

Development of a Pneumatically Driven Flight Simulator Motion Platform

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

von

Justin Pradipta
geboren in Bandung

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Tag der mündlichen Prüfung:	17. August 2016

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2016

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 30

Justin Pradipta

**Development of a Pneumatically Driven
Flight Simulator Motion Platform**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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.

ISBN 978-3-8440-4921-3

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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

Foreword

The works on the doctoral thesis were carried out during my time as a member of the academic staff at the Institute for System Dynamics, University of Stuttgart. The works were possible thanks to the supports generously provided by the German Academic Exchange Service (DAAD).

I would like to express my gratitude towards Prof. Dr.-Ing. Oliver Sawodny, for the supervision and guidance at the Institute for System Dynamics. Through his encouragement I was able to overcome my doubt and regain my confidence. I am very grateful to Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss for taking the responsibility of co-reviewing my dissertation.

Also to the professors, Prof. Michael Zeitz, Prof. Cristina Tarin and Prof. Herbert Wehlan for the helpful recommendation letters and fruitful discussion.

I would like to thank my colleagues at the Institute for System Dynamics for the conducive working atmosphere. In particular my office roommates Michael Heidingsfeld, Karl Lukas Knierim, Mark Wörner, and Adrian Raisch. Thank you for the technical assistance to Joachim Endler for making the ServoFlight project possible. Also to Mario Klünder and Dr. Eckhard Arnold for the help with improving my work.

Thank you for my students, for the works they delivered has helped me complete my dissertation. Notably Tobias Miunske, now at the FKFS Uni-Stuttgart, for his ability of flying which immensely helped me in developing the flight simulator.

I am particularly grateful to my wife, Rahmi and my two brilliant stars, Aldebaran and Antares, they were always boosting my morale so I could carry on and finish my work. Thank you to my parents as well, for giving me the inspiration to pursue my doctor degree abroad.

Singapore, March 2016

Justin Pradipta

Kurzfassung

Mit dem stetigen Wachstum der Luftfahrtindustrie und der Herausforderung, Piloten möglichst realitätsnah zu trainieren, erhöht sich somit auch das Kosten- und Zeitmanagement der Pilotenausbildung. Dabei sind zertifizierte Flugsimulatoren für Piloten eine gute Möglichkeit, ein Flugzeug wie in der Realität zu fliegen und sich effektiv auf den Pilotenberuf vorzubereiten. Dies ist für Piloten ein bedeutendes Ausbildungsgerät, um Erfahrungen und Flugstunden in einer gesicherten Umgebung und in einem abgestimmten Trainingsprogramm zu sammeln.

Heutzutage gibt es viele Arten von Flugsimulatoren mit unterschiedlichen Komplexität und Funktionalität. Mit ansteigender Komplexität von Simulatoren wachsen auch die Anschaffungs- und Unterhaltungskosten des Gesamtsystems. Einfache Varianten solcher Flugsimulatoren enthalten kein Bewegungssystem. Verfügt ein Flugsimulator über eine Bewegungsplattform, so wird dieser als Full-Flight Simulator bezeichnet und erreicht damit eine höhere FAA-Qualifikation Level. Der ausschlaggebende Aufwand eines derartigen Flugsimulators ist die Bewegungsplattform. Das ServoFlight-Projekt beschäftigt sich mit neuartigen Lösungsansätzen für eine solche Plattform. Die Idee ist dabei die Entwicklung einer kosteneffizienten Bewegungsplattform für einen Flugsimulator, welche über pneumatische Antriebe angesteuert wird.

Die pneumatisch angetriebene Bewegungsplattform ist in Form Stewart-Plattform aufgebaut. Für die Plattformbewegung aller sechs Freiheitsgrade im Raum werden sieben Zylinder verwendet. Mit einem zusätzlichen Mittelzylinder zählt die ServoFlight-Plattform zu dem Bereich der parallelkinematischen Simulatorplattformen. Die Aufgabe des Mittelzylinders ist die Kompensation der schweren Simulatorplattform inklusive der Nutzlast, sodass die äußeren sechs Zylinder entlastet werden können. Die Kraftverteilung einer derartigen Konfiguration eines Parallelroboters macht die Verwendbarkeit von weniger leistungsfähigen Aktoren möglich.

Bezüglich der Plattformansteuerung können mittels eines dualen Steuerungsschemas kinematische Beschränkungen eliminiert werden. Dabei steuern zum einen die äußeren sechs Zylinder den eigentlichen Bewegungsablauf, während zum anderen der Mittelzylinder für die Kräftekompensation der Plattformgewichtskraft zuständig ist. Dieser verwendet für die Kräfteregelung die Methode der exakten Ein-/Ausgangslinialisierung. Bei dieser Vorgehensweise werden zwei unterschiedliche Referenztrajektorien benötigt - einerseits die eigentliche Bewegungstrajektorie für alle sechs Außenzylinder und andererseits die darauf abgestimmte Krafttrajektorie für den Mittelzylinder.

Weiterhin wird eine verbesserte Bewegungstrajektorie für den Full-Flight Simulator erläutert. Dabei wird die Bewegungstrajektorie der äußeren Zylinder über einen Motion-Cueing-Algorithmus (MCA) generiert, der auf einem beschränkten Optimalsteuerungsproblem beruht, welches optimale Wahrnehmungsbeschleunigungen unter Berücksichtigung aller Zylinderbeschränkungen der Simulatorplattform generiert. Aufgrund des limitierten zur Verfügung stehenden Arbeitsraumes der Bewegungsplattform und der redundanten Auslegung werden die

Zylinderbeschränkungen wesentlich komplexer. Um die Beziehung zwischen der Beschleunigung in Plattformkoordinaten und Zylinderkoordinaten herzustellen, wird die differentielle Kinematik verwendet. Für das Beschleunigungsprofil, welches vom aktuellen Zylinderweg abhängt, wird eine Beschleunigungsbeschränkung in Zylinderkoordinaten definiert, die in eine Positionsbeschränkung für die Aktuatoren umgerechnet werden kann. Des Weiteren wird eine Krafttrajektorie für den Mittelzylinder unter der Verwendung eines inversen dynamischen Modells analytisch hergeleitet.

Die Messergebnisse zeigen, dass die vorgestellte Regelungsmethode für eine effektive Plattformansteuerung gut geeignet ist und nur kleine Zeitverzögerungen und geringe Abweichungen aufweist. In erster Linie sollen die Bewegungsplattform und deren Auslegung für Flugsimulatoren verwendet werden. Der vorgestellte MCA ist zu allen Zeiten in der Lage, die Zylinder in ihren Beschränkungen zu halten und zusätzlich dem Simulatorpiloten eine realistische Bewegungswahrnehmung zu übermitteln.

Abstract

The constantly growing aviation industry and the difficulty to train pilots increases the demand on cost efficient and time effective pilot training. Flight simulators are an acknowledged solution to prepare pilots for flying an aircraft effectively and safely. There are many kinds of flight simulators and they are ranged by their fidelity and complexity. The more complex the simulator, the more costly the system becomes. A simpler variation of a flight simulator may not have a motion system and it is called a flight training device. When a flight simulator has motion feedback in the system, then it can be called a full flight simulator and reaches a higher qualification level.

One major expense of a full flight simulator is the motion platform. Therefore, the ServoFlight project was set up to provide a cost efficient solution by developing a motion platform for a flight simulator using relatively less expensive pneumatic actuators. The final objective of the ServoFlight project is a low cost full flight simulator that can be used for pilot training and can partially replace training in high cost simulators.

In this thesis, a motion platform for a flight simulator that is driven by pneumatic actuators is developed. The platform is called the ServoFlight platform. It is a parallel manipulator configured in a Stewart platform fashion. Seven pneumatic cylinders are utilized to actuate the six degrees-of-freedom motion platform. With the extra cylinder, the ServoFlight platform is categorized as a redundantly actuated parallel manipulator. The redundant cylinder is the middle cylinder with the task of compensating the platforms heavy payload and relieves the outer six cylinders to only positioning. Force distribution is one of the advantages of a redundant parallel manipulator configuration, making the utilization of less powerful actuators feasible.

To control the platform dual control scheme is proposed, with the benefit of eliminating the kinematic constraints caused by the seven-cylinders configuration. The six outer cylinders are controlled according to motion trajectories whereas the middle cylinder acts as a pure force actuator to lift the weight of the platform. The Immersion and Invariance method is used for the motion control of the outer cylinders. Exact input/output linearization is used for designing the force control of the middle cylinder. The dual control scheme requires two kinds of reference trajectories; Motion trajectories for the outer cylinders and force trajectory for the middle cylinder.

An improved method to provide a motion trajectory for a full flight simulator to simulate the acceleration during a flight simulation is presented. The motion trajectory of the outer cylinders is generated by the motion cueing algorithm (MCA). The MCA is based on a constrained optimization problem, where the optimal acceleration cues are subjected to the actuators travel constraints. The motion platform's available workspace is more limited due to the redundant configuration, therefore the actuator constraints become more complex. The differential kinematic analysis is utilized in the optimization problem to define the relationship of the acceleration in the platform coordinate and in the actuator coordinates. An acceleration profile is

defined as a function of the actuator travel to create a strict acceleration constraint in the actuator coordinate, and thus a strict travel constraint. A force trajectory for the middle cylinder is derived analytically using the inverse dynamic model to maximize the benefit of the redundant actuator. A feed-forward control scheme is proposed with the requirement of good position tracking control.

The measurement results show that the proposed control scheme is effective for controlling the platform. It performs well with very small deviation and low total delay time. The platform is principally suitable to be used in a full flight simulator. The proposed MCA is able to keep the actuators within their travel limit while at the same time providing the correct motion cues for the simulator pilots. The need to tune the motion cueing algorithm for the worst case scenario, which is necessary to avoid damage to the platform but is also detrimental to the normal case, is relieved by the utilization of an on-line optimization process. The generated force by the middle cylinder is proven to reduce the average force of the outer cylinders, increasing the overall dynamic reserve of the platform.

Contents

Foreword	3
Kurzfassung	5
Abstract	7
1 Introduction	13
1.1 Reference System: ServoFlight	15
1.1.1 Flight Training Device: Diamond Aircraft Industries D-SIM 42	16
1.1.2 ServoFlight Platform	19
1.2 State of the Art	20
1.2.1 Motion Platforms	20
1.2.1.1 Control of six degrees-of-freedom parallel manipulator	22
1.2.1.2 Pneumatically actuated motion platform	22
1.2.1.3 Redundantly actuated parallel manipulator	23
1.2.2 Pneumatic Cylinder Control	24
1.2.3 Motion Cueing Algorithm	26
1.3 Objective and Structure of the Dissertation	29
2 Fundamentals	31
2.1 ServoFlight Platform Model	31
2.1.1 Inverse Kinematic	34
2.1.2 Jacobian Analysis of the Differential Kinematics	35
2.1.3 Direct Kinematic	38
2.1.4 Dynamics of the Platform	39
2.2 Pneumatic Cylinder Model	42
2.2.1 Cylinder Dynamic	42
2.2.2 Chamber Pressure Dynamics	43
2.2.3 Valve Model	45
2.2.4 State Space Representation	49
2.2.5 Differentially Flat Model	51
2.2.6 Friction Model	53
3 Controller Design	55
3.1 Control Strategy	55
3.2 Position Tracking Control Design	56
3.2.1 Immersion and Invariance Theorem	57
3.2.2 Immersion and Invariance Control Synthesis	58
3.2.3 Adaptive Immersion and Invariance Control Theorem	59

3.2.4	Adaptive Immersion and Invariance Control Law	61
3.3	Force Trajectory Tracking Control Design	62
3.3.1	Reduced Model of the Pneumatic Cylinder for Force Controlled Middle Cylinder	63
3.3.2	Exact Input/Output Linearization	64
4	Trajectory Generation	67
4.1	The Human Sense of Motion: Vestibular System	67
4.1.1	Semicircular Canals	68
4.1.2	The Otoliths	69
4.1.3	Motion Perception Thresholds	71
4.2	Motion Cueing Algorithm	71
4.2.1	Input Scaling and Limiting	73
4.2.2	Coordinate Transformation	74
4.3	Classical Washout Filter	76
4.3.1	High Pass Filter	76
4.3.2	Tilt Coordination	78
4.4	Adaptive Motion Cueing Algorithm	78
4.5	Actuator Constrained Motion Cueing Algorithm	81
4.5.1	C^3 High Pass Filter	82
4.5.2	Translational Channels	85
4.5.3	Rotational Channels	86
4.5.4	All Channels	88
4.5.5	Actuator Constrained Optimization Problem	89
4.5.6	Transformation into Actuator Coordinates	90
4.6	Middle Cylinder Force Trajectory Generation	91
4.6.1	Inverse Dynamic Model	91
4.6.2	Force Trajectory Generator	91
5	Experiment results and discussion	95
5.1	Controller Performance	95
5.1.1	Outer Cylinders Position Control	95
5.1.2	Middle Cylinder Force Control	100
5.1.3	Total Transport Delay	106
5.2	Actuator Constrained Motion Cueing Algorithm	109
5.2.1	Simulation Results of the Actuator Constrained MCA	110
5.2.2	Measurement Results	111
6	Conclusion	119
	List of Symbols	121
A	Appendices	125
A.1	The first derivative of the combined rotation matrix $\dot{\mathbf{R}}_{BC}$	125
A.2	The second derivative of the combined rotation matrix $\ddot{\mathbf{R}}_{BC}$	126
A.3	Filter parameters	127
A.4	ServoFlight platform parameters	128

A.5 Weighting matrices	129
A.6 Platform motion envelope	129
A.7 Workspace Analysis	130
A.8 Actuator Constrained Motion Cueing Algorithm Safety Function	133
List of Figures	135
List of Tables	139
Bibliography	141