

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 4796

Sinteza zvuka temeljena na sudaru tijela u virtualnom okruženju

Ivan Sičić

Zagreb, lipanj 2017.

Zagreb, 3. ožujka 2017.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 4796

Pristupnik: **Ivan Sičić (0036478798)**
Studij: Računarstvo
Modul: Računarska znanost

Zadatak: Sinteza zvuka temeljena na sudaru tijela u virtualnom okruženju

Opis zadatka:

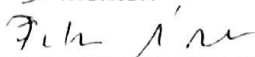
Proučiti načine generiranja zvuka pri sudaru objekata u virtualnom okruženju. Obratiti pažnju na različite materijale, fizikalna i akustička svojstva objekata. Realizirati generiranje zvuka pri sudaru objekata načinjenih iz različitih materijala i različitih akustičkih svojstava. Na različitim primjerima prezentirati ostvarene rezultate. Diskutirati utjecaj parametara. Načiniti ocjenu rezultata i implementiranih algoritama.

Izraditi odgovarajući programski proizvod. Koristiti grafički programski alat Unity. Rezultate rada načiniti dostupne putem Interneta. Radu priložiti algoritme, izvorne kodove i rezultate uz potrebna objašnjenja i dokumentaciju. Citirati korištenu literaturu i navesti dobivenu pomoć.

Zadatak uručen pristupniku: 10. ožujka 2017.

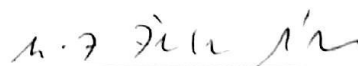
Rok za predaju rada: 9. lipnja 2017.

Mentor:



Prof. dr. sc. Željka Mihajlović

Predsjednik odbora za
završni rad modula:



Prof. dr. sc. Siniša Srblić

Djelovođa:



Doc. dr. sc. Tomislav Hrkać

Hvala prijateljima i mentorici prof. dr. sc. Željki Mihajlović na pomoći i stalnoj potpori u procesu izrade završnog rada. Bez vas ne bih mogao završiti.

SADRŽAJ

Popis slika	v
1. Uvod	1
2. Osnove zvučnih signala	3
2.1. Vremenska i frekvencijska domena	3
3. Sinteza zvuka temeljena na uzorku	6
3.1. Analiza zvuka	6
3.1.1. Digitalni prikaz zvuka	6
3.1.2. Fourierova analiza	7
3.2. Aditivna sinteza	9
3.3. Ponovna sinteza zvuka	11
3.3.1. Sinteza spektralnim modeliranjem	11
4. Sinteza zvuka temeljena na fizičkom modelu tijela	13
4.1. Izračunavanje matrica sustava	13
4.2. Modalna analiza	15
4.3. Modalna sinteza	16
4.4. Modalna sinteza zvuka vođena primjerom	18
5. Implementacija ponovne sinteze zvuka	19
5.1. Korištene tehnologije	19
5.2. Analiza zvuka u programskom jeziku Chuck	19
5.3. Sinteza zvuka u okruženju Unity	20
6. Zaključak	24
Literatura	25

POPIS SLIKA

1.1. Isječak iz računalne igre Days Gone [7]	2
2.1. Graf valnog oblika u vremenskoj domeni [11]	3
2.2. Prikaz valnog oblika koji sadrži samo osnovnu frekvenciju u vremen- skoj domeni (lijevo) i preslikavanje u frekvencijsku domenu (desno) [8]	4
2.3. Prikaz valnog oblika koji sadrži osnovnu frekvenciju i jedan harmonik (lijevo) i preslikavanje u frekvencijsku domenu (desno) [8]	5
2.4. Prikaz valnog oblika koji sadrži više frekvencija, u vremenskoj i frek- vencijskoj domeni [8]	5
3.1. Prikaz uzorkovanja analognog signala [4]	7
3.2. Prikaz vremenskog preklapanja pri uzorkovanju [6]	8
3.3. Prikaz kvantiziranja jačine signala [3]	8
3.4. Prikaz digitalnog signala [3]	9
3.5. Prikaz zbrajanja dvaju signala osnovnih valnih oblika [14]	10
3.6. Iscrtavanje vremenski promjenjivog spektra [18]	10
3.7. Prikaz dijagrama toka ponovne sinteze [18]	11
3.8. Pregled metode SMS [5]	12
4.1. Dijagram toka sinteze zvuka temeljene na fizičkom modelu tijela [15]	14
4.2. Tetraedar iz mreže [20]	15
4.3. Prigušeni oscilator [20]	16
4.4. Pregled rada sustava za sintezu zvuka vođenog primjerom [17]	18
5.1. Programski kod koji se poziva pri sudaru	21
5.2. Programski kod aditivne sinteze	22
5.3. Prikaz dijagrama toka ponovne sinteze	23
5.4. Scena za demonstraciju rješenja [4]	23

1. Uvod

Osjetila ljudima omogućavaju poimanje okoline u kojoj se nalaze. Reakcijama na podražaje koje osjetila primaju, ljudi oblikuju svijet oko sebe i iskazuju svoje instinktivne ili naučene sposobnosti. Time su osjetila usko vezana uz ono što činimo i kako shvaćamo događaje oko nas. Osjetilo zvuka nam pomaže nadopuniti informacije koje nam pruža najistančanije ljudsko osjetilo – vid. Zato se ne iznenadimo kada auto prođe pored nas, iako ga samo pomoću osjetila vida ne bismo primijetili. Dva odvojena sustava, vid i sluh se međusobno nadopunjavaju i ta dva odvojena sustava se funkcionalno stapaju kako bi pružila neprekinuti doživljaj okoline.

Jedan on glavnih ciljeva područja računalne grafike je realističan i uvjerljiv prikaz virtualnih okruženja. Metode prikaza takvih scena su se uvelike razvile u zadnjih nekoliko desetljeća, a sklopovlje popratilo računalnu snagu potrebnu za provođenje sve većih i detaljnijih virtualnih okruženja i zahtjevnijih metoda za realizaciju prikaza. Rezultat tog napretka vidljiv je u grafičkom realizmu računalne igre *Days Gone* (Slika 1.1).

S druge strane, zvučni efekti u virtualnim okruženjima nisu održali korak s napretkom tehnologije prikaza usprkos iznimnom značaju zvuka u nastojanju stvaranja uvjerljivih okruženja. U stvaranju sadržaja koji nisu interaktivni, poput filmova, svaki željeni zvuk se može snimiti, obraditi i provjeriti uklapa li se uspješno u vizualnu komponentu sadržaja. Inženjeri zvuka skoriste upravo ovu tehniku u ostvarivanju ugođaja filma, a slične tehnike se koriste i u izradi proizvoda koji sadrže interaktivna virtualna okruženja, poput računalnih igara i simulatora. Takav pristup često luči loše rezultate zbog brojnih i često nepredvidivih reakcija objekata u takvim okruženjima, inženjeri zvučnih efekata ne mogu napraviti toliku bazu zvučnih zapisa, a memorija računala ju teško može pohraniti [16].

U ostvarivanju zvučne, a time i ukupne realističnosti virtualnog okruženja pristupa se tehnikama koje dinamički određuju zvuk koji je potrebno reproducirati, čime se smanjuje memorijska zahtjevnost audio sustava i smanjuje potreba za predviđanjem situacija u kojima međudjeluju objekti virtualnog okruženja.



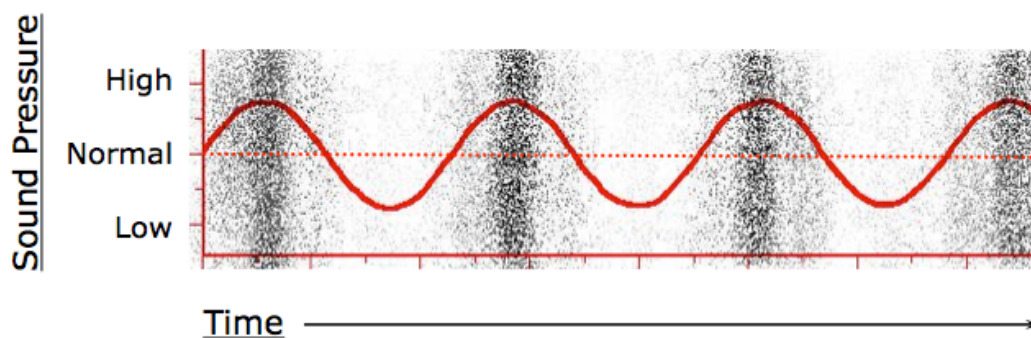
Slika 1.1: Isječak iz računalne igre Days Gone [7]

2. Osnove zvučnih signala

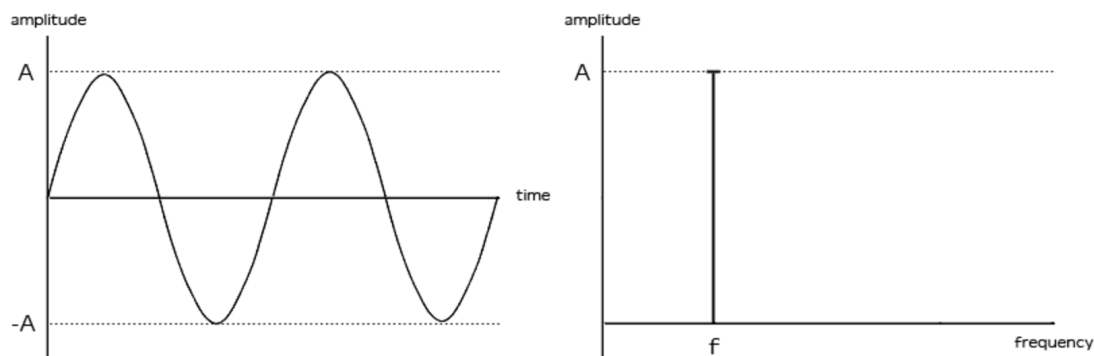
Zvuk čine promjene tlaka ili položaja čestica koje se prenose kroz sredstvo u obliku mehaničkog vala. Do ljudskog uha zvuk dopire stvaranjem i propagiranjem promjena u tlaku zraka, uzrokovanih titranjem izvora zvuka. Titranje, a time i nastali valni oblik zvuka može biti periodično, ako se valni oblik ponavlja u vremenu, i neperiodično, čime nastaje zvuk u obliku šuma. Također, mogu se javljati i valni oblici koji su između ovih krajnosti, što je čest slučaj pri radu sa zvučnim efektima. Osnovna frekvencija valnog oblika zvuka je definirana brojem ponavljanja valnog oblika u sekundi [19].

2.1. Vremenska i frekvencijska domena

Valni oblik zvučnog signala možemo iscrtavati na grafu na kojem je vrijeme na apscisi, a tlak zraka na ordinati, kao što je prikazano na slici 2.1. Zbog ovisnosti tlaka prijenosnog sredstva o vremenu ovakvo predstavljanje valnog oblika nazivamo prikazom u vremenskoj domeni. Točke s većom vrijednosti na ordinati grafa predstavljaju veći tlak, a one s manjom vrijednosti predstavljaju manji tlak sredstva. Iznos najvećeg apsolutnog odstupanja od normalne vrijednosti tlaka utvrđuje amplitudu valnog oblika, koja predstavlja količinu promjene tlaka.



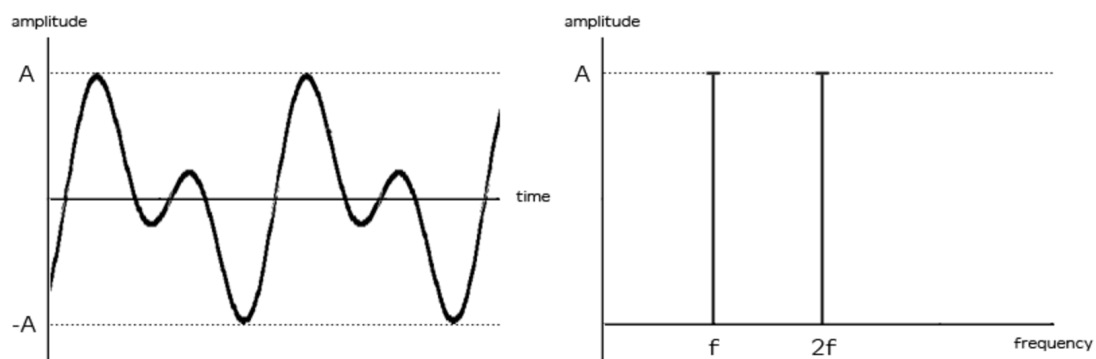
Slika 2.1: Graf valnog oblika u vremenskoj domeni [11]



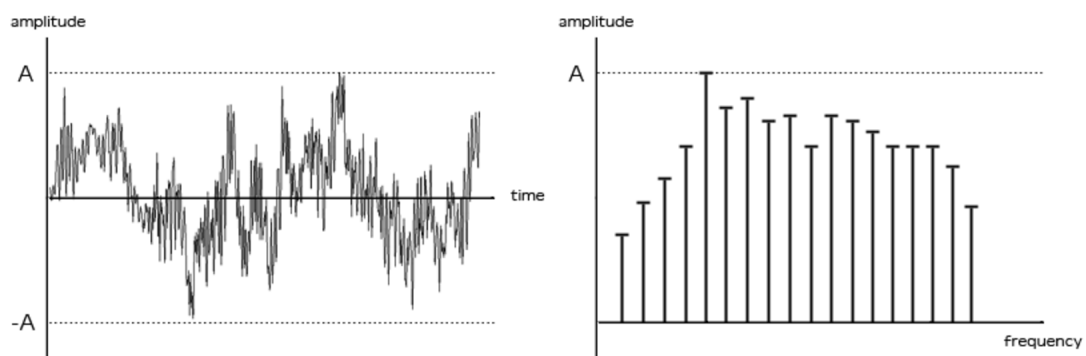
Slika 2.2: Prikaz valnog oblika koji sadrži samo osnovnu frekvenciju u vremenskoj domeni (lijevo) i preslikavanje u frekvencijsku domenu (desno) [8]

Frekvencijska domena prikazuje sastav valnog oblika po frekvencijama i njihovim amplitudama. Osim osnovne frekvencije, valni oblik zvučnog signala može sadržavati i ostale, više frekvencije. Ako su te frekvencije višekratnici osnovne frekvencije nazivaju se harmonicima, a u općem slučaju parcijalne frekvencije. Parcijalne frekvencije možemo iscrtavati na grafu koji na apscisi prikazuje frekvencije, a na ordinati amplitudu određene frekvencije. Slika 2.2 prikazuje preslikavanje sinusoidalnog valnog oblika koji sadrži samo jednu, osnovnu frekvenciju, u prikaz u frekvencijskoj domeni. U tom će slučaju prikaz u frekvencijskoj domeni sadržavati samo jednu točku na apscisi s pripadnom amplitudnom vrijednosti.

Ako valni oblik sadrži više frekvencija, prikaz u frekvencijskoj domeni također sadrži više točaka u prikazu u frekvencijskoj domeni. Primjer iscrtavanja valnog oblika s osnovnom frekvencijom i jednim harmonikom u vremenskoj i frekvencijskoj domeni prikazuje slika 2.3. Vizualizacija zvuka prikazom u frekvencijskoj domeni jasnije pokazuje što zapravo sačinjava valni oblik. U slučaju još složenijih valnih oblika, s mnogo parcijalnih frekvencija različitih amplituda, prikaz u vremenskoj domeni bi bio vrlo težak za iščitati (Slika 2.4).



Slika 2.3: Prikaz valnog oblika koji sadrži osnovnu frekvenciju i jedan harmonik (lijevo) i preslikavanje u frekvencijsku domenu (desno) [8]



Slika 2.4: Prikaz valnog oblika koji sadrži više frekvencija, u vremenskoj i frekvencijskoj domeni [8]

3. Sinteza zvuka temeljena na uzorku

Čest problem u računalnim igrama i ostalim uporabama interaktivnog virtualnog okruženja je ponavljanje istih snimljenih zvukova, što dovodi do gubljenja uvjerljivosti zvučne sastavnice medija i gubljenja realističnosti ukupnog doživljaja. Kako bi se ostvario prividan realizam i omogućilo stapanje osjetilnih podražaja u konzistentno iskustvo, moguće je iskoristiti jednostavnu tehniku izmjene karakteristika snimljenih zvukova. Time je očuvana srž originalnog zvuka i izbjegnuta repetitivnost reproduciranja istih zvukova. Također je i rješenje problema memorijske zahtjevnosti audio sustava.

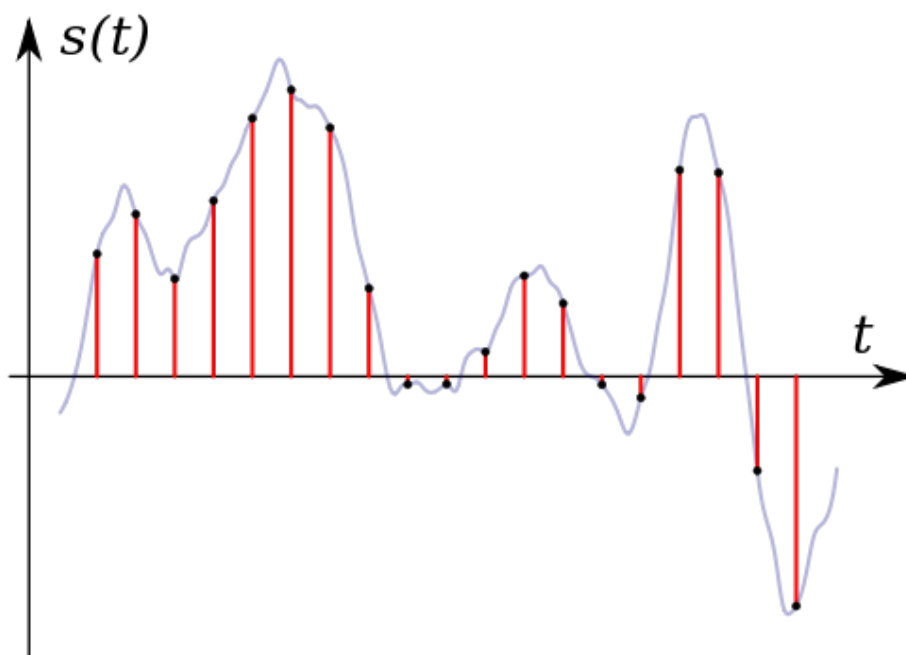
3.1. Analiza zvuka

Analiza zvuka daje informacije o svojstvima određenog zvuka, poput frekvencija koje sačinjavaju zvuk, njihovim amplitudama i opadanju amplituda u vremenu. Ove informacije omogućuju daljnje modifikacije. Kako bismo mogli računalom obraditi zvuk, važno je pohraniti ga u digitalnom obliku.

3.1.1. Digitalni prikaz zvuka

Pohranjivanje zvuka u oblik pogodan računalnoj obradi zahtijeva pretvorbu kontinuiranog signala u signal koji je diskretan po vremenu. Pri snimanju zvuka, određuje se uzorak zvučnog signala u određenim vremenskim trenutcima. Ovaj postupak naziva se uzorkovanje, prikazan na slici 3.1.

Kako ne bi došlo do gubljenja informacija o signalu uzorkovanje je potrebno obavljati frekvencijom uzorkovanja dvostruko većom od najviše frekvenciju u zvučnom signalu. Raspon frekvencija koje ljudi čuju je između 20 Hz i 22050 Hz i stoga bi frekvencija uzorkovanja trebala biti barem 44100 Hz. Kada bi frekvencija uzorkovanja bila manja, primjerice 20000 Hz, komponente zvučnog signala frekvencije veće od 10000 Hz uzrokovale bi vremensko preklapanje, čime bi te frekvencije postale nerazlu-



Slika 3.1: Prikaz uzorkovanja analognog signala [4]

čive. Na slici 3.2 vidljiv je gubitak informacije koju daje visoka frekvencija uzrokovan niskom frekvencijom uzorkovanja.

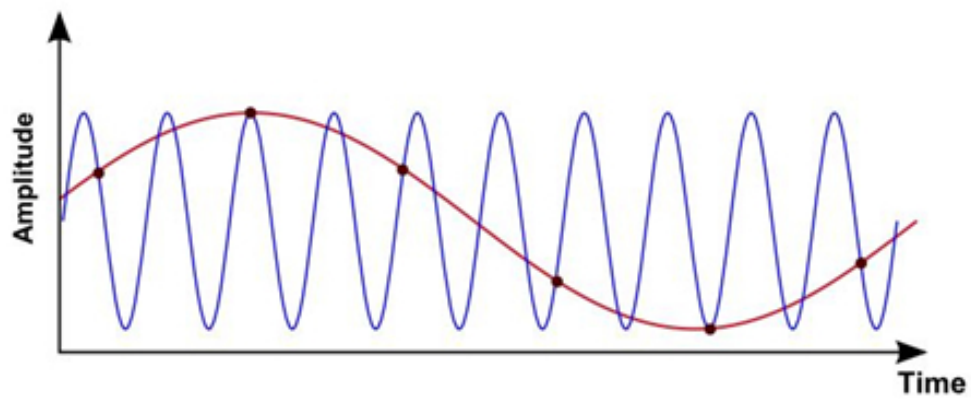
Pri pretvorbi signala u digitalni oblik bitno je i predstavljanje jačine signala u obliku pogodnom računalu. Postupkom kvantizacije vrijednosti jačine signala se zakružuju na diskretne vrijednosti koje se mogu obrađivati računalom (Slika 3.3). Kvantizirane vrijednosti su aproksimirane vrijednosti pravog signala te je zbog toga bitno kvantizaciju provoditi s dovoljno velikim rasponom vrijednosti u koje se signal može preslikati kako ne bi došlo do gubitka kvalitete zvuka [19].

Primjenom uzorkovanja i kvantizacije signala, dobiven je digitalni signal, diskretan po vremenu i vrijednosti jačine signala (Slika 3.4). Ovakav oblik signala je aproksimiran, ali uz dovoljno male korake uzorkovanja i kvantizacije daje perceptivno dovoljno točnu reprezentaciju zvuka.

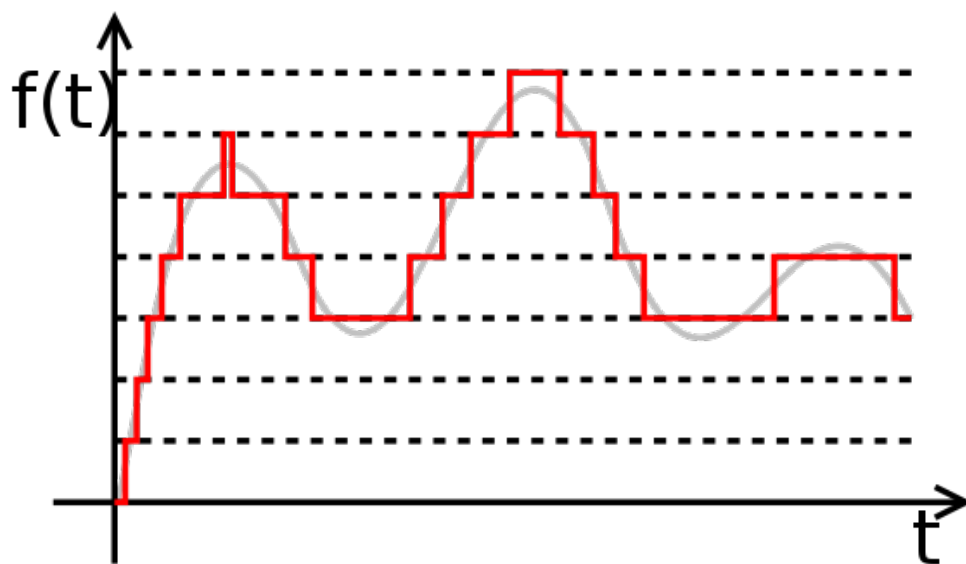
3.1.2. Fourierova analiza

Prema Fourierovom teoremu, bilo koja periodična funkcija može se izraziti pomoću reda sinusoida različitih frekvencija i amplituda. Korištenjem Fourierove transformacije signal se rastavlja na frekvencije koje ga sačinjavaju.

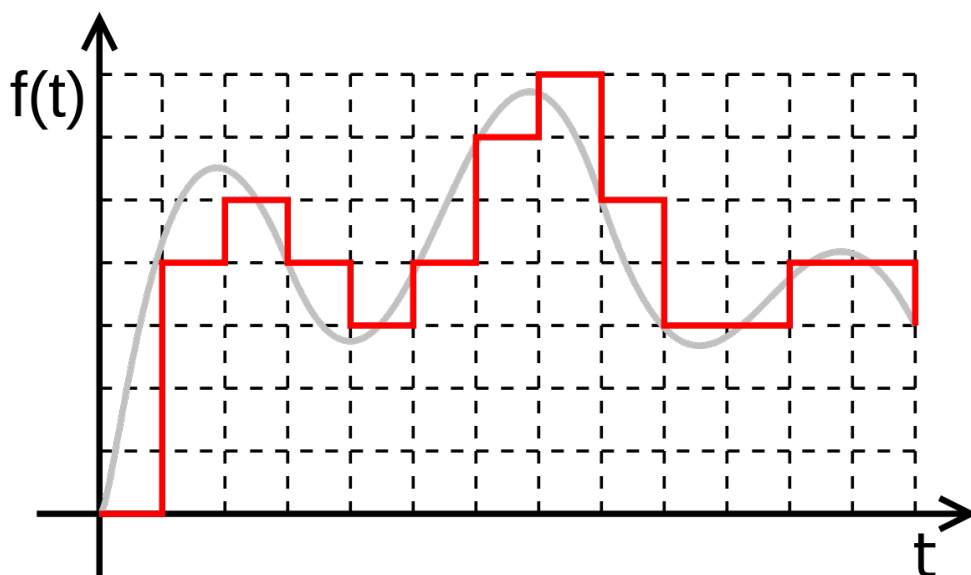
Kako bismo odredili frekvencijski sastav neperiodičnog zvučnog signala, možemo



Slika 3.2: Prikaz vremenskog preklapanja pri uzorkovanju [6]



Slika 3.3: Prikaz kvantiziranja jačine signala [3]



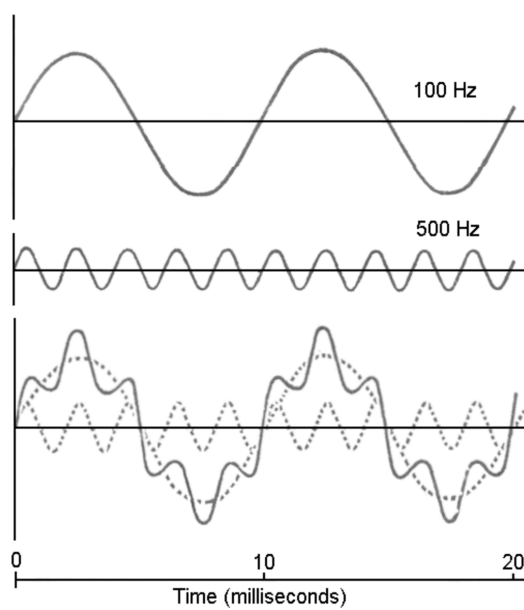
Slika 3.4: Prikaz digitalnog signala [3]

iskoristiti STFT (*Short-time Fourier transformation*) koja određuje frekvencijski sadržaj pojedinih odjeljaka zvučnog signala dok se mijenja u vremenu.

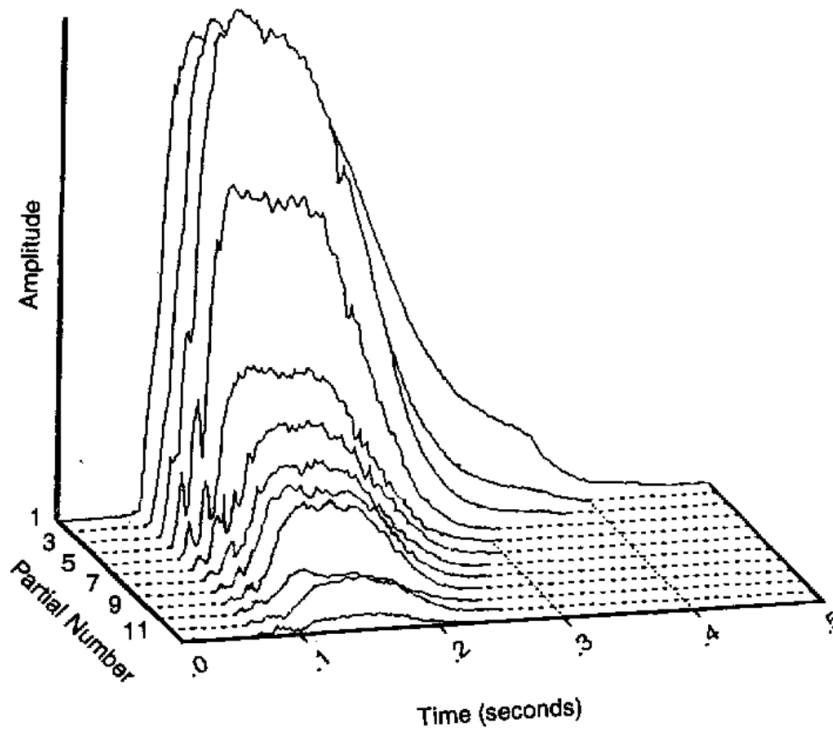
3.2. Aditivna sinteza

Aditivna sinteza sumiranjem osnovnih, sinusoidalnih valnih oblika sintetizira složenije valne oblike. Moguće je sumirati harmonike, ili općenito parcijalne frekvencije koje daju raznovrsnije zvučne signale. Prikaz dvaju signala osnovnog valnog oblika i njihov zbroj prikazan je na slici 3.5.

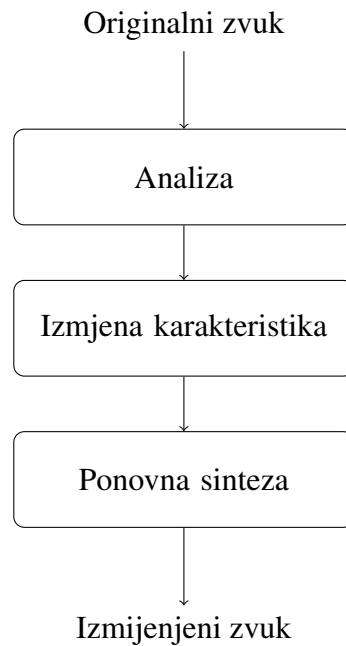
Ako je valni oblik osnovnih signala učvršćen u vremenu, rezultirajući valni oblik će također biti konstantan u vremenu. Time dobivamo zvukove koji ne variraju u vremenu i loše modeliraju stvarni zvuk, koji ima oscilacije u amplitudi parcijalnih frekvencija, poput početnog rasta energije signala i eksponencijalnog opadanja (Slika 3.6) [18]. Vremenski promjenjivom aditivnom sintezom moguće je ostvariti navedene karakteristike generiranog zvuka, modeliranjem omotnice amplitude koja se mijenja u vremenu. Omotnica je proizvoljno definirana, najčešće eksponencijalnom funkcijom opadanja [13].



Slika 3.5: Prikaz zbrajanja dvaju signala osnovnih valnih oblika [14]



Slika 3.6: Iscrtavanje vremenski promjenjivog spektra [18]



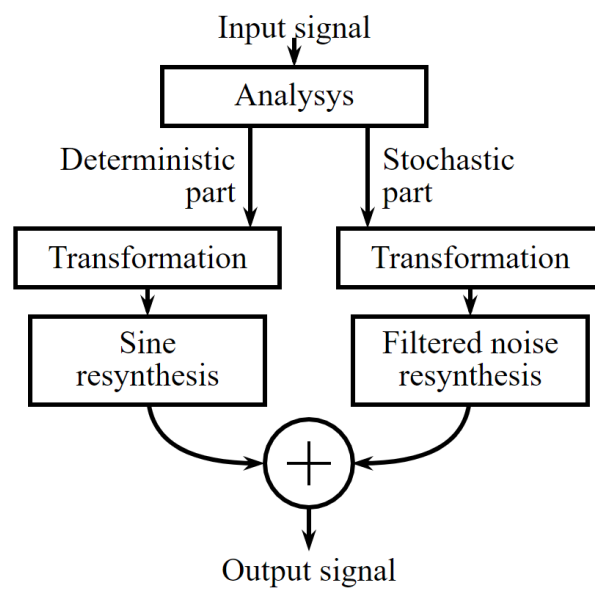
Slika 3.7: Prikaz dijagrama toka ponovne sinteze [18]

3.3. Ponovna sinteza zvuka

Postupak analize zvučnog signala i korištenja dobivenih parametara u sintetiziranju novog zvuka naziva se ponovna sinteza. Postoji više tehnika, koje imaju zajednička tri koraka: analiza snimljenog zvuka, izmjena značajki zvučnog signala i sinteza zvuka na temelju prethodnih karakteristika (Slika 3.7). Snimljeni zvuk se pretvara u digitalni zapis, nakon čega se podaci dobiveni analizom zvuka oblikuju prema željenom ishodu i koriste u sintetiziranju zvuka kako bi se dobio krajnji modificirani zvuk [19].

3.3.1. Sinteza spektralnim modeliranjem

Poseban pristup ponovnom sintetiziranju zvuka daje sinteza spektralnim modeliranjem (SMS) koja rastavlja zvuk u parcijalne frekvencije, ali i na komponentu šuma. Deterministička komponenta su sažete informacije najistaknutijih frekvencija u spektru zvučnog signala, a ostatak ili rezidual koji se dobije izuzimanjem determinističke komponente od originalnog signala se naziva stohastička komponenta (Slika 3.8). Rezidual se oblikuje kao vremenski promjenjiv filter kroz kojeg se propušta bijeli šum. Ovaj model omogućava modeliranje harmoničnih i šumnih komponenata zasebno i time je moguće generirati veći opseg zvukova, uključivši one s izraženim šumom, ili slabijom harmoničkom komponentom [18].



Slika 3.8: Pregled metode SMS [5]

4. Sinteza zvuka temeljena na fizičkom modelu tijela

Sudari tijela u simulacijama će zvučati drugačije ovisno u lokaciji i jačini sudara. Metode koje ne koriste fizičko modeliranje titranja tijela pri sudaru ne mogu u potpuno točno simulirati ovakvo ponašanje, nego se oslanjaju na nasumično odabrane vrijednosti kojima pokušavaju realizirati kvalitativni aspekt fizičkih fenomena.

Fizički model površinskog titranja tijela omogućava sintetiziranje zvuka sudara zadavanjem samo geometrijskog oblika i parametara materijala tijela. Uz unaprijed izračunate oblike i frekvencije deformacijskih modova tijela, moguće je izvoditi sintezu u stvarnom vremenu iz informacija o silama pri sudaru [15].

Tehnika je podijeljena na dva dijela, računanje parametara prije izvođenja simulacije i sintetiziranje zvuka na temelju sudara tijela, što pokazuje dijagram na slici 4.1. Početni postupak je pretvaranje površinske mreže u tetrahedralnu kako bi se mogla provesti daljnja modalna analiza [12].

4.1. Izračunavanje matrica sustava

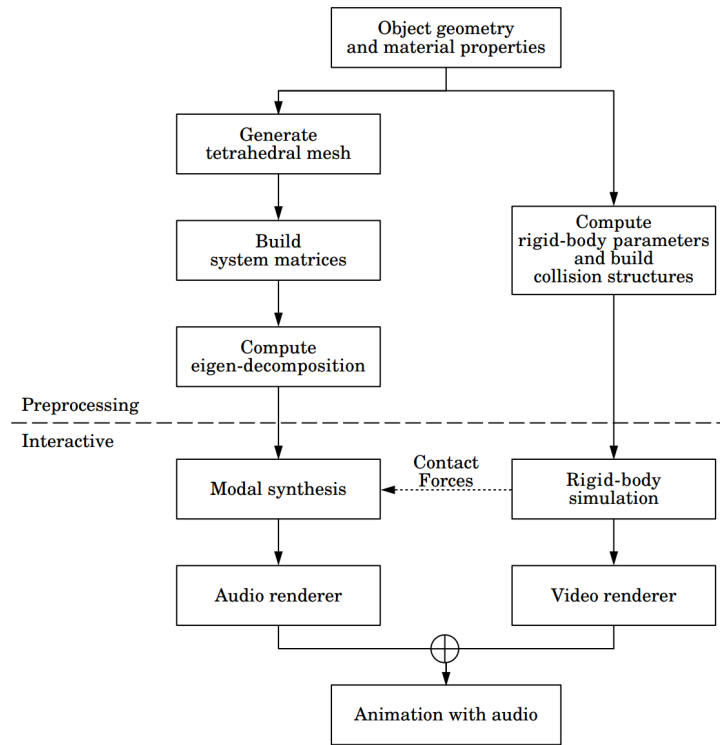
Na temelju tetrahedralne mreže i parametara materijala, potrebno je izgraditi matrice mase, prigušenja i krutosti. Cilj je opisati jednadžbu elastičnog titranja tijela,

$$M\ddot{\mathbf{u}} + D\dot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = \mathbf{f}(t)$$

gdje su M , D i K matrice mase, prigušenja i krutosti veličine $3n \times 3n$, gdje je n broj čvorova u mreži, a $\mathbf{u}$ je $3n \times 1$ vektor dislokacija čvorova u tetrahedralnoj mreži. Pozicije mirovanja čvorova možemo izraziti pomoću

$$\mathbf{X}_i, i = 1 \dots n$$

Tada je dislokacija čvorova uslijed elastične vibracije jednaka razlici odmaknutih pozicija i pozicija mirovanja:



Slika 4.1: Dijagram toka sinteze zvuka temeljene na fizičkom modelu tijela [15]

$$\mathbf{u}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{X}_i.$$

Pri izračunu matrice krutosti, promatramo jedan tetraedar iz mreže konačnih elemenata (Slika 4.2). Možemo aproksimirati gradijent deformacije konstantnom vrijednošću unutar tetraedra

$$\mathbf{F} = [\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_4 - \mathbf{x}_1][\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1 \quad \mathbf{X}_3 - \mathbf{X}_1 \quad \mathbf{X}_4 - \mathbf{X}_1]^{-1}$$

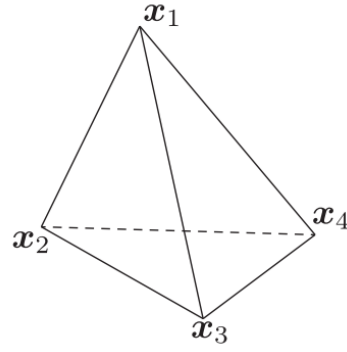
Površinska vibracija krutog tijela koja proizvodi zvuk je vrlo mala te stoga možemo pomoću gradijenta deformacije procijeniti tenzor naprezanja,

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{F} + \mathbf{F}^T)$$

Nadalje možemo odrediti tenzor pritiska,

$$\mathbf{S} = \mathbf{C} : \mathbf{E},$$

gdje je $\mathbf{C}$ tenzor krutosti, simetrični tenzor četvrtog reda. Nakon određivanja tenzora pritiska $\mathbf{S}$, možemo procijeniti unutarnju elastičnu silu na svaki od četiri čvora tetraedra S_n , gdje je n sredina normala triju trokuta susjednih pojedinom čvoru. Neka je S_i



Slika 4.2: Tetraedar iz mreže [20]

tenzor krutosti tetraedra i , n_{ji} efektivna normala čvora j u tetraedru i te tetraedar i pripadnik skupa svih tetraedara incidentnih po čvoru j . Tada je ukupna sila na čvoru j jednaka

$$\mathbf{t}_j = \sum_{i \in T_j} S_i \mathbf{n}_{ji}$$

S obzirom na linearnu povezanost S_i i odmaknutih pozicija čvorova x_i , unutarnja sila $\mathbf{t}_j$ linearno ovisi o vektoru dislokacije čvorova $\mathbf{u}$ te možemo izraziti

$$\mathbf{t} = \mathbf{K} \mathbf{u}$$

gdje $\mathbf{t}$ sadrži vektore unutarnjih sila svih čvorova i $\mathbf{K}$ je matrica krutosti [20].

Matricu mase $\mathbf{M}$ možemo izvesti dvostrukom parcijalnom derivacijom kinetičke energije po brzinama čvorova.

Za određivanje matrice prigušenja $\mathbf{D}$, često se koristi Rayleighov model koji definira matricu kao linearnu kombinaciju matrica krutosti i mase,

$$\mathbf{D} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}, \quad (4.1)$$

gdje su parametri α i β definirani proizvoljno. Ovakav model nije fizički utemeljen, općeniti fizički model elastičnog prigušenja nije utvrđen, ali Rayleighov model donosi prednosti poput razdvajanja linearnog titrajnog sustava u pojedinačne modalne titraje [20].

4.2. Modalna analiza

Jednadžbu elastičnog titranja možemo rastaviti na skup nezavisnih jednodimenzionalnih jednadžbi titranja,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t),$$

čije će rješenje biti dano u sljedećem odjeljku. Korištenjem uopćene dekompozicije na svojstvene vrijednosti,

$$KU = MUS.$$

dobivamo matricu modalnih oblika U te diagonalnu matricu svojstvenih vrijednosti S . Matricu U koristimo kao linearnu osnovu za izražavanje vektora dislokacije čvorova u izrazom $u = Uq$. Iz početne jednadžbe elastičnog titranja tijela dobivamo:

$$U^T MU\ddot{q} + U^T DU\dot{q} + U^T KUq = U^T f(t).$$

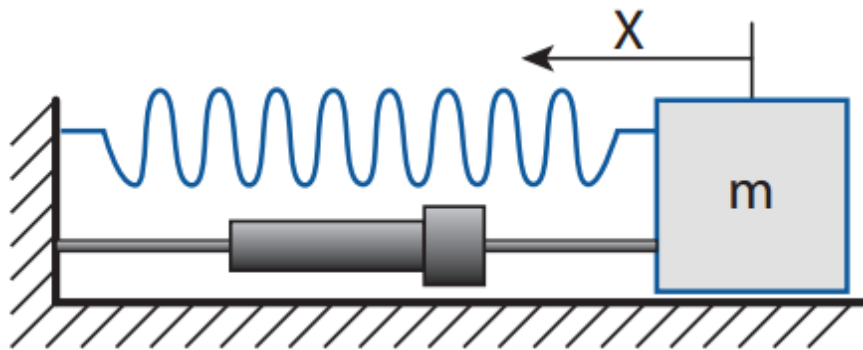
Dekompozicija na svojstvene vrijednosti daje $U^T MU = I$ i $U^T KU = S$. Korištenjem ovih svojstava i linearne kombinacije matrice prigušenja, uz $U^T DU = \alpha I + \beta S$ izražavamo:

$$\ddot{q} + (\alpha I + \beta S)\dot{q} + Sq = U^T f(t).$$

Jednadžbe za svaki element matrice q su nezavisne te dobivamo n nezavisnih jednadžbi titranja [20].

4.3. Modalna sinteza

Postupcima iz prošlog odjeljka dobiveno je n nezavisnih jednadžbi koje se mogu prikazati jednostavnim titrajnim modelima opruga s prigušenjem (Slika 4.3).



Slika 4.3: Prigušeni oscilator [20]

U danoj jednadžbi

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t),$$

m je masa tijela, k krutost opruge, c snaga prigušivača, a $f(t)$ vanjska sila na tijelo. Za analitičko rješenje korisno je odrediti impulsni odziv jednadžbe titranja. Moguće ga je odrediti korištenjem Laplaceove transformacije kako bismo dobili algebarsku jednadžbu:

$$(ms^2 + ds + k)\tilde{x}(s) = 1,$$

Čije je rješenje

$$\tilde{x}(s) = \frac{1}{ms^2 + ds + k}.$$

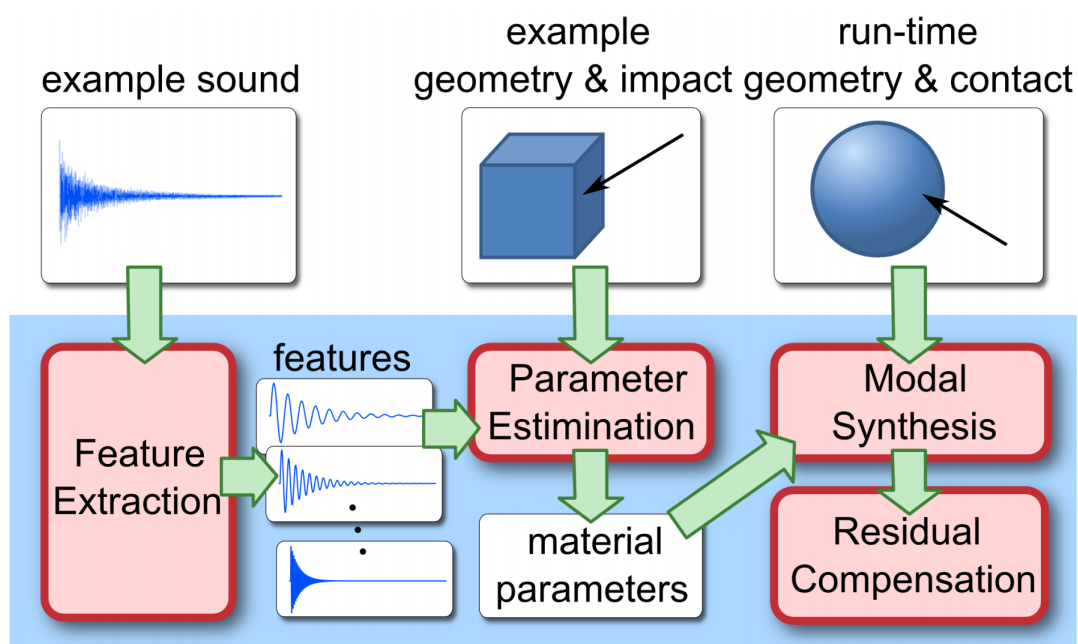
Inverznom transformacijom dobivamo impulsni odziv početne jednadžbe:

$$x(t) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\xi\omega t} \sin \omega_d t.$$

gdje je ω neprigušena prirodna frekvencija titranja, ξ faktor modalnog prigušenja, a ω_d prigušena frekvencija. Rješenje početne jednadžbe možemo izraziti vremenskom konvolucijom funkcije sile i impulsnog odziva:

$$x(t) = \int_0^t \frac{f(\tau)}{m\omega_d} e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau.$$

Konvoluciju možemo riješiti analitički, ili efikasnije, nekom od metoda numeričke integracije, poput IIR digitalnog filtera [20].



Slika 4.4: Pregled rada sustava za sintezu zvuka vođenog primjerom [17]

4.4. Modalna sinteza zvuka vođena primjerom

Nadogradnja metode bazirane na fizičkom modelu dane u prošlim odjeljcima je sinteza zvuka vođena primjerom, stvarnim zvukom sudara. Na temelju snimke stvarnoga zvuka, moguće je procijeniti parametre pojedinog materijala i primijeniti ih na virtualni objekt [17].

Iz zvučnog zapisa snimljenog sudara izvode se značajke, skup prigušenih sinusoida s konstantnim frekvencijama, prigušenjima i početnim amplitudama [17]. Kako bi se procijenili parametri materijala, uz izvedene značajke potrebno je i napraviti virtualni geometrijski model jednakog oblika i veličine kao i objekt iz stvarnoga svijeta pomoću kojega je snimljen zvuk sudara. Na temelju simulacije sudara tijela, uzimaju se u obzir procijenjeni parametri i sile koje djeluju na tijelo pri sudaru te se izvodi modalna sinteza zvuka. Procijenjene parametre moguće je prenijeti i na ostale objekte, drugih geometrijskih karakteristika.

Sintetizirani zvuk sliči izvornome, odnosno stvarnom zvuku koji bi bio generiran pri sudaru tijela, ali modalna sinteza ne može sintetizirati sve zvučne pojave koje se događaju pri sudaru tijela. Pri sudaru se ne prenosi sva energija u stabilne vibracije koje se mogu prikazati prigušenim sinusoidama. Stoga se računa i rezidual koji aproksimira razliku između sintetiziranog i stvarnog zvuka. Prikaz sustava vidljiv je na slici 4.4.

5. Implementacija ponovne sinteze zvuka

Ponovnom sintezom zvuka se može riješiti problem repetitivnosti zvučnih efekata i nakupljanja brojnih zvučnih zapisa u svrhu ostvarivanja varijacije.

5.1. Korištene tehnologije

U izradi praktičnog dijela rada korišteni su grafički programski alat *Unity* [9] i programski jezik *Chuck* [1].

Unity je programski alat koji podržava više platformi i primarno služi kao osnova za izradu i pokretanje računalnih igara i interaktivnih sadržaja. Podržava izradu dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih interaktivnih okruženja te tri programska jezika, od kojih se u ovom radu koristi programski jezik *C#* [2].

Primarna svrha programskog jezika *Chuck* je sinteza zvuka i stvaranje glazbe u stvarnom vremenu. Jezik je otvorenog koda i dostupan na operacijskim sustavima *MacOs*, *Windows* i *Linux*.

5.2. Analiza zvuka u programskom jeziku Chuck

Implementiran je program koji prima put do datoteke koja sadrži zvučni zapis koje potrebno analizirati te u tekstualnu datoteku zapisuje najznačajnije frekvencije koje čine zvuk i njihove relativne amplitude. Moguće je zadati i koliko najznačajnijih frekvencija program treba ispisati, ovisno o potrebama preciznosti korištenja. Veći broj frekvencija će dati točniji prikaz, ali će sinteza biti vremenski zahtjevnija. Glavnina rješenja preuzeta je s poveznice [10].

5.3. Sinteza zvuka u okruženju Unity

Implementirana je aditivna sinteza zvuka pomoću frekvencija i amplituda dobivenih izvršavanjem programa iz prošlog odjeljka. Dobivene tekstualne datoteke potrebno je unijeti u *Unity* projekt. Dijagram toka cijelog postupka ponovne sinteze prikazan je na slici 5.3.

U svrhu demonstracije rješenja, napravljena je scena koja se sastoji od kugle i nekoliko tijela s kojima će se kugla sudarati (Slika 5.4).

Unešenu tekstualnu datoteku potrebno je povezati s javnim parametrom na *Script* komponenti koja kontrolira ponašanje objekta i upravlja reproduciranjem zvuka. Pri pokretanju simulacije, program učitava tekstualnu datoteku te zapisuje učitane frekvencije i amplitude u niz koji će se kasnije koristiti pri sintezi zvuka.

Pri sudaru se poziva metoda koja izvršava odbijanje tijela, poziva metodu za generiranje zvuka koja vraća niz uzoraka te stvara novi zvučni zapis kojemu postavlja podatke dobivene sintezom (Slika 5.1).

Metoda za sintetiziranje zvukova na temelju učitanih frekvencija i pripadnih amplituda te ovisno o impulsu sile koji je bio potreban za razrješenje sudara sintetizira zvuk. Ukoliko je sudar jači, više frekvencije će dobiti veći značaj u ukupnom zvuku. Kako bi zvuk svaki put bio drugačiji, vrijednosti frekvencija i amplituda se mijenjaju u nasumično odabranom iznosu. Prikaz metode vidljiv je na slici 5.2.

Kako realizirano rješenje ne prati stvarne omotnice amplituda frekvencija, veliki broj zvukova ostaje nedostižan. Također, implementacija određivanja i korištenja reziduala omogućila bi sintetiziranje šumovitih zvukova.

Aditivna sinteza je vrlo složena za računanje, za svaki vremenski interval i za svaku osnovnu frekvenciju potrebno je izračunati sinus funkciju. S frekvencijom uzorka od 44.1 kHz i 10 značajnih frekvencija, za zvuk koji traje dvije sekunde potrebno je 882000 puta računati sinus. Implementiranom rješenju je potrebno prosječno 200 ms za takav izračun, što je previše za korištenje u interaktivnim sadržajima. Pokušaj optimizacije aproksimacijom sinusa kvadratnom krivuljom nije donio značajne rezultate, kao niti tablična aproksimacije funkcije sinus.

```

void OnCollisionEnter(Collision collision)
{

    rb.velocity =
        Vector3.Reflect((collision.relativeVelocity
        * -1) / 2, collision.contacts[0].normal);
    SoundGenerator gen = new SoundGenerator(44100, 2, 2);
    var samples = gen.Generate(freqsNamps,
        collision.impulse.magnitude);
    AudioClip newClip = AudioClip.Create("newClip",
        samples.Length, 2, 44100, false);
    newClip.SetData(samples, 0);
    PlayClipAtPoint(newClip, rb.position, 1);
}

```

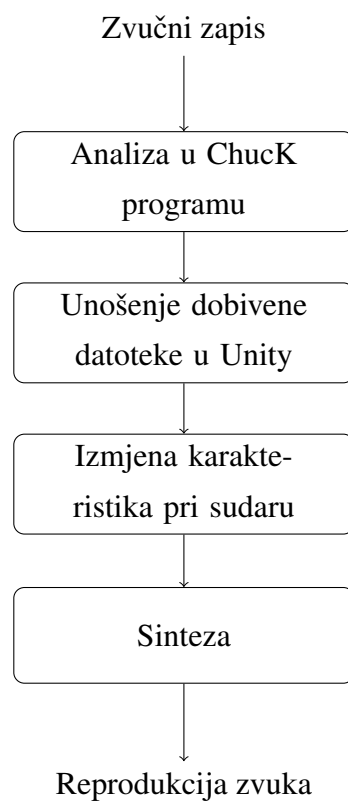
Slika 5.1: Programski kod koji se poziva pri sudaru

```

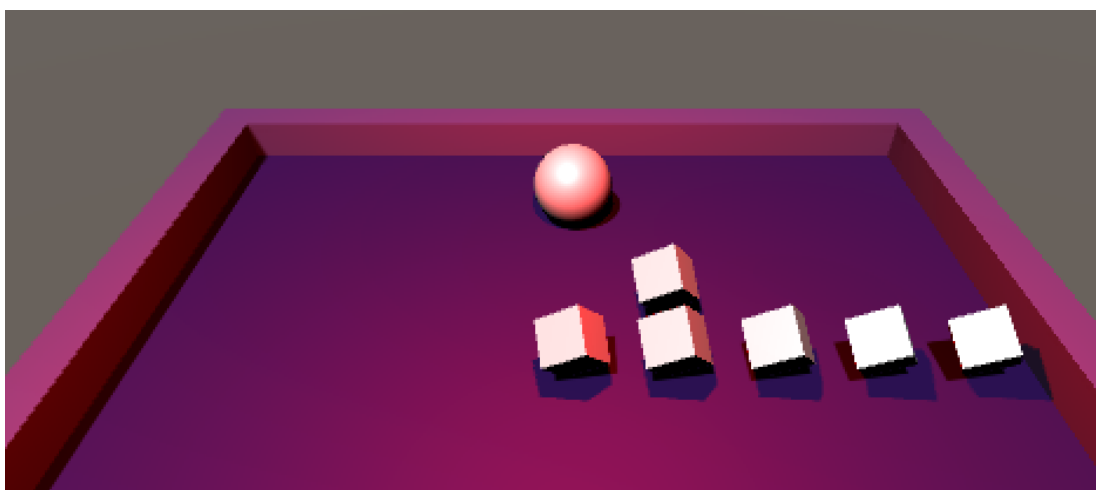
public float[] Generate(double[] freqs, float magnitude)
{
    double t = (Math.PI * 2) / (SamplesPerSec);
    double[] randFreqs = new double[freqs.Length];
    for (int k = 0; k < randFreqs.Length; k += 2)
    {
        randFreqs[k] = freqs[k] * (0.95 +
            rand.NextDouble() / 15);
        randFreqs[k + 1] = (freqs[k + 1] + freqs[k] /
            44100 * magnitude / 2) * (0.999 +
            rand.NextDouble() / (2000 - 20 * k));
    }
    for (uint i = 0; i < numSamples; i += 2)
    {
        double computed = 0;
        for (int j = 0; j < freqs.Length; j += 2)
        {
            computed += randFreqs[j + 1] *
                Math.Sin(randFreqs[j] * t * i / 2) /
                (15 + i / 4);
        }
        for (int channel = 0; channel < Channels;
            channel++)
        {
            sampleArray[i + channel] =
                (float)computed;
        }
    }
    return sampleArray;
}

```

Slika 5.2: Programski kod aditivne sinteze



Slika 5.3: Prikaz dijagrama toka ponovne sinteze



Slika 5.4: Scena za demonstraciju rješenja [4]

6. Zaključak

Stvaranje uvjerljivog zvučnog sustava za primjenu u interaktivnim virtualnim okruženjima, iznimno je izazovan zadatak koji zahtjeva dodatno istraživanje. Pri sudaru tijela zvuk generiraju mnogi fizički procesi koje je teško simulirati bez korištenja značajnih dijelova računalnih resursa.

Implementirano rješenje ne može ponuditi širok spektar zvukova koje pronalazimo u stvarnome svijetu, naročito šumovite zvukove koji nemaju izražen manji skup značajnih frekvencija te zvukovi čije amplitude frekvencija nepravilno opadaju u vremenu. Kako ljudsko uho čuje i najmanje nepravilnosti u generiranom zvuku, rješenje mora biti ispravno i izvedivo u realnom vremenu jer će i najmanje stanke u reproduciranju zvuka biti percipirane kao iznimno snažne zvučne nepravilnosti.

U budućem radu bi se implementirano rješenje moglo nadograditi korištenjem reziduala u analizi zvuka te praćenjem omotnica amplituda kako bi se mogli generirati različitiji i uvjerljiviji zvukovi. Također je potrebno pronaći način za optimiranje rješenja kako bi postalo uistinu iskoristivo za primjenu u interaktivnim okruženjima.

LITERATURA

- [1] Chuck. URL <http://chuck.cs.princeton.edu/>.
- [2] C#. URL <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/csharp>.
- [3] Signal, 2010. URL <https://commons.wikimedia.org/wiki/Signal>.
- [4] Sample rate, 2012. URL <https://sound.stackexchange.com/questions/25787/what-does-the-sample-rate-and-sample-size-of-audio-means>.
- [5] Spectrum modeling synthesis overview, 2015. URL [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectrum_Modeling_Synthesis_overview_\(based_on_Curtis_Roads_1996,_Fig.4.23\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectrum_Modeling_Synthesis_overview_(based_on_Curtis_Roads_1996,_Fig.4.23).svg).
- [6] Dynamic signal analysis review: Part 3 – aliasing, 2016. URL <http://blog.dataphysics.com/dynamic-signal-analysis-review-aliasing/>.
- [7] Days gone game overview, 2016. URL <https://www.playstation.com/en-us/games/days-gone-ps4/>.
- [8] Time vs. frequency, 2016. URL <http://www.erzetich-audio.com/knowledgebase-05-time-vs-frequency>.
- [9] Unity, 2017. URL <https://unity3d.com/>.
- [10] Perry Cook. Physics-based sound synthesis for games and interactive systems. URL <https://www.kadenze.com/courses/physics-based-sound-synthesis-for-games-and-interactive-systems/info>.

- [11] John Gibson. Introduction to midi and computer music, 2013. URL <http://www.iu.edu/~emusic/361/acoustics.htm>.
- [12] François Labelle i Jonathan Richard Shewchuk. Isosurface stuffing: fast tetrahedral meshes with good dihedral angles. U *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, svezak 26, stranica 57. ACM, 2007.
- [13] D Brandon Lloyd, Nikunj Raghuvanshi, i Naga K Govindaraju. Sound synthesis for impact sounds in video games. U *Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, stranice PAGE–7. ACM, 2011.
- [14] Robert Mannell. Adding waveforms and phase, 2008. URL http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/waveforms/adding_waveforms.html.
- [15] James F O’Brien, Chen Shen, i Christine M Gatchalian. Synthesizing sounds from rigid-body simulations. U *Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, stranice 175–181. ACM, 2002.
- [16] Nikunj Raghuvanshi. *Interactive physically-based sound simulation*. Doktorska disertacija, University of North Carolina at Chapel Hill, 2010.
- [17] Zhimin Ren, Hengchin Yeh, i Ming C Lin. Example-guided physically based modal sound synthesis. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(1), 2013.
- [18] Curtis Roads. *The computer music tutorial*. MIT press, 1996.
- [19] D Roads i John Strawn. Digital audio concepts. *The Computer Music Tutorial*, stranice 5–47, 1998.
- [20] Changxi Zheng. Physically based sound for computer animation and virtual environments: Modal vibration, 2016. URL http://graphics.stanford.edu/courses/sound/sig16/PBSound2016_ModalVibration_notes.pdf.

Sinteza zvuka temeljena na sudaru tijela u virtualnom okruženju

Sažetak

U radu su obrađene metode sintetiziranja zvuka za uporabu u virtualnim okruženjima. Opisane su osnovne značajke zvučnih signala i načini prikaza istih. Obrađene su osnove analize digitalnog zvuka te metode ponovne sinteze zvuka s naglaskom na uporabu u virtualnom okruženju. Nadalje, prikazan je uvod u sintezu zvuka temeljenu na fizičkom modelu tijela te metode linearne modalne analize i modalne sinteze te dodatno modalna sinteza vođena primjerom. Naposljetku, opisuje se implementacija ponovne sinteze u grafičkom alatu *Unity* i komentiraju nedostaci implementiranog rješenja.

Ključne riječi: zvuk, sudar, ponovna sinteza, modalna analiza, fizikalno modeliranje, virtualno okruženje, Unity

Synthesis of Sound Based on Rigid-Body Collision in a Virtual Environment

Abstract

The paper gives an overview of the methods of sound synthesis for application in virtual environments. The basics of sound signals are described along with the methods of representation of such signals. The work introduces basics of digital sound analysis and presents the methods of sound resynthesis with emphasis put on application in virtual environments. Advanced method of sound synthesis is presented in the form of physical modeling along with methods of linear modal analysis and modal synthesis. Additionally, example-guided modal synthesis is described. Finally, the implementation of sound resynthesis in Unity is described and the disadvantages of given solution are reviewed.

Keywords: sound, collision, resynthesis, modal analysis, physical modeling, virtual environment, Unity