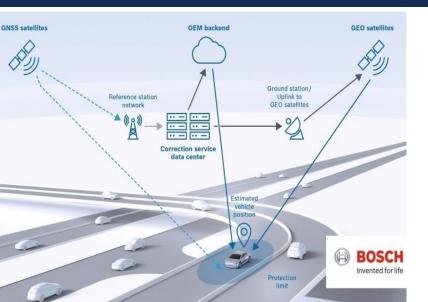
ドップラー速度を利用したNLOS衛星検出 2G09

東京海洋大学 情報通信工学研究室 尾関友啓

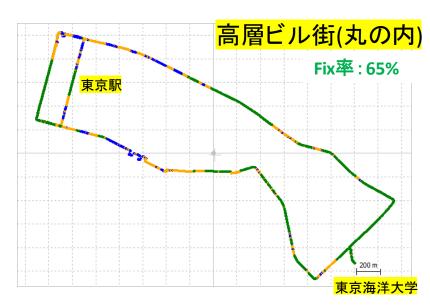
研究背景



出典: Panasonic

出典:docomo

出典:Bosch



出典: Softbank

研究背景

- ・GNSSの利活用が容易 高精度を求めることも重要だが、ミスFixなどの精度保証も重要 (特にマルチパス環境下)
- ・一例として、東京駅(八重洲)付近で約30分間停車時にRTK(F9P)を行った場合、Fix率は69%だったが、後半10分間はミスFixしていた(右下図)

GNSSと外部センサーを組み合わせることでミスFixを除去可能しかし、GNSSからの出力を改善することも依然として重要



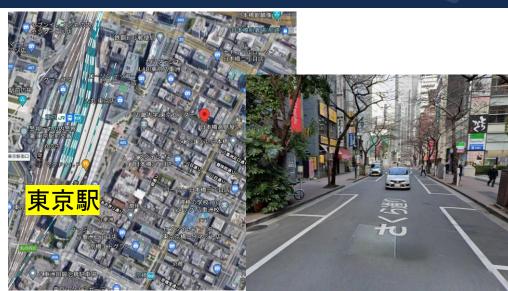
Lidar

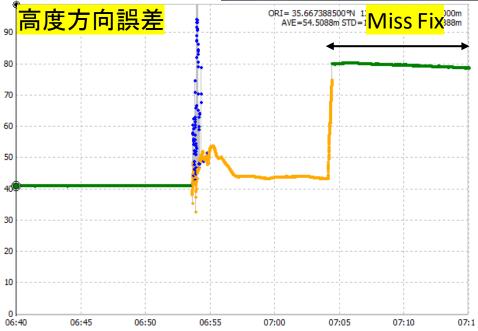


IMU

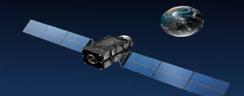


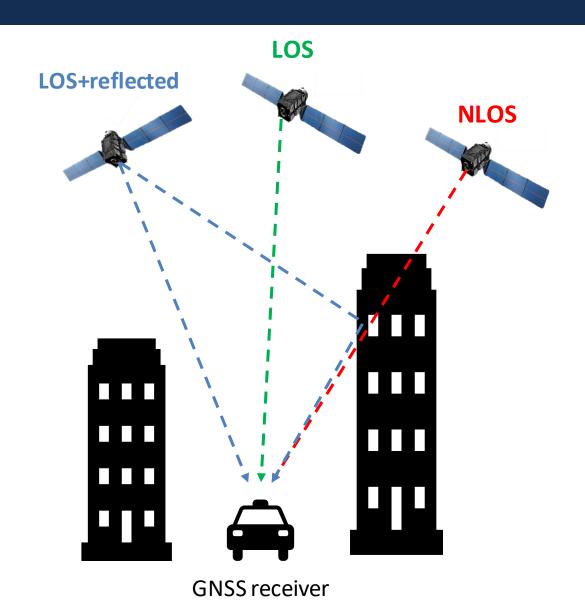
スピードセンサー





マルチパス環境下におけるGNSS信号





LOS (Line of sight)signal

&

LOS +reflected signal

&

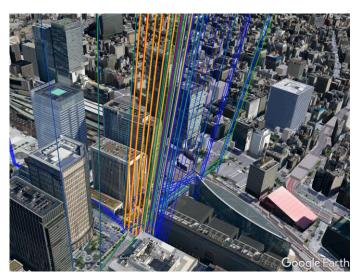
NLOS(Non-Line-of-sight) signal

LOS + reflected signal に関しては、 コリレーターを用いて対応するのが一般的

NLOS signalに関しては、残差チェックの手法が一般的

LOS信号の分類方法

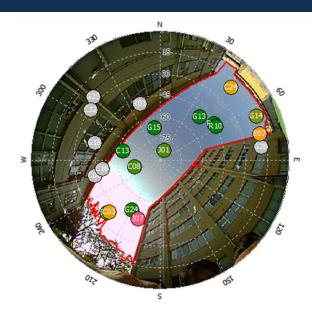
- ・3Dモデル
- ・魚眼カメラ
- •RHCP・LHCPアンテナ
- C/N0
- Lidar, Camera and other sensors
- 残差チェック



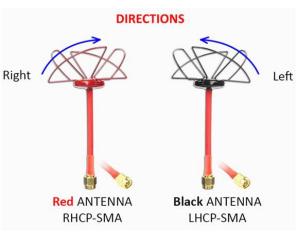
3Dモデル (電波伝搬シミュレーション)



Lidar

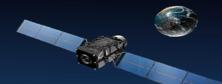


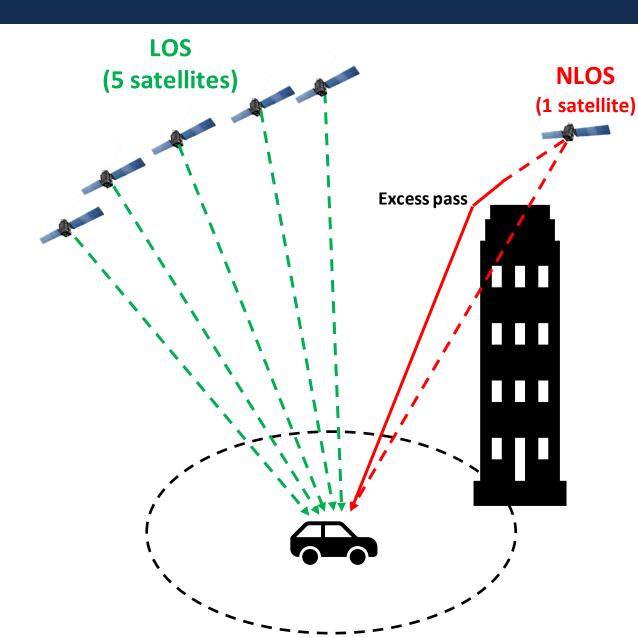
魚眼カメラ



https://ja.aliexpress.com/item/32916190954.html

測位誤差のイメージ





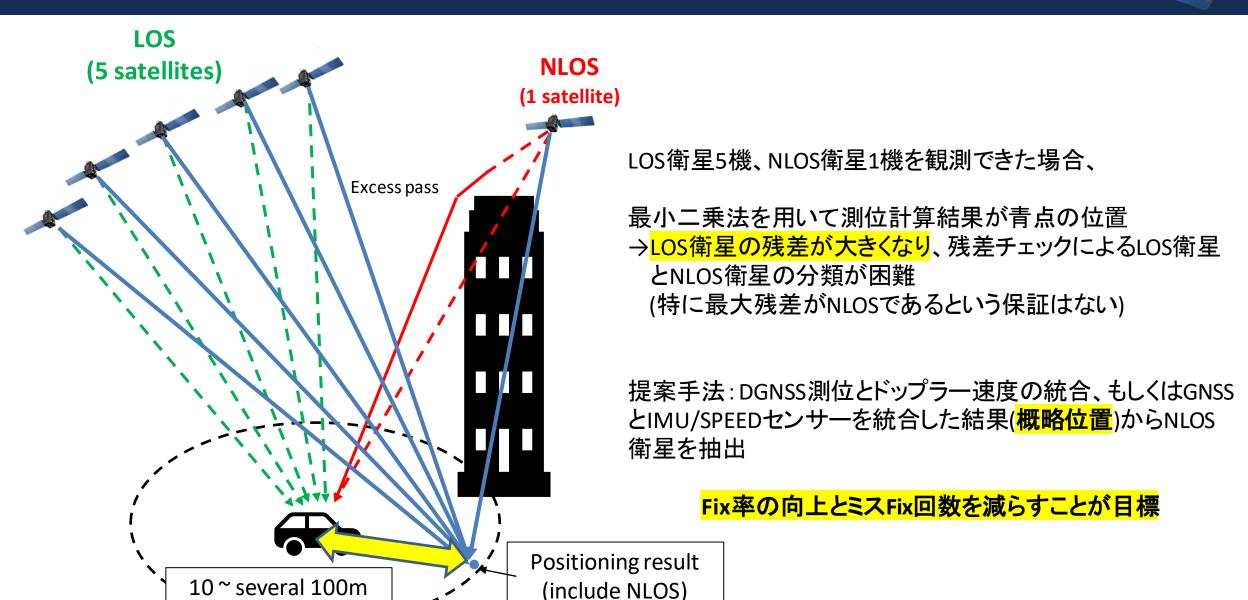
NLOS signal は障害物(高層ビル等)により遅延距離 (Excess pass)が含まれている

高層ビル街では、 遅延距離(擬似距離)が数10mから数100mにもなる

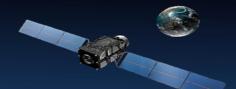
NLOS衛星を測位から除外、もしくは重み下げない場合、 測位誤差は数10mから数100mにもなる

測位誤差のイメージ(残差チェック)





残差チェック(1)



sv1からの擬似距離は、

$$P_{rov}^{sv1} = \rho_{rov}^{sv1} + c(dt_{sv1} - dT_{rov}) + ion_{rov}^{sv1} + tropo_{rov}^{sv1} + mp_{rov}^{sv1} + noise$$

DGNSS測位時に使用する補正情報により赤枠は消去できる

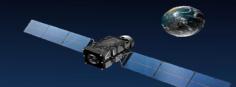
$$P_{rov}^{sv1} - cdt_{sv1} - ion_{rov}^{sv1} - tropo_{rov}^{sv1} = \rho_{rov}^{sv1} + c(-dT_{rov}) + mp_{rov}^{sv1} + noise$$

幾何距離と受信機時計バイアスは?

$$P_{rov}^{sv1} - cdt_{sv1} - ion_{rov}^{sv1} - tropo_{rov}^{sv1} = \rho_{rov}^{sv1} + c(-dT_{rov}) + mp_{rov}^{sv1} + noise$$

幾何距離に関しては、概略位置と放送歴から推定可能 受信機時計バイアスに関してはどうか? P: pseudorange [m] $\rho:$ geometric range [m] c: speed of light [m/s] $dt_{rcv}:$ receiver clock error [s] $dT_{sat}:$ satellite clock error [s] ion: ionospheric error [m] tropo: tropospheric error [m] mp: multipath error [m] $\varepsilon:$ noise error [m]

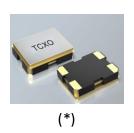
残差チェック(2)



GNSS receiver



TCXO



GNSS受信機は通常TCXOを使用 安価だが、原子時計と比べるとドリフトが大きく、推定も困難

GNSS receiver

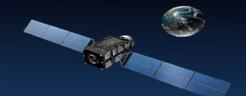


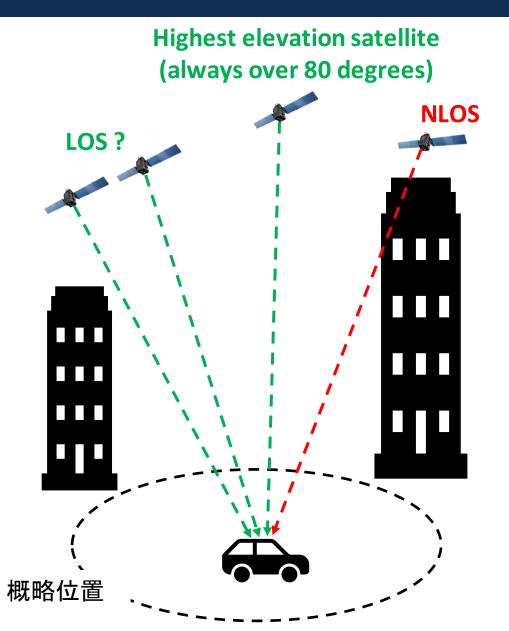
Rubidium atomic clock



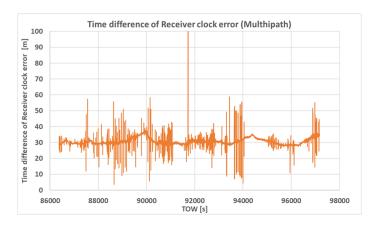
ルビジウム等の原子時計は非常に安定しており、推定は容易であるが、 価格の問題から商用利用×

残差チェック(3)





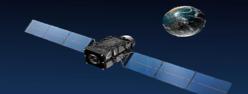
NLOS衛星を含んだ状態での受信機時計バイアスを推定した場合、正確な受信機時計バイアスの推定は困難



最大仰角の衛星(特に80度以上の衛星)はどのような高層ビル街でもLOS衛星

→ 概略位置と最大仰角の衛星の擬似距離を用いて正確な受信機時計バイアスが推定可能なのでは?

残差チェック(4)



sv1からの擬似距離は、

$$P_{rov}^{sv1} = \rho_{rov}^{sv1} + c(dt_{sv1} - dT_{rov}) + ion_{rov}^{sv1} + tropo_{rov}^{sv1} + mp_{rov}^{sv1} + noise$$

DGNSS測位時に使用する補正情報により赤枠は消去できる

$$P_{rov}^{sv1} - cdt_{sv1} - ion_{rov}^{sv1} - tropo_{rov}^{sv1} = \rho_{rov}^{sv1} + c(-dT_{rov}) + mp_{rov}^{sv1} + noise$$

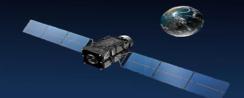
幾何距離と受信機時計バイアスは概略位置と最大仰角の衛星の擬似距離で推定可能

$$P_{rov}^{sv1} - cdt_{sv1} - ion_{rov}^{sv1} - tropo_{rov}^{sv1} - \rho_{rov}^{sv1} - c(-dT_{rov}) = mp_{rov}^{sv1} + noise$$

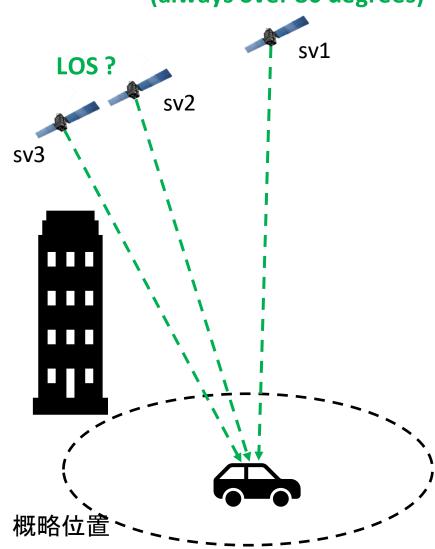
正確な残差チェックが可能!!

P: pseudorange [m] $\rho:$ geometric range [m] c: speed of light [m/s] $dt_{rcv}:$ receiver clock error [s] $dT_{sat}:$ satellite clock error [s] ion: ionospheric error [m] tropo: tropospheric error [m] mp: multipath error [m] $\varepsilon:$ noise error [m]

提案手法VS一重差



Highest elevation satellite (always over 80 degrees)



概略位置がある場合、sv1を基準衛星とした一重差により残差チェックは可能

$$P_{rov}^{sv1} - P_{rov}^{sv2}$$
 = $(\rho_{rov}^{sv1} + c(dt_{sv}) - dT_{rov}) + ion_{rov}^{sv1} + tropo_{rov}^{sv1} + mp_{rov}^{sv1} + noise)$ - $(\rho_{rov}^{sv2} + c(dt_{sv}) - dT_{rov}) + ion_{rov}^{sv2} + tropo_{rov}^{sv2} + mp_{rov}^{sv2} + noise)$ 補正情報でキャンセル $P_{rov}^{sv1} - P_{rov}^{sv2} = mp_{rov}^{sv1} - mp_{rov}^{sv2}$ ※ mp_{rov}^{sv1} はのに近いと仮定

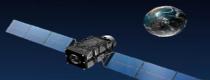
この場合、受信機時計誤差の推定は必要ない

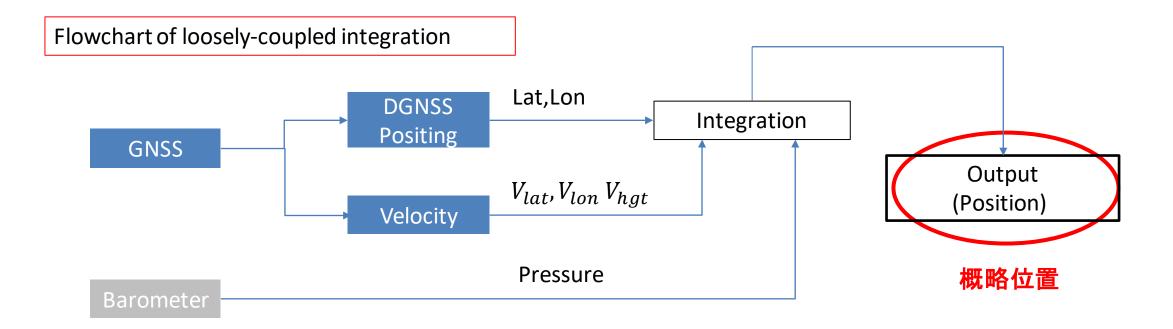
しかしRTK-GNSSで使用する2重位相差(GLONASS)には、受信機時計バイアスの 推定誤差分が残留

→提案手法を採用するほうが、よりFix率向上とミスFix回数の低下が見込める

$$\varphi_{rov_ref}^{sv1_sv2} = \rho_{rovref}^{sv1sv2} + N_{rovref}^{sv1sv2} + (f^{sv1} - f^{sv2}) \times dt_rovref$$

概略位置算出方法(DGNSS&ドップラー速度)





概略位置で残差チェックをした後に、DGNSS測位、RTK-GNSS測位を行い、 その前後での測位精度を確認

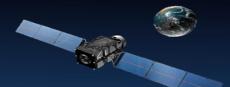
統合方法の基本的な考え方

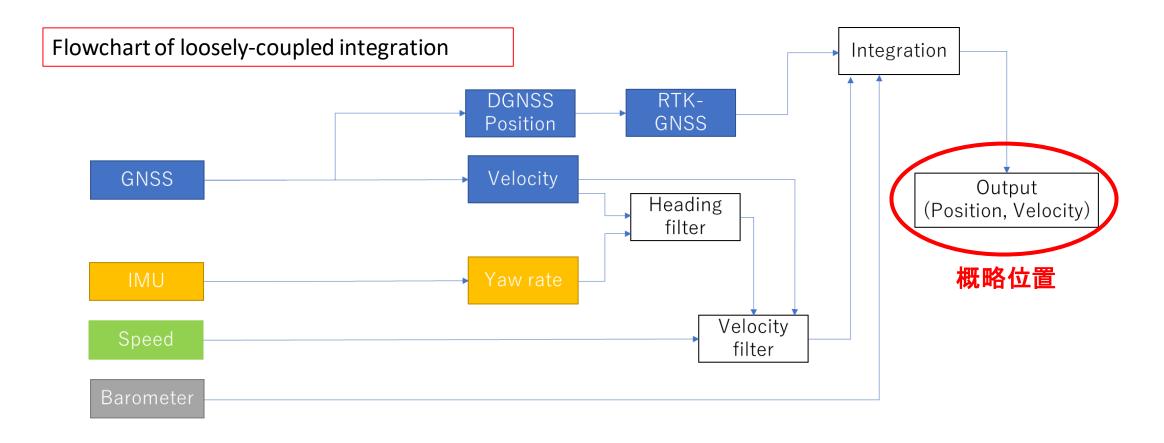
DGNSS測位は誤差を大きく含んでいるため水平の結果のみ使用、高度方向は気圧計より算出ドップラー周波数より算出した速度(ドップラー速度)はDGNSS測位より信用できるため、

両者の重みを2cm/secと2mと設定

イノベーション項(事前残差)が大きい場合、よりドップラー速度を信頼

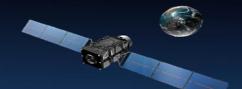
概略位置算出方法(GNSS/IMU+Speed)

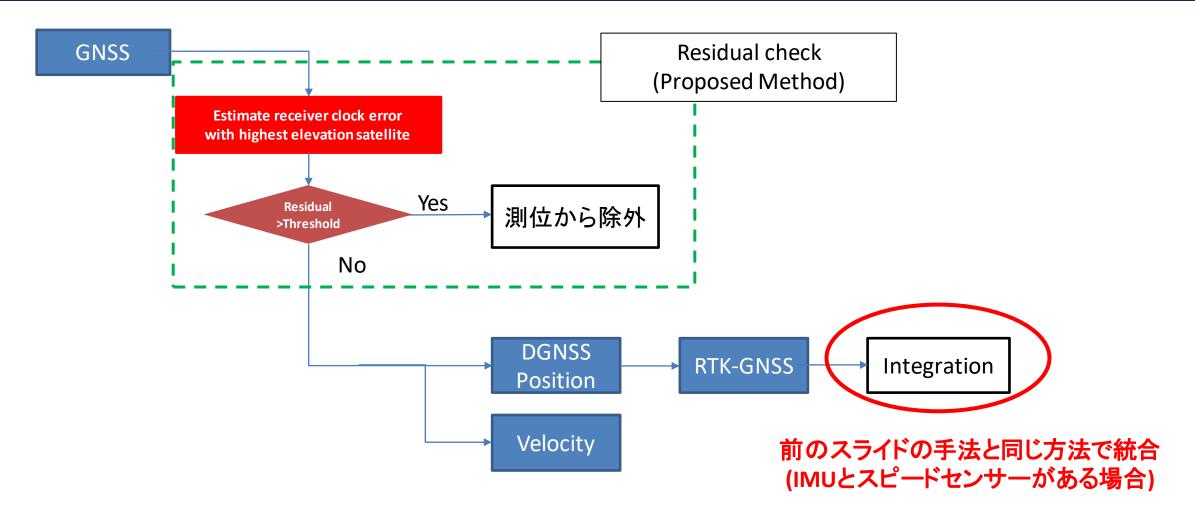




高層ビル街であれば、10m以内の位置が常に出力できることを確認済み スピードセンサーはドップラー速度が信用できない場合に使用 IMU及びスピードセンサを利用する場合、より正確な概略位置を取得可能 →残差チェックする際の閾値を小さくすることができる

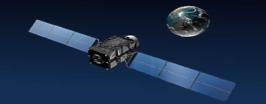
概略位置算出後、残差チェック

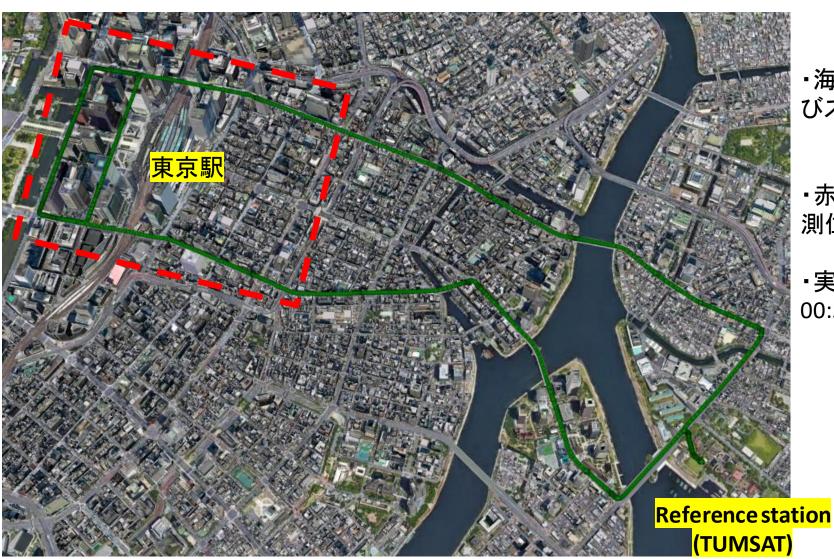




Fix率の向上とミスFix回数を減らすことが目標 IMUと統合結果の測位誤差を改善

実験(ルート)



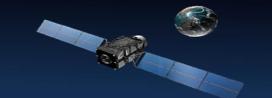


・海洋大学から丸の内をGNSS受信機、IMU及びスピードセンサーを搭載した車で走行

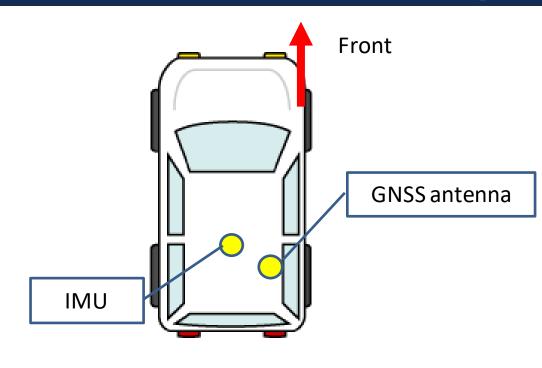
・赤枠で囲まれた箇所(東京駅周辺)はDGNSS 測位誤差が数10m~数100mにもなる場所

•実験日時(GPST):2021年3月2日00:20:00~00:59:34

実験(機材一覧)



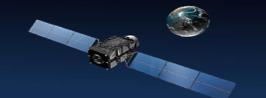
Equipment	Model Name
GNSS receiver	u-blox F9P (base/rover)
GNSS antenna (rover)	Aero Antenna AT1675
GNSS antenna (Base)	Trimble Zephyr 2 Geodetic
IMU(with Barometer)	STMicro
Speed sensor	POSLV-520
Reference position	POSLV-520





Speed sensor

実験(Common parameter)



GNSS setting

ltem	Parameter
Mask angle	15 degrees
Maximum DOP	10.0(HDOP)/20(VDOP)
Minimum SNR	30 dB-Hz
Code phase measurements	Tracked
Carrier phase measurements	Tracked
LLI(only RTK-GNSS)	Tracked and half-cycle resolved
Threshold for Residual	15m/30m
Satellites	GPS/QZSS/GALILEO/BDS/GLONASS

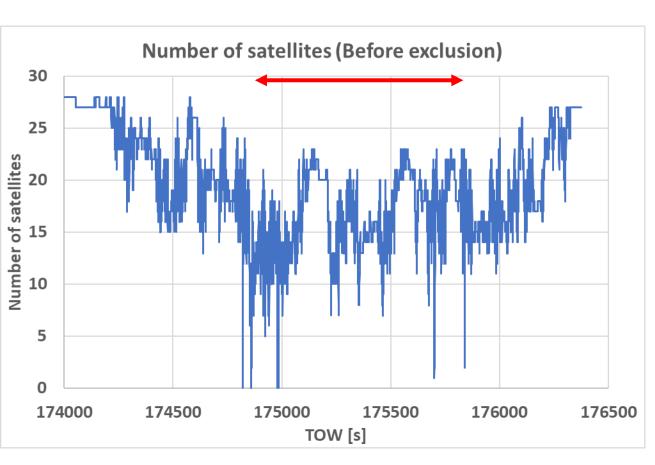
Frequency

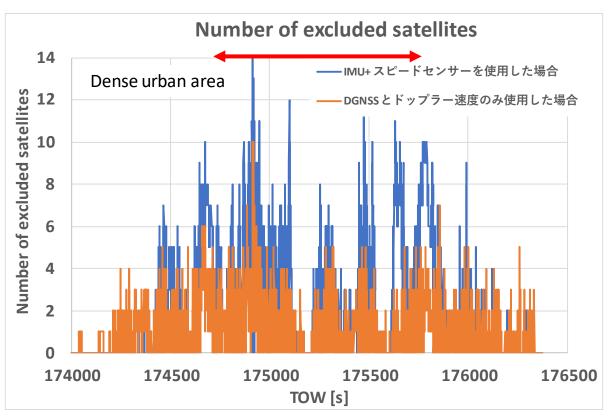
Sensor	Frequency
GNSS	5 Hz
IMU	50 Hz
Speed sensor	50 Hz

RTKのエンジンに関しては、瞬時ARを採用し、 Partial AmbiguityやAmbiguity Hold等の工夫は採用していない (本来の残差チェックの効果を確認するため)

結果(衛星数及び排除された衛星数)

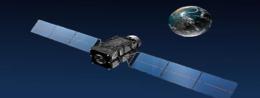






DGNSS+ドップラー速度のみ場合、平均0.9機 IMU+スピードセンサーを使用した場合、平均2機排除→統合結果の精度と閾値によるもの

結果(RTK-GNSS)



RTK-GNSS	Number of Fix(Fix rate)	Number of miss Fix(*)
排除前	8177(68.9%)	33
排除後(DGNSS&ドップラー)	8329(70.9%)	11
排除後(IMU&speed sensor)	8768(74.3%)	5

Miss Fix: Horizontal error of 0.5 m or more or Altitude error of 1.0 m or more

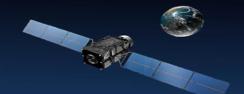


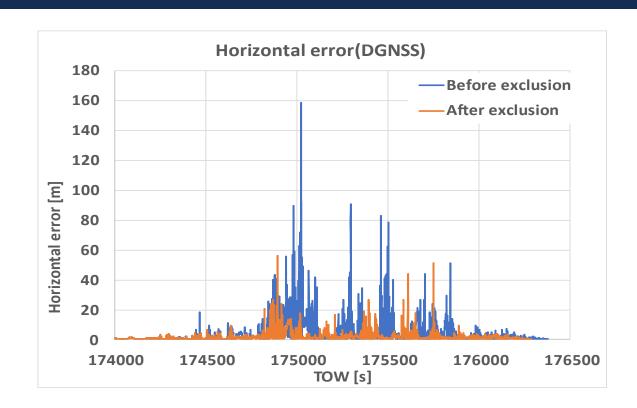
赤色:排除前のRTK結果 緑色:排除後(DGNSS&ドップラー)のRTK結果

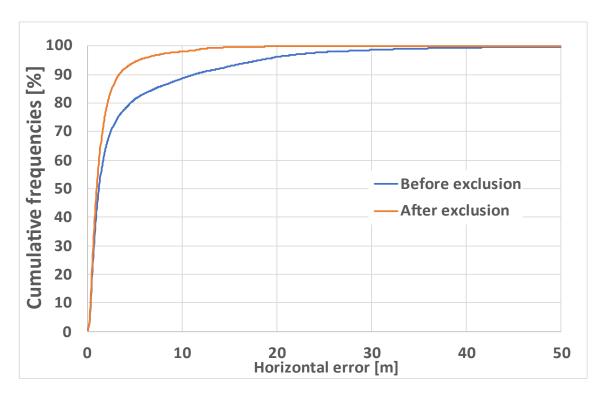


赤色:排除前のRTK結果 緑色:排除後(IMU&speed sensor)のRTK結果

Result(DGNSS測位誤差_IMUとスピードセンサー使用時のみ)

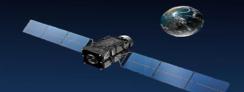


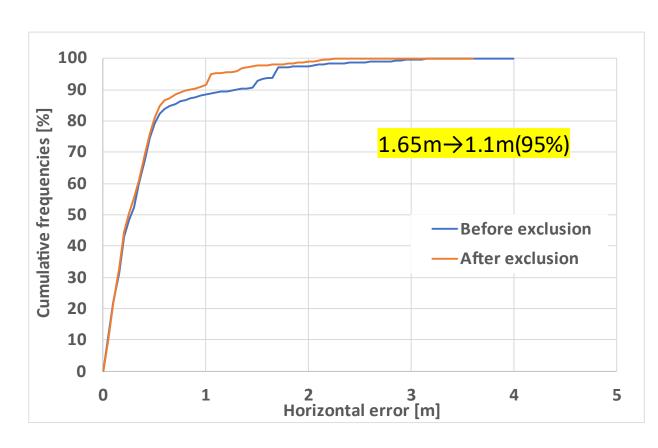


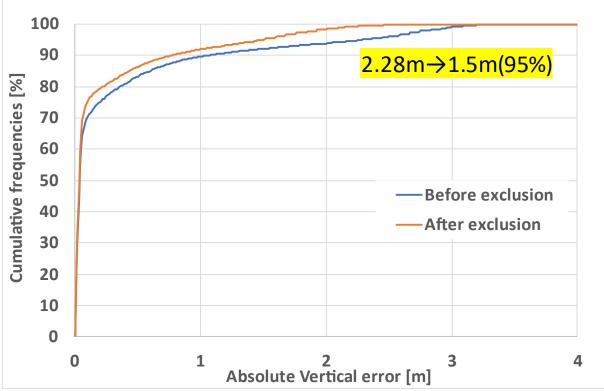


	Before exclusion	After Exclusion
Position error	3.86m (average) 7.31m (STD) 158.21 (max)	1.59m (average) 2.37m (STD) 56.32 (max)
Number of positioning	11814	11804

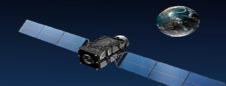
Result(統合結果)







まとめ

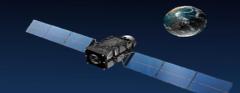


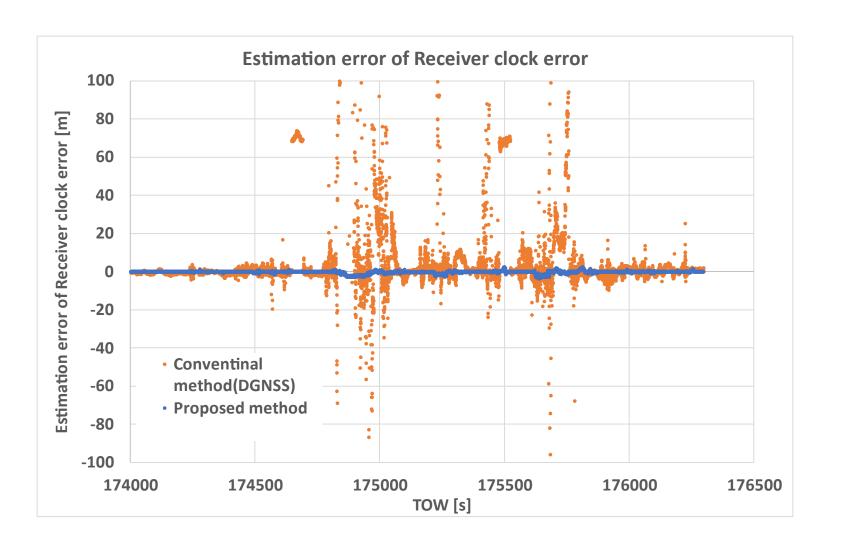
- ・DGNSS測位とドップラー速度の統合、IMU+スピードセンサを加えた統合の2種類で提案手法の有効性を確認
- ・当初の目標であるFix率及びミスFix回数を減らすことに成功

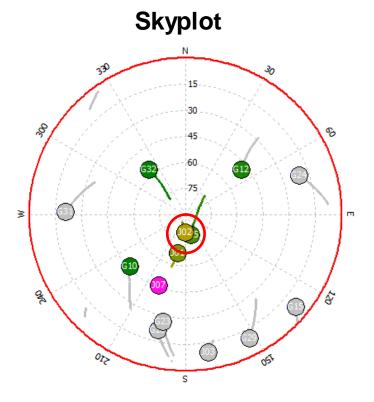
今後の目標として、

- ・GNSSが使えずデットレコニングしている際に、より正確な位置を出すためにIMUを有効活用していきたい
- ・今回の解析は単独のアンテナで行っているが、自動運転のような分野ではGNSSコンパスの活用も十分考えられるため、複数アンテナを用いて残差異常のチェックを行える方法を検討したい

結果(受信機時計誤差の推定誤差)

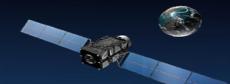






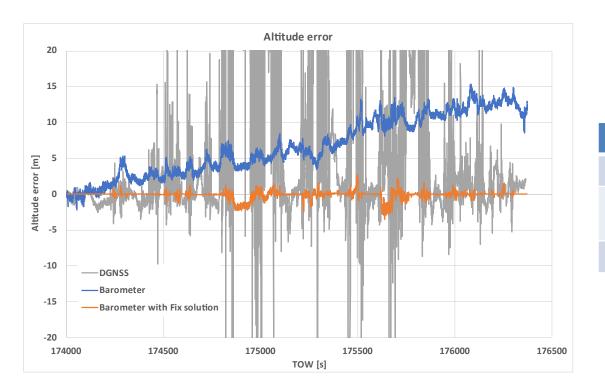
Use J02 for estimation of Receiver clock error

高度推定(気圧計)



- ・気圧から高度への変換方法
 - ✔ 気象庁よりリファレンスとなる海面気圧は10分ごとに更新されている
 - ✓またFix解を利用することで適宜キャリブレーションを行う

$$ALT(0) - ALT(obs) = -8.3 \times (P(0) - P(obs))$$



ALT(0): Absolute altitude provided by RTK-Fix solution P(0): Atmosheric barometric pressure observation provided by Japan meteorological agency by each 10 minuets

	Average [m]	STD [m]
Barometer	6.729684	4.158354
Barometer with Fix solutions	-0.09718	0.511082
DGNSS	14.66662	43.42141

結果(DGNSS&ドップラー速度の統合結果)



コレド日本橋付近でGNSS信号が入らず、直前のドップラー速度を使用してデッドレコニングを行ったが、 デッドレコニング中に車両が減速したため誤差が増大 GNSSだけでは厳しい状況であり、閾値も大きく設定