

The Hemi-Cube

A Radiosity Solution for Complex Environments

Michael F. Cohen und Donald P. Greenberg
Cornell University
1985

Seminarvortrag von Andreas Signer, SS 1997

Vorbemerkungen des Vortragenden

Das von mir bearbeitete Paper entstand, wie aus dem Titel ersichtlich, im Jahre 1985. Wenn ich im folgenden Text zeitbezogene Aussagen mache, so sind diese im Kontext des Entstehungsjahres zu sehen.

Einleitung und Motivation

Ein Ziel der Computergrafik ist es, realistische Bilder von nichtexistenten Szenen zu erstellen. Dies wird durch die Simulation der Verteilung der Lichtenergie in einer gegebenen Geometrie oder physikalischen Beschreibung der Umgebung erreicht. Ein grösseres Problem dabei war die korrekte Simulation der globalen Beleuchtungseffekte.

Das von einem Objekt abgegebene Licht entsteht entweder durch direkte Abstrahlung, wie z.B. bei einer Lichtquelle, oder durch Reflexion oder Transmission von einfallendem Licht. Das einfallende Licht kann das Objekt direkt erreichen (auf einer Linie zwischen einer Lichtquelle und dem Objekt) oder indirekt durch typischerweise komplexe Reflexionen oder Transmissionen anderer Objekte in der Umgebung (Licht aus „sekundären“ Lichtquellen). Diese sekundären Lichtquellen wurden früher ignoriert oder im besten Fall mehr schlecht als recht modelliert. Meistens wurden sie durch einen konstanten Term approximiert, der dann als ambiente Komponente hinzuaddiert wurde.

Für die spekulare Komponente der globalen Beleuchtung existieren bereits Lösungen, wie z.B. das Ray-Tracing-Verfahren.

Die Mehrheit der Oberflächen in einer realen Umgebung sind diffuse Reflektoren, d.h. ein einfallender Lichtstrahl wird in alle Richtungen innerhalb der Halbkugel über der Oberfläche reflektiert. Ein Spezialfall eines diffusen Reflektors ist der „ideal diffuse“ oder „Lambertscher“ Reflektor. Das einfallende Licht wird in diesem Fall in alle Richtungen mit gleicher Intensität reflektiert. Goral et al. haben zwar in [1] mit der Radiosity-Methode eine Lösung für die diffuse Komponente der globalen Beleuchtung vorgeschlagen, gingen aber von Umgebungen aus, in denen sich Objekte gegenseitig nicht verdecken. Ziel dieses Papers ist es, das Radiosity-Verfahren so zu erweitern, dass auch Umgebungen mit sich gegenseitig verdeckenden Objekten zugelassen sind.

Radiosity

Die Radiosity-Methode beschreibt ein Energiegleichgewicht innerhalb einer geschlossenen Umgebung. Dabei wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Emission und Reflexion sind ideal diffus.
- Spekulare Reflexion wird vernachlässigt.
- Das Licht wandert im Vakuum, d.h. das durchwanderte Medium hat keinen Einfluss auf den Energietransfer.

Das Licht, das von einer Oberfläche abgegeben wird, setzt sich aus emittiertem und reflektiertem Licht zusammen. Die Berechnung des einfallenden Lichts setzt eine vollständige Beschreibung sowohl der geometrischen Verhältnisse zwischen den reflektierenden Oberflächen als auch des abgestrahlten Lichts aller anderer Oberflächen voraus. Diese Beziehung kann durch die folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$Radiosity_i = Emission_i + Reflectivity_i \int_{env} Radiosity_j Formfactor_{ij} \quad (1)$$

- Radiosity (B): Totale Energie, die von einem Punkt der Oberfläche pro Zeiteinheit und Flächeneinheit abgegeben wird (Einheit Wm^{-2}).
- Emission (E): Energie, die von einem Punkt der Oberfläche pro Zeiteinheit und Flächeneinheit emittiert wird (Einheit Wm^{-2}).
- Reflectivity (ρ): Der Bruchteil des einfallenden Lichts, der zurück in die Umgebung reflektiert wird (einheitslos).
- Formfactor (F): Der Bruchteil der Energie, der die Oberfläche i verlässt und auf Oberfläche j ankommt. Die Verwendung der Indizes in der Formel scheint auf den ersten Blick falsch zu sein, da ja das einfallende Licht integriert wird. Im Kapitel „Form-Factors“ wird gezeigt, dass die angegebene Formel korrekt ist.

Diese Gleichung bedeutet, dass die Energie (oder Licht), die eine Oberfläche verlässt, gleich der Summe der Eigenemission und des reflektierten Lichts ist. Da wir uns in einer geschlossenen Umgebung befinden, kann Licht, das reflektiert wird, nur von anderen Oberflächen her stammen. Die Summe des reflektierten Lichts sowie der Eigenemission einer Oberfläche wird ihre Radiosity genannt. Abbildung 1 verdeutlicht diese Aussage.

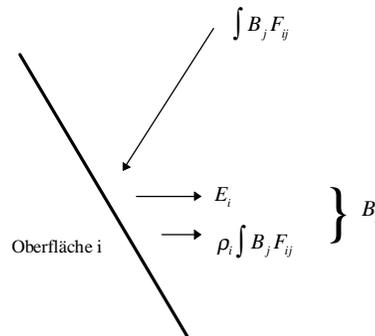


Abbildung 1

Wenn nun die Umgebung in N diskrete Oberflächenstücke (im folgenden kurz Patches genannt) unterteilt wird, und ausserdem angenommen wird, dass sowohl die Radiosity B als auch der Reflexionskoeffizient ρ eines Patches konstant sind, so wird aus dem Integral eine Summe der Energieaustausch innerhalb der Umgebung kann durch folgendes Gleichungssystem beschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} 1 - \rho_1 F_{11} & -\rho_1 F_{12} & \cdots & -\rho_1 F_{1N} \\ -\rho_2 F_{21} & 1 - \rho_2 F_{22} & & -\rho_2 F_{2N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ -\rho_N F_{N1} & -\rho_N F_{N2} & \cdots & 1 - \rho_N F_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

Die Farbe eines Objekts wird durch seine Reflektivität (oder Emission im Fall einer Lichtquelle) für jede Wellenlänge bestimmt. Die Reflektivitäts- und Emissionsterme in (2) sind deshalb nur für eine bestimmte Wellenlänge gültig. Deshalb ist es nötig, dieses Gleichungssystem für jede Wellenlänge, an der man interessiert ist, aufzustellen und zu lösen. Die Aussage, ein Patch habe eine konstante Radiosity und Reflektivität, bezieht sich immer auf Radiosity bzw. Reflektivität einer Wellenlänge.

Wichtig ist allerdings die Beobachtung, dass die Form-Factors einzig und allein eine Funktion der Geometrie der Szene sind. Sie müssen daher nur einmal berechnet werden und sind für jede Wellenlänge gültig.

Form-Factors

Ein Form-Factor ist der Bruchteil der Energie, die von einer Oberfläche abgestrahlt wird und auf einer anderen Oberfläche ankommt.

Die geometrischen Terme der Form-Factor-Herleitung sind in Abbildung 2 illustriert. Für Umgebungen, in denen jeder Punkt von jedem anderen aus sichtbar ist (d.h. es existieren keine Objekte, die andere ganz oder teilweise verdecken), ist der Form-Factor zwischen zwei infinitesimalen Flächen gegeben durch:

$$F_{dA_i dA_j} = \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} dA_j \quad (3)$$

Durch Integration über die Fläche j erhält man den Form-Factor zwischen einer infinitesimalen und einer endlichen Fläche:

$$F_{dA_i A_j} = \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} dA_j \quad (4)$$

Durch Integration über die Fläche i und Mittelung erhält man den Form-Factor zwischen zwei endlichen Flächen.

$$F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (5)$$

Im folgenden wird anstelle von $F_{A_i A_j}$ der Einfachheit halber F_{ij} verwendet.

Eine detaillierte Herleitung der Form-Factors, die den Rahmen dieses Papers sprengen würde, findet sich in [2].

Der in Gleichung (5) angegebene Ausdruck berücksichtigt nicht die Tatsache, dass eine Fläche von einer anderen aus nicht vollständig sichtbar sein muss. Deshalb muss (5) wie folgt erweitert werden:

$$F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} V(p_i, p_j) dA_j dA_i \quad (6)$$

Die Funktion V liefert die Werte 1, falls der Punkt p_j (auf der Fläche A_j) vom Punkt p_i (auf der Fläche A_i) aus „gesehen“ wird, oder 0, falls dies nicht der Fall ist.

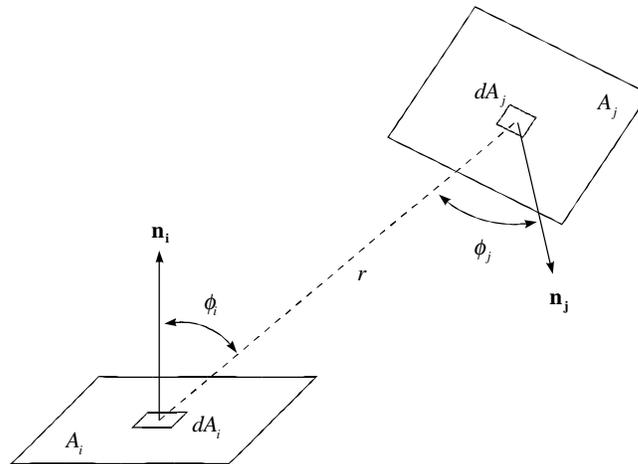


Abbildung 2: Form-Factor Geometrie

Eigenschaften des Form-Factors

Für Form-Factors gilt unter anderem folgende Beziehung:

$$\forall (i, j) \quad A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

Diese Beziehung ist sehr nützlich, da sie erlaubt, einen unbekanntem Form-Factor von einem bekannten abzuleiten. Ausserdem hilft sie, die Gleichung (1)

$$B_i = E_i + \rho_i \int_{env} B_j F_{ij}$$

zu verstehen [3]. Auf den ersten Blick scheint es, man müsse F_{ji} verwenden an Stelle von F_{ij} , da ja Energie vom Patch j zum Patch i übertragen wird. Dieser scheinbare Widerspruch kommt davon, dass Gleichung (1) in Radiosities geschrieben ist, die die Einheit Energie pro Zeiteinheit pro Einheitsfläche haben. Der Form-Factor bezieht sich aber nur auf die totale Energie pro Zeiteinheit. Wenn nun Gleichung (1) mit A_i multipliziert und der

Integrand mit $\frac{A_j}{A_j}$ erweitert, so erhält man folgende Gleichung:

$$A_i B_i = A_i E_i + \rho_i \int_{env} \frac{A_i}{A_j} F_{ij} A_j B_j$$

Mit $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$ folgt

$$A_i B_i = A_i E_i + \rho_i \int_{env} F_{ji} A_j B_j$$

Diese Gleichung beinhaltet nun Energie pro Zeiteinheit, und die vom Patch j abgestrahlte Energie wird wie erwartet mit F_{ij} multipliziert.

Berechnung des Form-Factors

Um den Form-Factor zu finden, muss also das doppelte Flächenintegral (6) gelöst werden. Ausser für sehr einfache Szenen ist dies nicht analytisch geschehen. Für allgemeine Szenen kommt also nur eine numerische Lösung in Frage.

Wenn der Abstand zwischen zwei Patches gross ist relativ zu ihrer Fläche und sich die „Sichtbarkeit“ des 2. Patches auf dem 1. Patch nicht ändert, so bleibt der Integrand des inneren Integrals der Gleichung (6) fast konstant. Das äussere Integral entspricht dann einer Multiplikation mit 1. Die Lösung des inneren Integrals liefert eine gute Approximation des Form-Factors. Falls die Patches nahe beieinander liegen oder die „Sichtbarkeit“ variiert, so kann der erste Patch subdividiert werden, bis die Bedingungen wieder erfüllt sind.

Eine geometrische Analogie zur Berechnung des Form-Factors nach Gleichung (4) (das oben erwähnte innere Integral ohne die Sichtbarkeitsfunktion V) wurde von Nusselt entwickelt. Für eine endliche Fläche ist der Form-Factor gleich dem Bruchteil der Fläche des Kreises (der Basis der Halbkugel), die überdeckt wird, wenn die Fläche zuerst auf die Halbkugel und dann orthogonal auf den Kreis projiziert wird (siehe dazu auch Abbildung 3).

Diese Halbkugel kann nun in kleine „Deltaräumwinkel“ unterteilt und für jeden Deltaräumwinkel ein Delta-Form-Factor berechnet werden. Der Form-Factor eines Patches ist dann gleich der Summe der Delta-Form-Factors der Deltaräumwinkel, die bei der Projektion des Patches auf die Halbkugel überdeckt werden. Wenn nun alle Patches auf die Kugel projiziert werden, wobei bei einer Überlappung die weiter entfernten Flächen entfernt werden (ähnlich dem z-Buffering), erhält man dadurch die Form-Factors zu allen Patches der Umgebung, wobei automatisch das Problem der teilweise verdeckten Flächen gelöst wird, da die Delta-Form-Factors ja immer der nächstgelegenen Fläche zugeordnet werden.

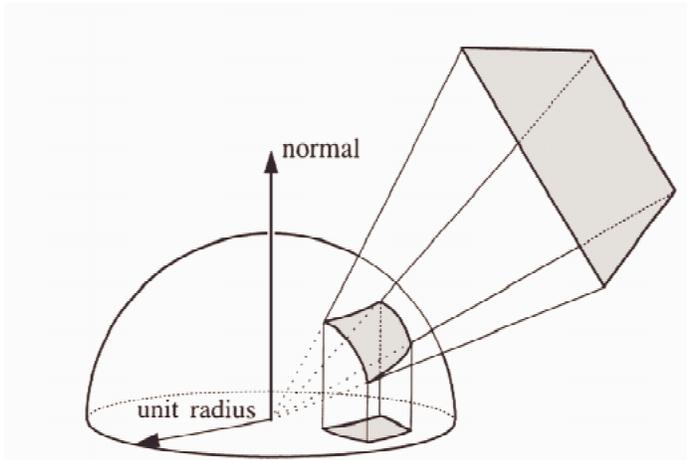


Abbildung 3: Nusselts Analogie

Die Projektion auf die Halbkugel liefert $\frac{1}{r^2}$ sowie den Kosinus des Winkels zwischen der Normalen des Patches und dem Vektor r. Die Projektion auf den Einheitskreis entspricht einer Multiplikation mit dem Kosinus des Winkels zwischen der Normalen des Patches und der projizierten Fläche auf der Halbkugel. Die Division durch π entspricht der Division durch die Fläche des Kreises.

Der Hemi-Cube

Aus der Analogie von Nusselt geht hervor, dass zwei Flächen den gleichen Form-Factor haben, wenn sie bei der Projektion auf die Halbkugel die gleiche Fläche und Position einnehmen. Dies gilt auch für Projektionen auf beliebige umschliessende Oberflächen (siehe auch Abbildung 4).

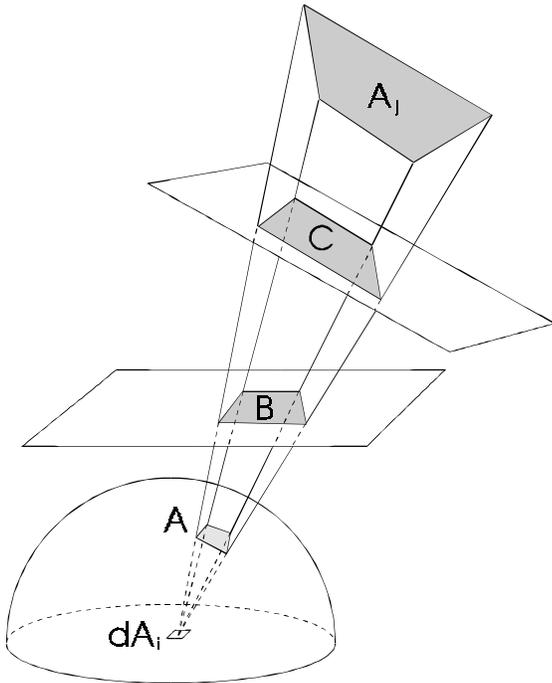


Abbildung 4: Flächen mit gleichem Form-Factor

Der Form-Factor von dA_i zu A_j ist gleich den Form-Factors von dA_i zu A , B und C .

Dies kann benutzt werden, um die Probleme zu vermeiden, welche sich bei einer Diskretisierung einer Halbkugel in gleich grosse Teile ergeben. Anstelle einer Halbkugel wird ein Halbwürfel (Hemi-Cube) um das Zentrum des Patches gelegt, für welches die Form-Factors zu den anderen Patches berechnet werden sollen. Die Seiten dieses Halbwürfels werden in kleine quadratische „Pixel“ unterteilt. Nun werden die Patches auf die Halbwürfelseiten projiziert (Abbildung 5). Falls zwei Patches auf den gleichen Pixel projiziert werden, so wird aufgrund des Abstands der beiden Patches zum Zentrum des Halbwürfels bestimmt, welches der beiden „sichtbar“ ist. Nachdem alle Patches auf den Halbwürfel projiziert wurden, kann durch einfaches Aufsummieren der Delta-Form-Factors der Form-Factor vom Patch im Zentrum des Halbwürfels zu jedem anderen Patch berechnet werden. Mit anderen Worten, wenn der Form-Factor vom Patch i zum Patch j berechnet werden soll und wenn $C(j)$ die Menge der Hemi-Cube-Pixel ist, durch die das Patch j sichtbar ist, so gilt:

$$F_{ij} = \sum_{q \in C(j)} \Delta F_q$$

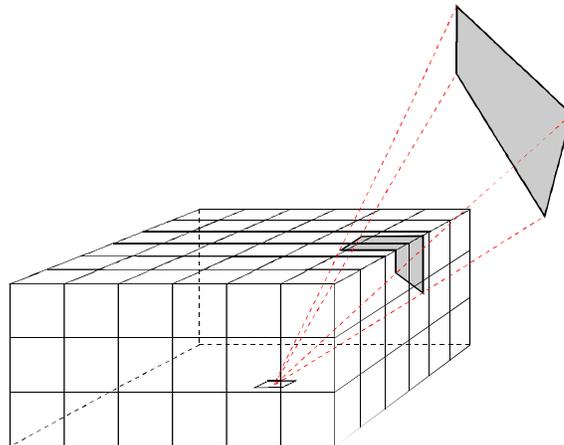
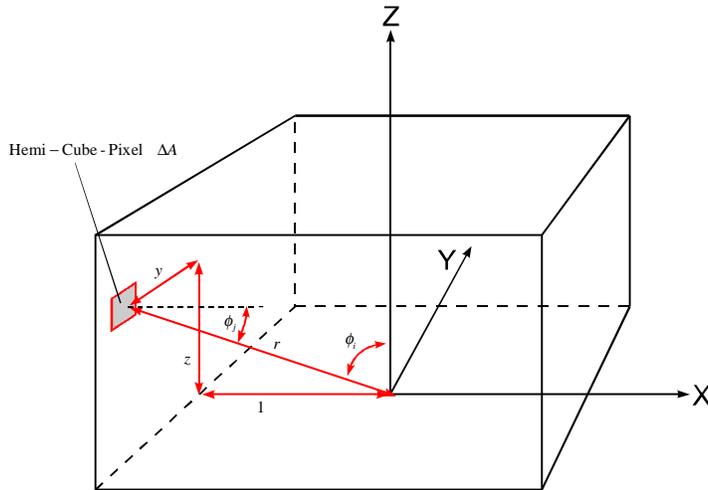


Abbildung 5: Projektion eines Patches auf den Hemi-Cube

Berechnung der Delta-Form-Factors

Der Beitrag jedes Pixels des Halbwürfels zum Form-Factor variiert und ist von der Pixelposition und -orientierung abhängig. Für jeden Pixel des Halbwürfels wird der Wert des Delta-Form-Factors mittels Gleichung (3) berechnet und in einer Tabelle gespeichert.



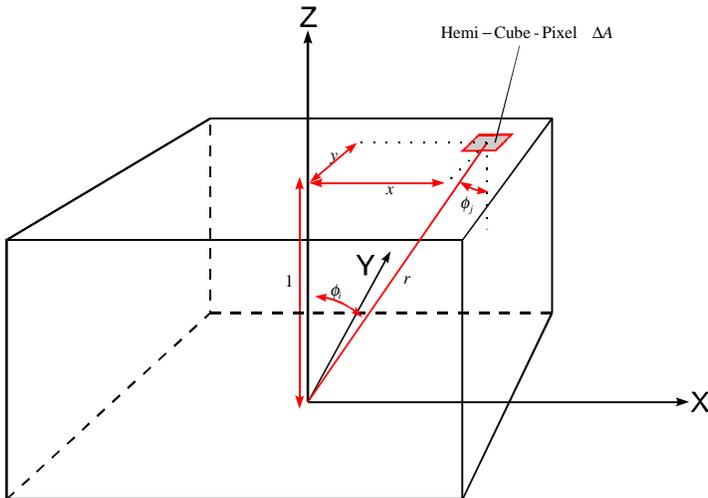
Seite des Hemi-Cubes

$$r = \sqrt{y^2 + z^2 + 1}$$

$$\cos \phi_i = \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2 + 1}}$$

$$\cos \phi_j = \frac{1}{\sqrt{y^2 + z^2 + 1}}$$

$$\begin{aligned} \Delta Form-Factor &= \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} \Delta A \\ &= \frac{z}{\pi (y^2 + z^2 + 1)^2} \Delta A \end{aligned}$$



Deckfläche des Hemi-Cubes

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + 1}$$

$$\cos \phi_i = \cos \phi_j = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + 1}}$$

$$\begin{aligned} \Delta Form-Factor &= \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} \Delta A \\ &= \frac{1}{\pi (x^2 + y^2 + 1)^2} \Delta A \end{aligned}$$

Lösen der Energie-Gleichgewichts-Gleichung

Nachdem die Form-Factors für alle Patches berechnet worden sind, kann das Gleichungssystem (2) gelöst werden. Dazu kann im Prinzip ein beliebiger Algorithmus verwendet werden. Es bietet sich aber das Gauss-Seidel-Verfahren an, da die Matrix diagonal dominant ist, d.h. der absolute Wert des Diagonalelements einer Zeile ist grösser als die Summe der absoluten Werte aller anderen Elemente der Zeile. Im folgenden wird gezeigt, dass dies immer gilt:

Ein Diagonalelement der Matrix ist gegeben durch

$$M_{ii} = 1 - \rho_i F_{ii}$$

Da nach Definition die Summe aller Form-Factors von einem Patch i zu allen anderen Patches j gleich 1 ist, gilt also:

$$|M_{ii}| = \sum_{j=1}^N F_{ij} - \rho_i F_{ii}$$

Da $\rho_i < 1$, gilt $F_{ij} > \rho_i F_{ij}$ für alle i , und

$$|M_{ii}| > \sum_{j=1}^N \rho_i F_{ij} - \rho_i F_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \rho_i F_{ij}$$

$$|M_{ii}| > \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N |M_{ij}|$$

Das Gauss-Seidel-Verfahren konvergiert für diagonal dominante Matrizen immer.

Als Startwerte der Iteration werden einfach die Emissionen verwendet. Laut den Autoren konvergiert das Verfahren typischerweise nach 6 bis 8 Iterationen.

Rendering

Um die Radiosity-Lösung zu rendern, muss natürlich eine Kameraposition und -orientierung angegeben werden. Dann können die Patches durch einen beliebigen Shader angezeigt werden, wobei die Farbe eines Patches aufgrund seiner Radiosity bestimmt wird. Am einfachsten ist dabei die Verwendung eines Flat Shaders. Das Bild kann aber stark verbessert werden, wenn Gouraud-Shading eingesetzt wird. Dazu müssen die Radiosities, die ja für das Zentrum jedes Patches berechnet wurden, an die Ecken der Patches gebracht werden, was durch einfache Mittelung der Radiosities der umgebenden Patches erreicht werden kann. Radiosities für Patch-Ecken an Kanten oder Ecken einer Oberfläche können durch Extrapolation berechnet werden.

Es ist aber zu beachten, dass man durch Gouraud-Shading keineswegs ein exakteres Resultat erreicht! Das kontinuierliche Shading dient einzig und allein dazu, den visuellen Eindruck des Bildes zu verbessern.

Schlussfolgerungen

Das Ziel, die Radiosity-Methode für komplexe Umgebungen mit sich verdeckenden Objekten zu erweitern, wurde sicherlich erreicht. Alle Oberflächen werden als Lichtquellen behandelt und die globale Beleuchtung wird somit korrekt modelliert. Der Einfluss verdeckter Oberflächen ist in der Berechnung der Form-Factors enthalten, und somit werden Schatten und Schattengrenzen richtig erzeugt.

Vorteile

Es muss hervorgehoben werden, dass die Berechnung der Intensitäten im Objektraum unabhängig von der Kameraposition und -orientierung erfolgt. Dies erlaubt es, animierte Sequenzen (etwa den Gang durch ein Gebäude) schnell zu berechnen, da nur noch die Szene von einer anderen Kameraposition aus gerendert werden muss, ohne dass Radiosities oder Form-Factors neu berechnet werden müssen. Falls die Geometrie unverändert bleibt, können Änderungen in der Beleuchtung (z.B. das Ein- bzw. Ausschalten von Lichtquellen) durch einfaches Lösen des Gleichungssystems und anschließendem Rendering berechnet werden. Nur bei Änderungen der Geometrie müssen die Form-Factors neu berechnet werden.

Der Hemi-Cube (und damit die Berechnung der Form-Factors) ist einfach zu implementieren. Ausserdem wird das Problem von verdeckten Flächen mit sehr wenig Mehraufwand gelöst.

Ausserdem müssen die in den Schlussfolgerungen erwähnten Punkte positiv bewertet werden: Der Algorithmus erzeugt photorealistische Bilder, die globale Beleuchtung wird physikalisch korrekt modelliert, und es sind weiche Schatten und durch diffuse globale Beleuchtung hervorgerufene Effekte (color bleeding) möglich.

Nachteile

Eine Fehlerquelle sind die getroffenen Annahmen bezüglich der Patches. Es wird davon ausgegangen, dass die Patches klein sind relativ zu ihrer Entfernung, so dass der Form-Factor zwischen einer infinitesimalen und einer endlichen Fläche verwendet werden kann. Ausserdem wird angenommen, dass sich die „Sichtbarkeit“ des Patches zu welchem der Form-Factor berechnet werden soll, auf dem Ausgangspatch nicht ändert. Diese Annahmen können durch ungeschicktes Meshing natürlich verletzt werden (zum Teil können sie auch gar nicht eingehalten

werden, z.B. bei Patches, die nebeneinander liegen, aber nicht auf der gleichen Ebene, und somit einen Form-Factor ungleich 0 besitzen).

Eine weitere Fehlerquelle in der Hemi-Cube-Methode ist die endliche Auflösung des Hemi-Cubes. Das Punkt-Sampling auf den Flächen des Halbwürfels kann Aliasing-Artefakte erzeugen, da die meisten Oberflächen bei der Projektion auf den Halbwürfel einige Pixel nur teilweise überdecken. Der Form-Factor für ein Patch kann deshalb je nach Projektionszentrum stark unterschiedlich sein. Kleine Patches können sogar vollständig „verloren“ gehen. Abbildung 6 verdeutlicht dies.

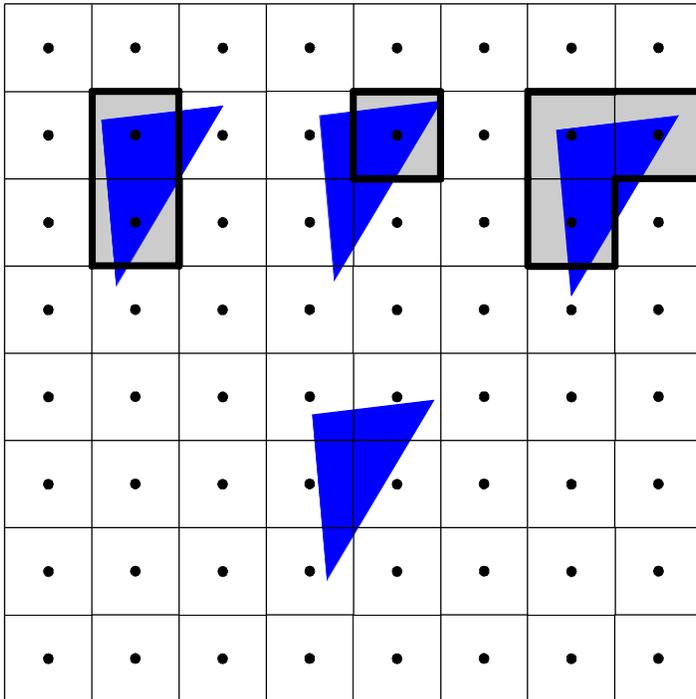


Abbildung 6

Ein Patch wurde an vier verschiedene Stellen einer Hemi-Cube-Seite projiziert. Das Zentrum eines Pixels ist durch einen Punkt markiert. Die Überdeckung reicht von keinem Pixel bis drei Pixel. Jede Projektion wird deshalb einen anderen Form-Factor haben.

Ausserdem ist die Anzahl Patches, die einen Form-Factor ungleich 0 haben können, ebenfalls durch die Auflösung des Hemi-Cubes begrenzt. Dies geschieht aufgrund der Tatsache, dass bei einem Hemi-Cube mit N Pixeln maximal N Delta-Form-Factors zugewiesen werden können. Die Auflösung des Hemi-Cubes muss deshalb in Abhängigkeit der Komplexität der Szene gewählt werden.

Weitere Nachteile sind sicherlich auch das Vernachlässigen der spekularen Reflektion sowie der hohe Rechenaufwand zur Bestimmung der Form-Factors bei Szenen mit vielen Patches.

Anwendungen

Allgemein ist die Radiosity-Methode überall dort anwendbar, wo ideal diffuse globale Beleuchtung wichtig und die Geometrie statisch ist. Durch die Unabhängigkeit von Kameraposition und -orientierung ist sie vor allem dann wertvoll, wenn in einem dreidimensionalen Modell „herumgewandert“ werden soll. Ein mögliches Anwendungsgebiet wäre zum Beispiel das Erstellen von Gebäudemodellen durch Architekten. Ein Kunde könnte sich das Gebäude dann im Gegensatz zu einem gebauten Modell auch von innen betrachten und es begehen.

Zukünftige Forschung

Es ist relativ schwer, Möglichkeiten für weitere Forschung aufzuzeigen, wenn das zugrunde liegende Paper bereits 12 Jahre alt ist. Die meisten im Original-Paper angesprochenen offenen Fragen wurden in den vergangenen Jahren behandelt. Ich habe trotzdem versucht, aufzuzeigen, wo - ausgehend vom Original-Paper - noch Arbeit zu investieren ist bzw. war.

Die Hemi-Cube-Methode sollte in folgenden Punkten erweitert werden:

- Nichtebene Oberflächen sollten zugelassen sein. Zur Berechnung der Form-Factors mag eine Polygon-Approximation genügen, zum Rendern sollten aber die exakten Oberflächen verwendet werden.
- Da der Aufwand zur Berechnung der Form-Factors und die Grösse der Matrix quadratisch zur Anzahl Patches wächst, muss ein Weg gefunden werden, die Berechnung mit vernünftigem Aufwand durchzuführen. Es sollte eine Möglichkeit gefunden werden, kleine Variationen der Intensität innerhalb eines Patches nicht durch

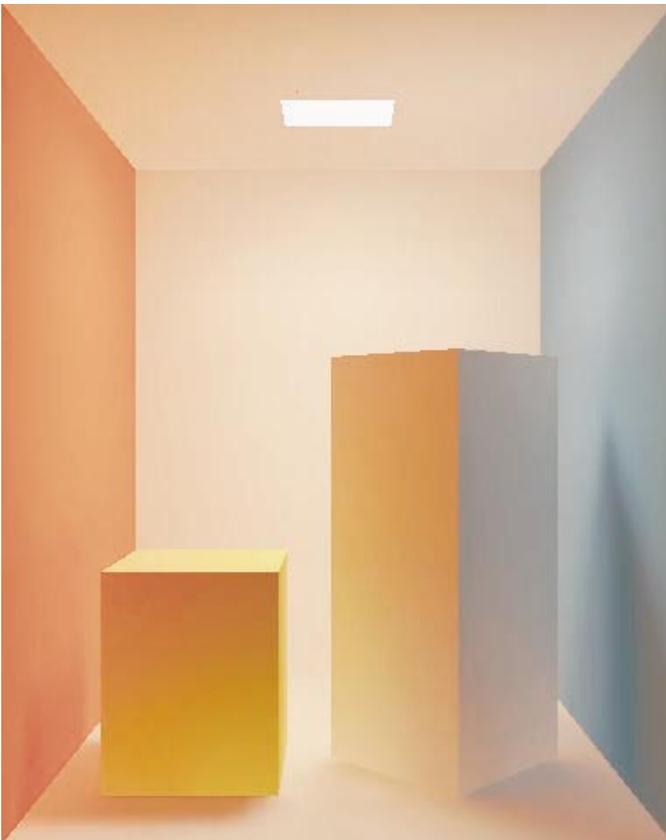
Subdivision korrekt zu berechnen, sondern z.B. durch die Verwendung von Basisfunktionen höherer Ordnung zur Modellierung der Radiosity eines Patches. Unter diesen Punkt fällt auch Texture-Mapping; es kann behandelt werden, indem für die Radiosity-Lösung die durchschnittliche Reflektivität eines texturierten Patches verwendet wird.

- Es muss ein Weg gefunden werden, spekulare Reflexion und Transmission in den Rendering-Prozess oder noch besser in die Radiosity-Formulierung einfließen zu lassen. Denkbar wäre z.B. ein Hybrid-Verfahren, bei dem in einem ersten Schritte die diffusen Effekte mittels Radiosity berechnet würden und dann in einem zweiten Schritt die spekularen mittels Ray-Tracing. Dabei ginge aber der Vorteil verloren, die Bilder bei einem Wechsel des Betrachterstandorts schnell rendern zu können.

Es sollte ausserdem geprüft werden, ob es Alternativen zum Hemi-Cube gibt, die nicht die erwähnten Nachteile besitzen. Es ist z.B. vorstellbar, dass in unproblematischen Fällen der Hemi-Cube verwendet wird, bei einer Verletzung der Annahmen bezüglich Abstand/Grösse und Sichtbarkeit zu robusteren Verfahren gewechselt wird. In der Berechnung der Form-Factors könnte zudem das äussere Integral durch mehrere Samples auf dem Ausgangspatch angenähert werden.

Beispiel-Bild

Das folgende Bild (bestehend aus 2370 Patches, gerendert unter Verwendung von Gouraud-Shading) demonstriert eine Vielzahl von Schattierungscharakteristiken, obwohl es über eine einfache Geometrie verfügt.



Beachtenswert sind:

- 1) Color bleeding auf der gelben und weissen Box.
- 2) Der rote Schatten auf der linken Seite der gelben Box. Der grösste Teil des Lichts, der den schattigen Bereich erreicht, entstammt einer Reflexion an der roten Wand, was für die Rotfärbung des Schattens verantwortlich ist.
- 3) Die Variation der Intensität an den Wänden, hervorgerufen durch die diffuse Lichtquelle an der Decke.

Literaturverzeichnis

- [1] Goral, Cindy M., Torrance, Kenneth E., Greenberg, Donald P., Battaile, Bennett, Modelling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces, ACM Computer Graphics (Proceedings 1984), pp. 213-222.
- [2] Siegel, Robert, Howell, John R. und Lohrengel, Joachim, Wärmeübertragung durch Strahlung Teil 2, Springer-Verlag, 1991
- [3] Sillion, François X. und Puech, Claude, Radiosity and Global Illumination, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1994