

Evaluation of haptic algorithms

Geert Bleyen

promotor :
Prof. dr. Chris RAYMAEKERS

co-promotor :
Prof. dr. Karin CONINX

Voorwoord

Het succesvol vervolledigen van deze thesis zou niet mogelijk zijn geweest zonder de hulp en bijstand van een aantal personen. Hen wil ik dan ook hier bedanken.

Eerst en vooral wil ik de mensen die me begeleid hebben met het onderzoek bedanken: mijn promotor Prof. Dr. Chris Raymaekers, mijn co-promotor Prof. Dr. Karin Coninx en mijn begeleider Dr. Joan De Boeck. Zij hebben mij geholpen bij de problemen die ik ben tegengekomen en hebben me vruchtbare tips gegeven gedurende mijn thesiswerk. Ook wil ik nog de mensen van STATCOM¹ en in het bijzonder Lamidi Mubashir Asafe en Leen Slaets bedanken, zij hebben me geholpen met het bepalen van de statistische testen.

Ik zou ook graag mijn vriendin Evi willen bedanken voor haar morele steun. Zij stond altijd klaar om mij te stimuleren en steunde me doorheen de loop van de thesis.

Verder wil ik ook nog mijn familie bedanken die mij steeds bijgestaan heeft tijdens de totstandkoming van dit werk en mijn gehele studieloopbaan. Mijn ouders verdienen een extra woord van dank omdat zij ervoor gezorgd hebben dat ik deze opleiding heb kunnen volgen en me in mijn keuzes gesteund hebben.

–Geert Bleyen–

¹STATCOM is een club van studenten aan de universiteit van Hasselt(Campus Diepenbeek) die zich bezighouden met statistiek en anderen met problemen in de statistiek bijstaan. Website: www.censtat.uhasselt.be/statcom/

Abstract

In dit werk worden een aantal evaluatiemethodes voorgesteld die het mogelijk maken om haptische algoritmes met elkaar te vergelijken. Door een steeds toenemende belangstelling naar haptische systemen is een noodzaak ontstaan naar een manier om de verschillende systemen met elkaar te vergelijken. In het eerste deel van de tekst wordt er een korte uitleg gegeven over haptics en haptische systemen, waarna er de theoretische achtergrond voorgesteld wordt die het mogelijk maakt om haptische systemen te evalueren. Een haptisch systeem is inherent niet-deterministisch omwille van de input van een menselijke gebruiker die niet nooit tweemaal exact dezelfde beweging kan uitvoeren. Verder veroorzaakt de terugkoppeling door force-feedback een bijkomende factor die ervoor zorgt dat vergelijkingen tussen systemen moeilijk zijn. De evaluatiemethode bestaat er hoofdzakelijk in het haptische apparaat en de menselijke gebruiker uit de 'vergelijking' te vervangen door een computersysteem die input en output van het haptische algoritme verzorgt. Hierdoor bekomen we een deterministisch systeem dat met een input-set steeds dezelfde output zal genereren.

Het oorspronkelijke concept van de evaluatiemethode veronderstelde dat zowel de botsingspunten, de benodigde rekentijd, het aantal botsingen, als de resulterende krachten gebruikt konden worden in de evaluatie, maar het is gebleken dat de vergelijking tussen krachten uit verschillende systemen geen vanzelfsprekende zaak is. Ook de vergelijking van botsingspunten is minder triviaal dan het oorspronkelijk leek door de toevoeging van het JND als factor in het evaluatie-proces wordt het plots moeilijk om een eenduidige evaluatie uit te voeren omdat niet noodzakelijk elke gebruiker dezelfde JND-waarden² zal hebben. Die verschillende waarden zijn te wijten aan verschillen in gestalte en ervaring.

Naast een aantal beperkingen die aan het licht zijn gekomen, hebben zich ook mogelijkheden gepresenteerd die niet rechtstreeks het doel van deze thesis waren. Met de voorgestelde methode is het ook mogelijk om in plaats van recording-sessies als input te gebruiken, mathematische formules te gebruiken die input genereren voor de haptische systemen. Dit zou zowel offline als online kunnen gebeuren. Met offline wordt bedoeld dat de input waarden op voorhand gegenereerd worden en niet veranderen met van de feedback van het haptische systeem, waarbij dit bij de online methode wel mogelijk is. Dit onderzoekspad is niet onderzocht in deze thesis, maar is mogelijk wel een interessante denkpiste voor toekomstig

²JND=Just Noticeable Difference. Het JND is een term die gebruikt wordt om de hoeveelheid aan te geven waarmee een bepaalde waarde mag afwijken zonder dat een gebruiker hierbij een verschil opmerkt. Deze marge is te wijten aan de onnauwkeurigheden van het menselijke kinesthetisch systeem en de marge van ongevoeligheid van het menselijke tactiele systeem.

onderzoek.

Er is ook een andere manier mogelijk om de twee algoritmes te vergelijken met elkaar. Men kan de set van botsingen beschouwen als een opeenvolging van punten in een 3d ruimte. Deze punten kunnen we bijgevolg zien als een curve. Aangezien elk algoritme zijn eigen curve zal genereren, waarvan elk punt berekend wordt uit een vaste inputwaarde, kunnen we de curves met elkaar gaan vergelijken en het verschil tussen de beide meten.

Lijst van figuren

2.1	1 DOF haptische apparaten.	6
2.2	2 DOF haptische apparaten.	7
2.3	3 DOF haptische apparaten.	7
2.4	Een SensAble PHANToM Premium 1.5 met 6 DOF	8
2.5	Het gebruik van pneumatische cilinders maakt het mogelijk om een draagbaar en licht apparaat te maken dat het grijpen van virtuele objecten simuleert.	8
2.6	De HAL-5, een full-body power-harnas, van Cyberdyne Inc.	9
3.1	basis architectuur van een haptisch systeem.	10
3.2	componenten van een haptisch rendering systeem.	11
3.3	Problemen bij de penalty based methode.	13
3.4	Werking van het constrained based method.	14
3.5	De componenten van een simulator voor een haptisch systeem.	15
6.1	Force-shading gebruik makend van de vertices van de driehoek waartegen het contactpunt gebotst is.	23
6.2	Force-shading gebruik makend van de normalen van de buur-driehoeken.	24
6.3	Het effect van force-shading.	24
6.4	Mesh-modellen van een vis, bol en een doos.	29
7.1	JND	38

Lijst van tabellen

2.1	Haptische definities	4
7.1	Het aantal botsingen gedetecteerd voor elke getest algoritme. Voor elke algoritme werden 50000 metingen uitgevoerd.	36
7.2	De gemiddelde rekentijd die nodig is per berekening, uitgedrukt in milliseconden.	36
7.3	De gemiddelde JND voor verschillende gewrichten aan de arm	37
7.4	De lengtes van de verschillende onderdelen van de arm die van belang zijn bij haptische interacties	37
7.5	De lengtes van de verschillende onderdelen van de arm die van belang zijn bij haptische interacties	39
8.1	Paren van algoritmes - doos - X-coördinaat.	42
8.2	Correlatie - doos - X-coördinaat.	44
8.3	T-Test - doos - X-coördinaat.	44
8.4	Tabel gebruikt bij de controle of een paar het JND in de x-richting overschrijdt. De p-waarde is afkomstig uit tabel A.18	54
8.5	Tabel gebruikt bij de controle of een paar het JND in de y-richting overschrijdt. De p-waarde is afkomstig uit tabel A.21	55
8.6	Tabel gebruikt bij de controle of een paar het JND in de z-richting overschrijdt. De p-waarde is afkomstig uit tabel A.24	56
8.7	Overzicht van de paired T-tests op de verschillende algoritmes. s=significant verschil; ns=niet-significant verschil; onderlijnd=JND wordt overschreden.	57
A.1	Paren van algoritmes - doos, Y-coördinaat.	64
A.2	Correlatie - doos - Y-coördinaat.	64
A.3	T-Test - doos - Y-coördinaat.	65
A.4	Paren van algoritmes - doos, Z-coördinaat.	66
A.5	Correlatie - doos - Z-coördinaat.	67
A.6	T-Test - doos - Z-coördinaat.	67
A.7	Paren van algoritmes - bol - X-coördinaat.	68
A.8	Correlatie - bol - X-coördinaat.	69
A.9	T-Test - bol - X-coördinaat.	69
A.10	Paren van algoritmes - bol - Y-coördinaat.	70

A.11 Correlatie - bol - Y-coördinaat.	71
A.12 T-Test - bol - Y-coördinaat.	71
A.13 Paren van algoritmes - bol - Z-coördinaat.	72
A.14 Correlatie - bol - Z-coördinaat.	73
A.15 T-Test - bol - Z-coördinaat.	73
A.16 Paren van algoritmes - vis - X-coördinaat.	74
A.17 Correlatie - vis - X-coördinaat.	75
A.18 T-Test - vis - X-coördinaat.	75
A.19 Paren van algoritmes - vis - Y-coördinaat.	76
A.20 Correlatie - vis - Y-coördinaat.	77
A.21 T-Test - vis - Y-coördinaat.	77
A.22 Paren van algoritmes - vis - Z-coördinaat.	78
A.23 Correlatie - vis - Z-coördinaat.	79
A.24 T-Test - vis - Z-coördinaat.	79

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Abstract	i
Lijst van figuren	iii
Lijst van tabellen	iv
Inhoudsopgave	vi
1 Introductie	2
2 Haptics	3
3 Haptische Systemen	10
3.1 Beschrijving	10
3.2 Haptische rendering methodes	12
3.2.1 Penalty Based Method	12
3.2.2 Constraint-based God-object Method	13
3.3 Testen van Haptische Systemen	15
4 Motivatie	17
5 Methode	19
5.1 Simulatie	19
5.2 Metingen	20
6 Experiment	21
6.1 HAL	21
6.1.1 HAL-algoritmes	22
6.1.2 Optimalisaties	25
6.2 CHAI 3D	25
6.2.1 Informatie	25
6.2.2 SOFA-library	26
6.3 Implementatie	27

6.4	Recording	28
6.4.1	Setup	28
6.4.2	Uitvoering	28
6.5	Experimenten (Playback en logging)	31
6.5.1	Setup	31
6.5.2	Uitvoering	31
6.6	Problemen	34
7	Analyse	35
7.1	Eerste vaststellingen	35
7.2	Just noticeable difference	37
7.3	Statistische test	39
8	Resultaten	41
8.1	Doos	42
8.1.1	X-coördinaat(tabel 8.1, 8.2 en 8.3)	42
8.1.2	Y-coördinaat(tabel A.1, A.2 en A.3)	47
8.1.3	Z-coördinaat(tabel A.4, A.5 en A.6)	48
8.1.4	Conclusie	49
8.2	Bol	49
8.2.1	X-coördinaat(tabel A.7, A.8 en A.9)	49
8.2.2	Y-coördinaat(tabel A.10, A.11 en A.12)	51
8.2.3	Z-coördinaat(tabel A.13, A.14 en A.15)	52
8.2.4	Conclusie	53
8.3	Vis	53
8.3.1	X-coördinaat(tabel A.16, A.17 en A.18)	53
8.3.2	Y-coördinaat(tabel A.19, A.20 en A.21)	55
8.3.3	Z-coördinaat(tabel A.22, A.23 en A.24)	56
8.3.4	Conclusie	57
8.4	Conclusie	57
9	Alternatieven	59
9.1	Mathematische modellen	59
9.2	Pad-vergelijking	59
10	Conclusie	61
A	Resultaten: tabellen	63
A.1	Tabellen: Doos-X	63
A.2	Tabellen: Doos-Y	63
A.3	Tabellen: Doos-Z	66
A.4	Tabellen: Bol-X	68
A.5	Tabellen: Bol-Y	70

A.6	Tabellen: Bol-Z	72
A.7	Tabellen: Vis-X	74
A.8	Tabellen: Vis-Y	76
A.9	Tabellen: Vis-Z	78

1

Introductie

De evaluatie van haptische algoritmes is al een geruime tijd een hekel punt in de informatica waarnaar nog niet heel erg veel onderzoek is verricht. Dit is dan ook de belangrijkste reden waarom er voor precies dit onderwerp gekozen is voor deze thesis. Een grondige literatuurstudie was nodig, en de hoofdstukken 2 en 3 beslaan dan ook hoofdzakelijk deze literatuurstudie. Na de literatuurstudie was het nodig om een evaluatiemethode te bedenken die in een groot aantal situaties bruikbaar hoort te zijn. De gevonden methode werd vervolgens toegepast om de algoritmes van CHAI3D en HAL (waarin verschillende optimalisaties geïmplementeerd zijn) met elkaar te vergelijken en te evalueren.

Het structuur van de tekst is als volgt ingedeeld: Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de achtergrond van haptics en geeft aan welke mogelijkheden er momenteel bestaan voor haptische systemen. Hoofdstuk 3 geeft een beknopt overzicht van twee welgekende haptische rendering methodes en geeft de aanzet voor de evaluatie van haptische systemen. Hierna, in hoofdstuk 4, komt de motivatie achter dit werk. Hoofdstuk 5 bespreekt de meer concrete manier waarop we haptische algoritmes kunnen evalueren. Hierop volgt de precieze omschrijving van de uitgevoerde experimenten, in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 7 vinden we de resultaten van een inleidende analyse waaruit toch al een aantal conclusies getrokken kunnen worden. Hoofdstuk 8 toont de resultaten uit de uitgevoerde experimenten samen met de observaties die gedaan zijn bij deze resultaten. Hoofdstuk 9 en 10 bespreken eventuele alternatieven, toekomstig werk en geven een conclusie over de gebruikte evaluatie methode.

2

Haptics

Het woord *haptics*, van het Griekse haptein (= aanraken), werd in het begin van de twintigste eeuw voor het eerst geïntroduceerd om het gebied van menselijke touch-based perceptie en manipulatie te omschrijven. In het begin van de jaren '90 heeft het woord een bijkomende betekenis gekregen, met name de wetenschap om tactiele sensaties toe te voegen aan de interacties tussen computers en mensen. Door objecten in een virtuele wereld voelbaar te maken aan een persoon en toe te laten dat deze objecten met krachtterugkoppeling manipuleerbaar zijn, wordt de onderdompeling in de virtuele wereld sterk verbeterd.

Algemeen kan gezegd worden dat haptics refereert naar de manuele interacties met omgevingen, zoals de exploratie van omgevingen om informatie te vergaren of de manipulatie van die omgeving. Maar het gebruik van haptics is niet beperkt tot de computerwereld waarin virtuele omgevingen gerenderd worden en haptisch voelbaar moeten zijn. Tegenwoordig worden haptics in een grote verscheidenheid van gebieden gebruikt: chirurgie, luchtvaart, architectuur, design, militaire toepassingen, et cetera.

Verder in deze thesis zullen we gebruik maken van de volgende termen die in het onderzoeksgebied als volgt gedefinieerd zijn. (tabel 2.1) [12]

Computer Haptics gebruikt een weergavetechnologie waarbij objecten fysisch voelbaar en manipuleerbaar zijn aan de hand van krachtterugkoppeling. Haptische interfaces - ook wel force-feedback apparaten genoemd - oefenen krachten uit op een lichaamsdeel van de gebruiker terwijl de gebruiker met de, niet noodzakelijk virtuele, omgeving interageert. Een haptische interface zorgt met andere woorden voor zowel de input als de output van een systeem. Vaak wordt de output van een haptische interface vergezeld van een visuele weergave van de omgeving. De directe fysieke interacties met virtuele objecten zorgen

Term:	Definitie
Haptisch:	Met betrekking tot het gevoel.
Proprioceptief:	Met betrekking tot het vermogen van een organisme om de positie van het eigen lichaam en lichaamsdelen waar te nemen.
Kinetisch:	Het gevoel van beweging van de spieren, pezen en gewrichten.
Cutaan:	Met betrekking tot de huid of de huid als zintuig: druk, temperatuur en pijn.
Tactiel:	Gerelateerd aan het cutane gevoel, maar dan nadruk op het drukgevoel.
Krachtterugkoppeling:	Met betrekking tot de productie van informatie dat gevoeld wordt door het menselijke kinetisch systeem.

Tabel 2.1: Haptische definities

voor een bruikbare en intuïtieve weergave van informatie van een omgeving. Een haptisch apparaat is met andere woorden een bi-directionele interface tussen de computer en de gebruiker. De bewegingen van de gebruiker worden geregistreerd door het apparaat en deze gegevens worden doorgegeven aan de computer en vervolgens verwerkt. De computer zal dan het apparaat aansturen om bepaalde krachten te generen. Op die manier kunnen virtuele objecten voelbaar gemaakt worden aan de gebruiker.

Het menselijke gevoel bestaat uit twee gescheiden delen, die door de hersenen verwerkt en samengevoegd worden:

- Kinetisch: Het kinetische gevoel wordt gebruikt voor positiebepaling en de beweging van ledematen. Verder worden de krachten op de spieren ook met dit type gevoel geassocieerd. Het kinetische gevoel zorgt voor het proprioceptief vermogen van de mens.
- Tactiel: Receptoren in de huid zorgen voor prikkels die gebruikt worden om details te kunnen waarnemen van een object. Op deze manier kunnen textuur, frictie, et cetera waargenomen worden.

De verwerking van deze gevoelens in de hersenen bepaalt de specificaties waaraan haptische interfaces moeten voldoen. Zoals er voor een bewegend beeld 25 beelden of frames per seconde nodig zijn om vloeiende overgangen te verkrijgen, zijn er bij haptics 1000 updates per seconde nodig om een realistisch gevoel te simuleren.

Hoewel er al sinds de begin jaren '60 vermeldingen van haptische interacties zijn, hebben recent beschikbare en betaalbare technologieën, zoals hoog-performante haptische interfaces,

cost-efficiënte computer hardware, berekenbare geometrie modellering en collision detectie, en voldoende kennis van het menselijke perceptie systeem ervoor gezorgd dat kwalitatief hoogstaande en betaalbare haptische systemen ontwikkeld kunnen worden die ook voor een breed publiek beschikbaar zijn [23]. Zo zijn er voor de computerspelletjesindustrie al verscheidene haptische apparaten ontwikkeld, met wisselend succes.

Haptische apparaten

Er bestaat een grote verscheidenheid van haptische apparaten. Elk apparaat heeft zijn doel en is vaak enkel specifiek voor dat doel bruikbaar. Haptisch apparaten bezitten een aantal eigenschappen die vaak hun capaciteiten en ook hun prijs bepalen. Een aantal eigenschappen:

- Degrees of Freedom (DOF): Dit is een heel belangrijke eigenschap en bepaalt het aantal vrijheidsgraden waarin het apparaat gemanipuleerd kan worden. Dit zijn in feite het aantal richtingen die gebruikt kunnen worden voor input en output. In de praktijk kan deze waarde 1, 2, 3 of 6 zijn. Voor de waarden 1, 2 en 3 is het evident in welke richting bewogen kan worden, namelijk de drie dimensies. Bij 6 vrijheidsgraden kan de gebruiker ook rond de drie assen draaien.
- Aarding: Indien een apparaat geaard is, is het bevestigd aan een vast oppervlak zoals een tafel of de grond. Een apparaat dat niet geaard is, is vrij beweegbaar, zoals een haptische handschoen of een exo-skeletal harnas.
- Bandbreedte: Net zoals een televisie een bandbreedte van 25Hz gebruikt om vloeiende beelden te genereren, hebben haptische devices minimaal een bandbreedte van 1KHz nodig. Het apparaat moet dus elke seconde 1000 keer de feedback aanpassen om voor een realistische weergave te komen. Deze bandbreedte komt overeen met die van het menselijk gevoel.
- Sensor&Feedback: Het is ook erg belangrijk dat de servo's in het apparaat een groot dynamisch bereik hebben en dat de resolutie van de sensoren en servo's groot zijn.
- Werkruimte: De grootte van het volume waarin het haptische apparaat kan manoeuvreren is eveneens van belang. Te kleine volumes beperken de bruikbaarheid, en te grote volumes maken het apparaat onhandig.

Voorbeelden

In het algemeen worden haptische apparaten volgens hun aantal vrijheidsgraden in groepen opgedeeld. Voor elke groep zullen nu een paar voorbeelden en toepassingsgebieden volgen.

- 1DOF: het makkelijkste voorbeeld van een 1DOF-force-feedbackapparaat is een stuurwiel met force-feedback. Vaak worden deze apparaten voor computergames gebruikt (voorbeeld: fig. 2.1(a)), maar er zijn ook toepassingen in de simulatiewereld, zoals bijvoorbeeld de rij-simulator die de politie gebruikt om het rijden onder invloed na te bootsen (fig. 2.1(b)). Meestal onderscheiden deze apparaten zich van elkaar in nauwkeurigheid en kwaliteit.



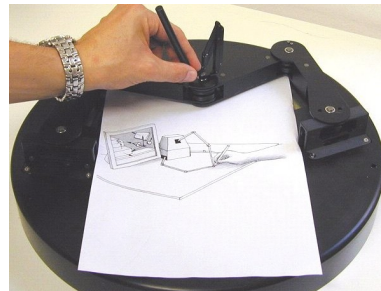
(a) De Microsoft Sidewinder Force Feedback Steering Wheel. (b) De rij-simulator die tijdens de BOB-campagnes gebruikt wordt.

Figuur 2.1: 1 DOF haptische apparaten.

- 2DOF: Hier vinden we twee grote groepen. De eerste groep zijn de zogenaamde joysticks. Deze apparaten zijn te vergelijken met de stuurstangen die in de vroegere gevechtsvliegtuigen te vinden waren. Er worden krachten uitgeoefend in de X- en Y-richting. Joysticks worden hoofdzakelijk in de entertainmentwereld gebruikt en hebben meestal de precisie niet om tijdens een echte simulatie gebruikt te worden (fig. 2.2(a)). De tweede groep van apparaten zijn de force-feedback muizen en stylus apparaten. Deze groep wordt hoofdzakelijk gebruikt in het bijstaan van interacties in een 2D interface, zoals tekenapplicaties (fig. 2.2(b)).
- 3DOF: In deze groep vinden de meest gebruikte apparaten. Het zijn vooral deze apparaten die in de onderzoekswereld vaak gebruikt worden. Eén van de bekendste types is de PHANToM, van SensAble Technologies. Er zijn verschillende versies beschikbaar en afhankelijk van de versie kunnen er ook 6 DOF gebruikt worden. Meestal wordt de PHANToM aan de hand van een stylus gemanipuleerd, maar ook een 'vingerhoedje' is mogelijk (fig. 2.3).



(a) De Microsoft Sidewinder Force Feedback 2.



(b) De 5 BAR ontwikkeld door Percro.

Figuur 2.2: 2 DOF haptische apparaten.



(a) Sensable Phantom Premium 1.0



(b) Sensable Phantom Omni

Figuur 2.3: 3 DOF haptische apparaten.

- 6DOF: Deze devices laten toe dat zowel oriëntatie als positie van de eindreceptor gebruikt wordt voor feedback. Omwille van de complexiteit van deze apparaten zijn ze vaak nog erg duur. Hierdoor worden ze dan ook in de praktijk nog niet erg veel gebruikt (fig. 2.4).

Bovenstaande voorbeelden zijn allemaal actief en geaard. Zoals eerder vermeld bestaat er een bijzondere groep van ongeaarde devices, namelijk de exo-skeletal haptische devices. Het bijzondere van deze apparaten is dat ze vaak aan het menselijke lichaam bevestigd worden. Algemeen kan gesteld worden dat deze apparaten een van de volgende twee doelen heeft. Het eerste doel is het versterken van feedback uit een virtuele wereld, zodat het realisme sterk stijgt. Met een exo-skeletal haptische handschoen kan bijvoorbeeld vrij realistisch het vastnemen van virtuele objecten gesimuleerd worden en kunnen de objecten als reëel aanvoelen (fig. 2.5). Een tweede toepassing is het bijstaan van de natuurlijke bewegingen



Figuur 2.4: Een SensAble PHANTOM Premium 1.5 met 6 DOF



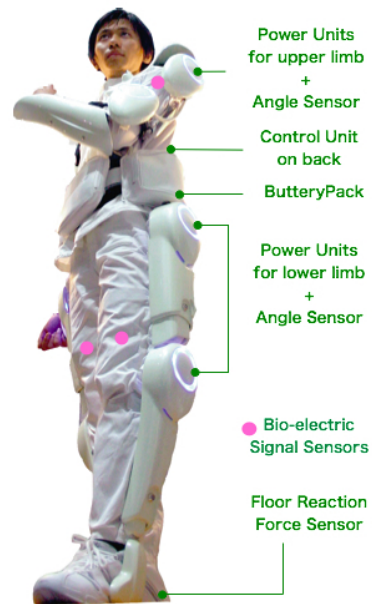
Note: The use of pneumatic pistons makes it possible to achieve a low weight and hence a portable device to simulate the grasping of virtual objects.

Figuur 2.5: Het gebruik van pneumatische cilinders maakt het mogelijk om een draagbaar en licht apparaat te maken dat het grijpen van virtuele objecten simuleert.

van het lichaam. Deze apparaten kunnen een deel van het lichaam beslaan, maar kunnen ook als een soort van harnas over het hele lichaam gedragen worden. Dit type van apparaat vindt toepassing in geneeskundige rehabilitatie [15], en gebruik op militair vlak is niet ver te zoeken. Deze harnassen kunnen de gebruiker onmenselijk sterk en lenig maken. Dit klinkt nog als science-fiction, maar er zijn al operationele apparaten te vinden (fig. 2.6).

Conclusie

Gedurende de afgelopen decennia zijn al een groot aantal strategieën en oplossingen gepresenteerd in het haptische onderzoeksgebied. Er zijn ook een groot aantal tools en technieken beschikbaar die met elkaar vergeleken moeten worden. Hier is momenteel echter nog maar weinig onderzoek naar verricht. Er bestaat met andere woorden een noodzaak om methodes te ontwikkelen die gebruikt kunnen worden om verschillende systemen van verschillende onderzoeksgroepen te vergelijken en de correctheid ervan te controleren.



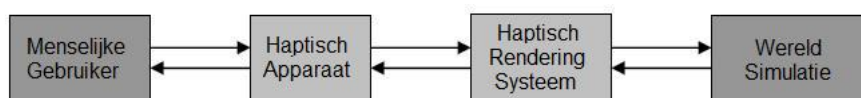
Figuur 2.6: De HAL-5, een full-body power-harnas, van Cyberdyne Inc.

3

Haptische Systemen

3.1 Beschrijving

Een haptisch systeem bestaat in de meeste gevallen uit vier gescheiden componenten: de wereld simulator, het haptisch rendering systeem, het haptische apparaat en de gebruiker (fig. 3.1).



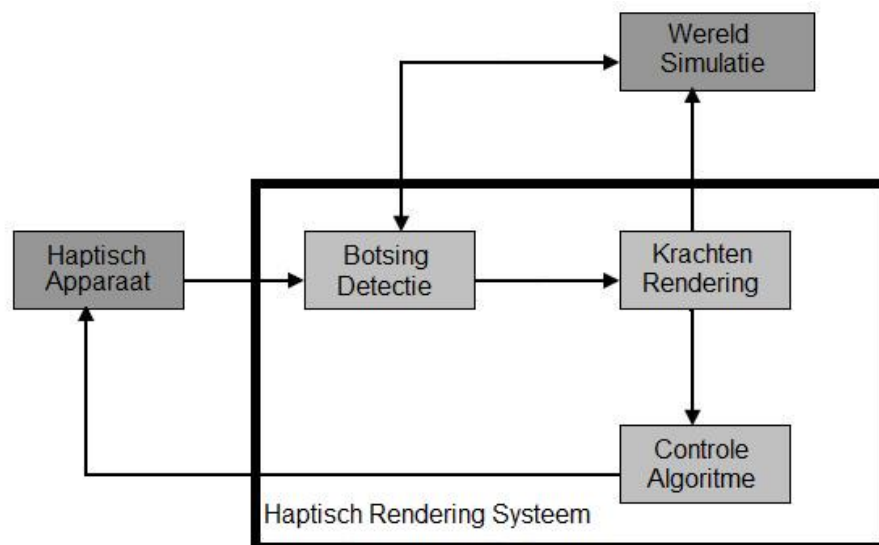
Figuur 3.1: basis architectuur van een haptisch systeem.

- De *Wereld Simulatie* is verantwoordelijk voor het gedrag van de virtuele omgeving.
- Het *Haptische Rendering Systeem* is verantwoordelijk voor de berekening van de botsingen en de berekening van de daaruit resulterende krachten, die naar de gebruiker overgebracht moeten worden. De performantie van dit systeem is een zeer belangrijke factor in de algemene prestaties van het haptische systeem in zijn geheel.
- Het *Haptische Apparaat* brengt de krachten die berekend worden door het haptische rendering systeem over naar de gebruiker door de signalen van de computer om te

zetten naar krachten op de servo-motoren van het apparaat. Dit apparaat ontvangt ook de input van de gebruiker en geeft die door aan het rendering systeem.

- De *Gebruiker* interageert met het haptische apparaat, geeft input door het apparaat te manipuleren (bijvoorbeeld door te bewegen met de controle-pen bij de PHANToM) en neemt de gegenereerde krachten waar.

Het doel van deze thesis is de evaluatie van haptische algoritmes op basis van metingen die uitgevoerd worden tijdens het gebruik van het haptische systeem. Het is dus cruciaal om over een uitgebreide kennis van de werking van het haptische rendering systeem te beschikken. Omdat het haptisch rendering rendering systeem vaak de bottleneck vormt, zullen we op dat onderdeel van het onderzoek dieper in gaan. Typisch bestaat een haptisch rendering systeem uit de combinatie van drie onderdelen, het collision detectie algoritme, kracht rendering en het controle algoritme (fig. 3.2).



Figuur 3.2: componenten van een haptisch rendering systeem.

- **(Stap1)** Het *Collision Detectie Algoritme* berekent de botsingen tussen de representatie van de gebruiker en de objecten in de virtuele omgeving waarin de gebruiker zich bevindt. De gevonden botsing wordt doorgegeven aan het algoritme dat de krachten berekent.
- **(stap2)** Het *Krachten Rendering Algoritme* berekent de resulterende krachten genereert door de botsingen uit de eerste stap.
- **(stap3)** Het *Controle Algoritme* controleert de krachten die naar het haptische apparaat gestuurd worden om deze zo realistisch mogelijk te laten overkomen - frictie, traagheid, etc.

Vergeleken met klassieke auditieve en visuele systemen vereist een haptisch systeem een grote hoeveelheid systeemresources. Dit komt omdat de fysieke interacties tussen verschillende objecten en het genereren van krachten die ontstaan tijdens het bewegen in de virtuele omgeving in real-time moeten gebeuren. Het wordt aangenomen dat de refresh-rate in de grote orde van 1000 Hz moet zijn om een vloeiende en overtuigende weergave van krachten te kunnen voorzien in een stabiel systeem [19] [21]. In elke haptische update loop moet er op botsingen gecontroleerd worden en moeten de bijbehorende krachten berekend worden. Dit betekent dat de benodigde rekentijd niet groter mag zijn dan 1 milliseconde. Als men rekening houdt met de tijd dat een haptisch apparaat nodig heeft om de juiste krachten te genereren moet de rekentijd nog korter zijn. Het is dus essentieel om een efficiënt maar toch correct haptisch rendering algoritme te hebben om een goed haptisch systeem te verkrijgen. De focus van deze thesis ligt dan ook op de evaluatie van het haptisch rendering systeem.

3.2 Haptische rendering methodes

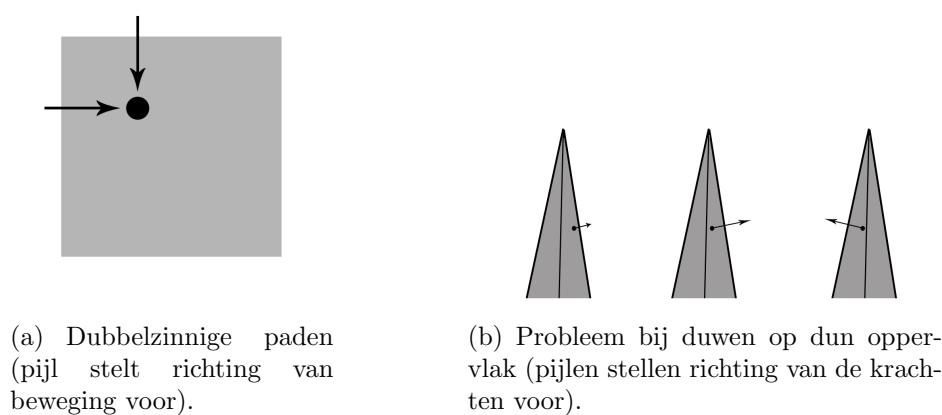
De volgende modellen zijn gebaseerd op gebruik van veelhoeken om complexe objecten te construeren. De basisblokken van dit type systemen zijn driehoeken aangezien elke andere vorm aan de hand van een aantal driehoeken opgebouwd kan worden. Het zoeken naar een botsing bestaat dan uit het zoeken naar een snijpunt tussen het pad van het apparaat en de oppervlakken van de driehoeken. Er bestaan echter meerdere manieren waarop dit kan gebeuren, en in elk van de volgende twee secties wordt er één beschreven.

3.2.1 Penalty Based Method

Historisch gezien was dit de eerste methode die door vele haptische systemen werd geïmplementeerd. De methode bestaat uit twee onderdelen die bij elke update van het apparaat berekend moeten worden.

- **Diepteberekening:** In deze stap wordt er berekend hoe diep het haptische interface punt (het eindpunt van het haptische apparaat waarmee geïntereageerd wordt) in een model ligt. Voor complexe objecten treden er echter problemen op die zich niet voordoen voor simpele objecten. Zo ontstaat er een probleem als het contactpunt op de snijlijn van twee oppervlakken ligt. Bij het berekenen van de krachten worden de krachten die voortkomen door de botsing met elk van de oppervlakken opgeteld, en dat geeft geen realistisch gevoel voor de gebruiker. Dit kan zelfs tot beschadiging van het apparaat of tot een kwetsuur van de gebruiker kan leiden. Een tweede

probleem is dat de manier waarop de richting waaruit het interface punt het object is binnengedrongen wordt bepaald, niet ambigu is. Het oppervlak het dichtst bij het haptische interface punt wordt als actief beschouwd, met andere woorden wordt de kracht berekend aan de hand van de diepte ten opzichte van dat oppervlak. Hierdoor komen er situaties voor dat wanneer het haptische interface punt te diep in het model wordt geduwd, er plotse overschakelingen tussen actieve oppervlakken ontstaan met alle ongewenste effecten vandien. Dit probleem komt nog sterker naar voor bij het interageren met dunne regionen van modellen waarbij het mogelijk is dat het haptische interface punt gewoon door het model heen wordt getrokken door de resulterende krachten (fig. 3.3).



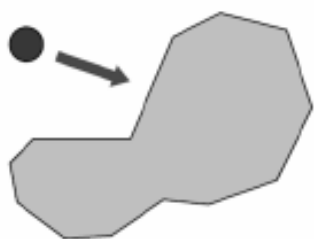
Figuur 3.3: Problemen bij de penalty based methode.

- **Krachtberekening:** In deze stap wordt berekend hoe groot de kracht moet zijn die als feedback gebruikt gaat worden. De kracht wordt berekend aan de hand van de diepte die gevonden is in de voorgaande stap. Aangezien deze berekening samen met de vinden van botsingen gebeuren in de haptische loop, mag de rekentijd samen met die van de botsingdetectie de 1ms bovengrens niet overschrijden.

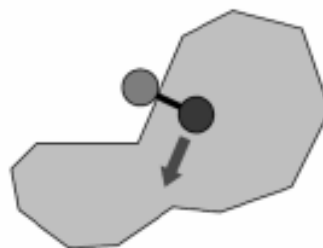
3.2.2 Constraint-based God-object Method

Om de problemen van de vorige methode te vermijden, werd een methode ontwikkeld die in alle situaties goed werkt en die situatie-afhankelijk is. In plaats van rechtstreeks met het haptische interface punt te werken, introduceerden Zilles et al [26] in hun methode het principe van het *god-object*. Dit is in feite de virtuele vertegenwoordiger van het haptische interface punt, met als verschil dat het enkel softwarematig bestaat en dus veel flexibeler is. Aan de hand van de geschiedenis van het god-object, het haptische interface punt en de verzameling van oppervlakken waaruit een model is opgebouwd kunnen we de verzameling van mogelijke botsingsoppervlakken berekenen. Omdat we totale controle hebben over het

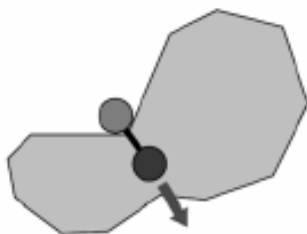
god-object kunnen we het laten stoppen op de oppervlakken van objecten. Het god-object wordt op de locatie geplaatst waar het haptische interface punt zich zou bevinden indien het virtuele object waar doorheen gegaan wordt oneindig stijf zou zijn. Met deze methode is het niet mogelijk dat er een dubbelzinnigheid bestaat over de richting van de resulterende kracht. Dit komt omdat het god-object een oppervlak enkel kan verlaten door over het oppervlak te glijden naar een aangrenzend oppervlak, of door het haptische interface punt uit het object te bewegen. Dit voorkomt eveneens het probleem van de penalty based methode bij het gebruik van dunne modellen. De werking van de methode is te zien op figuur 3.4.



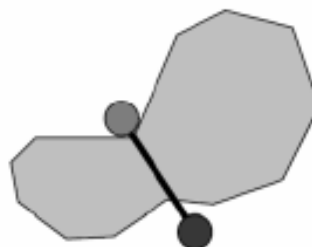
(a) Het haptische interface punt benaderd een virtueel object.



(b) Het interface punt botst tegen het object en het god-object wordt op het oppervlak geplaatst waar normaal het interface punt zou zijn blijven hangen. Daarna wordt het interface punt naar onder bewogen



(c) Het god-object botst tegen het tweede oppervlak en blijft in de hoek hangen. Daarna wordt het interface punt dieper in het object geduwd.



(d) Zelfs als het interface punt volledig doorheen het object geduwd is, blijft het god-object in de hoek hangen zoals interface zou doen indien het een reëel object zou zijn.

Figuur 3.4: Werking van het constrained based method.

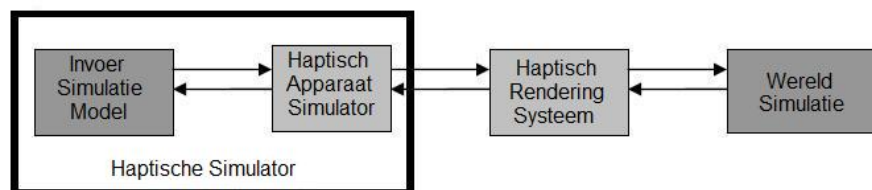
Voor meer gedetailleerde informatie over deze methode verwijzen we de geïnteresseerde lezer naar Ziller et al. [26]

3.3 Testen van Haptische Systemen

Haptische systemen zijn om verschillende redenen moeilijk testbaar en evalueerbaar:

- Zeer grote hoeveelheid data (positie, richting, snelheid, krachten, ...)
- Zeer hoge samplefrequentie
- Real-time systeem
- Bi-directioneel karakter
- Subjectiviteit van de gebruiker
- Niet-reproduceerbaarheid van tests

Als oplossing voor deze problemen zouden we een aantal simulators kunnen construeren waarbij de menselijke gebruiker en het haptische apparaat vervangen wordt door een input simulator en een haptisch apparaat simulator (fig. 3.5). Het simulatie systeem bestaat uit twee nieuwe componenten die we in een traditioneel haptisch systeem niet terugvinden, nl. het Input Simulatie Model en de Haptisch-Apparaat Simulator.



Figuur 3.5: De componenten van een simulator voor een haptisch systeem.

- Het *Input Simulatie Model* wordt gebruikt voor het nabootsen van de menselijke gebruiker door een eerder opgenomen pad terug af te spelen en door te geven aan de simulator die het haptische apparaat nabootst.
- De *Haptisch-Apparaat Simulator* bootst het haptische apparaat na. Het voorziet dezelfde mogelijkheden als een reëel haptisch apparaat, met als verschil dat er geen krachten worden gegenereerd en geen bewegingen van een menselijke gebruiker nodig zijn.

Zolang er een menselijke gebruiker in het systeem aanwezig is, zou het strikt genomen niet mogelijk zijn om het systeem te vergelijken met andere haptische systemen. Aangezien een haptisch apparaat van nature een bi-directioneel input/output apparaat is, zijn we

verplicht dit ook te vervangen door een simulator. Deze opstelling geeft ons de mogelijkheid om het haptische rendering systeem met input te voorzien die reproduceerbaar is. In de simulator voorzien we een module waarin de waarden die van het haptische rendering systeem verkregen worden - het bestaan van een botsing, positie botsing, grootte van de krachten, richting van de krachten, benodigde rekentijd, ... - opgeslagen worden, zodat de resultaten van verschillende systemen betekenisvol vergeleken kunnen worden.

Op de resulterende krachten kunnen dan statistische bewerkingen gedaan worden. Op deze manier kunnen we verschillende haptische rendering systemen onder gecontroleerde omstandigheden vergelijken zonder dat er invloed is van menselijke gebruikers.

4

Motivatie

Het haptische onderzoeksgebied is enorm multidisciplinair en wordt gebruikt voor een groot aantal toepassingen zoals robotica, experimentele psychologie, biologie, 3D-design, computer science, ... Het toepassingsgebied groeit overigens nog steeds. Vergeleken met een vijftiental jaren geleden is het aantal uitgegeven artikels en papers sterk gestegen. Dit duidt op een duidelijke groei in interesse naar dit onderzoeksgebied.

Een zeer groot deel van de huidige artikels en papers gaan over de gebruikte rendering technieken. Massie et al. [8] gebruiken een penetratie gebaseerde methode die goed functioneert voor primitieve objecten maar faalt bij dunne en complexe objecten. Zilles et al. [26] en Anderson et al. [2] ontwikkelden een constraint-gebaseerde rendering methode. Bij deze methode werd een proxy object (ook wel god-object of surface-contact-point) gedefinieerd dat gebruikt wordt om de afstand tussen het actieve polygon van het object en het controlepunt van het apparaat te bepalen. Ho et al. [6] hebben het algoritme van Zilles en Salisbury verbeterd door een hiërarchische database te construeren waarin de geometrische eigenschappen van de 3D objecten worden opgeslagen.

Uitgebreid onderzoek is ook gedaan naar bruikbare interactietechnieken in het haptische systeem en praktische applicaties van die systemen [3] [13] [14].

Verder is er nog onderzoek gedaan naar methodes om de krachten realistisch te maken door wrijving en textuur toe te voegen aan de oppervlakken van de virtuele objecten. Morgenbesser et al. [10] introduceerden een force-shading techniek en verder zijn er ook verscheidene frictiemethoden door meerdere onderzoeksgroepen ontwikkeld [9] [20] die ervoor gezorgd hebben dat een realistische weergave van krachten aan de gebruiker gepresenteerd kunnen worden.

Een uitgebreid gamma aan methodes en oplossingen in dit onderzoeksgebied zijn gepre-

senteerd, om er vervolgens voor te zorgen dat onderzoeksresultaten gevalideerd kunnen worden en om ervoor te zorgen dat resultaten van verscheidene laboratoria vergeleken kunnen worden is er nood aan een methode die deze resultaten met elkaar kan vergelijken en ze kan evalueren. Een haptisch systeem kan op twee manieren getest worden, op vlak van performantie en op vlak van correctheid.

Testen op performantie

Performantietesten worden gebruikt om te evalueren hoe het systeem zich zowel software- als hardware-matig zal gedragen op vlak van verwerking- en responsiesnelheid terwijl het in gebruik is. Een benchmark is een gekende methode die hiervoor gebruikt wordt en wordt al veelvuldig gebruikt in andere regio's van de computerindustrie. Hierbij wordt het geteste systeem aan een aantal representatieve testen onderworpen en de performantie van het systeem wordt zorgvuldig gemeten en bijgehouden. Bij het testen van een ander systeem worden dezelfde representatieve testscenario's gebruikt. Op die manier is het mogelijk om de performantie van verschillende systemen met elkaar te vergelijken en hier conclusies uit te trekken. Zoals eerder al aangegeven, is het bijzonder moeilijk om een haptisch systeem te testen omdat een aantal variabele factoren die in rekening gebracht moeten worden. Doordat er steeds een menselijke gebruiker aanwezig is in een haptisch systeem, zal er nooit meermaals exact hetzelfde scenario gebruikt worden, het is nu eenmaal onmogelijk voor de gebruiker om meermaals dezelfde bewegingen uit te voeren zonder dat er afwijkingen optreden. Met andere woorden is het niet mogelijk om reproduceerbare testen te creëren zolang er menselijk gebruikers deel zijn van het testsysteem.

Testen op correctheid

Verder moeten er ook testen uitgevoerd worden die het systeem controleren op correctheid. Ook hier duiken er een aantal fundamentele problemen op. Opnieuw is de menselijke gebruiker een hinderpaal voor het creëren van reproduceerbare testscenario's. Verder is de zeer grote hoeveelheid te registreren data een obstakel. Al deze data moet op een betekenisvolle en wetenschappelijke (statistische) manier verwerkt worden zodat er besluiten genomen kunnen worden over de correctheid van het systeem. Hierbij moet er rekening gehouden worden met toelaatbare afwijkingen omwille van het *Just Noticeable Difference* van het menselijke kinesthetische systeem. Als er dan toch afwijkingen zouden optreden, moet er op statistische manier beslist worden of die afwijking significant is of niet.

Het doel van deze thesis is om een testmethode te ontwikkelen die hoofdzakelijk de correctheid van haptische algoritmes test en beoordeelt en het verder ook mogelijk maakt dat algoritmes met elkaar vergeleken worden.

5

Methode

5.1 Simulatie

Zoals eerder aangegeven werd, zal het testsysteem uit een aantal simulators bestaan die de menselijke gebruiker en het haptische apparaat zullen vervangen (fig.3.5). Door deze simulators verwijderen we de onbetrouwbare elementen van het systeem en krijgen we een voorspelbaar systeem dat onderworpen kan worden aan reproduceerbare testen.

Invoer simulatie model (Recorder)

De werking van het *invoer simulatie model* kunnen we als volgt omschrijven. Er wordt een virtuele scene opgebouwd waarin er voldoende objecten aanwezig zijn om een representatieve situatie voor te stellen. Vervolgens zal een gebruiker, met bijvoorbeeld een PHANTOM, een sessie uitvoeren met een haptisch systeem waarvan in het algemeen geaccepteerd wordt dat het correct werkt. Het gevolgde pad van de gebruiker wordt opgenomen door de *recorder*. Op deze manier hebben we de input die we nodig hebben om aan de Haptische-apparaat Simulator door te geven, zodat verschillende algoritmes getest kunnen worden.

Haptisch-Apparaat Simulator (Playback en Logger)

Door het gebruik van het *invoer simulatie model*, en dus het weglaten van real-time interactie met een gebruiker, is het overbodig om een haptisch apparaat te gebruiken in het

systeem (enkel bij het opstellen van de test is het apparaat nog vereist). Het pad dat we bij het opstellen van de test hebben opgenomen kunnen we invoeren aan deze simulator en deze zal de data doorgeven aan het rendering systeem. Het rendering systeem weet niet dat de data in feite uit een bestand wordt ingelezen en zal de nodige berekeningen uitvoeren en teruggeven aan de simulator alsof dit een haptisch apparaat is. De functie van deze simulator zal eruit bestaan om de resulterende data te registreren en op te slaan naar een bestand. We hebben met andere woorden nu een manier om resultaten van dezelfde test op verschillende rendering algoritmes te vergelijken op een reproduceerbare methode.

5.2 Metingen

Een belangrijk aspect van een geldig testsysteem, is de registratie van voldoende gegevens. De input kan in een aantal gelijke tijdstappen verdeeld worden, en deze worden één voor één aangegeven als invoer voor het systeem. Voor elke tijdstap worden de resultaten van de berekeningen opgeslagen. De volgende gegevens moeten bijgehouden worden om een volwaardige evaluatie te verkrijgen.

- Botsing: Het is zeer belangrijk dat het geteste algoritme een botsing detecteert indien het referentie algoritme dit ook doet. Als er hier verschillen optreden is kunnen we zeggen dat het nieuwe algoritme niet *collision equivalent*[16] is met het referentie algoritme. Hierdoor mogen we ook besluiten dat de algoritmen niet *render equivalent*[16] zijn. Zelfs al vinden beide algoritmen op dezelfde momenten botsingen, is het niet noodzakelijk zo dat de algoritmes *render equivalent* zijn. Dan moeten de gevonden coördinaten van de botsingen ook overeenkomen.
- Botsingscoördinaat: Zowel de X-, Y- en Z-waarde van het coördinaat worden opgeslagen. Indien de afwijkingen op de gevonden waarden ten opzichte van het referentie algoritme het JND niet overschrijdt, mogen we besluiten dat de twee algoritmes *render equivalent* zijn.
- Krachten: Voor de krachten is het nodig om de grootte en richting te controleren. Net zoals bij de botsingscoördinaten mogen de waarden niet verder afwijken dan het JND. Indien dit niet het geval is mogen we concluderen dat het geteste algoritme en het referentie algoritme *gelijk*[16] zijn.
- Rekentijd: Hetzelfde geldt voor de benodigde rekestijd om alle data te berekenen. In sommige situaties kan het nuttig zijn om algoritmes met een hogere performantie te gebruiken die eventueel minder nauwkeurig werken, bijvoorbeeld bij gebruik van goedkope machines die de nodige rekenkracht niet bezitten om de complexere algoritmes binnen één haptische loop te berekenen.

6

Experiment

In onze proefopstelling zijn er zes algoritmes gebruikt om de datasets te verzamelen. Ten eerste hebben we het algoritme uit het HAL-framework (met de verschillende optimalisaties). Daarnaast hebben we nog het CHAI 3D algoritme.

Voor dit onderzoek hadden we de keuze uit twee recording/playback/logging tools. Ten eerste waren er de modules uit HAL. Verder was er ook nog de SOFA library [16], waarin ook de nodige functionaliteit aanwezig was.

6.1 HAL

Aangezien een substantieel deel van dit werk verricht is met het HAL-framework is het van belang om rond dit framework een duidelijk beeld te scheppen.

HAL is een project dat ontwikkeld is op het EDM¹ met als doelstelling een flexibele library te creëren waarmee onderzoek naar nieuwe haptische rendering- en interactietechnieken. HAL bestaat momenteel uit acht modules:

- Core: deze module bevat alle basisklasses die door de andere HAL-modules gebruikt worden (Node, Vector, Force, ...).
- Forces: hierin zijn verschillende methodes geïmplementeerd die het toelaten force-fields te creëren rond objecten.

¹Expertisecentrum voor Digitale Media, Campus U Hasselt, 3590 Diepenbeek

- **Measurements:** deze module zorgt voor de functionaliteit voor de playback, logging, en recording.
- **Objects:** deze module bevat de verschillende objecten die gebruikt kunnen worden binnen HAL (TriangleMesh, Sphere, AABBtree, vertex, ...).
- **Phantom:** dit is de klasse die met de PHANToM communiceert en de haptische loop regelt.
- **Pseudo:** dit is de klasse die een haptisch pseudo apparaat voorstelt. Hierdoor kunnen we de functionaliteit van HAL gebruiken zonder te beschikken over een haptisch apparaat.
- **Physics:** hierin vinden we de klassen om een mass-spring systeem te gebruiken.
- **Scenegraphs:** deze module bevat een simpele scenegraph manager die ons toelaat om een mass-spring systeem toe te voegen aan de scenegraph. Later kunnen hier andere managers aan toegevoegd worden die andere operaties toe laten.

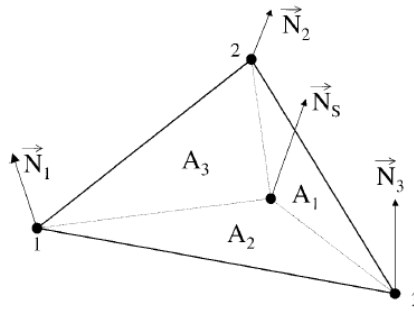
6.1.1 HAL-algoritmes

HAL bevat in principe twee algoritmes, waarvan er één niet werkt goed voor complexe objecten. Voor dit onderzoek is enkel gebruik gemaakt van het correct werkende algoritme. Dit algoritme is een implementatie van de constrained-bases God-object methode van Zilles en Salisbury [26] en bestaat uit drie fases. De verschillende fases werken als volgt:

- *Collision Detection:* de collision detectie van HAL werkt als volgt: eerst wordt er gecontroleerd of er een botsing plaatsvindt met een bepaalde driehoek in het model (het model bestaat uit driehoeken die samen complexe objecten kunnen vormen). Als er een botsing plaats gaat vinden wordt berekend waar op het vlak van die gegeven driehoek het botsingspunt komt te liggen. Het contactpunt wordt dan naar dat punt verschoven. Tijdens deze verschuiving wordt gekeken of er geen andere botsing plaatsvindt met een driehoek die de buur is van de oorspronkelijk driehoek. Opnieuw wordt er berekend waar het botsingspunt met het vlak van de tweede driehoek zou komen liggen. Net zoals bij de eerste botsing verschuiven we nu het contactpunt naar die locatie. De laatste stap van de collision-detection controleert nu nog eens of deze verplaatsing geen botsing veroorzaakt met nog een andere driehoek. Voor de laatste keer wordt nu het botsingspunt berekend met deze derde driehoek en verplaatsen we het contact punt naar die locatie. Er zullen nooit meer dan op drie botsingen gecontroleerd moeten worden omdat het snijpunt van drie driehoeken een punt vormt en dus het contactpunt in dat snijpunt zal moeten liggen. Bij twee botsingen ligt het contactpunt op de snijlijn tussen de twee driehoeken. Indien er geen bijkomende

botsing gevonden kan worden, stopt het algoritme en wordt het laatste contact punt als finaal contactpunt aangenomen.

- *Force Rendering*: aan de hand van het contactpunt en de eigenlijke locatie van het God-object (de positie van de pointer van het haptische apparaat) kan een kracht berekend worden. Het ontwerp van HAL is flexibel genoeg om toe te laten om zelf te bepalen hoe sterk de krachten zijn die gegenereerd worden, en per mesh kan er bepaald worden hoe groot de veer- en dempingsconstanten zijn.
- *Controle Algorithm*: in HAL zijn de volgende controle algoritmes geïmplementeerd: force-shading en frictie. De force-shading bestaat uit twee delen. Ten eerste worden de krachten op een zodanige manier aangepast zodat de overgang tussen driehoeken die een stompe hoek vormen vloeiend voor de gebruiker overkomen. Op die manier voelen objecten die ronde voorwerpen voorstellen ook echt rond aan [10]. Er zijn veel algoritmes ontwikkeld die dit als doel hebben en we zullen er twee kort beschrijven. Het eerste algoritme maakt gebruik van de normalen van de vertices waaruit een model is opgebouwd. In figuur 6.1.1 zien we hoe deze manier van shading werkt.



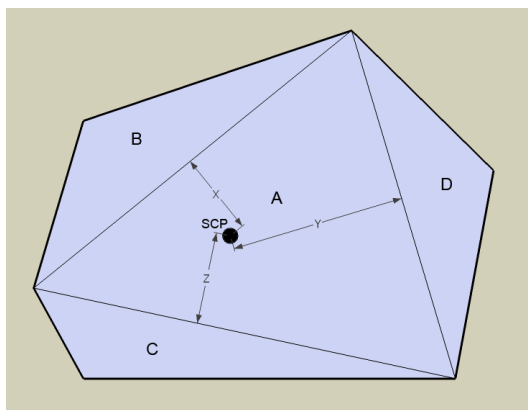
Figuur 6.1: Force-shading gebruik makend van de vertices van de driehoek waartegen het contactpunt gebotst is.

De driehoek waarin het contactpunt ligt wordt in drie kleinere driehoeken opgedeeld, waarbij het snijpunt van de driehoeken het contactpunt is. Aan de hand van de normalen in de vertices en de drie deel-driehoeken, wordt de richting en grootte van de resulterende normaal bepaald. In het geval van het voorbeeld in figuur 6.1, zijn N_1 , N_2 en N_3 de normalen in de vertices en N_s is de normaal in het contactpunt. N_s wordt berekend door de normalen van de vertices uit te middelen, waarbij de gebieden A_1 , A_2 en A_3 als gewichten gebruikt worden:

$$\vec{N}_s = \frac{\sum_{i=1}^3 A_i \cdot \vec{N}_i}{\sum_{i=1}^3 A_i}$$

De normaal van het contactpunt wordt vervolgens gebruikt bij het berekenen van de kracht.

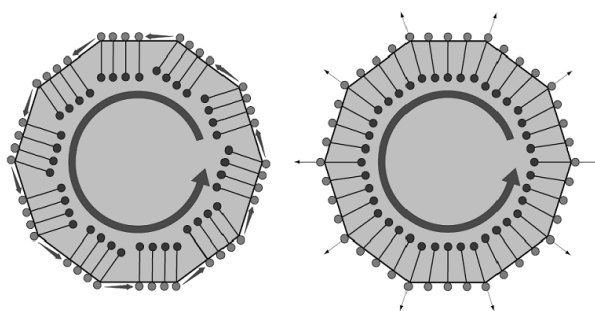
Niet alle datastructuren houden echter normalen in de vertices bij. Bij zulke structuren wordt een ander type van algoritme gebruikt. Nu wordt de loodrechte afstand tot de buur-driehoeken gebruikt als gewicht in plaats van de deel-driehoeken. Figuur 6.2 geeft een voorbeeld hoe deze methode werkt. Aangezien in deze methode geen vertex-normalen aanwezig zijn, worden de normalen van de buur-driehoeken gebruikt. Het effect van deze types van force-shading is te zien in figuur 6.3. We zien



Figuur 6.2: Force-shading gebruik makend van de normalen van de buur-driehoeken.

dat de scherpe overgangen van het object vloeiend worden en dat de gebruiker het object als rond zal ervaren.

Het tweede aspect van de force-shading dient om plotse krachten wisselingen vloei-



Figuur 6.3: Het effect van force-shading.

end te laten aanvoelen voor de gebruiker. In de huidige implementatie wordt er eenderde van de nieuwe kracht gebruikt samen met twee-derdes van de vorige kracht. Dit is echter een zeer simpele manier van shading en kan verbeterd worden door gebruik te maken van een circular array.

Het tweede controle algoritme voegt een vorm van frictie toe aan de rendering. Dit algoritme is gebaseerd op de friction-cone methode van Melder en Harwin [9].

6.1.2 Optimalisaties

Er zijn binnen HAL verschillende optimalisaties beschikbaar waardoor de benodigde reken-tijd van collision detection substantieel verlaagd kan worden. De verscheidene technieken rusten allemaal op het principe dat de mesh opgedeeld kan worden in gebieden. Hierdoor kunnen we lokale gebieden gebruiken als er gezocht moet worden naar botsingen in plaats van de gehele scene te moeten onderzoeken. Er wordt gekeken in welk gebied de pointer ligt en dan kan de verzameling van de te doorzoeken driehoeken beperkt worden tot de driehoeken die in dat gebied of deels in dat gebied liggen. De optimalisaties verschillen van elkaar in de methode waarop de opdeling gebeurt.

- De eerste optimalisatie gebruikt een zogenaamde AABB-tree (Axis-Aligned Bounding Box) om de scene op te delen. Tijdens de experimenten met het HAL algoritme met deze optimalisatie werd een AABB-tree met opdeling 2 gebruikt.
- De tweede optimalisatie gebruikt bollen om de scenes, en dus ook de meshes, op te splitsen. Tijdens de experimenten met het HAL algoritme met deze optimalisatie werd een sphere-tree met opdeling 2 gebruikt.
- De derde en laatste optimalisatie gebruikt een spatial hashing techniek. De 3D-ruimte wordt opgedeeld in kleine grid-cellen. Die grid-cellen worden gehashed in een buckettree gestopt. Ook bij deze optimalisatie werd tijdens de experimenten een opdeling van 2 gebruikt.

Voor meer details over deze technieken verwijzen we naar de thesis van Lode Vanack en [25].

6.2 CHAI 3D

6.2.1 Informatie

Bij de aanvang van dit onderzoek was het de bedoeling dat ook de berekende krachten geëvalueerd zouden worden. Maar tijdens onderzoek naar de functionaliteit van CHAI, bleek dat vergelijkende evaluatie tussen CHAI en HAL niet triviaal is. Hiervoor zijn meerdere redenen, maar vooraleer daarop in te gaan, geven we een korte omschrijving van CHAI 3D.

De library is opgedeeld in negen onderdelen:

- Graphics: CHAI 3D voorziet een module voor de grafische rendering van virtuele omgevingen. De module ondersteunt meervoudige scenegraphs en elke scenegraph

bevat een 'world', belichting, camera('s) en één of meer modellen. Een viewport wordt gebruikt om de scene te renderen alsof ze door de camera bekeken wordt. Er is ondersteuning voor textures, transparantie, frictie en stijfheid van objecten.

- Devices: Dit zijn de low-level interface klassen die gebruikt worden om met de haptische apparaten de communiceren.
- Tools: Deze klassen zijn onderdeel van de scenegraphs en vormen de links tussen de applicatie en de CHAI 3D devices (high-level).
- Forces: CHAI bevat een aantal algoritmes om krachten te berekenen. Ten eerste is er het God-Object met frictie (Gelijkaardig aan het algoritme van HAL) [26]. Ten tweede is er nog een algoritme dat gebruik maakt van 'potentieële velden'. Momenteel wordt er nog gewerkt aan een het proxy algoritme van Salisbury.
- Collision Detection: Er zijn twee methodes geïmplementeerd om aan collision detection te doen: aan de hand van een AABB-tree en aan de hand van 'sphere-hiërarchiën'.
- Files: CHAI laat twee soorten meshbestanden toe: .obj² en .3ds³ zijn ondersteund.
- Timers: de haptische servo-loop heeft een frequentie van ongeveer 1KHz en hiervoor zijn zeer precieze timers nodig. CHAI maakt gebruik van Windows Multimedia timers.
- Math en Display: Deze modules bevatten de klassen die gebruikt worden voor wiskundige berekeningen(vector, matrix, ...) en de weergave van informatie (Viewport).

CHAI 3D heeft ongeveer hetzelfde doel als HAL, met name om de onderzoekswereld van een flexibele library te voorzien waarin vernieuwende en experimentele haptische interactietechnieken getest kunnen worden. CHAI 3D staat echter veel verder in de ontwikkeling dan HAL. De laatste versie van CHAI voorziet ook de koppeling met physics-rendering aan de hand van ODE⁴, hoewel dit onderdeel zich nog in het beta-stadium bevindt. Meer informatie over CHAI is beschikbaar op de website van de ontwikkelaar: www.chai3d.org.

6.2.2 SOFA-library

Voor een eerder onderzoek is er een recorder/playback/logger library geschreven die geen onderdeel uitmaakte van HAL. Voor datzelfde onderzoek was er eveneens een applicatie geïmplementeerd die deze faciliteiten gebruikte om een log uit te voeren op het CHAI algoritme.

²Alias Wavefront bestandsformaat

³3D studio Max bestandsformaat

⁴Open Dynamics Engine

SOFA maakt origineel gebruik van PERL-script voor communicatie naar een database. Die database wordt gebruikt om de verzamelde gegevens op te slaan.

De module die voor het loggen naar een database instaat, is vervangen door functionaliteit die gelijkaardig is aan deze van HAL en dus gewoon de logs in geheugen opslaat en daarna naar een bestand schrijft. Hierdoor werd het makkelijker om de module te gebruiken omdat er geen database opgesteld moet worden en ook geen Perl nodig is om de module bruikbaar te maken.

6.3 Implementatie

Voor de logging is gebruik gemaakt van de `HAL::NodeLogger` klasse, die al aanwezig was in het framework van HAL. Er zijn wel enkele aanpassingen moeten gebeuren, omdat de originele versie wegens performance redenen niet correct werkte. De originele versie schreef meteen elke ontvangen data-tuppel naar een bestand weg. Maar zoals al eerder vermeld is, verwacht de haptische loop een minimale update snelheid van 1000Hz. Deze kon niet behaald worden met de bestaande implementatie. Omdat de logging voor dit werk gebeurde zonder haptisch apparaat was dit geen noodzaak, maar om de logging bruikbaar te maken voor een sessie met een haptisch apparaat waren deze aanpassingen noodzakelijk. De aanpassing bestaat eruit dat een instelbaar aantal data-tuppels gebufferd kunnen worden vooraleer ze weg te schrijven naar een bestand. Op die manier was het heel gemakkelijk ervoor te zorgen dat er tijdens de logging de nodige snelheid behouden kon worden. Verder worden er in de huidige versie meer waarden opgeslagen dan in de oorspronkelijke versie. Voor de playback voor het HAL algoritme is gebruik gemaakt van de modules die al beschikbaar waren in de HAL library. Net zoals bij de recorder van HAL zijn hier echter modificaties aangebracht moeten worden om een operationeel systeem te bekomen. De playback klasse bleek niet volledig geïmplementeerd te zijn, wat te wijten kan zijn aan de experimentele aard van HAL.

Bij de CHAI3D library zijn echter andere tools gebruikt dan deze in HAL. In eerder onderzoek zijn er playback en logging tools ontwikkeld die in samenwerking met CHAI goed werken (zie 6.2.2).

Het gebruik van verschillende playback en logging modules demonstreert meteen dat deze modules los staan van de recorder. Dit bevestigt het ontwerpmodel dat het rendering systeem gescheiden is van de simulators.

Verder moet nog vermeld worden dat HAL en CHAI3D op zich geen applicatie zijn, maar enkel libraries die aangesproken kunnen worden om aan haptische rendering te doen (in geval van CHAI3D ook visuele rendering).

6.4 Recording

6.4.1 Setup

Voor de recording sessies is gebruik gemaakt van een SensAble PHANToM ⁵ [22] om de bewegingen van de gebruiker te registreren. Voor elk type object is een nieuwe sessie gebruikt. Er bestaat een kans dat tijdens de recording de situaties waarin een algoritme in de fout kan gaan niet voorkomt. De gebruiker kan op voorhand niet weten welke situaties dit zijn en zal dus pogen om zoveel mogelijk verschillende bewegingen uit te voeren om die kans zo klein mogelijk te houden. Een extra maatregel die getroffen is om die kans te minimaliseren is ervoor te zorgen dat voldoende samples geregistreerd worden. In dit onderzoek is ervoor gekozen om per type 50000 samples te nemen, dit zou voldoende moeten zijn om een representatieve handeling met een algoritme voor te kunnen stellen. De recording werd uitgevoerd op een Intel dual Xeon 2,6GHz (hyperthreading) met 1GB RAM-geheugen. Het systeem draait op Microsoft Windows XP.

6.4.2 Uitvoering

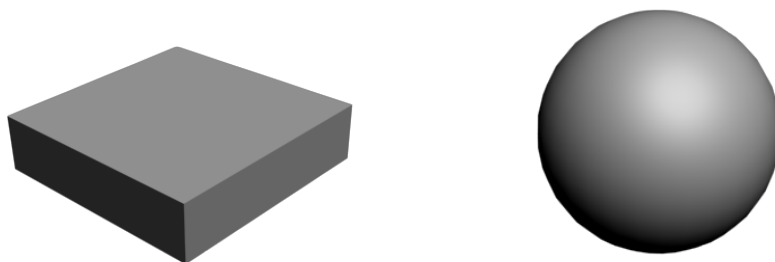
De keuze om gebruik te maken van het HAL-framework om de recording uit te voeren heeft eerder te maken gehad met het feit dat meer parate kennis over dat framework hadden dan de functionaliteit van SOFA. Beide tools slaan dezelfde gegevens op en zijn dus inwisselbaar, met als enige verschil dat de meetresultaten bij SOFA gedaan zouden zijn met het CHAI3D algoritme in plaats van het algoritme uit HAL. De opgeslagen informatie wordt echter opgevraagd van het haptische apparaat en hierdoor is er dus inwisselbaarheid tussen de modules.

Voor dit werk zijn er drie datasets opgenomen. Elke dataset is opgebouwd aan de hand van een ander 3D-model (in stijgende complexiteit):

- Een doos (fig 6.4(a)),
- een bol (fig 6.4(b)) en
- een vis (fig 6.4(c)).

De keuze van deze objecten is gebaseerd op de noodzaak elke mogelijk situatie die kan voorkomen in een virtuele omgeving te testen. Een doos heeft enkel hoeken van 90, het getriangulariseerde model van een bol heeft enkel stompe hoeken en het model van een vis bevat elk mogelijk type hoek.

⁵Model: Premium 1.0



(a) Doos opgebouwd uit 12 driehoeken (b) Bol opgebouwd uit 960 driehoeken



(c) Vis opgebouwd uit 256 driehoeken

Figuur 6.4: Mesh-modellen van een vis, bol en een doos.

De data die de recorder ontvangt wordt opgeslagen in een simpel tekstbestand dat later door de playback-module ingelezen kan worden. Om ervoor te zorgen dat playback mogelijk is, moeten we voldoende gegevens opslaan. Voor een haptisch systeem hebben we de locatie van de pointer nodig, evenals de snelheid van deze pointer. In principe is het niet nodig om voor elke meting bij te houden tot welke loop de meting toebehoort, maar voor dit werk werd die data ook opgeslagen. Een sample van een recording:

Listing 6.1: Een sample van een recording

```

1, -0.000101, -0.008322, -0.000425, 0.000000, 0.000000, 0.000000
2, -0.000075, -0.008292, -0.000483, 0.000000, 0.000000, 0.000000
3, -0.000076, -0.008322, -0.000425, 0.000000, 0.000000, 0.000000
4, -0.000176, -0.008410, -0.000401, 0.000000, 0.000000, 0.000000
5, -0.000176, -0.008499, -0.000495, 0.000000, 0.000000, 0.000000
6, -0.000101, -0.008440, -0.000462, 0.000000, 0.000000, 0.000000
7, -0.000101, -0.008410, -0.000312, 0.000000, 0.000000, 0.000000
8, -0.000126, -0.008410, -0.000342, 0.000000, 0.000000, 0.000000
9, -0.000076, -0.008469, -0.000434, 0.000000, 0.000000, 0.000000

```

10, -0.000050, -0.008499, -0.000377, 0.000000, 0.000000, 0.000000
11, -0.000000, -0.008469, -0.000316, 0.000000, 0.000000, 0.000000
12, 0.000025, -0.008440, -0.000373, 0.000000, 0.000000, 0.000000
13, 0.000025, -0.008499, -0.000436, 0.000000, 0.000000, 0.000000
14, 0.000050, -0.008528, -0.000379, 0.000000, 0.000000, 0.000000

Het eerste getal is het loop-nummer, de volgende drie getallen vormen de coördinaat van de pointer en drie laatste getallen geven de snelheid van de pointer aan.

De reden voor het feit dat de snelheid 0 lijkt het zijn is dat het haptische apparaat 30 cycles nodig heeft om een betrouwbare snelheid te kunnen berekenen. De 30 eerste metingen zullen dus een snelheid van grootte 0 aangeven, hoewel dit in realiteit natuurlijk niet zo is.

HAL::Recorder

De recorder in HAL is een afgeleide van een scenegraph en is op een zodanige manier gemaakt dat de recorder een normale scenegraph encapsuleerd. In plaats van de applicatie met de eigenlijke scenegraph verder te laten werken, wordt de recorder gebruikt. Deze zal dan de eigenlijke scenegraph intern aanspreken om de berekeningen uit te voeren.

De recorder buffert alle data totdat de recordingsessie gestopt is en schrijft dan de verzamelde gegevens naar een bestand weg. Bij het aanmaken van een instantie van een recorder geeft men aan hoeveel samples verzameld moeten worden en de recordingsessie zal automatisch stoppen als het gegeven aantal samples verzameld zijn.

Uit de volgende listing moet duidelijk zijn hoe de recorder van HAL gebruikt kan worden:

Listing 6.2: code fragment dat het gebruik van de recorder aantoont

```

0 //create the various variables
  m_pWorld = new HAL::HapticWorld;
  m_pSceneGraph = new HAL::SimpleSceneGraph(1);
  m_pTriangleM = new HAL::TriangleMesh(5);

5 //load the model
  load( "objects/orb.ASE" );
  m_pTriangleM->SetFriction(0.0);
  m_pTriangleM->FinalizeConstruction(0,1,100);
  m_pSceneGraph->AddNode( m_pTriangleM );

10 //create the recorder and start it
  m_pDevice = new HAL::Recorder(m_pSceneGraph, 50000);
  m_pWorld->AddSceneGraph(m_pRecorder);
  m_pWorld->SetActiveScene(m_pRecorder->GetID());

```

```

15 | m_pCamera = new CCamera();
    | m_pCamera->PositionCamera(0,0,4,0,0,0,0,1,0);
    | m_pDevice->Start();

```

6.5 Experimenten (Playback en logging)

6.5.1 Setup

Omdat er voor dit onderdeel geen PHANToM meer nodig is, was het mogelijk om de playback en logging uit te voeren op een gewone laptop. In ons geval was het testplatform een Intel Core2Duo 1,66GHz met 2GB RAM-geheugen. Het systeem draaide op Microsoft Windows Vista Ultimate Edition 64bit.

6.5.2 Uitvoering

Zoals eerder vermeld is er in het HAL-framework in principe slechts één volwaardig algoritme aanwezig waarop drie optimalisaties geïmplementeerd zijn. We kunnen deze echter als verschillend behandelen en zullen dan ook voor elk van de optimalisaties een experiment uitvoeren. Aangezien de optimalisaties enkel aanpassingen aanbrengen aan de verzameling van te doorzoeken driehoeken tijdens het zoeken naar botsingen, wordt er verwacht dat er enkel een verandering optreedt in de benodigde rekentijd. Aan de hand van de evaluatiemethode die we hier voorstellen kunnen we dus evenzeer optimalisaties van hetzelfde algoritme met elkaar vergelijken. Op die manier kan er gecontroleerd worden of een optimalisatie geen fouten introduceert.

De verschillende objecten werden tijdens de recording geschaleerd om de meshes naar een werkbare grootte om te zetten. Voor de playback is het dan uiteraard ook nodig dat we de objecten met dezelfde schaal verkleinen/vergroten om een geldig experiment te bekomen. Verder zijn alle gebruikte modules in release-mode gecompileerd om de prestaties van het systeem zo optimaal mogelijk te hebben.

Net zoals bij de recorder sectie willen we laten zien hoe de playback en logger te gebruiken zijn in een applicatie:

Listing 6.3: code fragment dat het gebruik van de playback en logging aantoont

```

0 | //create the various variables
  | m_pWorld = new HAL::HapticWorld;
  | m_pSceneGraph = new HAL::SimpleSceneGraph(1);
  | m_pTriangleM = new HAL::TriangleMesh(5);

```



```

5 //load the model
load( "objects/orb.ASE" );
m_pTriangleM->SetFriction(0.0);
m_pTriangleM->FinalizeConstruction(0,1,100);
m_pSceneGraph->AddNode( m_pTriangleM );
10
//create the playback-device and wrap the logger around our mesh
m_pDevice = new HAL::Playback(m_pWorld, "recording-orb.txt");
m_pLogger = new HAL::NodeLogger(m_pTriangleM->GetID(), 0,
    m_pTriangleM, true, "log-HAL.txt");
15 m_pWorld->AddSceneGraph(m_pLogger);
m_pWorld->SetActiveScene(m_pLogger->GetID());
m_pCamera = new CCamera();
m_pCamera->PositionCamera(0,0,4,0,0,0,0,1,0);
m_pDevice->Start();

```

HAL::Playback

De playback module is afgeleid van een abstracte Device-klasse en is zo ontworpen dat het een PHANToM nabootst. Het heeft dus hetzelfde aantal input- en outputDOF's. Het rendering algoritme kan op geen enkele manier detecteren of het gebruikte apparaat een PHANToM of playback uit een bestand is. De werking van deze module is vrij eenvoudig. Bij een PHANToM wordt er elke haptische loop een meting gedaan van de stand van de pointer en de snelheid wordt opgevraagd. In het geval een playback worden deze waarden gewoon 1-voor-1 uit een bestand ingelezen en doorgestuurd naar de rendering. De resulterende krachten en botsingspunten worden opgeslagen zodat deze gebruikt kunnen worden in de berekeningen die na de huidige loop gebeuren (het collision detection algoritme gebruikt het voorgaande contactpunt in de berekeningen).

HAL::NodeLogger

Dit is de module die instaat voor de logging van de resultaten van het haptische algoritme. Het laat de gewrapte mesh de gewoonlijke berekeningen uitvoeren en vangt deze op om ze tijdelijk in het geheugen op te slaan. Het bufferen van de resultaten is nodig om een zo optimaal mogelijk resultaat te verkrijgen. Het schrijven naar een vast medium is vele malen trager dan het berekeningen van een cyclus van het algoritme. De prestaties van de file I/O zou dus een significante invloed hebben op de prestaties van het programma en

hiermee dus ook de resultaten van het experiment beïnvloeden.
De gegevens die de logger opvangt zijn de volgende:

- Loop: deze waarde geeft aan uit welke loop de gegevens komen.
- NodeID: dit is de ID van de node die de logger geëncapsuleerd heeft.
- Object: dit is het nummer van het object dat gebruikt wordt bij het loggen. Dit is doorgaans hetzelfde als NodeID, maar kan in feite willekeurig gekozen worden door de programmeur.
- Experiment: deze waarde geeft het nummer van het experiment aan. Deze waarde heeft samen met NodeID en Object geen direct verband met het algoritme dat getest wordt, maar kan gebruikt worden om indicaties te geven aan verschillende experimenten.
- Time: dit is de tijd die gebruikt is om de berekeningen uit te voeren in termen van milliseconden. Deze meting wordt in HAL uitgevoerd aan de hand van een high-precision timer beschikbaar in het Windows OS.
- ColFound: deze waarde geeft aan of er al dan niet een botsing gevonden is. Een 1 geeft aan dat er een botsing plaatsvond en een 0 zegt het tegengestelde.
- SCPX: dit is de x-coördinaat van het contactpunt. Indien er geen botsing plaatsvond is dit eveneens de x-coördinaat van de pointer.
- SCPY: de y-coördinaat van het contactpunt of eventueel de pointer indien er geen botsing plaatsvond.
- SCPZ: zie SCPY, maar dan voor de z-coördinaat.
- FORCEX: dit is de x-coördinaat voor de force-vector die gebruikt wordt om krachten uit te oefenen via het haptische apparaat.
- FORCEY: zie FORCEX, maar de y-coördinaat.
- FORCEZ: zie FORCEX, maar de z-coördinaat.
- FORCE: de grootte van de kracht die uitgeoefend wordt.
- VELOC: de grootte van de snelheid van de virtuele pointer, aangezien er geen reële pointer meer is tijdens de playback.

Een sample van een bestand gegenereerd door de HAL-nodelogger ziet er dus als volgt uit:

Listing 6.4: een sample van een log-bestand gegenereerd voor dit onderzoek

loop	NodeID	Object	Experiment	time	ColFound	SCPX	SCPY	SCPZ
FORCEX		FORCEY	FORCEZ	FORCE	VELOC			
1	5	5	0	0.587784	0	-0.000101	-0.008322	-0.000425
0.000000		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
2	5	5	0	0.537778	0	-0.000075	-0.008292	-0.000483
0.000000		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
3	5	5	0	0.519759	0	-0.000076	-0.008322	-0.000425
0.000000		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
4	5	5	0	0.530724	0	-0.000176	-0.008410	-0.000401
0.000000		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
5	5	5	0	0.530514	0	-0.000176	-0.008499	-0.000495
0.000000		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			

Dit is dus een eenvoudig tab-separated data-bestand. Om echter makkelijker met de log bestanden te kunnen werken zijn deze naar een Excelbestand geïmporteerd.

6.6 Problemen

Tijdens het opstellen van de experimenten zijn er een aantal fundamentele problemen aan het licht gekomen.

Eén van de grootste problemen is dat HAL met een geheel andere methode werkt om de hardheid van een object te simuleren. HAL gebruikt een systeem met dempings- en veerconstanten, terwijl CHAI enkel met een veerconstante werkt. De krachten die door HAL worden geproduceerd, zijn een product van een veer-kracht en een dempingskracht. Het is niet triviaal om dat systeem van twee parameters te vergelijken met een systeem dat maar één parameter gebruikt.

Een ander probleem dat aan het licht is gekomen en dat ook verband houdt met het genereren van krachten, is het feit dat de force-shading algoritmes niet noodzakelijk dezelfde zijn. Zo heeft HAL bijvoorbeeld een systeem om piek-krachten weg te werken. Dit systeem is in het framework geplaatst omdat het gebruik van een damping- en veerconstante ervoor kan zorgen dat het haptische apparaat van het object weg wordt geduwd. De gebruiker zal dan het apparaat terug tegen het object duwen en op deze manier zou men oscillaties krijgen. Dit wordt in HAL tegengegaan door de laatste X krachten te bufferen en het gemiddelde als output te nemen. Aangezien CHAI met een ander krachten systeem werkt, kunnen we aannemen dat er een dergelijk systeem niet aanwezig gaat zijn en dat de gegenereerde krachten gegarandeerd zullen verschillen van elkaar.

De force-shading zadelt ons met nog een probleem op: het is niet noodzakelijk zo dat de verschillende algoritmes dezelfde forceshading geïmplementeerd hebben. Afhankelijk van het gekozen forceshading algoritme, kunnen de resulterende krachten van elkaar verschillen.

We hebben dus drie cruciale problemen die verhinderen dat we de krachten verkregen uit verschillende algoritmes kunnen vergelijken.

7

Analyse

7.1 Eerste vaststellingen

Nota Zoals eerder vermeld, kunnen we geen evaluatie uitvoeren op de genereerde krachten vanwege een aantal fundamentele problemen die optreden bij dergelijke evaluaties. Er zullen dus in de hierop volgende analyses geen data betreffende krachten terug gevonden worden.

Vooraleer er aan de eigenlijke analyse gedaan wordt, is het nuttig eerst een aantal statistische waardes te verzamelen over de verschillende experimenten.

Zoals eerder al vermeld is, het belangrijk om kennis te nemen van het aantal botsingen die voor elke algoritme voorkomen. Volgens de definitie uit hoofdstuk 5 moet het algoritme dat geëvalueerd wordt hetzelfde aantal botsingen vinden om equivalent te worden bevonden met het refentie-algoritme. De volgende tabel toont ons de gevonden waarden voor de algoritmes die gebruikt zijn in dit werk:

We zien in tabel 7.1 dat er zelfs binnen de HAL library verschil optreedt bij het aantal gedetecteerde botsingen, behalve bij het meest simpele object (de doos). Voor de bol en de vis zijn er substantiële verschillen die erop wijzen dat de vier optimalisaties in HAL niet 'collision equivalent' zijn. Hier kunnen meerdere redenen voor zijn. Zo is het mogelijk dat

Gemiddelde rekentijd	HAL				CHAI	
	NORMAL	AABB	SPHERE	HASH	NORMAL	AABB
Box	41073	41073	41073	41073	46413	46413
Sphere	48053	48053	18777	48053	50000	50000
Fish	42393	42393	40536	42393	48148	48148

Tabel 7.1: Het aantal botsingen gedetecteerd voor elke getest algoritme. Voor elke algoritme werden 50000 metingen uitgevoerd.

er een fout aanwezig is in de implementatie van de SphereCollisionTree. Verder is het ook mogelijk dat deze optimalisatie niet goed werkt voor complexere vormen. Ten slotte kan het ook het geval zijn dat om wille van afrondingsfouten de botsing foutief in het object is geplaatst en dus nu het interne traject van pointer gaat volgen in plaats van over het oppervlak te bewegen. De eerste optie is echter de meest voor de hand liggende oorzaak. We kunnen uit tabel 7.1 ook afleiden dat CHAI niet 'collision equivalent' is met HAL aangezien CHAI - waarbij voor dit werk ook gebruikt is gemaakt van een optimalisatie aan de hand van een AABB-tree - ook een ander aantal botsingen vindt dan het referentie algoritme. Dit verschil is vooral te wijten aan het eerder vermelde probleem dat CHAI botsingen detecteert indien de pointer binnen in het object start. Deze vaststelling geeft dan onmiddellijk een fundamenteel verschil aan tussen de implementaties van HAL en die van CHAI.

De volgende analyse beslaat de gebruikte rekentijd die het algoritme nodig heeft voor elke loop van de uitvoering.

Gem. rekentijd	HAL				CHAI	
	NORMAL	AABB	SPHERE	HASH	NORMAL	AABB
Box	0.019808	0.015755	0.020035	0.016588	0.007047	0.008291
Sphere	0.946419	0.023817	0.016224	0.0236811	0.244174	0.017935
Fish	0.159785	0.020354	0.024287	0.020403	0.075386	0.012597

Tabel 7.2: De gemiddelde rekentijd die nodig is per berekening, uitgedrukt in milliseconden.

In tabel 7.2 zien we duidelijk dat de optimalisaties een effect hebben op de rekentijd indien het object complex is. Voor een simpel object zoals een doos, is er een beduidend lagere effect. Bij de sphere zien we dadelijk dat de gemiddelde tijd maar net onder de vereiste 1ms zit, wat erop wijst dat het haptisch renderen van dit object in realiteit niet mogelijk zal zijn omdat er zeker en vast waarden boven de bovengrens zullen liggen.

Verder zien we dat CHAI een opvallend lagere gemiddelde rekentijd per loop nodig heeft dan HAL. Dit kan meerdere oorzaken hebben, maar het achterhalen van de oorzaak be-

hoort niet tot het doel van dit onderzoek.

7.2 Just noticeable difference

In het hieropvolgende deel van deze thesis zullen we een meer diepgaande analyse presenteren van de meetresultaten ten opzichte van het voorgaande deel. We willen gaan we controleren of de gevonden botsingspunten dezelfde zijn. Hierbij moet er zoals al eerder een paar keer vermeld is rekening gehouden worden met het JND. In theorie is dit simpel, je moet tijdens de vergelijking van de coördinaten een marge toelaten van een welbepaalde waarde. In de praktijk moeten we echter de effectieve grootte kennen van die marge, om ervoor te zorgen dat algoritmes niet foutief als verschillend bestempeld zouden worden indien er geen merkbaar verschil bestaat. De toelaatbare afwijking wordt in de onderzoekswereld uitgedrukt in graden, een waarde waar we in feite niet veel aan hebben in het gebied van haptics. We moeten dus die hoekwaarden omzetten naar een waarde in afstand. In tabel 7.3 zijn de verschillende JND-waardes te vinden die van toepassing zijn voor dit onderzoek.

Gewricht	Vinger	Pols	Elleboog	Schouder
JND	2.5°	2.0°	2.0°	0.8°

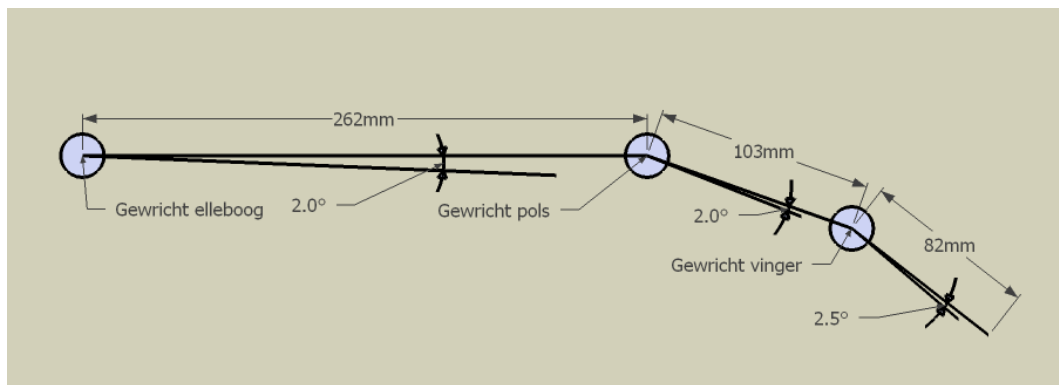
Tabel 7.3: De gemiddelde JND voor verschillende gewrichten aan de arm

Om te zorgen dat we bruikbare waarden hebben, moeten we ze eerst omzetten van hoeken naar een afstand. Hiervoor hebben we de lengtes van verschillende onderdelen van de arm nodig, en aangezien deze lengtes voor elke persoon anders zijn en zelfs per geslacht verschillen, zullen de bekende resultaten voor elke gebruiker lichtjes variëren van de waardes die gebruikt zijn in de hierop volgende analyses. Voor dit werk zijn de lengtes van de onderzoeker gebruikt, aanzien hij niet uitzonderlijk groot of klein van gestalte is. Door simpele driehoeksmeting kunnen we nu de hoeken omzetten naar afstanden (tabel 7.4 en fig. 7.2).

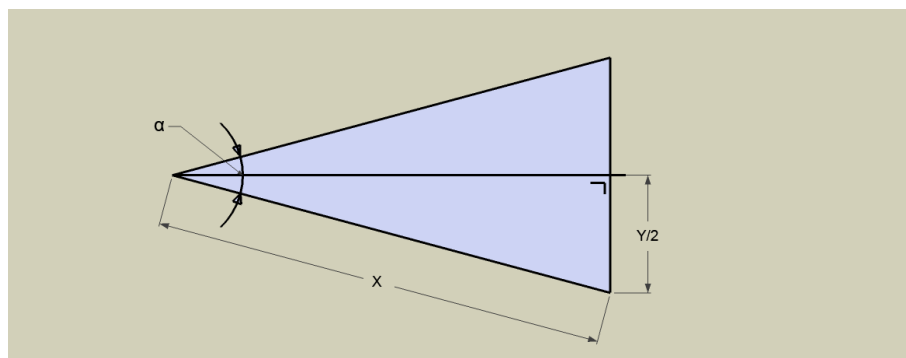
Deel van de arm	Vinger	Hand	voorarm
lengte	81mm	103mm	262mm

Tabel 7.4: De lengtes van de verschillende onderdelen van de arm die van belang zijn bij haptische interacties

Omdat het gewricht aan de schouder slechts minimaal gebruikt wordt tijdens de manipulatie van de meeste haptische apparaten, mogen we de JND-waarde van dat gewricht weglaten uit de berekeningen.



(a) Schematische representatie van de onderarm.



(b) Berekening van de JND, uitgedrukt in afstand.

Figuur 7.1: JND

Met de formule $y = 2 \cdot \sin(\frac{\alpha}{2}) \cdot x$ kunnen we vervolgens op een eenvoudige manier de eigenlijke afstanden berekenen, die dan gebruikt kunnen worden bij de evaluatie van de haptische algoritmes. De waarden die in deze thesis gebruikt zijn, zijn terug te vinden in tabel 7.5.

Deel van de arm	Vinger	Hand	voorarm
JND-afstand	3.57mm	3.59mm	9.14mm

Tabel 7.5: De lengtes van de verschillende onderdelen van de arm die van belang zijn bij haptische interacties

Eens we de waarden vastgelegd hebben, moet bepaald worden hoe we deze moeten gebruiken. De meest voor de hand liggende oplossing zou zijn om alle waarden op te tellen, omdat dat in feite de maximale afwijking kan zijn zonder dat er een verschil merkbaar is. Dit is echter fout: er bestaat immers geen garantie welke gewrichten gebruikt worden op het ogenblik dat er een verschil optreedt. We moeten dus de laagste waarde gebruiken in plaats van de som. In ons geval is dus het $JND = 3,57\text{mm}$.

We kunnen het JND bezien als een bol rond het haptische interface punt, waarin vrij bewogen kan worden zonder dat de gebruiker enig verschil opmerkt.

7.3 Statistische test

In het volgende hoofdstuk gaan we belangrijkste analyse doen. We gaan de gegevens statistisch bekijken en onderzoeken of er verbanden bestaan tussen de verschillende algoritmes. Om te controleren of de botsingen die verschillende algoritmes detecteren dezelfde zijn, rekening houdende met het JND, is er geopteerd om een paired T-test op de verschillende coördinaatelementen van de botsingen uit te voeren¹. Er wordt met andere woorden gecontroleerd of het gemiddelde verschil tussen de X-waarde van algoritme1 en de X-waarde van algoritme2 nul is. Er wordt ook gekeken naar de correlatie tussen algoritmes indien er verschillen bestaan tussen hun datasets. Omdat er rekening gehouden moet worden met het JND, wordt de hypothese dat de algoritmes gelijk zijn ook aanvaard als het gemiddelde verschil onder de JND-waarde ligt. Er zijn drie testen per paar van algoritmes, één test per coördinaatelement. We zullen dus het betrouwbaarheidsniveau moeten verhogen tot 98.33333% in plaats van de gewoonlijke 95%. We hebben hierdoor slechts een kans van 1.66666% dat we twee algoritmes als verschillend bestempelen hoewel ze toch gelijk zijn. Hierbij moeten we opletten dat het ook mogelijk is dat algoritmes statistisch niet significant van elkaar verschillen, maar dat het JND toch overschreden wordt. Indien dit het geval is, moeten we de hypothese dat de twee algoritmen gelijk zijn verwerpen.

¹Hierbij wil ik STATCOM en in het bijzonder Lamidi Mubashir Asafe en Leen Slaets bedanken voor hun hulp bij het bepalen van de te gebruiken testmethode

We mogen de drie verschillende waarden per coördinaat apart behandelen omdat een fout in een van de waarden niet noodzakelijk een verschil veroorzaakt bij een van de andere waarden, de X-, Y- en Z-waarden van een coördinaat worden dus als onafhankelijk van elkaar beschouwd.

Als tool voor de statistische berekeningen is gebruik gemaakt van Microsoft Office Excel en SPSS15.

8

Resultaten

In totaal er zijn negen tests uitgevoerd waarbij elke test uit het paarsgewijs vergelijken van de meetresultaten van de verschillende algoritmes bestaat. We hebben de zes eerder vermelde algoritmes gebruikt en krijgen dus vijftien paren per test. We zullen elk object apart bespreken en ten afsluiting een algemene uitspraak over de gevonden resultaten doen. In feite zou in de hierop volgende analyse niet onderzocht moeten worden of er een verschil gevonden wordt tussen HAL-SPHERE en de andere HAL-algoritmes aangezien we al aangetoond hebben ze een verschillend aantal collisions vinden in bijna alle testen en dus per definitie niet meer gelijk kunnen zijn. Hetzelfde kan gezegd worden voor de vergelijking tussen de HAL- en de CHAI-algoritmes. We zullen echter in de hier opvolgende analyses hiermee geen rekening houden om de te gebruiken analytische methode duidelijk te maken.

Bij elk algoritme werken we met drie hypothesen:

- $H_0 : \text{algoritme1}(x) = \text{algoritme2}(x)$
- $H_0 : \text{algoritme1}(y) = \text{algoritme2}(y)$
- $H_0 : \text{algoritme1}(z) = \text{algoritme2}(z)$

We testen deze hypothesen bij elk van de drie objecten en voor elk paar van algoritmes. Er moet op gewezen worden dat de conclusies bij elk van de coördinaat secties enkel van toepassing zijn op de desbetreffende analyse.

8.1 Doos

8.1.1 X-coördinaat(tabel 8.1, 8.2 en 8.3)

Bespreking

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair	X-HAL	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
1	X-HAL-AABB	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
Pair	X-HAL	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
2	X-HAL-SPHERE	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
Pair	X-HAL	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
3	X-HAL-HASH	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
Pair	X-HAL	-,01134468	50000	,050353329	,000225187
4	X-CHAI	-,01123059	50000	,049884307	,000223089
Pair	X-HAL	-,01134468	50000	,050353329	,000225187
5	X-CHAI-AABB	-,01123059	50000	,049884307	,000223089
Pair	X-HAL-AABB	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
6	X-HAL-SPHERE	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
Pair	X-HAL-AABB	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
7	X-HAL-HASH	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
Pair	X-HAL-AABB	-,01134468	50000	,050353329	,000225187
8	X-CHAI	-,01123059	50000	,049884307	,000223089
Pair	X-HAL-AABB	-,01134468	50000	,050353329	,000225187
9	X-CHAI-AABB	-,01123059	50000	,049884307	,000223089
Pair	X-HAL-SPHERE	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
10	X-HAL-HASH	-,01134468 ^a	50000	,050353329	,000225187
Pair	X-HAL-SPHERE	-,01134468	50000	,050353329	,000225187
11	X-CHAI	-,01123059	50000	,049884307	,000223089
Pair	X-HAL-SPHERE	-,01134468	50000	,050353329	,000225187
12	X-CHAI-AABB	-,01123059	50000	,049884307	,000223089
Pair	X-HAL-HASH	-,01134468	50000	,050353329	,000225187
13	X-CHAI	-,01123059	50000	,049884307	,000223089
Pair	X-HAL-HASH	-,01134468	50000	,050353329	,000225187
14	X-CHAI-AABB	-,01123059	50000	,049884307	,000223089
Pair	X-CHAI	-,01123059 ^a	50000	,049884307	,000223089
15	X-CHAI-AABB	-,01123059 ^a	50000	,049884307	,000223089

a. The correlation and t cannot be computed because the standard error of the difference is 0.

Tabel 8.1: Paren van algoritmes - doos - X-coördinaat.

In tabel 8.1 vinden de verschillende paren die tussen de verschillende algoritmes gemaakt kunnen worden terug. Deze tabel, en de hierop volgende tabellen met paren bevatten vijf kolommen:

- **Pair:** Deze kolom bevat de verschillende paren die onderzocht zijn. Er is gekozen om elk algoritme paarsgewijs te koppelen aan elk ander algoritme. Aangezien in dit geval het koppel X-Y hetzelfde is als koppel Y-X, zijn die paren weggelaten uit de resultaten.

- **Mean:** Dit is de gemiddelde waarde van dataset die voorgesteld wordt in een bepaalde rij, uitgedrukt in meter. Op zich heeft deze waarde niet veel belang, aangezien de gemiddelde waarde voor onze testen het gemiddelde van het betreffende coördinaat-element voorstelt en met andere woorden geen indicatie kan geven over het al dan niet goed werken van het desbetreffende algoritme. Deze waarde wordt met de volgende formule berekend:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i$$

- **N:** Dit is het aantal samples dat gebruikt wordt voor de berekeningen. In het geval van deze testen wordt met andere woorden steeds de volledige dataset van 50000 samples gebruikt.
- **Std. Deviation:** Dit is de standaardafwijking van de betreffende dataset en geeft de maat van spreiding van waarden in de dataset aan, uitgedrukt in meter. Opnieuw kunnen we aan de hand van deze waarden geen conclusies trekken over een algoritme. De formule voor de standaardafwijking is als volgt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

- **Std. Error Mean:** De standaardfout van het gemiddelde is de standaardafwijking op de spreiding van het gemiddelde, uitgedrukt in meter. Deze waarde wordt met de volgende formule berekend:

$$S_E = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}}$$

Opnieuw heeft deze waarde geen directe invloed op de evaluatie van de algoritmes.

Met de individuele waarden van deze tabel zijn we op zich niet veel. Ze geven wel reeds een indicatie of twee algoritmes gelijk zijn of niet. Zoals de tabel al aangeeft met een a'tje kunnen we in deze stap al concluderen dat twee algoritmes volledig gelijk zijn voor de betreffende variabele. Voor het geval van tabel 8.1 zien we de volgende gelijkheden:

- **HAL:** HAL-AABB, HAL-HASH en HAL-SPHERE
- **HAL-AABB:** HAL-HASH en HAL-SPHERE
- **HAL-HASH:** HAL-SPHERE
- **CHAI:** CHAI-AABB

We merken dus dat de HAL-algoritmes in dit specifieke geval gelijk zijn, en hetzelfde geldt voor de CHAI-algoritmes. Voor de duidelijkheid moet toch nog vermeld worden dat deze resultaten enkel gelden voor de X-waarde van de coördinaten en dan slechts voor de virtuele wereld met het doos-object.

In tabel 8.2 vinden we de correlatiewaarden tussen de algoritmen die in de eerste tabel als verschillend aangeduid zijn. **Correlation** geeft dus de maat van correlatie tussen de samples van de datasets van de algoritmes. Deze waardes liggen tussen 1 en -1. Het teken van de correlatiewaarde staat voor de richting van de relatie. **N** is opnieuw het aantal samples dat onderzocht is en **Sig.** geeft de significantie aan. In het geval van het x-coördinaat bij het doos-object zien we dat er een zeer sterke correlatie bestaat tussen de paren.

		N	Correlation	Sig.
Pair 4	X-HAL & X-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 5	X-HAL & X-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 8	X-HAL-AABB & X-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 9	X-HAL-AABB & X-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 11	X-HAL-SPHERE & X-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 12	X-HAL-SPHERE & X-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 13	X-HAL-HASH & X-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 14	X-HAL-HASH & X-CHAI-AABB	50000	1,000	,000

Tabel 8.2: Correlatie - doos - X-coördinaat.

De eigenlijke paired T-Test vinden we terug in tabel 8.3:

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	98,33333% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 4	X-HAL - X-CHAI	-,000114093	,001385455	,000006196	-,000128926	-,000099259	-18,414	49999	,000
Pair 5	X-HAL - X-CHAI-AABB	-,000114093	,001385455	,000006196	-,000128926	-,000099259	-18,414	49999	,000
Pair 8	X-HAL-AABB - X-CHAI	-,000114093	,001385455	,000006196	-,000128926	-,000099259	-18,414	49999	,000
Pair 9	X-HAL-AABB - X-CHAI-AABB	-,000114093	,001385455	,000006196	-,000128926	-,000099259	-18,414	49999	,000
Pair 11	X-HAL-SPHERE - X-CHAI	-,000114093	,001385455	,000006196	-,000128926	-,000099259	-18,414	49999	,000
Pair 12	X-HAL-SPHERE - X-CHAI-AABB	-,000114093	,001385455	,000006196	-,000128926	-,000099259	-18,414	49999	,000
Pair 13	X-HAL-HASH - X-CHAI	-,000114093	,001385455	,000006196	-,000128926	-,000099259	-18,414	49999	,000
Pair 14	X-HAL-HASH - X-CHAI-AARR	-,000114093	,001385455	,000006196	-,000128926	-,000099259	-18,414	49999	,000

Tabel 8.3: T-Test - doos - X-coördinaat.

- **Mean:** Dit is een zeer belangrijke factor. Deze waarden kunnen we tegenover de JND plaatsen om te oordelen of het gemiddelde verschil tussen twee overeenkomstige waarden binnen de marges van het JND vallen. Net zoals de meeste waarden in de tabellen wordt dit gemiddelde uitgedrukt in meter. Het gemiddelde dat we hier berekenen is dus het gemiddelde van de verschillen tussen overeenkomstige waarden:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x1_i - x2_i)$$

Met $x1_i$ de i^{de} x-waarde voor eerste algoritme uit het paar en $x2_i$ de i^{de} x-waarde uit het tweede algoritme.

- **Std. Deviation:** Dit is de standaardafwijking die optreedt op de populatie van de verschillen ($x1_i - x2_i$). Deze waarde is uitgedrukt in meter.
- **Std. Error Mean:** Dit is in feite dezelfde maat als in tabel 8.1. Deze waarde is uitgedrukt in meter.
- **98.33333% Confidence Interval of the Difference:** Dit stelt het interval voor waarvan met 98.33333% kan gezegd worden dat het de ware populatie waarde bevat. Aan de hand van dit interval kunnen belangrijke conclusies getrokken over de mate waarin het verschil significant groot is. Indien het interval geen 0 bevat, kunnen we zeggen dat het gepaarde verschil significant van 0 verschilt.
- **t:** Deze waarde is een statistiek die gebruikt wordt voor het testen van nul-hypothese dat twee populatiegemiddelden gelijk zijn.
- **df:** Dit is het aantal vrijheidsgraden en deze waarde wordt gebruikt bij de bepaling van de geobserveerde significantie.
- **Sig. (2-tailed):** Dit geeft de kans aan dat de gevonden resultaten te wijten zijn aan toevalligheden. Hoe lager het getal, hoe hoger de kans dat de gevonden resultaten niet aan toeval te wijten zijn. Als de berekende significantie onder het ingestelde niveau (in ons geval 1.66666%) valt, mogen we besluiten dat er een significant verschil bestaat tussen de twee onderzochte variabelen.

Aan de hand van deze tabellen kunnen we een oordeel vellen over de gelijkheid van de verschillende algoritmes. Voor elk algoritme moeten we dan kijken of er verschillen bestaan bij elk van de coördinaten en bij elk van objecten. Pas wanneer er geen verschil bestaat voor elk van deze tests mogen we besluiten dat twee algoritmes gelijk zijn, en hierbij kunnen we dan rekening houden met het JND.

Voor de algoritmes waarvan in de eerste tabel niet duidelijk was of ze al dan niet gelijk zijn, gaan we nu voor elke van die paren een korte bespreking doen.

X-HAL <-> X-CHAI

In tabel 8.2 zien we dat er een zeer sterke correlatie bestaat tussen de metingen van beide algoritmes, aangezien we de maximale correlatie waarden hebben met een p-waarde van .000 .

Aan de hand van tabel 8.3 kunnen we een aantal interessante vaststellingen maken. Zo zien we dat het gemiddelde verschil erg laag is, maar dat de standaarddeviatie op dat gemiddelde een factor 10 hoger ligt. Dit duidt op grote spreiding van de verschillen van de verschillende paren uit de twee algoritmes. We zien dus dat er grote verschillen bestaan tussen de verschillende waarden, wat al een indicatie is van het feit dat de twee algoritmes van elkaar zullen verschillen.

Verder zien we dat we een p-waarde van .000 hebben, wat erop wijst dat er een significant verschil is. Uit het betrouwbaarheidsinterval mogen we concluderen dat het verschil ook nog eens significant is.

Nu moeten we nog rekening houden met het JND. Om te controleren of de verschillen onder de JND-drempel blijven, maken we gebruik maken van het gemiddelde en de standaard afwijking. We hebben een normale verdeling, dus we mogen zeggen dat 95% van de samples binnen twee keer de standaard afwijking ligt. We krijgen dus het interval $[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma]$. Hiervan nemen we van de absolute waarde van de waarde het verst van nul gelegen. Dit getal leggen we dan naast het JND zodat we kunnen vaststellen of de verschillen voelbaar zijn of niet.

Toegepast op het paar (X-HAL,X-CHAI) krijgen we het interval [-0.002885003, 0.002656817]. De absolute waarde van het maximum van dit interval geeft ons 0.002885003 en dit ligt nog onder de grens van het JND, namelijk 0.00357. We kunnen dus met 95% zekerheid zeggen dat de afwijkingen op de x-coördinaat niet voelbaar is. Dit staat in contrast met het gegeven dat de algoritmes statistisch van elkaar verschillen.

X-HAL <-> X-CHAI-AABB

Bij het bekijken van de tabellen zien we duidelijk dat dit paar exact dezelfde waarden vertoont als het paar (X-HAL, X-CHAI). Hierbij kunnen we dus dezelfde conclusie trekken als bij (X-HAL, X-CHAI). Dat deze waarden dezelfde zijn, bevestigt nog eens dat de algoritmes CHAI en CHAI-AABB dezelfde resultaten geven voor de x-waarde.

De overige paren

Ook hier zien we dat de waarden in de correlatie en T-test tabellen dezelfde zijn als de waarden bij het vierde paar. Dit doet ons besluiten dat de algoritmes die we in tabel 8.3 vinden, statistisch van elkaar verschillen, maar dat de afwijkingen die ze vertonen het JND niet overschrijden en dus hetzelfde aanvoelen.

Conclusie

We kunnen concluderen dat betreffende de x-coördinaten de algoritmes in HAL hetzelfde zijn. Hetzelfde kunnen we zeggen voor de geteste algoritmes van CHAI. Deze vaststelling wordt nogmaals bevestigd in tabel 8.3, waarin duidelijk is dat de verschillen tussen de algoritmes van HAL en deze van CHAI exact dezelfde zijn, ongeacht het paar dat bekeken wordt. Over die verschillen kunnen we zeggen dat ze statistisch significant zijn en dat dus ook de algoritmes significant van elkaar verschillen. Als we echter rekening houden met het JND zien we dat de gevonden verschillen niet voelbaar zijn voor een gebruiker en dat we deze algoritmes toch als gelijk mogen bestempelen.

8.1.2 Y-coördinaat(tabel A.1, A.2 en A.3)

Voor het verdere verloop van deze analyse wordt er naar tabellen verwezen die terug te vinden zijn in bijlage A.

Bespreking

In tabel A.1 zien we opnieuw dat een aantal van de geteste algoritmes niet aan de paired T-test onderworpen moet worden omdat hun datasets volledig overeenkomen:

- **HAL:** HAL-AABB, HAL-HASH en HAL-SPHERE
- **HAL-AABB:** HAL-HASH en HAL-SPHERE
- **HAL-HASH:** HAL-SPHERE
- **CHAI:** CHAI-AABB

In tabel A.2 zien opnieuw dezelfde effecten als deze uit de vorige sectie. We zien dat er een sterke correlatie bestaat tussen de algoritmes.

In tabel A.3 vinden we dezelfde paren terug als in de tabel van de T-test van de x-waarden bij het doos-object. Opnieuw zien we dat de algoritmes statistisch significant verschillend zijn en dat het verschil ook nog significant groot is. Om het JND opnieuw in rekening te brengen moeten we weer een paar berekeningen uitvoeren.

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma] = [-0.001994289, 0.001924743]$$

We nemen vervolgens dan de absolute waarde van het maximum en vergelijken dat met het JND. We krijgen dus $0.001994289 < 0.00357$ en kunnen dus opnieuw vaststellen dat er, hoewel er een statistisch significant verschil bestaat, geen voelbare verschillen zijn.

Conclusie

Voor de y-coördinaat kunnen we dezelfde conclusie trekken als voor de x-coördinaat. We zien met andere woorden dat alle algoritmes van HAL dezelfde resultaten geven, en hetzelfde kan gezegd worden voor de geteste algoritmes van CHAI. Ook zien we opnieuw dat een statistisch significant verschil, niet noodzakelijk leidt tot voelbare verschillen.

8.1.3 Z-coördinaat(tabel A.4, A.5 en A.6)

Bespreking

We hebben nu zowel de x- als y-coördinaat besproken voor het doos-object. Er rest ons enkel nog de z-coördinaat om een algemeen oordeel te kunnen vellen over de geteste algoritmes.

Tabel A.4 toont ons geen verschil betreffende de gelijkheden tussen de verschillende algoritmes, opnieuw kunnen we hier al zien dat de volgende algoritmes gelijk zijn:

- **HAL:** HAL-AABB, HAL-HASH en HAL-SPHERE
- **HAL-AABB:** HAL-HASH en HAL-SPHERE
- **HAL-HASH:** HAL-SPHERE
- **CHAI:** CHAI-AABB

In tabel A.5 zien we het eerste verschil ten opzichte van de testen op de x- en y-waarden. Er is een lichte daling op de correlatie-waarde zichtbaar, maar nog steeds is deze waarde zeer hoog en ook de p-waarden van .000 wijst op een sterke correlatie tussen de algoritmes.

Als laatste moeten we nog kijken naar de T-test (tabel A.6). De p-waarden geven weer aan dat er een statistisch significant verschil is tussen de algoritmes. We merken nu echter een tweede verschil met twee vorige analyses.

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma] = [-0.005645319, 0.004366085]$$

Dit geeft ons een maximum van 0.005645319 en dit ligt ver boven de JND-waarde van 0.00357. In tegenstelling tot de vorige vaststellingen zijn de verschillen nu wel voelbaar voor het menselijke kinetische systeem.

Conclusie

We merken bij de z-coördinaat zowel een statistisch significant verschil als een voelbaar verschil op bij de verschillende algoritmes.

8.1.4 Conclusie

Alledrie de testen geven een statistisch significant verschil aan, maar slechts de test bij de z-coördinaat geeft ook een voelbaar verschil. Het zoeken achter de reden van dit verschil is niet evident en behoort niet tot het doel van deze thesis.

8.2 Bol

We herhalen nu de vorige analyse voor een bol-object in plaats van een doos.

8.2.1 X-coördinaat(tabel A.7, A.8 en A.9)

Bespreking

Het grote verschil dat we nu zien ten opzichte van de voorgaande analyses is dat er nu een verschil wordt gevonden tussen het HAL-SPHERE en de andere HAL algoritmes (tabel A.7). Deze verandering loopt door in de andere twee tabellen en dus zullen we deze ook individueel bespreken.

tabel A.8 toont ons drie dingen. We zien dat er sterke correlaties bestaat tussen de volgende algoritmes:

- **1.000:** (X-HAL, X-HAL-SPHERE) , (X-HAL-AABB, X-HAL-SPHERE) en (X-HAL-HASH, X-HAL-SPHERE)
- **0.989:** (X-HAL, X-CHAI) , (X-HAL, X-CHAI-AABB) , (X-HAL-AABB, X-CHAI) , (X-HAL-AABB, X-CHAI-AABB) , (X-HAL-HASH, X-CHAI) en (X-HAL-HASH, CHAI-AABB)
- **0.988:** (X-HAL-SPHERE, X-CHAI) en (X-HAL-SPHERE, X-CHAI-AABB)

Bij de vorige analyses zagen we overal dezelfde correlatiewaarde. Nu zien we dat er drie groepen zijn. Alle groepen vertonen echter wel een sterke correlatie en hebben ook alle drie een p-waarde van .000 .

tabel A.9 laat duidelijk zien dat alle paren significante verschillen vertonen, aangezien alle verschillen een p-waarde van .000 hebben. Verder moet er nog gecontroleerd worden of de verschillen onder de JND-waarde blijven. We zien duidelijk de drie groepen opnieuw in tabel A.9 en zullen dus voor elk van de groepen de berekeningen uitvoeren.

Groep1:(HAL&HAL-SPHERE, HAL-AABB&HAL-SPHERE en HAL-SPHERE&HAL-HASH)

Het paar HAL-SPHERE&HAL-HASH heeft wel een negatief gemiddelde maar aangezien we enkel met absolute waarden werken heeft dit geen enkele invloed op onze resultaten.

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} - 2\sigma] = [-0.001766752, 0.002152088]$$

We zien dat de absolute waarden van dit interval onder de JND-waarde van 0.00357 blijven. We mogen dus zeggen dat de gemeten verschillen niet voelbaar zijn voor de gebruiker, hoewel er statistisch een significant verschil bestaat.

Groep2:(HAL&CHAI, HAL&CHAI-AABB, HAL-AABB&CHAI, HAL-AABB&CHAI-AABB, HAL-HASH&CHAI en HAL-HASH&CHAI-AABB)

Wanneer we het interval $[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} - 2\sigma] = [-0.007396651, 0.006187105]$ berekenen kunnen we heel duidelijk zien dat de verschillen ver boven het JND liggen en dat we dus een merkbaar verschil kunnen noteren.

Groep3:(HAL-SPHERE&CHAI en HAL-SPHERE&CHAI-AABB)

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} - 2\sigma] = [-0.007649697, 0.006054815]$$

Ook hier zien we dat de JND-waarde zwaar overschreden wordt en dat de verschillen dus goed voelbaar zullen zijn.

Conclusie

Uit de voorgaande analyse concluderen we dat het verschil tussen het HAL-SPHERE algoritme en de andere HAL algoritme statistisch significant is, maar dat niet voelbaar is voor een gebruiker. Bij de andere twee groepen is er ook een statistisch significant verschil, maar we hebben ook een verschil dat de JND overschrijdt.

8.2.2 Y-coördinaat(tabel A.10, A.11 en A.12)

Bespreking

In tabel A.10 kunnen we hetzelfde vaststellen als in tabel A.7. We zien dus opnieuw dat de HAL-algoritmes dezelfde zijn, op HAL-SPHERE na. Ook zijn CHAI en CHAI-AABB opnieuw dezelfde. Aangezien sommige algoritmes exact hetzelfde zijn, kunnen we sommige paren niet onderzoeken, zoals ook in de tabel vermeld wordt.

We zien in tabel A.11 dat opnieuw alle algoritmes sterk gecorreleerd zijn.

Voor de duidelijkheid delen we paren opnieuw op in de drie groepen die in de vorige analyse zijn gebruikt, om het aantal berekeningen te verkleinen.

Groep1:(HAL&HAL-SPHERE, HAL-AABB&HAL-SPHERE en HAL-SPHERE&HAL-HASH)

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma] = [-0.001849012, 0.001870436]$$

Net zoals bij de x-coördinaat is er geen voelbaar verschil tussen de algoritmes in groep1.

Groep2:(HAL&CHAI, HAL&CHAI-AABB, HAL-AABB&CHAI, HAL-AABB&CHAI-AABB, HAL-HASH&CHAI en HAL-HASH&CHAI-AABB)

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma] = [-0.005463636, 0.0055625]$$

We zien dat de JND-waarde overschreden wordt en kunnen concluderen dat het verschil voelbaar is.

Groep3:(HAL-SPHERE&CHAI en HAL-SPHERE&CHAI-AABB)

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma] = [-0.005501734, 0.005579174]$$

Ook in groep3 is het verschil voelbaar, aangezien het maximale verschil groter is dan het JND.

Conclusie

De T-testen wijzen uit dat er een statistisch significant verschil bestaat tussen de onderzochte algoritmes. We zien echter wel dat enkel de verschillen uit groep1 en groep2 ook voelbaar zijn voor de gebruiker.

8.2.3 Z-coördinaat(tabel A.13, A.14 en A.15)

Bespreking

tabel A.13 toont ons ongeveer hetzelfde als de tabel met paren voor de y-coördinaat. We hebben opnieuw de volgende algoritmes die volledig gelijk zijn en dus niet onderzocht moeten worden:

- **HAL:** HAL-AABB en HAL-HASH
- **HAL-AABB:** HAL-HASH
- **CHAI:** CHAI-AABB

Voor de overige algoritmes wordt aan de hand van een paired T-test onderzocht of de verschillen significant zijn.

In tabel A.14 zien we dat er een zeer sterke correlatie bestaat tussen de algoritmes in de verschillende paren.

We kunnen net als bij de vorige twee analyses de berekeningen in drie groepen verdelen, omdat een aantal paren dezelfde waardes gegenereerd hebben.

Groep1: (*HAL* & *HAL-SPHERE*, *HAL-AABB* & *HAL-SPHERE* en *HAL-SPHERE* & *HAL-HASH*)

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma] = [-0.002536056, 0.002244096]$$

In groep1 zien we dat de verschillen statistisch significant zijn, maar het maximum van het interval ligt wel onder het JND. Dit betekent dat het significante verschil in praktijk niet merkbaar is voor een gebruiker.

Groep2: (*HAL* & *CHAI*, *HAL* & *CHAI-AABB*, *HAL-AABB* & *CHAI*, *HAL-AABB* & *CHAI-AABB*, *HAL-HASH* & *CHAI* en *HAL-HASH* & *CHAI-AABB*)

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma] = [-0.002682809, 0.001671615]$$

Net zoals bij groep1 is er in groep2 een significant verschil tussen de gepaarde algoritmes. Ook hier zien we echter dat het verschil het JND niet overschrijdt en dat het verschil dus onmerkbaar is.

Groep3:(HAL-SPHERE&CHAI en HAL-SPHERE&CHAI-AABB)

$$[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma] = [-0.002709319, 0.001990085]$$

Er bestaat eveneens een significant verschil tussen de gepaarde algoritmes in groep3 en in groep3 wordt het JND eveneens niet overschreden.

Conclusie

We hebben statistisch aangetoond dat er betreffende de z-coördinaat tussen de gepaarde algoritmes een gepaard verschil bestaat, maar bij vergelijking met het JND zien we dat er geen voelbaar verschil optreedt.

8.2.4 Conclusie

We hebben onderzocht of er een significant verschil bestaat tussen de gepaarde algoritmes en zagen dat er een significant verschil bestaat tussen de algoritmes van HAL en deze van CHAI. Verder merkten we op dat er nu ook een significant verschil optreedt tussen het HAL-SPHERE algoritme en de overige algoritmes van HAL. Hierbij is het echter wel zo dat verschil niet voelbaar is voor de gebruiker. Voor de overige twee groepen wordt er bij de x-coördinaat het JND overschreden en kunnen we zeggen dat het verschil ook voelbaar is.

8.3 Vis**8.3.1 X-coördinaat(tabel A.16, A.17 en A.18)****Bespreking**

We zouden verwachten dat we in tabel A.16 dezelfde groepen krijgen als in de vorige analyse, maar merken op dat er nu een verschil is opgetreden tussen de beide CHAI algoritmes. Dit heeft als gevolg dat bijna elk paar van algoritmes onderzocht moet worden op significante verschillen.

tabel A.17 geeft aan dat er sterke correlatie is tussen de gepaarde algoritmes.

In tegenstelling tot de vorige analyses is het niet meer vanzelfsprekend om de resultaten van tabel A.18 in groepen te verdelen. Daarom gaan we elk paar individueel bekijken.

Paar	95%-interval	Maximum	p-waarde
Pair2:	[-0.000681251, 0.000561138]	0.000681251	0.000
Pair4:	[-0.009795864, 0.009899395]	0.009899395	0.019
Pair5:	[-0.00532388, 0.005705293]	0.005705293	0.000
Pair6:	[-0.000681251, 0.000561138]	0.000681251	0.000
Pair8:	[-0.009795864, 0.009899395]	0.009899395	0.019
Pair9:	[-0.00532388, 0.005705293]	0.005705293	0.000
Pair10:	[-0.000561138, 0.000681251]	0.000681251	0.000
Pair11:	[-0.009709357, 0.009933001]	0.009933001	0.000
Pair12:	[-0.005248854, 0.005750381]	0.005750381	0.000
Pair13:	[-0.009795864, 0.009899395]	0.009899395	0.019
Pair14:	[-0.00532388, 0.005705293]	0.005705293	0.000
Pair15:	[-0.00827908, 0.008556963]	0.008556963	0.000

Tabel 8.4: Tabel gebruikt bij de controle of een paar het JND in de x-richting overschrijdt. De p-waarde is afkomstig uit tabel A.18

Tabel 8.4 toont ons dat er drie paren zijn met een p-waarde boven de vastgelegde p-waarde van .0166666 en waarvan de algoritmes met andere woorden niet significant van elkaar verschillen. De andere paren hebben een p-waarde van .000 en stellen een significant verschil voor. Verder kunnen we uit deze tabel afleiden dat het verschil bij paar 2, 6 en 10 niet merkbaar is. De andere verschillen zijn hoger dan de toegelaten JND van 3.57mm en geven dus een merkbaar ander gevoel.

Conclusie

We zagen bij deze test voor het eerst een verschil tussen de twee CHAI algoritmes. De reden dat dit verschil zich niet voordoet bij de andere twee objecten is niet duidelijk, en het zoeken achter de reden is geen triviale zaak. Hetgeen we bij de andere paren zien is enkel een bevestiging van bevindingen uit de voorgaande analyses. We hebben een significant verschil tussen de algoritmes van HAL en het CHAI-AABB algoritme. Bij deze analyse zien we wel dat er een verschil is tussen de HAL algoritmes en het CHAI algoritme, maar dat dit verschil niet significant is. Dit verschil mag dan wel niet significant zijn, bij de vergelijking met het JND merken we wel op dat verschil voelbaar is.

8.3.2 Y-coördinaat(tabel A.19, A.20 en A.21)

Bespreking

tabel A.19 bevestigt de vaststelling van de vorige analyse, met name dat er zich nu ook een verschil voordoet tussen de twee CHAI algoritmes. Er zijn nu maar drie paren overgebleven die dezelfde datasets gegenereerd hebben (aangeduid met een a'tje in de tabel).

Qua correlaties vinden we niets nieuws in tabel A.20. Opnieuw zijn de paren die een verschil vertonen sterk gecorreleerd.

Naar analogie met de vorige analyse gaan we de verschillende paren individueel bekijken (tabel 8.5).

Paar	95%-interval	Maximum	p-waarde
Pair2:	[-0.0001132382, 0.0000955807]	0.0001132382	0.000
Pair4:	[-0.0022938622, 0.0020983643]	0.0022938622	0.000
Pair5:	[-0.0017872024, 0.0017121847]	0.0017872024	0.000
Pair6:	[-0.0001132382, 0.0000955807]	0.0001132382	0.000
Pair8:	[-0.0022938622, 0.0020983643]	0.0022938622	0.000
Pair9:	[-0.0017872024, 0.0017121847]	0.0017872024	0.000
Pair10:	[-0.0000955807, 0.0001132382]	0.0001132382	0.000
Pair11:	[-0.0022830599, 0.0021052195]	0.0022830599	0.000
Pair12:	[-0.0017784444, 0.0017210843]	0.0017784444	0.000
Pair13:	[-0.0022938622, 0.0020983643]	0.0022938622	0.000
Pair14:	[-0.0017872024, 0.0017121847]	0.0017872024	0.000
Pair15:	[-0.0018445044, 0.0019649847]	0.0019649847	0.000

Tabel 8.5: Tabel gebruikt bij de controle of een paar het JND in de y-richting overschrijdt. De p-waarde is afkomstig uit tabel A.21

In tegenstelling tot de analyse van de x-coördinaat zien we dat nu wel alle verschillen statistisch significant zijn. Het tweede grote verschil dat we kunnen zien is dat geen enkel verschil de drempel van het JND overschrijdt. Dit staat in contrast met de statistiek die zegt dat de verschillen significant zijn. Dit toont nogmaals aan dat een significant verschil niet noodzakelijk overeenstemt met een voelbaar verschil.

Conclusie

We zien dat slechts 50% van de algoritmes nog gelijk zijn aan elkaar. Tussen de andere algoritmes bestaan significante verschillen, hoewel deze niet voelbaar zijn voor de gebruiker.

8.3.3 Z-coördinaat(tabel A.22, A.23 en A.24)

Bespreking

Analoog met de analyse bij de x- en y-coördinaat zien we in tabel A.22 dat enkel de algoritmes HAL, HAL-HASH en HAL-AABB exact dezelfde zijn. De andere algoritmes vertonen verschillen, ongeacht met welk algoritme ze gepaard worden. tabel A.23 toont ons wel dat de paren waarbij een verschil aanwezig is, er een sterke correlatie bestaat.

Aangezien bijna elk algoritme een andere dataset gegenereerd heeft (zie tabel A.22 en tabel A.24), moeten we elk paar onderzoeken waarvan de twee algoritmes een verschillende dataset hebben.

Paar	95%-interval	Maximum	p-waarde
Pair2:	[-0.0001449247, 0.0001689064]	0.0001689064	0.000
Pair4:	[-0.0047809409, 0.0059722856]	0.0059722856	0.000
Pair5:	[-0.0032281405, 0.0041084700]	0.0041084700	0.000
Pair6:	[-0.0001449247, 0.0001689064]	0.0001689064	0.000
Pair8:	[-0.0047809409, 0.0059722856]	0.0059722856	0.000
Pair9:	[-0.0032281405, 0.0041084700]	0.0041084700	0.000
Pair10:	[-0.0001689064, 0.0001449247]	0.0001689064	0.000
Pair11:	[-0.0047952936, 0.0059626565]	0.0059626565	0.000
Pair12:	[-0.0032450621, 0.0041014099]	0.0041014099	0.000
Pair13:	[-0.0047809409, 0.0059722856]	0.0059722856	0.000
Pair14:	[-0.0032281405, 0.0041084700]	0.0041084700	0.000
Pair15:	[-0.0051036578, 0.0047926426]	0.0051036578	0.000

Tabel 8.6: Tabel gebruikt bij de controle of een paar het JND in de z-richting overschrijdt. De p-waarde is afkomstig uit tabel A.24

Net zoals bij de y-coördinaat geeft de test voor alle paren een significant probleem aan (zie tabel 8.6). Nogmaals zien we dat het verschil tussen HAL-SPHERE en de andere HAL-algoritmes significant is, maar toch niet merkbaar is voor een gebruiker aangezien het verschil met 95% zekerheid onder het JND blijft. De andere paren vertonen zowel een significant als een voelbaar verschil.

Conclusie

De paired T-test op de z-coördinaat versterkt het algemeen beeld dat er een significant verschil bestaat tussen HAL en CHAI3D. Verder zien we ook nogmaals dat HAL-SPHERE een significant verschil toont met de andere HAL-algoritmes, maar hierbij onder het JND

blijft en dus niet voelbaar is. De andere paren vertonen ook een significant verschil, maar hierbij wordt het JND overschreden, wat resulteert in voelbare verschillen.

8.3.4 Conclusie

Nadat we de paired T-test uitgevoerd hebben op het vis-object, merken we een verschil tussen de twee CHAI-algoritmes. Dit is enigszins verrassend, aangezien beide algoritmes steeds hetzelfde aantal botsingen vond tijdens het uitvoeren van de experimenten met de verschillende objecten. Anderzijds zien we nogmaals dat HAL-SPHERE voor de drie testen verschillen vertoont ten opzichte van de andere algoritmes, terwijl de andere HAL-algoritmes geen verschil vertonen met elkaar.

8.4 Conclusie

Om een geheel overzicht te krijgen moeten we de verschillende testen naast elkaar leggen en nakijken in welke tests een algoritme verschillen vertoont: In tabel 8.7 zien we er in

Overzicht	Doos			Bol			Vis		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
pair1(HAL & HAL-AABB)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
pair2(HAL & HAL-SPHERE)	ns	ns	ns	s	s	s	s	s	s
pair3(HAL & HAL-HASH)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
pair4(HAL & CHAI)	s	s	<u>s</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	s	<u>s</u>	s	<u>s</u>
pair5(HAL & CHAI-AABB)	s	s	<u>s</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	s	<u>s</u>	s	<u>s</u>
pair6(HAL-AABB & HAL-SPHERE)	ns	ns	ns	s	s	s	s	s	s
pair7(HAL-AABB & HAL-HASH)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
pair8(HAL-AABB & CHAI)	s	s	<u>s</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	s	<u>ns</u>	s	<u>s</u>
pair9(HAL-AABB & CHAI-AABB)	s	s	<u>s</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	s	<u>s</u>	s	<u>s</u>
pair10(HAL-SPHERE & HAL-HASH)	ns	ns	ns	s	s	s	s	s	s
pair11(HAL-SPHERE & CHAI)	s	s	<u>s</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	s	<u>s</u>	s	<u>s</u>
pair12(HAL-SPHERE & CHAI-AABB)	s	s	<u>s</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	s	<u>s</u>	s	<u>s</u>
pair13(HAL-HASH & CHAI)	s	s	<u>s</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	s	<u>ns</u>	s	<u>s</u>
pair14(HAL-HASH & CHAI-AABB)	s	s	<u>s</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	s	<u>s</u>	s	<u>s</u>
pair15(CHAI & CHAI-AABB)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	<u>s</u>	s	<u>s</u>

Tabel 8.7: Overzicht van de paired T-tests op de verschillende algoritmes. s=significant verschil; ns=niet-significant verschil; onderlijnd=JND wordt overschreden.

feite maar drie algoritmes zijn die geen verschil met elkaar vertonen, namelijk HAL, HAL-AABB en HAL-HASH. Om aan te tonen dat twee algoritmes gelijk zijn moeten alle gestelde

hypotheses van de test aanvaard worden mag er met andere woorden geen enkel verschil statistisch significant zijn. Aan de hand van de overzichtstabel kunnen we de volgende besluiten nemen betreffende de voorgaande analyses:

- Tussen HAL, HAL-AABB en HAL-HASH bestaat op geen enkel moment een significant verschil. Dit gegeven samen met het feit dat deze drie algoritmes hetzelfde aantal botsingen vindt, doet concluderen dat deze algoritmes collision-equivalent zijn (definitie uit [16]). In de initiële analyse konden we al vaststellen dat deze drie algoritmes een verschillend aantal botsingen vond dan de algoritmes CHAI en CHAI-AABB. De T-testen bevestigde dit door bijna overal significante verschillen te vinden. Bij elk van de drie objecten was er verder steeds minstens één test die een verschil aangaf dat groter was dan het JND. We kunnen met andere woorden met zekerheid zeggen dat de algoritmes HAL, HAL-AABB en HAL-HASH verschillend zijn van CHAI en CHAI-AABB.
- HAL-SPHERE toonde bij de initiële analyse al aan dat het een ander aantal botsingen vond dan de overige algoritmes. Deze vaststelling werd verder bevestigd door de T-testen aangezien deze testen steeds significante verschillen aantoonde. We kunnen dus met zekerheid zeggen dat HAL-SPHERE verschillend is van de andere vijf algoritmes.
- Hoewel CHAI en CHAI-AABB in de initiële analyse hetzelfde aantal botsingen aantoonde, zien we aan de hand van de T-testen dat deze algoritmes toch significant van elkaar verschillen, zoals duidelijk is uit de testen met het vis-object.

Aan de hand van een aantal relatief simpele methodes hebben we een goede manier gevonden waarmee haptische algoritmes met elkaar vergeleken kunnen worden. Door te kijken naar het aantal botsingen en het uitvoeren van een T-test kunnen we een statistisch gegrond besluit formuleren betreffende de gelijkheid van de geteste algoritmes.

9

Alternatieven

Wegens tijdgebrek zijn de volgende ideeën niet uitgewerkt kunnen worden. Toch is het de moeite waarde om ze te omschrijven en ze eventueel in de toekomst uit te werken.

9.1 Mathematische modellen

Tijdens de simulaties voor deze thesis is gebruik gemaakt van een recording die op voorhand gemaakt is. In plaats dat vooraf een gebruiker een sessie opneemt, is er ook de mogelijkheid om aan de hand van mathematische vergelijkingen een pad wiskundig te berekenen. Van dit pad kunnen we samples op gelijke intervallen nemen om een recordingsessie te simuleren. Het gebruik van mathematisch berekende invoerdata heeft een aantal voordelen. Zo is het niet nodig om een menselijke gebruiker te zoeken die de recordingsessie uitvoert. Verder is het op geen enkel ogenblik van de evaluatie nog nodig om een haptisch apparaat ter beschikking te hebben. Een derde voordeel is dat er zeer snel veel testcases gegenereerd kunnen worden.

9.2 Pad-vergelijking

Door de botsingen te bekijken als een aantal opeenvolgende punten op een curve, kan er gebruik gemaakt worden van shape-recognition algoritmes die twee curves proberen

te matchen [11]. Het resultaat van deze algoritmes kan gebruikt worden als een maat van verschil tussen de twee curves. Aan de hand van deze methode kan er met andere woorden gecontroleerd worden of de curves van verschillende algoritmes dezelfde vorm hebben. Indien de vorm dezelfde is, kan er een oordeel geveld worden over de gelijkheid van de algoritmes die gerepresenteerd worden door de curves.

10

Conclusie

Door de voorgestelde evaluatiemethode in praktijk uit te testen, zijn er problemen aan het licht gekomen die ervoor gezorgd hebben dat de originele functionaliteit van de methode niet haalbaar is gebleken. Het principe dat een algoritme gebruikt om krachten te berekenen is niet eenduidig. Er zijn verscheidene aanpakken ontwikkeld en deze aanpakken zijn niet altijd compatibel met elkaar. Bij het onderzoek werd gebruik gemaakt van HAL, een haptics-library ontwikkeld aan het EDM, en van CHAI3D, een opensource haptics-library. Hierbij bleek het dat de systemen die instaan voor de berekening van de krachten, niet compatibel met elkaar zijn. Het ene systeem gebruikt twee factoren, een damping- en veerconstante, terwijl het andere systeem slechts één factor gebruikt, een stijfheidconstante. Tussen deze twee factoren is geen triviale overschakeling mogelijk en dus zijn de systemen principieel niet vergelijkbaar met onze methode. Het is uiterst moeilijk om een opstelling te creëren die ervoor zorgt dat er voor beide systemen dezelfde situatie omtrent krachten-generatie gebruikt wordt, als dit überhaupt mogelijk is.

Verder zijn er ook een aantal force-shading algoritmes beschikbaar, die niet allemaal hetzelfde effect en doel hebben. Hierdoor zullen resulterende krachten uit verschillende algoritmes van elkaar verschillen, zelfs wanneer ze van exact dezelfde opstelling uitgaan. De richting en grootte van de krachten wordt geïnterpoleerd, afhankelijk van de vorm van het model en locatie van het botsingspunt. Het is niet moeilijk op te merken dat het gebruik van verschillende interpolatietechnieken, ook zullen resulteren in verschillende krachten.

Omdat HAL een systeem met een dampingsconstante gebruikt, bestond de noodzaak om een tweede forceshader te implementeren. De dampingsconstante heeft als effect dat als de pointer tegen een hogesnelheid tegen het oppervlakte opbotst, de resulterende kracht zo groot kan zijn dat het apparaat terug achteruit geslingerd wordt. Dit effect kan resulteren

in resonantie-trillingen. Het doel van de tweede forceshader was dan om deze trillingen op te vangen en uit het systeem te verwijderen. We kunnen inzien dat een systeem dat geen gebruik maakt van damping deze shader niet zal hebben en dus ook andere krachten zal genereren.

Tijdens het onderzoek naar een evaluatiemethode zijn dus een aantal problemen aan het licht gekomen die de bruikbaarheid van de methode beperkt hebben. Ondanks die problemen zijn we erin geslaagd om een effectieve en statistisch gegronde methode te ontwikkelen die gebruikt kan worden om haptische algoritmes te vergelijken en evalueren. Deze vergelijking gebeurt aan de hand van een paired T-test. De T-test bleek een goede keuze te zijn omdat het direct duidelijk werd of een paar significante verschillen vertoonde. Daarnaast liet deze test ook toe dat er op een eenvoudige manier rekening gehouden kon worden met het JND. Dit gebeurt door een interval te berekenen dat minstens 95% van de waarden omvat. Indien dit interval de JND-waarde bevat mogen we zeggen dat het JND behaald wordt en er merkbare verschillen opgetreden hebben. Het feit dat gelijktijdig op significantie en op het JND getest kan worden, zorgt ervoor dat deze methode zeer nuttig kan zijn bij later onderzoek.

De voorgestelde methode is zoals de experimenten aangetoond hebben, een zeer geschikte manier om te controleren op collision-equivalence.

Een bijkomend voordeel van deze methode bestaat eruit dat geen uitzonderlijk uitgebreide kennis van statistische methodes vereist is. De voorgestelde resultaten zijn gegeneerd met vrij verkrijgbare software zonder dat enige aanpassingen vereist zijn.

In deze thesis is er gekozen om de libraries HAL en CHAI3D met elkaar te vergelijken en te evalueren. De methode is echter niet enkel bruikbaar voor het vergelijken van algoritmes. We kunnen de methode ook gebruiken om de correctheid van haptische algoritmes aan te tonen. Het is immers mogelijk om met onze methode de dataset van het te controleren algoritme te vergelijken met een dataset met reële meetresultaten. Het pad dat tijdens een recordingsessie wordt opgemeten kan ook gebruikt worden om metingen uit te voeren met reële objecten (voor meer informatie verwijzen we naar de paper van Ruffaldi et al [18]). De meetapparatuur wordt dan op een zodanige manier bewogen dat het pad van het haptische interface punt wordt nagebootst. De resultaten van die metingen kunnen als dataset gebruikt worden zodat een vergelijking tussen het algoritme en reële data mogelijk is. Aangezien we mogen aannemen dat de reële data correct is, hebben we een referentiebasis die gebruikt kan worden voor de controle op correctheid.



Resultaten: tabellen

Deze bijlage bevat de tabellen die gebruikt zijn tijdens de analyse van hoofdstuk 8. Voor uitleg over de betekenis deze tabellen verwijzen we naar [?], waar de verschillende kolommen in detail besproken worden.

A.1 Tabellen: Doos-X

De tabellen van het experiment met de x-coördinaat bij het doos-object zijn terug te vinden in 8.1.1.

A.2 Tabellen: Doos-Y

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	Y-HAL Y-HAL-AABB	,02428500 ^a ,02428500 ^a	50000 50000	,045441135 ,045441135	,000203219 ,000203219
Pair 2	Y-HAL Y-HAL-SPHERE	,02428500 ^a ,02428500 ^a	50000 50000	,045441135 ,045441135	,000203219 ,000203219
Pair 3	Y-HAL Y-HAL-HASH	,02428500 ^a ,02428500 ^a	50000 50000	,045441135 ,045441135	,000203219 ,000203219
Pair 4	Y-HAL Y-CHAI	,02428500 ,02431978	50000 50000	,045441135 ,045475816	,000203219 ,000203374
Pair 5	Y-HAL Y-CHAI-AABB	,02428500 ,02431978	50000 50000	,045441135 ,045475816	,000203219 ,000203374
Pair 6	Y-HAL-AABB Y-HAL-SPHERE	,02428500 ^a ,02428500 ^a	50000 50000	,045441135 ,045441135	,000203219 ,000203219
Pair 7	Y-HAL-AABB Y-HAL-HASH	,02428500 ^a ,02428500 ^a	50000 50000	,045441135 ,045441135	,000203219 ,000203219
Pair 8	Y-HAL-AABB Y-CHAI	,02428500 ,02431978	50000 50000	,045441135 ,045475816	,000203219 ,000203374
Pair 9	Y-HAL-AABB Y-CHAI-AABB	,02428500 ,02431978	50000 50000	,045441135 ,045475816	,000203219 ,000203374
Pair 10	Y-HAL-SPHERE Y-HAL-HASH	,02428500 ^a ,02428500 ^a	50000 50000	,045441135 ,045441135	,000203219 ,000203219
Pair 11	Y-HAL-SPHERE Y-CHAI	,02428500 ,02431978	50000 50000	,045441135 ,045475816	,000203219 ,000203374
Pair 12	Y-HAL-SPHERE Y-CHAI-AABB	,02428500 ,02431978	50000 50000	,045441135 ,045475816	,000203219 ,000203374
Pair 13	Y-HAL-HASH Y-CHAI	,02428500 ,02431978	50000 50000	,045441135 ,045475816	,000203219 ,000203374
Pair 14	Y-HAL-HASH Y-CHAI-AABB	,02428500 ,02431978	50000 50000	,045441135 ,045475816	,000203219 ,000203374
Pair 15	Y-CHAI Y-CHAI-AABB	,02431978 ^a ,02431978 ^a	50000 50000	,045475816 ,045475816	,000203374 ,000203374

a. The correlation and t cannot be computed because the standard error of the difference is 0.

Tabel A.1: Paren van algoritmes - doos, Y-coördinaat.

	N	Correlation	Sig.
Pair 4 Y-HAL & Y-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 5 Y-HAL & Y-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 8 Y-HAL-AABB & Y-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 9 Y-HAL-AABB & Y-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 11 Y-HAL-SPHERE & Y-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 12 Y-HAL-SPHERE & Y-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 13 Y-HAL-HASH & Y-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 14 Y-HAL-HASH & Y-CHAI-AABB	50000	1,000	,000

Tabel A.2: Correlatie - doos - Y-coördinaat.

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	98,33333% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 4	Y-HAL - Y-CHAI	-,000034773	,000979758	,000004382	-,000045263	-,000024283	-7,936	49999	,000
Pair 5	Y-HAL - Y-CHAI-AABB	-,000034773	,000979758	,000004382	-,000045263	-,000024283	-7,936	49999	,000
Pair 8	Y-HAL-AABB - Y-CHAI	-,000034773	,000979758	,000004382	-,000045263	-,000024283	-7,936	49999	,000
Pair 9	Y-HAL-AABB - Y-CHAI-AABB	-,000034773	,000979758	,000004382	-,000045263	-,000024283	-7,936	49999	,000
Pair 11	Y-HAL-SPHERE - Y-CHAI	-,000034773	,000979758	,000004382	-,000045263	-,000024283	-7,936	49999	,000
Pair 12	Y-HAL-SPHERE - Y-CHAI-AABB	-,000034773	,000979758	,000004382	-,000045263	-,000024283	-7,936	49999	,000
Pair 13	Y-HAL-HASH - Y-CHAI	-,000034773	,000979758	,000004382	-,000045263	-,000024283	-7,936	49999	,000
Pair 14	Y-HAL-HASH - Y-CHAI-AABB	-,000034773	,000979758	,000004382	-,000045263	-,000024283	-7,936	49999	,000

Tabel A.3: T-Test - doos - Y-coördinaat.

A.3 Tabellen: Doos-Z

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair	Z-HAL	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
1	Z-HAL-AABB	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
Pair	Z-HAL	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
2	Z-HAL-SPHERE	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
Pair	Z-HAL	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
3	Z-HAL-HASH	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
Pair	Z-HAL	,01624818	50000	,018950965	,000084751
4	Z-CHAI	,01688780	50000	,017761748	,000079433
Pair	Z-HAL	,01624818	50000	,018950965	,000084751
5	Z-CHAI-AABB	,01688780	50000	,017761748	,000079433
Pair	Z-HAL-AABB	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
6	Z-HAL-SPHERE	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
Pair	Z-HAL-AABB	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
7	Z-HAL-HASH	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
Pair	Z-HAL-AABB	,01624818	50000	,018950965	,000084751
8	Z-CHAI	,01688780	50000	,017761748	,000079433
Pair	Z-HAL-AABB	,01624818	50000	,018950965	,000084751
9	Z-CHAI-AABB	,01688780	50000	,017761748	,000079433
Pair	Z-HAL-SPHERE	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
10	Z-HAL-HASH	,01624818 ^a	50000	,018950965	,000084751
Pair	Z-HAL-SPHERE	,01624818	50000	,018950965	,000084751
11	Z-CHAI	,01688780	50000	,017761748	,000079433
Pair	Z-HAL-SPHERE	,01624818	50000	,018950965	,000084751
12	Z-CHAI-AABB	,01688780	50000	,017761748	,000079433
Pair	Z-HAL-HASH	,01624818	50000	,018950965	,000084751
13	Z-CHAI	,01688780	50000	,017761748	,000079433
Pair	Z-HAL-HASH	,01624818	50000	,018950965	,000084751
14	Z-CHAI-AARR	,01688780	50000	,017761748	,000079433
Pair	Z-CHAI	,01688780 ^a	50000	,017761748	,000079433
15	Z-CHAI-AABB	,01688780 ^a	50000	,017761748	,000079433

a. The correlation and t cannot be computed because the standard error of the difference is 0.

Tabel A.4: Paren van algoritmes - doos, Z-coördinaat.

		N	Correlation	Sig.
Pair 4	Z-HAL & Z-CHAI	50000	,993	,000
Pair 5	Z-HAL & Z-CHAI-AABB	50000	,993	,000
Pair 8	Z-HAL-AABB & Z-CHAI	50000	,993	,000
Pair 9	Z-HAL-AABB & Z-CHAI-AABB	50000	,993	,000
Pair 11	Z-HAL-SPHERE & Z-CHAI	50000	,993	,000
Pair 12	Z-HAL-SPHERE & Z-CHAI-AABB	50000	,993	,000
Pair 13	Z-HAL-HASH & Z-CHAI	50000	,993	,000
Pair 14	Z-HAL-HASH & Z-CHAI-AABB	50000	,993	,000

Tabel A.5: Correlatie - doos - Z-coördinaat.

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	98,33333% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 4	Z-HAL - Z-CHAI	-,000639617	,002502851	,000011193	-,000666414	-,000612820	-57,144	49999	,000
Pair 5	Z-HAL - Z-CHAI-AABB	-,000639617	,002502851	,000011193	-,000666414	-,000612820	-57,144	49999	,000
Pair 8	Z-HAL-AABB - Z-CHAI	-,000639617	,002502851	,000011193	-,000666414	-,000612820	-57,144	49999	,000
Pair 9	Z-HAL-AABB - Z-CHAI-AABB	-,000639617	,002502851	,000011193	-,000666414	-,000612820	-57,144	49999	,000
Pair 11	Z-HAL-SPHERE - Z-CHAI	-,000639617	,002502851	,000011193	-,000666414	-,000612820	-57,144	49999	,000
Pair 12	Z-HAL-SPHERE - Z-CHAI-AABB	-,000639617	,002502851	,000011193	-,000666414	-,000612820	-57,144	49999	,000
Pair 13	Z-HAL-HASH - Z-CHAI	-,000639617	,002502851	,000011193	-,000666414	-,000612820	-57,144	49999	,000
Pair 14	Z-HAL-HASH - Z-CHAI-AABB	-,000639617	,002502851	,000011193	-,000666414	-,000612820	-57,144	49999	,000

Tabel A.6: T-Test - doos - Z-coördinaat.

A.4 Tabellen: Bol-X

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair	X-HAL	-,00599594 ^a	50000	,022621592	,000101167
1	X-HAL-AABB	-,00599594 ^a	50000	,022621592	,000101167
Pair	X-HAL	-,00599594	50000	,022621592	,000101167
2	X-HAL-SPHERE	-,00618861	50000	,021862235	,000097771
Pair	X-HAL	-,00599594 ^a	50000	,022621592	,000101167
3	X-HAL-HASH	-,00599594 ^a	50000	,022621592	,000101167
Pair	X-HAL	-,00599594	50000	,022621592	,000101167
4	X-CHAI	-,00539117	50000	,022453739	,000100416
Pair	X-HAL	-,00599594	50000	,022621592	,000101167
5	X-CHAI-AABB	-,00539117	50000	,022453739	,000100416
Pair	X-HAL-AABB	-,00599594	50000	,022621592	,000101167
6	X-HAL-SPHERE	-,00618861	50000	,021862235	,000097771
Pair	X-HAL-AABB	-,00599594 ^a	50000	,022621592	,000101167
7	X-HAL-HASH	-,00599594 ^a	50000	,022621592	,000101167
Pair	X-HAL-AABB	-,00599594	50000	,022621592	,000101167
8	X-CHAI	-,00539117	50000	,022453739	,000100416
Pair	X-HAL-AABB	-,00599594	50000	,022621592	,000101167
9	X-CHAI-AABB	-,00539117	50000	,022453739	,000100416
Pair	X-HAL-SPHERE	-,00618861	50000	,021862235	,000097771
10	X-HAL-HASH	-,00599594	50000	,022621592	,000101167
Pair	X-HAL-SPHERE	-,00618861	50000	,021862235	,000097771
11	X-CHAI	-,00539117	50000	,022453739	,000100416
Pair	X-HAL-SPHERE	-,00618861	50000	,021862235	,000097771
12	X-CHAI-AABB	-,00539117	50000	,022453739	,000100416
Pair	X-HAL-HASH	-,00599594	50000	,022621592	,000101167
13	X-CHAI	-,00539117	50000	,022453739	,000100416
Pair	X-HAL-HASH	-,00599594	50000	,022621592	,000101167
14	X-CHAI-AABB	-,00539117	50000	,022453739	,000100416
Pair	X-CHAI	-,00539117 ^a	50000	,022453739	,000100416
15	X-CHAI-AABB	-,00539117 ^a	50000	,022453739	,000100416

a. The correlation and t cannot be computed because the standard error of the difference is 0.

Tabel A.7: Paren van algoritmes - bol - X-coördinaat.

		N	Correlation	Sig.
Pair 2	X-HAL & X-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 4	X-HAL & X-CHAI	50000	,989	,000
Pair 5	X-HAL & X-CHAI-AABB	50000	,989	,000
Pair 6	X-HAL-AABB & X-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 8	X-HAL-AABB & X-CHAI	50000	,989	,000
Pair 9	X-HAL-AABB & X-CHAI-AABB	50000	,989	,000
Pair 10	X-HAL-SPHERE & X-HAL-HASH	50000	1,000	,000
Pair 11	X-HAL-SPHERE & X-CHAI	50000	,988	,000
Pair 12	X-HAL-SPHERE & X-CHAI-AABB	50000	,988	,000
Pair 13	X-HAL-HASH & X-CHAI	50000	,989	,000
Pair 14	X-HAL-HASH & X-CHAI-AABB	50000	,989	,000

Tabel A.8: Correlatie - bol - X-coördinaat.

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	98,33333% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 2	X-HAL - X-HAL-SPHERE	,000192668	,000979710	,000004381	,000182178	,000203157	43,974	49999	,000
Pair 4	X-HAL - X-CHAI	-,000604773	,003395939	,000015187	-,000641132	-,000568414	-39,821	49999	,000
Pair 5	X-HAL - X-CHAI-AABB	-,000604773	,003395939	,000015187	-,000641132	-,000568414	-39,821	49999	,000
Pair 6	X-HAL-AABB - X-HAL-SPHERE	,000192668	,000979710	,000004381	,000182178	,000203157	43,974	49999	,000
Pair 8	X-HAL-AABB - X-CHAI	-,000604773	,003395939	,000015187	-,000641132	-,000568414	-39,821	49999	,000
Pair 9	X-HAL-AABB - X-CHAI-AABB	-,000604773	,003395939	,000015187	-,000641132	-,000568414	-39,821	49999	,000
Pair 10	X-HAL-SPHERE - X-HAL-HASH	-,000192668	,000979710	,000004381	-,000203157	-,000182178	-43,974	49999	,000
Pair 11	X-HAL-SPHERE - X-CHAI	-,000797441	,003426128	,000015322	-,000834123	-,000760759	-52,045	49999	,000
Pair 12	X-HAL-SPHERE - X-CHAI-AABB	-,000797441	,003426128	,000015322	-,000834123	-,000760759	-52,045	49999	,000
Pair 13	X-HAL-HASH - X-CHAI	-,000604773	,003395939	,000015187	-,000641132	-,000568414	-39,821	49999	,000
Pair 14	X-HAL-HASH - X-CHAI-AABB	-,000604773	,003395939	,000015187	-,000641132	-,000568414	-39,821	49999	,000

Tabel A.9: T-Test - bol - X-coördinaat.

A.5 Tabellen: Bol-Y

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair	Y-HAL	,00266736 ^a	50000	,024615405	,000110083
1	Y-HAL-AABB	,00266736 ^a	50000	,024615405	,000110083
Pair	Y-HAL	,00266736	50000	,024615405	,000110083
2	Y-HAL-SPHERE	,00265664	50000	,023962090	,000107162
Pair	Y-HAL	,00266736 ^a	50000	,024615405	,000110083
3	Y-HAL-HASH	,00266736 ^a	50000	,024615405	,000110083
Pair	Y-HAL	,00266736	50000	,024615405	,000110083
4	Y-CHAI	,00261792	50000	,024331815	,000108815
Pair	Y-HAL	,00266736	50000	,024615405	,000110083
5	Y-CHAI-AABB	,00261792	50000	,024331815	,000108815
Pair	Y-HAL-AABB	,00266736	50000	,024615405	,000110083
6	Y-HAL-SPHERE	,00265664	50000	,023962090	,000107162
Pair	Y-HAL-AABB	,00266736 ^a	50000	,024615405	,000110083
7	Y-HAL-HASH	,00266736 ^a	50000	,024615405	,000110083
Pair	Y-HAL-AABB	,00266736	50000	,024615405	,000110083
8	Y-CHAI	,00261792	50000	,024331815	,000108815
Pair	Y-HAL-AABB	,00266736	50000	,024615405	,000110083
9	Y-CHAI-AABB	,00261792	50000	,024331815	,000108815
Pair	Y-HAL-SPHERE	,00265664	50000	,023962090	,000107162
10	Y-HAL-HASH	,00266736	50000	,024615405	,000110083
Pair	Y-HAL-SPHERE	,00265664	50000	,023962090	,000107162
11	Y-CHAI	,00261792	50000	,024331815	,000108815
Pair	Y-HAL-SPHERE	,00265664	50000	,023962090	,000107162
12	Y-CHAI-AABB	,00261792	50000	,024331815	,000108815
Pair	Y-HAL-HASH	,00266736	50000	,024615405	,000110083
13	Y-CHAI	,00261792	50000	,024331815	,000108815
Pair	Y-HAL-HASH	,00266736	50000	,024615405	,000110083
14	Y-CHAI-AABB	,00261792	50000	,024331815	,000108815
Pair	Y-CHAI	,00261792 ^a	50000	,024331815	,000108815
15	Y-CHAI-AABB	,00261792 ^a	50000	,024331815	,000108815

a. The correlation and t cannot be computed because the standard error of the difference is 0.

Tabel A.10: Paren van algoritmes - bol - Y-coördinaat.

	N	Correlation	Sig.
Pair 2 Y-HAL & Y-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 4 Y-HAL & Y-CHAI	50000	,994	,000
Pair 5 Y-HAL & Y-CHAI-AABB	50000	,994	,000
Pair 6 Y-HAL-AABB & Y-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 8 Y-HAL-AABB & Y-CHAI	50000	,994	,000
Pair 9 Y-HAL-AABB & Y-CHAI-AABB	50000	,994	,000
Pair 10 Y-HAL-SPHERE & Y-HAL-HASH	50000	1,000	,000
Pair 11 Y-HAL-SPHERE & Y-CHAI	50000	,994	,000
Pair 12 Y-HAL-SPHERE & Y-CHAI-AABB	50000	,994	,000
Pair 13 Y-HAL-HASH & Y-CHAI	50000	,994	,000
Pair 14 Y-HAL-HASH & Y-CHAI-AABB	50000	,994	,000

Tabel A.11: Correlatie - bol - Y-coördinaat.

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	98,33333% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 2	Y-HAL - Y-HAL-SPHERE	,000010712	,000929862	,000004158	,000000756	,000020668	2,576	49999	,010
Pair 4	Y-HAL - Y-CHAI	,000049432	,002756534	,000012328	,000019919	,000078945	4,010	49999	,000
Pair 5	Y-HAL - Y-CHAI-AABB	,000049432	,002756534	,000012328	,000019919	,000078945	4,010	49999	,000
Pair 6	Y-HAL-AABB - Y-HAL-SPHERE	,000010712	,000929862	,000004158	,000000756	,000020668	2,576	49999	,010
Pair 8	Y-HAL-AABB - Y-CHAI	,000049432	,002756534	,000012328	,000019919	,000078945	4,010	49999	,000
Pair 9	Y-HAL-AABB - Y-CHAI-AABB	,000049432	,002756534	,000012328	,000019919	,000078945	4,010	49999	,000
Pair 10	Y-HAL-SPHERE - Y-HAL-HASH	-,000010712	,000929862	,000004158	-,000020668	-,000000756	-2,576	49999	,010
Pair 11	Y-HAL-SPHERE - Y-CHAI	,000038720	,002770227	,000012389	,000009060	,000068380	3,125	49999	,002
Pair 12	Y-HAL-SPHERE - Y-CHAI-AABB	,000038720	,002770227	,000012389	,000009060	,000068380	3,125	49999	,002
Pair 13	Y-HAL-HASH - Y-CHAI	,000049432	,002756534	,000012328	,000019919	,000078945	4,010	49999	,000
Pair 14	Y-HAL-HASH - Y-CHAI-AABB	,000049432	,002756534	,000012328	,000019919	,000078945	4,010	49999	,000

Tabel A.12: T-Test - bol - Y-coördinaat.

A.6 Tabellen: Bol-Z

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	Z-HAL Z-HAL-AABB	-,00266991 ^a -,00266991 ^a	50000 50000	,028186910 ,028186910	,000126056 ,000126056
Pair 2	Z-HAL Z-HAL-SPHERE	-,00266991 -,00252393	50000 50000	,028186910 ,027283428	,000126056 ,000122015
Pair 3	Z-HAL Z-HAL-HASH	-,00266991 ^a -,00266991 ^a	50000 50000	,028186910 ,028186910	,000126056 ,000126056
Pair 4	Z-HAL Z-CHAI	-,00266991 -,00216431	50000 50000	,028186910 ,027475063	,000126056 ,000122872
Pair 5	Z-HAL Z-CHAI-AABB	-,00266991 -,00216431	50000 50000	,028186910 ,027475063	,000126056 ,000122872
Pair 6	Z-HAL-AABB Z-HAL-SPHERE	-,00266991 -,00252393	50000 50000	,028186910 ,027283428	,000126056 ,000122015
Pair 7	Z-HAL-AABB Z-HAL-HASH	-,00266991 ^a -,00266991 ^a	50000 50000	,028186910 ,028186910	,000126056 ,000126056
Pair 8	Z-HAL-AABB Z-CHAI	-,00266991 -,00216431	50000 50000	,028186910 ,027475063	,000126056 ,000122872
Pair 9	Z-HAL-AABB Z-CHAI-AABB	-,00266991 -,00216431	50000 50000	,028186910 ,027475063	,000126056 ,000122872
Pair 10	Z-HAL-SPHERE Z-HAL-HASH	-,00252393 -,00266991	50000 50000	,027283428 ,028186910	,000122015 ,000126056
Pair 11	Z-HAL-SPHERE Z-CHAI	-,00252393 -,00216431	50000 50000	,027283428 ,027475063	,000122015 ,000122872
Pair 12	Z-HAL-SPHERE Z-CHAI-AABB	-,00252393 -,00216431	50000 50000	,027283428 ,027475063	,000122015 ,000122872
Pair 13	Z-HAL-HASH Z-CHAI	-,00266991 -,00216431	50000 50000	,028186910 ,027475063	,000126056 ,000122872
Pair 14	Z-HAL-HASH Z-CHAI-AABB	-,00266991 -,00216431	50000 50000	,028186910 ,027475063	,000126056 ,000122872
Pair 15	Z-CHAI Z-CHAI-AABB	-,00216431 ^a -,00216431 ^a	50000 50000	,027475063 ,027475063	,000122872 ,000122872

a. The correlation and t cannot be computed because the standard error of the difference is 0.

Tabel A.13: Paren van algoritmes - bol - Z-coördinaat.

		N	Correlation	Sig.
Pair 2	Z-HAL & Z-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 4	Z-HAL & Z-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 5	Z-HAL & Z-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 6	Z-HAL-AABB & Z-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 8	Z-HAL-AABB & Z-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 9	Z-HAL-AABB & Z-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 10	Z-HAL-SPHERE & Z-HAL-HASH	50000	1,000	,000
Pair 11	Z-HAL-SPHERE & Z-CHAI	50000	,999	,000
Pair 12	Z-HAL-SPHERE & Z-CHAI-AABB	50000	,999	,000
Pair 13	Z-HAL-HASH & Z-CHAI	50000	1,000	,000
Pair 14	Z-HAL-HASH & Z-CHAI-AABB	50000	1,000	,000

Tabel A.14: Correlatie - bol - Z-coördinaat.

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	98,33333% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 2	Z-HAL - Z-HAL-SPHERE	-,000145980	,001195038	,000005344	-,000158775	-,000133185	-27,315	49999	,000
Pair 4	Z-HAL - Z-CHAI	-,000505597	,001088606	,000004868	-,000517252	-,000493942	-103,853	49999	,000
Pair 5	Z-HAL - Z-CHAI-AABB	-,000505597	,001088606	,000004868	-,000517252	-,000493942	-103,853	49999	,000
Pair 6	Z-HAL-AABB - Z-HAL-SPHERE	-,000145980	,001195038	,000005344	-,000158775	-,000133185	-27,315	49999	,000
Pair 8	Z-HAL-AABB - Z-CHAI	-,000505597	,001088606	,000004868	-,000517252	-,000493942	-103,853	49999	,000
Pair 9	Z-HAL-AABB - Z-CHAI-AABB	-,000505597	,001088606	,000004868	-,000517252	-,000493942	-103,853	49999	,000
Pair 10	Z-HAL-SPHERE - Z-HAL-HASH	,000145980	,001195038	,000005344	,000133185	,000158775	27,315	49999	,000
Pair 11	Z-HAL-SPHERE - Z-CHAI	-,000359617	,001174851	,000005254	-,000372196	-,000347039	-68,445	49999	,000
Pair 12	Z-HAL-SPHERE - Z-CHAI-AABB	-,000359617	,001174851	,000005254	-,000372196	-,000347039	-68,445	49999	,000
Pair 13	Z-HAL-HASH - Z-CHAI	-,000505597	,001088606	,000004868	-,000517252	-,000493942	-103,853	49999	,000
Pair 14	Z-HAL-HASH - Z-CHAI-AABB	-,000505597	,001088606	,000004868	-,000517252	-,000493942	-103,853	49999	,000

Tabel A.15: T-Test - bol - Z-coördinaat.

A.7 Tabellen: Vis-X

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	X-HAL X-HAL-AABB	,002625442 ^a ,002625442 ^a	50000 50000	,0101118642 ,0101118642	,0000452216 ,0000452216
Pair 2	X-HAL X-HAL-SPHERE	,002625442 ,002685499	50000 50000	,0101118642 ,0100389089	,0000452216 ,0000448954
Pair 3	X-HAL X-HAL-HASH	,002625442 ^a ,002625442 ^a	50000 50000	,0101118642 ,0101118642	,0000452216 ,0000452216
Pair 4	X-HAL X-CHAI	,002625442 ,00257368	50000 50000	,0101118642 ,009484526	,0000452216 ,000042416
Pair 5	X-HAL X-CHAI-AABB	,002625442 ,00243474	50000 50000	,0101118642 ,009383088	,0000452216 ,000041962
Pair 6	X-HAL-AABB X-HAL-SPHERE	,002625442 ,002685499	50000 50000	,0101118642 ,0100389089	,0000452216 ,0000448954
Pair 7	X-HAL-AABB X-HAL-HASH	,002625442 ^a ,002625442 ^a	50000 50000	,0101118642 ,0101118642	,0000452216 ,0000452216
Pair 8	X-HAL-AABB X-CHAI	,002625442 ,00257368	50000 50000	,0101118642 ,009484526	,0000452216 ,000042416
Pair 9	X-HAL-AABB X-CHAI-AABB	,002625442 ,00243474	50000 50000	,0101118642 ,009383088	,0000452216 ,000041962
Pair 10	X-HAL-SPHERE X-HAL-HASH	,002685499 ,002625442	50000 50000	,0100389089 ,0101118642	,0000448954 ,0000452216
Pair 11	X-HAL-SPHERE X-CHAI	,002685499 ,00257368	50000 50000	,0100389089 ,009484526	,0000448954 ,000042416
Pair 12	X-HAL-SPHERE X-CHAI-AABB	,002685499 ,00243474	50000 50000	,0100389089 ,009383088	,0000448954 ,000041962
Pair 13	X-HAL-HASH X-CHAI	,002625442 ,00257368	50000 50000	,0101118642 ,009484526	,0000452216 ,000042416
Pair 14	X-HAL-HASH X-CHAI-AABB	,002625442 ,00243474	50000 50000	,0101118642 ,009383088	,0000452216 ,000041962
Pair 15	X-CHAI X-CHAI-AABB	,00257368 ,00243474	50000 50000	,009484526 ,009383088	,000042416 ,000041962

a. The correlation and t cannot be computed because the standard error of the difference is 0.

Tabel A.16: Paren van algoritmes - vis - X-coördinaat.

		N	Correlation	Sig.
Pair 2	X-HAL & X-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 4	X-HAL & X-CHAI	50000	,876	,000
Pair 5	X-HAL & X-CHAI-AABB	50000	,963	,000
Pair 6	X-HAL-AABB & X-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 8	X-HAL-AABB & X-CHAI	50000	,876	,000
Pair 9	X-HAL-AABB & X-CHAI-AABB	50000	,963	,000
Pair 10	X-HAL-SPHERE & X-HAL-HASH	50000	1,000	,000
Pair 11	X-HAL-SPHERE & X-CHAI	50000	,875	,000
Pair 12	X-HAL-SPHERE & X-CHAI-AABB	50000	,962	,000
Pair 13	X-HAL-HASH & X-CHAI	50000	,876	,000
Pair 14	X-HAL-HASH & X-CHAI-AABB	50000	,963	,000
Pair 15	X-CHAI & X-CHAI-AABB	50000	,901	,000

Tabel A.17: Correlatie - vis - X-coördinaat.

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	98,33333% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 2	X-HAL - X-HAL-SPHERE	-,00006006	,0003105972	,000001389	-,00006338	-,00005673	-43,236	49999	,000
Pair 4	X-HAL - X-CHAI	,000051765	,0049238147	,000022020	-,00000095	,0001044825	2,351	49999	,019
Pair 5	X-HAI - X-CHAI-AABB	,000190707	,0027572933	,000012331	,0001611856	,0002202279	15,466	49999	,000
Pair 6	X-HAL-AABB - X-HAL-SPHERE	-,00006006	,0003105972	,000001389	-,00006338	-,00005673	-43,236	49999	,000
Pair 8	X-HAL-AABB - X-CHAI	,000051765	,0049238147	,000022020	-,00000095	,0001044825	2,351	49999	,019
Pair 9	X-HAL-AABB - X-CHAI-AABB	,000190707	,0027572933	,000012331	,0001611856	,0002202279	15,466	49999	,000
Pair 10	X-HAL-SPHERE - X-HAL-HASH	,000060057	,0003105972	,000001389	,0000567313	,0000633821	43,236	49999	,000
Pair 11	X-HAL-SPHERE - X-CHAI	,000111822	,0049105894	,000021961	,0000592465	,0001643975	5,092	49999	,000
Pair 12	X-HAL-SPHERE - X-CHAI-AABB	,000250763	,0027498089	,000012298	,0002213224	,0002802044	20,391	49999	,000
Pair 13	X-HAL-HASH - X-CHAI	,000051765	,0049238147	,000022020	-,00000095	,0001044825	2,351	49999	,019
Pair 14	X-HAL-HASH - X-CHAI-AABB	,000190707	,0027572933	,000012331	,0001611856	,0002202279	15,466	49999	,000
Pair 15	X-CHAI - X-CHAI-AABB	,000138941	,004209011	,000018823	,000093877	,000184005	7,381	49999	,000

Tabel A.18: T-Test - vis - X-coördinaat.

A.8 Tabellen: Vis-Y

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	Y-HAL Y-HAL-AABB	,013141566 ^a ,013141566 ^a	50000 50000	,0318205957 ,0318205957	,000142306 ,000142306
Pair 2	Y-HAL Y-HAL-SPHERE	,013141566 ,013150395	50000 50000	,0318205957 ,0318138707	,000142306 ,000142276
Pair 3	Y-HAL Y-HAL-HASH	,013141566 ^a ,013141566 ^a	50000 50000	,0318205957 ,0318205957	,000142306 ,000142306
Pair 4	Y-HAL Y-CHAI	,013141566 ,01323932	50000 50000	,0318205957 ,031867663	,000142306 ,000142517
Pair 5	Y-HAL Y-CHAI-AABB	,013141566 ,0131791	50000 50000	,0318205957 ,03175040	,000142306 ,00014199
Pair 6	Y-HAL-AABB Y-HAL-SPHERE	,013141566 ,013150395	50000 50000	,0318205957 ,0318138707	,000142306 ,000142276
Pair 7	Y-HAL-AABB Y-HAL-HASH	,013141566 ^a ,013141566 ^a	50000 50000	,0318205957 ,0318205957	,000142306 ,000142306
Pair 8	Y-HAL-AABB Y-CHAI	,013141566 ,01323932	50000 50000	,0318205957 ,031867663	,000142306 ,000142517
Pair 9	Y-HAL-AABB Y-CHAI-AABB	,013141566 ,0131791	50000 50000	,0318205957 ,03175040	,000142306 ,00014199
Pair 10	Y-HAL-SPHERE Y-HAL-HASH	,013150395 ,013141566	50000 50000	,0318138707 ,0318205957	,000142276 ,000142306
Pair 11	Y-HAL-SPHERE Y-CHAI	,013150395 ,01323932	50000 50000	,0318138707 ,031867663	,000142276 ,000142517
Pair 12	Y-HAL-SPHERE Y-CHAI-AABB	,013150395 ,0131791	50000 50000	,0318138707 ,03175040	,000142276 ,00014199
Pair 13	Y-HAL-HASH Y-CHAI	,013141566 ,01323932	50000 50000	,0318205957 ,031867663	,000142306 ,000142517
Pair 14	Y-HAL-HASH Y-CHAI-AABB	,013141566 ,0131791	50000 50000	,0318205957 ,03175040	,000142306 ,00014199
Pair 15	Y-CHAI Y-CHAI-AABB	,01323932 ,0131791	50000 50000	,031867663 ,03175040	,000142517 ,00014199

a. The correlation and t cannot be computed because the standard error of the difference is 0.

Tabel A.19: Paren van algoritmes - vis - Y-coördinaat.

		N	Correlation	Sig.
Pair 2	Y-HAL & Y-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 4	Y-HAL & Y-CHAI	50000	,999	,000
Pair 5	Y-HAL & Y-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 6	Y-HAL-AABB & Y-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 8	Y-HAL-AABB & Y-CHAI	50000	,999	,000
Pair 9	Y-HAL-AABB & Y-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 10	Y-HAL-SPHERE & Y-HAL-HASH	50000	1,000	,000
Pair 11	Y-HAL-SPHERE & Y-CHAI	50000	,999	,000
Pair 12	Y-HAL-SPHERE & Y-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 13	Y-HAL-HASH & Y-CHAI	50000	,999	,000
Pair 14	Y-HAL-HASH & Y-CHAI-AABB	50000	1,000	,000
Pair 15	Y-CHAI & Y-CHAI-AABB	50000	1,000	,000

Tabel A.20: Correlatie - vis - Y-coördinaat.

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	98,33333% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 2	Y-HAL - Y-HAL-SPHERE	-,00000883	,000052205	,000000233	-,00000939	-,00000827	-37,816	49999	,000
Pair 4	Y-HAL - Y-CHAI	-,00009775	,001098057	,000004911	-,00010951	-,00008599	-19,905	49999	,000
Pair 5	Y-HAL - Y-CHAI-AABB	-,00003751	,000874847	,000003912	-,00004688	-,00002814	-9,587	49999	,000
Pair 6	Y-HAL-AABB - Y-HAL-SPHERE	-,00000883	,000052205	,000000233	-,00000939	-,00000827	-37,816	49999	,000
Pair 8	Y-HAL-AABB - Y-CHAI	-,00009775	,001098057	,000004911	-,00010951	-,00008599	-19,905	49999	,000
Pair 9	Y-HAL-AABB - Y-CHAI-AABB	-,00003751	,000874847	,000003912	-,00004688	-,00002814	-9,587	49999	,000
Pair 10	Y-HAL-SPHERE - Y-HAL-HASH	,000008829	,000052205	,000000233	,000008270	,000009388	37,816	49999	,000
Pair 11	Y-HAL-SPHERE - Y-CHAI	-,00008892	,001097070	,000004906	-,00010067	-,00007717	-18,124	49999	,000
Pair 12	Y-HAL-SPHERE - Y-CHAI-AABB	-,00002868	,000874882	,000003913	-,00003805	-,00001931	-7,330	49999	,000
Pair 13	Y-HAL-HASH - Y-CHAI	-,00009775	,001098057	,000004911	-,00010951	-,00008599	-19,905	49999	,000
Pair 14	Y-HAL-HASH - Y-CHAI-AABB	-,00003751	,000874847	,000003912	-,00004688	-,00002814	-9,587	49999	,000
Pair 15	Y-CHAI - Y-CHAI-AABB	,000060240	,000952372	,000004259	,000050043	,000070437	14,144	49999	,000

Tabel A.21: T-Test - vis - Y-coördinaat.

A.9 Tabellen: Vis-Z

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	Z-HAL Z-HAL-AABB	,016289434 ^a ,016289434 ^a	50000 50000	,0193917862 ,0193917862	,0000867227 ,0000867227
Pair 2	Z-HAL Z-HAL-SPHERE	,016289434 ,016277443	50000 50000	,0193917862 ,0193924277	,0000867227 ,0000867256
Pair 3	Z-HAL Z-HAL-HASH	,016289434 ^a ,016289434 ^a	50000 50000	,0193917862 ,0193917862	,0000867227 ,0000867227
Pair 4	Z-HAL Z-CHAI	,016289434 ,01569376	50000 50000	,0193917862 ,019814385	,0000867227 ,000088613
Pair 5	Z-HAL Z-CHAI-AABB	,016289434 ,015849	50000 50000	,0193917862 ,0193583	,0000867227 ,0000866
Pair 6	Z-HAL-AABB Z-HAL-SPHERE	,016289434 ,016277443	50000 50000	,0193917862 ,0193924277	,0000867227 ,0000867256
Pair 7	Z-HAL-AABB Z-HAL-HASH	,016289434 ^a ,016289434 ^a	50000 50000	,0193917862 ,0193917862	,0000867227 ,0000867227
Pair 8	Z-HAL-AABB Z-CHAI	,016289434 ,01569376	50000 50000	,0193917862 ,019814385	,0000867227 ,000088613
Pair 9	Z-HAL-AABB Z-CHAI-AABB	,016289434 ,015849	50000 50000	,0193917862 ,0193583	,0000867227 ,0000866
Pair 10	Z-HAL-SPHERE Z-HAL-HASH	,016277443 ,016289434	50000 50000	,0193924277 ,0193917862	,0000867256 ,0000867227
Pair 11	Z-HAL-SPHERE Z-CHAI	,016277443 ,01569376	50000 50000	,0193924277 ,019814385	,0000867256 ,000088613
Pair 12	Z-HAL-SPHERE Z-CHAI-AABB	,016277443 ,015849	50000 50000	,0193924277 ,0193583	,0000867256 ,0000866
Pair 13	Z-HAL-HASH Z-CHAI	,016289434 ,01569376	50000 50000	,0193917862 ,019814385	,0000867227 ,000088613
Pair 14	Z-HAL-HASH Z-CHAI-AABB	,016289434 ,015849	50000 50000	,0193917862 ,0193583	,0000867227 ,0000866
Pair 15	Z-CHAI Z-CHAI-AABB	,01569376 ,015849	50000 50000	,019814385 ,0193583	,000088613 ,0000866

a. The correlation and t cannot be computed because the standard error of the difference is 0.

Tabel A.22: Paren van algoritmes - vis - Z-coördinaat.

		N	Correlation	Sig.
Pair 2	Z-HAL & Z-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 4	Z-HAL & Z-CHAI	50000	,991	,000
Pair 5	Z-HAL & Z-CHAI-AABB	50000	,996	,000
Pair 6	Z-HAL-AABB & Z-HAL-SPHERE	50000	1,000	,000
Pair 8	Z-HAL-AABB & Z-CHAI	50000	,991	,000
Pair 9	Z-HAL-AABB & Z-CHAI-AABB	50000	,996	,000
Pair 10	Z-HAL-SPHERE & Z-HAL-HASH	50000	1,000	,000
Pair 11	Z-HAL-SPHERE & Z-CHAI	50000	,991	,000
Pair 12	Z-HAL-SPHERE & Z-CHAI-AABB	50000	,996	,000
Pair 13	Z-HAL-HASH & Z-CHAI	50000	,991	,000
Pair 14	Z-HAL-HASH & Z-CHAI-AABB	50000	,996	,000
Pair 15	Z-CHAI & Z-CHAI-AABB	50000	,992	,000

Tabel A.23: Correlatie - vis - Z-coördinaat.

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	98,33333% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 2	Z-HAL - Z-HAL-SPHERE	,000011991	,000078458	,0000003509	,0000111509	,0000128309	34,174	49999	,000
Pair 4	Z-HAL - Z-CHAI	,000595672	,002688307	,0000120225	,0005668898	,0006244549	49,547	49999	,000
Pair 5	Z-HAL - Z-CHAI-AABB	,000440165	,001834153	,0000082026	,0004205273	,0004598022	53,662	49999	,000
Pair 6	Z-HAL-AABB - Z-HAL-SPHERE	,000011991	,000078458	,0000003509	,0000111509	,0000128309	34,174	49999	,000
Pair 8	Z-HAL-AABB - Z-CHAI	,000595672	,002688307	,0000120225	,0005668898	,0006244549	49,547	49999	,000
Pair 9	Z-HAL-AABB - Z-CHAI-AABB	,000440165	,001834153	,0000082026	,0004205273	,0004598022	53,662	49999	,000
Pair 10	Z-HAL-SPHERE - Z-HAL-HASH	-,00001199	,000078458	,0000003509	-,00001283	-,00001115	-34,174	49999	,000
Pair 11	7-HAI -SPHFRF - 7-CHAI	,000583681	,002689488	,0000120278	,0005548863	,0006124766	48,528	49999	,000
Pair 12	Z-HAL-SPHERE - Z-CHAI-AABB	,000428174	,001836618	,0000082136	,0004085100	,0004478377	52,130	49999	,000
Pair 13	Z-HAL-HASH - Z-CHAI	,000595672	,002688307	,0000120225	,0005668898	,0006244549	49,547	49999	,000
Pair 14	Z-HAL-HASH - Z-CHAI-AABB	,000440165	,001834153	,0000082026	,0004205273	,0004598022	53,662	49999	,000
Pair 15	Z-CHAI - Z-CHAI-AABB	-,000155508	,002474075	,000011064	-,000181996	-,000129019	-14,055	49999	,000

Tabel A.24: T-Test - vis - Z-coördinaat.

Bibliografie

- [1] Acosta, E., Temkin, B.: Scene complexity: "A measure for real-time stable haptic applications.", Proceedings of the sixth PHANToM Users Group Workshop, Aspen, CO, USA (2001).
- [2] Anderson T., Brown N.: "The ActivePolygon Polygonal Algoritm for Haptic Force Generation".
- [3] Barbagli Federico, Prattichizzo Domenico, Salisbury Kenneth: "A Multirate Approach to Haptic Interaction with Deformable Objects Single and Multipoint Contacts", The International Journal of Robotics Research, Vol. 24, No. 9, 703-715 (2005)
- [4] Conti F., Barbagli F., Morris D., Sewell C.: "CHAI: An Open-Source Library for the Rapid Development of Haptic Scenes", Demo paper presented at IEEE World Haptics, Pisa, Italy, March 2005.
- [5] Hayward V., Astly O.R., Cruz-Hernandez M., Grant D., Robles-De-La-Torre G.: "Haptic interfaces and devices", Sensor Review, 24(1):16-29, Feb 2004.
- [6] Ho C.H., Basdogan C., Srinivasan M. A.: "Efficient point-based rendering techniques for haptic display of virtual objects", Presence, 8(5), October 1999, 477-491.
- [7] Kirkpatrick, A.E., Douglas, S.A.: "Application-based evaluation of haptic interfaces.", Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Orlando, FL, USA (2002) 32-39
- [8] Massie Thomas H., Salisbury J. K.: "The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects", Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, IL, Nov. 1994.
- [9] Melder N., Harwin W. S.: "Extending the Friction Cone Algorithm for Arbitrary Polygon Based Haptic Objects", Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS '04. Proceedings. 12th International Symposium on 27-28 March 2004, page 234- 241.

- [10] Morgenbesser H. B., Srinivasan M. A.: "Force shading for haptic shape perception", Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division 58, 1996, 407-412.
- [11] Morris D., Tan H., Barbagli F, Chang T, Salisbury K.: "Haptic Feedback Enhances Force Skill Learning", Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems WHC '07, pages 21-26, 2007.
- [12] Oakley I., McGee Marilyn R., Brewster S., Gray P.: "Putting the feel in 'Look And Feel'", ACM CHI 2000 (The Hague, NL), ACM Press Addison-Wesley, pp 415-422.
- [13] Otaduy M. A., Lin M.C.: "A perceptually-inspired force model for haptic texture rendering", in Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization, 2004, Los Angeles, USA, 123126
- [14] Otaduy M. A., Lin M.C.: "Sensation preserving simplification for haptic rendering", in ACM Transactions on Graphics (TOG), 22(3), July 2003, 543553
- [15] Rahman T., Sample W., Jayakumar S., King M.M., Wee Y.J., Seliktar R., Alexander M., Scavina M., Clark A.: "Passive exoskeletons for assisting limb movement.", Journal of Rehabilitation Research & Development, Volume 43, Number 5, pages 583-590, Aug/Sept 2006.
- [16] Raymaekers C., Coninx K.: "SOFA: Software for Observing Force-feedback Algorithms", EuroHaptics 2006
- [17] Raymaekers, C., De Boeck, J., Coninx, K.: "An empirical approach for the evaluation of haptic algorithms.", Accepted for First Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WorldHaptics 2005), Pisa, IT (2005)
- [18] Ruffaldi E., Morris D., Edmunds T. Barbagli F. Pai D. K.: "Standardized Evaluation of Haptic Rendering Systems", Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'06), Volume 00, page 33, 2006.
- [19] Ruspini D. C., Kolarov K., Khatib O. : "The Haptic Display of Complex Graphical Environments", Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 1997.
- [20] Salcudean S. E., Vlaar T. D.: "On the Emulation of Stuff Walls and Statuc Friction with a Magnetically Levitated Input/Output Device", ASME DSC, 55(1), 1994, 303-309.
- [21] Salisbury K., Conti F., Barbagli F. : "Haptic Rendering: Introductory Concepts", IEEE Computer Graphics and Applications (March/April 2004), 2432.
- [22] <http://www.sensable.com/phantom-premium-1-0.htm>

- [23] Srinivasan Mandayam A. : "What is haptics?"
- [24] Sutcliffe, A., Gault, B.: "Heuristic evaluation of virtual reality applications.", *Interacting with Computers* 16 (2004) 631-849
- [25] Vanacken L.: "Haptic Cloth Rendering", thesis voor het behalen van graad van licentiaat in de informatica 2004-2005.
- [26] Zilles C. B., Salisbury J. K.: "A Constraint-based God-object Method For Haptic Display", *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems-Volume 3 - Volume 3* Page: 3146, Year 1995.

Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen, de gevraagde informatie in te vullen (en de overeenkomst te ondertekenen en af te geven).

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Evaluation of haptic algorithms

Richting: **Master in de informatica**

Jaar: **2007**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Ik ga akkoord,

Geert Bleyen

Datum: **28.08.2007**