

# 1 Einführung

Diese Arbeit ist innerhalb einer Kooperation zwischen der an der Universität zu Lübeck tätigen Forschungsgruppe „SAFIR“ (Solutions and Algorithms for Image Registration) und der Gruppe Digital Imaging aus den Forschungslaboratorien der Firma Philips in Hamburg entstanden. Die enge Kommunikation zwischen den beiden Forschungseinrichtungen hat sowohl die praktische Relevanz als auch den theoretischen Beitrag der vorliegenden Arbeit positiv beeinflusst.

Die Einführung in das Themenfeld der Arbeit ist wie folgt gegliedert: Als Erstes wird die Motivation und die Zielsetzung der Arbeit beschrieben, dann der Aufbau der Arbeit skizziert und zuletzt die in die Arbeit geflossenen Beiträge herausgearbeitet.

## 1.1 Motivation

Die Segmentierung und die Bildregistrierung sind zwei zentrale Gebiete der modernen medizinischen Bildverarbeitung. Ihre Entwicklung wird massiv vorangetrieben und ist wahrscheinlich noch lange nicht abgeschlossen. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Möglichkeiten, Registrierungs- und Segmentierungsansätze miteinander zu verbinden. Neben der Beschreibung des theoretischen Rahmens für eine derartige Kombination der Methoden wird eine Klassifikation der Verfahren vorgenommen. Weitere neue Möglichkeiten, die Registrierung und die Segmentierung zu verbessern, werden vorgeschlagen. Ein Vergleich der Verfahren schließt die vorliegende Arbeit ab.

Bei der Bildsegmentierung wird ein Datensatz betrachtet. Es kommt darauf an, die für den Anwender wichtigen Bereiche zu extrahieren. Die Aufgabe der Segmentierung ist nicht einfach und kann in verschiedenen Fällen zusätzlich erschwert sein. Einige derartige Probleme werden hier aufgelistet: Der zu segmentierende Datensatz kann aus verschiedenen Gründen unvollständig sein. Es besteht die Möglichkeit, dass im Datensatz Strukturen zu sehen sind, die der Anwender nicht berücksichtigt hat. Die Umkehrung ist auch möglich, d.h. die Strukturen, die erwartet werden, fehlen im zu segmentierenden Datensatz. Relativ häufig kommt es auch vor, dass die Grenze zwischen unterschiedlichen Strukturen so wenig ausgeprägt ist,

dass sie nicht eindeutig identifiziert werden kann. Des Weiteren kann es vorkommen, dass der zu segmentierende Datensatz durch Bildgebungs- bzw. Bildverarbeitungsartefakte verzerrt ist. Die aufgelisteten Szenarien können die Segmentierung nicht nur schwer sondern sogar unmöglich machen. In solchen Fällen ist es vorteilhaft, in die Segmentierung zusätzliches Wissen über die zu bearbeitende Datensätze zu integrieren, um dadurch die Schwierigkeiten ausgleichen zu können.

Bei der Bildregistrierung werden zwei Datensätze betrachtet. Das Ziel der Registrierung ist es, eine Transformation zu finden, mit welcher die korrespondierenden Strukturen der beiden Datensätze aufeinander abgebildet werden können. Die Aufgabe der Registrierung ist ebenfalls nicht leicht. Alle oben aufgelisteten Fälle, die die Segmentierung zusätzlich erschweren, haben auch auf die Registrierungsverfahren einen negativen Einfluss. Auch in der Registrierung verspricht man sich durch die Integration von zusätzlichem Wissen bessere Ergebnisse zu erzielen.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist es, die Möglichkeiten zur Verbesserung von Registrierungs- und Segmentierungsansätzen zu untersuchen. Die Verbesserungen können durch die Integration vom zusätzlichen Wissen erreicht werden. Eine Möglichkeit, zusätzlichen Informationen zu integrieren, besteht in der Kombination von Verfahren. Mit solcher Kombination können die Schwierigkeiten eines Verfahrens mit dem Wissen aus dem anderen Verfahren ausgeglichen werden. Eine weitere in dieser Arbeit vorgestellte Möglichkeit greift nach aus einer Registrierung extrahierten Informationen, um dadurch die Segmentierung bzw. den nächsten Schritt der Registrierung zu verbessern. Zuletzt wird eine Möglichkeit gezeigt, wie durch die Kombination von einzelnen Bausteinen der Verfahren bis dahin ungelöste Probleme gelöst werden können.

Im Weiteren werden Verfahren, in denen die Registrierungs- und die Segmentierungsmethoden miteinander kombiniert sind, als *Segistrierung* (SEGmentierung + regISTRIERUNG) bezeichnet. Der Name Segistrierung wurde von Herrn Dr. Ingwer Carlsen aus den Philips Forschungslaboratorien in Hamburg in einer internen Veröffentlichung eingeführt. Diese Bezeichnung hat sich in der Bildverarbeitungsgemeinschaft noch nicht gemein durchgesetzt, gewinnt aber immer mehr an Verbreitung (vgl. dazu z.B. [IBI09]).

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in vier Teile. Im ersten, einführenden Teil werden die verwendeten Grundlagen skizziert. Es wird mit dem Konzept „Bild“ be-

gonnen. Anschließend folgt der theoretische Unterbau der Registrierung. Es werden unterschiedliche Ähnlichkeitsmaße und Regularisierer vorgestellt und auf eine Anwendbarkeit für unsere Aufgabenstellung hin untersucht. Nachfolgend wird ein Überblick über die Minimierung des Registrierungsproblems mit Hilfe der Variationsrechnung, dessen Approximation durch finite Differenzen und die Lösung des Registrierungsproblems durch das Verfahren der Fixpunktiteration gegeben. Das letzte Kapitel des ersten Teils befasst sich mit der Segmentierung. Es wird eine Einführung in die Problemstellung geben, gefolgt von der Beschreibung der internen und externen Energien. Da das Segmentierungsverfahren in einer Level-Set-Formulierung dargestellt wird, wird eine Einführung in dieses Themenfeld gegeben. Weiter wird die für die Aufgabenstellung besonders geeignete Multiphasen-Technik der Segmentierung eingeführt. Die Minimierung, Approximation und die Lösung des Segmentierungsproblems schließen diesen Teil ab.

Der zweite methodische Teil der Arbeit besteht aus drei Kapiteln. Zuerst wird ein Ansatz vorgestellt bei dem die Registrierungs- und Segmentierungsverfahren in einem Funktional miteinander auf verschiedenen Weise kombiniert werden. Aufbauend auf diesem Segistrierungsfunktional wird eine Klassifizierung der Verfahren eingeführt. Diese Klassifizierung basiert auf dem in der Segistrierung verwendeten Wissen über die Datensätze. Des Weiteren werden die unterschiedlichen Klassen der Segistrierung einzeln betrachtet. Es wird die Ableitung der einzelnen Klassen aus dem gemeinsamen Funktional gezeigt. Die aus der Literatur bekannten Segistrierungsverfahren werden in diese Klassifizierung integriert. Die algorithmische Umsetzung der einzelnen Klassen wird aufgezeigt. Die Verfahren sind dabei in einer modularen Form entwickelt, so dass verschiedene Registrierungs- und Segmentierungsmethoden ausgetauscht und(oder) konfiguriert werden können. Dadurch soll ein möglichst großes Spektrum an Verwendungsmöglichkeiten und Applikationen abgedeckt werden.

Das zweite Kapitel des methodischen Teils befasst sich mit einer Idee, wie die Informationen aus einer Registrierung extrahiert werden können, um die Weiterverarbeitung von Bildern zu verbessern. Hier wird auf Werkzeuge der Vektoranalysis zurückgegriffen, um das Transformationsfeld der Registrierung deuten zu können. Die vorgestellte Idee wird mit Algorithmen umgesetzt, in denen die so erhaltenen Informationen für die Verbesserung der Registrierung und für die Segmentierung genutzt werden können. Die vorgestellten Algorithmen beinhalten eine sequentielle Schaltung von Segmentierungs- und Registrierungsverfahren und sind damit für das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Thema von zentraler Bedeutung. Die Verfahren werden mit praxisrelevanten Beispielen evaluiert.

Das dritte und letzte Kapitel dieses Teils beschäftigt sich mit einem bis dahin ungelösten Problem aus der Neurologie und stellt einen Algorithmus für die Verbes-

serung der Symmetrie von Hirnaufnahmen entlang der Sagittalebene vor. Der beschriebene Algorithmus nutzt gleichzeitig sowohl die Bausteine der Segmentierung (aktive Konturen und externe Energie), als auch der Registrierung (angepasste Kostenfunktion und Transformation), um ein Problem der Unsymmetrie zu lösen. Die Wirkungsweise des Algorithmus wird am Ende des Kapitels mit einem ausführlich dargestellten Beispiel und mit einer auf 50 Datensätzen basierenden Evaluierung untermauert.

Die Validierung von Registrierungsmethoden ist eine schwierige Aufgabe, weil die Grundwahrheiten gewöhnlich unbekannt sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein spezielles Framework geschaffen, mit dessen Hilfe synthetische Grundwahrheiten für die Validierung, basierend auf realen Datensätzen, erzeugt werden können. Hier wurden für die Generierung der Grundwahrheiten Datensätze, die aus den Problemstellungen der Demenzforschung bekannt sind, verwendet. Im dritten Teil der Arbeit wird dieses Validierungsframework definiert, die verwendeten Fehlermaße vorgestellt und die Ergebnisse der Validierung von Registrierungsmethoden zusammengefasst.

Das vorliegende Werk schließt im vierten Teil mit einer Diskussion der vorgestellten Verfahren und liefert einen Ausblick für zukünftige Arbeiten.

### 1.3 Eigener Beitrag

In diesem Abschnitt werden die in der Arbeit eingeflossenen eigenen Beiträge herausgearbeitet. Die Reihenfolge ist chronologisch.

**Ein gemeinsamer Rahmen für die Registrierung:** Im Abschnitt 4.3 wird ein allgemein gültiges Framework für die Registrierung eingeführt. Der vorgestellte Rahmen erweist sich in den folgenden Punkten als nützlich:

- Alle bekannten Registrierungsmethoden sind damit ausdrückbar, was eine Vergleichbarkeit der Verfahren ermöglicht.
- Der Rahmen ist modular aufgebaut, so dass die einzelnen Module je nach Anwendung intuitiv eingesetzt werden können. Das Distanzmaß, der Regularisierer und die Energien der Segmentierung können ohne Veränderung des Rahmens ausgetauscht werden.

Dieser Rahmen ist erstmalig publiziert in [EvBK<sup>+</sup>08].

**Eine Klassifizierung der Segistrierung:** Im Abschnitt 4.2 wird eine Klassifizierung der Segistrierungsmethoden eingeführt. Diese Klassifizierung erweist sich in folgenden Punkten als hilfreich: Einerseits können durch die vorgestellte Klassifizierung die Kombinations- und Kommunikationsarten der Verfahren ausgedrückt werden. Andererseits kann dadurch die Art des in den einzelnen Klassen benutzten Vorwissens beschrieben werden, was wiederum die Wahl der Segistrierungsmethode für die vorgegebene Problemstellung erleichtert. Die vorgestellte Klassifizierung ist ebenfalls in [EvBK<sup>+</sup>08] publiziert.

**Ein Kommunikationsmaß für die Segistrierung:** Um die Zusammenführung zwischen der Registrierung und der Segmentierung zu verbessern, wird im Abschnitt 4.6.2 ein neues Kommunikationsmaß für die Segistrierung eingeführt. Dieses Kommunikationsmaß wurde mit dem einzigen mir bekannten bisher in der Literatur beschriebenen verglichen. Durch das neue Kommunikationsmaß wurde das Konvergenzverhalten der Segistrierungsverfahren deutlich verbessert, wodurch vergleichbare Ergebnisse in weniger Schritten und damit kürzerer Rechenzeit erzielt werden. Das Kommunikationsmaß ist publiziert in [EvBK<sup>+</sup>07, EvBF08].

**Die Methode für die Verbesserung der Registrierung und der Segmentierung:** In Abschnitt 5 wird eine Idee vorgestellt, wie Informationen aus einer Registrierung extrahiert werden können, um dadurch die Segmentierung der Datensätze und/oder den nächsten Schritt der Registrierung zu verbessern. Beide Möglichkeiten werden mit einem Algorithmus sowie mit akademischen und medizinischen Beispielen illustriert. Die erste Publikation dieses Verfahrens erfolgte in [EHMF09].

**Ein Algorithmus für die Erstellung der Validierungsrahmen:**

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz vorgestellt, wie die für die Validierung der Registrierung geeigneten Grundwahrheiten erzeugt werden können. Die Grundwahrheiten sind so erstellt, dass sie auch aus anatomischer Sicht vernünftig sind. Dadurch zeichnet sich im Speziellen eine praktische Relevanz dieses Verfahrens ab. Diese Arbeit ist in [EWY<sup>+</sup>09] publiziert.

**Ein Algorithmus für die Verbesserung der Symmetrie von Hirnaufnahmen entlang der Sagittalebene:** Eine Symmetrie der Hirnaufnahmen entlang der Sagittalebene ist für eine Reihe neurologischer Anwendungen vorteilhaft. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiger Algorithmus entwickelt, mit dessen Hilfe die Symmetrie von Hirnaufnahmen entlang der Sagittalebene verbessert werden kann. Dies geschieht unter Verwendung von aktiven Konturen, die mit Hilfe einer neuartigen Kostenfunktion gesteuert werden. Diese Arbeit ist erstmalig in [EWF09] präsentiert.