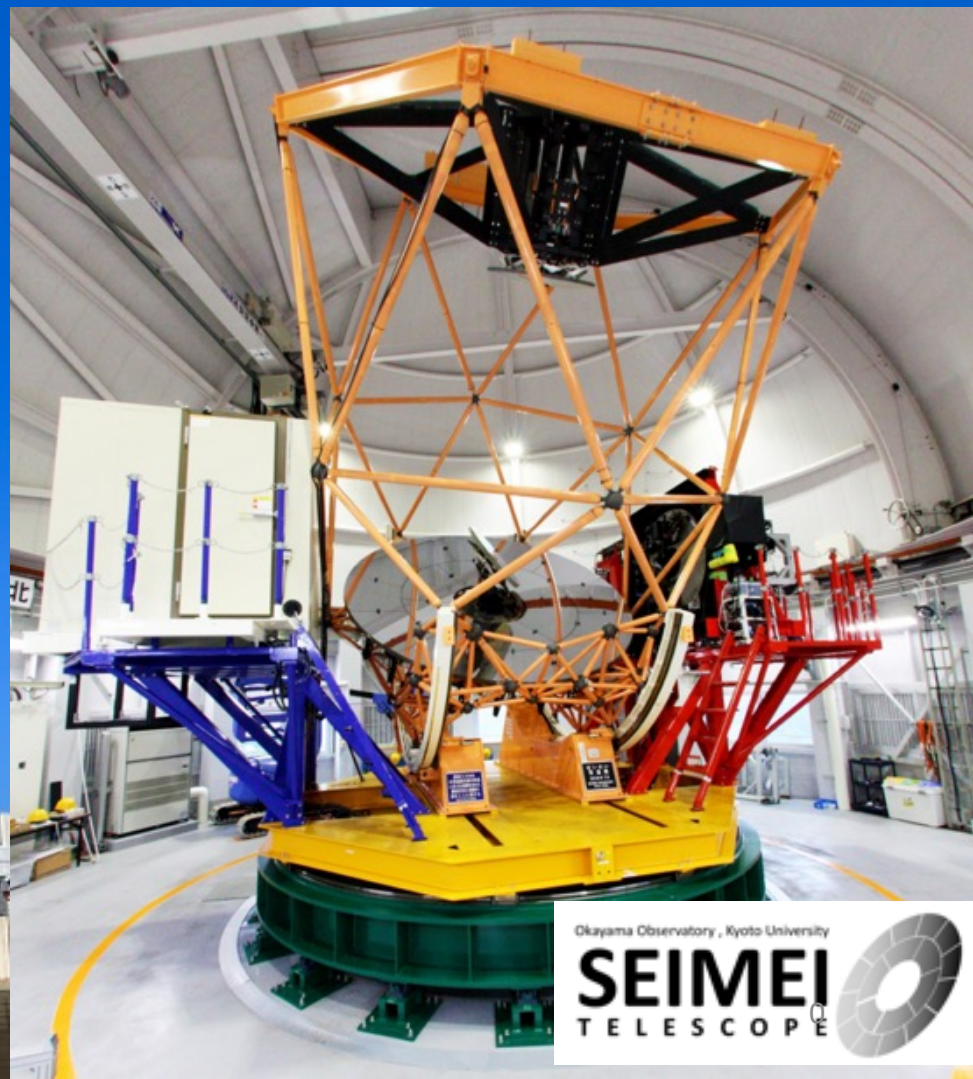
系外惑星撮像装置SEICA開発：全体進捗

〇山本広大(京都大学),
長田哲也, 栗田光樹夫, 木野勝,
〇津久井遼 (京都大学),
入部正継, 高橋陸, 大谷拓也(大阪電気通信大),
河原創(東京大学), 小谷隆行(ABC/NOAJ),
村上尚史(北海道大学),
田村元秀(東京大学/ABC/NOAJ)



本日の内容
・SEICAの紹介/進捗 (山本)
　　設計, 試験,
・点回折干渉計型波面センサ (津久井)

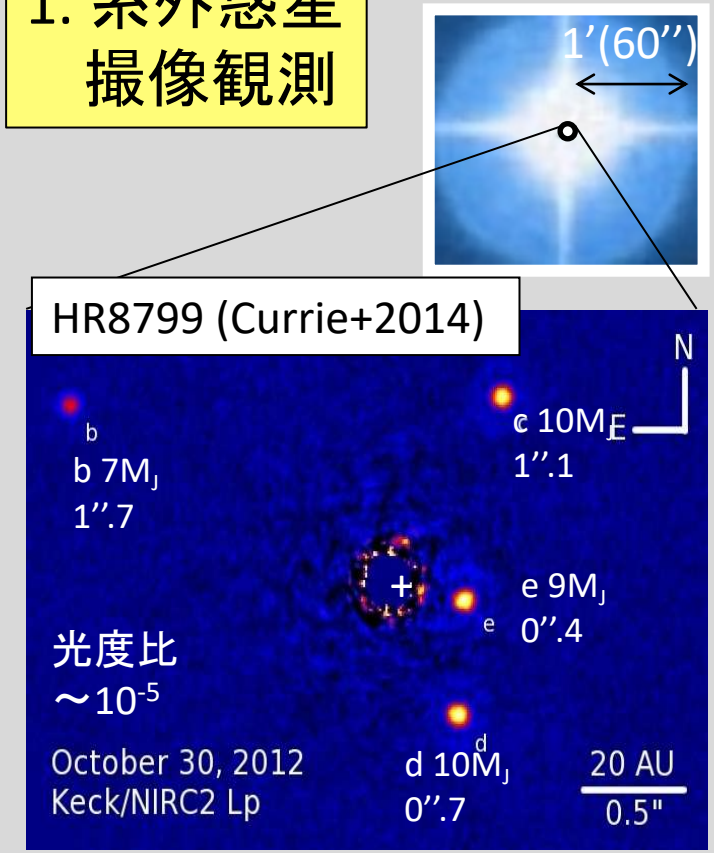
SEICA (Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Adaptive Optics)

目的: **系外惑星直接撮像 + 装置開発**

熱放射

1. 0''.2秒角以遠(2AU@10pc)で**木星質量の惑星の検出 / キャラクタリゼーション**
2. 惑星撮像装置(for TMT)に搭載する**先進技術開発・実証**

1. 系外惑星撮像観測



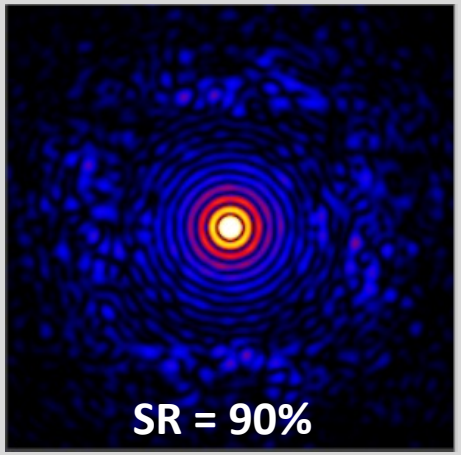
2. 技術開発

補償光学 (ExAO)	◆ FPGA controller for ExAO ◆ 直接位相計測型波面センサ
コロナグラフ	◆ ナリング干渉計型
ポスト-コロナグラフ	◆ スペックルナリング (SLM etc...) ◆ 瞳再配置撮像 ◆ 高分散分光器　など
その他	◆ 分割主鏡ならではの高コントラスト技術 ◆ 高精度温度制御　など開発中

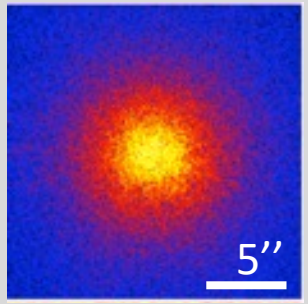
SEICA: ExAO: 仕様と構成

装置目標

高精度 (ストレール比0.9→ λ/20; rms @Hバンド)
→高頻度 (5-10 kHz)
→高空間周波数 (1辺24素子)



望遠鏡から



無補償

1. 低次補償光学

傾斜計測: Tip-Tilt＋Woofer
低速、粗いが大振幅波面制御

Tip-Tilt部 星像を安定

T-T: 2軸
ダイクロ1
λ:0.4-0.5 μm
CPU1
T-T sensor
Frame rate: 100Hz
限界等級: 10mag@B

Woofer部 λ/4程度まで

Woofer DM
88 actuators
ダイクロ2
λ:0.5-0.7 μm
CPU2
SHWFS
Frame rate: 1kHz
限界等級: 8mag@R

2. 高次補償光学

位相計測: Tweeter
高速、高精度波面制御

Tweeter部 λ/20程度

Tweeter DM
492 actuators
ダイクロ3
λ:0.7-0.9 μm
FPGA
位相
波面センサ
Frame rate: 6.5kHz
限界等級: 6mag?

→ コロナグラフ装置へ

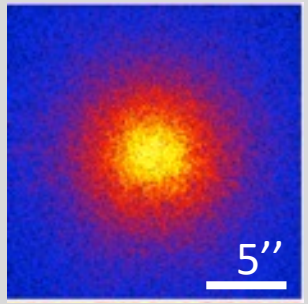
SEICA: ExAO: 低次補償光学系

装置目標

高精度 (ストレール比0.9→ λ/20; rms @Hバンド)
→高頻度 (5-10 kHz)
→高空間周波数 (1辺24素子)

1. 低次補償光学

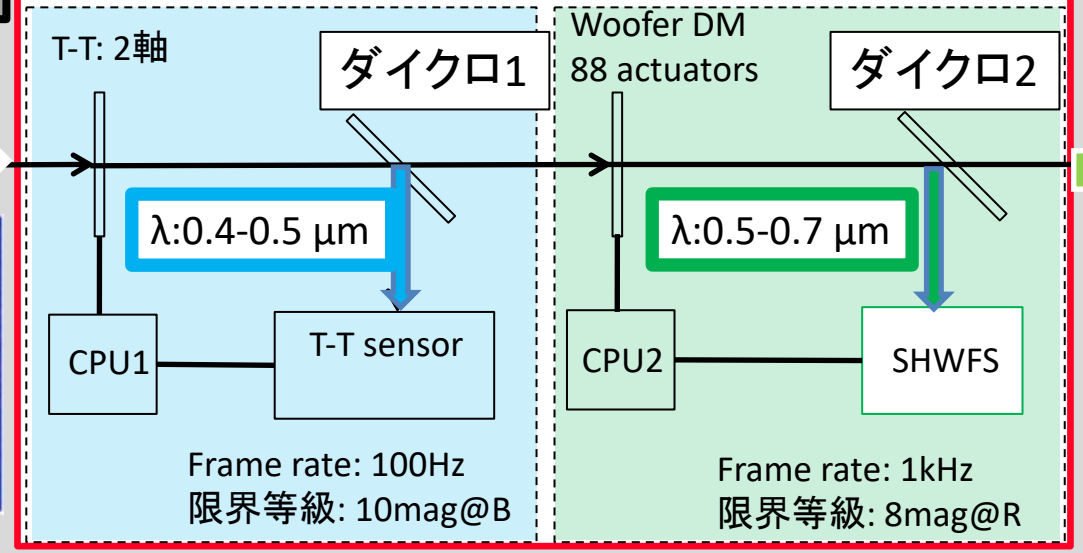
望遠鏡から

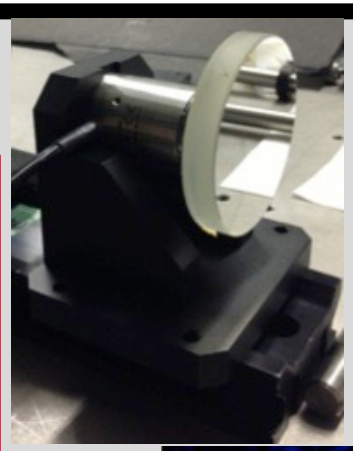


無補償

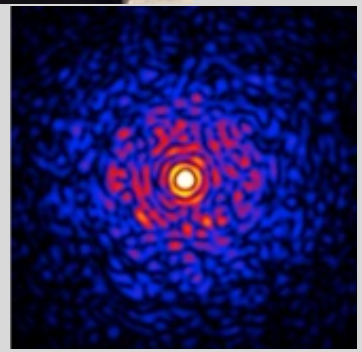
傾斜計測: Tip-Tilt＋Woofer
低速、粗いが大振幅波面制御

Tip-Tilt部 星像を安定　　Woofer部 λ/4程度まで





低次補償用
←アクチュエータ→

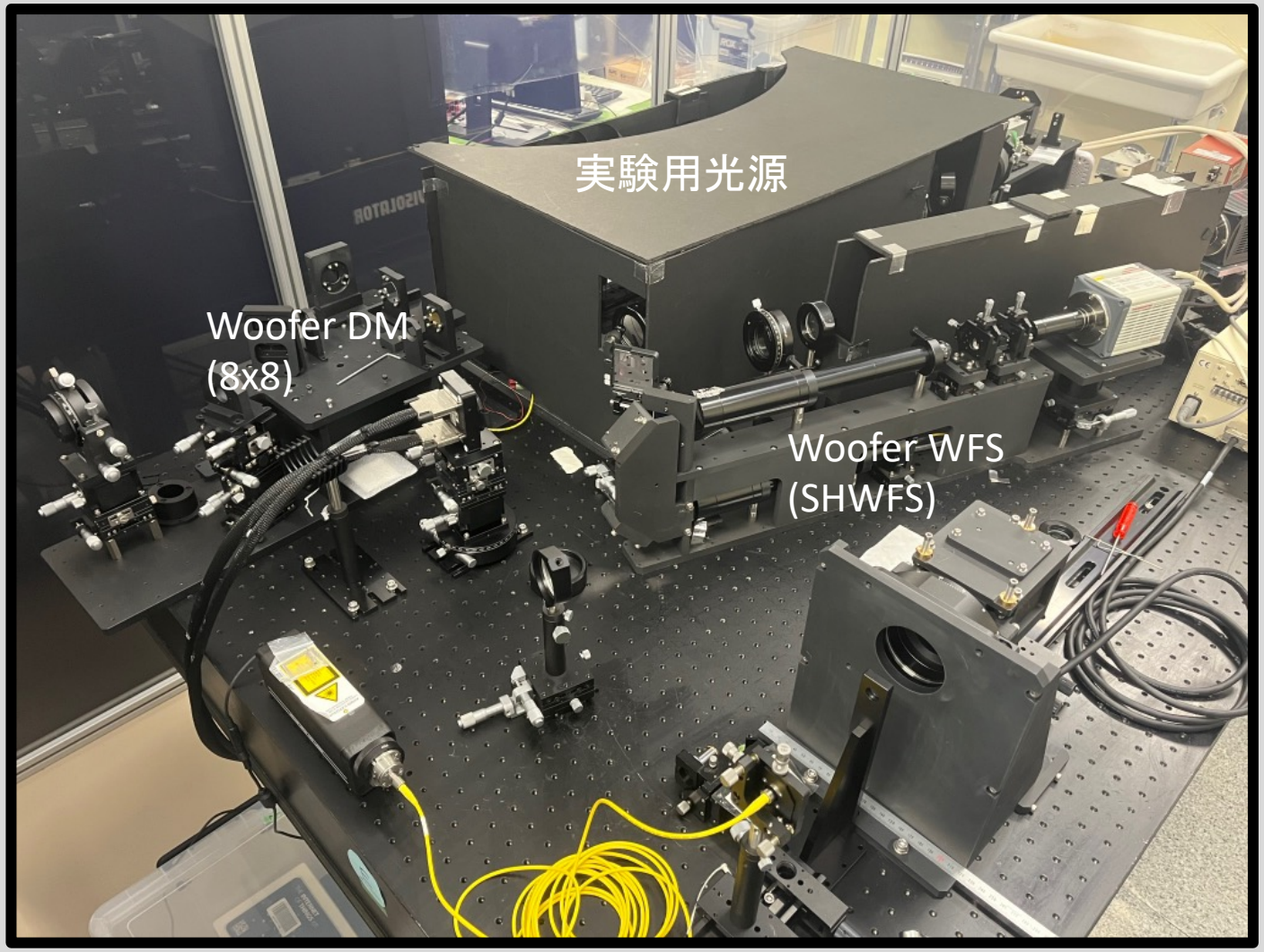


シミュレーション結果

低次補償光学を受けたあとの星像
SR～30—50% (3''x3''; λ=1.6 um)

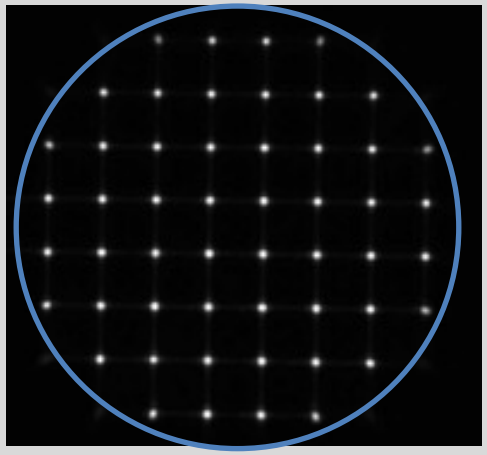
SEICA: 低次補償光学系: 実験室実験

■ 京大実験室にて



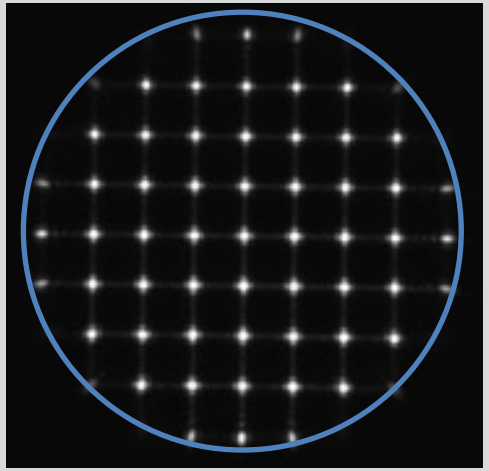
以前の計測点配置

8行8列の52点で
波面傾斜を計測

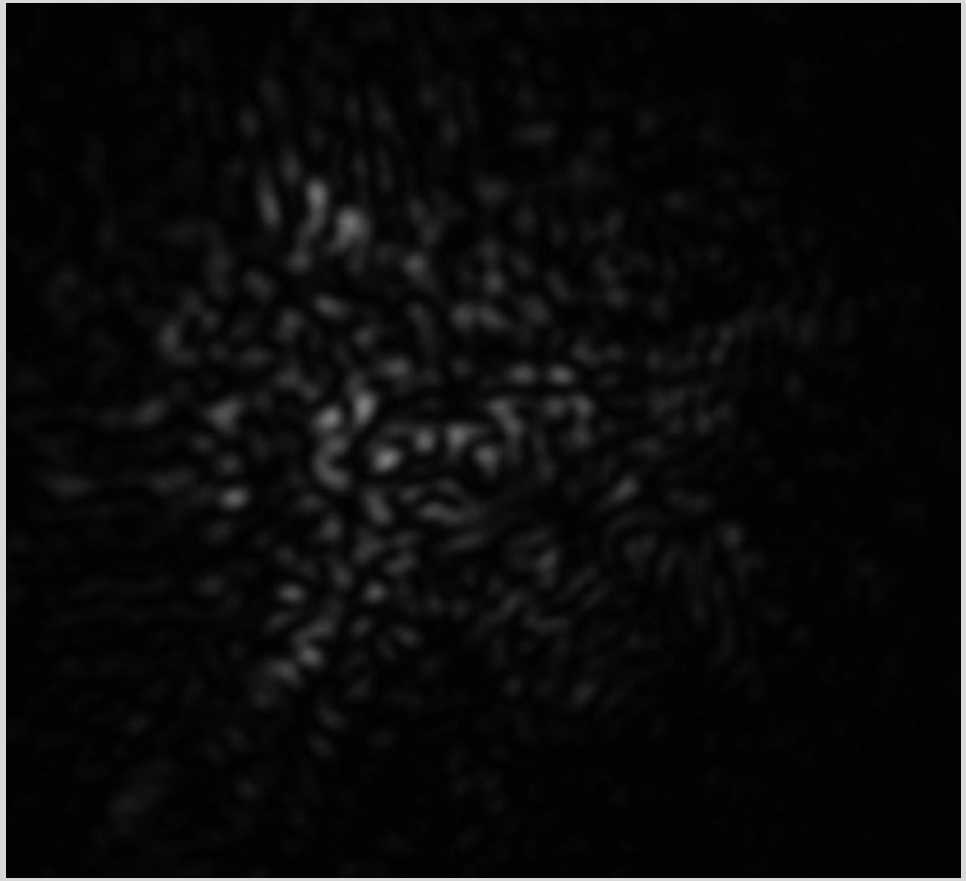


現在の計測点配置

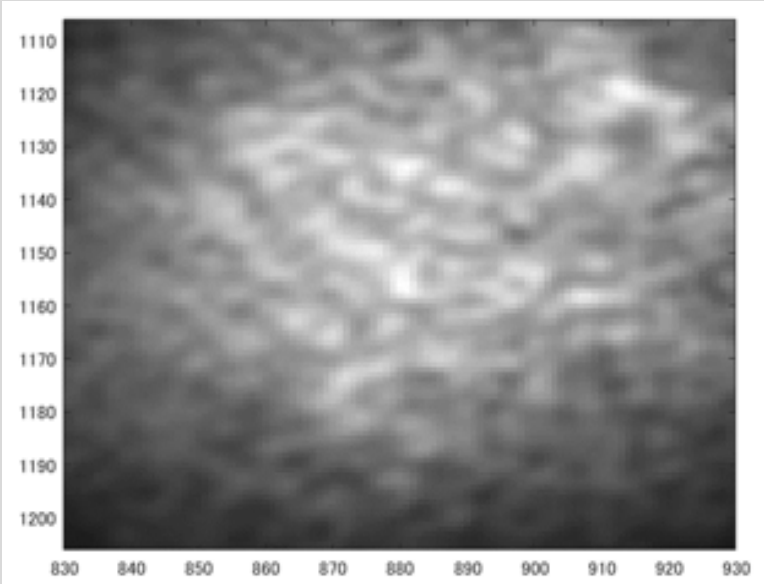
9行9列の61点で
波面傾斜を計測



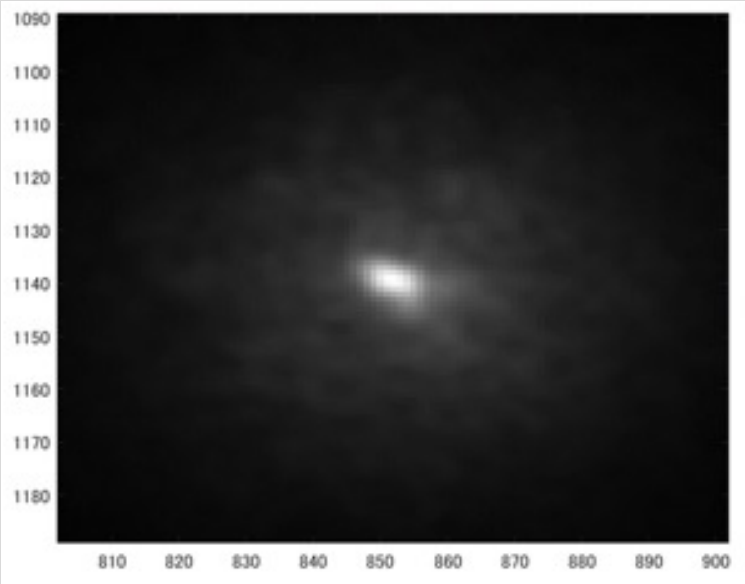
SEICA: 低次補償光学系: 実験室実験



大気乱流を模した位相板を
透過した星像
（開始4秒から補償光学ON）



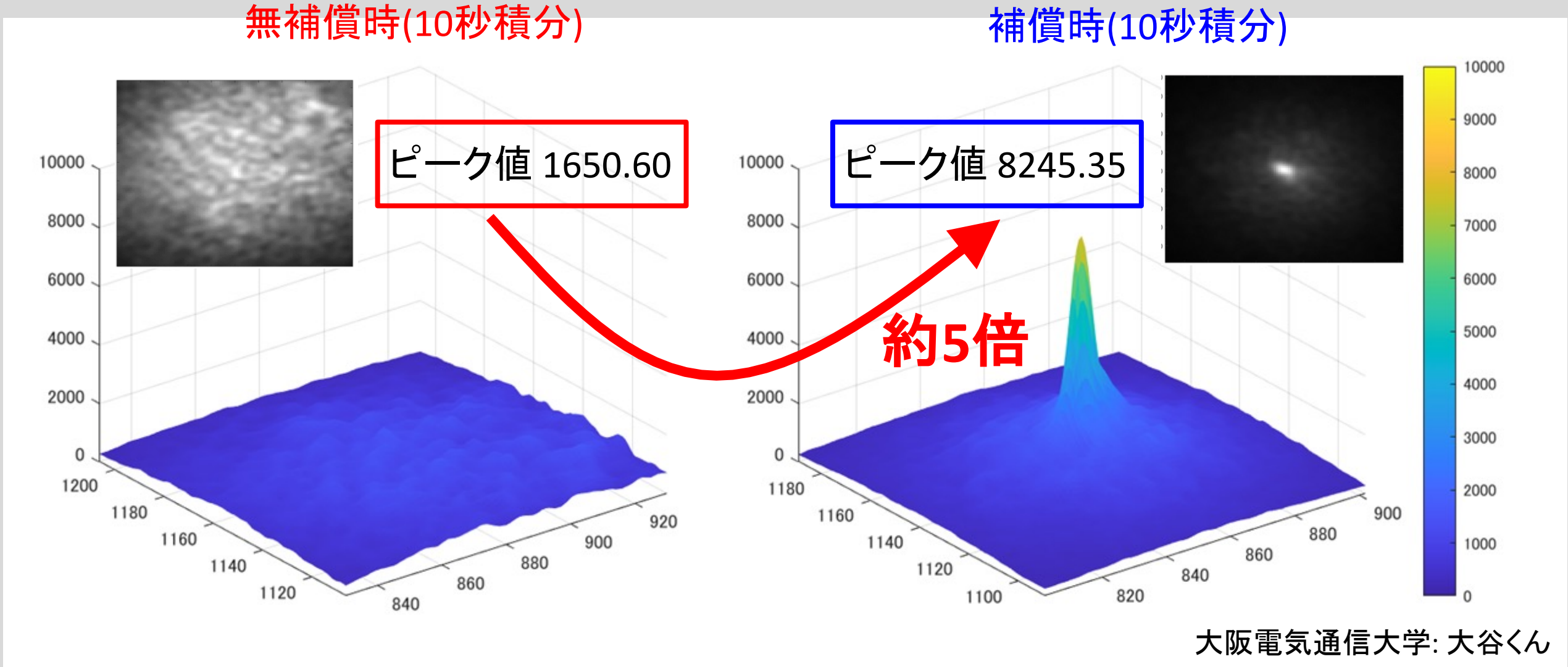
無補償時
（10秒間の映像を
平均化）



補償時
（10秒間の映像を
平均化）

大阪電気通信大学: 大谷くん

SEICA: 低次補償光学系: 実験室での星像回復



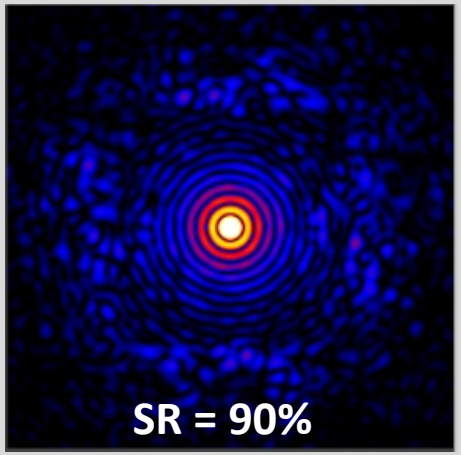
大阪電気通信大学: 大谷くん

可視光(λ=0.633 um)での結果なので、近赤外(Hバンド: 1.6 um)ではさらに改善する

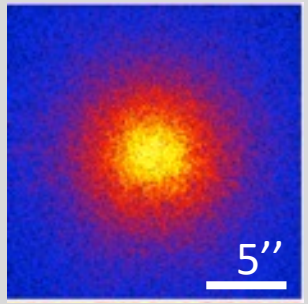
SEICA: ExAO: 仕様と構成

装置目標

高精度 (ストレール比0.9→ λ/20; rms @Hバンド)
→高頻度 (5-10 kHz)
→高空間周波数 (1辺24素子)



望遠鏡から



無補償

1. 低次補償光学

傾斜計測: Tip-Tilt＋Woofer
低速、粗いが大振幅波面制御

Tip-Tilt部 星像を安定

T-T: 2軸
ダイクロ1
λ:0.4-0.5 μm
CPU1
T-T sensor
Frame rate: 100Hz
限界等級: 10mag@B

Woofer部 λ/4程度まで

Woofer DM
88 actuators
ダイクロ2
λ:0.5-0.7 μm
CPU2
SHWFS
Frame rate: 1kHz
限界等級: 8mag@R

2. 高次補償光学

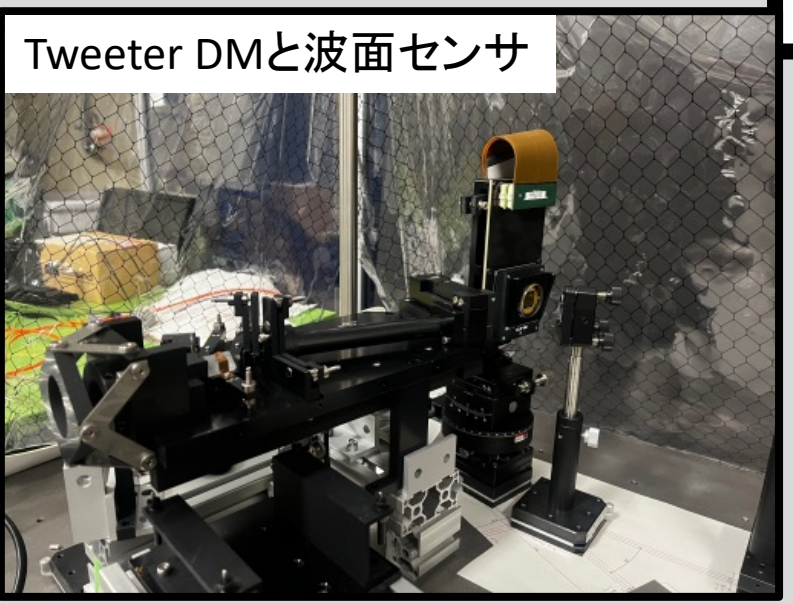
位相計測: Tweeter
高速、高精度波面制御

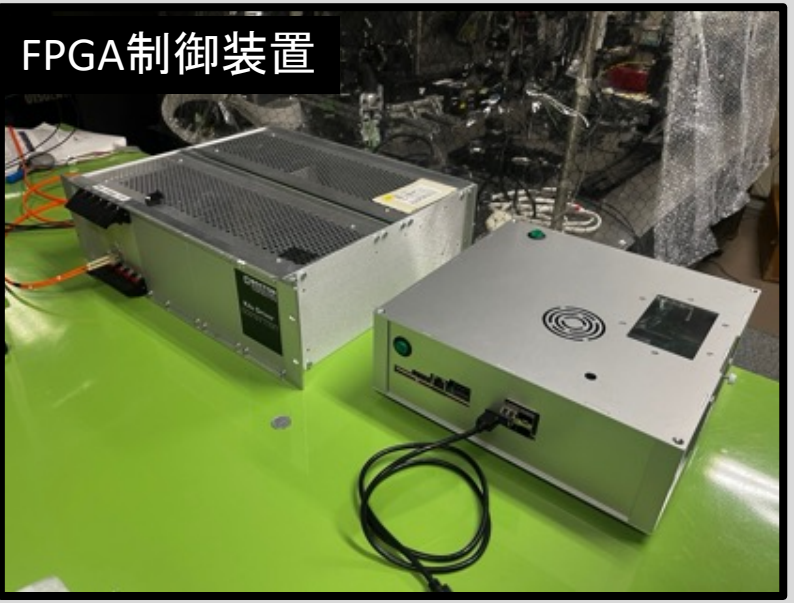
Tweeter部 λ/20程度

Tweeter DM
492 actuators
ダイクロ3
λ:0.7-0.9 μm
FPGA
位相
波面センサ
Frame rate: 6.5kHz
限界等級: 6mag?

コロナグラフ
装置へ

SEICA: ExAOの仕様と構成



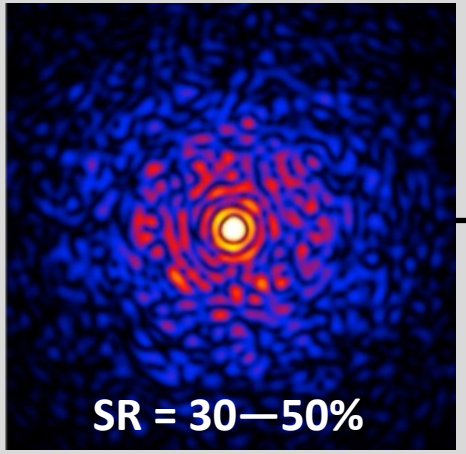


装置目標

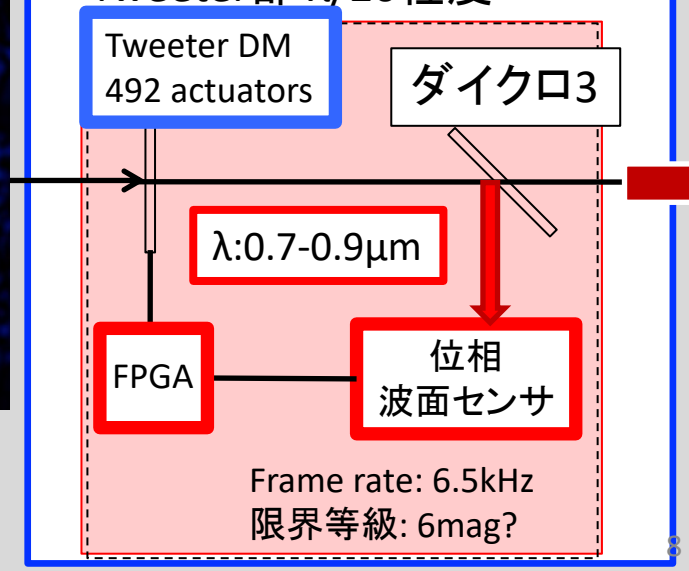
高精度 (ストレール比0.9→ λ/20; rms @Hバンド)
→高頻度 (5-10 kHz)
→高空間周波数 (1辺24素子)

2. 高次補償光学

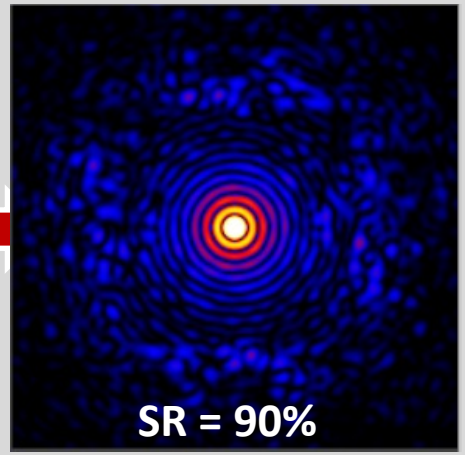
低次補償後の星像



位相計測: Tweeter
高速、高精度波面制御



コロナグラフ
装置へ

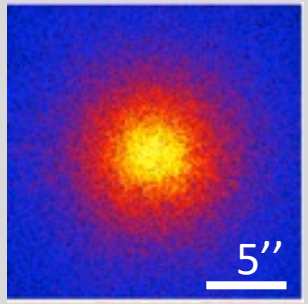


SEICA: ExAOの仕様と構成

装置目標

高精度 (ストレール比0.9→ λ/20; rms @Hバンド)
→高頻度 (5-10 kHz)
→高空間周波数 (1辺24素子)

望遠鏡から



無補償

1. 低次補償光学

傾斜計測: Tip-Tilt＋Woofer
低速、粗いが大振幅波面制御

Tip-Tilt部 星像を安定

T-T: 2軸
ダイクロ1
λ:0.4-0.5 μm
CPU1
T-T sensor
Frame rate: 100Hz
限界等級: 10mag@B

Woofer部 λ/4程度まで

Woofer DM
88 actuators
ダイクロ2
λ:0.5-0.7 μm
CPU2
SHWFS
Frame rate: 1kHz
限界等級: 8mag@R

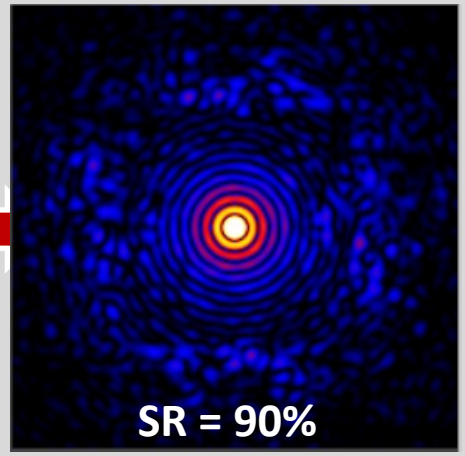
2. 高次補償光学

位相計測: Tweeter
高速、高精度波面制御

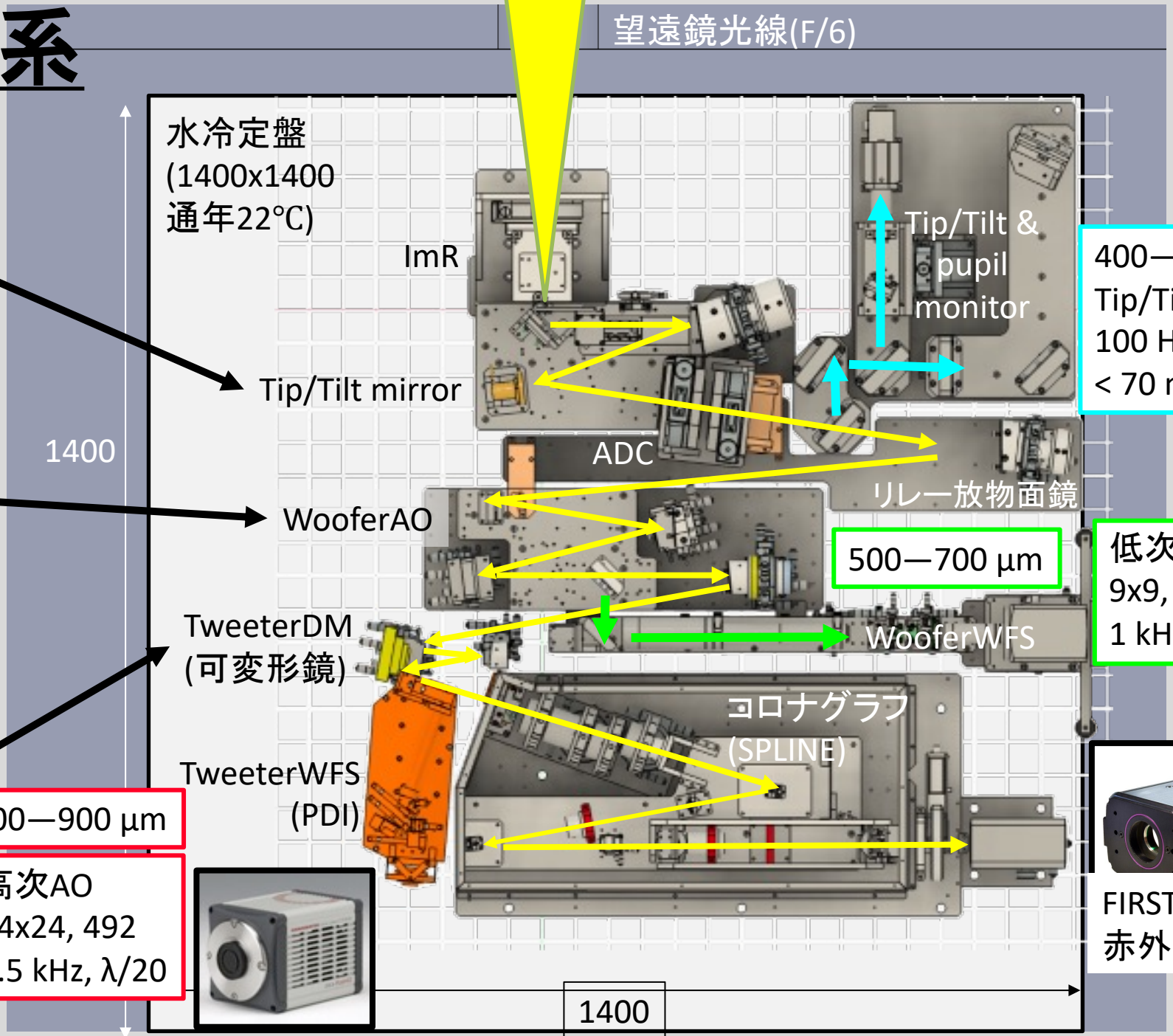
Tweeter部 λ/20程度

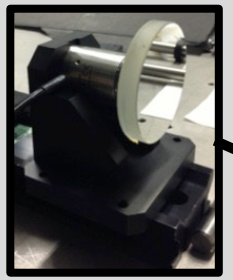
Tweeter DM
492 actuators
ダイクロ3
λ:0.7-0.9 μm
FPGA
位相
波面センサ
Frame rate: 6.5kHz
限界等級: 6mag?

コロナグラフ
装置へ

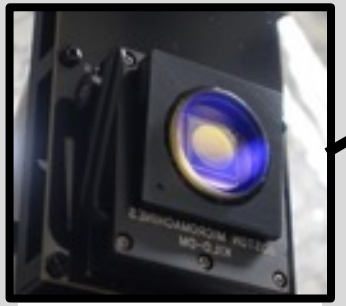


SEICA光学系





Alpao DM-88



BMC 492-DM

700—900 μm

高次AO
24x24, 492
6.5 kHz, λ/20

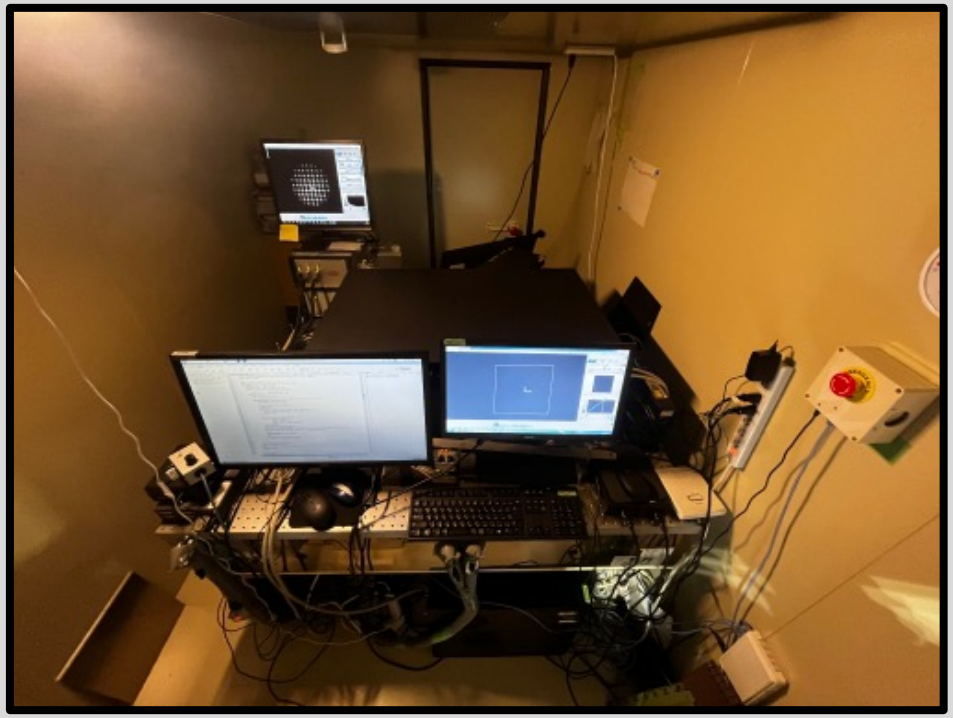
400—500 μm
Tip/Tilt 補正
100 Hz
< 70 mas (rms)

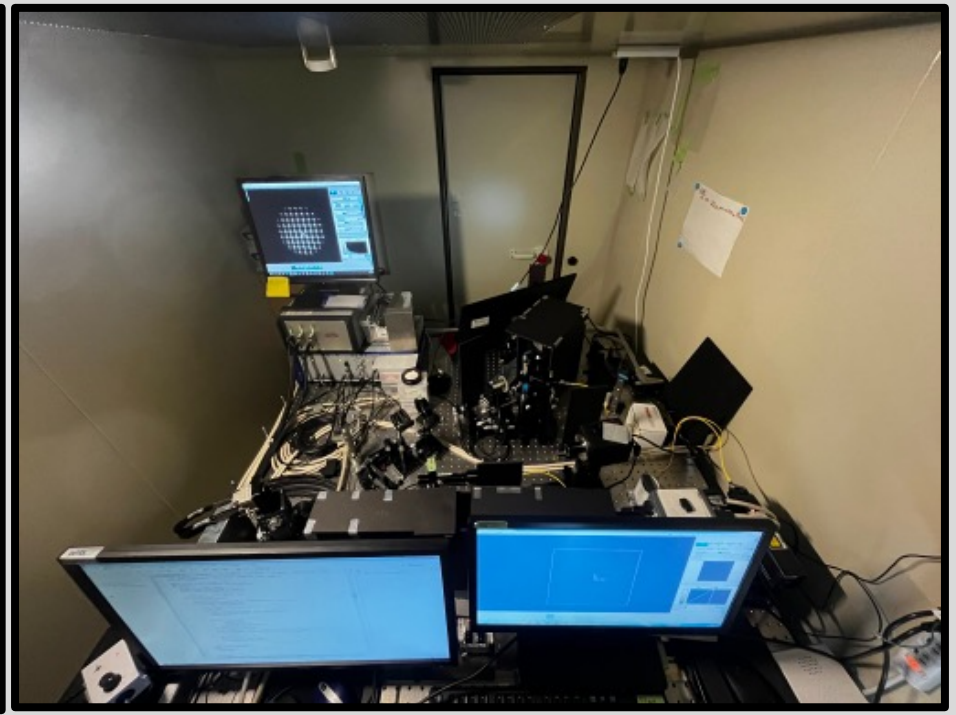
低次AO
9x9, 64
1 kHz, < λ/4

FIRST LIGHT C-RED2
赤外カメラ 640x512

SEICA: 低次補償光学系搭載実験

■ 2023年3月9日～10日(9は天候不順)





天体の光を低次補償光学系(Tip-Tilt光学系＋Woofer AO)で補償光学試験

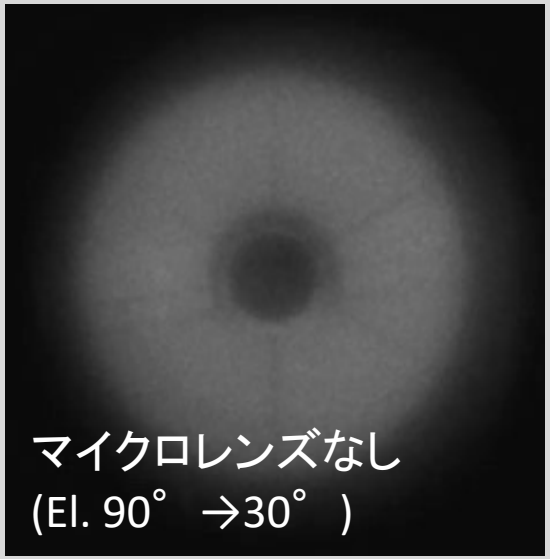
観測天体	視等級	観測期間 (3/10)
α Ori (ベテルギウス)	0.4	20:00—20:48
β Gem (ポルックス)	1.15	20:50—22:15
α Leo (レグルス)	1.4	22:26—22:50

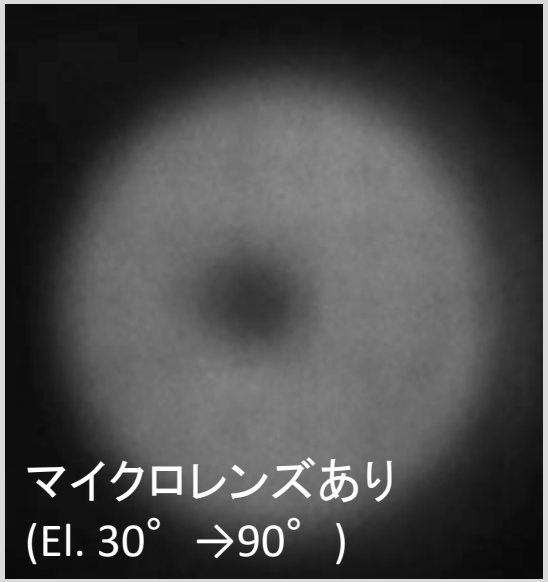
SEICA: 実験風景

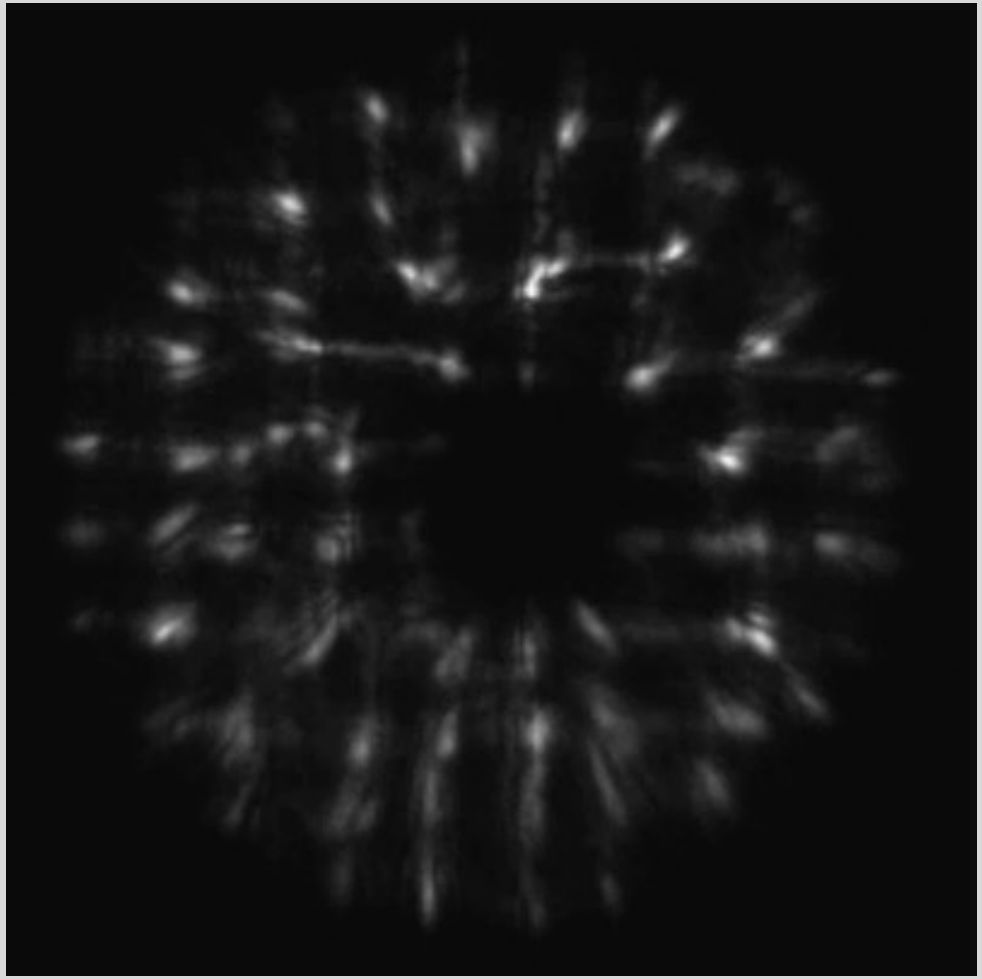
大阪電気通信大学
入部さん、大谷くん

SEICA: 天体導入時の低次波面センサ画像

望遠鏡EL変化による瞳像回転





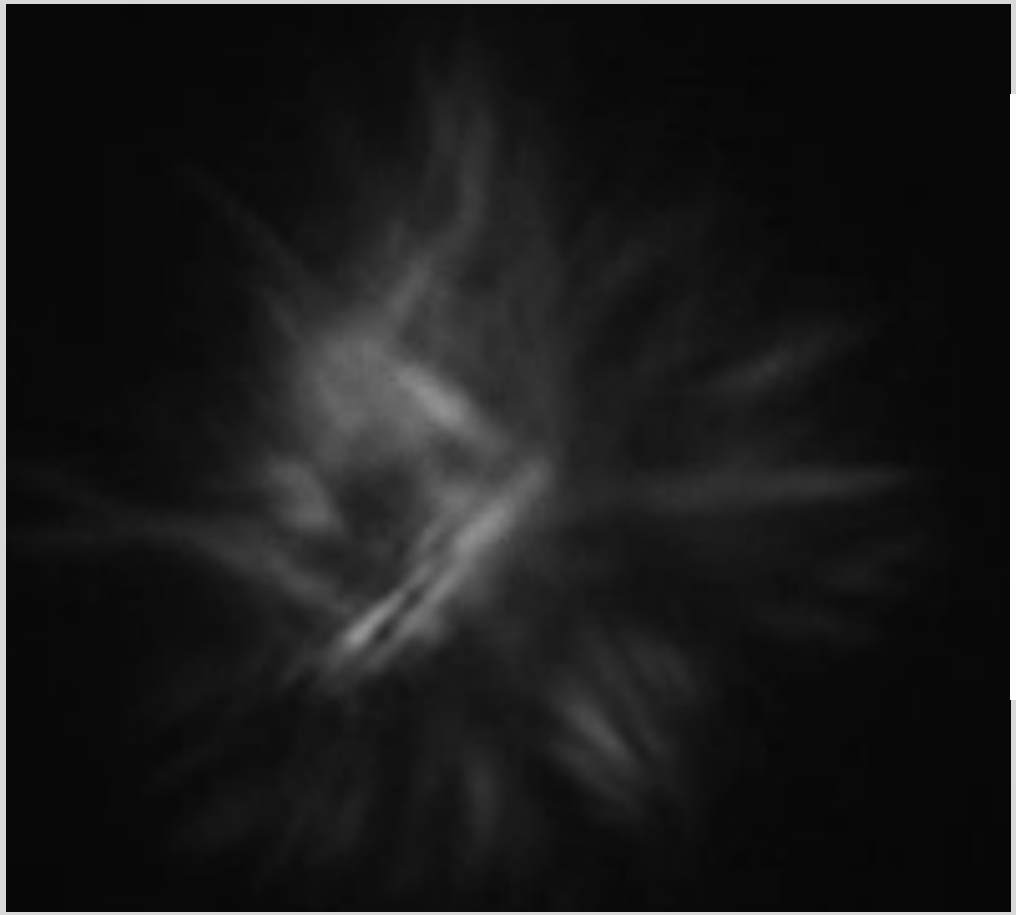


9x9 SHWFS

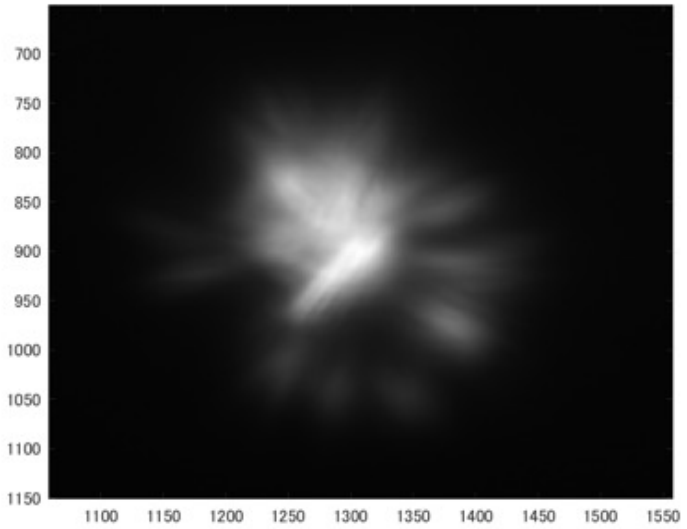
2023年3月10日22時2分頃
20秒動画
制御なし10秒
制御あり10秒
Kp=0.1
Ki =0.000003
Kd=0.01

イメージローテータなし
望遠鏡第3鏡調整機構
故障中

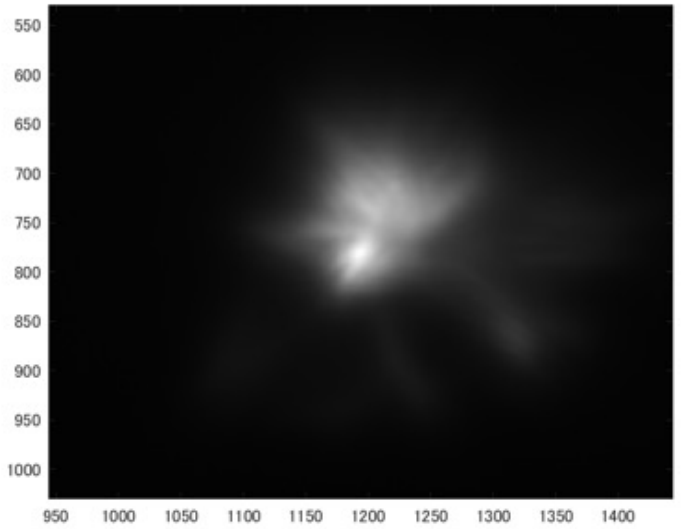
SEICA: 低次補償光学系: 天体導入実験



星像
（開始2秒から補償光学ON）



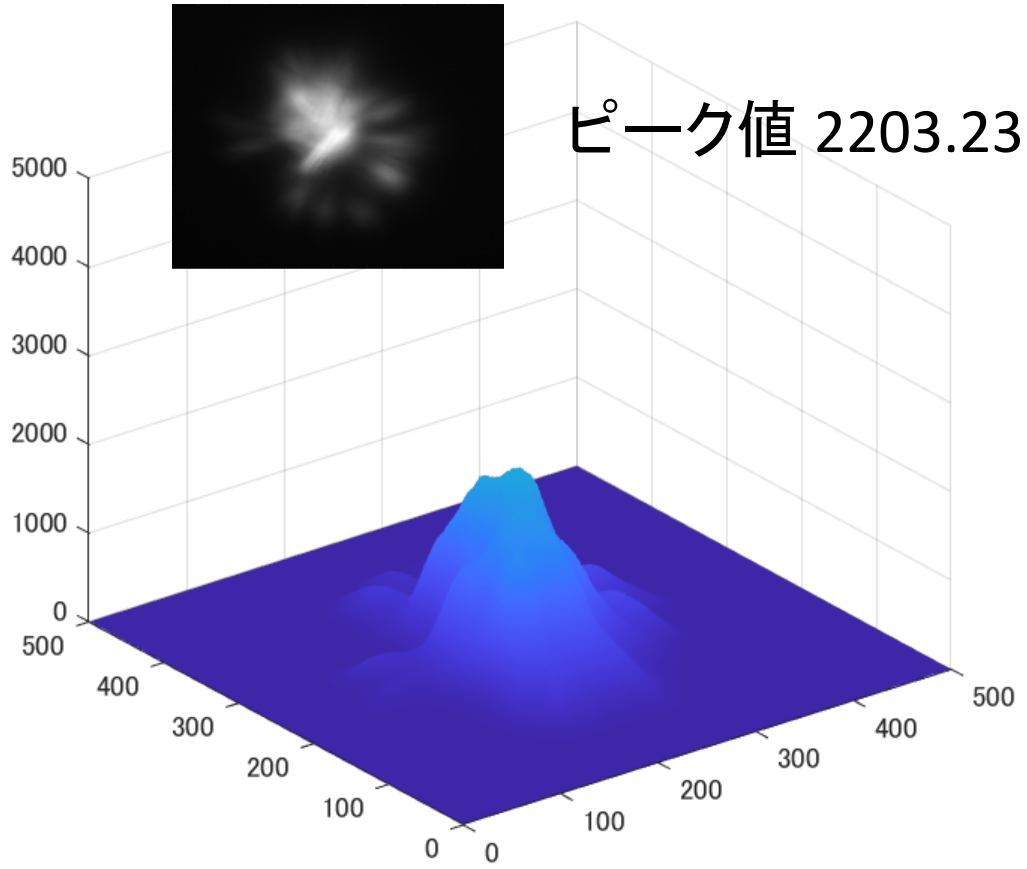
無補償時
（10秒間の映像を
平均化）



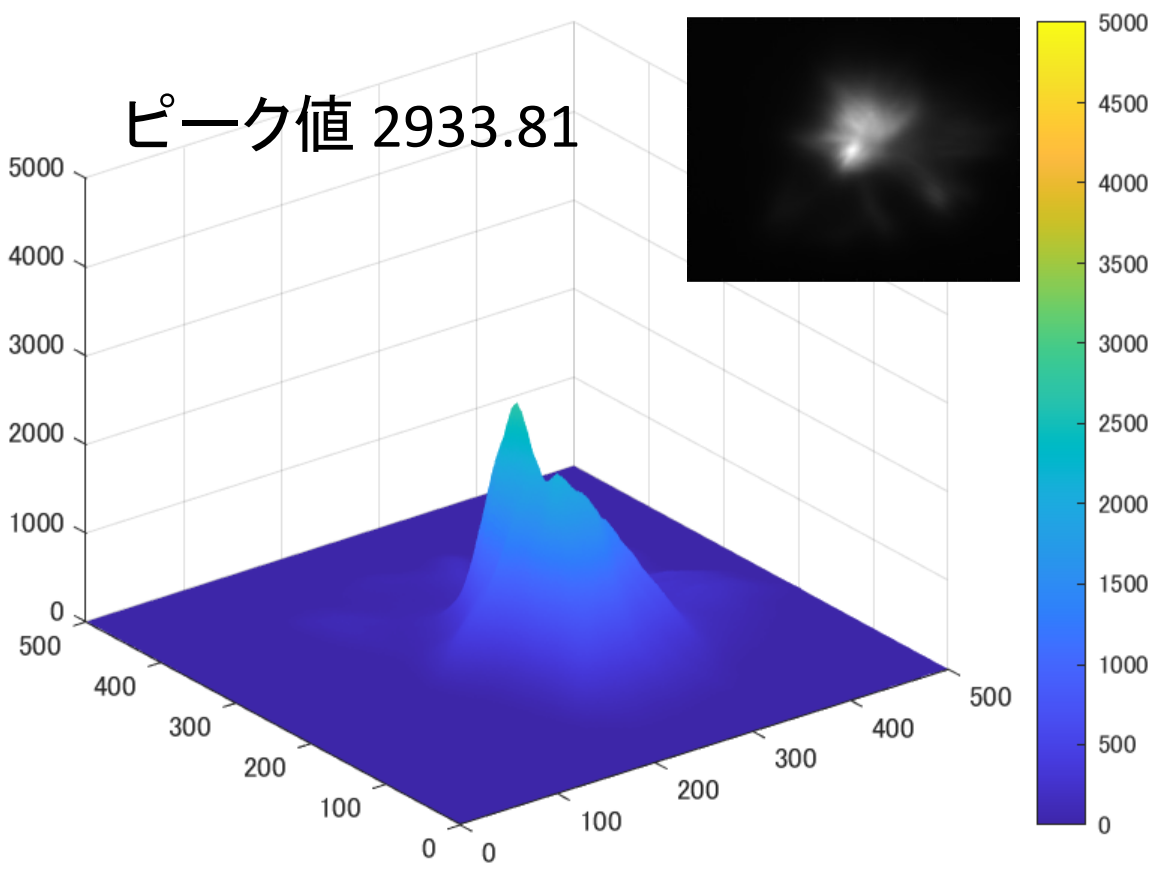
補償時
（10秒間の映像を
平均化）
大阪電気通信大学: 大谷くん

SEICA: 低次補償光学系: 天体導入実験

無補償時(10秒積分)



補償時(10秒積分)



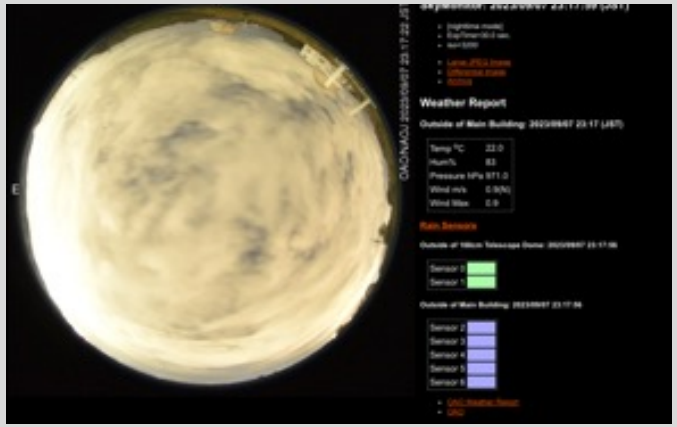
大阪電気通信大学: 大谷くん

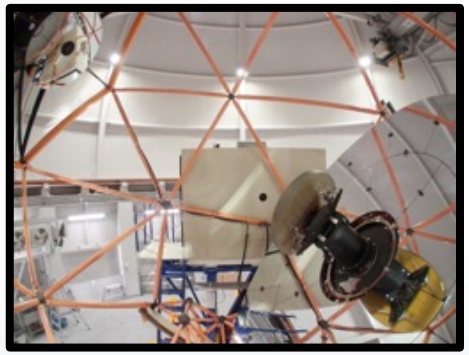
- 元々のシーイングが悪い(～2秒程度)
- PID制御パラメータが最適化されていない
- 観測中瞳が固定出来ていない
- 観測中にポインティングが外れていく

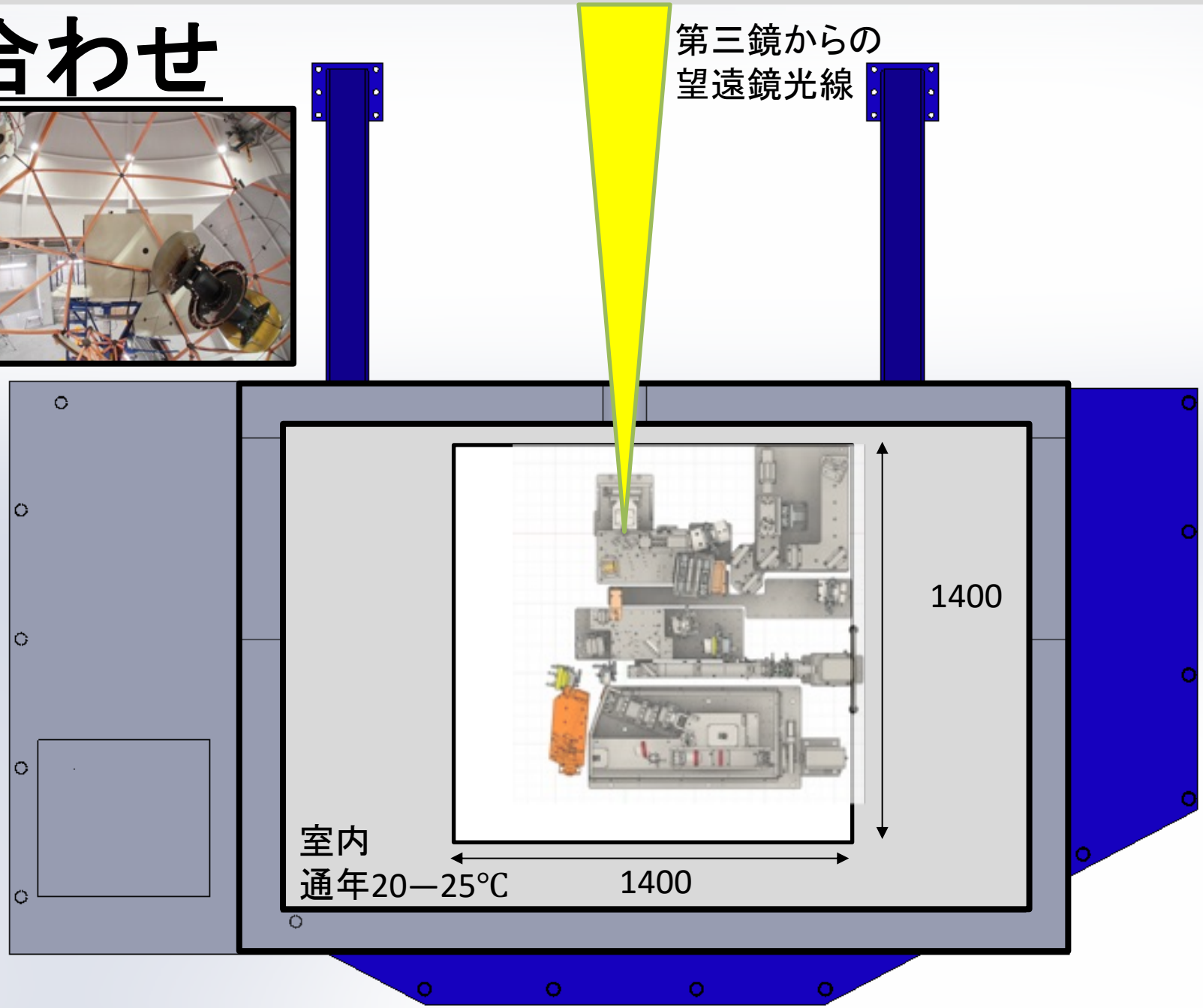
望遠鏡とのかみ合わせ

- ◆ 瞳の固定
  - ◆ 4月 : 第三鏡のモータ修理
  - ◆ 6月8—9日: 第3鏡角度調整 (ズレ量5% -> 0.5%)
- ◆ ポインティング
  - ◆ 8月4日: PAを実施
  - ◆ 300秒角 -> 5秒角(rms)

- ◆ 9月の試験観測は悪天候





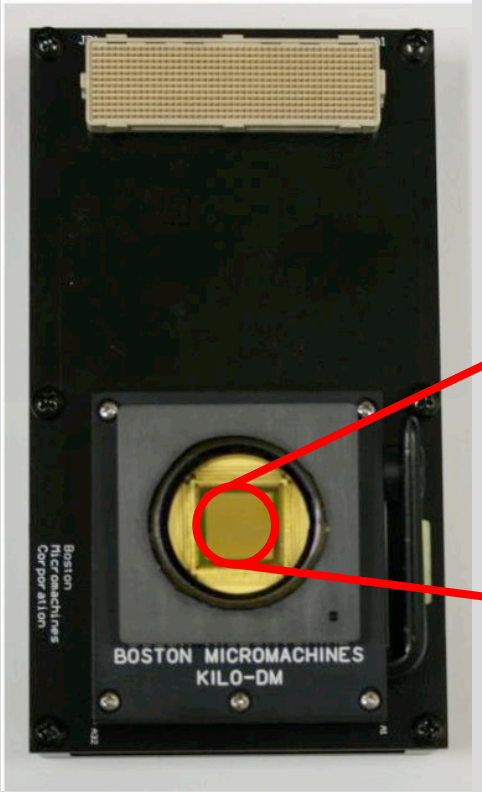


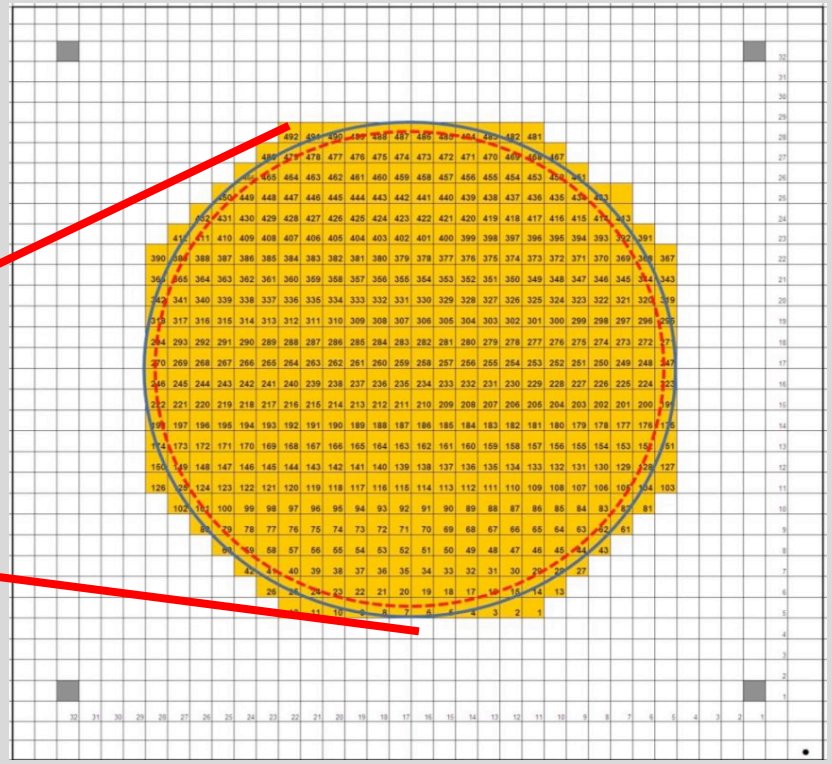
SEICA: 高次補償光学系: 可変形鏡

■系の構成要素：可変形鏡（DM:Deformable Mirror）

・492-DM@Kilo Driver std.（Boston Micromachines）

・アクチュエータ数：492（32×32を24×24で設定），ストローク：1.7 μm





制御用にナンバリング

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1							0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
2						12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25					
3					26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41				
4				42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59			
5			60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79		
6		80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	
7	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125
8	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149
9	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173
10	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197
11	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221
12	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245
13	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269
14	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293
15	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317
16	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341
17	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365
18	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389
19		390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	
20			412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431		
21				432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449			
22					450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465				
23						466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479					
24							480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491						

大阪電気通信大　入部さん

SEICA: 高次補償光学系: 制御系

■Tweeter補償光学系の制御装置：FPGAによる専用回路

PDI-WFSに使用する
CMOSカメラ(要素数548)
ORCA-Fusion BT

W_{means}計算

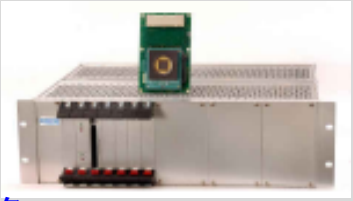
制御器
行列演算
PID制御器を実装

DM
アクチエータ
マッピング

使用するDM：492-DM
(Boston Micromachine)

CoaXpressデコード

DMドライバデコード



Zynq ZCU102 評価キット（Xlinx）

シリアル通信デコードとSFP変換

一番最初だけ約130μs必要
後は露光時間に依存

約64μs

PCだと～300 μs

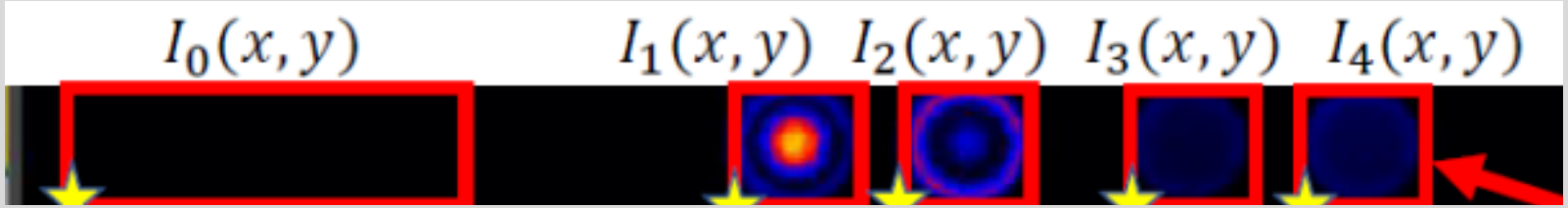
CoaXpressカメラ処理 初期入力時間：約130μs	W_{means}算出 約5μs	行列演算 約50μs	制御演算 約0.5μs	DM出力 8μs

最高制御速度
≒15 kHz強

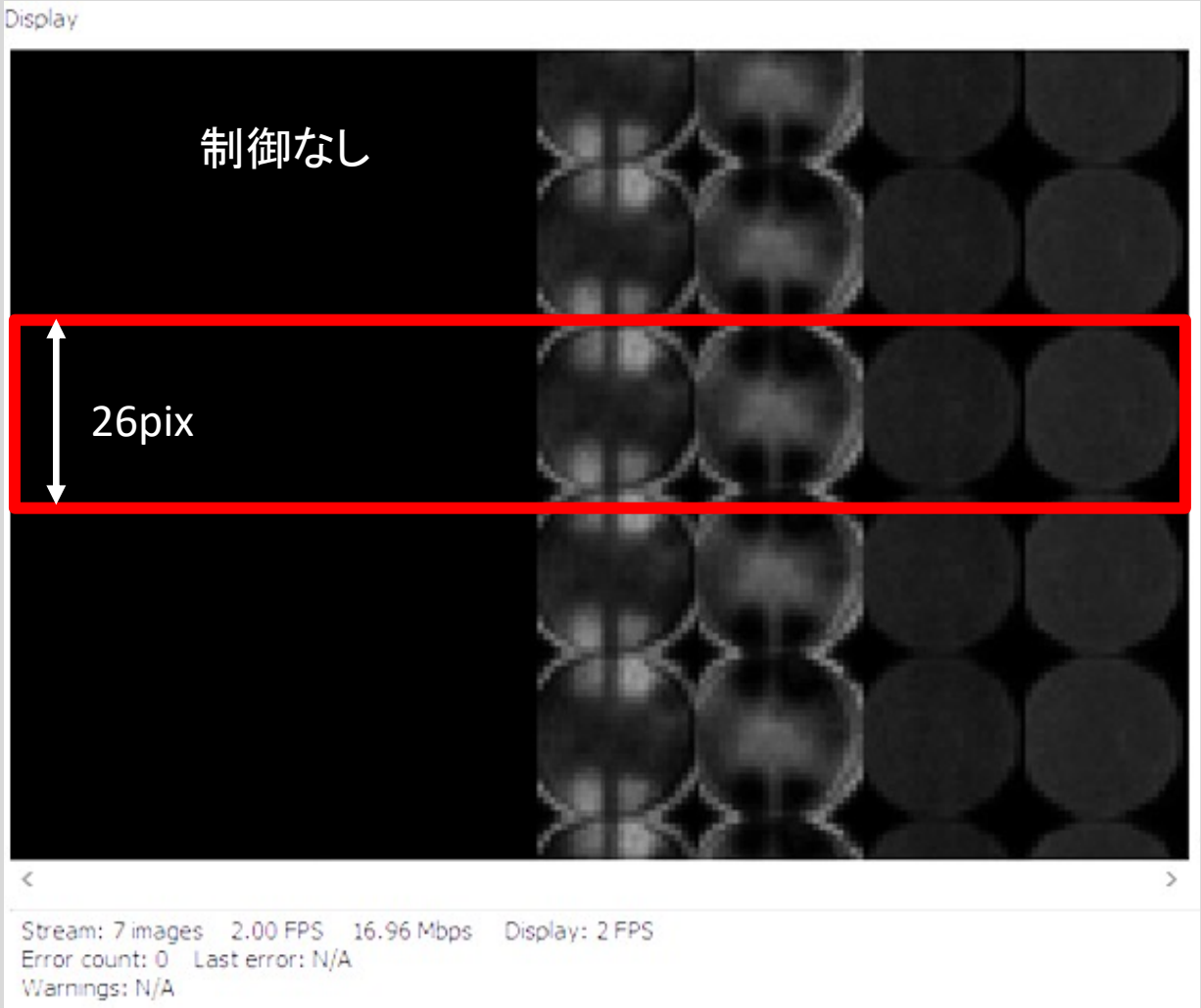
露光時間制限での速度
≒4.2 kHz強

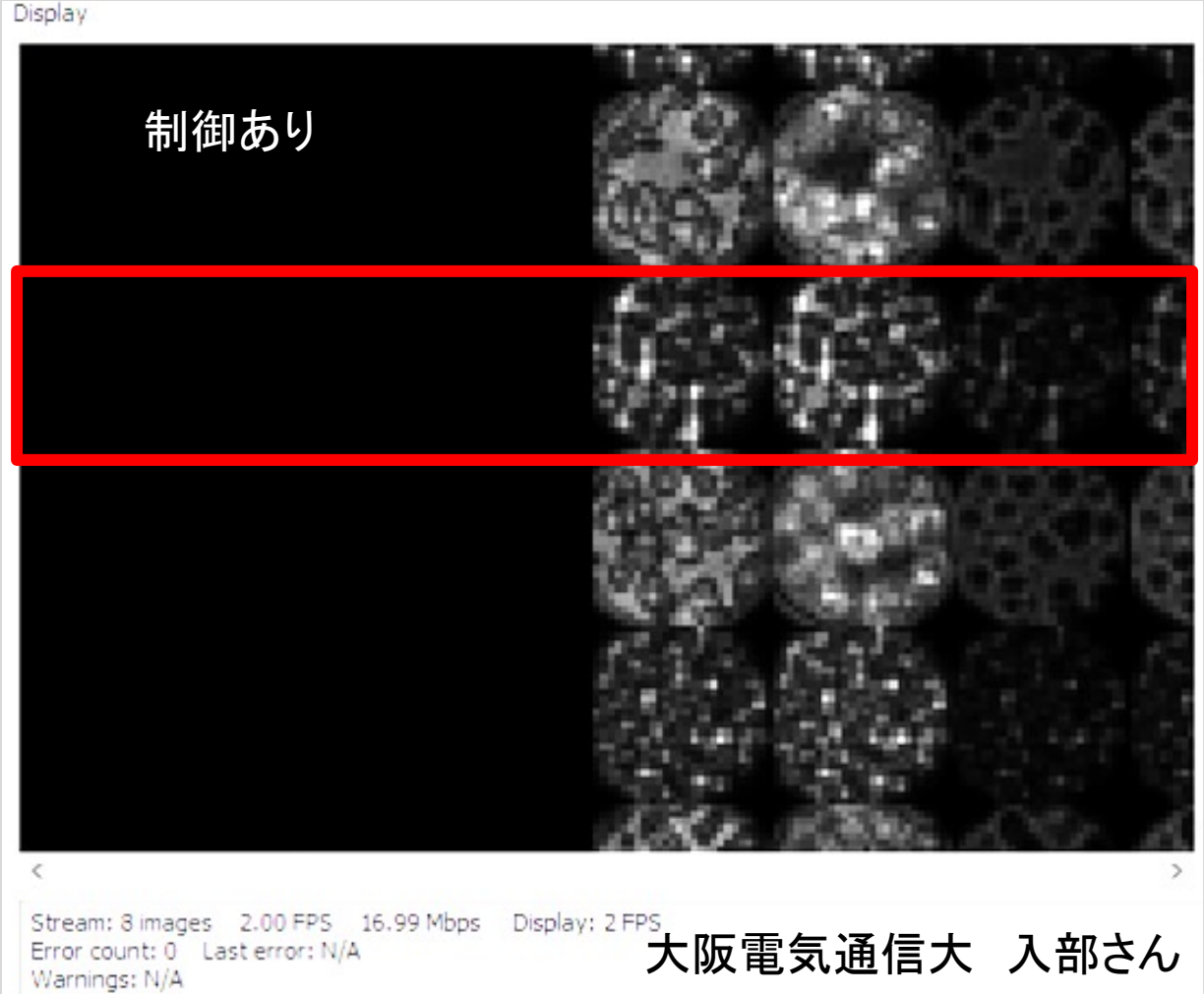
大阪電気通信大　入部さん

SEICA: 高次補償光学系: 波面センサ読出し試験



バイアスと
4位相差画像の同時取得





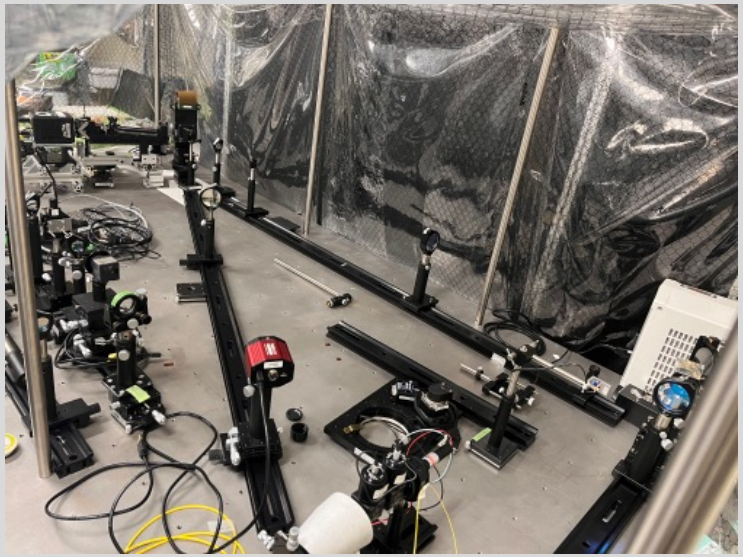
大阪電気通信大　入部さん

まとめ

SEICA-AOは低次＋高次補償光学系の**二段階**

- 低次補償光学系を実験室から望遠鏡に移設して試験観測中
- 高次補償光学系を実験室にて波面センサ+FPGAでAO制御試験中
- コロナグラフとの接続も本年度中に行いたい

FPGA制御装置



波面センサ+DMによる制御実験系