

Vergleich von Head-Tracking Systemen für virtuelle Akustik Applikationen

Wolfgang Heß

Harman/Becker Automotive Systems, 76307 Karlsbad, E-Mail: wolfgang.hess@harman.com

Einleitung

Bei der auditiven Wiedergabe von virtuellen Räumen über Kopfhörer können sowohl plausible Außenkopf-Lokalisation, korrekte vorne-hinten Lokalisation mit nicht-eigenen Außenohrübertragungsfunktionen, als auch Raumkonstanz erreicht werden. Das Hören wird also interaktiv, siehe [1] und [3]. Entscheidende Kriterien für die plausible auditive Wahrnehmung eines virtuellen Raumes sind unter anderem Aktualisierungsrate und Genauigkeit der Kopfbewegungserfassung, die die Adaption des virtuellen Schallfelds an die Kopfbewegung steuert. Häufig sind hier Phänomene vorzufinden, die einer plausiblen Wahrnehmung abträglich sind:

- Ein Nachziehen des virtuellen Raumes
- Springen des virtuellen Raums durch falsche Tracker Daten
- Eine dynamische Verschiebung des virtuellen Raumes entgegengesetzt der Bewegungsrichtung des Nutzers

Lokalisierung von Schallereignissen üben Menschen täglich. Bei jedem Hören trainieren Menschen bewußt oder unbewußt, woher Schall kommt und welchem Objekt er zuzuordnen ist. Korrekte Erfassung der Kopfbewegung zur plausiblen Wiedergabe von virtuellen Schallquellen ist also ein entscheidendes Qualitätsmerkmal in der virtuellen Akustik.

Beschreibung der Head-Tracking Systeme

Die Erfassung der Kopfbewegung findet in maximal sechs Freiheitsgraden (degrees of freedom, DOF) statt. Dabei haben sich die Bezeichnungen Yaw (Gierwinkel, Azimut), Pitch (Nickwinkel, Elevation) und Roll (Rollwinkel) für die rotatorischen Freiheitsgrade etabliert, mit der Vorrichtung als 0°-Referenz, siehe [3]. Abhängig vom Bezugssystem (für Landfahrzeuge wird oft das ENU-System (East-North-Up) benutzt, für Luft- und Seefahrzeuge NED (North-East-Down)) werden die translatorischen Freiheitsgrade als x-, y- und z-Achse bezeichnet. Fünf Systeme zur Erfassung der Kopfbewegung werden miteinander verglichen. Die beiden letztgenannten Systeme sind komplette Eigenentwicklungen:

- Ultraschall Head-Tracker (Logitech)
- Magnetfeld Head-Tracker Patriot (Polhemus)
- Face-Tracking mit Webcam (Face-Tracker)
- Camera-Gyro-Accelerometer Head-Tracker (Hybrid-Tracker)
- Optisches Head-Tracking System (PSD-Tracker)

Der PSD-Tracker besteht aus einer Sendeeinheit, die abhängig von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger über eine oder mehrere LEDs gepulstes Infrarotlicht sendet. Der Lichtstrahl wird mittels einer Linse in der auf dem Kopfhörer montierten Empfangseinheit gebündelt. Dabei bestimmt der Schwerpunkt des einfallenden Lichtes auf dem 2-dimensionalen lichtempfindlichen Feld der Photodiode, die auch als PSD (position sensitive device) bezeichnet wird, die Spannungspiegel an den vier Anoden des Bauteils. Durch

geschickte Anordnung des PSDs, bei der die volle Sensorfläche in horizontaler und vertikaler Richtung ausgeschöpft wird, ergibt sich ein kegelförmiger Erfassungsbereich von absolut 80°. Sowohl Azimut- als auch Elevations-Kopfdrehwinkel werden berechnet, d.h. 2 DOF mit jeweils +/-40° zur Vorrichtung stehen zur Verfügung.

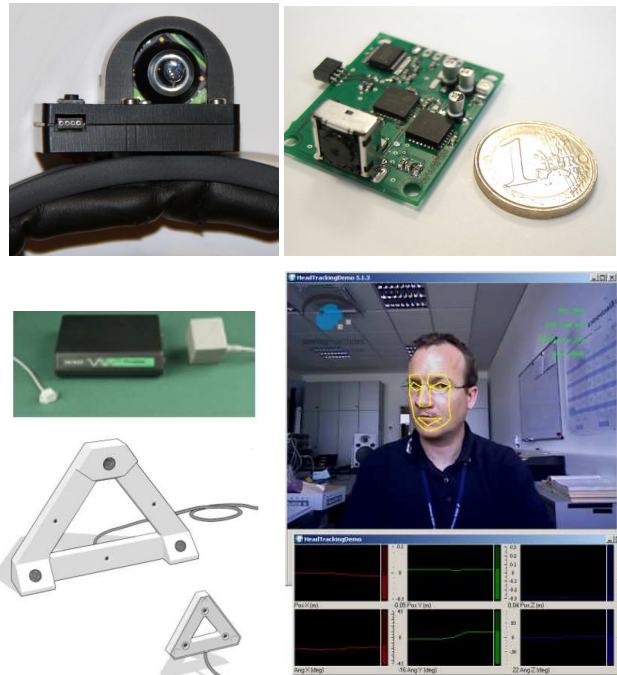


Abb. 1: Head-Tracking Systeme: Oben links PSD-Tracker, rechts Hybrid-Tracker, in der Mitte Polhemus, unten links Logitech, unten rechts Face-Tracker mit Webcam-Bild.

Der Hybrid-Tracker benutzt die identische Sendeeinheit wie der PSD-Tracker. Die Empfangseinheit beinhaltet drei Sensoren: Eine Infrarot-Minikamera in Vorne-Richtung, ein 1-D Gyroskop und einen 3-D Beschleunigungssensor. Die in Richtung der Sendeeinheit ausgerichtete Kamera mit XGA-Auflösung erfaßt Infrarot-Lichtpunkte in einem Bereich von etwa +/-20° horizontal und +/-15° vertikal. Wird der Kamera-Erfassungsbereich durch die Kopfdrehung verlassen, so werden mittels adaptiver Gewichtung beide Inertialsensoren voll wirksam. Eine Neigung des Gyros, die zu einer Verfälschung der Drehdaten führen würde, wird durch die Erfassung der Gewichtskraft mittels des Beschleunigungssensors kompensiert. Die beiden Achsen des Sensors in horizontale Richtung werden für die Schätzung der zwei fehlenden Drehachsen des Gyros benutzt. Die Abbildung der Kopfdrehung wird über ein intertiales Navigationsmodell berechnet. Systemzustand und Varianz werden mittels Kalmanfilter geschätzt und ständig aktualisiert. Das System erlaubt die vollständige Schätzung aller rotatorischer Freiheitsgrade, d.h. 3 DOF in jeweils 360° werden erfaßt.

Der Polhemus besteht aus einem Magnetfeldsensor und einem Magnetfeldquelle, wobei der Sensor auf dem

Kopfhörer montiert wird. Eine 6 DOF Erfassung ist bei einem Abstand zwischen Sender und Empfänger von bis zu 1.5 m möglich. Es ist keine Sichtverbindung notwendig.

Der Logitech-Tracker erfasst über die Laufzeitmessung von Ultraschallsignalen 6 DOF. Drei in einem gleichseitigen Dreieck angeordnet Mikrofone, auf dem Kopfhörer montiert, und ein Sendedreieck aus drei Ultraschall-Lautsprechern, ermöglichen die Erfassung von etwa $\pm 70^\circ$ Auslenkung von Azimut und Elevation. Die Funktionsweise ist bis zu einem Abstand von etwa 1.5 m gewährleistet.

Beim Face-Tracking wird nach Erfassung über eine Standard-Webcam die Orientierung des Gesichts zur Kamera berechnet. Ist das Gesicht als solches erkannt, so rastet der Algorithmus darauf ein und schätzt alle 6 DOF, wobei Azimut und Elevation bis etwa $\pm 50^\circ$ erfasst werden können. Die Qualität der Erfassung des Gesichts ist abhängig vom Umgebungslicht. Dieses Verfahren ist das einzige passive, d.h. keine Sendeeinheit wird als Referenz benötigt. Die durch die Berechnung erzeugte CPU-Last ist jedoch sehr hoch, abhängig von CPU und Bildwiederholrate über 2 GHz.

Messaufbau und Messung

Die Erfassung des Azimuts der Kopfdrehung in der Horizontalebene im Bereich $\pm 40^\circ$ wurde durch folgenden Meßaufbau überprüft: Eine Meßpuppe mit einem hochgenauen Hohlwellenrundtisch-Schrittmotor im Hals (Auflösung 0.004°), der den darauf montierten Kunstkopf dreht, wird in der Mitte des Meßaufbaus platziert. Die Head-Tracker werden auf einem Kopfhörer montiert, der auf den Kunstkopf aufgesetzt wird. Dort ist ebenfalls ein Laserpointer angebracht. Zur optischen Erfassung der Kopfdrehwinkel wurden in einem Ring optische Sensoren (senkrecht angebrachte Linien-PSDs) im Bereich von $\pm 40^\circ$ relativ zur Vorrichtung der Puppe in 5° -Abständen in der Horizontalachse angebracht und verschaltet. Die Sensoren befinden sich in einer Entfernung von etwa 40 cm zur Puppe, und werden beim Erreichen des jeweiligen Kopfdrehwinkels durch einen Laserpointer getriggert. Fällt das Laserlicht auf einen Sensor, so wird ein Sinuston über eine analoge Schaltung freigegeben, der am Analogeingang der PC-Soundkarte anliegt. Der Vergleich der von den verschiedenen Head-Trackern erfaßten Kopfdrehdaten mit den durch die optischen Sensoren gemessenen Winkeln wird durch ein VST-Plugin realisiert. Dort stehen sowohl die Head-Tracking

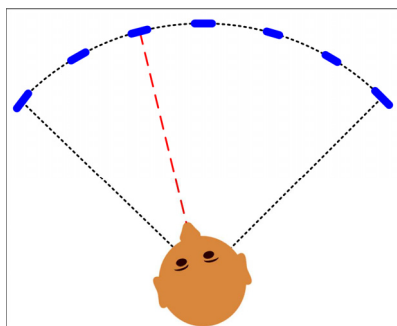


Abb. 2: Versuchsaufbau der Messung: Der auf einer Meßpuppe angebrachte Kunstkopf wird mittels Schrittmotor gedreht, ein Laserpointer triggert die in 5° Drehwinkeln in einem Ring angebrachten optischen Sensoren. Eine Kalibrierung wird durch Triggerung der optischen Sensoren bei 0° , 90° und 270° durchgeführt.

Daten via EIA232, USB oder UDP, als auch die Meßdaten über den Soundkarteneingang zur Verfügung. Durch einen Zeitstempel wird die Zeitdifferenz zwischen der Ausrichtung des Kopfes und der Winkelaktualisierung durch den gemessenen Head-Tracker ermittelt. Für den Face-Tracker wurde die Fotografie eines Gesichts in Gesichtspartien unterteilt ausgeschnitten und auf den Kunstkopf geklebt.

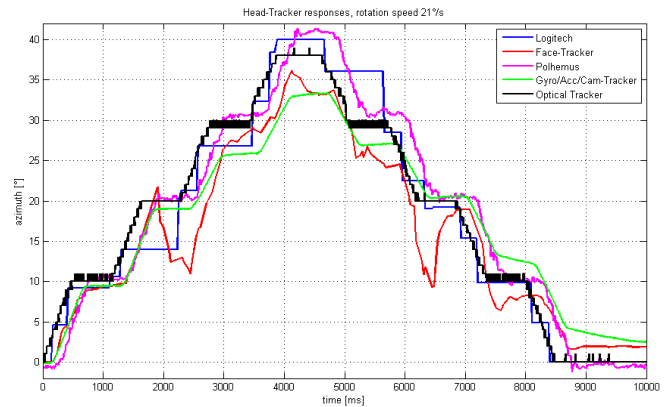


Abb. 3: Messung der Head-Tracking Systeme.

Diskussion und Zusammenfassung

Es wurden fünf Head-Tracking Systeme mit unterschiedlichen physikalischen Verfahren zur Erfassung des Kopfdrehwinkels untersucht. Die Messungen zeigen deutliche Unterschiede in Erfassungsgenauigkeit, Aktualisierungsrate und Latenz, wobei die Umgebungsbedingungen wie Reflektionen von Wand oder Glasscheiben (wie z.B. beim Logitech), Licht und Kontrast (Face-Tracker), elektromagnetische Störungen (Polhemus) einen deutlichen Einfluß haben. Der Magnetfeld-Tracker funktioniert auch durch ein Objekt hindurch, ist jedoch als Serienprodukt, ebenfalls wie der Ultraschall-Tracker, verhältnismäßig teuer. Magnetfeld-Einstreuungen beispielsweise von Lautsprechern führen zu Fehlern. Der Hybrid-Tracker funktioniert im vorderen Bereich, wo eine gute Ortung erforderlich ist, relativ genau. Durch die Aufteilung des Erfassungsbereichs in optische Erfassung und inertielle Erfassung sind deutliche Genauigkeitsunterschiede und Latenzen durch Kalmanfilterung und Glättung zu erkennen. Der Face-Tracker funktioniert bei guter Beleuchtung gut, bei schlechter Beleuchtung treten Effekte wie Springen der Erfassungswinkel auf, siehe Abb. 3. Weitere Untersuchungen müßten daher bei genau definierten Umgebungsbedingungen durchgeführt werden. Der PSD-Tracker zeichnet sich durch hohe Genauigkeit, geringe Latenz und geringe Bauteilekosten aus, ist allerdings vom Erfassungsbereich auf $\pm 40^\circ$ in Kegelform zur Vorrichtung beschränkt. Jedes Head-Tracking System ist also für den zgedachten Zweck und die Umgebung, in der es eingesetzt werden soll, zu ermitteln. Für virtuelle Akustik Applikationen in Fahrzeugen wäre der PSD-Tracker die geeignete Wahl.

Referenzen

- [1] Pellegrini, R. S. (2001): *A virtual reference listening room*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum
- [2] Hess, W. (2004): *Influence of head-tracking on spatial perception*, Proc. AES 117th Convention, San Francisco
- [3] Blauert, Jens (1983): *Spatial hearing - the psychophysics of human sound localization*, MIT Press, Cambridge, MA