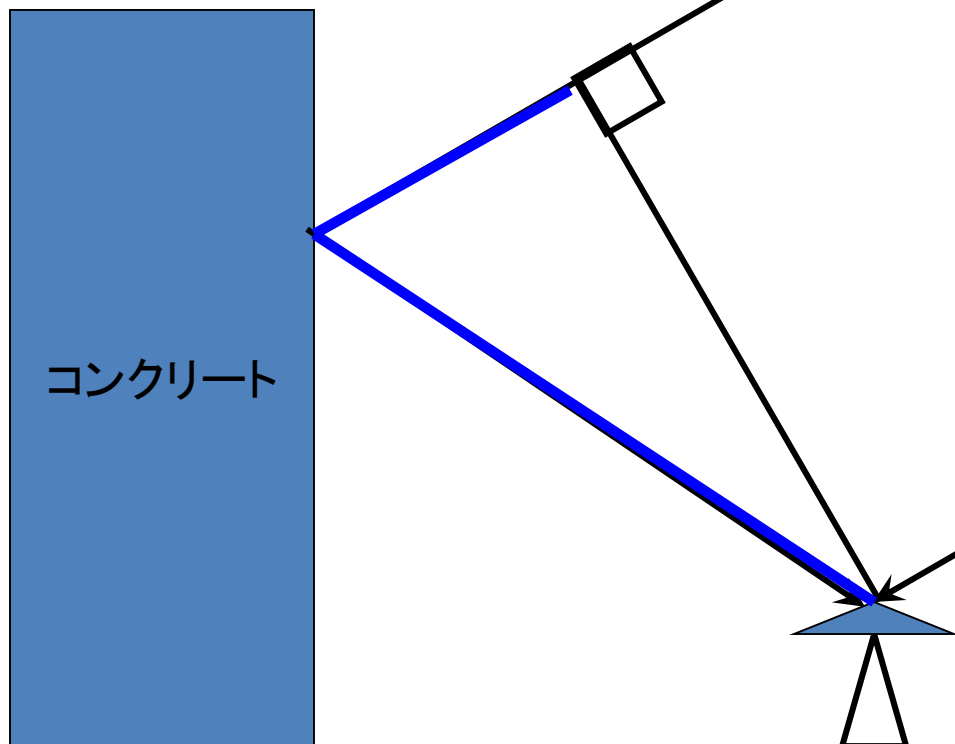
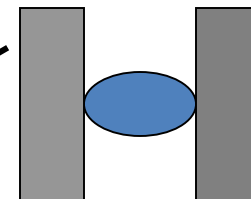


各種コリレータによる、マルチパス波の振幅比が0.5のときの、マルチパス誤差と遅延距離との関係図(同相のみ)

アンテナ-障害物間の関係

specular反射の衛星を選択(2次元のみ)

階段塔の壁の表面は必ずしも
きれいな平面ではない
(はしごやアンテナが存在)



3番衛星の動向

仰角 46⇒37

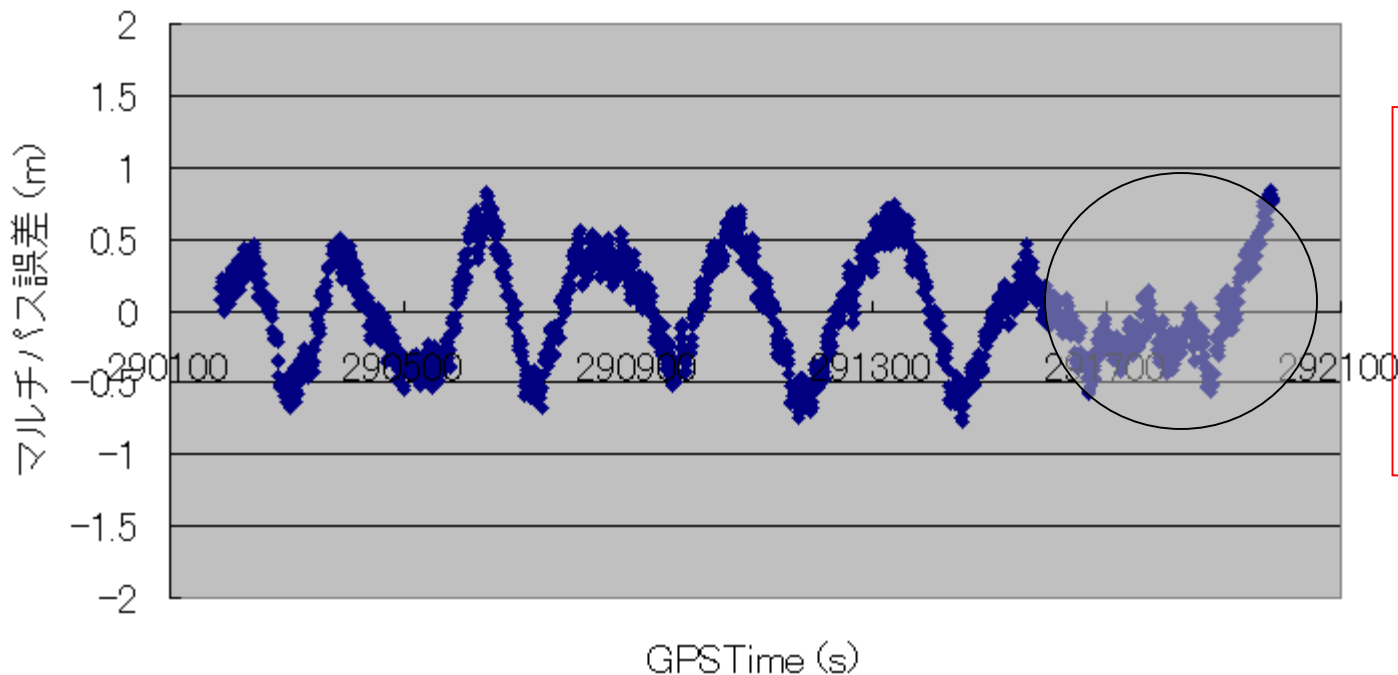
方位角 54⇒66

直接波に対する遅延距離を推定可能。
実際に30分間で
10.6mから12.2m
(L1で8~9波長分)

壁反射マルチパス誤差 (実際)

移動局側でspecular反射の衛星を選択

3番衛星のマルチパス誤差 (Code-Carrier+0平均)

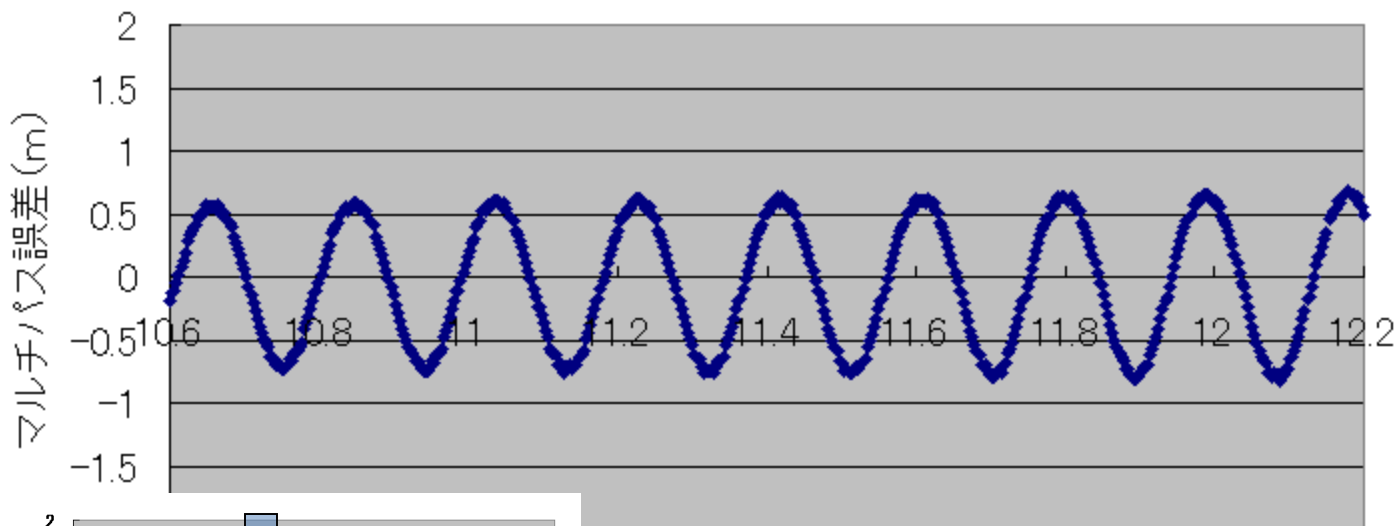


衛星電波の壁面での反射点において、壁自身が平らではなく様々な突起物等があるため、SIN波のようにならないこともある

壁反射マルチパス誤差 (シミュレーション)

移動局側でspecular反射の衛星を選択

3番衛星のマルチパス誤差シミュレーション
(位相差、振幅比、遅延より)



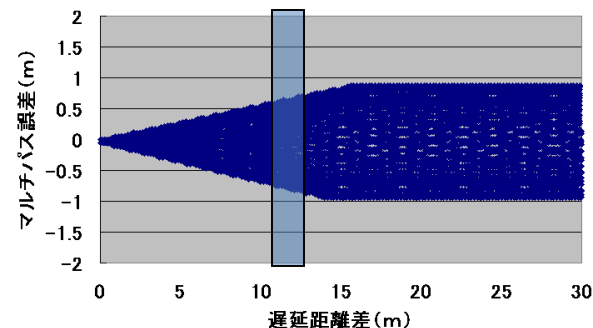
遅延距離は衛星の仰角、方位角の時間変化より算出

位相差は遅延距離に応じて変化

振幅比は0.06とした(壁の反射減衰だけを考えると0.3程度だが、壁の厚さ等は考慮せず)

帯域は制限せず

遅延距離差 (m)



アンテナ下面からの地面反射の影響

アンテナ (20cm、2m)

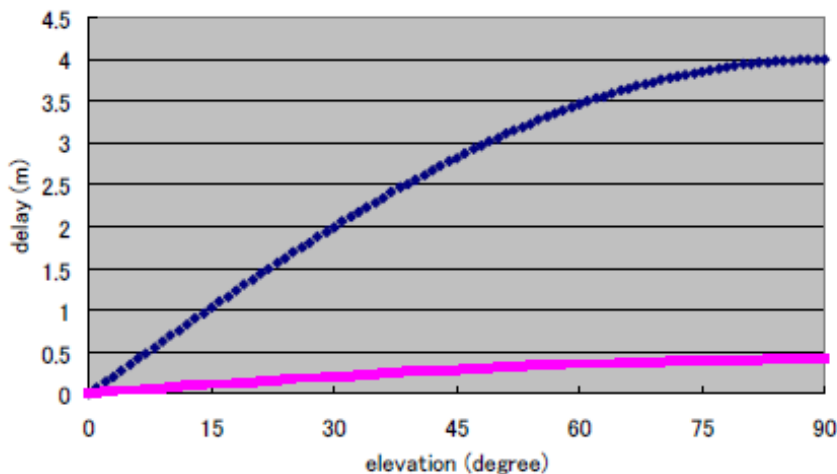
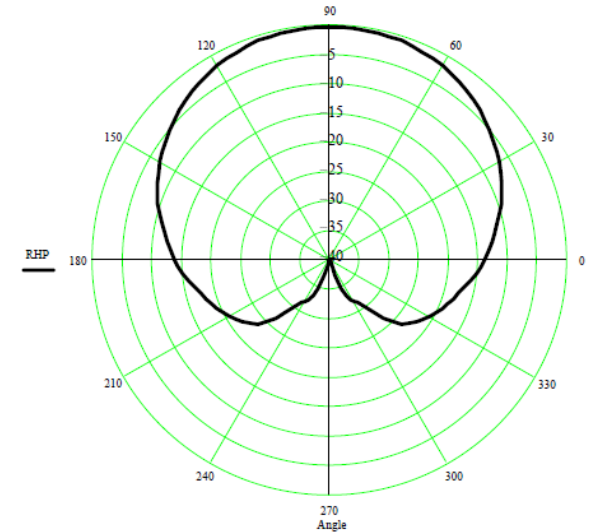


図1 仰角と地面反射のマルチパス波の遅延距離との関係

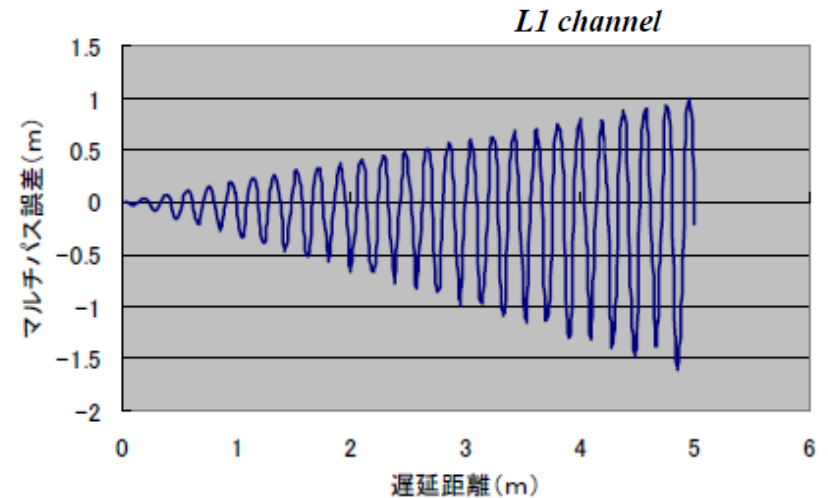
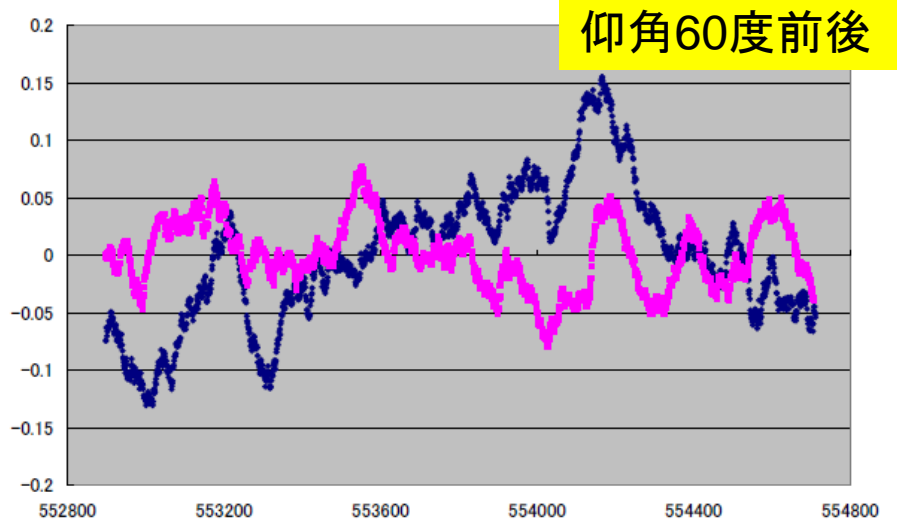
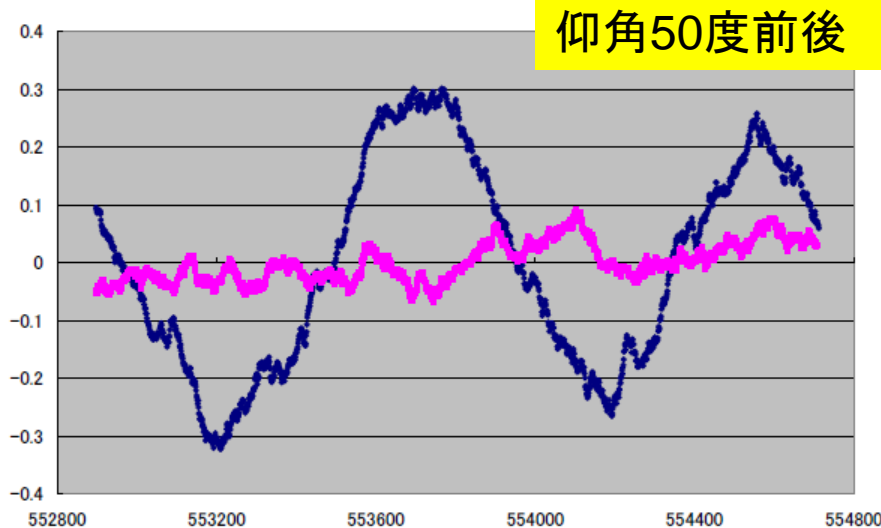
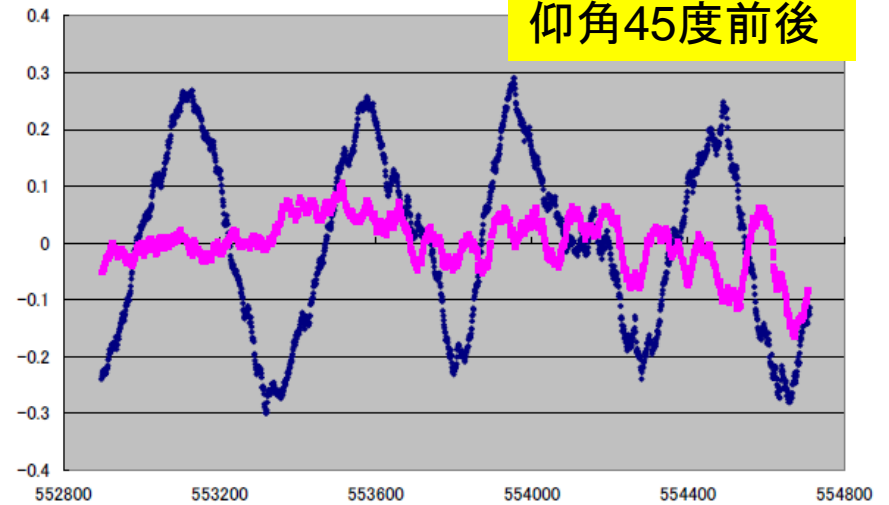
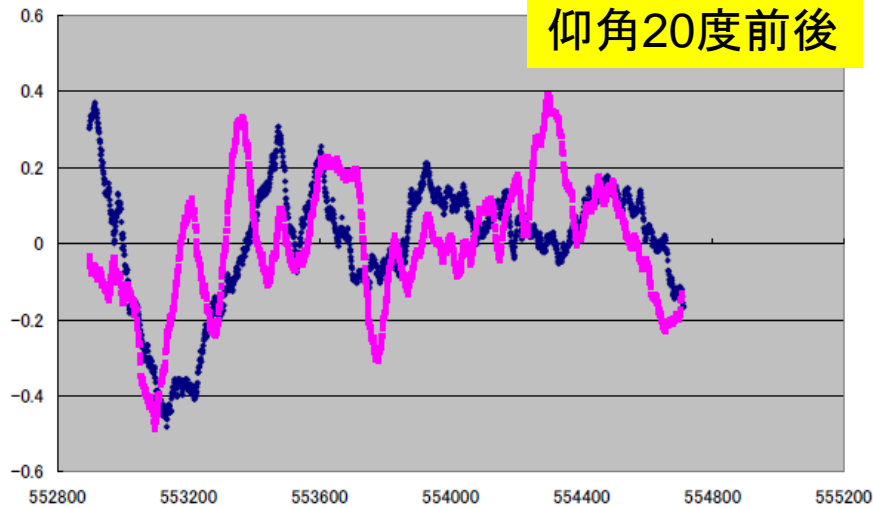


図2 遅延距離とマルチパス誤差の関係(振幅比0.25)

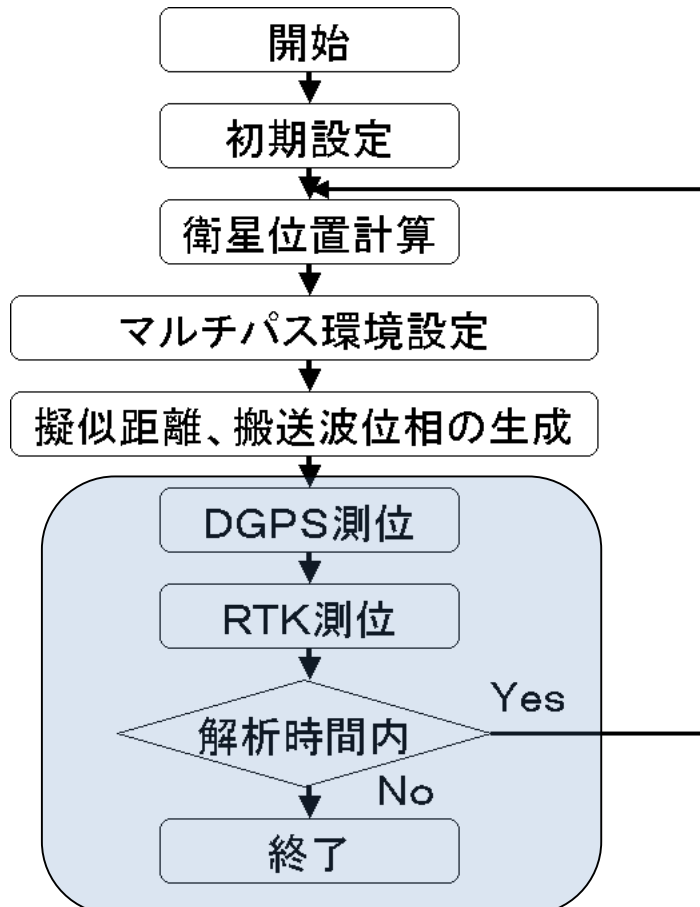
実際のコードマルチパス誤差の比較

(コードマイナスキャリア技術で算出)



測位シミュレーションソフトの開発

シミュレーションだと真値が1点になり、そこから誤差を付加していくため誤差がどのように測位結果に影響するのか眺めることができる



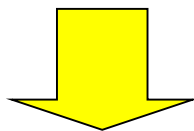
実環境のソフトと同じ

シミュレーションの概要

- 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
- 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、約1m程度の誤差を生じている
- **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。

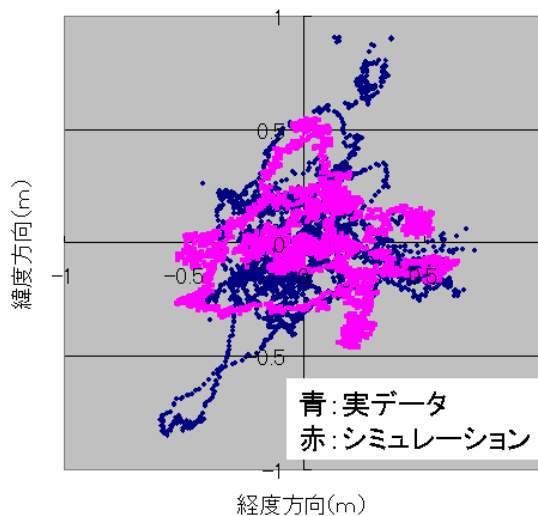


ただし、基準局データを利用したDGPSやRTK測位を行う場合は、

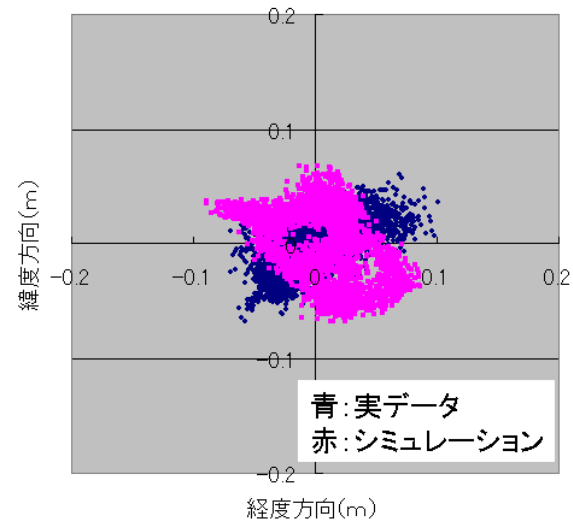
上記の全ての誤差について、短基線では、無視できるレベルに低減される

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(ワイドレーン)

細かい測位結果の変動は一致していないが、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。

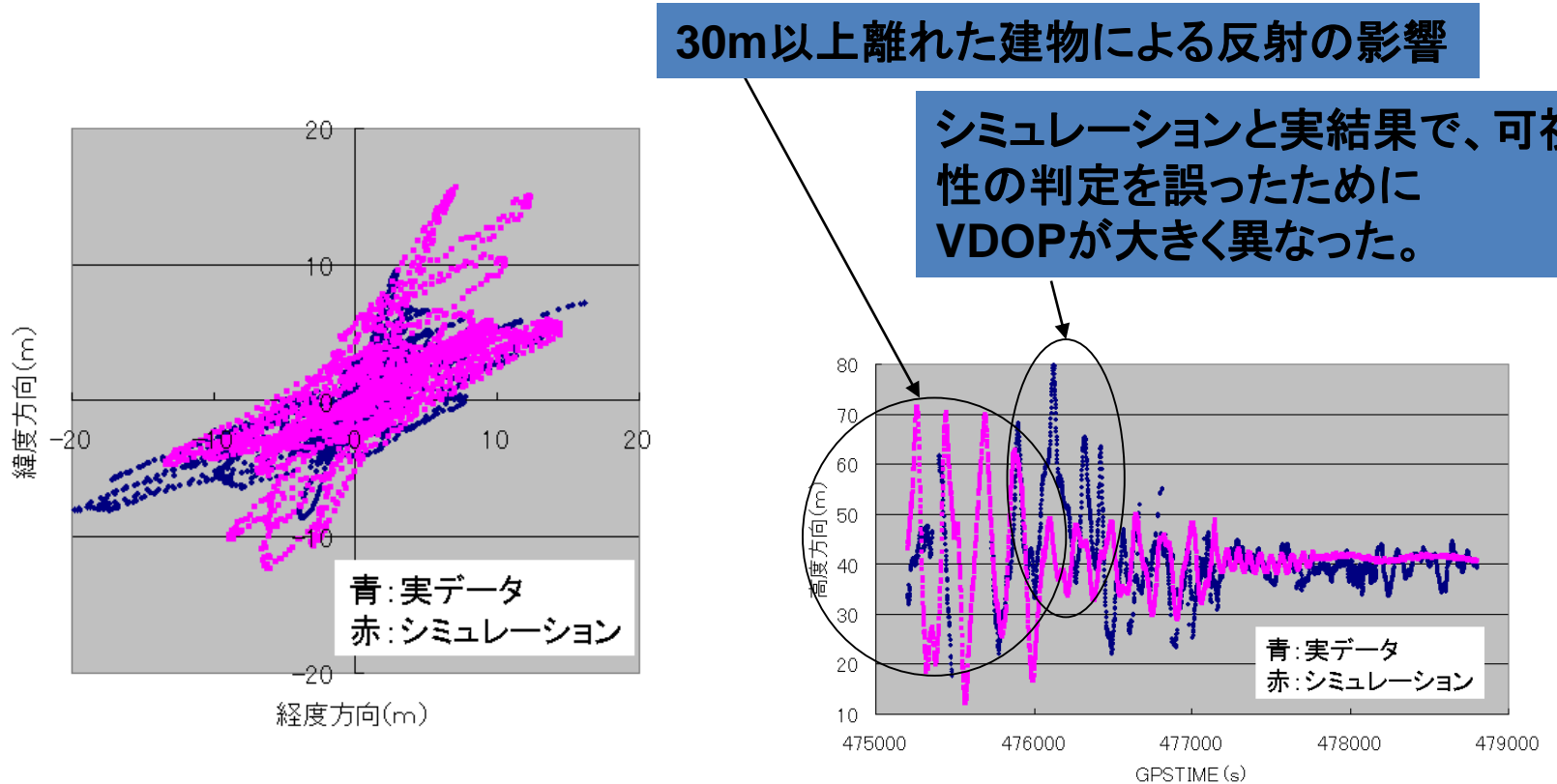


移動局1
5階の建物に近接している場所



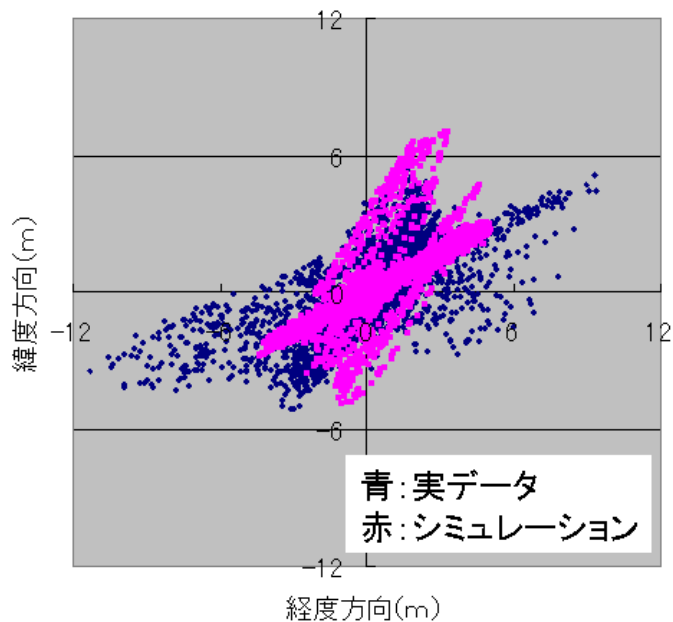
移動局2:10階程度のビルが
両側に並んでいる道路

移動局1: ナローコリレータでのDGPS測位結果(実データとの比較)



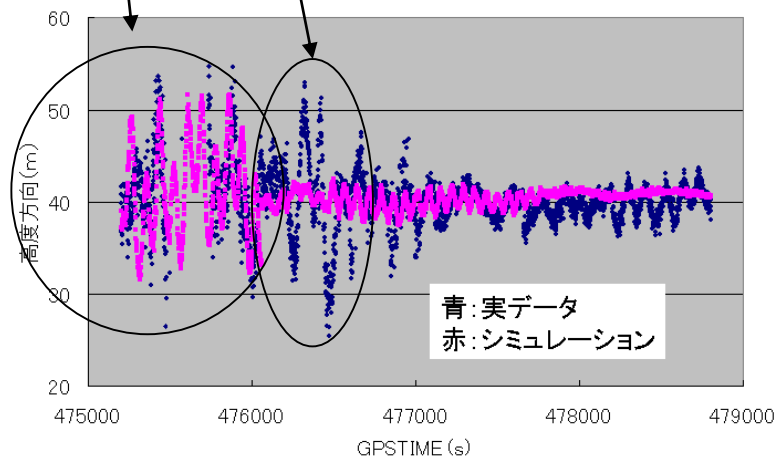
水平方向、高度方向ともずれはあるものの、測位精度の概要を把握するには良好なシミュレーション結果が得られている。

移動局1: 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)

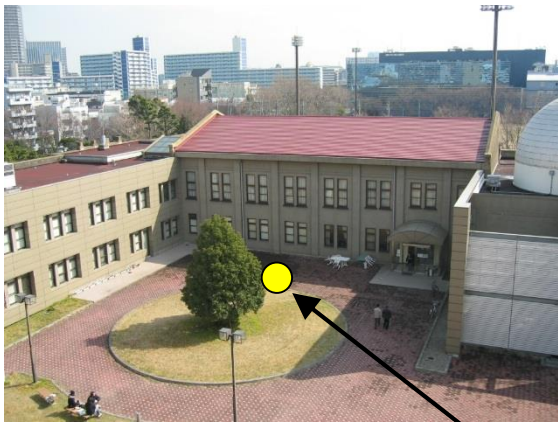
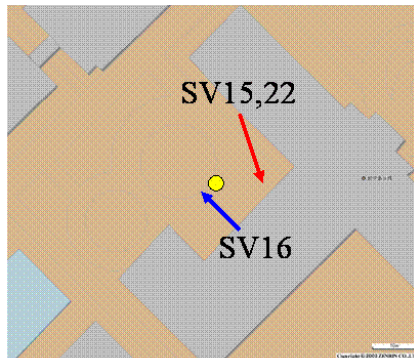
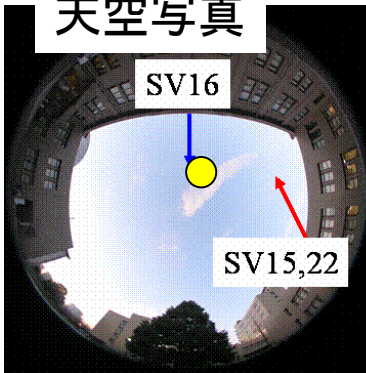
前スライドと同様の理由



前スライドと同様に、シミュレーションの妥当性をある程度確認できる。これらの結果をベースに
実目的である 提案手法による効果やGPS近代化による効果
(準天頂衛星の追加効果)を予測するためのシミュレーションを実施できる

実際のマルチパスによる影響

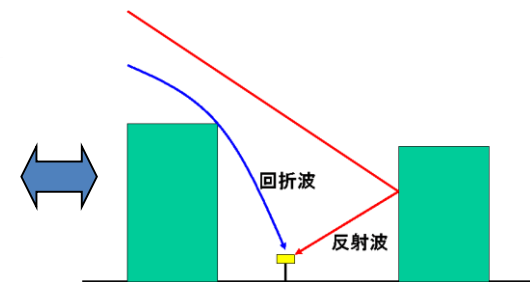
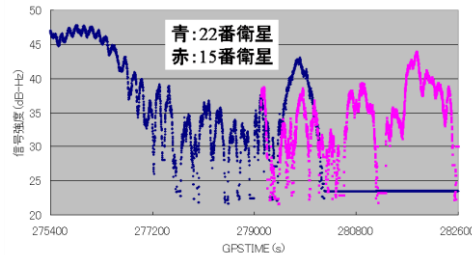
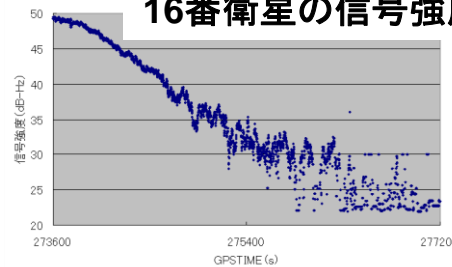
天空写真



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)

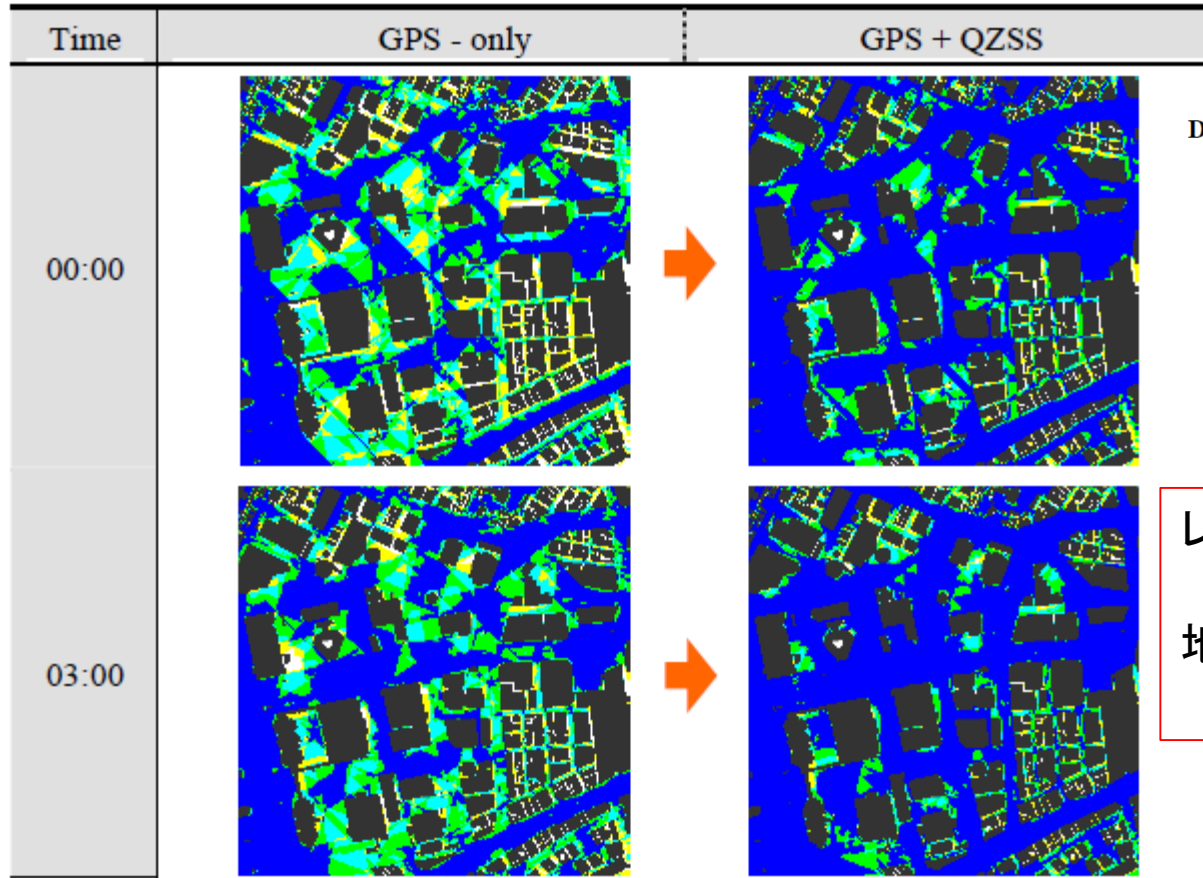
周囲が囲まれている場所でデータ取得。
取得日は2004/12/15

3D地図を利用したシミュレーション

準天頂衛星3機体制 新宿での可視性

2004年の東大柴崎研のSuh様のD論

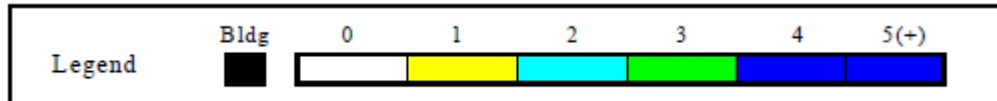
Map of the Number of Visible Satellites



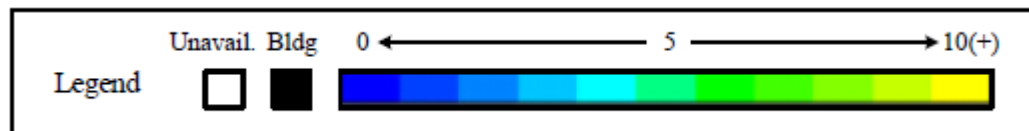
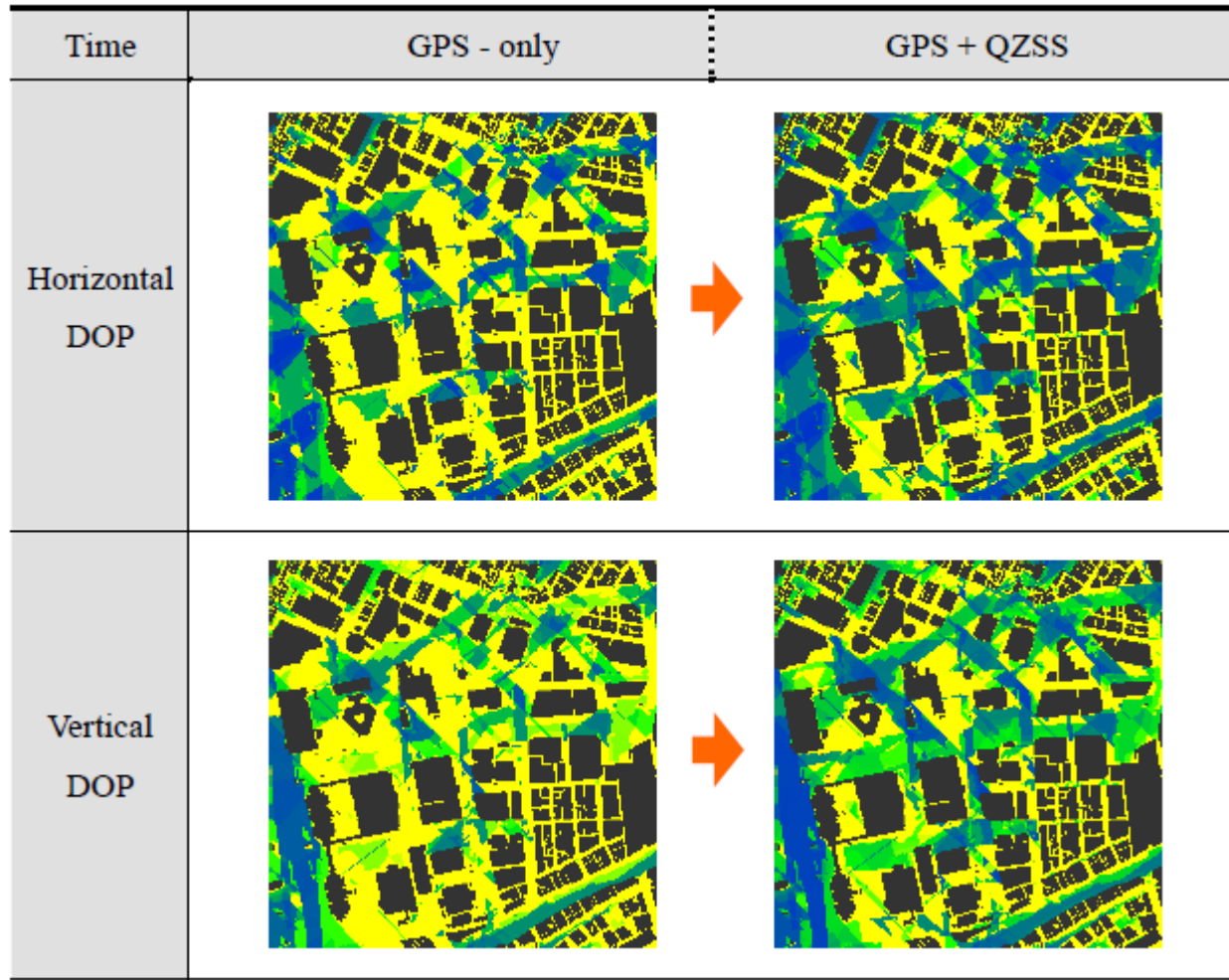
Development of a Simulation System to Evaluate the Availability of Satellite-based Navigation Services Using Three-Dimensional GIS

三次元 GIS を用いた衛星測位サービスの利用可能性
評価のためのシミュレーションシステムの開発

レイトレースは自前
→メンテが大変
地図はレーザ高精度データ
→高価

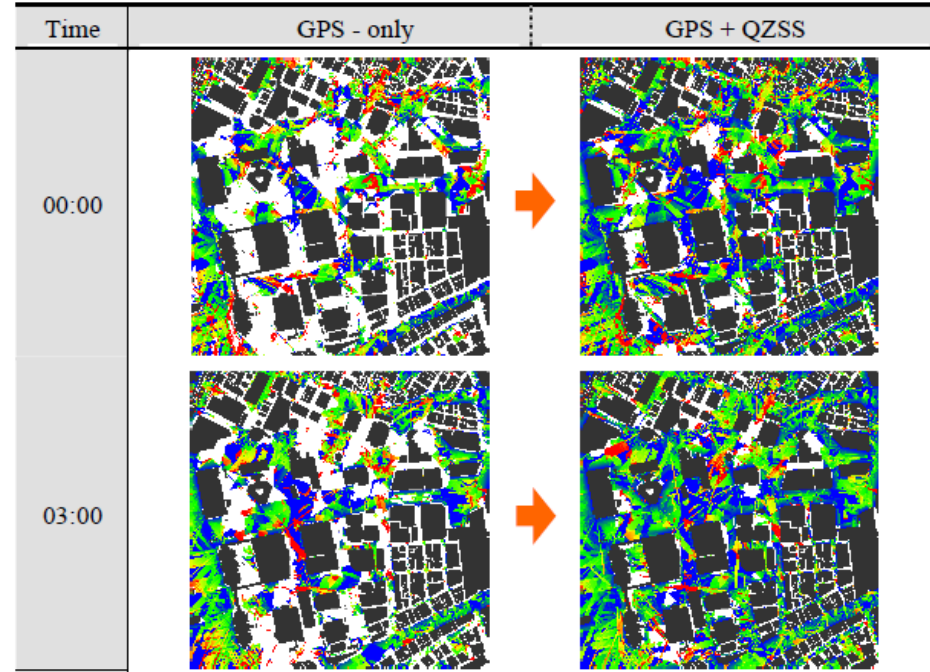


準天頂衛星3機体制 DOP評価(新宿)

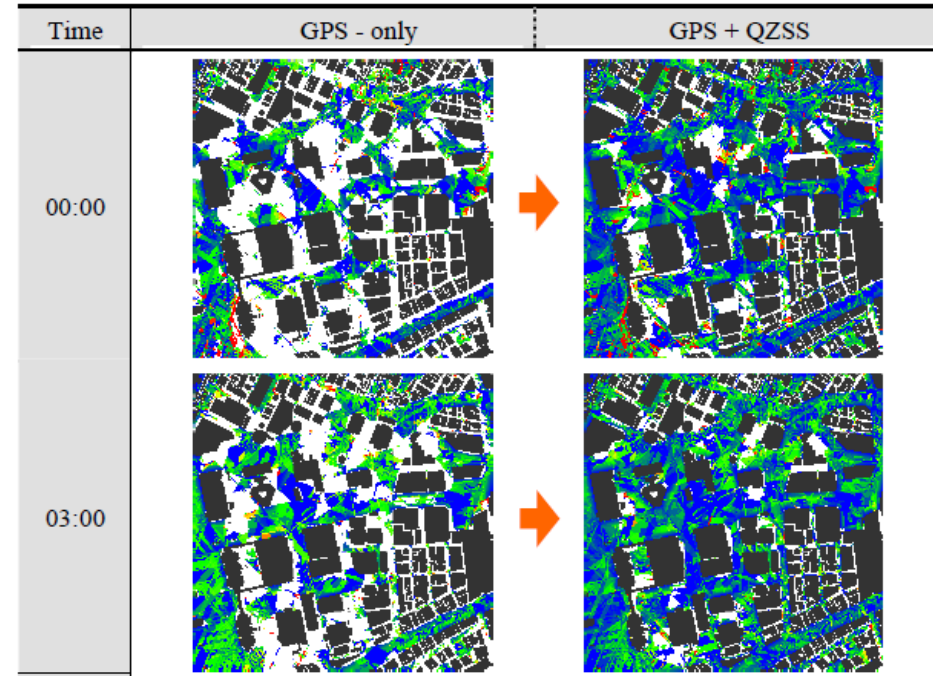


準天頂衛星3機体制 精度評価(新宿)

Map of the Predicting Positioning Error in 1.0 Chip Correlator Spacing



Map of the Predicting Positioning Error in 0.1 Chip Narrow Correlator Spacing

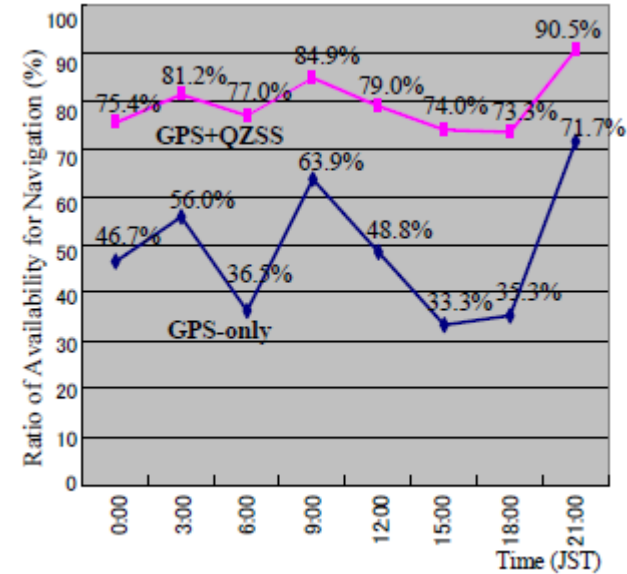
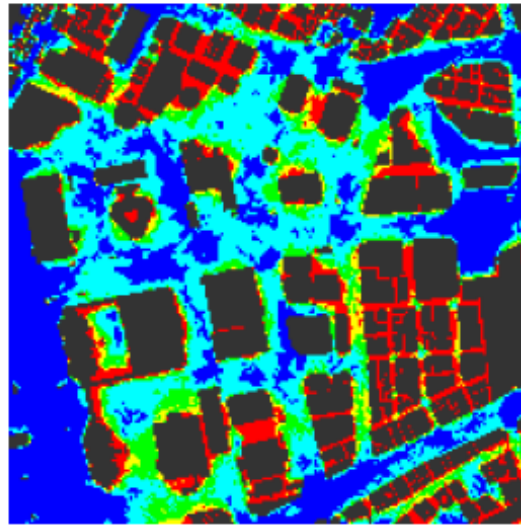
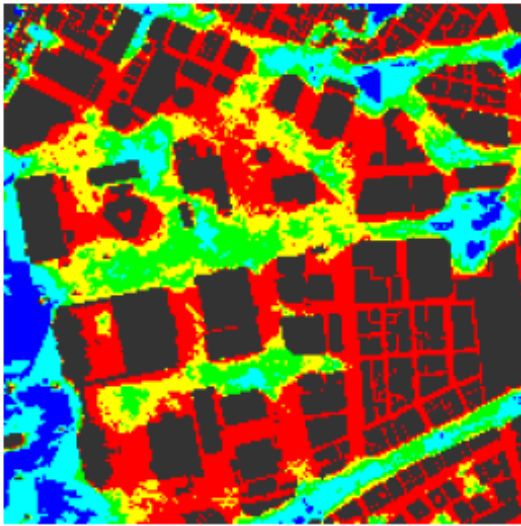


左が低コスト1チップ受信機 右が高コスト0.1チップ受信機
 0.1チップのコリレータのほうがマルチパスの影響を受けにくい
 白い箇所は利用衛星数が4機未満

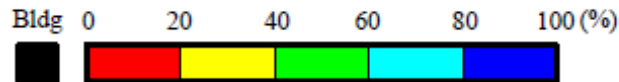
任意の位置での24時間の利便性(%)

GPS - only

GPS + QZSS

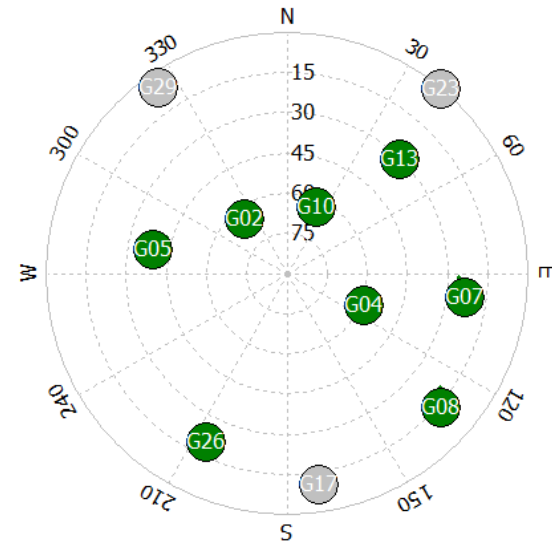


Legend



3D地図電波伝搬結果による 測位シミュレーション(Raplab7)

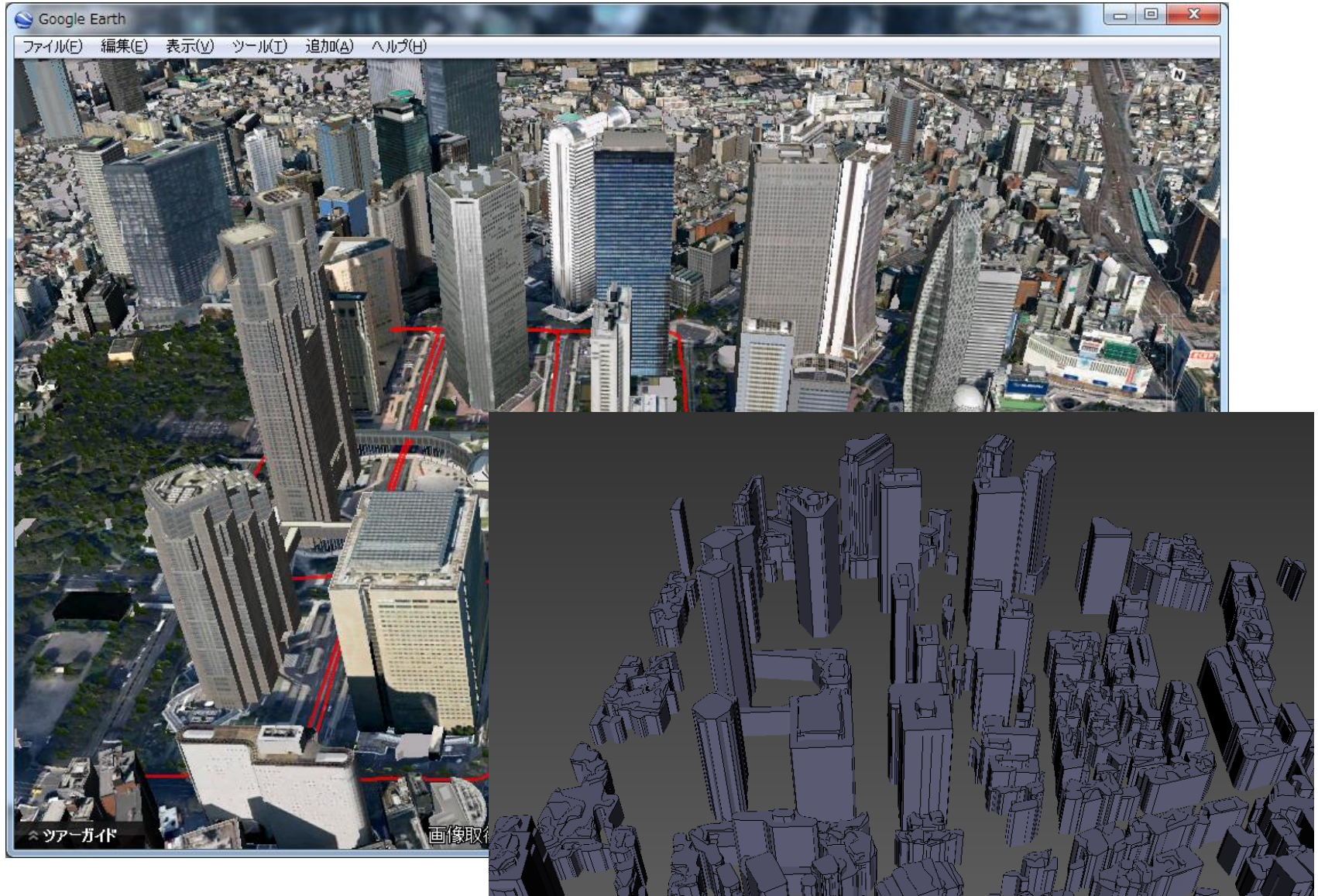
- 新宿を走行したときのデータを使用
 - 2012年12月 約16分(1Hz) レファレンス真値が別途有り
- 地図として国際航業のレーザ測量点群(2006)を自動変換したもの
- 1km × 1kmの地図内を走行した点のみで計算を行う
 - 具体的には14:21-14:37の間の953エポック(秒)
- RapLap V7を使用
 - 1.575GHz, 右回り円偏波, 建物材質:コンクリート
 - 反射1回, 回折1回のみ
 - 受信点の半径200m以内の建物のみを計算に使用



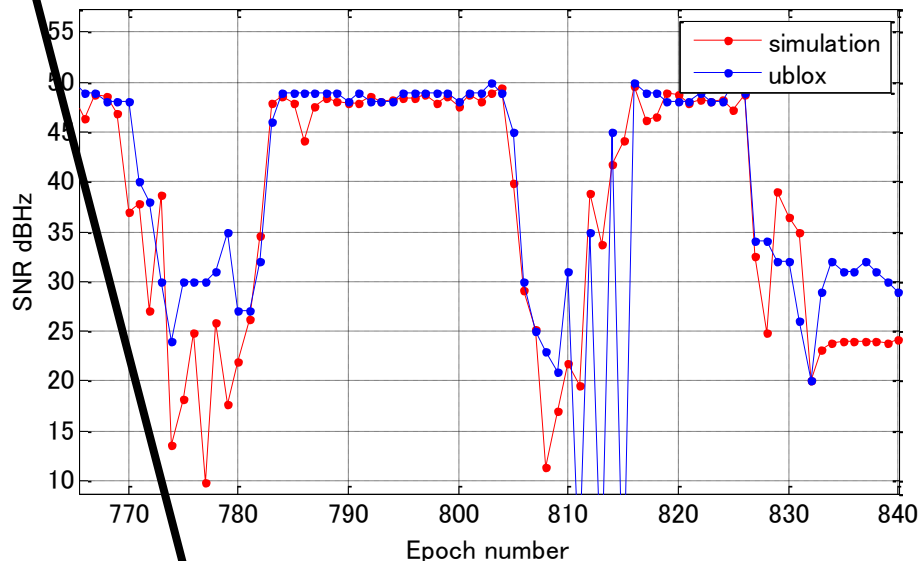
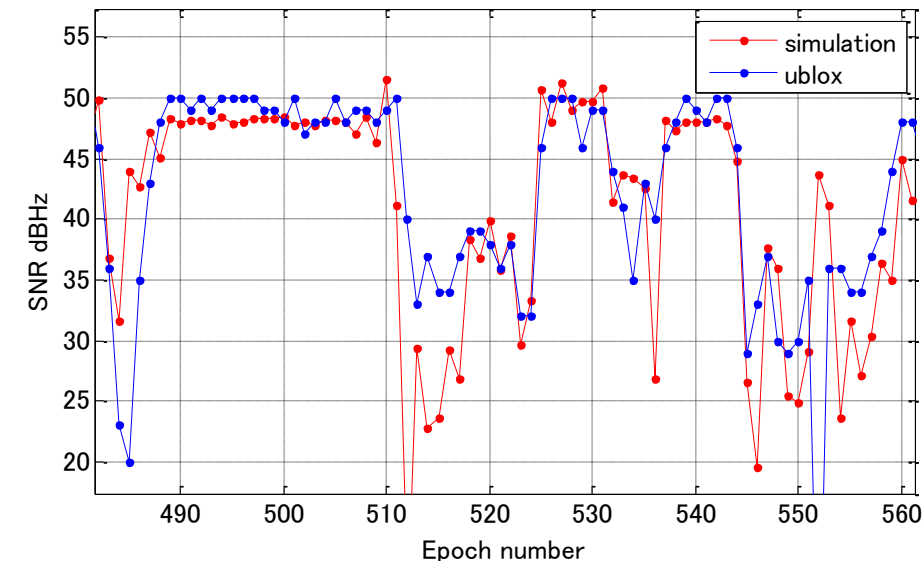
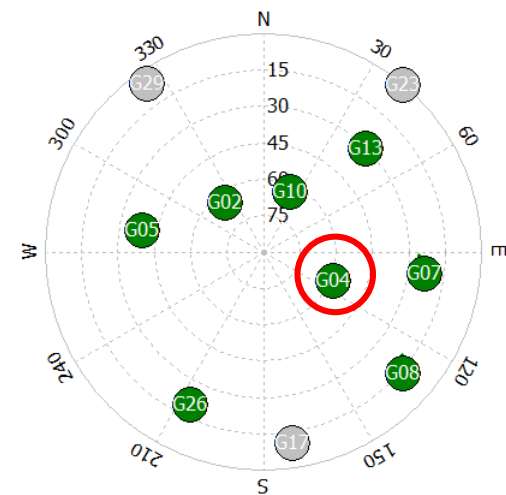
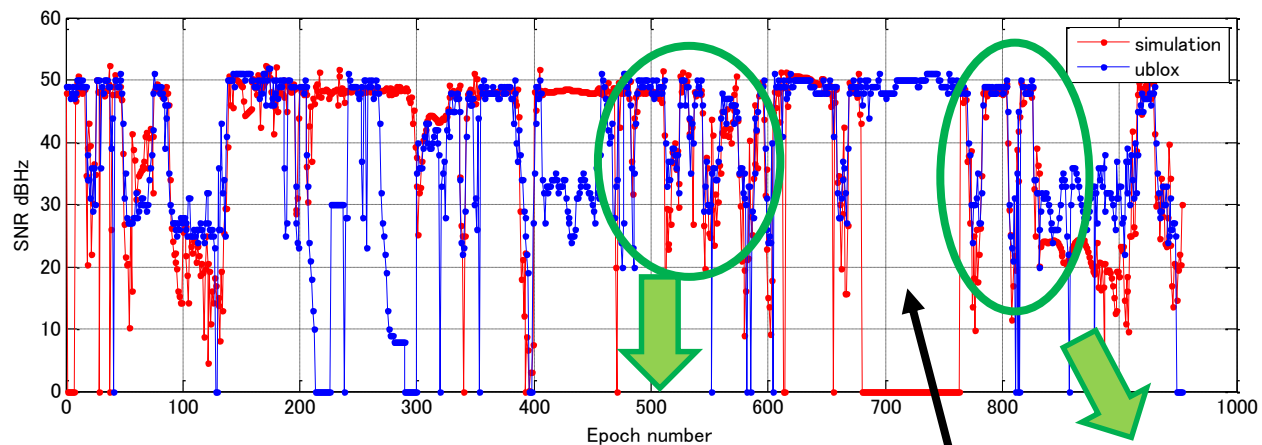
上記8衛星を対象

走行経路と3D地図

赤: シミュレーションに用いる走行経路

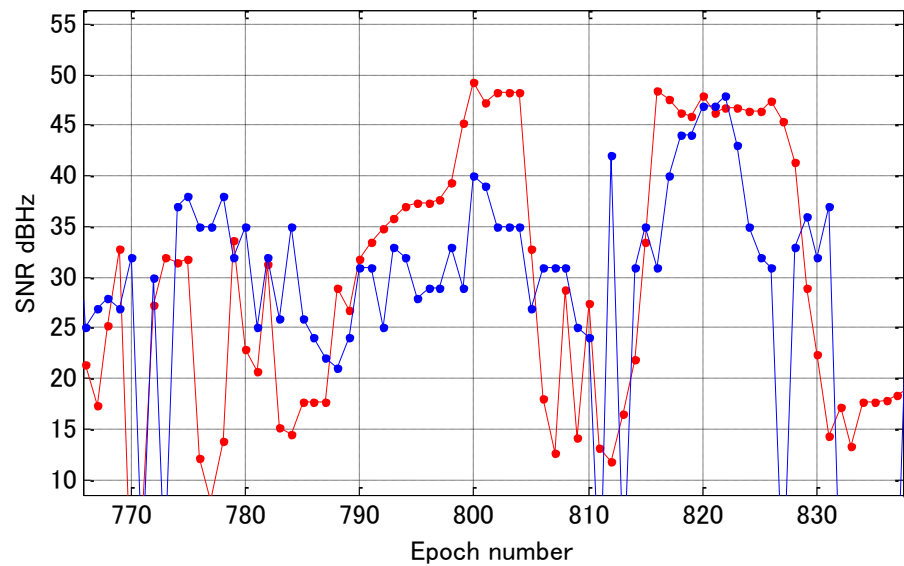
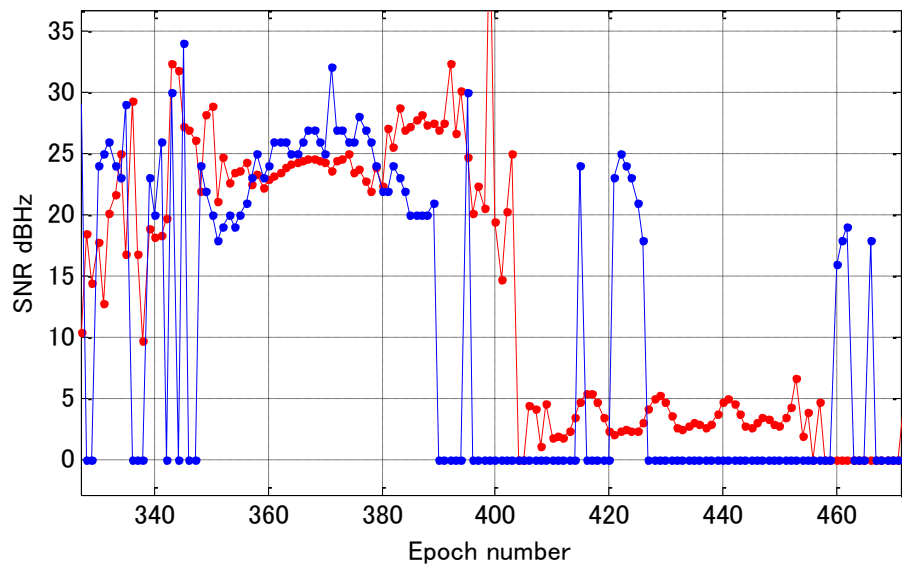
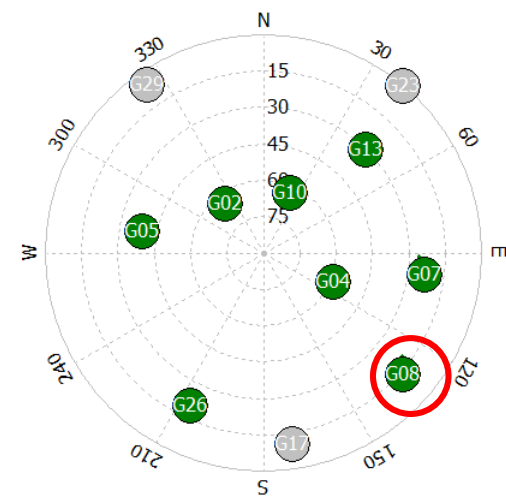
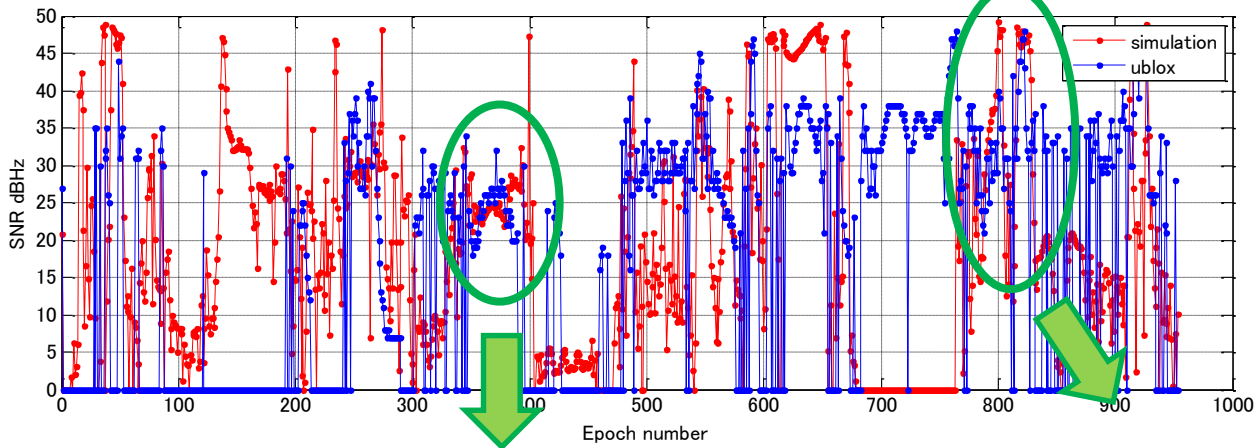


シミュレーション結果と低コスト受信機の比較 PRN4 拡大図

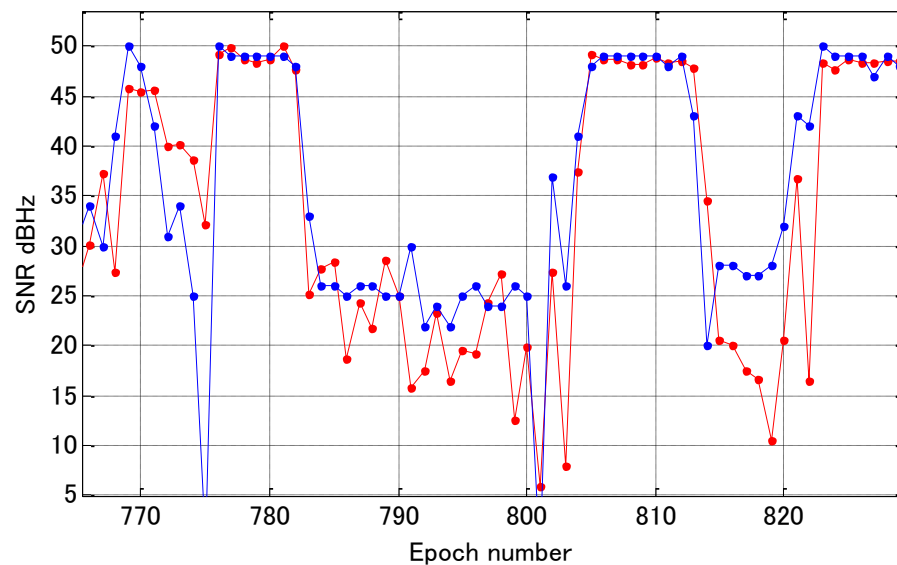
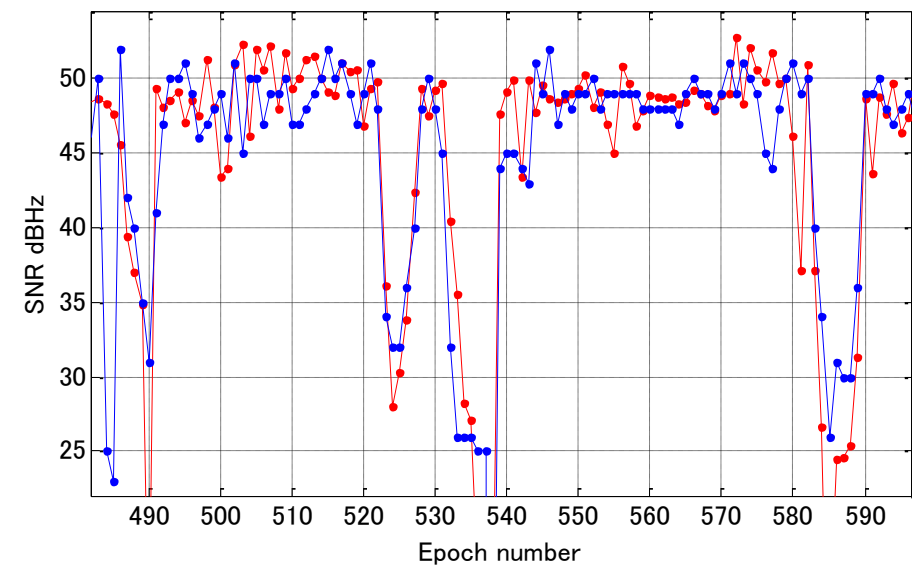
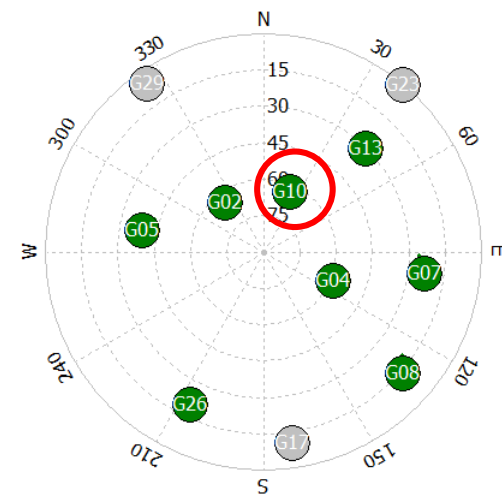
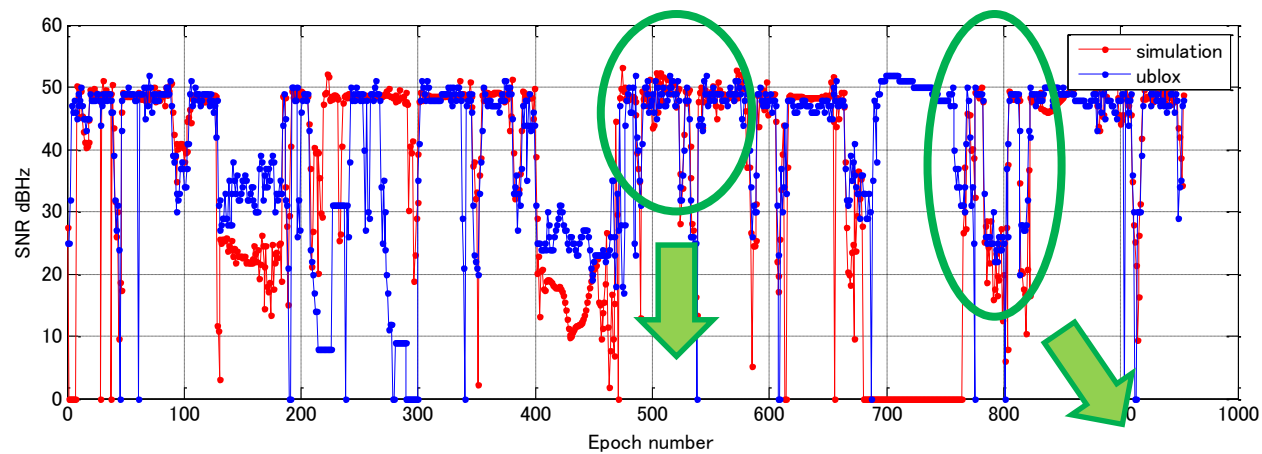


樹木をビルとして構築してしまったため、シミュレーション点がビルの中。
その結果衛星数が0になってしまった

シミュレーション結果と低コスト受信機の比較 PRN8 拡大図

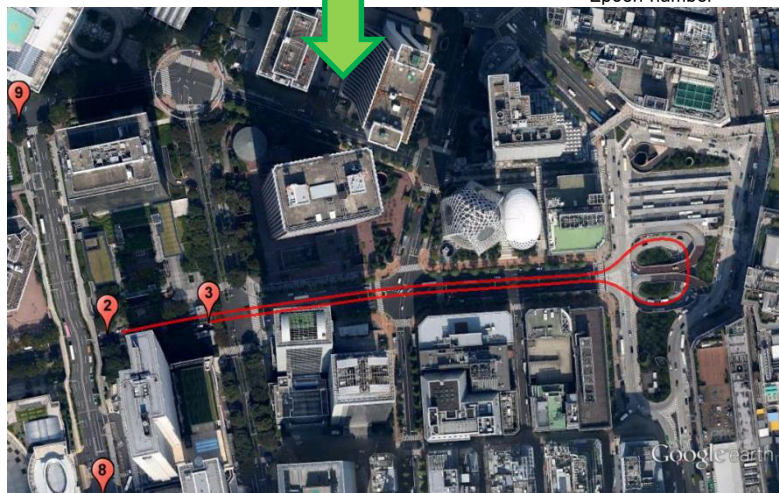
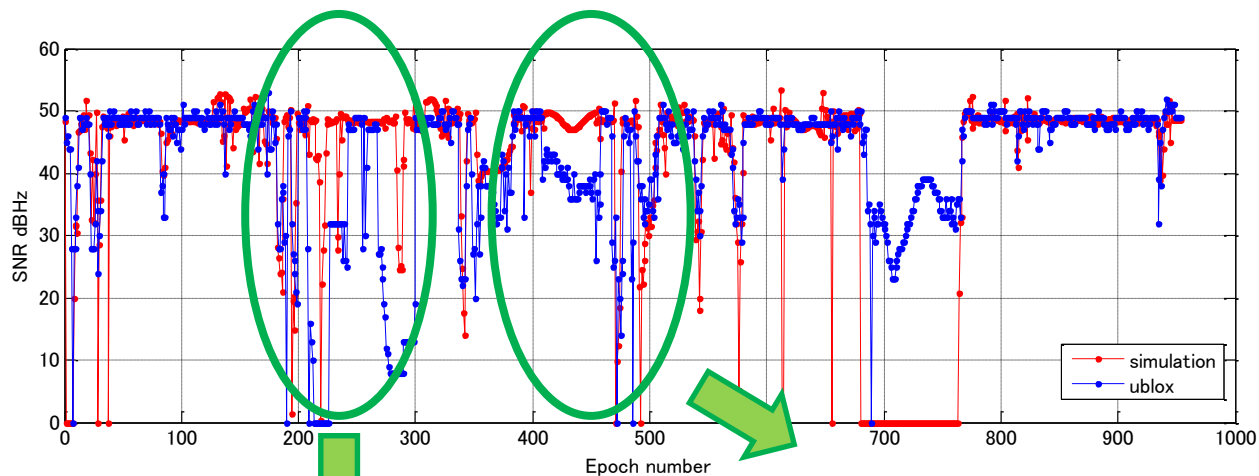


シミュレーション結果と低コスト受信機の比較 PRN10 拡大図

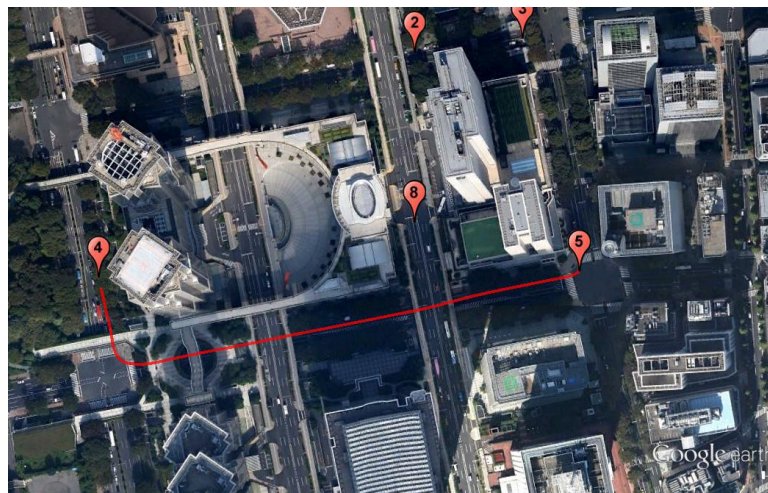


シミュレーションと実データとのまとめ

- 三次元地図が実環境と合うように正しく構築されている地点では良く一致する
- 現在の地図では、高架、立体交差、トンネル、樹木が正しく構築されていない
- 例: PRN2衛星



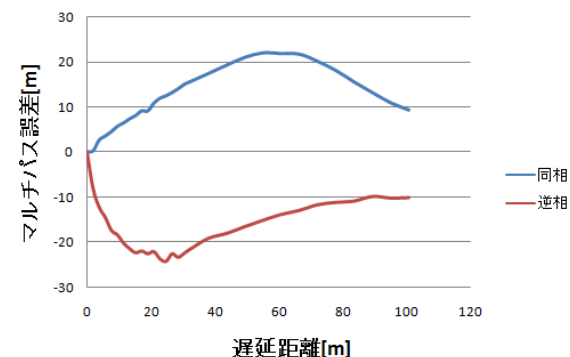
長いトンネルをくぐる箇所



多くの高架を潜る場所

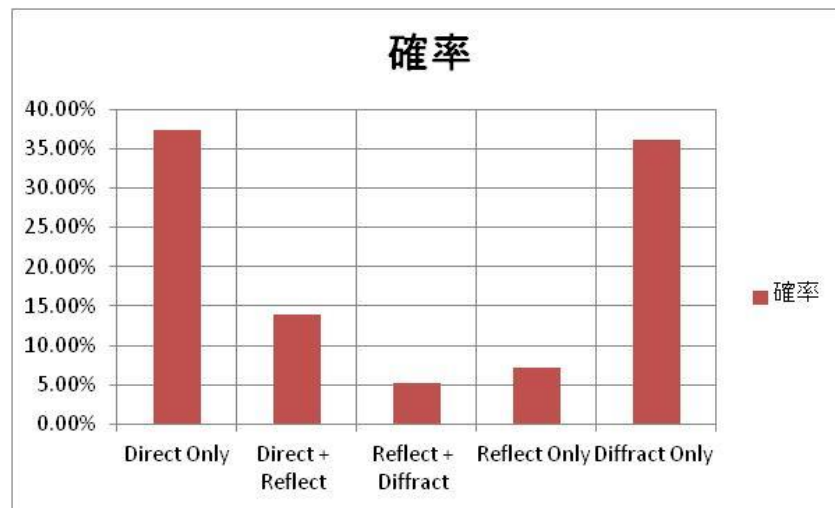
測位シミュレーション

- 前スライドのRaplabによる電波伝搬結果をCSVで読み込み、測位シミュレーションを実施
- 衛星位置はアルマナック利用
- 衛星位置とPOS/LVの位置より真の擬似距離算出
- 測位誤差要素として、信号強度による雑音とマルチパス誤差(直接波、反射波、回折波の様々な組み合わせ)を付加→衛星位置クロック誤差と大気圏誤差は現状の単独測位でも2-3mに入っているため考慮せず(考慮することは可能)
- 受信機コリレータはublox受信機相当(右下図)
- マスク角15度 最低信号レベル20dBHz HDOP<20
- POS/LVの位置結果と比較してチェック



電波伝搬種別（新宿コース）

	度数	確率
Direct Only	2554	37.4%
Direct + Reflect	954	14.0%
Reflect + Diffract	359	5.3%
Reflect Only	495	7.2%
Diffract Only	2467	36.1%



	直接波	反射波	回折波	
#1	0	0	0	信号なし→例外
#2	0	0	1	信号強度で支配的な回折波選定
#3	0	1	0	信号強度で支配的な反射波選定
#4	0	1	1	反射波が支配的→0,1,0で計算
#5	1	0	0	そのまま
#6	1	0	1	1,0,0で計算
#7	1	1	0	そのまま
#8	1	1	1	1,1,0で計算

Raplabで出力される反射波、回折波の数は非常に多い
→信号レベルで選定する

走行データでの測位率と精度比較

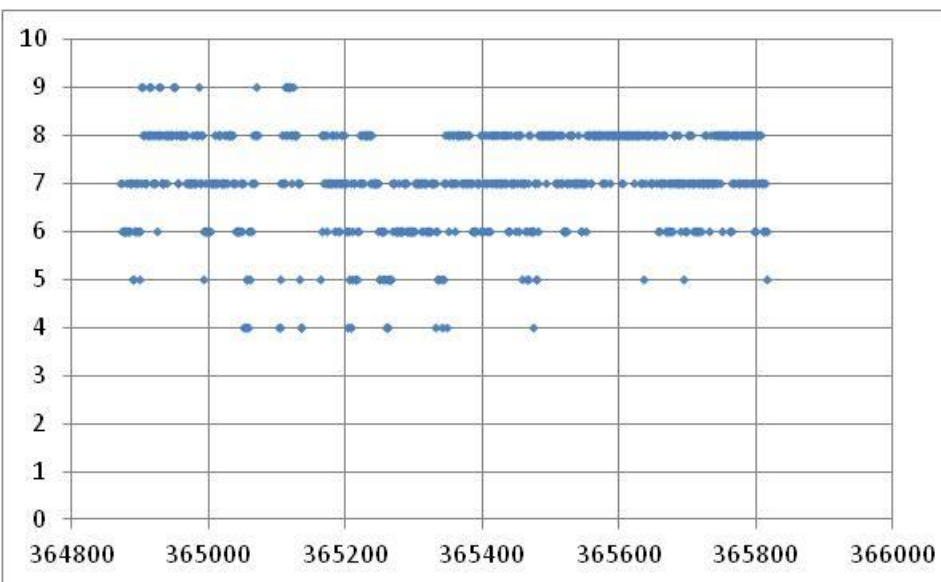
測位率	u-blox	シミュレーション
20dBHz	93.2%	89.5%
30dBHz	86.5%	84.9%
35dBHz	63.4%	74.8%

精度(20dBHz)	u-blox	シミュレーション
経度方向(m)	51.2m / 2.1m	57.0m / 2.6m
緯度方向(m)	73.8m / 9.1m	77.2m / 17.3m
水平絶対(m)	53.7m	58.0m

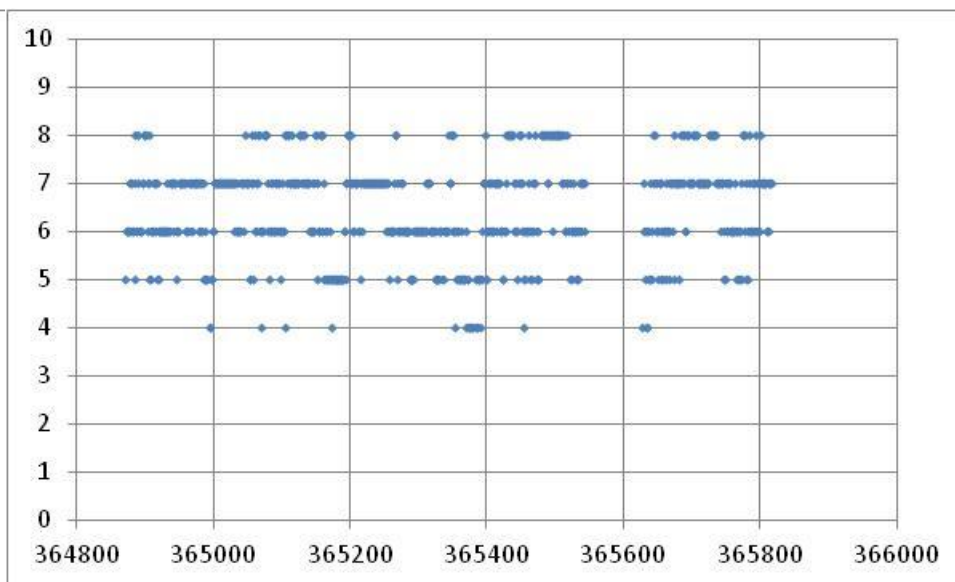
***/**は左が標準偏差、右が平均ずれ

測位率、精度ともにある程度一致

実際の時系列利用衛星数の比較



u-blox



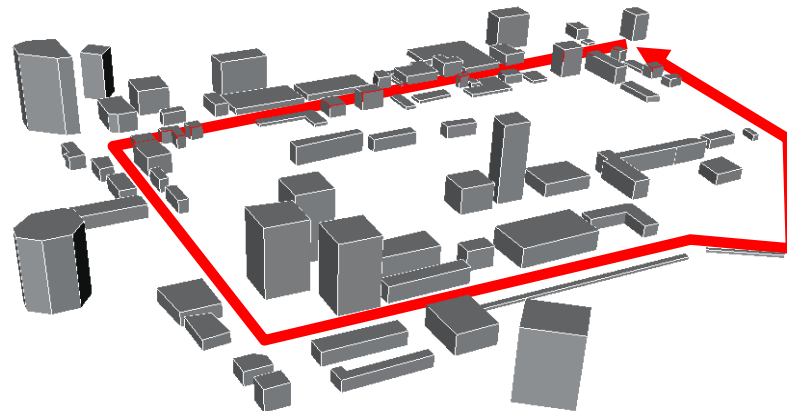
シミュレーション

利用衛星数の変化がある程度一致

シミュレーションのみで、利用できる衛星やそれらの信号強度がある程度一致してくると、測位性能という面での性能予測が可能となる

測位シミュレーション (Raplab8)

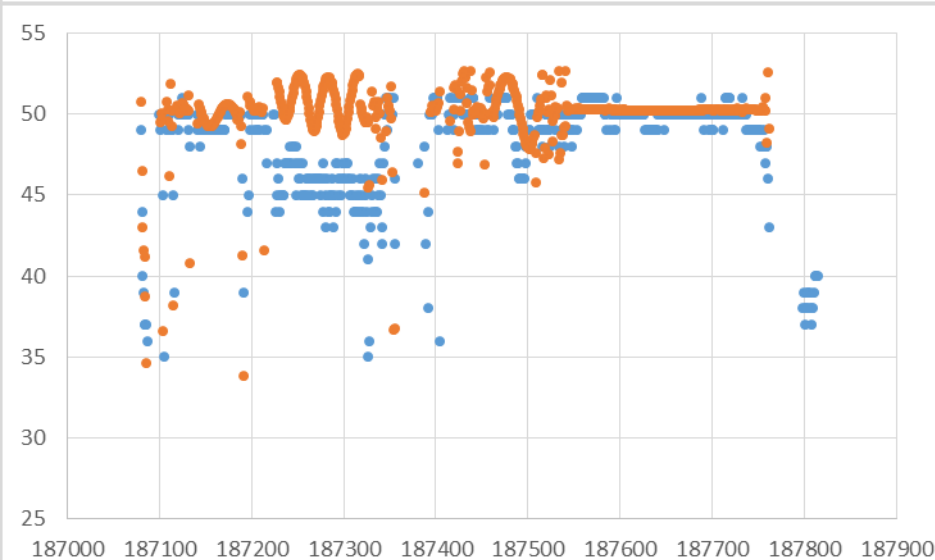
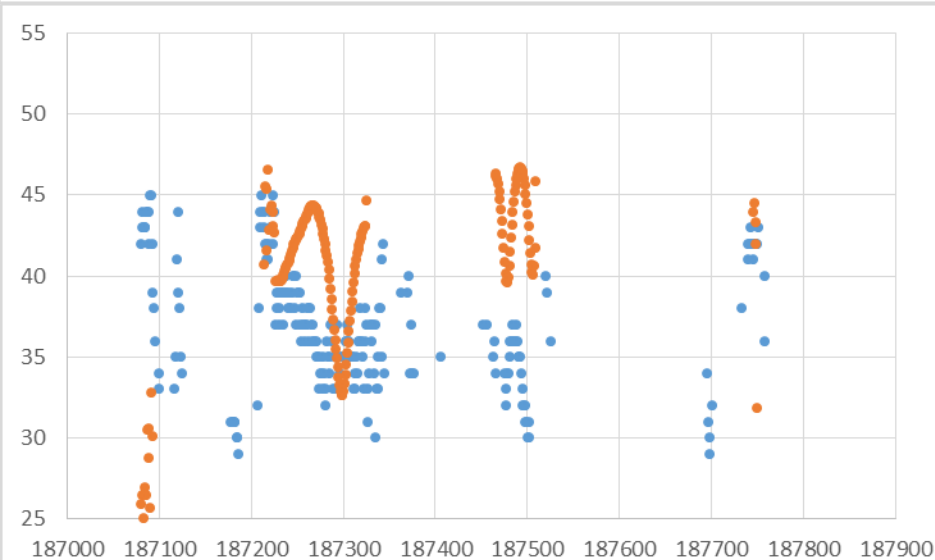
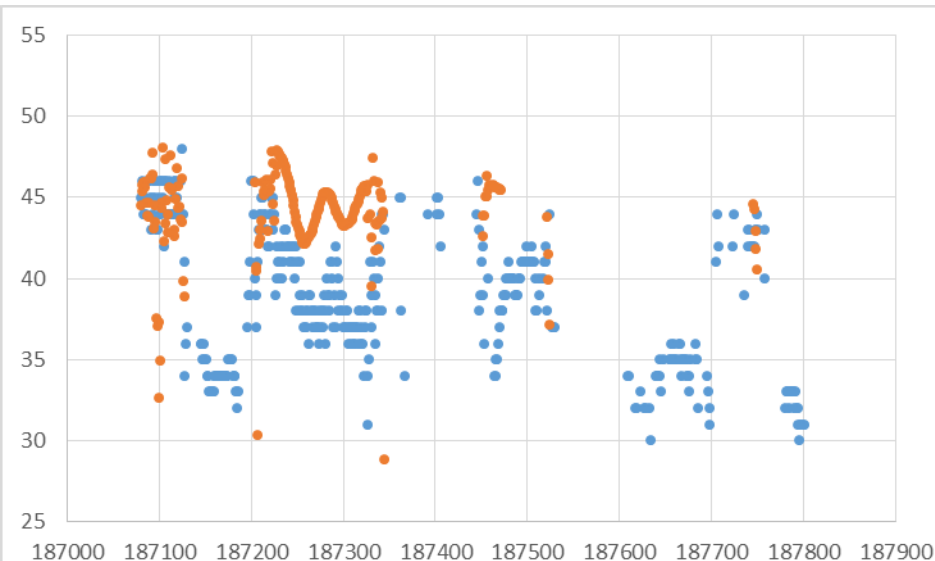
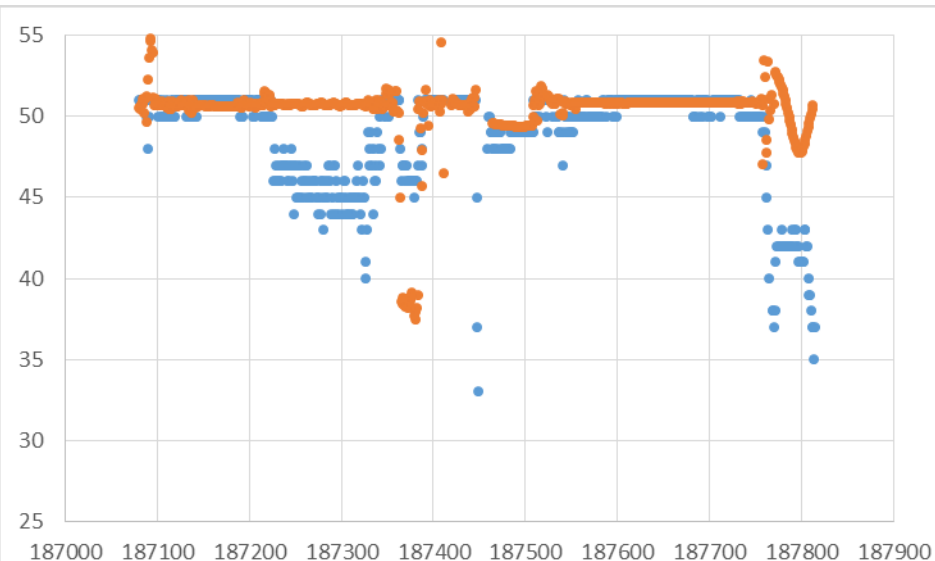
- 構造計画の古川様の協力を得て実施
- 月島で取得した実験観測データ(2013年10月1日の月島周回約13分データ)を利用。測量受信機と低コスト受信機及びレファレンス真値があるため分析に使いやすい
- 3D地図はゼンリン社のデータ
- 電波伝搬部分計算はRaplabにまかせる
- 測位シミュレーション部分はさきほどと同様
- 1, 8, 9, 11, 17, 19, 20, 28, 32の9衛星対象



月島走行経路と
3D建物データ群

信号強度の比較 (dBHz)

橙: シミュレーション 青: 実データ (ノバテル)

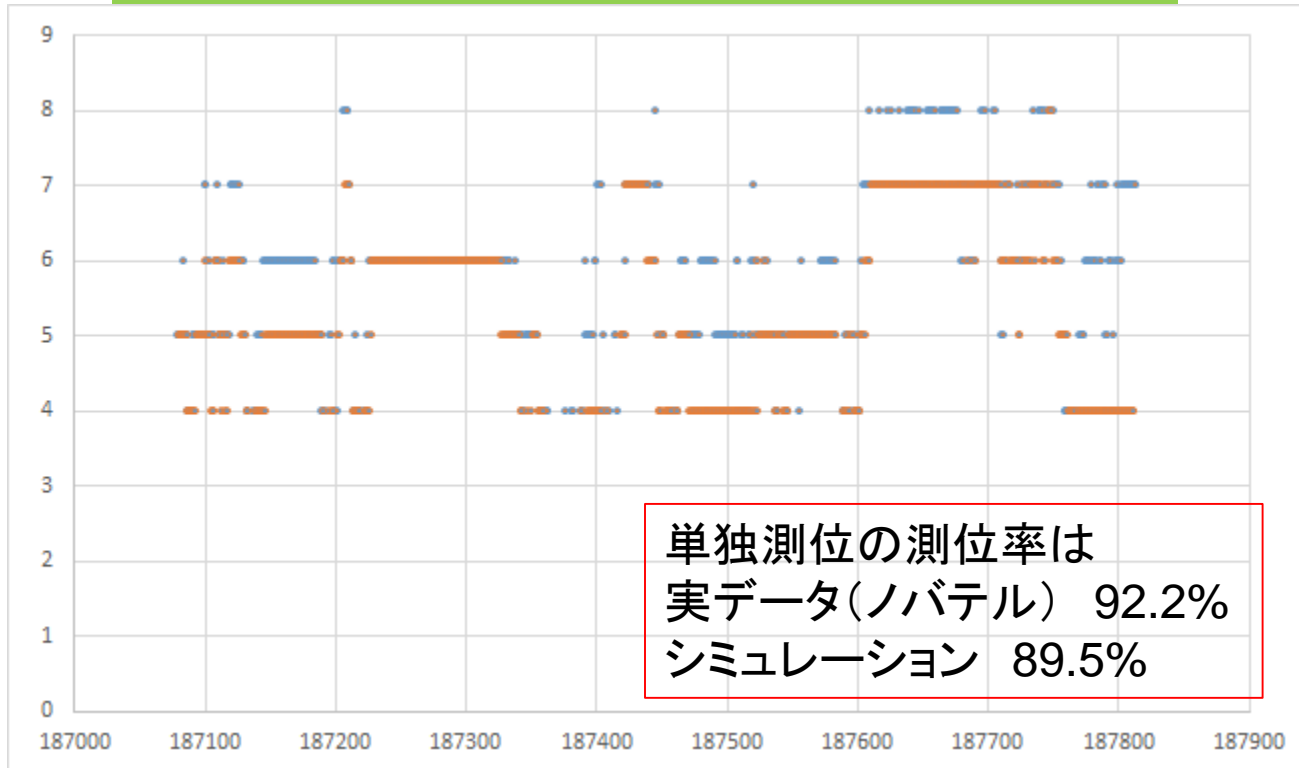


利用衛星数の比較

橙: シミュレーション 青: 実データ(ノバテル)

マスク角15度、HDOP<10、最低信号強度30dBHz

利用衛星数



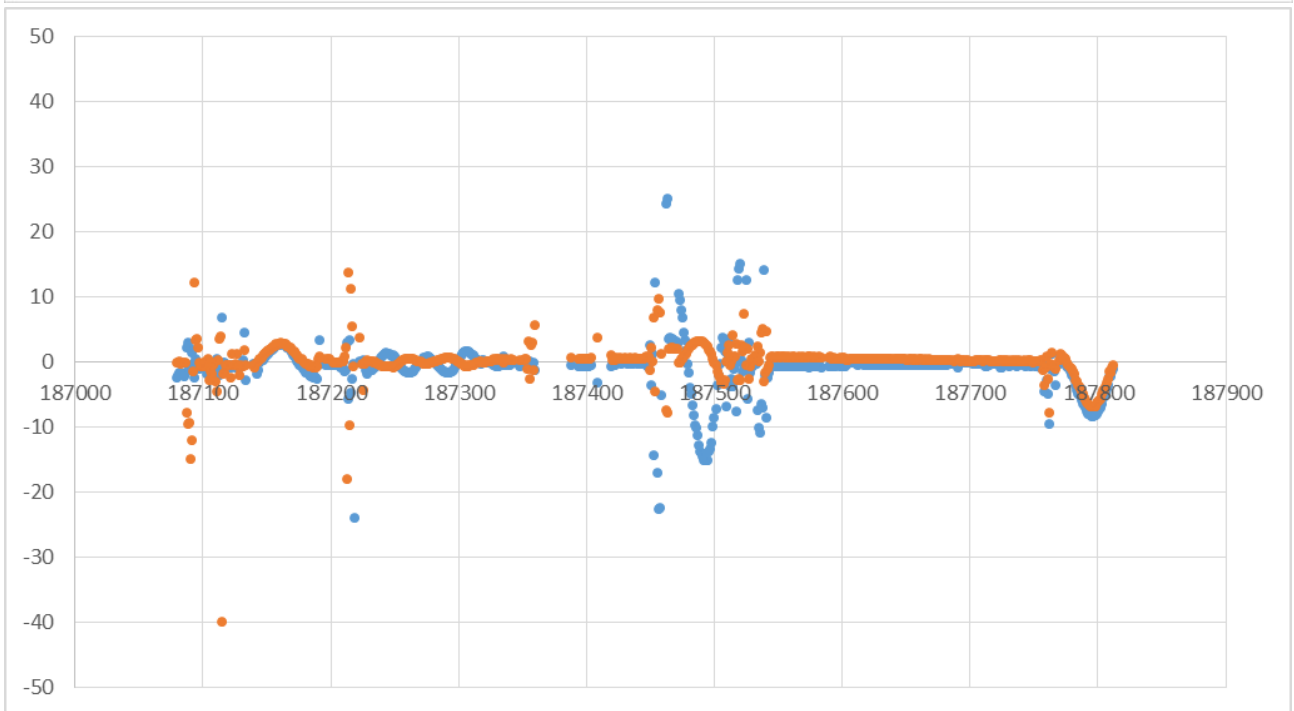
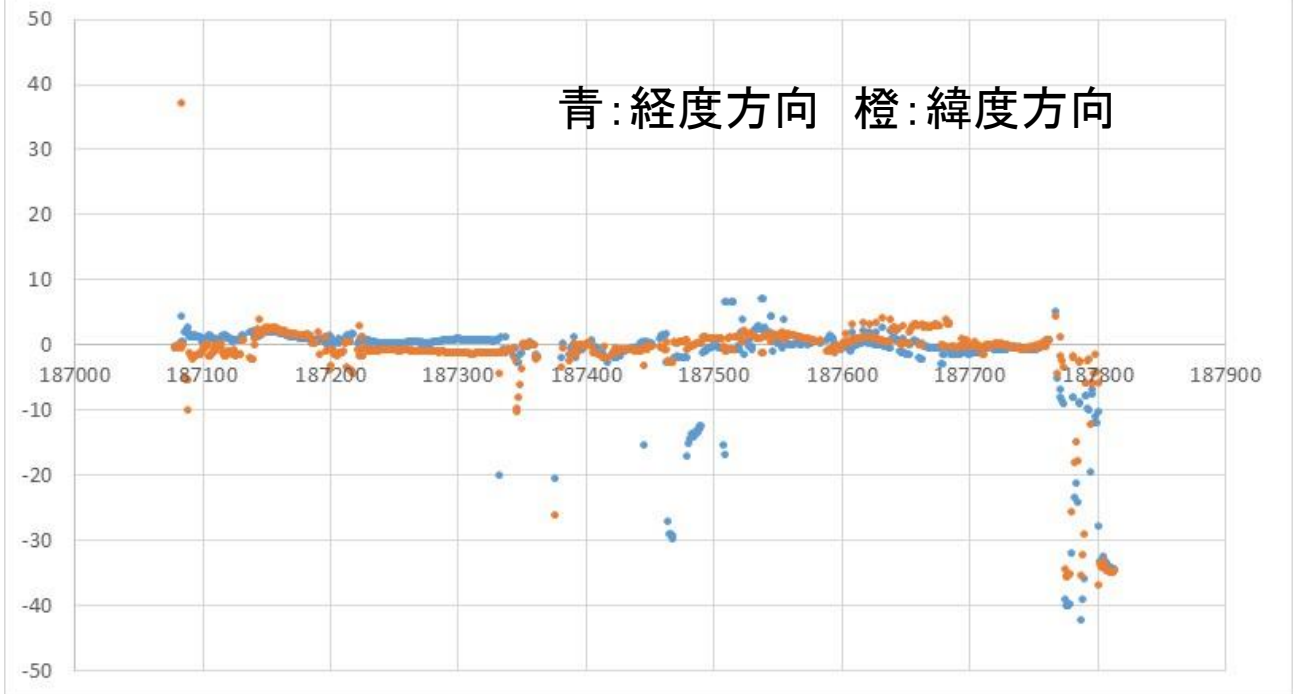
GPS時刻(秒)

予想以上に一致する結果となった

測位誤差の比較

実データ(ノバテル)

シミュレーション



シミュレーションの利用場面と課題

- 前述の衛星測位シミュレーションをマスク角だけでなく、3D地図も含めて実施可能
- GNSSでカバーできる領域とそうでない領域の判断をあるコースではなく道路全体で実施可能
- 国内だけでなく海外でもシミュレーション可能
- 実験計画時に、前もって期待される性能を推定可能→データを蓄積→推定精度が向上(両輪)
- お客様になぜ精度が劣化するかの説明を補強できる(例えば歩行者測位の場合、歩道は車道に比較してレイが悪いことは明らか)
- 移動体を考慮したシミュレーション
- 建物以外の障害物
- どこまで正確に回折波等を取り扱えるか

全体のまとめ

- GNSSが利用される場面が