

スペース重力波アンテナ DECIGO計画(105): 干渉計統合試験用プラットフォームの開発

長野晃士^A, 下田智文^B, 道村唯太^B, 安東正樹^B
東大宇宙線研^A, 東大理^B

概要

- 0.1-10 Hzの帯域の重力波を観測するためのスペース重力波アンテナDECIGOでは、双方向Fabry-Perot干涉計と呼ばれる干涉計方式を用いる予定である。
- これは、地上検出器に似た直接干渉型であるが、宇宙検出器特有の問題があるため、詳細な制御方式は決定されていない。
- 双方向Fabry-Perot干涉計の制御試験のための実験用プラットフォームの開発を進めている。
- 衛星を模す懸架された光学定盤の水平方向3自由度の地面の慣性系に対する制御を行い、懸架系と電気系に大きな問題がないことを確認した。

目次

1. DECIGOとその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討
3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発
4. 今後の展望、結論

目次

- 1. DECIGOとその干渉計構成**
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討
3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発
4. 今後の展望、結論

DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器) ← 最高感度の向上のため

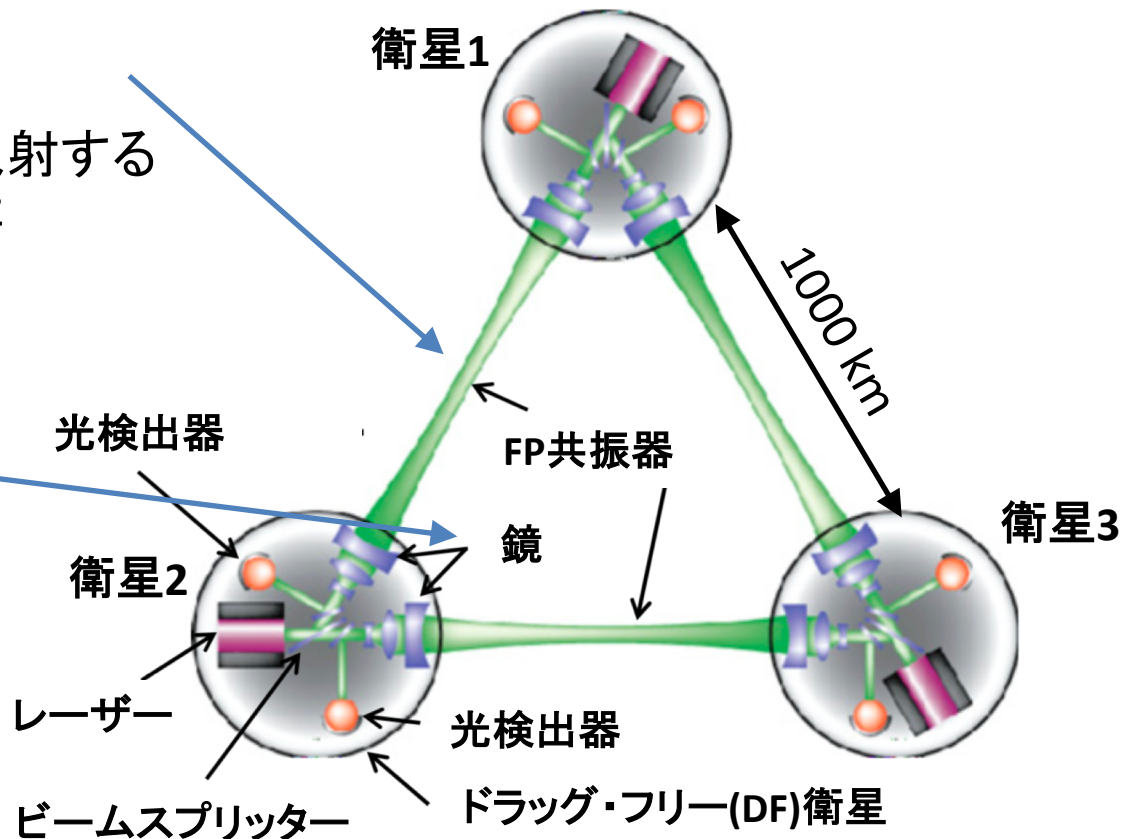
- 長さ: 1000 km
- フィネス: 10
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

鏡

- 質量: 100 kg

レーザー

- 波長: 515 nm
- 入射パワー: 10 W
- 周波数揺らぎ: $< 1 \text{ Hz/rtHz @ } 1 \text{ Hz}$



DECIGOの予備概念設計
(S. Kawamura+, CQG, 2011)

DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器) ← 最高感度の向上のため

- 長さ: 1000 km

- フィネス: 10

- 2つの衛星から入射する
レーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

冗長性を確保できる。

鏡

- 質量: 100 kg

光検出器

衛星2

鏡

レーザー

- 波長: 515 nm

- 入射パワー: 10 W

- 周波数揺らぎ: $<1 \text{ Hz/rtHz @ } 1 \text{ Hz}$

レーザー

ビームスプリッター

光検出器

ドラッグ・フリー(DF)衛星

衛星1

FP共振

衛星3から

衛星1から

衛星3

DECIGOの予備概念設計

(S. Kawamura+, CQG, 2011)

DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器) ← 最高感度の向上のため

- 長さ: 1000 km
- フィネス: 10
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

鏡

- 質量: 100 kg

レーザー

- 波長: 515 nm
- 入射パワー: 10 W
- 周波数揺らぎ: $<1 \text{ Hz/rtHz @1 Hz}$

光検出器

衛星2

レーザー

ビームスプリッター

衛星1

FP共振器

鏡

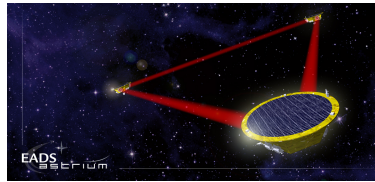
光検出器

ドラッグ・フリー(DF)衛星

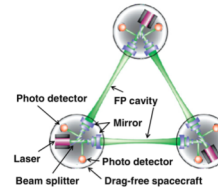
衛星3

DECIGOの予備概念設計
(S. Kawamura+, CQG, 2011)

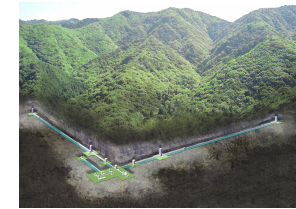
DECIGOとLISAとKAGRA



LISA



DECIGO



KAGRA

宇宙/地上

宇宙

宇宙

地上 (地下)

基線長

250万 km

1000 km

3 km

観測帯域

10^{-4} - 10^{-1} Hz

10^{-1} -10 Hz

10 - 10^4 Hz

光学構成

光トランス
ポンダ方式
(間接干渉型)

双方向FP
干渉計
(直接干渉型)

帯域可変型
干渉計
(直接干渉型)

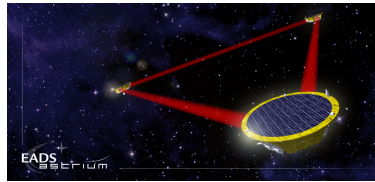
DF制御

必要

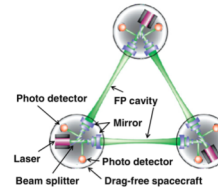
必要

不要

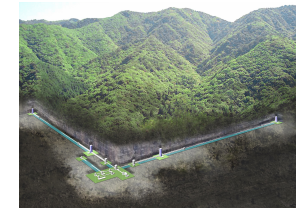
DECIGOとLISAとKAGRA



LISA



DECIGO



KAGRA

宇宙/地上

宇宙

宇宙

地上 (地下)

基線長

250万 km

1000 km

3 km

観測帯域

10^{-4} - 10^{-1} Hz

10^{-1} -10 Hz

10 - 10^4 Hz

光学構成

光トランス
ポンダ方式
(間接干渉型)

双方向FP
干渉計
(直接干渉型)

帯域可変型
干渉計
(直接干渉型)

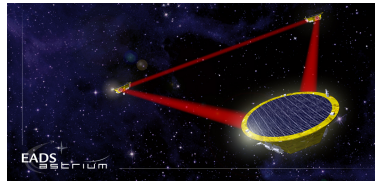
DF制御

必要

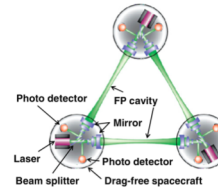
必要

不要

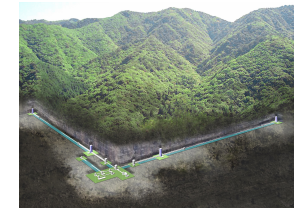
DECIGOとLISAとKAGRA



LISA



DECIGO



KAGRA

宇宙/地上

宇宙

宇宙

地上 (地下)

基線長

250万 km

1000 km

3 km

観測帯域

10^{-4} - 10^{-1} Hz

10^{-1} -10 Hz

10 - 10^4 Hz

光学構成

光トランス
ポンダ方式
(間接干渉型)

双方向FP
干渉計
(直接干渉型)

帯域可変型
干渉計
(直接干渉型)

DF制御

必要

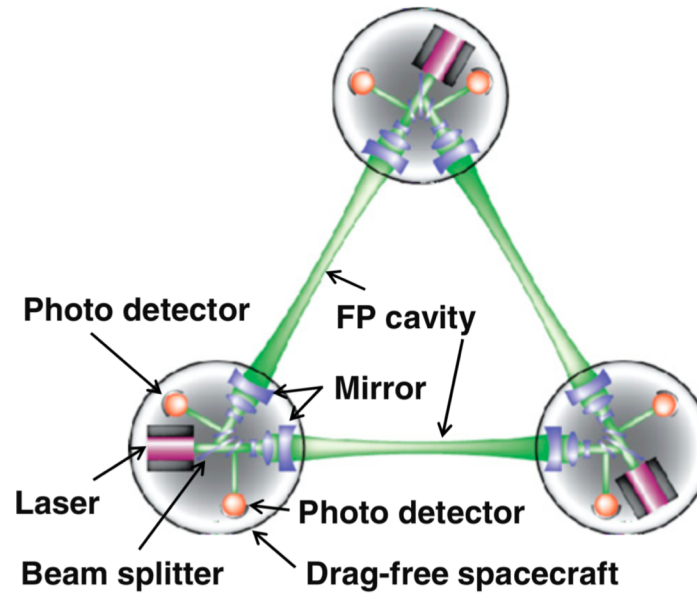
必要

不要

目次

1. DECIGOとその干渉計構成
- 2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討**
3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発
4. 今後の展望、結論

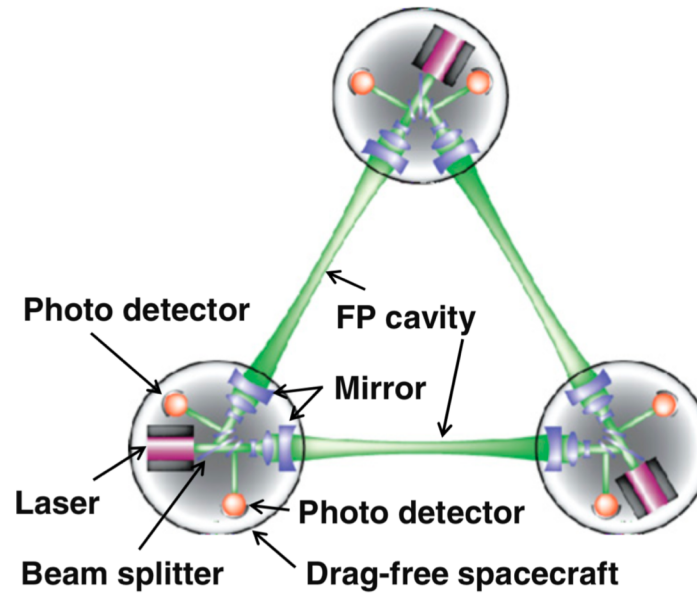
双方向Fabry-Perot干渉計の検討



シミュレーション等

実験的検証

双方向Fabry-Perot干渉計の検討



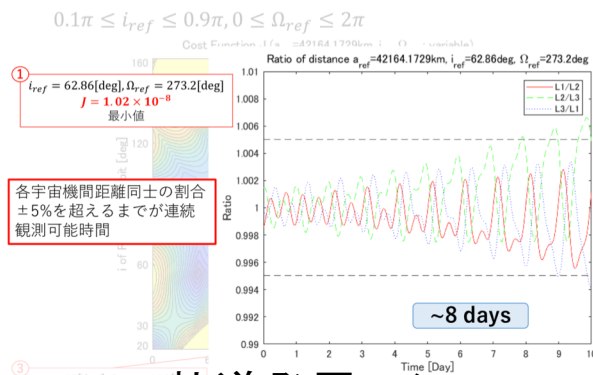
シミュレーション等

実験的検証

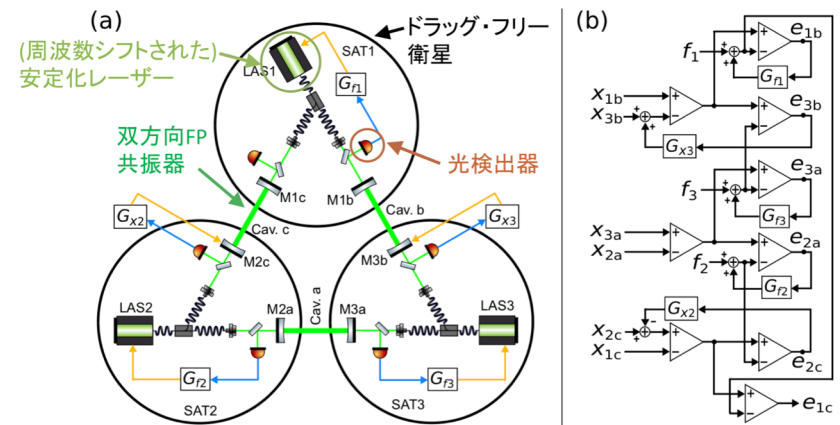
これまでの検討状況

- 干渉計の構成については、これまでシミュレーション等による検討が行われてきた。
 - 軌道設計
 - 擾乱の影響の推定
 - 重力波信号の取得可能性 (前回の学会発表) など。

グリッドサーチ探索 $a_{ref} = 42164\text{km}$ (@GSO)

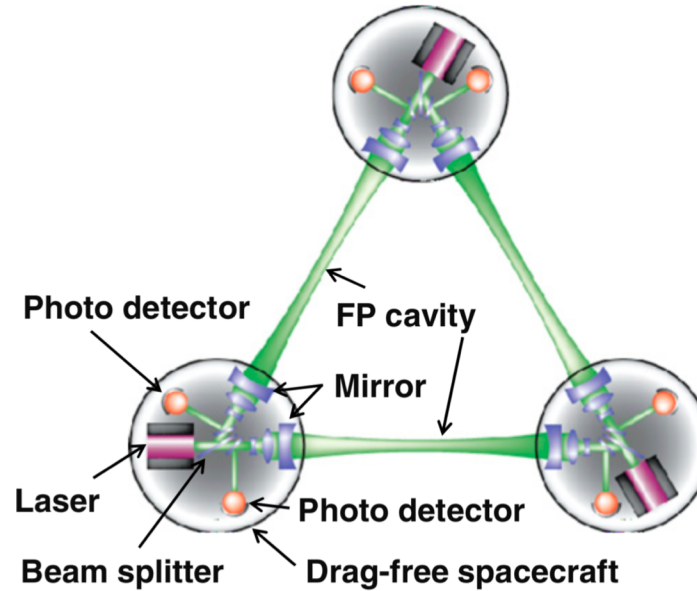


B-DECIGOの軌道発展のシミュレーション。
(松下、第17回DECIGOワークショップ)



ブロック図による制御則の検討。

双方向Fabry-Perot干渉計の検討



シミュレーション等

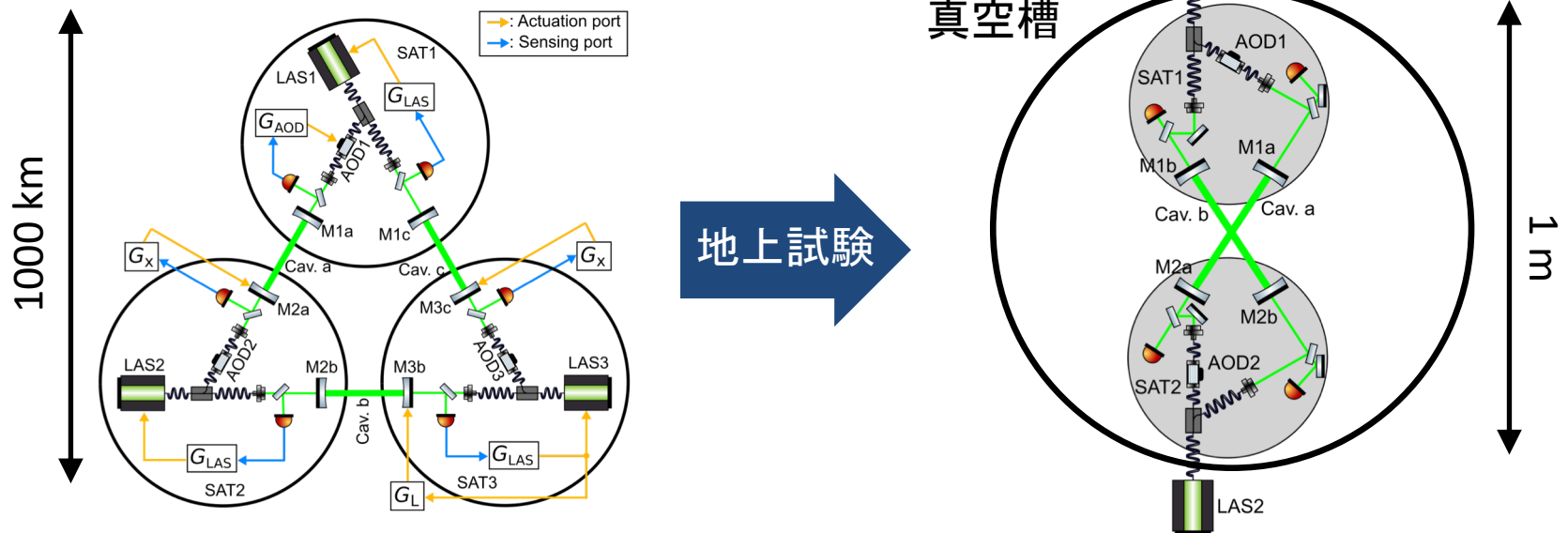
実験的検証

目次

1. DECIGOとその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討
- 3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発**
4. 結論、今後の課題、まとめ

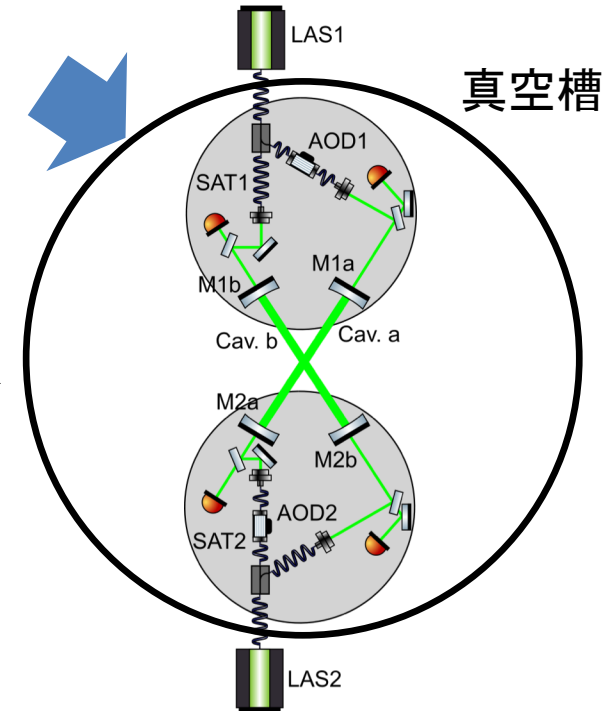
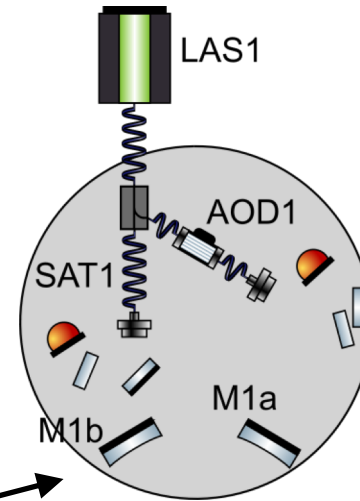
干渉計統合試験用プラットフォーム

- 理論検討だけでは、さまざまな実際上の問題を見逃す可能性がある。
- また、理論的にはどの程度影響があるか予想が難しい、偏光カップリング雑音や散乱光雑音などもある。
- その実験的実証のための干渉計地上統合試験用プラットフォームを構築している。



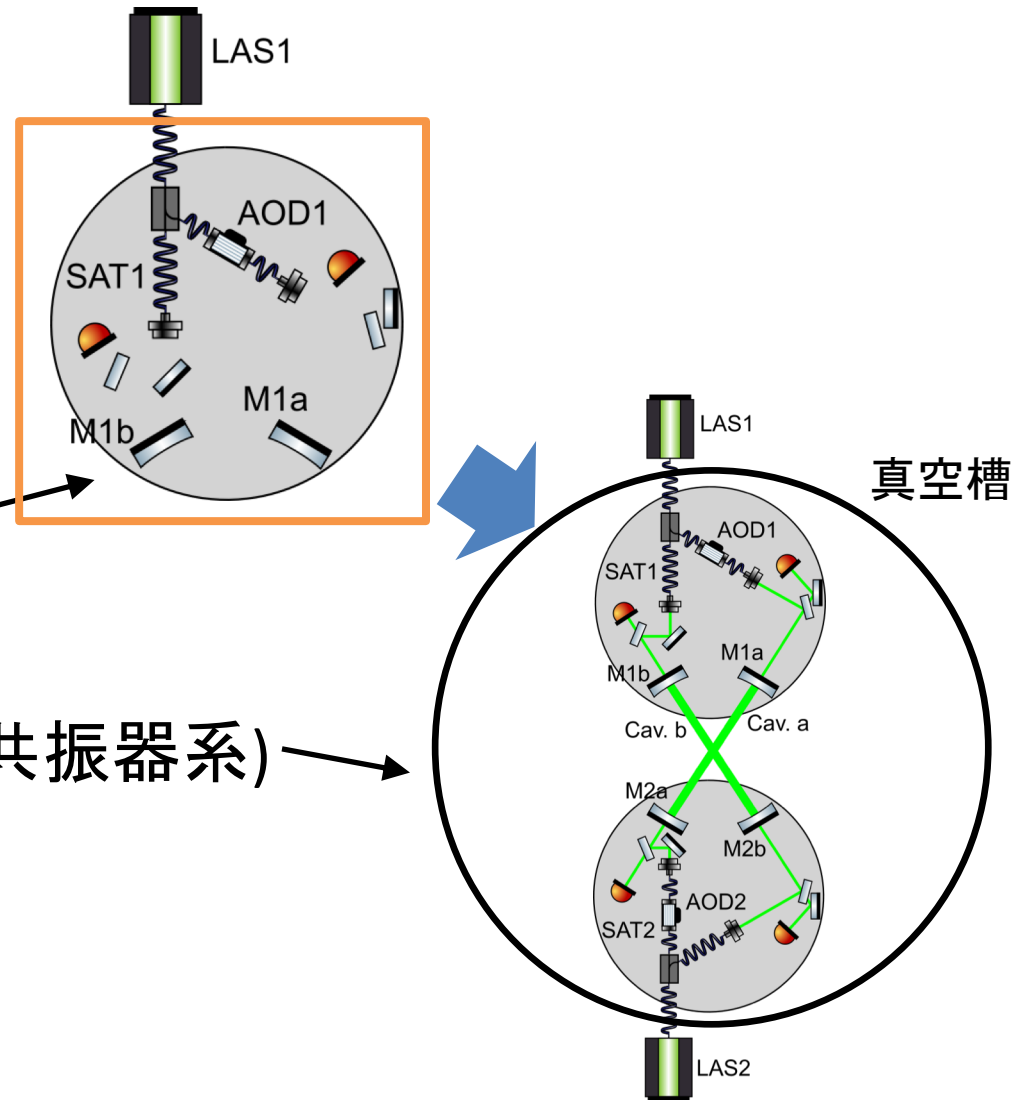
構築計画

- 2018年9月まで
 - 概念設計
- 2018年12月まで
 - 機械系物品調達
- 2019年3月まで
 - 光学系物品調達
 - 機械系構築
- 2019年6月まで
 - 光学系構築 (2衛星・2共振器系)
 - 干渉計試験
- 2019年9月まで
 - 試験完了



構築計画

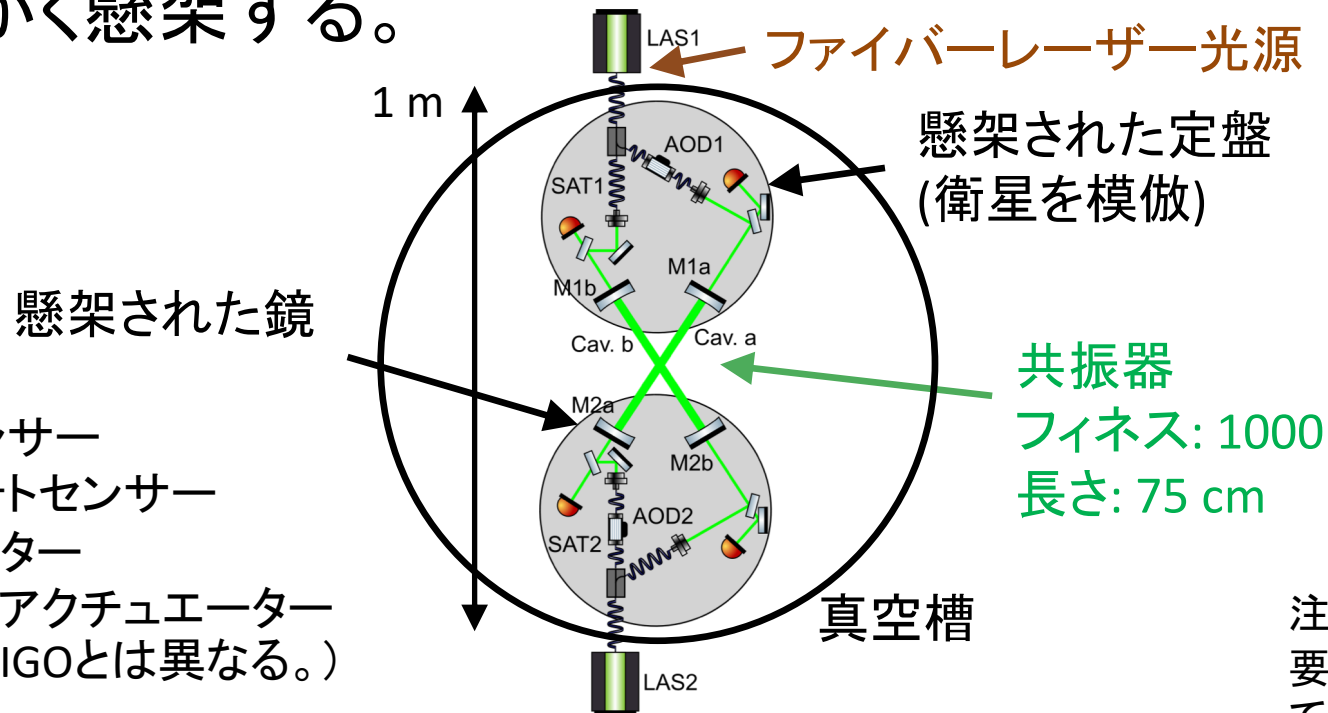
- 2018年9月まで
 - 概念設計
- 2018年12月まで
 - 機械系物品調達
- 2019年3月まで
 - 光学系物品調達
 - **機械系構築**
- 2019年6月まで
 - 光学系構築 (2衛星・2共振器系)
 - 干渉計試験
- 2019年9月まで
 - 試験完了



干渉計統合試験用プラットフォーム

• プラットフォームの特徴

- 干渉計制御とドラッグ・フリー制御の要素を持つ。
- 宇宙空間を模するために、各自由度をできるだけ柔軟に懸架する。

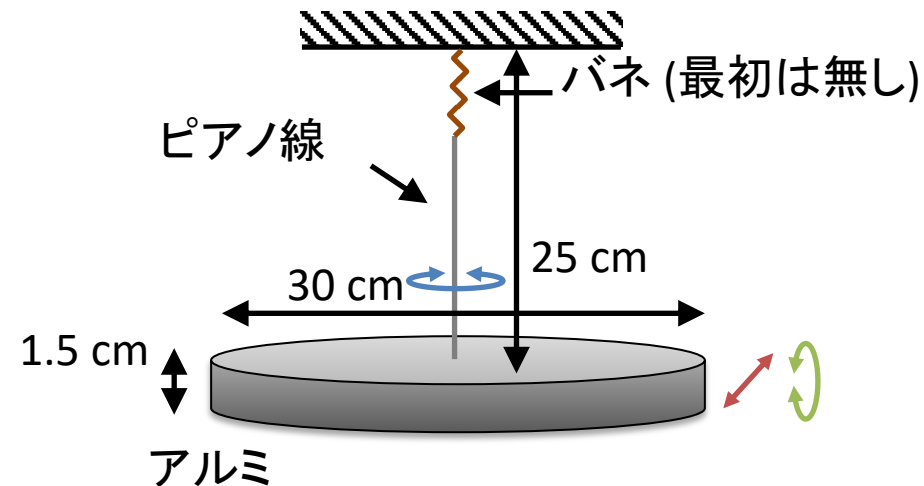


- ローカルセンサー
 - 光てこ・フォトセンサー
 - アクチュエーター
 - コイル磁石アクチュエーター
- (注: 実際のDECIGOとは異なる。)

注: いくつかの要素は描かれていない。

プラットフォームの懸架系

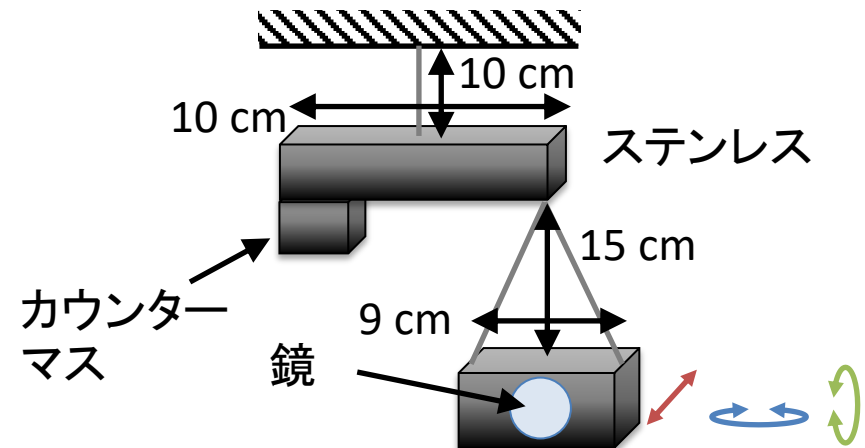
• 光学定盤懸架系



共振周波数 (設計値)

- ピッチ/ロール: 0.086 Hz
- ヨー: 0.012 Hz
- 水平: 1 Hz

• 鏡懸架系

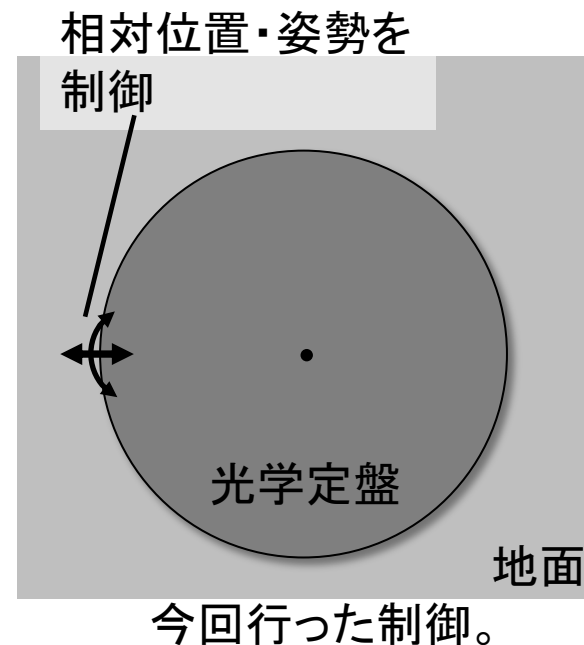
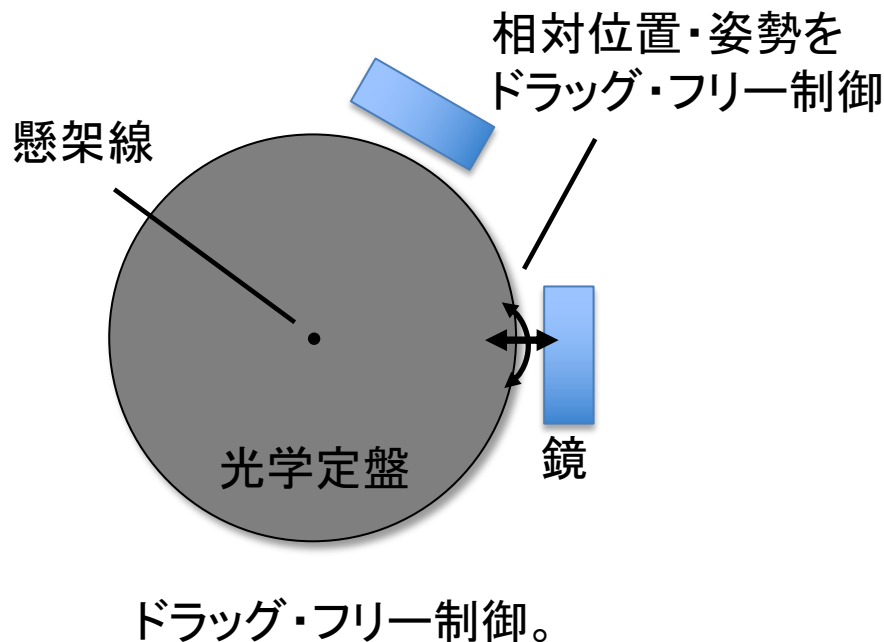


共振周波数 (設計値)

- ピッチ: 0.05 Hz
- ヨー: 0.1 Hz
- 長さ方向: 0.02 Hz

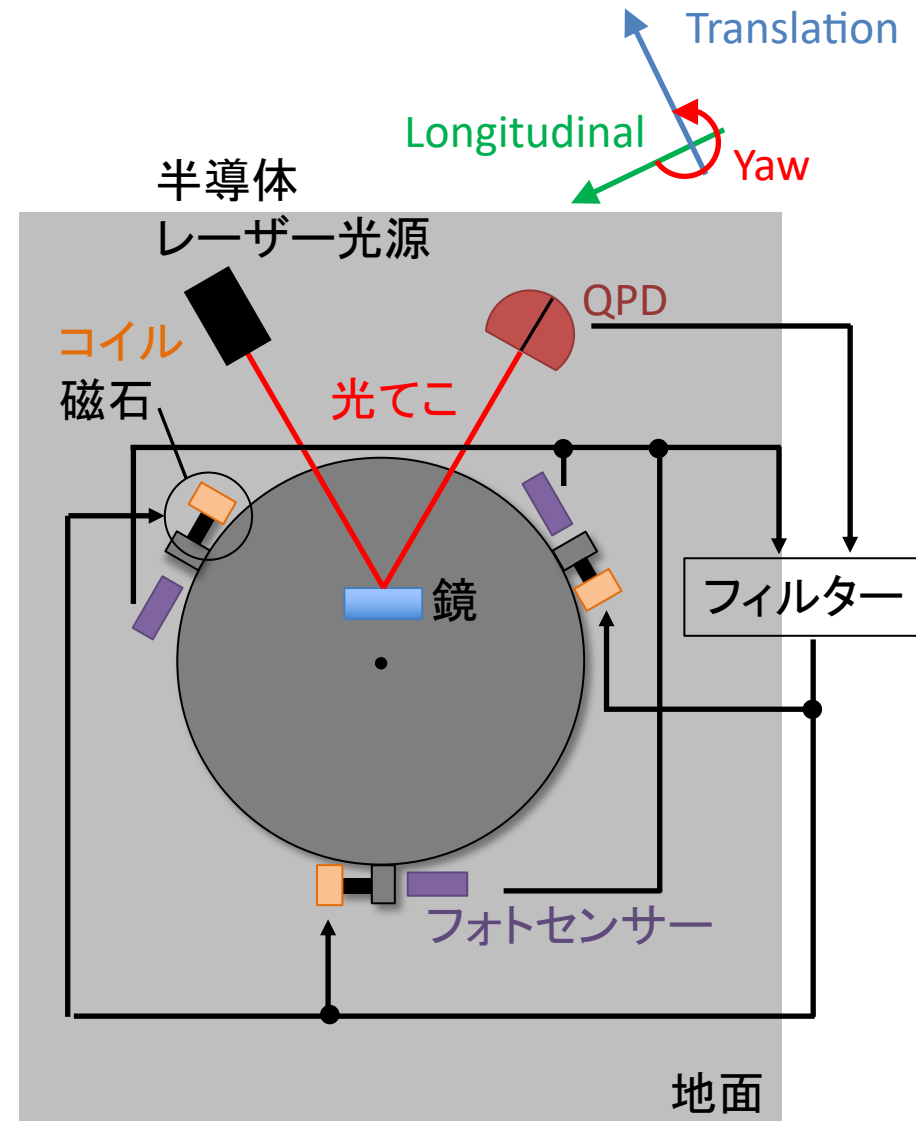
光学定盤懸架系の制御

- 光学定盤(衛星)は、鏡(テストマス)にドラッグ・フリー制御される。
- その予備測定として、光学定盤を地面の慣性系に対して制御する試験を行った。
 - 目的: 懸架系、および電気回路等のテスト。

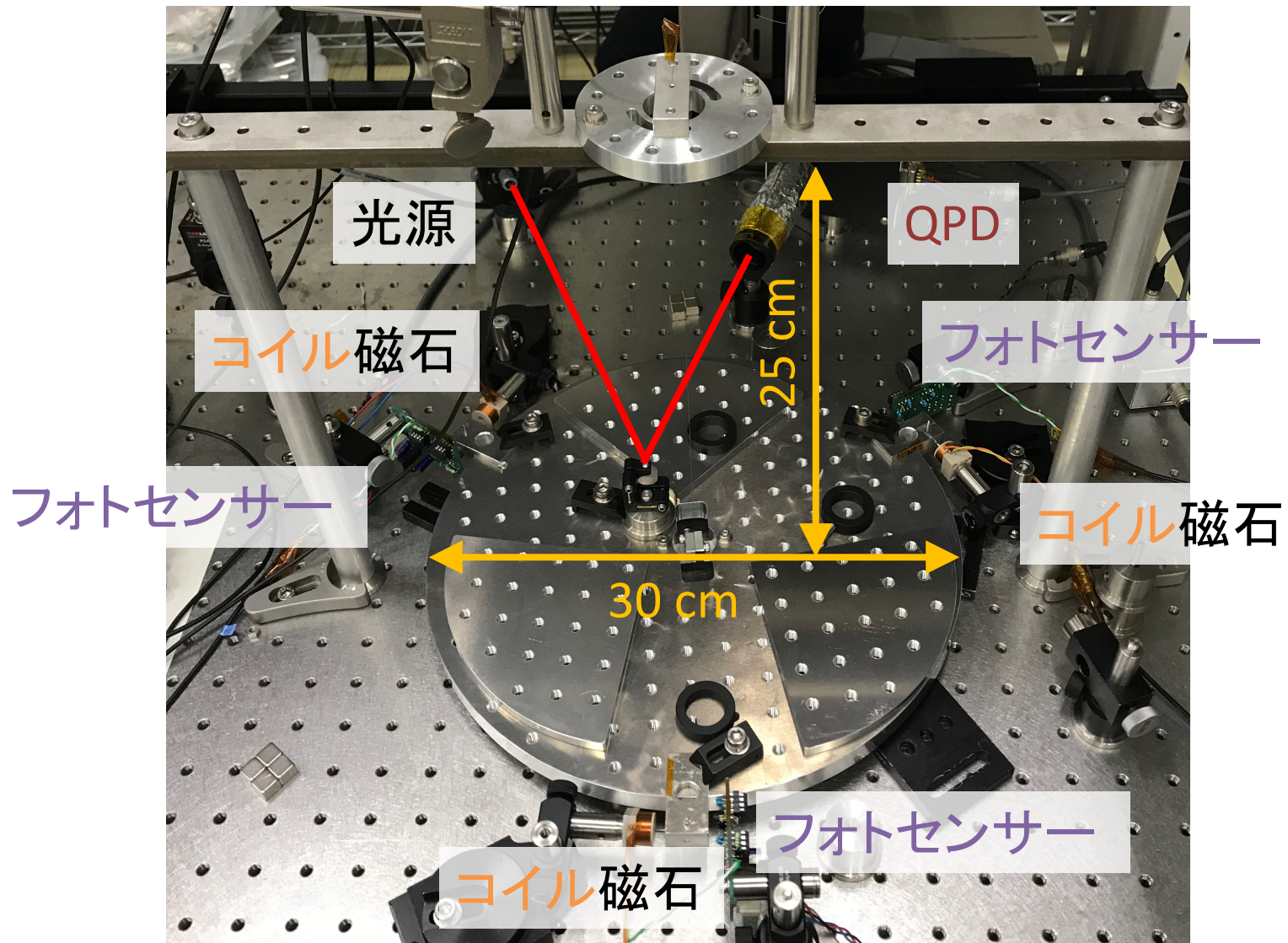


光学定盤懸架系の制御

- 今回は水平方向制御のみを行った。
- センサー
 - 変位: 反射型フォトセンサー
 - 回転: 光てこ
- アクチュエータ
 - コイル・磁石
- 制御フィルター
 - アナログ回路



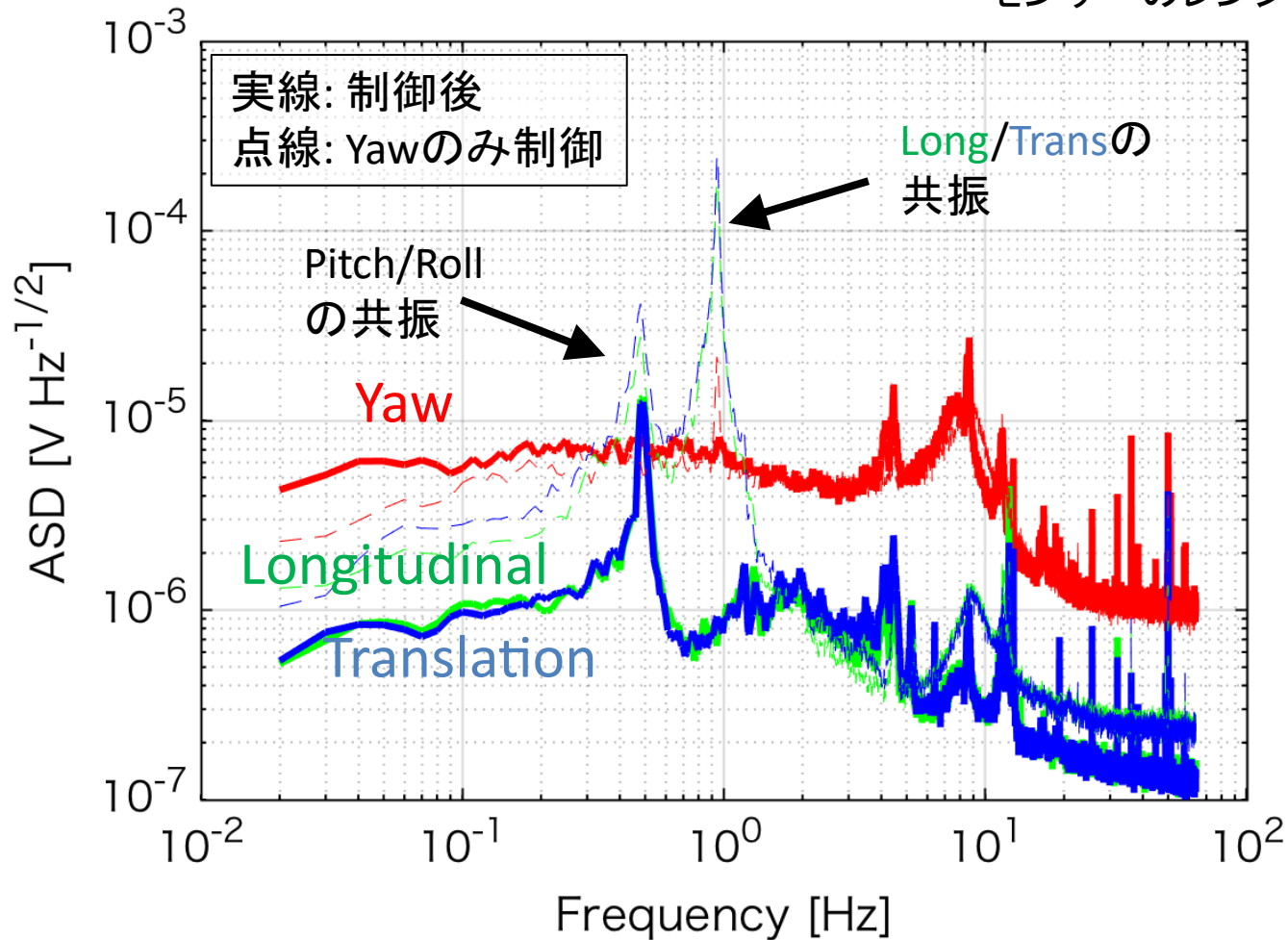
光学定盤懸架系



光学定盤懸架系の制御

- 相対変位信号のスペクトル

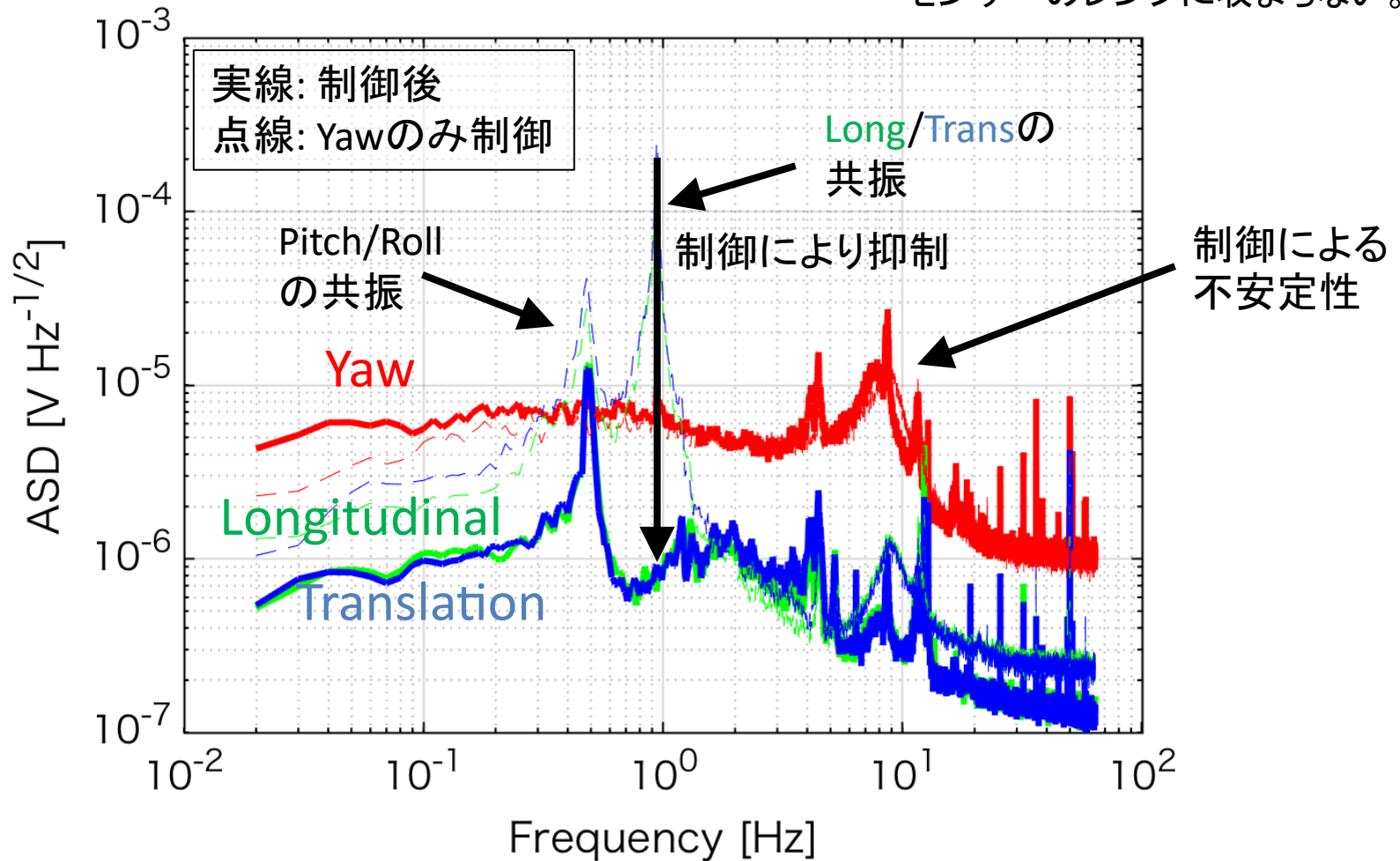
Yawを制御しないとフォトセンサーの磁性によるドリフトのためセンサーのレンジに収まらない。



光学定盤懸架系の制御

• 相対変位信号のスペクトル

Yawを制御しないとフォトセンサーの磁性によるドリフトのためセンサーのレンジに収まらない。

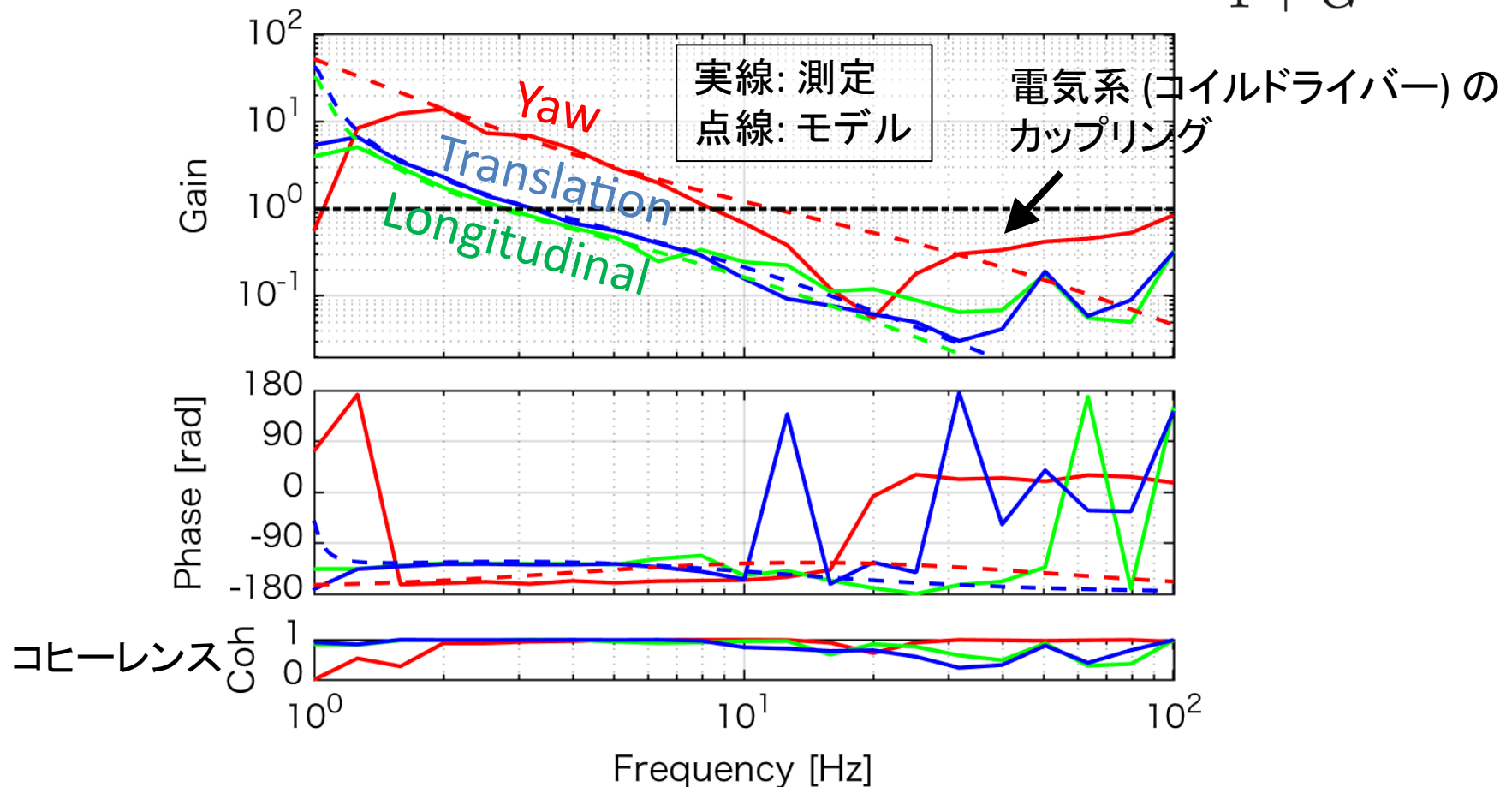


光学定盤懸架系の制御

• オープンループ伝達関数 G

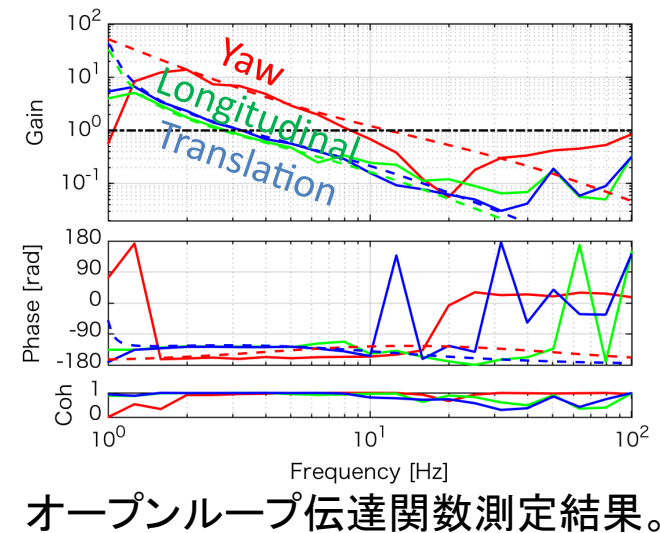
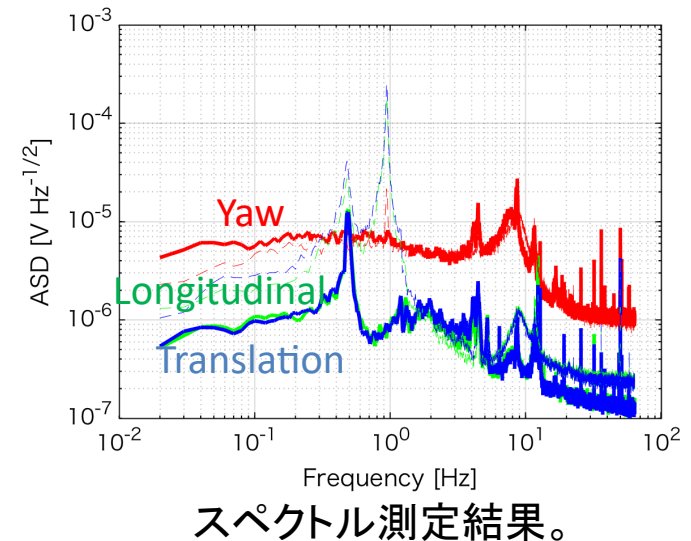
制御後の変位 制御前の変位

$$\Delta x = \frac{1}{1+G}x$$



結果

- 水平方向自由度を地面に対して制御することに成功した。
- 懸架系に大きな問題は見つからなかった。
- コイルドライバの電源起源と思われるカップリングが見つかった。
 - 電源系の改良で対処可能。

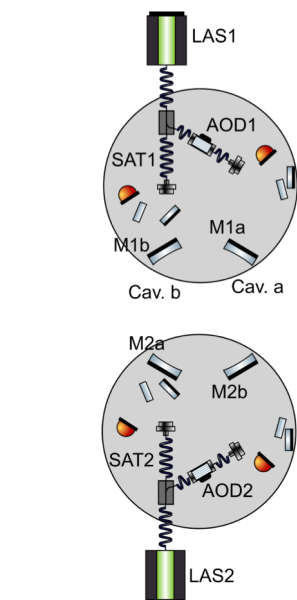


目次

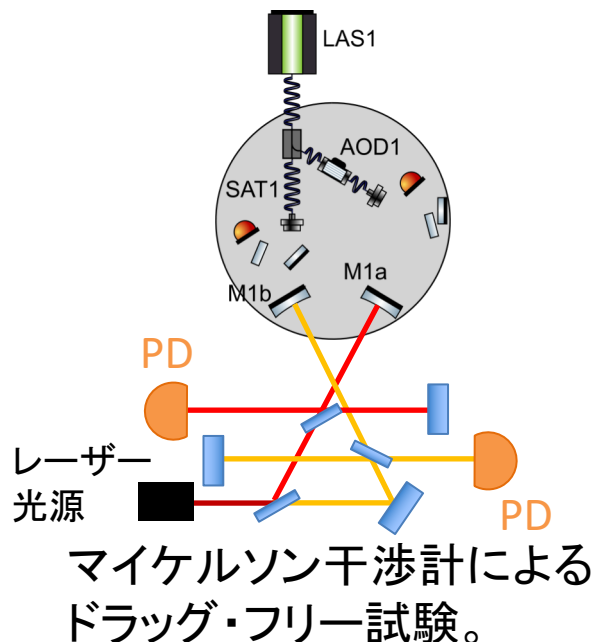
1. DECIGOとその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討
3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発
- 4. 今後の展望、結論**

今後の展望

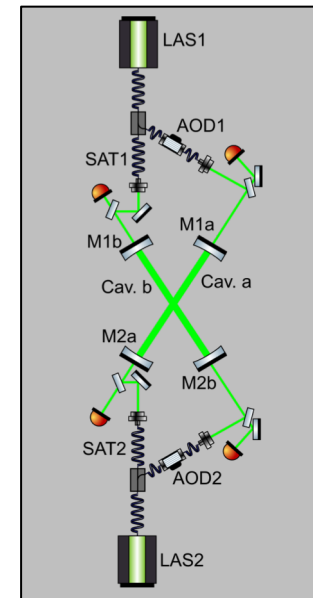
- 他自由度、複数台の制御に拡張する。
- 簡単な構成 (Michelson干渉計) で、干渉計制御とドラッグ・フリー制御の両立性試験を行う。
- 双方向FP干渉計を固定定盤上で試験する。



複数台への拡張。



マイケルソン干渉計による
ドラッグ・フリー試験。



光学系のための試験。

結論

- DECIGOで用いる予定の双方向Fabry-Perot干渉計の理論的・実験的検討が進められている。
- 実験的実証のための干渉計地上統合試験用プラットフォームを構築している。
- ドラッグ・フリー制御の予備測定として、衛星を模す光学定盤の一部の自由度を地面の慣性系に対して制御することに成功した。
- 今後は干渉計とドラッグ・フリー制御の両立性試験を行う。