

Martin Glück

Disturbance Mitigation Approaches for the ELT Instrument MICADO

Band 55

**Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart**



DISTURBANCE MITIGATION APPROACHES FOR THE ELT INSTRUMENT MICADO

Von der Fakultät
Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Martin Glück

geboren in Sinsheim

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Alois Herkommer

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Oktober 2020

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2020

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 55

Martin Glück

Disturbance Mitigation Approaches
for the ELT Instrument MICADO

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

DOI 10.2370/9783844077254

ISBN 978-3-8440-7725-4

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart. Die Forschungsarbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny für die Möglichkeit zur Mitarbeit und Promotion am ISYS sowie das entgegengebrachte Vertrauen, die Betreuung, die Unterstützung und die Übernahme des Hauptberichts dieser Arbeit. Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Dr.rer.nat. Alois Herkommer vom Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart für die Übernahme des Mitberichts und Herrn Prof. Dr.-Ing. Bertsche vom Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken.

Darüber hinaus möchte ich bei den Kollegen vom MPIA in Heidelberg insbesondere für die tatkräftige Unterstützung bei der Umsetzung von Versuchen im Labor bedanken. Ausdrücklich bedanke ich mich bei Jörg-Uwe Pott, dem Verantwortlichen des Kooperationsprojekts, für das Interesse, die zahlreichen Diskussionen zu meiner Arbeit und im allgemeinen zur Grundlagenforschung. Jörg-Uwe war immer daran interessiert die Konzepte der Arbeit in die Praxis umzusetzen. Dabei ermöglichte er mir, Teile der Arbeit am Large Binocular Telescope (LBT) in Arizona zu implementieren. Dies war verbunden mit mehreren Reisen nach Tucson, bei denen ich viele hilfsbereite und nette Menschen kennen lernen durfte. Für die Unterstützung in Tucson möchte ich Albert Conrad vom LBT herzlich danken. Des weiteren möchte ich mich bei Santiago Barboza für den fachlichen Austausch, die Unterstützung meiner Arbeit und die außerfachlichen Diskussionen am MPIA bedanken.

Meinen Institutskolleginnen und -kollegen danke ich herzlich für die tolle Zeit am ISYS, die fachliche Unterstützung und das sehr gute Miteinander. Insbesondere gilt mein Dank meinen Zimmerkollegen Alexander Keck, Michael Böhm, Michael Ringkowski und Philip Neureuther für die zahlreichen Diskussionen auch über das Fachliche hinaus. Hervorheben möchte ich die immer wieder ermunternden Worte von Michael Ringkowski, die zum erfolgreichen Abschließen der Arbeit beigetragen haben. Außerdem möchte ich mich bei Gerlind Preisenhammer und Corina Hommel für die zahlreiche Unterstützung bei organisatorischen Dingen bedanken.

Abschließend bedanke ich mich herzlich bei meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung und die kontinuierlichen ermutigenden Worte.

Aalen, im Oktober 2020

Martin Glück

ABSTRACT

The Extremely Large Telescope (ELT), with a primary mirror diameter of 39 m, will be built in the Atacama desert in Chile. One of the three first light instruments is the Multi-Adaptive Optics Imaging Camera for Deep Observations (MICADO). In order to achieve diffraction-limited images in MICADO, disturbances in the optical path need to be mitigated. Two disturbance sources have been identified, to be compensated by advanced control schemes: the field of view rotation tracking deviation due to mechanical imperfections for the counter-rotation of the earth's rotation and the induced structural vibrations in the optical path.

The field of view rotation is corrected by counter-rotating the MICADO instrument by a four-point contact ball bearing with a diameter of 2.8 m, the so-called derotator. Due to the slow rotation speeds of the bearing stick-slip friction effects cause a violation of the rotation accuracy requirement of $9.7 \mu\text{rad}$ in root mean square (RMS). A model-based friction compensation is developed, to handle these stick-slip effects. In a laboratory setup the developed models are identified and the compensation performance is evaluated. The friction compensator reduces the tracking error for rotation velocities smaller than $5 \mu\text{rad/s}$ by a factor of two for the MICADO derotator.

In the past, Adaptive Optics (AO) systems were designed, to compensate mainly for the atmospheric turbulence. However, structural vibrations become more dominant in telescope structures such as the ELT. A larger primary mirror allows for a higher diffraction-limited resolution, the wavefront error budget for the structural vibrations at each telescope mirror however is consequently tightened. Moreover, the fabrication of such large mirrors comes along with a reduced ratio between stiffness and mass. Therefore, further significant natural frequencies are introduced into the optical system. Structural vibrations are mainly caused by wind excitation of the telescope structure, where mainly the mirror's out-of-plane rotations dominates the image motion on the detector. In addition, the light through the atmospheric turbulence also contributes at its most to the image motion. Thus, the disturbances need to be compensated by a deformable mirror (DM) and an additional tip-tilt mirror (TTM). An over-actuated system with non-negligible compensation mirror dynamics and input constraints needs to be controlled based on the wavefront sensor (WFS) of the AO system for the out-of-plane rotations. A model predictive control (MPC) approach is proposed to fulfill these requirements. The main purpose of investigating an MPC approach is the consideration of input constraints of the compensation mirrors. An MPC approach is often not applied in mechatronic systems due to the fast sampling rates. However, for the image motion controller the model order is small enough to solve the optimization problem within the applied sampling rate of 2 ms. In order to analyze the performance, the MPC approach is compared with two common control structures: a dual stage and a linear quadratic (LQ) controller. The dual stage control scheme allows an individual controller design for each mirror. In comparison, the LQ controller is an optimal controller for the overall compensation mirrors. Additionally, the performance of a LQ controller and an MPC

can be improved by using disturbances models for prediction. The real time capability of the MPC approach is successfully tested and compared with the common schemes in a laboratory setup. The image motion can be significantly reduced in case of input constraints by the use of an MPC approach. These results show that the MPC image motion stabilization extends the use of the MICADO instrument for observation with difficult atmospheric conditions and structural vibrations.

In addition, accelerometers on the telescope mirrors can be used for the image motion correction due to structural vibrations. Especially, for scenarios where the AO wavefront sensor is longer exposed for a better signal-to-noise ratio of the WFS. Thus, the AO loop bandwidth is reduced and high frequency vibrations cannot be completely mitigated. Accelerometers measure vibrations independent of the observation light. Therefore, the high frequency vibrations are seen by the accelerometers and are compensated by a disturbance feedforward control. This scheme was implemented at the Large Binocular Telescope (LBT) to evaluate the mitigation performance in a real telescope environment with respect to the MICADO instrument.

KURZZUSAMMENFASSUNG

Derzeit wird das größte Teleskop der Welt, das Extremely Large Telescope (ELT), mit einem Primärspiegeldurchmesser von 39 m in der Atacama-Wüste in Chile errichtet. Eines der drei ersten Instrumente am Teleskop wird die Multi-Adaptive Optics Imaging Camera for Deep Observations (MICADO) sein. Um die Beugungsbegrenzung innerhalb des MICADO-Instruments zu erreichen, müssen auf den optischen Pfad wirkende Störgrößen kompensiert werden. Dabei sind zwei Störquellen identifiziert worden, deren Kompensation untersucht wird: Abweichungen der Sichtfeldrotationsnachführung aufgrund von mechanischen Imperfektionen für die Gegenbewegung der Erdrotation und Bildbewegungen aufgrund von Strukturvibrationen.

Die Sichtfeldrotation wird durch eine entgegengesetzte Rotation des MICADO Instruments auf einem 2.8 m Durchmesser Kugellager kompensiert. Das Lager soll mit einer Genauigkeit von $9.7 \mu\text{rad}$ gedreht werden. Im Bereich der geforderten Drehgeschwindigkeiten treten Haftgleiteffekte auf, welche die Genauigkeitsanforderungen verletzen. Zur Verbesserung dieser Drehgenauigkeit wird in dieser Arbeit ein Ansatz zur modellbasierten Reibungskompensation entwickelt. Dazu wird ein mechanisches Modell und ein Reibungsmodell erarbeitet. Die Reibungskompensation wird in einem Laboraufbau implementiert, die zugehörigen Modelle werden identifiziert und die Störminderung evaluiert. Die Drehgenauigkeit für Geschwindigkeiten kleiner $5 \mu\text{rad/s}$ bei auftretenden Haftgleiteffekten wird mit einer Reibungskompensation verdoppelt.

In der Vergangenheit wurden Adaptive Optik (AO) Systeme hauptsächlich zur Unterdrückung der atmosphärischen Turbulenz verwendet. Der Einfluss von Strukturschwingungen in Teleskopen wie dem ELT nehmen auf den optischen Pfaden signifikant zu. Ein größerer Primärspiegel ermöglicht eine höhere beugungsbegrenzte Auflösung, wobei aber auch das Wellenfrontfehlerbudget an die Teleskopspiegel hinsichtlich Strukturvibrationen deutlich verschärft wird. Zudem wird das Verhältnis zwischen Steifigkeit und Masse aufgrund der Spiegeldimensionen kleiner. Daher werden weitere Eigenschwingungen in das optische Systeme eingebracht. Strukturschwingungen werden hauptsächlich durch die Windanregung der Teleskopstruktur verursacht, wobei vor allem die Drehungen des Spiegels aus der Ebene heraus die Bildbewegung auf dem Detektor dominieren. Darüber hinaus trägt auch das Licht durch die atmosphärischen Turbulenzen am meisten zur Bildbewegung bei. Daher müssen die Störungen durch einen deformierbaren Spiegel (DM) und einem zusätzlichen Kippspiegel (TTM) kompensiert werden. Ein überaktuiertes System mit nicht vernachlässigbarer Dynamik der Kompensationsspiegel und Eingangsbeschränkungen wird mittels des AO Systems geregelt. Zur Erfüllung dieser Anforderungen wird ein modellprädiktiver (MPC) Ansatz vorgeschlagen. Der Hauptzweck der Untersuchung eines MPC-Ansatzes ist die Berücksichtigung von Eingangsbeschränkungen der Kompensationsspiegel. Ein MPC-Ansatz wird in mechatronischen Systemen aufgrund der schnellen Abstraten oft nicht angewandt. Für den Bildbewegungskompensation ist die Modellordnung jedoch klein genug, um das Optimierungsproblem innerhalb der angewandten Abstrakte von 2 ms zu lösen.

Um die Leistungsfähigkeit zu analysieren, wird der MPC-Ansatz mit zwei gängigen Regelungsstrukturen verglichen: einem Dual Stage und einem linear-quadratischen (LQ) Regler. Der Dual Stage Regler ermöglicht einen separaten Tip-Tilt-Reglerentwurf für die Kompensationsspiegel. Im Vergleich dazu ist der LQ-Regler ein modellbasierter Reglerentwurf. Zusätzlich kann die Störgrößenunterdrückung mit Störmodellen für die atmosphärische Turbulenz und die Strukturschwingungen weiter verbessert werden. Die Echtzeitfähigkeit des MPC-Ansatzes wird in einem Laboraufbau untersucht und mit gängigen Ansätzen verglichen. Die Bildbewegung kann im Falle von Eingangsbeschränkungen durch die Verwendung eines MPC-Ansatzes erheblich reduziert werden. Mit einer MPC-Bildbewegungsstabilisierung kann das MICADO-Instrument für Beobachtungen mit schwierigen atmosphärischen Bedingungen und Strukturvibrationen verwendet werden.

Zusätzlich können Beschleunigungssensoren an den Teleskopspiegeln zur Korrektur der Bildbewegung verwendet werden. Insbesondere für Szenarien bei denen der AO-Wellenfrontsensor für ein besseres "Signal zu Rauschverhältnis" (SNR) länger belichtet wird. Dadurch wird die Vibrationsunterdrückung im AO-Regelkreis reduziert. Beschleunigungssensoren messen Vibrationen unabhängig vom Beobachtungsobjekt. Daher können Vibrationen schneller erfasst und mit einer Störgrößenaufschaltung unterdrückt werden. Dieses Konzept wurde am Large Binocular Telescope (LBT) implementiert, um Aussagen über die Störunterdrückung in einer realen Umgebung im Hinblick für das MICADO Instrument zu erhalten.

CONTENTS

1	Introduction	1
1.1	European Extremely Large Telescope	3
1.2	The MICADO instrument	8
1.3	Disturbance mitigation in MICADO	11
1.4	State of the art	19
1.5	Aim of the work and outline	24
2	Modeling and control of the derotator	25
2.1	Modeling	27
2.1.1	Mechanics	28
2.1.2	Elasto-plastic friction model	32
2.2	Friction compensation scheme	34
2.3	Laboratory results	37
2.3.1	Model identification	37
2.3.2	Model-based disturbance compensation	42
2.4	Conclusion	43
3	Modeling of the adaptive optics	45
3.1	Telescope optics	46
3.1.1	Mirror kinematics	48
3.1.2	Image motion	50
3.1.3	Detector image	51
3.2	Atmospheric turbulence	53
3.2.1	Kolmogorov's turbulence description	53
3.2.2	Light propagation through the atmosphere	55
3.2.3	Temporal behavior of the atmosphere	57
3.3	Structural vibrations	60
3.4	Sensors	61
3.4.1	Pyramid wavefront sensor	61
3.4.2	Accelerometers	65
3.5	Compensation mirrors	68
3.5.1	Deformable mirror	68
3.5.2	Tip-tilt mirror	78
3.6	Wavefront control	87
3.7	Performance evaluation	88
3.8	Conclusion	89

4	Disturbance compensation schemes	91
4.1	Integral action	92
4.1.1	Dual stage control	92
4.1.2	Linear quadratic integral control	94
4.1.3	Model predictive control	96
4.2	Disturbance observer	99
4.3	Disturbance feedforward control	102
4.4	Multi-rate disturbance observer	105
4.5	Simulation results	107
4.5.1	Integral action	107
4.5.2	Disturbance observer	112
4.5.3	Disturbance feedforward control	116
4.5.4	Multi-rate disturbance observer	118
4.6	Laboratory results	120
4.6.1	Frequency behavior	122
4.6.2	Telescope benchmark signals	123
4.6.3	Disturbance feedforward control	124
4.7	Conclusion	125
5	Tip-tilt disturbance feedforward control at the LBT	127
5.1	Large Binocular Telescope	127
5.1.1	Adaptive Optics	128
5.1.2	Optical path difference and Vibration Monitoring System	129
5.2	Implementation	131
5.2.1	Coordinate transformation for the ASM	132
5.3	Tip-Tilt sensing verification	134
5.4	Simulation study	137
5.5	Daytime tests	139
5.6	Conclusion	143
6	Conclusion	145
Appendix		
A	Fundamentals of optics	149
B	Friction modeling	153
Acronyms		158
Symbols		159
List of Figures		167
List of Tables		171
Bibliography		173