

4. Übungsblatt zur Vorlesung Computergrafik im WS 2024/2025

Abgabe bis Montag, 13.01.2025, 8:00 Uhr

In diesem Übungsblatt sollen Sie eine Bounding Volume Hierarchy implementieren, um effizient eine große Anzahl an Dreiecken in einer Szene handhaben zu können. Außerdem soll ein einfacher Gauß-Filter implementiert werden, mit dem Texturen vorgefiltert werden können.

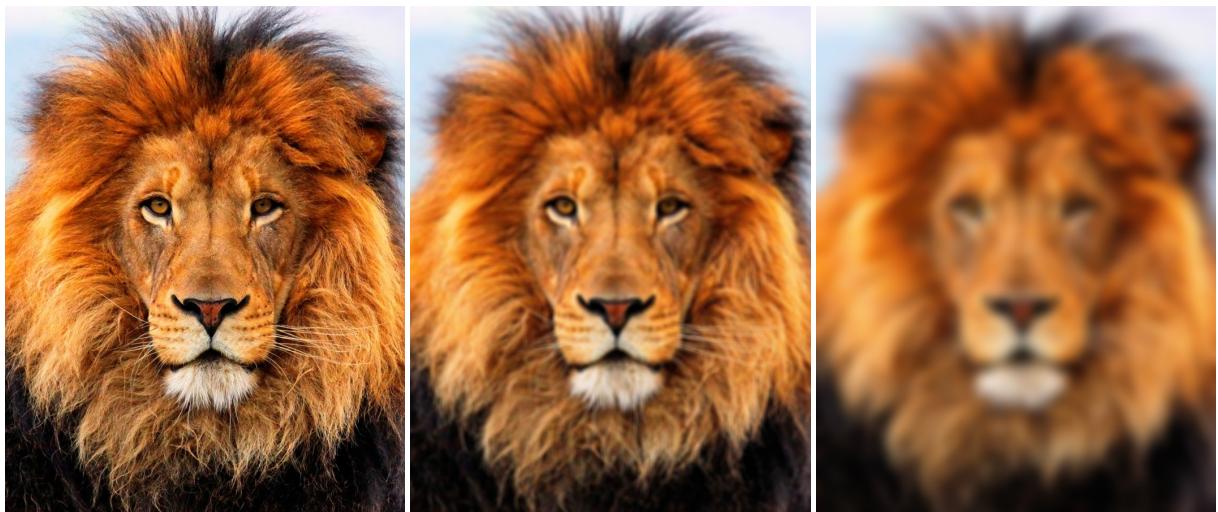
1 Gauß-Filter**8 Punkte**

Abbildung 1: Effekte des Weichzeichnens mit einem Gauß-Filter. Links: Orginalbild 707×900 . Mitte: $\sigma = 5$, Kernelgröße 9×9 (Radius 4). Rechts: $\sigma = 10$, Kernelgröße 49×49 (Radius 24).

Für das *Weichzeichnen* eines Bildes verwendet man in der Computergrafik sehr häufig einen Gauß-Filter. Dabei wird für jeden Pixel im Bild seine lokale Nachbarschaft gemäß einer zweidimensionalen Gauß-Glocke der Breite σ gewichtet:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

wobei x und y der horizontale und vertikale Abstand in Pixeln ist.

- a) **(4 Punkte)** In dieser Aufgabe soll in den Funktionen `Image::create_gaussian_kernel_1d` bzw. `Image::create_gaussian_kernel_2d` ein 1-dimensionaler bzw. 2-dimensionaler Gauß-Filterkernel erstellt werden. Die normalisierten Gauß-Filterkernell der Größe 3 mit $\sigma = 1$ (bis zur dritten Nachkommastelle) sind:

0.274	0.452	0.274
-------	-------	-------

0.075	0.124	0.075
0.124	0.204	0.124
0.075	0.124	0.075

- b) **(2 Punkte)** Implementieren Sie nun die Methode `Image::filter`, die eine gefilterte Version des Bildes berechnet und zurückgibt. Verwenden Sie dazu den zweidimensionalen Filterkernel, der als Parameter `kernel` übergeben wird.
- c) **(2 Punkte)** Gauß-Filter sind *separierbar*, d.h. ein zweidimensionaler Gauß-Filter lässt sich realisieren, indem man das Bild zuerst horizontal (bzw. zeilenweise) und danach vertikal (bzw. spaltenweise) (oder umgekehrt) mit einem eindimensionalen Gauß-Filter filtert. In `Image::filter_separable` soll eine separiert gefilterte Version des Bildes berechnet und zurückgegeben werden. Verwenden Sie dazu den eindimensionalen Filterkernel, der als Parameter `kernel` übergeben wird.

Setzen Sie die Szene in der GUI auf *Gauss* und wählen Sie unter *Image* das ursprüngliche Bild oder eine der gefilterten Varianten aus. Sie können die gefilterten Bilder auch erzeugen, indem Sie auf der Konsole das Framework mit `--gauss` aufrufen. Dies erzeugt die Ergebnisse der Filter in `assignment_images`. Je nach Filtergröße und Hardware kann insbesondere der „naive“ Ansatz aus b) mehrere Sekunden in Anspruch nehmen (zur Orientierung: Die Referenzlösung benötigt 13 Sekunden auf einem i7-6700).



Abbildung 2: Ergebnisbilder des Übungsblattes.

- a) **(6 Punkte)** Nun soll eine Hüllkörperhierarchie (BVH) mit *Object Median Split* aufgebaut werden. Mit einer BVH wird es möglich werden, komplexe Geometrie in Form von Dreiecksnetzen effizient im Renderer zu nutzen. Als Hüllkörper sind dabei an den Achsen ausgerichtete Quader zu wählen, die mit der Klasse `AABB` (`cglb/include/cglb/rt/aabb.h`) dargestellt werden.

Implementieren Sie die Methoden `build_bvh` und `reorder_triangles_median` der BVH-Klasse, sodass diese sich folgendermaßen verhalten:

- Die Methode `build_bvh` steuert den rekursiven Aufbau der BVH. Sie bearbeitet immer einen Knoten und alle zu diesem Knoten gehörigen Dreiecke. Der aktuelle Knoten wird in `build_bvh` einmal unterteilt, falls er mehr als `BVH::MAX_TRIANGLES_IN_LEAF` Dreiecke enthält. Die Unterteilung wird dann rekursiv auf den Kindknoten fortgesetzt.

Hinweis: Durch den Aufruf von `std::vector::push_back` kann sich die Adresse des Vektors durch Reallokation ändern. Damit sind alle Referenzen und Pointer auf Elemente des `std::vector` nach einem Aufruf von `push_back` ungültig.

- Die Methode `reorder_triangles_median` teilt die zu einem Knoten gehörigen Dreiecksindices in zwei Teile, wobei ein Teil maximal einen Index mehr haben darf, als der andere. Dazu werden alle Dreiecke, die vor dem Objektmedian liegen, in die erste Hälfte der Indexliste eingesortiert. Die Reihenfolge wird dabei durch die Mittelpunkte der Dreiecks-AABB und die gegebene Unterteilungssachse definiert. Die Dreiecke innerhalb eines Blattknotens müssen nicht sortiert sein.

Informieren Sie sich vor der Implementierung über die Schnittstelle der BVH-Klasse. Sie finden diese in `cglb/include/cglb/rt/bvh.h`. Eine schematische Darstellung der Datenstruktur sehen Sie in Abbildung 3. In der Funktion `intersect_recursive` können Sie nachsehen, wie das Datenlayout funktioniert und wie auf die Dreiecksdaten zugegriffen werden kann.

Das Framework stellt verschiedene Visualisierungsmodi bereit, die Sie zur Fehleranalyse verwenden können. Mit dem Modus „BVH Intersection Time“ wird pro Pixel die Zeit, die zum Berechnen des Schnittpunktes benötigt wurde, visualisiert. Der Modus „AABB Intersection Count“ schneidet einen Strahl mit sämtlichen Hüllkörpern der BVH. Dieser Modus soll dazu dienen, die Struktur der Hierarchie zu analysieren.

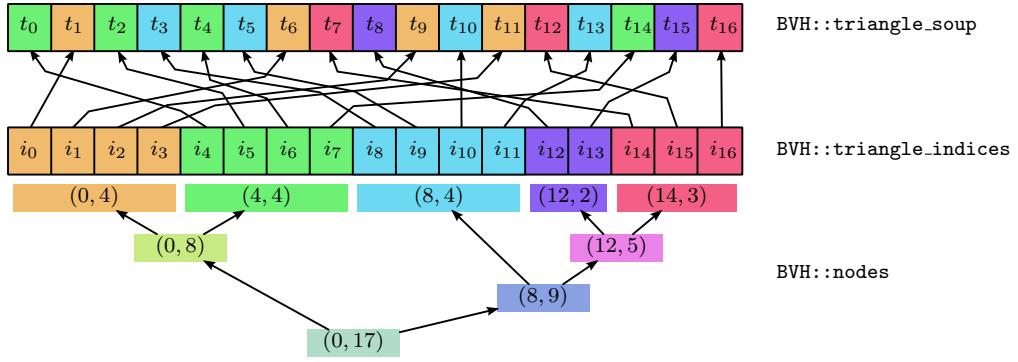


Abbildung 3: Dreiecke liegen in einer ungeordneten *triangle soup* vor (oben). Die BVH speichert zusätzlich eine durch den Aufbaualgorithmus sortierte Indexliste (Mitte). Zu jedem Knoten der BVH gehört ein Teilstück dieser Liste und somit ein Teil der gespeicherten Dreiecke. In Klammern angegeben sind die Werte von `Node::triangle_idx` und `Node::num_triangles` des jeweiligen Knotens.

Stellen Sie folgende Punkte sicher:

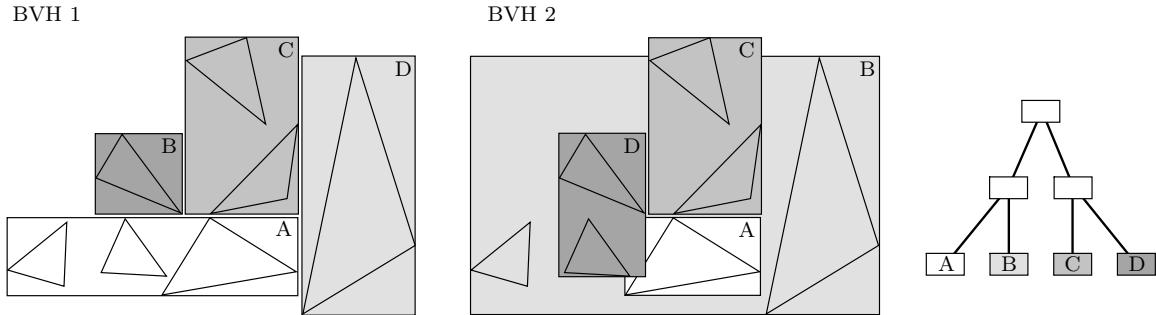
- Die AABB eines Knoten soll immer kleinstmöglich sein, aber alle Dreiecke des jeweiligen Teilbaumes umschließen. Um degenerierte AABBs zu vermeiden werden diese aber um ein Epsilon in jeder Dimension vergrößert (siehe `AABB::extend` in `aabb.h`).
- Ein innerer Knoten soll stets genau die Dreiecke enthalten, die in seinen Kindern enthalten sind. Insbesondere enthält der Wurzelknoten alle Dreiecke.
- Bei inneren Knoten sollen beide Kindzeiger `left` und `right` auf gültige Elemente des Vektors `BVH::nodes` verweisen. Bei Blattknoten sollen beide Kindzeiger den Wert `-1` haben. Eine Mischform (ein Zeiger gültig, der andere `-1`) ist nicht erlaubt.
- Zu einem Knoten gehören immer `Node::num_triangles` Dreiecke, deren Indices in einem zusammenhängenden Stück von `BVH::triangle_indices` liegen und bei Element `Node::triangle_idx` beginnen.
- Blattknoten sollen maximal `BVH::MAX_TRIANGLES_IN_LEAF` Dreiecke enthalten.
- Kein Blattknoten darf weniger als ein Dreieck enthalten.
- Der Split soll in der Reihenfolge X, Y, Z, X, Y, Z, \dots entlang je einer der Hauptachsen erfolgen. Der Wurzelknoten soll entlang der X -Achse geteilt werden.
- Ein Dreieck soll vor einem anderen Dreieck eingesortiert werden, wenn der Mittelpunkt seiner AABB vor dem Mittelpunkt der AABB des anderen Dreiecks liegt.
- Der BVH-Aufbau muss für alle möglichen Eingaben terminieren, also nicht in einer Endlosschleife enden.
- Für die volle Punktzahl darf der Aufbau der BVH für die Sponza-Szene (in der VM) nicht länger als 2 Minuten dauern. Benutzen Sie daher einen effizienten Algorithmus zum Sortieren. (z.B. `std::sort` oder `std::nth_element`).
- Testen Sie, ob Ihre Abgabe in der virtuellen Maschine kompiliert und läuft!

Beachten Sie, dass durch eine richtige Implementierung der Vektor `triangle_indices` umpsortiert wird.

b) **(6 Punkte)** In der Methode `BVH::intersect_recursive` soll nun die BVH rekursiv traversiert werden. Die Behandlung von Blattknoten ist schon implementiert. Sie müssen sich daher nur um die Behandlung von inneren Knoten kümmern. Schneiden Sie dafür den Strahl mit den AABBs der zwei Kindknoten. Im Fall, dass beide Kindknoten geschnitten werden, sollen Sie zuerst in den näheren Kindknoten absteigen. Ein Kindknoten ist dabei näher, wenn der Schnittpunkt näher am Strahlursprung liegt. Steigen Sie danach nur in den zweiten Kindknoten ab, falls im ersten Kindknoten kein Schnittpunkt gefunden wurde, der näher liegt als der Eintritt in den zweiten Kindknoten.

3 Beschleunigungsstrukturen und Hüllkörper (Theorie, keine Abgabe)

- a) Die folgende Abbildung zeigt die Blattknoten zweier Hüllkörperhierarchien (BVH). Beide Hierarchien beinhalten dieselben Dreiecke und besitzen je vier Blattknoten A, B, C, D. Die Topologie beider BVH ist gleich und als Baum rechts dargestellt.



Welche der beiden Hierarchien kann von einem Raytracer effizienter durchlaufen werden?
Begründen Sie dies in *Stichpunkten*!

BVH 1

BVH 2

b) Bewerten Sie die folgenden Aussagen, indem Sie *Wahr* oder *Falsch* ankreuzen!

Aussage	Wahr	Falsch
Ein kD-Baum kann für N Primitive den Aufwand für Strahlschnitte von $O(N)$ auf $O(\log(N))$ reduzieren.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Surface Area Heuristic sorgt dafür, dass beiden Kindknoten gleich viele Primitive zugeteilt werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Für die Suche der Trennebene (Split Plane) mit Objektmittel (Object Median) ist <i>immer</i> eine vollständige Sortierung der Primitive notwendig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Teilen eines Knotens am Objektmittel (Object Median) führt stets zu den effizientesten Hüllkörperhierarchien.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Surface Area Heuristic macht die Annahme, dass Strahlen stets außerhalb des zu unterteilenden Hüllkörpers starten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es gibt Szenen, in denen ein kD-Baum keinen Vorteil bringt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

c) Kreuzen Sie jeweils die passenden Kästchen an! Sie erhalten für jede vollständig richtige Zeile einen Punkt.

Aussage	AABB	OBB	Kugel
Der Hüllkörper kann einen beliebig orientierten Würfel optimal, also ohne freien Raum umschließen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es gibt <i>orthonormale</i> Transformationen des eingeschlossenen Objektes, die das Volumen des optimalen Hüllkörpers verändern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es gibt <i>affine</i> Transformationen des eingeschlossenen Objektes, die das Volumen des Hüllkörpers verändern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gegeben sind zwei Objektmengen und zu jeder Menge ihr optimaler Hüllkörper. Der Aufwand, den optimalen Hüllkörper für <i>alle</i> Objekte zu bestimmen, ist unabhängig von der Anzahl der Objekte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abgabe Laden Sie die Datei `exercise_04.cpp` in Ilias hoch.

Framework Für jedes Übungsblatt stellen wir ein Framework bereit, das Sie im Ilias-Kurs herunterladen können. Das Framework nutzt C++11 und wird unter Linux getestet. Es ist allerdings auch unter Windows mit Visual Studio 2013 lauffähig. Das Framework enthält das Unterverzeichnis `cglib`. Weiterhin gibt es das aufgabenspezifische Unterverzeichnis `04_bvh`, in dem Sie Ihre Lösung programmieren. Die Datei `Kompilieren.txt` enthält Informationen darüber, wie Sie das Framework kompilieren können.

Achtung: Abgegebene Lösungen müssen in der VM erfolgreich kompilieren und lauffähig sein, ansonsten vergeben wir 0 Punkte. Insbesondere darf Ihre Lösung nicht abstürzen.

Allgemeine Hinweise zur Übung

- Scheinkriterien: Sie benötigen jeweils 50% der Punkte aus den Praxisaufgaben von Block A (Blatt 1, 5, 6) und Block B (Blatt 2, 3, 4).
- Die theoretischen Aufgaben bedürfen *keiner* elektronischen Abgabe.
- Die Abgabe muss im Ordner `build` mit `cmake .. / && make` in der bereitgestellten VIRTUAL-Box VM¹ kompilieren, andernfalls wird die Aufgabe mit 0 Punkten bewertet.
- Da nur einzelne Dateien abgegeben werden, müssen diese kompatibel zu unserer Referenzimplementation bleiben. Verändern Sie daher wirklich nur die Dateien, die auch abgegeben werden müssen, insbesondere *nicht* die mitgelieferten Funktionsdeklarationen! Sie können allerdings in den abzugebenden Dateien Hilfsfunktionen definieren und benutzen.
- Sie dürfen sehr gerne untereinander die Aufgaben diskutieren, allerdings muss jede*r die Aufgaben *selbst* lösen, implementieren und abgeben. Plagiate bewerten wir mit 0 Punkten.
- Sie können sich bei Fragen an die Übungsleitung oder das Ilias-Forum wenden.

Alle Übungsleiter `cg_ws2425@lists.kit.edu`

Lucas Alber `lucas.alber@kit.edu`
Nathan Lerzer `nathan.lerzer@kit.edu`
Vincent Schüßler `vincent.schuessler@kit.edu`

¹<https://cg.ivd.kit.edu/lehre/ws2023/cg/downloads/cgvm.zip>