ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

კომპიუტერულ მეცნიერებათა დეპარტამენტი

ირაკლი ქოიავა

განათების გავრცელების სიმულაცია რეალისტური გამოსახულების მისაღებად

ნაშრომი შესრულებულია კომპიუტერულ მეცნიერებათა მაგისტრის

აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

ხელმძღვანელი: სრული პროფესორი ალექსანდრე გამყრელიძე

თბილისი 2014

ანოტაცია

დღეს უკვე აღარავის უკვირს ფილმებში ის დაუჯერებელი კადრები და ეფექტები, რისი ნახვაც 20 წლის წინ გააოგნებდა მაყურებელს. ფილმების დიდ ნაწილში, კომპიუტერული დამუშავების სტადიაზე, გამოსახულების ნაწილობრივი ან/და სრული ჩანაცვლება ხდება. ჩანაცვლებული გამოსახულება კომპიუტერულად მუშავდება მაღალი სიზუსტის გამოთვლითი მეთოდებით და ერგება არსებულ კადრს ისე, რომ ეს პროცესი მაყურებლისთვის შეუმჩნეველი რჩება. არსებული ან/და ვირტუალური გარემოს გამოსახულების კომპიუტერული შექმნის და დამუშავების პროცესი თავის მხრივ საკმაოდ რთული და კომპლექსური ამოცანების გადაჭრას გულისხმობს.

კინოინდუსტრია ერთ-ერთი ყველაზე ძვირადღირებული ინდუსტრიაა მსოფლიოში. თანამედროვე ფილმების ბიუჯეტი ასეულ მილიონებსაც კი აღწევს, რაც განპირობებულია ძვირადღირებული ტექნოლოგიებით, მაღალკვალიფიციური და მაღალანაზღაურებადი კადრებით და ფილმზე მუშაობის პროცესის სირთულით. როგორც ვთქვით ამ პროცესში კომპიუტერულ გრაფიკას დიდი როლი უკავია. მეორე, არანაკლებ დიდი, ძვირადღირებული და შესაბამისად მარკეტინგულად საინტერესო და მიმზიდველი ინდუსტრია გახლავთ კომპიუტერული ვიდეოთამაშები. ეს ინდუსტრია პირველად პერსონალური კომპიუტერების გამოჩენის დროს გამოჩნდა და მისი განვითარების პარალელურად ვითარდებოდა. კომპიუტერული ვიდეოთამაშები დღეს კინოინდუსტრიაზე არანაკლებ შემოსავლიანია. მაგალითად: პოპულარული ვიდეოთამაშის Grand Theft Auto(შემოკლებით GTA)-ს ბოლო ვერსიის გაყიდვებმა, გამოშვების დღიდან 24 საათში, 800 მილიონ ამერიკულ დოლარს მიაღწია. კინოინდუსტრიისგან განსხვავებით, კომპიუტერულ ვიდეო თამაშები მთლიანად კომპიუტერულ გრაფიკაზეა დაფუძნებული. ეს ყველაფერი იმას ნიშნავს, რომ ამ ორ, უზარმაზარ ინდუსტრიაზე კომპიუტერულ გრაფიკას ძალიან დიდი გავლენა აქვს. ამ ყველაფრის გათვალისწინებით, ეს ინდუსტრია მარკეტინგულად ძალიან მიმზიდველია, რაც თემის აქტუალობას კიდევ ერთხელ უსვამს ხაზს.

მოცემულ ნაშრომში განხილულია ვირტუალური გარემოს გამოსახულების მიღების საშუალებები კომპიუტერის მეშვეობით, განათების ფიზიკური გავრცელების სიმულაციის გზით. ეს პროცესი გამოირჩევა თავისი კომპლექსურობით, რადგან

მოითხოვს ცოდნას სხვადასხვა მიმართულებით: ფიზიკა, გამოთვლითი სტატისტიკა, წრფივი ალგებრა, გამოთვლითი გეომეტრია და, რა თქმა უნდა, ვიწრო მიმართულებები კომპიუტერული მეცნიერებიდან.

Summary

Nowadays nobody is surprised to see such unbelievable and exciting effects in films which could astonish spectators 20 years ago. In the majority of films during the computer processing happens the partial or complete replacement of the image. Replaced image is processed by computer with high precision computational methods and fits on existing image such that this process is not observing for spectators. Making and processing existing or virtual environment by computer by the way is a hard work and includes solving the complex problems.

Film industry is one of the most expensive industry in the world. Budget of modern films rich hundreds of million dollars. This is because of expensive technologies, highly trained specialists and highly payed staff and complexity of working on films. As we mentioned in this process computer graphics has a huge role.

Second, no less expensive and correspondingly marketingly interesting and attractive industry is computer video games. This industry first appeared when first personal computers came out and developed with them in parallel. Computer games is not less profitable then film industry. For example, popular video game Grand Theft Auto's (GTA) sales in first 24 hours reached 800 million American dollars. Difference between film industry and computer games is that computer games are completely based on computer graphics. This means that computer graphics has a huge influence on this industries. According to this computer graphics industry is marketingly attractive thus once again underlines the actuality of this theme.

In this work discussion is about getting image of virtual environment using physical simulation of light transport. This process is distinguished from its complexity because it requests knowledge in different directions: physics, computational statistics, linear algebra, computational geometry and of course narrow directions of computer science.

სარჩევი

შესავალი

ბაზრის მოთხოვნა კომპიუტერულ გრაფიკაზე

რეალისტურ კომპიუტერულ გრაფიკაზე მოთხოვნის ძირითადი ნაწილი მოდის კინო და სარეკლამო ინდუსტრიიდან. კინოინდუსტრიაში გამოსახულების ხარისხს ბევრად უფრო მეტი ყურადღება ექცევა ვიდრე რეკლამაში, თუმცა ხშირად გვხვდება არანაკლები ხარისხით შესრულებული სარეკლამო რგოლებიც. დღევანდელ ვიდეო რგოლებში კომპიუტერული გრაფიკა გამოიყენება რამოდენიმე მიზნით: როდესაც სცენას რეალური ანალოგი არ გააჩნია, როდესაც რეალური ანალოგის შექმნა დიდ ტექნიკურ ან/და მატერიალურ სირთულეებთანაა დაკავშირებული, როდესაც კომპიუტერული მოდელირება შედეგს უფრო მალე ვღებულობთ...

გასულ საუკუნეში , როდესაც კომპიუტერული მოდელირება და გრაფიკა ჯერ კიდევ ფეხს იდგამდა და მისი გამოყენება კინოში არ ხდებოდა, ფილმების გადაღება დიდ სირთულეებთან იყო დაკავშირებული. მასიური სცენები რეალურად იდგმებოდა დიდი დეკორაციებით და გადაღებაში დიდი რაოდენობით ხალხი მონაწილეობდა, რაც გადაღების პროცესს ურთულესს ხდიდა. მაგალითად 1959 წელს გადაღებულ, თერთმეტი ოსკარის მფლობელ ფილმ "Ben-Hur"-ს 5 წლიანი კვლევის შემდგომ, წლების მანძილზე იღებდნენ და ჯამში 15,175,000 $ დაჯდა, რაც იმ დროისათვის წარმოუდგენლად დიდი ფული იყო. დღეს ამ პროცესში არსებულ ძირითად სირთულეებს კომპიუტერული მოდელირებითა და ვიზუალიზაციით აგვარებენ, რაც პროცესს კოლოსალურად ამარტივებს.

კიდე უფრო მეტი მოთხოვნა მოდის თამაშების ინდუსტრიიდან. თამაშებში რეალისტურ კომპიუტერულ გრაფიკას ძალიან დიდი ყურადღება ექცევა, თუმცა არსებული ტექნოლოგიები არსებულ გამომთვლელ მოწყობილობებზე არ გვაძლევს საშუალებას, რეალურ დროში ხარვეზებისგან თავისუფალი, ფიზიკურად სწორი, სუპერრეალისტური გამოსახულება მივაწოდოთ მომხმარებელს. დღევანდელ კომპიუტერულ თამაშებში არსებული წამყვანი ვიზუალიზატორები არის ჰიბრიდული ტიპის, ისინი იყენებენ როგორც რასტერიზაციას, ასევე სხივების მიდევნებას. სხივების

მიდევნების მეთოდს არ ახლავს თან ის ხარვეზები, რომელიც რასტერიზაციის მეთოდს, თუმცა მისი გამოყენება ძალიან შეზღუდული დოზით ხდება მასთან დაკავშირებული სხვადასხვა პრობლემის გამო. ამის მიუხედავად ბოლო წლებში უკვე დაიწყო აქტიური კვლევა ამ მიმართულებით, რომ ნელ-ნელა მოხდეს არსებული ვიზუალიზაციის ძრავების ჩანაცვლება სხივების მიდევნებაზე სრულად დაფუძნებული ფიზიკურად სწორი, რეალისტური ვიზუალიზატორებით. კვლევები ამ მიმართულებით ერთ-ერთმა პირველმა დაიწყო ჯაკო ბიკერმა(Ray Tracing In Real-Time Games. September 2012), ამ კვლევების პროცესში მან შექმნა ვიზუალიზაციის ძრავი Brigade, რომელიც ახდენდა გამოსახულების გამოთვლას სხივების მიდევნების მეთოდით. Brigade გამოყენებული იქნა თამაშებში "Reflect"და "It's About Time" სტუდენტების მიერ. დღეს Brigade კომპანია OTOY-ს საკუთრებაშია, რომელიც პარალელურად აწარმოებს ვიზუალიზაციის ძრავს octane. Brigade-ს განვითარება აქტიურად მიმდინარეობს. Octane ორიენტირებულია ოფლაინ ვიზუალიზაციაზე, მისგან განსხვავებით Brigade არქიტექტურულად მორგებულია თამაშის მოთხოვნებს და გამოირჩევა მაღალი სისწრაფით.

დასმული ამოცანის ჩამოყალიბება და ანალიზი

ჩვენი ამოცანაა, შევქმნათ ვიზუალიზატორი, რომელიც შეძლებს 3 განზომილებიანი ფიგურების ფიზიკურად სწორ ვიზუალიზაციას განათების გავრცელების სიმულაციის საფუძველზე. ამ ნაშრომის ფარგლებში განვიხილავთ მეთოდებს, რომელთა საშუალებითაც ვიზუალიზაციის პროცესში გავითვალისწინებთ განათების სხივის ძირითად ქცევას და თვისებებს.

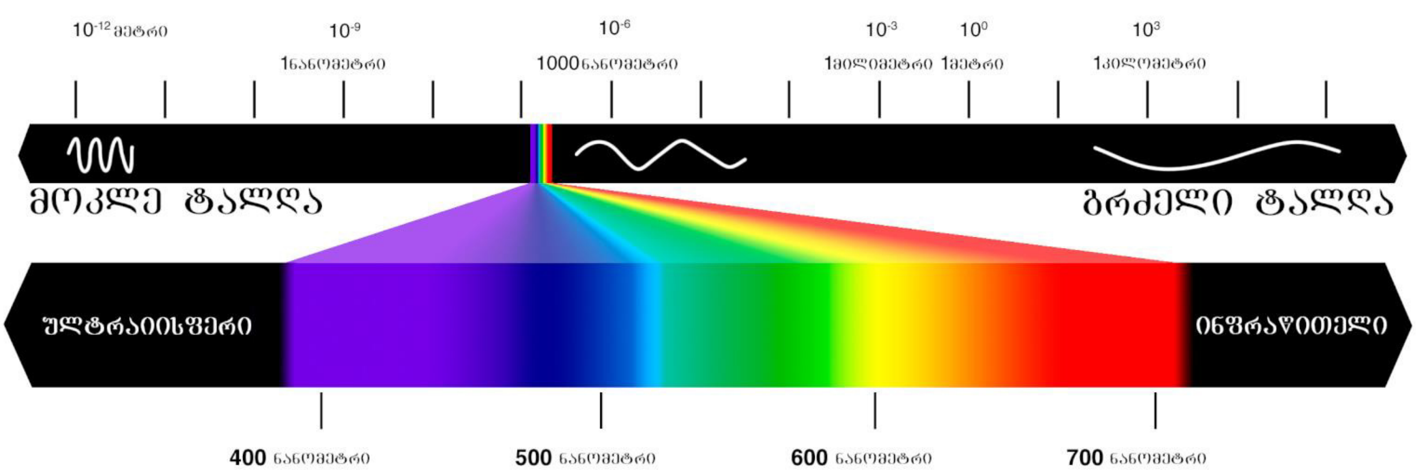
ამოცანის გადაჭრის სხვადასხვა გზები და ძირითადი სირთულეები

ამ ნაშრომის ძირითადი ნაწილი დაეთმობა გზების მიდევნების მეთოდს, მის ანალიზს, სირთულეებს. გზების მიდევნების მეთოდის რამოდენიმე მოდიფიცირებული ვარიანტი არსებობს, რომელსაც თავისი დადებითი და უარყოფითი მხარეები აქვს, რასაც დეტალურად განვიხილავთ და შევადარებთ ალტერნატიულ მეთოდებს.

სინათლის სხივის ფიზიკური ქცევა და თვისებები

სინათლის ხილული სპექტრი

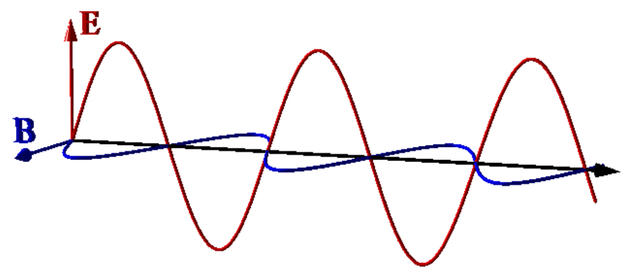
სინათლე წარმოადგენს ელექტრომაგნიტურ ტალღას, რომელსაც, როგორც ყველა ელექტრომაგნიტურ ტალღას, რამოდენიმე მნიშვნელოვანი მახასიათებელი აქვს, მათ შორის ერთ-ერთი არის ტალღის სიგრძე, რომელიც განსაზღვრავს სხივის სპექტრულ ფერს. ელექტრომაგნიტური ტალღები ბუნებაში და თანამედროვე სამყაროში მრავლად გვხვდება. სხვადასხვა ტალთის სიგრძის (სიხშირის) ტალღებს იყენებენ როგორც საყოფაცხოვრებო (რადიო, მობილური ტელეფონი) დანიშნულების, ასევე სამედიცინო (რენდგენის სხივები) დასამხედრო (რადარები) მოწყობილობებში. ადამიანის თვალისთვის ხილული სინათლის ელექტრომაგნიტური ტალღების სიგრძე იწყება დაახლოებით 400 ნანომეტრიდან და მთავრდება 700 ნანომეტრზე. ამ დიაპაზონს ქვემოთ ექცევა ულტრაიისფერი ტალღები და დიაპაზონს ზემოთ - ინფრაწითელი, რომელსაც ადამიანის თვალი ვერ აღიქვამს (იხილეთ ქვემოთ მოცემული სურათი).



სინათლის თეთრი სხივი შედგება სხვადასხვა სიხშირის ტალღების ერთობლიობისგან. კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელი არის ამპლიტუდა,

რაც განაპირობებს სინათლის ინტენსივობას. ეს ორი მახასიათებელი - ფერი და ინტენსივობა - ჩვენი თვალისთვის ყველაზე მეტად შესამჩნევია, თუმცა არსებობს მახასიათებლები, რომელთა გავლენასაც არც თუ ისე ხშირად, მაგრამ მაინც ვამჩნევთ.

ელექტრომაგნიტური ტალღა არის ელექტრული და მაგნიტური ტალღების ერთობლიობა, რომელთაც აქვთ ტოლი ტალღის სიგრძე და ირხევიან სხვადასხვა სიბრტყეში (იხილეთ სურათი).



ადამიანის თვალი პოლარიზებულ და არაპოლარიზებულ სხივებს ერთნაირად აღიქვამს.

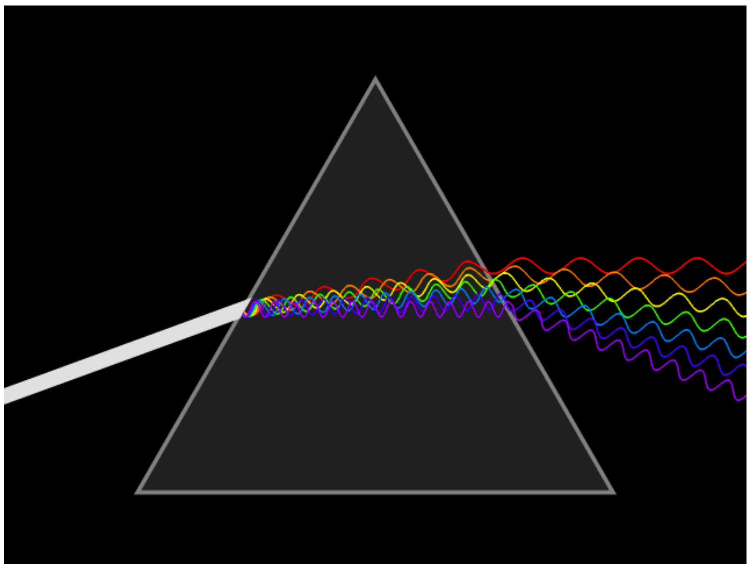
სხივის თვისებები

სინათლის თეთრი სხივი შედგება სხვადასხვა სიხშირის ტალღების ერთობლიობისგან. სინათლის ელექტრული და მაგნიტური ტალღები შეიძლება ირხეოდნენ ერთ სიბრტყეში. სინათლის ასეთ სხივს ქვია წრფივად პოლარიზებული. სინათლის სხივი შეიძლება არ იყოს პოლარიზებული და შეიძინოს ეს თვისება. მაგალითად, სხივი ზედაპირზე არეკვლისას არეკვლის სიბრტყეში პოლარიზდება ღაღაც დონეზე. ასევე არსებობს სხვადასხვა ტიპის პოლარიზატორები, რომელში გავლის დროსაც ხდება არაპოლარიზებული სხივის პოლარიზება.

როდესაც სხივი გადადის ერთი ოპტიკური სიმკვრივის მქონე გარემოდან მეორეში, ის გადატყდება. სინათლის სხივის გადატეხვა ნიშნავს მისი ელექტრომაგნიტური ტალღის მიმართულების ცვლილებას. როგორც ცნობილია, დაგატეხვის კუთხე

დამოკიდებულია როგორც ოპტიკურ სიმკვრივეებზე, ასევე ტალღის სიგრძეზე (სპექტრულ ფერზე). მოკლე ტალღის სიგრძის მქონე სხივები უფრო მეტად გადატყდება, ხოლო გრძელი ტალღის სიგრძის მქონე - უფრო ნაკლებად. მაგალითად, ვაკუუმიდან ალმასში გადასხვლისას სხივი უფრო მეტად გადატყდება, ვიდრე ვაკუუმიდან შუშაში.

როგორც ზემოთ ვთქვით, თეთრი სხივი შედგება სხვადასხვა სიხშირის ტალღებისგან. როდესაც თეთრი სხივი გადადის ერთი ოპტიკური სიმკვრივის გარემოდან მეორეში, მისი სხვადასხვა სიგრძის მქონე ტალღები გადატყდებიან სხვადასხვა კუთხით (იხილეთ ქვედა სურათი). ამ პროცესს **სხივის სპექტრული დაშლა** ეწოდება. სხივის ეს თვისება არის ხშირად თვალში საცემი.



1 სურათზე ნაჩვენებია პრიზმაში გამავალი თეთრი სხივის სპექტრულად დაშლის პროცესი

მოდელირება

გარემოს კომპიუტერული მოდელი

შემავალ მონაცემს ვიზუალიზაციის ძრავისათვის წარმოადგენს გარემოს კომპიუტერული მოდელი, რომელიც რამოდენიმე ნაწილისგან შედგება:

1. სცენაში არსებული ობიექტები - ობიექტები მოიცემა ზედაპირების სახით. ზედაპირი განსაზღვრავს გეომეტრიულ ფორმას და, შესაბამისად, ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი მონაცემია. (ამ ნაშრომის ფარგლებში განვიხილავთ მხოლოდ ზედაპირების ვიზუალიზაციას და არა სივრცული ობიექტებისას)
2. ობიექტების ზედაპირის მატერიალები - მატერიალი განსაზღვრავს ზედაპირის ტიპს, რომელიც შემდგომში განაპირობებს სინათლის სხივის ქცევას ზედაპირზე.
3. განათება - განათებას შემოაქვს სცენაში სინათლე, ასე რომ, მის გარეშე ჩვენ სცენაში იქნებოდა სიბნელე და გამოსახულებაც გამოვიდოდა შავი. განათების ტიპები შემდგომ თავებში დეტალურად იქნება განხილული.
4. სენსორი - გამოსხულების აღმქმელი სენსორი (თვალი, კამერა) ხასიათდება სპეციფიური მახასიათებლით, რაც სხვადასხვა სახით მოქმედებს საბოლოო გამოსახულებაზე.

ზედაპირები

ზოგადი აღწერა

ზედაპირების ვიზუალიზაციისათვის აუცილებელია მათი რაიმე ფორმით აღწერა და ვიზუალიზატორისთვის მიწოდება. ზედაპირების აღწერის რამოდენიმე მეთოდი არსებობს. მაგალითად, თუ ჩვენ სფეროს აღვწერთ მისი ცენტრის კოორდინატით და რადიუსით, ეს მის ზედაპირს ცალსახად განსაზღვრავს. ასეთი აღწერა სრულად იძლევა

ინფორმაციას ზედაპირის შესახებ და არ გააჩნია ზედაპირის აღწერის ხარისხის მახასიათებელი, თუ, რა თქმა უნდა, პოზიცია და რადიუსიც ხარისხის დაუკარგავად მოიცემა. მეორე მეთოდი არის ზედაპირის სამკუთხედებად აღწერის მეთოდი. ამ მეთოდით ნებისმიერი ზედაპირი მოიცემა წერტილებით და მათი შეერთებით მიღებული სამკუთხედებით. ამ ფორმით მოცემულ ზედაპირებს უწოდებენ მეშს (mesh ქართულად ბადეს ნიშნავს). შემდგომში ჩვენ მას ამ ტერმინით მოვიხსენიებთ.

ანალიტიკური ზედაპირები

ანალიტიკური ზადაპირები, როგორც წესი, მოიცემა ფორმულის სახით, რომლის საშუალებითაც ჩვენ ვახდენთ ასახვას სხივების მიდევნების მეთოდში. ვიზუალიზაციისთვის საკმარისია თანაკვეთების დათვლის საშუალება.

დისკრეტული ზედაპირები

ზედაპირების დისკრეტული სახით წარმოსადგენად ვიყენებთ სამკუთხედების ბადეს (Triangle Mesh), ნაშრომის მიმდინარეობის პროცესში მას მოვიხსენიებთ სამკუთხა მეშის სახელით. სამკუთხა მეში შედგება წვეროებისაგან და მათი შეერთებით მიღებული სამკუთხედებისგან(წახნაგებისგან).

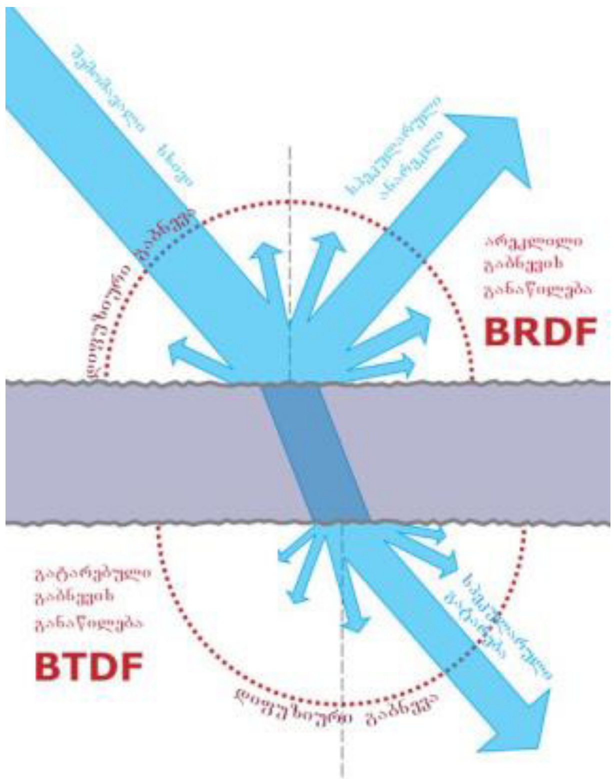
მატერიალები

ზოგადი აღწერა

სხივის ქცევას ობიექტის ზედაპირზე განსაზღვრავს ზედაპირის მატერიალი, მაგალითად სარკისებური ზედაპირზე დაცემული სხივები იმავე კუთხით აირეკლებიან სიმეტრიულად ნორმალის მიმართ, რაც ზედაპირზე მკაფიო არეკლილ გამოსახულებას იწვევს. დიფუზიური ზედაპირი დაცემულ სხივებს ფართოდ შლის, ამიტომ ზედაპირზე არეკლილი გამოსახულება არ იკითხება. ზედაპირის მატერიალი არის საკვანძო ნაწილი ვიზუალიზატორის, რომელიც განსაზღვრავს ზადაპირის სახეს.

გაბნევის ორმხრივი განაწილების ფუქნცია

გაბნევის ორმხრივი განაწილების ფუნქცია (BSDF) ასახავს მანათობელი სხივის ქმედებას ზედაპირზე დაცემისას.



2სურათზე ნაჩვენებია განათების სხივის გაბნევის მოდელი. სურათის ორიგინალი აღებულია ვიკიპედიიდან

თავისმხრივ სხივის ზედაპირზე გაბნევის შემთხვევას ყოფენ ორ დამოუკიდებელ ნაწილად:

1. **არეკვლის ორმხრივი განაწილების ფუნქცია (BRDF**) -აღწერს მხოლოდ ზედაპირიდან არეკლილი განათების სხივების განაწილებას.
2. **გატარების ორმხრივი განაწილების ფუნქცია (BTDF)** -აღწერს ზედაპირის ქვეშ გატარებული განათების სხივების განაწილებას.

ხშირად ცალკე გამოყოფენ ხოლმე შემთხვევას, როდესაც დაცემული სხივი აღწევს ზედაპირის ქვეშ, გადაადგილდება სხვადასხვა მიმართულებით და შემდეგ ტოვებს

ზედაპირს ისევ დაცემის მხარეს. ეს არის BRDF-ზე ბევრად კომპლექსური შემთხვევა. ამ შემთხვევას აღწერენ ორმხრივი ზედაპირქვეშგაბნეული არეკვლის განაწილების ფუნქციით (**BSSRDF**). მაგალითად BSSRDF-ით კარგად ხასიათდება ადამიანის კანი, რომელიც რეალურ რენდერში ხშირად ერთ-ერთ წამყვან როლს იკავებს და მისი კორექტული რენდერი ძალიან მნიშვნელოვანია.

ანიზოტროპული მატერიალი

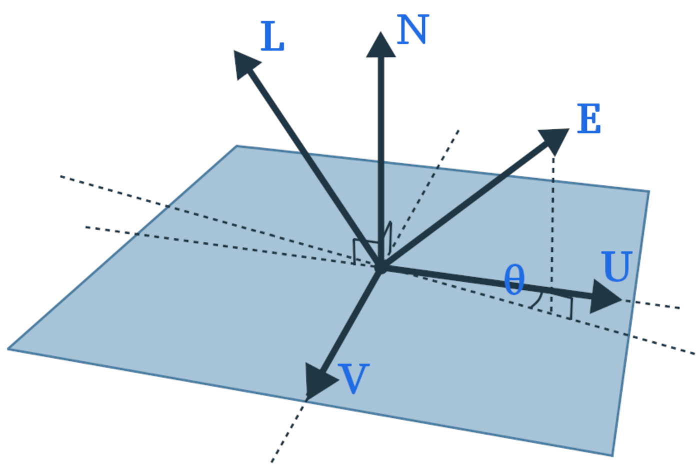


Figure 3ანიზოტროპულ brdf-ში მონაწილე კომპონენტები. U, V - პარამეტრიზაციის მიმართულებები, N - ზედაპირის ნორმალი, E - დამკვირვებლის მიმართულება. L - განათების მიმართულება.

როდესაც მიკროზედაპირი არაა ქაოსური ხასიათის და რაიმე კანონზომერებით არის მოწესრიგებული, ეს შეიძლება გახდეს ანიზოტროპული არეკვლის მიზეზი(იხილეთ ქვემოთ მოცემული სურათი). მაგალითად თუ ზედაპირს წარმოვიდგენთ, როგორც ჩამწკრივებულ მიკრო ცილინრებს, რომელთაც მეტნაკლებად მსგავსი მიმართულება აქვთ, ასეთ შემთხვევაში სინათლის სხივის არეკვლის მიმართულებების განაწილება(BSDF) დამოკიდებული იქნება იმაზეც, თუ რომელი მხრიდან ხდება მისი დაცემა. შესაბამისად ანიზოტროპული მატერიალის აღსაწერად აუცილებელია პარამეტრიზებული ზედაპირი(პარამეტრიზაციის მიმართულებები (U,V)), რათა მოხდეს დაცემის მიმართულების განსაზღვრა.

Figure 4ანიზოტროპული ზედაპირი

იზოტროპული მატერიალი

იზოტროპული ზედაპირი უფრო მარტივი შემთხვევაა. აქ მიკროზედაპირი ქაოსური ხასიათისაა და შესაბამისად BSDF არაა დამოკიდებული θ კუთხეზე. ამის გამო ხშირად იზოტროპული BSDF-ები სქემატურად ორ განზომილებაზე იხატება, რაც მათ აღქმას აადვილებს. იზოტროპული ზედაპირები ბუნებაში უფრო ხშირად გვხვდება.

ტექსტურა და ზედაპირის პარამეტრიზაცია

Figure 5სურათზე ნაჩვენებია სამკუთხა მეში დიფუზიური ტექსტურით(მარცხნივ) და მის გარეშე(მარჯვნივ)

იმისათვის, რომ ზედაპირის სხვადასხვა წერილი აღვწეროთ სხვადასხვა მახასიათებლით იყენებენ ტექსტურებს. ტექსტურა შეიძლება იყოს როგორც დისკრეტული(რასტრული), ასევე ვექტორული. დისკრეტული სახით მოცემული ტექსტურები უფრო ხშირად გამოიყენება. დისკრეტული მოიცემა მატრიცის სახით და ხშირ შემთხვევაში მათი შენახვა ფაილურ სისტემაში ხდება ციფრული სურათის სახით.

მარტივი მისახვედრია, რომ თუ გვსურს ზედაპირის ნებისმიერი წერტილი აღვწეროთ რაიმე მახასიათებლით(ფერი, სიგლუვის კოეფიციენტი,...) და ეს მონაცემები შევინახოთ მატრიცის სახით, აუცილებელია არსებობდეს რაიმე ასახვა, რომელიც ზედაპირის ნებისმიერ წერტილს შეუსაბამებს მატრიცის ელემენტს. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, მოცემული ტექსტურა უნდა გადავაკრათ გეომეტრიის ზედაპირს, ხშირად ამბობენ პირიქით, რომ ზედაპირი უნდა გავშალოთ სიბრტყეზე(unwrap). ამ პროცესს ეწოდება ზედაპირის პარამეტრიზაცია.

არ არის აუცილებელი, რომ ასახვა ზედაპირიდან ტექსტურაზე იყოს ბიექციური. ხშირ შემთხვევაში ზედაპირის გაშლა სიბრტყეზე ადვილად ვერ ხერხდება, რის გამოც ახდენენ მის დანაწევრებას და ისე დალაგებას სიბრტყეზე. ამ დროს ტექსტურა სრულად შეიძლება არ დაიკავოს ზედაპირმა და დაგვრჩეს ადგილები რომლელთაც ზედაპირზე შესატყვისი არ გააჩნიათ. პეზაპირის პარამეტრულ კოორდინატებს უმეტესად (u,v) წყვილით აღნიშნავენ.

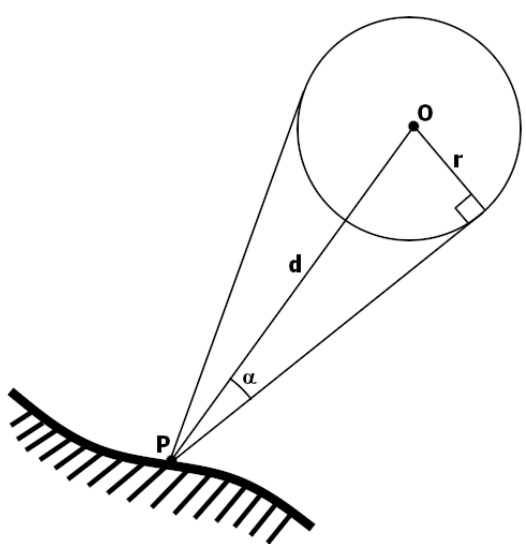
განათება

წერტილოვანი განათება

წერტილოვანი განათებები ბუნებაში არ გვხვდება, რადგან რეალურ ცხოვრებაში ნებისმიერ მანათობელ ზედაპირს გააჩნია ზედაპირის ფართობი. წერტილოვანი განათების შემოღება აუცილებელი გახდა მისი სიმარტივის გამო. ის ხასიათდება პოზიციით სივრცეში, განათების ფერით და ინტენსივობით. წერტილოვანი განათების შერჩევა სცენაში არსებული ზედაპირის წერილებისთვის განათების დასათვლელად მარტივი პროცესია, რადგან განათების მიმართულების დადგენა ადვილად ხდება. ამ ტიპის განათების დროს დაცემული ჩრდილებს მკვეთრი კიდეები აქვს(Hard Shadows).

სფერული დიფუზიური განათება

როგორც სახელწოდებიდან ჩანს, სფერული განათება წარმოადგენს მანათობელ სფეროს, რომლის ზედაპირიც დიფუზიურად ასხივებს სინათლეს. ზედაპირის წერტილებისთვის სფერული განათების წვლილის დათვლის პროცესი ტექნიკურად უფრო რთული და შრომატევადია, ვიდრე წერტილოვანის.



განვიხილოთ სფერული განათების შერჩევის პროცესი. სფერული განათების შერჩევისას არსებული შემთხვევები შეგვიძლია გავყოთ 2 ნაწილად: როდესაც წერტილი ექცევა სფეროს შიგნით და როდესაც არის გარეთ. პირველ შემთხვევაში ნებისმიერი შერჩეული ვექტორი აუცილებლად განათებისკენაა მიმართული, ასე რომ საკმარისია მოვახდინოთ მიმართულების შემთხვევითი, თანაბარი შერჩევა. ახლა განვიხილოთ შემთხვევა, როცა წერტილი განათების გარეთაა(იხილეთ ზემოთ მოცემული სურათი). სიმარტივისთვის შემთხვევა განვიხილოთ 2 განზომილებაში. ზედაპირის წერტილი რომლისთვისაც ვახდენთ მიმართულებების შერჩევას აღვნიშნოთ P-თი, სფეროს ცენტრი O-თი ხოლო რადიუსი r-ით. პირველ რიგში უნდა დავითვალოთ სფეროს ცენტრამდე მანძილი d=|O-P|. შემდეგ უნდა გამოვთვალოთ სფეროს მიერ P წერტილის მიმართ შედგენილი კუთხე. კონუსის წვეროსთან არსებული კუთხე რომელსაც კონუსის მსახველი ადგენს ღერძთან აღვნიშნოთ α-თი. ნახაზიდან კარგად ჩანს რომ $\sin\alpha = \frac{r}{d}; \alpha = \sin^{-1}\frac{r}{d}$. ახლა, როცა უკვე ვიცით განათებისკენ მიმართული, კონუსის წვეროსთან არსებული, α კუთხე შეგვიძლია მოვახდინოთ მიმართულებების შერჩევა კონუსში ლოკალურად. ეს ამოცანა განვიხილოთ ცალკე.

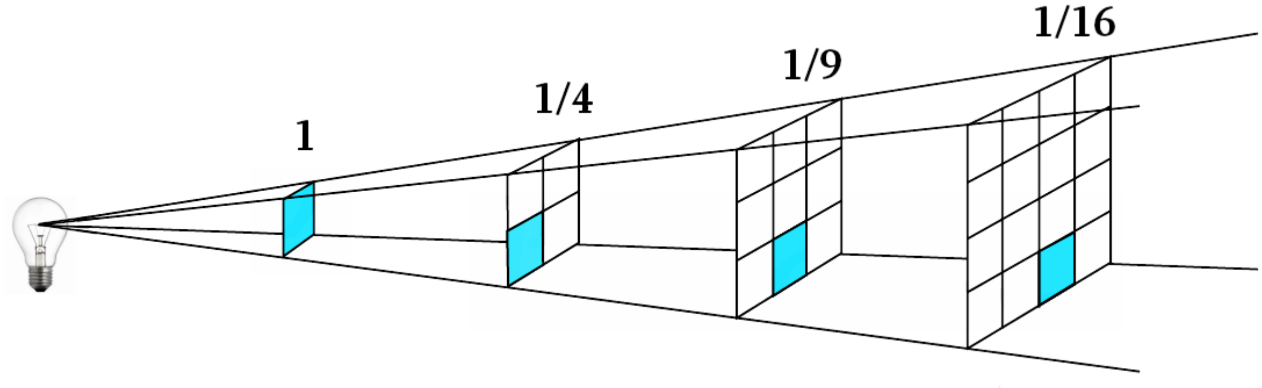
სასურველი გაშლილობის მქონე კონუსში მიმართულებების გენერირება ადვილად შეიძლება გაკეთდეს სფერული კოორდინათთა სისტემის დახმარებით, თუმცა აქ არ უნდა დაგვავიწყდეს ერთი მნიშვნელოვანი მომენტი. სფერული კოორდინათთა სისტემაში Φ და Θ-ს თანაბარი შერჩევის დროს პოლუსებთან უფრო მეტი სიმკვრივით ხდება შერჩევა ამიტომ ეს პრობლემა უნდა მოვაგვაროთ. ცხადია ამისთვის Θ-ს შერჩევა თანაბრად არ უნდა მოხდეს.

```
//ფუნქცია ახდენს ნორმალიზებუილი ვექტორების შერჩევას კუნუსის შეიგნით
Vector3 uniformRandomDirectionWithinCone( double cosMaxTheta, double r1, double r2 )
{
	Vector3 dir;
	const double Phi = TWO_PI*r1;

	dir.z = cosMaxTheta+(1.0-cosMaxTheta)*r2;
	double sinAlpha = sqrt(1.0-dir.z*dir.z);
	dir.x = cos(Phi)*sinAlpha;
	dir.y = sin(Phi)*sinAlpha;

	return dir;
}
```

ფუნქციას გადაეცემა კოსინუსი კუთხისა, რომელსაც კონუსის მსახველი ადგენს ღერძთან და 2 ნამდვილი რიცხვი თანაბარი განაწილებიდან(ეს რიცხვები შეიძლება იყოს როგორც ფსევდო, ასევე კვაზი შემთხვევითი რიცხვები). თუ r1 და r2 არაა თანაბარი განაწილების ელემენტები და გააჩნიათ კორელაცია, შერჩეული ვექტორებიც იქნებაინ კორელაციური. რესურსის მხრივ ფუნქცია იოლი ნამდვილად არაა, რადგან შეიცავს თითო სინუს/კოსინუსს და ფესვის ამოღებას.

გარემოს განათება

გარემოს განათება წარმოადგენს უსასრულოდ შორ განათებას, რომელიც გარშემო ევლის მთელ სცენას. გარემოს განათება ძალიან კარგი და მოსახერხებელი საშუალებაა სცენის რეალისტური განათებისათვის. ის ძალიან ადვილად მოიცემა პანორამული სტილის სურათით. იმის გამო, რომ განათება არის უსასრულოდ შორი, ის პოზიცია-ინვარიენტია, რაც დამატებით საშუალებებს გვაძლევს გამოთვლის პროცესში.



შებრუნებული კვადრატის წესი აღწერს განათების ინტენსივობის შესუსტების ფენომენს განათების წყაროსა და ობიექტს შორის მანძილის ზრდის დროს. ამ წესის თანახმად: განათების ინტენსივობა ერთეულოვან ფართობზე არის განათების წყარომდე მანძილის კვადრატის შებრუნებულის პროპორციული.

მაგალითად გვაქვს P ინტენსიობის მქონე რაიმე წერტილოვანი განათება. თუ ამ განათებას მოვათავსებთ სფეროს ცენტრში, მაშინ შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ამ განათების სრული ინტენსიობა(P) ნაწილდება სფეროს ზედაპირზე, რომლის ფართობიც არის $4\pi r^2$ შესაბამისად სფეროს ზედაპირზე ერთეულოვან ფართობზე მოსული ინტენსიობა იქნება $\frac{P}{4\pi r^2}$. აქედან კარგად ჩანს, რომ ერთეულოვან ფართობზე მოსული ინტენსივობა არის r-ის(მანძილის) კვადრატის შებრუნებულის პროპორციული. თუ განათებამდე მანძილს გავზრდით 2-ჯერ ინტენსიოვობა შემცირდება 4-ჯერ, თუ გავზრდით 3-ჯერ ინტენსივობა შემცირდება 9-ჯერ და ა.შ.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ განათების წყაროდან ზედაპირამდე მიმავალ გზაზე განათების ინტენსივობა(ენერგია) არ იკარგება.

ვიზუალიზაციის მეთოდები

ამ ნაშრომის მთავარი თემა არის გამოსახულების მიღება ფიზიკური პროცესის სიმულაციის გზით. ამ პროცესის აღსაწერად გამოიყენება სხვადასხვა მათემატიკური, სტატისტიკური მოდელები და შემფასებლები. შემდეგ ქვეთავში არის მოცემული ის მინიმალური ნაწილი ალათობის თეორიიდან, რომელსაც აქტიურად ვიყენებთ და რომლის ცოდნაც აუცილებელია.

მცირედი ალბათობის თეორიიდან

კუმულაციური განაწილების ფუნქცია

კუმულაციური განაწილების ფუნქცია X ნამდვილი ცვალის შემთხვევითი სიდიდისა განიმარტება შემდეგნაირად:

$$F_x(x) = P(X \leq x),$$

ტოლობის მარჯვენა მხარე ასახავს ალბათობას იმისა, რომ X შემთხვევითი ცვლადი იღებს x-ზე ნაკლებ ან ტოლ მნიშვნელობას. შესაბამისად, ალბათობა იმისა, რომ X ნამდვილი ცვლადი ჩავარდება რაიმე (α,β] შუალედში იქნება

$$P(\alpha < X \leq \beta) = F_x(\beta) - F_x(\alpha).$$

მას ასევე მოიხსენიებენ განაწილების ფუნქციის სახელით(ინგლისურად Cumulative Distribution Function). შემდგომში გამოვიყენებთ cdf აბრევიატურის სახით.

ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია

$$f_x(x) = \frac{d}{dx} F_x(x)$$

ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია(pdf) არწერს ალბათობას იმისა, რომ უწყვეტი შემთხვევითი სიდიდე ჩავარდება x-ის რაიმე უსასრულოდ მცირე მიდამოში(ხშირად ამბობენ, რომ იღებს რაიმე მნიშვნელობას). ზემოთ მოცემული ფორმულა ჭეშმარიტია მაშინ თუ f_x არის უწყვეტი x წერტილში. შესაბამისად ალბათობა იმისა, რომ შემთხვევითი სიდიდე X ჩავარდება რაიმე (α,β] ინტერვალში მოიცემა ამ ინტერვალზე ფუნქციის ინტეგრალით, რაც გვიჩვენებს ალბათობის სიმკვრივის ფუნქციის საინტერესო დამოკიდებულებას კუმულაციური განაწილების ფუნქციასთან:

$$P(\alpha < X \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f_x(x)dx = F_x(\beta) - F_x(\alpha).$$

$$F_x(x) = \int_{-\propto}^{\propto} f_x(u)du$$

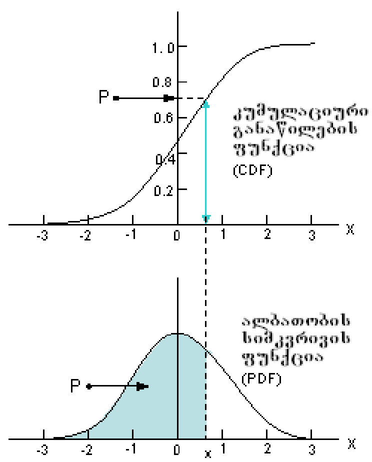


Figure 6სურათზე ნაჩვენებია ალბათობის სიმკვრივის ფუნქციის გრაფიკი(ქვედა) და მისი შესაბამისი კუმულაციური განაწილების ფუნქციის გრაფიკი(ზედა).

ვიზუალურად რომ წარმოვიდგინოთ, ეს არის შესაბამის ინტერვალში ფუნქციის წირსა და x ღერძს შორის მოქცეული ფიგურის ფართობი(იხილეთ პირველი სურათი). ფუნქციის ინტეგრალი მთელ ღერძზე არის 1-ის ტოლი. რადგან ფუნქცია ასახავს ალბათობას, შესაბამისად ის არის მთლიანად არაუარყოფითი.

ალბათობის სიმკვრივის ფუნქციას ასევე უწოდებენ განაწილების სიმკვრივეს ან/და სიმკვრივის ფუნქციას(ინგლისურად Probability Density Function). შემდგომში გამოვიყენებთ pdf აბრევიატურის სახით.

მათემატიკური მოლოდინი და დისპერსია

X შემთხვევითი სიდიდის მათემატიკური მოლოდინი განიმარტება შემდეგნაირად:

$$E(X) = \int_{-\propto}^{\propto} x\, f_x(x) dx$$

სადაც $f_x(x)$ არის x შემთხვევითი ცვლადის განაწილების სიმკვრივე. ხოლო დისპერსია არის

$$V(X) = E((X - E(X))^2)$$

დისპერსია გვაძლევს წარმოდგენას მონაცემების გადახრის შესახებ მისი ყველაზე მოსალოდნელი(E(X)) მნიშვნელობიდან. ასევე მნიშვნელოვანი საზომია სტანდარტული გადახრა(standard deviation), რომელიც მიიღება დისპერსიიდან კვადრატული ფესვის ამოღებით.

$$\sigma(X) = \sqrt{V(X)}$$

ხშირად გადანწილების სტანდარტული გადახრის მიახლოვება ხდება განაწილებაში შემთხვევითი შერჩევებით. ყველაზე ფართოდ გავრჩელებული საზომი არის სტანდარტული გადახრა, რომელიც მოიცემა შემდეგნაირად:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

სადაც x_i შერჩევის i-ური ელემენტი, ხოლო $\bar{x}$ არის შერჩევითი საშუალო მოცემულ განაწილებაში. მათემატიკური მოლოდინი და დისპერსია, ისევე როგორც სტანდარტული გადახრა შემთხვევითი სიდიდის განაწილების ერთერთი მნიშვნელოვანი საზომებია.

გადახრილი, ობიექტური და თანმიმდევრული შემფასებლები

სტატისტიკაში შემფასებელის გადახრა ეწოდება ამ შემფასებლის მათემატიკური მოლოდინსა და რეალურ მოლოდინს შორის სხვაობას. შესაბამისად *გადახრილი* შემფასებლები ეწოდებათ ისეთ შემფასებლებს, რომელთა მათემატიკური მოლოდინიც შეფასების დროს ცდება რეალურს, ხოლო *ობიექტური* შემფასებელი არის ისეთი შემფასებელი, რომლის მოლოდინიც ემთხვევა რეალურს. *თანმიმდევრულ* შემფასებელს გააჩნია გადახრა, თუმცა ეს გადახრა მცირდება რაც უფრო იზრდება შეფასებაში მონაწილე შერჩევების რაოდენობა.

სხივის გეომეტრიულ ობიექტებთან თანაკვეთის ამოცანა

ამაჩქარებელი სტრუქტურები

სხივის მიდევნების მეთოდებში სხივის გეომეტრიულ ობიექტებთან თანაკვეთის ამოცანას ერთ-ერთი წამყვანი ადგილი უკავია. მას ალგორითმის საერთო გამოთვლითი რესურსის საკმაოდ დიდი ნაწილი მიაქვს და მისი მუშაობის დროის ცვლილებაც მკვეთრად აისახება ვიზუალიზაციის საერთო დროზე. ამოცანა მდგომარეობს შემდეგში: ჩვენ გვაქვს სცენა, მასში არსებული დიდი რაოდენობის პრიმიტივებით და ყოველი მოცემული სხივისათვის უნდა გამოვთვალოთ ის პრიმიტივი, რომლსაც სხივი პირველი ხვდება (ამასთან ერთად უნდა მოხდეს თანაკვეთის მანძილის დადგენაც და შემდგომ, მის საფუძველზე, თანაკვეთის კოორდინატის გამოთვლა). თავად სცენის ერთ პრიმიტივთან თანაკვეთის ამოცანა სრულდება O(1) დროში, შესაბამისად თუ ჩვენ გადავარჩევთ ყველა პრიმიტივს და შევამოწმებთ თითოეულ მათგანს თანაკვეთაზე ეს მეთოდი იქნება O(n) სირთულის, სადაც n სცენაში არსებული პრიმიტივების რაოდენობაა. აქ უნდა აღინიშნოს, რომ O(n) სირთულეს ვიღებთ ცუდ და კარგ შემთხვევაშიც, რადგან ჩვენი ამოცანაა ვიპოვოთ არა რომელიმე, ნებისმიერი თანამკვეთი პრიმიტივი, არამედ ის, რომელსაც პირველი ჰქკეთს სხივი.

იმისთვის, რომ არ მოვახდინოთ თანაკვეთის შემოწმება ყველა პრიმიტივთან ჩვენ უნდა ავაგოთ ხე(ამაჩქარებელი მონაცემთა სტრუქტურა), რომელშიც ძებნას განვახორციელებთ O(logn) დროში.

შემომსაზღვრელი ფიგურები

იმისათვის, რომ სწრაფად მოხდეს იმ პრიმიტივების უკუგდება, რომელთაც სცდება ჩვენი სხივი, კარგი იქნება თუ, პრიმიტივთან თანაკვეთამდე თანაკვეთას შევამოწმებთ ჯერ სხვა ფიგურასთან, რომელიც სრულად მოიცავს პრიმიტივს სივრცეში და რომელთან თანაკვეთის შემოწმებაც უფრო მარტივი ოპერაციაა ვიდრე სასურველ პრიმიტივთან. თუ ამ შემომსაზღვრელ ფიგურასთან არ მოხდა სხივის თანაკვეთა, მაშინ არ მოხდება არც ფიგურის შიგნით მოქცეულ პრიმიტივთან, ამით თავიდან ავიცილებთ რთულ გამოთვლებს.

თუ შემომსაზღვრელი ფიგურა მჭიდროდ ეკვრის გეომეტრიას მას *მინიმალურს უწოდებენ*. შემომსაზღვრელი ფიგურა შესაძლოა არ იყოს მინიმალური, თუმცა ეს მის კორექტულობას არ არღვევს, რადგან მთავარი პირობა, რომ პრიმიტივი ფიგურის შიგნით სრულად უნდა ექცეოდეს არ ირღვევა, თუმცა როდესაც ფიგურა მინიმალური არ არის, სხივის თანაკვეთის შემოწმების დროს მოხვედრის ალბათობა იქრდება, რაც მის საბოლოოდ ეფექტურობას ამცირებს.

შემომსაზღვრელი სფერო

შემომსაზღვრელი ფიგურები, როგორც ზემოთ აღინიშნა, უნდა გამოირჩეოდნენ სიმარტივით, რათა მათთან სხივის თანაკვეთის დათვლა ხდებოდეს ძალიან სწრაფად. შემომსაზღვრელ ფიგურებად ხშირად იყენებენ სფეროებს. იმისთვის, რომ შევამოწმოთ ხვდება თუ არა სხივი სფეროს უნდა დავითვლოთ მანძილი სფეროს ცენტრიდან სხივამდე, თუ მანძილი სფეროს რადიუსზე დიდია მაშინ სცდება, წინააღმდეგ შემთხვევაში ხვდება. შემომსაზღვრელი სფეროები ხშირად გამოიყენება პრიმიტივების ერთმანეთთან თანაკვეთის ამოცანაში, თუმცა სხივების მიდევნების მეთოდებში მას ნაკლები გამოყენება აქვს.

ღერძებზე გასწორებული შემომსაზღვრელი ყუთი

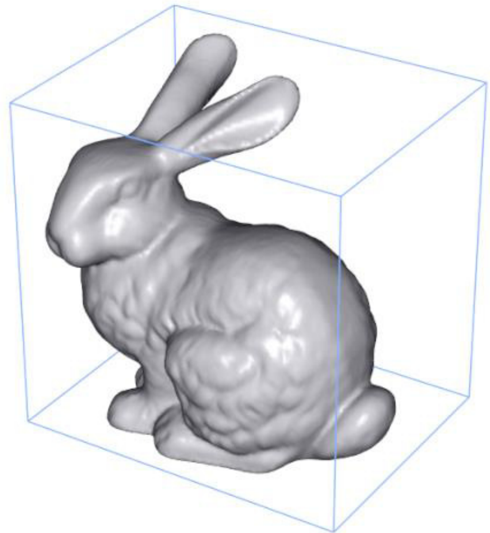


Figure 7სურათზე ნაჩვენებია სტენფორდის კურდღლის მოდელი და მისი შემომსაზღვრელი ყუთი

როგორც სახელწოდებიდან ჩანს, ღერძებზე გასწორებული შემომსაზღვრელი ყუთი არის პარალელეპიპედი, რომლის წახნაგებიც საკოორდინატო სიბრტყეების პარალელურია(იხილეთ სურათი). იმისათვის რომ სრულად აღვწეროთ ეს ფიგურა 3 განზომილებიან სივრცეში, საკმარისია მისი x,y,z კოორდინატის მინიმალური დამაქსიმალური მნიშვნელობები. შემომსაზღვრელი ყუთი არის ერთერთი ყველაზე ფართოდ გამონებადი შემომსაზღვრელი ფიგურა. არსებული ამაჩქარებელი სტრუქტურების უმრავლესობა სწორედ მას აყენებს კვანძების სივრცეში აღსაწერად.

ობიექტების დაყოფა და სივრცის დაყოფა

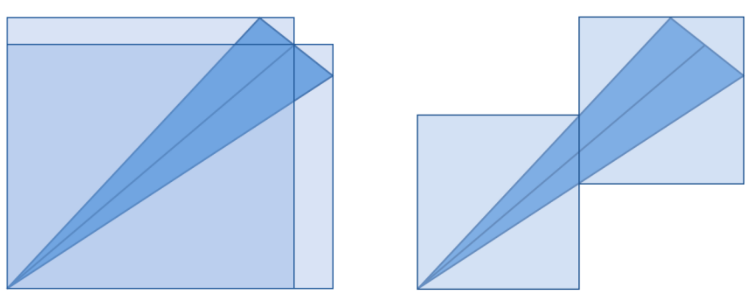


Figure 8სურათზე ნაჩვენებია შემთხვევა, როდესაც მოცემული 2 სამკუთხედის(პრიმიტივის) დაყოფა ხდება ობიექტებად(მარცხენა) და სივრცულად(მარჯვენა).

ამაჩქარებელი სტრუქტურის(ხის) აგების პროცესი გულისხმობს პრიმიტივების გადანაწილებას ხის შიდა და გარე კვანძებში, მთავარია შევიმუშავოთ გადანაწილების ისეთი მეთოდი რომელიც მოქვცემს უკეთეს შედეგს. განვიხილოთ ხის აგების ორი ტიპის მეთოდი:

1. სივრცული დაყოფა - სივრცული დაყოფის დროს შემოგვაქვს რაიმე სივრცული გამყოფი(მაგალითად სიბრტყე) და იმის მიხედვით, თუ გამყოფის რომელ მხარეს ექცევა პრიმიტივი, ვანაწილებთ შვილობილ კვანძებში. ასეთ შემთხვევაში ერთი პრიმიტივი შეიძლება რამოდენიმე კვანძში მოხვდეს. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ერთ პრიმიტივს შესაძლოა რამოდენიმე კვანძი უთითებდეს.
2. ობიექტების დაყოფა - ობიექტების დაყოფის დროს ხდება პრიმიტივების გადანაწილება შვილობილ კვანძებში ისე, რომ ყოველი პრიმიტივი ხვდება ერთ რომელიმე კვანძში, სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ: ნებისმიერ პრიმიტივს უთუთებს მხილოდ ერთი კვანძი.

ხეები, რომელთა აგებაც ხდება სივრცის დაყოფით, მოითხოვენ უფრო დიდ მეხსიერებას, რადგან სივრცული დაყოფის დროს ერთი პრიმიტივი რამოდენიმე კვანში შეიძლება ინახებოდეს. ასეთ შემთხვევაში თუ ჩვენ ხის სიღრმეს შევზღუდავთ რაიმე მნიშვნელობაზე, მის ფოთლებში აღმოჩნდებიან განსხვავებული რაოდენობის პრიმიტივები. მეხსიერების გამოყენების თვალსაზრისით ობიექტების დაყოფის მეთოდი უფრო მომგებიანია. ამ დროს ჩვენ წინასწარ შეგვიძლია ვთქვათ, თუ რამდენი კვანძი გვექნება ხეში და შესაბამისად რა მეხსიერება დაჭირდება ხეს. ობიექტებად დაყოფის მეთოდის მთავარ პრობლემას წარმოადგენს კვანძების გადაფარვები სივრცეში. მაგალითად, თუ ორი გეომეტრიული პრიმიტივი იმდენად ახლოსაა ერთმატეთთან, რომ მათი შემომსაზღვრელი ყუთების თანაკვეთა დიდია, ასეთი შემთხვევით მიღებული კვანძისთვის სხივის თანაკვეთის დათვლის პროცესში ხის ეფექტურობა მცირდება, რადგან რაც უფრო დიდია გადაფარვა კვანძებს შორის მით ნაკლების შანსი იმისა, რომ სხივი მხოლოდ ერთ მათგანს მოხვდება და მოვახდენთ თანაკვეთის ლოკალიზებას.

რვაობითი ხე

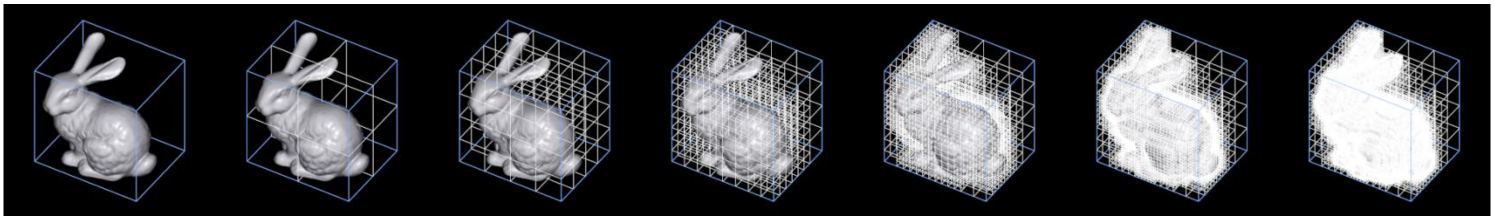


Figure 9სურათზე ნაჩვენებია სტენფორდის კურდღლის მოდელზე აგებული რვაობითი ხე სხვადასხვა სიღრმეზე

რვაობითი ხე არის ისეთი ხე, რომლის თითოეულ შიდა კვანძს ჰყავს მაქსიმუმ 8 შვილობილი კვანძი, რომლებიც მიიღება მშობელი კვანძის შესაბამისი შემომსაზღვრელი ყუთის, x, y და z ღერძების მიმართ, სივრცულად შუაზე გაყოფის შედეგად. რვაობითი ხის აგება შეგვიძლია რამოდენიმე გზით, ერთ-ერთი ასეთი გზა ხის აგებას ახდენს ზემოდან ქვემოთ, რაც იმას გულისხმობს, რომ პირველ ეტაპზე, როდესაც მოცემული გვაქვს პრიმიტივების სია, ვახდენთ შემომსაზღვრელი ყუთის დადგენას და ვქმნით ხის ძირს, რომელშიც ვათავსებთ ყველა პრიმიტივს. ამის შემდგომ შევდივართ კვანძში, ვქმნით მის შვილობილ 8 კვანძს, საკოორდინატო ღერძების მიმართ, სივრცულად, შუაზე გაყოფის გზით და პრიმიტივებს ვანაწილებთ შვილობილ კვანძებში. შემდგომ ისევ ჩავდივართ თითოეულ კვანძში და ამ პროცესს ვიმეორებთ რეკურსიულად, სანამ არ ავაგებთ სასურველ ხეს.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, პრიმიტივების შვილობილ კვანძებში გადანაწილების დროს ერთი პრიმიტივი შესაძლოა მოხვდეს რამოდენიმე შვილში ერთდროულად, ასევე შესაძლოა ზოგიერთ შვილში არცერთი პრიმიტივი არ მოხვდეს. ასეთ დროს ხის აგება ამ მიმართულებით აღარ გრძელდება.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ რვაობით ხეში შვილობილი კვანძების შესაბამისი შემომსაზღვრელი ყუთები არაა მინიმალური და შესაბამისად მასში არსებულ პრიმიტივებს მჭიდროდ არ ეკვრის, რაც მასზე სხივის მოხვედრის ალბათობას ზრდის. ეს საბოლოოდ დამატებით, ტყუილ(ტყუილი შემოწმებას ვეძახით ისეთ შემოწმებას, როდესაც სხივი ხვდება შემომსაზღვრელ ფიგურას, თუმცა სცდება პრიმიტივს) შემოწმებებს იწვევს, რაც ერთისმხრივ ავმირებს მის ეფექტურობას, თუმცა იმის გამო, რომ კვანძების მდებარეობა სივრცეში წინასწარ განსაზღვრულია მისი მეხსიერებაში შენახვა შემომსაზღვრელი ყუთების სახით არაა აუცილებელი. ამ ინფორმაციის აღდგენა მარტივად შეიძლება ძებნის პროცესში, როდესაც ჩავდივართ სიღრმეში, მშობელი კვანძიდან შვილობილი კვანძების მიმართულებით.

სწორედ სივრცულად დაყოფის გამო, რვაობითი ხე არის არაბალანსირებული, თუმცა შემდგომში ვნახავთ, რომ მისი ეს თვისება სულაც არ გულისხმობს იმას, რომ სხივის თანაკვეთის ძიების პროცესი რთულდება.

შემომომსაზღვრელი ყუთების იერარქია

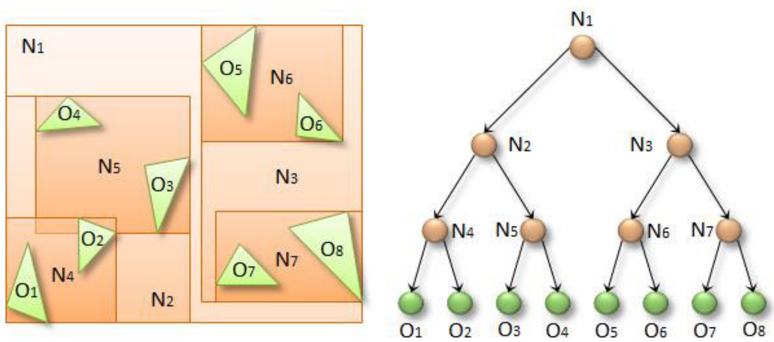


Figure 10მარცხენა მხარეს ნაჩვენებია პრიმიტივები(სამკუთხედები) და მასზე აგებული BVH ვიზუალურად, მარჯვენა მხარეს ნაჩვენებია იგივე BVHხის სახით

როგორც სახელწოდებიდან ჩანს, შემომსაზღვრელი ყუთების იერარქია წარმოადგენს ისეთ ხეს, რომელშიც შემომსაზღვრელი ყუთები არის ჩალაგებული იერარქიულად, ხოლო ფოთლებში მოთავსებულია ერთი ან რამდენიმე პრიმიტივი. შემოკლებით ხშირად BVH-ს უწოდებენ, რაც ინგლისური სახელწოდების აბრევიატურას წარმოადგენს, სიმარტივისათვიშ შემდგომში ამ სახელს გამოვიყენებთ. BVH-ის აგების პროცესში ხდება პრიმიტივების გადანაწილება ყუთებში, რის გამოც ერთი პრიმიტივი ერთ რომელიმე ყუთში ხვდება.

სანამ ხის აგებაზე გადავალთ, განვიხილოთ ერთი მნიშვნელოვანი საკითხი. ვთქვათ გვაქვს რაიმე ევრისტიკული ფუნქცია f(i,j), რომელიც კვანძების ნებისმიერი (i,j) წყვილისთვის, სადაც i≠j, ახდევს მათი დაჯგუფების ხარისხის შეფასებას. ასეთ შემთხვევაში ჩვენ შეგვიძლია განვიხილოთ დაჯგუფების სხვადასხვა ვარიანტი, მოვახდინოთ მათი ევრისტიკული შეფასება და ამოვირჩიოთ ევრისტიკულად ყველაზე მომგებიანი ვარიანტი(ის, რომელიც ყველაზე მაღალი ხარისხის ხეს მოქვცემს).

არსებობს მეთოდი, რომელიც ხეს აგებს ქვემოდან ზემოთ: ჯერ ქმნის ფოთლებს არსებული პრიმიტივებით, შემდეგ აჯგუფებს მათ და ქმნის მათ მშობელ შიდა კვანძებს, და ასე სანამ არ მიიღებს ხის ძირს. როგორც ზემოთ ვთქვით, იმისათვის რომ

მოვახდინოთ კვანძების დაჯგუფება, დაჯგუფების სხვადასხვა ვარიანტებიდან უნდა შევარჩიოთ ევრისტიკულად ყველაზე მომგებიანი. აგების ეს მეთოდი არის $O(n^3)$ სირთულის, სადაც n პრიმიტივების რაოდენობაა. კუბური სირთულიდან გამოყვანა შესაძლებელია თუ გამოვიყენებთ გროვებს, თუმცა მეთოდი მაინც იმდენად რთულია, რომ პრაქტიკაში მისი გამოყენება თითქმის არ ხდება მისი გამოთვლითი სირთულის გამო.

ახლა განვიხილოთ მეთოდები, რომლებიც ხეს აგებენ ზემოდან ქვემოთ: ჯერ აგებენ ხის ძირს, შემდეგ შვილობილ, შიდა კვანძებს და ჩადიან ფოთლებამდე. ხის აგების რამოდენიმე, ასეთი მეთოდი არსებობს, მოვიყვანოთ მაგალითი: საწყის ეტაპზე ყველა პრიმიტივი მოვათავსოთ ერთ ყუთში, შემდეგ განვსაზღვროთ ყუთის ყველაზე გრძელი მხარე და შესაბამისი ღერძის გასწვრივ დავალაგოთ პრიმიტივები მათი ცენტრის კოორდინატების მიხედვით. ამის შემდგომ დალაგებული პრიმიტივების პირველი ნახევარი მოვათავსოთ ერთ შვილობილ კვანძში, ხოლო მეორე ნახევარი მეორეში. ეს პროცესი გავიმეოროთ რეკურსიულად, სანამ ფოთლებში სასურველი რაოდენობის პრიმიტივები არ დაგვრჩება. ასეთი სახით აგებული ხე სრულად ბალანსირებულია, რადგან ყოველი კვანძისთვის შვილობილ კვანძებში პრიმიტივების რაოდენობის ნახევარ-ნახევარს ვათავსებთ, თუმცა თავად აგების პროცესი საკმაოდ რთულია, რადგან გვიწევს პრიმიტივების დალაგებები შუაზე გასაყოფად.

განვიხილოთ კიდევ ერთი მეთოდი: წინასგან განსხვავებით ეს მეთოდი თავიდან იცილებს პრიმიტივების დალაგებას. ამის მაგივრად მას შემოაქვს გამყოფი სიბრტყე(ყველაზე მარტივ შემხვევაში შეიძლება ავიღოთ ის სიბრტყე, რომელიც შუაზე ყოფს ყუთს მისი გრძელი გვერდის მიმართ) და ის პრიმიტივები, რომელთა ცენტრის კოორდინატებიც მოექცევიან გამყოფის ერთ მხარეს მოვათავსოთ ერთ შვილში, ხოლო დანარჩენები მეორეში. პრიმიტივის ცენტრის კოორდინატი სიბრტყის ან ერთ მხარეს ექცევა, ან მეორე, განსხვავებით თავად პრიმიტივისაგან, რომელიც შეიძლება თანაიკვეთოს კიდეც. ამ მეთოდით აგებული ხე გამოვა არაბალანსირებული, რადგან გამყოფის სხვადასხვა მხარეს სხვადასხვა რაოდენობის პრიმიტივები შეიძლება მოექცნენ. რაც შეეხება თავად აგების პროცესის სირთულეს წინა მეთოდთან შედარებით ბევრად სწრაფად ხდება, რადგან ყოველ კვანძში პრიმიტივებზე ერთი გარბენით ვახდენთ მათ გადასანაწილებლად შვილობილ კვანძებში.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, იმისათვი, რომ შევძლოთ ხის ხარისხის შეფასება გვჭირდება რაიმე შემფასებელი ფუნქცია, ეს ფუნქცია დაგვეხმარება ხის აგების პროცესში, როდესაც გვჭირდება შევადაროთ ერთმანეთს სხვადასხვა ხეები/ქვეხეები და მათში შევარჩიოთ ჩვენთვის ყველაზე ხელსაყრელი. ეს ფუნქცია შეიძლება იყოს ევრისტიკული, რომელიც არაოპტიმალურად, მინიმალური გამოთხლებით შეაფასებს ხეს.

როდესაც ჩვენ ვცდილობთ ავაგოთ ამაჩქარებელი სტრუქტურა სხივების თანაკვეთის ამოცანისთვის მთავარ პრიორიტეტს წარმოადგენს სწორედ სხივების ზედმეტი შემოწმებების მინიმიზაცია. ჩვენ ზემოთ ვთქვით, რომ თუ შემომსაზღვრელი ყუთი დიდია და პრიმიტივს მჭიდროდ არ ეკვრის ეს მის ეფექტურობას ამცირებს. ეფექტურობის შემცირება იმაში გამოიხატება, რომ ჩვენი სხივების უფრო დიდი ნაწილი ხვდება მას, რომლებიც რეალურ პრიმიტივს შესაძლოა ცდებოდნენ და გვიწევს ყუთის ტყუილად გახსნა და ქვეხეში ჩასვლა.

ზედაპირის ფართობის ევრისტიკა(Surface Area Heuristic, შემოკლებით SAH), როგორც სახელიდან ჩანს, არის ევრისტიკული ფუნქცია, რომელიც შეფასებისთვის იყენებს შემომსაზღვრელი ყუთის ზედაპირის ფართობს. SAH ევრისტიკის თანახმად ხის შიდა კვანძის ფასი ტოლია:

$$SAH(node) = Ct + \left(\frac{SA(node.leftChild.aabb)}{SA(node.aabb)}\right) * SAH(node.leftChild) + \left(\frac{SA(node.leftChild.aabb)}{SA(node.aabb)}\right) * SAH(node.rightChild)$$

ხის ფოთლების ფასი ტოლია:

$$SAH(node) = \frac{SA(node.aabb)}{SA(node.parentNode.aabb)} * Ci * node.primitiveCount$$

სადაც :

C_t - კვანძის გავლის ფასი.

C_i - პრიმიტივის თანაკვეთის ფასი.

SA() - ზედაპირის ფართობი.

სივრცული შემომომსაზღვრელი ყუთების იერარქია

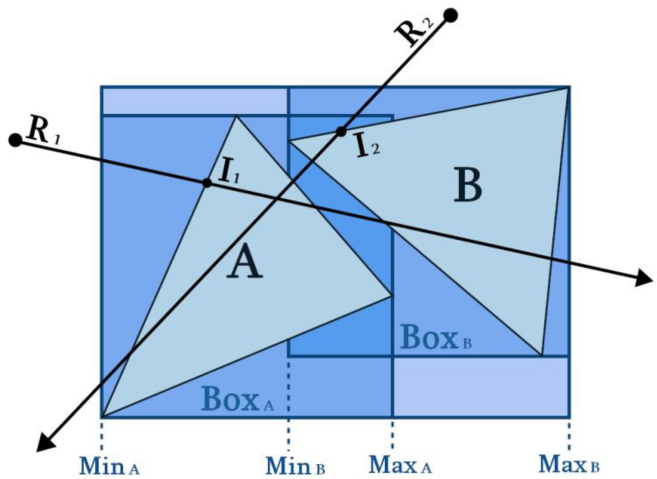
როგორც ზემოთ ითქვა ხის აგება ხდება, როგორც ობიექტებად დაყოფით, ასევე სივრცის დაყოფით და ორივე მეთოდს თავისი დადებითი და უარყოფითი თვისებები გააჩნია. მაშინ, როდესაც ჩვენ გვსურს მაღალი ხარისხის ხის აგება, რათა სხივის სცენასთან თანაკვეთის დათვლის ამოცანა მაქსიმალურად ავაჩქაროთ, შეგვიძლია მოვახდინოთ ხის აგება კომბინირებული მეთოდით, რომელსაც შეეძლება ხის კონკრეტული კვანძისთვის გამოიყენოს საუკეთესო ვარიანტი. ასეთ ხეს სივრცულ BVH უწოდებენ, ჩვენ გამოვიყენებთ ინგლისური შესატყვისის აბრევიატურას SBVH.

ხის ასაგებად უნდა მოვახდინოთ კვანძის სივრცული და ობიექტებად დაყოფის კანდიდატების შერჩევა, დავითვალოთ მათთვის SAH-ის ფასი და ავირჩიოთ საუკეთესო ვარიანტი(რომლის ფასიც ნაკლებია). ფსევდოკოდი ასე გამოიყურება:

```
SplitNode()
{
	split1 = findBestObjectSplit()   // ობიექტებად დაყოფის კანდიდატი
	split2 = findBestSpatialSplit()   // სივრცული გაყოფის კანდიდატი

	if( split1.SAHcost <= split2.SAHcost )
		PerformSplit( split1 )
	else
		PerformSplit( split2 )
}
```

ხის აგების ეს მეთოდი მეთოდი მოგვცემს მაღალი ხარისხის ხეს, თუმცა მასაც თავისი მინუსები გააჩნია. სივრცული დაყოფის პოვნა საკმაოდ რთული პროცესია, რაც ხის აგებას შეანელებს, ამიტომ რეკომენდირებულია მისი გამოყენება სცენის სტატიკური ობიექტებისათვის. SBVH-ის შემთხვევაში უკვე ხის უბრალო გადაჭიმვას ვეღარ გავაკეთებთ, რადგან პრიმიტივები კვანძის შესაბამის ყუთებში მთლიანად არ არიან მოთავსებული.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, ჩვენი ამოცანა გულისხმობს არსებულ გეომეტრიასთან სხივის უახლოესი თანაკვეთის პოვნას. იმის მაგივრად, რომ ვიპოვოთ ყველა თანაკვეთა სხივის გასწვრივ და შემდგომ ამოვარჩიოთ იქიდან უახლოესი აჯობებს მებნის პროცესი მოვაწყოთ ისე, რომ შევძლოთ ახლო თანაკვეთების შემოწმება უფრო ადრე და თავიდან ავიცილოთ დამატებითი გამოთვლები.



მოვიყვანოთ მარტივი მაგალითი: ვთქვათ გვაქვს A და B პრიმიტივი(სამკუთხედი) და მათი შესაბამისი, საერთო მშობლის მქონე Box_A და Box_B შემომსაზღვრელი ყუთები და გვინდა დავითვალოთ R_1 და R_2 სხივის თანაკვეთა უახლოეს პრიმიტივებთან. იმისათვის, რომ შევძლოთ ვარაუდი, თუ რომელ პრიმიტივს შეიძლება კვეთდეს სხივი პირველი, თითოეული ღერძის მიმართულებით უნდა განვსაზღვროთ თუ რომელი ყუთი არის კიდეში. მაგალითად როდესაც x ღერძზე ვმოძრაობთ დადებითი მიმართულებით პირველი გვხვდება Box_A და შემდეგ Box_B, ხოლო როდესაც ვმოძრაობთ საწინააღმდეგო მიმართულებით პირიქით. ამ ინფორმაციის დახმარებით შევძლებთ ვივარაუდოთ, თუ რომელ კვანძს მოხვდება ჩვენი სხივი პირველი და ამ თანმიმდევრობით მოვახდინოთ შემოწმება. განვიხილოთ R_1 სხივის თანაკვეთის პროცესი: R1 სხივი უფრო მეტად x ღერძის გასწვრივ მოძრაობს, ღერძის დადებითი მიმართულებით, ამიტომ უნდა მოვძებნოთ თუ რომელი შვილიბილი ყუთი გვხვდება ამ ღერძის გასწვრივ დადებითი მიმართულებით პირველი(ეს ინფორმაცია ხის აგების პროცესში შეგვიძლია გადავითვალოთ და შევინახოთ კვანძებში) და დავითვალოთ მასთან თანაკვეთა(ხის კვანძების შემთხვევაში ჩავალთ ამ შვილში რეკურსიულად). თუ მიღებული მიღებული თანაკვეთის წერტილი I_1, რადგან ის მეორე შვილის ყუთის დიაპაზონში[Min_B,Max_B] არ ექცევა მასთან თანაკვეთის შემოწმება საჭირო აღარაა. Ray2-

ის შემთხვევაში მას მერე რაც მისი დომინანტი მიმართულების გასწვრივ პირველ შვილობილ კვანზთან Box$_B$-სთან დავითვლით თანაკვეთას I$_2$-ს ვნახავთ რომ ის [Min$_A$,Min$_B$] დიაპაზონში ექცევა, ამიტომ ამ შემთხვევაში ორივე კვანძში მოგვიწევს ჩასვლა.

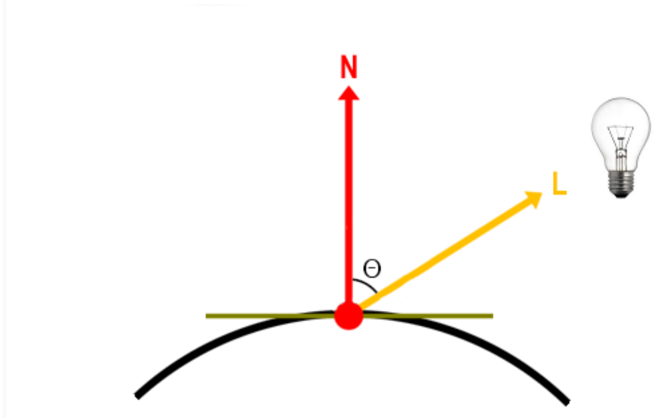
განათების მოდელები

ემპირიული და ფიზიკურად სწორი BSDF-ები

განათების მოდელებს ყოფენ ორ ჯგუფად:

1. **ემპირიული** - ემპირიული მოდელები მიიღება ცდებისა და დაკვირვებების შედეგად, ამიტომ განათების ემპირიული მოდელები ფიზიკური სიზუსტით არ გამოირჩევიან. მათ დადებით თვისებას წარმოადგენს მცირე გამოთვლითი რესურსი, სწორედ ამის გამო ისინი ხშირად გვხვდებიან რეალურ დროში მომუშავე აპლიკაციებში.
2. **ფიზიკაზე დაფუძნებული** - მოდელები მიიღება მეტნაკლებად ზუსტი, ფიზიკური ფორმულირების საფუძველზე. ისინი იძლევიან უფრო რეალისტურ განთებას, თუმცა ხშირ შემთხვავაში მოითხოვენ უფრო მეტ გამოთვლით რესურსს. ფიზიკაზე დაფუძნებულ brdf-ებს გააჩნიათ დამათებითი მახასიათებლები:
   - არაუარყოფითობა - $f_r(w_i, w_r) \geq 0$
   - ჰელმჰოლტსის(Helmholtz) რეციპტროულობა - რაც გულისხმობს BRDF-ის სიმეტრიულობას(თუ w$_i$ და w$_r$ გავუცვლით ადგილებს მნიშვნელობა იგივე უნდა დარჩეს).
   - ენერგიის მუდმივობა - $\forall w_i,\ \int_{\Omega} f_r(w_i, w_r) \cos\theta_r \, dw_r \leq 1$

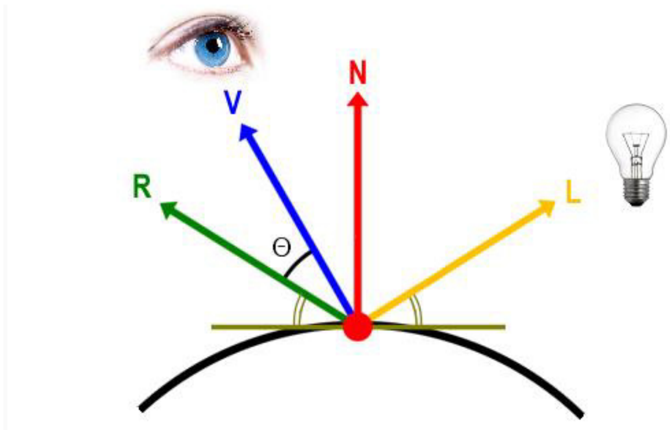
ლამბერტის მოდელი



ლამბერტის დიფუზიური არეკვლის მოდელი არის *ფიზიკურად სწორი* მოდელი, რომელიც აღწერს იდეალურად დიფუზიურ, *იზოტროპულ* ზედაპირზე არეკვლას. მეთოდი მთლიანად დაფუძნებულია ლამბერტის კოსინუსის წესზე და ამბობს, რომ განათების ინტენსივობის ცვლილება დიფუზიური ზედაპირის წერტილში დამოკიდებულია განათების მიმართულებასა(L) და ზედაპირის ნორმალს(N) შორის არსებული კუთხის კოსინუსზე. როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ იმისათვის, რომ არ დავარღვიოთ ენერგიის მუდმივობა, რათა მოხდეს BRDF-ის ნორმალიზება(ინტეგრალი იყოს ერთი), θ კუთხის კოსინუსი უნდა გავყოთ ნახევარსფეროს პროექცირებულ კუთხურ მნიშვნელობაზე (π-ზე).

```
double BRDFLambertian( const Vector3& N, const Vector3& L )

{

       double NdotL = Vector3::dot( N, L );

       if ( NdotL > 0.0 ) {

              return NdotL*( 1 / 3.1415926 );

       }

       return 0.0;

}
```

ლამბერტის არეკვლის მოდელი არის ერთერთი ყველაზე მეტად გამოყენებადი. მეთოდი ასევე ითხოვს ძალიან მცირე გამოთვლით რესურსს.



ფონგის სპეკულარული არეკვლის მოდელი არის *ემპირიული* მოდელი, რომელიც ითვლის განათების სპეკულარულ განათებას *იზოტროპული* ზედაპირის ლოკალურ წერტილში.

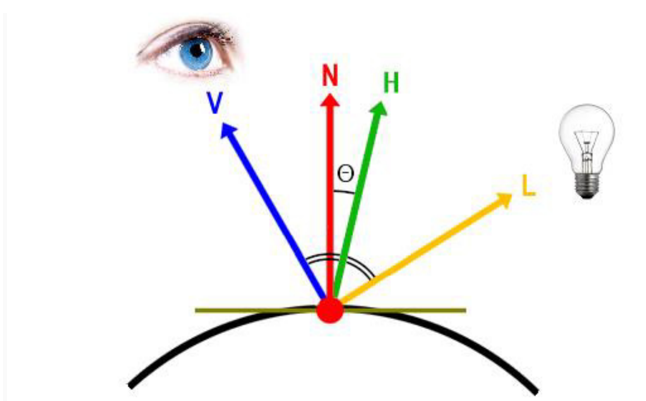
ლოკალური განათების გამოთვლის ამოცანა მდგომარეობს შემდეგში: მოცემული გვაქვს ზედაპირის მიმართულება (N), განათების მიმართულება (L) და დამკვირვებლის მიმართულება (V), ასევე მოცემულია ზედაპირის სიგლუვის კოეფიციენტი s. ჩვენ უნდა დავთვალოთ ალბათობა იმისა, რომ ლოკალურ წერტილში, რომელსაც გააჩნია ფონგის სიგლუვის კოეფიციენტი s, L მიმართულებიდან მოსული სხივი აირეკლება V მიმართულებით.

ფონგის განათების მოდელი ამისთვის ჯერ ითვლის იდეალური არეკვლის მიმართულებას (R) და ამბობს, რომ სპეკულარული განათება პირდაპირპროპორციულად არის დამოკიდებული R და V ვექტორებს შორის მდებარე Θ კუთხის კოსინუსზე. ეს დამოკიდებულება უკრო მკვეთრია, რაც უფრო პრიალა არის ზედაპირი, ამიტომ სიგლუვის s კოეფიციენტი ჯდება ხარისხის მაჩვენებლად. ამის გამო s-ს ხშირად სპეკულარულ ექსპონენტსაც უწოდებენ. ქვემოთ მოცემულია ფუნქცია, რომელიც ითვლის სპეკულარულ განათებას პონგის მეთოდით:

```
double BRDFPhong( const Vector3& N, const Vector3& V, const Vector3& L, double s )
{
    Vector3 R = reflect( L, N ).normalize();

    double RdotV = Vector3::dot( R, V );

    if ( RdotV > 0.0 )

    {

        double normalizationFactor = ( s + 2 ) / ( 2 * 3.1415926 );

        return pow( RdotV, s )*normalizationFactor;

    }

    return 0.0;
}
```

მიუხედავად იმისა, რომ ფონგის მოდელი არ არის ფიზიკურად სწორი, ის მაინც ხშირად გამოიყენება გრაფიკაში მისი სიმარტივის და მცირე გამოთვლითი რესურსის საჭიროების გამო.

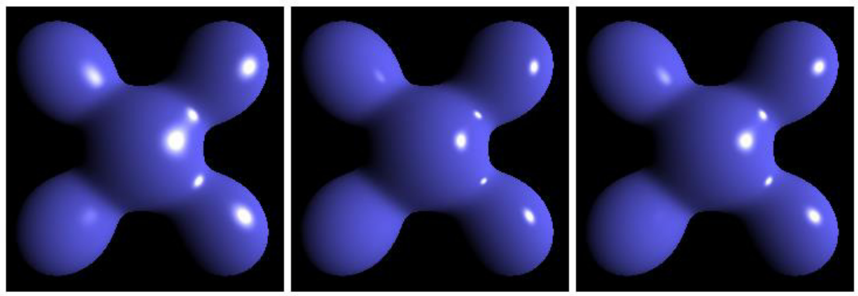
ბლინის მოდელი



ბლინის სპეკულარული არეკვლის მოდელი არის *ემპირიული* მოდელი, რომელიც ითვლის განათების სპეკულარულ წილს *იზოტროპული* ზედაპირის ლოკალურ წერტილში. ის წარმოადგენს ფონგის მოდელის მოდიფიცირებულ ვარიანტს, რომელიც შეიმუშავა ჯიმ ბლინმა, სახელწოდებაც სწორედ მისი გვარიდან

მოდის. ამის გამო ამ მოდელს ხშირად ბლინ-ჰონგის მოდელსაც ეძახიან.

ფონგის მოდელისგან განსხვავებით, ბლინის მოდელი ითვლის განათების (L) მიმართულებასა და დამკვირვებლის (V) მიმართულების საშუალო მიმართულებას (H) და ამბობს, რომ სპეკულარული განათება პირდაპირპროპორციულად არის დამოკიდებული N და H ვექტორებს შორის მდებარე Θ კუთხის კოსინუსზე. ზედაპირის სიგლუვის s კოეფიციენტი აქაც ხარისხის მაჩვენებლად ჯდება, ისევე როგორც ფონგის მოდელში.



ბლინის მოდელი | ფონგის მოდელი | ბლინის მოდელი (მაღალი სპეკულარული ექსპონენტით)

ქვემოთ მოვემულია ფუნქცია, რომელიც ითვლის სპეკულარულ განათებას ბლინის მეთოდით. ფუნქციას გადაეცემა N, V, L ვექტორები და s სპეკულარული ექსპონენტი და აბრუნებს სპეკულარული განათების წილს.

```
double BlinnPhongShading( const Vector3& N, const Vector3& V, const Vector3& L, double s )

{

    Vector3 H = (L + V).normalize();

    double HdotN = Vector3::dot( H, N );

    if ( HdotN > 0.0 )

    {

        double normalizationFactor = ( s + 8 )/( 8 * 3.1415926 );

        return pow( HdotN, s )* normalizationFactor;
    }

    return 0.0;

}
```

ბლინის მოდელი, ისევე როგორც ფონგის მოდელი, მოითხოვს მცირე გამოთვლით რესურსს და არის ყველაზე გავრცელებული განათების მოდელი რეალურ დროში მომუშავე გრაფიკული აპლიკაციებისთვის. სწორედ ამ მოდელს იყენებენ OpenGL და DirectX ძრავები სპეკულარული განათების დასათვლელად.

პროექციაზე დაფუძნებული ვიზუალიზაცია

პროექციაზე დაფუძნებულ ვიზუალიზაციის მეთოდს წარმოადგენს რასტერიზაციის მეთოდი. მისთვის აუცილებელია, რომ ზედაპირი მოცემული იყოს პოლიგონების სახით. მეთოდი იღებს პოლიგონის წერტილებს და ითვლის მათ პროექციას სენსორის სასურათე სიბრტყეზე. თუ გვსურს რასტერიზაციის მეთოდით ანალიტიკურად მოცემული გეომეტრიული ფიგურის ვიზუალიზაცია, პირველ ეტაპზე უნდა დავყოთ ზედაპირი პოლიგონებად და შემდგომ მოვახდინოთ მათი პროექცია. პოლიგონებად დაყოფა იწვევს ანალიტიკური ზედაპირის დისკრეტულად გარდაქმნას, რაც საბოლოოდ ვიზუალიზაციაზეც აისახება.

არსებობს მეთოდი, რომელიც ანალიტიკური ზედაპირის ხატვის დაწყებამდე საღვრავს დისკრეტიზაციის პარამეტრს ისე, რომ კამერასთან ახლოს მდებარე ზედაპირი უფრო პატარა სამკუთხედებად დაიყოს, ხოლო შორს მდებარეები - უფრო დიდად, თუმცა ეს პრობლემას ბოლომდე არ ჭრის.

Figure 11მარცხენა სურათზე ნაჩვენებია ფერების ბუფერი, მარჯვენაზე-სიღრმის ბუფერი ინტენსივობის სახით

პროექცირებული პრიმიტივები შეიძლება ერთმანეთს ზემოთ აღმოჩნდნენ და პოლიგონებმა ერთმანეთი გადაფარონ. საჭიროა ხილვადობის პრობლემის გადაჭრა, რომელიც დაგვეხმარება განვსაზღვროთ, თუ რომელი პრიმიტივი ჩანს კამერიდან და რომელი - არა. ხილვადობის პრობლემას რასტერიზაციის მეთოდი წყვეტს სიღრმის ბუფერის დახმარებით, რომელიც ინახავს სიღრმის ინფორმაციას თითოეული პიქსელისთვის და ყოველი პრიმიტივის დახატვის დროს ხდება მისი განახლება. პრობლემის გადაჭრის ეს მეთოდი თავისმხრივ ასევე დისკრეტულია და მასაც სპეციფიური ხარვეზები ახასიათებს, მათ შორს ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი არის გამჭვირვალე პოლიგონები, მათი კორექტული ხატვა რასტერიზაციის მეთოდისთვის კვლავ აქტუალურ ამოცანად რჩება.

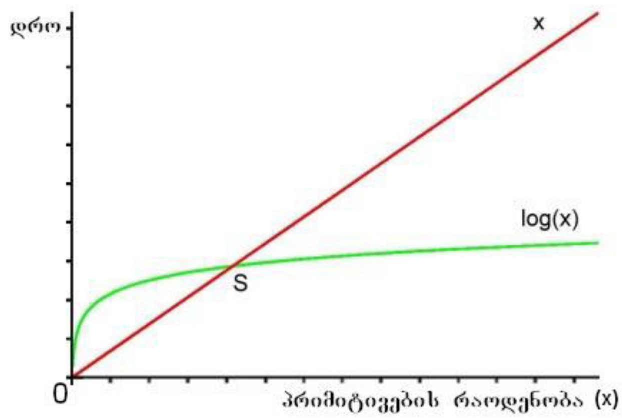
პროექციაზე დაფუძნებული ვიზუალიზაციის მეთოდის გამოთვლითი სირთულე პირდაპირპროპორციულად არის დამოკიდებული პრიმიტივების რაოდენობაზე. თუ პრიმიტივების პროექციისას არანაირი სხვა ოპტიმიზაცია არ ხდება ზედმეტი გამოთვლების თავიდან ასაცილებლად, მაშინ ეს დამოკიდებულება წრფივია. მაგალითად თამაშებში, სადაც პრიმიტივების რაოდენობა მილიარდებს ცდება, სხვადასხვა ოპტიმიზაციის საფუძველზე (Frustum Culling, Occlusion Culling, Level Of Detail) ხდება დასახატი პრიმიტივების გადარჩევა, რაც შესაძლებელს ხდის დიდი სცენების ვიზუალიზაციას.

დღევანდელ რეალურ დროში მომუშავე აპლიკაციებსა და თამაშებში რასტერიზაციის მეთოდი ჯერ კიდევ აშკარად დომინირებს. სწორედ მასზე არის დაფუძნებული OpenGL, DirectX ბიბლიოთეკები, რომელსაც თამაშის თითქმის ყველა წამყვანი ძრავი იყენებს ვიზუალიზაციისთვის.

მიდევნებაზე დაფუძნებული ვიზუალიზაცია

რასტერიზაციის მეთოდებისაგან განსხვავებით, რომელიც ხილვადობის ამოცანას ჭრიდა სიღრმის ბუფერის გამოყენებით, მიდევნების მეთოდი იგივე ამოცანას სხივის სცენასთან თანაკვეთის ამოცანის გადაჭრის გზით ხსნის. იმისათვის, რომ სწრაფად დავითვალოთ, თუ რომელ პრიმიტივს მოხვდა ჩვენი სხივი, პრიმიტივებზე აგებენ ამაჩქარებელ სტრუქტურას (ხეს), რომელიც თანაკვეთის ამოცანის სირთულეს ამცირებს წრფივიდან ლოგარითმულამდე. მიდევნებაზე დაფუძნებული ვიზუალიზაციის მეთოდები, რასტერიზაციის მეთოდისგან განსხვავებით, ახდენენ თითოეულ პიქსელში

მიმავალი სხივის მიდევნებას იმისთვის, რომ ამ პიქსელისთვის დათვალონ ფერი. იმის გამო, რომ მეთოდი თოთოეული პიქსელისთვის ცალ-ცალკე ცდილობს ფერის მოძებნას, მისი სირთულე პიქსელების რაოდენობაზე წრფივად არის დამოკიდებული.

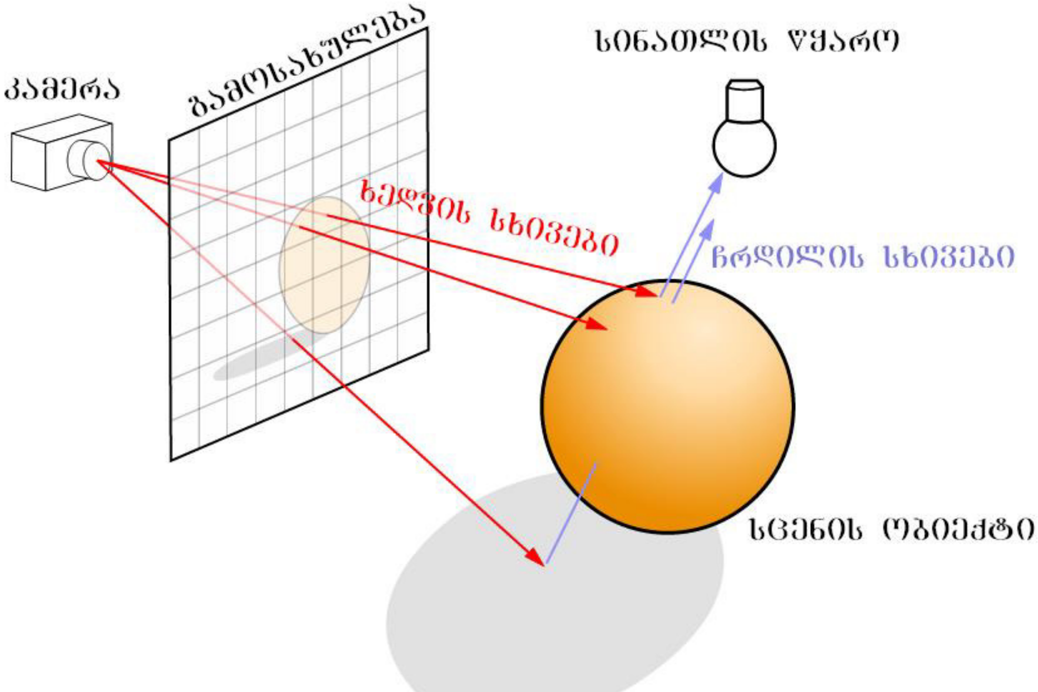


12 გრაფიკები ასახავს რენდერის დროის დამოკიდებულებას პრიმიტივების რაოდენობაზე რასტერიზაციის(წითელი) და სხივების მიდევნების(მწვანე) შემთხვევაში

როგორც გრაფიკიდან ჩანს, იმ სცენებისთვის, სადაც პრიმიტივების რაოდენობა რაღაც ზღვარზე ნაკლებია, რასტერიზაციის მეთოდი უფრო სწრაფად მუშაობს, ვიდრე მიდევნების, ხოლო ზღვარს ზემოთ მიდევნების მეთოდი უფრო სწრაფია. აქედან კარგად ჩანს, რომ თუ ჩვენ გვინდა რეალურთან მაქსიმალურად მოახლოვებული სცენის ვიზუალიზაცია, სადაც გეომეტრიული ზედაპირები დიდი სიზუსტით იქნებიან მოცემული, მაშინ სხივების მიდევნების მეთოდი უფრო ხელსაყრელი ხდება. ამ ნაშრომის მთავარ თემას სწორედ მიდევნების მეთოდები წარმოადგენს.

სხივების მიდევნება

სხივების მიდევნების მეთოდი არის გამოსახულების კომპიუტერულად მიღების ერთ-ერთი გზა, რომელიც გულისხმობს ციფრული გამოსახულების თითოეული პიქსელისათვის სხივის მიდევნებას, რომელიც მიმართულია დამკვირვებლიდან შესაბამისი პიქსელის მიმართულებით (ქვემოთ მოცემულ სურათზე შესაბამისი სხივები ნაჩვენებია წითლად).



13სხივების მიდევნების ილუსტრაციული მოდელი

მეთოდი აგებს ხედვის სხივებს, ითვლის მათ თანაკვეთას გეომეტრიულ ობიექტებთან და თითოეული თანაკვეთის წერტილისთვის ითვლის განათებას განათების მოდელის საშუალებით იმ შემთხვევაში, თუ ეს განათება ამ წერტილიდან ჩანს. ხილვადობის შესამოწმებლად ხდება ჩრდილის სხივების გაშვება სინათლის წყაროს მიმართულებით, თუ ჩრდილის სხივი სინათლის წყარომდე რამეს მოხვდა, ესე იგი წერტილი ჩრდილშია, წინააღმდეგ შემთხვევაში განათებაში. ამის შემდეგ დათვლილ განათებას ამრავლებს ზედაპირის ფერზე და იღებს საბოლოო ფერს(მოყვანილი მაგალითი ასახავს ყველაზე მარტივ შემთხვევას). შესაბამისად, ამ მეთოდის მიერ აგებული განათების გადამტანი გზები განათებას კამერასთან აკავშირებს მხოლოდ ერთი ზედაპირის გავლით. ამ ზედაპირისთვის ირიბად მოსული განათების დათვლა არ ხდება, ამიტომ თუ ზედაპირის ხილული წერტილიდან არცერთი განათება არ ჩანს(ჩრდილშია) ამ წერტილში დათვლილი განათება საერთოდ არ გვექნება. ამიტომ, ჩრდილში მყოფი ადგილები სულ შავი რომ არ იყოს შემოიღეს გარემომცველი განათება(ambient light). ეს არის მინიმალური განათება, რომელიც ყველგან გვხვდება და რომელსაც მიმართულება არ გააჩნია(წარმოადგენს მცირე დანამატს).

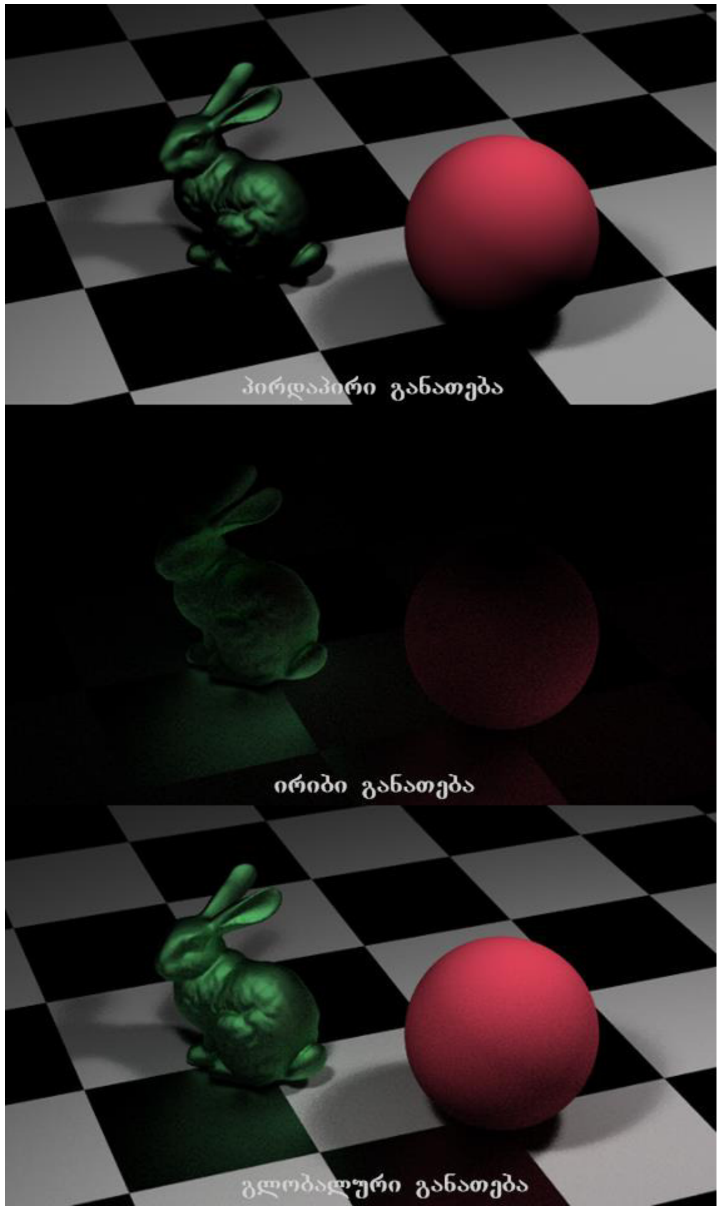
მეთოდის რეალიზაციისას აუცილებელია დიდი ყურადღება მიექცეს სხივის თანაკვეთის ამოცანის ოპტიმალურობას, რადგან ის ძალიან დიდი რაოდენობით გვჭირდება და მკვეთრად მოქმედებს ვიზუალიზაციის საერთო დროზე.

გლობალური განათება

კომპიუტერულ გრაფიკაში ხშირად გამოყოფენ ორი ძირითადი ტიპის განთებას:

1. **პირდაპირი განათება (Direct Illumination)** - რომელიც გამოწვეულია სინათლის წყაროდან წამოსული სხივების პირდაპირი დაცემით და რომელსაც ჩვენ ვითვლით განათების მოდელების საშუალებით.
2. **ირიბი განათება (Indirect Illumination)** - ყველა დანარჩენი განათება, რომელიც გამოწვეულია ერთჯერადად ან მრავალჯერადად არეკლილი სხივებით.

მათ გაერთიანებას უწოდებენ გლობალურ განათებას (Global Illumination).



14სურათზე ნაჩვენებია პირდაპირი(ზედა), ირიბი(შუა) და გლობალური(ქვედა) განათების მაგალითები. დარენდერებულია Colibri-ში.

გამოსახულების დათვლა პირდაპირი განათებით მარტივად ხდება უბრალო სხივების მიდევნების ალგორითმით, რომელიც სცენის ყოველი ხილული წერტილისათვის ითვლის პირდაპირ განათებას ჩრდილის სხივების საშუალებით. რაც შეეხება ირიბ განათებას, მისი გამოთვლა უბრალო სხივების მიდევნებით ვერ ხერხდება და მთავარ პრობლემას წარმოადგენს. როგორც ზემოთ ვთქვით, სწორედ ამის გამო მოხდა გარემომცველი განათება, რომელიც აღწერს იმ მინიმალურ გაბნეულ, ირიბ განათებას, რომელსაც მიმართულება არ გააჩნია და ყველა მხრიდან მოდის. გაბნეული განათების შემოღებით მოხდა რენდერის განტოლების ყველაზე რთულად დასათვლელი ნაწილის მიახლოებითად ამოხსნა ძალიან სწრაფად, რამაც შესაძლებელი

გახადა გამოსახულების რეალურ დროში გამოთვლა. თუმცა არის ბევრი შემთხვევა, სადაც განსხვავება რეალურ, ირიბ განათებასა და გარშემორტმულ(ambient) განათებით მიახლოებულს შორის ძალიან თვალშისაცემია. სწორედ ამისი შედეგია ისეთი მეთოდების გამოჩენა, როგორიცაა მაგალითად Ambient Occlusion, რომელიც ასევე ცდილობს ეს თვალშისაცემი განსხვავება დამალოს. დღევანდელ რეალურ დროში მომუშავე აპლიკაციებში, კომპიუტერულ თამაშებში, რომელთა დიდი უმრავლესობა დაფუძნებულია რასტერიზაციის ალგორითმებზე (OpenGL, DirectX) სულ რამოდენიმე წელია რაც გამოჩნდა ირიბი განათების უკეთესი მიახლოვება.

15 კონუსების მიდევნების მეთოდის მუშაობის შედეგი Unreal Engine 4-ში.

ეს მეთოდი ითვლის მხოლოდ ერთჯერად ირიბ განათებას. მისი გამოყენება მოხდა ძალიან შეზღუდული ფორმით მხოლოდ დახურულ, პატარა სცენებში. მეთოდი ითხოვს დიდ მეხსიერებას, რადგან ინახავს მეჩხერი კუბიკების რვაობით ხეს(Sparse Voxel OcTree), თავისი ტექსტურებით, რომლის აგებასაც ასევე დიდი დრო ჭირდება. სცენის დაყოფა ხდება თანაბარი ზომის ყუთებად(კუბიკებად), თუმცა ისინი მთლიანად არ ინახებიან მეხსიერებაში, არამედ მეჩხერად. ინახება მხოლოდ ის ნაწილი რომელშიც ექცევა გეომეტრია და მის შესანახად გამოიყენება რვაობითი ხე.

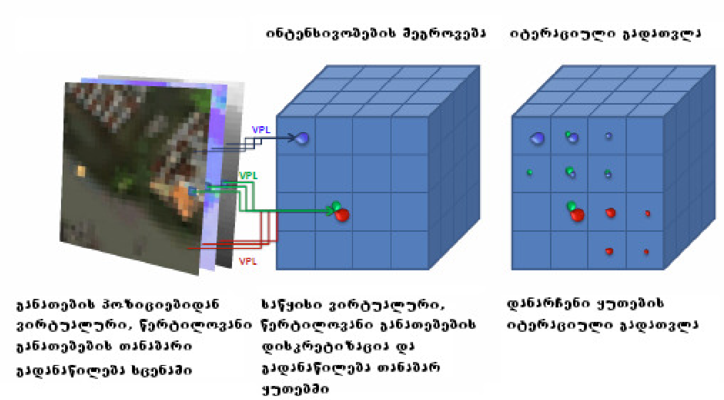


Figure 16სურათზე ნაჩვენებია Light Propagation Volumes მეთოდის მუშაობის პრინციპი

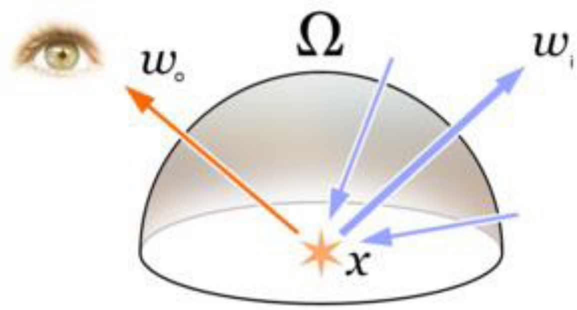
არანაკლებ საინტერესო მეთოდი არის **Light Propagation Volumes**, რომელიც ახდენს განათების ინფორმაციის კეშირებას სივრცეში, თანაბარი ბიჯით, დისკრეტულად, ახდენს მათ ინტერპოლაციას, რათა დაითვალოს განათების წილი სივრცის ნებისმიერი წერტილისთვის და იყენებს მათ ირიბი განათების დათვლის დროს. პირველ ეტაპზე პირდაპირი განათების დათვლის დროს ქმნის ვირტუალურ წერტილოვან განათებებს, ათავსებს მათ სივრცის შესაბამის ყუთებში და შემდეგ ეტაპზე მათ საფუძველზე ახდენს ინფორმაციის დათვლას სივრცის სხვა ყუთებისთვის.

17Light Propagation Volumes მეთოდის მუშაობის შედეგი Unreal Engine 4-ში

დღევანდელი პოპულარული თამაშის ძრავები არის ჰიბრიდული ტექნოლოგიის და იყენებს როგორც პროექციებს, ასევე მიდევნებებს.
არსებობს მიდევნებაზე დაფუძნებული სხვადასხვა მეთოდი, რომელიც

მაქსიმალური სიზუსტით ითვლის გლობალურ განათებას, რაც ამ ნაშრომის მთავარი განხილვის საგანია.

რენდერის განტოლება



იმისათვის, რომ შევძლოთ ფიზიკურად სწორი, სუპერრეალისტური გამოსახულების მიღება, იყენებენ რენდერის განტოლების სახელით ცნობილ მათემატიკურ მოდელს, რომელსაც საფუძვლად უდევს ენერგიის მუდმივობის კანონი და ინტეგრალური განტოლების სახით აღწერს სინათლის ქცევას:

$$L_o(x, w_o, \lambda, \mathrm{t}) = L_e(x, w_o, \lambda, \mathrm{t}) + \int_\Omega f_r(x, w_i, w_o, \lambda, \mathrm{t})\, L_i(x, w_i, \lambda, \mathrm{t})(w_i * n)\, dw_i$$

მთავარი აზრი ამ განტოლებისა არის ის, რომ დავითვალოთ Lo ინტენსიობა სინათლისა, რომელსაც აქვს λ ტალღის სიგრძე და რომელიც მოდის ზედაპირის x წერტილიდან w_o მიმართულებით დროის მოცემული t მომენტისთვის. ეს ინტენსიობა შეგვიძლია განვიხილოთ ორი ინტენსიობის ჯამად:

1. ინტენსიობა λ ტალღის სიგრძეზე, რომელსაც თავად ასხივებს x წერტილი დროის მოცემულ t მომენტში wo მიმართულებით.
2. x წერტილიდან w_o მიმართულებით არეკლილი ის ინტენსიობა λ ტალღის სიგრძეზე, რომელსაც იღებს თავად x წერტილი ყველა მიმართულებიდან მოცემულ t მომენტში. შესაბამისად, რადგან გვიწევს ბევრი მიმართულების

განხილვა, განტოლებაში გვიზის ჯამი Σ_{Ω}-ზე, სადაც Ω არის ერთეულოვანრადიუსიანი ნახევარსფერო, რომელიც შეიცავს ყველა შესაძლო w_i მიმართულებას.

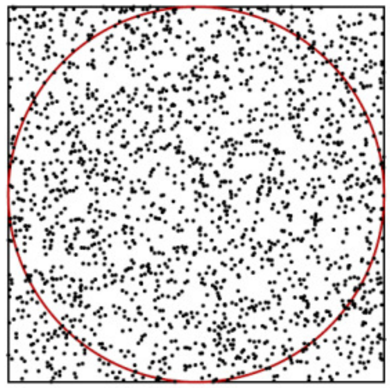
t დროის მოცემულ მომენტში კონკრეტული wi მიმართულებიდან x წერტილში მოსული λ ტალღის სიგრძის მქონე სხივის ინტენსიობას ითვლის L_i ფუნქცია. განტოლების ბოლოში მოცემული ჩანაწერი (w_i*n) არის ლამბერტის კოსინუსის წესი, რომელიც აღწერს ინტენსიობის შესუსტების ფენომენს ცერად დაცემული სხივების შემთხვევაში. როგორც ზემოთ ვახსენეთ, ჩვენ უნდა დავითვალოთ wo მიმართულებით არეკლილი განათება. აქ უკვე შემოდის არეკვლის f_r ფუნქცია, რომელიც განსაზღვრავს სინათლის ქცევას ზედაპირზე. უფრო დეტალურად ეს ფუნქცია ითვლის დროის t მომენტში x წერტილზე w_i მიმართულებიდან დაცემული λ ტალღის სიგრძის მქონე სინათლის სხივის არეკვლის ალბათობას w_o მიმართულებით.

რადგან განტოლებაში გვხვდება L_i, რომელიც არის x წერტილში w_i მიმართულებიდან მოსული განათება და რომელიც ჩვენთვის ისეთივე უცნობი პარამეტრია, როგორც L_o, ამიტომ რეალურად განტომელება წარმოადგენს უსასრულოდ მაღალი ხარისხის ინტეგრალს. ასეთი ტიპის ამოცანების ამოსახსნელად განსაკუთრებით ეფექტურია მონტე კარლოს ინტეგრირების მეთოდი.
თუ x წერტილი თავად არ წარმოადგენს განათებას, მაშინ პირველი ნაწილი შეგვიძლია უგულებელვყოთ და საკმარისია დავითვალოთ მეორე ნაწილი. ასევე თუ ჩვენ ვარენდერებთ ერთ კადრს და არა ანიმაციას, შეგვიძლია t დავაფიქსიროთ. ან თუ გვინდა კადრზე მივიღოთ გადღაბნილი მოძრაობა, მაშინ დროის მცირე ინტერვალში უნდა ვცვალოთ t და მიღებული ინტენსიობები გავასაშუალოთ.

მონტე კარლოს ინტეგრირება

მონტე კარლოს ინტეგრირება არის რიცხვითი ინტეგრირების მეთოდი, რომელიც შემთხვევითი რიცხვების შერჩევის გამოყენებით ხსნის სასრულ ინტეგრალს. ამ მეთოდს განსაკუთრებით დიდი გამოყენება აქვს მაღალი განზომილების ინტეგრალების ამოხსნისას.

მონტე კარლოს მეთოდი გამოირჩევა არადეტერმინისტული მუშაობის პრინციპით, რაც იმაში გამოიხატება, რომ ერთი და იგივე შემომავალ პარამეტრზე მეთოდი იღებს სხვადასხვა შედეგს. აღსანიშნავია, რომ სასრული ინტეგრალის გამოთვლისას პასუხი არის ცალსახა და სასრული, ხოლო მონტე კარლოს მეთოდი იძლევა ინტეგრალს სასურველი მიახლოებით. მოვიყვანოთ მაგალითი: ვთქვათ, გვინდა დავთვალოთ Π-ს რიცხვითი მნიშვნელობა სასურველი მიახლოებით.



წარმოვიდგინოთ კვადრატი, რომელშიც არის ჩახაზული წრეწირი (იხილეთ სურათი). ვქვათ, ამ კვადრატში ვსვამთ თანაბრად განაწილებულ შემთხვევით წერტილებს, რომელთაგან ნაწილი მოხვდება წრეწირს შიგნით, ხოლო ნაწილი გარეთ. შერჩეული წერტილების საერთო რაოდენობა აღვნიშნოთ როგორც C, ხოლო წრეწირში ჩავარდნილი წერტილების რაოდენობა კი როგორც C_c. რადგან ჩვენ წერტილებს თანაბრად ვარჩევთ, ვიცით, რომ რაც უფრო გავზრდით წერტილთა რაოდენობას, მით უფრო თანაბარი გახდება განაწილება. ასეთ შემთხვევაში შეგვიძლია ვთქვათ, რომ Cc/C იქნება იგივე, რაც წრეწირის ფართობის შეფარდება კვადრატის ფართობთან. ჩვენ ვიცით, რომ წრეწირის ფართობი არის Π^*r^2, ხოლო კვადრატის $(2^*r)^2$. ვიღებთ: $C_c/C=(\Pi^*r^2)/(4^*r^2)=\Pi/4$; აქედან $\Pi=(C_c^*4)/C$, სადაც C ჩვენთვის ცნობილი პარამეტრია და მას იმის მიხედვით ვარჩევთ, თუ რა სიზუსტით გვსურს პასუხთან მიახლოება. ასევე ცნობილია C_c, რადგან ყოველი ახალი წერტილის შერჩევისას ვამოწმებთ, ჩავარდა იგი წრეწირში თუ არა.

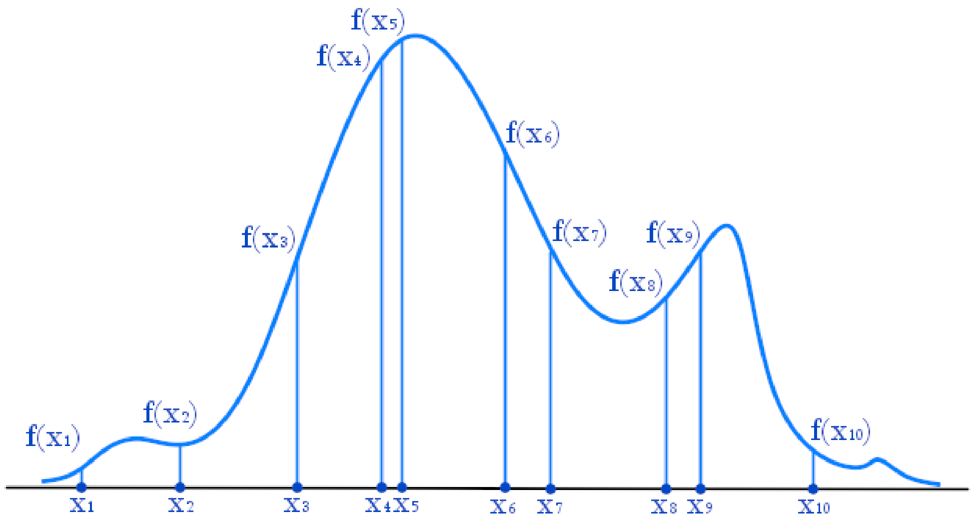


Figure 18სურათზე ნაჩვენებია f(x) ფუნქციის გრაფიკი, სადაც განსაზღვრის არეზე ხდება თანაბარი შერჩევა

მოვიყვანოთ კიდევ ერთი თვალსაჩინო მაგალითი, როდესაც ვახდენთ ფუნქციის ინტეგრალის ან საშუალოს დათვლას რაიმე შუალედში, მონტე კარლოს მეთოდი არის ერთერთი საშუალება, რომ იტერაციულად ნელ-ნელა მივუახლოვდეთ სასურველ შედეგს. ზემოთ მოცემულ სურათზე ნაჩვენებია ფუნქცია რომლის განსაზღვრის არეზეც ვახდენთ თანაბარ შემთხვევით შერჩევას(x_1, x_2, x_3, … ,x_{10} არიან თანაბარი განაწილების ელემენები). შერჩევითი საშუალოს დათვლას მიღებული მონაცემების საფუძველზე ადვილად შევძლებთ. შერჩევითი საშუალო მით უფრო მიუახლოვდება რეალურ საშუალოს, რაც უფრო გავზრდით შერჩევების რაოდენობას.

შერჩევა მნიშვნელოვნობით

ზემოთ მოყვანილ შემთხვევაში ფუნქციის საშუალოსთან მიახლოვებას ვახდენდით განსაზღვრის არეზე x-ების თანაბარ შერჩევით. თუ დავაკვირდებით ადვილად შევამჩნევთ, რომ x-ის ის მნიშვნელობები, რომელთა შესაბამის f(x)-ს დიდი რიცხვითი მნიშვნელობა გააჩნია უფრო მეტად მოქმედებენ(ცვლიან) შერჩევითი საშუალოს მნიშვნელობას, ვიდრე პატარა მნიშვნელობის მქონენი. ასეთ შემთხვევაში შეგვიძლია ვთქვათ, რომ გამოთვლის პროცესზე ისინი უფრო დიდ გავლენას ახდენენ და შესაბამისად მათი შერჩევა ჩვენთვის მეტად მნიშვნელოვანია.

მნისვნელოვნობით შერჩევა გულისხმობს სწორედ იმას, რომ ნაცვლად თანაბარი შერჩევისა განსაზღვრის არეზე მოვახდინოთ მეტი შერჩევები იქ, სადაც გამოთვლით

პროცესში მონაწილე, უფრო მნიშვნელოვანი ელემნტებია განლაგებული. იმისათვის, რომ გამოთვლის პროცესი დარჩეს კორექტული შერჩეული ელემენტები უნდა გადავწონოთ მათი შერჩევის ალბათობის შებრუნებული სიდიდეებით.

მრავალი მნიშვნელოვნობით შერჩევა

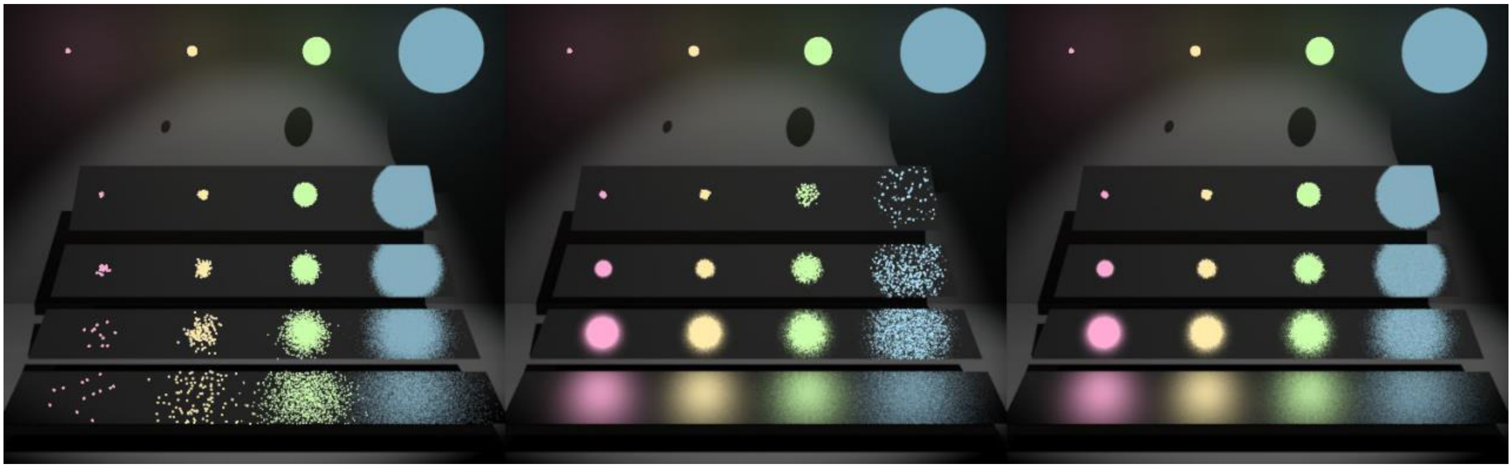


Figure 19სურათზე ნაჩვენებია 3 გამოსახულება: brdf-ის შერჩევის გზით (მარცხენა), განათების შერჩევის გზით (შუა) და მათი კომბინაცია მრავალი მნიშვნელოვნობით შერჩევის გზით(მარჯვენა)

ერიკ ვიჩმა მის სადოქტორო ნაშრომში(E. VEACH. 1997. Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation. PhD thesis, Standford Univeristy.) წარმოადგინა რამოდენიმე ძალიან მნიშვნელოვანი მეთოდი, რომელთა გამოყენებითაც ხდება ხმაურის საგრძნობი შემცირება გზების მიდევნების მეთოდში. ერთერთი ამ მეთოდთაგანი იყო მრავალი მნიშვნელოვნობით შერჩევა. ცნობილია, რომ BRDF-ით შერჩევის დროს პირდაპირი განათების წვლილის გამოთვლა ძალიან რთულდება როდესაც განათების წყარო ძალიან პატარაა და ამ დროს ჯობია, რომ მოვახდინოთ განათების ცალკე შერჩევა. ასეთი შერჩევა დაეხმარება მეთოდს მალე ამოწუროს ხმაური რომელსაც იწვევს განათებაზე შემთხვევით მოხვედრის ძალიან მცირე ალბათობა. თუმცა, იმ შემთხვევაში, როდესაც ვახდენთ განათების ცალკე შერჩევას ასევე აქვს პრობლემა მაშინ, როდესაც განათების წყარო ძალიან დიდია. რეალურად ორივე ეს მეთოდი არის მიუკერძოებელი, თუმცა სხვადასხვა შემთხვევებში ისინი დიდ ხანს ანდომებენ ხმაურის ამოწურვას. ვიჩმა თქვა, რომ თუ ორი მეთოდი არის *ობიექტური(unbiased)* მათი კომბინაციით მიღებული მეთოდიც იქნება აუცილებლად

ობიექტური. აქედან გამომდინარე, ჩვენ შეგვიძლია შევქმნათ რაიმე ევრისტიკული ფუნქცია, რომელიც კონკრეტულ შემთხვევებში შემოგვთავაზებს შესაბამის მეთოდს, ისეთს რომელიც კონკრეტულ შემთხვევაში უკეთ უმკლავდება ხმაურს.

მრავალი მნიშვნელოვნობით შერჩევის მეთოდი არის ძალიან კარგ მეთოდი დისპერსიის(ხმაურის) შესამცირებლად. წელს ერიკ ვიჩს გადაეცა კინოაკადემიის ჯილდო კომპიუტერული გრაფიკის განვითარებაში შეტანილი წვლილისათვის. მის სადოქტორო ნაშრომში ამ მეთოდის გარდა ასევე იყო წარმოდგენილი მეტროპოლისის სინათლის ტრანსპორტირების მეთოდი(MLT), რომელიც არის მარკოვის ჯაჭვებზე დაფუძნებული მონტე-კარლოს მეთოდი და ადვილად უმკლავდება განსაკუთრებულად რთულ შემთხვევებს.

გადარჩეული მნიშვნელოვნობით შერჩევა

მეთოდის არსი მდგომარეობს შემდეგში: მაგალითად გვაქვს გეომეტრიული მოდელი რაიმე მატერიალით მოთავსებული გარემოს განათებაში(იხილეთ ზემოთ მოცემული სურათი). ჩვენ შეგვიძლია გარემოს განათებაზე მოვახდინოთ n შერჩევა, შემდეგ ამ n შერჩევისთვის დავითვალოთ განათება ხილვადობის ტესტის გარეშე, რაც თავისმხრივ ყველაზე რთული და მძიმე ნაწილია პირდაპირი განათების დათვლის მომენტში. ამის შემდეგ ამ n დათვლილი განათებიდან მოვახდინოთ m განათების ამორჩევა განათების ინტენსიობების პროპორციული ალბათობებით და ბოლო ეტაპზე მოვახდინოთ m შერჩეული განათებისათვის ხილვადობის შემოწმება. ამ გზით ჩვენ მეტი ყურადღება გადაგვაქვს მაღალი ინტენსივობის მქონე განათების ნაწილზე, რაც იწვევს იმას, რომ როდესაც დიდი ინტენსივობის განათებები ჩვენი ინტერესის წერტილიდან არ ჩანს მეთოდი კარგავს ეფექტურობას. თუმცა ბევრ შემთხვევაში მეთოდი ძალიან ეფექტურია. განსაკუთრებით, მაშინ როდესაც სცენაში გვაქვს დიდი რაოდენობის სხვადასხვა ტიპის, სიმძლავრის განათებები. შერჩევის ეს მეთოდი თავისმხრივ არის მიუკერძოებელი, რაც მის დიდ პლიუსს წარმოადგენს.

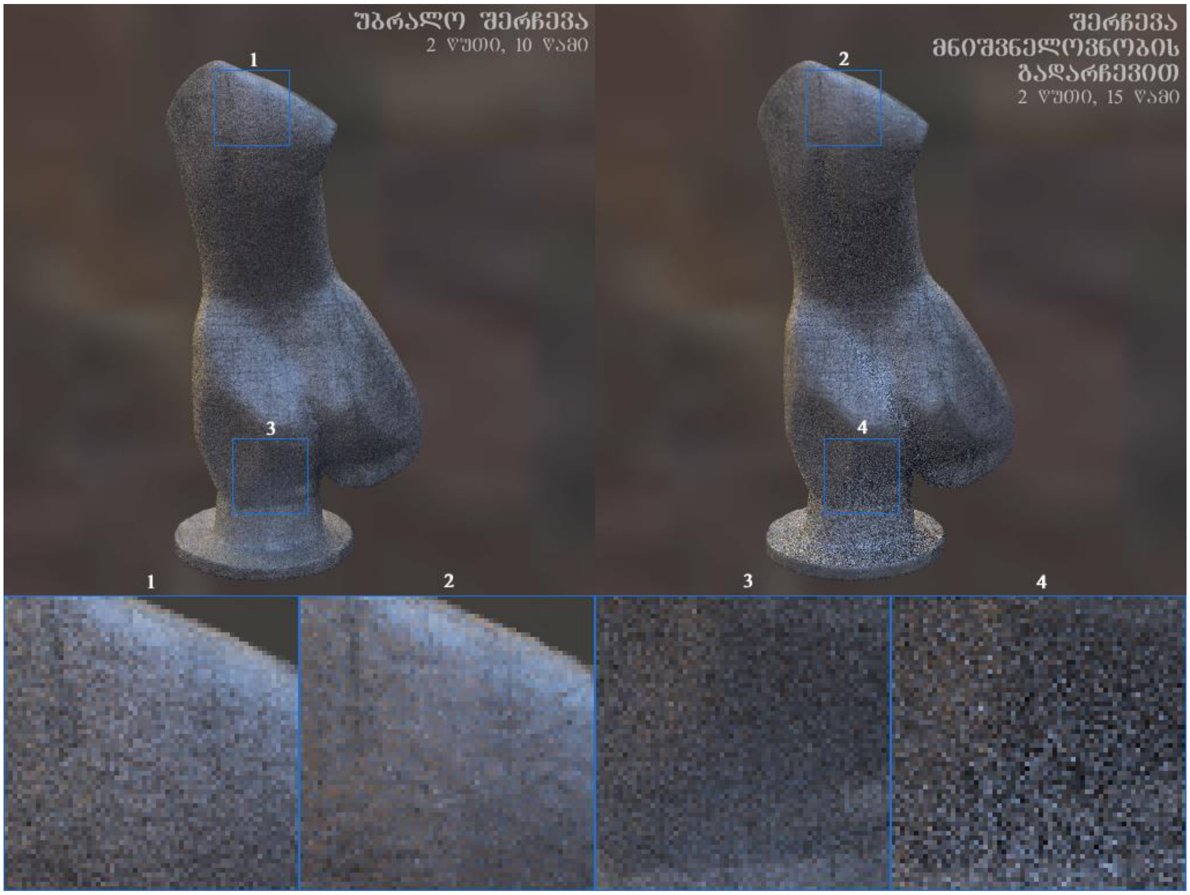
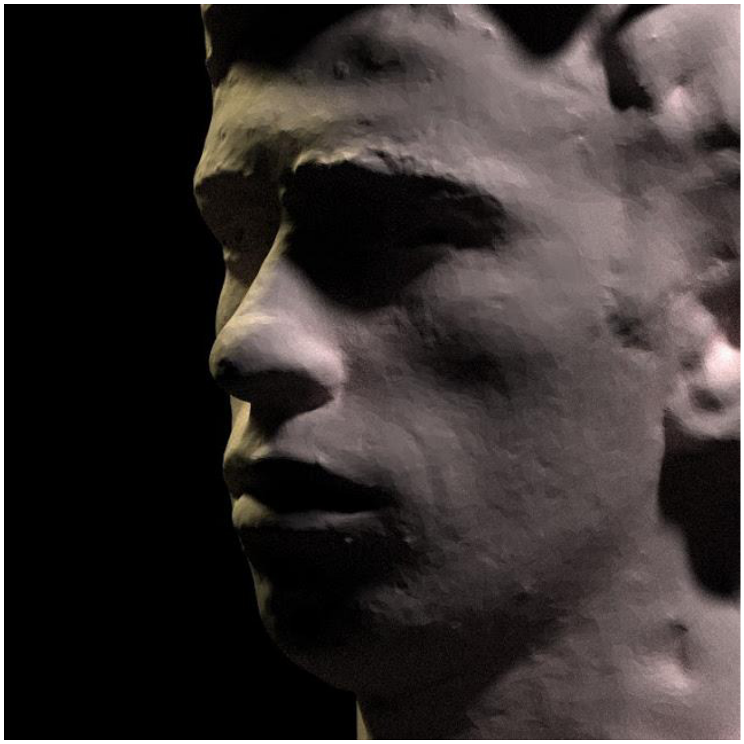


Figure 20გადარჩეული მნიშვნელოვნობით შერჩევა.

როგორც სურათიდან ჩანს, გარკვეულ შემთხვევებში ეს მეთოდი ძალიან კარგ შედეგს იძლევა, თუმცა ამავდროულად სხვა შემთხვევაში უფრო ზრდის ხმაურს. ეს განპირობებულია სწორედ იმ ფაქტით, რომ ზედაპირის იმ ადგილებში(1 და 2 უჯრა ზემოთ მოცემულ სურათში), რომლებსაც ნორმალის მიმართულებით ნახევარსფეროში დაბრკოლებები არ აქვთ და საიდანაც გარემოს განათება კარგად მოჩანს მნიშვნელოვნობით შერჩევა გვეხმარება, ხოლო იმ წერტილებში(მე-2 და მე-3 უჯრა ზედა სურათში), რომლთაც დაბრკოლებები ფარავს სრულად ან/და ნაწილობრივ ხილვადობის ტექსი წარუმატებლად სრულდება, რაც იწვევს ფუჭად დაწარჯულ გამოთვლით რესურსს და შესაბამისად გამოსახულებაში ხმაური მატულობს. ასეთ შემთხვევაში უნდა მოხდეს ევრისტიკული შემფასებლის გამოყენება, რომლის საფუძველზეც მივიღებთ გადაწყვეტილებას თუ რომელი მეთოდი გამოვიყენოთ.

გზების მიდევნება



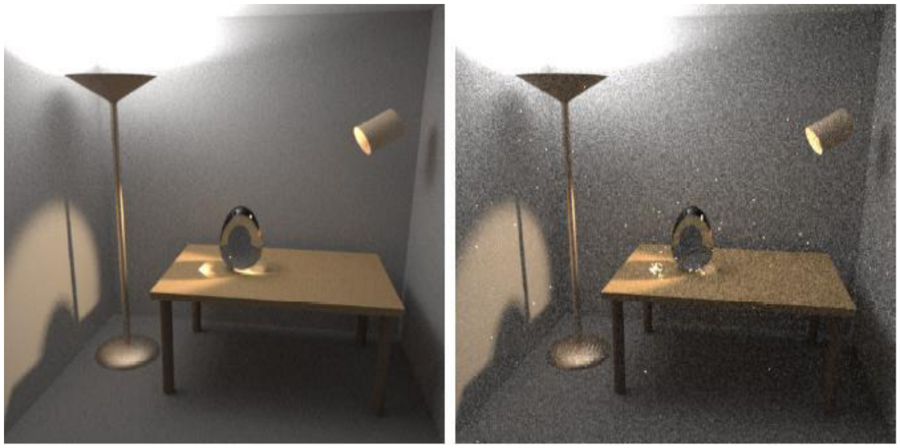
კომპიუტერულ გრაფიკაში გზების მიდევნების მეთოდი არის ალგორითმი, რომელიც ფიზიკური პროცესის სიმულაციის საფუძველზე 3 განზომილებიანი სცენებისთვის ხსნის რენდერის განტოლებას, გლობალურ განათებას ითვლის და იღებს მაქსიმალურად რეალისტურ გამოსახულებას. ფართოდ გავრცელებული, პროექციაზე და რასტერიზაციაზე დაფუძნებული მეთოდებისაგან განსხვავებით, ის ბუნებრივი გზით, მარტივად იღებს ისეთ ვიზუალურ ეფექტებს, როგორიცაა: ხედვის სიღრმე (Depth Of Field), რბილი ჩრდილები (Soft Shadow), როგორც კამერის, ასევე ობიექტების გადღაბნილი მოძრაობა (Motion Blur), მწველი სხივები (Caustics) და ბევრი სხვა, რომლებიც სხვა მეთოდებში მიიღება სხვადასხვა, სპეციალურად დამუშავებული ალგორითმებით.

სხივების მიდევნების მეთოდისაგან განსხვავებით, რომელიც ხშირ შემთხვევაში ითვლის მხოლოდ პირველად სხივებს, გზების მიდევნების ალგორითმი ცდილობს აღადგინოს კამერიდან სინათლემდე მიმავალი ყველა შესაძლო გზები. თავად ალგორითმის აზრი იმაში მდგომარეობს, რომ ობიექტების ზედაპირის კონკრეტული წერტილისათვის დაითვალოს მთელი ის განათება, რომელიც ხვდება ამ წერტილში გარემოდან. მეთოდი რენდერის განტოლებაში არსებულ უსასრულოდ მაღალი ხარისხის ინტეგრალს ხსნის *მონტე კარლოს ინტეგრირების მეთოდით* იტერაციულად და ნელ-ნელა უახლოვდება რეალურ ამონახსნს. მიიჩნევა, რომ სცენაში არსებული ნებისმიერი ობიექტი ასხივებს სინათლეს. თვითონ ასხივებს განათებას, ან

ირეკლავს/ატარებს სხვა ობიექტიდან მოსულ სხივებს. სწორედ მუშაობის ამ პრინციპის გამო ალგორითმი რეკურსიული ხასიათისაა.

ალგორითმის მიზანია, იპოვოს ფერი თითოეული პიქსელისათვის. ამისთვის ის იწყებს მუშაუბას კამერის პოზიციიდან, შესაბამისი პიქსელისათვის აღადგენს ვექტორს და გამოთვლის უახლოეს თანაკვეთას გარემოში არსებულ ობიექტებთან. მას შემდეგ, რაც დაადგენს, თუ რა ტიპის ზედაპირს მოხვდა სხივი, ორმხრივი არეკვლის განაწილების ფუნქციით (BRDF) გამოთვლის არეკლილ/გატარებულ სხივს და რეკურსიულად განაგრძობს სხივის მიდევნებას მანამ, სანამ არ შესრულდება რაიმე პირობა. მაგალითად: სხივი მოხვდება განათებას, ან მივაღწევთ რაიმე წინასწარ განსაზღვრულ სიღრმეს (ეს შეზღუდვა გამოიწვევს სისტემატურ შეცდომას და მეთოდს გახდის მიკერძოებულს), ან შევწყვეტთ რაიმე შემთხვევითი ხდომილების საფუძველზე. როგორც ალგორითმიდან ჩანს, დიფუზიური ზედაპირებისთვისაც კი, რომლებიც დაცემულ სხივებს აბნევენ ყველა მიმართულებით, ჩვენ არეკვლას მხოლოდ ერთი მიმართულებით ვახდენთ. ამ შემთხვევაში ყოველ წერტილში მოხდება მხოლოდ რომელიმე, კონკრეტული მიმართულებიდან მოსული განათების დათვლა. ამიტომ ალგორითმი ამ პროცესს იმეორებს ზევრჯერ, რათა დააგროვოს არა რომელიმე ერთი, არამედ ყველა მხრიდან მოსული განათება. დაბალი რაოდენობის იტერაციების დროს გამოსახულებაზე ვიღებთ ხმაურს, იტერაციების ზრდასთან ერთად ხმაური მცირდება და ვიღებთ მაქსიმალურად რეალისტურ გამოსახულებას გლობალური განათებით. იმ დროს, როდესაც მანათობელი ობიექტი ძალიან მცირეა, ან რთულად მიღწევად ადგილას არის მოთავსებული, ჩვენს მიერ მიდევნებული სხივები მას შეიძლება დიდი ხნის განმავლობაში არ მოხვდნენ, რაც მეთოდს მკვეთრად შეანელებს და გაზრდის ხმაურს. ეს შემთხვევა ამ მეთოდის მთავარ პრობლემას წარმოადგენს. არსებობს ამ პრობლემის გადაქყვეტის ალგორითმის მოდიფიცირებული ვერსიები, რომლებსაც შემდგომ პარაგრაფებში განვიხილავთ.

გზების ორმხრივი მიდევნება

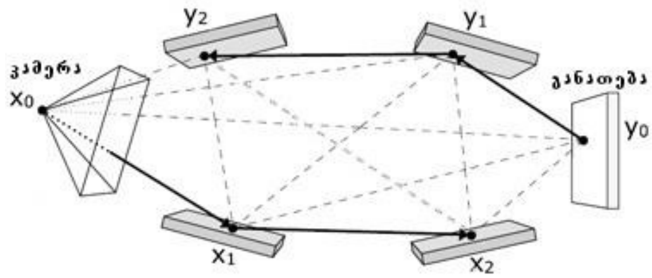


21 სურათზე ნაჩვენებია ორმხრივი(მარცხენა) და ცალმხრივი(მარჯვენა) გზების მიდევნების მეთოდის მუშაობის შედეგი

იმისათვის, რომ სხვადასხვა ხასიათის სინათლის გადამტანი გზები ჩავწეროთ უფრო აღქმადი სახით, იყენებენ რეგულარულ გამოსახულებებს. მაგალითად, დიფუზიურ, სპეკულარულ და მანათობელ ზედაპირებს თუ აღვნიშნავთ შესაბამისად D, S, L სიმბოლოებით, ხოლო E-თი კამერას, მაშინ შევძლებთ ნებისმიერი გზის აღწერას რეგულარული გამოსახულების სახით. მაგალითდ, განათების გზა, რომელიც იწყება მანათობელი ზედაპირიდან, ეცემა ერთ ან რამოდენიმე დიფუზიურ ზედაპირს, შემდეგ სპეკულარულს და შემდეგ ხვდება კამერაში, ჩაიწერება ასე: LDD*SE.

ცალმხრივი გზების მიდევნების მეთოდი გზის მიდევნებას იწყებს კამერიდან და ამთავრებს მანათობელ ზედაპირზე, ასე რომ, ამ მეთოდით მიღებული გზები დაიწყება E-თი და დასრულდება L-ით. უბრალოდ, ცალმხრივი გზების მიდევნების მთავარ პრობლემას წარმოადგენს პატარა ზომის განათებაზე შემთხვევითად მოხვედრის მცირე ალბათობა, თუმცა ამ პრობლემის მოგვარებას ვახერხებთ განათებების დამატებით შერჩევის გზით. ეს მეთოდი ზედაპირის წერტილისთვის ახდენს მიმართულებების შერჩევას მანათობელი ზედაპირისკენ იმ იმედით, რომ ასეთი შერჩევის გზით იპოვის ამ წერტილში მოსული განათების დიდ წილს. თუმცა ეს მოლოდინი ყოველთვის არ მართლდება. ზემოთ მოცემულ სურათზე ნაჩვენებია შემთხვევა, როდესაც ოთახში არსებული განათების დიდი ნაწილი არის ირიბი, რაც იმას ნიშნავს, რომ განათების პირდაპირ შერჩევის მეთოდი ვერ ეხმარება რენდერერს და ხმაურის ამოწურვის პროცესი დიდ ხანს გრძელდება. სურათის ცენტრში ჩანს შუშის კვერცხი, რომელიც დევს დიფუზიურ მაგიდაზე, მისკენ მიმართულია მკვეთრი განათება, რაც მაგიდის ზედაპირზე იწვევს მწველ სხივებს. სწორედ აქ გვხვდება გზები EDSSD*L, რომელიც განსაკუთრებულ პრობლემას წარმოადგენს ცალმხრივი გზების მიდებნების

მეთოდისთვის. ნებისმიერი გზა, რომელიც ბოლოვდება DS*D*L გამოსახულებით, არის პრობლემატური ამ მეთოდისთვის. რადგან პირველი D ზედაპირიდან მეორე D ან E ზედაპირის ხილვადობა ვერ მოწმდება შუაში არსებული სპეკულარული ზედაპირის გამო, ამიტომ საჭირო გახდა გზების ორმხრივი მიდევნება.



22 სურათზე ნაჩვენებია თვალისა და განათების გზები და მათ კვანძებს შორის კავშირები რომელთა შემოწმებაც ხდება რათა მოხდეს გადაბმა

გზების ორმხრივი მიდევნების მეთოდი ახდენს სინათლის გადამტანი გზების გენერაციას დაწყებულს როგორც თვალიდან, ასევე განათებიდან. გზებს, რომელიც იწყება თვალიდან, უწოდებენ თვალის გზას (Eye Path), ხოლო რომელიც იწყება განათებიდან, განათების გზას (Light Path). მეთოდი ცდილობს მეღებული თვალის გზის გადაბმას განათების გზასთან, რისთვისაც პირველ რიგში ამოწმებს განათებისა და თვალის გზის კვანძებს შორის ხილვადობას. შესაბამისად გადაბმული გზები აუცილებლად იწყებიან თვალში და მთავრდებიან განათებაზე. ასეთ შემთხვევაში, როგორც ვთქვით, განათების შერჩევა მხოლოდ მანათობელი ზედაპირების მიმართ არ ხდება, არამედ მოწმდება განათებიდან წამოსული გზის კვანძები (რომელიც თავის მხრივ განათებას წარმოადგენს), რაც ეხმარება მეთოდს, გაუმკლავდეს ისეთ პრობლემებს, რომელსაც ცალმხრივი მიდევნებით ეფექტურად ვერ ვჭრით. შესაბამისად DS*D*L გზის სპეკულარულ ზღურბლზე განათება გადმოაქვს განათების გზას და ხილვადობის შემოწმებაც თვალის გზიდან უპრობლემოდ ხდება. მოვიყვანოთ მაგალითი: ვთქვათ გვაქვს ოთახი, რომელშიც ერთად-ერთ განათებას წარმოადგენს ნათურა, რომელიც თავის მხრივ შედგება შუშაში მოქცეული მანათობელი სპირალისგან. ასეთ შემთხვევაში ოთახში განათების დათვლის დროს სპირალის მიმართულებით თუ გავაკეთებთ სხივების შერჩევას ხილვადობის ტესტი ყოველთვის წარუმატებელი იქნება, რადგან სპირალს წინ ეფარება შუშა. ორმხრივი მიდევნების დროს განათებიდან წამოსული გზები გაცდებაინ შუშას და გამოვლენ გარეთ, ამის

შემდეგ თვალის გზებიდან ჩვენ ხილვადობას ძირითადად შევამოწმებთ სწორეთ სპეკულარულ ზედაპირს გარეთ არსებულ კვანძებთან, რაც მოხსნის ჩვენს პრობლემას.

არსებობს გზები, რომლებიც გზების ორმხრივი მიდევნების მეთოდისთვის კვლავ პრობლემად რჩება. მაგალითად, SDS გზების დათვლა ამ მეთოდით ვერ ხერხდება, რადგან ხილვადობის ამოცანას დიფუზიური (D) ზედაპირიდან ეფექტურად ვერცერთი მიმართულებით ვერ ვხსნით.

გზების ორმხრივი მიდევნების მეთოდი ხშირად გვხვება შემოკლებით, ინგლისური შესატყვისის აბრევიატურის სახით: BDPT – Bidirectional Path Tracing.

ვიზუალიზაციის ძრავი Colibri

ჩატარებული სამუშაოები

23სტენფორდის ცნობილი დრაკონის მოდელი Colibri-ში.

ნაშრომზე მუშაობის პროცესში მიმდინარეობდა არსებული მეთოდების საფუძვლიანი შესწავლა, მათი პრაქტიკული დაპროგრამება და მიღებული რეალური შედეგების ანალიზი. ამისათვის შეიქმნა დამოუკიდებელი ვიზუალიზატორი, რომელიც სხვადასხვა ტიპის მოდელების ვიზუალიზაციის საშუალებას იძლევა.

ვიზუალიზატორზე მუშაობის პარალელურად ხდებოდა კომუნიკაცია მსგავს პროდუქტებში მომუშავე, სხვადასხვა კვალიფიკაციის მქონე, სფეციალისტებთან, ხდებოდა მათი რჩევების და მოთხოვნების ანალიზი, რამაც ხელი შეუწყო რენდერერს პროდუტად ჩამოყალიბებაში. რენდერერის პროდუქტად ჩამოყალიბების პროცესში მის სახელს და ლოგოს დიდი მნიშვნელობა აქვს. პროდუქტის პოტენციური მომხმარებლები პირველ ეტაპზე სწორედ მას ეცნობა, რის შემდეგაც იწყებს უშუალოდ პროდუქტთან მუშაობას.

Figure 24სურათზე გამოსახულია კოლიბრის "მომწვანო-მოიისფრო" სახეობა

სამხრეთ ამერიკაში ბინაბრობს მსოფლიოში ყველაზე პატარა ჩიტი, რომელიც თავისი უცნაურად პატარა ზომის და განსაკუთრებული სილამაზის გარდა კიდევ ბევრი საინტერესო თვისებით გამოირჩევა. სისწრაფე, მოქნილობა, ჰაერში უდიდესად ზუსტი და სტაბილური მანევრირების უნარიუნარი(ის ერთადერთი ჩიტია რომელსაც უკან ფრენა შეუძლია) მას ჩვენი პლანეტის მართლაც რომ განსაკუთრებულ ფრინველად აქცევს. ამ ფრინველს ქვია **კოლიბრი**. სწორედ ამ თვისებების გამო რენდერერს დაერქვა "კოლიბრი" (Colibri). პროდუქტისთვის სათანადო ლოგო შესარჩევად ჩატარდა კონკურსი, რომლის შედეგადაც შეირჩა გამარჯვებული ნამუშევარი.

25ლოგო, რომელიც შეირჩა ვიზუალიზატორისთვის, კონკურსის შედეგად. (ლოგოს ავტორი: ნიკა მონასელიძე)

ძირითადი შესაძლებლობები

რენდერერი იღებს სცენის ობიექტებს, განათებას, კამერის პარამეტრებს, რენდერის პარამეტრებს, ითვლის რენდერის განტოლებას ობიექტურად, იტერაციულად და გამოთვლის პროცესის მიმდინარეობის შესახებ ინფორმაციას აძლევს რეგისტრირებულ უკუკავშირის ფუნქციებს. შესაძლებელია გამოთვლების მიმდინარეობის პროცესის შეჩერება, გაგრძელება გამორთვა და ახლიდან დაწყება, რაც საშუალებას აძლევს გარე აპლიკაციას მოახდინოს ინტერაქტიული რენდერი, როდესაც მომხმარებელი თვალს ადევნებს გამოთვების მიმდინარეობას და ხედავს თუ როგორ უახლოვდება მიმდინარე გამოთვლილი შედეგი რეალურს. აქვს საშუალება კამერის პარამეტრების(პოზიცია, ორიენტაცია, გაშლის კუთხე, საფოკუსე მანძილი, ...) ცვლილების, რომლის დროსაც ავტომატურად ხდება გამოთვლის პროცესის შეჩერება და თავიდან გაშვება. გამოსახულების გამოთვლის ნებისმიერ დროს მომხმარებელს შეუძლია არსებული გამოსახულების შენახვა ფაილურ სისტემაში. მას ასევე ბევრი დამატებითი პარამეტრის კონტროლის საშუალება კონტექსტური მენიუდან.

გამოთვლითი პროცესი მთლიანად მიმდინარეობს ცენტრალურ პროცესორზე, პარალელურ ნაკადებში. მომხმარებელს აქვს საშუალება მიუთითოს დატვირთვის პროცენტული მაჩვენებელი, რის საფუძველზეც რენდერერი მოახდენს პროცესორის შესაბამისად დატვირთვას.

პრაქტიკული შედეგები

პირველ რიგში მომზადდა პროექტზე სამუშაოდ აუცილებელი პროგრამული ინფრასტრუქტურა. შეიქმნა საჭირო ობიექტები წრფივი ალგებრიდან(ვექტორები, მატრიცები,...) და სხვადასხვა ტიპის მათემატიკური ფუნქციონალი, ასევე მომზადდა სხვადასხვა ფორმატის გამოსახულების ჩამტვირთველი/ჩამწერი, სამკუთხა მეშის ჩამტვირთველი, BVH, ..., რამაც შემდგომში გაამარტივა პროექტზე მუშაობის პროცესი.

მოხდა SAH BVH-ის დაპროგრამება, რომელსაც შეუძლია იმუშაოს ზოგადი, უცნობი ტიპის პრიმიტივთან. ვიზუალიზატორის ბირთვში BVH-ის გამოყენება ხდება 2 დონეზე: სამკუთხა მეში იყენებს მას სამკუთხედების შესანახად და ასევე სცენის ობიექტები თავისმხრივ ინახებიან BVH-ში, მათ შორის სამკუთხა მეშიც. მოხდა BVH-ის დალაგებული შემოვლის დაპროგრამება, რათა მალე მოხდეს ყველაზე ახლო თანაკვეთის პოვნა და თავიდან ავიცილოთ ყველა იმ თანაკვეთის დათვლა, რომელიც სხივის გასწვრივ გვხვდება. (იხილეთ ქვედა სურათი)

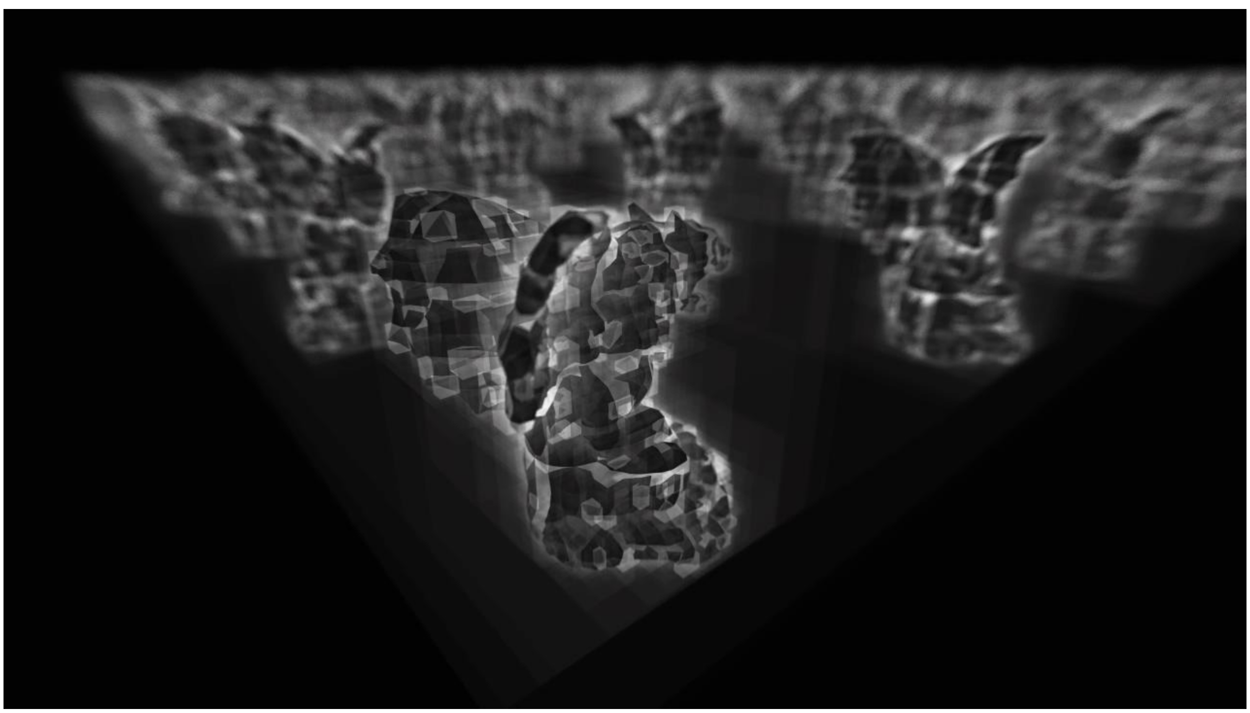


Figure 26სურათზე ნაჩვენებია სხივების მიდევნების დროს, SAH BVH-ის დალაგებული შემოვლილის პროცესში, შემოვლილი კვანძების რაოდენობა ინტენსიობის სახით. სურათზე კარგად ჩანს კვანძების შესაბამისი შემომსაზღვრელი ყუთები.

გაკეთდა სამკუთხა მეშის Wavefronf Obj ფორმატის ფაილიდან(*.obj გაფართოვების ფაილები) ჩამტვირთველი, რომელიც თანმიმდევრულად ტვირთავს მთელ ფაილს და ჩატვირთვის პროცესში გაწვდის როგორც მონაცემებს, ასევე

ინფორმაციას თუ რა ნაწილია ამ ეტაპზე ჩატვირთული. ჩამტვირთველს შეუძლია იმუშაოს, როგორც მთავარ ნაკადში ასევე კონკურენტულში.

პირველ ეტაპზე მოხდა ცალმხრივი გზების მიდევნების პროგრამული განხორციელება, რომელიც ახდენდა თანაბარი რაოდენობის გზების აგებას თითოეული პიქსელისთვის. ამ ეტაპზე ხდებოდა მხოლოდ BSDF-ის შერჩევით ობიექტის ზედაპირებზე არეკვლა, რისი საშუალებითაც ჩავდიოდით სიღრმეში, ვაგებდით გზებს და ვხსნდით რენდერის განტოლებას მიუკერძოებლად. როგორც ზემოთ აღინიშნა, ამ მეთოდით ძალიან დიდი დრო ჭირდება ხმაურის შემცირებას იმ სცენებში, სადაც არის მცირე ზომის მკვეთრი განათებები, ამიტომ შემდეგ ეტაპზე დაემატა გზის ყოველი კვანძისთვის განათების დამატებით შერჩევის საშუალება, რამაც მკვეთრად შეამცირა ხმაური კონკრეტულ სცენებში. ქვემოთ მოცემულია შედარება ამ ორ მეთოდს შორის, სადაც კარგად ჩანს განსხვავება. სცენაში არის ერთი ანალიტიკური სფერო, ერთი ანალიტიკური საკოორდინატო სიბრტყეების პარალელური სიბრტყე, ერთი სამკუთხა მეში(იკოსაედრი), ორი სხვადასხვა ფერის და ინტენსივობის სფერული განათება. ორივე შემთხვევაში რენდერის დრო არის დაახლოებით თანაბარი.

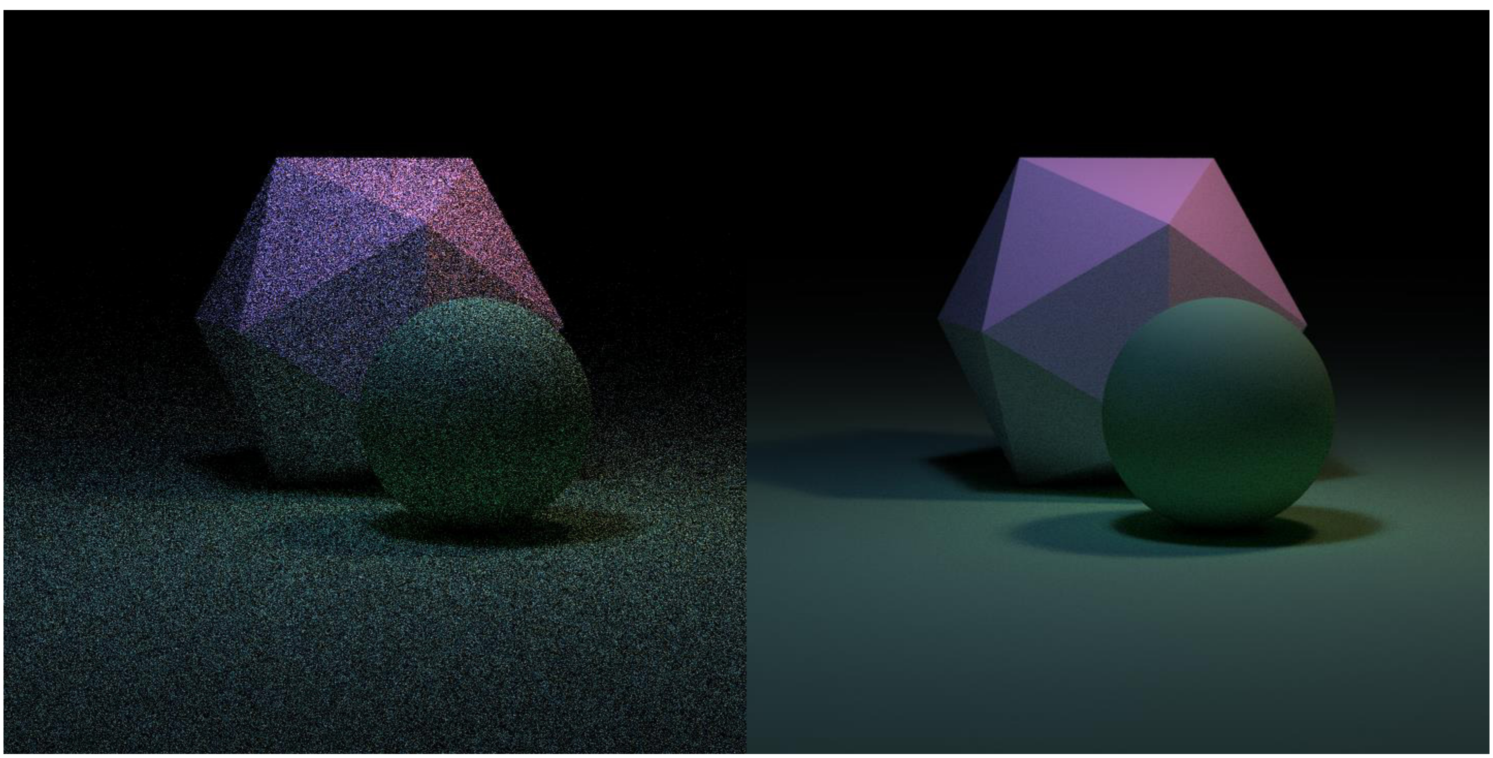
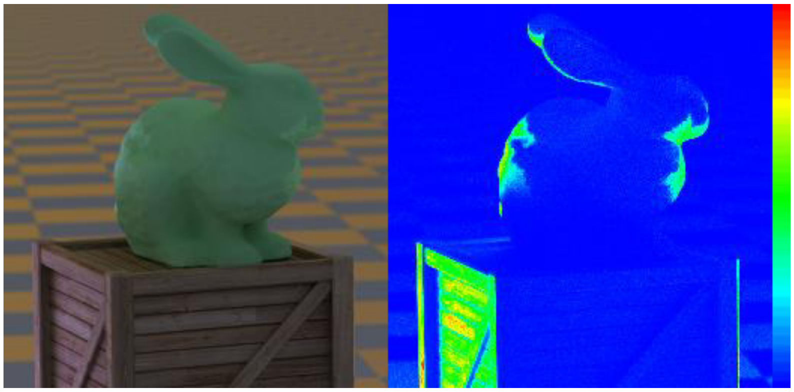


Figure 27სურათზე ნაჩვენებია რენდერი მხოლოდ BRDF-ის შერჩევით(მარცხენა) და განათების დამატებით შერჩევის გზით(მარჯვენა)

რენდერის პროცესში, სხვადასხვა მიზეზების გამო, სასურათე სიბრტყეზე ხმაური თანაბრად არ ნაწილდება, რაც იწვევს იმას, რომ როდესაც ჩვენ ვითვლით პიქსელებში

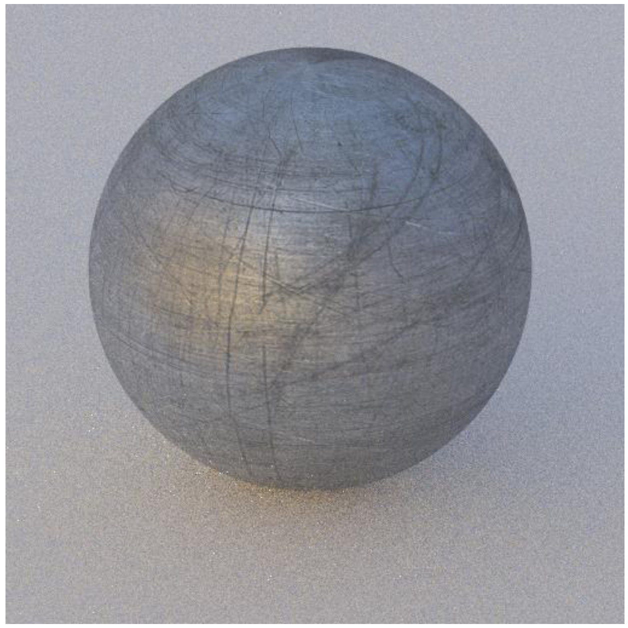
თანაბარი რაოდენობის შერჩევებს, გამოსახულების ზოგ ადგილზე ხმაური სუფთავდება, ხოლო ზოგგან კვლავ შესამჩნევი რჩება. ხმაურისგან სრულად თავისუფალი გამოსახულების მისაღებად გვიწევს დიდი ხანი ლოდინი. ამიტომ დაემატა დამატებითი საშუალება, რომ მოხდეს დისპერსიის ანალიზი და შერჩევების რაოდენობა თითოეულ პიქსელში გავხადოთ ადაპტური. მოვახდინოთ მეტი შერჩევები სურათის იმ ნაწილში, სადაც დიდია ხმაური, რათა სურათი თანაბრად გასუფთავდეს.



28მარცხენა სურათზე ნაჩვენებია ცნობილი სტენფორდის კურდღელის მოდელი. მარჯვენა სურათი უჩვენებს პიქსელში შერჩევების რაოდენობას გარდამავალი ფერების სახით.

გაკეთდა გადარჩეული მნიშვნელოვნობით შერჩევის პროგრამული განხორციელება, გარემოს განათებიდან პირდაპირი განათების დათვლის პროცესში ხმაურის შესამცირებლად. ამ მიმართულებით კვლევები ჯერ კიდევ მიმდინარეობს, თუმცა საინტერესო შედეგები მივიღეთ. (შეგიძლიათ ნახოთ *გადარჩეული მნიშვნელოვნობით შერჩევა*)

შეიქმნა კონფიგურირებადი მატერიალების სისტემა, რომელიც საშუალებას იძლევა შევქმნათ სხვადასხვა ტიპის მატერიალები, მათი კომბინაციები და შევუსაბამოთ ისინი სასურველ ზედაპირს. თითოეულ მატერიალზე შესაძლებელია მიეთითოს მახასიათებელი როგორც ერთი, ასევე განსხვავებული ზედაპირის სხვადასხვა წერტილებისთვის ტექსტურის სახით.



29ანალიტიკური სფერო კომბინირებული მატერიალით

სურათზე ნაჩვენებია ანალიტიკური სფერო დიფუზიური და სპეკულარული მატერიალების კომბინაციით. შერევის კოეფიციენტი, ისევე როგორც თავად დიფუზიური და სპეკულარული კომპონენტები მითითებულია ტექსტურის სახით.

კოლიბრი საშუალებას იძლევა, რომ შეიქმნას არსებული გეომეტრიული ობიექტების სასურველი რაოდენობის მითითება. ეს საშუალებას გვაძლევს ვიზუალურად დავტვირთოთ სცენა გეომეტრიული ობიექტებით, თუმცა მეხსიერებაში შევინახოთ მხოლოდ ერთი. ეს ძალიან ხელსაყრელია ისეთი სცენებისთვის, სადაც დიდი რაოდენობის მსგავსი ობიექტები გვხვდება, მაგალითად: ბალახებით, ხეებით დაფარული დიდი მინდორი.

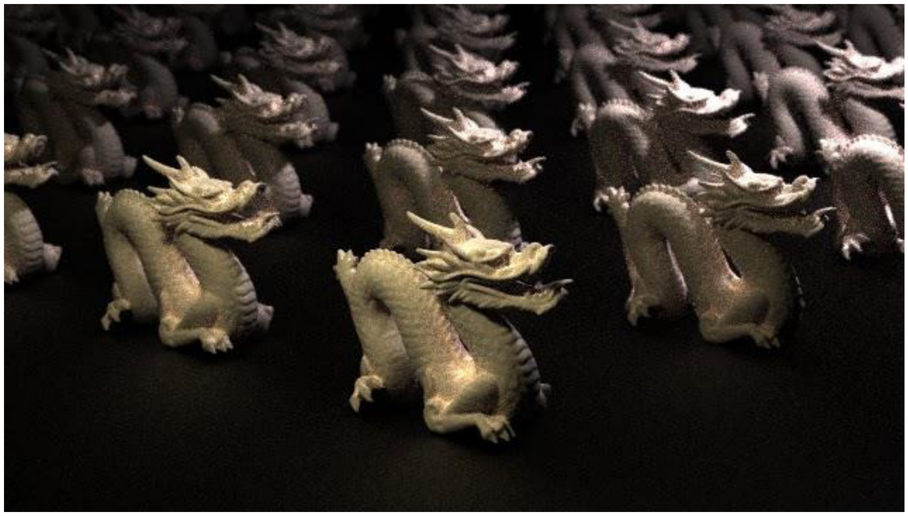


Figure 30 გეომეტრიული ობიექტების მითითებები Colibri-ში

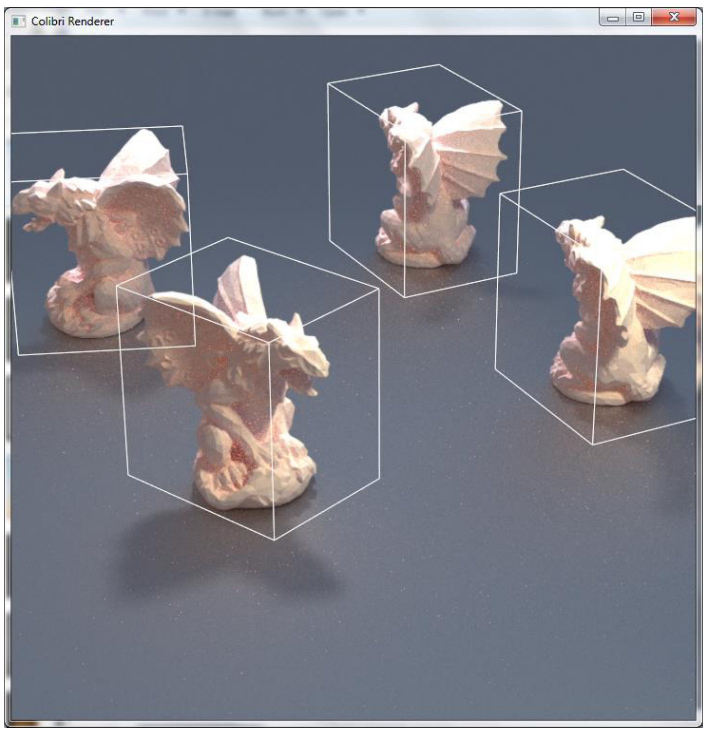


Figure 31სურათზე ნაჩვენებია სამკუთხა მეშის 4 მითითება Colibri-ში, რომლებიც სხვადასხვა საკოორდინატო სისტემაში იმყოფებიან. თეთრად არის ნაჩვენები მათი შემომსაზღვრელი ყუთები.

პირველ ეტაპზე Colibri, განათების დათვლის პროცესში, ახდენდა გარბენას თითოეულ პიქსელზე და მათთვის აგებდა სხივს, ითვლიდა თანაკვეთას, ითვლიდა არეკლილ სხივს ისევ თანაკვეთას და ასე ჩადიოდა სიღრმეში რეკურსიულად და ამოჰქონდა ფერი. ეს პროცესი სიღრმეში ძებნას გავს, დადებითი თვისება ისაა, რომ ოპერატიული მეხსიერებას მინიმალურად იყენებს, რადგან მეხსიერებაში უჭირავს მხოლოდ ერთი გზა(რომელსაც ითვლის მიმდინარე მომენტში). ასეთი ტიპის, ღრმა რეკურსიული, გამოთვლების გაპარალელება შიდა თუ გარე გამომთვლელ

მოწყობილობაზე რთული პროცესია, რადგან მოითხოვს მთელი შიდა პროგრამული ინფრასტრუქტურის გადატანას შესაბამის მოწყობილობაზე.

ასევე მნიშვნელოვანი საკითხია გამოთვლების და მონაცემების კოჰერენტულობა(მსგავსება). როგორც ზემოთ ვთქვი, ღრმა რეკურსიული ტიპის გამოთვლითი პროცესი, რომლის ყოველ მომდევნო ეტაპზე გვხვდება ერთმანეთისგან განსხვავებული მონაცემები და ინსტრუქციები, ამცირებს გამომთვლელი მოწყობილობის მონაცემების და ინსტრუქციების კეშის ეფექტურობას.

სწორედ ამ მიზეზების გამო გაკეთდა ძირეული ცვლილებები რენდერის გამომთვლელ ნაწილში. ცვლილებების მთავარი იდეა მდგომარეობს შემდეგში: იმის მაგივრად, რომ ყოველი პიქსელისთვის თანმიმდევრულად ჩავიდეთ სიღრმეში და ამოვიტანოთ ფერი, მოხდეს ამ პროცესის გადაწყობა განივად.

გამოთვლითი პროცესი ასე გამოიყურება:

1. ვითვლით კამერიდან წამოსულ სხივებს ყველა პიქსელისთვის.
2. სხივებისთვის ვითვლით თანაკვეთებს და რუსული რულეტკის მეთოდით ვწყვეთ გავწყვიტოთ თუ არა გზა ამ კვანძზე.
3. brdf-ის გამოყენებით ვითვლით ზედაპირზე არეკლილ/გატარებულ სხივებს.
4. ვბრუნდებით მე-2 ეტაპზე.
5. თითოეული პიქსელისთვის ჩავდივართ უკვე გამოთვლილ, შენახულ გზებში, მისი კვანძებისთვის ვითვლით პირდაპირ განათებებს(თუ საჭიროა) და უკან ამოგვაქვს საბოლოო ფერი პიქსელისთვის.

ახალი ტიპის გამოთვლითი პროცესი, წისანთან შედარებით, მოითხოვს დამატებით მეხსიერებას, რადგან ინახავს განათების გადამთან გზებს ყველა პიქსელისთვის. თუმცა წინა ვარიანტთან შედარებით ბევრი პლიუსი გააჩნია:

პირველი, ერთერთი მთავარი დადებითი თვისება არის ის, რომ მსგავსი გამოთვლები მოექცა ერთმანეთის მიყოლებით(სხივების გენერაცია, თანაკვეთების დათვლა, განათებების დათვლა) რაც გვაძლევს საშუელებას, რომ ბევრად უფრო უმტკივნეულოდ გავითანოთ თითოეული ეს ეტაპი პარალელურ გამომთვლელზე, იქნება ეს CPU-ზე დაფუძნებული თუ GPU-ზე. იზრდება SIMD ეფექტურობა, გამომთვლელი მოწყობილობის მონაცემების და ინსტრუქციების კეშის გამოყენების

ეფექტურობა, შეგვიძლია პაკეტებად რენდერის ორგანიზება. ასეთი ტიპის რენდერის დროს ძალიან ადვილად ხდება რენდერის შრეების(დიფუზიური, სპეკულარული, ალფა, ნორმალების, ...) ცალ-ცალკე დაყოფა რაც საკმაოდ მოთხოვნადი და შესაბამისად მნიშვნელოვანი საკითხია. ასევე შიდა გამოთვების გაპარალელება საშუალებას იძლევა უფრო მალე მივიღოთ პირველი გამოსახულება. უფრო მეტიც, ამ არქიტექტურით, მე-5 ეტაპზე, როდესაც ხდება გზებში ჩასვლა და იქიდან განათების ამოტანა, შესაძლებელია უკუკავშირის ასაჩქარებლად ჩასვლის სიღრმის კონტროლიც რაც კიდევ უფრო შეუწყობს ხელს ინტერაქტიულ რენდერს, რომელიც დღესდღეობით ძალიან მოთხოვნადია.

სამომავლო განვითარების გეგმები

ნაშრომზე მუშაობის პროცესში საკმაოდ დიდი მოცულობის თეორიული მასალა საფუძვლიანად იქნა შესწავლილი და დამუშავებული, თუმცა ყოველი მათგანის პრაქტიკული განხორციელება(დაპროგრამება) ამ ეტაპისთვის ვერ მოხერხდა, ამიტომ სამომავლოდ კვლევა უნდა გაგრძევლედ საკითხების კიდე უფრო ღრმად შესასწავლად, რასაც თან უნდა ახლდეს შესაბამისი პრაქტიკული იმპლემენტაციები. უნდა მოხდეს *გზების ორმხრივი მიდევნების*(BDPT) პროგრამული განხორციელება, რის შემდგომაც მიზანშეწონილია მეტროპოლისის სინათლის თრანსპორტირების(MLT) გაკეთებაც, სხვადასხვა ტიპის მუტაციის სტრატეგიებით, რათა გამოსახულებაში ხმაურის შემცირების დამოკიდებულება სცენის სირთულეზე შემცირდეს და რენდერერი მეტად გამოყენებადი გახდეს.

უნდა გაგრძელდეს კვლევები და პროგრამული განხორციელებები ამაჩქარებელი სტრუქტურების გარშემო. პირველ რიგში იგეგმება *სივრცული შემომსაზღვრელი ყუთების იერარქიის* დაპროგრამება, მაქსიმალურად მაღალი ხარისხის ხის მისაღებად, რომელიც გამოყენებაც მოხდება სცენის სტატიკური ობიექტებისთვის.

ასევე, ერთერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი და პრიორიტეტული საკითხი არის გამოთვლითი პროცესის გაპარალელება არსებულ გრაფიკულ პროცესორებზე, რომელთა არქიტექტურაც სხვადასხვა ტიპისაა და განსხვავდება ცენტრალური პროცესორის არქიტექტურისგან, რის გამოც ეს საკითხი დამატებით დამუშავებას მოითხოვს.

ჩატარებული სამუშაოების ანალიზი და შედეგების შეჯამება

როდესაც ხდება მომხმარებლის მოთხოვნების ჩამოყალიბება და ანალიზი რეალისტური გრაფიკის კუთხით უნდა გვესმოდეს, რომ გამოთვლითი პროცესის სირთულე და კომპლექსურობა პროგრამული პროდუქტს გერეთ არ უნდა ჩანდეს. საბოლოო პროგრამული პროდუქტი უნდა იყოს მარტივად აღქმადი, ინტუიტიური და ადვილად მოსახმარი. რაც შეეხება ხარისხს, ამ მხრივ მომხმარებლის მოთხოვნებს საზღვარი არ აქვს, ამიტომ მაქსიმალურად რეალისტური გამოსახულების მიღების ყველაზე ბუნებრივ საშუალებას ფიზიკური სიმულაცია წარმოადგენს. როგორც ზედა თავში ითქვა, თეორიული კვლევების პარალელურად ჩატარებული პრაქტიკული სამუშაოები საკმაოდ ფართო და მაშტაბურია. ყველაზე მნიშვნელოვანი არის ის ფაქტი, რომ ყველა ეს შექმნილი პრაქტიკული პროგრამული პაკეტი შეიკრა ერთად და საფუძველი ჩაეყარა რეალურ პროდუქტს, "Colibri"-ს. Colibri ჯერ კიდევ აქტიური განვითარების პროცესშია და მისი, როგორც პროდუქტის შეფასება რთულია, თუმცა ის შესაძლებლობები, რაც მას ამ დროისთვის გააჩნია გვაძლევს წარმოდგენას მის სამომავლო სახეზე.

გამოყენებულ ლიტერატურათა ნუსხა

- E. VEACH. 1997. Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation. PhD thesis, Standford Univeristy.
- E. VEACH AND L. J. GUIBAS. 1997. Metropolis light transport. In SIGGRAPH ’97.
- J. BIKKER. Ray Tracing In Real-Time Games. PhD thesis, Delft Univeristy of technology.
- B.SEGOVIA, J.C.IEHL AND B.PEROCHE. Coherent Metropolis Light Transport with Multiple-Try Mutations.
- M. COLBERT, S. PROMOZE AND G. FRANCOIS. Importance Sampling for Production Rendering. 2010 SIGGRAPH Course.
- K. Crane. 2006. Importance Sampling for Monte Carlo Ray Tracing.
- J.F. TALBOT. 2005. Importance Resampling for Global Illumination. Master's thesis, Brigham Young University.
- D.CLINE AND P.EGBERT. 2005. A Practical Introduction to Metropolis Light Transport. Brigham Young University.
- B.J. NEKOLA. 2011. Software library for reflectance functions. Master's thesis, Czech Technical University
- Y.GU, Y.HE, K. FATAHALIAN AND G.BLELLOCH. Efficient BVH Construction via Approximate Agglomerative Clustering. Carnegie Mellon University.
- M.STICH, H.FRIEDRICH NAD A.DIETRICH. Spatial Splits in Bounding Volume Hierarchies. NVIDIA Research.
- T.KARRAS, T.AILA. Fast Parallel Construction of High-Quality Bounding Volume Hierarchies. NVIDIA Research.
- F. PELLACINI. 2009. Rendering Equation.
- M. ANDERSSON. 2012. Bounding Volume Hierarchy. Seminar.
- J.ARVO, P.DURTE, A.KELLER, H.W.JENSEN, A.OWEN, M.PHARR, P.SHIRLEY. SIGGRAPH 2003 Course 44.