

# LEO衛星を用いたドップラー航法

2023/09/01 測位技術振興会 第5回研究発表講演会

大阪公立大学大学院 工学研究科

辻井研究室 修士1年

BJA23061 松藤尚也

担当教員:辻井利昭教授

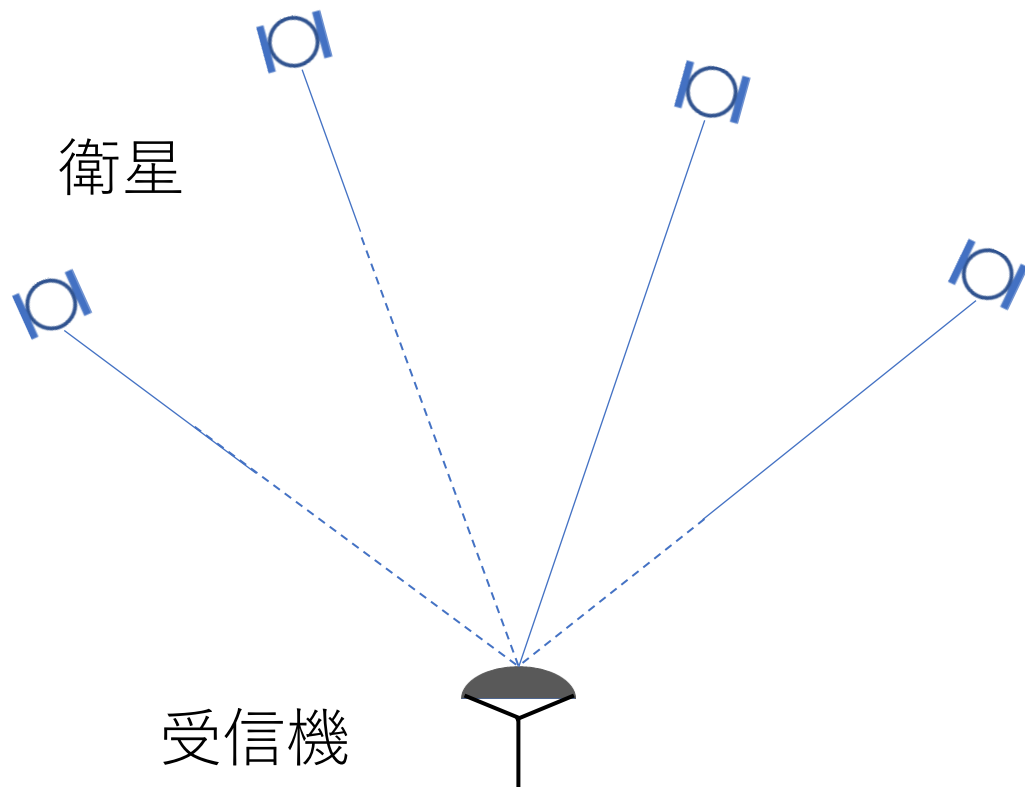
# 目次

1. 研究背景・研究目的
2. 原理
3. シミュレーション条件
4. シミュレーション結果
5. 実験の方針・解析結果
6. まとめと今後の課題

# 目次

1. 研究背景・研究目的
2. 原理
3. シミュレーション条件
4. シミュレーション結果
5. 実験の方針・解析結果
6. まとめと今後の課題

# 研究背景

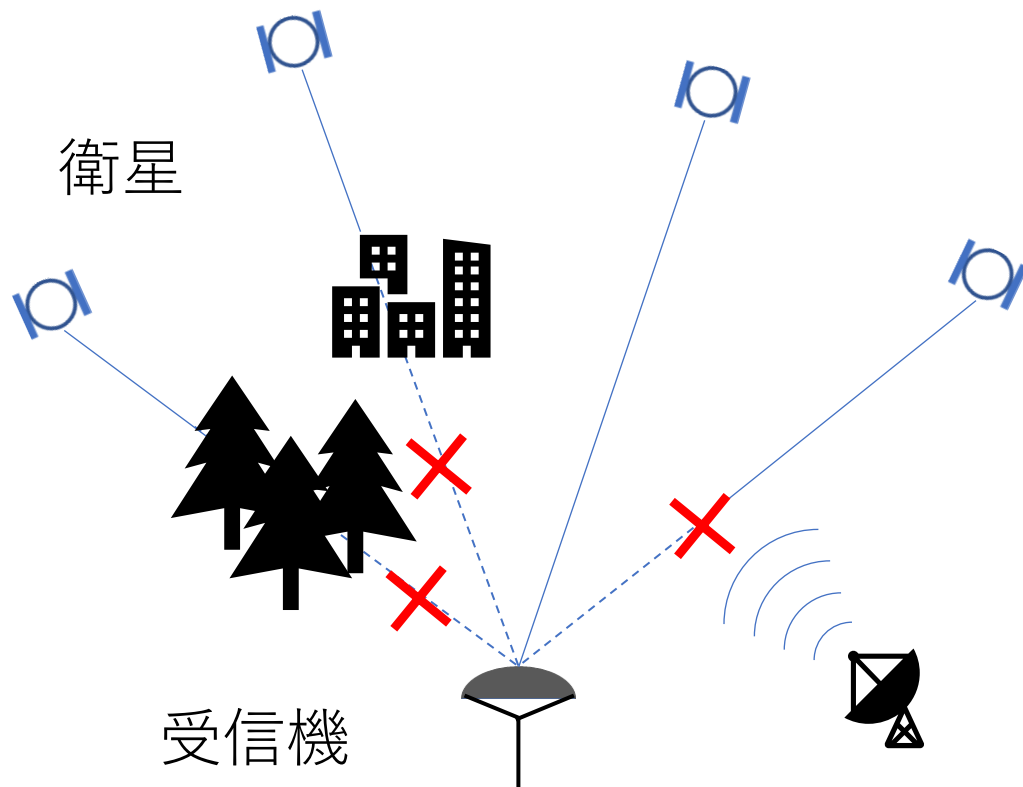


## GPSの測位原理

衛星-受信機間の距離

衛星信号が微弱

# 研究背景



## GPSの測位原理

衛星-受信機間の距離

衛星信号が微弱

- 木々の密集地
- 都市部
- 妨害電波

➔ GPSが利用できない

# 研究目的

GPS衛星

LEO(Low Earth Orbit)衛星

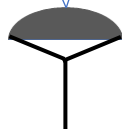
高度 **2,000 km** 以下の衛星

※GPSは高度約20,200 km

LEO衛星

多くの衛星が必要だが...

受信機



# 研究目的



## LEO(Low Earth Orbit)衛星

高度 **2,000 km** 以下の衛星

※GPSは高度約20,200 km

LEO衛星

多くの衛星が必要だが...

軌道が低い⇒信号強度が高い

速度が大きい⇒**ドップラー**が大きい

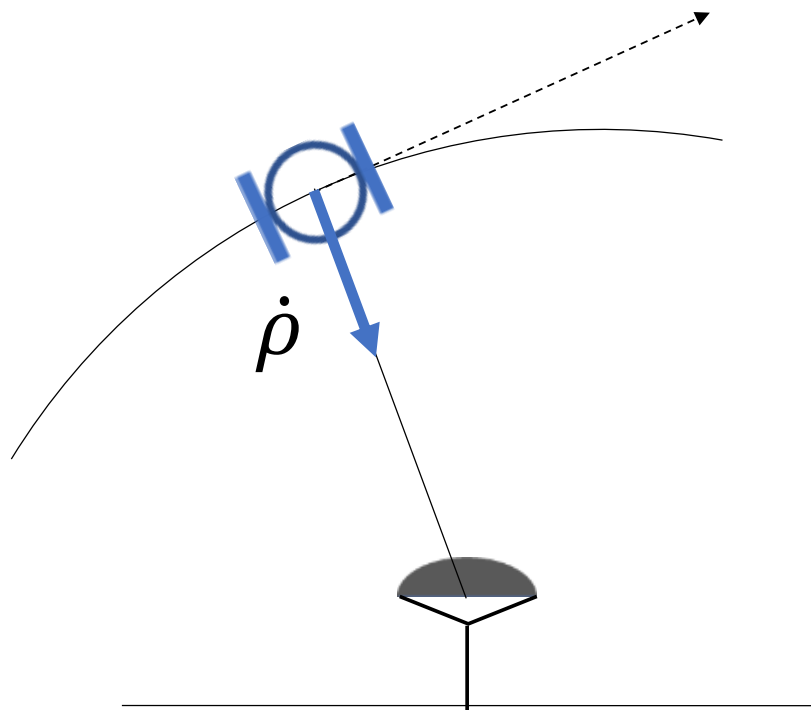
目的:LEO衛星のドップラー周波数を用いた測位

# 目次

1. 研究背景・研究目的
2. 原理
3. シミュレーション条件
4. シミュレーション結果
5. 実験の方針・解析結果
6. まとめと今後の課題



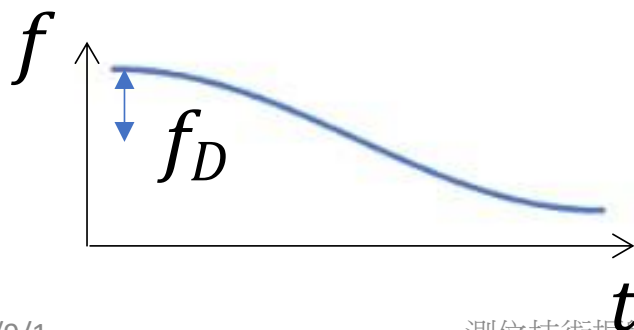
# 原理



電波のDoppler効果の式

$$\dot{\rho} = c \frac{f_D}{f_c}$$

- ・光速  $c$
- ・送信周波数  $f_c$  → 既知



LEO衛星の視線方向速度 $\dot{\rho}$ が  
ドップラー周波数 $f_D$ より得られる

# 原理

実際の距離の変化率

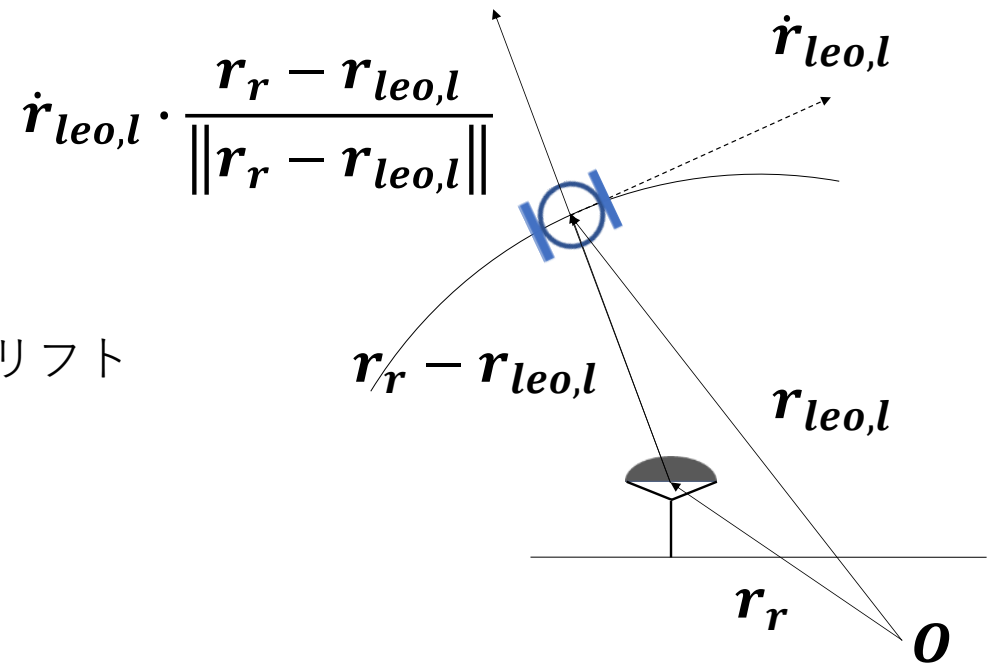
$$\dot{\rho} = \dot{r}_{leo,l} \cdot \frac{\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{leo,l}}{\|\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{leo,l}\|}$$

+  $c\dot{\delta}t_r - c\dot{\delta}t_{leo,l}$  クロックドリフト

+  $c\dot{\delta}_{iono}$  電離圏遅延

+  $c\dot{\delta}_{trop}$  対流圏遅延

+  $\varepsilon_l$  観測誤差



# 原理

実際の距離の変化率

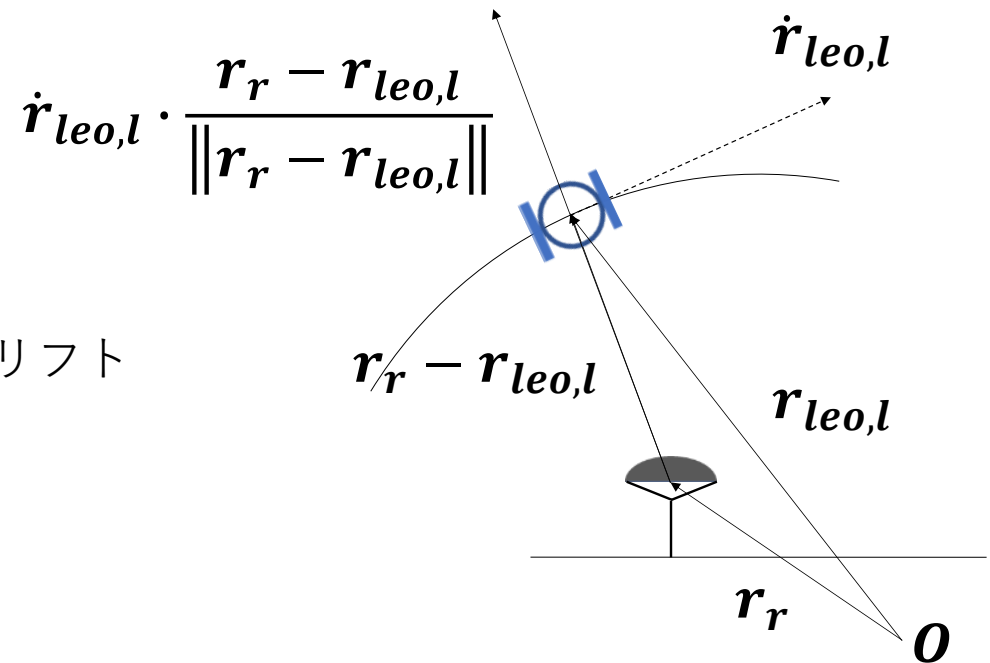
$$\dot{\rho} = \dot{r}_{leo,l} \cdot \frac{\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{leo,l}}{\|\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{leo,l}\|}$$

+  $c\dot{\delta}t_r - c\dot{\delta}t_{leo,l}$  クロックドリフト

+  $c\dot{\delta}_{iono}$  電離圏遅延

+  $c\dot{\delta}_{trop}$  対流圏遅延

+  $\varepsilon_l$  観測誤差



最小二乗法を用いて受信機座標 $\mathbf{r}_r$ を求める

GPSとの違い:衛星のクロックドリフトが未知数

# 目次

1. 研究背景・研究目的
2. 原理
3. シミュレーション条件
4. シミュレーション結果
5. 実験の方針・解析結果
6. まとめと今後の課題

# シミュレーション条件

- LEO衛星の運動方程式

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mathbf{r}}{r^3}$$

- LEO衛星
  - 軌道高度:710km
  - 軌道傾斜角:40,47度
  - 衛星数:100, 200基
- 受信機位置:B6棟屋上
- 初期推定値:電子基準点大阪A



# シミュレーション条件

電離圏遅延, 対流圏遅延を無視した観測方程式

$$\dot{\rho}_l = \dot{\mathbf{r}}_{leo,l} \cdot \frac{\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{leo,l}}{\|\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{leo,l}\|} + c\delta t_r - c\delta t_{leo,l} + \varepsilon_l$$

t=0とt=30における  
疑似距離の変化率

$c\delta t_r, c\delta t_{leo,l}$ :  $[-50, 50]$ [m/s]の一樣乱数     $\varepsilon_l$ :  $1\sigma = 0.01$ [m/s]のガウス分布に従う乱数

誤差の評価: RMSE[m]を使用

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$n$ : データの個数  
 $y_i$ : 真値     $\hat{y}_i$ : 推定値

# シミュレーション条件

- ① 全体の衛星数**100**基， 可視衛星数**4**基
- ② 全体の衛星数**200**基， 可視衛星数**7**基
- ③ ①と可視衛星数は同じだが， 衛星配置が悪い

# シミュレーション条件

① 全体の衛星数100基，可視衛星数4基

② 全体の衛星数200基，可視衛星数7基

⇒可視衛星数の影響を検証

③ ①と可視衛星数は同じだが，衛星配置が悪い

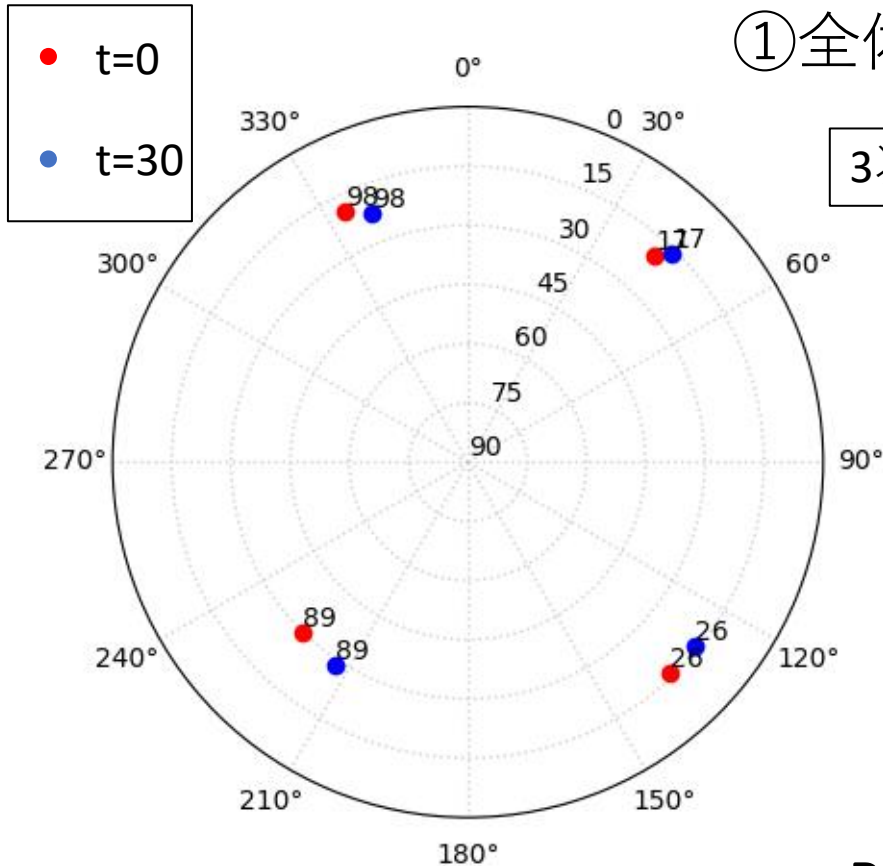
⇒衛星配置の影響を検証



# 目次

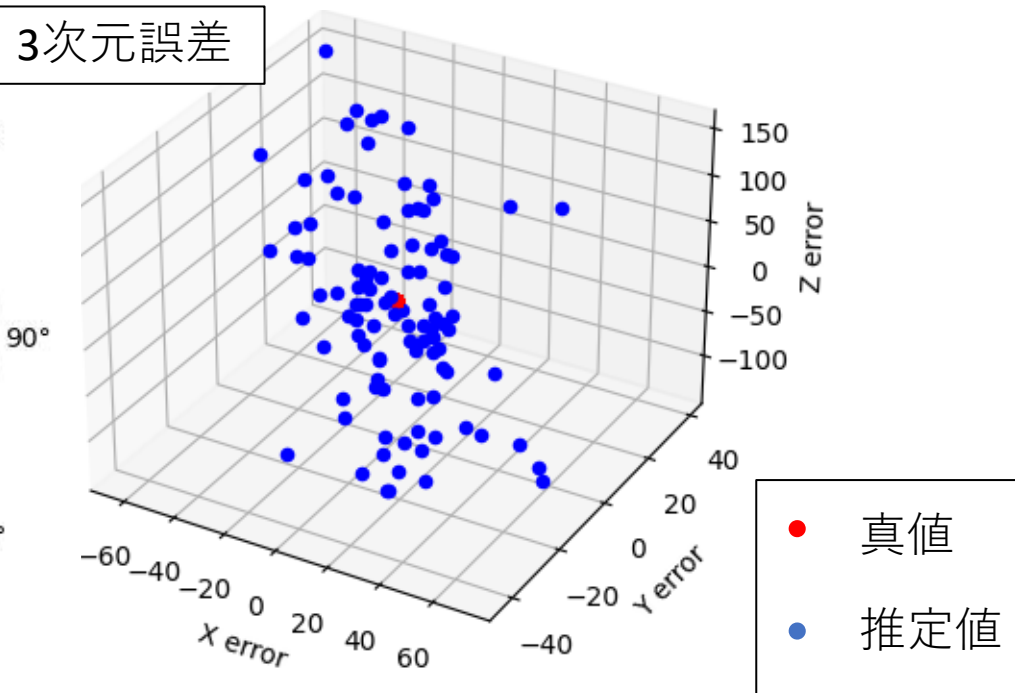
1. 研究背景・研究目的
2. 原理
3. シミュレーション条件
4. シミュレーション結果
5. 実験の方針・解析結果
6. まとめと今後の課題

# シミュレーション結果①



①のスカイプロット

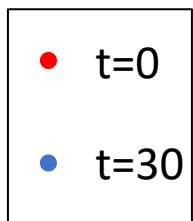
①全体の衛星数100基，可視衛星数4基



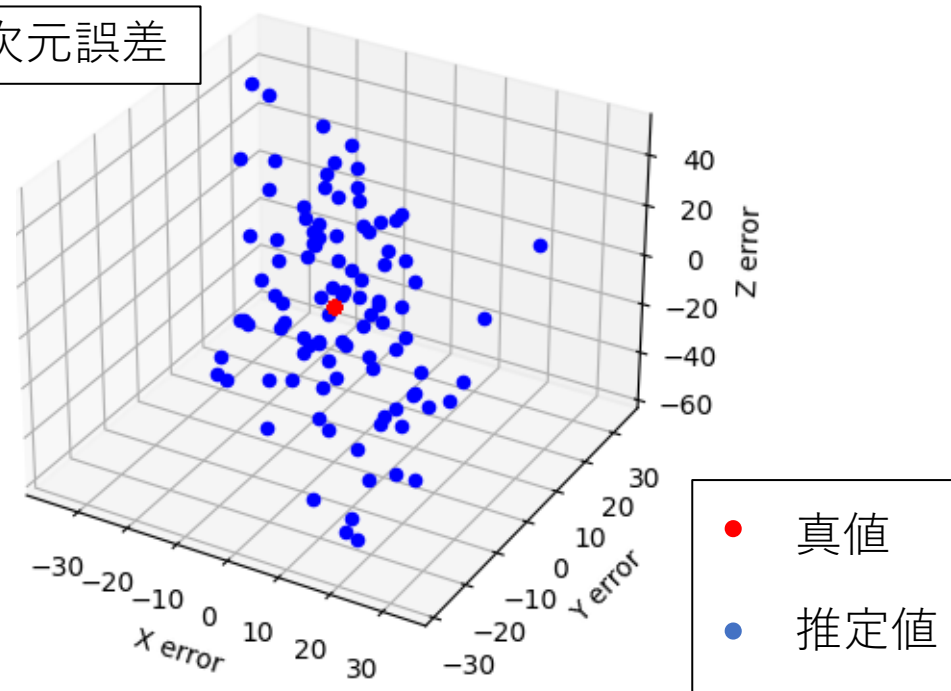
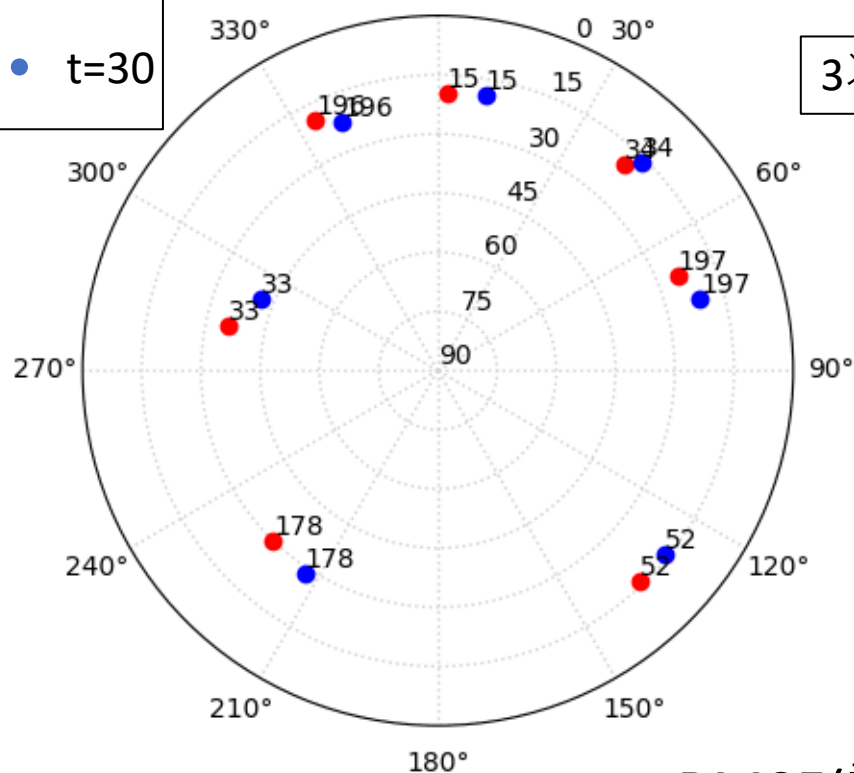
RMSE(試行回数100回):89.38m

GPS単独測位の精度:10~20m

# シミュレーション結果②



②全体の衛星数200基, 可視衛星数7基

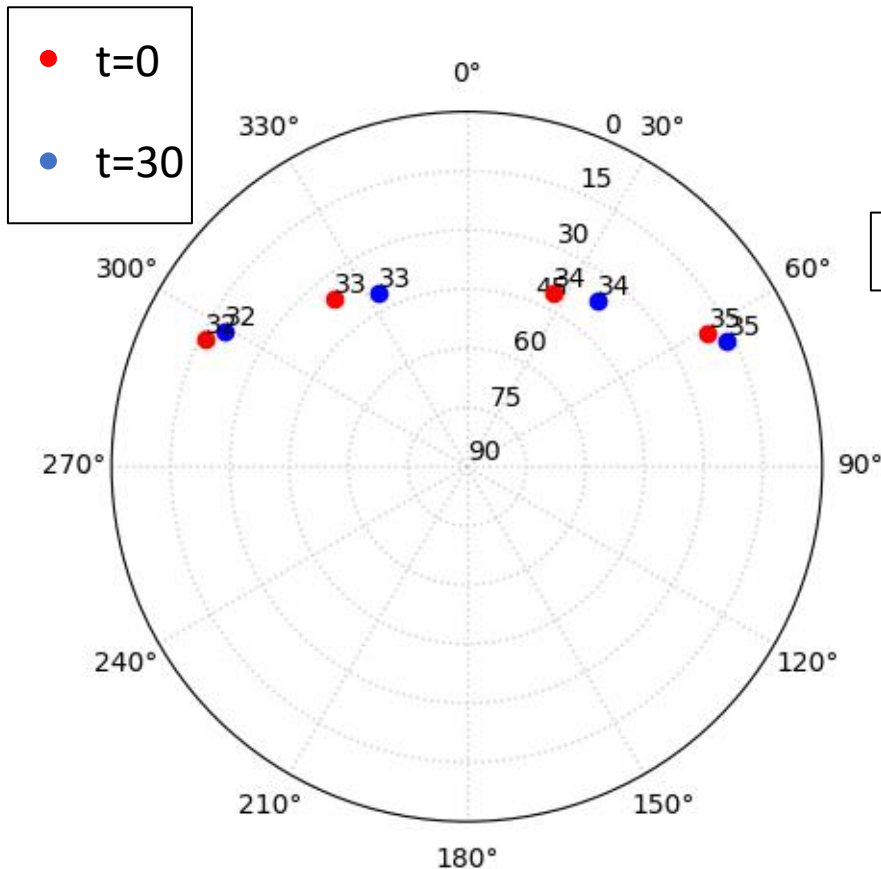


RMSE(試行回数100回):27.88m (① 89.38m )

②のスカイプロット

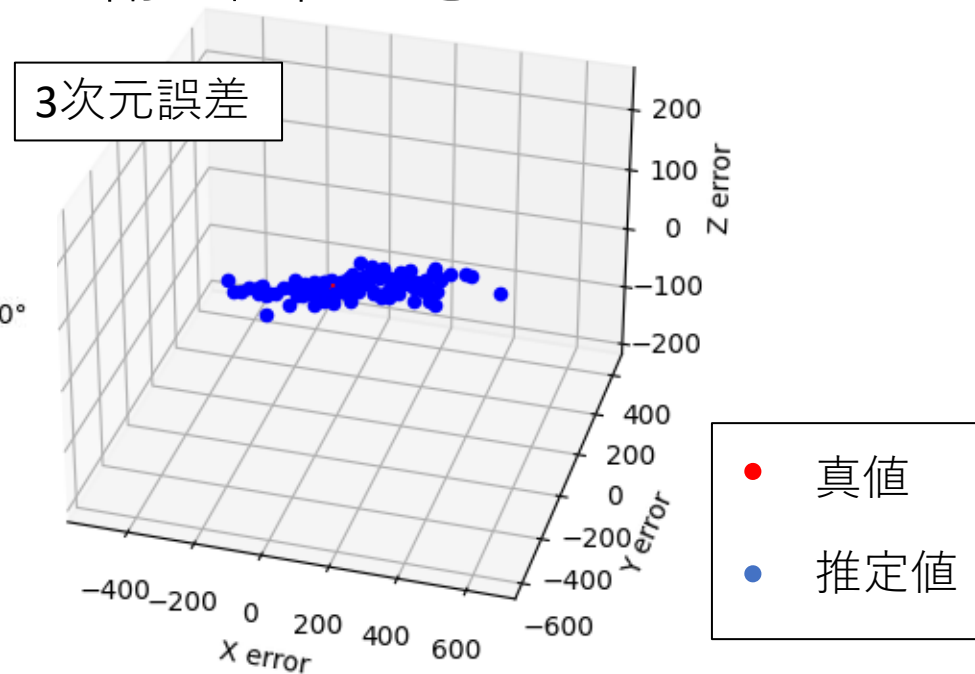
可視衛星数の増加により改善

# シミュレーション結果③



③のスカイプロット

③①と可視衛星数は同じだが  
衛星配置が悪い



RMSE(試行回数100回):361.61m

(① 89.38m) 衛星配置が悪い環境では  
測位精度が劣化

# まとめ

- 複数エポックの情報を用いることで  
**100m以下**の精度で測位可能
- 衛星数が多い，衛星配置が良い環境で精度改善
- 衛星配置が悪い環境では測位精度が悪化

# 目次

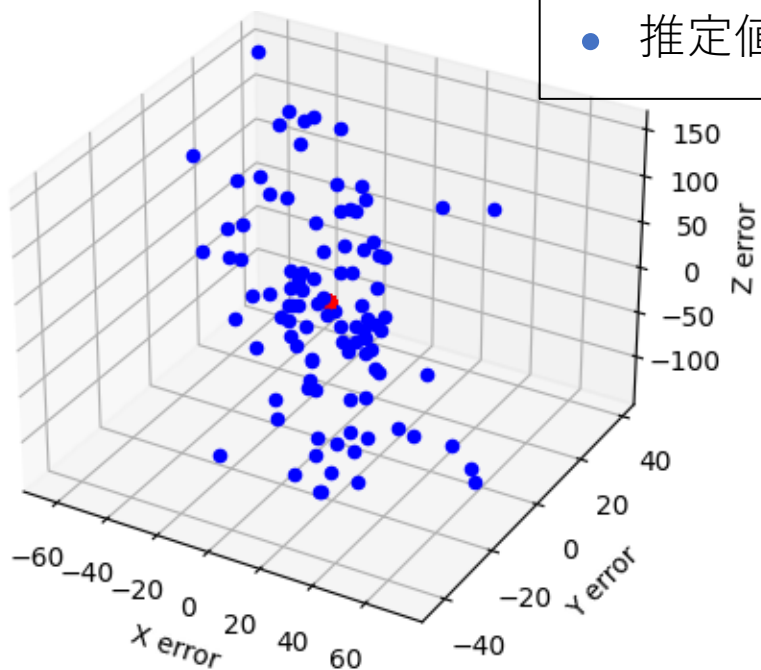
1. 研究背景・研究目的
2. 原理
3. シミュレーション条件
4. シミュレーション結果
5. 実験の方針・解析結果
6. まとめと今後の課題

# 方針

## ドップラー周波数を用いたシミュレーション

3次元誤差

● 真値  
● 推定値



<条件> ・全体衛星数100基  
・可視衛星数4基

RMSE(試行回数100回):89.38m

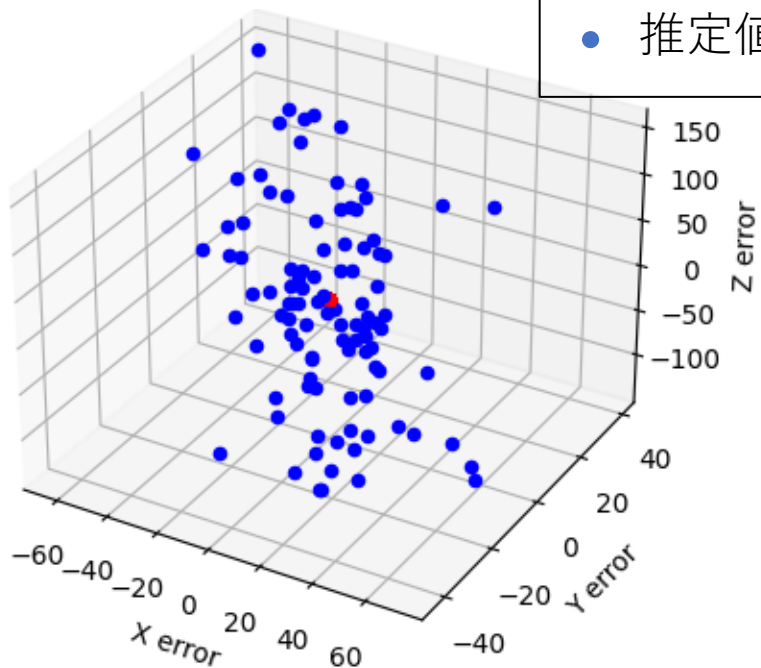
GPSを使用せず位置推定が  
可能であることを確認

# 方針

## ドップラー周波数を用いたシミュレーション

3次元誤差

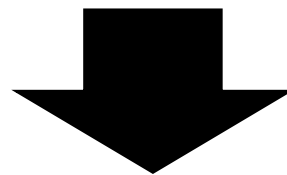
● 真値  
● 推定値



<条件> ・全体衛星数100基  
・可視衛星数4基

RMSE(試行回数100回):89.38m

GPSを使用せず位置推定が  
可能であることを確認



実LEO衛星 (Orbcomm) の  
ドップラー周波数を利用



# 方針

目標: ドップラー周波数の取得

Orbcomm衛星の信号を  
デコードするソフトウェアを使用

デコードが可能



信号の追尾が可能

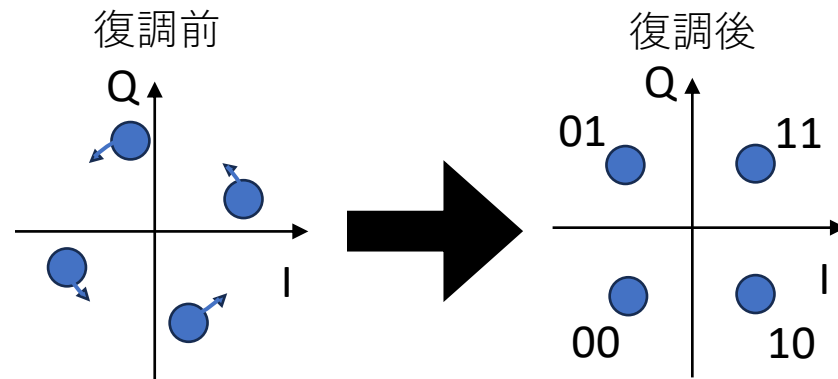


ドップラー周波数を得ることが可能

Orbcommの変調方式

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

4段階の位相を用いて2ビット分のデータを送信



信号空間ダイアグラム

原点からの距離: 振幅

水平軸から反時計回りの角度: 位相

# 実験

## 実験環境・条件



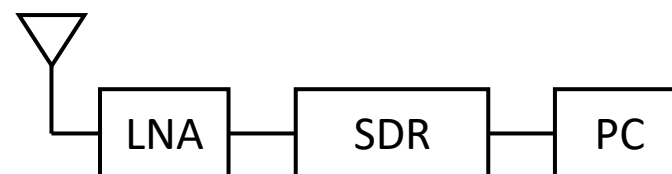
実験場所:I-wing中百舌鳥前広場

実験日時:①2023年5月8日16:00~17:00

②2023年7月13日15:00~16:00

※①:FM109衛星 ②:FM110衛星を使用

## 実験器具の構成・流れ



- ①アンテナで信号を受信
- ②LNAで信号を増幅
- ③SDRで信号をIQデータに変換
- ④PCにデータを保存
- ⑤ソフトウェアを用いてデコード

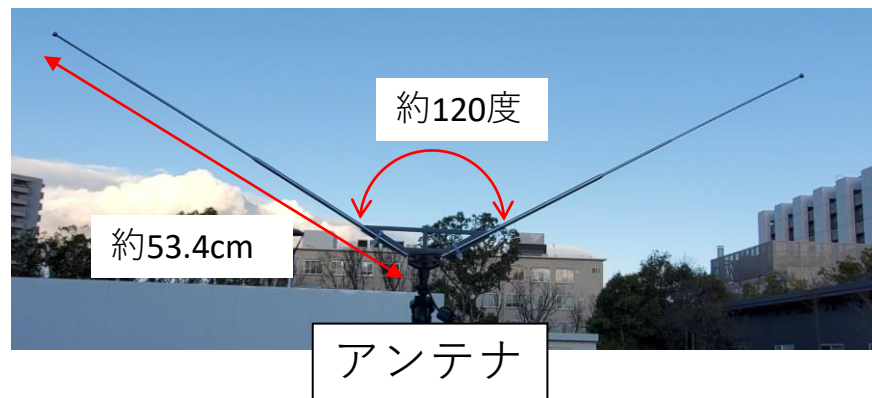
# 実験器具

## 使用器具

V型ダイポールアンテナ（アンテナ長53.4cm）

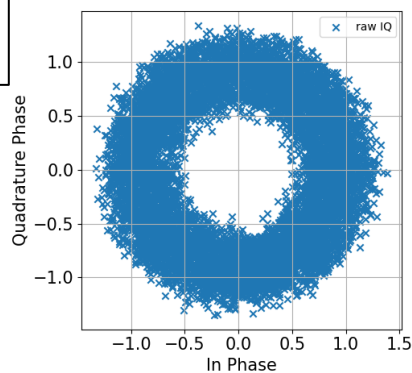
RTL-SDR...ソフトウェア受信機

LNA...137MHz帯の信号増幅

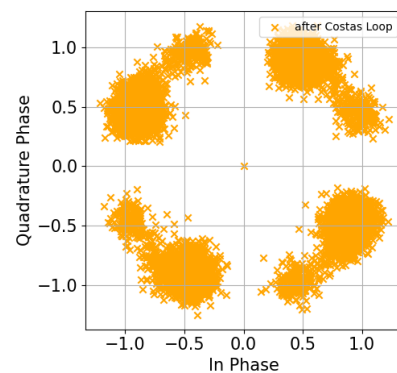


# 解析結果 (IQ信号)

A



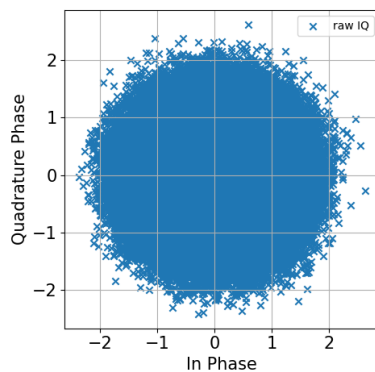
デコード前



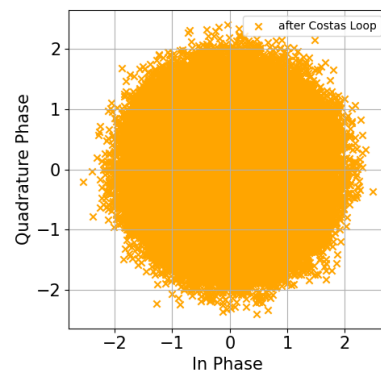
デコード後

デコード後に信号を  
QPSK信号に復調できている

B



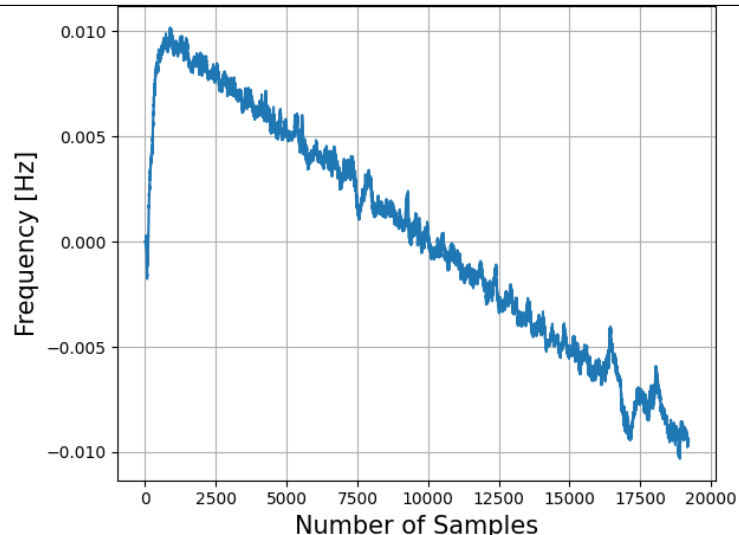
デコード前



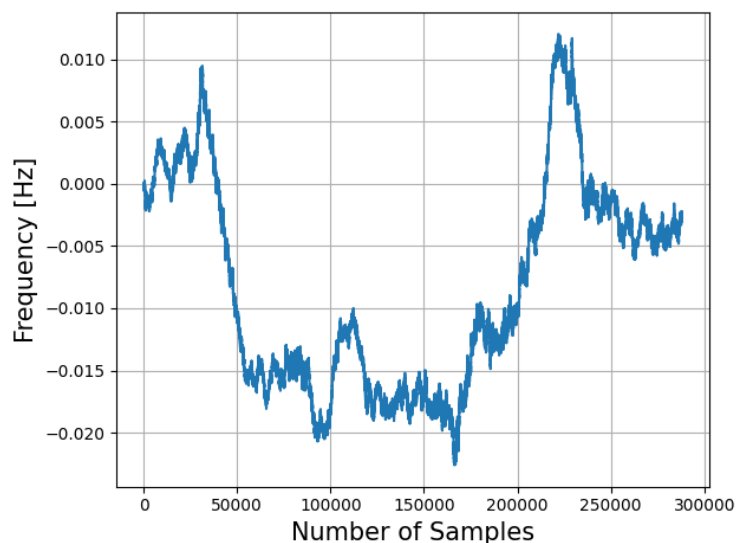
デコード後

デコード後に  
信号の復調ができていない

# 解析結果（ドップラー）

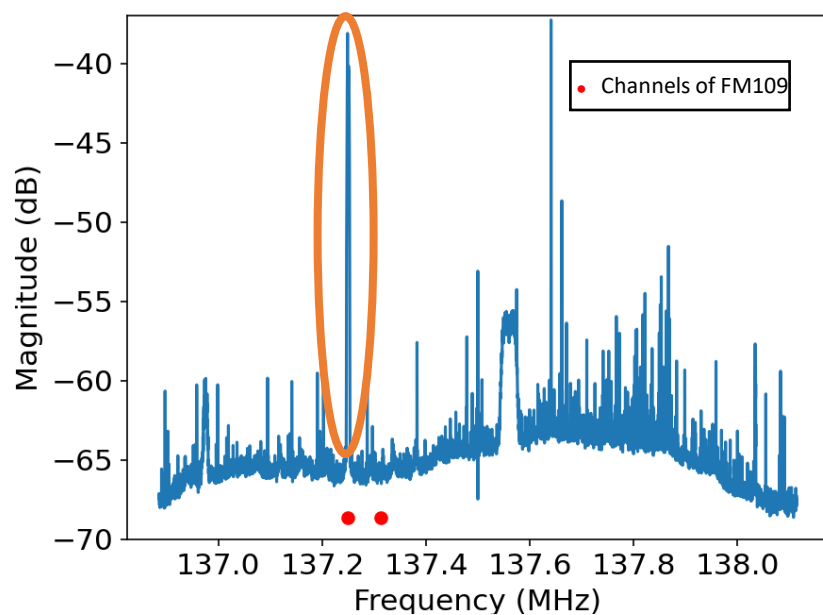


ドップラー（初期値からの変化）  
の時刻変化が確認できる

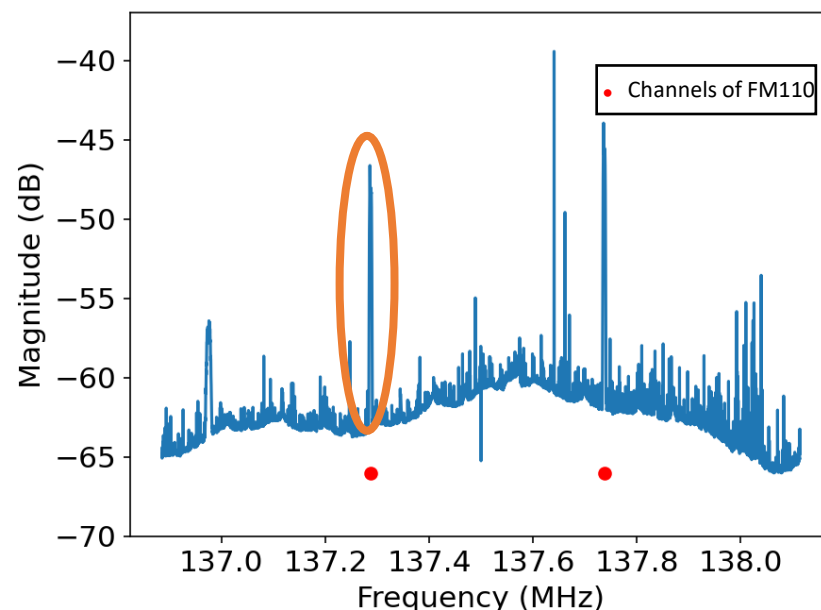


ドップラーの時刻変化が確認できない  
⇒信号の追尾ができていない

# 解析結果 (スペクトル)



① FM109衛星信号のスペクトル表示



② FM110衛星信号のスペクトル表示

②は①と比較して受信強度が8dBほど小さい



十分な受信強度を持つ信号を受信できていない

# 目次

1. 研究背景・研究目的
2. 原理
3. シミュレーション条件
4. シミュレーション結果
5. 実験の方針・解析結果
6. まとめと今後の課題

# まとめ

- まとめ
  - 実LEO衛星のドップラーを用いた測位を目標
  - 2秒間の衛星信号を追尾
- 今後の課題
  - より長い時間での信号追尾
    - 感度の良いアンテナの設計
    - 実験場所の検討
  - 可視衛星数が少ない場合のアルゴリズム