ねじれ振り子を用いた光学浮上の安定性検証(2)

東京大学理学系研究科　物理学専攻安東研究室

和田祥太郎

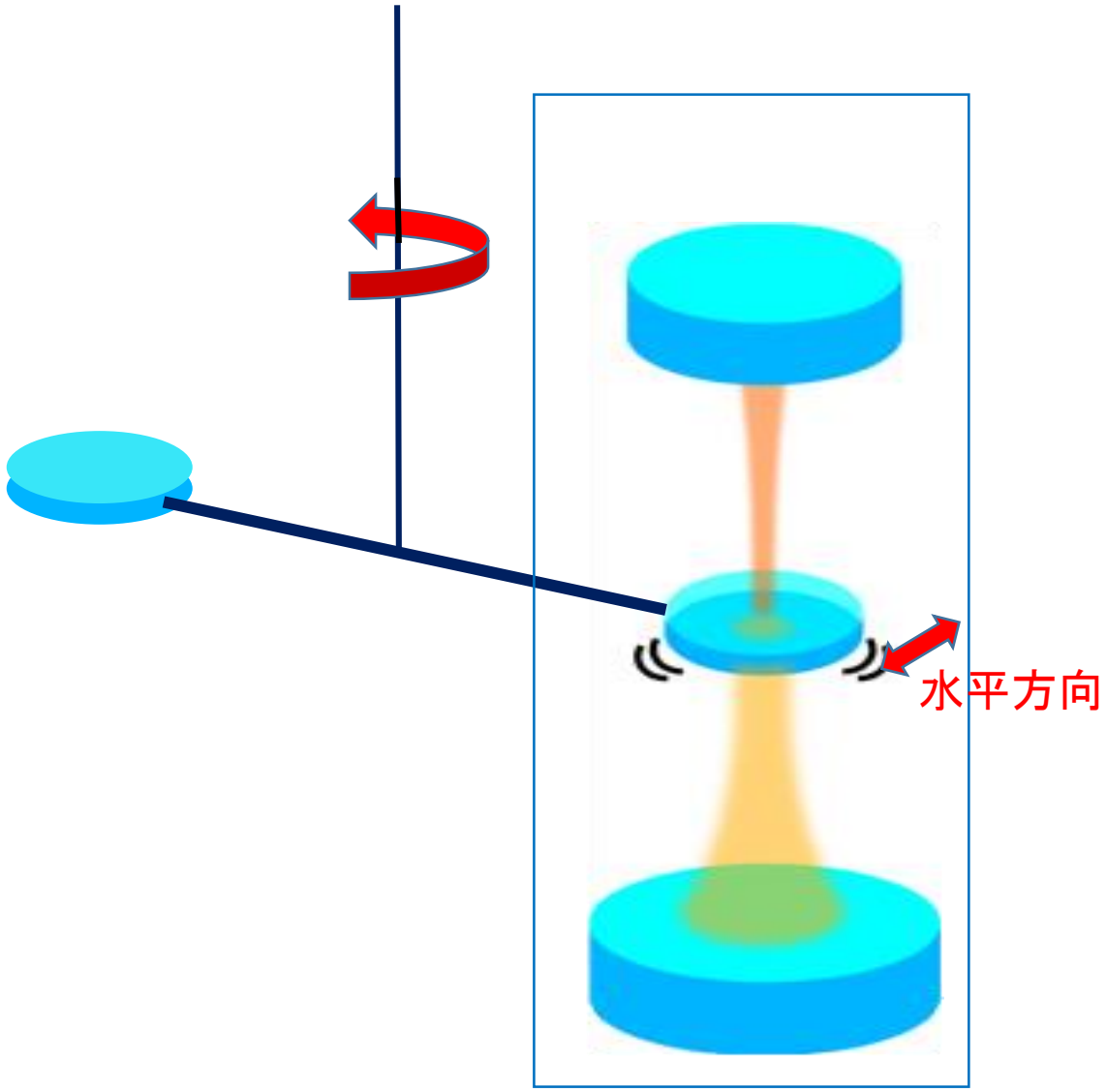
道村唯太、桑原祐也、牛場崇文、松本伸之、安東正樹

今回の発表の概要

・mgスケールでの量子力学の検証のために光学浮上の実現を目指す

・光学浮上の一つの構造であるサンドイッチ型の水平方向の安定性検証のためにねじれ振り子を用いる

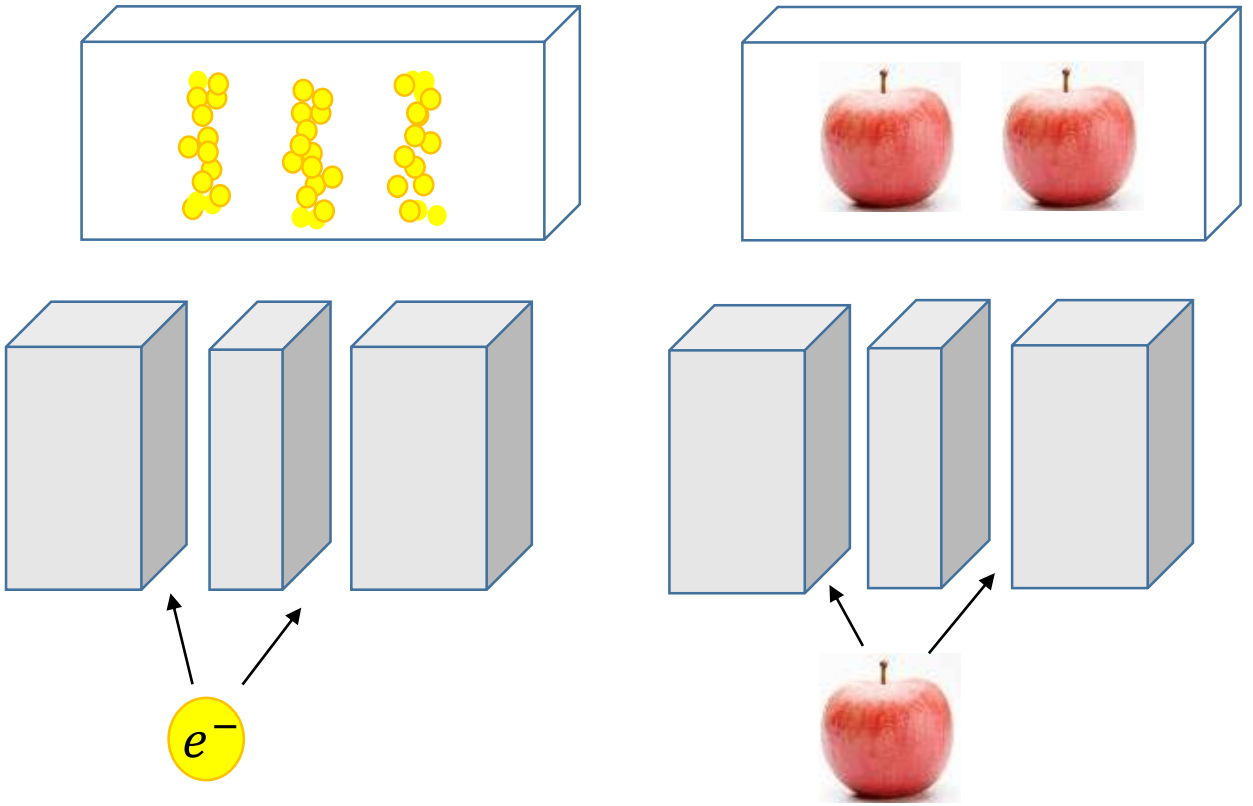
・今回ねじれ振り子の設計と制御方法に改善を加えた



背景

量子力学で未だに解決されていない問題

→マクロな系で位置の重ね合わせ状態がみられるかどうか



電子はミクロ
→位置の重ね合わせ状態は観測済み

りんごはマクロ
→位置の重ね合わせ状態は未観測

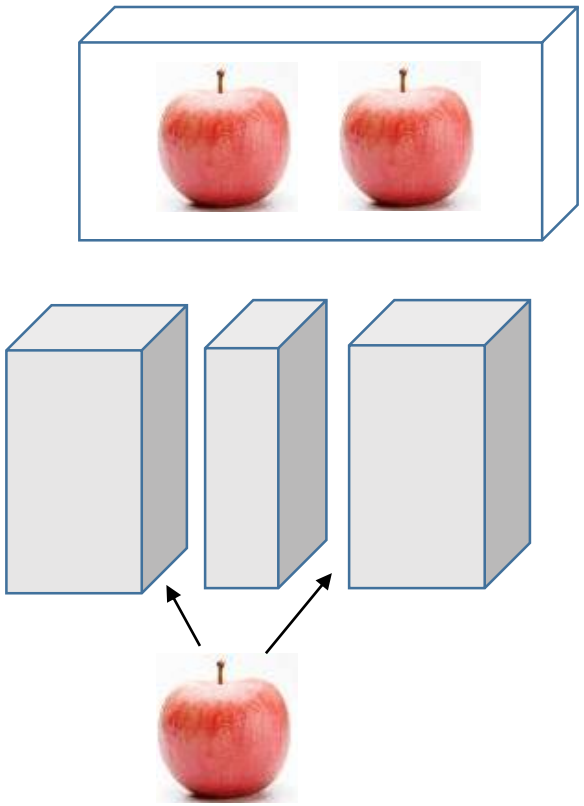
観測されない理由

・重い物体にも位置の重ね合わせ状態が見られる

　→単純に古典雑音が大きい？

・重い物体には位置の重ね合わせ状態がそもそも存在しない

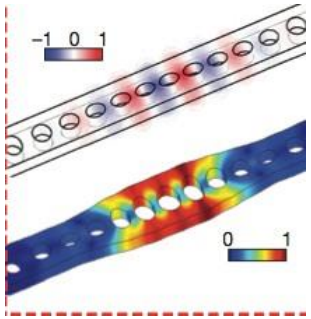
　→量子力学と古典力学の境界線が存在？



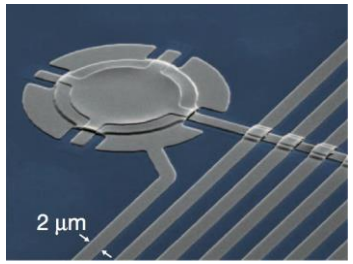
様々な質量スケールで実験することが必要

機械光学系実験（光を振動子に当てることによる位置測定）がよく用いられる

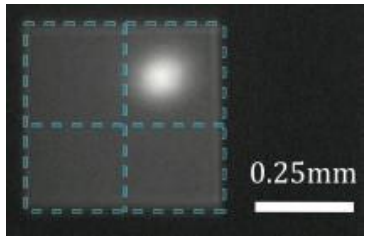
機械光学系を用いた先行研究



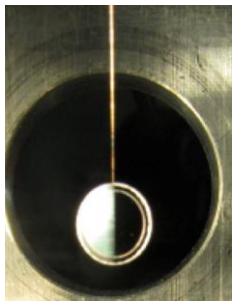
nanomechanical oscillator,
311 fg
Chan+(2011)



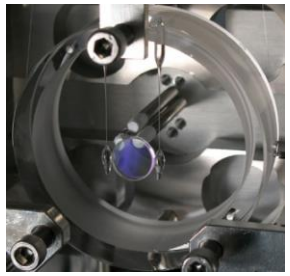
membrane,
48 pg
Teufel+(2011)



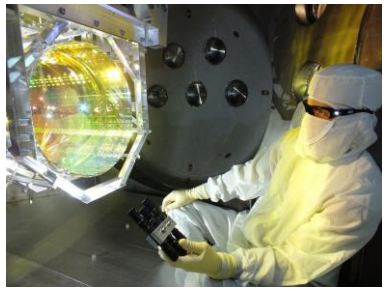
membrane,
7 ng
Peterson+(2016)



suspended mirror,
5 mg
Matsumoto+(2014)



Suspended mirror,
1 g
Neben+(2012)

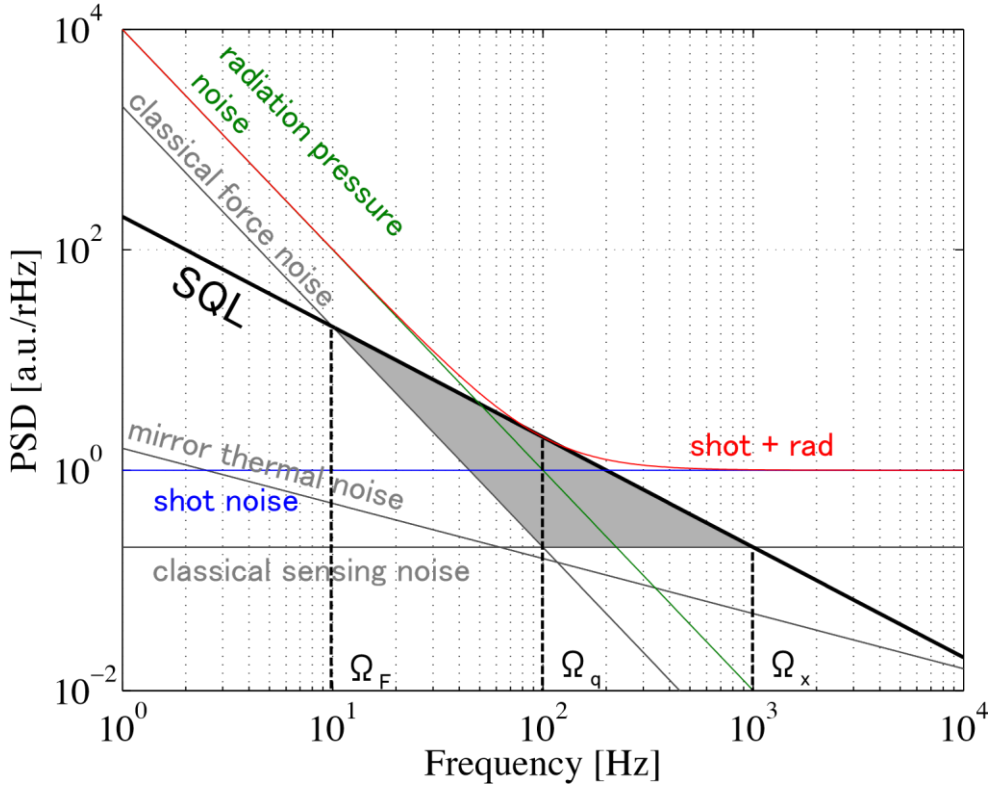


suspended mirror,
40 kg
GW detector (LIGO, VIRGO, KAGRA)

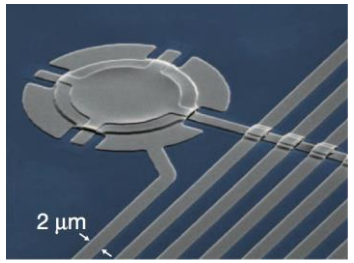
fg pg ng ug mg g kg 質量スケール

巨視的量子力学の検証のための必要条件

古典雑音が
SQLを下回ることが
必要条件

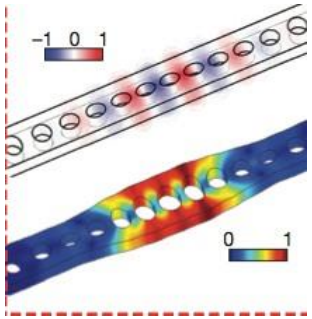


SQL（Standard Quantum Limit）とは？
量子力学の不確定性原理から生じる測定限界のこと

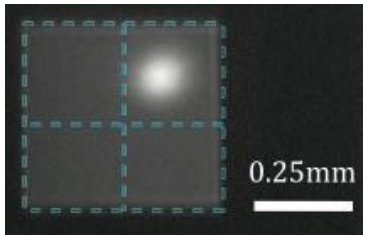


membrane, 48 pg
Teufel+(2011)

SQL到達

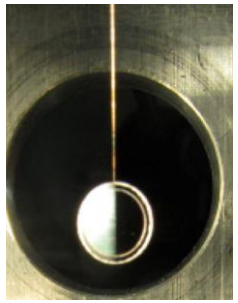


nanomechanical oscillator, 311 fg
Chan+(2011) SQL到達



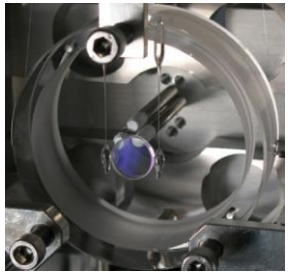
membrane, 7 ng
Peterson+(2016)

SQL到達



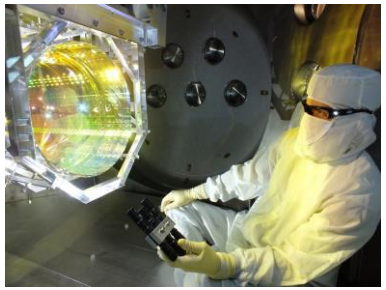
suspended mirror, 5 mg
Matsumoto+(2014)

未到達



suspended mirror, 1 g
Neben+(2012)

未到達



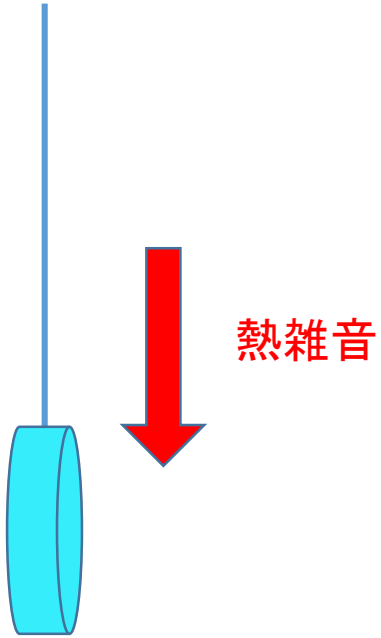
suspended mirror, 40 kg
GW detector (LIGO, VIRGO, KAGRA)

ほぼSQL到達

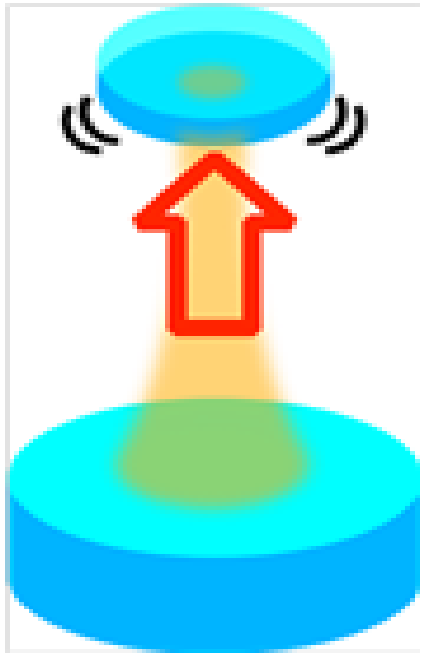
fg pg ng ug mg g kg 質量スケール

今回はmgスケールのSQL到達を目指す

mgスケールでのSQL到達への障壁～熱雑音～



振り子
→懸架による熱雑音が生じSQL到達が困難

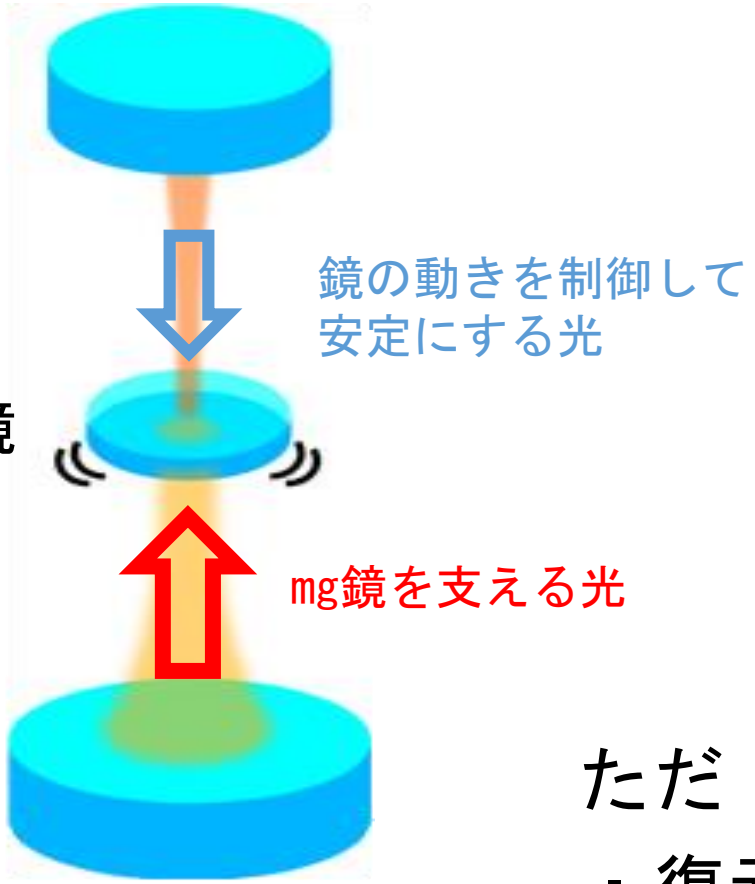


光学浮上とは？

高パワーのレーザー光の輻射圧を使って鏡を浮かせること

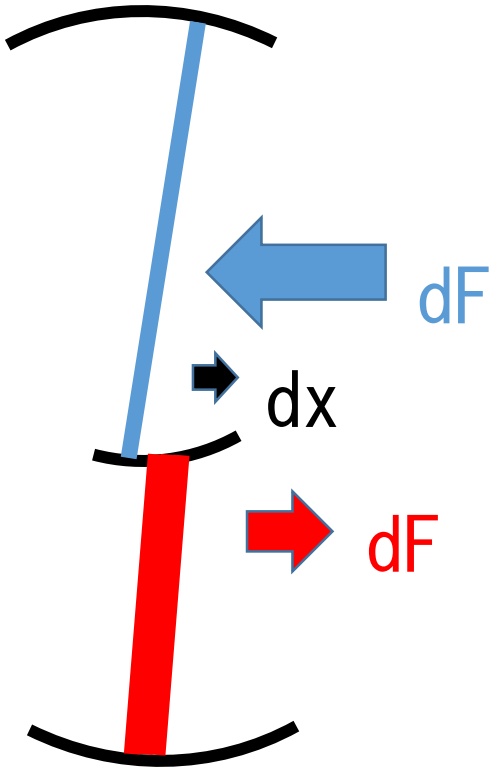
光学浮上
→SQL到達への最大の障壁である鏡の支持による熱雑音が生じない

光学浮上の安定性



サンドイッチ型

模式図



光軸のずれによる復元力が働く

理論的には安定

ただ

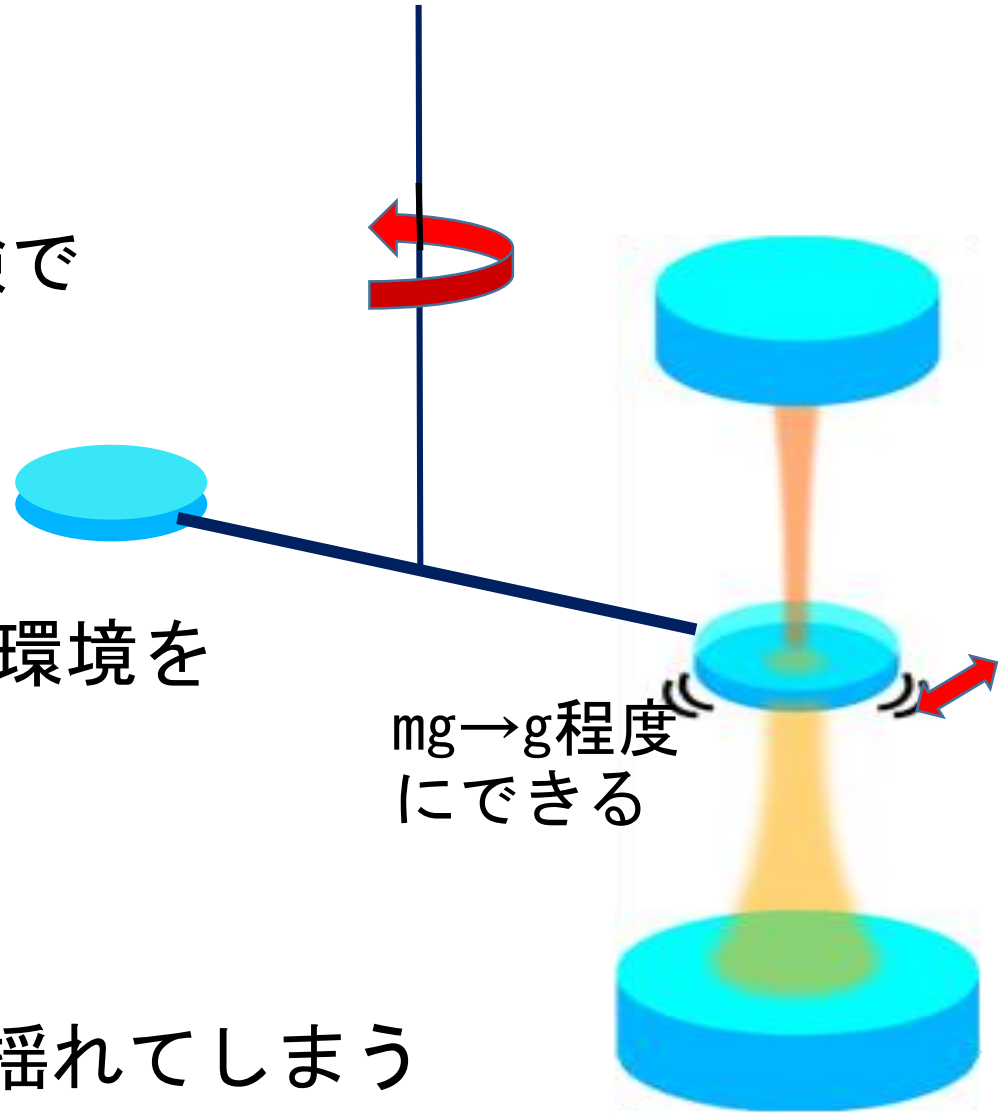
- 復元力は実際に実現可能か
- 実際の浮上に至る手順 ➡ 確認する必要あり

水平方向の安定性検証

サンドイッチ型の水平方向の安定性を実験で検証したい

→ねじれ振り子を用いる

水平方向に関して浮いている状態と同じ環境をg程度の鏡でつくれる

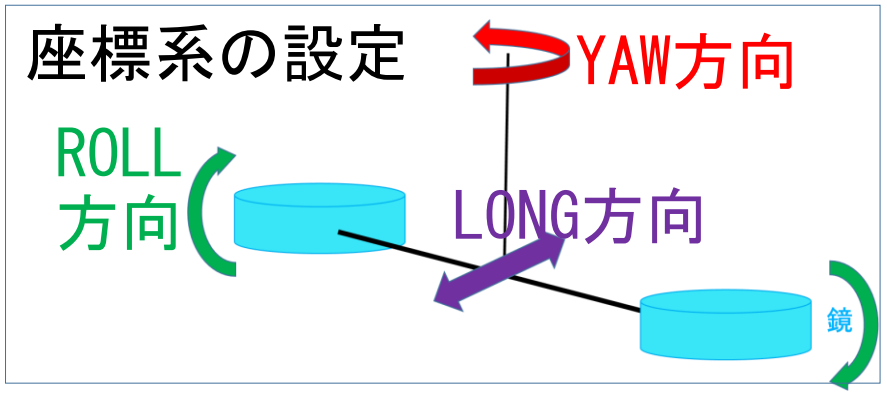


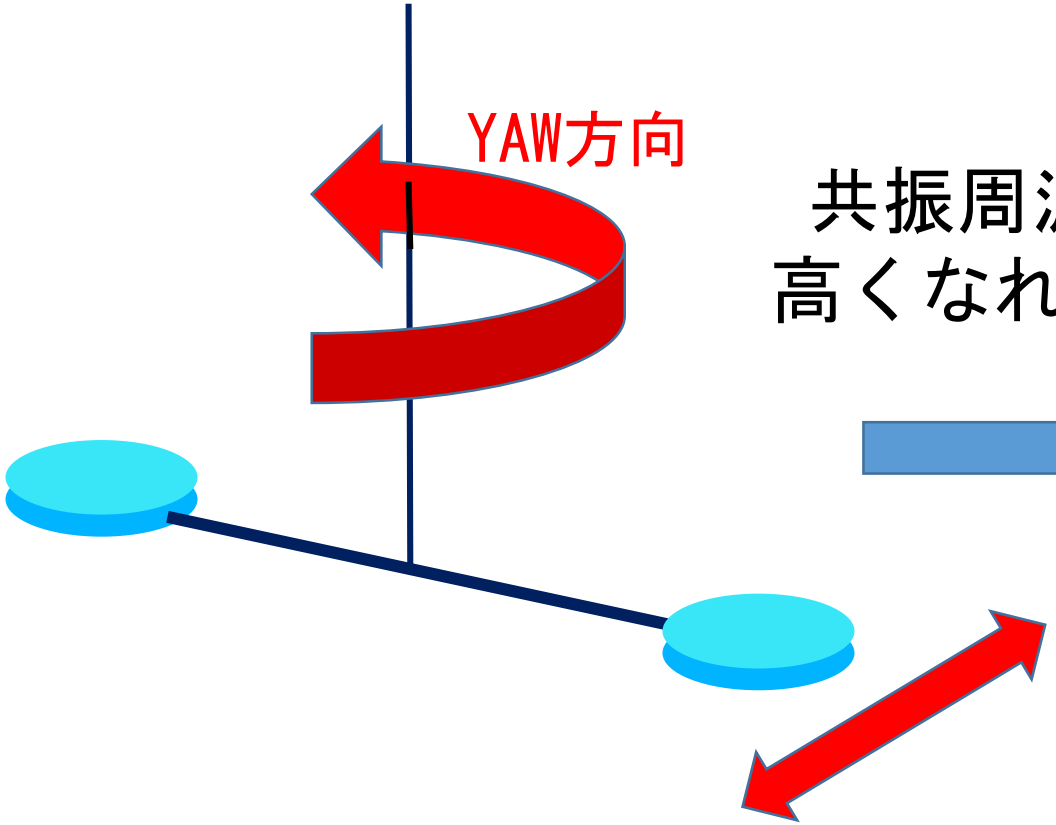
ねじれ振り子を用いる欠点

→地面振動などにより必要以上に鏡が揺れてしまう

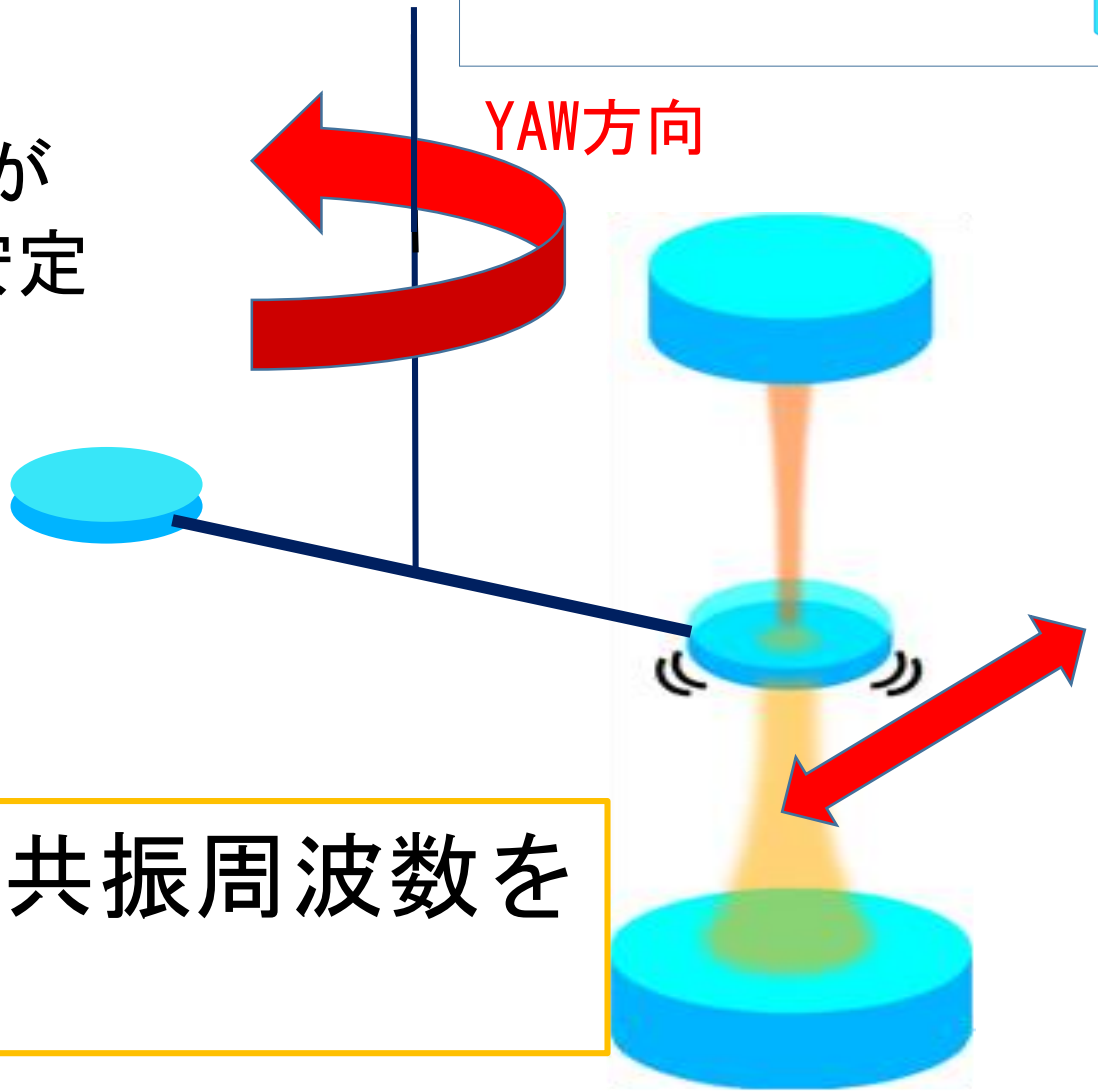
ねじれ振り子を制御することが必要

安定性の検証方法





共振周波数が
高くなれば安定



制御した状態でYAW方向の共振周波数を測定することが必要

取り組む必要があること

- ねじれ振り子の位置制御

→ YAW方向のRMS 10 μm 以下（ビーム径×0.1）
ROLL方向のRMS 9 μm 以下（ピエゾのレンジ）

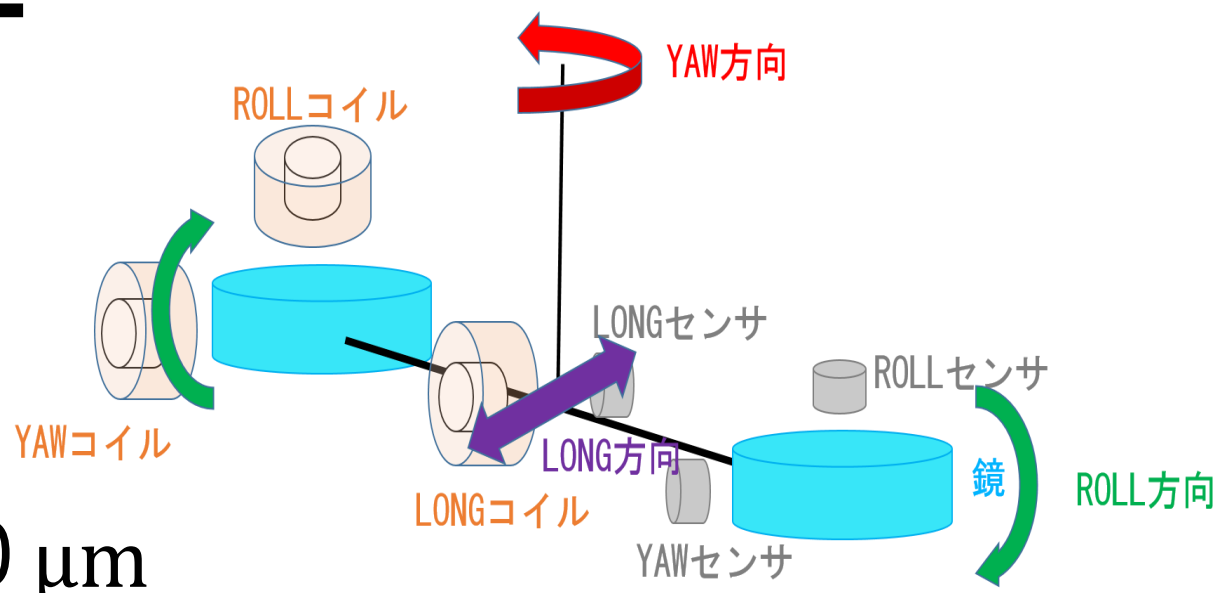
に制御することが必要 前回確認済み

- ねじれ振り子のYAW方向の共振周波数測定

→ ねじれ振り子の共振周波数62 mHz以下
（光でかたくなった共振周波数）

前回行ったこと

ねじれ振り子の位置制御



- YAW方向のRMS 0.15 μm ＜10 μm
- ROLL方向のRMS 0.73 μm ＜9 μm

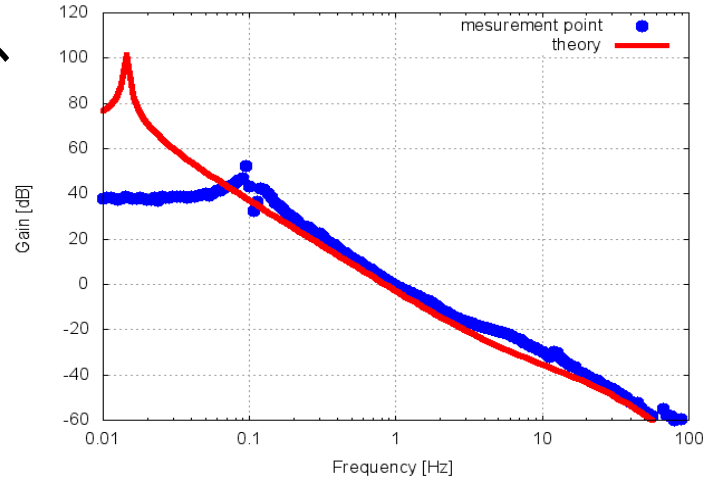
を満たす制御をかけることに成功

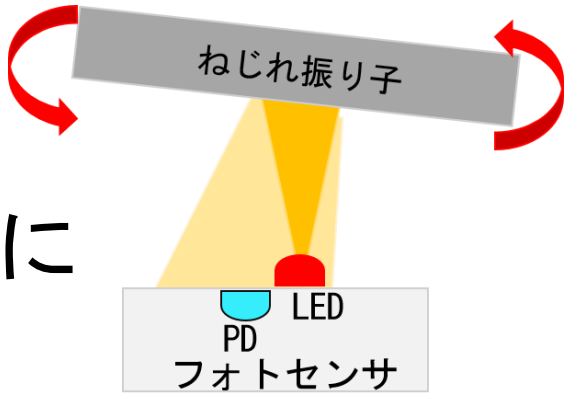
前回のセットアップの問題点

YAW方向の共振周波数がうまく測定できない

YAW方向制御がLONG方向制御とカップリング

- YAW方向の共振周波数が理論値より高くなる





- LONGセンサがYAW回転に影響してしまう問題

→ 対称性のある制御系に変える

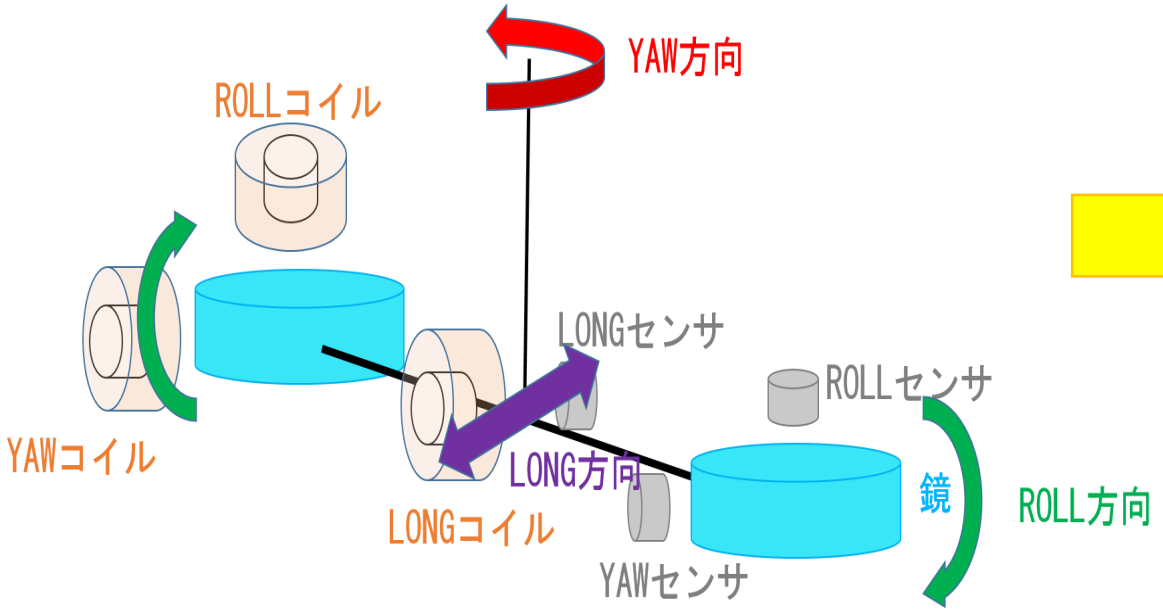
今回行ったこと

・ねじれ振り子の制御方法の改善

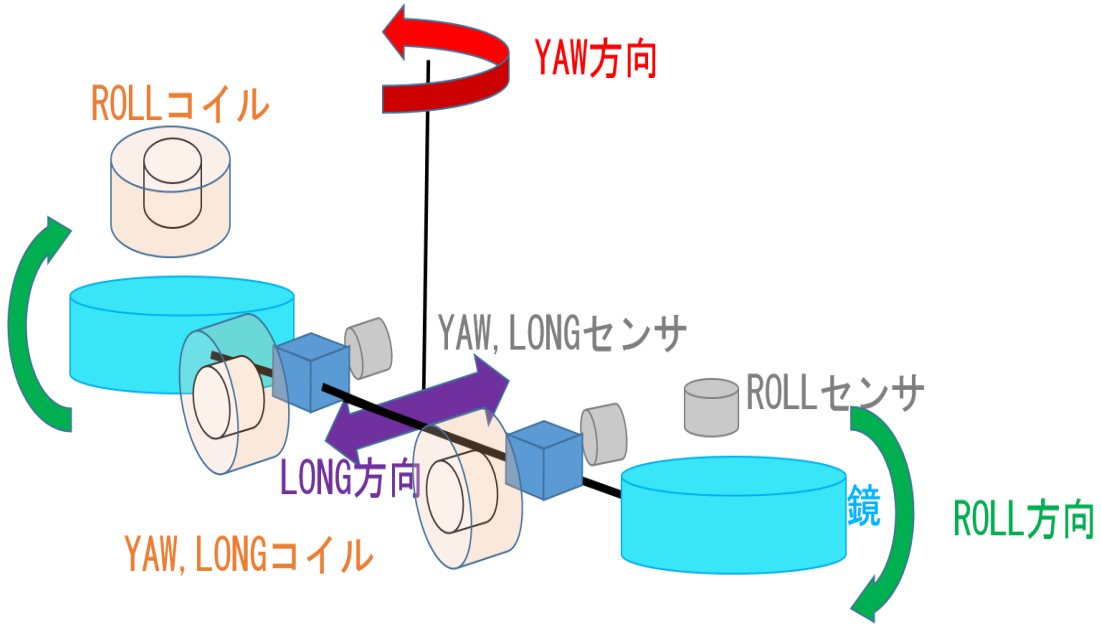
対称性のある制御系にした

セットアップの改善

before



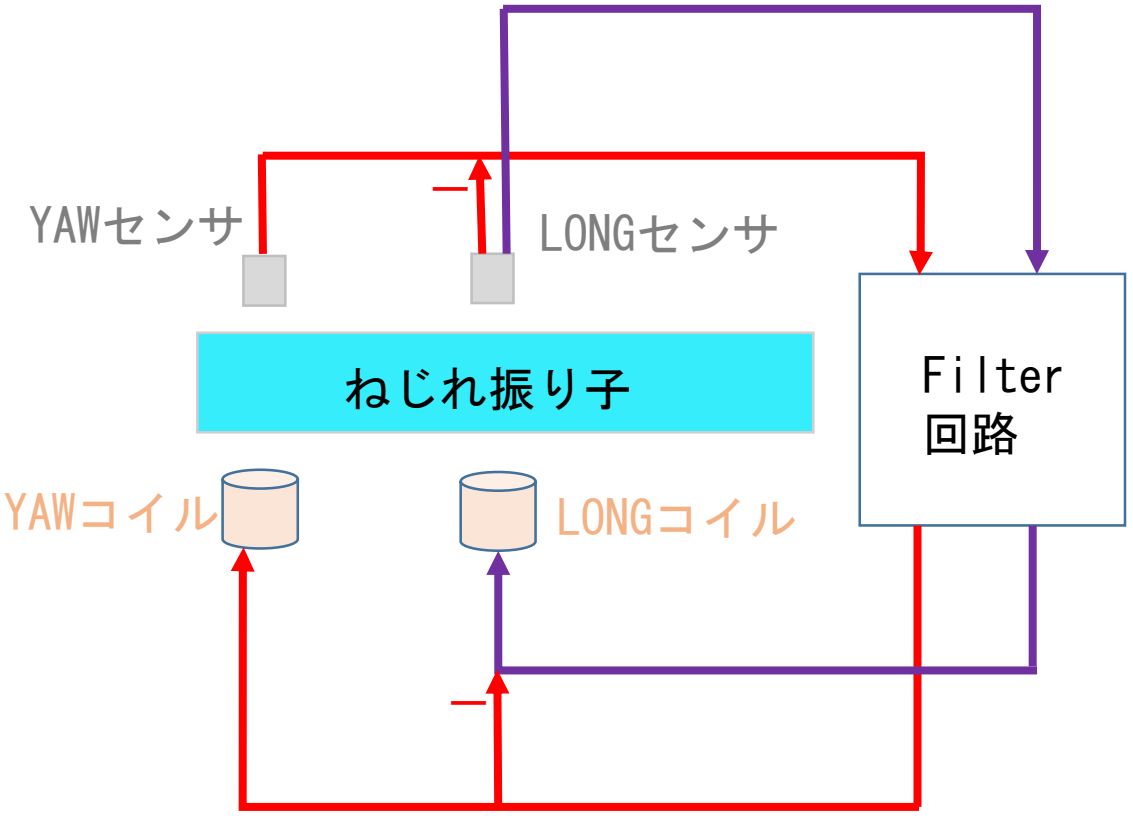
after



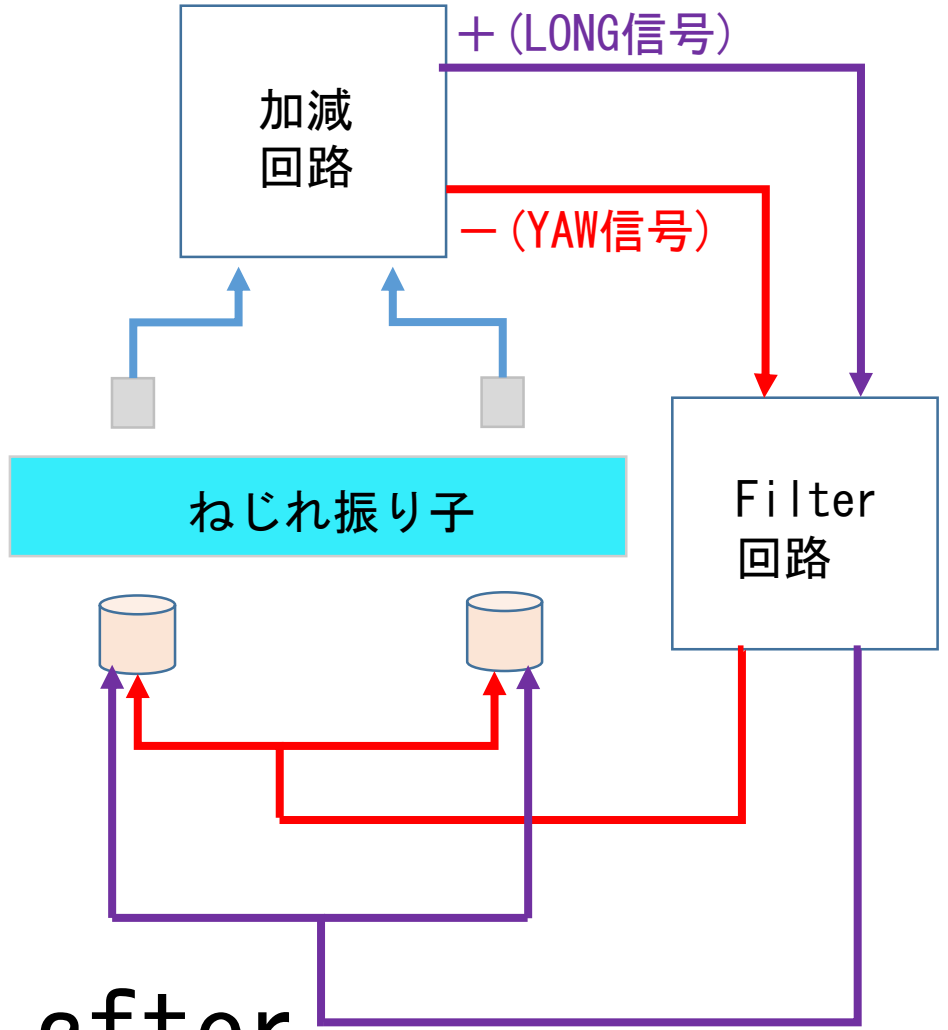
対称性がよくない

対称性がよい

制御方法の改善

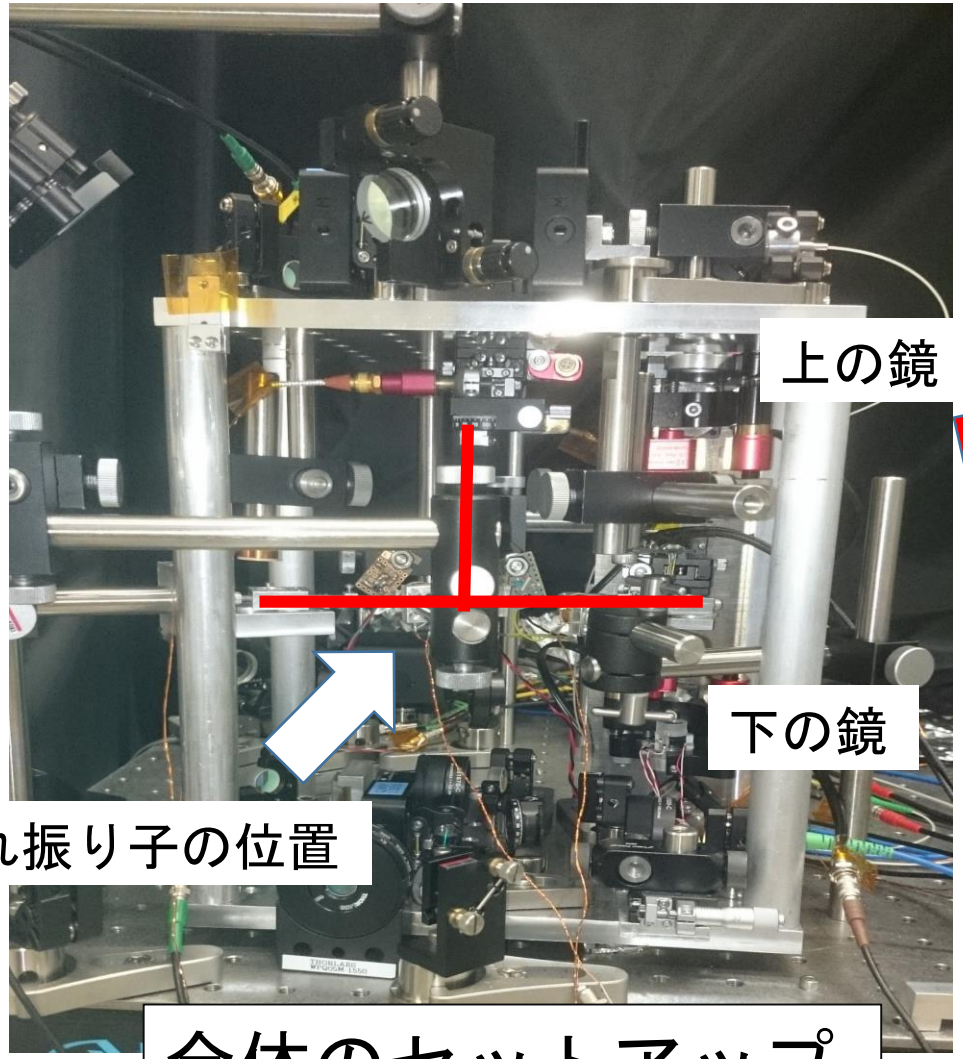


before

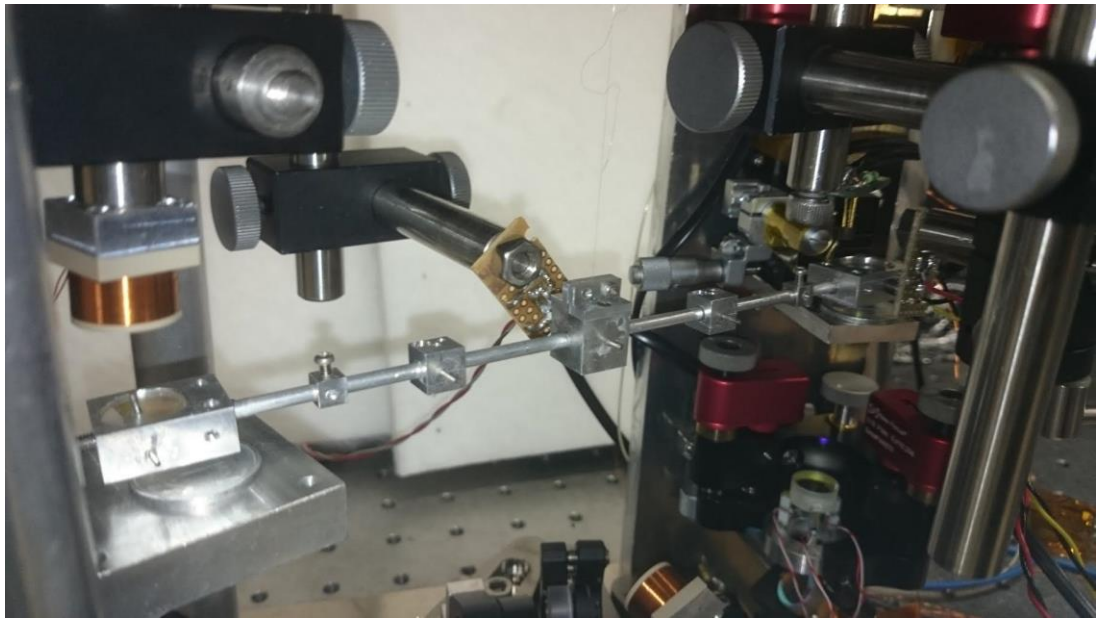


after

実験セットアップ



全体のセットアップ



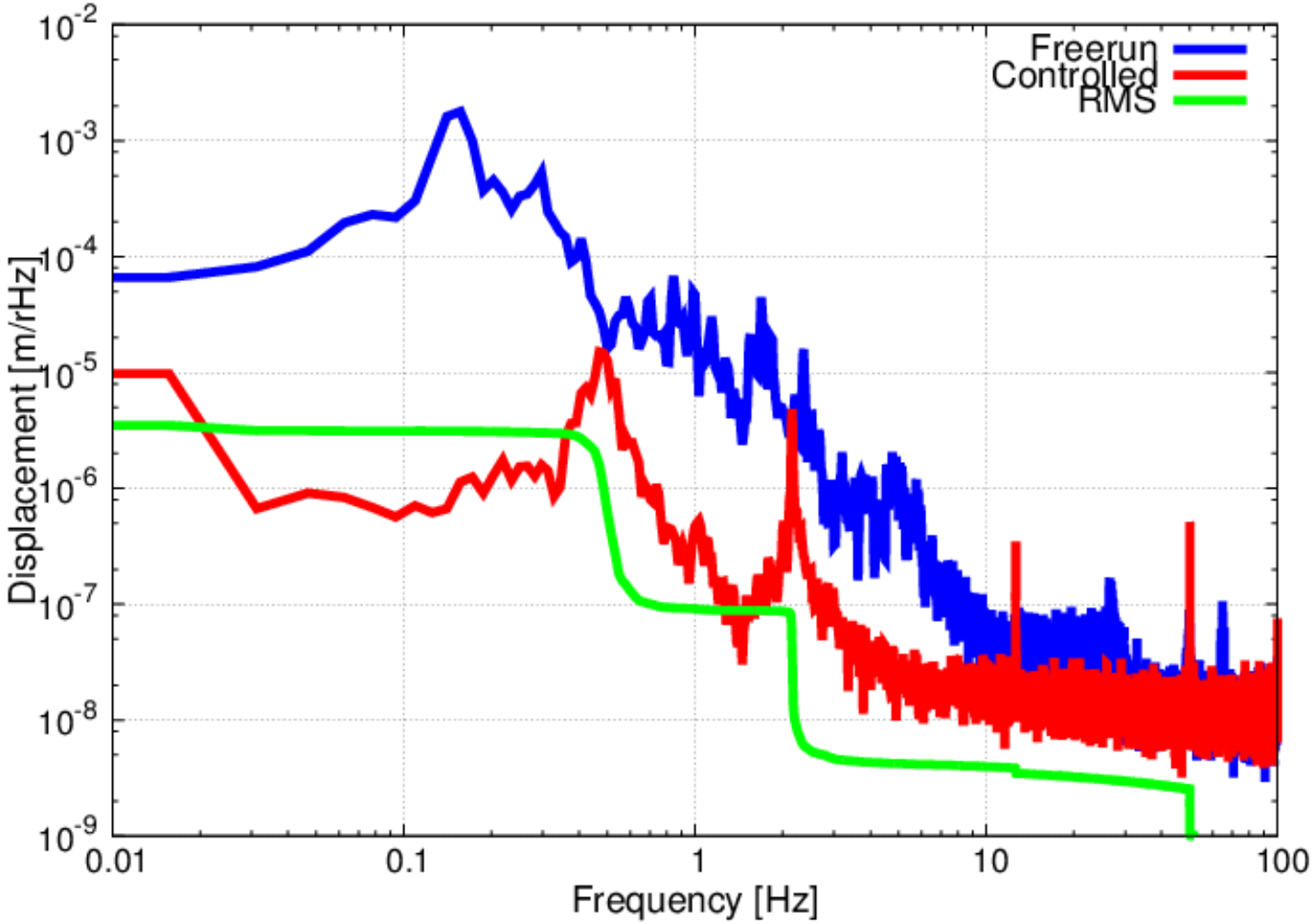
ねじれ振り子拡大図

真空槽には入れず、
まずは大気中で実験

結果

①RMSの確認
②YAW方向の共振周波数の測定

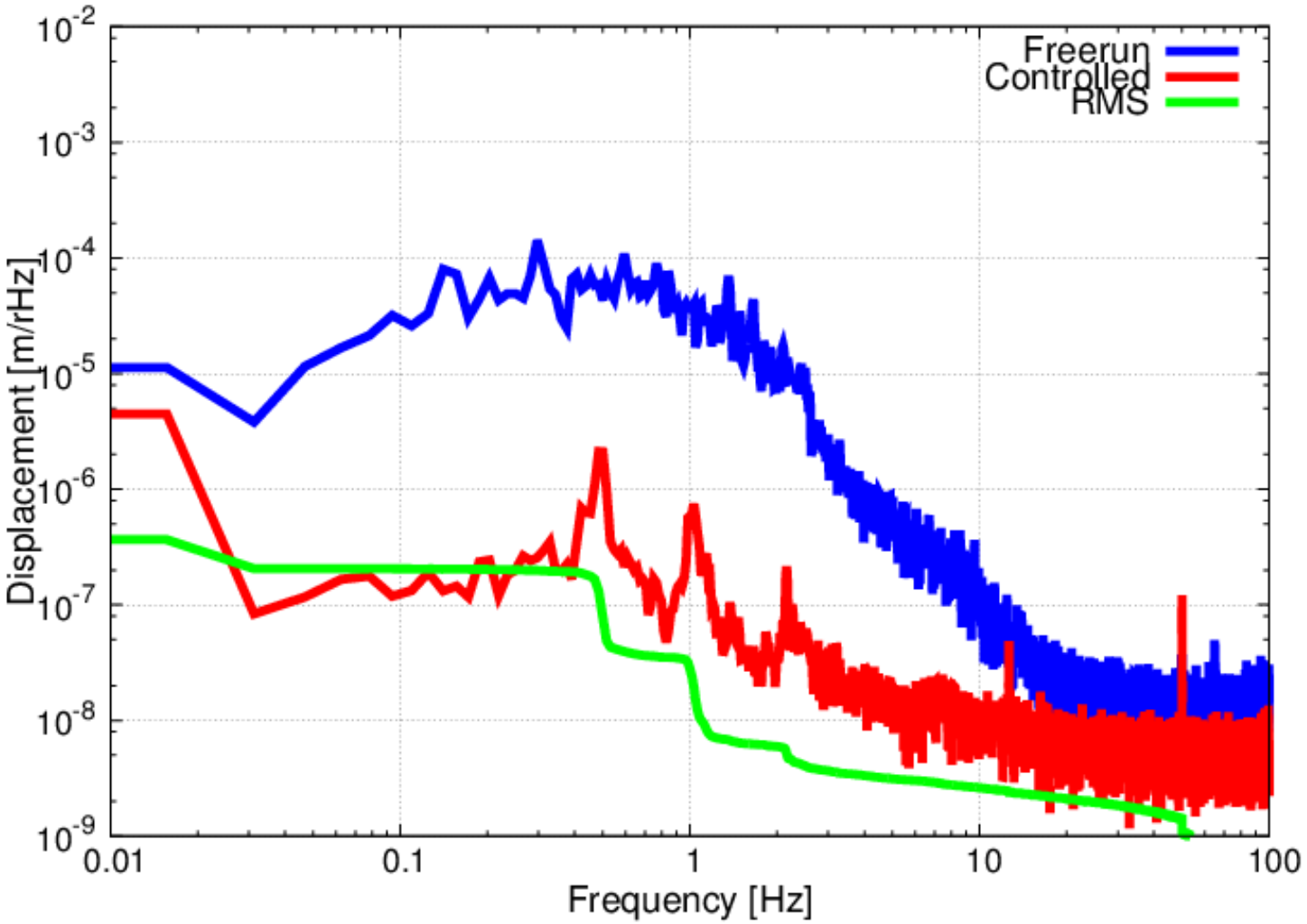
①RMSの確認(YAWセンサのパワースペクトル)



制御後のRMS $3.58\mu m$ ＜$10\mu m$

制御後は要求値を満たした。

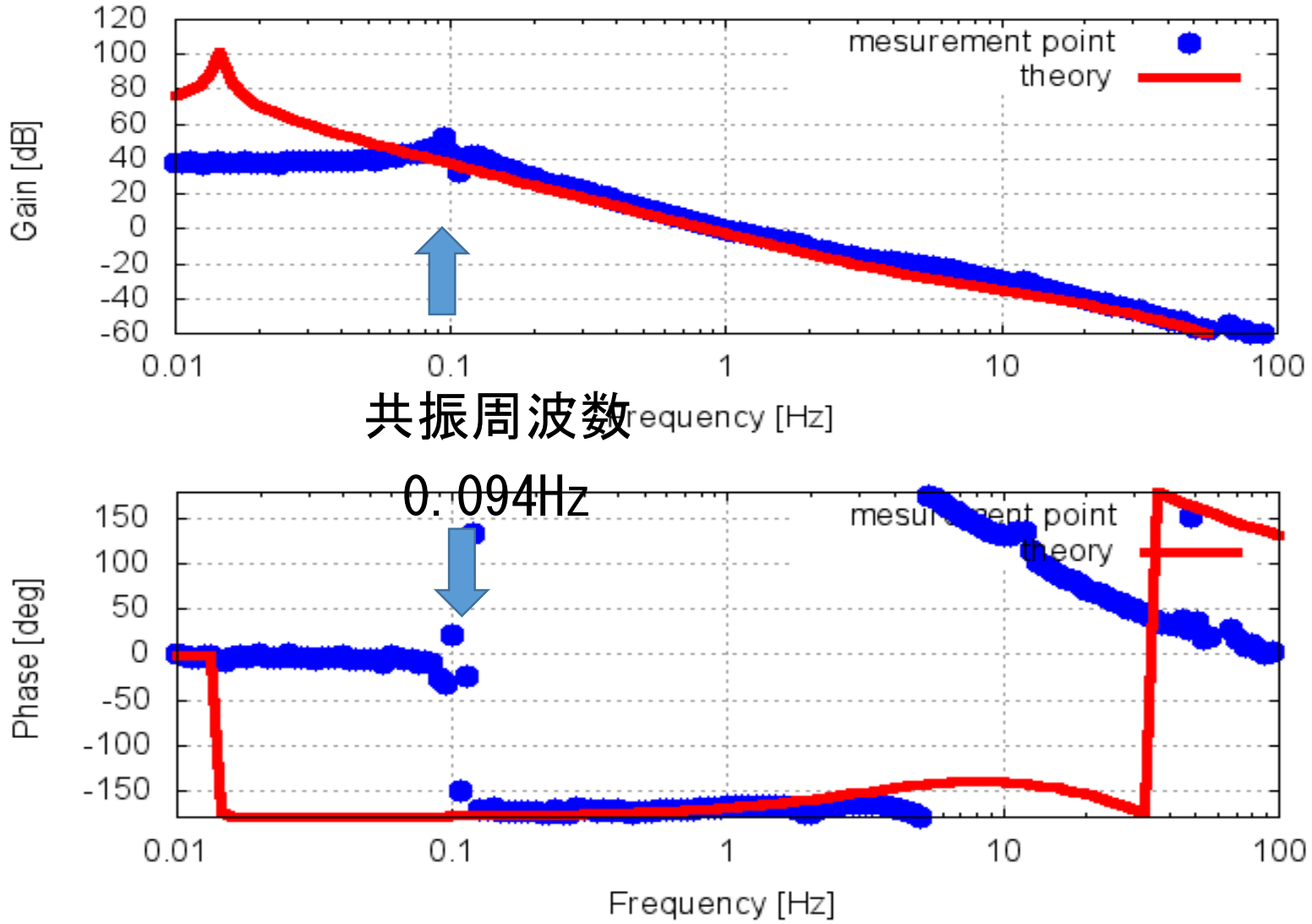
①RMSの確認(ROLLセンサのパワースペクトル)



制御後のRMS $0.35\mu m < 9\mu m$

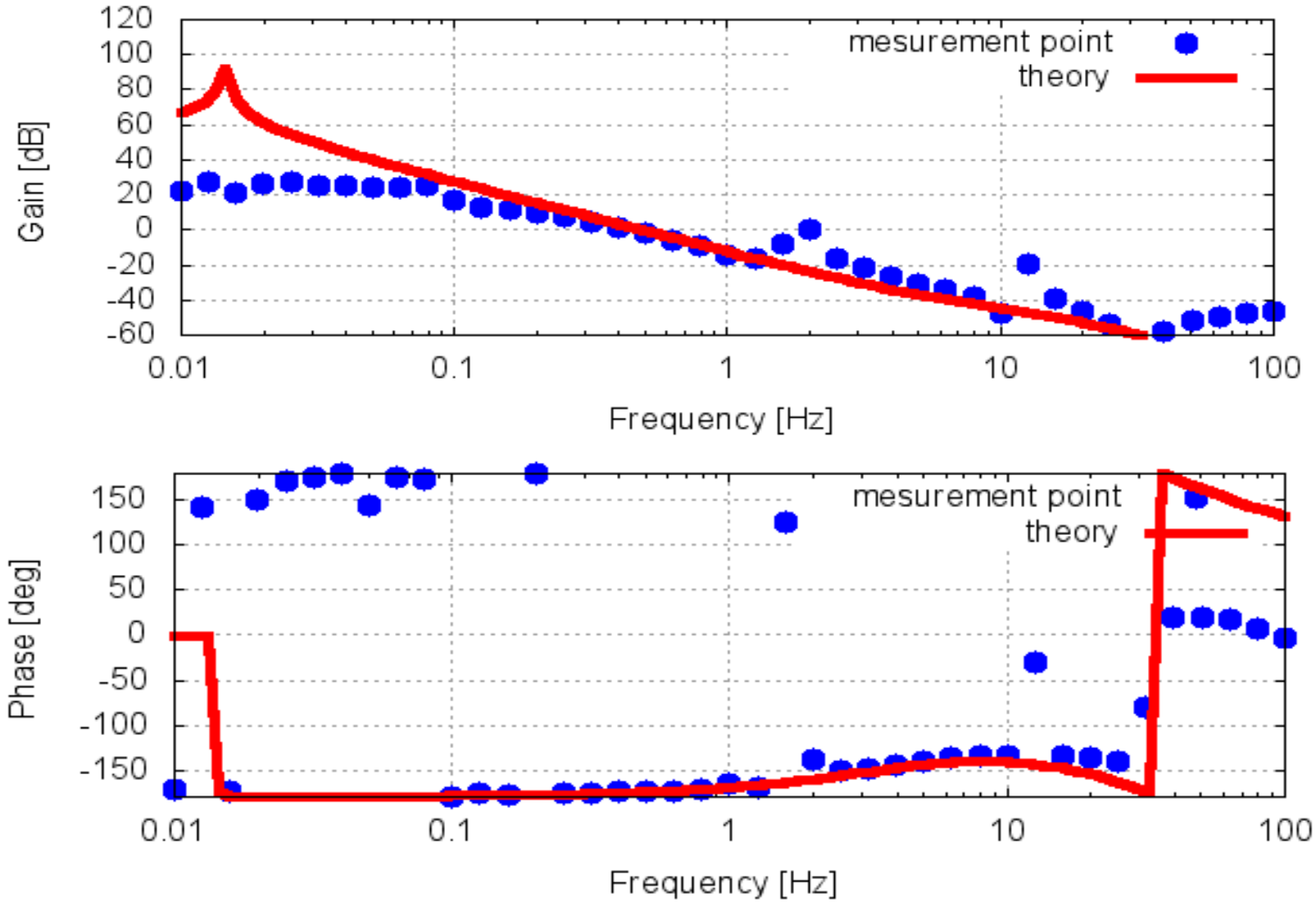
制御後は要求値を満たした。

②YAW方向の共振周波数の測定(制御系改善前)



明らかに共振が
理論とは別のと
ころでたってい
る

②YAW方向の共振周波数の測定(制御系改善後)



0.1Hz付近の共振は見えなくなったが、低周波でゲインが一定

まとめ

- 制御系を対称性のあるものに改善した
- 新しい制御系でRMSを要求値以下に抑えることができた
- YAW方向の共振周波数の測定はまだうまくできていない

今後の展望

- YAW方向の共振周波数の測定
  - YAW方向LONG方向のカップリング
    →光てこを使った制御

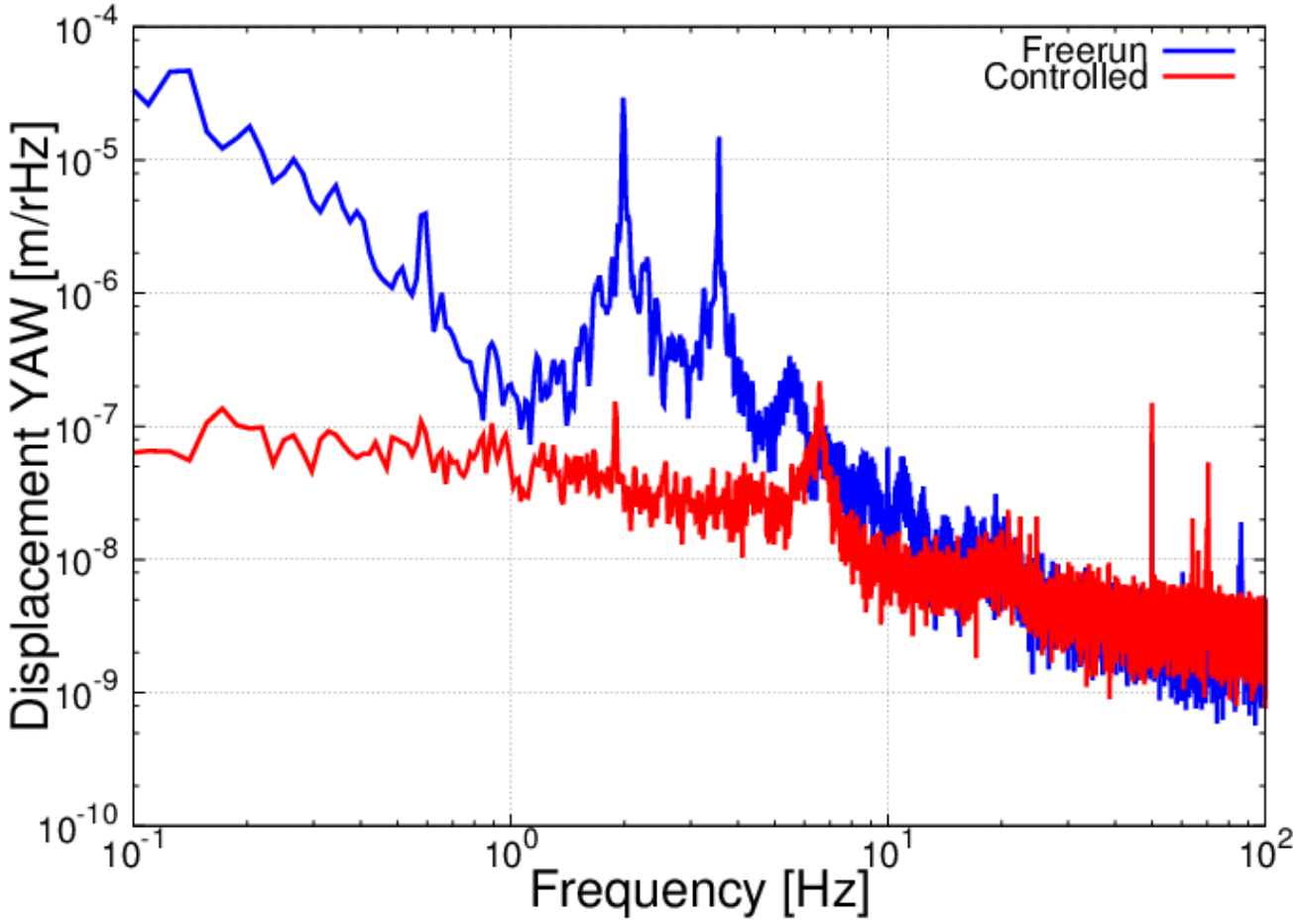
  - 大気による揺れ
    →真空中での測定

- ねじれ振り子を制御した状態で共振器をロック
- 水平方向の安定性を検証

終わり

おまけ

結果（YAWセンサで見たパワースペクトル）



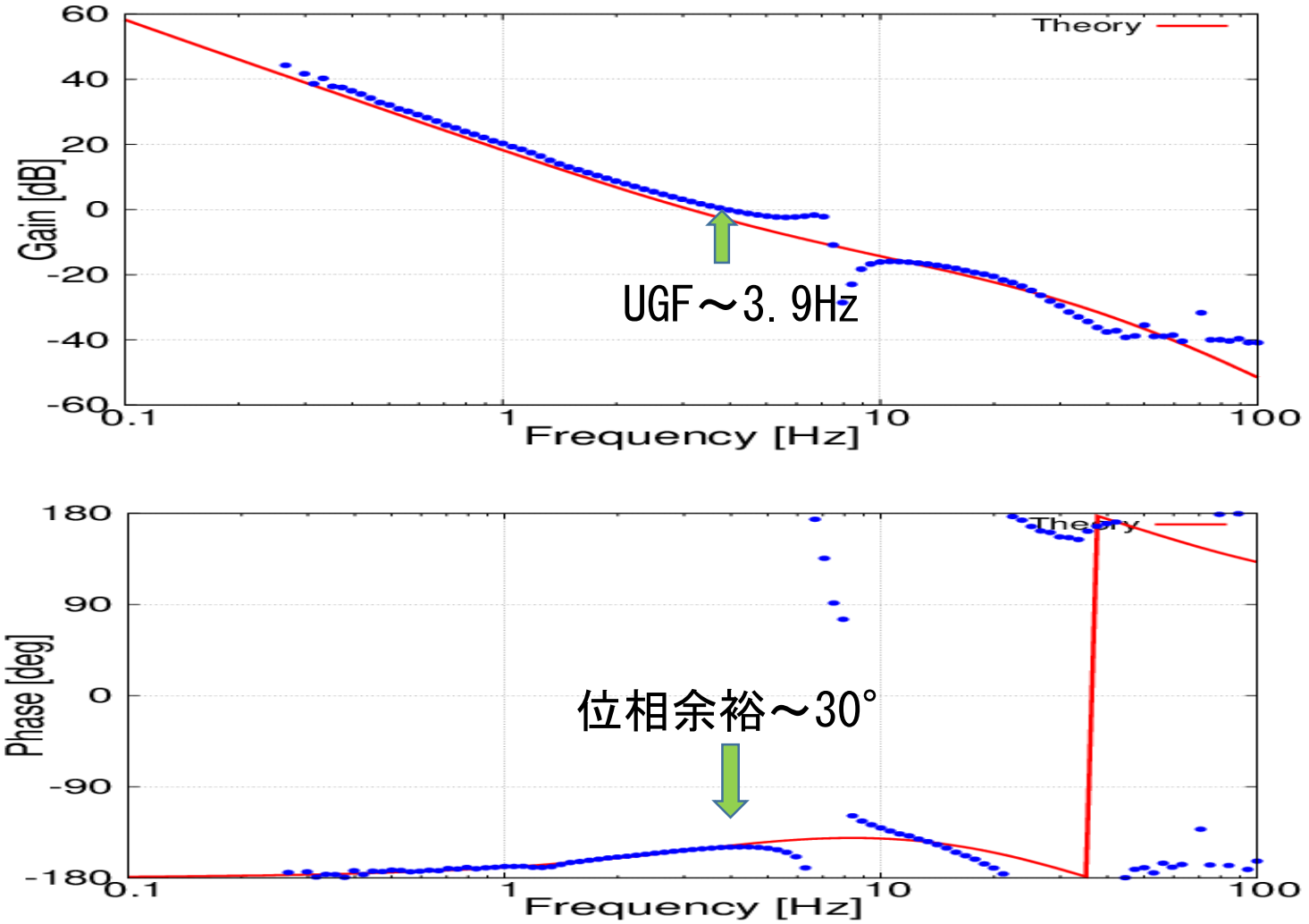
RMS

制御なし　$69\mu m > 10\mu m$

制御あり　$0.15\mu m < 10\mu m$

制御後は要求値を満たした。

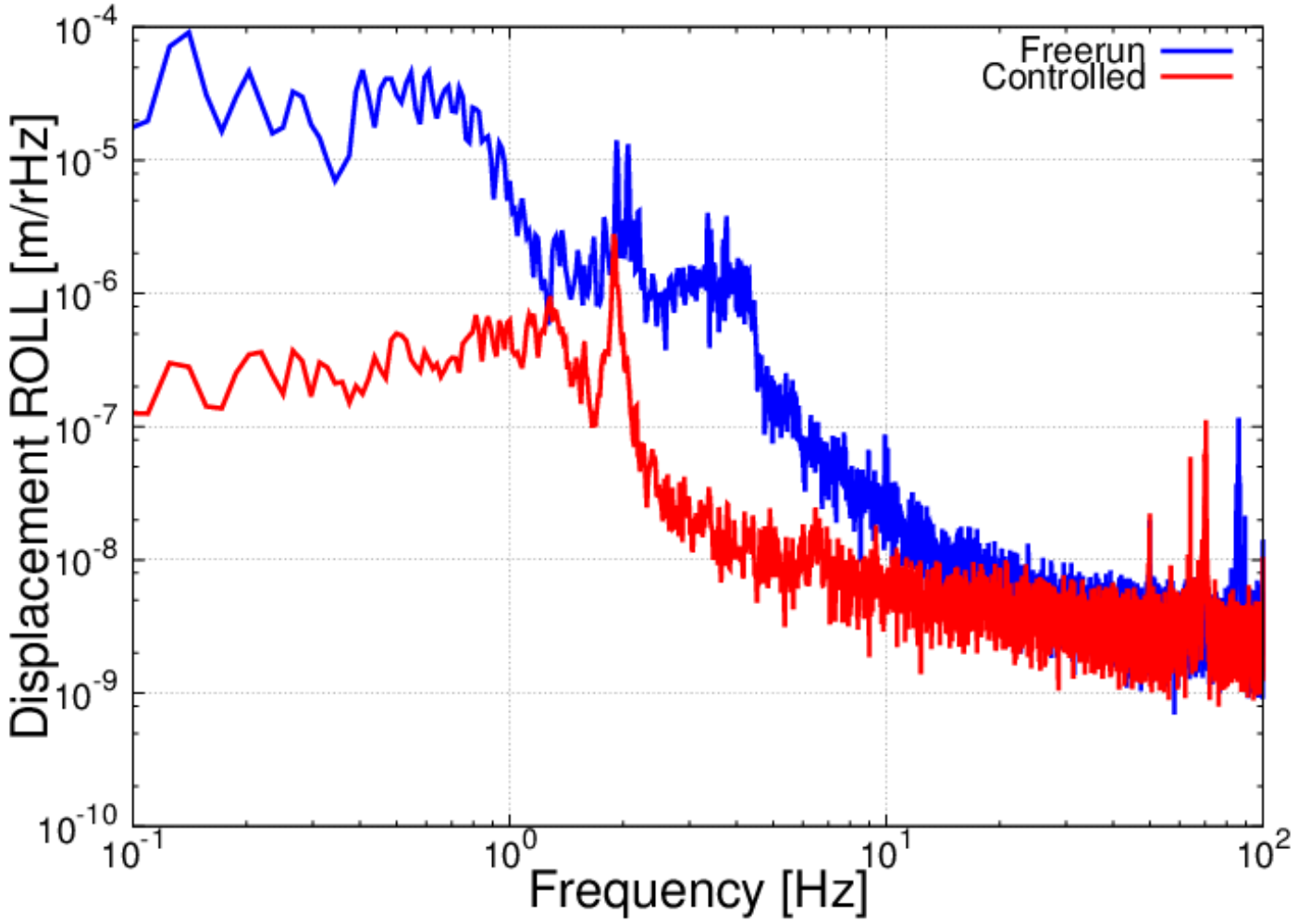
結果（YAW方向のオープンループ伝達関数）



UGF～3.9Hz
位相余裕～30°

安定な制御がかかった

結果（ROLLセンサで見たパワースペクトル）



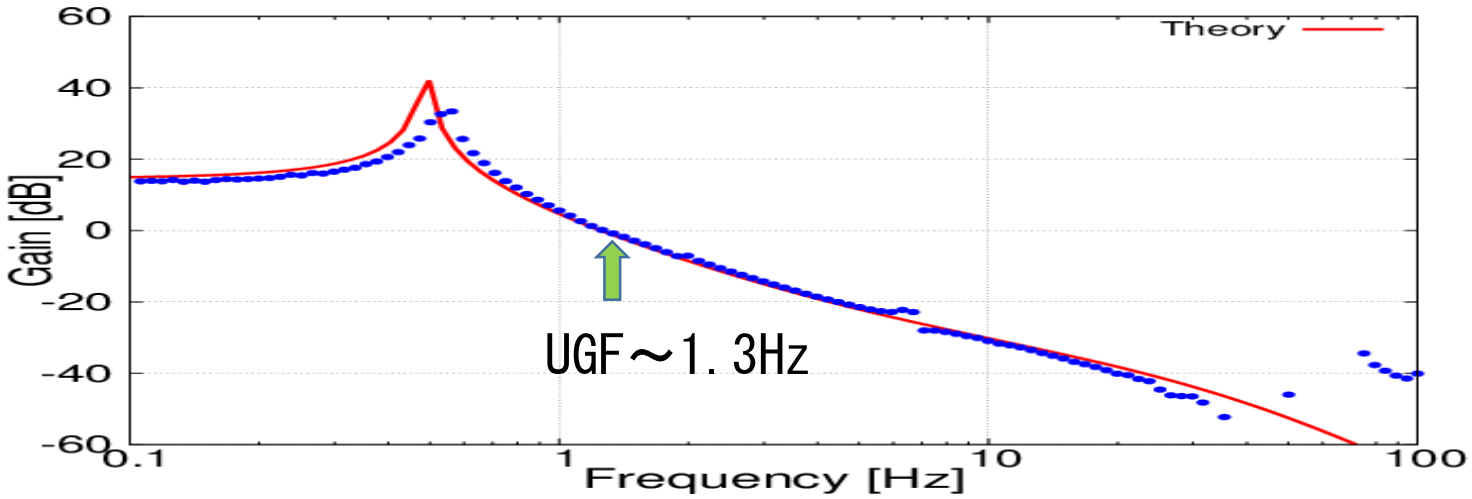
RMS

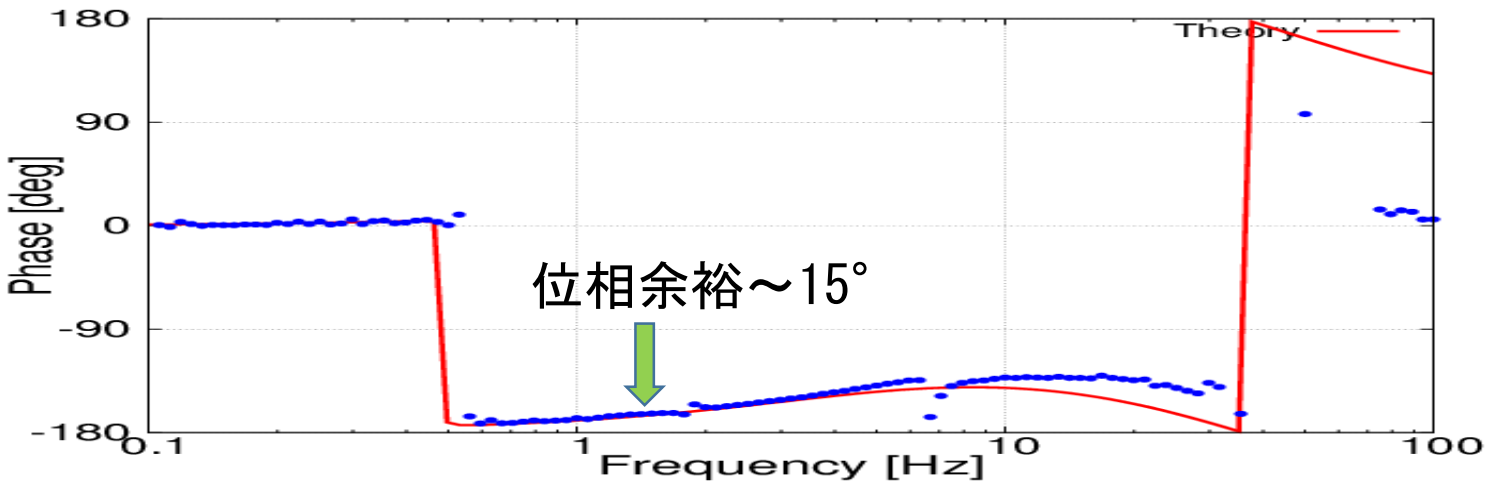
制御なし $25\mu m > 9\mu m$

制御あり $0.73\mu m < 9\mu m$

制御後は要求値を満たした。

結果（ROLL方向のオープンループ伝達関数）

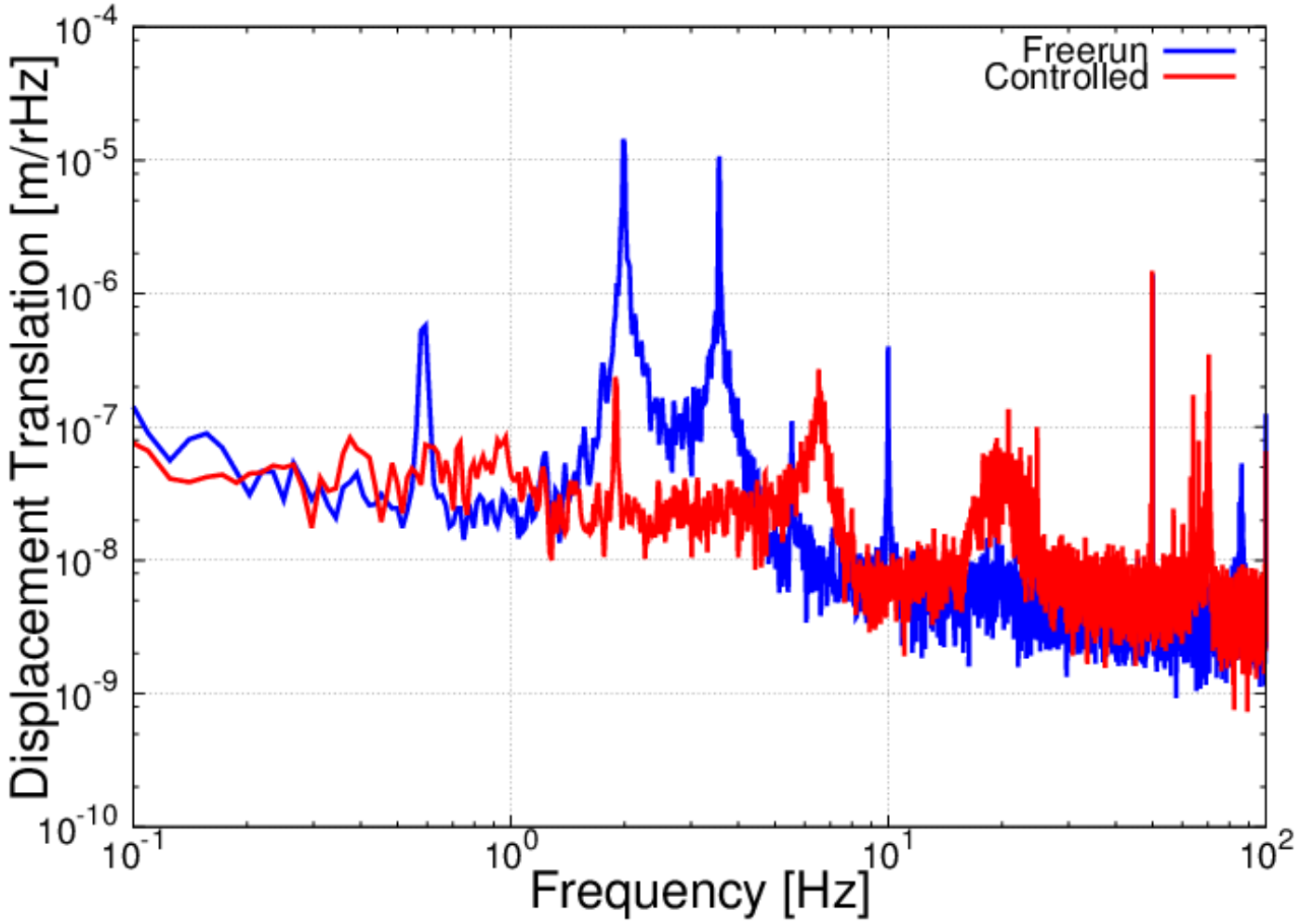




UGF～1.3Hz
位相余裕～15°

安定した制御になった

結果（並進センサで見たパワースペクトル）



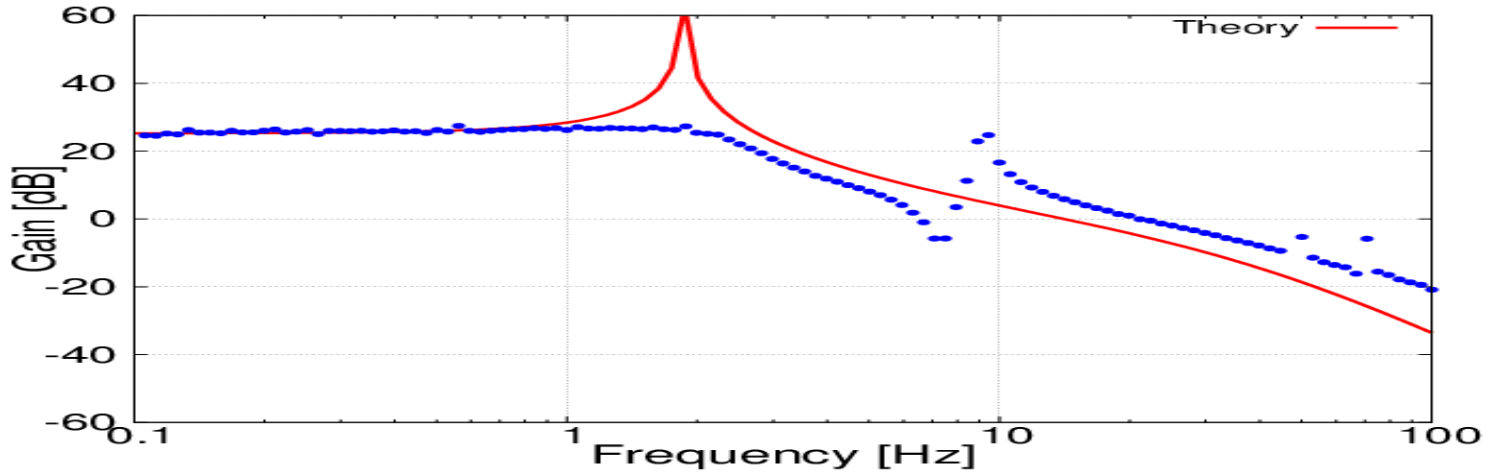
RMS

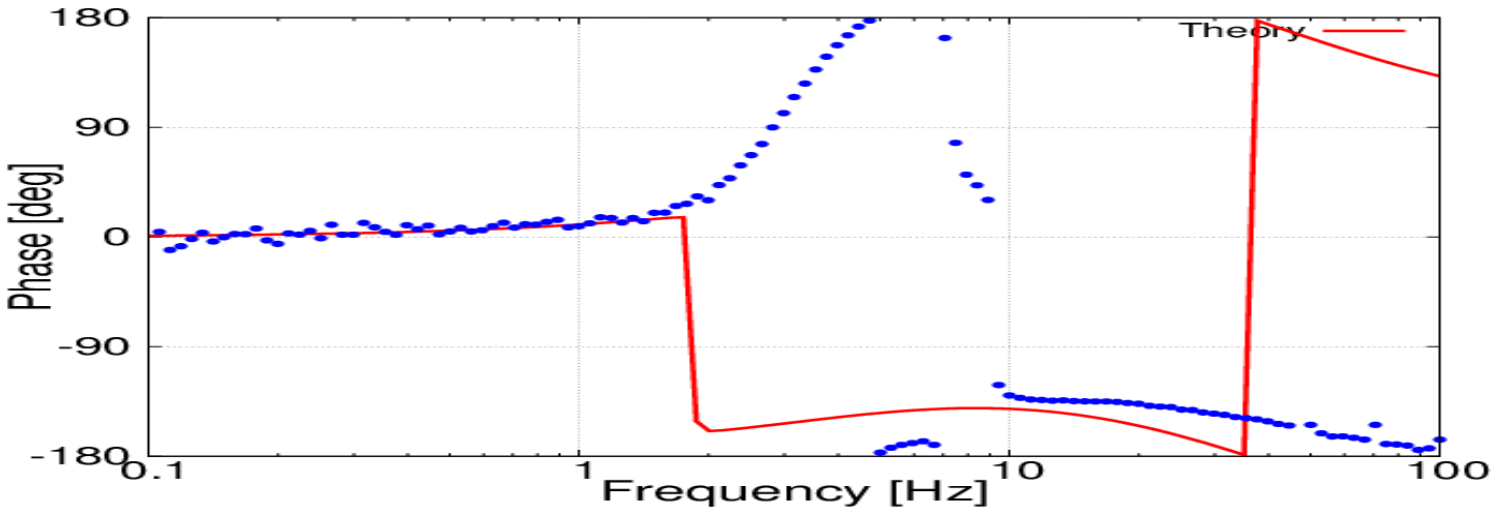
制御なし $2.8\mu m < 10\mu m$

制御あり $0.38\mu m < 10\mu m$

制御後並進の共振ピークを抑えることに成功した

結果（並進方向のオープンループ伝達関数）





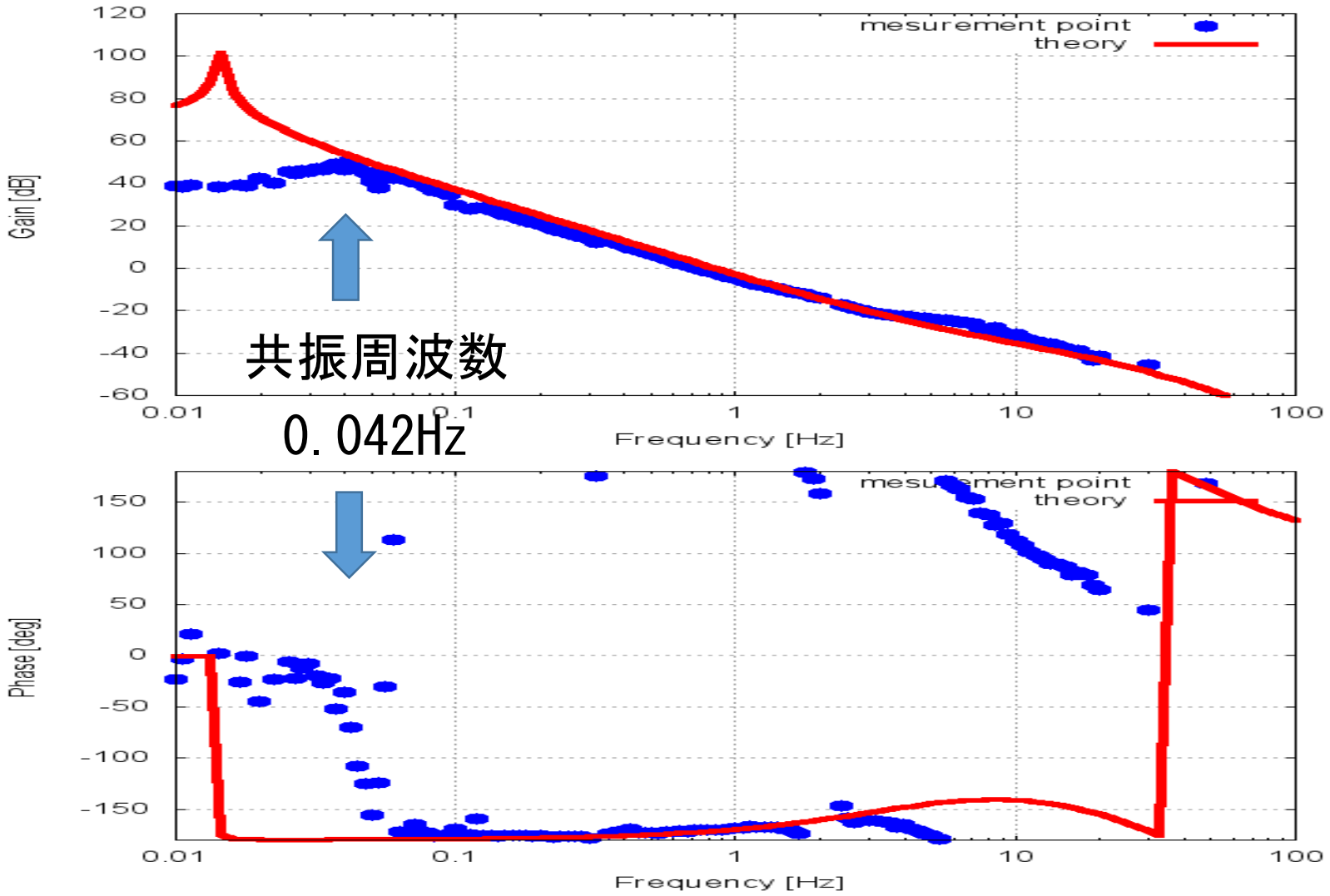
UGFが三か所ありやや不安定

課題

・並進制御のゲインが10倍以上あげられない

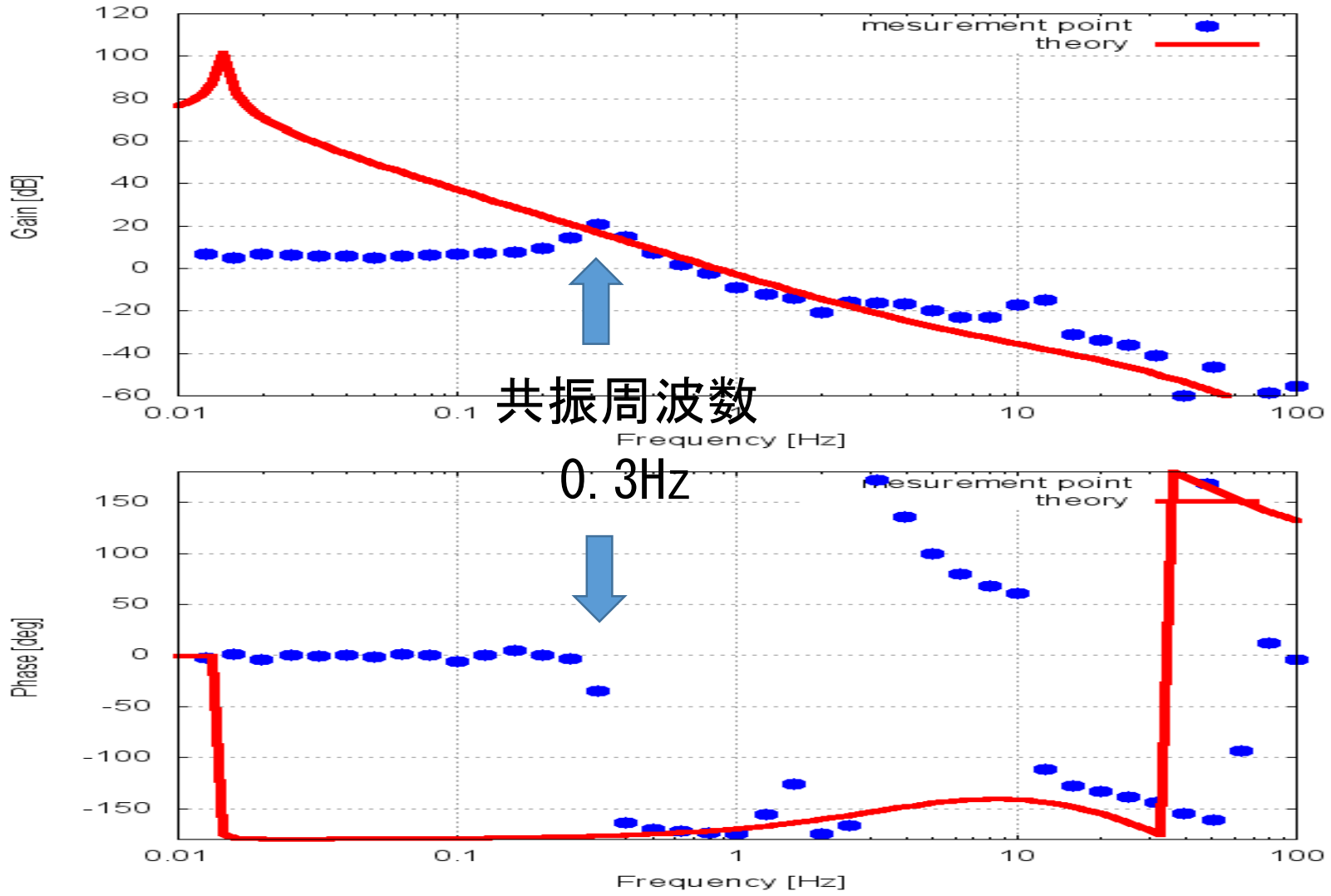
・フォトセンサと被るねじれ振り子の面積が小さく、信号がやや不安定

①YAW方向共振周波数がうまく測れない



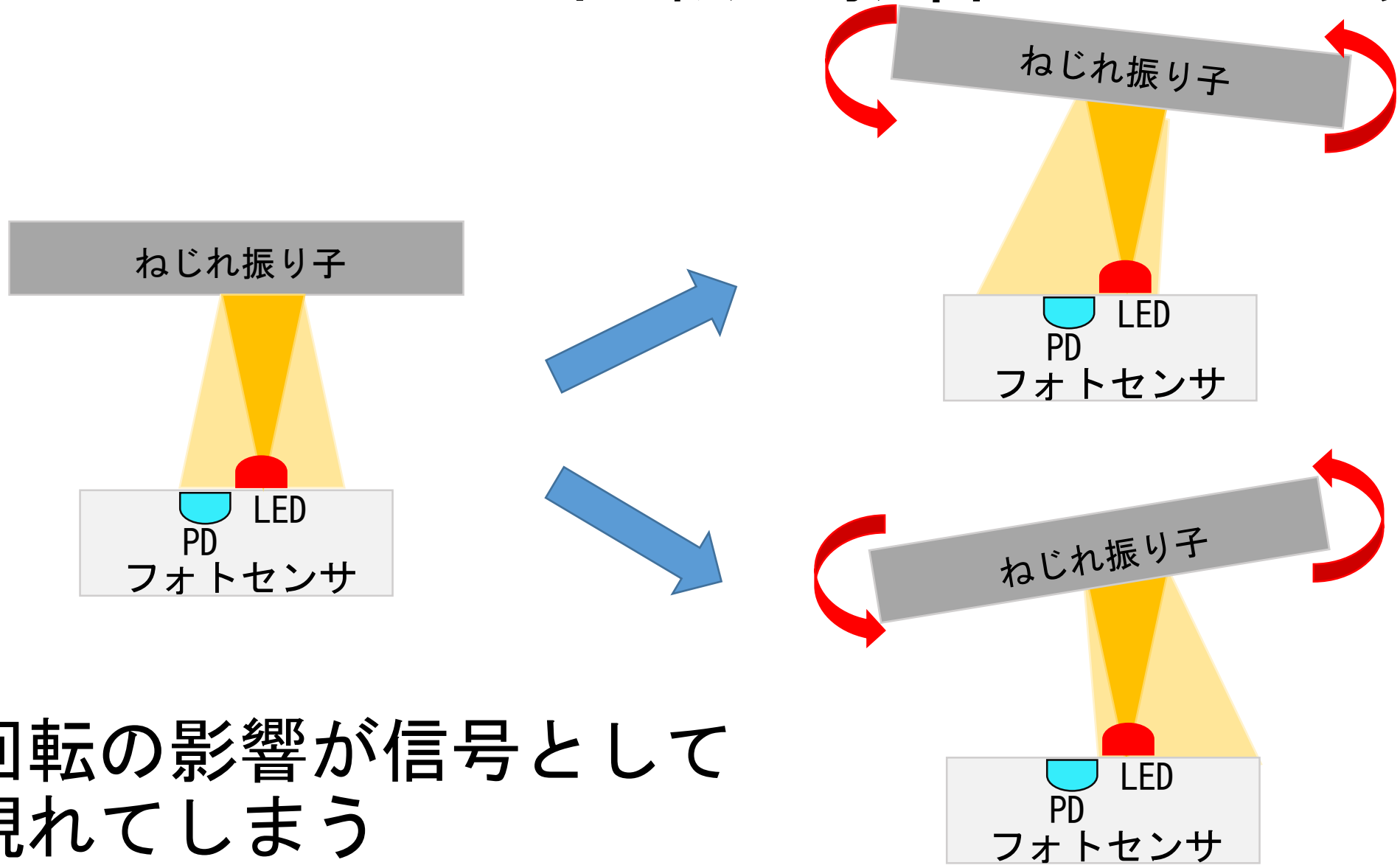
・LONG制御による影響？
・再現性が見られない

①YAW方向共振周波数がうまく測れない



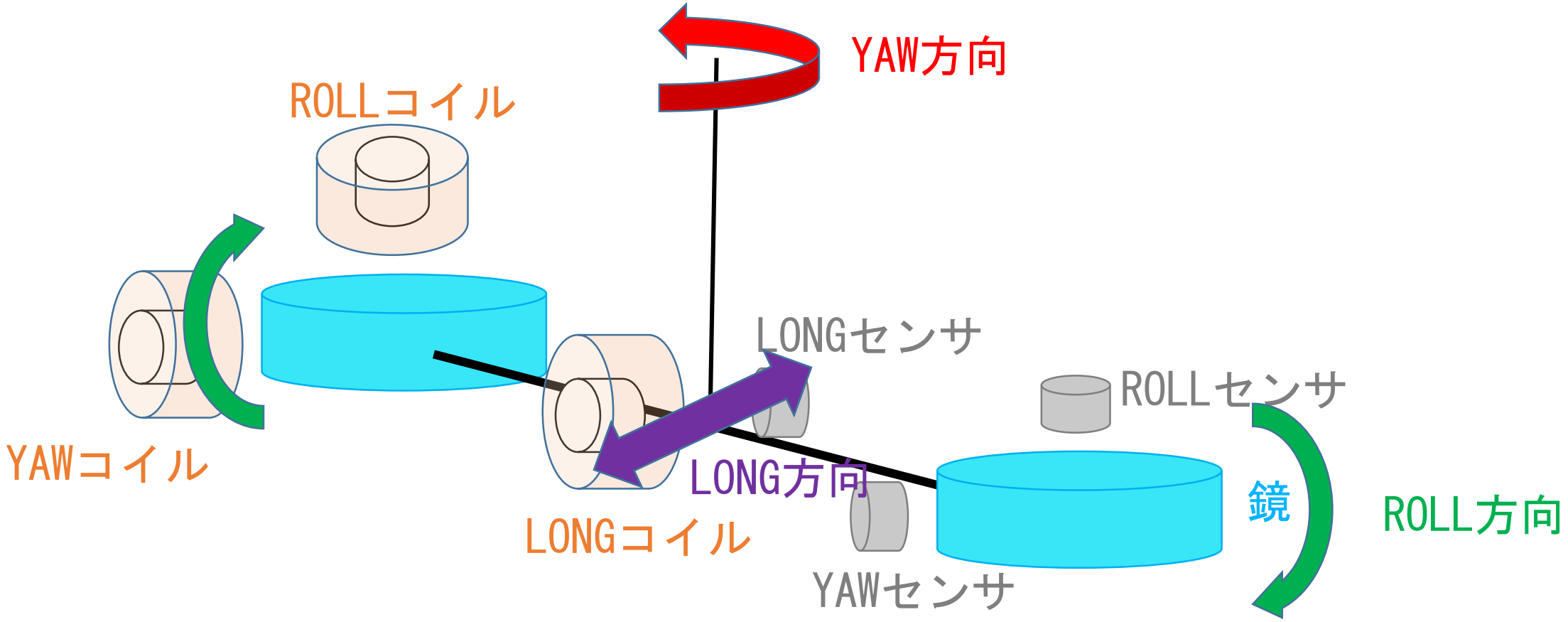
・LONG制御による影響？
・再現性が見られない

②LONGセンサがYAW回転に影響してしまう問題



回転の影響が信号として
現れてしまう

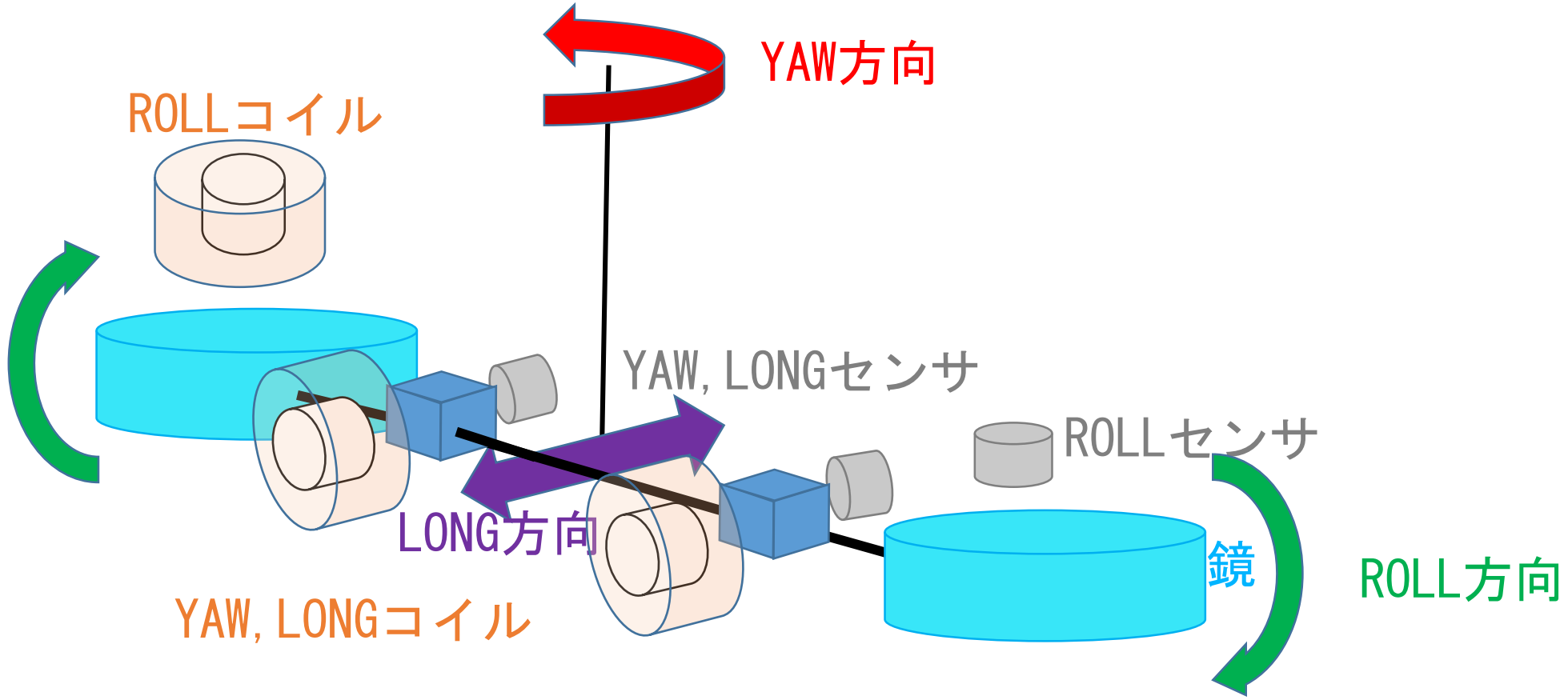
前回のセットアップ(before)



YAW,ROLL,並進方向の3方向で制御

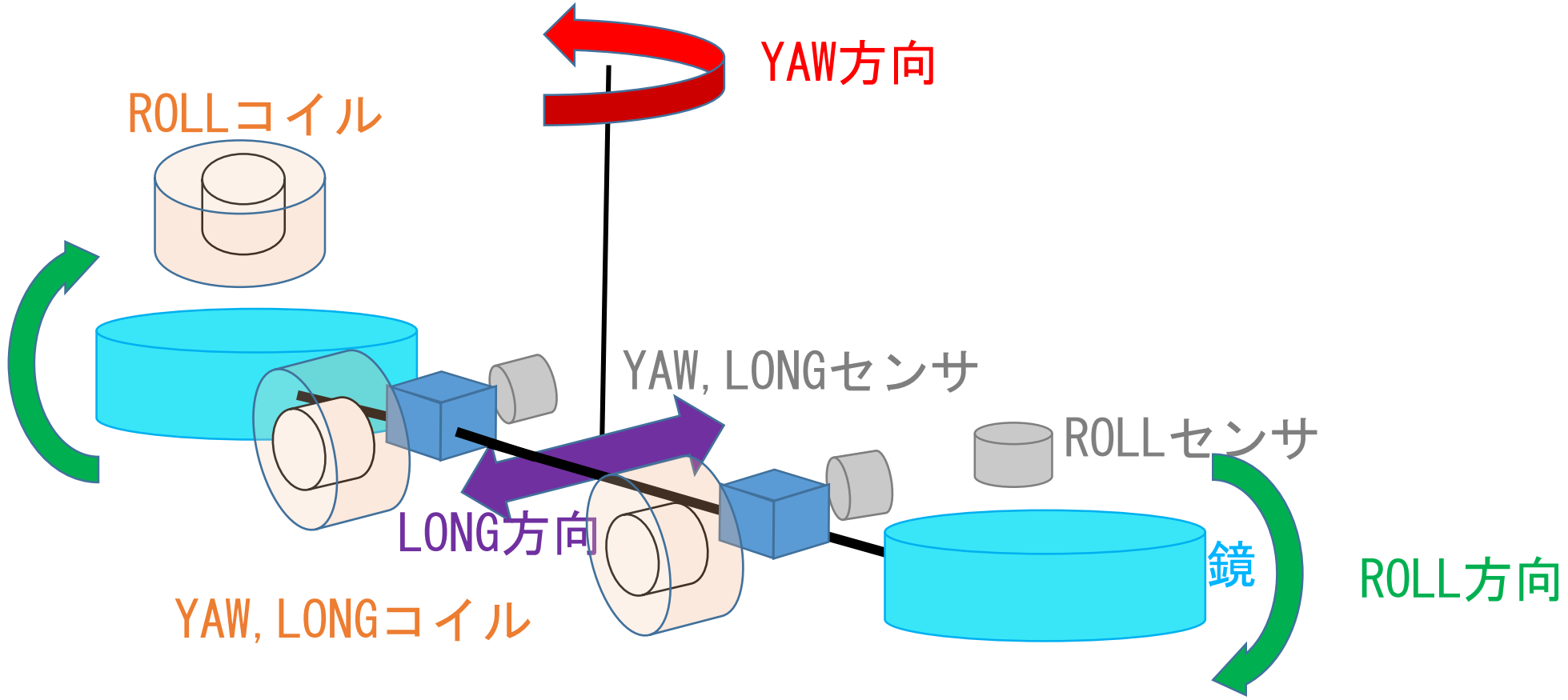
→実際に制御はかかる（前回の発表）

今回のセットアップ(after)



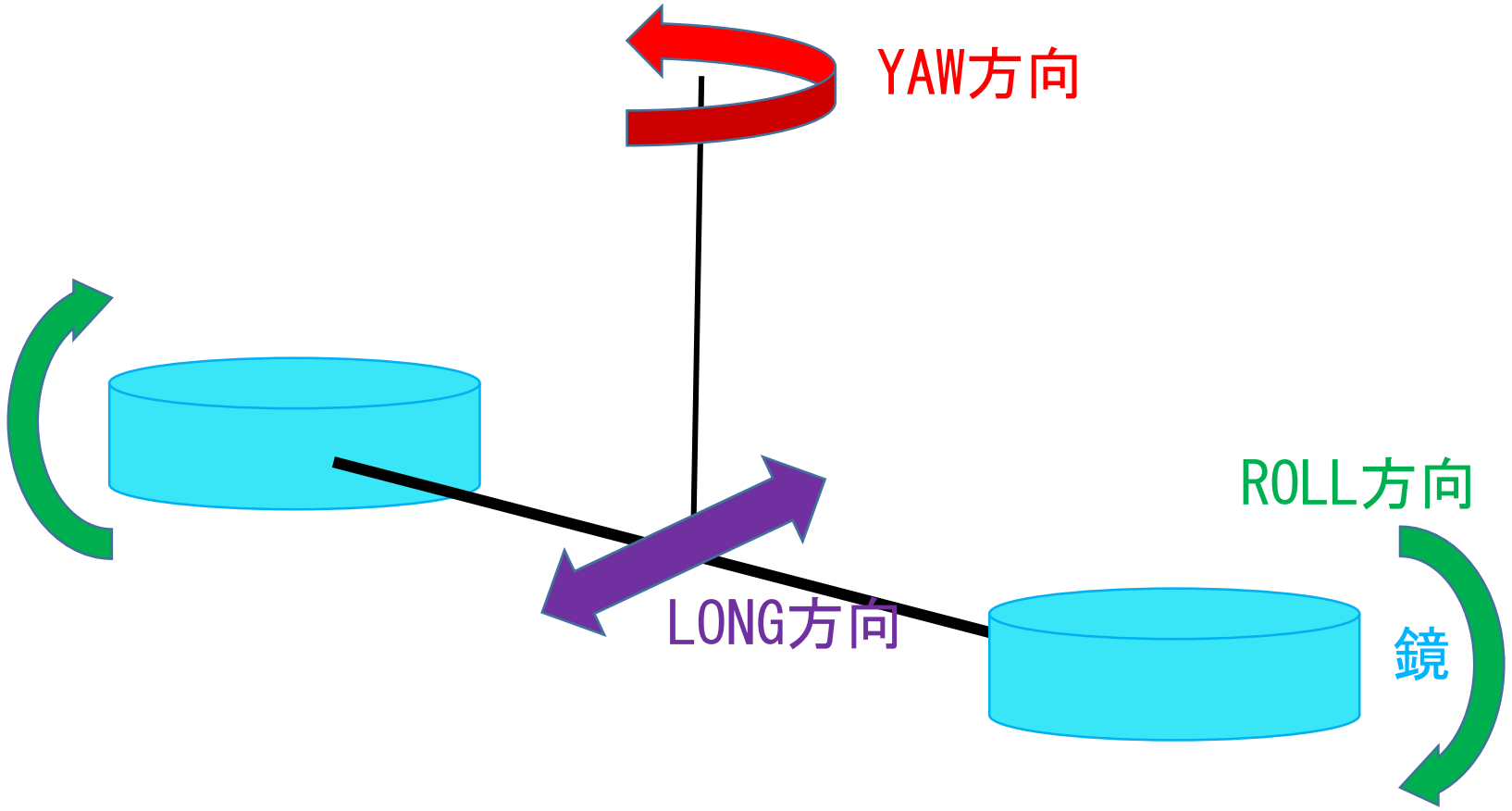
和と差の信号でYAW,LONG方向を制御

今回のセットアップ(after)



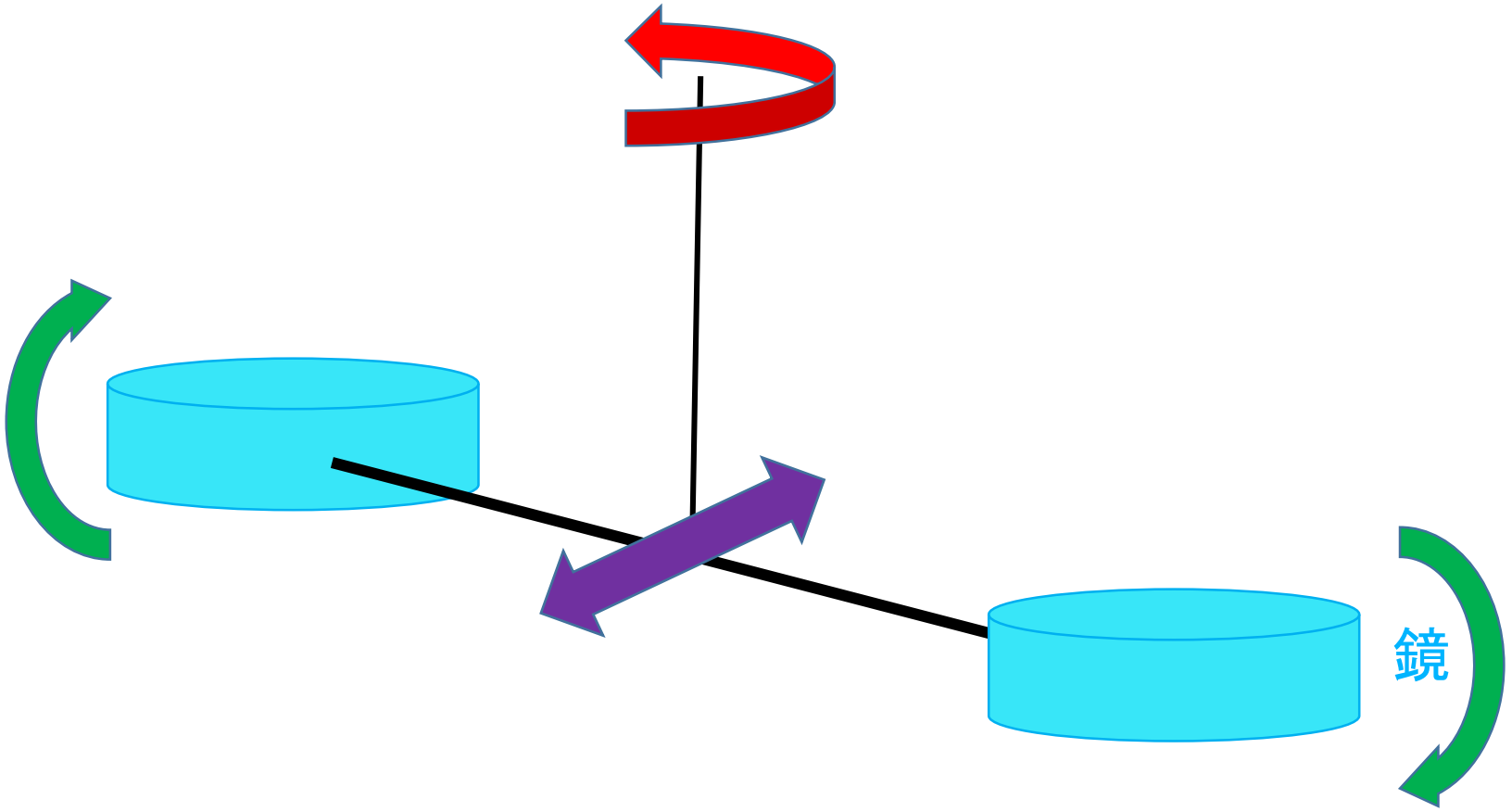
和と差の信号でYAW,LONG方向を制御

座標系の設定



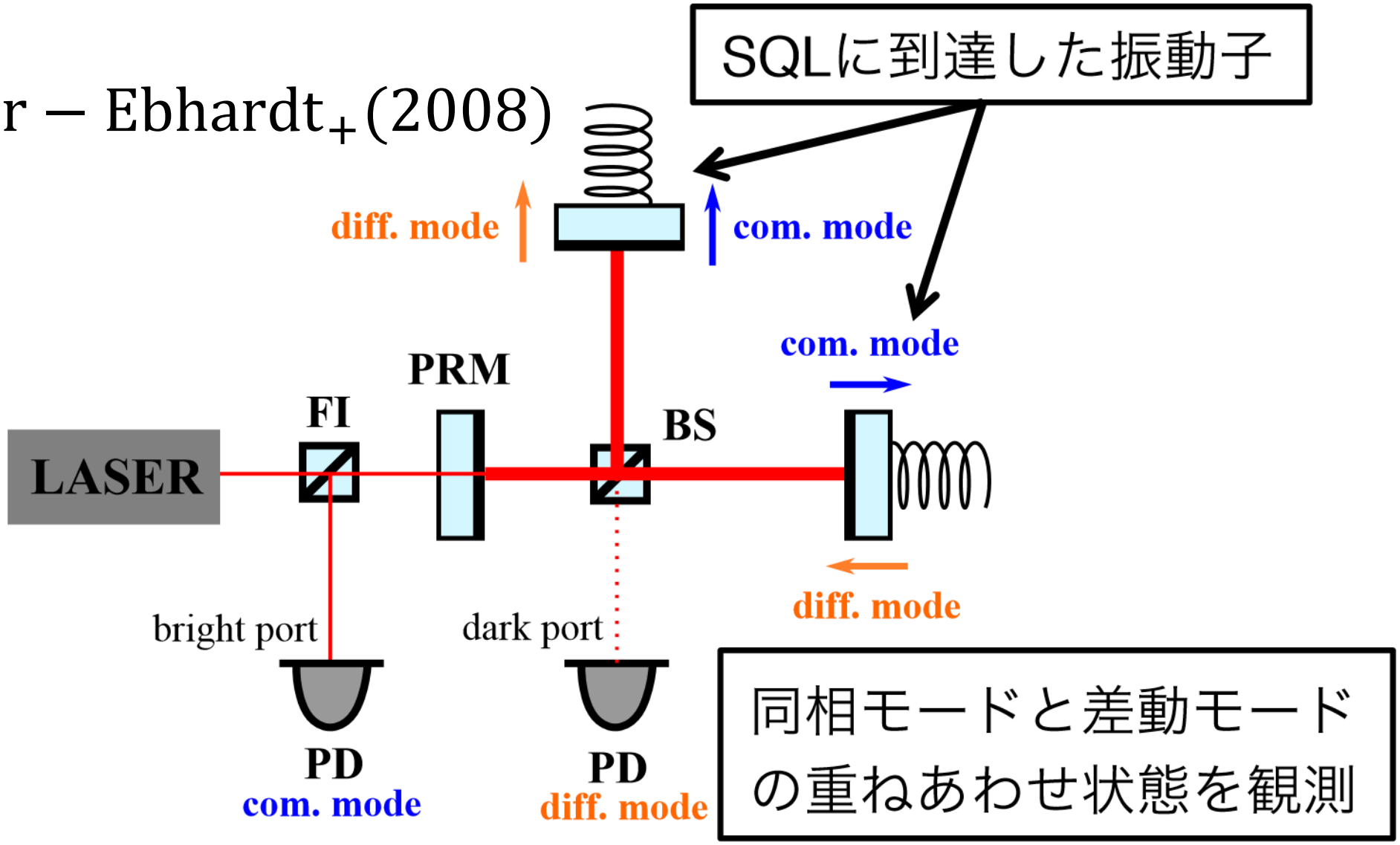
ROLL方向　YAW方向　LONG方向

座標系の設定

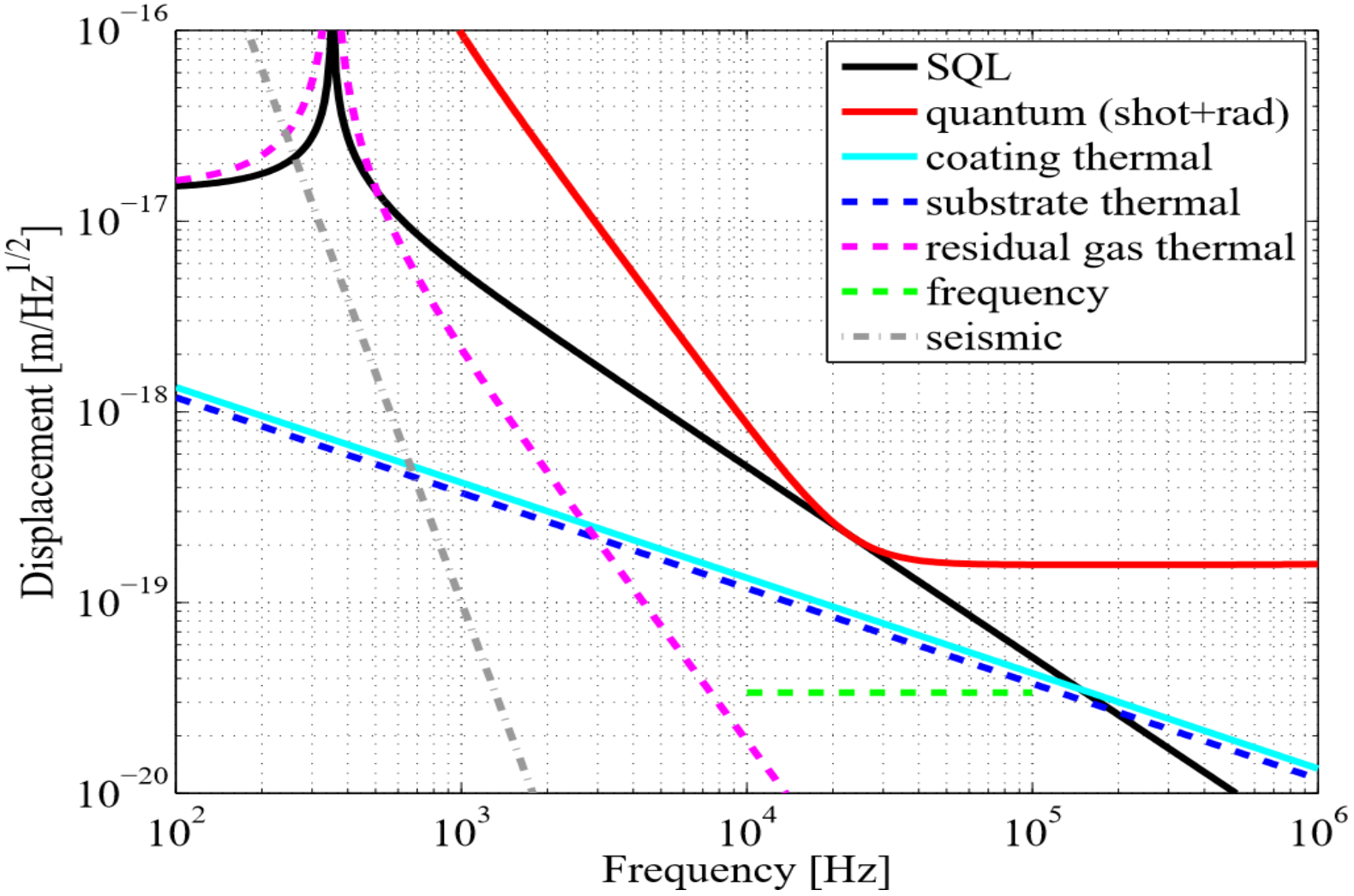


位置の重ね合わせ状態の観測

Müller − Ebhardt$_+$(2008)



ノイズスペクトル



0.2 mgの鏡

13 Wのレーザー入射光

23 kHz付近でSQL到達