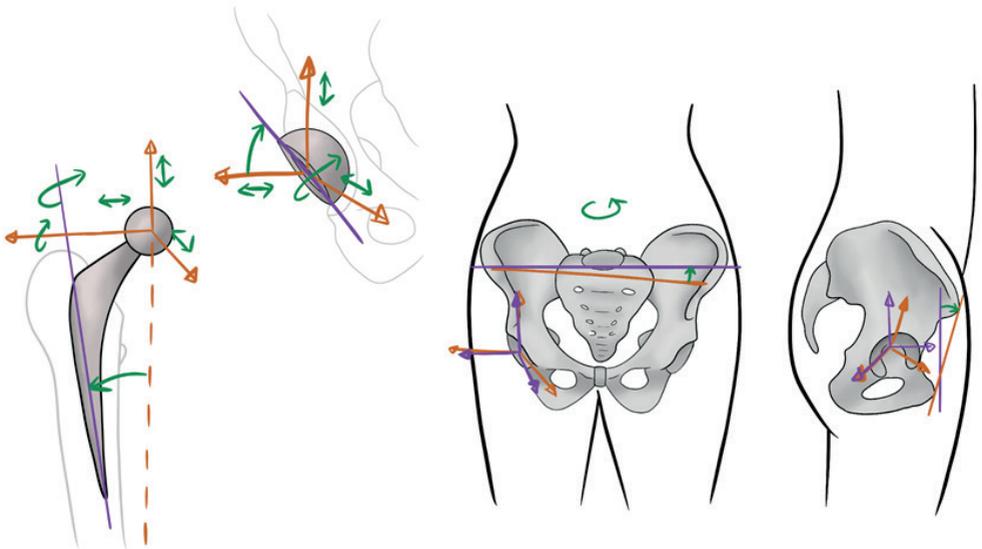


Juliana Habor

The Patient-specific Combined Target Zone for Total Hip Arthroplasty Planning



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

The Patient-specific Combined Target Zone for Total Hip Arthroplasty Planning

Die patienten-spezifische kombinierte Target Zone zur Planung einer Hüfttotalendoprothese

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

vorgelegt von

Juliana Habor, geb. Hsu

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

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Januar 2020

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

Juliana Habor

The Patient-specific Combined Target Zone for Total Hip Arthroplasty Planning

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

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

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

ISBN 978-3-8440-7599-1

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 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Medizintechnik im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Ganz besonders möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher für die hervorragende Betreuung und Unterstützung danken. Deine zahlreichen Ideen und konstruktive Kritik haben die Arbeit vorangebracht und Deine Begeisterung für das Thema war sehr motivierend! Außerdem möchte ich mich bei Dir für die Möglichkeiten bedanken, viele interessante und lehrreiche Konferenzen zu besuchen. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn apl. Prof. Dr. med. Christian Lüring für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Teile der Arbeit wurden von der Firma ConforMIS, Inc., Billerica, USA im Rahmen einer Industriekooperation gefördert, wofür ich mich ebenfalls bedanken möchte. Ich danke Daniel Steines, Rene Vargas-Voracek sowie Sumesh Zingde für die gute Zusammenarbeit und für die fruchtbaren Diskussionen.

Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen sowie Studentinnen und Studenten am Lehrstuhl für Medizintechnik für die gute Zusammenarbeit und die sehr schöne gemeinsame Zeit. Bitte fühlt Euch alle angesprochen. Besonders danke ich Christoph Hänisch für die Betreuung meiner Masterarbeit und die lustige Zeit als Bürokollegen, Thorsten Vollborn für den Hinweis, dass eine Stelle am Lehrstuhl frei wird, Matías de la Fuente für die gute Betreuung insbesondere am Anfang meiner Zeit am Lehrstuhl, Maximilian Fischer, Malte Asseln, Benjamin Hohlmann und Sonja Grothues für die gute Zusammenarbeit im Team, Jasmin Dell'Anna-Pudlik, Marc Janzen und Tim Bartel für die schöne Zeit im Büro, Mark Verjans, Manuel Vossel, Philipp Schleer und Lukas Theisgen für die unzähligen gemeinsam verbrachten Mittagspausen, Kristin Dietz-Lauronn für das Organisieren der gemeinsamen Kochabende, Anne Benninghaus für das viele miteinander Lachen, Nina Reinhardt für die gemeinsamen Abendessen, sowie Ali Sedghi, Gildas Esnault und Nathalie Gierden für die Unterstützung meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meinem Lieblingskollegen und Ehemann Daniel Habor. Danke, dass Du meine Zeit am Lehrstuhl noch schöner gemacht hast, für das Korrekturlesen meiner Dissertation, für die Verbesserungsvorschläge für den Promotionsvortrag, für Deine Unterstützung in allen Lebenslagen und für Deine Liebe. Abschließend danke ich meiner Familie für ihre Geduld und Unterstützung.

Summary

Total hip arthroplasty is one of the most frequently performed joint replacement procedures. Proper acetabular and femoral component design, position and orientation are of major importance for a long prosthesis lifespan. Despite high success rates, complications such as dislocations, wear and loosening still occur. They could be reduced by considering patient-specific parameters during the implant planning process. In this thesis, a throughout literature review was performed first in order to identify criteria, methods and rules for adapting the implant alignment and design to the individual patient. A common target zone could not be found from clinical outcome studies. Criteria that are considered in literature include the prosthetic and bony range of motion, the pelvic tilt, the cup containment, and the resulting hip force. The planning methods in literature incorporate one or more of the described criteria but not all of them at once.

It was found that morphological parameters such as the bone surface and functional parameters such as the pelvic tilt in standing position are needed for patient-specific planning. For integrating the data acquisition into the clinical workflow, two concepts are introduced. The first approach is based on CT and weight-bearing X-ray, the second one on multi-planar X-rays and a statistical shape model.

A new method for calculation of a patient-specific target zone including all relevant criteria is developed and evaluated. Its modular design allows the integration of further criteria. The algorithm considers the cup coverage, the residual bone thickness prior to penetration, the leg length discrepancy, the minimal distances to impingement, the minimal distance to edge loading and the difference of the resulting hip force compared to the pre-operative situation. A validation of this method based on a retrospective analysis of 201 patients showed that the patient reported outcomes are higher for the patients whose implant are inside the so-called combined target zone.

Even though most of the used methods are derived from literature, in some cases, qualitative rules are quantified and calculated on the basis of patient-specific morphology and other functional parameters. Further validation of these calculations as well as the resulting target zones should be an objective in future studies.

Zusammenfassung

Die Totale Hüftendoprothetik ist einer der am häufigsten durchgeführten Gelenkersatzoperationen. Dabei spielen das Design, die Positionierung sowie die Ausrichtung der Komponenten eine entscheidende Rolle für die Langlebigkeit der Prothese. Trotz hoher Erfolgsraten treten immer noch Komplikationen wie beispielsweise Dislokationen, erhöhter Abrieb und Lockerungen auf. Diese könnten durch eine Berücksichtigung patienten-spezifischer Parameter verringert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt um Kriterien, Methoden und Regeln zu identifizieren, mit dem Ziel eine Hüftprothese an einen spezifischen Patienten anzupassen. Eine übereinstimmende Zieldefinition konnte aus klinischen Studien nicht abgeleitet werden. Kriterien, die in der Literatur berücksichtigt wurden, sind der Bewegungsumfang der Prothese und der knöchernen Strukturen, die Beckenkipfung, die Pfannenüberdachung und die resultierende Hüftkraft. Die in der Literatur beschriebenen Methoden berücksichtigen eine oder mehrere dieser Kriterien, jedoch nicht alle gleichzeitig.

Es hat sich herausgestellt, dass morphologische Parameter wie bspw. die Knochenoberfläche und funktionelle Parameter wie bspw. die Beckenkipfung für eine patienten-spezifischen Planung benötigt werden. Um eine solche Planung in den klinischen Alltag integrieren zu können, werden zwei Konzepte zur Akquise dieser Daten vorgestellt. Das erste Konzept verwendet CT Daten und ein Röntgenbild im Stehen, das Zweite multi-planare Röntgenbilder und ein Statistisches Formmodell.

Eine neue patienten-spezifische Planungsmethode wurde entwickelt und evaluiert, welche die zuvor identifizierten relevanten Kriterien gleichzeitig berücksichtigt. Der zugehörige Algorithmus ist modular aufgebaut und ermöglicht somit eine Integration weiterer Kriterien. Die Methode berechnet die Pfannenüberdachung, den minimalen Abstand von der Pfanne bis zum medialen Rand des Beckenknochens, die Beinlängendiskrepanz, die minimale Distanz bis zum Impingement, die minimale Distanz bis zur Belastung des Pfannenrandes sowie die resultierende Hüftkraft verglichen mit der präoperativen Situation. Eine Validierung dieser Methode erfolgte anhand von 201 Patientendaten im Rahmen einer retrospektiven Studie. Dabei zeigte sich, dass Patienten, deren Implantate in der berechneten sogenannten Combined Target Zone liegen, einen besseres klinisches Outcome Score haben.

Viele der verwendeten Methoden wurden aus der Literatur abgeleitet. Einige wurden modifiziert um patienten-spezifische morphologische und funktionale Parameter zu berücksichtigen. Diese Methoden und die darauf aufbauende Berechnung der Combined Target Zone müssten in zukünftigen Studien weiter validiert werden.

Table of Contents

1	Introduction	1
2	Background and motivation.....	3
2.1	Hip anatomy and biomechanics	3
2.2	Total hip arthroplasty	14
2.2.1	Conventional approach	18
2.2.2	Computer-assisted approach	22
2.2.3	Patient-specific approach	24
2.3	Problem statement	25
2.4	Concept	27
3	Preliminary studies	29
3.1	Criteria for THA optimization	29
3.1.1	Statistical evaluation of factors correlated with dislocation	29
3.1.2	Prosthesis range of motion	34
3.1.3	Bony range of motion	40
3.1.4	Pelvic tilt	42
3.1.5	Cup containment	45
3.1.6	Resulting hip force	46
3.2	Imaging and data analysis	51
3.2.1	Literature review of data acquisition methods	52
3.2.2	Concept 1: CT and weight-bearing X-ray	54
3.2.3	Concept 2: Multi-planar X-rays and statistical shape model-based reconstruction	60
3.3	Conclusion	62
4	Proposed workflow and implementation	65
4.1	Data acquisition and processing	65
4.2	Calculation of the patient-specific target zone	66
4.2.1	Bone stock-based target zone and leg length	69
4.2.2	Prosthetic ROM-based target zone	71
4.2.3	Bony ROM-based target zone	79
4.2.4	Load-based target zone	82
4.2.5	Combination of target zones	90
4.3	Implementation of an experimental graphical user interface	91
5	Technical evaluation of the combined target zone	99
5.1	Verification	99
5.1.1	Prosthetic impingement calculation	99
5.1.2	2D mapping-based bony impingement analysis	100
5.1.3	Sampling density of bony surface	102
5.1.4	Resulting hip force estimation	104
5.2	Sensitivity analysis	105
5.2.1	Cup coverage threshold	105
5.2.2	Target ROM	108

5.2.3	Pelvic tilt	110
5.2.4	Neck orientation	113
5.2.5	Technical ROM	115
5.3	Time performance analysis	116
6	Clinical validation of the combined target zone – A retrospective analysis	117
6.1	Material and methods	117
6.2	Results	122
6.3	Discussion and conclusion	129
7	Conclusion and future work	131
	References	I
	List of Abbreviations	XXIX
	List of Mathematical Symbols	XXXI
	List of Figures	XXXV
	List of Tables	XLI