

Beurteilung der Eignung eines VR-Systems als 3D-Koordinatenmesssystem

Peter BAUER, Samuel JOST und Werner LIENHART

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als „peer reviewed paper“ angenommen.

1 Einleitung

Ein *Virtual Reality* (VR) System wird üblicherweise dazu benutzt, dreidimensionale Inhalte einer Person aus der „Ich“-Perspektive zugänglich zu machen. Der Nutzer kann über ein Display, das am Kopf fixiert wird, in die Simulation eintauchen. Dabei wird permanent die Position und Orientierung dieses *Head Mounted Displays* (HMD) von einem Positionierungssystem bestimmt. Diese Technologie erlaubt einen neuen Zugang zur Datenaufbereitung, weit über den zweidimensionalen Computermonitor hinaus.

Obwohl ein funktionsfähiges HMD bereits 1968 (SUTHERLAND 1968) gebaut und diese Technologie stetig weiterentwickelt wurde, hat diese Branche erst in den letzten Jahren ein enormes Wachstum erfahren. Leistungsfähige Computer und ein Hype in der Unterhaltungsindustrie haben dafür gesorgt, dass kostengünstige VR-Systeme für den Massenmarkt produziert werden können. Durch den wachsenden Anspruch der Zielgruppe wurden diese Systeme immer leistungsfähiger und auch für technische Anwendungen attraktiv. Mittlerweile ist ein VR-System ein etabliertes Hilfsmittel zur dreidimensionalen Datenvisualisierung.

Bei den technischen Anforderungen eines VR-Systems liegt der Fokus der Hauptzielgruppe auf einer möglichst realen Darstellung der virtuellen Welt und nicht auf der Genauigkeit des Positionierungssystems. Aus diesem Grund sind Herstellerangaben oder Datenblätter zur Systemgenauigkeit nicht üblich.

Für die Bestimmung der Position und Orientierung der VR-Komponenten werden von einigen Herstellern Basisstationen (z. B. Lighthouses von HTC) benötigt. Als bewegliche Objekte besitzen viele VR-Systeme zusätzlich zum HMD periphere Geräte, wie Controller und sogenannte VR-Tracker, deren Position und Orientierung ebenfalls in Echtzeit bestimmt werden. Der Tracker ist durch seinen Aufbau darauf ausgelegt, auf realen Objekten (z. B. Tennisschläger) montiert zu werden, um diese in die virtuelle Welt mit einzubeziehen. In diesem Beitrag wird diese Funktionalität genutzt, um daraus ein System zur Koordinatenmessung aufzubauen

Konzeptionell gibt es eine Analogie zum üblichen Verfahren in der Industrievermessung, bestehend aus Lasertracker und Corner Cube Reflektor bzw. Probe (LEICA 2009, FARO 2018) (siehe Abbildung 1).

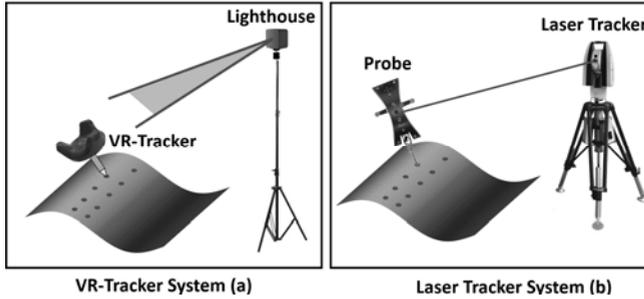


Abb. 1: 3D-Erfassung einer Oberfläche mittels VR-Tracker (a) und konventionellem Lasertracker (b) (Bilder der Komponenten von *vive.com* und *leica-geosystems.com*).

Der Vorteil des VR-Systems gegenüber üblichen geodätischen Instrumenten wie Totalstationen und Lasertrackern ist, dass der Messtaster (VR-Tracker inkl. Spitze) nicht an eine Sichtverbindung zu einer einzigen Basisstation gebunden ist, sondern der Arbeitsbereich durch das Hinzufügen von weiteren Lighthouses erweitert werden kann. Dadurch ist es prinzipiell möglich, sich frei im Werkstück oder rundherum zu bewegen. Ob die Genauigkeit des VR-Systems HTC Vive Pro für die Industrievermessung, oder allgemein für Vermessungsanwendungen, ausreichend ist, wird in diesem Beitrag anhand umfangreicher Laboruntersuchungen diskutiert.

2 Das VR-System HTC Vive Pro

2.1 Funktionsprinzip

Das HTC Vive Pro System (VIVE 11/2019) besteht aus einem HMD, zwei Controllern, bis zu 15 Lighthouses der 2. Generation und einer optionalen Anzahl an VR-Trackern (siehe Abbildung 2a). Für die Positions- und Orientierungsbestimmung befinden sich am HMD 31, an den Controllern jeweils 24 und an den VR-Trackern 22 Infrarotdetektoren. Diese Detektoren detektieren Signale, welche von den Lighthouses ausgesendet werden. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, gibt es für das System keine Datenblätter mit Angaben zur erreichbaren Genauigkeit der Positions- und Orientierungsbestimmung.

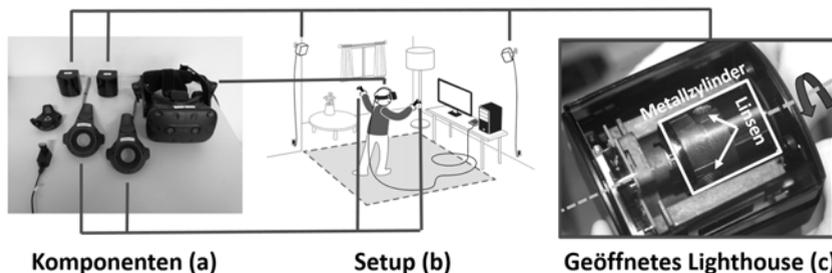


Abb. 2: Systemkomponenten des VR-Systems HTC Vive Pro, empfohlenes Setup (VIVE 09/2019) und geöffnetes Lighthouse (CNLOHR 2018).

MÜLLER (2015) berichtet, dass laut Hersteller der Lighthouses Valve ein Minimum an fünf Rezeptoren benötigt wird, um die Position und die Orientierung einer VR-Komponente zu bestimmen. Die Zeit zwischen den Positionsupdates durch die Lighthouses und bei Verlust der Sichtverbindung soll durch inertielle Messeinheiten (IMU) in den Komponenten überbrückt werden (YATES 2016). In den Lighthouses der aktuellen Version befindet sich eine einzige IR-Quelle, um die, wie in Abbildung 2c zu sehen ist, ein Metallzylinder mit zwei Linsen rotiert. Die angewinkelten Facetten der Linsen definieren zwei verkippte Ebenen. Die Rotation des Metallzylinders erzeugt daraus ein durch den Raum streifendes V-förmiges Signal (BEZMALINOVIC 2018).

Die orientierten Richtungen vom Lighthouse zu den IR-Rezeptoren werden aus der Zeitdifferenz zwischen dem Auftreffen des Signals auf den Rezeptoren und dem Beginn der jeweiligen Rotation bestimmt. Obwohl der genaue Aufbau des ausgesendeten Signals von Valve noch nicht veröffentlicht wurde, wird in einschlägigen Internetbeiträgen davon ausgegangen, dass die Ausrichtung des Zylinders und die ID des Lighthouses aus der zeitabhängigen Zusammensetzung des ausgesendeten Signals hervorgehen (R2X0T 2018).

Aus dieser Information ergibt sich die Annahme, dass die Zeitdifferenz zwischen dem Empfang der beiden Ebenen des V-förmigen Signals an einem Rezeptor eine Bestimmung des Vertikalwinkels zwischen Lighthouse und Rezeptoren ermöglicht. Durch die bekannte Lage der IR-Rezeptoren am Gerät könnte daraus die Entfernung und Orientierung der VR-Komponenten zum Lighthouse bestimmt werden. Aus diesem Grund lässt sich die Position und Orientierung der VR-Komponente auch mit nur einem Lighthouse bestimmen.

Das lokale Koordinatensystem des VR-Systems kann über die Lage und Orientierung des HMD oder über die eingegebenen Spielfeldgrenzen zu Beginn der Anwendung definiert werden.

Laut Produktbeschreibung des VR-Systems HTC Vive Pro wird empfohlen, zwei Lighthouses in gegenüberliegenden Ecken des Raumes in einer Höhe von 2 m mit einem Neigungswinkel von 30° bis 45° zu befestigen, um eine möglichst gute Abdeckung zu erzielen (siehe Abbildung 1b). Die Lighthouses haben einen Öffnungswinkel von 120° in der horizontalen Ebene und einen spezifizierten Arbeitsbereich von 0,5 m bis 6 m. Damit soll standardmäßig eine Fläche von mind. $2\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ bis zu $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ abgedeckt werden können (VIVE 09/2019).

2.2 VR-Tracker als Messtaster

Der VR-Tracker besitzt ein Kameragewinde an der Unterseite (siehe Abbildung 3c), damit er an realen (meist abstrahierten) Objekten befestigt werden kann. Am geöffneten Exemplar in Abbildung 3b sind 13 der 22 IR-Rezeptoren zu erkennen. Abbildung 3a zeigt die zugehörigen konischen Vertiefungen am Gehäuse. Beim Vergleich des geöffneten Trackers mit dem Gehäuse fällt auf, dass ein Sensor weniger verbaut wurde als es Vertiefungen am Gehäuse gibt.



Abb. 3: VR-Tracker: geschlossene Ansicht (a), geöffneter Tracker (b), Skizze der Unterseite (HTC 2017).

In Rotationsversuchen im Messlabor des Institutes für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz konnte bestätigt werden, dass das koordinative Zentrum direkt im Kameragewinde an der Unterseite des VR-Trackers liegt, wie es laut HTC in den Konstruktionszeichnungen beschrieben wird (HTC 2017).

Erweitert man den VR-Tracker über das Kameragewinde mit einer Metallspitze als Messtaster, kann das VR-System als Koordinatenmesssystem genutzt werden. Da das VR-System die Koordinaten des Mittelpunktes und die Orientierung des Trackers im Raum in Echtzeit bestimmt, kann über diese Information die Position der Metallspitze in Echtzeit im lokalen Koordinatensystem des VR-Systems berechnet werden. Das Messsystem kann zeitgleich über die Tastenbelegung eines VR-Kontrollers gesteuert werden, um Messungen auszulösen.

2.3 Implementierung der Messroutinen in Unity

Die Messroutinen für die Untersuchungen wurden in der Spiel-Engine Unity (UNITY 2019) entwickelt. Diese Entwicklungsumgebung bietet die Möglichkeit, die Funktionalität des VR-Systems über selbst entwickelte C#-Routinen zu erweitern. Die Kommunikation mit dem VR-System wurde über die von SteamVR zur Verfügung gestellten Schnittstellen abgewickelt. In Unity sind diese als Plug-in implementiert. Über dieses Plug-in kann mittels C#-Routinen auf die Positions- und Orientierungsdaten der VR-Komponenten zugegriffen werden. Ein Zugriff auf die Rohdaten (Vertikal-, Horizontalwinkel und Distanz) ist nicht möglich. Die Prozessierung dieser übernimmt die von SteamVR für das VR-System zur Verfügung gestellte Software.

3 Systemuntersuchungen des VR-Trackers im Messlabor

3.1 Rauschverhalten bei Verwendung von nur einem Lighthouse

Um eine Abschätzung der Genauigkeit der Positionsbestimmung des VR-Trackers zu erhalten, wird zuerst das systemimmanente Rauschverhalten untersucht. Zu diesem Zweck wurden statische Einzelmessungen mit dem VR-Tracker über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet. Um die Effekte besser unterscheiden zu können und nicht durch eine Überbestimmung zu verschmieren, wurde die Positionsbestimmung mit nur einem Lighthouse in unter-

schiedlichen Entfernungen durchgeführt. Beispielhaft werden nachfolgend die Ergebnisse bei einer Distanz von 2 m zwischen Lighthouse und VR-Tracker diskutiert.

Die Scatterplots von über 500 Messungen pro Position zeigen in Abbildung 4a deutlich, dass das Rauschen der Position in Richtung des Lighthouses höher ist als das Rauschen quer zum Lighthouse. Die Fehlerfigur zeigt ein elliptisches Verhalten mit einer eindeutigen Ausrichtung zum Lighthouse. Die einfache Standardabweichung der horizontalen Punktlage liegt bei der untersuchten Distanz von 2 m zwischen 0,6 mm und 0,7 mm in Richtung zum Lighthouse und unter 0,05 mm orthogonal dazu. In Abbildung 4b zeigt die Fehlerfigur auch in der Vertikalebene ein elliptisches Verhalten mit einer Ausrichtung auf das Lighthouse. Das Rauschen in den einzelnen Komponenten ist inhomogener als in Abbildung 4a, da mit der Höhenvariation auch die Sichtbarkeit von IR-Rezeptoren verändert wird.

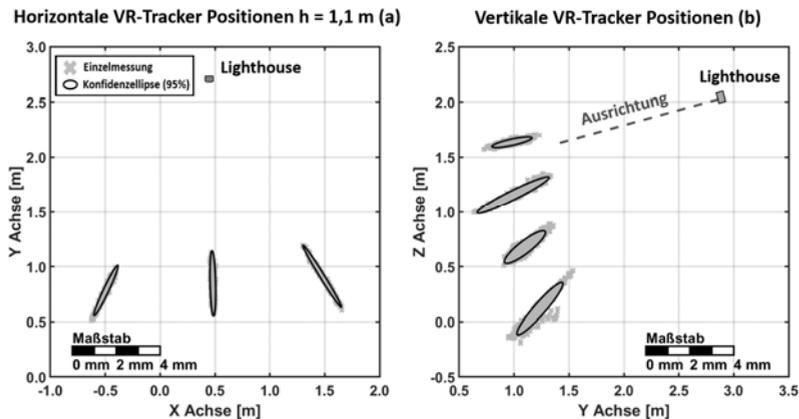


Abb. 4: Horizontale Scatterplots auf 3 Positionen auf selber Höhe (a), Vertikale Scatterplots auf 4 Positionen in einer Ebene mit dem Lighthouse (b).

3.2 Systemverhalten mit einem Lighthouse am Horizontalkomparator

Zur Überprüfung der absoluten Lagegenauigkeit wurde der VR-Tracker auf dem horizontalen Komparator im Messlabor des IGMS positioniert und linear verfahren (siehe Abbildung 5a). Der horizontale Komparator besteht aus einem Schienensystem, auf dem ein Messwagen linear bewegt werden kann. Die Verschiebung wird durch ein Laserinterferometer mit übergeordneter Genauigkeit bestimmt. Als Referenz für die Abweichungen in der Lage wurden die Soll-Positionen als Gerade auf die Messungen des VR-Trackers transformiert, da das Schienensystem der Komparatorbank eine ausreichende Genauigkeit aufweist.

Um einen großen Messbereich abzudecken, wurde das Lighthouse in 4 m Entfernung auf der gleichen Höhe wie der VR-Tracker positioniert. Der Tracker wurde in 25 cm Schritten linear weiterbewegt und 100 Einzelmessungen pro Position wurden ausgelöst (siehe Abbildung 5b). Der Versuch wurde mit unterschiedlichen Längen (mit und ohne Verlassen des Blickfeldes des Lighthouses) am Horizontalkomparator und variierenden Abständen (1,5 m und 4 m) zum Lighthouse wiederholt.

Beispielhaft werden in diesem Artikel die Ergebnisse bei einem Abstand von 4 m von der Komparatorbank gezeigt. Vergleicht man die Mittelwerte der Einzelmessungen mit den Soll-Positionen am Komparator, so können Abweichungen in Richtung des Lighthouses von mehreren Zentimetern beobachtet werden (siehe Abbildung 5). Diese Abweichungen sind systematischer Natur, denn sie sind bei Hin- und Rückweg bis auf wenige Millimeter reproduzierbar (Abbildung 5c).

Weitere Versuche haben gezeigt, dass Positionsbestimmungen auch über den spezifizierten Öffnungswinkel der Lighthouses von 120° hinaus möglich sind. Ab 120° kann ein Anstieg in der Standardabweichung (größere Konfidenzellipsen) wie auch eine Zunahme der Abweichungen zur Referenzlinie (Länge der Pfeile) beobachtet werden. Ab einem Winkel von mehr als 150° vom Lighthouse zum VR-Tracker versucht das System, vermutlich mittels IMU-Daten, die schlechte Positionsbestimmung des Lighthouses auszugleichen. In einer weiteren Untersuchung wurde das Lighthouse kontrolliert abgedeckt, um den Ausfall optischer Messungen zu simulieren. Dies hat gezeigt, dass das System noch für weitere 1,5 Sekunden Daten für den VR-Tracker liefert. Die Positionsbestimmung wird dann sehr unzuverlässig und es kann zu Abweichungen von mehreren Dezimetern kommen.

Führt man den VR-Tracker anschließend wieder in den Sichtbereich der Lighthouses zurück, kommt es in der Positionsbestimmung zu Hysteresen im Bereich mehrerer Zentimeter. Daher kann angenommen werden, dass die Positionsbestimmung nicht unabhängig von der Vorgängerepoche erfolgt und die zurückliegende Trajektorie miteinfließt.

Verbleibt der VR-Tracker aber stets im Blickfeld des einen Lighthouses, sind die Koordinaten frei von Hysteresen und Koordinatensprüngen.

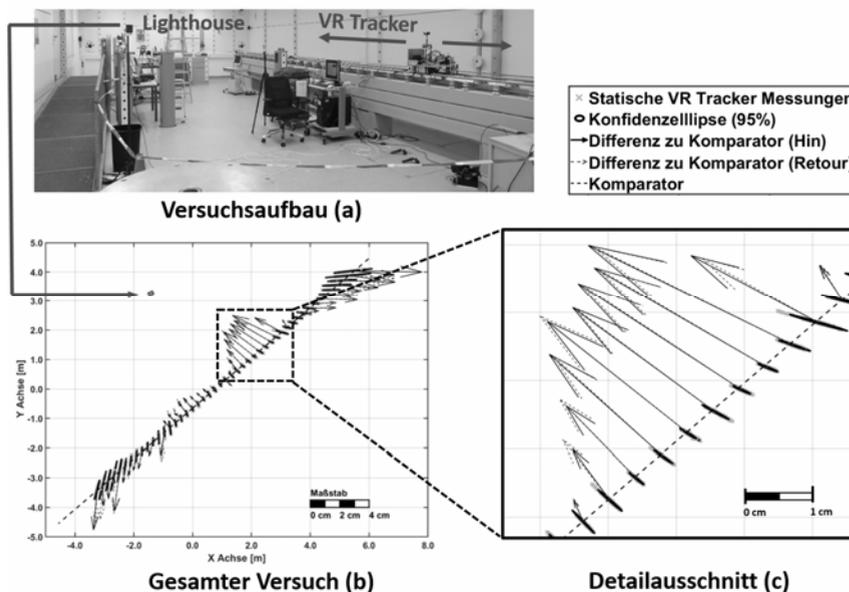


Abb. 5: Untersuchung der Systemgenauigkeit des VR-Trackers am Horizontalkomparator: Positionsabweichungen von Hin- und Rückweg, wobei der VR-Tracker den Sichtbereich der Lighthouses nie verlassen hat.