

Externe Ventrikeldrainage mittels Augmented Reality und Peer-to-Peer-Navigation

Simon Strzeletz¹, José Moctezuma², Mukesh Shah³, Ulrich Hubbe³,
Harald Hoppe¹

¹Hochschule Offenburg, Labor für Computerassistierte Medizin

²Stryker Leibinger GmbH & Co. KG, Freiburg

³Universitätsklinikum Freiburg, Klinik für Neurochirurgie

`simon.strzeletz@hs-offenburg.de`

Kurzfassung. Das hier vorgestellte System verbindet das neue Konzept der Peer-to-Peer-Navigation mit dem Einsatz von Augmented Reality zur Unterstützung von bettseitig durchgeführten externen Ventrikeldrainagen. Das sehr kompakte und genaue Gesamtsystem beinhaltet einen Patiententracker mit integrierter Kamera, eine Augmented-Reality-Brille mit Kamera und eine Punktionsnadel bzw. einen Pointer mit zwei Trackern, mit dessen Hilfe die Anatomie des Patienten aufgenommen wird. Die exakte Position und Richtung der Punktionsnadel wird unter Zuhilfenahme der aufgenommenen Landmarken berechnet und über die Augmented-Reality-Brille für den Chirurgen sichtbar auf dem Patienten dargestellt. Die Methode zur Kalibrierung der statischen Transformationen zwischen Patiententracker und daran befestigter Kamera beziehungsweise zwischen den Trackern der Punktionsnadel sind für die Genauigkeit sehr wichtig und werden hier vorgestellt. Das Gesamtsystem konnte in vitro erfolgreich getestet werden und bestätigt den Nutzen eines Peer-to-Peer-Navigationssystems.

1 Einleitung

Der Einsatz herkömmlicher Navigationssysteme für externe Ventrikeldrainagen (EVD) ist in dringlichen Situationen zu aufwendig, wenngleich dies aus Gründen der Genauigkeit, insbesondere für Ungeübte, wünschenswert wäre. AlAzri et al. haben in [1] gezeigt, dass externe Ventrikeldrainagen, die ohne Navigationsunterstützung durchgeführt werden, sehr ungenau sind. Zwar ist die Sterblichkeitsrate gering, doch mit jeder weiteren fehlgeschlagenen Platzierung steigt das Risiko einer Verletzung des Gewebes. Ferner sind Augmented-Reality-Brillen (AR-Brillen) zur Einblendung von Einstichpunkt und -richtung noch nicht in der klinischen Routine angekommen. Beide Aspekte werden in dem hier vorgestellten Konzept kostengünstig adressiert. Bisherige Konzepte dieser Art benötigen bildgebende Verfahren und sind bzgl. ihrer Genauigkeit nicht validiert [2].

Herkömmliche Navigationssysteme weisen eine eindeutige Trennung zwischen nachverfolgender Kamera und nachverfolgtem Tracker auf. Das Konzept der

Peer-to-Peer-Navigation (P2P) hebt diese Trennung auf [3]: Präzise kalibrierte Kameras befinden sich unmittelbar im Operationssitus – insbesondere integriert in Trackern, die ihrerseits andere Tracker nachverfolgen. Die Anordnung der Tracker-LEDs ist so gewählt, dass eine monokulare Kamera ausreicht, um Transformationen schnell und präzise mittels Point-to-Line-Matching berechnen zu können. Neben weiteren Details wurde in [4] gezeigt, dass die dabei erzielte Genauigkeit den Anforderungen im chirurgischen Bereich genügt.

2 Material und Methoden

Im hier vorliegenden Anwendungsbeispiel der EVD trägt der Operateur eine AR-Brille mit integrierter Kamera W , die sowohl den Patiententracker T als auch den auf der Punktionsnadel bzw. dem Pointer S befestigten Tracker A nachverfolgt (siehe Abb. 1). Die in T integrierte Kamera K verfolgt einen zweiten an S angebrachten Tracker B . Dieser Punktions-Tracker kann von K und W beidseitig nachverfolgt werden. Präkalibriert sind die rigiden Transformationen $T \leftrightarrow K$, $S \leftrightarrow A$ sowie $S \leftrightarrow B$. Die entscheidende Transformation $S \rightarrow W$ entsteht wahlweise über die Kette $S \rightarrow A \rightarrow W$ oder $S \rightarrow B \rightarrow K \rightarrow T \rightarrow W$. Die Punktionsnadel bzw. der Pointer bleiben auch dann sichtbar, wenn einer dieser Pfade unterbrochen ist. Punktionsnadel, Pointer sowie Patiententracker sind als sterile Einwegartikel konzipiert.

2.1 Algorithmus

Nach Befestigen des Patiententrackers und Aufsetzen der AR-Brille führen folgende Schritte zum Kocher-Punkt $\mathbf{c}$ und der Punktionsrichtung $\mathbf{d}$ (nach Seeger [5]):

1. Digitalisierung von ipsilateralem $\mathbf{m}_I$ und kontralateralem $\mathbf{m}_K$ Meatus acusticus externus.
2. Digitalisierung von Nasion $\mathbf{n}$ und ipsilateralem Epicanthus $\mathbf{e}_I$. Die sagittale Mittelebene M verläuft durch $\mathbf{n}$ und steht senkrecht auf $\mathbf{m}_I - \mathbf{m}_K$.
3. Vom Nasion ausgehend: Digitalisierung von Punkten $\mathbf{q}_i$ entlang der Sagittalebene in Richtung Bregma. Durch Projektion der $\mathbf{q}_i$ auf M ergeben sich die projizierten Punkte $\mathbf{p}_i$, entlang derer der Punkt $\mathbf{p}_M$ bestimmt wird, der sich 120 mm vom Nasion entfernt befindet.
4. Digitalisierung von Punkten $\mathbf{r}_j$ des ipsilateralen Bereichs, der sich circa 25 mm entfernt von $\mathbf{p}_M$ und M befindet. Der Punktionspunkt $\mathbf{c}$ wird so berechnet, dass sich dieser in der Ebene E befindet, die durch $\mathbf{m}_I$, $\mathbf{m}_K$ und $\mathbf{p}_M$ verläuft und 25 mm (gemessen entlang der gekrümmten Oberfläche $\mathbf{r}_j$) von $\mathbf{p}_M$ entfernt ist.
5. Bestimmung des Lotfußpunktes $\mathbf{e}_L$ des ipsilateralen Epicanthus $\mathbf{e}_I$ auf der Ebene E . Die Punktionsrichtung ist $\mathbf{d} = \mathbf{e}_L - \mathbf{c}$.

Sowohl die digitalisierten Punkte als auch die aus diesen Punkten berechnete Punktionsstelle und Punktionsrichtung werden ortsgenau als Überlagerung in der AR-Brille dargestellt. Die Digitalisierung selbst erfolgt mittels Fußpedal.

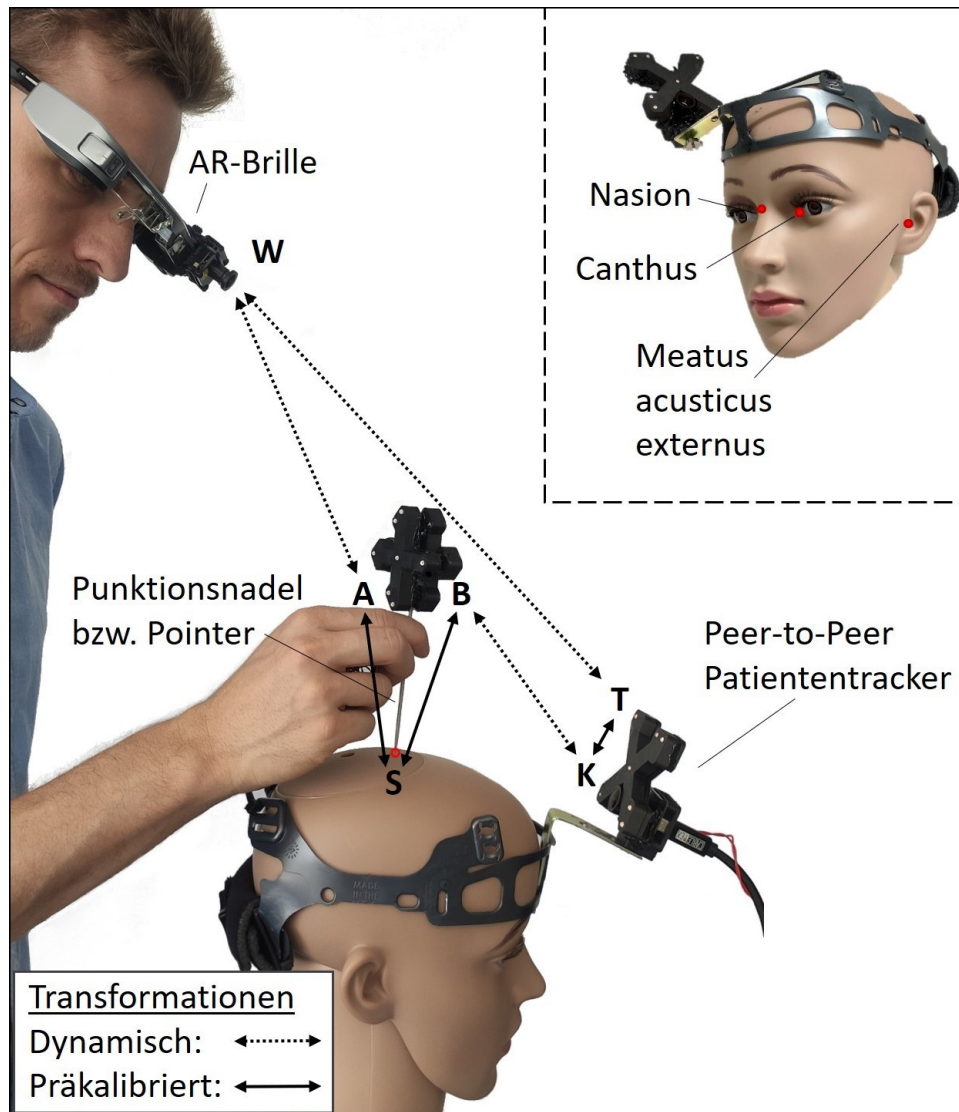


Abb. 1. Gesamtsystem mit AR-Brille, Peer-to-Peer-Patiententracker und Punktionsnadel bzw. Pointer.

2.2 Kalibrierung der statischen Transformationen

Die Genauigkeit des Gesamtsystems hängt entscheidend davon ab, dass die statischen Transformationen zwischen Kamera K und Tracker T sowie zwischen den beiden Trackern A und B der Punktionsnadel bzw. des Pointers exakt kalibriert sind.

Zur Kalibrierung der Transformation F_{KT} wird der Verbund aus Kamera K und Tracker T auf einem Kalibrierkreuz befestigt, an dessen Enden sich jeweils

eine Kugel befindet (siehe Abb. 2 links). Nun werden die Mittelpunkte dieser vier Kugeln im Koordinatensystem T bestimmt, indem diese in einer Mulde pivotiert und dabei von einem Stereokamerasystem G beobachtet werden. Nach jeweils 1000 aufgenommenen Transformationen F_{GT_i} aus möglichst vielen Blickwinkeln werden die Kugelmittelpunkte $\mathbf{m}_{T_j}$ mit $1 \leq j \leq 4$ optimiert. In gleicher Weise werden die Mittelpunkte der Kugeln auch im Koordinatensystem K der Kamera bestimmt, wobei nun ein fester Tracker R als Referenz dient. Wiederum durch Pivotieren und Aufnahme von jeweils 1000 Transformationen F_{KR_i} können die Mittelpunkte $\mathbf{m}_{K_j}$ optimiert werden. F_{KT} ergibt sich nun mittels Least-Square-Fit der Punkte $\mathbf{m}_{T_j}$ auf die Punkte $\mathbf{m}_{K_j}$ (Point-to-Point-Matching).

Vollkommen analog wird auch der Verbund aus den Trackern A und B auf einem Kalibrierkreuz befestigt und zunächst Tracker A, dann Tracker B um jede der vier Kugeln pivotiert und dabei vom Stereokamerasystem G beobachtet (siehe Abb. 2 rechts). Aus den jeweils 1000 Transformationen F_{GA_i} bzw. F_{GB_i} werden wiederum die Mittelpunkte der Kugeln $\mathbf{m}_{A_j}$ bzw. $\mathbf{m}_{B_j}$ optimiert, und die Transformation F_{AB} ergibt sich nun mittels Least-Square-Fit der Punkte $\mathbf{m}_{B_j}$ auf die Punkte $\mathbf{m}_{A_j}$.

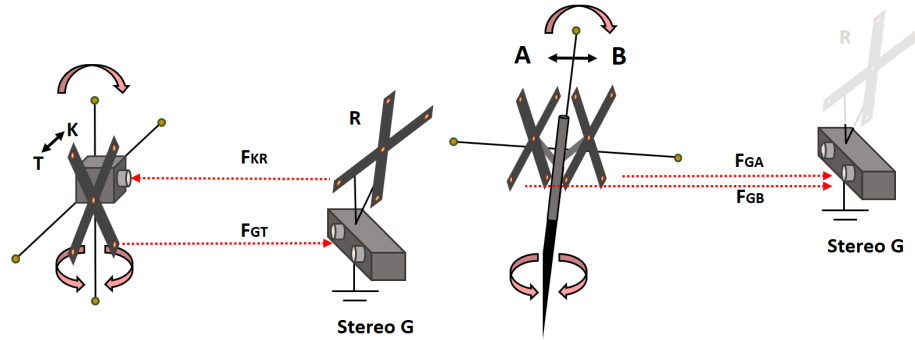


Abb. 2. Schematische Darstellung des Aufbaus zur Bestimmung der Transformation F_{KT} bzw. F_{AB} .

3 Ergebnisse

Das Gesamtsystem konnte inzwischen erfolgreich in vitro (siehe Abb. 1) getestet werden. Dabei wurde, wie in Kapitel 2 beschrieben, vorgegangen, um die Anatomie des Patienten aufzunehmen. Einstichstelle und Punktionsrichtung konnten problemlos in der AR-Brille auf dem Patienten überlagert dargestellt werden (siehe Abb. 3).

Dass das Konzept des monokularen Peer-to-Peer-Trackings die Genauigkeitsanforderungen chirurgischer Navigationssysteme erfüllt, konnte in [3] nachgewiesen werden. Für die Kalibrierung der statischen Transformationen wurde gezielt eine Stereo-Kamera eingesetzt, um eine noch höhere Genauigkeit zu erzielen. Das Tracking mit einer Stereo-Kamera ist im Vergleich zu monokula-

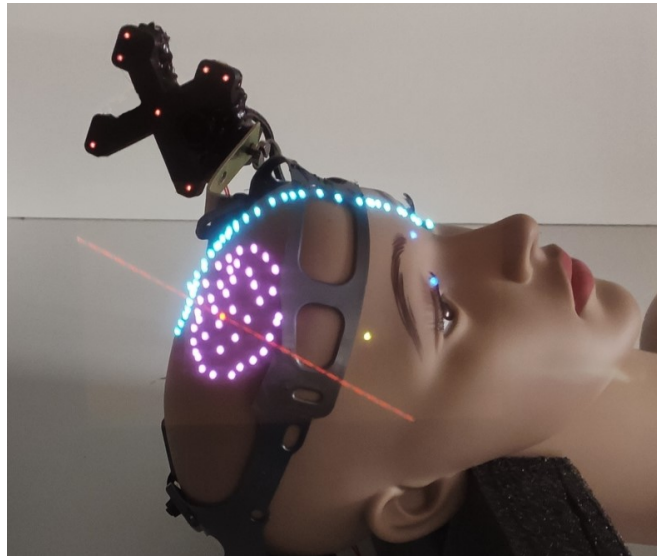


Abb. 3. Blick durch ein Display der AR-Brille auf den Patienten.

rem Pose-Estimation im Schnitt um den Faktor 2,5 genauer. In Abbildung 4 (links) sind die Abweichungen der mit Stereo- und Monokular-Tracking pivотиerten Punkte mit je 1000 Transformationen für eine Kalibrierung des Peer-to-Peer-Patiententrackers aufgelistet. Abbildung 4 (rechts) zeigt die statistische Verteilung der Abweichungen in mm für jeden pivотиerten Punkt.

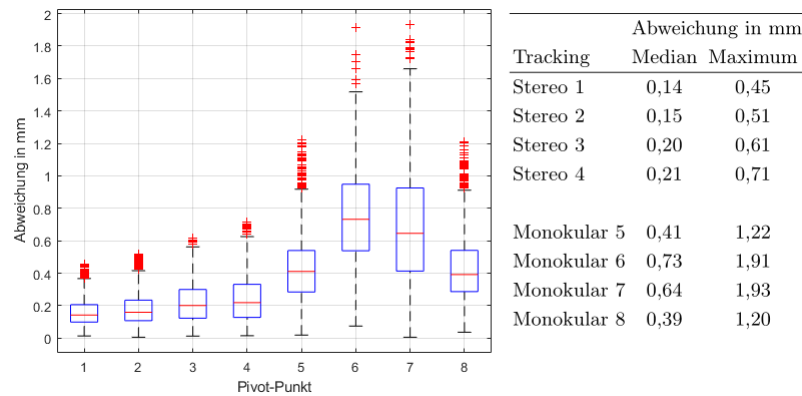


Abb. 4. Vergleich der Berechnung von jeweils vier pivотиerten Punkten mittels Stereo- und Monokular-Tracking bei der P2P-Tracker-Kalibrierung. Boxplot (links) und Tabelle (rechts) der Ergebnisse.

4 Diskussion

Vergleichbare Systeme für navigierte Eingriffe sind meist mit hohen Kosten verbunden. Das hier vorgestellte System ist sehr kostengünstig und ermöglicht dennoch das genaue Auffinden und präzise Einblenden der Anatomie auf dem Patienten. So kann ein Eingriff ohne lange Wartezeiten bettseitig auch von nicht erfahrenen Chirurgen durchgeführt werden. Anatomische Strukturen aus bildgebenden Verfahren können, sofern diese bezüglich des Patiententrackers registriert wurden, direkt in der AR-Brille eingeblendet werden. Das Gesamtsystem wird an einem Laptop betrieben und kostet lediglich circa 1350 Euro (600 Euro für die AR-Brille, 600 Euro für die Kameras, circa 150 Euro für die übrigen Komponenten), wobei der batteriebetriebene Pointer- bzw. Punktionsnadel-Tracker und der Patienten-Tracker T als Einwegartikel konzipiert sind. Die hier vorgestellte Möglichkeit, kostengünstig, schnell und genau eine navigierte externe Ventrikeldrainage durchzuführen ist nach Ansicht der Autoren wegweisend. Im nächsten Schritt wird das Gesamtsystem an einem Phantomkopf mit Zielstrukturen durch Neurochirurgen evaluiert.

Die externe Ventrikeldrainage ist nur ein Anwendungsbeispiel für das Konzept der Peer-to-Peer-Navigation, die vielseitig eingesetzt werden kann. Herkömmliche, platzintensive optische Navigationssysteme sind bei eingeschränkter Sicht auf ihre Tracker nicht in der Lage, Transformationen zu liefern. Die Peer-to-Peer-Navigation erlaubt Tracking auf engstem Raum und eröffnet Möglichkeiten, die bisher nicht möglich waren, beispielsweise den Aufbau von Transformationsketten (Tracken um die Ecke) oder die Verwendung alternativer Transformationspfade, falls einzelne Transformationen ausfallen.

Literaturverzeichnis

1. AlAzri A, Mok K, Chankowsky J, et al. Placement accuracy of external ventricular drain when comparing freehand insertion to neuronavigation guidance in severe traumatic brain injury. *Acta Neurochirurgica*, 159. 2017; p. 0942–0940.
2. Kunz C, Hlavac M, Schneider M, et al. A System for Augmented Reality Guided Ventricular Puncture Using a HoloLens: Design Implementation and Initial Evaluation. In: T Neumuth et al (eds) CURAC 2018. 2018; p. 132–137.
3. Strzeletz S, Hazubski S, Moctezuma JL, et al. Peer-to-Peer-Navigation in der computerassistierten Chirurgie. In: T Neumuth et al (eds) CURAC 2018. 2018; p. 119–124.
4. Strzeletz S, Hazubski S, Moctezuma JL, et al. Fast, robust, and accurate monocular peer-to-peer tracking for surgical navigation. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2020; p. 479–489.
5. Seeger W. Atlas of Topographical Anatomy of the Brain and Surrounding Structures for Neurosurgeons, Neuroradiologists, and Neuropathologists;.