

GNSSを利用した列車位置検出の研究

海運ロジスティクス専攻

1255017

中曽根 隆太

研究の背景・目的

鉄道はメジャーな公共交通機関であるが事業者が国営から民間企業に代わり、近年赤字路線等の運営問題が浮かび上がっている。



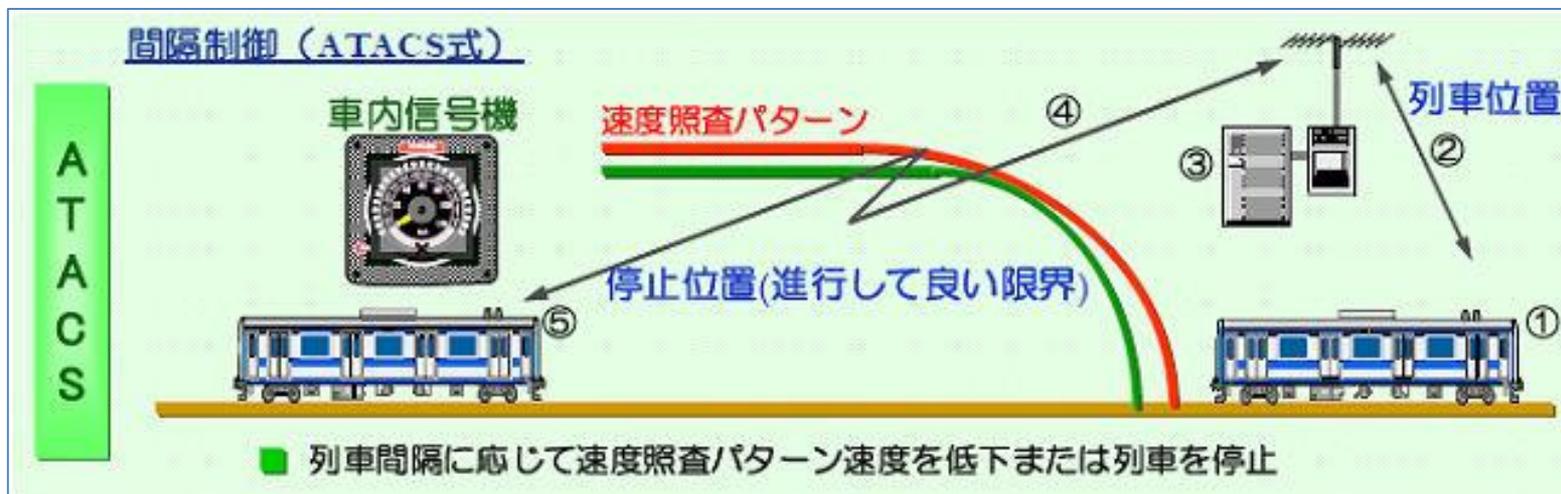
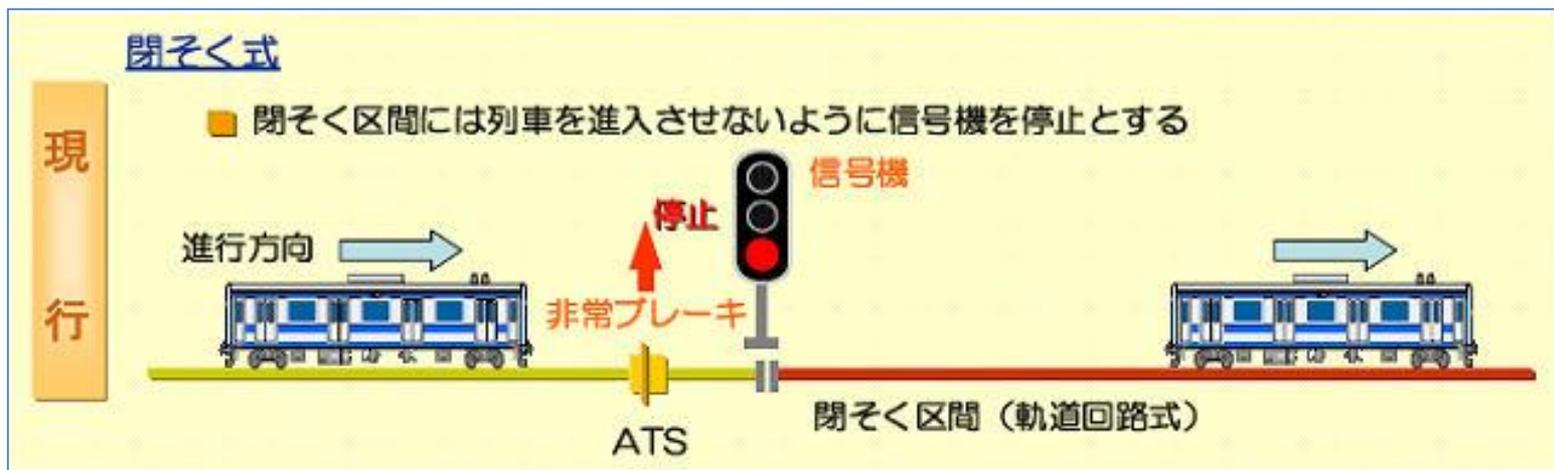
2013年9月の産経新聞より

そこで事業者にとって大きな負担となっている

位置検出の地上設備への依存

をGNSS利用の利点であるアンテナと受信機のみで位置が求まる事を利用し低減を目指す。

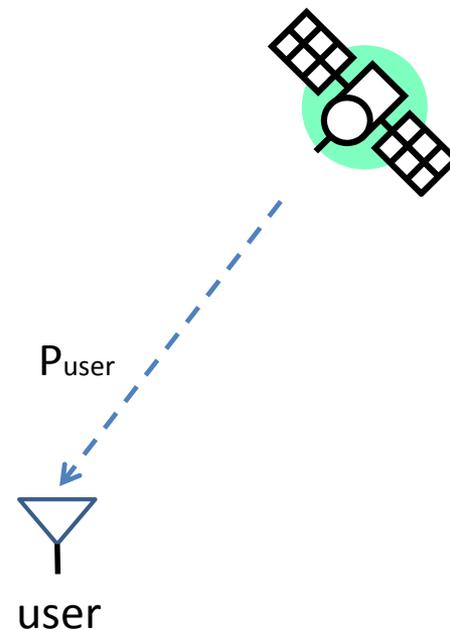
鉄道車両の位置検出 (現行方式)



衛星測位

今回は以下の点からコード測距を採用

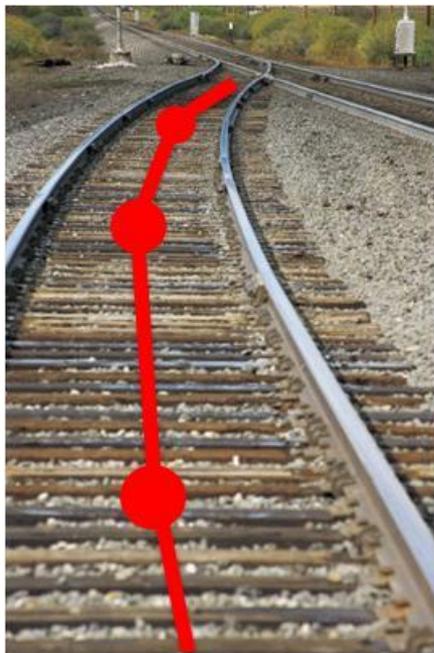
- 精度がそれほど要求されていない
- アベイラビリティを最大限増やしたい
- 列車上で完結させたい



擬似距離観測方程式

$$P^S = \rho^S + c(t_r - t^S) + I^S + T^S + \varepsilon$$

提案手法



鉄道車両は固定されたレール上に常に存在するため、これを拘束条件とし測位を行う。

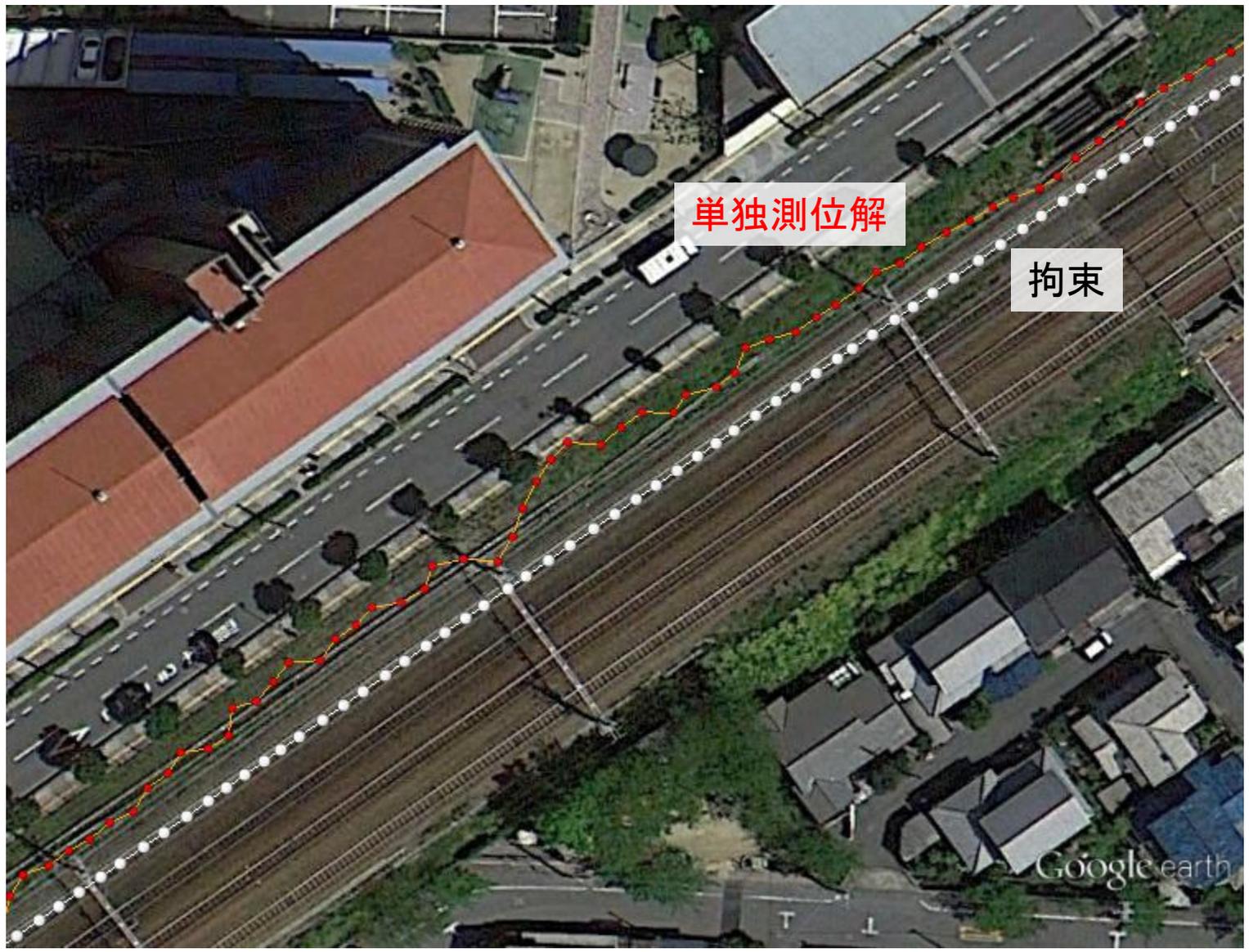
具体的には...

レールを座標列に落とし込み

- ① どの座標点間にあるか(区間検索)
- ② 座標点からどれ程の距離にあるか(測位)を計算する。

車両位置は保安制御用にも利用されるため
何らかの方法で測位解を保障する必要がある。

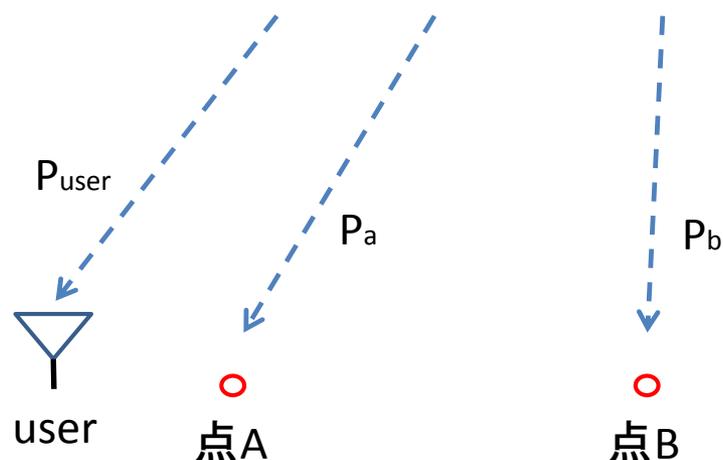
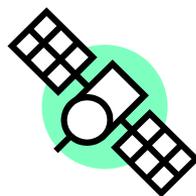
提案手法



提案手法（区間検索）

① 区間検索

観測値と座標点における擬似距離の衛星間一重差の残差二乗和を求めることで検索を行う。



理論的には
「衛星から各軌跡座標点までの距離」
と「観測点での観測値」
を比べた場合、最も残差の小さいものが観測点に近いはずである。

↓

観測値に入ってる受信機時計誤差が残る

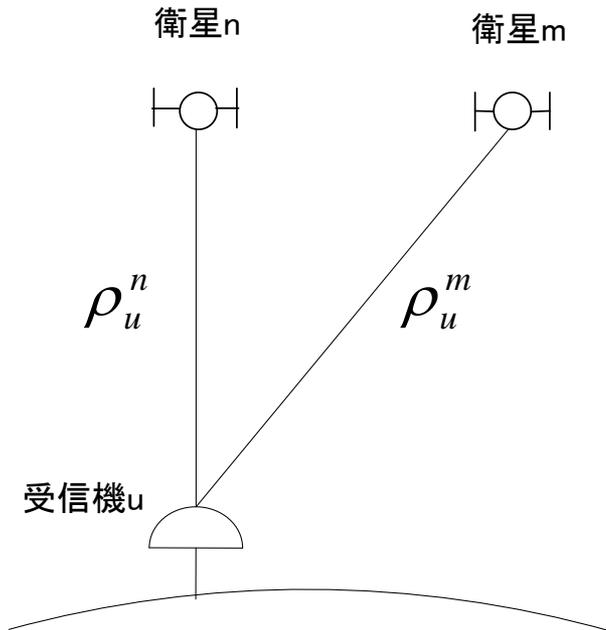
↓

衛星間一重差で解決

提案手法（区間検索）

衛星間一重差

$$\begin{aligned}
 p_r^{n-m} &= p^n - p^m \\
 &= (\rho^n - \rho^m) + (I^n - I^m) + (T^n - T^m) + c[(\underline{t_u} - t_u) - (t^n - t^m)] + \varepsilon \\
 &= \rho^{n-m} + I^{n-m} + T^{n-m} - c * t^{n-m} + \varepsilon
 \end{aligned}$$



受信機時計誤差が解消

↓

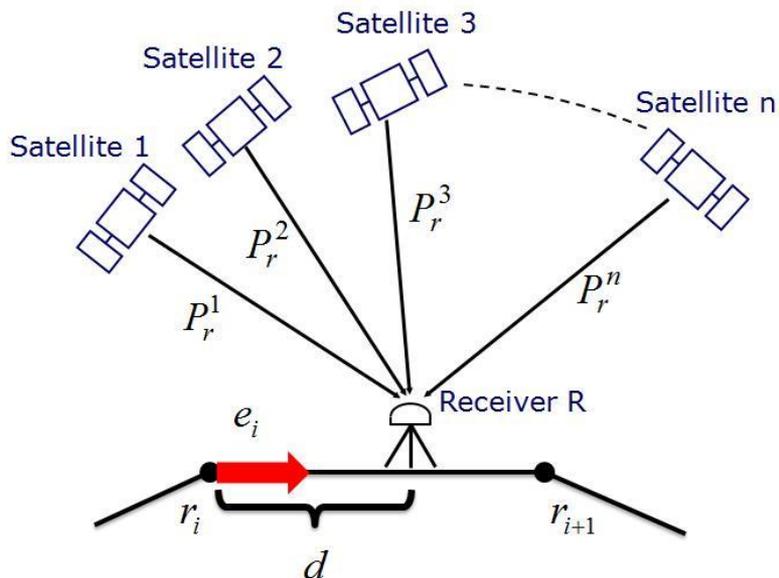
「座標点」と「観測点」での衛星間一重差の残差から観測点の位置を検出することが出来る

↓

衛星がs機見えている場合の観測点1での一重差の残差を W_1

$$W_1 = \begin{cases} P_1^{2-1} - P_u^{2-1} \\ P_1^{3-1} - P_u^{3-1} \\ \dots \\ \dots \\ P_1^{s-1} - P_u^{s-1} \end{cases}$$

提案手法（測位部）



$$\text{単位ベクトル } e_i = \frac{r_{i+1} - r_i}{|r_{i+1} - r_i|}$$

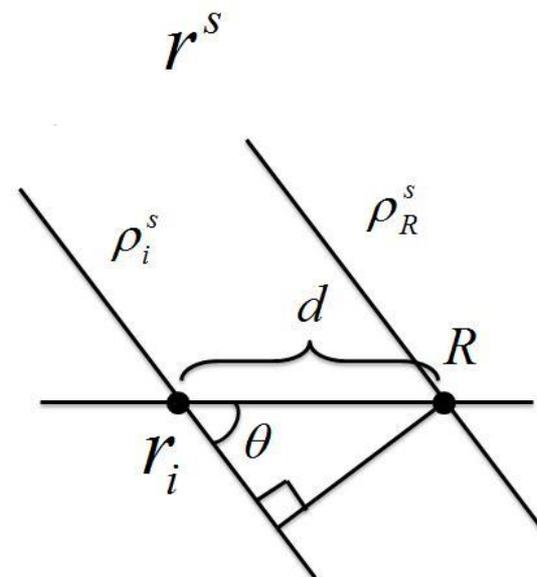
$$\text{受信機位置 } R = r_i + d * e_i$$

座標点と受信機位置の幾何学距離の関係

$$\rho_R^s \approx \rho_i^s + d * \cos\theta = \rho_i^s + d \frac{e_i^T (r_i - r^s)}{\rho_i^s}$$

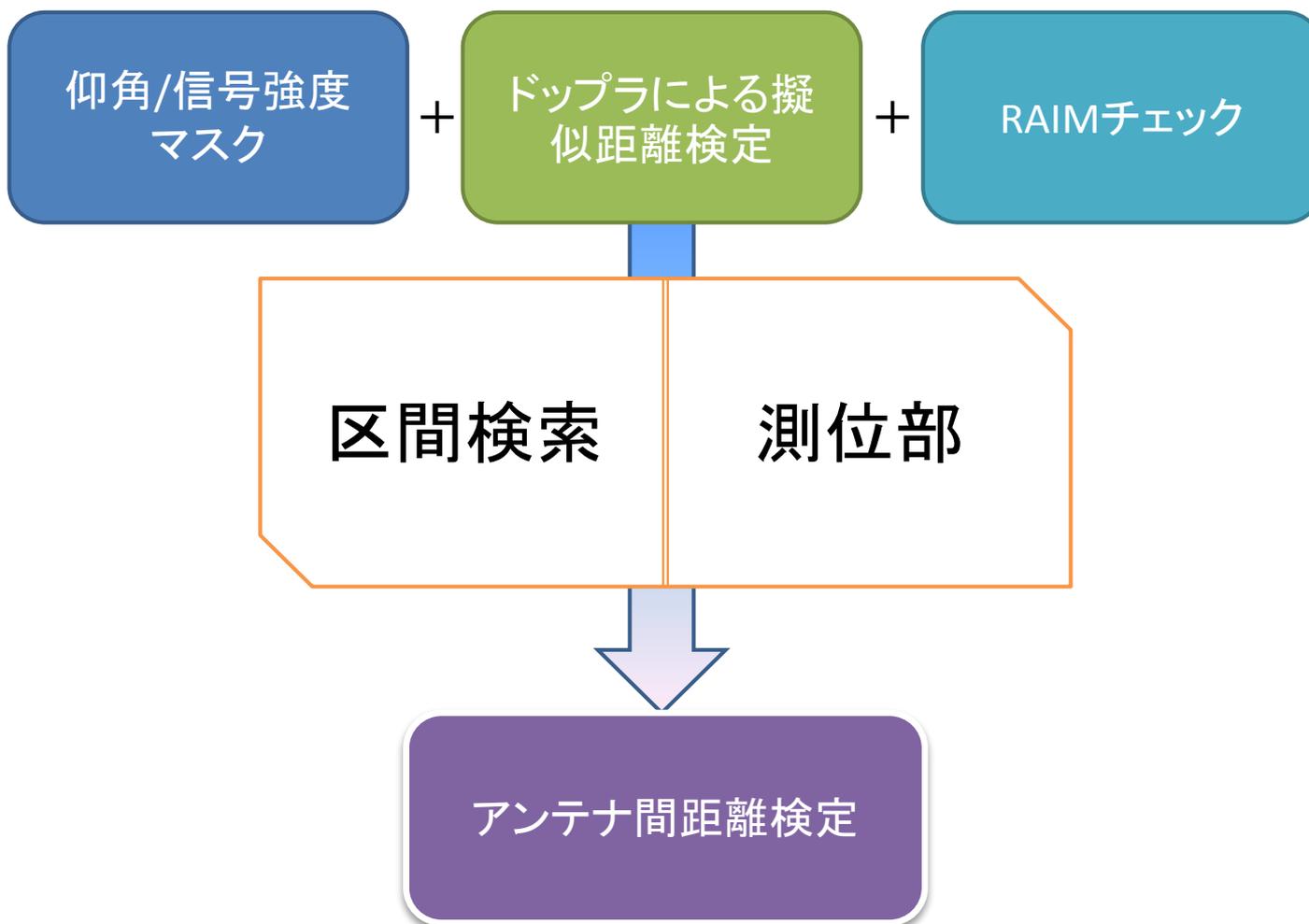
観測方程式を変形、以降最小二乗法でパラメータ推定

$$\begin{aligned} P^s &= \rho^s + c(t_R - t^s) + I^s + T^s + \varepsilon \\ &\approx \rho_i^s + d \frac{e_i^T (r_i - r^s)}{\rho_i^s} + c(t_R - t^s) + I^s + T^s + \varepsilon \end{aligned}$$



マルチパスと検定手法

観測方程式 $P^s = \rho^s + c(t_r - t^s) + I^s + T^s + \underline{\varepsilon}$



実験車両

前アンテナ



後アンテナ



在来線技術試験車U@tech

実験

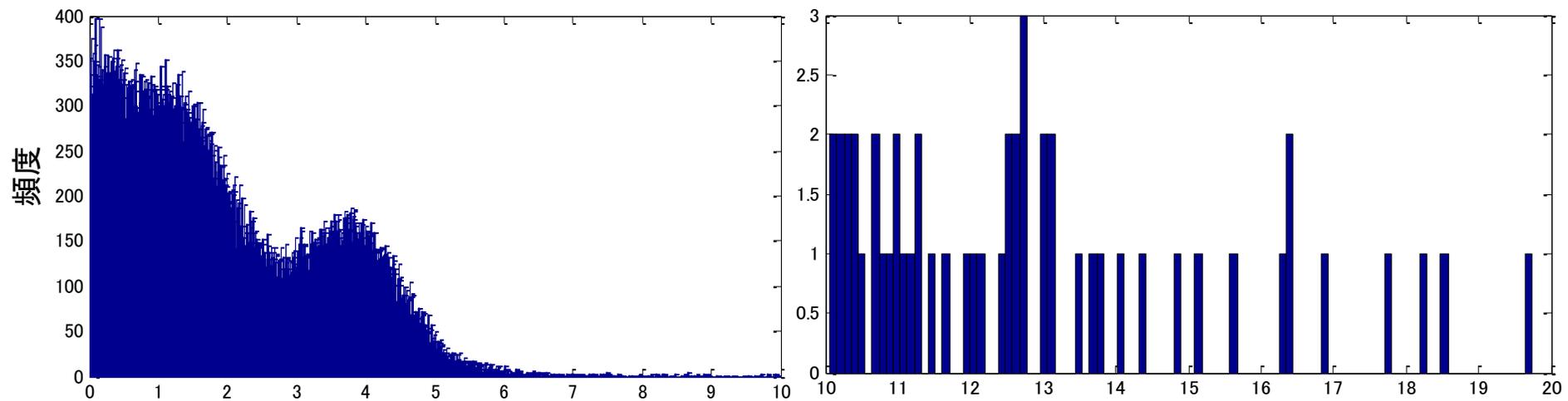
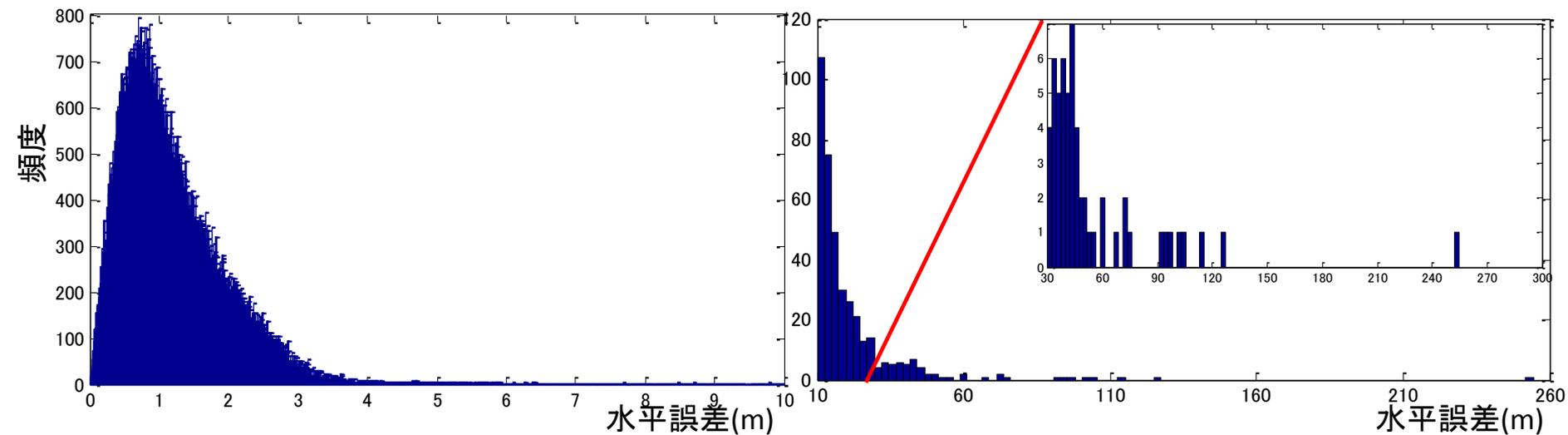


Date	区間	Data数
2012年 12月11日	琵琶湖線 [安土-彦根]	10万点
2012年 12日12日	湖西線 [堅田-京都]	6万点
2013年 2月5日	嵯峨野線 [亀岡-園部]	6万点

実験解析

[単独測位との比較]

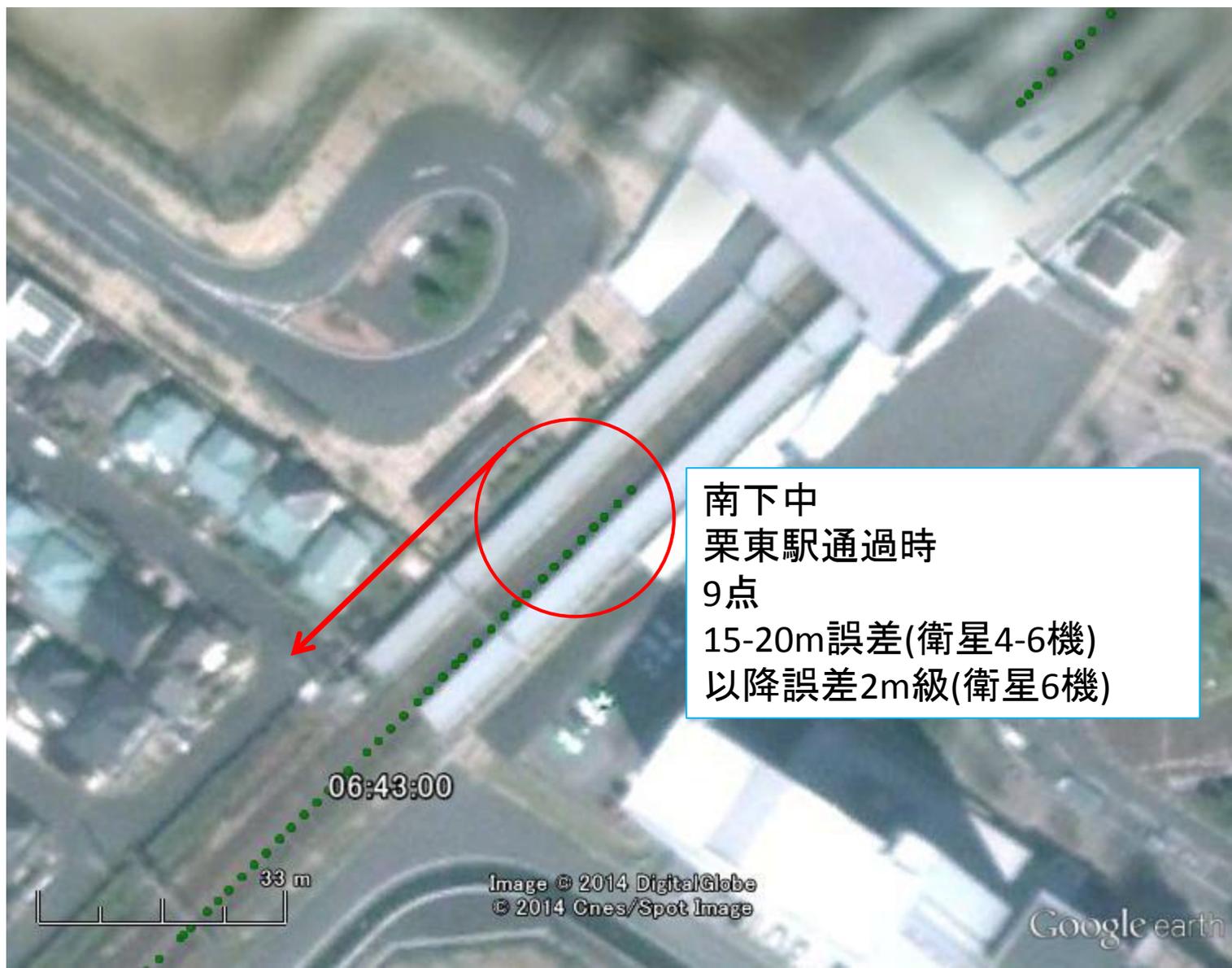
12月11日(全)	single	拘束
測位率(暫定)	92.1%(110873)	89.9%(103719)
標準偏差	1.89m	1.42m
10m以上	392	52
	0.35%	0.05%
max	254m	19.7m



誤差の大きい測位解 1



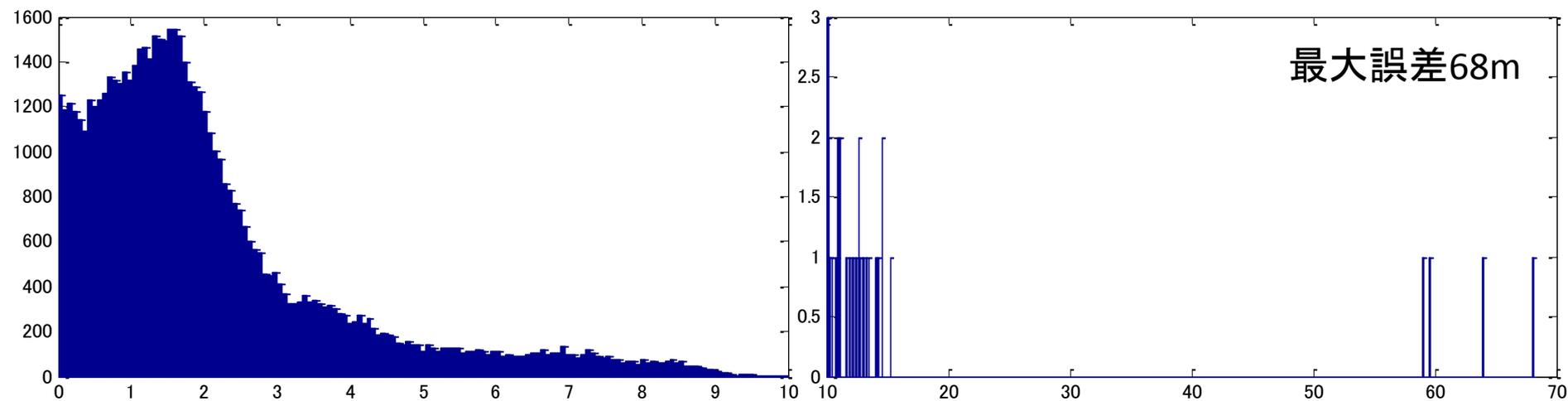
誤差の大きい測位解 2



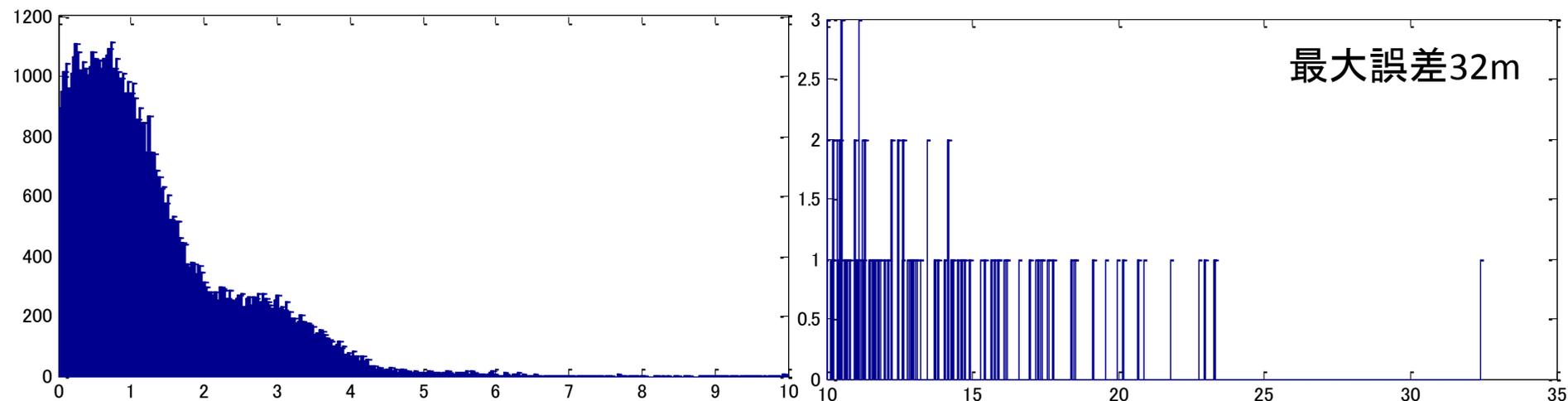
実験解析

[2012年12月12日湖西線、2013年2月5日嵯峨野線]

12月12日

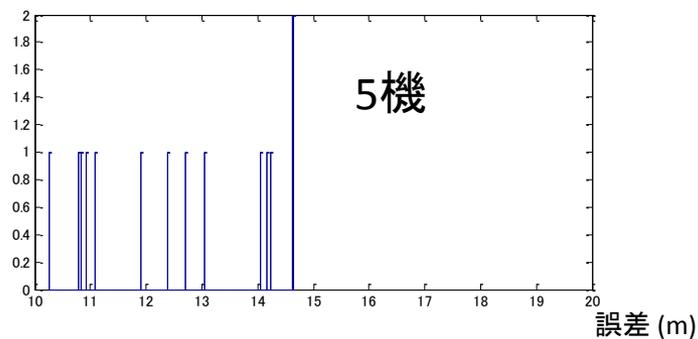
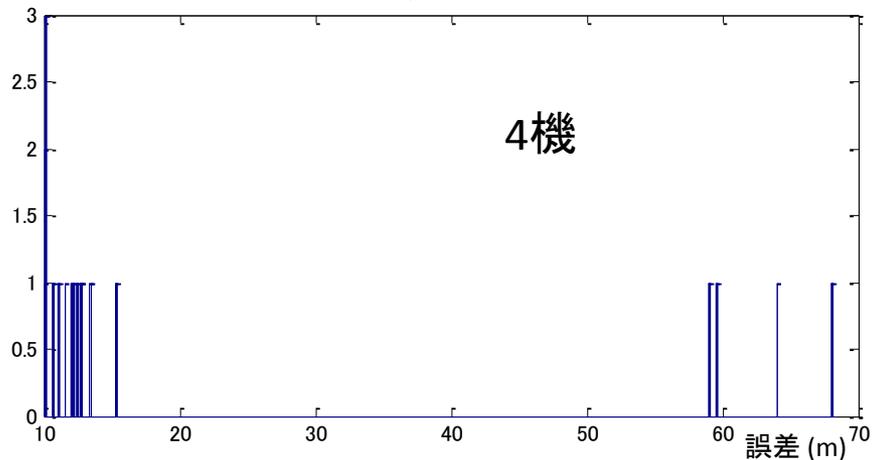


2月5日

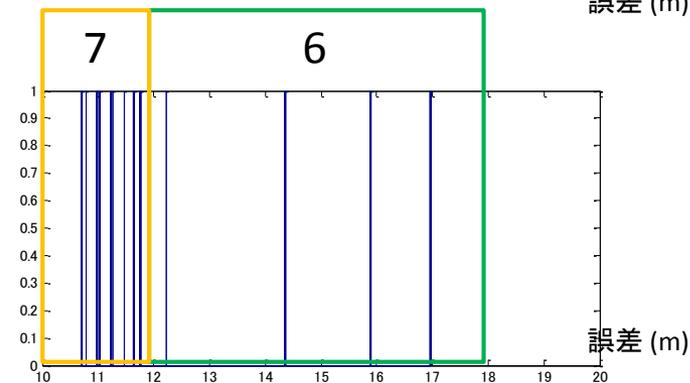
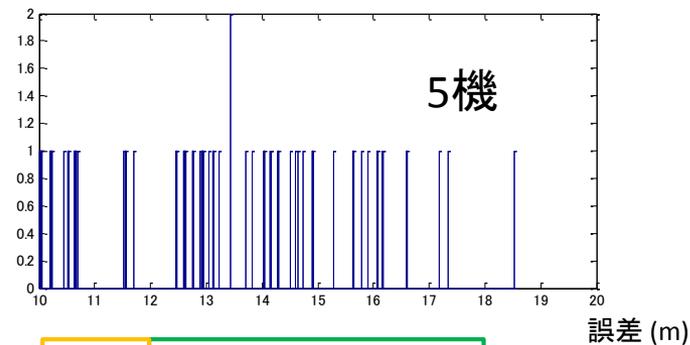
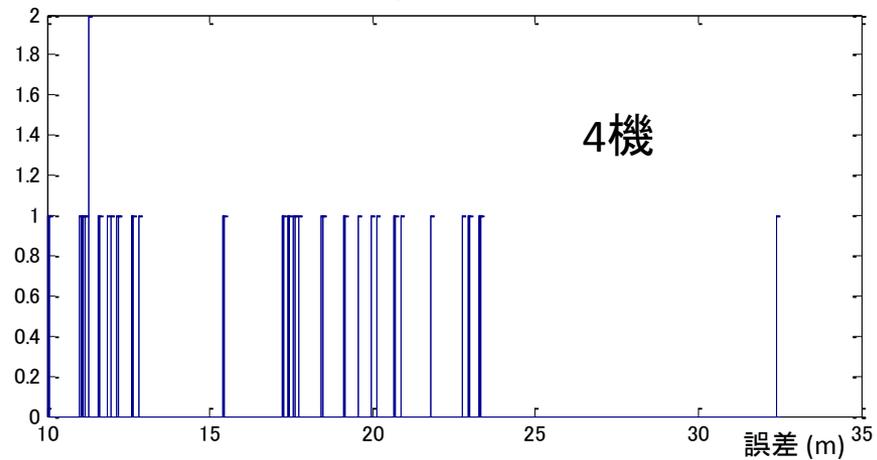


衛星数別測位誤差

12月12日

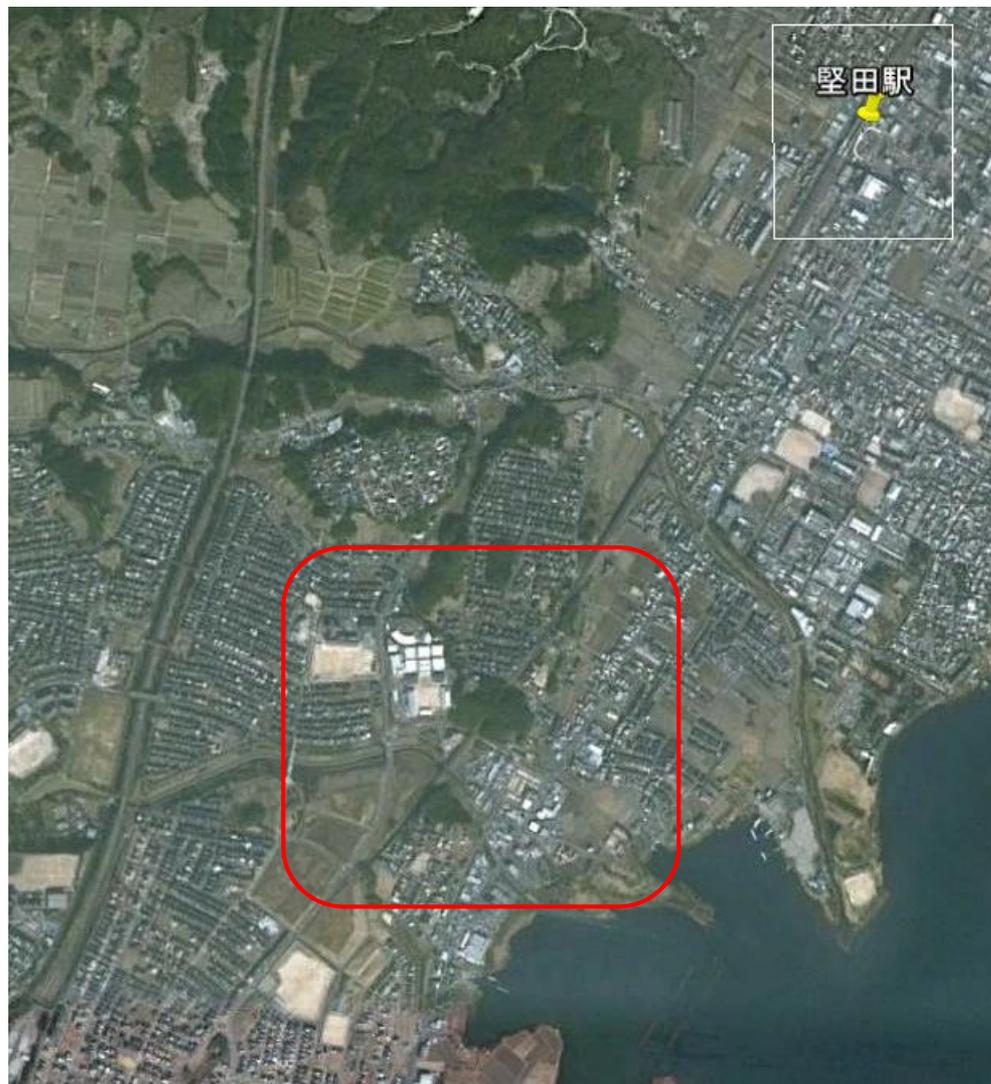


2月5日

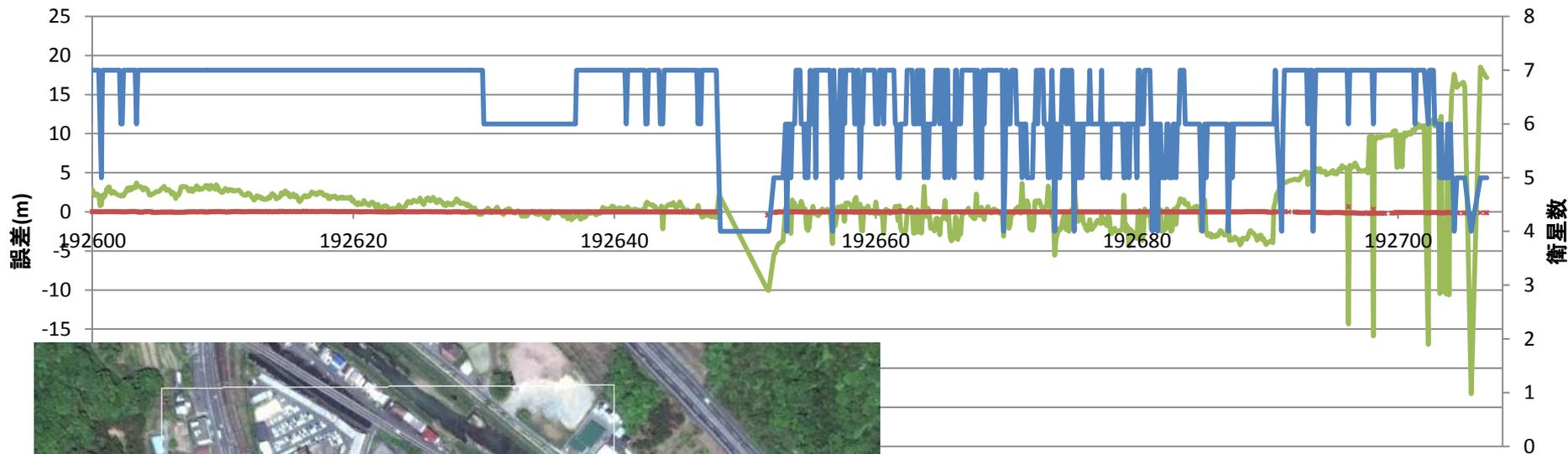


6衛星使用時、誤差10-11m間に3点あるが省略

湖西線 最大誤差箇所



嵯峨野線 連続誤差箇所



終点である園部駅に進入時

7衛星で数m

↓

7衛星で10m程度

↓

6衛星で10m程度

↓

5衛星で15m程度

↓

4衛星で15-23mの誤差発生

まとめ

- 拘束条件を利用した測位手法を提案/評価した。
また、主な誤差要因であるマルチパス誤差を排除するための検定を提案し実装した。
- 提案手法では単独測位と同等程度の測位率を保ちつつ高い信頼性で測位解が求められた。
誤差10m以内 99.92% (99.7%)
誤差20m以内 99.995%(99.9%)
誤差100m以内 100.0% (99.95%)

謝辞

- 実験にあたり鉄道総合技術研究所の山本様をはじめJR西日本、ジェイアール西日本コンサルタンツ、株式会社ジェノバと多くの方々に協力頂き感謝の意を表します。また、JAXAから受信機の借用、レファレンス作成に国土地理院の電子基準点データを使用させて頂きました。記して感謝いたします。

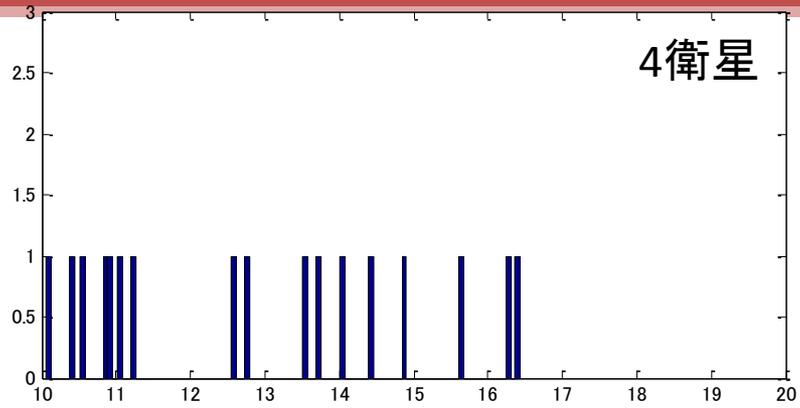
まとめ

satn	12月11日		err	
	点数	%	点数	%
4	1098	1.1	17	1.54827
5	3525	3.4	19	0.539007
6	11027	10.6	16	0.145098
7	46790	45.1		
8	25278	24.4		
9	11769	11.3		
10	4231	4.1		
	103718		52	0.050136

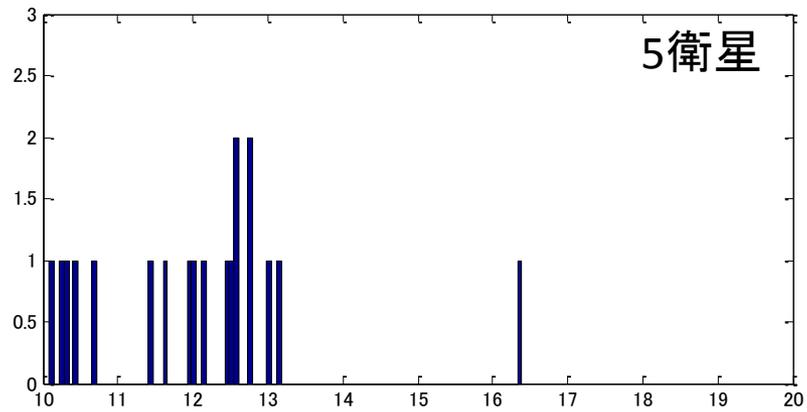
satn	2月5日		err	
	点数	%	点数	%
4	1037	1.6	36	3.471553
5	3334	5.1	47	1.409718
6	8544	13.1	11	0.128745
7	23475	36.0	17	0.072417
8	23959	36.8		
9	4835	7.4		
10		0.0		
	65184		111	0.170287

satn	12月12日		err	
	点数	%	点数	%
4	2061	3.3	22	1.067443
5	5001	7.9	14	0.279944
6	11838	18.8	3	0.025342
7	23871	37.9		
8	20255	32.1		
9		0.0		
10		0.0		
	63026		39	0.061879

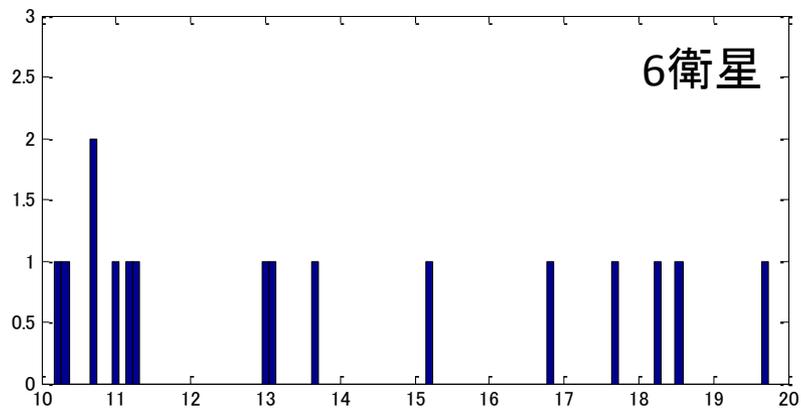
4衛星



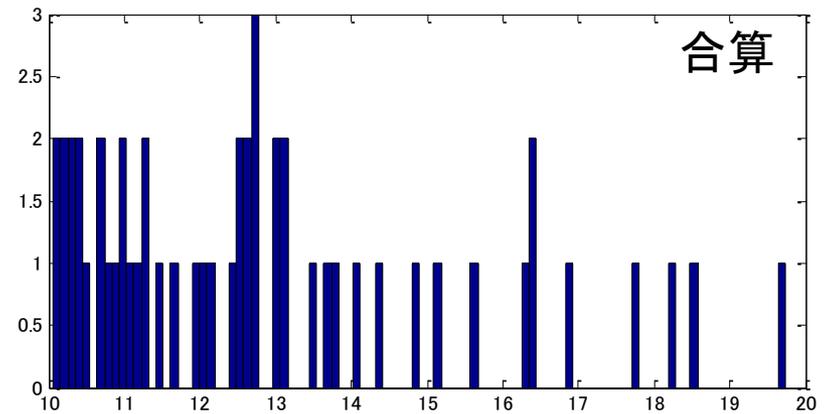
5衛星



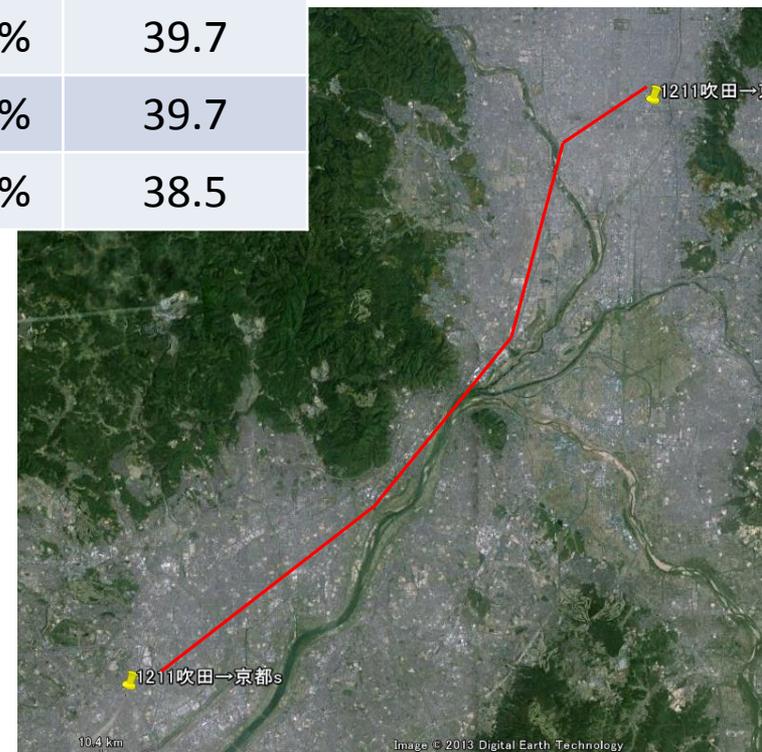
6衛星



合算

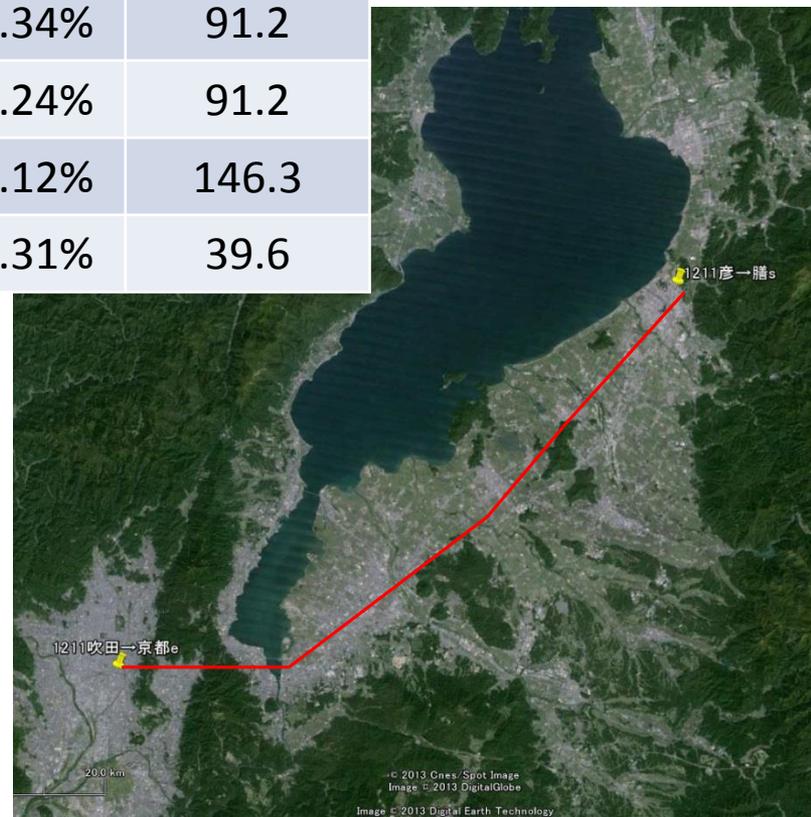


検証1	測位率 (%)	標準偏差 (m)	10m以上		最大誤差 (m)
単独測位	96.2	1.08	21	0.17%	40.7
線路拘束	97.9	0.89	7	0.06%	39.7
アンテナ間距離	3m	0.75	1	0.01%	11.4
	5m	0.79	2	0.02%	12.2
ドップラー	1.0m	0.89	7	0.06%	39.6
	1.5m	0.91	6	0.05%	49.5
信号強度	8db	1.16	27	0.22%	39.2
	10db	0.91	14	0.11%	39.7
RAIM	96.3	0.84	5	0.04%	39.7
SBAS	89.2	1.11	5	0.04%	38.5



検証2	測位率 (%)	標準偏差 (m)	10m以上	最大誤差 (m)	
単独測位	97.0	1.08	45	0.21%	47.6
線路拘束	97.8	1.60	51	0.24%	110.3
アンテナ間距離	3m	0.76	5	0.02%	49.0
	5m	0.79	7	0.03%	49.0
ドップラー	1.0m	1.35	32	0.15%	121.37
	1.5m	1.31	37	0.18%	121.37
信号強度	8db	1.53	71	0.34%	91.2
	10db	1.37	51	0.24%	91.2
RAIM	97.4	1.08	26	0.12%	146.3
SBAS	90.1	1.56	60	0.31%	39.6

全時間	観測データ	3衛星以上	4衛星以上
23360	21598	21454	21390
	92.5%	91.8%	91.6%



検証3	測位率 (%)	標準偏差 (m)	10m以上		最大誤差 (m)	26
単独測位	68.6	3.47	7	0.09%	289	
線路拘束	69.5	1.89	30	0.41%	85.4	
アンテナ間距離 3m	68.8	1.51	14	0.19%	18.9	
	5m	69.3	1.53	22	0.30%	18.9
ドップラー 1.0m	69.2	1.62	35	0.48%	41.7	
	1.5m	69.4	1.60	34	0.46%	41.7
信号強度 8db	64.2	1.74	83	1.22%	30.1	
	10db	68.0	1.65	49	0.68%	34.9
RAIM	68.4	1.60	10	0.14%	56.2	
SBAS	57.9	2.00	1	0.01%	10.2	



検証4		測位率 (%)	標準偏差 (m)	10m以上		最大誤差 (m)
単独測位		78.4	2.09	182	1.20%	117.2
線路拘束		80.0	1.64	48	0.31%	59.6
アンテナ間距離	3m	79.0	1.31	11	0.07%	16.7
	5m	79.6	1.38	23	0.15%	25.2
ドップラー	1.0m	79.7	1.69	38	0.31%	81.7
	1.5m	79.8	1.54	33	0.21%	63.2
信号強度	8db	78.4	1.67	24	0.16%	108
	10db	79.4	7.29	38	0.25%	511
RAIM		79.6	1.72	74	0.48%	61.9
SBAS		70.0	1.39	39	0.29%	23.2

