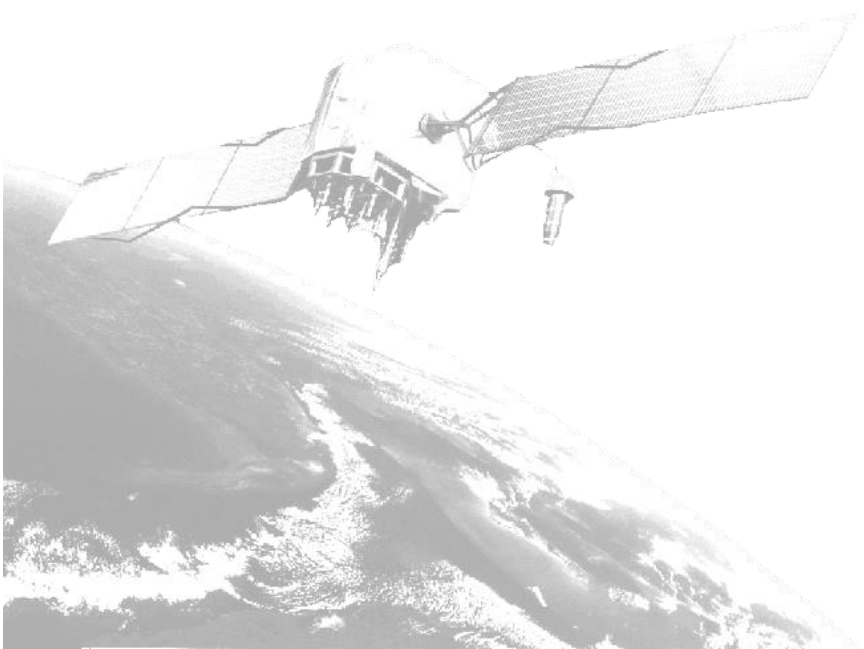


都市部におけるGPSとBeiDouによる 統合RTK測位に関する研究

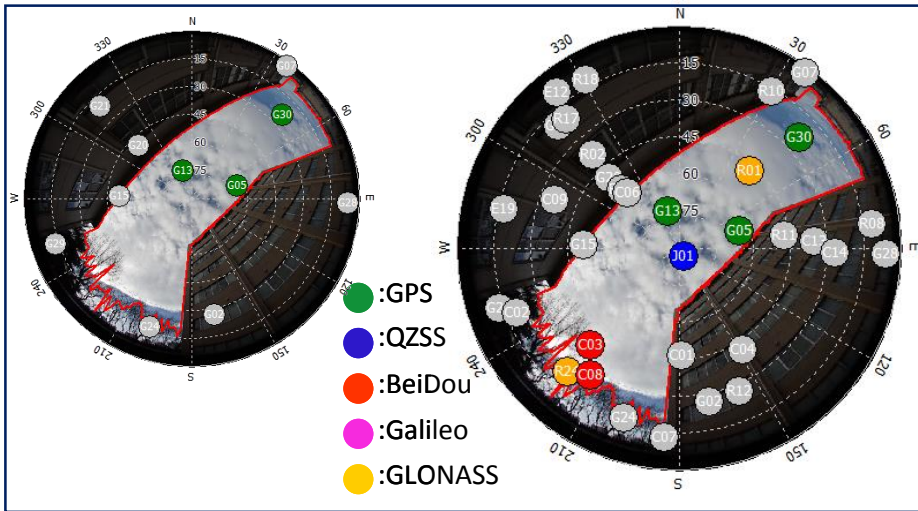


東京海洋大学
土倉弘子 久保信明

目次

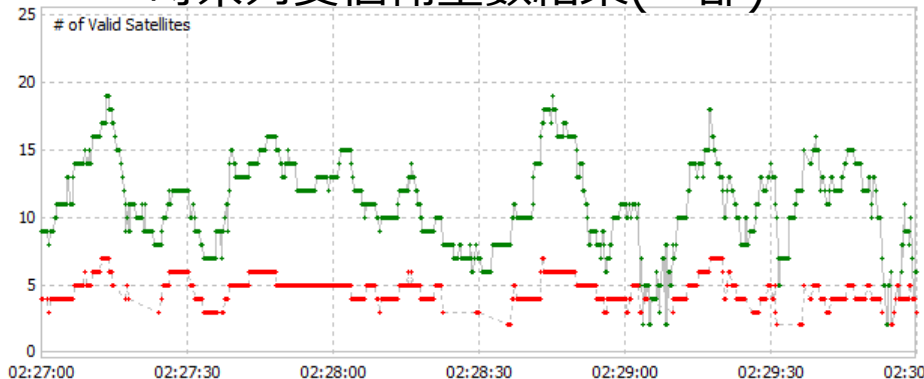
- 背景と目的
- RTK測位概要
- 統合測位のためのシステム間バイアス導出
- ゼロ期線解析 実験と結果
- 移動体におけるシステム間バイアス推定手法
- 移動体における解析 実験と結果
- まとめ

マルチGNSSの効果



多くのGNSS衛星が運用開始

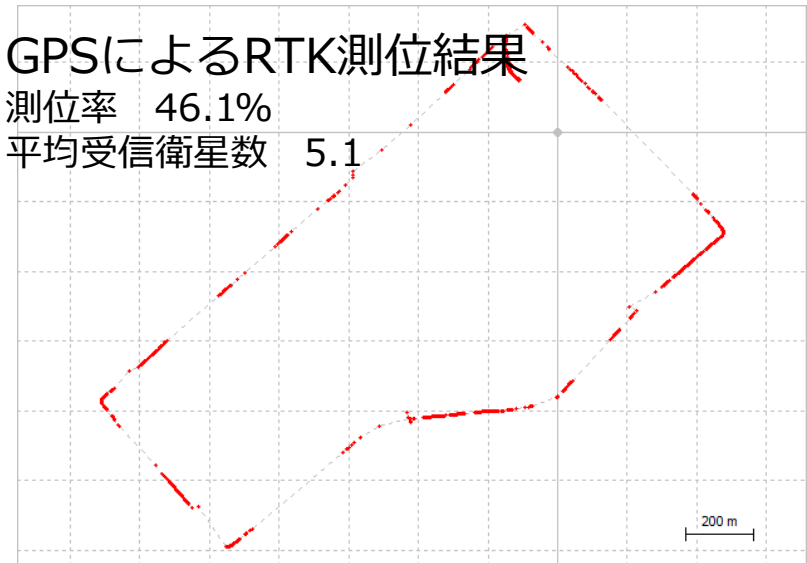
時系列受信衛星数結果(一部)



衛星数の低下により測位不能

GPSによるRTK測位結果

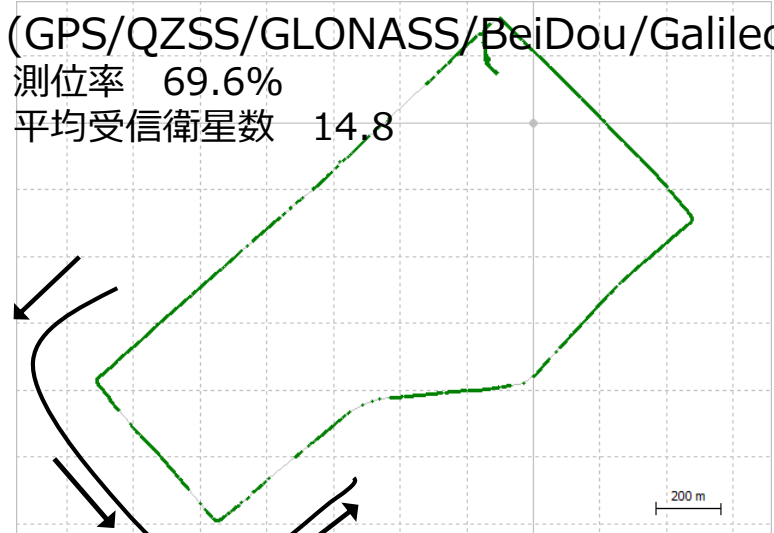
測位率 46.1%
平均受信衛星数 5.1



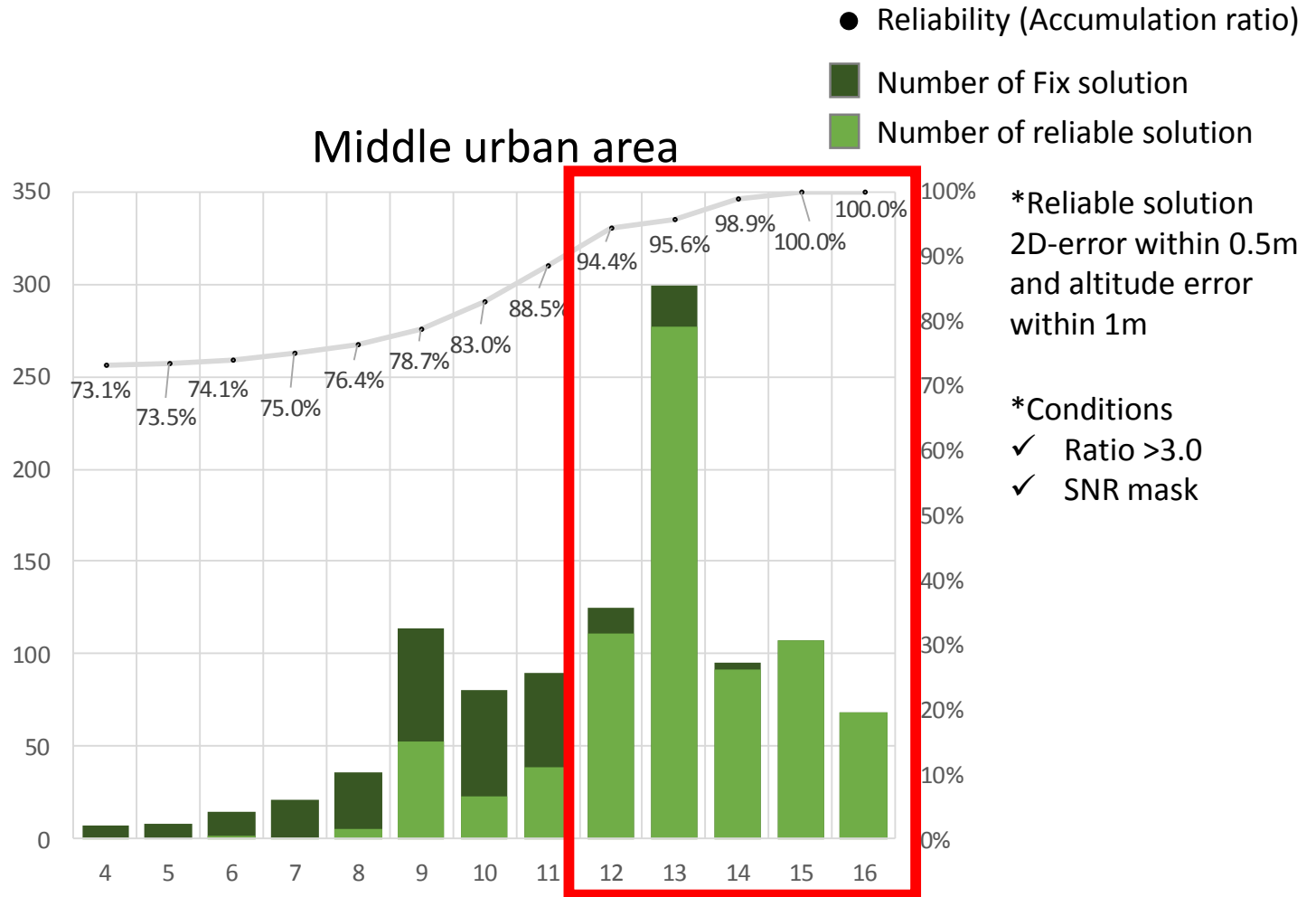
GNSSによるRTK測位結果

(GPS/QZSS/GLONASS/BeiDou/Galileo)

測位率 69.6%
平均受信衛星数 14.8



衛星数と信頼性

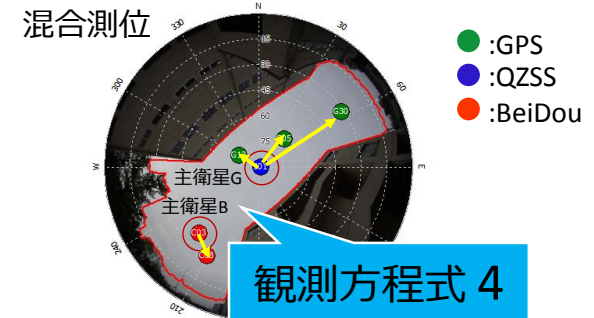


信頼性向上にはより多くの衛星数（観測値）の確保が必要

目的

GPS-BeiDouによる統合RTK測位

- GPS-BeiDouによるRTK測位（cm級測位）ではシステム間の周波数の差異によりシステム間バイアスが発生
- 混合RTK測位（現在主流）
 - ✓ システム間のバイアス考慮が不要
 - × 受信衛星数の減少、棄却が生じる

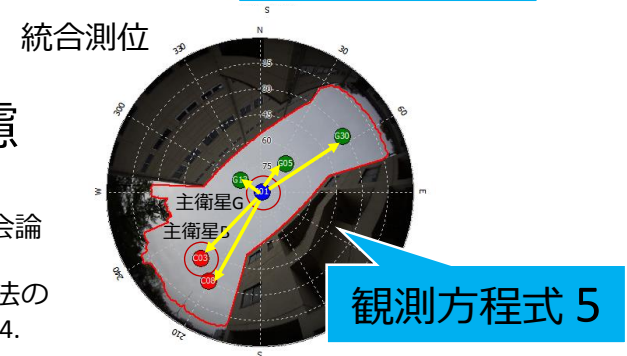


- **統合RTK測位**

- ✓ 受信衛星数の有効活用が可能
- × システム間のバイアス（周波数依存）の考慮

異周波数システム間バイアス解決による統合RTK測位の従来研究

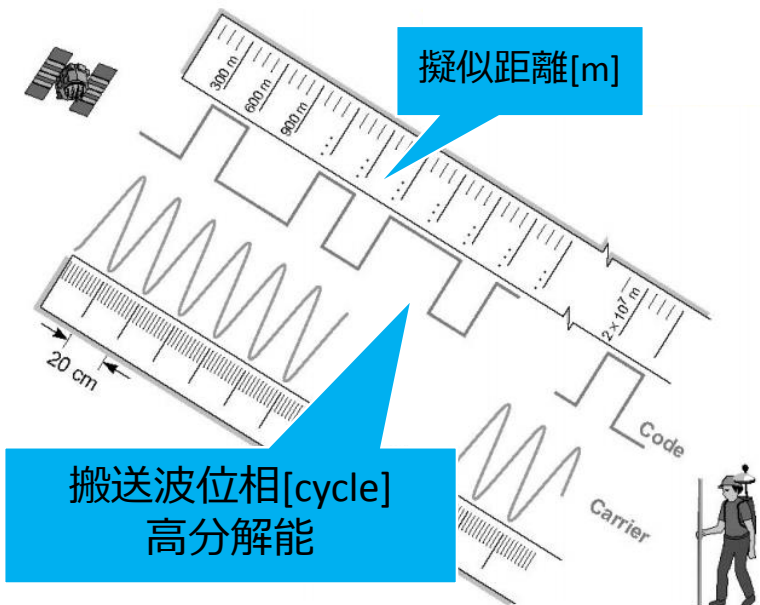
- 山田英輝 et al, "GLONASS 信号におけるチャネル間バイアスの校正," 電子情報通信学会論文誌, 2013.
- 北村光教, "複数衛星測位システムの複合による都市部での測位精度・利用率向上手法の研究," 早稲田大学理工学術院基幹理工学研究科機械科学専攻, 博士課程学位論文, 2014.



本研究の目的

- 統合RTK測位のためのシステム間バイアス推定手法の評価
- 移動体におけるバイアス推定手法の提案

RTK測位 (搬送波位相相対測位)



- 主に搬送波位相観測値を用いた相対測位
- 2衛星 + 2受信機による4観測値の差分 (2重差) により受信機依存、衛星依存誤差を相殺する

◆二重位相差

$$\begin{aligned} \phi_{rb,j}^{s1s2} &= (\phi_{r,j}^{s1} - \phi_{b,j}^{s1}) - (\phi_{r,j}^{s2} - \phi_{r,j}^{s2}) \\ &= (\lambda_j^s)^{-1} (\rho_{rb}^{s1s2} + \epsilon_{rb,j}^{s1s2}) + N_{rb,j}^{s1s2} \end{aligned}$$

受信機-衛星間幾何距離二重差

整数値アンビギュイティ

ϕ_j^s : 搬送波位相観測値[cycle]

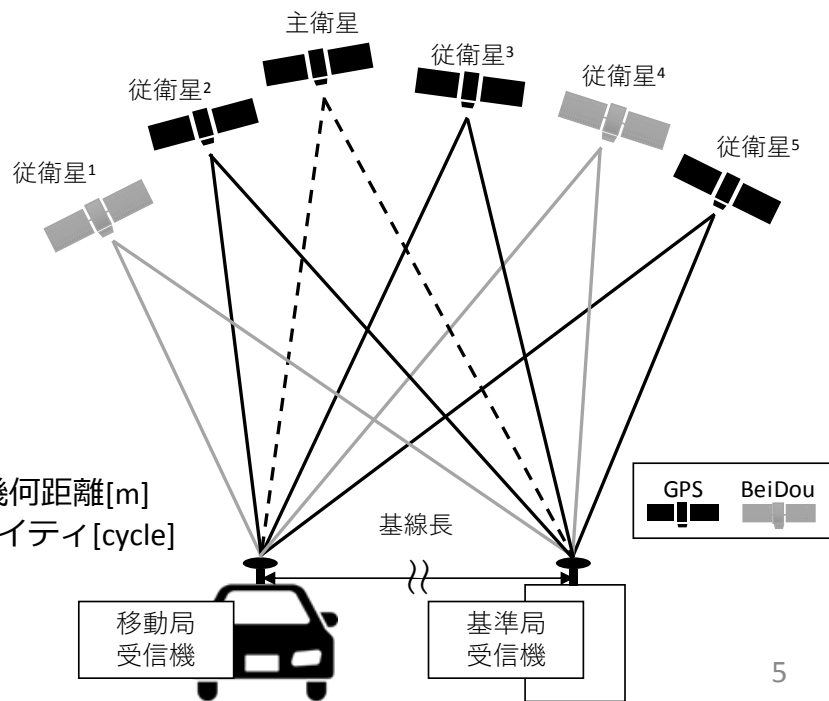
λ_j^s : 搬送波の波長[m], f_j^s : 衛星の送信周波数[Hz]

dt_r, dt^s : 受信, 衛星時計誤差[s]

$\epsilon_{r,j}^s$: 観測誤差[m]

ρ_r^s : 衛星と受信機間の幾何距離[m]

$N_{r,j}^s$: 整数値アンビギュイティ[cycle]



RTK測位における整数値アンビギュイティ決定

◆二重位相差 (DD: Double Difference)

$$\begin{aligned}\phi_{rb,j}^{s1s2} &= (\phi_{r,j}^{s1} - \phi_{b,j}^{s1}) - (\phi_{r,j}^{s2} - \phi_{r,j}^{s2}) \\ &= (\lambda_j^s)^{-1} (\rho_{rb}^{s1s2} + \epsilon_{rb,j}^{s1s2}) + N_{rb,j}^{s1s2}\end{aligned}$$

受信機一衛星間幾何距離二重差

整数値アンビギュイティ

Calculation float solution
and ambiguities by DD

入力：実数アンビギュイティ

Integer ambiguities by
LAMBDA

出力：整数値アンビギュイティ

Ratio test

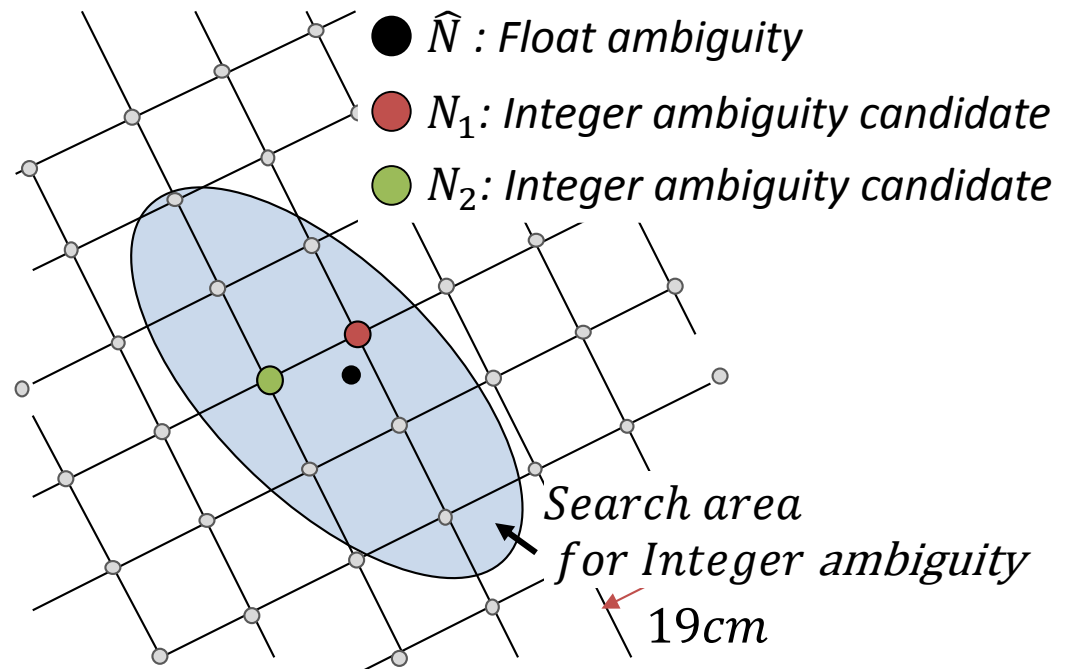
Fail

Pass

Fix Solution

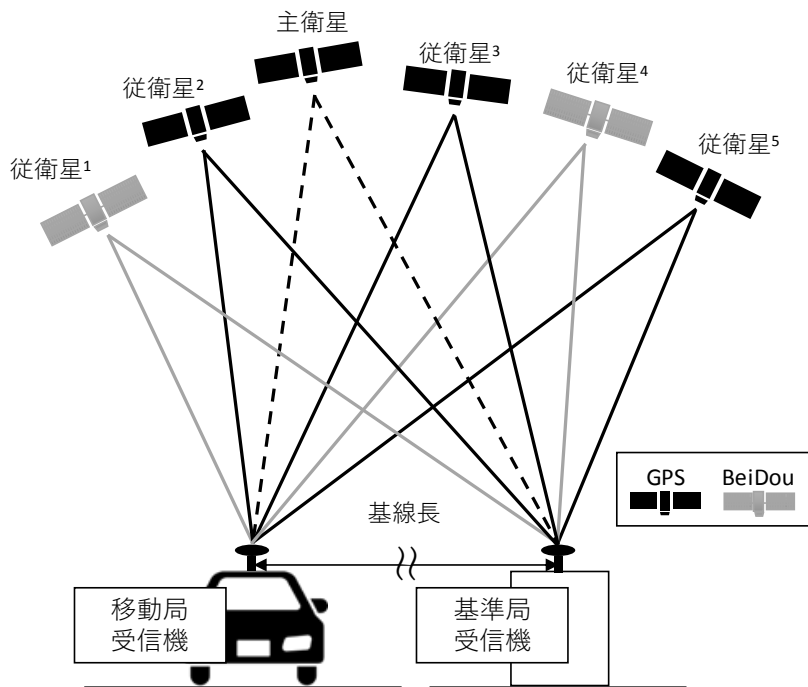
No solution

◆整数値アンビギュイティ決定 (LAMBDA法)



実数アンビギュイティの精度向上→RTKの精度へ影響

GPS-BeiDou間二重位相差



衛星系	周波数帯	周波数(MHz)
GPS	L1	1575.420
	L2	1227.600
	L5	1176.450
BeiDou	B1	1561.098
	B2	1207.140
	B3	1268.520

* 本研究ではQZSSはGPSに準拠しているためGPS衛星の一部とみなす

◆同システムによる二重位相差

$$\begin{aligned}\phi_{rb,j}^{s1s2} &= (\phi_{r,j}^{s1} - \phi_{b,j}^{s1}) - (\phi_{r,j}^{s2} - \phi_{r,j}^{s2}) \\ &= (\lambda_j^s)^{-1} (\rho_{rb}^{s1s2} + \epsilon_{rb,j}^{s1s2}) + N_{rb,j}^{s1s2}\end{aligned}$$

受信機-衛星間幾何距離二重差

整数値アンビギュイティ

◆異システムによる二重位相差

$$\begin{aligned}\phi_{r,kj}^{qs} &= (\lambda_j^s)^{-1} (\rho_{rb}^s + \epsilon_{rb,j}^s) - (\lambda_k^q)^{-1} (\rho_{rb}^q + \epsilon_{rb,k}^q) \\ &\quad + (f_j^s - f_k^q) (dt_{rb}) + \delta_{rb,kj}^{BG} + N_{rb,kj}^{qs}\end{aligned}$$

受信機-衛星間幾何距離二重差項

受信機時計誤差差分

受信機ハードウェア
キャリア遅延差分

整数値アンビギュイティ

- 通常相殺される受信機時計誤差は周波数の差異により残留
- 受信機内回路を通過時に、衛星系により遅延量が異なる。この差分が受信機ハードウェア遅延として残留

システム間バイアスまとめ

◆GPS-BeiDou間二重位相差

$$\phi_{rb,j}^{sq} = (\lambda_j^s)^{-1} (\rho_{rb}^s + \epsilon_{rb,j}^s) - (\lambda_k^q)^{-1} (\rho_{rb}^q + \epsilon_{rb,k}^q) + (f_j^s - f_k^q)(dt_{rb}) + \delta_{rb,kj}^{BG} + N_{rb,kj}^{qs}$$

$$N = [\delta_{rb,kj}^{BG}] + N_{rb,kj}^{qs}$$

受信機ハードウェアキャリア遅延差分整数部分

◆システム間バイアス

$$ISB_{\phi,jk} = \underbrace{\phi_{rb,j}^{sq}}_{\text{観測値二重差}} - \{ \underbrace{(\lambda_j^s)^{-1} (\rho_{rb}^s + \epsilon_{rb,j}^s)}_{\text{幾何距離二重差}} - \underbrace{(\lambda_k^q)^{-1} (\rho_{rb}^q + \epsilon_{rb,k}^q)}_{\text{幾何距離二重差}} + \underbrace{(f_j^s - f_k^q)(dt_{rb})}_{\text{受信機時計誤差差分}} + \underbrace{N}_{\text{整数値アンビギュイティ}} \}$$

観測値二重差

幾何距離二重差

受信機時計誤差差分

整数値

アンビギュイティ

受信機時計誤差差分補正

- 基準局：複数衛星システムによるマルチGNSS単独測位で算出
- 移動局：複数衛星システムによるマルチDGNSSで算出

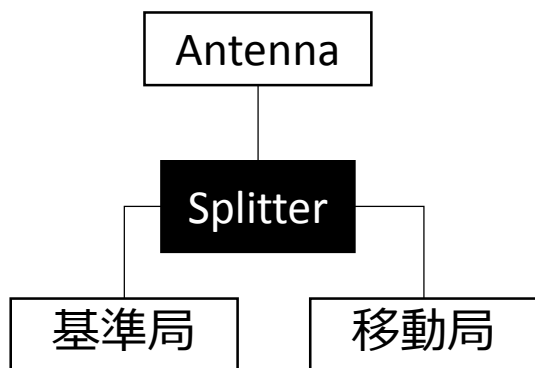
ISBを推定する必要あり

ゼロ基線解析におけるISB推定実験

◆システム間バイアス

$$ISB_{\phi,jk} = \underbrace{\phi_{rb,j}^{sq}}_{\text{観測値二重差}} - \left\{ \underbrace{\left(\lambda_j^s \right)^{-1} \left(\rho_{rb,j}^q + \epsilon_{rb,k}^q \right)}_{\text{幾何距離二重差}} + \underbrace{\left(\text{算出、消去} \right)}_{\text{受信機時計誤差差分}} + \underbrace{N}_{\text{整数値アンビギュイティ}} \right\}$$

- 移動局と基準局で同じアンテナから分岐しデータを受信（基線長ゼロ）
- 幾何距離の影響を受けない



- 移動局、基準局共に同じ種類の受信機を利用
- 2組の受信機セットで実験を実施

◆実験概要

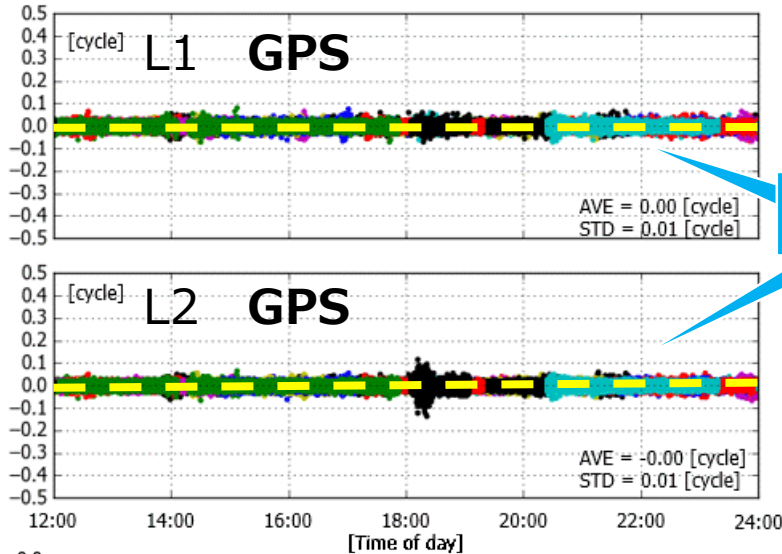
受信機セット	解析時間
一周波受信機	2016/3/2 12時間-1Hz
二周波受信機	2016/6/6 12時間-1Hz

解析条件

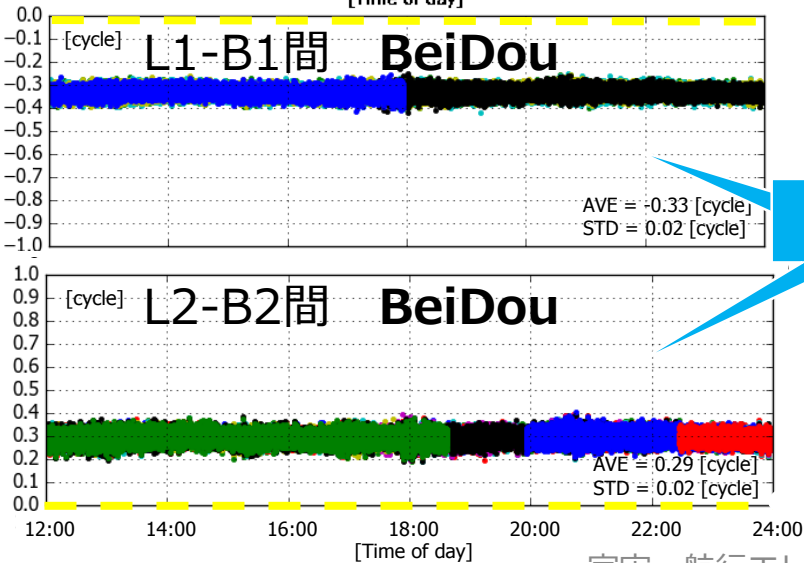
仰角マスク15度
HDOPマスク10
瞬時RTK-GNSS
LAMBDA法
(Ratioテスト:閾値3)

各衛星によるISB比較

二周波受信機 二重位相差

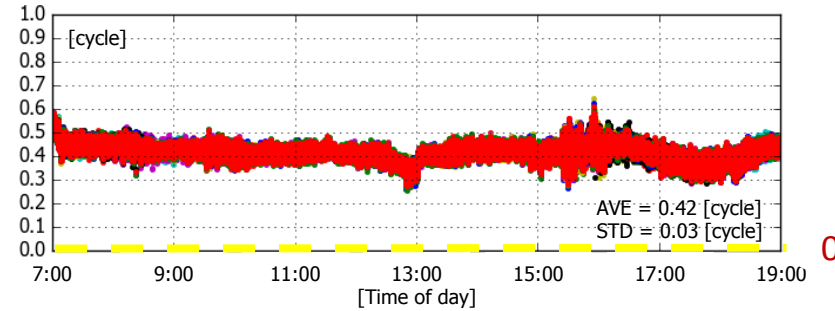


平均ゼロ



要補正

一周波受信機 L1-B1間二重位相差



- GPSと比較しBeiDouの二重差は全衛星に同様のバイアスが存在
- 補正が必要
- バイアス補正なし統合測位では測位率0%

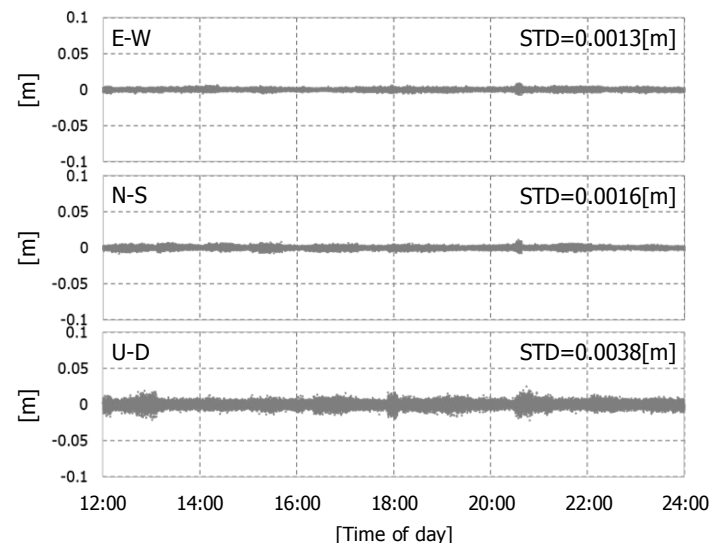
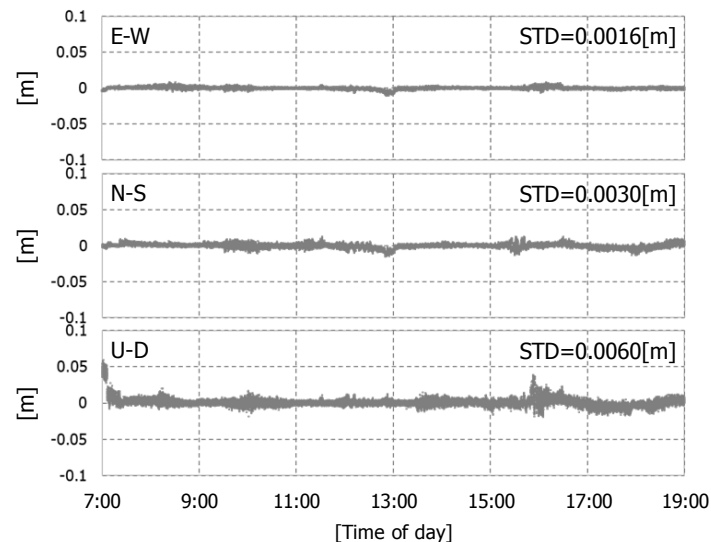
ISB_{AVE} による補正 統合RTK測位結果

解析条件
 仰角マスク15度
 HDOPマスク10
 瞬時RTK-GNSS
 LAMBDA法(Ratioテスト:閾値3)

全BeiDou衛星による

ISB_{AVE} : 二重差の全時間平均

受信機	利便性	信頼性	水平方向 標準偏差
M8T	97.2 %	100.0 %	3.4 mm
NetR9	100.0 %	100.0 %	2.1 mm



ISBの安定性について

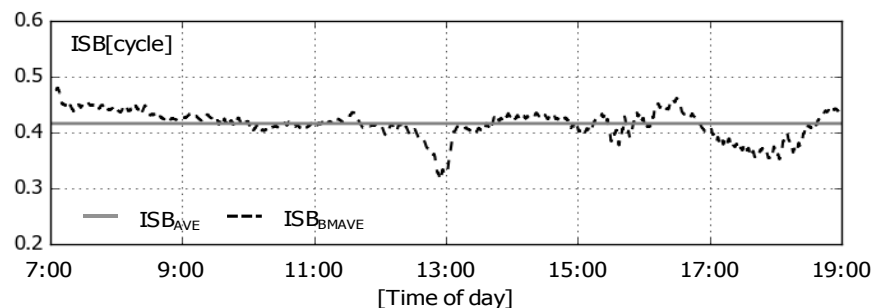
- 実験結果より短時間でのISB推定の可能性の評価を行った。
- 全時間平均および、5分間の後方移動平均を算出、比較を行った。

全BeiDou衛星による

ISB_{AVE} : 二重差の全時間平均

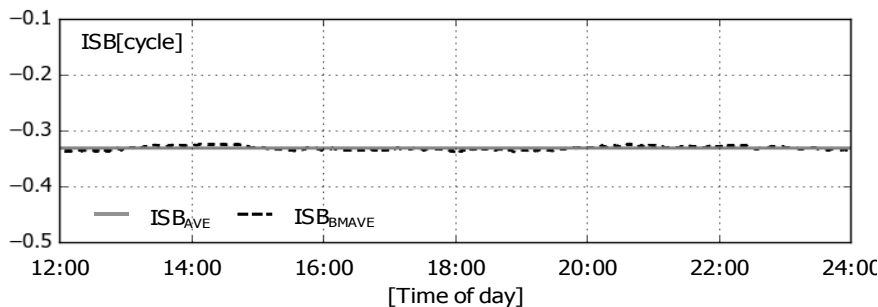
ISB_{BMAVE} : 二重差の5分間後方移動平均

一周波受信機 L1-B1間二重差



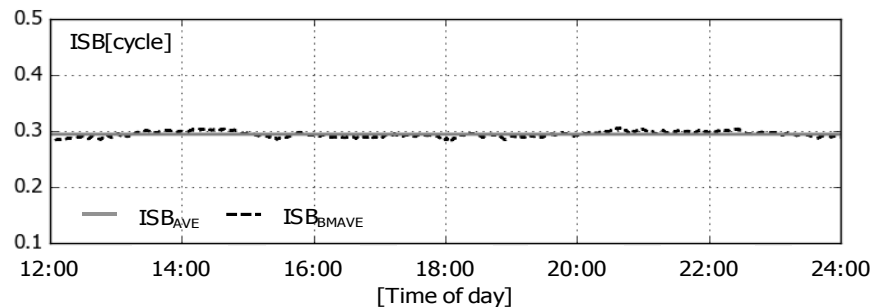
ISB_{AVE} : 最大誤差0.15cycle

二周波受信機 L1-B1間二重差



ISB_{AVE} : 最大誤差0.08cycle

二周波受信機 L2-B2間二重差



ISB_{AVE} : 最大誤差0.10cycle

5分間の後方移動平均による推定、補正が可能

移動体におけるシステム間バイアス推定手法

- ✓ ISB推定には正しい幾何距離が必要
- ✓ ゼロ基線の結果より短時間でのISB推定が有効

1. 移動開始前に開けた場所にて短時間静止データを取得

- 混合RTK測位によりFIX解を算出
- FIX解を用いたISBの推定

2. 移動開始 (ISBによる補正)

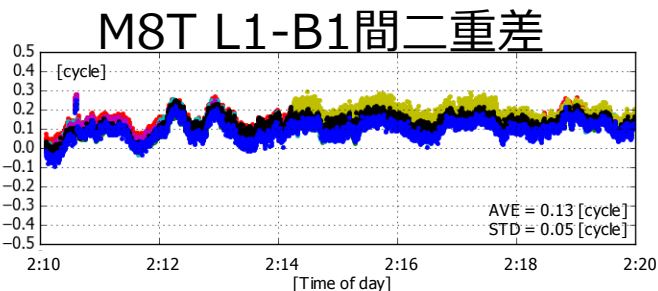
* 大気圏遅延影響を抑えるため、短基線での解析とした。



移動体実験概要とISBの推定

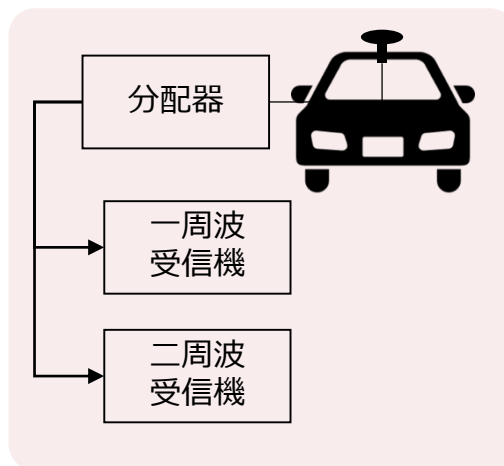
受信機セット		
一周波受信機	2016 5/26	静止 10分間
二周波受信機	5Hz	移動中 2分30秒

1. 移動開始前10分間静止
 - RTK-GPS/QZSSによるFIX解の算出
 - FIX解を用いたISBの推定
2. 移動開始 (ISBによる補正)

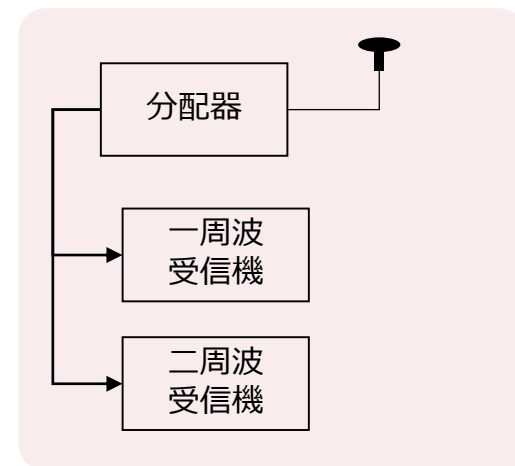


10分間の平均値をISB値とし、補正を行う

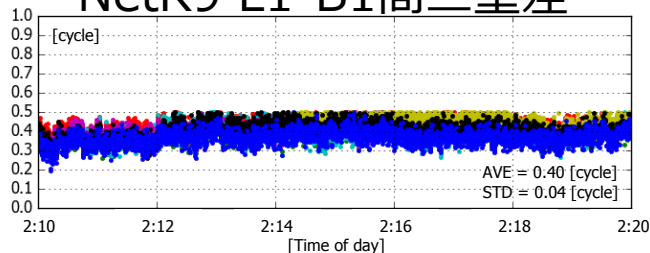
移動局



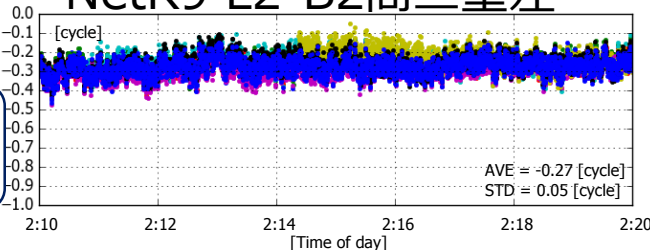
基準局



NetR9 L1-B1間二重差



NetR9 L2-B2間二重差



移動体実験結果

解析条件

仰角マスク15度

HDOPマスク10

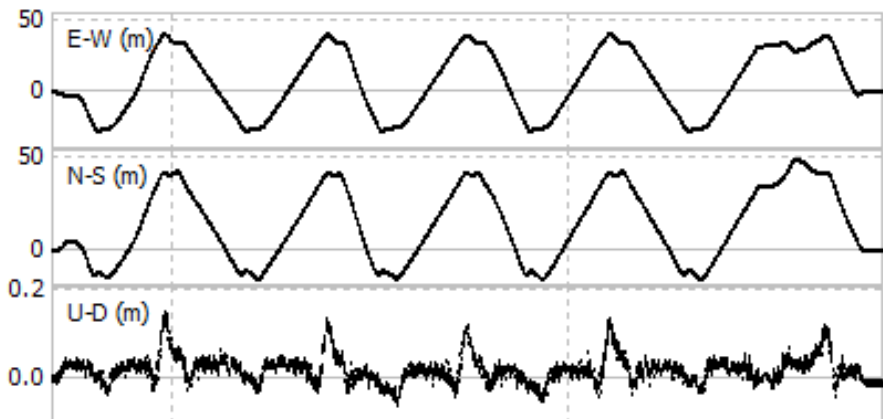
瞬時RTK-GNSS

LAMBDA法(Ratioテスト:閾値3)

受信機セット	利便性	
	上段	統合RTK-GNSS
一周波受信機	下段	混合RTK-GNSS
		99.1 [%]
二周波受信機		98.5 [%]
		99.8 [%]
		99.8 [%]

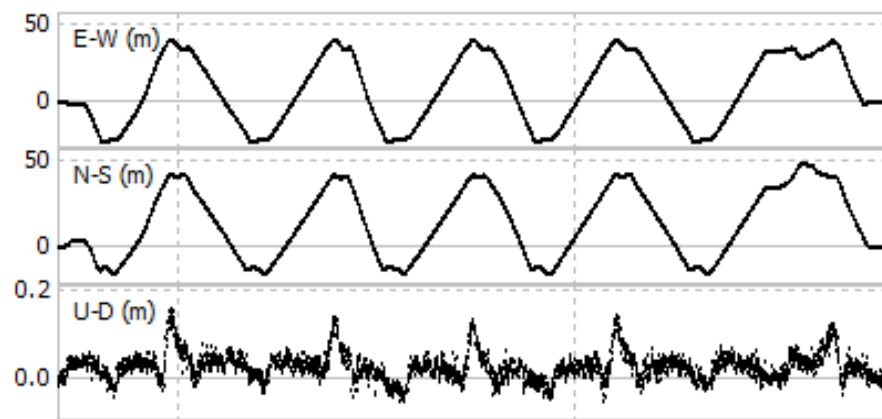
一周波受信機による統合RTK-GNSS

補正值： ISB_{AVE}



二周波受信機による統合RTK-GNSS

補正值： ISB_{AVE}



衛星数が十分確保できていたため混合、統合での大きな差異は見られなかったが一周波受信機では利便性の向上が確認できた。

異周波数の二重差に起因する受信機時計誤差の影響について

$$\phi_{rb,j}^{sq} = (\lambda_j^s)^{-1} (\rho_{rb}^s + \epsilon_{rb,j}^s) - (\lambda_k^q)^{-1} (\rho_{rb}^q + \epsilon_{rb,k}^q) \\ + (f_j^s - f_k^q)(dt_{rb}) + ISB_{\phi,jk} + N_{rb,kj}^{qs}$$

$$(f_{L1}^s - f_{B1}^q)(dt_{rb}) = (f_{L1}^s - f_{B1}^q) \times (dT_{rb} \times c^{-1}) \\ = (1575.420 - 1561.098) \times 10^6 \times dT_{rb} \times (3.00 \times 10^8)^{-1} \\ = 0.048 \times dT_{rb}$$

$$(f_{L2}^s - f_{B2}^q)(dt_{rb}) = (f_{L2}^s - f_{B2}^q) \times (dT_{rb} \times c^{-1}) \\ = (1227.600 - 1207.140) \times 10^6 \times dT_{rb} (3.00 \times 10^8)^{-1} \\ = 0.068 \times dT_{rb}$$

受信機誤差差分が1mと仮定

- L1 - B1間で0.048cycle
- L2-B2間で0.068cycle

まとめ

- ISB推定による統合測位の評価を行った
- ゼロ基線解析によるISB推定から短時間でも安定して推定可能
- 短基線移動体におけるISB推定方法を提案した
- 移動体実験結果より、統合測位の有効性が示された

- 今後の課題
 - 都市部移動体での有効性の確認
 - 受信機時計誤差の影響を抑える必要あり

ありがとうございました。