

Echtzeit-Implementierung des Spiegelschallquellenverfahrens

Dirk Schröder, Tobias Lentz

Institut für Technische Akustik, 52056 Aachen, Deutschland, Email: dsc@akustik.rwth-aachen.de

Einleitung

Das Ziel interaktiver virtueller Umgebungen ist es eine immersive, multimodale Nachbildung realer Prozesse darzustellen, was visuelle, auditive und haptische Aspekte einschliesst. Im Gegensatz zur Qualität der visuellen Komponente, die durch hochentwickelte Hardwarebeschleunigung ermöglicht wird, fehlt es der raumakustischen Simulation immer noch an einer realistischen Darstellung, welche aber das Immersionsgefühl in die virtuelle Welt bedeutsam vertiefen würde. Zur präzisen Bestimmung der für die auditive Richtungswahrnehmung wichtigen frühen Klangreflexionen eignet sich sehr gut das bekannte Spiegelschallquellen(SSQ-) Verfahren[1], das allerdings äusserst rechenintensiv und daher für Echtzeitanwendungen nur sehr beschränkt einsetzbar ist.

Diese Arbeit stellt eine Implementierung des SSQ-Verfahrens vor, die durch den Einsatz sogenannter binary space partitioning (BSP-) Bäume[2] für die schnelle Ermittlung hörbarer SSQ die Anforderung der Echtzeit erfüllt.

Virtuelle Welten

Zur Darstellung der Raumgeometrie und der entsprechenden Materialeigenschaften ist für die Raumakustiksimulation ein geeignetes Modell gefordert. Die echtzeitfähige Emulation der auftretenden Schallwege von Quellen zu Empfänger benötigt eine sehr schnelle Berechnung von Schnittpunkten zwischen Strahlen und Objekten der Szene. Daher ist es sinnvoll, die virtuelle Umgebung mit Hilfe von konvexen Polygonen zu konstruieren, da dieser Polygontyp im Gegensatz zu konkaven Polygonen einfach zu handhaben und somit eine Implementierung schneller Algorithmen erlaubt. Dies bedeutet keine Einschränkung bei der Szenenerstellung, da jedes konkave Polygon aus einer endlichen Menge konvexer Polygone gebildet werden kann.

SSQ-Verfahren

Das polygon-basierte SSQ-Verfahren generiert normalerweise eine Vielzahl redundanter SSQ, da durch das Spiegeln an koplanaren Polygonen identische SSQ entstehen, von denen aber nur genau eine für eine bestimmte Empfängerposition hörbar sein kann. Dies führt zu einem ebenen-basierten Ansatz, mit dem die Anzahl generierter SSQ verringert werden kann.

In einem Vorverarbeitungsschritt werden alle koplanaren Polygone einer Szene sortiert und in eine sogenannte Ebene/Polygon-Karte abgelegt (siehe Abb. 1).

Die SSQ werden nun durch Spiegeln an denen in der Kar-

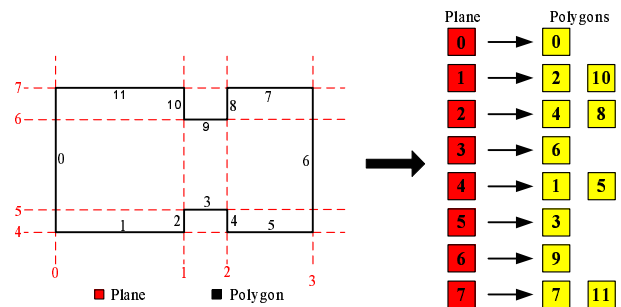


Abbildung 1: Beispiel der Erstellung einer Ebene/Polygon-Karte.

te abgelegten Ebenen bis zu einer vordefinierten Ordnung erzeugt, wobei den SSQ die entsprechenden Ebenenindizes, an denen sie gespiegelt wurden, zugewiesen werden. Dadurch geht allerdings für jede SSQ die wichtige Information über die generierenden Polygone verloren, weshalb diese während des Hörbarkeitstests wiedererlangt werden müssen, z.B. wegen verschiedenen Wandmaterialien. Daher werden die während des Hörbarkeitstests nun auftretenden Ebenenschnittpunkte daraufhin getestet, ob sie innerhalb eines der unter dem entsprechenden Karteneintrag abgelegten koplanaren Polygonen liegen. Wurde ein Polygon getroffen, wird der zugehörige Index der SSQ zugewiesen, ansonsten wird die Quelle als nicht hörbar verworfen.

BSP-Bäume

Anstatt die Position eines beliebigen Punktes anhand aller Raumebenen zu bestimmen, erlaubt die BSP-basierte Suche eine effizientere Positionsklassifizierung, da durch die binäre Baumstruktur nur ein Teil der Raumebenen getestet werden muss, welche durch den Pfad im Baum definiert sind.

Das Prinzip der BSP ist es einen (N)-dimensionalen Raum mit Hilfe von (N-1)-dimensionalen Partitionierungsebenen in (N)-dimensionale Teilräume zu unterteilen. Die Höhe des entstehenden Baumes ist daher abhängig von der Wahl der Partitionierungsebenen. Eine einfache und effiziente Möglichkeit zur Wahl geeigneter Partitionierer ist es die Ebenen zu verwenden, die von den Polygonen aufgespannt werden, da dies schon recht kompakte Baumstrukturen erzeugt. Jeder Baumknoten enthält eine Partitionierungsebene, die den momentanen (Teil)Raum in zwei kleinere Teilräume zerschneidet. Ein Blatt hingegen verweist auf einen Teilraum, der nicht weiter sinnvoll zerlegbar ist, d.h. es handelt sich um eine konvexe Mengen von Polygonen (siehe Abb. 2).

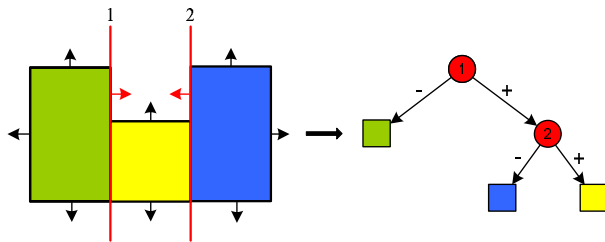


Abbildung 2: Beispiel der Erstellung eines BSP-Baumes für eine typische Raumgeometrie.

Ein Punkt kann drei verschiedene Positionen haben: a) auf, b) vor oder c) hinter der Partitionierungsebene. Im ersten Fall ist die Position direkt bestimmt, in den beiden letzteren Fällen wird der Punkt im Baum in die entsprechenden Teilräume verschoben, bis ein Blatt erreicht wurde, da dort ebenfalls die Position eindeutig bestimmt ist. Durch den BSP-basierten Ansatz kann so die Anzahl der erforderlichen Tests zur Positionsbestimmung minimiert werden, wobei im Falle eines balancierten Baumes sich der Suchaufwand von $\mathcal{O}(N)$ auf $\mathcal{O}(\log N)$ reduziert (N = Anzahl der Polygone).

Strahl-Polygon Schnittpunkttest

Für die Schnittpunktbestimmung eines Strahls mit den Szenenelementen, also Polygonen, ist die BSP-basierte Suche eine sehr schnelle und effiziente Strategie. Ähnlich der Positionsbestimmung eines Punktes relativ zur Szene durch Traversierung des Baumes, können auch die Strahl-Polygon-Schnittpunkte durch rekursive Abfrage des Baumes und gezielte Schnittpunkttests ermittelt werden.

Ob ein Strahl eine Partitionierungsebene schneidet oder nicht, kann über eine einfache Positionsbestimmung des Start- und Endpunkt des Strahles relativ zur Ebene ermittelt werden. Dabei können folgende Fälle auftreten:

- **Beide Punkte liegen auf derselben Seite:**
Da beide Punkte auf derselben Seite der Ebene liegen, kann der Strahl die Ebene nicht geschnitten haben. Daher wird der Strahl in den Teilraum weiterverschoben, in dem beide Punkte liegen.
- **Die Punkte liegen auf verschiedenen Seiten:**
Offensichtlich muss in diesem Fall der Strahl die Ebene geschnitten haben. Falls der Schnittpunkt von einem der in der Ebene/Polygon-Karte gespeicherten koplanaren Polygonen liegt, wurde ein vom Strahl getroffenes Szenenelement bestimmt. Danach wird der Strahl am Partitionierer geteilt und die beiden Teilstrahlen in die entsprechenden Teilräume weitergeleitet.
- **Ein Punkt liegt auf der Partitionierungsebene:**
In diesem Fall wird der Strahl in den Teilraum weiterverschoben, in dem der zweite Punkt liegt.
- **Beide Punkte liegen auf der Partitionierungsebene:**
Liegen beide Punkte auf dem Partitionierer, wird

der Strahl per Definition in den Teilraum vor der Partitionierungsebene verschoben.

Erreicht der (Teil)Strahl ein Blatt, so muss mit jedem der dort abgespeicherten Polygone ein Schnittpunkttest vollzogen werden.

Ein weiterer großer Vorteil der BSP-Baumstruktur liegt in der Steuerbarkeit des Suchverhaltens. Da bei dem SSQ-Hörbarkeitstest nur der vom Empfänger am kürzesten entfernte Schnittpunkt von Interesse ist, wird die BSP-Traversierung dahingehend geändert, daß der Strahl ausgehend vom Empfänger in Richtung Sender verfolgt wird, bis er mit einem der Szeneobjekte kollidiert oder der Sender erreicht wird.

Ergebnis

Das Konzept der BSP-Bäume wurde zur Implementierung eines schnellen SSQ-Hörbarkeitstests verwendet. Da der BSP-Baum in einem Vorverarbeitungsschritt generiert wird, ermöglicht dieses Verfahren die Bestimmung hörbarer SSQ in Echtzeit. Der BSP-Ansatz wurde anhand eines Polygonmodells des Aachener Eurogress, welches aus 37 Polygonen und 18 Ebenen besteht, evaluiert. Auf dem Testsystem (AMD Athlon XP 3000+) konnte der Hörbarkeitstest 5500 SSQ in Echtzeit (30 ms) verarbeiten, was eine Simulation bis einschliesslich dritter SSQ-Ordnung ermöglicht. Da das Polygonmodell nur in 5 große konvexe Teilräume sinnvoll zerlegt werden kann, fällt dieses Messergebnis eher relativ langsam aus.

Die Rechenanforderung dieses Verfahrens wird von der Raumgeometrie in zweierlei Hinsicht beeinflusst. Die Höhe des Baumes, die die Anzahl der Baumanfragen reflektiert, wächst im Falle eines balancierten Baumes nur logarithmisch mit der Anzahl der Polygone, wodurch eine sehr schnelle Schnittpunktbestimmung ermöglicht wird. Der zweite wichtige Punkt ist, daß die Anzahl der SSQ drastisch mit der Anzahl der Polygone ansteigt, da für s Originalquellen ungefähr $s \cdot p^m$ SSQ generiert werden (p = Anzahl Polygone, m = SSQ Ordnung). Durch den ebenen-basierten Ansatz des SSQ-Verfahrens wurde nur jeweils eine SSQ pro Raumebene generiert, wodurch die Anzahl der zur Laufzeit zu verarbeitenden SSQ und damit auch die Rechenanforderungen erheblich reduziert wurde. Beim Testmodell wurde durch diesen Ansatz eine Reduktion der SSQ um den Faktor 10 bei Simulation bis dritter Ordnung erreicht.

Literatur

- [1] Allen, J.B., Berkley, D.A., *Image Method for Efficiently Simulating Small-Room Acoustics*, The Journal of the Acoustical Society of America, 65(4):943-950, 1979.
- [2] Shumacker, R., Brand, R., Gilliland, M., Sharp, W., *Study for Applying Computer-Generated Images to Visual Simulations*, Report AFHRL-TR-69-14, U.S. Air Force Human Resources Laboratory, 1969.