

南極2.5m望遠鏡用 三色赤外線カメラの光学設計の進捗

東北大学天文学専攻 市川研究室
M2 小幡朋和

Abstract

□ 三色カメラ

- 近赤外線域(1-5 μm : [J, H, K] [3.4 μm] [L', M'])に対応
- コリメーターは3カメラ共通
- 目標: **全球面**での設計

□ コリメーター

- **球面反射鏡1枚**で設計
- **Off-axial光学系**における“**一次収差**”が大きく発生

□ カメラ

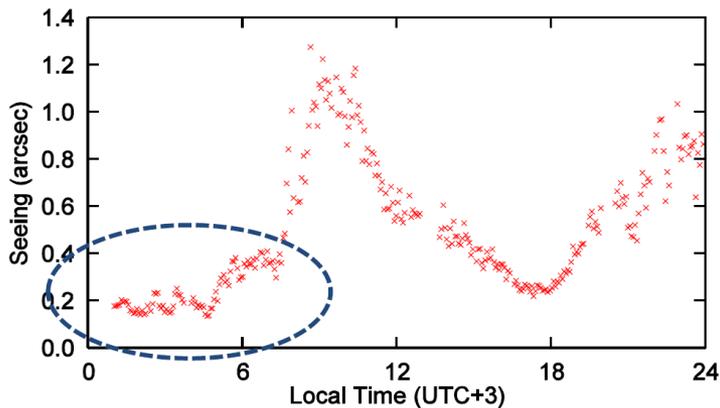
- コリメーターでの一次収差を打ち消すため、**tiltレンズ**を挿入し最適化
- 現段階では目標をほぼ満足

□ 問題点とこれからの課題

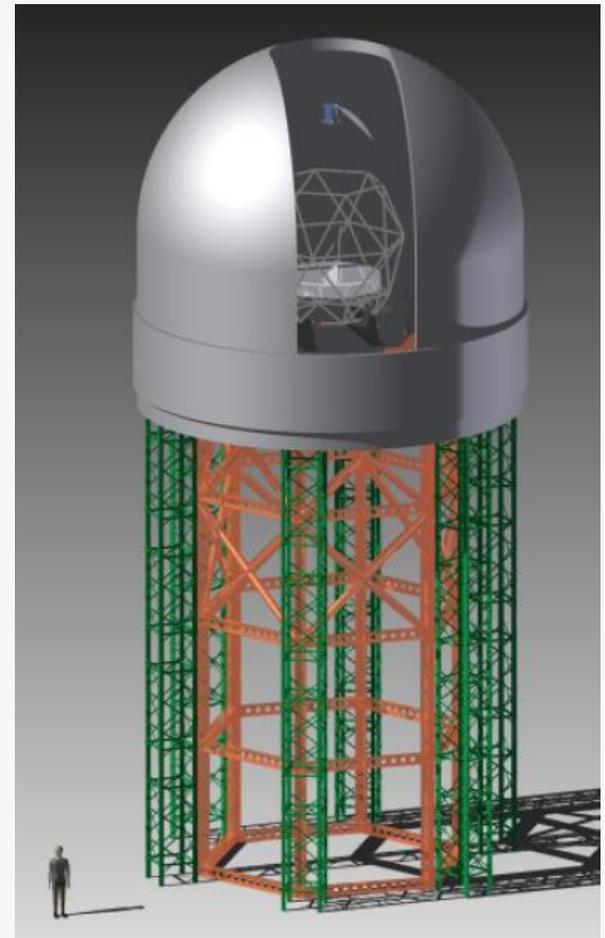
- ディストーションの形が“いびつ”
- カメラ光学系の設計
- 公差が厳しい値になる可能性

南極環境

- 低大気放射, 高大気透過率
 - 特に赤外線・THz観測で有利
 - 1-5 μm ほぼ全域での観測が可能
- シーイング0.2''
 - 口径2.5mならば、赤外線で回折限界で観測可能。



Okita et al.(2013)



仕様と制限

□ 仕様

- 口径2.5m --シーイングフリーで回折限界観測--
- 波長域 1 – 5 μm ([J, H, K] [3.4 μm] [L', M'])
- 3色同時撮像
- ピクセルスケール 0.221"/pixel : Kバンドでの回折限界 (> シーイング)
- 検出器 2048 × 2048 pixels × 3
- 視野 7'.5 × 7'.5

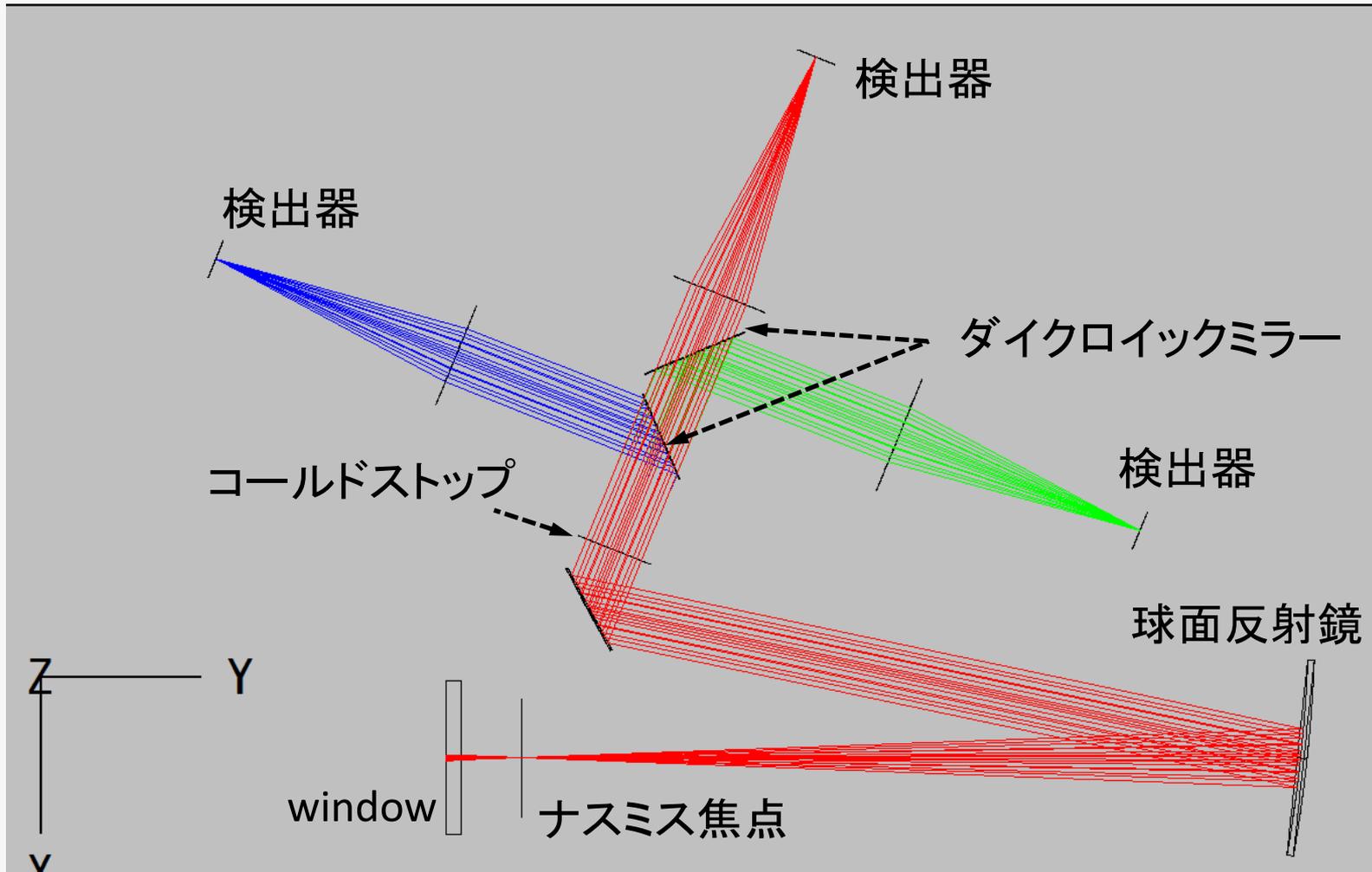
□ 制限

- 安価で製作するため、**全球面**で設計
- 低分散分光器搭載のためにコリメーターは必須かつ3カメラ共通
- Kバンド以降でSiO₂使用不可 ; コリメーターは**反射鏡**で設計

従来の赤外線観測装置はKバンドまで。
レンズで設計可能。

➡ コリメーターを**球面反射鏡**で設計したい

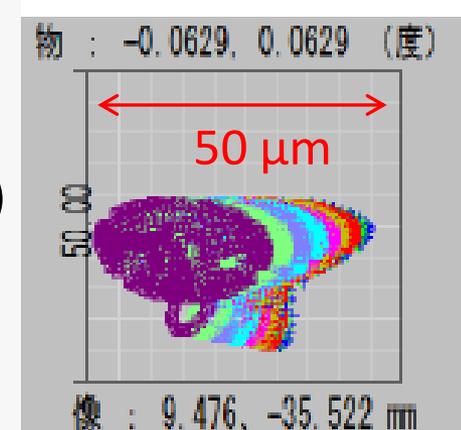
3色カメラ：概念図



球面反射鏡コリメーターの評価と改善

評価

- 瞳光学系の収差量
 - 目標 : 630 μ m-760 μ m
 - 最大で690 μ m程度
- カメラ光学系へと残る収差量
 - 目標 : 2ピクセル四方の50 μ m \times 50 μ m内 (JHKカメラ)
 - **× 最大で220 μ m程度**



改善

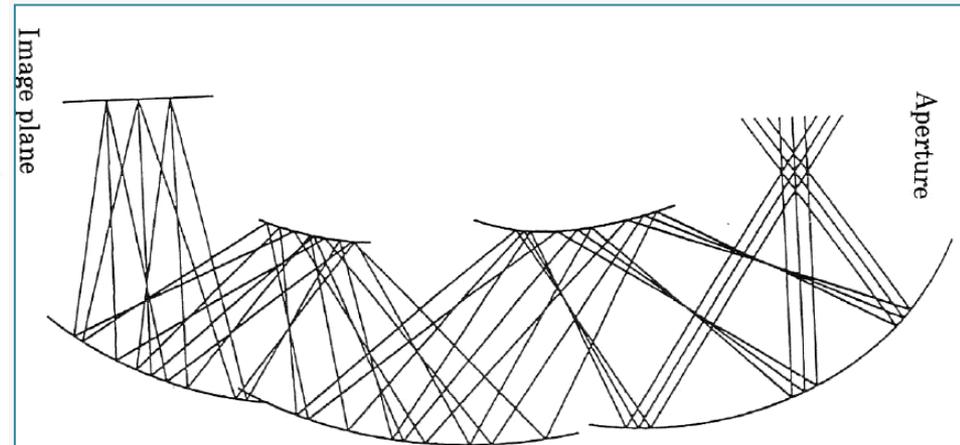
- Off-axial光学系の近軸理論(荒木敬介(2002))とZEMAXの最適化を組み合わせ、**tiltレンズ**を挿入し“一次収差”を打ち消した。
 - ✓ **最大収差量25 μ m程度まで改善**

Off-axial 光学系

荒木敬介博士論文

「Off-axial光学系の近軸・収差論的解析」

- ヘッドマウントディスプレイのように、非対称非球面(反射鏡)を用いた設計は**従来の近軸論などでは扱えない**
- Off-axial光学系の近軸理論(荒木敬介(2002))は従来の共軸回転対称光学系を特殊例として含んだ汎用的な理論



※荒木敬介氏はキャノン/宇都宮大学オプティクス教育研究センター 所属

Off-axial光学系の近軸理論

「非球面定数を適切に設定すれば、
off-axial由来の収差(一次収差)は消すことができる」
=「通常の光学系と同じように扱える」

「各面が一次収差0でなくとも、
光学系全体で一次収差が0ならばよい」

カメラ光学系をoff-axialとして適切に設計すれば、
off-axial**コリメーターの一次収差を補正可能**

※いわゆる逆符号の収差による収差補正

※詳細は荒木敬介(2002)を参照

※非球面反射鏡の場合は各面の一次収差を0にできる。

屈折面の場合、一面での一次収差補正が不可能。

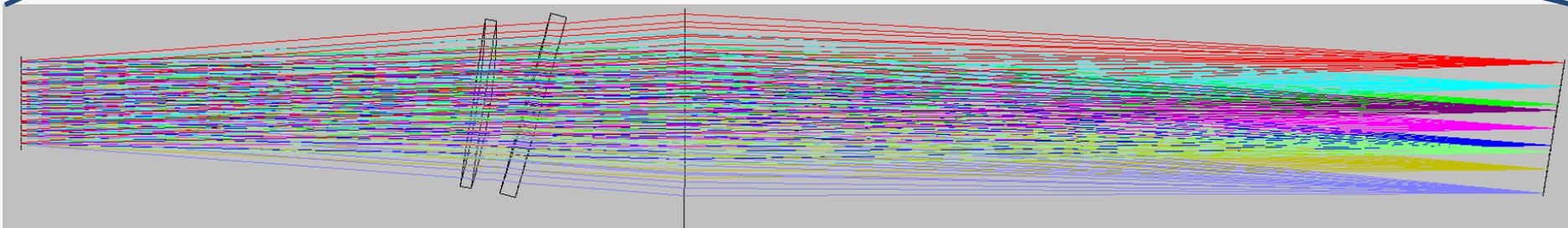
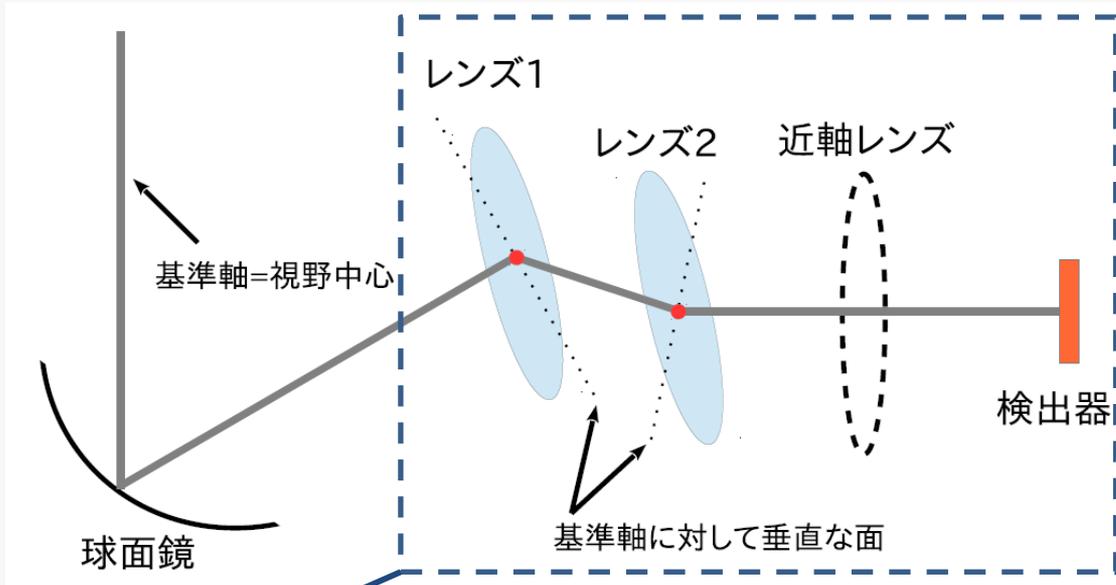
一次収差除去: Off-axial理論 + ZEMAX最適化

- ◆ Off-axial光学系の近軸理論における光軸:「拡張された光軸」
 - ≠ 従来の光軸(ZEMAXの光軸)
 - Off-axial理論のtilt角 $\theta_{\text{off-axial}}$ ≠ ZEMAXのtilt角 θ_{ZEMAX}
 - そのまま最適化を実行しても一次収差を除去できない

□ 最適化の手順

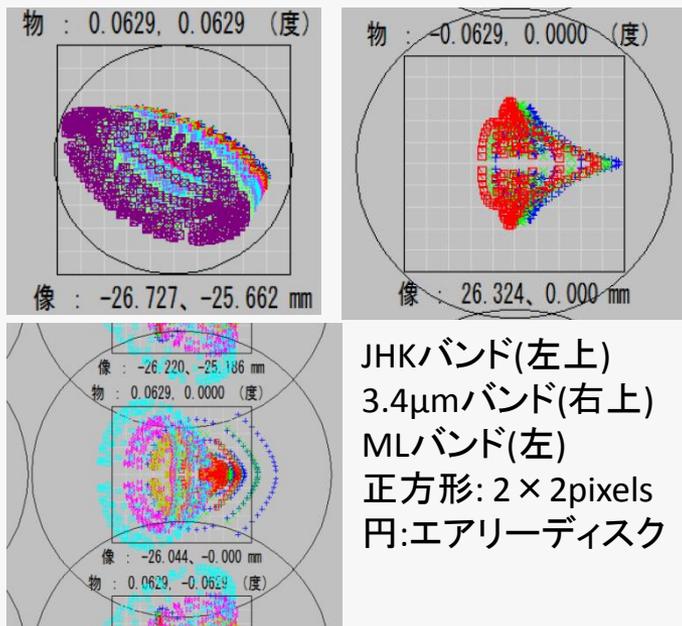
1. 「拡張された光軸」を視野中心に設定
2. ZEMAXの光軸を視野中心に設定
3. Off-axial理論のtilt角 $\theta_{\text{off-axial}} = \text{ZEMAXのtilt角 } \theta_{\text{ZEMAX}}$
4. tiltレンズを挿入(今回は2枚)
5. tiltレンズの後に近軸レンズを挿入
6. tiltレンズでいらない収差を発生させないために、
近軸レンズにカメラ光学系のほとんどのパワーを持たせる
7. tiltレンズの曲率半径とtilt角 $\theta_{\text{off-axial}}$ を変数に設定して最適化

一次収差除去: Off-axial理論 + ZEMAX最適化

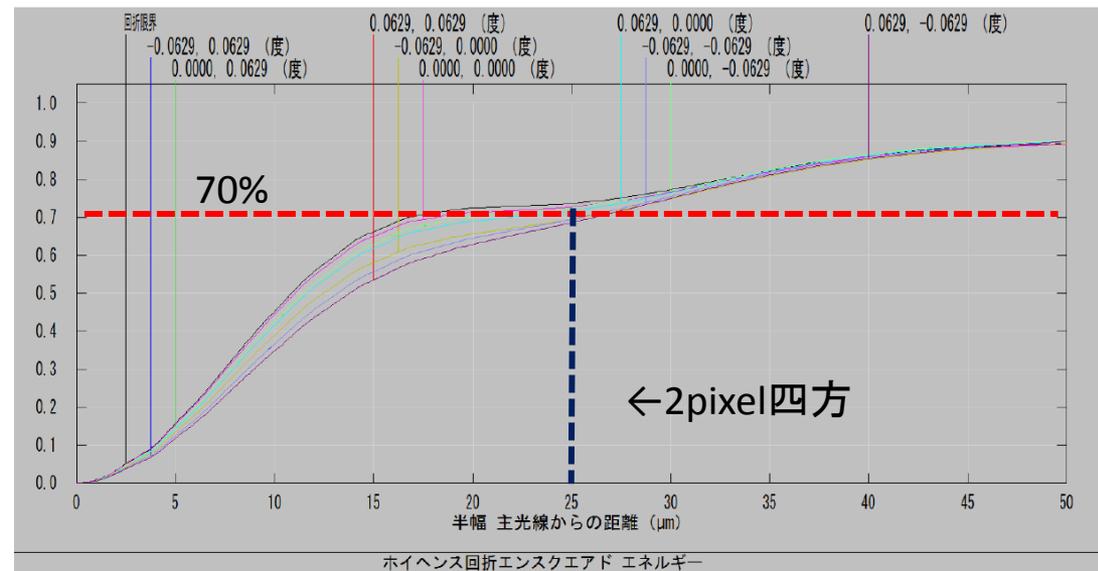


カメラ光学系の評価

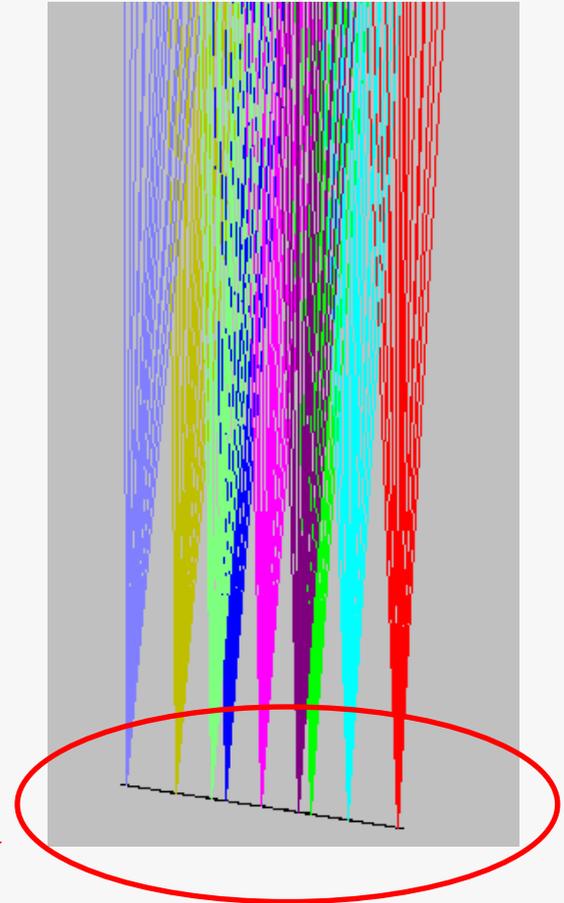
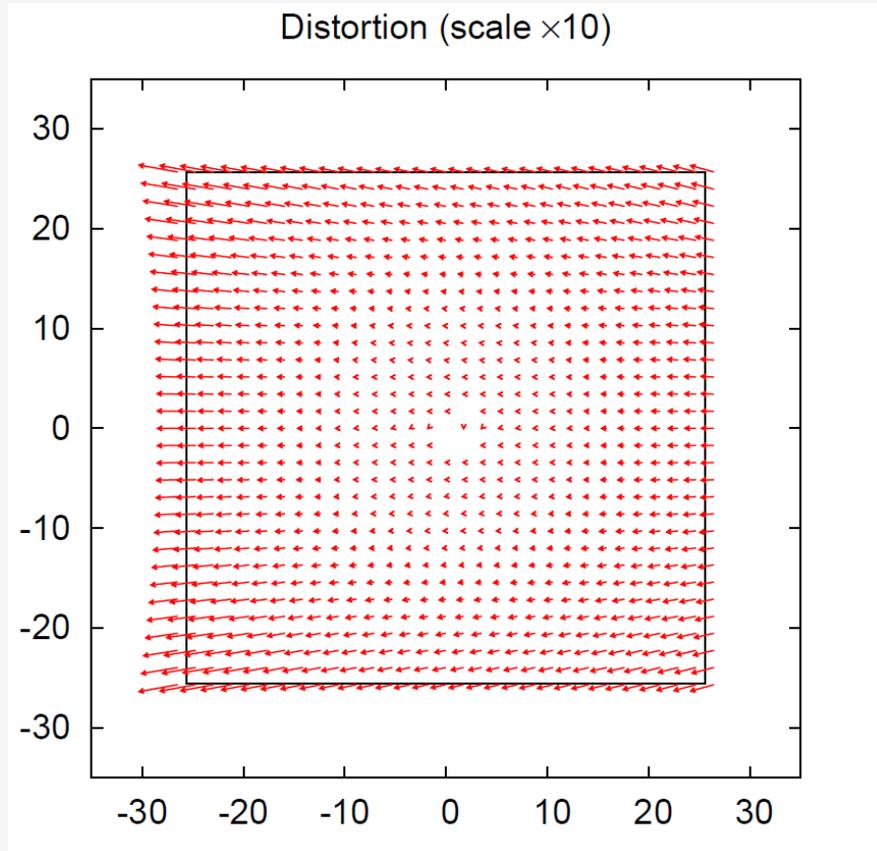
- ✓ tiltレンズ+近軸レンズのカメラ光学系
 - スポットダイアグラム：全バンドで**エアリーディスク内**に収まっている。
 - エンスクエアドエネルギー
 - : 各バンドのレイリーの判断基準の距離で**70%程度**
 - ストレール比：全バンド全視野でほぼ**0.9以上**



JHKバンド(左上)
3.4 μ mバンド(右上)
MLバンド(左)
正方形: 2 \times 2pixels
円:エアリーディスク



問題点: ディストーション



全体が左に流れる“いびつ”な形

- ◆ 最大で0.9%程度なので許容範囲?
- ◆ Off-axial光学における“2次収差” = “像面の傾き” 由来
- ◆ “球面”反射鏡が主な原因

まとめ

まとめ

- 三色カメラ(1-5 μ m)の光学設計
- コリメーターは球面反射鏡一枚
- off-axial理論とZEMAXの最適化を組み合わせ、一次収差除去達成
- Tiltレンズ+近軸レンズのカメラ光学系はほぼ目標値を達成
- 現状は全球面で設計できている

問題点と課題

- ディストーションの形がいびつ: 0.9%程度なので問題ない?
- 検出器(像面)の傾きも特に問題ない?
- カメラ光学系の設計: 近軸レンズの場合とほぼ同じ性能がでる見込み
- 公差解析: 球面反射鏡とtiltレンズが厳しくなる可能性がある

ご静聴ありがとうございました。
