KU LEUVEN

FACULTEIT INGENIEURSWETENSCHAPPEN

Het gebruik van de normalen bij het bouwen van BSP acceleratiestructuren

Jesse Hoobergs

Thesis voorgedragen tot het behalen van de graad van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: computerwetenschappen, hoofdoptie Mens-machine communicatie

Promotor:
Prof. dr. ir. Philip Dutré

Assessoren:
Ir. W. Eetveel
W. Eetrest

Begeleiders:
Ir. M. Moulin
Ir. P. Bartels

Academiejaar 2018 – 2019

Voorwoord

Dit is mijn dankwoord om iedereen te danken die mij bezig gehouden heeft. Hierbij dank ik mijn promotor, mijn begeleider en de voltallige jury. Ook mijn familie heeft mij erg gesteund natuurlijk.

Jesse Hoobergs

Inhoudsopgave

Samenvatting

In dit `abstract` environment wordt een al dan niet uitgebreide samenvatting van het werk gegeven. De bedoeling is wel dat dit tot 1 bladzijde beperkt blijft.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Lijst van figuren en tabellen

Lijst van figuren

Lijst van tabellen

Lijst van afkortingen en symbolen

Afkortingen

BSP	Binary Space Partitioning
BVH	Bounding Volume Hierarchy
$k - DOP$	Discrete Oriented Polytope
$RBSP$	Restricted Binary Space Partitioning Tree
$\mathcal{SA}$	Surface Area

Symbolen

BSP_{wn}	BSP boom die per knoop random normalen als splitsrichtingen gebruikt.
BSP_{wn+}	BSP_{wn} boom waarbij de drie richtingen volgens de hoofdassen altijd deel uitmaken van de splitsrichtingen.
BSP^{Kd}_{wn+}	BSP_{wn+} boom waarbij Kd knopen efficiënter doorkruist worden dan BSP knopen.
BSP_{cn}	BSP boom die per knoop een clustering van de normalen berekend en de centrums van deze clusters als splitsrichtingen gebruikt.
BSP_{cn+}	BSP_{cn} boom waarbij de drie richtingen volgens de hoofdassen altijd deel uitmaken van de splitsrichtingen.
BSP^{Kd}_{cn+}	BSP_{cn+} boom waarbij Kd knopen efficiënter doorkruist worden dan BSP knopen.
BSP_{random}	BSP boom die per knoop random richtingen als splitsrichtingen gebruikt.
$BSP_{random+}$	BSP_{random} boom waarbij de drie richtingen volgens de hoofdassen altijd deel uitmaken van de random splitsrichtingen.
$BSP^{Kd}_{random+}$	$BSP_{random+}$ boom waarbij Kd knopen efficiënter doorkruist worden dan BSP knopen.
$\mathcal{K}_{d,BSP}$	De kost om een BSP knoop te doorkruisen.
$\mathcal{K}_{d,Kd}$	De kost om een Kd knoop te doorkruisen.
$RBSP^{Kd}$	$RBSP$ waarbij Kd knopen efficiënter doorkruist worden dan BSP knopen.

Hoofdstuk 1

Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het werk ingeleid. Het doel wordt gedefinieerd en er wordt uitgelegd wat de te volgen weg is (beter bekend als de rode draad).

Als je niet goed weet wat een masterproef is, kan je altijd Wikipedia eens nakijken.

1.1 Ray tracing

Stralen volgen Door elke pixel één (of meerdere stralen), kleur intersectiepunt is kleur pixel -> path tracing.

Acceleratiestructuren Doel: aantal straal-driehoek intersecties verminderen.

1.2 Doelstelling

Betere Acceleratiestructuur bouwen door een algemene BSP te maken die gebruik maakt van de geometrische normalen bij het splitsen. Aantal intersecties nog doen dalen, traversals stijgen, rendertijd dalen.

1.3 Methodologie

1.4 Contributie

1.5 Overzicht

Hoofdstuk 2

Voorgaand werk

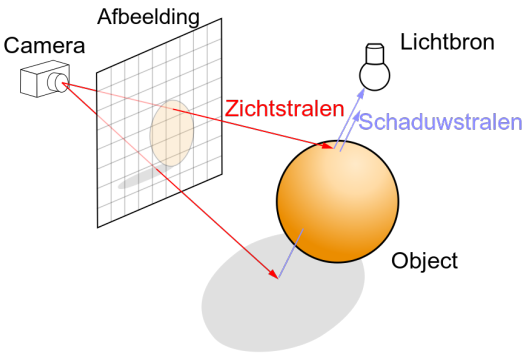
Dit hoofdstuk start met een korte uitleg over enkele basisconcepten: *ray tracing* en acceleratiestructuren. *Ray tracing* vereist acceleratiestructuren om efficiënt driehoeken in de scene te kunnen zoeken. Daarna wijdt dit hoofdstuk uit over één specifieke acceleratiestructuur: de *Binary Space Partitioning* (BSP) boom. De varianten van de BSP boom worden één voor één besproken.

2.1 Basisconcepten

Ray tracing *Ray tracing* is een computergrafiek techniek voor fysisch gebaseerd renderen. Het vormt een beschrijving van een 3D scene om tot een fotorealistische 2D afbeelding. Een camera wordt op een bepaalde positie in de scene geplaatst en een afbeeldingsvlak, opgedeeld in pixels, wordt ervoor geplaatst. Door elke pixel worden één (of meerdere stralen) gestuurd. Deze stralen worden zichtstralen genoemd en de kleur van hun dichtste intersectiepunt met de scene, bepaalt de kleur van de pixel. Figuur 2.1 toont dit visueel.

Om realistische afbeeldingen te maken, wordt belichting in rekening gebracht. De eenvoudigste vorm van belichting is directe belichting waarbij een punt donker is als er niet rechtstreeks licht van een lichtbron op valt. Om dit te ondersteunen in *ray tracing* wordt gebruikt gemaakt van schaduwstralen. Dit zijn stralen van het punt naar de lichtbron. Deze schaduwstralen worden geïntersecteerd met de scene, als een intersectiepunt tussen het punt en de lichtbron gevonden wordt, is de lichtbron niet zichtbaar. Bij elke intersectie wordt aan de hand van schaduwstralen gekeken of het punt belicht wordt of niet, als het niet belicht wordt, is de kleur zwart. Voor indirecte belichting is *path tracing* een veelgebruikte techniek. *Path tracing* reflecteert stralen in het intersectiepunt afhankelijk van het materiaal en als deze straal na een aantal botsingen een lichtbron raakt, krijgt het intersectiepunt een belichting van die lichtbron.

Acceleratiestructuren Het doel van acceleratiestructuren is om het aantal straal-driehoek intersecties te verminderen. De simpelste acceleratiestructuur bestaat uit



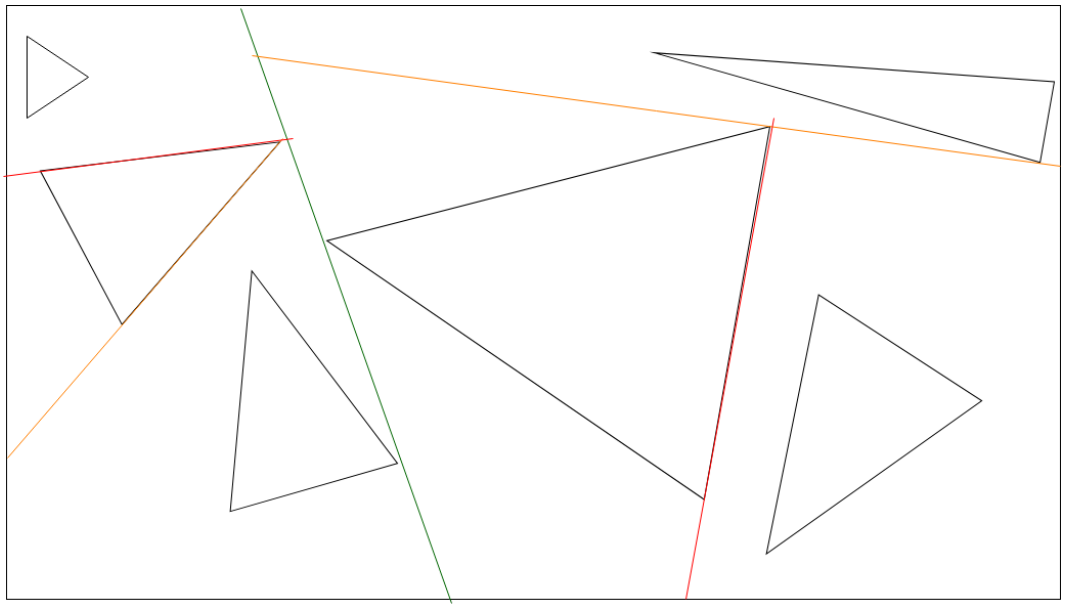
Figuur 2.1: Visuele voorstelling van *ray tracing* - Door elke pixel worden één of meerdere zichtstralen gestuurd. Schaduwstralen worden gebruikt om de belichting in de scene realistisch te maken. Deze afbeelding is een aangepaste versie van een afbeelding op https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing_(graphics)

het omhullend volume van de scene. Testen op intersectie met de driehoeken in de scene gebeurt dan enkel als dit omhullend volume intersecteert met de straal. Deze acceleratiestructuur kan worden uitgebreid tot een boomstructuur door dit volume recursief op te delen in kindvolumes. Binaire bomen delen elk omhullend volume op in twee nieuwe volumes, andere acceleratiestructuren zoals bijvoorbeeld octrees, delen het volume op in meer dan twee volumes.

Het volume kan worden opgedeeld op twee manieren: volgens objecten of volgens ruimte. Bij opdeling volgens objecten worden de objecten binnen het volume opgedeeld in meerdere disjuncte groepen en de kindvolumes zijn de omhullende volumes van deze groepen. Na deze opdeling zit elk object in exact één van deze nieuwe volumes, maar de volumes kunnen overlappen. Een voorbeeld van een acceleratiestructuur waarbij de opdeling volgens objecten gebeurt is de *Bounding Volume Hierarchy* (BVH). Opdeling volgens ruimte betekent dat de ruimte in het volume wordt opgedeeld in meerdere delen. Na deze opdeling overlappen deze nieuwe volumes niet, maar een object ligt nu in minstens één (en mogelijks in meerdere) kindvolume(s). De BSP boom deelt de ruimte van het volume steeds op in twee kindvolumes.

2.2 BSP bomen

De BSP boom deelt de ruimte van het omhullend volume recursief op door te splitsen volgens een willekeurig georiënteerd vlak totdat aan een bepaalde stopconditie voldaan wordt. Het feit dat de BSP boom volgens willekeurig georiënteerde vlakken splitst, is zowel een voor- als nadeel. Het zorgt ervoor dat de BSP boom zich heel goed kan aanpassen aan de scene en alle niet-intersecterende driehoeken in principe kan scheiden (zie figuur 2.2). Het zorgt er echter ook voor dat het heel moeilijk is om deze goede splitsingsvlakken te vinden. In de praktijk wordt vaak een specifieke soort BSP boom gebruikt: de Kd boom.

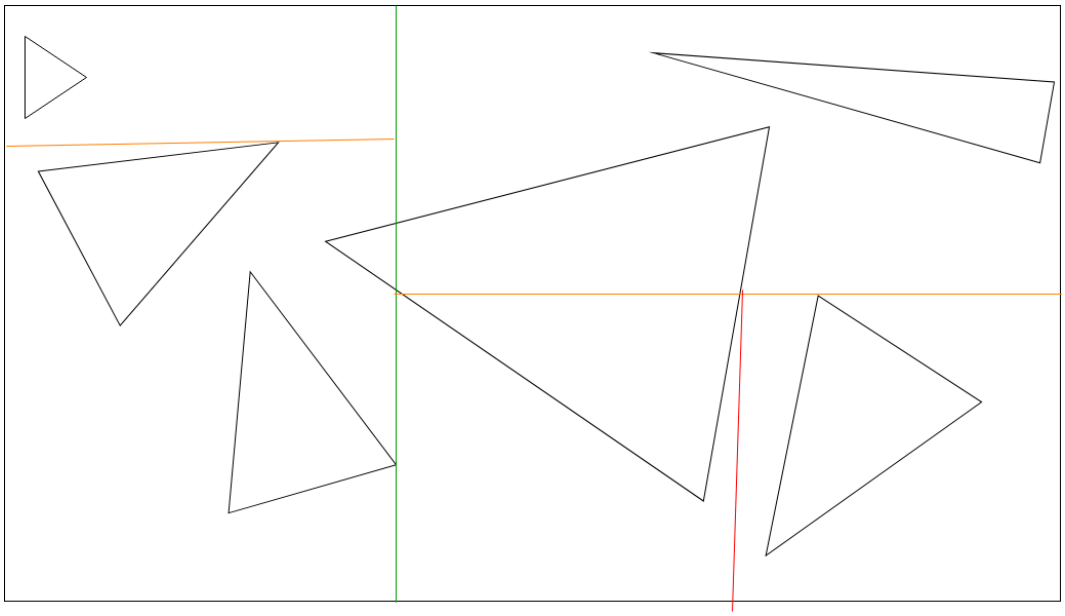


Figuur 2.2: Splitsingskracht BSP boom - Een 2D voorbeeld dat toont dat alle (niet-intersecterende) driehoeken gesplitst kunnen worden door een BSP boom.

Het bouwen van de boom Het splitsingsvlak dat een knoop opdeelt in twee delen, kan een grote impact hebben op het aantal doorkruisstappen en het aantal driehoekintersecties. Het bouwalgoritme moet voor elke knoop het beste splitsingsvlak bepalen en als splitsen volgens dat vlak voordelig is, de knoop opsplitsen in twee kindknopen. Heuristieken voorspellen hoe goed een splitsing volgens een bepaald splitsingsvlak is. Het algoritme stopt met het splitsen van de knoop als een stopconditie bereikt wordt. Deze stopconditie kan een maximale diepte zijn, of het feit dat er geen nuttig splitsingsvlak gevonden wordt of dat het aantal driehoeken in de knoop lager is dan een vastgelegde limiet, bijvoorbeeld als er maar één driehoek in de knoop zit.

2.3 Kd Bomen

De Kd boom is een BSP boom waarbij alle splitsingsvlakken asgealigneerd zijn. Hiermee wordt bedoeld dat de splitsingsrichting (de normaal op het splitsingsvlak) evenwijdig is aan één van de drie hoofdassen. Dit zorgt ervoor dat elke knoop van de boom een asgealigneerde balk voorstelt. Het doorkruisen van een knoop uit een Kd boom is daardoor goedkoper dan het doorkruisen van een knoop uit een algemene BSP boom. De reden hiervoor is dat het goedkoper is om het intersectiepunt van een straal en een asgealigneerd vlak te vinden (verschil en vermenigvuldiging) dan het intersectiepunt van een straal en een willekeurig vlak (twee scalaire producten en deling). Door de beperking op mogelijke splitsingsvlakken kunnen Kd bomen zich minder goed aanpassen aan de scene. Ze kunnen bijvoorbeeld niet alle niet-intersecterende driehoeken scheiden. Figuur 2.3 toont een situatie waarin de Kd



Figuur 2.3: Splitsingskracht Kd boom - Een 2D voorbeeld dat toont dat niet alle (niet-intersecterende) driehoeken gesplitst kunnen worden door de asgealigneerde vlakken van de Kd boom. De twee driehoeken linksonder (en rechtsboven) kunnen niet gesplitst worden omdat zowel hun projecties op de x-as, als hun projecties op de y-as overlappen.

boom niet alle driehoeken kan scheiden.

Ondanks dit nadeel, worden in de praktijk Kd bomen verkozen boven algemene BSP bomen. Ize et al [IWP08] geven drie (volgens hun foute) ruimverspreide aannames over algemene BSP bomen die ervoor zorgen dat Kd bomen hoger ingeschat worden. Ten eerste wordt er aangenomen dat algemene BSP bomen nooit sneller kunnen zijn dan Kd bomen omdat het doorkruisen van een BSP boom beduidend duurder is. De beperkte precisie van vlottende komma getallen wordt gezien als het tweede probleem omdat het BSP bomen numeriek onstabiel zou maken. De derde aanname is dat door de grotere flexibileit (= grotere verzameling van mogelijke splitsingsvlakken) het veel moeilijker is om een BSP boom te bouwen dan om een Kd boom te bouwen.

Voor een Kd-boom is de Surface Area Heuristiek (SAH) de beste gekende methode om bomen met minimale verwachtte kost te bouwen. De SAH is oorspronkelijk ontwikkeld door Goldsmith en Salmon [GS87] voor de BVH en later aangepast door MacDonald en Booth [MB90] voor de Kd boom. De SAH schat de kost van een splitsingsvlak door te veronderstellen dat beide kindknopen, bladknopen worden en dat de kost om een bladknoop te intersecteren afhankelijk is van het aantal driehoeken en de oppervlakte van het omhullend volume. De verwachte kost $\mathcal{K}$ om een knoop p te splitsen in kindknopen l en r is dan: $\mathcal{K}_p = \frac{\mathcal{SA}(l)}{\mathcal{SA}(p)} * n_l * \mathcal{K}_i + \frac{\mathcal{SA}(r)}{\mathcal{SA}(p)} * n_r * \mathcal{K}_i + \mathcal{K}_d$ met kost $\mathcal{K}$, oppervlakte $\mathcal{SA}()$ en aantal driehoeken n. De subscripts i en d staan

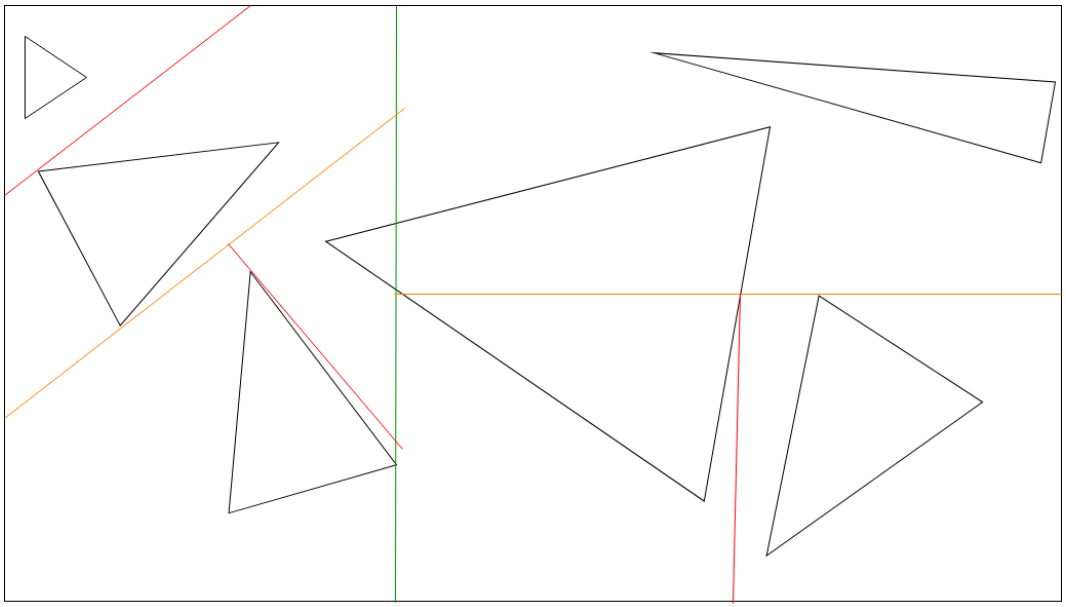
voor respectievelijk intersectie en doorkruising. De kost van het beste splitsingsvlak (laagste kost) wordt dan vergeleken met de kost voor de knoop als die niet gesplitst zou worden: $n * \mathcal{K}_i$. Als splitsen voordelig is, wordt de knoop opgesplitst volgens dit splitsingsvlak, anders wordt de knoop een bladknoop.

Alle mogelijke asgealigneerde splitsingsvlakken testen is ondoenbaar. Havran [Hav00] toonde aan dat de kost van de SAH langs een richting ofwel lineair stijgt ofwel linear daalt tussen eindpunten (de minimale en maximale waarde) van de driehoeken langs die richting. Dit impliceert dat het beste splitsingsvlak door een eindpunt van een driehoek gaat. Het is dus voldoende om enkel de splitsingsvlakken te bekijken die door de eindpunten van de driehoeken gaan. Hieruit volgt dat er voor elke richting in een knoop met n driehoeken, $2n$ splitsingsvlakken bekeken moeten worden. Aangezien een Kd boom drie richtingen bekijkt, is het bij een Kd boom voldoende om $6n$ splitsingsvlakken te bekijken. Om de SAH kost te berekenen voor een splitsingsvlak moet het aantal driehoeken dat (deels) aan de ene kant van het splitsingsvlak ligt (n_l) en het aantal driehoeken dat (deels) aan de andere kant ligt (n_r) gekend zijn. Om deze aantallen efficiënt te kunnen berekenen, worden de eindpunten van de driehoeken in de knoop gesorteerd volgens hun projectie op de splitsingsrichting. Een veegbeweging (*sweep*) over deze gesorteerde lijst kan dan in lineaire tijd de SAH kost van alle splitsingsvlakken langs de splitsingsrichting berekenen.

2.4 $RBSP$ bomen

De Restricted Binary Space Partitioning ($RBSP$) boom is een uitbreiding van de Kd boom die toelaat om knopen op te splitsen volgens splitsingsrichtingen uit een vaste verzameling van k richtingen. Het omhullend volume van een $RBSP$ knoop is hierdoor geen balk maar een Discreet Geöriënteerde Polytoop met k richtingen: een k-DOP. Zowel Klosowski et al [KHM+98] als Zachmann [Zac98] hebben hiërarchiën van k-DOPs gebruikt binnen het domein van botsherkenning (*collision detection*). De $RBSP$ boom is voor het eerst gebruikt in *ray tracing* door Kammaje en Mora [KM07] en verder onderzocht door Budge et al [BCNJ08]. Aangezien de splitsingsrichtingen niet asgealigneerd moeten zijn, lijkt de $RBSP$ boom meer op de algemene BSP boom dan de Kd boom. Net als de Kd boom kan de $RBSP$ boom niet alle niet-intersecterende driehoeken scheiden. Figuur 2.4 toont een situatie waarin de $RBSP$ boom niet alle driehoeken kan scheiden.

Een belangrijke ontwerpbeslissing bij $RBSP$ bomen is het kiezen van de verzameling splitsingsrichtingen. Volgens Budge et al [BCNJ08] werkt in principe elke verzameling met minstens drie niet-evenwijdige richtingen, maar is het gewenst om richtingen te kiezen die samen de eenheidsbol goed bedekken. Kammaje en Mora [KM07] genereren punten langs een spiraal op gelijk verdeelde breedtegraden volgens de gouden ratio. Budge et al [BCNJ08] gebruiken de verzamelingen die ze de standaard richtingen van Klosowski et al [KHM+98] noemen. Deze richtingen



Figuur 2.4: Splitsingskracht $RBSP$ boom - Een 2D voorbeeld dat toont dat niet alle (niet-intersecterende) driehoeken gesplitst kunnen worden door de vlakken van de $RBSP$ boom. De $RBSP$ boom kan de driehoeken wel beter splitsen dan de Kd boom in figuur 2.3. De twee driehoeken rechtsboven kunnen niet gesplitst worden omdat de discrete verzameling van k richtingen, geen richting bevat waarlangs deze driehoeken gesplitst kunnen worden.

gebruiken enkel waarden uit de verzameling $\{-1, 0, 1\}$ als x, y en z coördinaat.

Kammaje en Mora [KM07] toonden aan dat de SAH ook gebruikt kan worden voor $RBSP$ bomen. Net zoals bij de Kd boom moeten voor elke splitsingsrichting de eindpunten van de driehoeken gesorteerd worden en $2n$ splitsingsvlakken bekeken worden. In totaal bekijkt de $RBSP$ boom dus $2kn$ splitsingsvlakken. Het bouwen van de $RBSP$ boom is computationeel duurder dan het bouwen van de Kd boom door het grotere aantal richtingen en het feit dat het splitsen en het berekenen van de oppervlakte van een k-DOP computationeel duurder is dan het splitsen en het berekenen van de oppervlakte van een balk. Budge et al [BCNJ08] vonden een oplossing voor dit tweede probleem door een methode te ontwikkelen waarmee de kind k-DOPs en hun oppervlaktes incrementeel berekend kunnen worden tijdens het sweepen.

De huidige $RBSP$ implementaties zijn superieur ten opzichte van de Kd boom in termen van het aantal driehoekintersecties en het aantal doorkruisingen, maar moeten onderdoen in termen van rendertijd. Ize et al [IWP08] menen dat de $RBSP$ boom de slechtste eigenschappen van zowel de Kd boom als de algemene BSP boom overneemt. Net als de Kd boom kan het geen rekening houden met de lokale geometrie en zich dus niet aanpassen aan complexe geometrie. Net als bij de algemene BSP boom moet de intersectie met een willekeurig georiënteerd vlak

berekend worden om knopen te doorkruisen. Budge et al [BCNJ08] tonen aan dat deze tweede eigenschap minder erg is bij de $RBSP$ boom dan bij de algemene BSP boom omdat het mogelijk is om alle scalaire producten op voorhand (en dus maar één keer) te berekenen.

2.5 Algemene BSP Bomen in de praktijk

Ize et al [IWP08] ontwikkelden de eerste algemene BSP boom voor *ray tracing*. In tegenstelling tot de Kd en $RBSP$ boom kan BSP_{IZE} wel splitsingsvlakken kiezen afhankelijk van de geometrie. De BSP_{IZE} boom gebruikt de splitsingsvlakken van de Kd boom en elke driehoek in de knoop bepaalt nog vier extra splitsingsvlakken. Deze vier vlakken zijn: het vlak van de driehoek zelf (autopartitie) en de drie vlakken loodrecht op de driehoek door elk van de drie zijden. Merk op dat deze laatste vier vlakken rekening houden met de geometrie en niet mogelijk zouden zijn bij een $RBSP$ boom. Het omhullend volume van de knopen bij een BSP boom is een convex veelvlak. Voor de eenvoud wordt de omhullende balk gebruikt als omhullend volume voor de wortelknoop. Dit heeft als extra voordeel dat er een zeer snelle test is voor stralen die niets raken.

De SAH kan ook gebruikt worden voor algemene BSP bomen. De BSP_{IZE} boom controleert de $6n$ Kd splitsingsvlakken door te sweepen zoals bij de Kd en $RBSP$ boom. Het splitsen in kindknopen en de SA berekening is duurder aangezien het omhullend volume een convex veelvlak is. De BSP_{IZE} boom controleert ook vier extra vlakken per driehoek. Voor deze vlakken is het berekenen van de SAH kost moeilijker omdat het aantal driehoeken links en rechts van het vlak bepaald moet worden. Om dit efficiënt te bepalen, gebruiken Ize et al [IWP08] de BVH als hulpstructuur. In elke knoop wordt een BVH boom gebouwd en die wordt bij elke niet-Kd splitsing gebruikt om het aantal driehoeken in beide kindknopen te bepalen. Hierdoor is het bouwen van de BSP_{IZE} boom computationeel beduidend duurder dan het bouwen van $RBSP$ en Kd bomen. De inwendige knopen van de boom kunnen worden opgedeeld in twee groepen: de knopen die gesplitst worden door een Kd vlak en de knopen die gesplitst worden door een geometrie-afhankelijk BSP vlak. Met Kd knopen worden de knopen uit de eerste groep bedoeld, met BSP knopen die uit de tweede groep.

Ize et al [IWP08] verminderen het probleem van de tragere BSP boom doorkruising door Kd knopen apart te behandelen bij het doorkruisen. Als een Kd knoop doorkruist wordt, kan de intersectie met het splitsingsvlak berekend worden als de intersectie van de straal met een asgealigneerd vlak. De boom die deze optimalisatie toepast, wordt aangeduid met BSP^{Kd}_{IZE}. Het feit dat Kd knopen goedkoper zijn om te doorkruisen dan BSP knopen, zorgt ervoor dat er voor deze twee soorten knopen een aparte doorkruiskost gebruikt moet worden in de SAH: $\mathcal{K}_{d,BSP}$ en $\mathcal{K}_{d,Kd}$. Deze kosten rechtstreeks in de SAH gebruiken, zorgt ervoor dat voornamelijk BSP knopen gecreëerd worden. De reden hiervoor is dat de intersectieterm van

de SAH lineair varieert in het aantal driehoeken en die intersectieterm domineert snel de constante doorkruisterm waardoor BSP splitsingen, die de driehoeken beter splitsen, gekozen worden. Deze lineaire afhankelijkheid is geen probleem als de SAH enkel moet beslissen of een knoop gesplitst wordt of niet, maar wel als het moet bepalen of een knoop al dan niet gesplitst wordt en of dit best door een goedkoep Kd vlak of door een duur BSP vlak gedaan wordt. Ize et al [IWP08] lossen dit probleem op door ook $\mathcal{K}_{d,BSP}$ lineair te laten variëren in het aantal driehoeken: $\mathcal{K}_{d,BSP} = \alpha * \mathcal{K}_i * (n-1) + \mathcal{K}_{d,Kd}$ waarbij α een instelbare parameter is. Als er na het testen van alle splitsingsvlakken geen splitsingsvlak gevonden is dat zorgt dat de kost om te splitsen lager is dan de kost om een bladknoop te creëren, worden alle BSP vlakken opnieuw getest, maar deze keer met een constante $\mathcal{K}_{d,BSP}$. Dit blijkt veel beter te werken dan een constante kost. Merk op dat deze optimalisatie gebruikt kan worden bij elke BSP boom die de Kd richtingen bekijkt. Aangezien de Kd richtingen bij alle huidige $RBSP$ implementaties steeds in de verzameling splitsingsrichtingen zitten, kan de optimalisatie ook gebruikt worden om een $RBSP^{Kd}$ boom te bouwen.

De BSP^{Kd}_{IZE} boom is in veel scenes even snel of zelfs sneller dan de Kd boom. De niet geöptimaliseerde BSP_{IZE} boom is voor sommige scenes ook al beter dan de Kd boom. De winst wordt behaald door het lagere aantal straal driehoek intersecties. Het aantal knoopdoorkruisingen stijgt echter, waardoor de totale verbetering wordt afgezwakt. De BSP^{Kd}_{IZE} boom toont veel minder variatie in rendertijd per pixel dan de Kd boom die duidelijke hotspot regio's heeft. Dit toont aan dat de BSP boom beter kan omgaan met complexe geometrie.

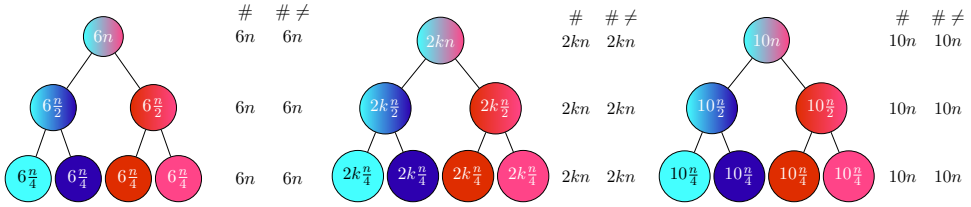
2.6 Vergelijking

Bouwen en intersecteren Tabel 2.1 vergelijkt de hierboven besproken BSP bomen. Hoe algemener de BSP boom, hoe complexer het omhullend volume en hoe nauwer de boom kan aansluiten aan de scene. Als voor elke driehoek in de knoop, dezelfde vlakken bekeken worden, kan sweeping toegepast worden om efficiënt de SAH kosten te berekenen. Als sweeping niet kan, zoals bij de geometrie-afhankelijke vlakken bij de BSP_{IZE} boom, is het berekenen van de SAH kosten moeilijker en moet een hulpstructuur gebruikt worden. Voor elk van deze soorten BSP boom kan de optimalisatie met de snelle Kd knoop doorkruising gebruikt worden. Voor de $RBSP$ boom is dit nog nooit gedaan.

Aantal verschillende splitsingsvlakken Eén van de belangrijkste eigenschappen van een BSP algoritme is zijn vermogen om zich aan te passen aan complexe geometrie. Het totaal aantal verschillende splitsingsvlakken dat bekeken wordt tijdens het bouwen van de boom, draagt bij tot dit vermogen. Voor een scene met n driehoeken, bekijkt een Kd boom $6n$ verschillende splitsingsvlakken. Elk niveau van de boom bekijkt exact dezelfde splitsingsvlakken. Figuur 2.5a toont dit visueel. Een $RBSP$ boom met k discrete richtingen doet hetzelfde, maar bekijkt $2kn$ verschillende splitsingsvlakken. Figuur 2.5b toont dit visueel. De BSP_{IZE} boom gebruikt $10n$

	Kd	$RBSP$	BSP_{IZE}
Omhullend volume	Asgealigneerde balk	$k-DOP$	Convex veelvlak
Sweeping	Ja	Ja	Deels
Geometrie afhankelijke vlakken	Nee	Nee	Ja
Snelle Kd doorkruising	Kd	$RBSP^{Kd}$ [1]	BSP^{Kd}_{IZE}
# splitsingsvlakken per niveau	$6n$	$2kn$	$10n$
totaal # $\neq$ splitsingsvlakken	$6n$	$2kn$	$10n$

Tabel 2.1: Vergelijking van de bestaande soorten BSP bomen - Deze tabel vat een aantal belangrijke eigenschappen van de bestaande soorten BSP bomen samen.



(a) Kd boom (b) $RBSP$ boom (c) BSP_{IZE} boom

Figuur 2.5: Splitsingsvlakken Kd, $RBSP$ en BSP_{IZE} - Per niveau het aantal (#) splitsingsvlakken en het totaal aantal verschillende (# $\neq$) splitsingsvlakken gebruikt in bovenliggende niveaus.

verschillende splitsingsrichtingen, $6n$ voor de Kd richtingen en n voor elk van de vier andere richtingen. De BSP_{IZE} boom bekijkt op elk niveau ook exact dezelfde splitsingsvlakken en is dus niet zo algemeen als een BSP boom kan zijn. Figuur 2.5c toont dit visueel. De reden hiervoor is dat de gebruikte BSP splitsingsvlakken enkel afhankelijk zijn van de driehoeken zelf en niet van welke driehoeken samen in een knoop zitten. Geen van bovenstaande bomen gebruikt de volledige vrijheid van een BSP boom om op elk niveau andere splitsingsvlakken te nemen en op die manier beperken ze hun vermogen om zich aan te passen aan complexe geometrie. Driehoeken die in de wortelknoop door geen enkel vlak van elkaar kunnen worden gesplitst, kunnen nooit van elkaar gesplitst worden. Het volgende hoofdstuk introduceert nieuwe BSP bomen die deze vrijheid wel benutten.

[1] De $RBSP^{Kd}$ boom is nog nooit geïmplementeerd.

Hoofdstuk 3

BSP_{SWEEP}

In dit hoofdstuk wordt een nieuwe soort BSP boom besproken: de BSP_{SWEEP} boom. Eerst wordt het nut van het opsplitsen van bladknopen in kleinere bladknopen wiskundig besproken. Het algemene idee van de BSP_{SWEEP} boom wordt dan besproken en daarna worden een aantal specifieke versies van de BSP_{SWEEP} (BSP_{random}, BSP_{wn} en BSP_{cn}) besproken.

3.1 Probleemstelling

Het doel van acceleratiestructuren is om de totale tijd nodig om een scene te renderen, te minimaliseren. Deze rendertijd T_{render} bestaat uit twee grote factoren: de tijd gespendeerd aan het intersecteren met driehoeken (de intersectietijd) en de tijd gespendeerd aan het doorkruisen van de boom (de doorkruistijd). De totale intersectietijd $T_{i,totaal}$ is afhankelijk van het aantal driehoeken n_b in de geïntersecteerde bladknopen b en het aantal keer D_b dat elk van deze bladknopen doorkruist wordt. De totale doorkruistijd $T_{d,totaal}$ is afhankelijk van het aantal doorkruisingen $D_{inwendig}$ van inwendige knopen. Formule 3.1 beschrijft dit wiskundig met T_i de tijd nodig voor één straal-driehoek intersectie en T_d de tijd nodig om één knoop te doorkruisen.

$$T_{render} \sim T_{i,totaal} + T_{d,totaal} = T_i * \sum_{b}^{B} n_b * D_b + T_d * D_{inwendig} \tag{3.1}$$

Stel dat één kindknoop b_j uit de boom wordt opgesplitst in twee kleinere kindknopen b_{j1} en b_{j2} die elk de helft van de driehoeken krijgen. Deze opsplitsing is voordelig als aan voorwaarde 3.2 voldaan is. Deze voorwaarde drukt uit dat knoop b_j nu een inwendig knoop wordt en dus niet meer zorgt voor een intersectietijd en wel voor een doorkruistijd en dat de nieuwe kindknopen zorgen voor een intersectietijd. De voorwaarde is equivalent aan voorwaarden 3.3 en 3.4.

$$T_{render} - T_i * n_{b_j} * D_{b_j} + T_d * D_{b_j} + \frac{n_{b_j}}{2} * (D_{b_{j1}} + D_{b_{j2}}) * T_i \leq T_{render} \tag{3.2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{n_{b_j}}{2} * (D_{b_{j1}} + D_{b_{j2}}) * T_i \leq (T_i * n_{b_j} - T_d) * D_{b_j} \tag{3.3}$$

$$\Leftrightarrow D_{b_{j1}} + D_{b_{j2}} \leq 2D_{b_j} * (1 - \frac{T_d}{n_{b_j} * T_i}) \tag{3.4}$$

De som in het linkerlid van voorwaarde 3.4 is minstens gelijk aan D_{b_j} aangezien elke doorkruising van b_j voor minstens één doorkruising door een kindknoop zorgt. Analoog kan worden ingezien dat de maximale waarde voor deze som gelijk is aan $2D_{b_j}$ aangezien elke doorkruising van b_j voor maximaal twee doorkruisingen door een kindknoop kan zorgen. Hieruit volgt ongelijkheid 3.5.

$$D_{b_j} \leq D_{b_{j1}} + D_{b_{j2}} \leq 2D_{b_j} \tag{3.5}$$

In het algemeen geval geldt dat $D_{b_{j1}} + D_{b_{j2}} = (2 * (1 - \alpha) + \alpha)D_{b_j}$ waarbij α het procentueel aantal doorkruisingen is dat door slechts één van de twee kindknopen gaat. In dit geval leidt voorwaarde 3.4 tot voorwaarde 3.6.

$$(2 * (1 - \alpha) + \alpha)D_{b_j} \leq 2D_{b_j} - \frac{2D_{b_j}T_d}{n_{b_j}T_i} \Leftrightarrow 2 - \alpha \leq 2 - \frac{2T_d}{n_{b_j}T_i} \Leftrightarrow T_d \leq \frac{\alpha n_{b_j}}{2}T_i \tag{3.6}$$

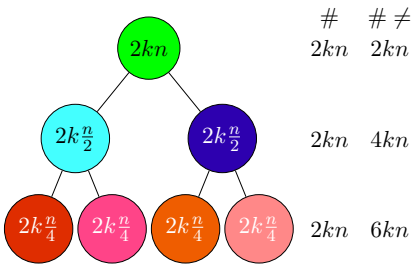
In het ideale geval ($\alpha = 1$) leidt voorwaarde 3.6 tot $T_d \leq \frac{n_{b_j}}{2}T_i$. Het opsplitsen van een knoop met twee elementen, kan hierdoor pas voordelig zijn als de doorkruistijd kleiner is dan de intersectietijd. Aangezien de doorkruistijd in de realiteit beduidend kleiner is dan de intersectietijd, is het in dit ideale geval altijd voordelig om een kindknoop op te splitsen, ongeacht het aantal driehoeken in de knoop. In het slechtste geval ($\alpha = 0$) kan aan voorwaarde 3.6 enkel voldaan zijn als de doorkruistijd gelijk is aan nul. Dit is onmogelijk waardoor opsplitsen nooit voordelig kan zijn in dit geval.

Het is moeilijk om de waarde van α te voorspellen, deze is namelijk afhankelijk van de exacte stralen die tijdens het renderen gevolgd worden, de specifieke driehoeken in de knoop en het splitsingsvlak. Voorwaarde 3.6 toont dat de kans dat splitsen voordelig is, lineair stijgt met n_{b_j}. De voorwaarde toont ook dat het splitsen van een knoop met twee driehoeken, voordelig is wanneer de doorkruistijd α keer kleiner is dan de intersectietijd. Intuitief lijkt het logisch dat hier in het algemeen aan voldaan is. Hieruit kan worden afgeleid dat het altijd beter is om bladknopen met meer dan één driehoek op te splitsen in twee kleinere bladknopen.

De volgende secties bespreken nieuwe BSP bomen die gebruik maken van de vrijheid om op elk niveau van de boom andere splitsingsvlakken te gebruiken en op die manier meer bladknopen kunnen opsplitsen in kleinere bladknopen.

3.2 Algemeen idee

De BSP_{SWEEP} boom is een algemene BSP boom waarbij in elke knoop k richtingen bepaald worden en alle $2n$ splitsingsvlakken langs elk van deze richtingen worden bekeken door te sweepen. Deze k richtingen kunnen verschillend zijn voor elke knoop en kunnen gekozen worden afhankelijk van de lokale geometrie. De $RBSP$ boom is



Figuur 3.1: Splitsingsvlakken BSP_{random} - Per niveau het aantal (#) splitsingsvlakken en het totaal aantal verschillende (# ≠) splitsingsvlakken gebruikt in bovenliggende niveaus bij de BSP_{random} boom.

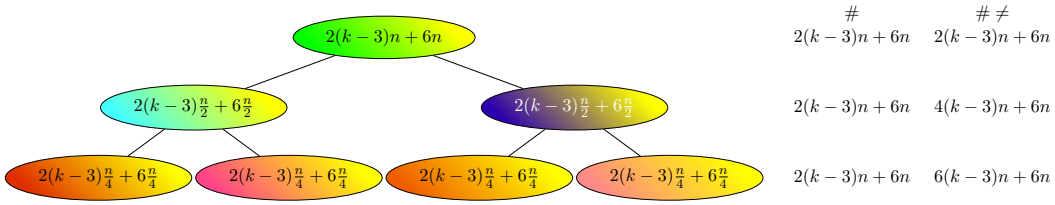
een BSP_{SWEEP} boom waarbij de gekozen richtingen in elke knoop hetzelfde zijn. De BSP_{SWEEP} boom heeft drie belangrijke ontwerpbeslissingen. De belangrijkste ontwerpbeslissing bij de BSP_{SWEEP} boom is de methode die gebruikt wordt om de k richtingen te bepalen. Een tweede belangrijke ontwerpbeslissing is de waarde van k. De derde belangrijke ontwerpbeslissing sluit aan bij de eerst en gaat over het al dan niet gebruiken van de Kd richtingen als de eerste drie van de k richtingen.

3.3 Gebaseerd op random richtingen

De simpelste BSP_{SWEEP} boom, de BSP_{random} boom, bepaalt in elke knoop k random richtingen onafhankelijk van de geometrie. De richtingen worden uniform op de hemisphere gegenereerd. Het idee achter deze boom is dat het nuttiger kan zijn om driehoeken via veel verschillende vlakken te proberen splitsen, dan om ze steeds met dezelfde vlakken te proberen splitsen. Als de driehoeken in de scene uniform verdeeld zijn, dan is de kans dat twee driehoeken volgens een willekeurige richting gesplitst kunnen worden, even groot als de kans dat ze door een Kd richting gesplitst kunnen worden.

Als de BSP_{random} boom perfect gebalanceerd is, worden in elk niveau $2kn$ verschillende splitsingsvlakken bekeken. Deze splitsingsvlakken zijn verschillend op elk niveau, zodat in totaal $2knlog(n)$ verschillende splitsingsvlakken bekeken worden. Figuur 3.1 toont dit visueel. De BSP_{random} boom probeert elke driehoek via gemiddeld $2klog(n)$ ($\mathcal{O}(log(n))$) vlakken te splitsen van de andere driehoeken, in tegenstelling tot de bestaande bomen die dit maximaal met $\mathcal{O}(1)$ vlakken proberen.

De Kd richtingen zijn in praktische scenes vaak beter dan willekeurige richtingen omdat ze loodrecht op elkaar staan waardoor ze de hemisphere goed bedekken en omdat scenes die door de mens gemaakt worden, vaak asgealigneerde delen bevatten. Dit geeft aanleiding tot een boom die als eerste drie richtingen steeds de Kd richtingen kiest en enkel de overige $k-3$ richtingen random genereert: de $BSP_{random+}$ boom. Een extra voordeel is dat de snellere Kd knoop doorkruising gebruikt kan worden.



Figuur 3.2: Splitsingsvlakken $BSP^{(Kd)}_{random+}$ - Per niveau het aantal (#) splitsingsvlakken en het totaal aantal verschillende (# $\neq$) splitsingsvlakken gebruikt in bovenliggende niveaus bij de $BSP^{(Kd)}_{random+}$ boom.

Een BSP_{random} boom die altijd de Kd richtingen gebruikt en de doorkruising van Kd knopen optimaliseert, wordt aangeduid als $BSP^{Kd}_{random+}$. Als de $BSP^{(Kd)}_{random+}$ boom perfect gebalanceerd is, worden in elk niveau $2kn$ splitsingsvlakken bekeken. Van deze $2kn$ zijn er $6n$ die hergebruikt worden, de vlakken volgens de Kd richtingen. Dit zorgt voor $2(k-3)n$ verschillende splitsingsvlakken per niveau, zodat in totaal $2(k-3)nlog(n)+6n$ verschillende splitsingsvlakken bekeken worden. Figuur 3.2 toont dit visueel. De $BSP^{(Kd)}_{random+}$ boom probeert elke driehoek via gemiddeld $\mathcal{O}(log(n))$ vlakken te splitsen van de andere driehoeken, net als de BSP_{random} boom.

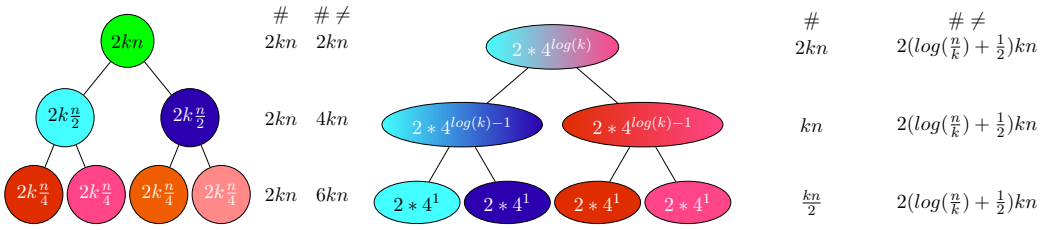
3.4 Gebaseerd op normalen

De kracht van de BSP_{SWEEP} boom ligt in het feit dat er gebruik gemaakt kan worden van de lokale geometrie om de splitsingsrichtingen te bepalen. De normalen van de driehoeken in een knoop bevatten informatie over de oriëntatie van de driehoeken. De autopartitie vlakken van Ize et al maken ook gebruik van de normalen, maar de normaal van een driehoek wordt enkel voor die driehoek zelf gebruikt.

3.4.1 Willekeurige normaal

De BSP_{wn} boom is een BSP_{SWEEP} boom waarbij in elke knoop de normalen van k willekeurige driehoeken gekozen worden als splitsingrichtingen. Als er k of minder driehoeken in de knoop zitten, worden alle normalen als splitsingrichting genomen. In het algemeen zijn er n driehoeken met n verschillende normalen waardoor er in totaal $2n^2$ mogelijke splitsingsvlakken zijn. Figuur 3.3a toont het aantal splitsingsvlakken gebruikt per knoop in de bovenste niveaus van de boom. Deze figuur is identiek aan de figuur voor de BSP_{random} boom.

Voor de onderste $log(k)$ niveaus is er echter een verschil, omdat er dan k of minder driehoeken in elke knoop zitten. In de onderste $log(k)$ niveaus worden er in elke knoop $2n_m^2$ splitsingsvlakken bekeken, met $n_m <= k$. Een knoop op het m^{de} laagste niveau (met $m \leq log(k)$) bevat $\frac{n}{2^{log(n)-m}}$ driehoeken waardoor er $2n_m^2 = 2*(\frac{n}{2^{log(n)-m}})^2 = 2*(2^m)^2 = 2*4^m$ splitsingen gebeuren in deze knoop. Formule



(a) Bovenste drie niveaus (b) Onderste $log(k)$ niveaus

Figuur 3.3: Splitsingsvlakken BSP_{wn} - Per niveau het aantal (#) splitsingsvlakken en het totaal aantal verschillende (# ≠) splitsingsvlakken gebruikt in bovenliggende niveaus bij de BSP_{random} boom.

3.7 toont dat het totaal aantal splitsingsvlakken bekeken op het $log(k) - j^{de}$ onderste niveau gelijk is aan $\frac{2kn}{2^j}$. Dit aantal is berekend als het aantal splitsingsvlakken per knoop $(2 * 4^{log(k)-j})$ vermenigvuldigd met het aantal knopen $(2^{log(n)-log(k)+j})$ op het niveau.

$$2 * 4^{log(k)-j} * 2^{log(n)-log(k)+j} = 2 * 2^{log(k)+log(n)-j} = \frac{2 * 2^{log(kn)}}{2^j} = \frac{2kn}{2^j} \tag{3.7}$$

In de bovenste $log(n) - log(k) = log(\frac{n}{k})$ niveaus worden $2log(\frac{n}{k})kn$ verschillende splitsingsvlakken bekeken. Het niveau eronder gebruikt nog kn nieuwe splitsingsvlakken zodat in totaal $2(log(\frac{n}{k}) + \frac{1}{2})kn$ verschillende splitsingsvlakken worden gebruikt. Figuur 3.3b toont dit visueel. Als de boom perfect gebalanceerd is, probeert de BSP_{wn} boom elke driehoek via gemiddeld $2klog(\frac{n}{k} + \frac{1}{2})$ $(\mathcal{O}(log(n)))$ vlakken te splitsen van de andere driehoeken. Dit aantal is minder dan bij de BSP_{random} boom, die ook in de lagere niveaus steeds k splitsingrichtingen genereert.

Net als bij de BSP_{random} boom kan een versie van de BSP_{wn} boom gemaakt worden die als eerste drie richtingen steeds de Kd richtingen kiest en enkel voor de overige $k - 3$ richtingen willekeurige normalen selecteert: de BSP_{wn+} boom. Een BSP_{wn} boom die altijd de Kd richtingen gebruikt en de doorkruising van Kd knopen optimaliseert, wordt aangeduid als BSP^{Kd}_{wn+}. Als de $BSP^{(Kd)}_{wn+}$ boom perfect gebalanceerd is, worden in totaal $2(log(\frac{n}{k-3}) + \frac{1}{2})(k-3)n + 6n$ verschillende splitsingsvlakken bekeken. De analyse hiervoor is analoog aan de analyse voor $BSP^{(Kd)}_{random+}$.

3.4.2 Geclusterde normalen

Bovenstaande BSP_{SWEEP} bomen bevatten een grote niet-deterministische factor. De BSP_{cn} boom gebruikt het K-means clustering algoritme om deterministischere richtingen te bepalen. De normalen van de driehoeken in een knoop worden geclusterd in k clusters en de centra van deze clusters worden gebruikt als richtingen voor de BSP_{SWEEP} boom. Als er k of minder driehoeken in de knoop zitten, worden alle normalen als splitsingsrichting genomen, net zoals bij de BSP_{wn} boom. In

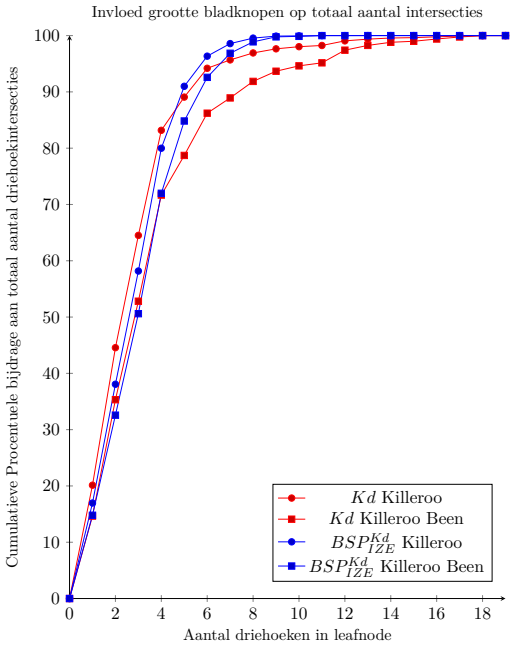
	BSP_{random}	BSP_{wn}	BSP_{cn}
Omhullend volume	Convex veelvlak	Convex veelvlak	Convex veelvlak
Sweeping	Ja	Ja	Ja
Geometrie afhankelijke vlakken	Nee	Ja	Ja
Snelle Kd doorkruising	$BSP^{Kd}_{random+}$	BSP^{Kd}_{wn+}	BSP^{Kd}_{cn+}
# splitsingsvlakken per niveau	$2kn$	$2kn^*$	$2kn^*$
totaal # $\neq$ splitsingsvlakken	$2knlog(n)$	$2(log(\frac{n}{k}) + \frac{1}{2})kn$	$2(log(\frac{n}{k}) + \frac{1}{2})kn$

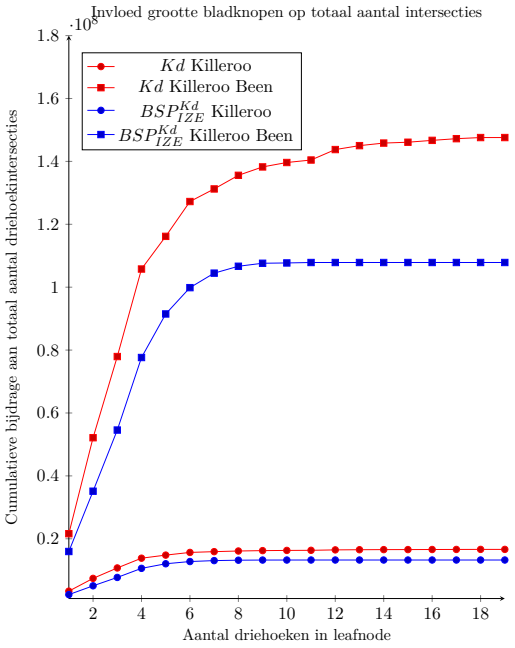
Tabel 3.1: Vergelijking van de nieuwe soorten BSP bomen - Deze tabel vat een aantal belangrijke eigenschappen van de nieuwe soorten BSP bomen samen. *De onderste niveaus van BSP_{wn} en BSP_{random} bekijken minder dan $2kn$ splitsingsvlakken.

tegenstelling tot de BSP_{wn} is het voor de BSP_{cn} moeilijker om het totaal aantal mogelijke splitsingsvlakken te bepalen. In het algemeen kan elke clustering verschillende richtingen geven waardoor er oneindig veel mogelijke splitsingsrichtingen mogelijk zijn. De BSP_{cn} boom is zeer gelijkaardig aan de BSP_{wn} boom waardoor het totaal aantal verschillende splitsingsvlakken die gebruikt worden, gelijk is. Analoog bestaan ook de BSP_{cn+} en BSP^{Kd}_{cn+} bomen.

3.5 Vergelijking

Tabel 3.1 vergelijkt de hierboven besproken BSP_{SWEEP} bomen. Alle drie bomen zijn algemene BSP bomen die een convex veelvlak hebben als omhullend volume. De BSP_{SWEEP} bomen zijn ontworpen om sweeping te ondersteunen en zo efficiënt de SAH kosten te kunnen berekenen, zonder hulpstructuren. De BSP_{random} boom is onafhankelijk van de lokale geometrie, de twee andere bomen bepalen hun splitsingsvlakken afhankelijk van de lokale geometrie. De BSP_{SWEEP} bomen zijn makkelijk uit te breiden naar BSP^{Kd}_{SWEEP} bomen die de optimalisatie met de snelle Kd knoop doorkruising gebruiken. Per niveau gebruiken de BSP_{SWEEP} bomen niet altijd meer splitsingsvlakken dan de bestaande bomen, maar de BSP_{SWEEP} bomen gebruiken in totaal duidelijk meer verschillende splitsingsvlakken dan de bestaande bomen en zouden zich hierdoor beter moeten kunnen aanpassen aan complexe scenes.


Invloed grootte bladknopen op totaal aantal intersecties
Cumulatieve Procentuele bijdrage aan totaal aantal driehoekintersecties
Aantal driehoeken in leafnode
Kd Killeroo
Kd Killeroo Been
BSP^{Kd}_{IZE} Killeroo
BSP^{Kd}_{IZE} Killeroo Been


Invloed grootte bladknopen op totaal aantal intersecties
$\cdot 10^8$
Cumulatieve bijdrage aan totaal aantal driehoekintersecties
Aantal driehoeken in leafnode
Kd Killeroo
Kd Killeroo Been
BSP^{Kd}_{IZE} Killeroo
BSP^{Kd}_{IZE} Killeroo Been

Hoofdstuk 4

Implementatie

In dit hoofdstuk wordt de implementatie van volgende BSP bomen besproken: Kd boom, $RBSP$ boom, $RBSP^{Kd}$ boom, BSP_{IZE} boom, BSP^{Kd}_{IZE} boom, BSP_{random} boom, $BSP_{random+}$ boom, $BSP^{Kd}_{random+}$ boom, BSP_{wn} boom, BSP_{wn+} boom, BSP^{Kd}_{wn+} boom, BSP_{cn} boom, BSP_{cn+} boom en BSP^{Kd}_{cn+} boom.

Het hoofdstuk start met een hoogniveau beschrijving (4.1) van het algoritme om de boom te bouwen en het algoritme om de boom te intersecteren.
Uitbreiding pbrt-v3

4.1 Hoog niveau beschrijving

4.1.1 Bouwalgoritme

Het bouwalgoritme voor BSP bomen heeft een aantal parameters:

- $\mathcal{K}_i$: De intersectiekost voor primitieven. Deze parameter is nodig voor de SAH heuristiek.
- $\mathcal{K}_{d,Kd}$: De doorkruiskost voor Kd knopen. Deze parameter is nodig voor de SAH heuristiek.
- $\mathcal{K}_{d,BSP}$: De aparte doorkruiskost voor BSP knopen. Deze parameter is nodig voor de SAH heuristiek.
- n_{max}: Elke knoop met n_{max} of minder primitieven wordt direct een bladknoop, er wordt niet geprobeerd om de knoop te splitsen.
- d_{max}: De maximale diepte van de boom.

Algoritme 1 toont de algemene vorm van het bouwalgoritme voor BSP bomen. Elk type BSP boom wordt bepaald door de specifieke implementatie van de volgende functies:

Algoritme 1 Bouwen van een BSP boom

stack $\leftarrow \emptyset$
Voeg een bouwknoop met alle primitieven toe aan de stack
while *stack* $\neq \emptyset$ **do**
  $b \leftarrow$POP(*stack*)
  if $b_n \leq n_{max}$ **or** $b_d = d_{max}$ **then**
    MAAK_BLAD_KNOOP(b)
    continue
  end if
  $besteSplit \leftarrow$ BEPAAL_BESTE_SPLIT(b)
  $nietSplitKost \leftarrow b_n * \mathcal{K}_i$
  if $besteSplit_{kost} > nietSplitKost$ **then**
    $b_{slechteAanpassingen} \leftarrow b_{slechteAanpassingen} + 1$
  end if
  if $(besteSplit_{kost} > 4 * nietSplitKost$ **and** $b_n < 16)$ **or** $besteSplit = None$ **or** $b_{slechteAanpassingen} = 3$ **then**
    MAAK_BLAD_KNOOP(b)
    continue
  end if
  MAAK_INWENDIGE_KNOOP(b)
  Plaats de kindknopen als twee nieuwe bouwknopen op de stack
end while

1. BEPAAL_BESTE_SPLIT(bouwknoop): Deze functie bepaalt de beste splitsing voor de knoop. Het resultaat bevat het splitsingsvlak en de bijhorende SAH kost.

2. MAAK_BLAD_KNOOP(bouwknoop): Deze functie maakt een bladknoop van de huidige bouwknoop.

3. MAAK_INWENDIGE_KNOOP(bouwknoop): Deze functie maakt een inwendige knoop van de huidige bladknoop.

De eerste functie omvat de specifieke eigenschappen van het type BSP boom en bepaalt de kracht van dat type BSP boom. Het resultaat van de tweede en derde functie is een specifieke representatie voor bladknopen / inwendige knopen die nuttig is voor het specifieke type BSP boom. In de volgende secties wordt bij elk type BSP boom hun specifieke knoopprepresentaties besproken. De exacte implementaties van de functies om deze representaties in te vullen, zijn triviaal en worden niet expliciet beschreven.

Samengevat gaat Algoritme 1 voor elke knoop, die nog voldoende primitieven bevat en niet op de maximale diepte ligt, de beste splitsing bepalen en afhankelijk van de SAH waarde bepalen of een splitsing moet gebeuren. Aangezien een slechte splitsing op een bepaald niveau, kan leiden tot een nuttige split op een lager niveau,

wordt een knoop toch gesplitst als splitten nadelig is volgens de SAH heuristiek. Zulke *slechte aanpassingen* worden niet gedaan als de kost van de beste split vier keer hoger is dan de kost om niet te splitsen en als er bovendien minder dan 16 primitieven in de knoop zitten. Elk lusvrij pad van de wortelknoop naar elke andere knoop, mag maximaal twee zulke *slechte aanpassingen* bevatten. Dit komt neer op het feit dat een *slechte aanpassing* enkel mag gebeuren als er minder dan twee voorouderknopen een *slechte aanpassing* gedaan hebben. Dit concept is overgenomen van de originele implementatie van de Kd boom in *pbrt-v3*.

4.1.2 Intersectie-algoritme

Het intersectie-algoritme bepaalt het intersectiepunt tussen een straal en de BSP boom. Een straal wordt voorgesteld met de parametervoorstelling $\vec{s} = \vec{o} + t\vec{d}$. Algoritme 2 toont de algemene vorm van het intersectie-algoritme voor BSP bomen. Dit intersectie-algoritme is ontworpen voor zichtstralen en bepaalt dus het dichtste intersectiepunt. De aanpassing naar een algoritme dat controleert of er een intersectiepunt bestaat, wat gebruikt kan worden voor schaduwstralen, is triviaal en wordt niet verder besproken.

Het algoritme maakt gebruik van de volgende functies:

1. INTERSECTEER_INWENDIGE_KNOOP(knoop, straal): Deze functie bepaalt de intersectie van de gegeven straal met het splitsingsvlak van de gegeven inwendige knoop. Het resultaat bevat tVlak, de t waade waarvoor de straal intersecteert met het vlak en linksEerst, een boolean die aangeeft of de straal eerst door de linkerkindknoop gaat of niet.

2. INTERSECTEER_BLAD_KNOOP(knoop, straal): Deze functie bepaalt de intersectie van de primitieven in de gegeven bladknoop met de gegeven straal.

3. INTERSECTEER(volume, straal): Deze functie bepaalt de intersectie van het omhullend volume van de boom en de straal. Het resultaat bevat een booleaans waarde, die aanduidt of het volume geraakt wordt door de straal. Als het volume geraakt wordt, bevat het ook de waarde tMin, de t waarde waarvoor de straal het volume binnengaan, en tMax, de t waarde waarvoor de straal het volume verlaat.

De eerste functie is afhankelijk van de specifieke representatie voor bladknopen / inwendige knopen die gebruikt worden voor het specifieke type BSP boom. Bij de bespreking van de knooprepresentaties in de volgende secties, wordt steeds de implementatie van deze functie voor die knooprepresentatie getoond. De tweede functie is hetzelfde voor alle knopen die besproken worden, elke driehoek in de bladknoop wordt op intersectie met de straal getest. De derde functie bepaalt de intersectie van het omhullende volume van de BSP boom met de straal. Bij alle besproken bomen wordt dit voorgesteld door een asgealigneerde balk. Intersectie berekenen met een asgealigneerde balk is triviaal.

Algoritme 2 Intersecteren van een BSP boom

```
function INTERSECTEER(Boom b, Straal s)
    geraakt_omhullendVolume, tMin, tMax ← INTERSECTEER(b_omhullendVolume, s)
    if not geraakt_omhullendVolume then
        return false
    end if
    geraakt ← false
    k ← b_wortelKnoop
    stack ← ∅
    while k ≠ None do
        if s_maxT < tMin then
            break
        end if
        if k_isInwendig then
            tVlak, linksEerst ← INTERSECTEER_INWENDIGE_KNOOP(k,s)
            if linksEerst then
                k_1 ← k_linkerKind
                k_2 ← k_rechterKind
            else
                k_1 ← k_rechterKind
                k_2 ← k_linkerKind
            end if
            if tVlak > tMax or tVlak <= 0 then
                k ← k_1
            else if tVlak < tMin then
                k ← k_2
            else
                ADD(stack, {k_2, tMin : tVlak, tMax : tMax}))
                k ← k_1
                tMax ← tVlak
            end if
        else
            if INTERSECTEER_BLADKNOOP(k, s) then
                geraakt ← true
            end if
            if stack ≠ ∅ then
                k, tMin, tMax ←POP(stack)
            else
                break
            end if
        end if
    end while
    return geraakt
end function
```

Inwendig	bits	Blad	bits
tSplit	32	primitief Offset	32
flags	2	flags	2
tweedeKindIndex	30	n	30
	64		64

Tabel 4.1: Voorstelling Kd knoop -

4.2 Kd boom

De implementatie van de Kd boom is gebasseerd op de Kd boom implementatie van pbrt. De Kd boom maakt gebruik van Kd knopen. Tabel 4.1 toont de representatie van zowel inwendige Kd knopen als blad Kd knopen. Zowel inwendige knopen als bladknopen worden voorgesteld met 64 bits en bevatten de *flags* variabele. Als de *flags* variabele gelijk is aan 3, is het een bladknoop. Bij inwendige knopen stelt die variabele de as voor waarlangs gesplitst wordt: 0 is x, 1 is y en 2 is z.

De inwendige knopen bevatten extra informatie over hun splitsingsvlak via *tSplit*. Deze *tSplit* variabele bepaalt de locatie van het vlak langs de as. De knopen van een boom worden opgeslagen in een lijst, bij een inwendige knoop wordt zijn linkerkind-knoop opgeslagen op de volgende index in de lijst. De index van de rechterkindknoop, wordt opgeslagen in de *tweedeKindIndex* variabele.

De bladknopen bevatten informatie over hun primitieven via n en *primitiefOffset*. De n variabele stelt het aantal primitieven in de bladknoop voor. De *primitiefOffset* variabele verwijst naar de primitieven in de bladknoop. Als er maar één primitief in de knoop zit, wijst de variabele rechtstreeks naar het primitief. Als er meerdere primitieven in de knoop zitten, stelt het in index voor in een lijst. Elk element in die lijst met een index tussen *primitiefOffset* en *primitiefOffset* $+ n$ wijst dan naar een primitief in de bladknoop.

Algoritme 3 Intersecteren van een inwendige Kd knoop.

function INTERSECTEER_INWENDIGE_KNOOP(Kd Knoop k, Straal s)
  $as < -k_{splitsAs}$
  $tVlak \leftarrow$ KD_VLAK_AFSTAND($k_{splitPos}$, s, $\frac{1}{\vec{s_d}}$, as)
  $linksEerst \leftarrow \vec{s_o}[as] < k_{splitPos}$ **or** ($\vec{s_o}[as] = k_{splitPos}$ **and** $s_d[as] \leq 0$)
  return $tVlak$, $linksEerst$
end function

4.3 $RBSP$ boom

Implementatie gebasseerd op De $RBSP$ boom maakt gebruik van $RBSP$ knopen. Tabel 4.2 toont de representatie van zowel inwendige $RBSP$ knopen als blad $RBSP$

Algoritme 4 Intersectie tussen een asgealigneerd vlak en een straal.

function KD_VLAK_AFSTAND(splitPositie, s, inverseRichting, as)
  return $(splitPos - \vec{s_o}[as]) * \vec{inverseRichting}[as]$
end function

Inwendig	bits	Blad	bits
tSplit	32	primitief Offset	32
flags	$log_2(k+1)$	flags	$log_2(k+1)$
tweedeKindIndex	32 - $log_2(k+1)$	n	32 - $log_2(k+1)$
	64		64

Tabel 4.2: Voorstelling $RBSP$ knoop -

knopen.

Algoritme 5 Intersectie tussen een vlak en een straal.

function VLAK_AFSTAND($\vec{normaal}$, splitPositie, s)
  $projOorsprong \leftarrow \vec{normaal} \cdot \vec{s_o}$
  $invProjRichting \leftarrow \frac{1}{\vec{normaal} \cdot \vec{s_d}}$
  $afstand \leftarrow (splitPos - projOorsprong) * invProjRichting$
  return projOorsprong, invProjRichting, afstand
end function

Algoritme 6 Intersecteren van een inwendige $RBSP$ knoop.

function INTERSECTEER_INWENDIGE_KNOOP($RBSP$ Knoop k, Straal s)
  $richtingId \leftarrow k_{splitsAs}$
  $tVlak, projOorsprong, invProjRichting \leftarrow$ VLAK_AFSTAND($\vec{richtingen}[\vec{richtingId}]$, $k_{splitPos}$, s)
  $linksEerst \leftarrow projOorsprong < k_{splitPos}$ **or** $(projOorsprong = k_{splitPos}$ **and** $invProjRichting \leq 0)$
  return $tVlak$, $linksEerst$
end function

4.4 $RBSP^{Kd}$ boom

Nieuwe implementatie, uitbreiding $RBSP$ met de snelle Kd doorkruistechniek van Ize et al. $RBSP^{Kd}$ knoop identiek aan $RBSP$ knoop in termen van voorstelling, andere intersectie

Algoritme 7 Intersecteren van een inwendige $RBSP^{Kd}$ knoop.

function INTERSECTEER_INWENDIGE_KNOOP($RBSP^{Kd}$ Knoop k, Straal s)
  $richtingId \leftarrow k_{splitsAs}$
  if $richtingId < 3$ **then**
    $tVlak \leftarrow$ KD_VLAK_AFSTAND($k_{splitPos}$, s, $\frac{1}{\vec{s_d}}$, richtingId)
    $linksEerst \leftarrow \vec{s_o}[richtingId] < k_{splitPos}$ **or** ($\vec{s_o}[richtingId] = k_{splitPos}$ **and** $s_d[richtingId] \leq 0$)
    return $tVlak$, $linksEerst$
  else
    $tVlak, projOorsprong, invProjRichting \leftarrow$ VLAK_AFSTAND($\vec{richtingen}[richtingId]$, $k_{splitPos}$, s)
    $linksEerst \leftarrow projOorsprong < k_{splitPos}$ **or** ($projOorsprong = k_{splitPos}$ **and** $invProjRichting \leq 0$)
    return $tVlak$, $linksEerst$
  end if
end function

Inwendig	bits	Blad	bits
tSplit	32	primitief Offset	32
flags	1	flags	1
tweedeKindIndex	31	n	31
splitRichting	96		
	160		64

Tabel 4.3: Voorstelling BSP knoop -

4.5 BSP_{IZE} boom

Vergelijk representatie met die van de paper

Algoritme 8 Intersecteren van een inwendige BSP knoop.

function INTERSECTEER_INWENDIGE_KNOOP(BSP Knoop k, Straal s)
  $tVlak, projOorsprong, invProjRichting \leftarrow$ VLAK_AFSTAND($\vec{k_{splitsRichting}}$, $k_{splitPos}$, s)
  $linksEerst \leftarrow projOorsprong < k_{splitPos}$ **or** ($projOorsprong = k_{splitPos}$ **and** $invProjRichting \leq 0$)
  return $tVlak$, $linksEerst$
end function

Inwendig	bits	Blad	bits
tSplit	32	primitief Offset	32
flags	3	flags	3
tweedeKindIndex	29	n	29
splitRichting	96		
	160		64

Tabel 4.4: Voorstelling BSP^{Kd} knoop -

Algoritme 9 Intersecteren van een inwendige BSP^{Kd} knoop.

function INTERSECTEER_INWENDIGE_KNOOP(BSP^{Kd} Knoop k, Straal s)
  $isKdKnoop \leftarrow k_{flags} < 4$
  if $isKdKnoop$ **then**
    $as \leftarrow k_{flags}$
    $tVlak \leftarrow$ KD_VLAK_AFSTAND($k_{splitPos}$, s, $\frac{1}{\vec{s_d}}$, as)
    $linksEerst \leftarrow \vec{s_o}[as] < k_{splitPos}$ **or** ($\vec{s_o}[as] = k_{splitPos}$ **and** $s_d[as] \leq 0$)
    return $tVlak$, $linksEerst$
  else
    $tVlak, projOorsprong, invProjRichting \leftarrow$ VLAK_AFSTAND($k_{splits\vec{R}ichting}$, $k_{splitPos}$, s)
    $linksEerst \leftarrow projOorsprong < k_{splitPos}$ **or** ($projOorsprong = k_{splitPos}$ **and** $invProjRichting \leq 0$)
    return $tVlak$, $linksEerst$
  end if
end function

4.6 BSP^{Kd}_{IZE} boom

4.7 BSP_{SWEEP} boom

Intersectie identiek aan andere, zelfde soorten knopen.

Selectie beste splitsingsvlak Algoritme BSP_{SWEEP} en BSP_{SWEEP}+ hetzelfde, behalve de *getDirections* Apart voor BSP^{Kd}_{SWEEP}

BSP boom	Knooptype
Kd	Kd
$RBSP$	$RBSP$
$RBSP^{Kd}$	$RBSP^{Kd}$
BSP_{IZE}	BSP
BSP^{Kd}_{IZE}	BSP^{Kd}
$BSP_{SWEEP(+)}$	BSP
BSP^{Kd}_{SWEEP}	BSP^{Kd}

Tabel 4.5: Gebruikte soorten knopen voor alle soorten BSP bomen -

Hoofdstuk 5

Resultaten

In dit hoofdstuk wordt het werk ingeleid. Het doel wordt gedefinieerd en er wordt uitgelegd wat de te volgen weg is (beter bekend als de rode draad).

Als je niet goed weet wat een masterproef is, kan je altijd Wikipedia eens nakijken.

	Been			Sponza			Conference Hall		
K	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
2	94.263	95.144	95.837	454.741	437.608	454.138	298.405	300.392	310.614
3	88.062	89.091	89.322	364.787	345.522	368.295	261.261	266.944	268.196
4	85.441	85.581	85.62	316.678	294.67	305.886	225.13	232.307	239.816
5	83.558	83.651	84.418	289.664	272.468	278.195	211.855	214.093	216.993
6	81.93	82.325	82.287	255.474	248.777	263.412	200.431	204.593	205.686
7	81.117	81.057	81.357	249.249	231.221	232.563	193.014	194.539	194.655
8	79.914	80.121	80.089	235.069	223.647	223.241	183.805	184.94	184.278
9	79.39	79.174	79.477	224.679	208.786	212.783	177.842	178.935	178.442
10	78.257	78.481	78.198	219.107	198.755	199.18	171.722	173.994	178.498

Tabel 5.1: Rendertijd BSP_{random} in functie van K - Deze tabel toont statistieken over de rendertijd voor BSP_{random} voor verschillende waarden van K. Voor elke waarde van K is het algoritme zeven keer uitgevoerd. De *Min* kolom staat voor de minimale rendertijd, de *Max* kolom voor de maximale rendertijd en de *Med* kolom voor de mediaan van de zeven tijd. De (min, max, med) rendertijd is procentueel uitgedrukt ten opzichte van de (min, max, med) rendertijd van de Kd boom.

	Been			Sponza			Conference Hall		
K	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
3	102.896	102.681	102.697	100.902	91.383	89.77	97.219	97.129	102.432
4	90.292	90.191	89.904	102.357	95.368	100.245	95.658	96.988	97.714
5	85.014	85.512	87.979	100.715	94.368	98.783	93.773	94.099	99.636
6	82.523	82.349	86.901	100.973	97.991	99.783	91.391	93.91	98.434
7	80.748	80.892	80.888	104.466	96.864	101.065	90.272	93.843	94.656
8	79.55	79.911	79.513	105.823	97.068	99.078	92.536	92.504	92.933
9	78.837	79.001	78.943	101.183	94.022	97.615	92.26	92.212	93.991
10	78.225	78.24	78.501	103.721	95.61	98.762	91.082	92.371	92.354

Tabel 5.2: Rendertijd $BSP_{random+}$ in functie van K - Deze tabel toont statistieken over de rendertijd voor $BSP_{random+}$ voor verschillende waarden van K. Voor elke waarde van K is het algoritme zeven keer uitgevoerd. De *Min* kolom staat voor de minimale rendertijd, de *Max* kolom voor de maximale rendertijd en de *Med* kolom voor de mediaan van de zeven tijd. De (min, max, med) rendertijd is procentueel uitgedrukt ten opzichte van de (min, max, med) rendertijd van de Kd boom.

	Been			Sponza			Conference Hall		
K	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
3	101.563	101.346	101.579	105.439	95.087	99.882	98.029	97.286	100.595
4	91.987	92.271	95.524	100.225	90.867	92.592	92.05	92.736	93.297
5	88.29	88.335	88.449	97.599	90.537	90.244	90.222	91.448	92.026
6	84.518	84.519	84.819	95.31	88.422	88.965	88.878	90.463	95.608
7	82.944	82.626	82.843	94.765	85.315	85.011	89.03	89.65	93.787
8	81.29	81.566	83.309	93.903	85.485	88.245	87.747	90.072	94.933
9	80.581	80.799	81.702	93.203	84.301	83.876	87.304	88.272	89.006
10	80.028	80.234	79.716	93.666	85.503	88.406	86.135	87.09	90.935

Tabel 5.3: Rendertijd $BSP^{Kd}_{random+}$ in functie van K - Deze tabel toont statistieken over de rendertijd voor $BSP^{Kd}_{random+}$ voor verschillende waarden van K. Voor elke waarde van K is het algoritme zeven keer uitgevoerd. De *Min* kolom staat voor de minimale rendertijd, de *Max* kolom voor de maximale rendertijd en de *Med* kolom voor de mediaan van de zeven tijd. De (min, max, med) rendertijd is procentueel uitgedrukt ten opzichte van de (min, max, med) rendertijd van de Kd boom.

	Been			Sponza			Conference Hall		
K	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
2	78.381	80.439	80.06	189.64	205.401	299.886	143.656	163.78	352.315
3	75.41	76.171	77.975	166.622	165.521	193.158	127.188	133.497	170.861
4	74.31	74.369	74.782	157.165	149.284	154.059	115.946	121.746	128.461
5	73.644	74.334	74.324	151.537	153.732	157.101	112.462	120.877	134.361
6	73.125	73.867	76.303	148.679	137.888	162.36	109.783	113.731	124.092
7	72.715	74.099	74.861	143.61	143.17	150.795	107.986	111.324	114.767
8	72.301	73.992	73.77	144.221	134.784	142.216	108.338	110.33	115.036
9	72.375	72.973	74.384	135.611	130.295	141.337	108.666	109.587	119.766
10	71.807	72.579	73.052	137.872	134.463	134.933	107.595	110.402	112.553

Tabel 5.4: Rendertijd BSP_{wn} in functie van K - Deze tabel toont statistieken over de rendertijd voor BSP_{wn} voor verschillende waarden van K. Voor elke waarde van K is het algoritme zeven keer uitgevoerd. De *Min* kolom staat voor de minimale rendertijd, de *Max* kolom voor de maximale rendertijd en de *Med* kolom voor de mediaan van de zeven tijd. De (min, max, med) rendertijd is procentueel uitgedrukt ten opzichte van de (min, max, med) rendertijd van de Kd boom.

	Been			Sponza			Conference Hall		
K	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
3	102.555	102.405	103.09	104.655	96.063	100.144	97.549	97.503	97.794
4	70.873	70.982	70.946	96.228	94.165	95.941	81.85	82.461	86.085
5	67.85	68.482	68.37	94.684	92.765	99.968	84.101	83.239	87.39
6	67.419	67.283	68.196	101.928	98.831	107.121	82.223	83.912	87.486
7	66.999	67.177	67.03	96.528	100.152	113.112	83.9	84.41	88.507
8	66.752	66.861	66.809	106.938	102.555	110.824	83.37	84.228	88.147
9	66.831	66.729	66.616	107.749	104.674	107.536	83.752	84.364	88.829
10	66.414	66.491	66.772	107.362	100.657	110.953	83.12	85.119	89.107

Tabel 5.5: Rendertijd BSP_{wn+} in functie van K - Deze tabel toont statistieken over de rendertijd voor BSP_{wn+} voor verschillende waarden van K. Voor elke waarde van K is het algoritme zeven keer uitgevoerd. De *Min* kolom staat voor de minimale rendertijd, de *Max* kolom voor de maximale rendertijd en de *Med* kolom voor de mediaan van de zeven tijd. De (min, max, med) rendertijd is procentueel uitgedrukt ten opzichte van de (min, max, med) rendertijd van de Kd boom.

	Been			Sponza			Conference Hall		
K	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
3	101.652	101.544	101.482	105.459	95.15	98.877	97.689	97.169	96.844
4	71.907	72.068	71.865	91.903	83.277	88.974	79.777	79.16	87.162
5	68.89	69.158	69.3	90.929	83.87	82.445	79.208	78.864	86.424
6	67.788	67.723	67.484	88.438	80.364	79.45	77.673	78.562	83.647
7	67.372	67.182	67.237	88.779	80.472	80.619	78.101	80.896	86.181
8	67.092	67.012	67.01	89.004	80.036	78.671	78.746	80.682	80.576
9	67.163	67.043	66.863	88.714	80.296	80.374	78.44	80.007	86.294
10	67.15	67.126	66.711	90.26	83.683	86.547	78.839	80.188	80.407

Tabel 5.6: Rendertijd BSP^{Kd}_{wn+} in functie van K - Deze tabel toont statistieken over de rendertijd voor BSP^{Kd}_{wn+} voor verschillende waarden van K. Voor elke waarde van K is het algoritme zeven keer uitgevoerd. De *Min* kolom staat voor de minimale rendertijd, de *Max* kolom voor de maximale rendertijd en de *Med* kolom voor de mediaan van de zeven tijd. De (min, max, med) rendertijd is procentueel uitgedrukt ten opzichte van de (min, max, med) rendertijd van de Kd boom.

	Been			Sponza			Conference Hall		
K	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
2	101.213	102.797	104.333	370.413	370.346	406.212	176.209	178.901	186.517
3	79.02	79.765	81.037	232.447	212.866	224.591	138.359	141.885	146.04
4	74.735	75.708	76.117	200.78	187.343	185.482	128.482	132.851	134.903
5	72.416	74.268	75.84	173.423	163.685	169.425	125.084	126.273	133.541
6	72.482	72.469	73.301	159.539	152.916	166.353	116.994	120.382	130.53
7	71.614	71.852	72.965	151.17	145.378	153.251	113.379	117.766	120.444
8	72.276	72.52	72.391	150.888	146.582	158.044	112.247	116.81	134.788
9	71.515	71.992	73.25	147.545	142.395	153.013	112.446	114.814	121.813
10	71.857	72.229	72.821	153.516	144.594	150.238	104.583	114.291	118.389

Tabel 5.7: Rendertijd BSP_{cn} in functie van K - Deze tabel toont statistieken over de rendertijd voor BSP_{cn} voor verschillende waarden van K. Voor elke waarde van K is het algoritme zeven keer uitgevoerd. De *Min* kolom staat voor de minimale rendertijd, de *Max* kolom voor de maximale rendertijd en de *Med* kolom voor de mediaan van de zeven tijd. De (min, max, med) rendertijd is procentueel uitgedrukt ten opzichte van de (min, max, med) rendertijd van de Kd boom.

	Been			Sponza			Conference Hall		
K	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
3	102.827	102.606	102.73	104.446	102.09	99.832	97.57	97.246	98.053
4	77.713	77.536	77.276	101.442	99.184	97.47	85.942	86.035	91.19
5	70.206	70.343	70.382	101.233	93.449	105.114	80.749	83.323	87.966
6	67.618	67.694	67.306	110.861	105.866	115.97	84.898	89.229	90.635
7	66.694	66.572	66.722	122.426	114.48	123.15	84.767	88.392	90.639
8	66.655	66.451	66.718	117.905	110.056	116.398	84.719	86.746	88.584
9	66.618	66.879	66.583	112.357	110.56	114.611	83.749	87.156	88.896
10	66.52	66.411	66.117	117.148	111.116	111.114	87.258	89.005	94.316

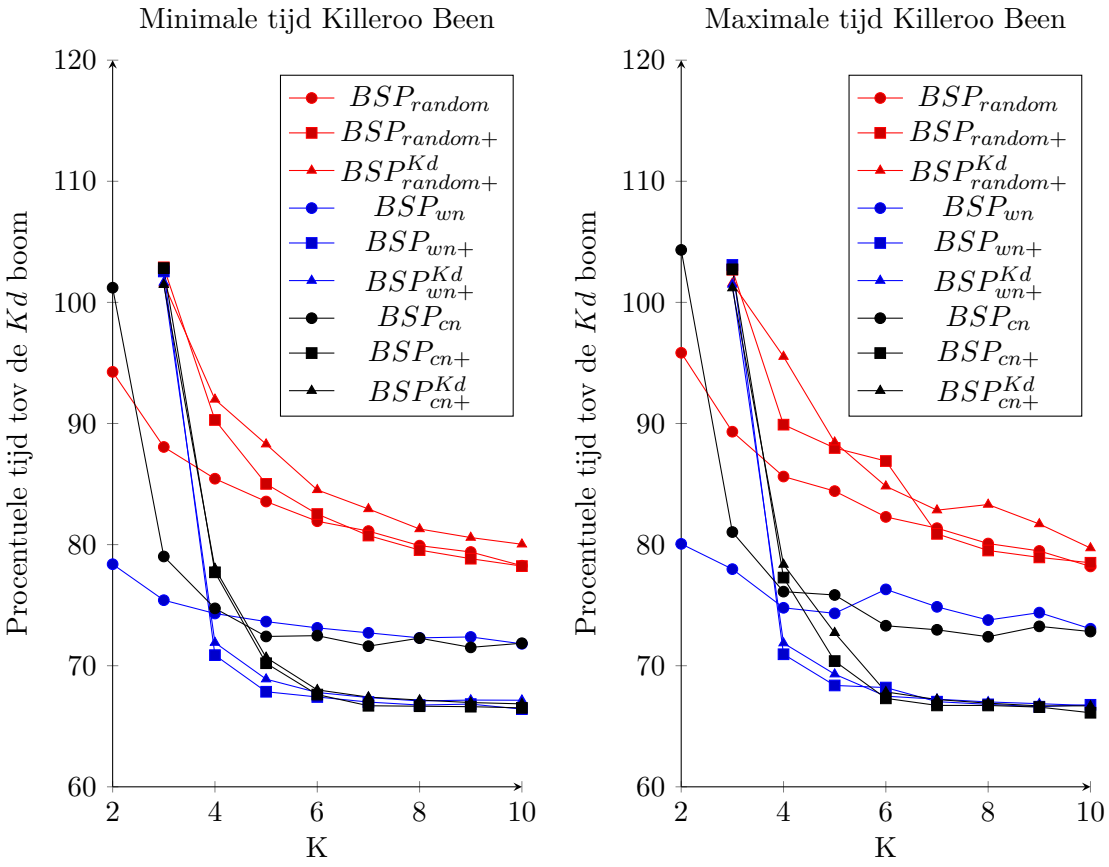
Tabel 5.8: Rendertijd BSP_{cn+} in functie van K - Deze tabel toont statistieken over de rendertijd voor BSP_{cn+} voor verschillende waarden van K. Voor elke waarde van K is het algoritme zeven keer uitgevoerd. De *Min* kolom staat voor de minimale rendertijd, de *Max* kolom voor de maximale rendertijd en de *Med* kolom voor de mediaan van de zeven tijd. De (min, max, med) rendertijd is procentueel uitgedrukt ten opzichte van de (min, max, med) rendertijd van de Kd boom.

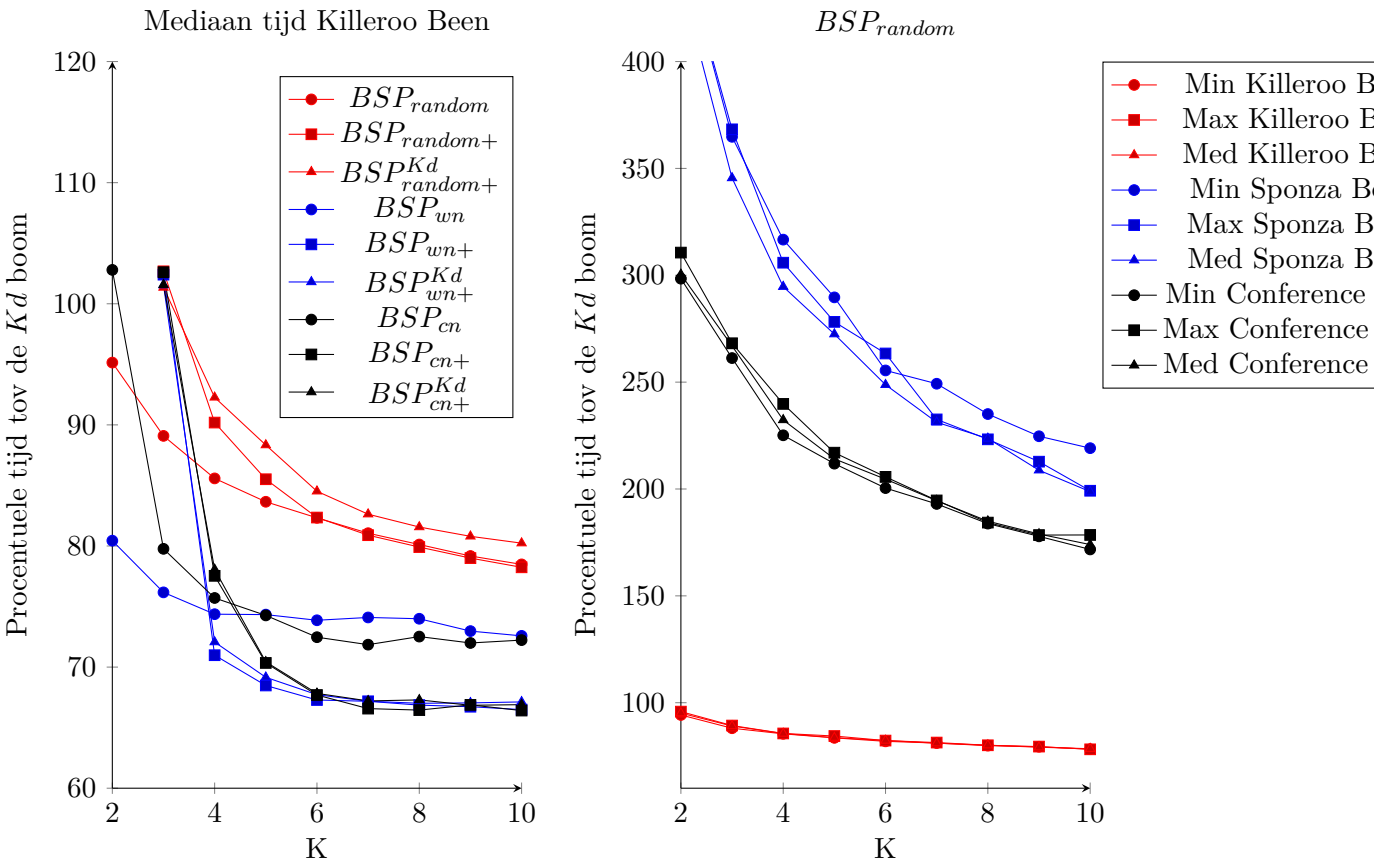
	Been			Sponza			Conference Hall		
K	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
3	101.454	101.571	101.18	105.169	95.846	99.905	96.645	96.491	95.757
4	78.023	78.065	78.356	96.472	87.161	94.116	84.088	83.582	91.343
5	70.681	70.429	72.718	91.49	83.064	85.978	79.583	80.756	88.038
6	68.006	67.828	67.837	89.127	80.339	80.096	78.349	79.272	86.204
7	67.408	67.208	67.208	88.377	79.844	78.395	79.853	79.577	85.83
8	67.165	67.291	66.905	88.68	80.107	79.958	79.798	79.712	86.478
9	66.958	66.847	66.683	89.005	80.173	79.666	77.809	78.885	79.792
10	66.849	66.899	66.686	89.448	83.764	83.188	79.45	80.151	87.728

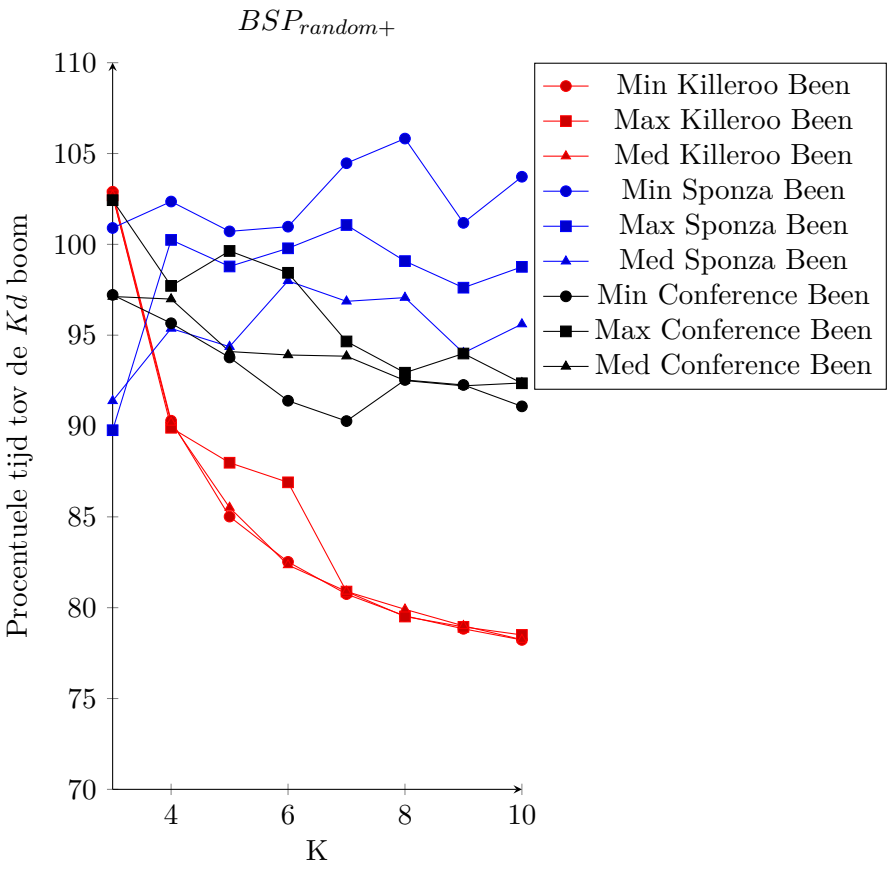
Tabel 5.9: Rendertijd BSP^{Kd}_{cn+} in functie van K - Deze tabel toont statistieken over de rendertijd voor BSP^{Kd}_{cn+} voor verschillende waarden van K. Voor elke waarde van K is het algoritme zeven keer uitgevoerd. De *Min* kolom staat voor de minimale rendertijd, de *Max* kolom voor de maximale rendertijd en de *Med* kolom voor de mediaan van de zeven tijd. De (min, max, med) rendertijd is procentueel uitgedrukt ten opzichte van de (min, max, med) rendertijd van de Kd boom.

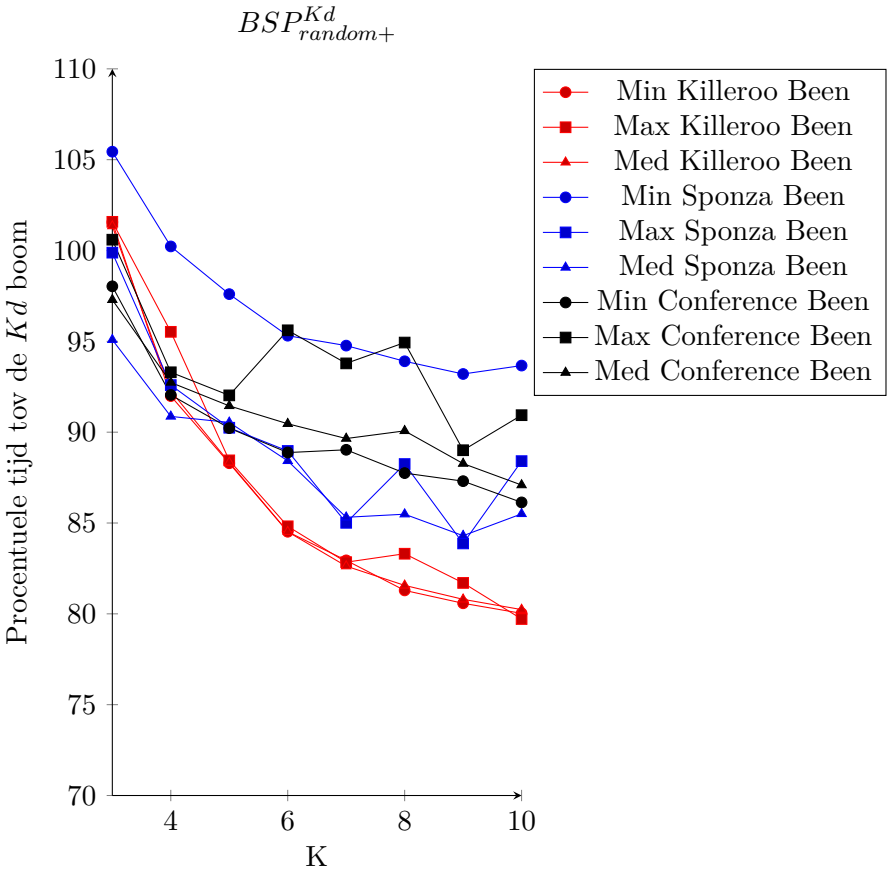
5.1 Praktische aspecten

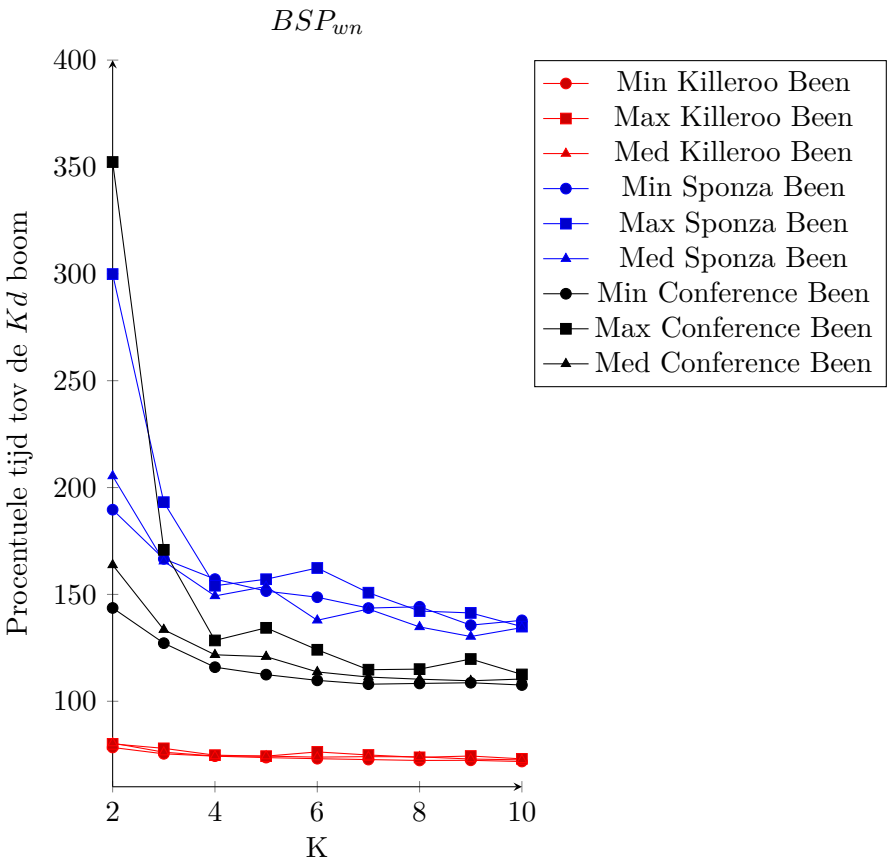
5.2 Afhankelijkheid van aantal richtingen

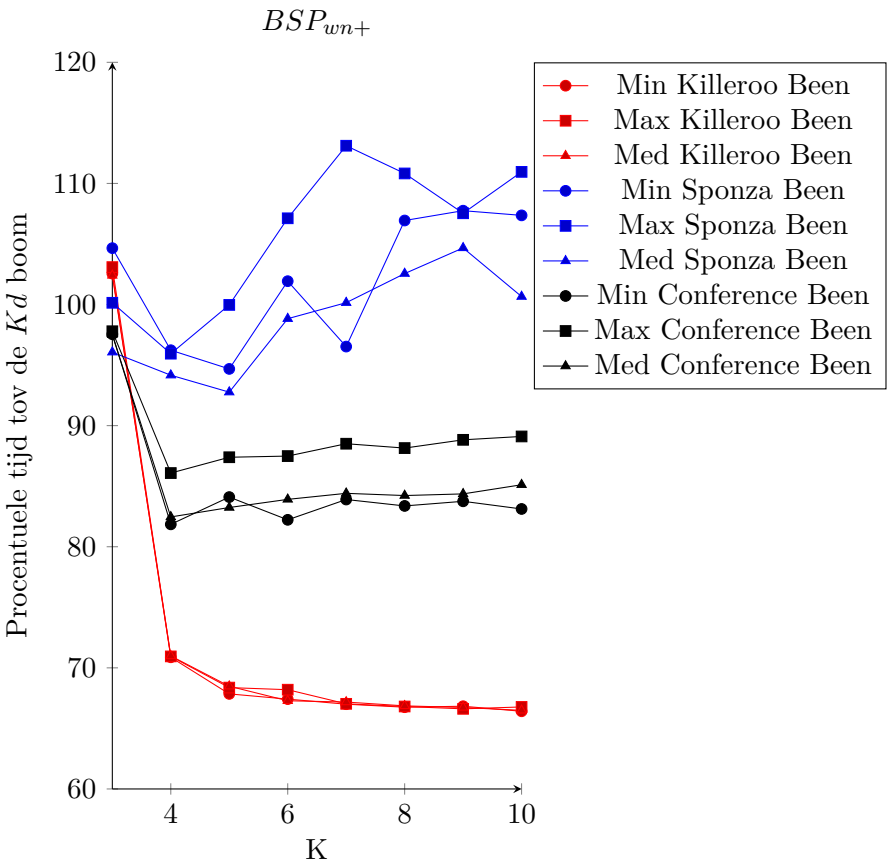


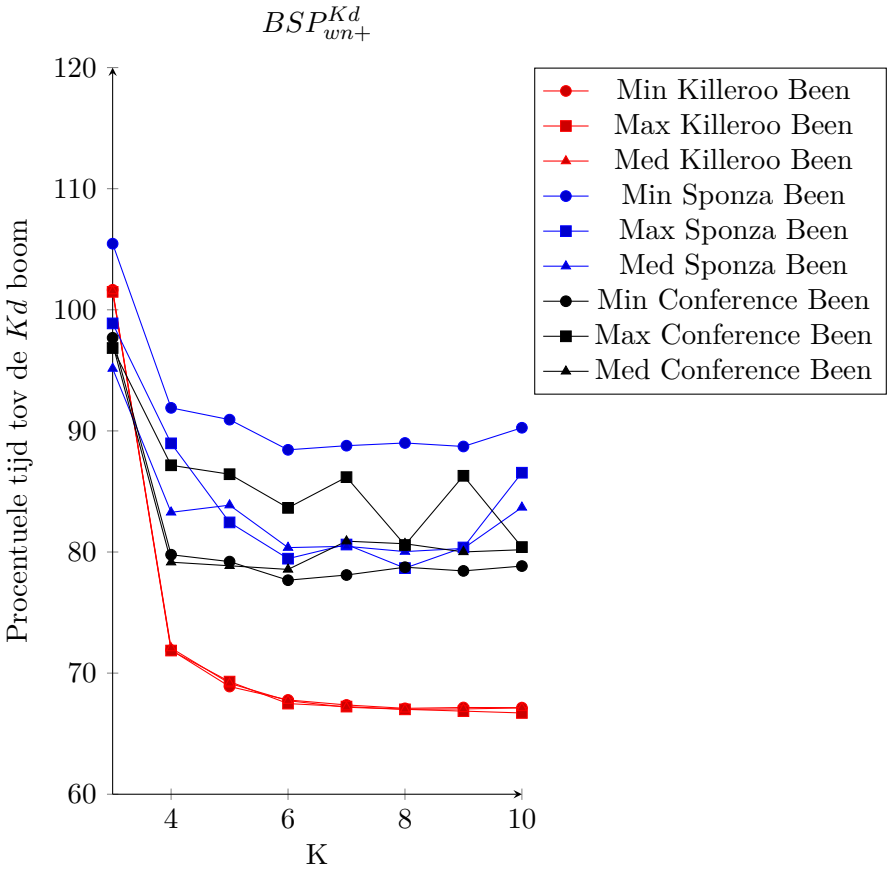

Mediaan tijd Killeroo Been
Procentuele tijd tov de Kd boom
K
BSP_{random}
$BSP_{random+}$
$BSP^{Kd}_{random+}$
BSP_{wn}
BSP_{wn+}
BSP^{Kd}_{wn+}
BSP_{cn}
BSP_{cn+}
BSP^{Kd}_{cn+}
BSP_{random}
Min Killeroo B
Max Killeroo B
Med Killeroo B
Min Sponza B
Max Sponza B
Med Sponza B
Min Conference
Max Conference
Med Conference

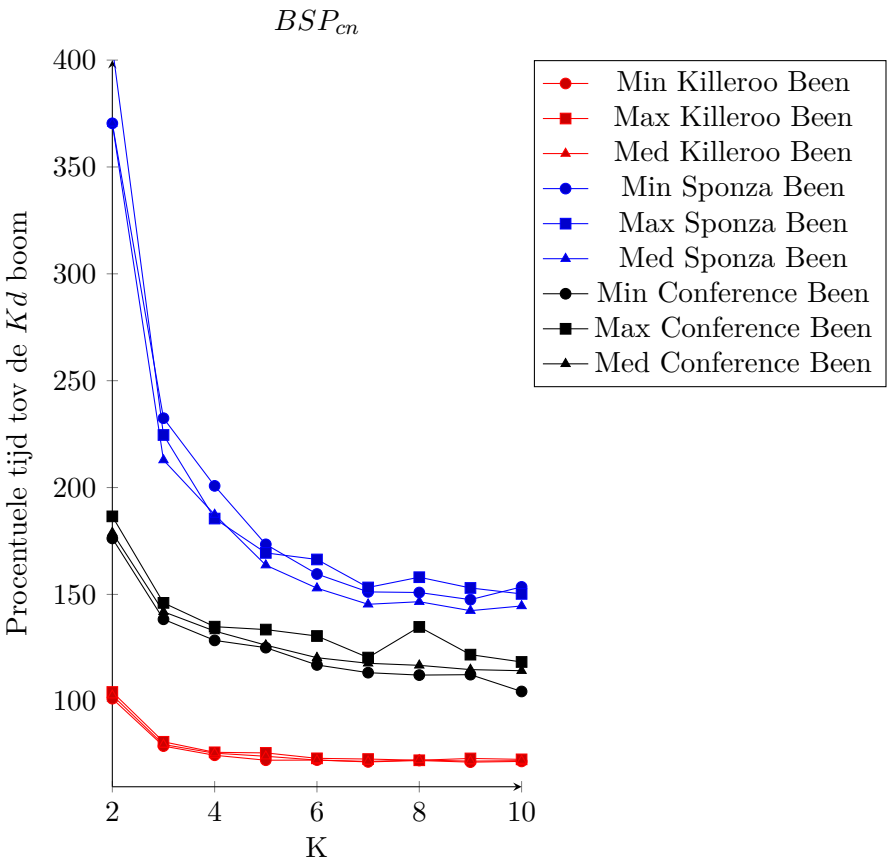

$BSP_{random+}$
Procentuele tijd tov de Kd boom
110
105
100
95
90
85
80
75
70
4
6
8
10
K
Min Killeroo Been
Max Killeroo Been
Med Killeroo Been
Min Sponza Been
Max Sponza Been
Med Sponza Been
Min Conference Been
Max Conference Been
Med Conference Been

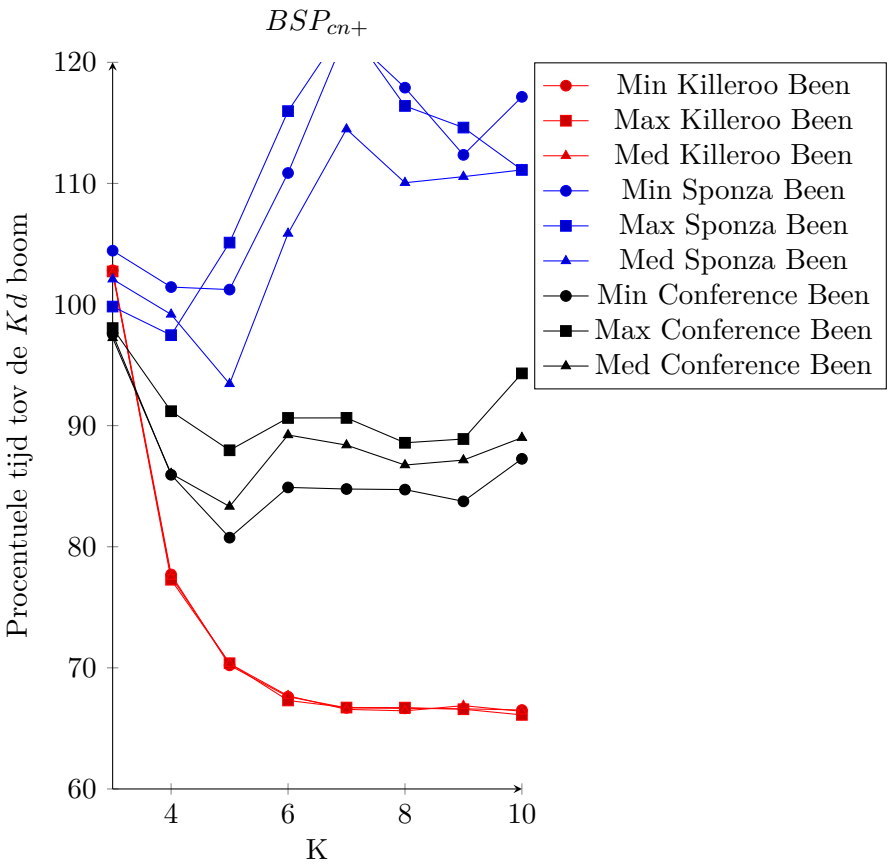

$BSP^{Kd}_{random+}$
Procentuele tijd tov de Kd boom
110
105
100
95
90
85
80
75
70
4
6
8
10
K
Min Killeroo Been
Max Killeroo Been
Med Killeroo Been
Min Sponza Been
Max Sponza Been
Med Sponza Been
Min Conference Been
Max Conference Been
Med Conference Been


BSP_{wn}
Procentuele tijd tov de Kd boom
400
350
300
250
200
150
100
2
4
6
8
10
K
Min Killeroo Been
Max Killeroo Been
Med Killeroo Been
Min Sponza Been
Max Sponza Been
Med Sponza Been
Min Conference Been
Max Conference Been
Med Conference Been


BSP_{wn+}
Procentuele tijd tov de Kd boom
120
110
100
90
80
70
60
4
6
8
10
K
Min Killeroo Been
Max Killeroo Been
Med Killeroo Been
Min Sponza Been
Max Sponza Been
Med Sponza Been
Min Conference Been
Max Conference Been
Med Conference Been

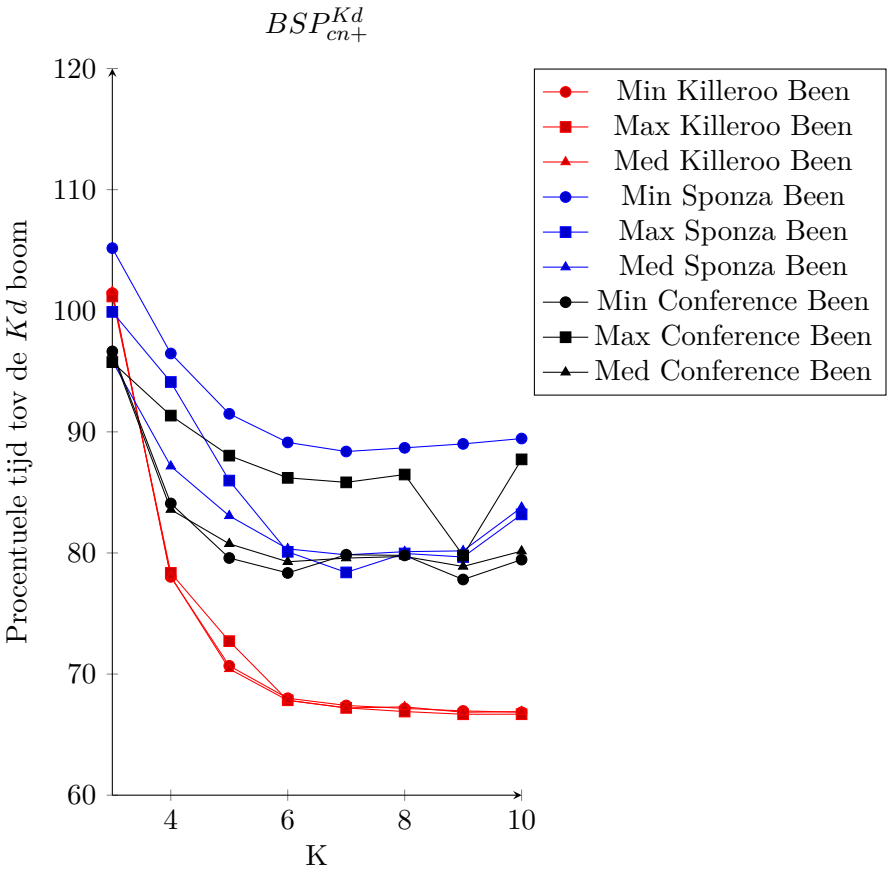

BSP^{Kd}_{wn+}
Procentuele tijd tov de Kd boom
120
110
100
90
80
70
60
4
6
8
10
K
Min Killeroo Been
Max Killeroo Been
Med Killeroo Been
Min Sponza Been
Max Sponza Been
Med Sponza Been
Min Conference Been
Max Conference Been
Med Conference Been


BSP_{cn}
Procentuele tijd tov de Kd boom
400
350
300
250
200
150
100
2
4
6
8
10
K
Min Killeroo Been
Max Killeroo Been
Med Killeroo Been
Min Sponza Been
Max Sponza Been
Med Sponza Been
Min Conference Been
Max Conference Been
Med Conference Been


BSP_{cn+}
Procentuele tijd tov de Kd boom
120
110
100
90
80
70
60
4
6
8
10
K
Min Killeroo Been
Max Killeroo Been
Med Killeroo Been
Min Sponza Been
Max Sponza Been
Med Sponza Been
Min Conference Been
Max Conference Been
Med Conference Been

	Feet			Sponza			Conference Hall			Museum		
K	Kd	BSP	Totaal	Kd	BSP	Totaal	Kd	BSP	Totaal	Kd	BSP	Totaal
2	0	642081	642081	0	2473542	2473542	0	954708	954708			
3	0	718759	718759	0	3307722	3307722	0	1203867	1203867			
4	0	783752	783752	0	3831201	3831201	0	1456774	1456774			
5	0	784195	784195	0	4250026	4250026	0	1608240	1608240			
6	0	794381	794381	0	4500849	4500849	0	1658489	1658489			
7	0	809726	809726	0	4721923	4721923	0	1765114	1765114			
8	0	829596	829596	0	4908790	4908790	0	1802687	1802687			
9	0	830428	830428	0	4940333	4940333	0	1819335	1819335			
10	0	856250	856250	0	5099947	5099947	0	1891082	1891082			

Tabel 5.10



5.3 Vergelijking

Hoofdstuk 6

Resultaten

Bibliografie

[BCNJ08] B. C. Budge, D. Coming, D. Norpchen, and K. I. Joy. Accelerated building and ray tracing of restricted bsp trees. In *2008 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, pages 167–174, Aug 2008.

[GS87] Jeffrey Goldsmith and John Salmon. Automatic creation of object hierarchies for ray tracing. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 7(5):14–20, 1987.

[Hav00] Vlastimil Havran. *Heuristic ray shooting algorithms*. PhD thesis, Ph. d. thesis, Department of Computer Science and Engineering, Faculty of . . . , 2000.

[IWP08] T. Ize, I. Wald, and S. G. Parker. Ray tracing with the bsp tree. In *2008 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, pages 159–166, Aug 2008.

[KHM+98] James T Klosowski, Martin Held, Joseph SB Mitchell, Henry Sowizral, and Karel Zikan. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-dops. *IEEE transactions on Visualization and Computer Graphics*, 4(1):21–36, 1998.

[KM07] R. P. Kammaje and B. Mora. A study of restricted bsp trees for ray tracing. In *IEEE/ EG Symposium on Interactive Ray Tracing 2007(RT)*, volume 00, pages 55–62, 09 2007.

[MB90] J David MacDonald and Kellogg S Booth. Heuristics for ray tracing using space subdivision. *The Visual Computer*, 6(3):153–166, 1990.

[Zac98] Gabriel Zachmann. Rapid collision detection by dynamically aligned dop-trees. In *Proceedings. IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium (Cat. No. 98CB36180)*, pages 90–97. IEEE, 1998.

Fiche masterproef

Student: Jesse Hoobergs

Titel: Het gebruik van de normalen bij het bouwen van BSP acceleratiestructuren

Engelse titel: Using the normals to build BSP acceleration structures.

UDC: 621.3

Korte inhoud:
Hier komt een heel bondig abstract van hooguit 500 woorden. LaTeX commando's mogen hier gebruikt worden. Blanco lijnen (of het commando `\par`) zijn wel niet toegelaten!

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Thesis voorgedragen tot het behalen van de graad van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: computerwetenschappen, hoofdoptie Mens-machine communicatie

Promotor: Prof. dr. ir. Philip Dutré

Assessoren: Ir. W. Eetveel
W. Eetrest

Begeleiders: Ir. M. Moulin
Ir. P. Bartels