

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	大金原	提出年	令和 5 年
学位論文の 題目	Development and On-sky Demonstration of Atmospheric Turbulence Profiler for Future Adaptive Optics with Multiple Laser Guide Stars (次世代の複数レーザーガイド星補償光学に向けた大気ゆらぎ測定装置の開発と観測実証)		

論文目次

1 General Introduction	1
1.1 Ground-based astronomy under Earth’s atmosphere	1
1.2 Atmospheric turbulence	3
1.2.1 Theoretical model of turbulent field	3
1.2.2 Correlation function and structure function	5
1.2.3 Vertical structure of atmospheric turbulence	6
1.2.4 Wavefront distortion	8
1.2.5 Parameters characterizing atmospheric turbulence	11
1.3 Single conjugate adaptive optics	12
1.3.1 Principle of the system	12
1.3.2 Performance metrics	15
1.3.3 Fundamental limitation	15
1.4 Adaptive optics with multiple laser guide stars	17
1.4.1 Classification of the systems	17
1.4.2 Tomographic wavefront reconstruction	19
1.4.3 ULTIMATE project	21
1.4.4 Structure formation of star-forming galaxies	22
1.5 Scope of the thesis	23
2 Atmospheric Turbulence Profiling at Subaru telescope	25
2.1 Introduction	25
2.1.1 Atmospheric turbulence effect on propagating light	25
2.1.2 Reviewing measurement methods of atmospheric turbulence	27
2.1.3 Principles of methods considered in this study	31
2.2 Instrumentation	39
2.2.1 Design concept	39
2.2.2 Optical design	40
2.2.3 Mechanical design	44
2.2.4 Data acquisition software	45
2.2.5 Laboratory assembly and performance check	47

2.2.6 Installation to the Subaru telescope	49
2.3 Observation	56
2.3.1 Observation target	56
2.3.2 Engineering observation	56
2.4 Analysis	61
2.4.1 Timing and synchronicity of data acquisition	61
2.4.2 Shack-Hartmann sensor spot detection	61
2.4.3 Slope auto-covariance	62
2.4.4 SH-MASS	67
2.4.5 Scintillation temporal auto-covariance	70
2.4.6 Pupil matching	71
2.4.7 SLODAR	72
2.5 Results	73
2.5.1 Total seeing	73
2.5.2 Free atmospheric turbulence profile	77
2.5.3 Wind profile	79
2.5.4 Ground layer turbulence profile	83
2.6 Discussion	86
2.6.1 Comparison with CFHT MASS-DIMM	86
2.6.2 Consistency between scintillation auto-covariance map and SH-MASS	87
2.7 Conclusion	87
3 Rolling Shutter Effect on Wavefront Sensing	91
3.1 Introduction	91
3.2 Analytical evaluation	93
3.2.1 Modeling the shutter modes	93
3.2.2 Simplified simulation of wavefront measurement	95
3.2.3 Laboratory verification	102
3.3 End-to-end simulation	103
3.3.1 Sources of wavefront distortion	103
3.3.2 Simulation setup	105
3.3.3 Results	106
3.4 Conclusion	108
4 Summary and Future Prospects	111
4.1 Summary of the thesis	111
4.2 Future prospects	113
4.2.1 Additional observations with the turbulence profiler	113
4.2.2 Mitigation of the rolling shutter effect for LTAO	114
Acknowledgements	115

References	117
Appendix A	123
Appendix B	125
Appendix C	127
Appendix D	153
Appendix E	159
Appendix F	169

論 文 要 旨

In ground-based astronomy in optical and near-infrared wavelength, turbulence in the Earth's atmosphere causes wavefront distortion, which results in poorer angular resolution or worse sensitivity compared to the intrinsic performance of large telescopes. One of the solutions is using an adaptive optics (AO) system, which controls the wavefront distortion with a loop speed faster than the atmosphere changes. Recently, AO using multiple laser guide stars (LGS) and atmospheric tomography techniques have been developed and demonstrated for AO working with a wider field of view, at shorter wavelength, and over larger sky coverage, compared to the classical AO. The AO with multiple LGS is also important in terms of the technique being a standard observation mode in the era of extremely large telescopes.

This thesis focuses on two topics related to the development of AO with multiple LGS in the context of the ULTIMATE project at the Subaru telescope. The first topic, measuring atmospheric turbulence profiles at the Subaru telescope, is crucial for designing AO parameters, optimizing the tomographic wavefront reconstruction matrix, and evaluating AO performance. In order to investigate free atmospheric turbulence with a high altitude range and ground layer turbulence with a fine altitude resolution at the same time, we develop a novel atmospheric turbulence profiler comprising two Shack-Hartmann (SH) sensors with a fine pupil sampling of 2 cm. Through several engineering observations at the Subaru telescope, we obtain free atmospheric turbulence profiles with a range of 1-20 km and a resolution of a few km and ground layer turbulence profiles with a range of up to 400 m and a resolution of 10-20 m, which is applicable to tomography and performance simulation for the ULTIMATE AO systems. Besides, we measure total seeing and wind speed/direction profile based on the slope and scintillation measurements by a single SH sensor.

The second topic, evaluating the performance of detectors with rolling shutter mode as AO wavefront sensors, is important considering that recent commercially-available CMOS detectors have many attractive features such as faster frame rate, lower readout noise, and larger format size, compared to conventional CCD detectors. In this study, we model the behaviors of wavefront sensors with rolling shutter mode and perform AO simulations to evaluate their performance. The result suggests that additional wavefront error induced by the rolling shutter is sufficiently small for GLAO, though not negligible for LTAO.

論文審査の結果の要旨

天体からの光波の地球大気による揺らぎを補正する補償光学は、地上の大型望遠鏡による宇宙観測においては必須の技術となっている。より高い補正性能やより広い領域に対する補正を実現するために、複数のレーザー人工星を用いた補償光学が稼動し始めている。その性能の予測や運用においては大気乱流の高度分布の情報が重要な役割を果たす。複数のレーザー人工星を用いて望遠鏡の回折限界の補償を実現するレーザートモグラフィ補償光学においては大気乱流の高度分布をリアルタイムに測定することが求められる。

大金原氏は大気乱流の高度分布を求める手法としてシャックハルトマン波面センサー(SH-WFS)のスポット像に見られるシンチレーションの信号を用いた新しい手法、SH Multi Aperture Scintillation Sensor (SH-MASS)、を考案した。2cm 程度の高い空間分解能を持つ SH-WFS を用いて、星像の明滅(シンチレーション)の時系列データを取得することで上空 1km をこえる自由大気の大気乱流の高度分布を推定する手法である。さらにこの手法ではカバーできない地表層付近の大気乱流の情報を取得するため、2 台の SH-WFS を用いる SLOpe Detection And Ranging (SLODAR)の手法と組み合わせた測定系を構築した。大金氏は測定系の光学機械設計を自分で行うと共に、測定系の組み上げとすばる望遠鏡に取り付けた試験観測までを主体的に行った。得られたデータを SH-MASS および SLODAR の手法で解析し、自由大気および地表層の大気乱流の高度分布を得ることに成功し、すばる望遠鏡の地表層付近の大気乱流は望遠鏡のドーム高さ付近までに集中していることを明らかにした。さらに、時系列の相関を取る解析により、上空の大気乱流が風とともに移動する情報から、風向および風速の高度分布を得る手法を確立した。

さらに大金氏は波面センサーの検出器としてその低読み出しノイズや安価さから注目される CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) センサーの波面測定性能の評価を行った。特にグローバルシャッター読み出しである Charge Coupled Device (CCD) に比較して、ローリングシャッター読み出しとなる CMOS では、その読み出し方法の違いが波面測定に与える影響が懸念されていた。大金氏は補償光学シミュレーションを通じた評価により地表層補償光学であればローリングシャッター読み出しの影響は無視できるほど小さいことを示した。

以上の結果は自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、大金原氏の提出した博士論文は、博士(理学)の学位論文として合格と認める。