

Carlos Eduardo Cárdenas Sandoval
Dr. sc. hum.

Konzeption und Realisierung eines objektorientierten Frameworks und dessen Komponenten für die multimodale präoperative Operationsplanung in der Leber- und Nierenchirurgie

Geboren am 03.04.73

Reifeprüfung am July 1992

Studiengang der Fachrichtung Medizinische Informatik vom WS 1992/93 bis WS 1997/98

Vordiplom WS 1994/95 an der Universität Heidelberg

Diplom WS 1997/98 an der Universität Heidelberg

Promotionsfach Medizinische Informatik

Doktorvater Prof. Dr. H.P. Meinzer

Für die Entwicklung von medizinischen Anwendungssystemen eignen sich objektorientierte Konzepte und Techniken, weil sie der menschlichen Denkweise nahe kommen. Der Einsatz objektorientierter Techniken reicht aber nicht aus, um wiederverwendbare und flexible Komponenten zu erstellen. Dies kann durch den Einsatz eines übergeordneten Frameworks erreicht werden, das auf erprobten Entwurfsmustern basiert. Ein derartiges Framework reduziert das Risiko, das "Open-Close"-Prinzip (Open for Extension and Closed for Modification) in den bereits entwickelten Modulen zu verletzen. Ziel dieser Arbeit war die Konzipierung eines objektorientierten Frameworks, welches den Entwicklungsprozess von medizinischen Anwendungssystemen erleichtert, beschleunigt und weniger fehleranfällig gestaltet.

Das entwickelte Framework basiert auf einem komponentenbasierten Ansatz. Dabei bietet das Framework den Anwendungsentwicklern eine generische Architektur an, die eine vorgegebene Basisstruktur, vorgegebene Komponenten und ein Interaktionsmodell für die Implementierung von dedizierten Systemen zur Verfügung stellt. Bei der Erzeugung neuer Applikationen auf der Basis des Frameworks können zusätzliche Komponenten entwickelt werden, die die Basisfunktionalität des Frameworks erweitern. Somit lässt sich das Framework in verschiedenen Bereichen für unterschiedliche Ziele in der medizinischen Bildverarbeitung und Visualisierung einsetzen. Dabei bietet das Framework die Möglichkeit, die entwickelten Systeme als eigenständige Applikationen oder auch als Bauteile übergeordneter Systeme zu realisieren. Aufgabe der Entwickler ist entweder die Verwendung der von dem Framework zur Verfügung gestellten Komponenten oder die Implementierung der Komponenten, die das Framework an die Anforderung des zu entwickelnden Anwendungssystems anpassen.

Der Anwendungsentwickler kann sich bei der Verwendung des Frameworks auf die spezifischen Details seiner Komponenten konzentrieren. Die Kommunikation der Komponenten miteinander, die automatische Generierung von graphischen Benutzungsschnittstellen, die Verwaltung des Informationsflusses, die Anordnung und das Aussehen der Komponenten, die Kommunikation des Anwendungssystems mit anderen Systemen und die Integration der neuen Komponenten durch die Bereitstellung von Generatoren sind einige der Aufgaben, die das Framework übernimmt. Vorteil der Verwendung eines komponentenbasierten Ansatzes ist die Unabhängigkeit bei der Realisierung der einzelnen Komponenten. Die vorgefertigten und die neuen Komponenten sind eigenständige Softwaremodule, die vom Framework in Form von Bibliotheken geladen werden. Diese Black-Box-Einbindung erlaubt eine lose Kopplung zwischen ihnen und dem Framework. Somit kann der Anwendungsentwickler die gleiche Komponente für verschiedenen Zwecke in das Framework einbinden, austauschen, entfernen, getrennt voneinander verwenden, in andere Systeme einbinden oder sogar eigenständig ausführen lassen. Die Integration der neuen Komponenten kann der Anwendungsentwickler durch Methodenaufrufe des Frameworks realisieren, die die jeweiligen Generatoren aufrufen. Diese erstellen die Kommunikation mit dem Framework, die graphischen Elemente für die Interaktion mit dem Endanwender sowie die Interaktionsmechanismen in Abhängigkeit vom Datentyp der eingefügten Komponenten.

Entwurfsmuster wurden sowohl für den Entwurf und die Implementierung des Frameworks als auch für die in dieser Arbeit durchgeführte Beschreibung verwendet. Die in dieser Arbeit verwendeten Entwurfsmuster beziehen sich auf die bewährten Techniken von Gamma et al., Grand, Pree und Buschmann et al. Die Struktur des implementierten Frameworks basiert auf drei unterschiedlichen generischen Modulen. Diese Module sind eine mehrstufige Umsetzung des Model-View-Controller-Modells, die durch die Zusammensetzung verschiedener Klassen im Sinne der objektorientierten Technologie in der Programmiersprache C++ implementiert wurden. Das Modul Model verwaltet die Informationen, die in den Modulen und in den auf dem Framework basierenden Anwendungssystemen verwendet werden. Das Modul View verwaltet die graphischen Komponenten des Frameworks und das Modul Controller die Framework-Komponenten.

Jedes der drei genannten Module beinhaltet mehrere Untermodule. Diese stellen vorgefertigte Bauteile zur Verfügung, die die Entwicklung von Anwendungssystemen unterstützen. Zu den Aufgaben der verschiedenen Untermodule gehören die:

automatische Generierung von graphischen Komponenten,
Verwaltung und Darstellung von medizinischen Bilddaten (Originaldaten, anatomische Landmarks und Parameter für die Visualisierungen),

Bereitstellung von über dreißig kanten- und regionenbasierten Bildverarbeitungsfunktionen.

Das Framework bietet eine Reihe vorgegebener Komponenten, die für die Erzeugung von Applikationen im Bereich der medizinischen Bildverarbeitung und Visualisierung benötigt werden. Somit braucht der Anwendungsentwickler die gleichen Komponenten nicht immer wieder zu implementieren. Folgende Komponenten werden von dem Framework bereitgestellt:

Registrierungskomponente,

Segmentierungskomponente und

Visualisierungskomponente

Die Registrierungskomponente erlaubt die Integration multimodaler Daten der Leber. Sie ermöglicht dadurch die gemeinsame Darstellung von metabolischen Informationen aus den PET-Aufnahmen zusammen mit anatomischen Informationen aus den CT-Aufnahmen. Somit können die PET-Aufnahmen zur Identifizierung vorhandener Tumore verwendet werden, da die Tumore ohne aufwendige Segmentierungsverfahren in den PET-Aufnahmen von den gesunden Leberarealen gut zu unterscheiden sind.

Die Segmentierungskomponente stellt semi-automatische Bildverarbeitungsalgorithmen wie Region Growing, Threshold, Konturverfolgung, interaktiv bedienbare Aktive Konturen sowie Werkzeuge zum freien Einzeichnen oder Entfernen von Konturen und Linien zur Verfügung. Mit deren Hilfe kann der Endanwender die Bilddaten schichtweise bearbeiten. Die Erweiterungsfähigkeit mit neuen Bildverarbeitungsfunktionen wird vom Framework gewährleistet. Das beinhaltet z.B. die Generierung von den graphischen Komponenten für die neuen Bildverarbeitungsfunktionen, mit deren Hilfe der Endanwender die Funktionen selektieren und deren Parameterwerte ändern kann. Das Framework stellt verschiedene Modi zur Verfügung, mit deren Hilfe der Anwendungsentwickler bestimmen kann, welches Interaktionsmuster bei der Verwendung einer bestimmten Funktion angewendet werden soll. Damit ist es möglich festzulegen, wie die Parameterwerte, die der Algorithmus benötigt, gewonnen werden.

Die Visualisierungskomponente ermöglicht die interaktive Visualisierung, Manipulation und Parametrisierung von medizinischen Bildern auf der Basis des Heidelberg Raytracing Modells (HRM). Für die Integration des HRM in das Framework wurden Schnittstellen implementiert, die die interaktive und intuitive Parametrisierung des HRM ermöglichen. Das Framework erzeugt für diese Schnittstellen Kontrollelemente, mit deren Hilfe der Anwender die Parameter des HRM interaktiv setzen kann.

Die Qualität eines Frameworks läßt sich gut an den daraus entwickelten Applikationen bewerten. Auf der Basis des Frameworks wurden Applikationen entwickelt, die in folgenden Projekten eingesetzt werden:

„Navigation für die Leberchirurgie“, gefördert durch das Tumorzentrum Heidelberg/ Mannheim. Ein Operationsplanungssystem wurde auf der Basis des Frameworks für die onkologische Leberchirurgie entwickelt.

„Optimierung der Resektionplanung von Nierenzellkarzinomen“, gefördert durch die Universitätsklinik Heidelberg. Das für die onkologische Leberchirurgie entwickelte Operationsplanungssystem wird für die Nierenchirurgie angepasst und angewendet.

„Interaktive Volumenvisualisierung und Integration von Softwaremodulen“ und „Interaktive 3D-Segmentierung“ (Sonderforschungsbereich 414). Die vorgegebene Segmentierungskomponente wird für die Segmentierung von Bilddaten mit verschiedenen texturbasierten Bildverarbeitungsfunktionen unabhängig von Typ und Dimension der Bilddaten eingesetzt.

„Klinische Applikation und Entwicklung dreidimensionaler Verfahren zur Unterstützung der Diagnostik und Therapie“ (Sonderforschungsbereich 414). Die vorgegebene Segmentierungskomponente wird auch hier für die Segmentierung von Herzdaten für die Operationsplanung in der Herzchirurgie eingesetzt.

Das Operationsplanungssystem für die onkologische Leberchirurgie besteht aus vorgegebenen und von mehreren Anwendungsentwicklern implementierten Komponenten. Das System wurde so konzipiert, dass die Entscheidung des Mediziners immer im Mittelpunkt steht. Die für die Operationsplanung notwendigen Schritte wurden in dem System in Form von Komponenten implementiert, die dem Mediziner während der Verwendung des Operationsplanungssystems ein besseres Verständnis und eine bessere Veranschaulichung der vorliegenden individuellen anatomischen Gegebenheiten der Patientendaten ermöglichen. Durch die verschiedenen Darstellungen kann der Mediziner somit die Operationsstrategie besser planen. Folgende Aufgaben werden mit Hilfe des Operationsplanungssystems bewältigt:

Segmentierung von Leber und Tumor: Durch semiautomatische Bildverarbeitungsfunktionen werden die Organe segmentiert.

Segmentierung der Gefäßbäume: Diese Segmentierung basiert auf dem von Zahlten vorgeschlagenen Algorithmus.

Trennung von Gefäßbäumen: Wenn aus der Segmentierung der Gefäße nicht nur der Portalbaum resultiert, wird er hiermit herausgefiltert.

Identifizierung der Segmente der Leber sowie anschließende 3D- Visualisierung der Leber, des Tumors, des Resektionsvorschlages und der unterschiedlichen Gefäße.

Das System wird bereits von klinischen Partnern eingesetzt. Über 50 Patientendaten wurden mit dem System verarbeitet und die Ergebnisse der Planung ausgewählter Patientendaten wurden im Operationssaal verwendet. Im Rahmen des Projektes „Navigation für die Leberchirurgie“ wurde eine Studie durchgeführt, für die das Operationsplanungssystem angepasst erweitert wurde. Die Studie wurde mit dem Ziel durchgeführt, die bis heute für die Einteilung der Leber verwendete Methode von Couinaud mit der Segmenteinteilung anhand des Gefäßbaumes quantitativ zu vergleichen. Dafür wurde sowohl eine Komponente für die klassische Einteilung der Leber in das Operationsplanungssystem integriert als auch die Visualisierungskomponente so erweitert, dass die statistischen Werte berechnet werden konnten. Anhand dieser Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die klassische Einteilung der Leber nach Couinaud nicht falsch ist, da bei ihrem Vergleich mit der gefäßorientierten Methoden Ähnlichkeiten bei allen Segmenten nachgewiesen werden konnten. Zur Berechnung eines Resektionsvorschlags ist sie jedoch zu ungenau. Eine individuelle Einteilung der Leber anhand der Gefäße ist somit für eine genaue Berechnung der zu resezierenden Segmente erforderlich.

Der Einsatz des Frameworks erwies sich als erfolgreich, da die erstellten Applikationen mit Erfolg routinemäßig eingesetzt werden. Die Zeit für das Design und die Implementierung von neuen Anwendungssystemen wird durch die Verwendung des Frameworks reduziert. Ebenso bewährte sich die komponentenbasierte Entwicklung, da die Integration und der Austausch der Komponenten eine schnellere Reaktion auf die Anforderungen der Mediziner zulassen.