



Institute of Electrical Measurement and Measurement Signal Processing  
Institute of Lightweight Design  
Graz University of Technology  
A-8010 Graz, Austria

---

Master's Thesis

# Image-based Measurement of Relative Motions between Railway Vehicle Carbodies

Author:

**Robert Hödl, BSc.**

Supervisors:

**Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Axel Pinz**

**Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Thurner**

January, 2013



---

## Abstract

The test and validation process of connecting components between railway vehicles comprises the determination of the performed relative motions between two adjacent car-bodies during operation. Existing measurement systems have the drawback of being extensive and time consuming regarding installation, measurement and analysis. This thesis is concerned with the feasibility study and prototype development of a robust and cost-efficient image-based measurement system, which is capable of tracking the relative motions between railway vehicle car-bodies.

First, the thesis defines the operational requirements of an image-based measurement system. Then a suitable marker and an accompanying target design as well as a robust tracking method are introduced. Further, two appropriate pose estimation algorithms are determined and chosen for evaluation. Moreover, an adequate measurement setup relating to the specified carbody motion model is developed and the corresponding pre-requisites are described. At last, these considerations enable the definition an appropriate optical imaging system.

The feasibility of the designed image-based measurement system is investigated by extensive experiments conducted on a laboratory scale and using a full-scale test rig. Detailed evaluation of the uncertainties is carried out which allows to derive important implications concerning the measurement setup. From the results, it is apparent that the proposed system meets the specified requirements and is capable of measuring the relative motions within the defined limits, but to a certain extent remains susceptible to inaccuracies in the measurement setup and changing lighting conditions. Recommendations for a specific pose estimation method and further enhancements to increase robustness are given. The suitability of the system is finally verified in the course of a test ride on board of a high-speed train.

The proposed image-based measurement system contributes a novel, genuine alternative to conventional methods applied to the particular task of measuring the relative motions between two railway vehicle car-bodies. It perfectly fulfils the technical and economic requirements.



---

## Kurzfassung

Zur Auslegung von verbindenden Komponenten zwischen Wagenkästen, werden in der Entwicklung von Schienenfahrzeugen umfangreiche Tests und Prüfungen durchgeführt. Im Zuge dieser Tests ist es auch erforderlich die Relativbewegungen zwischen zwei zusammenhängenden Wagenkästen zu ermitteln. Aktuell eingesetzte Messverfahren haben den Nachteil, einerseits sehr zeit- und kostenaufwendig bei Installation und Inbetriebnahme, sowie andererseits komplex in der Auswertung zu sein. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb die Realisierbarkeit eines bildgestützten Systems zur Messung von Relativbewegungen zwischen Wagenkästen überprüft. Eine prototypische Umsetzung soll sowohl die Eignung als auch die Robustheit und Wirtschaftlichkeit eines solchen Systems verifizieren.

In dieser Arbeit werden zuerst die grundlegenden Anforderungen und Einsatzbedingungen eines bildgestützten Messverfahrens festgelegt. Weiters werden eine geeignete Messmarke samt einhergehender Anordnung auf einem planaren Zielobjekt und eine zugehörige Trackingmethode vorgestellt, sowie zwei verschiedene Algorithmen zur Poseschätzung präsentiert. Passend zu dem vorgegebenen Modell der Wagenkastenbewegungen wird ein eigens entwickelter Messaufbau und die dafür notwendigen Voraussetzungen beschrieben. Aus diesen Erkenntnissen ist abschließend ein adäquates optisches Aufnahmesystem ableitbar.

Die Realisierung und Umsetzung des entwickelten Systems wird in verschiedenen Experimenten, im Labor und auf einem Prüfstand, untersucht. Die ausführliche Evaluierung der Messunsicherheiten erlaubt wichtige Rückschlüsse auf den Messaufbau. Aus den Resultaten der Experimente ist schließlich ersichtlich, dass das präsentierte Verfahren in der Lage ist, die gesuchten Relativbewegungen innerhalb der geforderten Genauigkeiten zu messen. Bis zu einem gewissen Grad bleibt das Verfahren jedoch anfällig in Bezug auf Ungenauigkeiten im Messaufbau sowie auf sich ändernde Lichtverhältnisse. Weiters werden Empfehlungen zur Auswahl eines Algorithmus zur Poseschätzung sowie Verbesserungen bezüglich der Robustheit erarbeitet. Die prinzipielle Eignung des entworfenen Systems wird im Rahmen einer Messfahrt an Bord eines Hochgeschwindigkeitszuges nachgewiesen.

Das vorgestellte bildgestützte Verfahren zur Messung von Relativbewegungen zwischen Wagenkästen stellt eine neuartige Alternative zu den konventionell eingesetzten Methoden dar, da es die gestellten Anforderungen hinsichtlich technischer Eignung und Wirtschaftlichkeit bestens erfüllt.



**This thesis is dedicated to my family  
for their unconditional love  
and endless support.**

5c9320d21e24f4875bb4baa185151f45





---

## Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

---

DATE

---

ROBERT HÖDL



## Contents

<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation and Problem Statement . . . . .	1
1.2. Railway Vehicle Carbody Motions . . . . .	2
1.3. Requirements, Constraints and Limitations . . . . .	5
1.4. Basic Setup and Measurement . . . . .	7
1.5. Outline of the Thesis . . . . .	8
<b>2. Related Work</b>	<b>9</b>
<b>3. Rigid Body Pose Estimation</b>	<b>13</b>
3.1. System Overview . . . . .	15
3.2. Marker Tracking . . . . .	16
3.2.1. Fiducial Markers . . . . .	16
3.2.2. Target Design . . . . .	20
3.2.3. Tracking Method . . . . .	21
3.2.4. Influence of Perspective Distortion . . . . .	24
3.2.5. Implementation Details . . . . .	25
3.3. Pose Estimation Algorithms . . . . .	28
3.3.1. Camera Representation . . . . .	29
3.3.2. Pose Estimation from Point Correspondences . . . . .	33
3.3.3. DLT - Direct Linear Transformation . . . . .	34
3.3.4. EPnP - Efficient Perspective-n-Point Camera Pose Estimation . . . . .	36
3.3.5. Necessary Number of Correspondences . . . . .	39
3.4. Measuring Relative Motions between Railway Vehicle Carbodies . . . . .	40
3.4.1. Railway Vehicle Carbody Motion Model . . . . .	40
3.4.2. Measurement Setup and Installation . . . . .	42
3.4.3. Initialisation and Relative Pose Estimation . . . . .	43
<b>4. Optical Image Acquisition System</b>	<b>45</b>
4.1. Requirements . . . . .	45
4.1.1. Camera, Image Sensor and Lens . . . . .	45
4.1.2. Illumination . . . . .	48

4.2. Geometric Camera Calibration . . . . .	50
4.2.1. Camera Calibration Methods . . . . .	50
4.2.2. Camera Calibration Implementation . . . . .	51
4.2.3. Modelling Lens Distortion . . . . .	51
4.2.4. Camera Calibration in Practice . . . . .	53
<b>5. Experimental Evaluation</b>	<b>55</b>
5.1. Methodology . . . . .	55
5.2. Implementations of Pose Estimation Algorithms . . . . .	56
5.3. Experiments in Laboratory . . . . .	57
5.3.1. Measurement Setup . . . . .	57
5.3.2. Experiment 1a . . . . .	59
5.3.3. Experiment 1b . . . . .	62
5.3.4. Experiment 1c . . . . .	65
5.3.5. Uncertainty Analysis . . . . .	68
5.4. Experiments on Test Rig . . . . .	69
5.4.1. Measurement Setup . . . . .	70
5.4.2. Reference Data and Synchronisation . . . . .	71
5.4.3. Experiment 2a . . . . .	73
5.4.4. Experiment 2b . . . . .	77
5.4.5. Experiment 2c . . . . .	80
5.4.6. Evaluation 2a . . . . .	83
5.4.7. Evaluation 2b . . . . .	85
5.5. Evaluation of a Test Ride on a High-Speed Train (Velaro D) . . . . .	87
5.5.1. Measurement Setup . . . . .	88
5.5.2. Measurement Results . . . . .	89
5.6. Computation Time . . . . .	91
5.7. Best Practice Approach . . . . .	92
<b>6. Conclusion</b>	<b>94</b>
<b>Bibliography</b>	<b>97</b>
<b>A. Project Proposal (in German)</b>	<b>i</b>