

修 士 学 位 論 文

イメージスライサ搭載型中間赤外線分光器 MIRSIS における極低温での光学素子駆動系開発

2011 年度
(平成 23 年度)

茨城大学大学院理工学研究科
理学専攻物理系

10NM154R
北澤 良

ABSTRACT

茨城大学、宇宙科学研究所、国立天文台、東京大学でイメージスライサ搭載型中間赤外線分光器 (MIRSIS) の共同開発を行っている。この中で極低温環境中での光学素子の切替・調整を行う駆動系のハードウェアとソフトウェアの両方の開発について報告する。

MIRSIS の光学素子駆動系には、光学調整可動平面鏡、シャッター、切替鏡、レンズホイール、撮像フィルターホイールの 5 つのユニットがある。駆動には極低温用ステッピングモータを使い、位置測定にはリミットスイッチまたはホールセンサを使用する。

ハードウェア開発は各ユニットの設計、組み立て、改修に分けられるが、その中で本研究では組み立てと改修を行った。またソフトウェア開発はデバイスドライバの作製、各ユニットで使用する共通プログラム群の作製、各ユニット用のアプリケーション開発に分けられるが、その中で本研究は共通プログラム群及び、アプリケーションを開発した。

各ユニットの組み立て試験を起こった結果、切替鏡以外の 4 つのユニットでわずかな修正を行なった。撮像フィルターホイールについてはラッチ機構の動作に問題があり、改良を行なった。ばねとアルミグロックを使った機構からホイール押さえに、ベアリングを搭載して、さらに摺動部に二硫化モリブデン処理をすることによって問題を解決した。またばねの強度を最適化することで、モータへの電流供給を止めた時にラッチが働くようにした。またシャッターと撮像フィルターホイールとレンズホイールではリミットスイッチを押す力不足、押す動作の再現性不良があったため、ホールセンサを用いた位置検出方法を用いることとし、そのスイッチ回路の開発を行なった。開発した回路はホールセンサ、センサ駆動のための定電流回路、センサ出力の差動増幅回路、コンパレータ、出力スイッチ回路で構成されている。ホールセンサからの出力電圧は差動増幅回路により増幅され、コンパレータにより、ある基準電圧と比べられ、その大小により出力トランジスタの ON/OFF をしている。回路の単体駆動実験とユニットに搭載した実験を行なった。その結果、モータからのノイズが多かったが、センサとして使用できるレベルまでノイズを落とすことに成功した。また常温下で各ユニットの基準点からセンサまで距離 (パルス数) とそのばらつきについてさまざまな速度及び駆動電流で測定した。その結果、常温下での駆動速度として適切な値が得られた。レンズホイールにおいて、レンズの位置の再現性のばらつき実験を常温下で行なった。その結果、ばらつきの全範囲は $260\mu m$ の中におさまっており、星像の働きに直すと 3pix 分である。極低温下での駆動実験はレンズホイールのみ行ない、安定して動作させることのできる駆動電流を求めた。また駆動電流において、ラッチが効いていると思われる点からホールセンサを検知するところまでのステップ数とそのばらつきを求め、十分に小さな範囲に収まることを確認した。

今後は他のユニットでも冷却下での実験を行っていかなければならない。またシャッターでは新たにラッチ機構を設けなければならないことがわかったため、その開発を行う必要がある。

目次

1	イントロダクション	1
1.1	赤外線観測	1
1.2	赤外線観測装置	2
1.3	データキューブ	3
1.4	イメージスライサ	3
1.5	中間赤外線観測装置イメージスライサ搭載型分光器 MIRSIS	4
2	MIRSIS の光学系	6
2.1	前光学系	6
2.2	撮像系	7
2.3	スライサ系	8
2.4	分光系	8
3	MIRSIS の光学素子駆動系開発	10
3.1	MIRSIS の光学素子駆動の全体構成	10
3.1.1	基本構成	10
3.2	駆動部品	10
3.2.1	ステッピングモータ	10
	駆動原理	11
	分解能	11
	駆動方式	11
3.2.2	モータドライバ	12
	駆動電流	12
	カレントオフとカレントダウン	12
	入力信号方式	13
3.2.3	モータコントローラボード	13
	基本機能	14
	パルス出力	14
	ドライバ制御	14
	センサ入力	14
	駆動パラメータと加減速モード	15
3.2.4	リミットスイッチとホールセンサ	15
3.2.5	配線と回路	16
3.3	ホールセンサによるスイッチ回路の開発	17
3.3.1	ホール効果	17
3.3.2	基本特性	18
3.3.3	ホールセンサによるスイッチ回路の開発	19
	基本構成	19
	回路	19
	定電流回路	19
	差動増幅回路	21

定電圧回路	23
コンパレータ	23
出力	23
ノイズ対策	23
MIRSIS への応用	24
二つのホールセンサの使い方	25
3.4 入射平面鏡	26
3.5 シャッター	26
3.6 切替鏡	28
3.7 撮像フィルターホイール	28
3.8 レンズホイール	31
4 光学素子駆動制御プログラム	34
4.1 概要	34
4.2 デバイスドライバ	34
4.2.1 概要	34
4.2.2 基本知識	34
システムファイル	34
カーネル	34
PCI デバイス	34
システムコール	35
4.3 各ユニット共通プログラム群	35
4.3.1 プログラムの構成	35
4.3.2 モータコントローラボードの初期化	35
4.3.3 モータコントローラボードの各レジスタの情報の読み込みと標準出力	35
4.3.4 モータやセンサを動かすための値を書き込む	36
4.3.5 モータを動かす	38
4.3.6 モータの非常停止	38
4.3.7 カレントオフ	39
4.4 MySQL	40
4.5 各ユニットの駆動アプリケーション	42
5 駆動実験	44
5.1 目的	44
5.2 実験	44
5.2.1 常温下での動作確認/パルス数測定	45
可動平面鏡	46
シャッター	48
切替鏡	49
撮像フィルターホイール	50
レンズホイール	54
5.2.2 常温下でのラッチの動作確認	55
レンズホイール	55
5.2.3 常温下でのレンズホイールの再現性	57

5.2.4	極低温下での最小適正電流値測定	59
	レンズホイール	59
	切替鏡	61
5.2.5	極低温下でのラッチの確認	63
	レンズホイール	63
5.3	ラッチについての考察	65
6	まとめと今後の展望	66
6.1	まとめ	66
6.2	今後の展望	66

図目次

1	各波長帯	1
2	大気之窗 ([1] シリーズ現代の天文学 宇宙の観測 1 より引用	2
3	一般的な赤外線分光観測装置の概念図	2
4	データキューブ	3
5	イメージスライサの概念図	4
6	スリットを用いたデータキューブ	4
7	イメージスライサを用いたデータキューブ	4
8	MIRSIS の概念図	5
9	IRTF 入射光側	6
10	撮像系側	7
11	スライサ系	8
12	分光系スライサ側	9
13	分光系検出器側	9
14	MIRSIS 光学系における駆動系	10
15	光学素子駆動系の全体図 1	11
16	光学素子駆動系の全体図 2	12
17	ステッピングモータの構造	13
18	2 相ステッピングモータのコイル構成	13
19	電流調整	14
20	CW/CCW の波形	14
21	モータの CW と CCW	14
22	パルス波形 (参照 [15])	15
23	配線	16
24	ホール効果	17
25	Hall sensor	18
26	ホイートストン・ブリッジ	18
27	不平衡電圧	19
28	ブロック図	20
29	ホールセンサ回路図	20
30	ボード図	21
31	定電流電源回路	21
32	差動増幅回路	22
33	コンパレータ	23
34	出力回路 1	23
35	ツイスト線	24
36	入力端子直列回路	24
37	入力、出力端子の直列回路 (+,-)	25
38	入力、出力端子の直列回路 (-,-)	25
39	入力端子直列回路	25
40	FM1	26
41	シャッター	27

42	切替鏡	29
43	撮像フィルターホイールのホイール構成	29
44	撮像フィルターホイールユニット	30
45	撮像フィルターホイールユニットのラッチ機構の構成 1	30
46	撮像フィルターホイールユニットのラッチ機構の構成 2	31
47	撮像フィルターホイールユニットのラッチ機構の構成 3	31
48	レンズホイールユニット	32
49	レンズホイールの内側	32
50	レンズホイールフィルター部	32
51	レンズホイールユニットのラッチ機構	33
52	モータコントローラボード初期化フローチャート	36
53	各ステータスとコマンドの情報を読みと標準出力の取フローチャート	37
54	モータやセンサを動かすための値を書き込む	39
55	モータを動かす	40
56	モータの非常停止	41
57	カレントオフ機能	41
58	駆動系の MySQL の構造	42
59	各ユニットの駆動アプリケーション	43
60	FM1 tip FOR	46
61	FM1 tip REV	46
62	FM1 tilt FOR	47
63	FM1 tilt REV	47
64	shutter FOR	48
65	shutter REV	48
66	change mirror FOR	49
67	change mirror REV	49
68	Im filter 1-1	50
69	Im filter 1-2	50
70	Im filter 1-3	51
71	Im filter 1-4	51
72	Im filter 1-5	51
73	Im filter 2-1	52
74	Im filter 2-2	52
75	Im filter 2-3	52
76	Im filter 2-4	53
77	Im filter 2-5	53
78	lens	54
79	lens 0.5A nomal 30Hz	55
80	lens 0.7A nomal 15Hz	56
81	lens 0.7A nomal 20Hz	56
82	lens 0.7A nomal 30Hz	56
83	レンズと検出器の光軸のずれ	57
84	レンズホイールの再現性の試験概念図	57
85	レンズホイールの再現性の結果	57

86	lens cold 0.5A	59
87	lens cold 0.7A	60
88	change mirror cold 0.5A FOR	61
89	change mirror cold 0.5A REV	61
90	change mirror cold 0.7A FOR	62
91	change mirror cold 0.7A REV	62
92	lens 0.6A cold 20Hz	63
93	lens 0.7A cold 15Hz	63
94	lens 0.7A cold 20Hz	64
95	lens 0.7A cold 30Hz	64

表目次

1	MIRSIS の仕様 (Okamoto et al. 2006 引用)	5
2	半導体の電子移動度 (参考文献 [6])	18
3	駆動系とホールセンサ	25
4	行なった駆動実験	44
5	FM1 tip FOR data	46
6	FM1 tip REV data	46
7	FM1 tilt FOR data	47
8	FM1 tilt REV data	47
9	shutter FOR deta	48
10	shutter REV deta	48
11	change mirror FOR deta	49
12	change mirror REV deta	49
13	Im filter 1-1 data	50
14	Im filter 1-2 data	50
15	Im filter 1-3 data	51
16	Im filter 1-4 data	51
17	Im filter 1-5 data	51
18	Im filter 2-1 data	52
19	Im filter 2-2 data	52
20	Im filter 2-3 data	52
21	Im filter 2-4 data	53
22	Im filter 2-5 data	53
23	lens data	54
24	lens 0.5A nomal 30Hz data	55
25	lens 0.7A nomal 15Hz data	56
26	lens 0.7A nomal 20Hz data	56
27	lens 0.7A nomal 30Hz data	56
28	lens cold 0.5A data	59
29	lens cold 0.7A data	60
30	change mirror cold 0.5A FOR data	61
31	change mirror cold 0.5A REV data	61
32	change mirror cold 0.7A FOR data	62
33	change mirror cold 0.7A REV data	62
34	lens 0.6A cold 20Hz data	63
35	lens 0.7A cold 15Hz data	63
36	lens 0.7A cold 20Hz data	64
37	lens 0.7A cold 30Hz data	64

1 イン트로ダクション

1.1 赤外線観測

光とは電磁波と呼ばれる波動の一種で、さまざまな波長に分けることができ、それぞれの波長域で名前がついている。例えば我々が見ることができる領域を可視光といい、約 $300\text{nm} \sim 750\text{nm}$ 帯である (図 1 参照)。

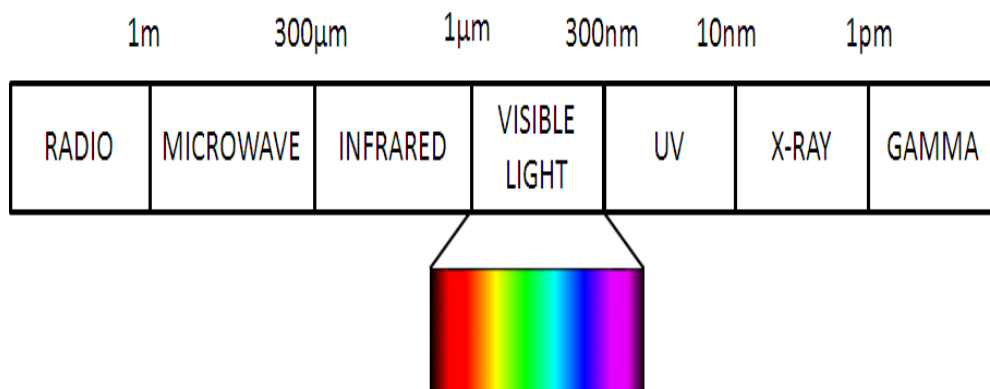


図 1 各波長帯

赤外線は波長が約 $1 \sim 300 \mu m$ の領域の電磁波である、赤外線の中でも波長 $1 \sim 3 \mu m$ を近赤外線、波長 $3 \sim 30 \mu m$ を中間赤外線、波長 $30 \sim 300 \mu m$ を遠赤外線と細かく分けることができる。大部分の天体からの放射は黒体放射に近似することができる。黒体放射の放射強度は Planck の法則より温度 $T[K]$ で式 1 表すことができる。

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (1)$$

ここで、 $B_{\lambda}(T)$ は単位面積、単位立体角、単位波長あたり放射されるエネルギー (放射強度) である。 h はプランク定数、 c は光速、 k は Boltzmann 定数、 T は黒体の温度である。この式から放射強度はある波長で極大値を持ち、その波長は Wien の変位式によって表される (式 2)。

$$\lambda_m \sim \frac{2900}{T} [\mu m] \quad (2)$$

この式から $300K$ の物体からの熱放射は波長約 $10\mu m$ であることがわかる。

赤外線観測 (約 $1 \sim 300 \mu m$ 帯) は他の波長域での観測との違いは下記のような特徴がある。

- 低温度の天体 (原始星) を調べるのに有効
- 可視光を遮る塵などによる減光の影響を受けにくいから透過性が高い
- 水素分子などが出す特徴的な光を観測可能
- 市街光の影響を受けにくい

などがあげられる。これらの特徴を活かした観測は宇宙をより深く理解する手段として用いられる。

赤外線観測を地上で行うにはいくつか難点があり、一つとして地球大気による天体からの電磁波の吸収・散乱の影響があげられる。一般的に大気による吸収・散乱はおもに大気を構成する気体分子 (窒素、酸素、二酸化炭素など) によるものと、大気を漂っている液体や個体の微粒子によるものである。赤外線波長域では主に水蒸気などの気体分子の振動回転遷移による吸収が存在し、吸収帯はいくつかの波長域に集中している。そのため、気体分子による吸収が少ない領域も存在し、それを「大気の窓」として天体観測に用いられる測光バ

ンドとしている。中間赤外線では $8 \sim 13\mu\text{m}$ の N バンドや $16 \sim 25\mu\text{m}$ の Q バンドが主に使われている領域である。(図 2 参照)

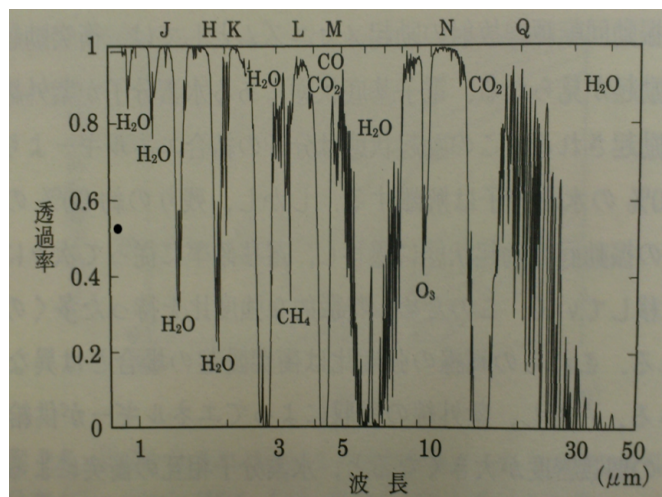


図 2 大気窓 ([1] シリーズ現代の天文学 宇宙の観測 1 より引用)

図は横軸に波長、縦軸に透過率を示している。観測において空間分解能は重要である。空間分解能とは観測するターゲットをどれだけ細かく見ることができるかという指標で、式 3 で表すことができる。

$$\text{空間分解能} = 1.22 \frac{\lambda}{D} [\text{rad}] \quad (3)$$

$\lambda[m]$ は波長、 $D[m]$ は望遠鏡の口径を示している。この式から得られた値は小さい方がより細かく見ことを示している。つまり短い波長で、かつ望遠鏡の口径が大きいもので観測することにより、空間分解能は向上する。

1.2 赤外線観測装置

この節では一般的に使用されている赤外線観測装置について述べる。図 3 は一般的な赤外線分光観測装置

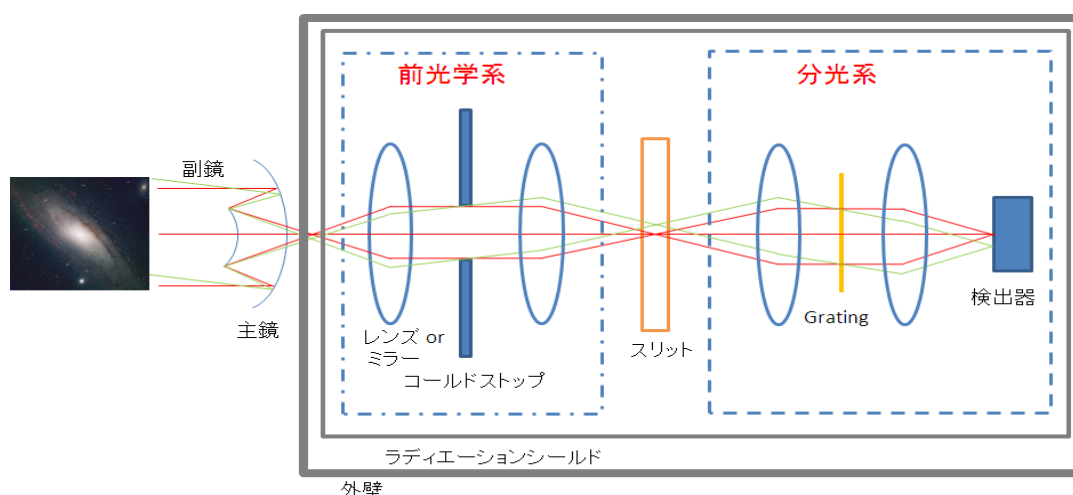


図 3 一般的な赤外線分光観測装置の概念図

の概念図である。観測装置は極低温に冷やすために真空容器中に構築する。また外部からの放射熱を防ぐために外壁の内側にラディエーションシールドがある。その内部は前光学系、スリット、分光系、検出器で構成されている。望遠鏡の主鏡に当たった光りは副鏡にあたり、装置内部に入ってくる。装置内部に入った光は

前光学系のコリメータレンズにより平行光になり、コールドストップを通る。コールドストップとは望遠鏡の副鏡に反射せずに装置内部に入ってきた光 (迷光) を後ろの光学系に入射させないための機構である。コールドストップを通った平行光は一度、カメラレンズによってスリット上で結像され、分光系に入射する。スリットを通った光のみが分光系へ入射される。分光系に入射した光は再度コリメータレンズによって平行光にされ、分散素子により分光される。そして、分光された平行光がカメラレンズによって結像され、その結像位置に検出器を置き、光を検出する。

1.3 データキューブ

分光観測によって得られたデータなどを扱う際にデータキューブを用いると理解しやすい。データキューブとは観測領域を X 軸 (スリット長編方向)、Y 軸として (スリットの短軸方向)、波長を Z 軸方向にとる (図 4 参照)。前節で説明したスリット型分光の場合はスリットを通ることにより一部の観測領域からしかデータを得ることができなかった。その様子を示したのが図 4 で、黄色い幅がスリットを通して得られてデータである。このようにスリット型分光器はスリットを通った観測領域の全波長を取得することができ、限られた箇所の分光には向いている。しかし、広がった天体などを観測するにはスリットの短軸方向に望遠鏡の指す向きをずらしてデータを繰り返すことが必要で多くの観測時間がかかってしまう。

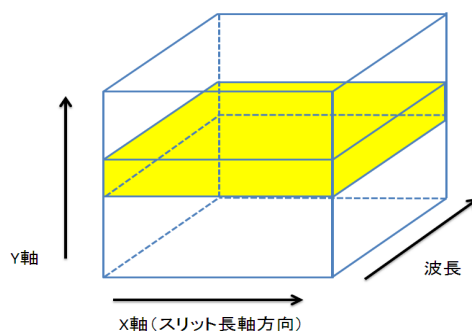


図 4 データキューブ

1.4 イメージスライサ

1.3 でも述べたように分光観測を行う際は焦点面上の天体像にスリットをあてて分光器に入射させる。天体像の大きさは望遠鏡、観測装置の光学系の光学性能、地球大気のゆらぎによる像の劣化で決まるが、天体像より狭いスリットを用いる場合には、スリットからはみ出た光を利用することができない。もしすべての光を利用できればデータの S/N 比が向上する。S/N 比とは信号とノイズの比 (Signal/Noise) のことで、信号検出の質を表す指標として用いられる。そこで、天体像を一度に分光するための技術としてイメージスライサがある。図 5 がイメージスライサ型分光器の原理である。1.3 で述べたスリット分光との違いはスリットの代わりにスライシングミラーを置いたことである。スライシングミラーとは、僅かに角度の異なる反射スリットの集合体のことを示す。天体からの光はスライシングミラー上で一度結像され、角度の異なるミラー面により短冊状に分けて異なる方向へ反射させる。それぞれ反射した光は瞳ミラーによって擬スリットミラー上で再び再結像する。瞳ミラーはスライシングミラーによって反射した光を擬スリットミラー上で一列に並べる役割をして、瞳となる光路上に置かれる。また擬スリットミラーは瞳ミラーからの光を揃えて分光系に入射させるための平面鏡である。擬スリットミラーを反射した光は一列に並んでいるので分光系からみるとあたかもスリットを通してきたかのように見える。これがデータキューブで 1.3 のスリット型と比較する。

1.3 で説明したスリット型の分光器のデータキューブでは一度に天体像のある限られた領域のみデータを得ることができた (図 6)。一方イメージスライサを用いた場合、一度に天体像全体のデータを得ることができ

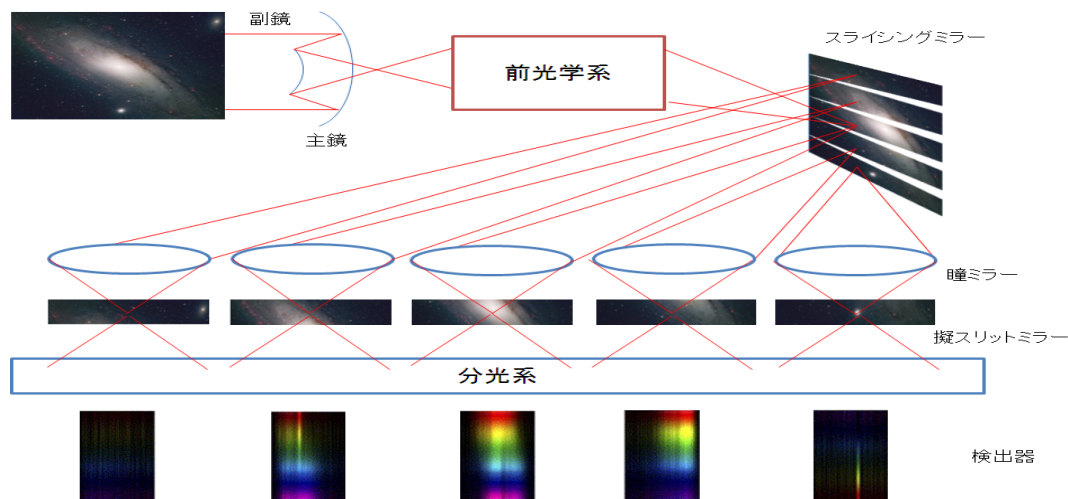


図5 イメージスライサの概念図

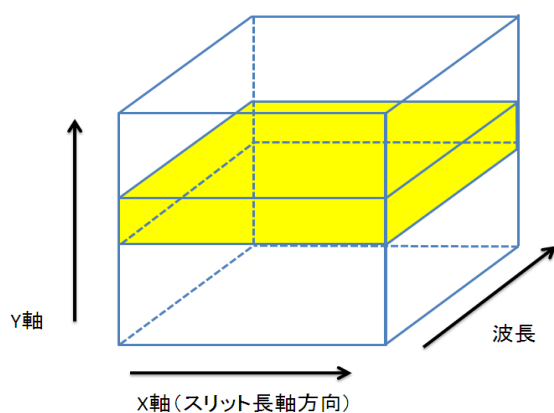


図6 スリットを用いたデータキューブ

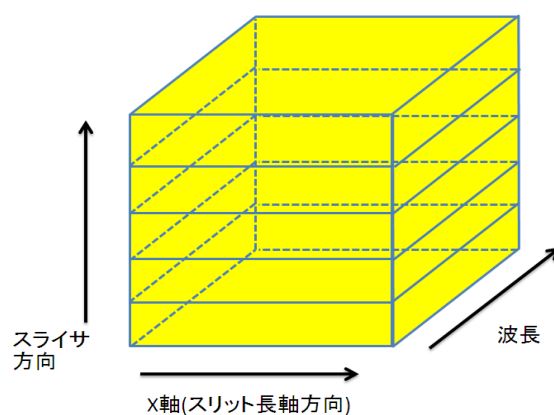


図7 イメージスライサを用いたデータキューブ

た(図7)。この技術を用いることで、スリットより大きい天体像の面分光を可能にする。またスライシングミラーを用いることで一度に天体の波長分散の観測を行えることで、観測効率が向上する。また、点源の分光観測において天体像をスリット上に入れる労力の改善が期待できる。

1.5 中間赤外線観測装置イメージスライサ搭載型分光器 MIRSIS

近年、望遠鏡の巨大化が進んできて、口径 8m のすばる望遠鏡や次世代の口径 30m の超大型望遠鏡 TMT(Thirty Meter Telescope) などの開発が進んでいる。しかし、巨大望遠鏡は世界的に数が少ない。そのためこれらの望遠鏡を多くのユーザが使うには観測効率の向上が必要不可欠になってくる。だからイメージスライサの技術は今後の観測効率をあげるために必要な技術である。そこで茨城大学、宇宙航空研究開発機構、国立天文台、東京大学では中間赤外線観測装置イメージスライサ搭載型分光器 (Mid-InfraRed Spectrometer with an Image Slicer(MIRSIS)) を共同開発している。MIRSIS は観測向上を目指したイメージスライサ型分光器のプロトタイプとして開発が進められている。またこの装置を用いた試験観測によって観測とデータ解析の手法を確立するのが目的である。MIRSIS の観測領域は $8\mu\text{m}\sim 13.5\mu\text{m}$ で、撮像と分光の二つのモードを兼ね備えている。装置の完成後は広島のかなた望遠鏡、ハワイ・マウナケア山の IRTF 望遠鏡、すばる望遠鏡での試験観測が予定されている。図8はMIRSISの概念図である。

MIRSIS の大きさは $65\text{cm} \times 51\text{cm} \times 32\text{cm}$ で、前光学系、スライサ系、撮像系、分光系の4つに分けることができる。これらの詳しい内容を2章で説明する。最後にこの装置の仕様を表1に示す。

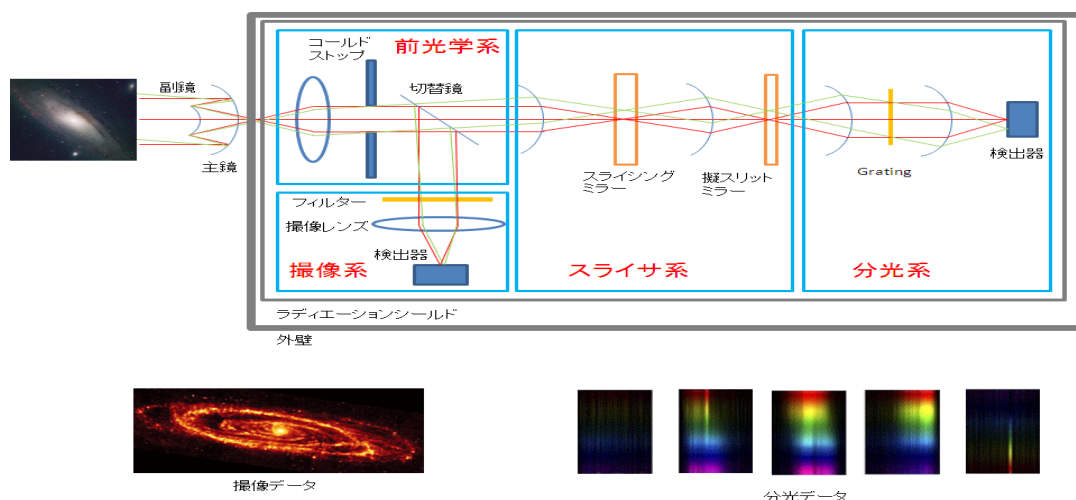


図 8 MIRSIS の概念図

MIRSIS について	
観測波長	$8\mu m \sim 13.5\mu m$
観測モード	撮像モード、分光モード
真空容器サイズ	$65cm \times 51cm \times 32cm$
光学系サイズ	$57cm \times 43cm \times 29cm$
冷却系	GN 冷凍機を使用・4K まで冷却可能
	検出器:6K
	光学系:30K
	radiation shield:40K
撮像系	
フィルター	7 枚
視野	$40'' \times 40''$
ピクセルスケール	$0.31''/pix(@IRTF)$
スペクトル分解能	$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 10$
最終 F 値	16.5
検出器	Si:As 128×128 Array
分光系	
スライシングミラー	5 枚
視野	$22'' \times 4.5''(@IRTF)$
ピクセルスケール	$0.45''/pix(@IRTF), 0.2''/pix(@すばる)$
スペクトル分解能	$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 200$
最終 F 値	7.7
検出器	Si:As 320×240 Array

表 1 MIRSIS の仕様 (Okamoto et al. 2006 引用)

2 MIRSIS の光学系

この章では MIRSIS の光学系について述べる。MIRSIS の光学系は大きく分けて、前光学系、撮像系、スライサ系、分光系に分けることができる ([2]kamoto et al.2006,[3]2009 年度富田皓一修論参照)。使用する光学系部品は反射鏡 17 枚、レンズ 3 枚、フィルター 7 枚 + 遮蔽板 1 枚、grating(回折格子)である。これらは T 字型の光学定盤上に配置する。次節から各パートごとに機能、構成、他との相互作用について詳細にまとめていく。また、以下で述べていくことは IRTF 搭載時の光学系で、すばる・かなた望遠鏡搭載時は前光学系の一部を置換して使用する。

2.1 前光学系

前光学系は望遠鏡に当たった観測光が始めに入ってくるパートである。前光学系には光軸調整を行う可動平面鏡、ダークを測定するためのシャッター、迷光の除去のためのコールドストップ、モードの切り替えを行う切替鏡、が設置されている。撮像系に観測光を導入する場合、光路上に切替鏡を配置する。MIRSIS の撮像系は天体の撮像を行うもので、分光観測を行う際の補足役として使用される。前光学系は入射方向から、入射窓、入射可動平面鏡 (FM1(Flat Mirror))、4 個の固定平面鏡 (FM2,FM3,FM4,FM5)、光学系コリメータレンズ (FCOL(Flont Colimater))、シャッター、N バンドフィルター、コールドストップ、切替鏡、2 個の曲面鏡 (前光学系カメラミラー 1(FCAM1(Flont Camera))、前光学系カメラミラー 2(FCAM2)) で構成されている図 9、図 10 参照)。

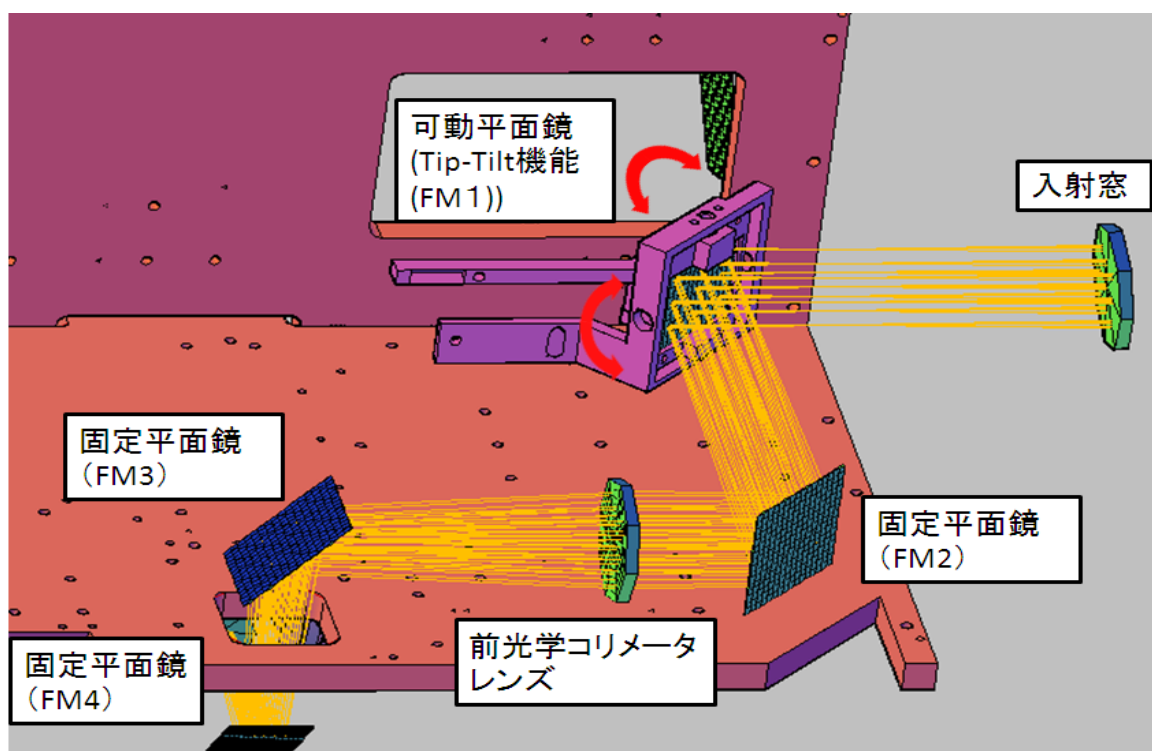


図 9 IRTF 入射光側

これらの機能について望遠鏡に近い方から説明していく。入射窓はゲルマニウムで出来ている。この波長透過領域は約 $1.8\mu\text{m}$ ~ $15\mu\text{m}$ (透過率 50% 越え)である (参照 [5]Physical Properties and Date of optical Materials)。装置内部に入射した光は可動平面鏡 (FM1) にあたる。FM1 は光軸を調整するための機構である。FM1 にあたる観測光は固定平面鏡 (FM2) にあたり、前光学系コリメータレンズ (FCOL) を通って平行光になる。平行になった光は 2 個の固定平面鏡 (FM3,FM4) によって反射された後、シャッターユニット

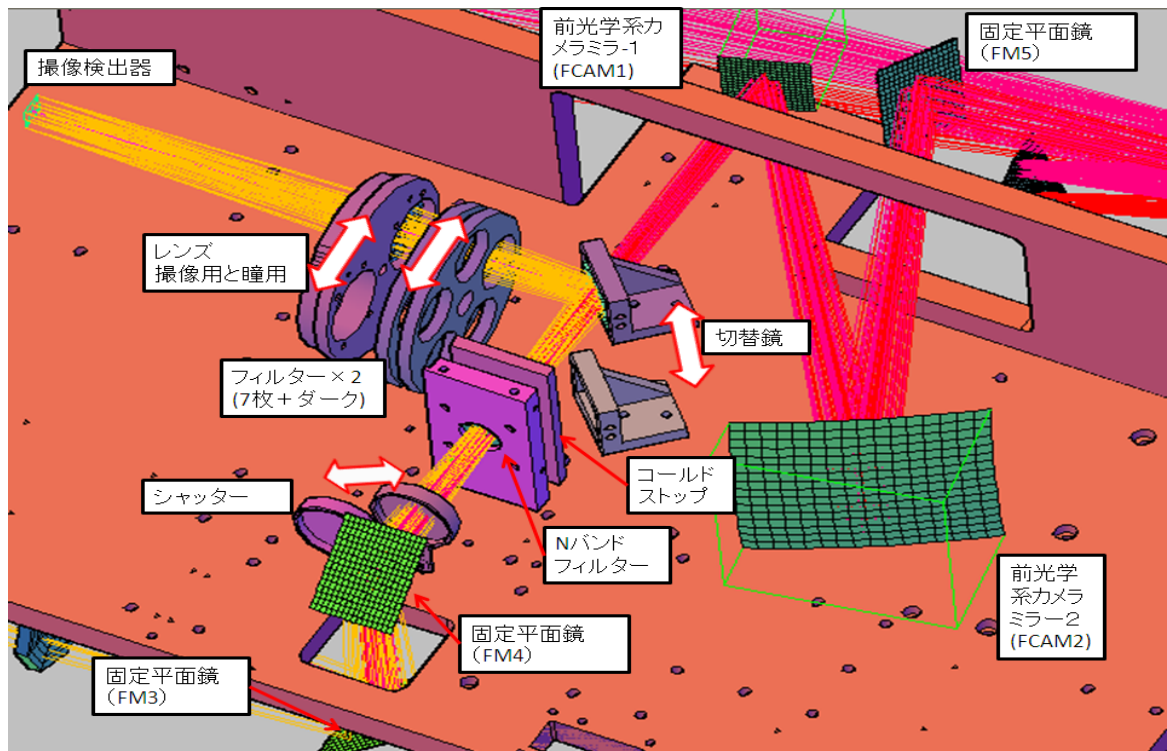


図 10 撮像系側

へ入る。シャッターはダークを測定するための機構である。またシャッターユニットには N バンドフィルターとコールドストップも搭載されており、シャッター、N バンドフィルター、コールドストップの順で観測光が通る。MIRSIS で使用される N バンドフィルターの波長透過領域は $7.4\mu\text{m}\sim 13.4\mu\text{m}$ である。N バンドフィルターの後にコールドストップがあり、ここで迷光は除去される。コールドストップを通った後は観測モードを切り替えるための切替鏡がある。切替鏡には平面鏡が搭載されており、光路上にこの平面鏡を置くことで撮像系へ導き、光路から除くと、スライサ系へと導かれる。光路上に切替鏡を配置していない状態で切替鏡を通った平行光の観測光は二つの曲面鏡 (FCAM1、FCAM2) によってスライシングミラー上で結像される。前光学系カメラミラー 1(FCAM1) は凸面鏡、前光学系カメラミラー 2(FCAM2) は凹面鏡でそれぞれ曲率が異なる。曲面鏡に当たった光は固定平面鏡 (FM5) で折り曲げられ、スライサ系 (スライシングミラー) へ導かれる。

2.2 撮像系

撮像系には特定の波長を通すためのフィルターを 5 枚搭載可能なフィルターホイール 2 枚、撮像用のカメラレンズ 2 枚が収まっているレンズホイール 1、固定平面鏡 (FMI(Flat Mirror Imaging))、撮像用の検出器 (Si:As BIB 128×128 array) で構成されている。撮像フィルターは全部で 8 枚あり、撮像用フィルター 7 枚とダーク用 1 枚である。撮像用レンズには観測用レンズ、光軸調整のための瞳用レンズがある (図 10 参照)。切替鏡によって折り曲げられた観測光は撮像系に導入される。まず撮像フィルターに入り、細かい波長域に分けられる。フィルターは適宜交換することができる。撮像フィルターを通った後は撮像用カメラレンズを通る。撮像用カメラレンズには撮像用と瞳用のレンズがあり、これらは焦点距離が違う。撮像用カメラレンズを通った観測光は検出器上で結像させられる。一方、瞳用カメラレンズを通った観測光は検出器上で瞳ができる。瞳とは望遠鏡の副鏡であり、検出器上で瞳が蹴られる場合は光軸がずれていることを示す。瞳用レンズは観測装置を取り付けた際に、最初に使用するものである。撮像系カメラレンズを通った観測光は FMI によって曲げられ撮像用検出器に入る。

2.3 スライサ系

スライサ系は 1.4 節で説明したスライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーが搭載された光学的機能をもった機構である。スライサ系に観測光を導入する場合は光軸上の切替鏡を取り除く必要がある。スライサ系はスライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーが設置されている。(参照図 11)

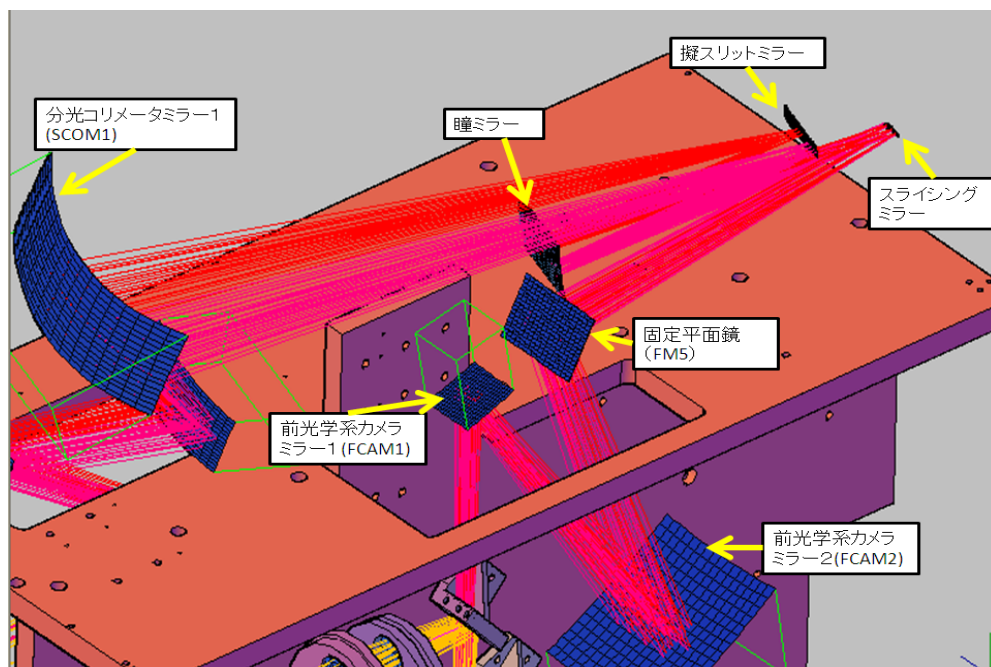


図 11 スライサ系

切替鏡に反射しなかった観測光は FCAM1, FCAM2 によってスライシングミラー上で結像される。1 枚のスライシングミラーは幅 $300\mu\text{m}$ 、長編方向 14mm (実際に使用する範囲は 7.5mm) であり、これらを 5 枚使用する。またそれぞれ 3 度ずつずれている (参考文献 [4] Okamoto et al 2008)。

2.4 分光系

分光系はスライサ系を通った後に観測光が導入される機構である。分光系は分散素子によって分光され、検出器でデータを取得する。分光系は 3 枚の曲面鏡 (分光コリメータミラー 1(SCOL1(Spectol-Colimator)) 分光コリメータミラー 2(SCOL2), 分光カメラトロイダル鏡、2 枚の固定平面鏡 (FM6, FM7)、Grating(回折格子)、Si:As IBC 320×240 array 分光用検出器が設置されている。(参照図 12, 図 13)

スライサ系を通過してきた観測光はあたかも一本のスリットを通過してきたかのように見え、その観測光は二つの曲面鏡 (SCOL1, SCOL2) により再度平行光となる。SCOL1 が凹面鏡で、SCOL2 が凸面鏡で、それぞれ曲率が異なる。平行光になった観測光は固定平面鏡 (FM6) に反射して、Grating(分散素子) に入る。ここで光は各波長ごとに分けれる。その後、固定平面鏡 (FM7) で反射した光は分光カメラトロイダル鏡によって分光検出器上で結像させられる。

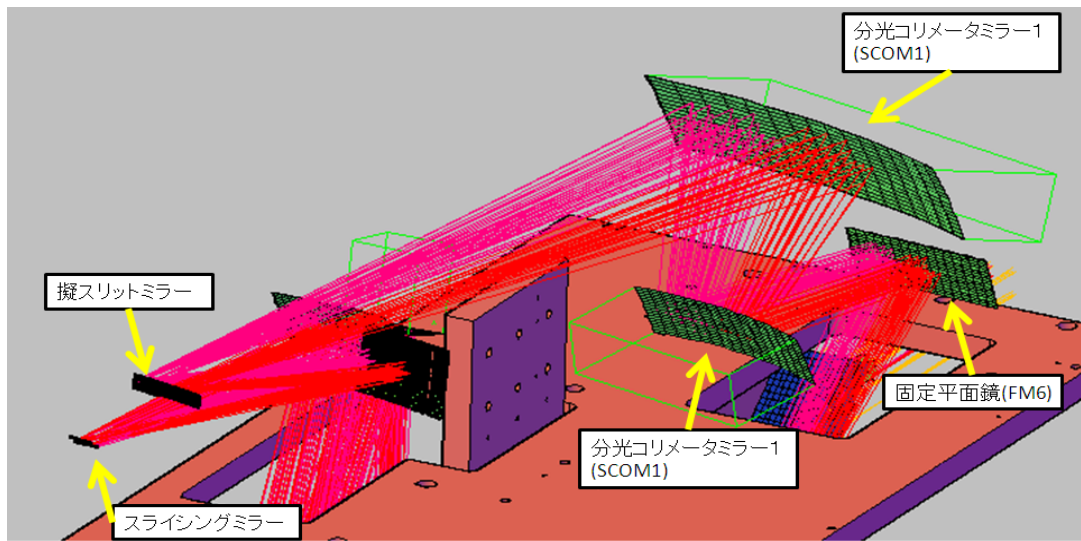


図 12 分光系スライサ側

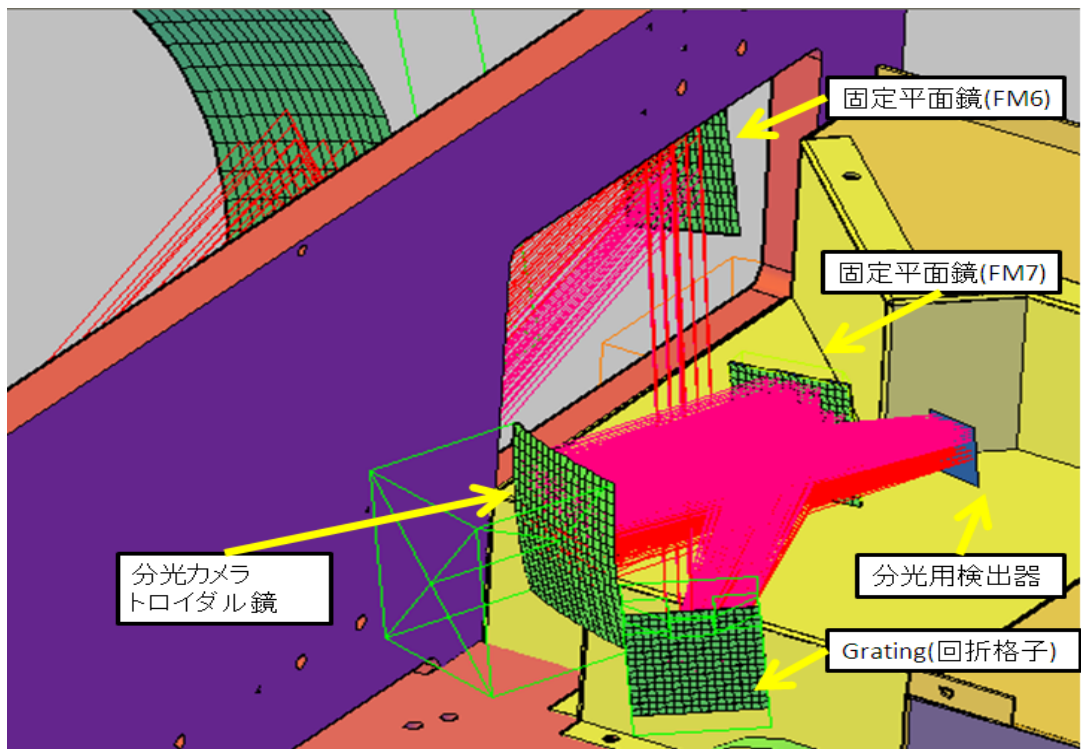


図 13 分光系検出器側

3 MIRSIS の光学素子駆動系開発

MIRSIS の光学系の中で動かすものは可動平面鏡 (FM1)、シャッター、撮像フィルター、撮像用レンズ、切替鏡であり、全体で光学素子駆動系という。この章では駆動させるための各部品の紹介や各ユニットの機能について述べる。また本研究で行なった撮像フィルターのラッチ機構開発、位置検出のためのホールセンサを用いたスイッチ回路の開発についても述べる。

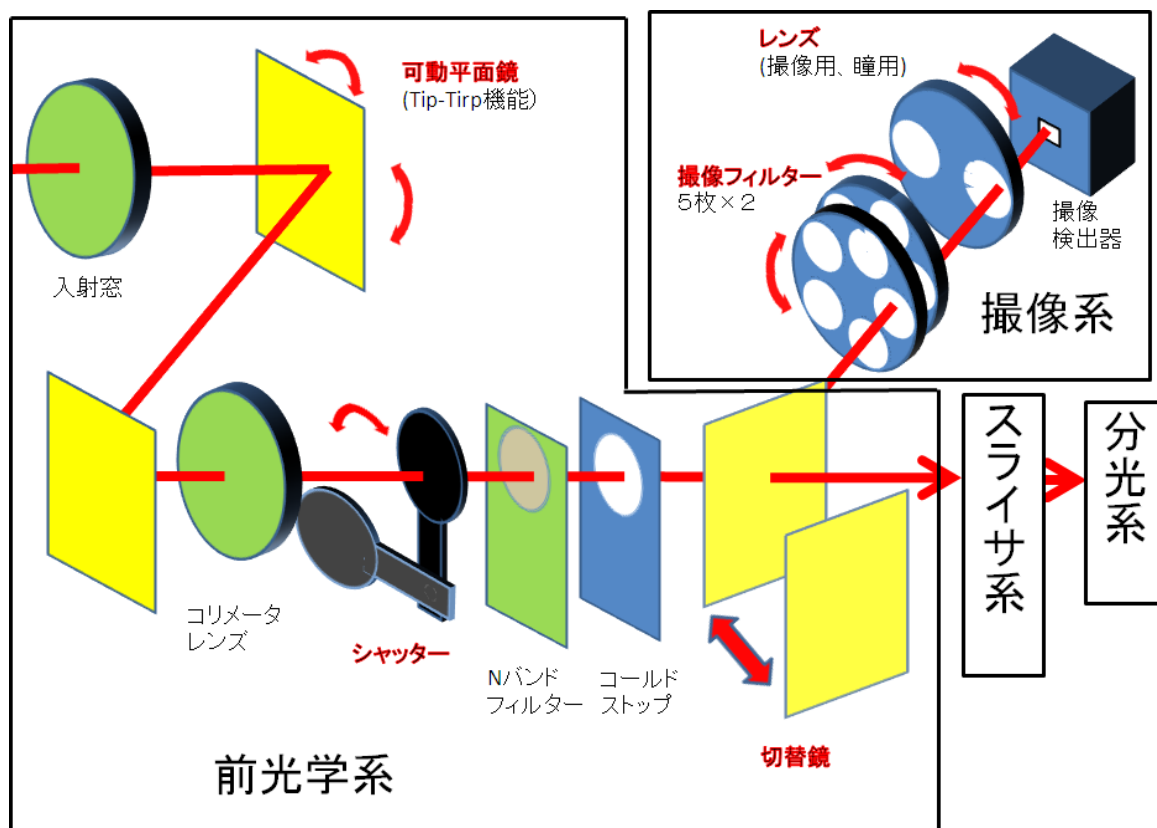


図 14 MIRSIS 光学系における駆動系

3.1 MIRSIS の光学素子駆動の全体構成

3.1.1 基本構成

MIRSIS の光学素子駆動系の構成は光学素子駆動系ユニット、ステッピングモータ、モータドライバ、モータコントローラボード、センサ (リミットスイッチまたはホールセンサ)、PC で構成されている (参照図 15)。PC に搭載されている 2 枚のモータドライバ制御用のモータコントローラボードが制御用 PC から命令信号を受け取り、それに基づいた励磁信号を発生させ、各モータドライバに送る。信号を受けとったモータドライバは真空容器冷却下に設置された光学素子駆動ユニットの各モータに電流を流し、モータを回転させ、光学素子駆動ユニットを制御する。またセンサからの信号をモータコントローラボードが受け取り、励磁信号を発生させ、モータドライバに送ることもできる。図 16 は光学素子駆動系の全体構成の詳細図である。

3.2 駆動部品

3.2.1 ステッピングモータ

MIRSIS では光学素子駆動ユニットを駆動するためにステッピングモータを使用している。ステッピングモータとは 1 パルスにつき、ある一定の角度動くモータのことである。MIRSIS で使用するステッピングモータ

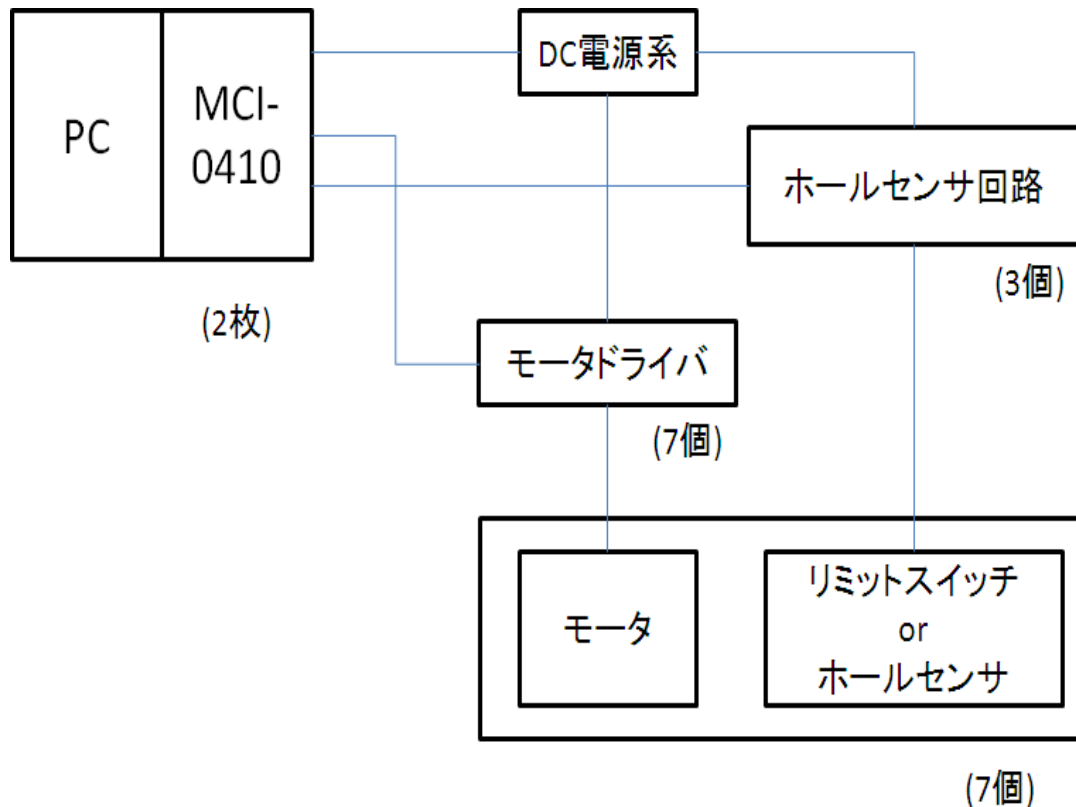


図 15 光学素子駆動系の全体図 1

タは Phytron 社の VSS(Vakuum-Schrittmotoren Serie)-UHVC(Ultra High Vacuum Cryo)Stepper Motors(ステップ数 200/回転、駆動可能温度域 -270° から 40°) である。

■駆動原理 基本的なステッピングモータの構造は図 17 のようになっている。中心にロータ (回転子) がとりつけてあり、その周りに固定コイル (固定子) が取り付けられている。図 17 は 2 種類の固定コイル (これを 2 相という) がついている。これは今回使用するステッピングモータが 2 種類の固定コイルを使用しているためである。固定コイルに電流が流れると固定コイルは電磁誘導によって励磁する。これによりロータは固定コイルから引力または斥力を受ける。次に現在の固定コイルに電流を流すのをやめ、となりの固定コイルに電流を流す。すると、固定コイルとロータとの間で決められた角度 (ステップ角) 動く。同様に、順々に固定コイルに電流を流すことによりロータを連続的に回すことができる。今回使用するステッピングモータは 1 回転に 200 ステップ角必要となる。よって 1 ステップ角は $360^{\circ}/200 = 1.8^{\circ}$ となる。

■分解能 2 相ステッピングモータには基本ステップ角で動くフルステップ方式 (1 励磁方式、2 励磁方式) と基本ステップ角の半分で動くハーフステップ方式 (1-2 励磁方式) がある。ハーフステップ方式はフルステップ方式に比べ、回転が滑らかになり、回転時の振動も小さくなる。また初速度が小さいパルスではハーフステップ方式の方がトルクが大きい。そこで MIRSIS では基本ハーフステップ方式を使用する。ステップ角は $1.8^{\circ}/2 = 0.9^{\circ}$ で、一周 400 パルスになる。

■駆動方式 固定コイルに電流を流すときに電源からコイルへの配線が必要になる。ステッピングモータではバイポーラ駆動方式とユニポーラ駆動方式があるが、MIRSIS ではバイポーラ駆動方式を使用している。バイポーラ駆動方式とは図 18 のように 1 種類の固定コイルに対して 1 本の巻線を使い、電流の向きによって電極の向きを変更することである。また対の固定コイルの巻線は電流を流した際に、磁極が逆転するように巻いてある。

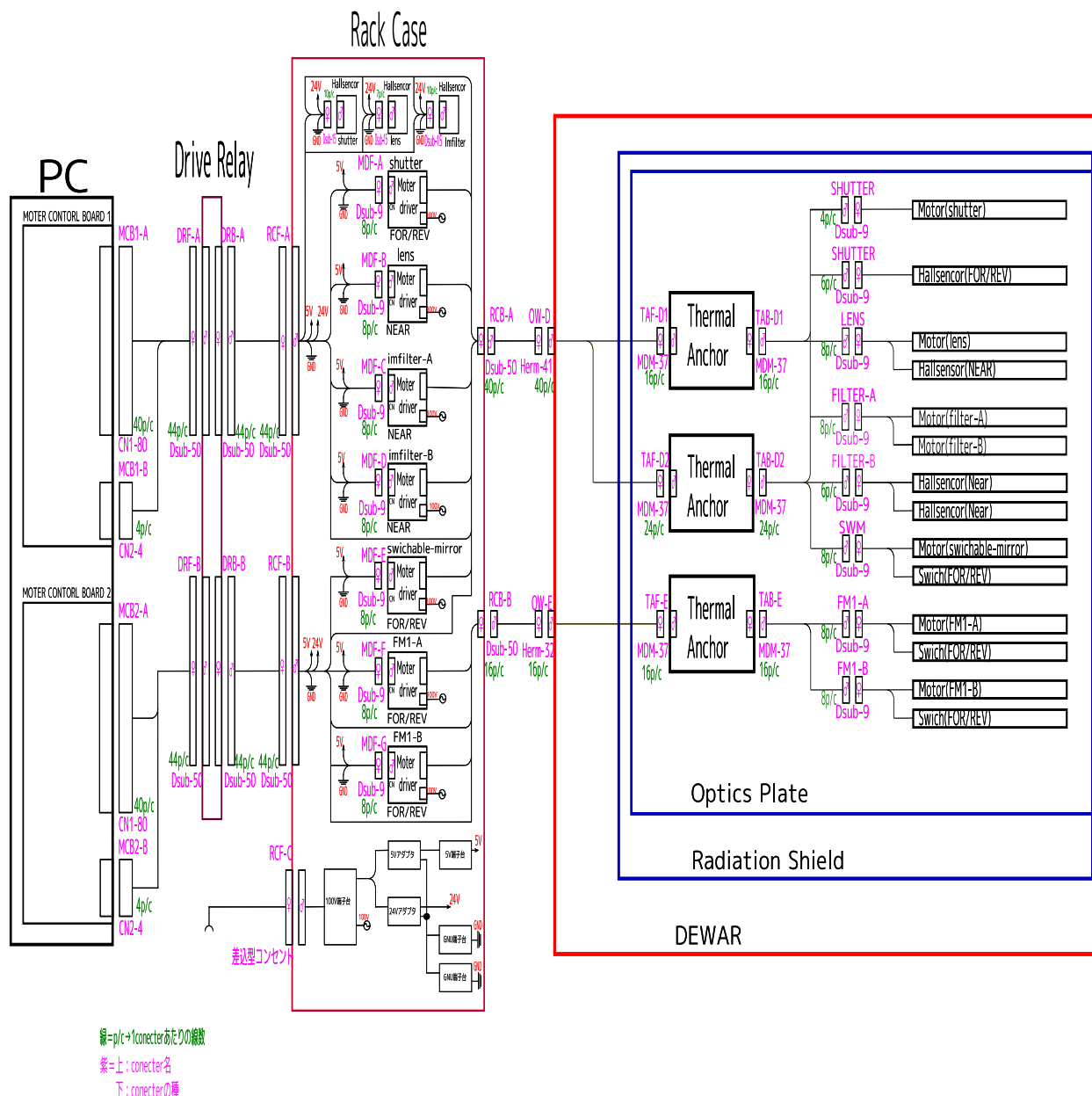


図 16 光学素子駆動系の全体図 2

3.2.2 モータドライバ

モータドライバはステッピングモータの固定コイルに駆動パルス (駆動電流) を流す機器である。MIRSIS で使用するモータコントローラボードはマイコム株式会社の 2 相ステッピングモータ用ドライバ IMS20-210 を使用する。(マイコム株式会社の 2 相ステッピングモータ用ドライバ IMS20-210 の取扱説明書を参照)

■**駆動電流** 今回使用するモータドライバはモータを駆動させるための電流 (駆動電流) を調整することができる (図 19 参照)。最大 2.0A である。赤外線観測装置は極低温に冷やさなければならず、発熱を嫌う。そのため、光学素子駆動ユニットを動かす際は極力電流を小さくしなければならない。それぞれの電流値については第 5 章で述べる。

■**カレントオフとカレントダウン** モータが停止時、モータに電流を自動的に流さない状態をカレントオフといい、電流を通常の数パーセントにすることをカレントダウンという。MIRSIS ではカレントオフとカレントダウン機能を使用している。モータとモータドライバが電氣的に繋がっている状態の時、モータを駆動させるための電流を送ってなくてもモータには電流が流れている。これはモータを静止させるためである。

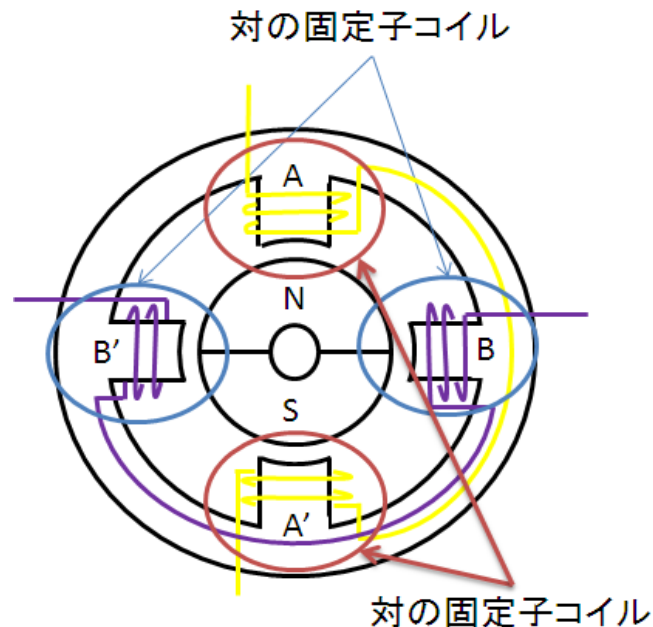


図 17 ステッピングモータの構造

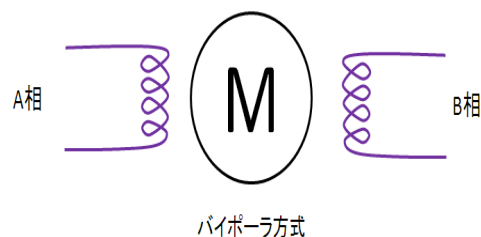


図 18 2相ステッピングモータのコイル構成

しかし、電流が流れることによりモータで発熱してしまう。そこでカレントオフを使用する。IMS20-210 ではドライバ内の温度が上昇し、オーバーヒート状態になったときに、自動的にカレントオフ機能が働く。またボードからの信号によって意図的にオフすることも可能である。カレントダウンはモータ停止 0.2 秒後にモータ電流値を通常の約 50% まで自動的に下げる。

■入力信号方式 ステッピングモータにパルスを送る方法は 2 種類あり、2 パルス方式と 1 パルス方式がある。MIRSIS では 2 パルス方式を採用している (図 20 参照)。2 パルス方式は CW(Clock Wise) と CCW(Caunter Clock Wise) の 2 種類の入力部があり、時計回りと反時計回りに動かすことができる。また 1 パルス方式は一方の入力部にパルス信号を入力し、もう一方で回転方向を切り替える方法である。基本的に CW は出力軸側からみて時計回りで、CCW は出力軸側からみて反時計回りである (図 21 参照)。また入力信号のパルスには制限がある。IMS20-210 は図 22 のような波形をもつ。ここから最大出力周波数を求めると約 1.5kHz になる。詳しい計算方法は服部保人卒業論文を参照すること。

3.2.3 モータコントローラボード

モータコントローラボードはモータドライバに励磁信号を送ったり、スイッチからの信号を受信することができる。MIRSIS で使用するモータコントローラボードはマイコム株式会社の PCI バス対応 4 軸コントローラボード MCI-0410 である。アドレスデータや制御信号を受け取ることができる PCI コントローラ FPGA に信号を送ると、モータコントローラボードの中心核でもあるマイコムパルスジェネレータ MPG2031 に命令信号を送ることができ、励磁信号を発生させることができる。(PCI バス対応 4 軸コントローラボード



図 19 電流調整

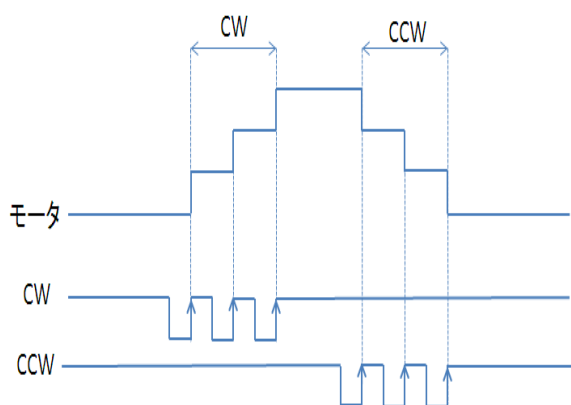


図 20 CW/CCW の波形

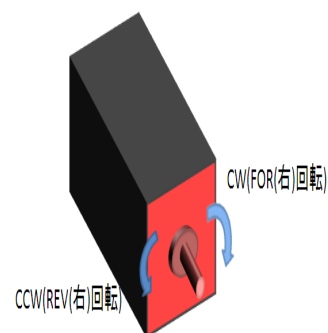


図 21 モータの CW と CCW

MCI-0410 の取扱説明書と MPG2031 2 軸超高速パルスジェネレータ LSI の取扱説明書を参照)

■**基本機能** 使用するモータコントローラボードは 4 軸対応なので一度に 4 つのモータを制御することができる。MIRSIS で使用するステッピングモータの数は全部で 7 つある。そのため今回使用するボードは 2 枚である。基準クロックは 3.2768MHz でこの値は後のプログラムで使用する。

■**パルス出力** コントローラボード MCI-0410 はフォトカップラ・オープンコレクタ出力を使用している。また出力パルス形式はモータドライバと合わせるために 2 パルス方式を採用している。小節 3.2.2 で CW は出力軸側からみて時計回りとしたが、場合により CW の回転方向を反対にすることができる。MIRSIS では常に CW は出力軸側からみて時計回りにしているので変更する必要はない。

■**ドライバ制御** モータドライバ IMS20-210 にはカレントオフ機能が搭載されていたがこの機能を意図的に働かせることができる。モータに保持トルクを働かすと必ず発熱が生じてしまう。そのため、光学素子駆動ユニットが指定の場所に動いたら電流をオフにする必要がある。しかし、流さないことにより光学素子駆動ユニットを固定する力が弱くなる。これを防ぐために停止後に動きが許されないユニットにはラッチ機構を搭載している。ラッチ機構については各ユニットの節で紹介する。

■**センサ入力** 光学素子駆動ユニットを極低温下で制御するためにセンサを使用する。センサは全部で 4 つあり、大きく分けて 3 つに分類され、両端オーバーランセンサ、原点サーチ、汎用入力端子である。両端オー

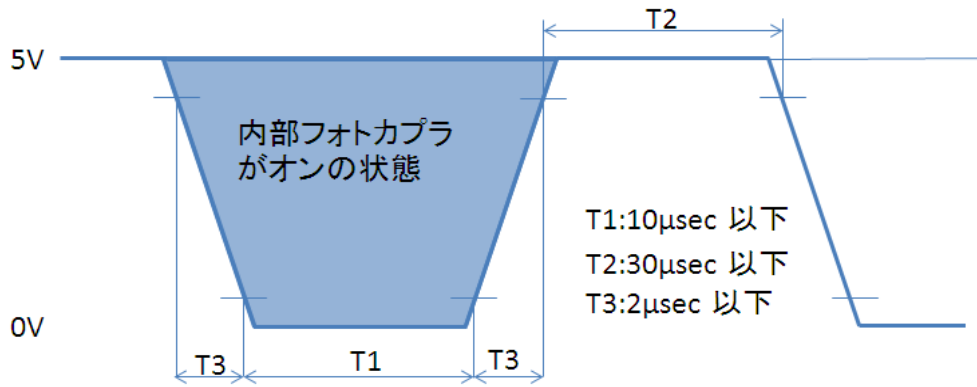


図 22 パルス波形 (参照 [15])

バランスセンサは可動範囲が有限な値をもつユニットに使用する。このセンサ機能はモータが右回転したときのみ有効なフォワードオーバーラン入力端子と左回転したときのみ有効なリバースオーバーラン入力端子がある。またこの入力端子が切り替わるとモータは即時停止する。原点サーチはホイールのような回転系のユニットに使われる。原点サーチには 3 種類のモードがあり、MIRSIS では即時停止を使用する。他のモードについては MPF2031 の取扱説明書を参照すること。汎用入力端子は端子に電流が流れているか流れていないかを随時観察し、その切り替わりをセンサの役割として使用する。MIRSIS では主に両端オーバーランセンサと原点サーチ機能を使ったセンサを使用する。汎用入力端子は随時切り替わりを観察する必要があり、かつ自動では停止しないため MIRSIS では使用しない。

■**駆動パラメータと加減速モード** モータを動かすための基本的なパラメータは 4 つある。

- 自起動速度
- 最高速度
- 加減速度
- 総パルス数

自起動速度はモータが動き始めるときの速度である。最高速度はモータが最も速く動かすことができる速度である。加減速度は 1 秒あたりにどれだけの速度を加速または減速するパラメータである。総パルス数はどれだけモータを回転させるかを定めるパラメータである。加減速の形状には 2 種類あり、台形型と任意形状型がある。任意形状型はサイクロ曲線や放物線をはじめとする複雑な動きを可能にする。しかし、MIRSIS では複雑な動きは行わないために台形型を使用している。

3.2.4 リミットスイッチとホールセンサ

リミットスイッチは各光学素子駆動ユニットの位置を把握するためや可動範囲を超えないために使用する。各ユニットの位置を把握するためにはリミットスイッチがある場所を基準点とし、そこからのパルス数と動いた位置関係を事前に測定しておくことにより、極低温下で駆動しても位置を把握することができる。使用するリミットスイッチはオムロン株式会社の極超小形基本スイッチ形 D2F-L3-D3 を使用する。リミットスイッチには 3 つの端子 COM, NO, NC の 3 つがあり、COM は基本的に GND に継ぎ、もう一方を NO または NC に繋ぐ。NO と NC の違いは、スイッチを押していない状態で導通しているかしていないかである。NC に繋ぐとスイッチを押していない状態で内部は導通し、スイッチを押すと導通する。NO はその逆である。光学素子駆動ユニットはそれぞれ違う特性を持っているため、リミットスイッチの繋ぎ方は各ユニットによって考える必要がある。しかし光学素子駆動で使用するリミットスイッチはすべて COM と NO の組み合わせで使われている。詳細については各ユニットの説明で述べる。

リミットスイッチを押す際に必要とされる力は 1.47N である。リミットスイッチを搭載するユニットはこの数値以上の力を発揮するモータを使用しなければならないが、この力をだすことができないユニット (シャッターユニット) やリミットスイッチの再現性不良があったユニット (撮像フィルターホイールユニット、レンズホイールユニット) についてはホールセンサを利用したスイッチを用いる。これについては 3.3.1 で述べる。

3.2.5 配線と回路

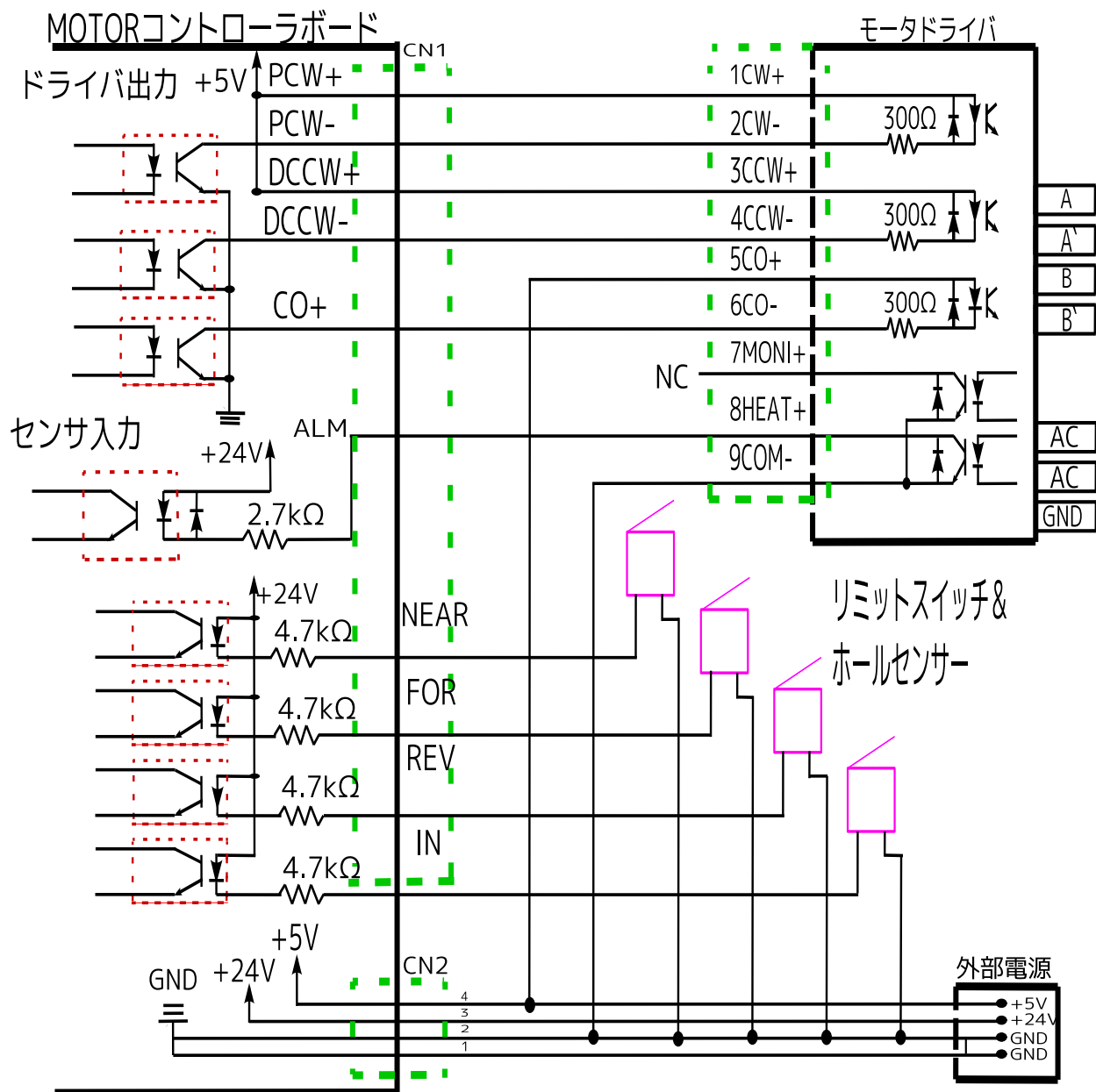


図 23 配線

図 23 に光学素子駆動系のモータコントローラボードとモータドライバの接続を示す。またモータドライバやモータコントローラボードの内部に描かれている↑の電圧と GND は内部で同じ値部と結合していることを示す。

モータドライバの接続先はモータコントローラボードとモータと 100V 電源の 3 箇所である。図 23 では CN と描かれた緑の点線部がモータコントローラボードと結合するためのコネクタで、A, A', B, B' 部がモータと結合する箇所、AC, GND 部が外部の 100V 電源と結合する。モータコントローラボードはモータドライバやセンサと接続する CN1 コネクタと外部電源と接続する CN2 コネクタがある。図 23 では緑の点線で

囲まれた部分がコネクタ部である。

モータコントローラボードはフォトカプラ形式になっている。フォトカプラとは光を利用して電気信号を伝達する素子のことである。つまり PC から送られてきた電流がダイオードを光らせ、その光でフォトトランジスタを導通させる。フォトカプラ形式の利点として入出力間を電氣的に絶縁分離することが可能なので、ノイズによる誤作動が起きにくい。また一方方向の伝送なので電子部品の破損が少ない。

モータコントローラボード (MCI-0410) はフォトカプラ形式のようにジャンパで設定してある。モータドライバ (IMS20-210(L)) の入力もフォトカプラ形式である。またモータドライバに異常が発生したら信号を発生させ、モータコントローラボード側へ信号を伝える。

モータコントローラボードのセンサ入力では外部で信号線を GND に導通させることにより、4 種類のセンサ信号を発生させる。

3.3 ホールセンサによるスイッチ回路の開発

ホールセンサとはホール効果を利用した磁気センサのことである。磁石の発生する磁界や電流の発生する磁界を電気信号に変換し、出力する。ホールセンサは次のような性質をもっている。

- 出力電圧が磁束密度に比例する
- 出力電圧の極性によって磁極がわかる
- 温度によって出力電圧が変化する

3.3.1 ホール効果

ホール効果とは 1879 年にアメリカの物理学者 Edwin Herbert Hall によって発見された。物質中に流れる電流に対し、電流に垂直に磁場をかけると、電流と磁場の両方に垂直な方向に起電力が現れる現象である。この現象を説明するために図 24 を使用する。図 24 の中央にある灰色の物質がホールセンサである。まずこのホールセンサの X 軸方向に定電流を流す。ここでマイナスの電荷をもった電子 (図 24 では黄色い丸いもの) は電流とは逆方向に進む。次に電流に対して垂直方向 (Z 軸方向) に磁場をかける。これによりフレミングの左手の法則から、電子は電流と磁場方向に対して垂直方向にローレンツ力を受ける。そのため、電子は Y 軸の負の方向に曲がり、溜まっていく。それゆえ、Y 軸の負の方向に電子によってマイナスに帯電し、正の方はプラスに帯電していく。

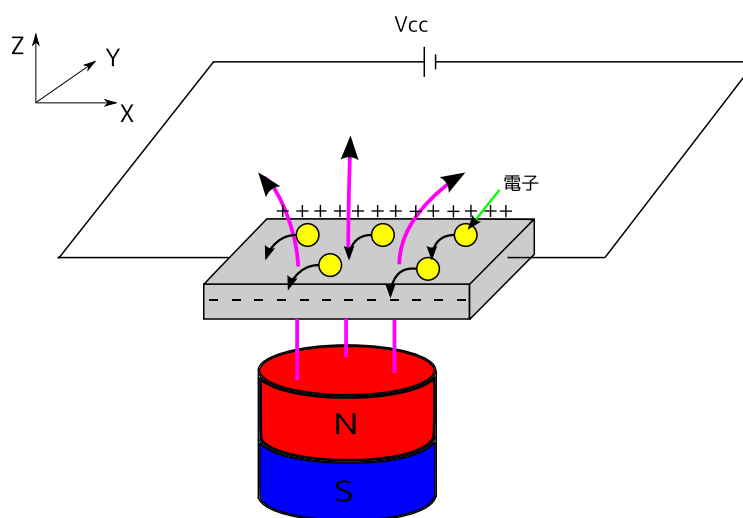


図 24 ホール効果

これにより、Y 軸方向のセンサ内で電位差が生じ、Y 軸の正の方向から負の方向へ電界が発生する。この

電界は電子に影響を与える。マイナスの電荷をもった電子はプラス方向へ引きつけられる。そして、電子が電界により受けるクーロン力と磁場により受けるローレンツ力が釣りあうことにより、電子が左右に移動しなくなり定常状態となる。この現象をホール効果と呼ぶ。この安定した電圧を出力電圧として読み取ることができる。ローレンツ力は磁束密度に比例し、出力電圧はローレンツ力に比例する。従って、出力電圧は磁束密度に比例する。これを式で表すと

$$F_{lor} \propto B \quad (4)$$

$$V_{out} \propto F_{lor} \quad (5)$$

$B[T]$:素子周辺の磁束密度

$V_{out}[V]$:出力電圧

F_{lor} :ローレンツ力

また磁束密度が一定で駆動電圧が一定ならば、ローレンツ力は電子の速度に比例する。電子の速度は薄膜を構成する材料によって決まるので、電子の移動速度 $\mu[m^2/V \cdot sec]$ の大きい材料を使ったホールセンサほど高感度で、大きな出力電圧を発生する。一般的な半導体の電子移動度は表 2 のようになっている。今回使用したホールセンサは ASAHI KASEI MICRODEVICES の品番号 HG-106C である。これは GaAs を使用しており、Si と比べると約一桁大きいことので感度の高いホールセンサである。

物質名	電子移動度 $[m^2/V \cdot sec]$
Si	0.15
Ge	0.36
GaAs	0.97
InAs	3.30
InSb	8.20

表 2 半導体の電子移動度 (参考文献 [6])

3.3.2 基本特性

ホールセンサは 2 入力 2 出力の 4 端子素子である。図 25 はホールセンサで、このセンサの等価回路としてホイートストン・ブリッジで表すことができる (図 26)。

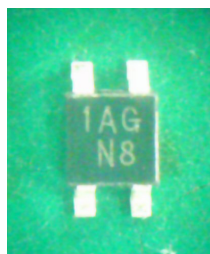


図 25 Hall sensor

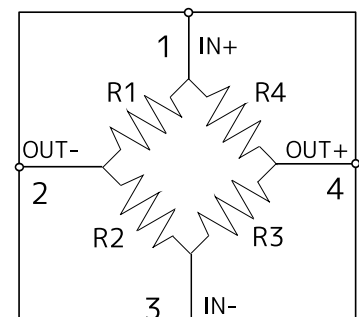


図 26 ホイートストン・ブリッジ

入力端子に加わる電圧 V_{in} および電流 i_{in} と出力電圧 V_{out} には次のような比例関係がある。

$$V_{out} = K_1 i_{in} B \quad (6)$$

$K_1[V/A \cdot T]$:ホールセンサの感磁部の材質や形状で決まる定数

$V_{in}[V]$:入力電圧

$i_{in}[A]$:入力電流

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

しかし、実際のホールセンサは OP アンプやほかのデバイスと同様に形状のばらつきや物性的なアンバランスがあるため、内部の 4 つの抵抗は必ずしも一致しない。そのため磁場が 0 のときでも電圧が 0 にならない。磁場 0 のときのホールセンサの出力電圧を不平衡電圧という。

今回使用するホールセンサでの不平衡電圧はデータシートによると最大 $\pm[11mV]$ である (参考文献 [7])。

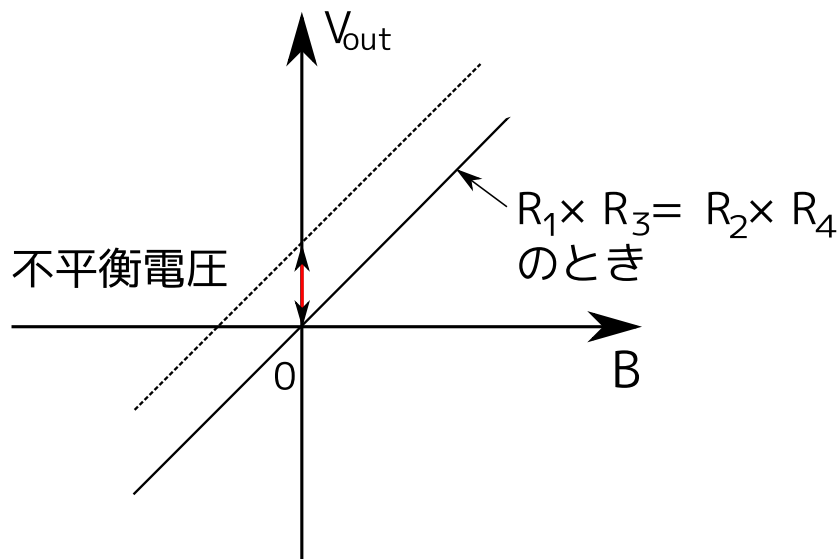


図 27 不平衡電圧

測定温度: $25^{\circ}C$

制御電圧: $V_c = 6[V]$

磁束密度: $B = 0[mT]$

また最大抵抗値は 850Ω である。

3.3.3 ホールセンサによるスイッチ回路の開発

ホールセンサは磁石を近づけると反応し、起電圧を生じる。このことを利用してリミットスイッチの代わりになるスイッチ回路を開発した。

■基本構成 今回作成したホールセンサによるスイッチ回路は図 28 のように作成した。左からホールセンサ、差動増幅回路、コンパレータ、出力系、また各電子部分を駆動させるための定電流系と定電圧系で構成されている。ホールセンサからの出力電圧は差動増幅回路により増幅され、コンパレータにより、ある基準電圧と比べられ、そのの大小により出力トランジスタの ON/OFF をしている。ホールセンサは定電流で駆動させ、電流値は抵抗値の組み合わせで決まる。センサの検出点 (スイッチの ON/OFF を決める点) は $0.5 \sim 2.5V$ の範囲になる。回路系は $5V$ の片電源系とし、差動増幅後の出力は $0.5 \sim 4.5V$ になるようなオフセット電圧と増幅率を設定した。今回採用したホールセンサの電流 $0.45mA$ とした。ホールセンサの抵抗値は常温で最大 850Ω なのでこの値から発熱量を計算すると $1.72 \times 10^{-4}W$ になる。この値は内部の排熱速度と比べて影響はないであろう。図 29 が設計図であり、また図 30 はボード図である。

■回路

定電流回路 定電流回路とはその両端にかかる電圧にかかわらず、つねに一定の電流が流れる回路のことである。これには National Semiconductor 社の LM334 を用いその回路は図 31 になる。ただし、 I は定電流

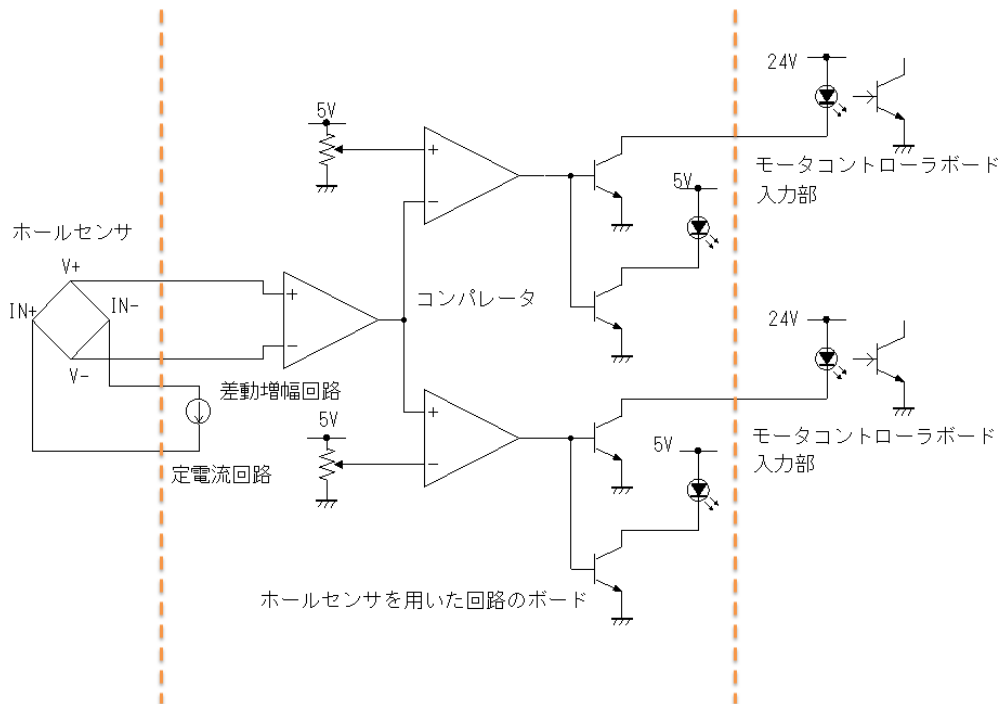
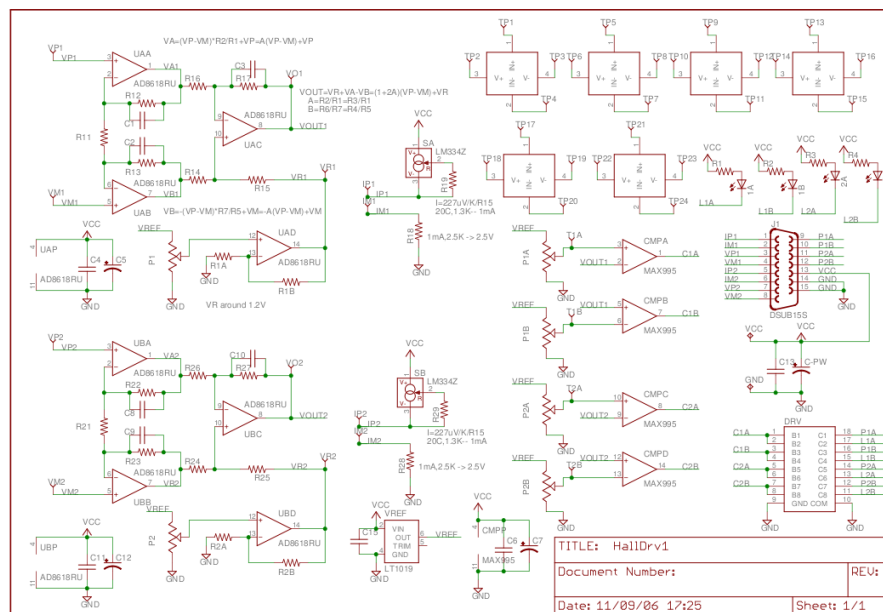


図 28 ブロック図



11/09/06 23:56 /home/kataza/eagle/Hall_Driver1/HallDrv1.sch (Sheet: 1/1)

図 29 ホールセンサ回路図

で駆動すべき負荷である。

この回路は 3 端子可変電流源で、温度を一定とした時に電流は抵抗 R のみに依存する。この回路は駆動系のラックに使われるのため常温下に置かれる。よって $T = 298$ である。そのときの出力電流は以下のように

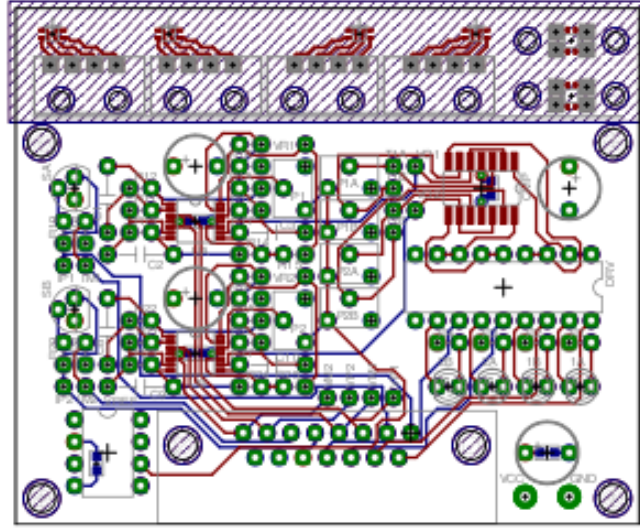


図 30 ボード図

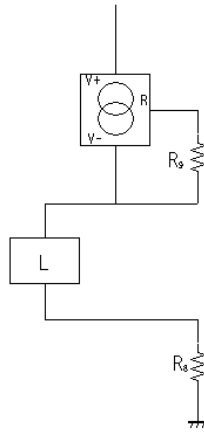


図 31 定電流電源回路

なる。

$$I_{set} = \frac{227[\mu V/K]}{R_{set}[\Omega]} \cdot T[K] \quad (7)$$

$$= \frac{227[\mu V/K]}{R_{set}} \cdot 298[K] \quad (8)$$

$$(9)$$

目標値を $0.45mA$ にするためには下記の値を得る。

$$R_{set} = \frac{227[\mu V/K]}{0.45[mA]} \cdot 298[K] \quad (10)$$

$$= 150[\Omega] \quad (11)$$

差動増幅回路 差動増幅回路は二つの入力電圧の電位差だけを増幅する回路のことをいう。この回路は図 32 のようになる。入力電圧 V_P 、 V_M はホールセンサの V_+ 、 V_- に繋がっている。抵抗 R_1 、 R_2 、 R_3 と出力電圧の間では以下が成り立つ。

$$\frac{V_P - V_M}{R_1} = \frac{V_{A1} - V_P}{R_2} = \frac{V_M - V_{B1}}{R_3} \quad (12)$$

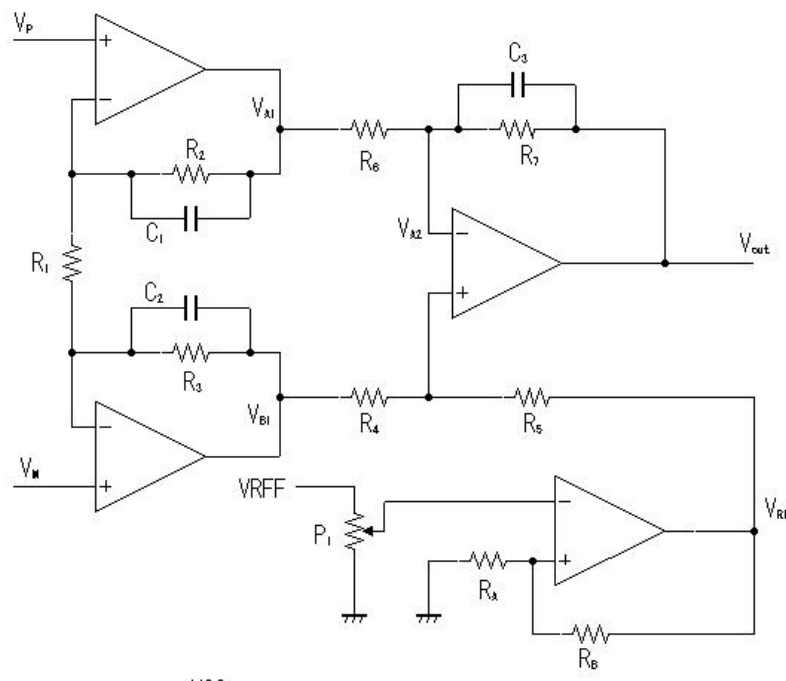


図 32 差動増幅回路

この式から V_{A1} と V_{B1} を V_P と V_M をつかって表すと

$$V_{A1} = (V_P - V_M) \frac{R_2}{R_1} + V_P \quad (13)$$

$$V_{B1} = -(V_P - V_M) \frac{R_2}{R_1} + V_M \quad (14)$$

さらに抵抗 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 と出力との関係は

$$\frac{V_{out} - V_{A2}}{R_7} = \frac{V_{A2} - V_{A1}}{R_6} \quad (15)$$

$$\frac{V_{R1} - V_{A2}}{R_5} = \frac{V_{A2} - V_{B1}}{R_4} \quad (16)$$

となる。ただし、 R_1 は可変抵抗を使って $0 \sim 2.5V$ まで変化させることができる。ここで $R_4 = R_5 = R_6 = R_7$ とすると、式 15 式 16 から

$$V_{out} = 2V_{A2} - V_{A1} \quad (17)$$

$$V_{R1} = 2V_{A2} - V_{B1} \quad (18)$$

となり、式 17 - 式 18 とすると、

$$V_{out} = V_{B1} - V_{A1} + V_{R1} \quad (19)$$

$$V_{out} = (1 + 2A)(V_P - V_M) + V_{R1} \quad (20)$$

となる。ただし、式 20 は $A = R_2/R_1 = R_3/R_1$ とする。式 20 から V_{out} は V_{R1} を基準とし、 $V_P - V_M$ を変数とした一次関数として表すことができる。またホールセンサに $0.3mA$ の電流を流し、 $\Phi 1mm$ のネオジウム磁石を近づけた予備実験から $V_P - V_M$ の変化量は $\pm 0.003V$ 程度である。ここから $1 + 2A = 1600$ とし、出力の変化 $4.8V$ にした。このとき $A=800$ で

- $R_1 = 100\Omega$
- $R_2 = 80k\Omega$

とした。

定電圧回路 定電圧回路とは入力電圧や温度の変動に対して安定した出力電圧を吐き出す回路のことである。今回使用する定電圧回路は LINEAR technology 社の LT1019 の 2.5V を安定して出力する。

コンパレータ コンパレータとは二つの電圧を比較して、どちらかが大きいかによって出力が変わる素子のことである。今回の使用するものは MAXIM INNOVATION DELIVERED の MAX9024ASD+ である。この素子のブロック図は図 33 のようになる。この回路の基本特性は入力電圧に非反転入力 (+) と反転入力 (-)

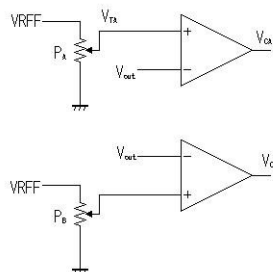


図 33 コンパレータ

がある。非反転入力の電圧が反転入力よりも高ければ、 $V+$ を出力する。逆に非反転入力の電圧が反転入力よりも低ければ、 $V-$ をとる。図 33 の回路では入力電圧の一方に可変抵抗回路が繋がれており、 $0\sim 2.5V$ を出力することがきる。またもう一方には差動増幅回路によって増加された電圧が出力される。非反転入力の電圧が反転入力よりも高ければ、電源の $5V$ を出力し、逆に非反転入力の電圧が反転入力よりも低ければ、 GND をとる。

出力 出力方法として、図 34 のようなオープンコレクタ回路 (ダーリントン接続) を使う。この回路はトランジスタ (npn 型) とコンデンサでできている。B はコンパレータの出力でトランジスタのベースと繋がっている。また C は外部からの入力先であり、コレクタと繋がっている。そしてエミッタは GND とつながっている。ダイオードは電流が逆流させないためである。この回路はコンパレータから出力された電圧がプラスのときにコレクタからエミッタに電流が流れるようになり、コンパレータから出力電圧が 0 のときはコレクタとエミッタは切れた状態になる。コンパレータの出力先は別れの二つの入力端子に接続されている。一つ

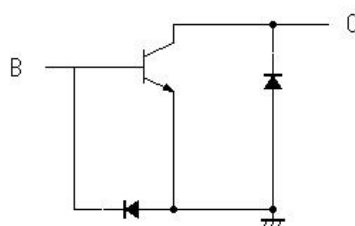


図 34 出力回路 1

のコンパレータの出力に対して二つの外部入力を使う。一つはモータコントローラボードの $24V$ 駆動のフォトカプラを動かす。もう一方は発光ダイオード回路と継ぎ、実際に回路が流れているかを視覚的に観察する。

ノイズ対策 また差動増幅回路や定電圧回路にはそれぞれノイズが乗ってしまう。そのためノイズ対策としてホールセンサによるスイッチ回路にはツイスト線、各抵抗と並行に $1\mu F$ のコンデンサーをつけた。また電源系には $6.8\mu F$ のコンデンサーを取り付けた。

ノイズについての特性は下記にまとめる。ノイズはさまざま種類があり、下記のようなものがある。

- 静電誘導によるノイズ

- 磁気誘導によるノイズ
- 電磁波によるノイズ
- コモン・モードのノイズ
- 調光器によるノイズ

これらのノイズは遮断することができる。今回は以下の二つの方法でノイズをキャンセルした。一つはツイスト線にすることである。図 35 のように左の閉回路に電磁波が通ったら誘導電流が生じて、それがノイズとして乗ってしまう。しかし右のように配線をツイストにすることにより、電磁波が通ったとしても誘導電流が互いに打ち消し合いノイズを減らすことができる。

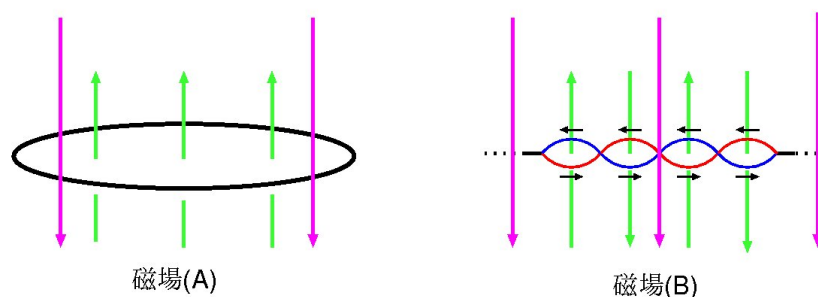


図 35 ツイスト線

もう一方は抵抗にコンデンサーを並列でつなげることである。コンデンサのリアクタンスは

$$R = \frac{1}{2\pi fC} \quad (21)$$

となる。ただし、 R がリアクタンス、 f が周波数、 C が電気容量とする。この式から $f \times C$ の値が大きいほどコンデンサのリアクタンスは小さくなるので電流を通しやすくなる。 f が高周波とすると右辺の値が大きいほど高周波数を除去してくれる。つまり $R \times C$ の値が大きいほど f は大きくなる。そこでセラミックコンデンサーを $1\mu F$ を搭載した。

またコンパレータが切り替わる際にショートを起こすことがあり、その際、スパイク状のノイズが発生してしまう。このノイズ対策として、コンパレータの切り替え時間が長いものを使用することによって軽減される。そこで今回当初は使用する MAX995 から MAX9024ASD+ に変更した。ただし、下記の実験は MAX995 を使用したものの結果である。

MIRSIS への応用 MIRSIS でホールセンサを 2 つ使用するユニットがある。その際に回路を図 36 のように入力電流を直列回路で結び、出力電圧をそれぞれ出力するようにし、必要配線数を 6 本に抑えた。

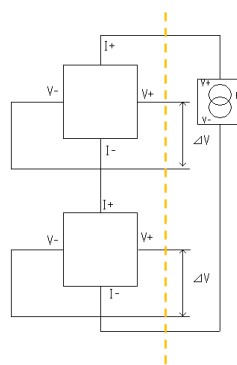


図 36 入力端子直列回路

次に MIRSIS でホールセンサを使用するユニット、使用数、必要配線数についてまとめておく。シャッ

ユニット名	ホールセンサー	必要配線数
Shutter	2	6
Lens wheel	1	4
Image filter wheel1	1	4
Image filter wheel2	1	4

表 3 駆動系とホールセンサ

ターユニットではホールセンサに必要な配線数とモータで使う配線数を足すと一つの Dsub9 コネクタでは足りないため予備用のコネクタ取り付け台 (Dsub9 用) も使うことにした。

二つのホールセンサの使い方 2 個用いる場合にさまざまな方法でつなげ、つなげ方によって出力電圧がどのように変化するかをここではまとめる。出力電圧は 2 つのホールセンサのうち、磁気を検出したものの ΔV が出てくると予想する。ホールセンサの配線方法は 3 通り考えられまとめると

1. 電流と電圧をそれぞれ直列で結ぶ (ホールセンサ 1 の出力電圧 $V+$ とホールセンサ 2 の出力電圧 $V-$ を結ぶ (図 37))
2. 電流と電圧をそれぞれ直列で結ぶ (ホールセンサ 1 の出力電圧 $V+$ とホールセンサ 2 の出力電圧 $V+$ を結ぶ (図 38))
3. 電流を直列で結び、電圧はそれぞれで出力する (図 39)

1、2 の方法では使用配線数が 4 本になり、3 使用配線数が 6 本になる。しかし 1、2 の方法ではオフセット電圧がのってしまい、3 の方法ではオフセット電圧はのらなかった。

ホールセンサの出力電圧の正負は磁石の極性の向きと出力電圧端子の接続に依存する。二つのホールセンサを区別するには互いに反対の符号の出力電圧を得れば容易に確認することができる。そこで方法 1 は磁石の向きを逆転することで、方法 2 は同じ磁石の向きで得ることができる。方法 1 で出力電圧を測定した結果、オフセット電圧が $0.2V$ のってしまった。方法 2 でも同様に $0.198V$ のってしまった。この原因は二つのホールセンサの V 端子には $I+$ と $I-$ の端子の中間ぐらいの電位で現れ、二つのホールセンサ間の V 端子間の電位差をキャンセルするためであろう。今回の回路ではオフセットが大きいとゲインをかけられないためオフセットの少ない 3 の方式にした。

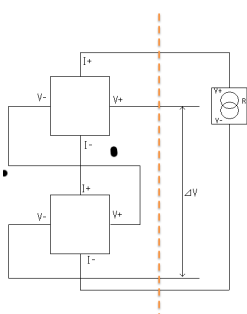


図 37 入力、出力端子の直列回路 (+,-)

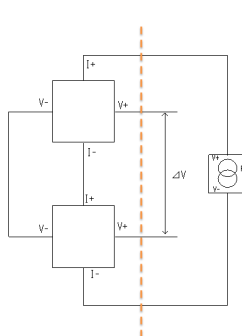


図 38 入力、出力端子の直列回路 (-,-)

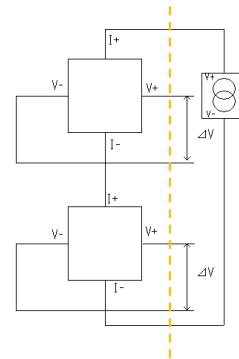


図 39 入力端子直列回路

3.4 入射平面鏡

入射平面鏡 (FM1) は望遠鏡の副鏡に反射した観測光が装置内部に入ってきたときに最初にあたる鏡であり、光軸調整を目的とした駆動ユニットである。

観測装置を望遠鏡に取り付けた際に望遠鏡と装置の光軸はずれてしまう。ここでいう光軸とは光線の中心軸を示す。仮に望遠鏡と装置の光軸がずれてしまうと光学性能が発揮できず、検出器の視野がずれてしまう。この問題を解決するため、観測光が最初にあたる入射平面鏡を垂直な 2 軸方向に動かせるようにした (図 40)。具体的には入射平面鏡を中心として、長軸方向 (X 軸方向 (tilt)) と短軸方向 (Y 軸方向 (tip)) の 2 軸回りに回転できるようになっている。これにより光軸を調整することができる (参考文献 [8] 佐藤 圭悟、茨城大学大学院理工学研究科自然機能科学専攻修士論文)。光軸調整を外部より行うために、各軸にモータを取り付けた。また FM1 の位置を検出するためにリミットスイッチをつけた。これらを制御して観測者が外部より光学調整することを可能にした。入射平面鏡の駆動パターンはデータベースから現在位置の情報を取得する。そこから数パルス分動き、動き終わった位置の情報をデータベースに書き込む。ユーザはコマンドラインから軸とパルスを指定しなければならない。

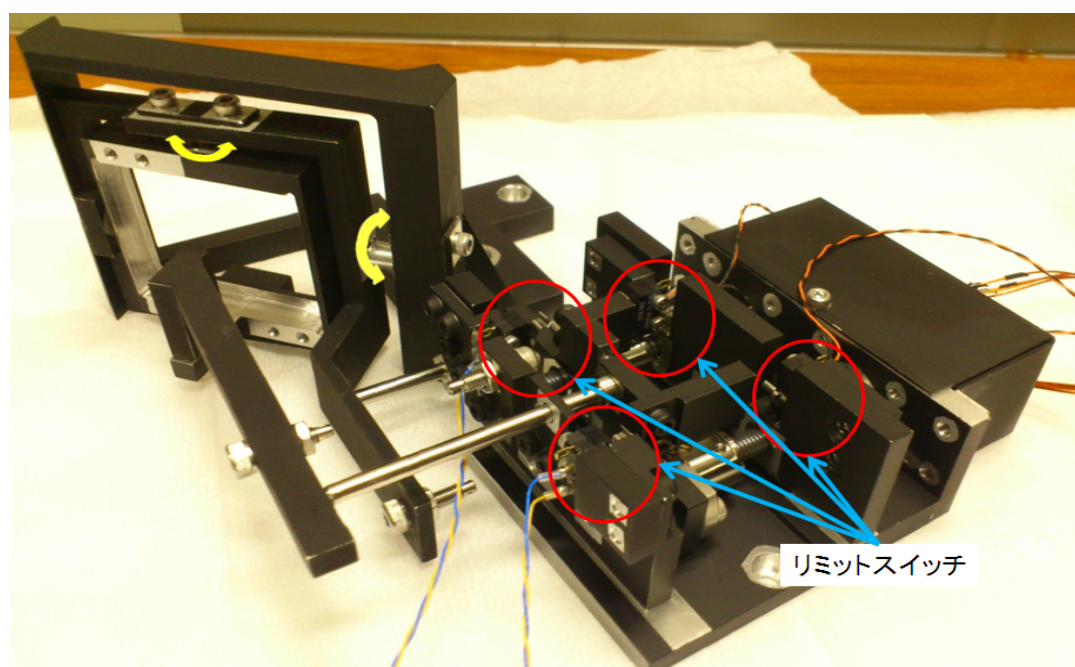


図 40 FM1

3.5 シャッター

シャッターは暗電流を測定するためのユニットである。第 1 章より常温下の物質は赤外線領域の熱放射が大きい。そのため観測装置は極低温まで冷やされる。しかし、冷やしたからといって熱が完全になくなることはなく、熱があることにより検出器中の電子は伝導帯に多く存在してしまい、入射がない状態でも電流が流れてしまう。これを暗電流という。そのため観測光による電荷と暗電流による電荷の読み取り値を分離するための補正が必要となる。そこで暗電流を測定するために入射光を遮るためのシャッターが必要となった。シャッターは撮像モードか分光モードか切り替える切替鏡の直前に設置した。直前に設置することにより、撮像モードと分光モードの両方に対応できるようにしたからである。シャッターを開閉するためにシャッターの先端にモータを取り付けた。また位置測定とオーバーランを防ぐためにシャッターユニットにホールセンサを取り付け、シャッター部品の可動方向の先端にネオジウム磁石を取り付けた (図 41 参照)。これらの部品

を使うことにより外部からシャッターを遠隔操作することを可能にした。

シャッターユニットを通る光のビームサイズは最大直径が 8mm で、シャッターが覆える領域は直径 30mm である。そのためシャッターは光軸から 11mm ずれることができる。これをシャッターの回転角度に直すと 20.6° になる。よってシャッターはハーフステップ角を採用しているので、22 パルスの幅をもつ。

シャッターの駆動パターンは全部で 12 通りあり、基本的に上記の 4 通りを使い、それ以下はスイッチが壊れた場合に使用する。

1. close → close 側のセンサで止まる (REV) → open 側のセンサで止まる (FOR) → open
2. open → open 側のセンサで止まる (FOR) → close 側のセンサで止まる (REV) → close
3. ??? → open 側のセンサで止まる (FOR) → open
4. ??? → close 側のセンサで止まる (REV) → close
5. open → close 側のセンサで止まる (REV) → close
6. close → close 側のセンサで止まる (REV) → open
7. ??? → close 側のセンサで止まる (REV) → open
8. ??? → close 側のセンサで止まる (REV) → close
9. open → open 側のセンサで止まる (FOR) → close
10. close → open 側のセンサで止まる (FOR) → open
11. ??? → open 側のセンサで止まる (FOR) → open
12. ??? → open 側のセンサで止まる (FOR) → close

???は現在位置が特定できない場合を示す。上から 4 行は FOR センサと REV センサが使用できる場合、4 行目から 8 行目までは FOR センサが使用不可能で REV センサが使用できる場合、8 行目から最後までは FOR センサが使用でき、REV センサが使用できない場合である。

シャッターユニットには N バンドフィルターとコールドストップがついている。N バンドフィルターはある特定の領域 ($7.4\mu\text{m} \sim 13.4\mu\text{m}$) の光を通す機構で、コールドストップは迷光を除去するための機構である。またコールドストップには瞳 (副鏡) の像が形成される。

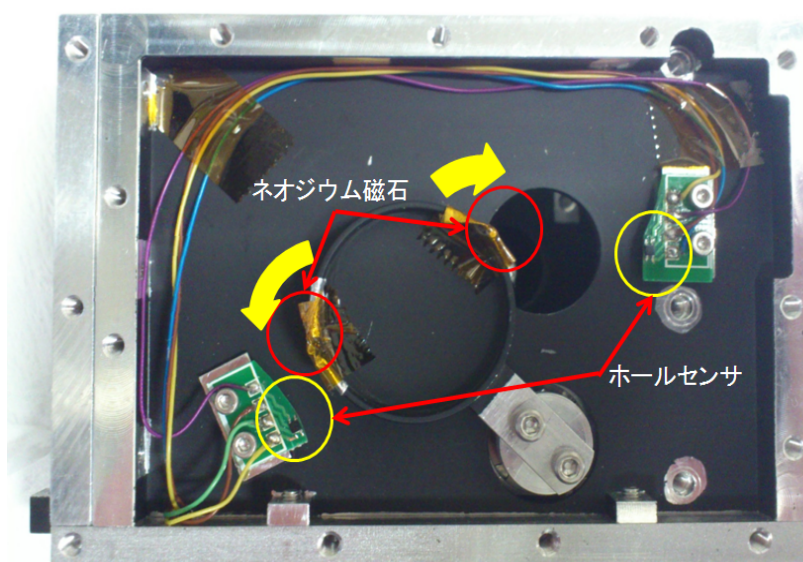


図 41 シャッター

3.6 切替鏡

MIRSIS は二つの検出モード (撮像モードと分光モード) がある。これらのモードを切り替えるため、光路上に平面鏡を置くことで可能にした。切り替えるための駆動として、ボールネジとシャフトが平行にあり、それらの上に平面鏡が乗った台 (切替鏡可動台) が置かれている。ボールネジの先端をカップリングに取り付け、カップリングのもう片方をモータを取り付ける。モータの駆動によってボールネジが回転し、乗っている切替鏡の台が平行移動する。ボールネジのリードは 1mm なのでモータが 1pulse 回転すると、切替鏡可動台は $2.5\mu\text{m}$ 動く (halfstep 時)。切替鏡ユニットにはモータ一つとリミットスイッチが二つ取り付けられている。リミットスイッチは両端オーバーランセンサを使用する。

切替鏡の駆動パターンは全部で 12 通りあり、基本的には上の 4 つを使い、それ以外はセンサが壊れたときに使う。

1. 分光モード→分光モード側のセンサで止まる (REV) →撮像モード側のセンサで止まる (FOR) →撮像モード
2. 撮像モード→撮像モード側のセンサで止まる (FOR) →分光モード側のセンサで止まる (REV) →分光モード
3. ???→撮像モード側のセンサで止まる (FOR) →撮像モード
4. ???→分光モード側のセンサで止まる (REV) →分光モード
5. 撮像モード→分光モード側のセンサで止まる (REV) →分光モード
6. 分光モード→分光モード側のセンサで止まる (REV) →撮像モード
7. ???→分光モード側のセンサで止まる (REV) →撮像モード
8. ???→ 分光モード側のセンサで止まる (REV) →分光モード
9. 撮像モード→撮像モード側のセンサで止まる (FOR) → 分光モード
10. 分光モード→撮像モード側のセンサで止まる (FOR) →撮像モード
11. ???→撮像モード側のセンサで止まる (FOR) →撮像モード
12. ???→撮像モード側のセンサで止まる (FOR) →分光モード

???は現在位置が特定できない場合を示す。上から 4 行は FOR センサと REV センサが使用できる場合、4 行目から 8 行目までは FOR センサが使用不可能で REV センサが使用できる場合、8 行目から最後までは FOR センサが使用でき、REV センサが使用できない場合である。

3.7 撮像フィルターホイール

赤外線の撮像観測を行うにあたり、特定の波長域のみ透過するフィルターを使用する。このフィルターは多層膜干渉フィルターを利用しており、厚さは 1mm である。フィルターは全部で 8 枚使用し、撮像用フィルターを 7 枚とダーク用の遮蔽版を 1 枚搭載する。フィルターホイールはフィルターを収めることができ、2 枚のフィルターホイールを搭載する。ホイールの穴が全部で 10 個に対して使用するフィルターが 8 枚なのは、もう一枚のホイールを使うために必ず 1 ヶ所は何もない穴にしておく必要があるからである。ホイールの駆動はモータ軸にとりつけた歯車から中継ギアをはさみ、ホイール外周の歯車に回転を伝達することで行う。位置を把握するためにはホールセンサを用いた。ホールセンサはホイールに取り付けたネオジウム磁石によって反応する。それぞれの磁石の距離間とは同じではない部分があるため、駆動パルス数の違いによって現在のフィルターの位置を把握することができる。ホイールは中心からみて、くぼみと磁石の位置が直線上になっているか所が 1 か所 (原点とする) のみであり、他はずれている。またくぼみと磁石と中心の直線を軸に線対称になっている (参照図 43)。ホイール 1 枚につきモータ 1 つとホールセンサ 1 つ、ネオジウム磁石 5 つが搭載されている (参照図 44)。撮像フィルターホイールユニットにはフィルターの中心を光軸の中心で止

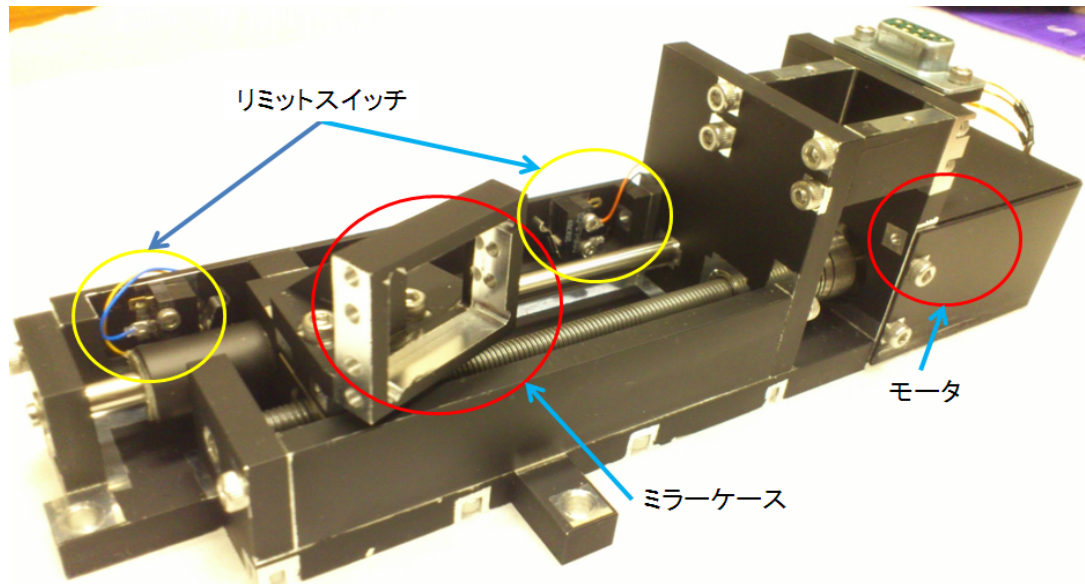


図 42 切替鏡

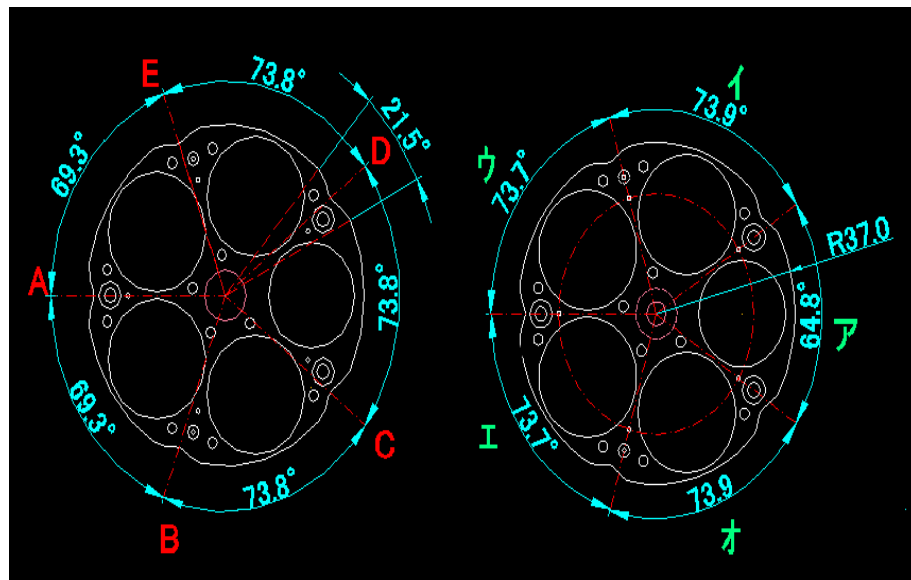


図 43 撮像フィルターホイールのホイール構成

めるためにラッチ機構を搭載している。冷却系での発熱をおさえるために撮像フィルターホイールは動かす時以外カレントオフの状態にする。そのため、モータの保持トルクは弱い。また冷却下では熱収縮によって、歯車と歯車との間に隙間ができてガタつきを生じる可能性がある。そこでラッチ機構によりフィルターを光学的に正しい位置（ここでいう正しい位置とはフィルターの中心が光軸に対して垂直でかつ中心と一致する点をいう）で固定している。そのため、ホイールの外周にくぼみを掘り、ホイールが正しい位置に来たときにはくぼみを押さえてフィルターホイールを固定する。撮像フィルターホイールのラッチ機構はベアリング、シムリング (0.15mm)、バネ (株式会社ミスミ丸型コイルスプリング UR4-9)、ラッチ部品、ラッチ支え部品で構成されている (図 45 参照)。ラッチ部品にシムリングを挟み、ベアリングを取り付ける。取り付けたベアリングはヒンジピンではずれないようにしている。フィルターホイールが回転し、フィルターが光学的に正しい位置にきたら、ベアリングがばねの力を利用してフィルターのくぼみに入り、フィルターホイールを固定する。

くぼみに入りこむ部分にはベアリングを使用しないとラッチ機構がうまく動作しなかった。またベアリングを押さえるためにばねを入れる部分には二硫化モリブデンのメッキをつけることで、なめらかに動作する

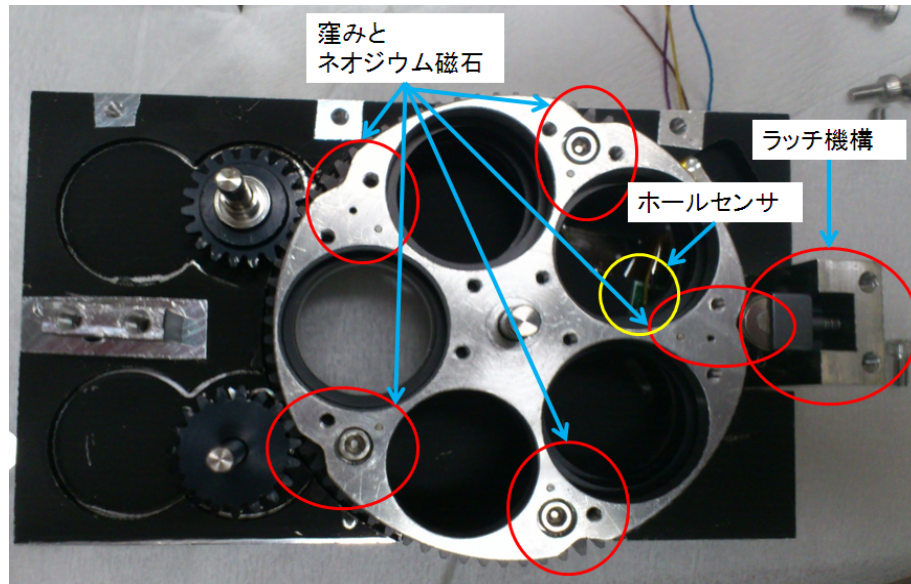


図 44 撮像フィルターホイールユニット

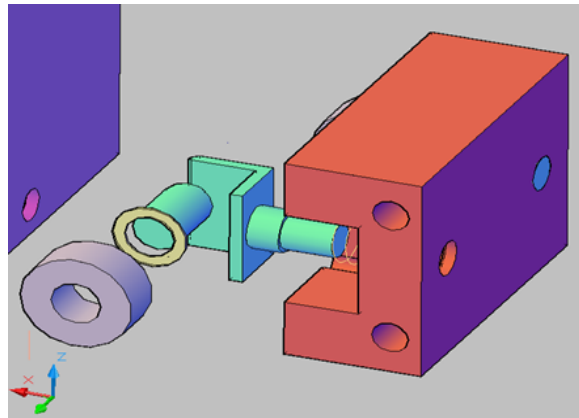


図 45 撮像フィルターホイールユニットのラッチ機構の構成 1

ようにしている。

次にラッチ機構がばねによってフィルター方向へ押し、くぼみに入っているときの脱出トルクについて考える。撮像フィルターホイールのラッチ機構は図 46 と図 47 の系で考えられる。図 46 でばねが押す力を F_1 とするとフックの法則より

$$F_1 = k(L - l) \quad (22)$$

ここで k はばね定数、 L はばねの自然長 l はばねが縮んだときの長さである。くぼみにベアリングが入った系を考えるには図 47 のように、斜めの台にボール、そしてボールの動く方向を垂直方向に限るための壁のある系として考えることができる。

ボールへの力は斜め台から F_2 の力を台に鉛直方向に受け、壁から F_3 の力を水平方向に受ける。ボールが止まっている時には、これらの力が釣り合い、

$$F_3 = F_2 \tan \theta \quad (23)$$

になる。モータのトルクを T とする。撮像フィルターではモータ軸にとりつけたギアと中継ギアの半径は等しく、それを R とする。そうするとホイール外周に動く力は T/R であり、これがベアリングによる力と釣り

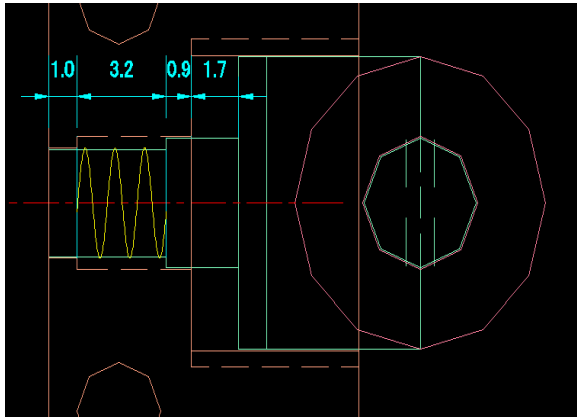


図 46 撮像フィルターホイールユニットのラッチ機構の構成 2

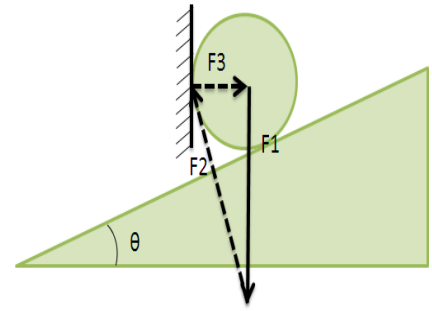


図 47 撮像フィルターホイールユニットのラッチ機構の構成 3

り合うので

$$T = F_1 \tan \theta \cdot R \quad (24)$$

ばね定数 $0.29[\text{mN} \cdot \text{m}]$

縮み量 $(L - l) = 5.8[\text{mm}]$

$\theta = 23^\circ$

$R = 9.5[\text{mm}]$

よって、 $T = 6.78[\text{mN} \cdot \text{m}]$

これは電流がオフの時のモータトルク $3[\text{mN} \cdot \text{m}]$ より大きいため、電流を切るとくぼみの中心にベアリングが来る。またモータの起動トルク $34[\text{mN} \cdot \text{m}]$ より小さいためモータの回転によってくぼみから脱出することができる (参照 [9])。

またフィルターの直径は 23mm 、ビームサイズの直径は 18.6mm なのでフィルターとビームサイズの間隙は 2.2mm になる。これをフィルターホイールの回転角度に直すと 5.4° になり、つまり 22pulse 分のあそび幅がある。しかし、フィルターホイールでは常にフィルターの同じ部分を光線が通るようにもっと厳しい再現性をもたせている。ラッチ機構はフィルター中心から 7 パルスずれていてもばねの力で、中心をあわせるようにすることができる。

撮像フィルターホイールの駆動パターンは 2 通りである。

1. 現在のフィルター→ラッチ機構を脱出する→隣りのフィルターのセンサで止まる→カレントオフ機能により、ラッチ機構が働き、フィルターの中心と光軸の中心が一致する
2. ???→隣りのフィルターのセンサで止まる→カレントオフ機能により、ラッチ機構が働き、フィルターの中心と光軸の中心が一致する

???は現在位置が特定できない場合を示す。撮像フィルターはギアのかみ合わせにより、回転方向が指定される。そのため、フィルターの交換は最低 1 回と最高 4 回になる。2 番目のパターンは現在の位置がセンサに反応していない場所のときに限られる。仮にセンサが働いている場合はラッチ機構も働き、フィルターの中心が光軸と一致していることになる。つまり、センサが働いている場合は撮像フィルターホイールを動かさず、検出器を見る。センサが働いていない場合は 2 番目のパターンで動かし、撮像検出器を見て判断する。

3.8 レンズホイール

切替鏡で撮像系に導かれた観測光は撮像フィルターホイールユニットを通ったあとも平行光のままである。そのため検出器で像を結ぶためのレンズが必要になる。MIRSIS の撮像用のレンズは 2 枚ある。撮像するた

めに平行光を収束させ、検出器上で像を結ぶ撮像レンズと副鏡およびコールドストップの像 (瞳) の像を確認して装置と望遠鏡の光軸を一致させるための瞳撮像レンズがある。これらのレンズはホイールに入っており、はじめ装置を取り付けたときは瞳撮像レンズを使う。光軸調整後は撮像レンズを使い撮像観測を行う。ホイールには歯車がついており一つの中継ギアをかえて、モータの動力で回転する仕組みになっている (参照図 48, 図 49)。

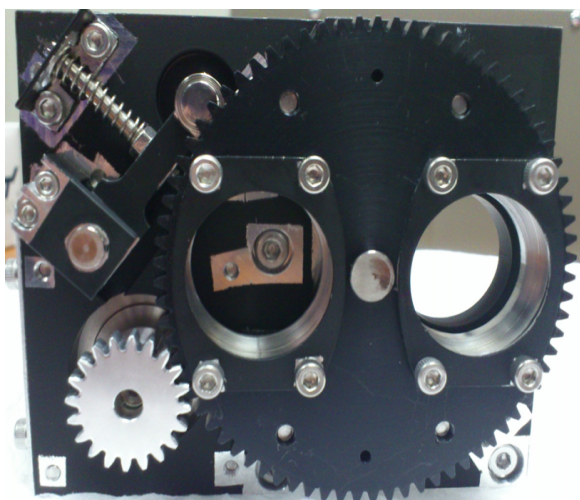


図 48 レンズホイールユニット

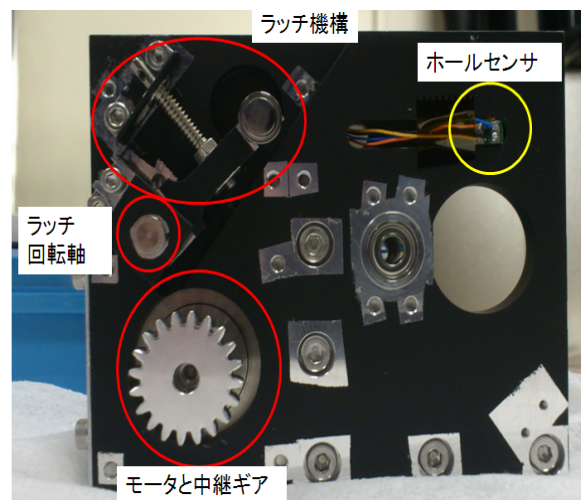


図 49 レンズホイールの内側

レンズホイールユニットは一つの駆動用のモータと位置を把握するためのホールセンサを搭載した。そのためホイールにはネオジウム磁石が 2 つ対象の位置に搭載してある (参照図 50)。

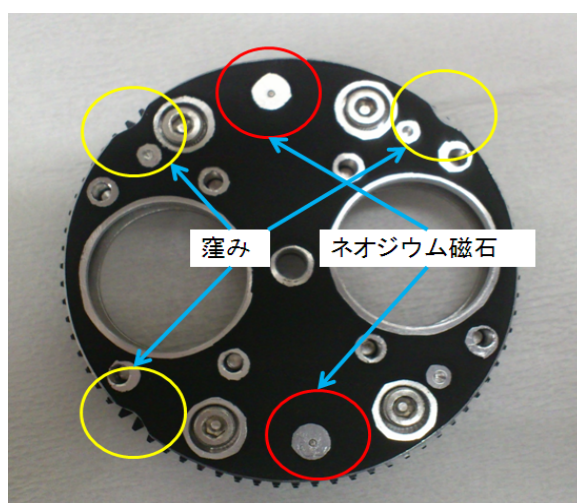


図 50 レンズホイールフィルター部

レンズホイールユニットも撮像フィルターホイールユニットと同様にレンズを光学的に正しい位置で固定する必要があるため、ラッチ機構を設けている。レンズホイールの円周部にくぼみが掘られおり、レンズが光学的に正しい位置に来たらラッチ機構が働く。ラッチ機構はベアリング、ばね (ミスミ UL5-25)、ばね止め、シャフトで構成されている。レンズホイールのラッチ機構は回転軸があり、ばねの押す力によって回転するようになっている (図 51 参照)。

ばねが押す力を $F_{\text{ばね}}$ 、ベアリングが押す力を F_1 とする。 F_1 について解くと

$$F_1 = \frac{l_1}{l_1 + l_2} F_{\text{ばね}} \quad (25)$$

この式を式 24 に代入することでトルクを求めることができる。

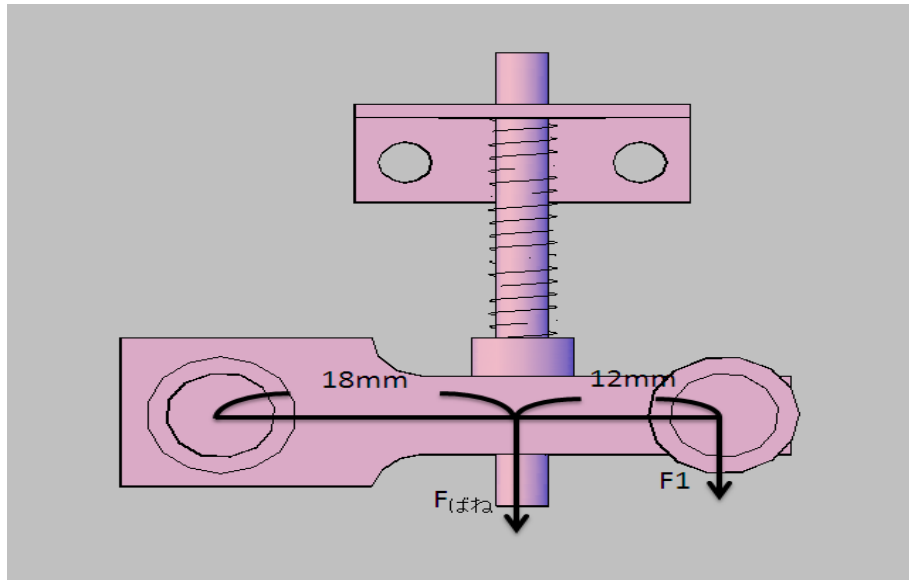


図 51 レンズホイールユニットのラッチ機構

ばね定数 $0.98[\text{mN}\cdot\text{m}]$

縮み量 $(L - l) = 9.5[\text{mm}]$

$\theta = 23^\circ$

$R = 22[\text{mm}]$

よって、 $T = 52.2[\text{mN}\cdot\text{m}]$

これは電流がオフの時のモータトルク $3.3[\text{mN}\cdot\text{m}]$ より大きいため、電流を切るとくぼみの中心にベアリングが来る。またモータの起動トルク $92[\text{mN}\cdot\text{m}]$ より小さいためモータの回転によってくぼみから脱出することができる (参照 [9])。

レンズホイールの駆動パターンは 4 通りである。

1. 撮像レンズ→ラッチ機構を脱出する→瞳撮像レンズのセンサで止まる→ラッチ機構が働く範囲まで移動 (瞳撮像レンズ) →カレントオフ機能により、ラッチ機構が働く
2. 瞳撮像レンズ→ラッチ機構を脱出する→撮像レンズのセンサで止まる→ラッチ機構が働く範囲まで移動 (撮像レンズ) →カレントオフ機能により、ラッチ機構が働く
3. ???→センサで止まる→ラッチ機構が働く範囲まで移動→カレントオフ機能により、ラッチ機構が働く
4. ???→ラッチ機構が働く範囲まで移動→カレントオフ機能により、ラッチ機構が光学的な位置に働く

???は現在位置が特定できない場合を示す。3 番目のパターンはセンサが働いていない状態で 4 番目のパターンはセンサが働いている状態である。

4 光学素子駆動制御プログラム

4.1 概要

この章では光学素子駆動系の制御システムについて述べる。MIRSIS の光学素子駆動系は極低温下で駆動させなければならず、装置は真空容器で覆われている。そのため、装置の中を見ることはできず、外部から制御をしなければならない。MIRSIS では外部制御するため PC を使ってモータを動かし、またセンサからさまざまな情報を得る。MIRSIS の光学素子駆動系の制御システムはハードウェアに近い方から大きく分けて、デバイスドライバ、各ユニット共通プログラム群、各ユニットの駆動アプリケーションで構成されており、本研究では各ユニット共通プログラム群、各ユニットの駆動アプリケーションを開発した。

4.2 デバイスドライバ

4.2.1 概要

デバイスドライバとはハードウェアを OS に認識させて、アプリケーションからそのハードウェアを使用するためのソフトのことをいう。つまり、ハードウェアとソフトウェアの仲介役である。デバイスドライバは服部により作成された。ここではデバイスドライバの基本知識と基本機能についてのみ述べる (詳細は 2008 年度卒業服部卒業論文を参照)。

4.2.2 基本知識

■**システムファイル** UNIX 系の OS の特徴のひとつとして、ファイルシステムがある。ファイルシステムとはほとんどすべてのものにファイルとしてアクセスできるようになることである。主な役割として、

- 入力でデバイスにアクセスするための手段
- UNIX プログラムとのアクセス手段としてのデバイス特殊ファイル

ファイルシステム概念により、デバイスファイルを用いることにより、I/O デバイスをあたかもファイルと見なし、通常のファイルの制御に関連するシステムコールを、同じような感覚で適用できるようになる (参考文献 [11])。

■**カーネル** デバイスドライバを作成する前にパソコンのカーネルのバージョンを確認する必要がある。カーネルとは OS の中心核で、OS の基本機能を実行するところである。カーネルにもさまざまな種類やバージョンがあり、MIRSIS で使用するカーネルはカーネル 2.6 系のバージョン 2.6.24.7 である。また、デバイスドライバのビルドに必要なパッケージとして、kernel-devel と kernel-headers がある。これらにも同様にバージョンがあり、極力カーネルと同じバージョンにした方がよい。なぜならもしバージョンが異なるとデバイスドライバが役に立たなくなるかもしれない。またカーネルのバージョンと kernel-devel や kernel-headers のバージョンを知るには下記のコマンドでわかる。

- `uname-r`(カーネルのバージョンを知る)
- `rpm-qel | grep kernel`(kernel-devel と kernel-headers を知る)

■**PCI デバイス** PCI デバイスを使用するときは OS が PCI デバイスを認識しているか確認する必要がある。認識していない場合は差込み不慮かスロットが壊れた可能性がある。ちなみに PCI デバイス (Peripheral Component Interconnect device) とは PCI バススロットに差し込むボード (今回の場合はモータコントローラボード (MCI-0410)) のことを示す。

コマンド `/sbin/lspci` と打つとバス番号:デバイス番号. ファンクション番号 デバイス名:詳細なデバイス名が

表示される。もし詳細なデバイス名の欄に MYCOM とあれば認識されてる。

■**システムコール** デバイスドライバのコマンドはデバイスファイルの Open、デバイスファイルの Close、システムコールである。デバイスファイルの Open とはどのデバイスドライバを使用するのかを関連付ける。デバイスファイルの Close はデバイスの使用を終了する。そして、システムコールとはデータの読み書きを行う。MIRSIS で使用するシステムコールには read コマンド (デバイスのレジスタにアクセスして、その情報を得る) と write コマンド (デバイスのレジスタにアクセスして、情報を書き込む) がある。これらのコマンドはインクルードファイル (one_motor_ioctl.h) の中で定義しており、各ユニット共通プログラム群ではこれらのコマンドを使用して、ボードのレジスタにアクセスする。

4.3 各ユニット共通プログラム群

4.3.1 プログラムの構成

光学素子駆動系ユニットは各ユニットによって動作は異なる。しかし、その異なる動作の中でも共通する部分がある。例えばステッピングモータを動かす、ステッピングモータの停止などがある。そこでモータコントロールのためのコマンドを駆動系ユニット共通のものとして開発した。その際にいくつかのコマンドで共通に用いるものをライブラリおよびヘッダとしてまとめた。ライブラリ及びヘッダは次の 5 つで書いてあり、それらについて述べる。

- 各ユニット共通プログラム (バイナリファイル)
- one_motor_lib.c
- one_motor_lib.h
- one_motor_ioctl.h
- MOTOR_ADDRESS.h

4.3.2 モータコントローラボードの初期化

コマンド名 : init_mci0410

引数 : なし

モータコントローラボードの初期化フローチャートは図 52 である。モータコントローラボードにアクセスするには PCI バススロットに差込み、デバイスドライバをカーネルに登録しなければならない。アクセスできるようになったら、モータコントローラボードの全軸共通レジスタの D4 番目のビット値の ESLOG が初期状態になっているため、変更する必要がある。ESLOG とは非常停止論理設定を行っており、非常停止には A 接と B 接の二種類配線方法がある。電気信号の ON/OFF によって回路を導通させたり断線することがある。その際、電気信号が ON の時に回路が導通する接続方法を A 接といい、逆に電気信号が ON の時に回路が断線する接続方法を B 接という。非常停止論理設定の初期状態は B 接になっている。MIRSIS では非常停止信号の出力ピン (CN1 コネクタの 77pin) は外部と接続していないため、B 接では常に止まった状態になる。そのため、A 接に切り替える必要がある。よって全軸共通レジスタ (アドレス:0x4005) に 0x08 を書き込まなければならない (0x とは 16 進法で表記されていることを示す)。MCI-0410 ボードには停止信号レジスタがあり、各軸に減速停止、非常停止信号を出ることができる。非常信号レジスタのビットが 0 以外のときは各ビットに対応したモータが停止状態になっている。そのため、毎回必ず停止信号レジスタ (アドレス:0x4004) に 0 を書き込まなければならない。

4.3.3 モータコントローラボードの各レジスタの情報の読み込みと標準出力

コマンド名 : mtr_status

引数 : parameter1 axis (1-8)

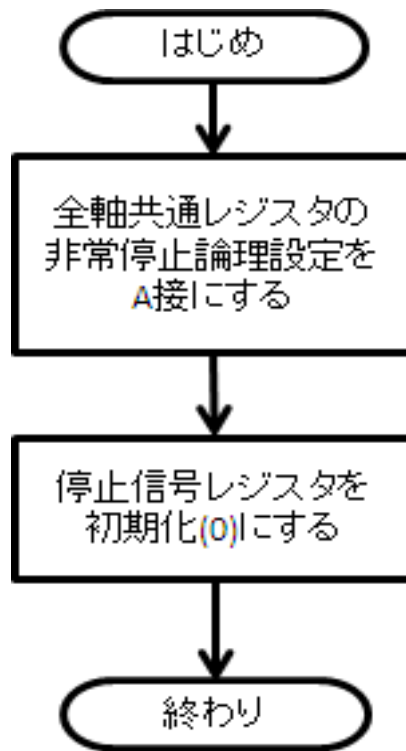


図 52 モータコントローラボード初期化フローチャート

MCI-0410 にはステータスレジスタ 3 つ、コマンドレジスタ 5 つ、制御レジスタ 8 つがある。これらのレジスタの各ビットにはモータ制御やセンサ制御に必要な情報が書き込まれている。そのため、これらの値を知らなければならない。モータコントローラボードの各ステータスとコマンド情報の読み込みと標準出力のフローチャートは図 53 である。読み込むレジスタは上記で説明した全部で 16 のレジスタとモータ駆動関係の P レジスタ、S レジスタ、M レジスタ、G1 レジスタ、N レジスタ、出力パルス数である。読み込んだら各レジスタ値 (P レジスタと出力レジスタ以外) を 16 進法と 2 進法で標準出力する。また読み込んだレジスタから、スイッチの状態 (スイッチの ON/OFF) やモータ駆動に必要なパラメータを書き込んだ各レジスタ値やカレントオフ機能を標準出力する。

4.3.4 モータやセンサを動かすための値を書き込む

コマンド名 : mtr_setup

引数	:	parameter1	axis (1-8)
	:	parameter2	max_speed [pulse/sec,Hz] (integer)
	:	parameter3	start_speed [pulse/sec,Hz] (integer)
	:	parameter4	total_pulse (integer)
	:	parameter5	acceleration_rate [Hz/sec] (integer)
	:	parameter6	direction 1:CW(FOR) 2:CCW(REV)
	:	parameter7	NEAR switch 0:disable 1:active-ON or 2:active-OFF
	:	parameter8	FOR switch 0:disable 1:active-ON or 2:active-OFF
	:	parameter9	REV switch 0:disable 1:active-ON or 2:active-OFF
	:	parameter10	カレント ON 1:OFF 0

3.2.3 で説明した通り、モータを動かすために必要なパラメータは自起動速度、最高速度、加減速度、総パルス数の 4 つがあり、回転方向指定パラメータも MIRSIS では使用するため全部で 5 つのモータ駆動パラメータを設定する必要がある。また MIRSIS では FOR,REV,NEAR,IN の 4 種類のセンサのうち、基本的に FOR,REV,NEAR の 3 つを使用する。IN は予備として使用する。センサのパラメータは 3 つあり、使用し

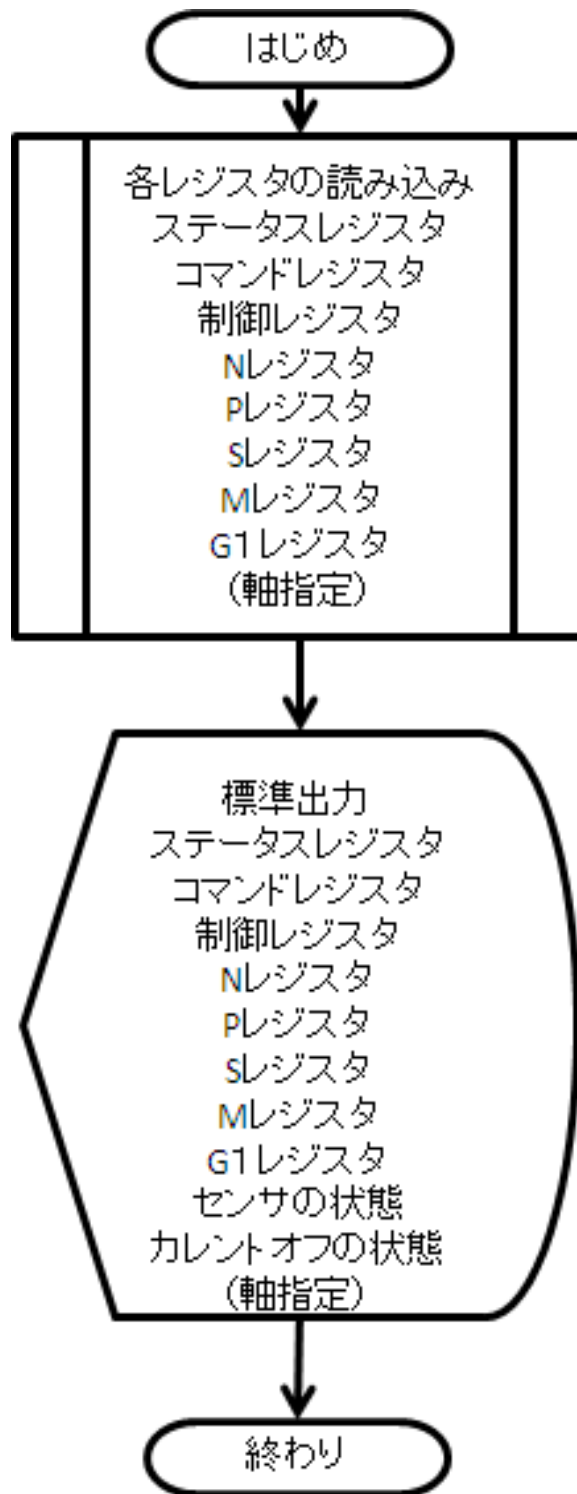


図 53 各ステータスとコマンドの情報を読みと標準出力の取フローチャート

ない、A 接使用、B 接使用が存在する。またカレントオフ機能の ON/OFF パラメータも使う。

駆動パラメータが決まったら、期待する形状で加減速できるか判断するために式 26 の条件を満たさなければならぬ。

$$P_{ALL} \geq \frac{M_S^2 - S_S^2}{4 \cdot n \cdot G_{AV}} \cdot 2 + 5 = \frac{M_P^2 - S_P^2}{g} + 5 \quad (26)$$

ただし、式 26 は式 27– 式 30 を満たす (参考文献 ([14])。)

$$k = \frac{f}{131072 \cdot n} [Hz] \quad (27)$$

$$M_S = \frac{M_P}{k} \quad (28)$$

$$S_S = \frac{S_P}{k} \quad (29)$$

$$G_{AV} = \frac{g}{2 \cdot n \cdot k} \quad (30)$$

ステップ係数: k [Hz]

基準入力クロック: f (3276800[Hz])

分周比 (= 109): n

総パルス数: P_{ALL}

加減速データ設定値: G_{AV}

加減速のパラメータ値: g

最高速度データ設定値: M_S

最高速度のパラメータ値: M_P

自起動速度データ設定値: S_S

自起動速度のパラメータ値: S_P

ステップ係数とは MPG2031 が処理できるような数値に変換する係数のことを示す。基準入力クロックの値は MCI-0410 モータコントローラボードの規格値である。

4.3.5 モータを動かす

コマンド名 : mtr_move

引数 : parameter1 axis (1-8)
: parameter2 y: force rotate i: interactive

モータを動かすフローチャートは図 55 である。モータを動かすためにはコマンド 1 の RUN(D1) のビットを 1 にする必要がある。またモータを動かす前にモータの回転時間を計算する。計算後、回転時間を標準出力をして、観測者にモータを回転させるか尋ねる。実験などで確認しながら行いたい場合はインタラクティブし、各ユニットのアプリケーションで使用する場合はバッチ処理動作をする。バッチ処理動作の有無はパラメータで設定できるようにしてある。モータが回転しはじめると、センサの割り込みについて監視する。センサの割り込みはステータスレジスタの 1 と 2 の値で判断できる。割り込みが見られない場合は回転時間の 1/100[sec] だけ待機して、再び監視を行う。この行為を 110 回行う。正常に動作した場合、途中出力パルス数が総パルス数と同じになった場合、監視を止めすべて出力したことを標準出力させる。センサの割り込みが入った場合、どのセンサでモータが止まったのかを標準出力する。それ以外 (監視が 110 回行った) の場合、どこかが異常になっているため、どこが異常なのかを標準出力して、モータを止める。

4.3.6 モータの非常停止

コマンド名 : mtr_stop

引数 : なし

モータを止めるためには制御レジスタの停止信号レジスタの値を書き換えなければならない。停止信号レジスタには各軸に減速停止命令と非常停止命令があるが、MIRSIS では非常停止命令しか使わない。

モータを止める行為は基本的にモータの駆動中に起こす。そのためモータを止めるプログラムはモータを動かすプログラム中に組み込まれている。モータを止めるフローチャートは図 56 である。

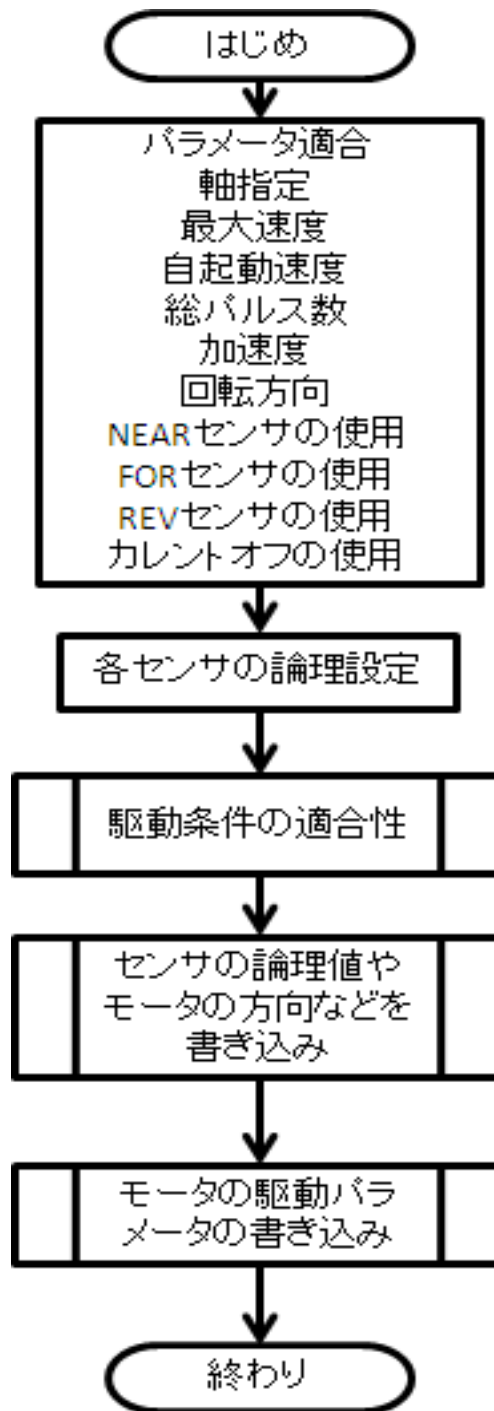


図 54 モータやセンサを動かすための値を書き込む

4.3.7 カレントオフ

コマンド名 : mtr_co

引数 : parameter1 axis (1-8)

: parameter2 カレント ON 1:OFF 0

カレントオフ機能の ON/OFF をする。指定軸とカレント機能の ON/OFF をパラメータに持つ。カレント機能はコマンド 2 の OP1 で ON/OFF ができる。OP1 を ON にするとフォトカプラ出力が ON になる。カレントオフ機能のフローチャートは図 57 である。

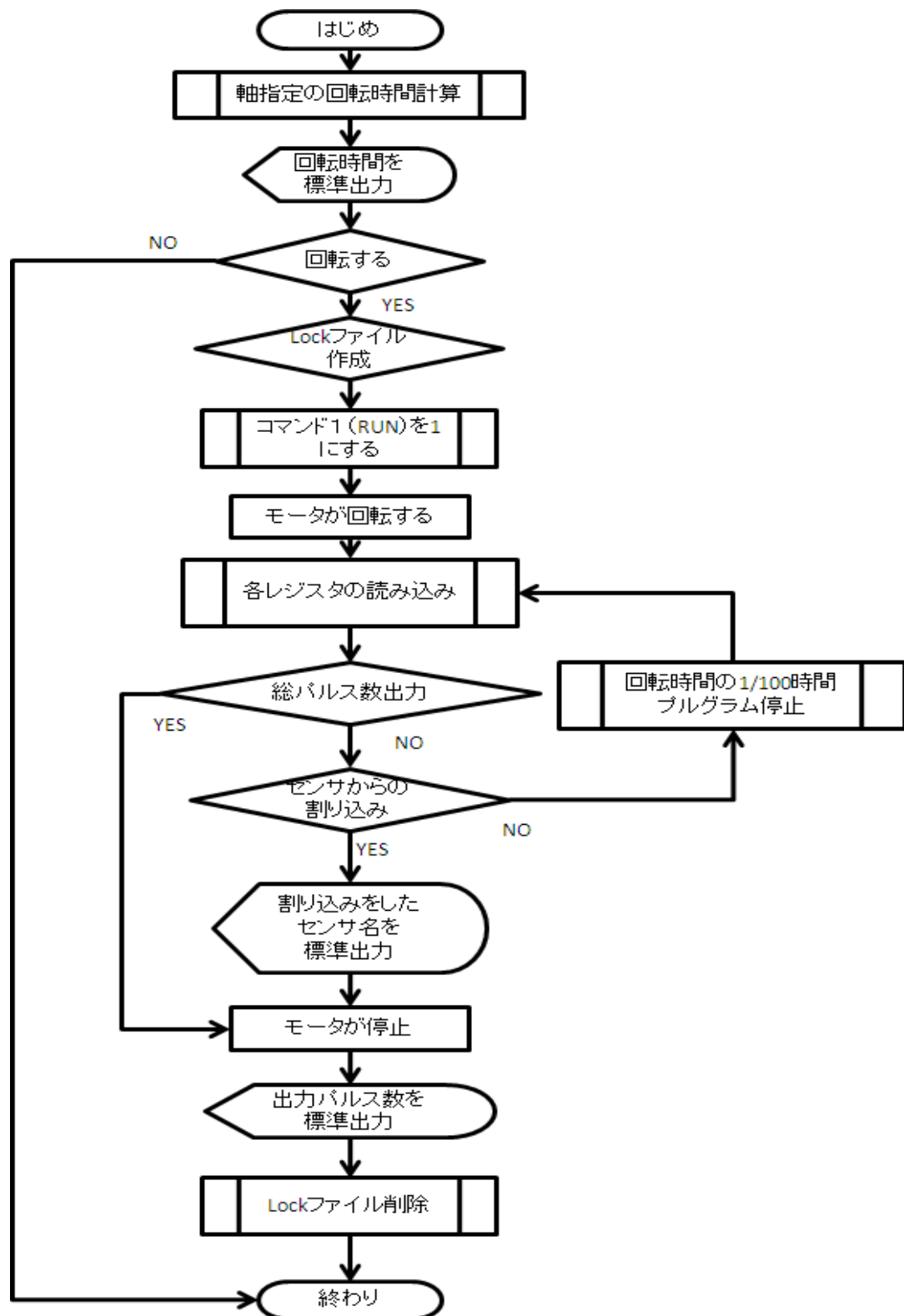


図 55 モータを動かす

4.4 MySQL

MIRSIS では情報を管理するために MySQL を使用している。MIRSIS では光学素子駆動系の他に光学系や検出器などの位置や状態の情報を保存しなければならず、また別の状態にするにも以前の状態を知らなければ、毎回初期状態に戻し、動かさなければならない。MySQL で状態を一括して管理することで効率的運用が可能となる。観測者は MySQL にかかれた情報を使い、観測や解析を行っていく。

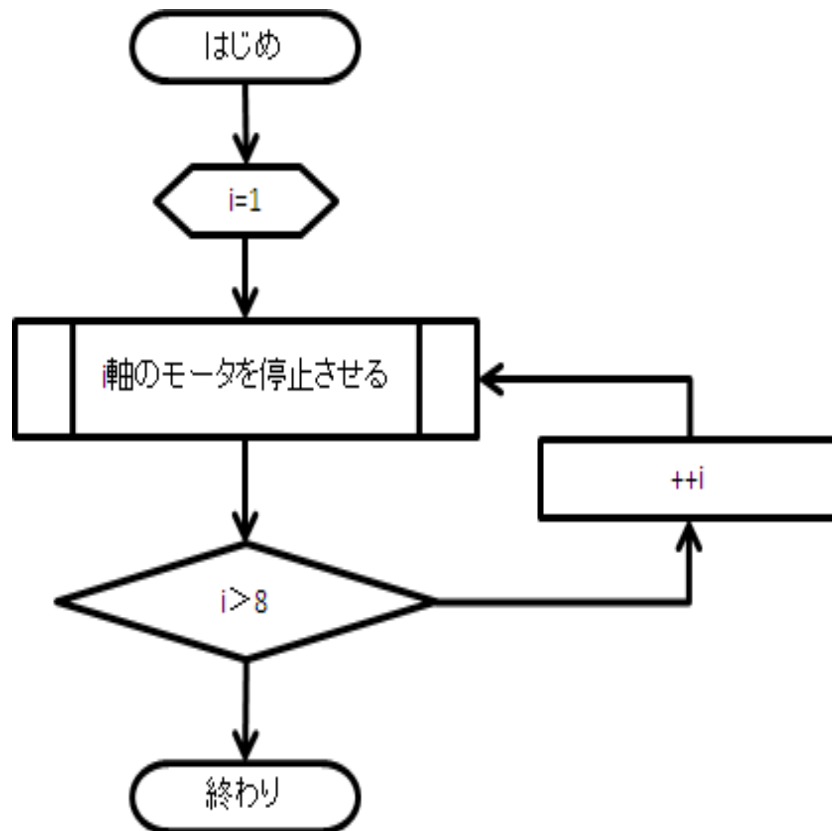


図 56 モータの非常停止

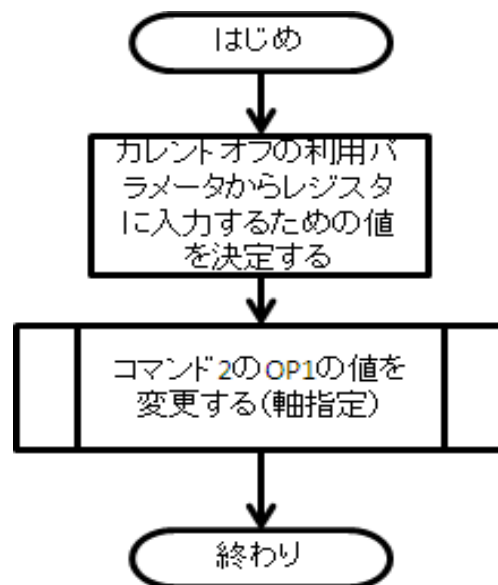


図 57 カレントオフ機能

MIRSIS の光学素子駆動系ユニットの MySQL 構造は図 58 のようになっている。MIRSIS の光学素子駆動系ユニットの情報は全部 10 個のフィールドが存在する (参照表 4.4)。

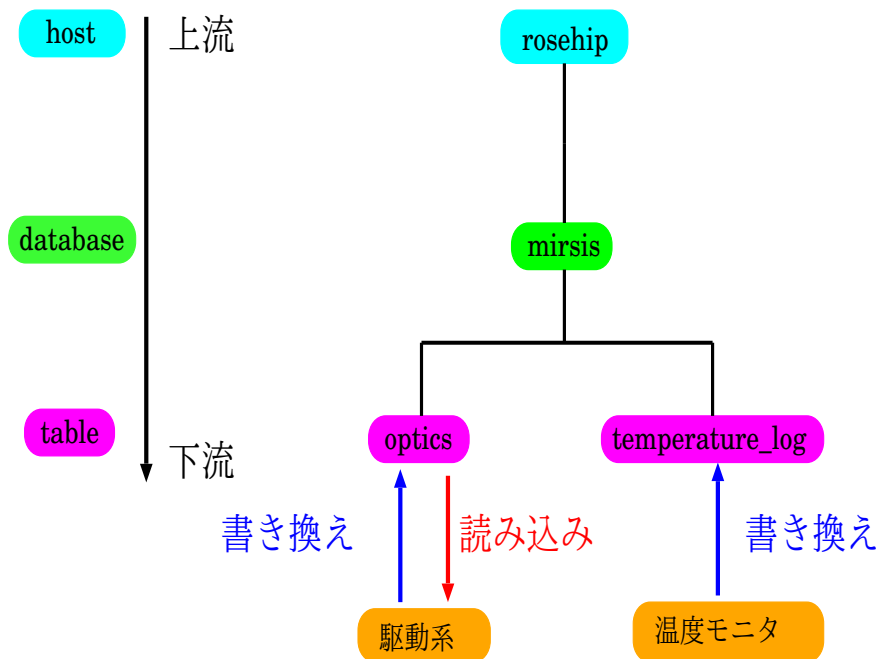


図 58 駆動系の MySQL の構造

column 名	説明
unit	駆動系ユニット名
datetime	データの取得年月日
sw_rev	rev スイッチの NO/OFF
sw_rev	rev スイッチの状態
sw_for	for スイッチの NO/OFF
sw_for	for スイッチの状態
sw_near	near スイッチの NO/OFF
sw_near	near スイッチの状態
status	駆動系のステータス

4.5 各ユニットの駆動アプリケーション

各光学素子駆動ユニットの駆動アプリケーションとは 4.3 で説明したプログラム群を組み合わせることでそれぞれに適したプログラムである。これらのプログラムは図 59 のフローチャートで表すことができる。

はじめに MySQL から指定軸のユニットおよびセンサ状態を取得し、次にモータコントローラボードの各ステータスとコマンドの情報を読み込み、標準出力し、MySQL の情報と比較する。一致している場合は観測者にユニットをどのような状態にするのか問う。一致していない状態ではユニットの初期化を行う。次に観測者の要望と現在のユニットの状態を比較する。一致した場合は今のユニットの状態を標準出力して終わる。一致しない場合は各ユニットの駆動パターンに当てはめ、駆動させる。駆動し終わったら、その状態を MySQL に書き込む。駆動パターンとは 3 の各ユニットで説明した駆動方法と各ユニットの駆動部品とセンサの位置と距離を事前の測定により作成されたパターンを示す。次にユニットの状態が観測者の要望した状態になっているか比較して、一致した場合は終わり、一致しない場合は駆動パターンに沿って再度駆動する。

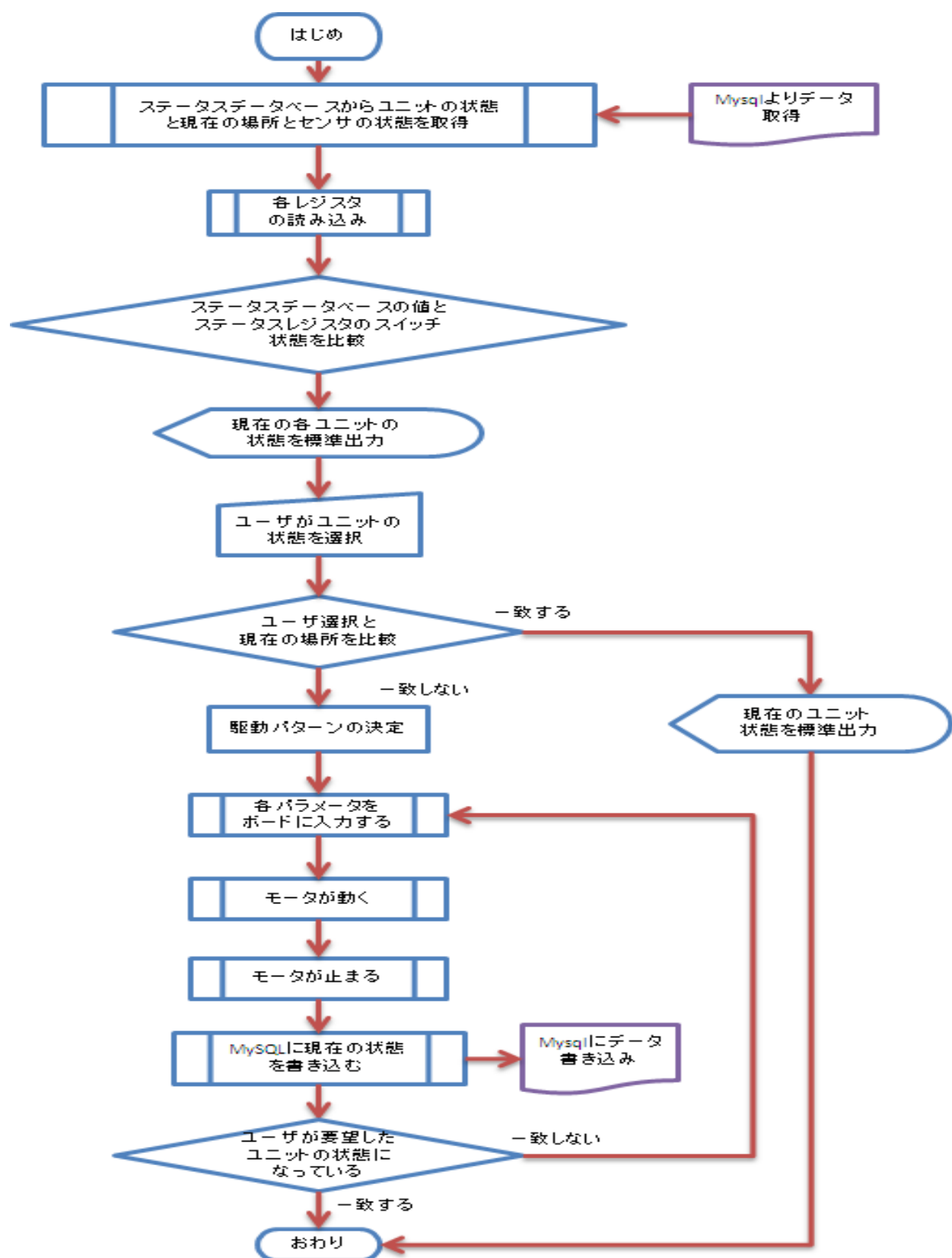


図 59 各ユニットの駆動アプリケーション

5 駆動実験

5.1 目的

MIRSIS の光学素子駆動系は極低温下で確実に駆動させなければならない。そこで、常温下で駆動範囲やセンサ間の距離などを事前に測定する必要がある。

また極低温下では発熱を極力小さくするため駆動電流値を小さくしなければならない。そのためには駆動電流値を絞っていきモータを確実に駆動させる値を測定しなければならない。

まず常温下で各ユニットの駆動パルス数を決定し、各ユニットが正しく駆動できるか評価する。ラッチ機構のあるユニットではラッチ機構で収めることができる範囲 (レンズホイールでは基準点から ± 20 pulse、撮像フィルターホイールでは基準点から ± 7 pulse) であるかも評価する。正常に駆動できない場合には 1:モータが脱調してしまい、パルス数に応じた回転をしなくなってしまう。2:モータの電流を切った時に残っているトルクによって、ラッチの力が負けてしまい、基準点からずれる。3:モータの回転トルクが足りなく、ラッチから脱出することができないということが考えられる。ちなみに脱調とはステッピングモータにおいて、過負荷や急激な速度変化の際に、入力パルス信号とモータ回転との同期が失われ、回転しなくなってしまう現象のことである。

5.2 実験

上記の目的をすべてのユニットで達するためには 5 つの実験を行わなければならない。

1. 常温下での動作確認/パルス数測定
2. 常温下でのラッチの動作確認
3. 常温下でのレンズホイールの再現性
4. 極低温下での最小適正電流値測定
5. 極低温下でのラッチの動作確認

上記の実験方法と結果についてまとめる。表 4 は本研究で行なった各ユニットの駆動実験である。

実験の種類	1	2	3	4	5
可動平面鏡	○	—	—	×	—
シャッター	○	—	—	×	—
切替鏡	○	—	—	○	—
撮像フィルター	○	×	—	×	×
レンズホイール	○	○	○	○	×

表 4 行なった駆動実験

○:実験を行なった

×:実験を行っていない

—:実験を行わない

5.2.1 常温下での動作確認/パルス数測定

常温下での駆動確認を行うために、駆動範囲やセンサまでの距離を測定を行なった。常温下で各光学素子駆動ユニットの基準点からセンサで止まるまで動かし、このパルス数を測定した。また動かす際には異なる3つの速度で行った。また全駆動ユニットの駆動方法として加減速度は0として行うため自起動速度と最高速度は同じである。この実験において自起動速度と最高速度を駆動速度と名前で使用する。またホールセンサ回路のオフセット電圧は1.2V、コンパレータの切替わる電圧は2.0Vと設定した。

解析には分散を使用して評価をする。測定結果からヒストグラムを作成して、最頻値 $\bar{X}$ を求める。その後データ $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ から式 31 で分散を求める。データ X_i は測定したパルス数を示している。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (31)$$

次に最頻値から $\pm 3\sigma$ の範囲内のデータだけを用いて、もう一度式 31 と同様にして分散を求める、これを σ とした。また測定結果は最頻値から4の倍数と8の倍数が脱調したと考えれる。今回使用するモータが2相ステッピングモータであるため、フルステップ角モードで4パルス、ハーフステップ角モードで8パルスでタイミングチャートが1周期を終える。

■**可動平面鏡** 可動平面鏡はFOR センサと REV センサの間が可動範囲で、それを測定した。FOR センサから REV センサまでのパルス数またその反対の動作として REV センサから FOR センサまでのパルス数を測定した。

測定条件 (tip)

ステップ角のモード : full step
駆動電流値 : 0.600[A]

測定結果 (tip)

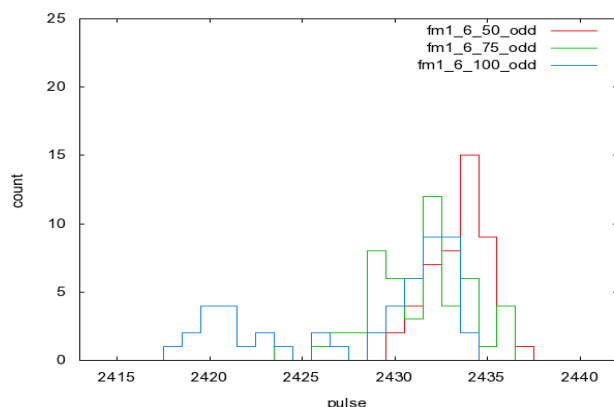


図 60 FM1 tip FOR

駆動速度度 [Hz]	50	75	100
最頻値 [pulse]	2434	2432	2432
最頻値の割合 [%]	30	24	18
分散 [pulse]	1.68	2.79	6.51
脱調の評価	なし	あり	あり

表 5 FM1 tip FOR data

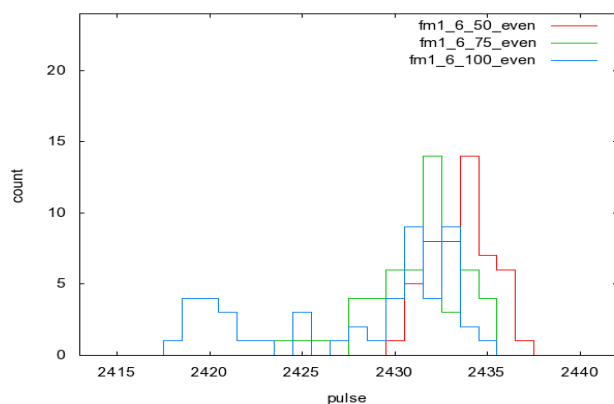


図 61 FM1 tip REV

駆動速度 [Hz]	50	75	100
最頻値 [pulse]	2434	2432	2431
最頻値の割合 [%]	28	28	18
分散 [pulse]	1.70	2.64	6.22
脱調の評価	なし	あり	あり

表 6 FM1 tip REV data

図は X 軸パルス数、Y 軸回数のヒストグラムを表し、速度の遅い方から赤線、緑線、青線の示している。また表は各駆動速度での最頻値 [pulse]、最頻値の割合 [%]、分散 [pulse]、脱調の評価をしている。以下の各ユニットの図と表でも同様である。

図 60 と図 61 から速度が大きいと最頻値のパルス数が小さくなっている。また表 5 と表 6 から分散は速度が大きいと大きくなる傾向がみられる。このばらつきの原因はモータの脱調やセンサのノイズが考えれる。また速度が 50[Hz] だと 3σ の外にでることはなく、かつ分散値が小さいためこの速度で回転すべきである。

測定条件 (tilt)

ステップ角のモード : full step

駆動電流 : 0.423[A]

測定結果 (tilt)

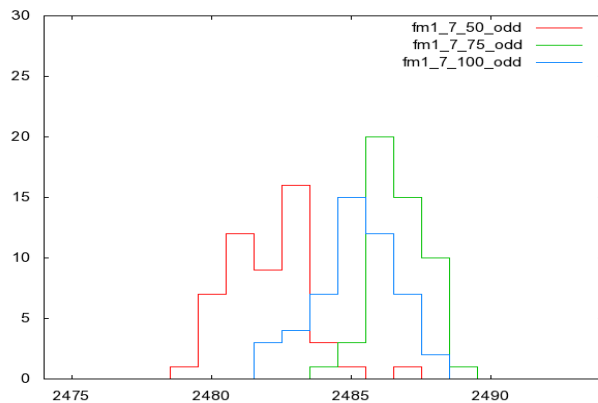


図 62 FM1 tilt FOR

駆動速度 [Hz]	50	75	100
最頻値 [pulse]	2483	2486	2485
最頻値の割合 [%]	32	40	30
分散 [pulse]	1.80	1.20	1.48
脱調の評価	なし	なし	なし

表 7 FM1 tilt FOR data

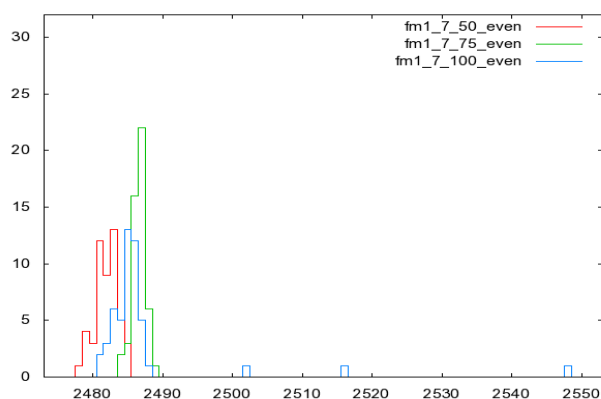


図 63 FM1 tilt REV

駆動速度 [Hz]	50	75	100
最頻値 [pulse]	2483	2487	2485
最頻値の割合 [%]	26	44	26
分散 [pulse]	1.97	1.07	5.36
脱調の評価 [回]	なし	なし	あり

表 8 FM1 tilt REV data

図 62 から速度 100Hz において脱調があった。また表 7 と表 8 から速度 50[Hz]、75[Hz] だと 3σ の外にでることはなく、かつ分散値も小さいため安定して回転できる。

■シャッター シャッターユニットは Opne と Close の 2 つのモードがあり、ホイールではないので可動範囲が決まってくる。シャッターの可動範囲を測定するために Close 側のセンサ (REV) から Open 側のセンサ (FOR) の距離とその逆の Open 側のセンサ (FOR) から Close 側のセンサ (REV) までの距離を測定した。測定条件と測定結果は下記で示される。

測定条件

ステップ角のモード half step
駆動電流値 0.537[A]

測定結果

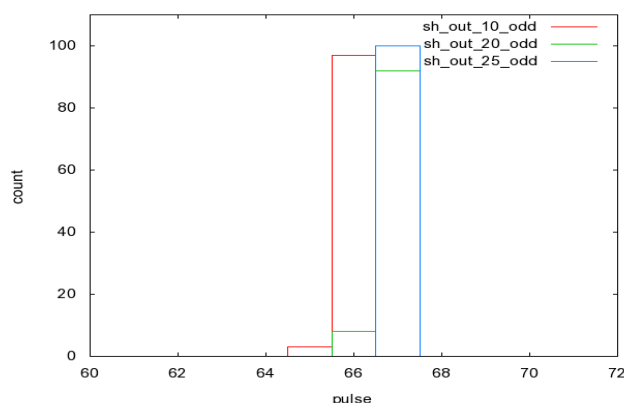


図 64 shutter FOR

駆動速度 [Hz]	10	20	25
最頻値 [pulse]	66	67	67
最頻値の割合 [%]	97	92	100
分散 [pulse]	0.00	0.00	0.00
脱調の評価	なし	なし	なし

表 9 shutter FOR deta

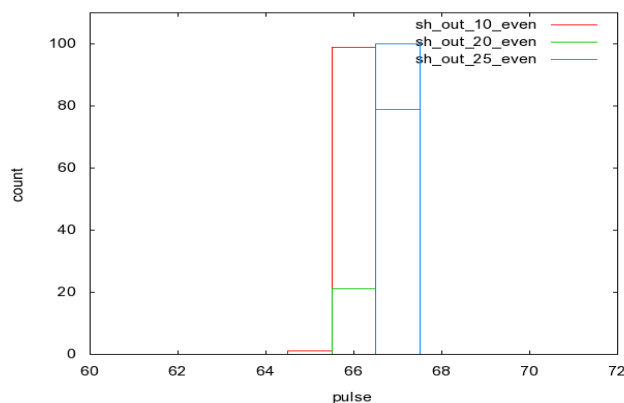


図 65 shutter REV

駆動速度 [Hz]	10	20	25
最頻値 [pulse]	66	67	67
最頻値の割合 [%]	99	79	100
分散 [pulse]	0	0.46	0.00
脱調の評価	なし	なし	なし

表 10 shutter REV deta

図 64 と図 65 は赤線が 10[Hz]、緑線が 20[Hz]、青線が 25[Hz] での駆動速度を示している。図 64 と図 65 からどの速度でも最頻値のパルス数がほとんど変わらない。また表 9 と表 10 から分散は各速度で 1 以下なので脱調していないとみなす。またシャッターの余韻幅 22pulse に対して 3pulse のばらつきであるため、十分な精度であると評価できる。

■切替鏡 切替鏡の測定は可動範囲を求めた。切替鏡の可動範囲を測定するために分光モード側のセンサ (REV) から撮像モード側のセンサ (FOR) の距離とその逆の撮像モード側のセンサ (FOR) から分光モード側のセンサ (REV) までの距離を測定した。

測定条件

ステップ角のモード : half step

駆動電流値 : 0.225[A]

測定結果

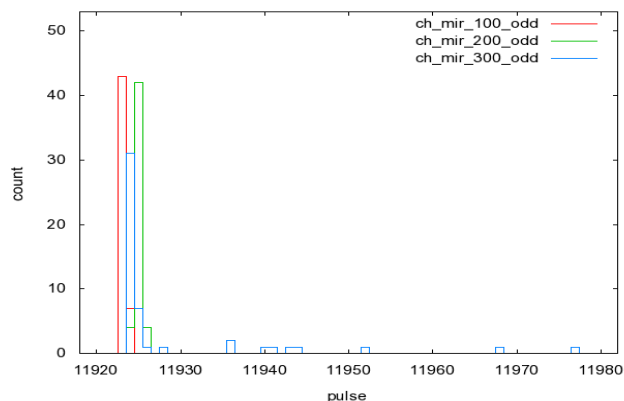


図 66 change mirror FOR

駆動速度 [Hz]	100	200	300
最頻値 [pulse]	11923	11925	11924
最頻値の割合 [%]	86	84	63
分散 [pulse]	0.37	0.40	7.23
脱調の評価	なし	なし	あり

表 11 change mirror FOR deta

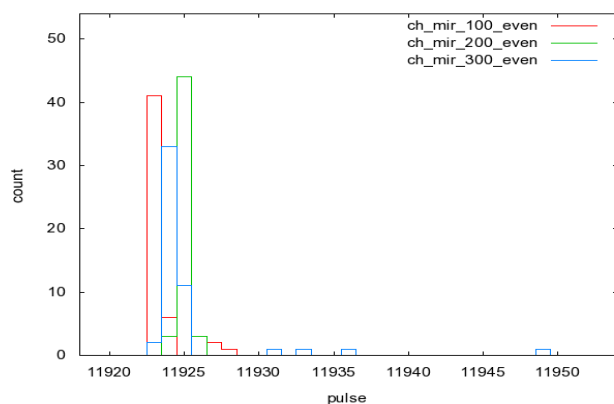


図 67 change mirror REV

駆動速度 [Hz]	100	200	300
最頻値 [pulse]	11926	11925	11924
最頻値の割合 [%]	82	88	66
分散 [pulse]	1.13	0.35	2.45
脱調の評価	あり	なし	あり

表 12 change mirror REV deta

図 66 と図 67 は X 軸パルス数、Y 軸回数のヒストグラムを表している。また赤線が 100[Hz]、緑線が 200[Hz]、青線が 300[Hz] での駆動速度を示している。図 66 と図 67 から駆動速度が 100[Hz] で脱調があったと考えられる。また表 9 と表 10±3σ が 300[Hz] を除き 3pulse で収まっている。そのため 7.5μm のずれが生じるが 1pix(75μm) に対してとても小さいため問題ない。REV 回転のとき 100[Hz] と 300[Hz] で脱調がみられた。よって電流値が小さいかったと考えられる。

■**撮像フィルターホイール** 撮像フィルターホイールユニットはホイール 1 に対して、5 つのフィルターが備わっている。実験ではラッチ機構から 100pulse 回転させ、さらにそこから同じ回転方向に回転させ、センサで止まるまでのパルス数の測定をそれぞれの速度で行った。求める区間は図 43 から AB、BC、CD、DE、EA の 5 つである。また撮像フィルターユニットには 2 つのホイールがあり、入射窓に近い方を撮像フィルター 1、撮像検出器側を撮像フィルター 2 とする。

撮像フィルター 1

測定条件

ステップ角のモード half step
 駆動電流 1.148[A]
 回転方向 FOR

測定結果

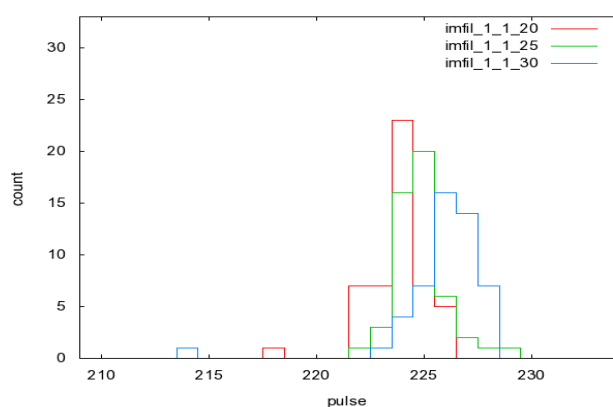


図 68 Im filter 1-1

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	224	225	226
最頻値の割合 [%]	46	39	32
分散 [pulse]	1.14	1.24	1.24
脱調の評価	あり	なし	あり

表 13 Im filter 1-1 data

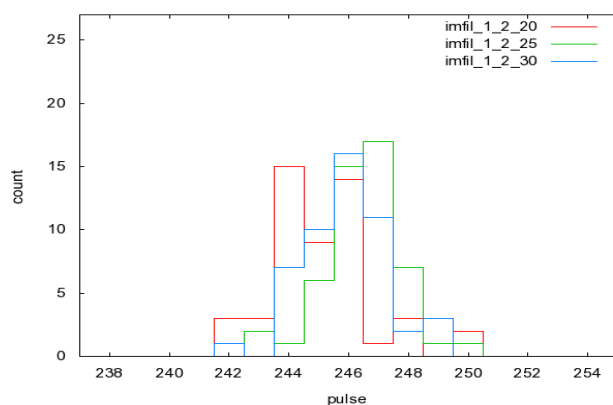


図 69 Im filter 1-2

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	244	247	246
最頻値の割合 [%]	30	34	32
分散 [pulse]	2.06	1.42	1.43
脱調の評価	あり	なし	なし

表 14 Im filter 1-2 data

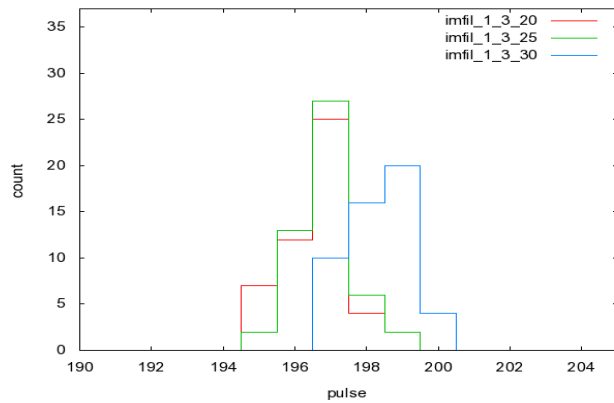


図 70 Im filter 1-3

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	197	197	199
最頻値の割合 [%]	50	50	40
分散 [pulse]	1.03	0.84	1.11
脱調の評価	なし	なし	なし

表 15 Im filter 1-3 data

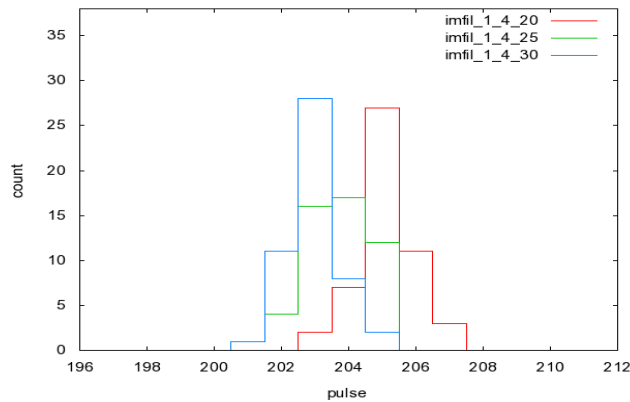


図 71 Im filter 1-4

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	205	204	203
最頻値の割合 [%]	54	92	56
分散 [pulse]	0.88	1.04	0.79
脱調の評価	なし	なし	なし

表 16 Im filter 1-4 data

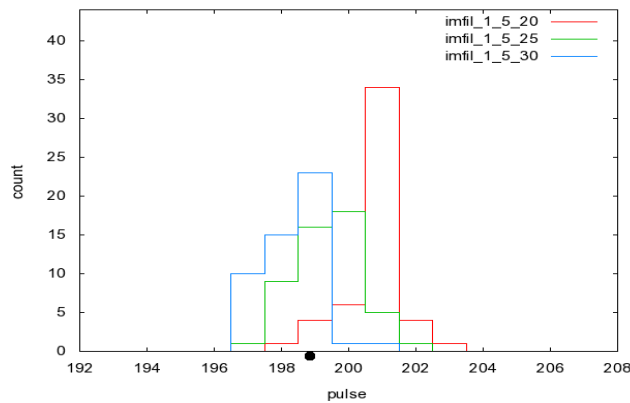


図 72 Im filter 1-5

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	201	200	199
最頻値の割合 [%]	68	36	46
分散 [pulse]	0.79	1.20	1.11
脱調の評価	なし	なし	なし

表 17 Im filter 1-5 data

図 68, 図 69, 図 70, 図 71, 図 72 は赤線が 20[Hz]、緑線が 25[Hz]、青線が 30[Hz] での駆動速度を示している。図 68 と図 69 から脱調があったと考えられる。この原因は電流値が小さかったと考えらる。また表 13 と表 17 からどの σ を 6 倍してもラッチの効く幅 (14pulse) より小さいことがわかる。よって充分ラッチの効く範囲に収まっている。

撮像フィルター 2

測定条件

ステップ角のモード half step
 駆動電流 0.381[A]
 回転方向 REV

測定結果

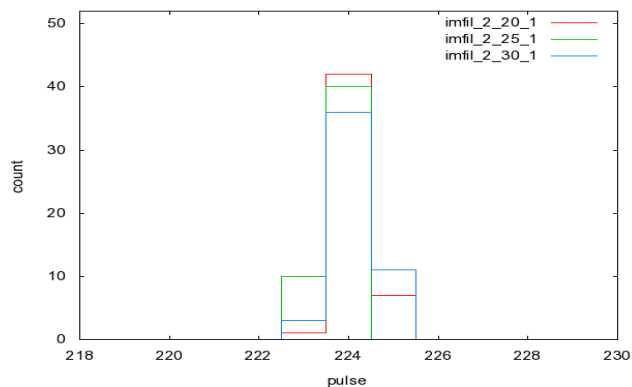


図 73 Im filter 2-1

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	223	224	224
最頻値の割合 [%]	84	80	72
分散 [pulse]	0.40	0.45	0.53
脱調の評価	なし	なし	なし

表 18 Im filter 2-1 data

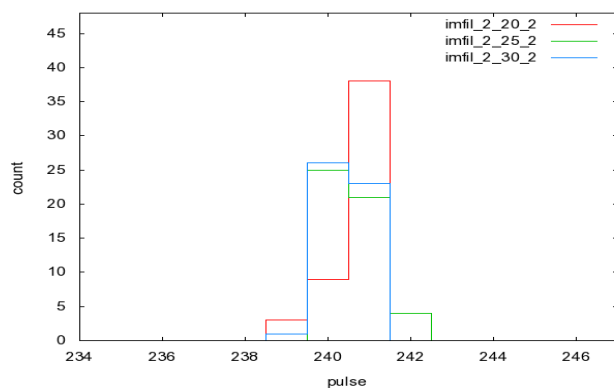


図 74 Im filter 2-2

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	241	240	240
最頻値の割合 [%]	76	50	52
分散 [pulse]	0.65	0.87	0.70
脱調の評価	なし	なし	なし

表 19 Im filter 2-2 data

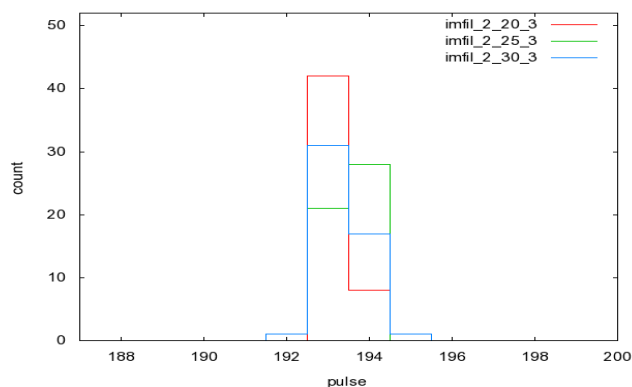


図 75 Im filter 2-3

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	193	194	193
最頻値の割合 [%]	84	56	62
分散 [pulse]	0.40	0.71	0.67
脱調の評価	なし	なし	なし

表 20 Im filter 2-3 data

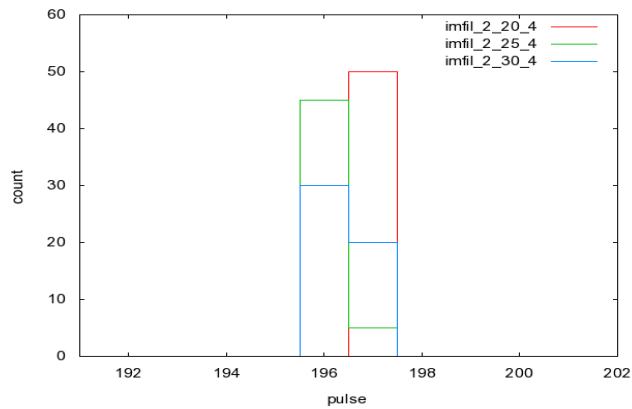


図 76 Im filter 2-4

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	197	196	196
最頻値の割合 [%]	100	90	60
分散 [pulse]	0.00	0.00	0.63
脱調の評価	なし	なし	なし

表 21 Im filter 2-4 data

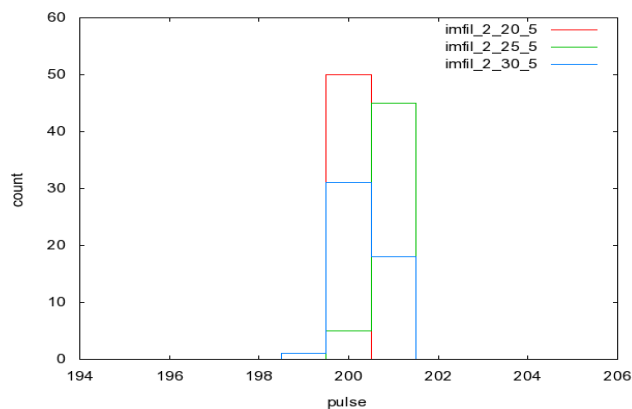


図 77 Im filter 2-5

駆動速度 [Hz]	20	25	30
最頻値 [pulse]	200	201	200
最頻値の割合 [%]	100	90	62
分散 [pulse]	0.00	0.31	0.62
脱調の評価	なし	なし	なし

表 22 Im filter 2-5 data

図 68、図 69、図 70、図 71、図 72 は赤線が 20[Hz]、緑線が 25[Hz]、青線が 30[Hz] での駆動速度を示している。図 73-図 77 から脱調はみられなかった。また表 18-表 22 から全体的に分散値が小さく、フィルターのあそび幅に対して十分な精度を出すことができた。

■**レンズホイール** レンズホイールは撮像レンズと瞳レンズを適宜交換する。レンズを交換するためにはホイールを半周させなければならない。その距離は 750pulse(harf step) 分に相当する。交換するときの動きは a:レンズ 1(ラッチ機構が働いている状態) →センサで停止 b:センサ停止→レンズ 2(ラッチ機構のベアリングがくぼみに入る)c:カレントオフによってラッチ機構が働く→レンズの中心と光軸が一致する、の 3 つに分けることができる。レンズ 1 からセンサによって停止するところまで動いたときにセンサが効くタイミングに誤差が生じる。この原因は脱調やノイズによるものである。そのためレンズ 1 からセンサまでの距離 (パルス数) にばらつきが生じる。このばらつきがラッチ機構が働く範囲より小さくなければならない。ラッチ機構が働く範囲はレンズが光軸中心から ± 20 pulse 分ずれても効くことが測定でわかっている。また速度が異なることでばらつきの違いが生じるかと考えられるので 3 種類の速度で実験を行った。測定条件と結果を下記に示す。

測定条件

ステップ角のモード : half step
 駆動電流 : 0.727[A]
 回転方向 : FOR

測定結果

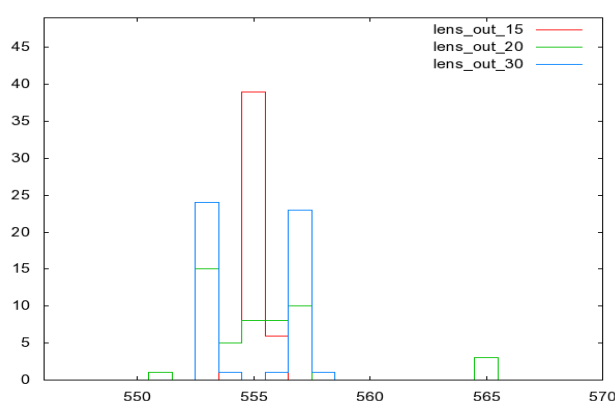


図 78 lens

駆動速度 [Hz]	15	20	30
最頻値 [pulse]	555	553	553
最頻値の割合 [%]	78	30	48
分散 [pulse]	0.47	2.43	2.87
脱調の評価	なし	あり	あり

表 23 lens data

図 78 は赤線が 15[Hz]、緑線が 20[Hz]、青線が 30[Hz] での駆動速度を示している。図 78 から 20[Hz] で脱調がみられた。また表 23 から全体的に分散値が小さく、ラッチ機構が効く範囲に収まっていることがわかった。速度を上げると分散が大きくなった。

5.2.2 常温下でのラッチの動作確認

ラッチ機構があるユニット (撮像フィルターホイールユニット、レンズホイールユニット) ではラッチ機構の有効に働いているか確認する必要がある。ラッチ機構が有効に働いていることを確認するためには基準値からセンサまで動かし、その後、基準点まで再び動かす。その際に事前に測定した値より ± 数パルス動かし、あえて基準点からずらす。動作後、カレントオフ機能を使用してラッチ機構を働かせる。そして再び、基準点からセンサで止まるまで動かし、この動いたパルス数を測定する。仮にラッチ機構が有効に働いた場合はセンサ間まで測定した結果と同じ結果が得られる。しかし、ラッチが無効だった場合、センサまでの測定結果より、数パルス分ずれた結果が得られる。

■**レンズホイール** ラッチが有効であるか検証するための実験を行った。レンズホイールはセンサから基準点までの距離が 185pulse に相当することがわかっている。またレンズホイールのラッチ機構は ±20pulse まで働き、かつ上記の試験の結果から分散が 3pulse 分であることを考慮してセンサから基準点までを 185 ± 10 pulse で駆動させた。

測定条件

センサから基準点までを 185 ± 10 pulse で駆動

ステップ角のモード : half step
駆動電流 (図 79-図 79) : 0.5
駆動電流 (図 82-図 82) : 0.7[A]
回転方向 : FOR

測定結果

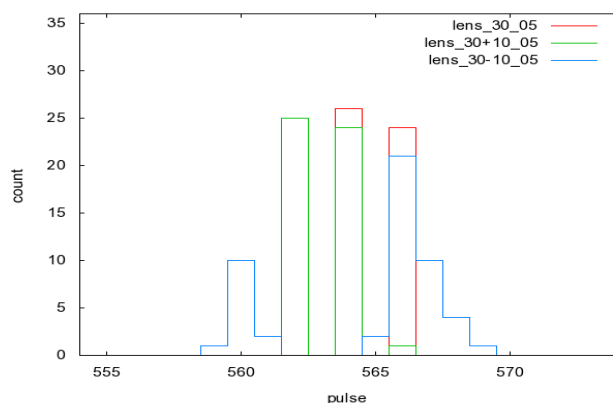


図 79 lens 0.5A nomal 30Hz

駆動距離 [pulse]	185	175	195
最頻値 [pulse]	564	562	566
最頻値の割合 [%]	52	50	42
分散 [pulse]	1.40	1.51	0.51
脱調の評価	なし	なし	なし

表 24 lens 0.5A nomal 30Hz data

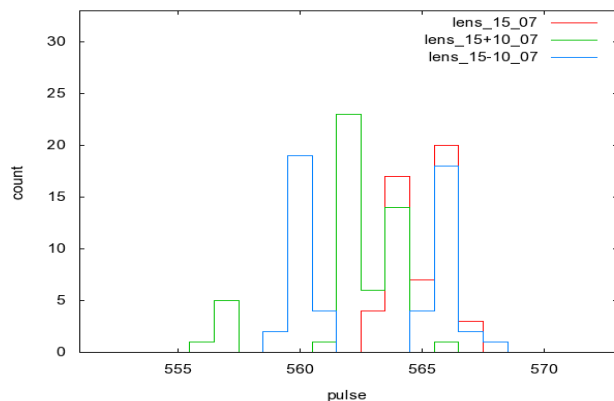


図 80 lens 0.7A nominal 15Hz

駆動距離 [pulse]	185	175	195
最頻値 [pulse]	566	562	560
最頻値の割合 [%]	40	46	38
分散 [pulse]	1.46	2.16	4.16
脱調の評価	なし	なし	なし

表 25 lens 0.7A nominal 15Hz data

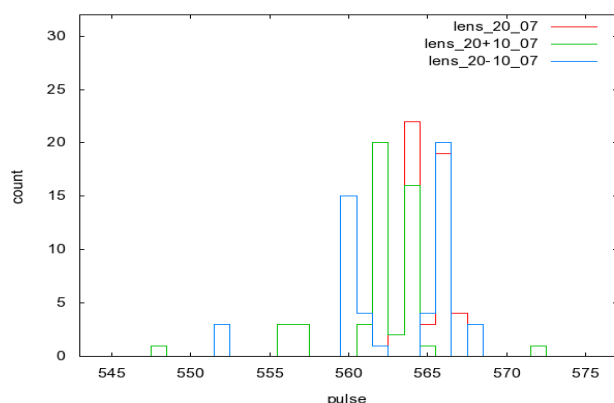


図 81 lens 0.7A nominal 20Hz

駆動距離 [pulse]	185	175	195
最頻値 [pulse]	564	562	566
最頻値の割合 [%]	44	40	40
分散 [pulse]	0.25	0.40	0.63
脱調の評価	なし	なし	なし

表 26 lens 0.7A nominal 20Hz data

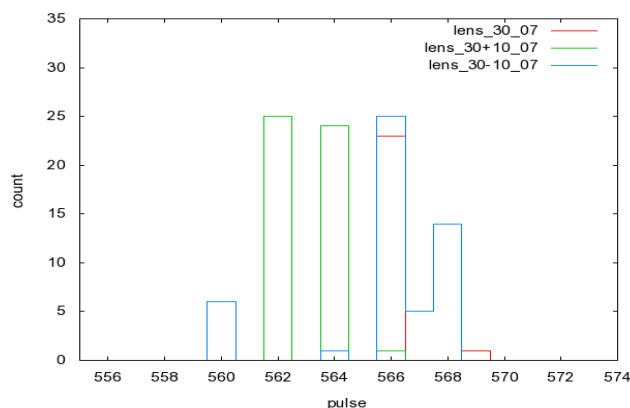


図 82 lens 0.7A nominal 30Hz

駆動距離 [pulse]	185	175	195
最頻値 [pulse]	564	562	566
最頻値の割合 [%]	48	50	50
分散 [pulse]	0.0	1.51	2.35
脱調の評価	なし	なし	あり

表 27 lens 0.7A nominal 30Hz data

図 79-図 82 は赤線が 185[pulse]、緑線が 175[pulse]、青線が 195[pulse] の駆動距離別で示している図 79-図 82 からすべての速度でも標準駆動距離 185[pulse] のヒストグラムに対して標準駆動距離から ± 10 pulse ずらして駆動させたヒストグラムのずれがほとんどが 10 pulse 以下であるためラッチは有効に働いていると考えられる。標準からのずれが生じる原因としてラッチ機構が完全に働いていないと考えられる。ラッチ機構を基準点に合せ、カレントオフにし、手でラッチに触れると微小に動く。よって微小に動く幅があるため、ラッチが有効になると必ず基準点に合わさらないと考えられる。

5.2.3 常温下でのレンズホイールの再現性

ラッチ機構がさまざまな回転速度でもある程度有効に働くことがわかったので、再現性について考える。ホイールが回転し、レンズが光学的な位置で止まったときに、回転する前と後ではずれが生じる。このずれ量は検出器上で同じだけずれる (図 83 参照)。このずれ量は解析で必要になってくる。

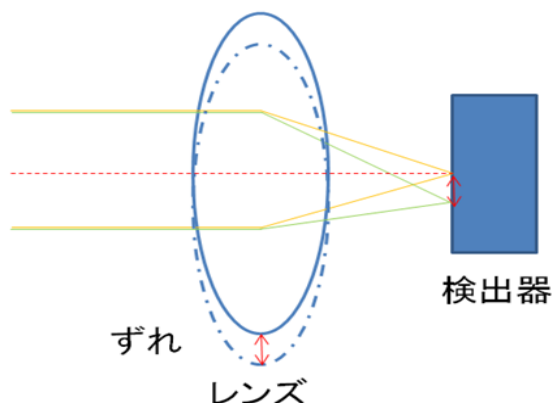


図 83 レンズと検出器の光軸のずれ

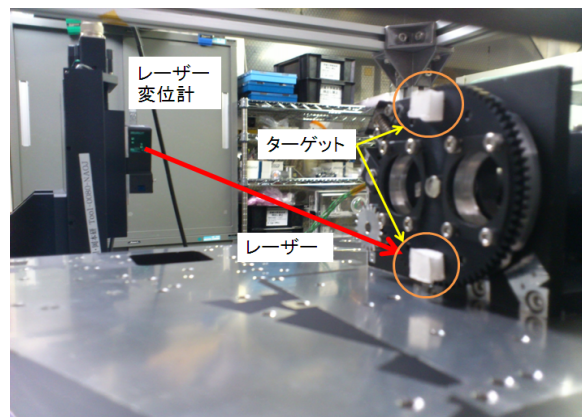


図 84 レンズホイールの再現性の試験概念図

測定方法

レンズホイールに一辺約 7mm の立方体的な磁石のギア側に 2 箇所取り付け (図 84 参照)。この的的位置を光軸に垂直な方向からレーザー変位計で測定する)。使用するレーザー変位計は KEYENCE レーザー変位計 (型式:LK-G 500) で、的との距離間を測定することができる。ホイールを一回転させて、レンズ位置の再現性を測定できる。また回転方法は上記の実験と同じである。目標値は 1 ピクセル以内である。

測定条件

KEYENCE レーザー変位計は $1\mu\text{m}$ の位まで測定できるが、 $1\mu\text{m}$ の位はノイズがのり随時値が乱れてしまう。そのため信用性に欠けるため、 $10\mu\text{m}$ までの値で示す。測定結果は測定値の最小値を全体から引いた量を示す。X 軸が $10\mu\text{m}$ 、Y 軸が回数のヒストグラムで表されている。またモータの 1 パルスはレンズ位置では $8.38 \times 10^{-2}[\text{mm}]$ である。

測定結果とまとめ

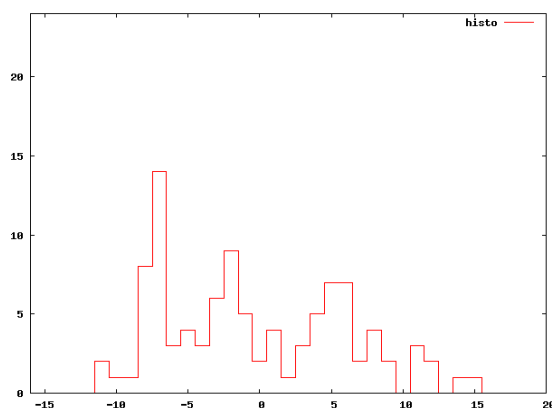


図 85 レンズホイールの再現性の結果

測定結果よりズレの最大値が $260\mu\text{m}$ で、レンズ位置に換算すると $173\mu\text{m}$ である。撮像検出器の 1 ピクセルの大きさは $75\mu\text{m}$ である。よって約 2.3 ピクセルに相当する。この値は目標値 1pix より大きくなってしまった。しかし、レンズホイールユニットは観測中撮像用のレンズを使用して、瞳用レンズに切り替えるこ

とはない。よってレンズホイール撮像画像が 2.3 ピクセルずれると考慮して解析を行なえば問題はない。ズレてしまった原因として、レンズホイールユニットのホイール回転軸のゆがみ、ラッチ機構が完全に有効に働いていないの二つが考えられる。回転軸のゆがみは回転軸 (ヒンジピン) と回転軸を通す穴の隙間によって出来ている。そこでヒンジピンを伸ばし、ぶれを軽減させる方法がある。また公差を小さくして、かつ潤滑剤を使用して摩擦を軽減させる方法も考えられる。またレンズホイールのラッチ機構はラッチの先端部分にあるヒンジピンとホイールについている歯車が接触しているヶ所があるため、摩擦が生じ、ラッチが動きにくくなっている。そのため、ヒンジピンの接触部分を削れば問題を解決できる。

5.2.4 極低温下での最小適正電流値測定

適切な駆動電流値を測定するためには、実際に極低温下で動いているか確認する。確認方法は真空容器の外壁の窓から中を覗き込み動いているか確認する。駆動電流値は 0.1 刻みで変化させる。各駆動電流値で駆動させるとモータが駆動しない電流値と駆動電流値の境がわかる。その境から 0.2[A] だけ大きい値を使う。境の値を使用すると途中でモータが駆動しなくなってしまうことが考えら得るからである。実際に数回の駆動で駆動しなくなっているか確認するために極低温下でも実験 1 を行った。

■**レンズホイール** 駆動パターンは常温下で行った試験と同様にし、駆動電流を変化させて、外壁窓から中を除き視覚的に駆動しているかどうかを確認した。

自起動速度	電流	回転の評価
40Hz	MAX(1A 強)	○
20Hz	MAX(1A 強)	○
20Hz	0.7[A]	○
20Hz	0.5[A]	○
20Hz	0.4[A]	×
20Hz	0.3[A]	×
20Hz	0.2[A]	×

回転評価の「○」は回転したことを示し、「×」は回転しなかったことを示す。結果から駆動電流が 0.5[A] 以上で駆動することがわかった。そこで 0.5[A] と 0.7[A] で駆動させ、基準点から位置からセンサが効くまでのパルス数を測定し、そのばらつきについて評価した。

測定条件

ステップ角のモード : half step

駆動電流 (図 86) : 0.5[A]

駆動電流 (図 87) : 0.7[A]

測定結果

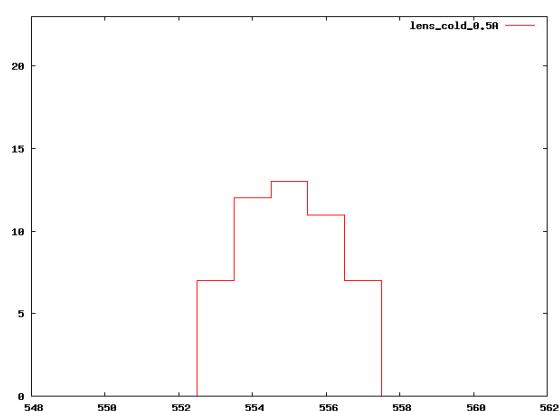


図 86 lens cold 0.5A

自起動速度と最高速度 [Hz]	20
最頻値 [pulse]	555
最頻値の割合 [%]	26
分散 [pulse]	1.27
脱調の評価	なし

表 28 lens cold 0.5A data

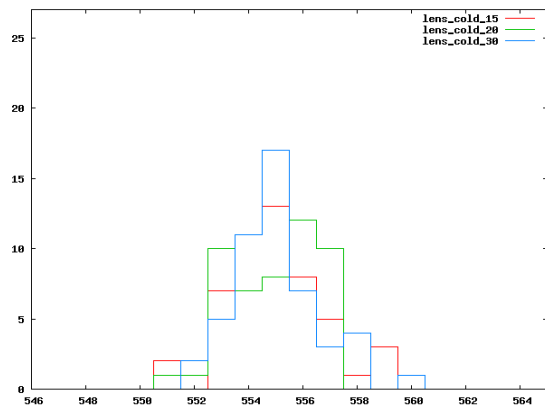


図 87 lens cold 0.7A

駆動速度 [Hz]	15	20	30
最頻値 [pulse]	555	556	555
最頻値の割合 [%]	26	24	34
分散 [pulse]	1.78	1.98	1.47
脱調の評価 [回]	なし	なし	なし

表 29 lens cold 0.7A data

図 86 と図 87 は赤線が 15[Hz]、緑線が 20[Hz]、青線が 30[Hz] での駆動速度を示している。図 86 と図 87 から脱調はみられなかった。表 28 と表 29 から全体的に分散値が小さく、ラッチ機構が効く範囲に収まっていることがわかった。また 0.5[A] で駆動させても脱調はなかった。そのため駆動電流は 0.7[A] の自起動速度を 20[Hz] にする。

■切替鏡 駆動パターンは常温下で行った試験と同様にし、駆動電流を変化させて、外壁窓から中を除き視覚的に駆動しているかどうかを確認する。

自起動速度	電流	回転の評価
100Hz	1[A]	○
100Hz	0.7[A]	○
100Hz	0.6[A]	○
100Hz	0.5[A]	○
100Hz	0.4[A]	×

回転評価の「○」は回転したことを示し、「×」は回転しなかったことを示す。結果から駆動電流が 0.5[A] 以上で駆動することがわかった。そこで 0.5[A] と 0.7[A] で駆動させ、基準点からセンサが効くまでのパルス数を測定し、そのばらつきについて評価した。

測定条件

ステップ角のモード : half step

駆動電流 (図 88、図 89) : 0.5[A]

駆動電流 (図 90、図 91) : 0.7[A]

測定結果

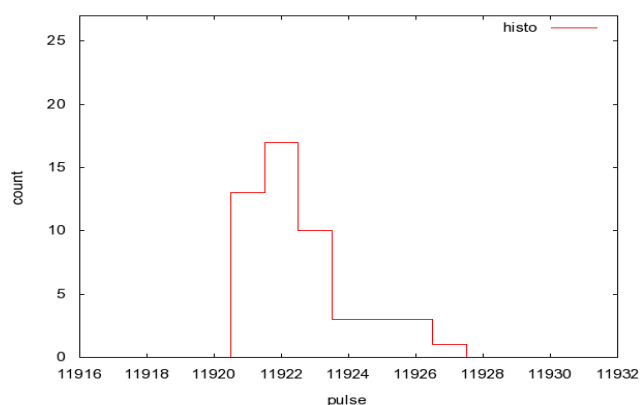


図 88 change mirror cold 0.5A FOR

駆動速度 [Hz]	100
最頻値 [pulse]	11922
最頻値の割合 [%]	34
分散 [pulse]	0.93
脱調の評価	0

表 30 change mirror cold 0.5A FOR data

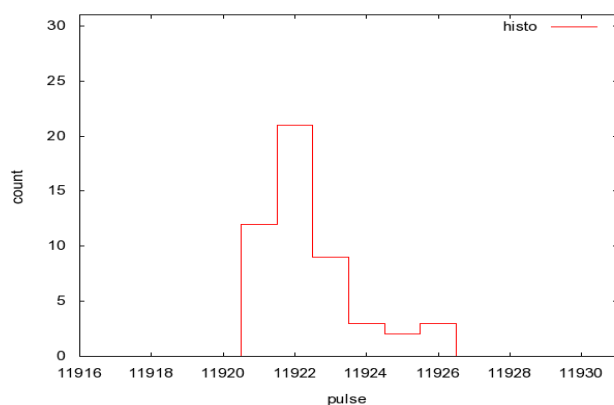


図 89 change mirror cold 0.5A REV

駆動速度 [Hz]	100
最頻値 [pulse]	11922
最頻値の割合 [%]	42
分散 [pulse]	0.99
脱調の評価	0

表 31 change mirror cold 0.5A REV data

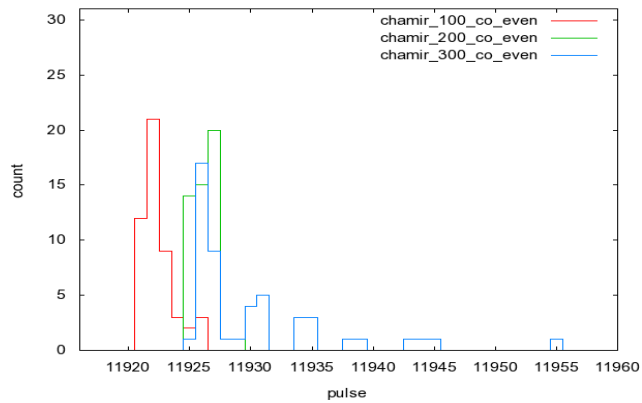


図 90 change mirror cold 0.7A FOR

駆動速度 [Hz]	100	200	300
最頻値 [pulse]	11922	11927	11926
最頻値の割合 [%]	42	40	34
分散 [pulse]	0.98	0.88	4.96
脱調の評価	なし	なし	あり

表 32 change mirror cold 0.7A FOR data

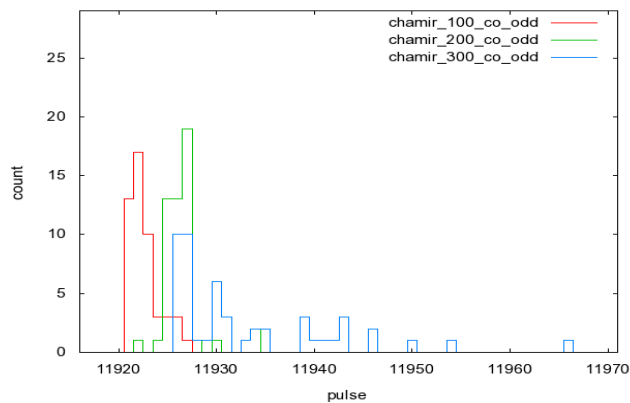


図 91 change mirror cold 0.7A REV

駆動速度 [Hz]	100	200	300
最頻値 [pulse]	11922	11927	11926
最頻値の割合 [%]	34	38	20
分散 [pulse]	0.93	1.15	5.72
脱調の評価	なし	なし	あり

表 33 change mirror cold 0.7A REV data

図 88-図 91 は赤線が 100[Hz]、緑線が 200[Hz]、青線が 300[Hz] での駆動速度を示している。図 88 と図 89 から脱調はみられなかったが図 90 と図 91 の駆動速度 300[Hz] では脱調があった。また表 30 と表 33 から駆動速度 300[Hz] を除き、全体的に分散値が小さいことがわかった。また 0.5[A] で駆動させても脱調はなかった。そのため駆動電流は 0.7[A] で一番安定していた駆動速度を 100[Hz] にする。

5.2.5 極低温下でのラッチの確認

実験方法は実験 2 と同じである。実験 2 のデータと比較して、動作していることを確認する。

■**レンズホイール** ラッチが極低温化で有効であるか検証するための実験を行った。実験方法は常温下と同じである。

測定条件

センサから基準点までを 185 ± 10 pulse で駆動

ステップ角のモード : half step

駆動電流 (図 92) : 0.6[A]

駆動電流 (図 93-図 95) : 0.7[A]

回転方向 : FOR

測定結果

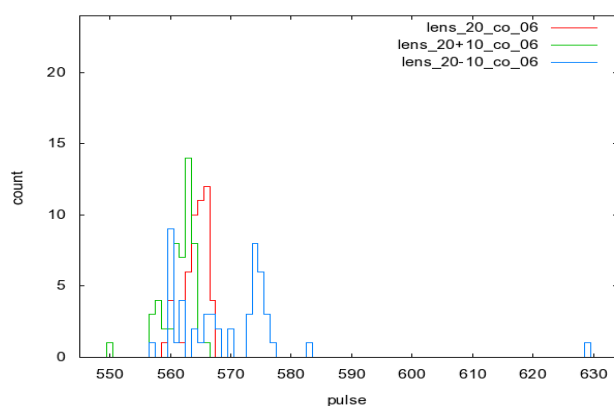


図 92 lens 0.6A cold 20Hz

駆動距離 [pulse]	185	175	195
最頻値 [pulse]	566	560	563
最頻値の割合 [%]	28	18	28
分散 [pulse]	1.48	7.39	1.62
脱調の評価	なし	あり	あり

表 34 lens 0.6A cold 20Hz data

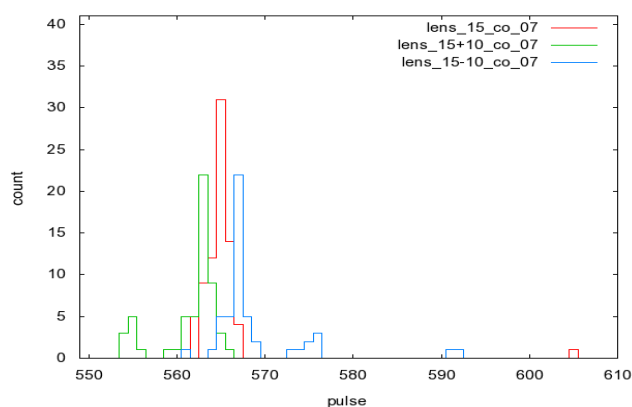


図 93 lens 0.7A cold 15Hz

駆動距離 [pulse]	185	175	195
最頻値 [pulse]	565	567	563
最頻値の割合 [%]	62	44	44
分散 [pulse]	1.25	2.12	1.05
脱調の評価	あり	なし	あり

表 35 lens 0.7A cold 15Hz data

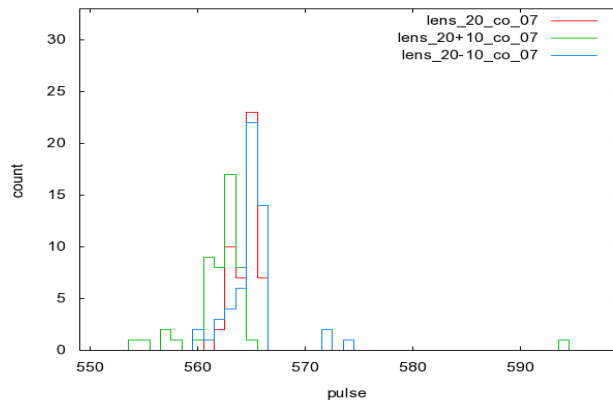


図 94 lens 0.7A cold 20Hz

駆動距離 [pulse]	185	175	195
最頻値 [pulse]	565	565	563
最頻値の割合 [%]	46	44	34
分散 [pulse]	0.81	1.81	1.95
脱調の評価	なし	あり	あり

表 36 lens 0.7A cold 20Hz data

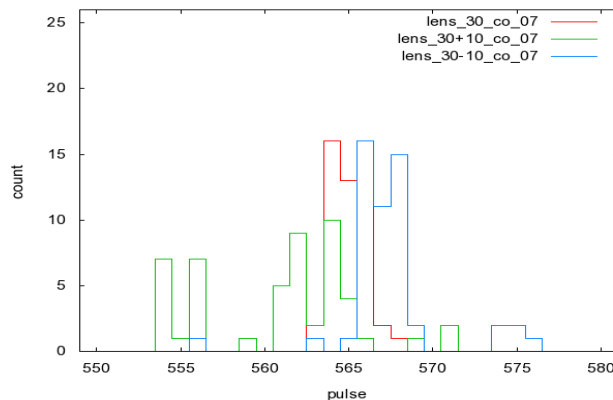


図 95 lens 0.7A cold 30Hz

駆動距離 [pulse]	185	175	195
最頻値 [pulse]	564	566	564
最頻値の割合 [%]	32	32	20
分散 [pulse]	0.99	2.11	1.46
脱調の評価	なし	あり	あり

表 37 lens 0.7A cold 30Hz data

図 92-図 95 は赤線が 185[pulse]、緑線が 175[pulse]、青線が 195[pulse] の駆動距離別で示している。図 92-図 95 からすべての速度でも標準駆動距離 185[pulse] のヒストグラムに対して標準駆動距離から ± 10 pulse ずらして駆動させたヒストグラムのずれがほとんどが 10 pulse 以下であるためラッチは有効に働いていると考えられる。標準からのずれが生じる原因としてラッチ機構が完全に働いていないと考えられる。この原因は常温下での実験と同じである。またホールセンサのノイズも影響していると考えられる。冷却下で実験を行なった際には配線が長くなり、ノイズがのりやすくなっている。そのため、ばらつきは大きくなってしまう。またラッチ機構先端部のベアリングとホイールについているギアの側面がかなり近いので、軸のずれによって接触してしまい、スタックしている可能性もある。他にも速度大きい (30Hz) ではラッチ機構が働いていない場合が多い。よって回転は 15Hz、20Hz で行なった方がよい。以上より、ラッチは有効に働くがばらつきが生じるので必ず基準点に合わせ、20Hz 以下で駆動させなければならないと考えられる。

5.3 ラッチについての考察

実際に使用するときにはラッチの中心位置にパルス数で駆動させ、そこで、カレントオフにすべきである。ラッチによる引き込みはパルス数での制御より再現性が悪いので、ラッチはカレントオフの時に装置全体の向きを変えた場合にホイールが動くのを防ぐ役割と考えるべきである。

6 まとめと今後の展望

6.1 まとめ

本研究では光学素子駆動系のハードウェア開発 (組み立て、改修、センサの開発) とソフトウェア開発 (各ユニット共通プログラム群、各ユニットのアプリケーション開発) を行い、常温下での駆動実験と極低温下での駆動実験を一部行った。

ハードウェア開発ではレンズホイールや撮像フィルターホイールのラッチ機構の開発を行い、カレントオフの状態ではラッチが効く状態に仕上げる事ができた。またリミットスイッチの代わりにホールセンサを用いたスイッチ回路の開発を行い、実際に極低温下で駆動させることができた。ソフトウェア開発では各ユニット共通プログラム群を作成し、それらを組わせて各ユニットのアプリケーションを作成した。また試験用のプログラムも作成し、それらを使い常温下と極低温下でユニットを駆動させることに成功した。また駆動試験の結果から各ユニットのばらつきを求め、モータの駆動範囲の信頼性の評価を行った。

6.2 今後の展望

極低温下での駆動実験がまだすべてのユニットで行われていないため、残りのユニットでも実施しなければならない。また実際にミラーやフィルターやレンズを各ユニットに搭載して極低温試験を行う必要がある。搭載された状態とされていない状態では重さが変わってくるため駆動電流や駆動範囲のパルス数が変化することかもしれない。

シャッターユニットは MIRSIS に搭載した際にモータのカレントオフ機能がオフの状態ではシャッター部を維持できない。そのため維持するためにはラッチ機構の開発が必要である。またシャッターユニットではホールセンサを用いたスイッチ回路を使用しているため、シャッター部にネオジウム磁石を搭載している。現在は仮止めをしている状態なので、シャッター部に磁石を搭載できるように改修が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり多くの方々にご指導とご協力を賜りました。

岡本美子氏には観測装置や天文学の基礎やコンピュータの基礎や製図の方法など、またものごとの考え方や研究の進め方などを丁寧に教えて頂きましたことを深く感謝しております。ISAS/JAXA の片坐宏一氏にはものづくりの楽しさ、測定や解析の方法について教えて頂きましたこと、またレポートや論文を作成するにあたり丁寧な御指導して頂いたことを深く感謝しております。百瀬宗武氏には天文学の基礎を教えて頂き、また野辺山の電波観測実習という貴重な機会を与えて頂きましたこと深く感謝しております。また茨城大学の宇宙観測研究室の皆様や ISAS/JAXA の赤外線・サブミリ波研究の皆様には様々な支援をして頂きましたこと、また良い刺激を頂きましたことを深く感謝致します。

最後に、大学院進学、および日々の生活を支えてくれた家族や友人に感謝致します。
ありがとうございました。

参考文献

- [1] 家正則・岩室史英・舞原俊憲・水本好彦・吉田道利編、「宇宙の観測 I ー光 赤外線天文学」、日本評論社、2007
- [2] Yoshiko Kataza Okamoto, Hirokazu Kataza, Kenji Mitsui, Takashi Onaka 「Development of a test N-band image slicer: optical design」 SPIE 6269 , 2006
- [3] 富田 皓一、茨城大学大学院理工学研究科自然機能科学専攻修士論文、2010
- [4] Yoshiko Kataza Okamoto, Hirokazu Kataza, Keigo Sato, Kei Manabe, Kenji Mitsui, Norio Okada, Mitsuhiro Fukushima, Tetsuo Nishino, Koji Tomita, Masamune Tosa, and Takashi Onaka 「Development of mid-infrared spectrometer with an image slicer (MIRSIS) for ground-based astronomy: developing optical and mechanical mounts」 SPIE 7014 , 2008
- [5] Morialc Wakaki・Keiei kudo・Takehisa shibuya、physical Properties and Date of optical Materials
- [6] 塩沢修/村橋善光, 電子回路設計の基本知 ,CQ 出版社 改訂新版
- [7] HG-106G GaAs Hall Element ASHAHI kASEI MICRODEVICES 社
- [8] 佐藤 圭悟、茨城大学大学院理工学研究科自然機能科学専攻修士論文、2007
- [9] Extreme Environment Stepper Motors VSS/VSH シリーズ 説明書 phytron 社
- [10] 服部 保人、茨城大学理学部物理コース卒業論文、2009
- [11] 中原紀 著、一般教養としての UNIX/Linux(インプレス,2006 年)
- [12] トランジスタ技術 SPECIAL 編集部, センサ活用ハンドブック ,CQ 出版社
- [13] PCI バス対応 4 軸コントローラボード MCI-0410 取扱説明書, マイコム株式会社
- [14] MPG20312 軸超高速パルスジェネレータ LSI 取扱説明書, マイコム株式会社
- [15] 2 相ステッピングモータ用ドライバ IMS20-210(L) 取扱説明書、マイコム株式会社
- [16] 新原佳久・坪井和男・小沢彰 著、小型モータの基礎知識 (オーム社,1985 年)