

Der flexible Einsatz von Augmented Reality Tracking Systemen in unterschiedlichen Umgebungen

Nadia Hintze
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department Informatik
nadia.hintze@haw-hamburg.de

Abstract

Die digitale Lokalisierung realer Objekte in der Umgebung, auch Tracking genannt, ist ein wesentlicher Bestandteil der Augmented Reality. Eine Eigenschaft eines optimalen Tracking Systems ist der flexible Einsatz in variierenden Umgebungen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Aktuell werden Tracking Systeme mit verschiedenen Stärken und Schwächen eingesetzt. Keines von ihnen eignet sich für jeden denkbaren Anwendungsfall gleichermaßen. Die aktuell am häufigsten eingesetzten Systeme werden in dieser Arbeit erläutert. Dabei wird aufgezeigt, dass jedes von ihnen andere Bedingungen an den Einsatzort stellt, um zu funktionieren. In dieser Arbeit werden Herangehensweisen erläutert, die die Funktionalitäten mehrerer Tracking Systeme miteinander vereinen. Als ein Beispiel aus der Forschung werden AR Anwendungen vorgestellt, deren Tracking Systeme dynamisch den Eigenschaften von Smart Objects in IoT-Systemen angepasst werden.

1. Einleitung

Augmented Reality¹ beschäftigt sich mit der Erweiterung der Realitätswahrnehmung um die Darstellung virtueller Inhalte. Azuma [1] zufolge soll dabei ein dreidimensionaler Bezug des Virtuellen zu der Realität hergestellt werden. Die digitalen Objekte sollen den Anschein erwecken, sie befänden sich in derselben Umgebung wie die realen Gegenstände (Abb. 1).

Um das gewährleisten zu können, müssen zu jedem Zeitpunkt die Position und die Ausrichtung des AR Displays relativ zur realen Umgebung gemessen werden. Dieser Vorgang wird auch als *Tracking* bezeichnet. Schmalstieg und Höllerer [9] definieren in ihrer Arbeit Ziele eines optimalen Tracking Systems. Dazu gehört, dass das Tracking System in jeder Umgebung gleichermaßen eingesetzt werden kann.

Dafür muss das Tracking System flexibel auf unterschiedliche Eigenschaften des Einsatzortes reagieren können. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie diese Flexibilität in Tracking Systemen erreicht werden kann. Aktuell werden verschiedene Systeme und Sensoren für das Tracking in AR Anwendungen benutzt. Der erste Teil dieser Arbeit setzt sich damit auseinander, wie diese Systeme aufgebaut sind, in welchen Umgebungen sie jeweils eingesetzt werden können und in welchen sie an ihre Grenzen stoßen. Im zweiten Teil der Arbeit werden Ansätze vorgestellt, die die Grenzen einzelner Herangehensweisen erweitern, um einen flexibleren Einsatz zu ermöglichen.



Abbildung 1. Reales Fossil erweitert um ein virtuelles 3D Modell eines Fisches
Quelle: Hintze [2]

¹Im Folgenden abgekürzt durch AR.

2. Grundlegende Tracking Methoden

Im Folgenden werden die aktuell am häufigsten eingesetzten Tracking Methoden vorgestellt. Dafür wird sich an der Arbeit von Schmalstieg und Höllerer [9] orientiert. Ein besonderer Augenmerk liegt auf den Bedingungen, die die Umgebung erfüllen muss, damit die jeweilige Methode eingesetzt werden kann.

2.1. GPS-/Netzwerkbasierendes Tracking

Die erste Kategorie von Tracking Systemen, die Schmalstieg und Höllerer [9] vorstellen, ermittelt die absolute Position des Users. Als Grundlage dafür dienen GPS-Systeme oder drahtlose Netzwerke wie beispielsweise Wifi, Bluetooth oder Mobilfunk. Diese Art von Tracking Systemen nutzt Informationen aus der Kommunikation mit den Satelliten bzw. den Basis Stationen.

Um die Position des AR Devices ermitteln zu können, wird ein mathematisches Verfahren namens *Trilateration* angewandt. Dafür müssen die Positionen mehrerer Satelliten bzw. Basis Stationen, sowie die Distanzen zwischen ihnen und dem AR Device bekannt sein (Abb. 2a). Die Positionsdaten sind bei Systemstart abrufbar. Die Distanzen lassen sich mithilfe der Time of Flight einzelner Signale oder der Signalstärke innerhalb des Netzwerkes erschließen. Daraus kann für jeden Satelliten bzw. für jede Basis Station berechnet werden, in welchem Umkreis sich das Device befindet. Der Schnittpunkt dieser Umgebungen entspricht der Position des Devices (Abb. 2b).

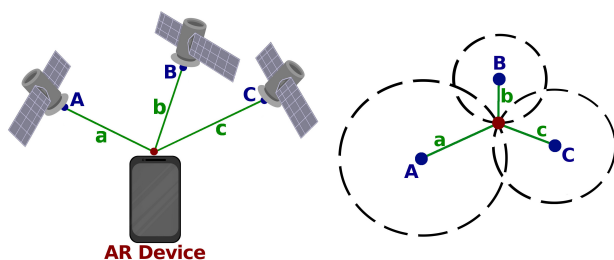


Abbildung 2. Bestimmung der absoluten Position des AR Devices durch Trilateration

Quelle: Nadia Hintze 2019

Um eine Trilateration im 3D Raum durchführen zu können, müssen mindestens vier Satelliten bzw. Basis Stationen erreichbar sein. Das setzt einerseits voraus, dass sich genügend Geräte im Umkreis des AR Devices finden, aber auch, dass nicht zu viele Signale durch andere Objekte abgeschirmt werden. Sofern genug Geräte erreicht werden können, schwankt die Genauigkeit der Lokalisierung

abhängig von der Abschirmung von Signalen gerundet zwischen einem und zehn Metern. (Schmalstieg und Höllerer [9])

Der Einsatz von GPS-/Netzwerkbasierendem Tracking eignet sich folgedessen vor allem bei relativ offenen Plätzen. Die Systeme haben den großen Vorteil, dass die Kommunikationsstrukturen für GPS und die Netzwerke häufig bereits bestehen und dann nur noch entsprechend benutzt werden müssen. Außerdem ist ein erfolgreiches Tracking, abgesehen von den genannten Punkten, nicht von der Gestaltung der Umgebung abhängig. Insbesondere GPS-Signale sind außerhalb von Gebäuden an den meisten Orten zugänglich. Jedoch ist eine Genauigkeit im Bereich mehrerer Meter nicht für jede AR Anwendung ausreichend.

2.2. Inertial Measurement Units (IMUs)

Die zweite Kategorie der laut Schmalstieg und Höllerer [9] am häufigsten eingesetzten Tracking Systeme beruht auf Messungen trägheitsbasierter Sensoren. Dazu gehören Magnetometer, Gyroskope und lineare Beschleunigungsmesser.

Ein Magnetometer erfüllt dieselbe Funktionalität wie eine Kompass. Es misst die Ausrichtung des Systems relativ zum Erdmagnetfeld (Abb. 3a). Durch andere magnetische Felder kann es zu Messfehlern kommen. Diese sollten demnach am Ort den Einsatzes vermieden werden.

Gyroskope erkennen die Geschwindigkeit einer Rotation um eine Achse. Davon lässt sich auf die Neigungsänderung relativ zum vorherigen Zustand schließen. Wenn drei Gyroskope orthogonal zueinander befestigt werden, kann so die Neigung entlang aller drei Achsen im 3D Raum gemessen werden (Abb. 3b). Dadurch, dass die Neigung im Raum nur relativ zur vorherigen angegeben werden kann, lauert hier die Gefahr, dass sich Fehler bei den Messungen akkumulieren.

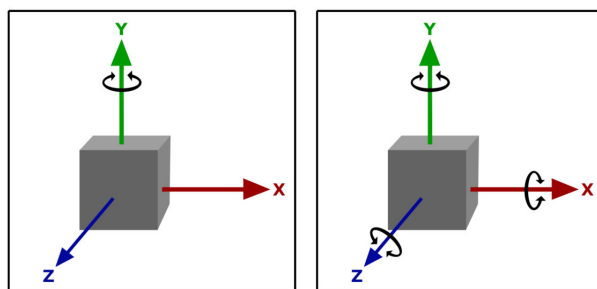


Abbildung 3. a) Magnetometer Messung, b) Messung von drei Gyroskopen

Quelle: Hintze [2]

Lineare Beschleunigungsmesser messen eine Positionsveränderung entlang einer Achse. Genau wie im Fall der Gyroskope können auch hier drei Sensoren orthogonal zueinander platziert werden, um eine Bewegung im gesamten 3D Raum wahrnehmen zu können (Abb. 4a). Da die Beschleunigung gemessen wird, wird auch hier nur eine Aussage über die Positionsveränderung, aber nicht über die absolute Position im Raum getroffen. Sofern sich die Position des Sensors nicht verändert, kann mit einem linearen Beschleunigungsmesser auch die absolute Neigung entlang von bis zu zwei horizontalen Achsen gemessen werden (Abb. 4b).

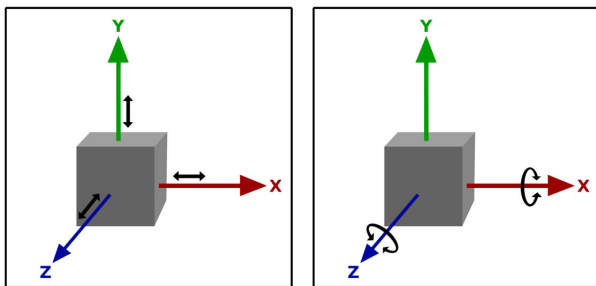


Abbildung 4. a) Positionsmessung von drei Beschleunigungsmessern, b) Rotationsmessung von zwei Beschleunigungsmessern
Quelle: Hintze [2]

In Inertial Measurement Units werden meistens alle drei Sensorikarten verbaut, um unterschiedliche Bewegungsformen beobachten zu können. Die genannten Sensoren funktionieren in fast allen Fällen unabhängig von der Gestaltung des Einsatzortes. Die einzige Ausnahme bilden Magnetfelder in der Umgebung, die eine Auswirkung auf Magnetometer haben. Da die genannten Sensoren keine absolute Position messen können, werden IMUs in Augmented Reality Systemen in der Regel mit anderen Tracking Systemen kombiniert (siehe Kap. 3.1). (Schmalstieg und Höllerer [9])

2.3. Optisches Tracking

Optische Tracking Systeme sind die Schmalstieg und Höllerer [9] zufolge am häufigsten in AR Anwendungen eingesetzte Tracking Methode. Sie analysieren Kamerabilder, um an räumliche Informationen zu gelangen. Es gibt zwei zentrale Eigenschaften dieser Systeme.

Die erste Eigenschaft beschäftigt sich damit, ob der Tracking Algorithmus ausschließlich künstliche Objekte erkennt, die der realen Umgebung extra hinzugefügt wurden. Solche Objekte werden auch *Marker* genannt. Diese Methode hat den Vorteil, dass das Tracking robuster läuft, da die Marker gezielt so gestaltet werden können, dass sie für den Algorithmus leicht auf dem Kamerabild

erkennbar sind. Das kann erreicht werden, indem der Marker möglichst hohe farbliche Kontraste und einfache Formen beinhaltet (siehe Abb. 5). Jedoch kann das System dann nur in Umgebungen angewendet werden, die zuvor mit den Markern ausgestattet wurden. Das widerspricht dem Ziel eines flexibel in allen Umgebungen operierenden Tracking Systems. Optische Tracking Systeme, die in einem komplett natürlichen Umfeld funktionieren, heißen *natural feature based*. Bei natural feature based Systemen kann es zu Problemen mit dem Tracking kommen, wenn Objekte in der Umgebung aus einem durchscheinenden Material bestehen oder sich wiederholende Muster beinhalten. Somit gibt es bestimmte Bedingungen, die an die realen Objekte gestellt werden, damit sie erkannt werden können.



Abbildung 5. Beispiele möglicher Marker Designs
Quelle: Ruan und Jeona [8]

Um ein reales Objekt auf einem Kamerabild wiederzuerkennen, muss es eine Form von digitaler Referenz geben. Die zweite Eigenschaft bezieht sich darauf, ob diese bereits zu Systemstart vorliegt oder erst zur Laufzeit entsteht. Im ersten Fall handelt es sich um ein *modell-basiertes* Tracking System. Das Referenzmodell kann ein digitales 3D-Modell, das z.B. durch 3D Scan entstanden sein kann, oder ein einfaches zweidimensionales Bild sein. Wenn das Referenzmodell zur Laufzeit aufgebaut wird, spricht man von einem *modell-freien* Tracking System. Bei dieser Methode kann theoretisch die gesamte reale Umgebung augmentiert werden, während sich ein modell-basiertes System immer auf die realen Objekte berufen muss, zu denen die Referenz-Daten vorliegen.

Im Gegensatz zu den anderen beiden Kategorien von Tracking Systemen, sind optische stark von der visuellen Gestaltung der Umgebung abhängig. Sie setzen beispielsweise eine ausreichende Beleuchtung und hohe Kontraste voraus, während bestimmte Musterungen oder durchscheinende Materialien zu Problemen bei der Erkennung von Objekten führen können. Somit sind sie nicht für die Erkennung aller Objekte und Umgebungen gleichermaßen geeignet.

Optische Tracking Systeme weisen eine hohe Genauig-

keit auf. Das Forschungsfeld der Computer Vision ist relativ groß und entwickelt Bilderkennungs-Algorithmen weiter. Außerdem kann man Moore's Law zufolge mit einem stetigen Wachstum der Rechenleistung, die Chipsätzen erbringen können, rechnen.² Daher sagen Schmalstieg und Höllerer [9] eine dauerhafte Verbesserung der optischen Tracking Systeme voraus, was für den Einsatz solcher Systeme spricht.

2.4. Fazit: Grundlegende Tracking Methoden

Jede vorgestellte Kategorie von Tracking Systemen hat eigene Schwächen und Einschränkungen. Beispielsweise kann es AR Anwendungen geben, denen ein eher ungenaues Tracking genügt. In diesem Fall kann sich ein Tracking über GPS-/Netzwerk-Signale anbieten, da der mögliche Einsatzbereich relativ groß ist. Wenn das Tracking genauer sein muss, bietet sich eher eine optische Herangehensweise an. Jedoch ist diese Methode davon abhängig, dass die reale Umgebung des AR Devices visuell so gestaltet ist, dass optische Tracking Algorithmen mit Kameraaufnahmen davon arbeiten können. Demnach sind die Methoden, die aktuell eingesetzt werden, nicht für jede Umgebung gleich gut geeignet.

3. Kombination unterschiedlicher Methoden

Im folgenden Kapitel wird erläutert, wie Tracking Systeme robuster auf variierende Umgebungen reagieren können. Dafür werden zwei Möglichkeiten einer Kombination der vorgestellten Techniken vorgestellt. Die erste Möglichkeit ist, ein Tracking System direkt im AR Device so anzulegen, dass gleichzeitig mehrere Techniken zum Einsatz kommen, um sich dann zu ergänzen. Die zweite besteht, wenn ein reales Objekt, das augmentiert werden soll, ein Smart Object ist. Dann kann es selbst Aussagen über Eigenschaften treffen, die bestimmen, wie das Objekt am leichtesten getrackt werden kann. Das ist insbesondere interessant für die Verwendung optischer Tracking Algorithmen.

3.1. Sensor Fusion

Sensor Fusion ist die Vereinigung mehrerer Sensoren und damit verbundener Algorithmen. Bei jedem Tracking Vorgang kommen dabei alle verbauten Techniken zum Einsatz. Es gibt mehrere Ziele, die eine solche Kombinationen verfolgen kann.

²„Moore's Law beschreibt das stetige Wachstum der Komplexität integrierter Schaltkreise im Verhältnis zu den Kosten der Komponenten.“ (Hintze [2], S.10) (Moore [6])

Das erste Ziel ist eine *komplementäre Sensor Fusion*. Dabei werden gleichzeitig Techniken benutzt, die sich funktional ergänzen. Somit benötigen sie keinen Austausch von Informationen untereinander, um Messungen vornehmen zu können. Ein Beispiel für eine solche Fusion ist die Benutzung einer Inertial Measurement Unit mit einem GPS-/Netzwerk-basierten System. Die IMU kann die Neigung des AR Devices und eine Veränderung der Position ermitteln, während das GPS-/Netzwerk-basierte System die absolute Position messen kann.

Die zweite Möglichkeit einer Fusion ist eine *kompetitive Sensor Fusion*. Hierbei erfüllen die benutzten Techniken die gleiche Funktionalität. Ihre Ergebnisse werden miteinander verglichen, um die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers zu verringern. Außerdem wird eine Ausfallwahrscheinlichkeit damit abgemildert. Auch wenn sie den Einsatz an verschiedenen Orten nicht flexibler machen, haben sie demnach andere Vorteile für ein Tracking System. Ein Beispiel für eine kompetitive Sensor Fusion ist ein redundant eingesetztes System. Ein weiteres Beispiel ist die gleichzeitige Rotationsmessung von Beschleunigungsmessern und Gyroskopen in einer Inertial Measurement Unit.

Die letzte Art der Fusion ist die *kooperative Sensor Fusion*. In diesem Fall ist ein erfolgreiches Tracking nur möglich, wenn alle fusionierten Komponenten ein Ergebnis liefern. Ein Beispiele dafür ist ein Kamera Rig, bei dem sich die Sichtfelder der Kameras für das optische Tracking ergänzen. In Abb. 6 werden beispielsweise zwei Kameras gezeigt, deren Sichtfelder jeweils durch eine Wand in der Mitte beschränkt sind. Daher wäre es Kamera K_1 alleine nicht möglich Objekt O_2 wahrzunehmen. Neben der reinen Erweiterung des Sichtbereiches können Kamera Rigs auch dazu dienen, an Tiefeninformationen zu den Objekten auf den jeweiligen zweidimensionalen Bildern zu gelangen. (Schmalstieg und Höllerer [9])

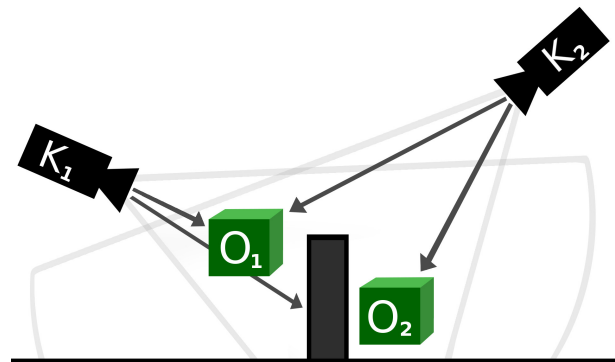


Abbildung 6. Kooperative Sensor Fusion
Quelle: Schmalstieg und Höllerer [9] nachempfunden

3.2. Verbindung mit Smart Objects im Internet of Things³

Wie bereits erwähnt wurde, ist auch denkbar, ein Tracking System dynamisch an die Bedingungen der realen Umgebung anzupassen. Dafür können in Smart Objects hinterlegte Informationen über das Objekt mit einbezogen werden. Dazu wurde bislang eine geringe Zahl an Arbeiten verfasst. Im Folgenden werden einige dieser Forschungsarbeiten vorgestellt.

Zuerst wird das von Rambach et al. [7] entwickelte Tracking System betrachtet. Die Autoren schreiben den Entwicklern der Smart Objects einen Vorbereitungsprozess für das Tracking zu. An dem Ende dieses Prozesses sollen auf dem Smart Object Daten für das Tracking und Informationen über die zu augmentierenden Inhalte hinterlegt werden (Abb. 7).

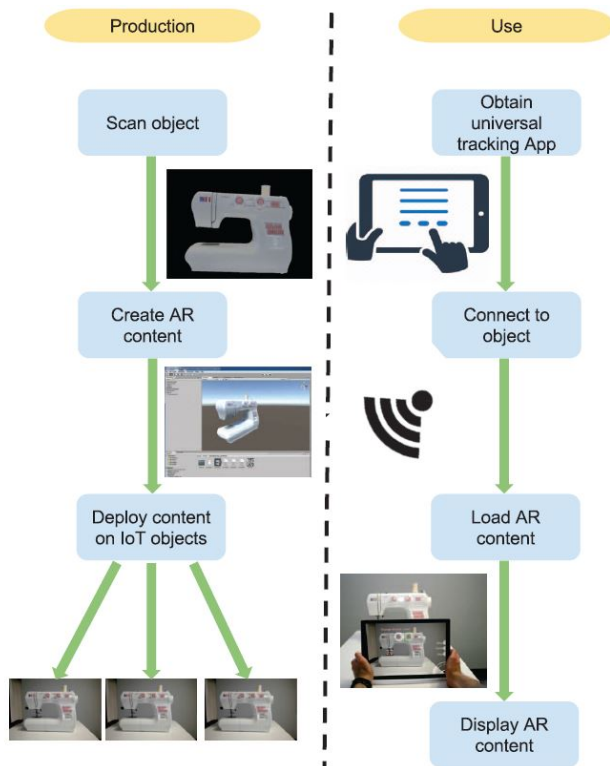


Abbildung 7. Architektur des Systems
Quelle Rambach et al. [7]

Für die Berechnung der Tracking-Hilfs-Daten wird zunächst von den Entwicklern für jedes Smart Object ein 3D Modell davon erstellt. Anschließend werden Renderings aus verschiedenen Sichten angefertigt. Daraus werden

³Im Folgenden abgekürzt durch *IoT*.

Datenstrukturen mit den Bildpunkten entwickelt, die von einem KLT Feature Detector gefunden werden. Zusätzlich werden ORB Deskriptoren extrahiert. Beide Arten von Datenstrukturen werden zusammen mit Informationen zu den zu augmentierenden Inhalten im jeweiligen Smart Object hinterlegt.

Bei einer Wifi- oder Bluetooth-Verbindung des AR Devices mit dem Smart Object können diese Daten an das Device übermittelt werden. Anschließend werden die Daten für das Tracking zurate gezogen. In der Anwendung findet bei jedem neuen Frame ein Vergleich zwischen den hinterlegten Feature Deskriptoren und den Deskriptoren, die im aktuellen Frame gefunden werden, statt. Darüber kann das Smart Object auf dem Bild wiedergefunden werden. Anschließend werden die auf dem Smart Object hinterlegten Augmentierungen auf dem AR Device dargestellt. Rambach et al. kommen sowohl bei der Genauigkeit des Trackings, als auch bei Messungen der Performanz zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

Jo und Kim haben mehrere Arbeiten zu dem Thema „Verbindung von Augmented Reality und Smart Objects im Internet of Things“ veröffentlicht [3][4][5]. Wie in der Arbeit von Rambach et al. werden auch hier auf den Smart Objects jeweils Hilfs-Informationen für das Tracking des jeweiligen Objektes und die zu augmentierenden Inhalte gespeichert. Jedoch ist das Tracking System nicht nur auf ein rein optisches Verfahren gestützt, wie das bei Rambach et al. der Fall war. Jo und Kim haben jedem Smart Object einen Beacon hinzugefügt. Mit Beacons kann der Standpunkt eines Devices ermittelt werden. Das passiert, wie im Fall des GPS-/Netzwerk-basierten Trackings, per Trilateration. Die Beacons agieren wie die Satelliten/Basis Stationen. Zusätzlich werden auch in den Systemen von Jo und Kim auf den Smart Objects Feature Deskriptoren hinterlegt. Außerdem heben die Autoren hervor, dass insbesondere für die optischen Tracking Verfahren zusätzliche Informationen hinterlegt werden können, wie z.B. der zu dem Objekt passendste Erkennungs-Algorithmus.

Für Jo und Kim sprechen einige Argumente für eine Verbindung von Augmented Reality und Smart Objects im Internet of Things. Zunächst lassen sich die Tracking Algorithmen besonders robust gestalten, indem sie dynamisch den Objekten und Umgebungen angepasst werden. Zudem sind die Systeme insbesondere bei optischen Tracking Methoden deutlich skalierbarer. Wie in Kap. 2.3) bereits erklärt wurde, muss für optisches Tracking immer ein digitales Referenzmodell bei Systemstart vorhanden oder zur Laufzeit erstellt werden. Das bedeutet, dass bei einem Einsatz in Umgebungen in denen viel erkannt werden muss immer größere und mehr Referenzen erstellt werden müssen. Das braucht zunehmend mehr Speicherplatz und senkt die Performanz, da das Kamerabild mit immer mehr verglichen werden muss.

In den vorgestellten Arbeiten wird dagegen eingeschränkt, welches Objekt getrackt werden muss. Außerdem wird weniger zentraler Speicherplatz benötigt, da viele Daten für das Tracking und die Augmentierung verteilt auf den Objekten gespeichert werden. Im Vergleich zu einer zentralen Speicherung dieser Daten kommt es außerdem zu den Vorteilen eines verteilten Systems wie z.B. Ausfallsicherheit oder ein nicht vorhandener Bottleneck. Zuletzt sind Jo und Kim im Rahmen ihrer Forschungsarbeiten zu dem Schluss gekommen, dass sich Augmented Reality besonders gut als Interaktionsform mit IoT Objekten eignet [3].

4. Fazit

Wie flexibel sind aktuelle Tracking Methoden, wenn es um den Einsatz in unterschiedlichen Umgebungen geht? Diese Frage wurde in zwei Teilen beantwortet.

Der erste Teil dieser Arbeit beantwortet diese Frage für die grundlegenden Tracking Methoden, die aktuell häufig zum Einsatz kommen. GPS-/Netzwerkbasierendes Tracking stößt an seine Grenzen, wenn nicht genügend Satelliten/Basis Stationen erreichbar sind. Das kann unter anderem durch eine Abschirmung der Signale durch Objekte passieren. Ansonsten ist diese Methode flexibel einsetzbar. Inertial Measurement Units funktionieren weitestgehend unabhängig von den Eigenschaften der Umwelt. Nur Magnetfelder können Fehler in den Messungen verursachen. Optische Tracking Algorithmen sind stark von der visuellen Gestaltung des Umfeldes abhängig. Es müssen genügend Kontraste und klare Formen im Kamerabild zustande kommen, damit getrackt werden kann. Das setzt z.B. eine ausreichende Beleuchtung voraus. Zudem gibt es einige optische Eigenschaften von Objekten, die diese schwieriger erkennbar machen.

Der zweite Teil setzte sich mit Möglichkeiten auseinander, die zuvor vorgestellten Methoden so miteinander zu verbinden, dass sie flexibler auf unterschiedliche Umgebungen reagieren können. Die erste Möglichkeit nennt sich Sensor Fusion und bildet ein Tracking System, in dem immer mehrere Tracking Methoden zum Einsatz kommen. Die verschiedenen Tracking Methoden können sich dabei auf verschiedene Weise ergänzen. Die zweite Möglichkeit besteht darin, in Smart Objects Informationen zu speichern, an die das Tracking System dann dynamisch zur Laufzeit angepasst wird. Dazu gibt es zwar relativ wenige Forschungsarbeiten, jedoch waren alle, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, erfolgreich. Zudem hat die Verbindung von Augmented Reality und Smart Objects in IoT Umgebungen neben einem robusteren und flexibleren Tracking noch einige weitere Vorteile.

Insgesamt lässt sich sagen, dass ein flexibles Tracking aktuell noch einige Hürden mit sich bringt. Die Techniken, die bisher zum Einsatz kommen, sind in ihren Möglichkeiten

beschränkt. Jedoch gibt es genügend Beispiele für mögliche Kombinationen von Methoden, die die Tracking Systeme flexibler machen. Das wenig erforschte Feld der Verbindung von Augmented Reality und Smart Objects in IoT Umgebungen ist ein Beispiel für einen vielversprechender Lösungsansatz, der auch Abseits des Trackings noch viele weitere Vorteile mit sich bringt.

Literatur

- [1] R. T. Azuma. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, 6(4):355–385, Aug. 1997.
- [2] N. Hintze. Entwicklung und Einsatzmöglichkeiten einer Anwendung im Rahmen von Museumsausstellungen, 2018.
- [3] D. Jo and G. J. Kim. Local context based recognition + internet of things: Complementary infrastructures for future generic mixed reality space. In *Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '15*, pages 196–196, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [4] D. Jo and G. J. Kim. Ariot: scalable augmented reality framework for interacting with internet of things appliances everywhere. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 62(3):334–340, August 2016.
- [5] D. Jo and G. J. Kim. Iot + ar: pervasive and augmented environments for “digi-log” shopping experience. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 9(1):1, Jan 2019.
- [6] G. E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits, reprinted from electronics, volume 38, number 8, april 19, 1965, pp.114 ff. *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, 11(3):33–35, Sep. 2006.
- [7] J. Rambach, A. Pagani, and D. Stricker. [poster] augmented things: Enhancing ar applications leveraging the internet of things and universal 3d object tracking. In *2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct)*, pages 103–108, Oct 2017.
- [8] K. Ruan and H. Jeong. An augmented reality system using qr code as marker in android smartphone. pages 1–3, 05 2012.
- [9] T. Schmalstieg, Dieter; Höllerer. *Augmented Reality - Principles and Practice*. Taub, Mark L., 2016.