

Holographische Visualisierung der Leber mit markergestütztem Tracking an einem Phantom

Bachelorarbeit

Antonia Gerdes

Abteilung Translationale Chirurgische Onkologie
NCT Dresden

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Stefanie Speidel
Zweitgutachter:	Dr.-Ing. Sebastian Bodenstedt
Betreuender Mitarbeiter:	Micha Pfeiffer

Bearbeitungszeit: Juli 08, 2019 – September 23, 2019

Ich versichere hiermit, die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt zu haben. Die verwendeten Hilfsmittel und Quellen sind im Literaturverzeichnis vollständig aufgeführt.

Dresden, den YY Monat, 20XX

Zusammenfassung

Short description of motivation, methods, results and discussion

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele	1
1.3	1
2	Stand der Forschung	3
2.1	Augmented Reality in der Chirurgie	3
2.2	Marker Tracking in der Chirurgie	3
2.3	Hololens in der Chirurgie	4
3	Grundlagen	7
3.1	Mixed Reality	7
3.2	Head Mounted Displays	7
3.3	Registrierung	8
3.4	AR Tracking	8
3.4.1	Infrarot Tracking	8
3.4.2	Visible Light Tracking	9
3.4.3	3D Structure Tracking	10
3.5	Phantom	10
4	Methoden	11
4.1	Microsoft Hololens	11
4.2	NDI Polaris	12
4.3	Unity	12
4.4	Mixed Reality Toolkit	12
4.5	Vuforia	12
4.6	Versuchsaufbau	12
4.7	Kalibrierung	12
4.8	GUI und Interaktion	12
5	Evaluation	13
6	Diskussion	15
	List of Figures	17
	List of Algorithms	19
	Bibliography	21

1. Einführung

This section should describe your motivation and general introduction to the topic as well as the goals of your work.

1.1 Motivation

-kein hin und her schauen zwischen Patient und Bildschirm -vermeidung von strahlung

1.2 Ziele

Getrackt werden soll das Phantom eines Torsos. Es sollen verschiedene Methoden des markerbasierten Trackings implementiert und ein Hologramm der Leber relativ zu den Markern platziert werden. Zu diesen Methoden zählt Vuforia Model Recognition mit einem Trained Model Dataset, bei der die Bauchplatte des Phantoms als Model Target (Marker) fungiert und von Vuforia getrackt wird. Weitere Marker sind Vuforia ImageTargets, ArUco Marker und kreisförmige Farbmarker. Bei diesen drei Methoden werden mehrere Marker auf dem Torso platziert.

Die Methoden sollen mit Hilfe der NDI Polaris evaluiert werden. Dazu soll dem Modell des Torsos eine Reihe an voneinander unterscheidbaren Modellen (farbige Kugeln o.Ä.) hinzugefügt werde, welche sowohl in die Polaris eingepflegt als auch mit der Hololens angezeigt werden. Diese Modelle werden von VersuchsteilnehmerInnen mit dem Pointer der Polaris angefahren. Aus den Positionsdaten des Pointers und den Positionsdaten des in die Polaris eingepflegten Modells lässt sich der Fehler der jeweiligen Methode berechnen.

1.3 ...

2. Stand der Forschung

Im Folgenden werden verwandte Arbeiten genannt, wobei besonderer Fokus auf Anwendungen mit der Microsoft Hololens gelegt wird. Weiterhin wird auf verschiedene Möglichkeiten der Registrierung, u.a. durch Marker Tracking eingegangen.

2.1 Augmented Reality in der Chirurgie

Augmented Reality kann im medizinischen Bereich in vielerlei Hinsicht eingesetzt werden. Großes Potential haben Anwendungen zur präoperativen Planung [1], intraoperativer Visualisierung und zum Training von Chirurgen [2]. Anwendungen mit *Head-Mounted-Displays* (HMD), also Displays, die wie eine Brille auf dem Kopf getragen werden, bieten zusätzlich den Vorteil, dass der Chirurg seine Hände frei nutzen kann. Eine Herausforderung hierbei ist, dass zur Visualisierung die Daten korrekt mit dem Patienten überlagert (*registriert*) werden müssen. Es muss also erreicht werden, dass die wahrgenommene Position in der Szene mit dem computergenerierten Objekt übereinstimmt [3]. Dazu muss die Kamera kalibriert werden.

Azuma hat bereits 1997 Anwendungsfälle für AR im medizinischen Bereich genannt, unter anderem ein Projekt, bei welchem eine Biopsie des Brustgewebes durch AR unterstützt wurde. Die Position des Tumors in einem Phantom wurde visualisiert und die Einstichstelle sowie der Pfad der Nadel im Gewebe bis zum Tumor geführt [2].

Bei *INPRES* (intraoperative presentation of surgical planning and simulation results)[] wurde als HMD die Optische-Durchsicht-Brille Sony Glasstron verwendet.

2.2 Marker Tracking in der Chirurgie

Registrierung kann über das Tracken von Markern erreicht werden. Marker sind Objekte, die in der Szene angebracht werden und durch Methoden der Computer Vision im Videostream erkannt werden können. Durch die Position der Marker im Bild lässt sich dann wiederum die Kamerapose ermitteln und so das 3D Objekt an der richtigen Stelle im Raum anzeigen.

Ha und Hong haben ein System zur Unterstützung einer Knochentumorresektion entwickelt. Um den Patienten und die Instrumente zu tracken, wurde ein Tablet Computer mit Kamera genutzt, auf dem auch gleichzeitig die Visualisierung zu sehen war. Als Marker wurden Würfel genutzt, an welchen auf jeder Seite ein planares Bild angebracht war,

ähnlich zu Aruco Markern. Diese Marker wurde am Patienten und an den Instrumenten befestigt, ein externes Tracking System war nicht notwendig [1].

Kenngott et al. [4] haben ein mobiles System entwickelt, welches eine möglichst patientennahe Anwendung von Augmented Reality ermöglicht. So können Aufnahmen des Patienten schnellstmöglich visualisiert werden. Dies ist vor allem in Umfeldern, wo es auf Schnelligkeit ankommt (bspw. in der Notaufnahme) ein großer Vorteil gegenüber des üblichen Vorgehens, dem Anzeigen der Aufnahmen an einem dafür vorgesehenen Arbeitsplatz. Um den Bezugsrahmen für die AR Anwendung zu definieren, wurden 15 strahlenundurchlässige Marker genutzt, welche frei auf dem Patienten positioniert werden konnten. Für den Registrierungsprozess wurden 6 dieser Marker genutzt und farblich markiert. Zum Tracking der Marker und Anzeigen des Hologramms wurde ein handelsübliches Apple iPad genutzt.

[5]

2.3 Hololens in der Chirurgie

Die Microsoft Hololens ist ein HMD für Augmented Reality und zurzeit eines der besten HMDs auf dem Markt geeignet für chirurgische Anwendungen [6]. Es ist ein optical see-through display, ermöglicht also dem Chirurgen gleichzeitig die Sicht auf die reale Umgebung ohne eine Zeitverzögerung. Die Hololens ist nicht kabelgebunden und lässt sich über Handgesten und Sprachbefehle steuern, was die Sterilität im Operationssaal nicht gefährdet [6].

Von Pratt et al. [6] wurde eine Hololens App zur Unterstützung der Chirurgen bei einer Operation zur Rekonstruktion von Extremitäten entwickelt (siehe Abb. 2.2). Es wurde festgestellt, dass die Anwendung verlässlicher und weniger zeitaufwändig ist, als die zur Zeit für solche Eingriffe genutzte Doppler-Sonografie. Das Hologramm wurde beim Start der App ausgehend von der Pose der Hololens an einer festgelegten Stelle im Raum gerendert. Die Registrierung wurde vom Chirurgen manuell durch das Nutzen der Air-Tap-and-Hold Geste durchgeführt. Über Sprachbefehle oder entsprechende Buttons in einer Toolbar konnte zwischen Translation und Rotation Modus gewechselt werden.

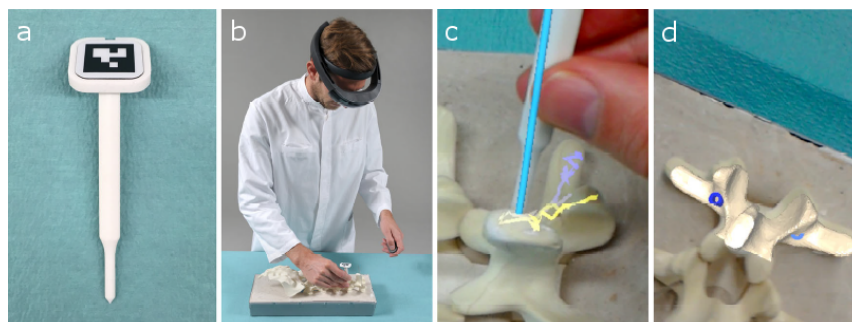


Abb. 2.1: Erstellung der intraoperativen Point Cloud; (a) Pointer mit Marker; (b) Chirurg mit Hololens; (c) Sicht durch Hololens während des Abtastvorgangs; (d) Überlagerung nach der Registrierung [7]

Liebmann et al. [7] haben eine Navigationsanwendung für die Platzierung von Pedikelschrauben bei Operationen an der Wirbelsäule entwickelt. Ziel der Anwendung war es, intraoperative Bildgebung wie CT Aufnahmen zu vermeiden, da der Patient dabei einer hohen Strahlenbelastung ausgesetzt wird. Mit 2 der 4 Frontkameras der Hololens auf die über den Research Mode zugegriffen werden kann wurde Marker Tracking zur Bestimmung der Kamerapose umgesetzt. Als Marker wurden sterile kommerziell verfügbare Marker verwendet. Um zu Registrieren, wurde intraoperativ die Oberfläche der Wirbelsäule mit Hilfe

eines Pointers, der getrackt werden kann, abgetastet. Zusätzlich wurde der Klicker der Hololens genutzt. Während der Klicker gedrückt wurde, wurde die Position vom Pointer gespeichert. Die so erhaltene intraoperative Point Cloud wurde anschließend vollautomatisch mit der präoperativen Point Cloud registriert (siehe Abb. 2.1). Abschließend wurde das Hologramm angezeigt und bei korrekter Überlagerung vom Chirurgen bestätigt. Durch doppelklicken des Hololens Klickers wurde dann die Navigation gestartet. Während der Navigation wurde das Hologramm ausgeblendet und nur die Bohrlöcher visualisiert, zusätzlich wurde dem Chirurgen die aktuelle und gewünschte Neigung eines Navigationswerkzeuges angezeigt.

Rae et al. [8] nutzen die Hololens, um die Platzierung von Bohrlöchern auf dem Schädel anzuzeigen. Mit dem Tool 3D Slicer wurde ein 3D Modell erstellt und Marker sowohl an den gewünschten Bohrpunkten als auch an Registrierungspunkten platziert. Die Registrierung des 3D Modells via Hololens mit dem Phantom erfolgte über die manuelle Positionierung des ersten Markers. Die Abstände zwischen den Markern sind fix, sodass die beiden anderen Marker vom Chirurgen an die gewünschte Stelle rotiert werden konnten. Anschließend konnten vom Chirurgen kleinere Anpassungen in der Positionierung vorgenommen werden. Bei dem gesamten Vorgang wurde auf die korrekte Einschätzung des Chirurgen vertraut.

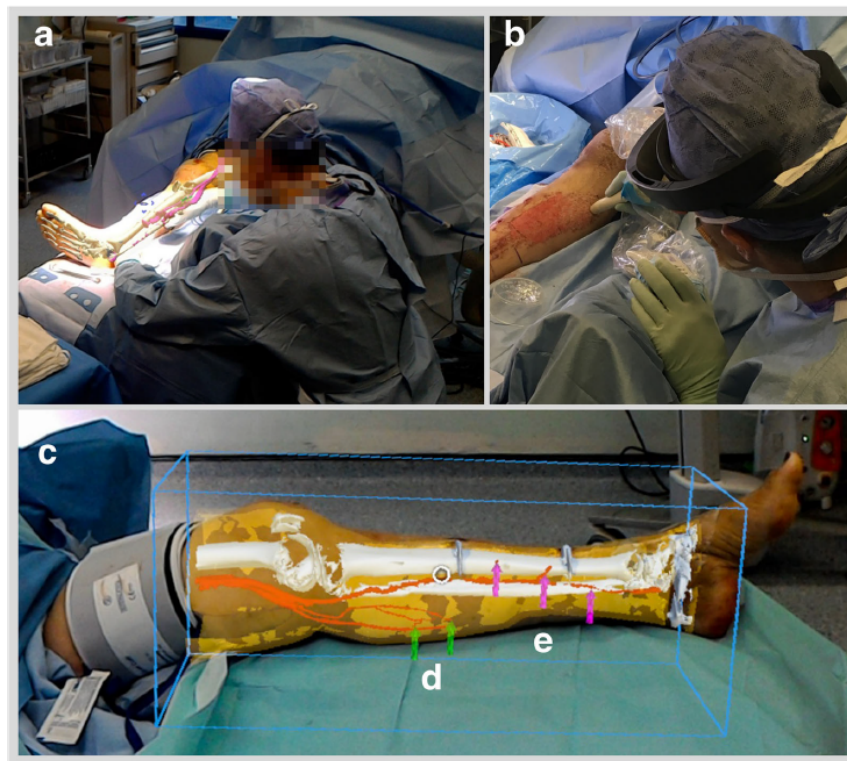


Abb. 2.2: Hololensgestützte Operation; (a) Blick auf OP über zweite Hololens; (b) Chirurg nutzt Doppler-Sonografie zur Überprüfung; (c) Registrierung von Hologramm und Patient, Hervorhebung wichtiger Positionen durch Pfeile [6]

3. Grundlagen

In diesem Kapitel wird eine Einführung in die Grundlagen gegeben, welche im Methoden Kapitel verwendet werden. Zuerst wird das Mixed Reality Spektrum erläutert, anschließend das Prinzip der Head Mounted Displays. Im Abschnitt 4.3 wird AR Tracking beschrieben, welches Marker, verschiedene Arten von Markern und Tracking Algorithmen beinhaltet. Abschließend wird das bei dieser Arbeit verwendete Phantom vorgestellt.

3.1 Mixed Reality

Der Begriff *Mixed Reality* (MR) wurde zuerst von Milgram und Kishino [9] beschrieben. Dabei handelt es sich um ein Spektrum, welches sich zwischen der realen und der virtuellen Welt aufspannt (siehe Abb. 3.1). Unter der virtuellen Welt wird hierbei die *Virtuelle Realität* (VR) verstanden, welche sich dadurch kennzeichnet, dass der Nutzer vollständig in eine digitalisierte Umgebung eintaucht, ohne seine reale Umwelt direkt wahrnehmen zu können. Auf dem MR Spektrum sind reale und virtuelle Welt unterschiedlich stark miteinander verschmolzen. Bei der *Augmented Reality* (AR) werden der realen Welt virtuelle Objekte, wie bspw. der Avatar einer sich nicht im Raum befindlichen Person, hinzugefügt [10]. Bei der *Augmented Virtuality* (AV) werden ausgehend von der virtuellen Welt Eigenschaften des realen Raumes übernommen, wie etwa Hindernisse [10].

Heutzutage wird die MR nicht nur durch die Art des verwendeten Bildschirms beschrieben, sondern zusätzlich durch die Fähigkeit des Geräts, sich im Raum lokalisieren zu können und bspw. Geräusche räumlich korrekt wiedergeben zu können [10].

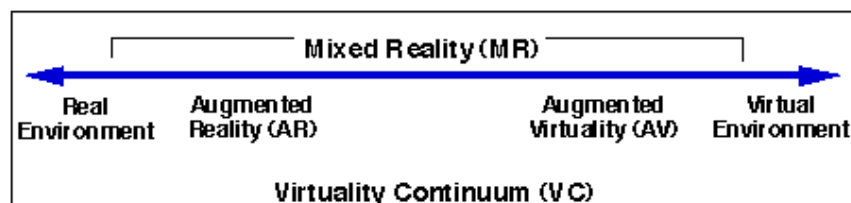


Abb. 3.1: Mixed Reality Spektrum nach Milgram und Kishino [9]

3.2 Head Mounted Displays

Um virtuelle Objekte in der realen Welt anzeigen zu können, werden Displays benötigt. Neben Displays, welche in der Hand gehalten werden und stationär befestigten Displays,

gibt es *Head Mounted Displays* (HMDs). Sie werden ähnlich einer Brille auf dem Kopf getragen, das Display befindet sich vor den Augen des Nutzers. Im Bereich AR wird zwischen *video see-through HMD* (VST-HMD) und *optical see-through HMD* (OST-HMD) unterschieden.

Bei VST-HMDs wird ein Video der Umwelt aufgenommen, in welches die virtuellen Objekte mittels Methoden der Computer Vision pixelgenau eingefügt werden [11]. Es tritt keine Zeitverzögerung zwischen Bild der realen Welt und dem darauf angezeigtem virtuellem Objekt auf. Mittels Tiefenkameras kann eine korrekte räumliche Überlagerung von virtuellen Objekten durch reale Objekte garantiert werden. Ein Nachteil von VST-HMDs ist die Tatsache, dass der Träger des HMDs die Welt nur über das Video wahrnimmt und es so zu Problemen aufgrund von begrenzter Auflösung und zeitlicher Verzögerung zwischen realer Welt und Video kommen kann [11].

OST-HMDs hingegen sind Displays, welche durchsichtig sind und so den Blick auf die reale Umgebung ermöglichen. Dadurch gibt es keine Zeitverzögerung zwischen realer Welt und Szene, die der Nutzer sieht, mehr. Allerdings kann es nun zur zeitlichen Verzögerung im Rendering des virtuellen Objektes kommen. Ein weiteres großes Problem ist das Registrieren der virtuellen Objekte mit der Umwelt, da bei OST-HMDs zum positionieren dieser Objekte keine Methoden der Computer Vision verwendet werden können [11]. Die in dieser Arbeit verwendete Microsoft Hololens lässt sich zu den OST-HMDs zählen.

3.3 Registrierung

Im medizinischen Bereich ist es wünschenswert, verschiedene Datensätze, welche bspw. durch unterschiedliche Bildgebende Verfahren oder zu verschiedenen Zeitpunkten im Krankheitsverlauf entstanden sind, in Übereinstimmung zu bringen. So können die Datensätze gleichzeitig angezeigt werden, was die Interpretation erleichtert und das aufwändige Wechseln zwischen den verschiedenen Medien vermeidet. Dies ermöglicht eine Verbesserung von Diagnose, Planung und Therapie. Dieser Prozess des in-Übereinstimmung-bringens wird *Registrierung* genannt.

In der AR bezieht sich der Begriff Registrierung auf das Problem, die Objekte der virtuellen und realen Welt miteinander in Einklang zu bringen [2]. Es werden *Ankerpunkte* (Anchor) benötigt, um die Hologramme am korrekten Ort anzuzeigen und dort zu halten, selbst wenn der Nutzer sich im Raum bewegt. Als Anchor können u.a. reale Objekte im Raum, bspw. Image Marker aus Papier, genutzt werden [11]. Nach der initialen Registrierung, bei welcher die Position und Rotation (*Pose*) des Nutzers in Relation zum Anchor bestimmt werden, müssen diese kontinuierlich aktualisiert werden, da der Nutzer sich im Raum bewegt [11]. Im Folgenden werden verschiedene Tracking Methoden genannt.

3.4 AR Tracking

Generell gibt es verschiedene Tracking Methoden, wie Magnetisches Tracking, Sichtbasiertes Tracking, Inertial Tracking oder hybride Anwendungen.

Sichtbasiertes Tracking zeichnet sich dadurch aus, dass zur Berechnung der Kamerapose im Verhältnis zu Objekten im Raum Methoden aus der Computer Vision genutzt werden [12]. Da in dieser Arbeit sichtbasiertes Tracking verwendet wurde, wird nur dieses im Weiteren erläutert.

3.4.1 Infrarot Tracking

Beim Infrarot Tracking wird von einem Marker entweder Infrarot Strahlung ausgesendet (*aktiver Marker*) oder reflektiert (*passiver Marker*). Für die trackende Kamera haben diese

Marker einen hohen Kontrast, da sie als helle Punkte vor dunklem Hintergrund erscheinen. Es gibt zwei Ansätze, wie Marker und Kamera konfiguriert sein können: als *outside-looking-in* Konfiguration, bei welcher das zu trackende Objekt mit Markern ausgestattet und von einer stationären Kamera getrackt wird oder als *inside-looking-out* Konfiguration, bei welcher das zu trackende Objekt mit einer Kamera ausgestattet wird und sich anhand von im Raum befestigten Markern orientiert [11].

3.4.2 Visible Light Tracking

Mit Hilfe von Video Aufnahmen aus RGB-Kameras, wie sie bspw. die Hololens besitzt, lassen sich Hologramme ebenso mit der realen Welt registrieren. Die dazu verwendeten Methoden lassen sich in drei Techniken aufteilen, welche im Folgenden erläutert werden.

Fiducial Tracking

Fiducials sind physische Objekte, die in der realen Welt platziert werden (siehe Abb.3.2). Sie können als Anchor für virtuelle Objekte genutzt werden, um diese im Raum zu positionieren. Wie ein Fiducial aussieht, ist stark von dem Algorithmus abhängig, der zum Tracken genutzt wird. So gibt es einfarbige Fiducials, die per Color Matching getrackt werden können [11]. Hierbei muss beachtet werden, dass ein einzelner, einfarbiger Marker nicht genügend Informationen enthält, um die Kamerapose zu bestimmen. Es müssen mindestens vier Punkte im Raum erkannt werden, um diese berechnen zu können [11]. Es muss also darauf geachtet werden, die Marker so in der realen Welt zu positionieren, dass zu jeder Zeit mindestens vier einfarbige Fiducials sichtbar sind. Dieser Mehraufwand kann vermieden werden, indem planare quadratische Marker verwendet werden, deren Ecken als die vier bekannten Punkte dienen. Zusätzlich kann ein Bild dem Marker hinzugefügt werden, um zu ermöglichen, dass mehrere Marker zeitgleich verwendet und voneinander unterschieden werden können, sowie die Rotation um die vertikale Achse feststellen zu können, wie es bspw. beim ARToolkit der Fall ist [11].

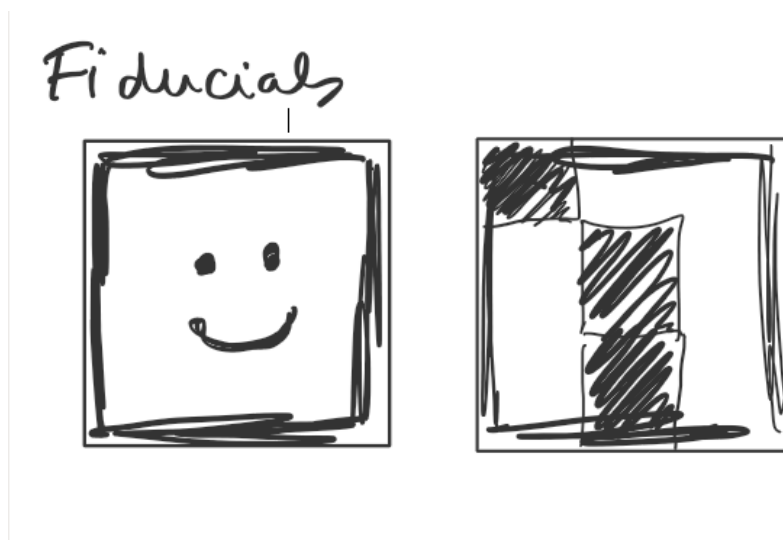


Abb. 3.2: Beispiel planare Fiducials und einfarbige Fiducials (beim zeichnen vergessen)

Natural Feature Tracking

Natural Feature Tracking ermöglicht ein markerloses Tracking, somit müssen dem Raum keine künstlichen Merkmale in Form von Fiducials hinzugefügt werden. Algorithmen wie SIFT (Scale Invariant Feature Transform) ermitteln eindeutige Merkmale in einem Set von Referenzbildern und bilden einen Deskriptor, welcher spezifisch für dieses eine Merkmal ist und in einer Datenbank gespeichert wird. Mittels Feature Matching werden Merkmale

des zu trackenden Objekts mit Merkmalen aus der Datenbank abgeglichen. Die Pose der Kamera kann nun mit den gefundenen Features ähnlich berechnet werden wie bei Fiducials [11].

Modellbasiertes Tracking

Beim modellbasierten Tracking wird ein 3D-Modell des Objektes genutzt, welches getrackt werden soll. Auf die Szene werden Kantenfilter angewendet, welche mit dem 3D-Modell abgeglichen werden, wodurch die Pose der Kamera bestimmt wird. Es ist möglich, Natural Feature Tracking und die Textur des 3D-Modells mit einzubeziehen, wodurch das Tracking robuster wird [11].

3.4.3 3D Structure Tracking

Es ist möglich, mit Hilfe von 3D-Kamerasystemen Tiefendaten zu erhalten. Diese Tiefendaten werden mittels Methoden wie time-of-flight oder strukturiertem Licht erzeugt. Bei ersterem wird die Laufzeit eines Lichtimpulses zum Objekt und zurück gemessen, sodass für jeden Pixel in der Szene eine Laufzeitmessung und somit die Distanz zur Kamera bekannt ist [13]. Bei strukturiertem Licht werden Streifen oder Punkte auf eine Oberfläche projiziert. Durch die Oberfläche wird das projizierte Muster verzerrt. Mithilfe von optischer Triangulation kann nun die 3D Position der Punkte bestimmt werden [13]. Die KinectFusion nutzt strukturiertes Licht um 3D Modelle von Objekten und vom Raum zu erstellen, welche wiederum zum Tracken der Pose der Kamera genutzt werden [11].

3.5 Phantom

Unter einem *Phantom* wird in der Medizin die Nachbildung eines Organs verstanden, an welchem Übungen und Experimente durchgeführt werden können. Das in dieser Arbeit verwendete Phantom ist das *open-source Heidelberg laparoscopic phantom* (Open-HELP). Es wurde nach dem CT-Scan des Torsos eines männlichen Patienten modelliert [14]. Der Torso enthält naturgetreue Organe und eine abnehmbare Bauchdecke (siehe Abb. 3.3).



Abb. 3.3: Open-HELP Phantom mit und ohne Bauchdecke

4. Methoden

Description of your used methods, algorithms and the actual work you did. This is often the longest and most detailed chapter...

4.1 Microsoft Hololens

Das in dieser Arbeit genutzte Optical See-Through HMD ist die Hololens der ersten Generation. Die Hololens wurde 2016 von der Microsoft Corporation auf den Markt gebracht. Sie übertrifft andere kommerziell verfügbaren OST-HMDs in Kontrast und Stabilität der Bildwiederholrate und hat eine geringere Zeitverzögerung [15]. Die Hololens ist nicht kabelgebunden, lässt sich über Handgesten sowie Sprachbefehle steuern und gefährdet somit nicht die Sterilität im Operationssaal [6].

Ein virtuelles Objekt, welches von der Hololens angezeigt wird, wird *Hologramm* genannt. Die Hololens projiziert ein Hologramm auf zwei Durchsichtdisplays (*Waveguides*), für jedes Auge eines. Im Gegensatz zu Video See-Through HMDs, welche bei einem Stromausfall dem Nutzer jegliche Sicht versperren, ermöglichen die Waveguides zeitgleich die Sicht auf die reale Umgebung. Für jeden Waveguide gibt es eine *Light Engine*, welche die holographischen Inhalte projiziert. Mit Hilfe von vier Umgebungssensoren und einer Time-of-Flight Tiefenkamera kann die Hololens eine Karte des Raumes erstellen (*Spatial Mapping*) und sich selbst darin Positionieren. Die Tiefenkamera wird zusätzlich zur Erkennung der Handgesten genutzt. [16]

Technische Daten

Komponente	Daten
Optik	2 Durchsichtdisplays (Waveguides) 2 HD 16:9 Light Engines
Holographische Auflösung	2,3 Millionen Lichtpunkte
Holographische Dichte	mehr als 2500 Radianten (2500 Lichtpunkte pro Radiant, wobei $1rad \approx 57,3^\circ$)
Sensoren	1 IMU (Inertiale Messeinheit) 4 Umgebungssensoren 1 Tiefenkamera (Time-of-Flight) 1 2MP HD Kamera 4 Mikrofone 1 Umgebungslichtsensor
Interaktion	räumlicher Ton Blickverfolgung Handgesten Sprachsteuerung (bei Internetverbingung)
Leistung	2-3 Stunden aktive Nutzung bis zu 2 Wochen standby nutzbar während des Ladevorgangs passive Kühlung
Prozessoren	Intel 32 bit architecture Microsoft Holographic Processing Unit (HPU 1.0)
Betriebssystem	Windows 10

4.2 NDI Polaris

4.3 Unity

4.4 Mixed Reality Toolkit

4.5 Vuforia

-model targets -model target generator -image targets -wie sieht ein gutes image target aus -die image targets die ich genutzt habe? Oder erst später?

4.6 Versuchsaufbau

Box Phantom

4.7 Kalibrierung

4.8 GUI und Interaktion

man muss mit dem Hologramm interagieren wegen kalibrierung zwei möglichkeiten für GUI 1. box transparent 2. rendering reihenfolge (box muss von achsen überlagert werden)

für 2. entschieden, da bei box transparent buttons drin liegen und so nicht ersichtlich dass interagiert werden kann

5. Evaluation

Description of your evaluation and its results. Interpretation of these results should go in the next chapter.

6. Diskussion

Discussion/Conclusion section. Some questions to think about while writing this section:

- What is the outcome of your evaluation?
- Did it meet the required goals defined in chapter 1? Why/Why not?
- How can future work improve on your work? Bessere Targets Bessere Positionierung Algorithmus, der Erkennt, wenn Target falsch getrackt wird (bspw dadurch, dass der winkel in dem es erkannt wird plötzlich stark anders ist)

Abbildungsverzeichnis

2.1	Pedikelschrauben Navigation	4
2.2	Hololensgestützte Extremitätenrekonstruktion	5
3.1	Virtuality Continuum	7
3.2	Fiducials	9
3.3	Open-HELP Phantom	10

List of Algorithms

Literaturverzeichnis

- [1] H.-G. Ha and J. Hong, “Augmented Reality in Medicine,” *Hanyang Medical Reviews*, vol. 36, no. 4, pp. 242–247, Nov. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7599/hmr.2016.36.4.242>
- [2] R. T. Azuma, “A Survey of Augmented Reality,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, Aug. 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- [3] W. Birkfellner, M. Figl, K. Huber, F. Watzinger, F. Wanschitz, J. Hummel, R. Hanel, W. Greimel, P. Homolka, R. Ewers, and H. Bergmann, “A head-mounted operating binocular for augmented reality visualization in medicine - design and initial evaluation,” *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 21, no. 8, pp. 991–997, Aug. 2002.
- [4] H. Kenngott, A. Amin Preukschas, M. Wagner, F. Nickel, M. Müller, N. Bellemann, C. Stock, M. Fangerau, B. Radeff, H.-U. Kauczor, H.-P. Meinzer, L. Maier-Hein, and B. Peter Müller-Stich, *Mobile, real-time, and point-of-care augmented reality is robust, accurate, and feasible: a prospective pilot study*, Jun. 2018, vol. 32.
- [5] T. Frantz, B. Jansen, J. Duerinck, and J. Vandemeulebroucke, “Augmenting Microsoft’s HoloLens with vuforia tracking for neuronavigation,” *Healthcare Technology Letters*, vol. 5, no. 5, pp. 221–225, 2018.
- [6] P. Pratt, M. Ives, G. Lawton, J. Simmons, N. Radev, L. Spyropoulou, and D. Amiras, “Through the HoloLens™ looking glass: augmented reality for extremity reconstruction surgery using 3d vascular models with perforating vessels,” *European Radiology Experimental*, vol. 2, no. 1, p. 2, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s41747-017-0033-2>
- [7] F. Liebmann, S. Roner, M. von Atzigen, D. Scaramuzza, R. Sutter, J. Snedeker, M. Farshad, and P. Fürnstahl, “Pedicule screw navigation using surface digitization on the Microsoft HoloLens,” *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 14, no. 7, pp. 1157–1165, Jul. 2019. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s11548-019-01973-7>
- [8] E. Rae, A. Lasso, M. S. Holden, E. Morin, R. Levy, and G. Fichtinger, “Neurosurgical burr hole placement using the Microsoft HoloLens,” in *Medical Imaging 2018: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*, vol. 10576. International Society for Optics and Photonics, Mar. 2018, p. 105760T. [Online]. Available: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10576/105760T/Neurosurgical-burr-hole-placement-using-the-Microsoft-HoloLens/10.1117/12.2293680.short>
- [9] P. MILGRAM and F. KISHINO, “A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays,” Dec. 1994. [Online]. Available: https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e77-d-12_1321

- [10] B. Bray, v stdemo, J. McCulloch, N. Schonning, and M. Zeller, “What is mixed reality? - Mixed Reality.” [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mixed-reality>
- [11] M. Billinghurst, A. Clark, and G. Lee, “A Survey of Augmented Reality,” *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, vol. 8, no. 2-3, pp. 73–272, Mar. 2015. [Online]. Available: <https://www.nowpublishers.com/article/Details/HCI-049>
- [12] I. Rabbi and S. Ullah, “A Survey on Augmented Reality Challenges and Tracking Authors,” p. 18, 2013.
- [13] R. Szeliski, “Computer Vision: Algorithms and Applications,” p. 979.
- [14] “OpenHELP (Heidelberg laparoscopy phantom): development of an open-source surgical evaluation and training tool | SpringerLink.” [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00464-015-4094-0>
- [15] L. Qian, A. Barthel, A. Johnson, G. Osgood, P. Kazanzides, N. Navab, and B. Fuerst, “Comparison of optical see-through head-mounted displays for surgical interventions with object-anchored 2d-display,” *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 12, no. 6, pp. 901–910, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11548-017-1564-y>
- [16] Varnauld, “Mixed Reality documentation - Mixed Reality.” [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/>