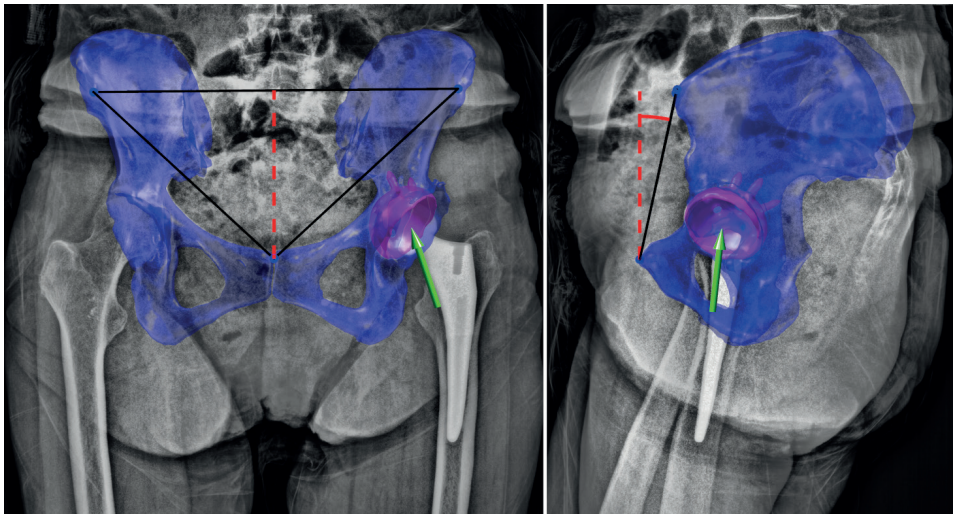


Maximilian C. M. Fischer

Morpho-functional Modelling for Preoperative Planning in Total Hip Arthroplasty



Aachener Beiträge zur Medizintechnik

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Dr. h. c. Steffen Leonhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher

Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

Morpho-functional Modelling for Preoperative Planning in Total Hip Arthroplasty

Morphofunktionelle Modellierung für die präoperative Planung in der totalen Hüftendoprothetik

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Maximilian C. M. Fischer

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher
Apl. Prof. Dr. med. Christian Lüring

Tag der mündlichen Prüfung: 29. April 2022

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Aachener Beiträge zur Medizintechnik

71

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Dr. h. c. Steffen Leonhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher

Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

Maximilian C. M. Fischer

**Morpho-functional Modelling for Preoperative
Planning in Total Hip Arthroplasty**

Ein Beitrag aus dem Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen
(Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher).

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2022

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 10.2370/9783844086713

ISBN 978-3-8440-8671-3

ISSN 1866-5349

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Medizintechnik im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Klaus Radermacher, Direktor des Lehrstuhls für Medizintechnik, für die Betreuung der Arbeit, die stets engagierte Unterstützung und die konstruktiven fachlichen Diskussionen, die zum erfolgreichen Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Die von ihm geschaffenen wissenschaftlichen Rahmenbedingungen ermöglichten mir eine fachliche und persönliche Weiterentwicklung.

また、この論文の執筆するにあたりご協力と臨床データのご提供を頂いた亀田第一病院の徳永邦彦博士及び岡本昌士氏に感謝の意を表します。こうしたご協力なしには論文の大部分が成立しませんでした。

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Christian Lüring, Direktor der Orthopädischen Klinik am Klinikum Dortmund, für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats bedanken.

Weiterhin danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Medizintechnik sowie allen beteiligten Studierenden für die wertvolle Unterstützung während meiner Promotion. Insbesondere bedanke ich mich beim gesamten Team „Biomechanische Modellierung und Simulation“, Dr. Juliana Habor, Dr. Jörg Eschweiler, Dr. Malte Asseln, Christoph Hänisch, Sonja Grothues und Benjamin Hohlmann für die fachliche Unterstützung und sehr gute Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank gilt Dr. Juliana Habor für die produktive und erfolgreiche Zusammenarbeit am Projekt der patientenspezifischen präoperativen Planung in der Hüftendoprothetik.

Tief verbunden und dankbar bin ich meiner Partnerin Vera für ihre Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis bei der Anfertigung dieser Doktorarbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Erika und Christian, die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglicht haben und denen ich diese Arbeit widme.

Summary

Total hip arthroplasty (THA) is the most frequently performed joint replacement worldwide. Preoperative planning considering the patient-specific morphology based on medical images is an established process in clinical routine. Although the high importance of functional parameters, such as the sagittal orientation of the pelvis, known as the pelvic tilt, and the resulting hip joint force, for the optimal alignment of the prosthesis is well-known from literature, these parameters are not usually considered in the preoperative planning process. The reasons for the missing integration might be the lack of adequate technical means and additional time required for the functional analysis as a basis for a prediction of the patient-specific postoperative functional parameters. One approach is the consideration of the relationship between the individual morphology and function of the musculoskeletal system in the development of prediction models for postoperative functional parameters. However, very little attention has been paid to the accuracy of the prediction of the postoperative functional parameters. Therefore, the aim of the thesis was to quantify the prediction uncertainties of clinically applicable morpho-functional prediction models for postoperative functional parameters and reveal the implications for a patient-specific preoperative planning process.

The prediction of the postoperative pelvic tilt in the standing position was evaluated using multiple linear regression models that included preoperative morphological, functional and biometric parameters of a cohort of 196 THA patients. Static musculoskeletal models for the prediction of the hip joint force during the peak force phase of level walking were adapted by the osseous morphology of the patient and validated using in vivo data of ten patients with instrumented hip implants. Selected prediction models of both functional parameters were integrated into the planning process and the necessary reduction of a patient-specific target zone by the prediction uncertainties was investigated. The results show that functional parameters can change significantly after THA and the postoperative values can be predicted preoperatively. The results suggest that preoperative osseous morphological parameters might help to improve the prediction. However, their predictive value seems to be of minor importance. A preoperative measurement of the functional parameter in question, whenever possible and clinically practicable, seems to be a plausible basis for a prediction model. The prediction uncertainty of each prediction model has to be considered in the preoperative planning process. The prediction uncertainties have a significant impact on the preoperative plan. This highlights the importance of accurate preoperative parameter measurements and further research to improve the prediction of postoperative functional parameters.

Zusammenfassung

Die totale Hüftendoprothetik (THEP) ist der weltweit am häufigsten durchgeführte Gelenkersatz. Die präoperative Planung unter Berücksichtigung der patientenspezifischen Morphologie auf der Basis medizinischer Bilddaten ist ein etablierter Prozess in der klinischen Routine. Obwohl die wichtige Rolle funktioneller Parameter, wie der sagittalen Beckenkipfung und der resultierenden Hüftgelenkskraft, für die optimale Ausrichtung der Prothese aus der Literatur bekannt ist, werden diese Parameter im präoperativen Planungsprozess meist nicht berücksichtigt. Gründe für die fehlende Integration könnten das Fehlen adäquater technischer Mittel und der zusätzliche Zeitaufwand für die Funktionsanalyse als Grundlage für eine Vorhersage der patientenspezifischen postoperativen funktionellen Parameter sein. Ein Lösungsansatz stellt die Berücksichtigung der Beziehung zwischen der individuellen Morphologie und der Funktion des muskuloskelettalen Systems bei der Entwicklung von Vorhersagemodellen dar. Der Vorhersagegenauigkeit der postoperativen funktionellen Parameter wurde bisher jedoch nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Ziel der Arbeit war es daher, die Vorhersageunsicherheiten von klinisch anwendbaren morphofunktionellen Vorhersagemodellen für postoperative funktionelle Parameter zu quantifizieren und daraus folgende Konsequenzen für einen patientenspezifischen präoperativen Planungsprozess aufzuzeigen.

Die Vorhersage der postoperativen Beckenkipfung im Stehen wurde mit Hilfe multipler linearer Regressionsmodelle evaluiert, die präoperative morphologische, funktionelle und biometrische Parameter einer Kohorte von 196 THEP-Patienten einbezogen. Statische muskuloskelettale Modelle zur Vorhersage der maximalen Hüftgelenkskraft beim Gehen wurden anhand der knöchernen Morphologie des Patienten angepasst und mit in vivo Daten von zehn Patienten mit instrumentierten Hüftimplantaten validiert. Ausgewählte Vorhersagemodelle der beiden funktionellen Parameter wurden in den Planungsprozess integriert und die notwendige Reduktion einer patientenspezifischen Zielzone aufgrund der Vorhersageunsicherheiten untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die funktionellen Parameter nach einer THEP signifikant verändern können und dass eine präoperative Vorhersage der postoperativen Werte möglich ist. Präoperative knöchern morphologische Parameter können die Vorhersage verbessern. Ihr prädiktiver Wert scheint jedoch von untergeordneter Bedeutung zu sein. Eine präoperative Messung des betreffenden funktionellen Parameters, wann immer möglich und klinisch praktikabel, scheint eine plausible Grundlage für ein Vorhersagemodell zu sein. Die Vorhersageunsicherheit jedes Vorhersagemodells muss im präoperativen Planungsprozess berücksichtigt werden. Die Vorhersageunsicherheiten haben einen signifikanten Einfluss auf die präoperative Planung. Dies unterstreicht die Bedeutung genauer präoperativer Parametermessungen und weiterer Forschung zur Verbesserung der Vorhersage postoperativer funktioneller Parameter.

Table of Contents

1. Introduction	1
2. Medical background.....	8
2.1 Anatomy and biomechanics of the hip joint.....	8
2.1.1 Osseous parameters of the hip joint	9
2.2 Total hip arthroplasty (THA).....	13
2.2.1 Epidemiology	13
2.2.2 Surgical indication.....	14
2.2.3 Evaluation of outcome	15
2.2.4 Surgical approaches and implant types	15
2.2.5 Causes of revision surgery	16
2.2.6 Preoperative planning and CAOS.....	17
2.2.7 Planning criteria	19
3. Prediction of the postoperative pelvic tilt in THA.....	23
3.1 Introduction	23
3.2 Patients and methods	24
3.2.1 Patient data.....	24
3.2.2 Pelvic parametrization	25
3.2.3 Measurement of the pelvic tilt	26
3.2.4 Measurement of the lumbar lordosis angle.....	27
3.2.5 Multiple linear regression analysis	28
3.3 Results.....	30
3.4 Discussion.....	31
3.5 Conclusion	37
4. Prediction of the postoperative hip joint force in THA.....	39
4.1 Introduction	39
4.2 Patients and methods	41
4.2.1 Patient data.....	41
4.2.2 Framework for hip joint force prediction	42
4.2.3 Cadaver templates.....	43
4.2.4 Patient-specific scaling laws	43
4.2.5 Static models for hip joint force prediction	44
4.2.6 Evaluation	45
4.3 Results.....	46
4.4 Discussion.....	52
4.5 Conclusion	54
5. Implications for the planning process.....	56
5.1 Introduction	56
5.2 Patients and methods	57
5.2.1 Reconstruction of the patient's anatomy.....	57
5.2.2 Prediction of the pelvic tilt.....	58

5.2.3	Prediction of the hip joint force.....	58
5.2.4	Prosthetic ROM-based target zone.....	58
5.2.5	Load-based target zone.....	59
5.2.6	Evaluation.....	59
5.3	Results.....	60
5.3.1	Prediction uncertainty of the postoperative standing pelvic tilt.....	60
5.3.2	Prediction uncertainty of the hip joint force.....	60
5.3.3	Impact of the prediction uncertainties on the target zones.....	61
5.4	Discussion.....	62
5.5	Conclusion.....	64
6.	Discussion and outlook.....	65
6.1	Pelvic tilt prediction.....	65
6.2	Hip joint force prediction.....	66
6.3	Integration into the planning process.....	68
7.	Conclusion and future directions.....	70
	References.....	I
	List of Figures.....	XLII
	List of Tables.....	XLV
	Appendices.....	XLVIII
Appendix I.	Pelvic tilt: parameter definitions.....	XLVIII
Biometric parameters.....		XLVIII
Morphological parameters.....		XLVIII
Functional parameters.....		L
Appendix II.	Pelvic tilt: Evaluation results of the CT2EOS method.....	LI
Appendix III.	Pelvic tilt: Results of the postoperative pelvic tilt prediction.....	LII
Appendix IV.	Hip joint force: cadaver templates.....	LVII
Appendix V.	Hip joint force: scaling laws.....	LX
NUL _A		LX
NUL _B		LX
LDB.....		LXI
Appendix VI.	Hip joint force: static models.....	LXIII
Pauwels model based on [Pauwels 1980].....		LXIII
Debrunner model based on [Debrunner 1975].....		LXV
Iglıc model based on [Iglıc et al. 1990].....		LXVI
mediTEC model.....		LXVII