

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE E TECNOLOGIE



CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INFORMATICA MUSICALE

STUDIO E IMPLEMENTAZIONE DI STRUMENTO
VIRTUALE A MODELLAZIONE FISICA CONTROLLATO
ATTRAVERSO TECNOLOGIA MPE

Relatore: Prof. Luca Andrea Ludovico
Correlatore interno: Giorgio Presti
Correlatore esterno: Stefano Lucato

Tesi di Laurea di:
Dolif Eleonora
Matr. Nr. 832987

ANNO ACCADEMICO 2016-2017

A Morgana, che le stelle ti proteggano dalle fredde notti

Prefazione

In questo elaborato viene studiato e analizzato il modello fisico di una tromba a coulisse, implementando il relativo modello con il fine di realizzare uno strumento virtuale controllato attraverso Lightpad Block, controller esterno prodotto da Roli. Lo strumento virtuale è stato sviluppato attraverso il framework Juce, usando il linguaggio di programmazione C++. La gestione MIDI avverrà attraverso il metodo Multidimensional Polyphonic Expression – o MPE – che consente agli strumenti multidimensionali, come appunto Lightpad Block, di controllare più parametri per ogni nota.

Organizzazione della tesi

La tesi è organizzata come segue:

- nel Capitolo 1 verrà introdotta la sintesi per modelli fisici e saranno spiegati i primi esperimenti;
- nel Capitolo 2 si parlerà degli strumenti a fiato, nello specifico gli ottoni, e verrà introdotto un modello generale sulla struttura fisica della tromba;
- nel Capitolo 3 saranno trattati gli strumenti virtuali e la tecnologia MPE;
- nel Capitolo 4 verrà spiegato in dettaglio lo strumento virtuale creato;
- infine nel Capitolo 5 verranno spiegati gli obiettivi raggiunti e gli sviluppi futuri legati al modello.

Indice

Prefazione

1	Sintesi per modelli fisici	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Modello di una corda pizzicata	5
1.3	Simulazione degli strumenti a fiato	7
2	Strumenti a fiato: gli ottoni	10
2.1	Cenni storici	10
2.2	Struttura degli ottoni	12
2.3	Caratteristiche della tromba	14
2.4	Elementi distintivi acustici	16
3	Strumenti virtuali e tecnologia MPE	21
3.1	Strumenti virtuali	21
3.2	Multidimensional Polyphonic Expression	22
3.3	Lightpad Block	27
4	Software realizzato	30
4.1	Sintesi sonora per tromba e trombone	30
4.2	Controlli e GUI	35
4.3	Analisi acustica	37
5	Conclusioni	40
5.1	Risultati ottenuti	40
5.2	Sviluppi futuri	41
	Ringraziamenti	43

Capitolo 1

Sintesi per modelli fisici

1.1 Introduzione

La sintesi a modelli fisici ha lo scopo di creare un modello matematico della descrizione fisica di uno strumento musicale, in modo che la generazione sonora sia la conseguenza della variazione di parametri in ingresso, che rappresentano le azioni che lo strumentista applica allo strumento reale. Questo approccio si può applicare sia a strumenti acustici, sia a strumenti elettronici, cioè creando un modello matematico dei componenti elettronici che li costituiscono.

La descrizione matematica di uno strumento acustico può essere estremamente complessa. A seconda del livello di dettaglio con cui si descrive il modello, il risultato ottenuto può essere più o meno realistico. Una volta ottenuta la rappresentazione matematica del sistema mediante equazioni, per fare in modo che possa essere elaborata attraverso mezzi informatici, sarà necessario discretizzare il modello. Esiste un'intera branca dello studio dei sistemi che si occupa della discretizzazione di sistemi continui. Un esempio è la tecnica alle differenze finite.

In molti casi è possibile assumere che lo strumento acustico sia costituito da elementi interconnessi tra loro, i quali possono influenzarsi reciprocamente, e quindi, oltre alla descrizione di ogni singolo elemento, occorre tener conto anche dell'interazione tra essi.

In alcuni casi è possibile assumere che i diversi elementi siano connessi tra loro senza che la connessione alteri il comportamento di ogni elemento; ciò semplifica la modellazione, che può essere effettuata "a blocchi", in cui l'uscita di un blocco è utilizzata come ingresso del blocco successivo.

Sebbene nella struttura di base del modello fisico si sia comunque seguito un approccio ingegneristico e scientifico che si basa sullo studio delle leggi fisiche dei moti vibrazionali e consiste in metodi per la simulazione di un modello meccanico che

riproduce il processo cinetico di un corpo, nella creazione e nello studio del modello di tromba descritto nel Capitolo 4 si è seguito un approccio più empirico, sperimentale e “musicale” soprattutto nella taratura delle variabili.

Nell’ambito specifico della riproduzione degli strumenti musicali, la sintesi per modelli fisici si concentra sullo studio delle caratteristiche fisiche dello strumento preso in esame, che mediante un modello matematico è in grado di riprodurre con la miglior approssimazione possibile il timbro e il comportamento dello strumento stesso.

Alla base di questo tipo di sintesi c’è quindi uno studio approfondito sulla fisica della generazione delle onde e sull’interazione fra i vari elementi che fanno parte dello strumento e lo caratterizzano in modo univoco, questo al fine di creare un prototipo che emuli la maggior parte delle caratteristiche dello strumento preso in esame.

Nel corso degli anni molti matematici e fisici hanno cercato di rappresentare in equazioni i diversi comportamenti degli strumenti e delle relative propagazioni delle onde sonore prodotte.

Certe categorie di algoritmi ben si adattano a strumenti di una certa famiglia¹:

- aerofoni;
- cordofoni;
- membranofoni;
- idiofoni.

Da questa suddivisione dei modelli di base è possibile derivare modelli più specifici e complessi, ad esempio si può partire dallo schema generale di una piastra percossa che può valere per molteplici altri strumenti e da questo arrivare a creare ad esempio un prototipo di un charleston aggiungendo le variabili che lo caratterizzano.

La modellazione fisica è caratterizzata principalmente dall’interazione fra diversi elementi:

- Eccitatore, detto anche *exciter*, generatore di energia applicata a un sistema (plettro, dito, arco, soffio, ecc.);
- Risonatore, o *resonator*, sistema in cui una fonte di energia esterna (*exciter*) viene sottoposta ad una sollecitazione periodica di frequenza pari all’oscillazione propria del sistema stesso e in molti casi interagisce con esso (corda, tubo, piastra, ecc.);

¹Classificazione di Hornbostel-Sachs

- Radiatore, o *radiator*, elemento che emette e irradia il suono (cassa armonica, campana degli ottoni, ecc.).

Si esemplificherà di seguito la struttura generale della sintesi nello specifico di uno strumento a corda evidenziando le variabili fondamentali per la costruzione del modello²:

- per prima cosa viene scelto l'agente esterno Eccitatore come plettro, dita o arco, e in che modo questa variabile metterà in moto la corda dello strumento, quindi con che forza, con quale distanza rispetto al ponte, ecc.;
- successivamente si specifica il tipo di Risonatore, quindi le caratteristiche della corda stessa, come lunghezza, spessore, rigidità o tensione;
- infine si sceglie il tipo di Radiatore, specificando grandezza, struttura e forma della cassa che "amplifica" (in realtà trasmette e trasforma) il suono.

Ovviamente le variabili possono essere molteplici e cambiare a seconda dello strumento preso in esame.

Gli elementi sopra citati, eccitatore, risonatore e radiatore, verranno ricreati mediante una serie di algoritmi, come ad esempio:

- generatori di funzioni periodiche (oscillatori) e non (generatori di rumore), in grado di generare forme d'onda prestabilite;
- filtri, che elaborano e trasformano il segnale a seconda della loro particolare funzione. Ad esempio un filtro passa-alto è un sistema che lascia passare tutte le frequenze al di sopra di un determinato valore, detto frequenza di taglio;
- linee di ritardo, impiegate per ritardare un segnale nel tempo.

Questi elementi, come nell'esempio sopra citato, possono essere utilizzati per ricreare e simulare per esempio il decadimento di una corda, quindi la diminuzione in ampiezza di un segnale acustico o più in generale la risposta di un corpo connesso a un tubo.

Con l'evoluzione tecnologica, la continua ricerca di algoritmi sempre più sofisticati, supportati dalla disponibilità di microprocessori sempre più potenti, è possibile ottenere dei modelli sempre più realistici che offrono ai musicisti la possibilità di intervenire e interagire con lo strumento virtuale in maniera molto simile a ciò che avviene nella realtà con gli strumenti acustici, in special modo nel controllo e nella

²"Introduzione alla sintesi del suono", www.sintetizzatore.com

modifica in tempo reale del suono, interazione non presente nei comuni sintetizzatori digitali a campioni³.

Di seguito si esaminerà nel dettaglio uno dei primi modelli matematici applicati alla sintesi del suono, modello che risulta fondamentale per la base di studi futuri. Il modello in esame è quello di Karplus e Strong del 1983 che definisce il comportamento di una corda pizzicata.

³Nella sintesi per campioni un suono, solitamente di pochi secondi o frazioni di secondo, viene registrato e poi processato attraverso filtri ed effetti.

1.2 Modello di una corda pizzicata

Uno dei primi esperimenti di sintesi per modelli fisici è quello della simulazione di una corda pizzicata ideato da Alex Karplus e Kevin Strong, dai quali prende per l'appunto il nome del modello: Karplus-Strong.

L'algoritmo di Karplus-Strong è usato nel campo dell'acustica in quanto manipola una forma d'onda attraverso una linea di ritardo (delay) con lo scopo di simulare il suono di una corda pizzicata o percossa. Questa tecnica è basata sulla retroazione, ovvero il sistema è in grado di tenere conto dei risultati dell'output precedente per modificare le caratteristiche del sistema stesso. In figura 1 viene raffigurato il modello dell'algoritmo [1].

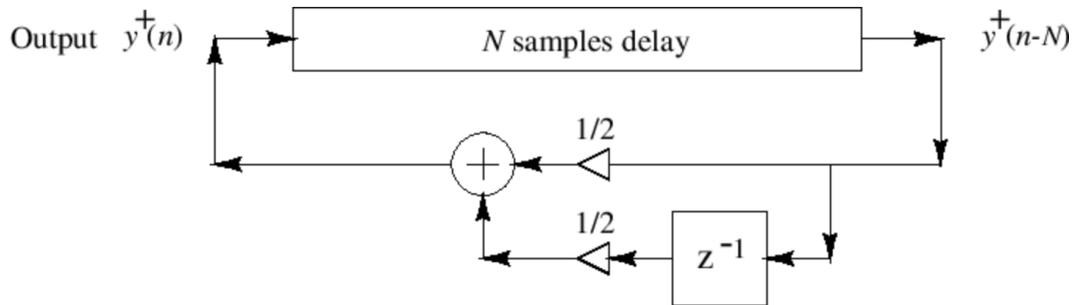


Figura 1: Modello dell'algoritmo di Alex Karplus e Kevin Strong

Come prima operazione viene generata una breve forma d'onda, di lunghezza di L campioni, di eccitazione. Il segnale d'ingresso può essere, per esempio, del rumore bianco, come lo era nell'algoritmo originale. Il segnale di partenza viene poi inviato all'uscita del sistema e nello stesso momento inviato in retroazione in una catena di ritardi, lunga L campioni [2].

Quindi, nell'algoritmo Karplus-Strong, la corda viene "pizzicata" da uno spostamento iniziale casuale e dalla distribuzione iniziale della velocità.

Questa energia o segnale viene reso periodico grazie alla retroazione di una delay line di lunghezza d'onda pari alla nota desiderata. Tale retroazione deve avere un coefficiente inferiore a 1 e un filtro passa basso che simula la maggior dispersione delle frequenze alte nel sistema, come avviene nella realtà. Negli anni Ottanta, per problemi di potenza di calcolo, veniva utilizzato un semplice filtro mediano (ossia veniva calcolata la media di due campioni adiacenti).

In sostanza questo algoritmo prevede che un segnale a banda estesa venga ripetuto un numero di volte al secondo pari alla frequenza della fondamentale della nota che si vuole riprodurre. Prendiamo come esempio il caso di un La a 440 Hz; si considera quindi un piccolo campione di rumore bianco che si ripete 440 volte ogni secondo.

Ogni volta che il campione viene ripetuto si generano frequenze armoniche multiple della fondamentale mentre il filtro passa basso, ad ogni periodo successivo, ne attenua maggiormente le armoniche superiori.

Nel caso di una situazione di rumore impulsivo iniziale, ovvero quando la corda viene pizzicata o percossa, esso si disperde velocemente con un comportamento spettrale tipico di un regime ad onde stazionarie di una corda fissata agli estremi.

È infine interessante notare come l'algoritmo originale, grazie alla sua alta efficienza, permise di operare senza pesare troppo sulla limitata potenza di calcolo dei processori dei primi anni Ottanta, consentendo così un possibile impiego industriale nella produzione di sintetizzatori digitali [3].

1.3 Simulazione degli strumenti a fiato

Per quanto riguarda gli strumenti a fiato, gli elementi ai quali si deve prestare attenzione sono: i flussi d'aria e la pressione-depressione formulati nel teorema di Bernoulli. In particolar modo l'equazione di Bernoulli definisce la legge sulla conservazione dell'energia [5]:

$$p + \frac{1}{2}\rho u^2 + \rho gh = \text{costante} \quad (1)$$

dove:

- p = pressione ($\frac{N}{m^2} = \frac{kg}{ms^2}$);
- u = velocità delle particelle ($\frac{m}{s}$);
- ρ = volume della densità dell'aria ($\frac{kg}{m^3}$);
- g = costante gravitazionale di Newton ($\frac{m}{s^2}$);
- h = quota potenziale media della sezione (m);

L'effetto dell'equazione di Bernoulli prevede che quando un gas come l'aria scorre, la sua pressione diminuisca.

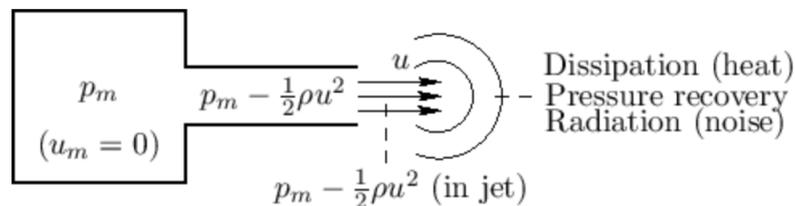


Figura 2: Illustrazione dell'effetto dell'equazione di Bernoulli in un tubo

La figura 2 illustra l'effetto dell'equazione 1 per il caso di un contenitore a pressione costante, che emula la pressione della bocca, condotta in un tubo acustico. L'eventuale flusso all'interno della bocca per ora viene trascurato. All'interno del canale acustico c'è un flusso di particelle con velocità costante u . Per conservare energia, la pressione all'interno del tubo acustico deve scendere a $p_m - pu^2/2$. Ovvero l'energia cinetica del flusso si sottrae dall'energia cinetica di pressione all'interno del canale. In uscita al tubo troviamo un getto che esercita la propria pressione fino quando non si dissolve in qualche forma, generando per esempio onde sonore.

Per simulare uno strumento a fiato possiamo riferirci alla figura 3 che illustra uno schema delle labbra di un suonatore di ottoni [7].

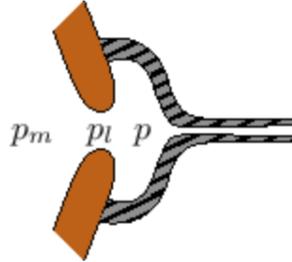


Figura 3: Modello delle labbra di un suonatore di ottoni

La pressione viene denotata con:

- p_m pressione all'interno della bocca
- p_l pressione tra le labbra
- p pressione all'interno del bocchino

Possiamo dunque far riferimento all'equazione 1 di Bernoulli, assumendo che il flusso d'aria fra le labbra sia privo di attrito:

$$p_m = p_l + \frac{1}{2}\rho u_l^2 \quad (2)$$

dove ρ indica la densità dell'aria e u_l la velocità delle particelle tra le labbra. La velocità delle particelle all'interno della bocca è così bassa che possiamo approssimarla a zero. Il flusso d'aria tra le labbra crea quindi un movimento di particelle all'interno dello spazio del bocchino con velocità u_l .

In sostanza, come visto nei paragrafi introduttivi, un modello fisico di uno strumento musicale si può riassumere con due componenti principali illustrati in figura 4: eccitatore e risuonatore.

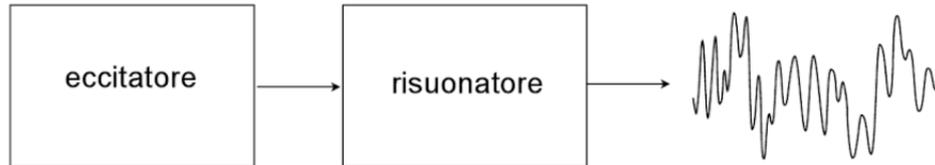


Figura 4: Approccio tipico dei modelli fisici

Dove per “eccitatore” intendiamo la forza che scaturisce la reazione: il plettro e le dita nella chitarra, l’archetto nel violino, le bacchette per i tamburi o come visto prima il sistema labbra-bocchino per gli ottoni; mentre per “risuonatore” intendiamo ad esempio la corda per il violoncello o il tubo per la tromba.

Capitolo 2

Strumenti a fiato: gli ottoni

2.1 Cenni storici

È necessario premettere che la tromba, originariamente, veniva utilizzata non tanto per finalità musicali, ma se ne sfruttava, da un lato, la potenza di suono per comunicare a grandi distanze - la stessa, infatti, consentiva l'emissione di suoni percepibili e riconoscibili come chiari e precisi segnali, sia durante la caccia sia in circostanze belliche - dall'altro, la particolarità del suono per l'esaltazione religiosa degli spiriti.

La ragione per la quale le prime trombe non venivano considerate propriamente degli strumenti musicali risiede nel fatto che esse non permettevano di ottenere una grande varietà di note e avevano notevoli problemi di intonazione. Tali limiti erano dovuti a due fattori intrinseci alle prime trombe:

- il materiale: l'uomo ricavava le prime trombe rudimentali da elementi cavi già presenti in natura, come grosse conchiglie, lunghe ossa, fusti vegetali e canne di bambù;
- la struttura: nell'antichità le trombe avevano la canna dritta. Nonostante manchino dati precisi sulle origini della tromba, si ritiene che essa sia uno strumento antichissimo proprio per la semplicità primitiva della sua costruzione, consistente in un tubo di varie dimensioni, la cui estremità inferiore si allargava a forma di campana, mentre quella superiore terminava con un bocchino.

La tromba medievale e la tromba romana (buccina) sono da considerarsi i precursori dei moderni ottoni: la prima era di bronzo e presentava un tubo dritto (da qui il nome Tromba Dritta), inizialmente lungo 150 cm; la seconda, fatta a spirale, era costituita da un tubo ripiegato a forma di "C". I limiti e gli inconvenienti che la costruzione primitiva dello strumento presentava imposero la necessità di ripiegare il tubo di cui era formata la Tromba Dritta, arrivando, dunque, tra il 1400 ed il

1500, alla creazione della Tromba Storta, Corta, Doppia o Ricurva. Ma anche queste presentavano problemi.

Dopo diversi tentativi di estendere la gamma di note emesse e dopo celebri fallimenti – si ricordi, ad esempio, quello di Halternhorf che, verso la fine del XVIII Secolo, spinto dall'intenzione di colmare il gap esistente tra i limiti della Tromba Dritta ed il progredire della musica strumentale, tentò di costruire, invano, delle trombe a tiro con la pompa a coulisse – la prima svolta importante si ebbe verso il 1820, quando furono applicati i pistoni (inventati da Bluhmel ed applicati al corno per la prima volta da Stolz nel 1813), i quali permettevano di eseguire sullo strumento l'intera scala cromatica, fino al limite fisico di circa tre ottave [10].

Un'ulteriore miglioria ci fu nel 1829 grazie al fabbricante viennese Riedl, il quale inventò, dapprima i doppi pistoni - applicandone cioè due per ogni pompa, funzionanti a mezzo di leve, con l'obiettivo di poter cambiare istantaneamente la tonalità – poco dopo i cilindri o rotelle, messe in funzione anch'esse a mezzo di leve.

Quest'ultima invenzione, dalla quale l'antica Tromba Dritta prese il nome di Tromba a macchina, utilizza un meccanismo di poco dissimile da quello che si applica ancor oggi agli strumenti d'ottone e conserva, dunque, a tutt'oggi il campo incontrastato [11].

2.2 Struttura degli ottoni

Generalmente uno strumento facente parte della famiglia degli ottoni è caratterizzato dalle seguenti componenti: imboccatura, tubo cilindrico e campana. La figura 5 illustra lo schema essenziale delle varie parti di un ottone precedentemente elencate.

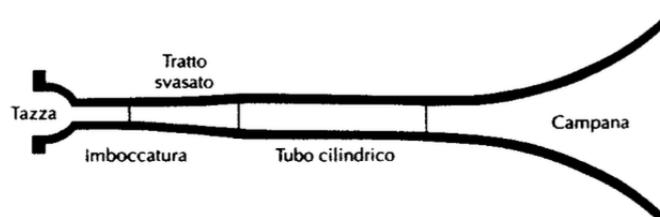


Figura 5: Varie parti di un ottone

Le trombe (acuta, media e bassa) e i tromboni (tenore, basso e contrabbasso) hanno il tubo di forma cilindrica. La particolare forma attribuisce a questi strumenti un timbro brillante. Inoltre la forma cilindrica ha un vantaggio: rende più agevole l'eventuale scorrimento della prolunga telescopica del trombone o i tratti supplementari di caneggio della tromba [6].

Attualmente le dimensioni di questi strumenti sono di:

- tromba (media) 140 cm, nota fondamentale si^{b3} , diametro della campana 11cm;
- trombone (basso) 275 cm, nota fondamentale si^{b1} , diametro della campana 18cm.

Le gamme musicali coperte da tuba, corno, trombone e tromba sono descritte in figura 6.

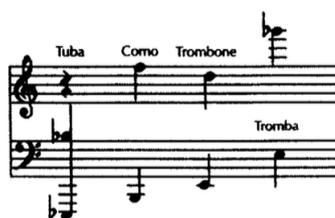


Figura 6: Estensione musicale dei principali ottoni

Il timbro degli ottoni cambia con l'intensità e l'altezza (pitch)¹ della nota suonata. Per quanto riguarda il rapporto tra intensità e timbro in questi strumenti risulta che nei suoni più deboli o dinamiche inferiori vi è una minore presenza delle armoniche superiori ma è maggiormente percepito il suono del soffio; mentre le parziali o armoniche superiori compaiono quando si applica una maggior pressione che aumenta l'oscillazione labiale, introducendo così una distorsione nel moto, ovvero una non linearità tra flusso dell'aria e pressione. Possiamo quindi affermare che in una tromba suonata a livelli dinamici maggiori si attiveranno in numero crescente le parziali superiori.

¹Grandezza che individua la frequenza percepita di un suono.

2.3 Caratteristiche della tromba

La tromba moderna si presenta come illustrato in figura 7. Questo strumento musicale, appartenente alla famiglia degli ottoni, è composto da un tubo cilindrico ripiegato a spirale, all'inizio del quale è posto il bocchino a forma di tazza. Il tubo principale termina con una campana conica ed è possibile allungarlo attraverso tre tratti di canna aggiuntivi posizionati a metà della canna principale. I tre canneggi supplementari possono essere usati come prolunghe del tubo principale, veicolati tramite l'utilizzo di tre valvole a pistone, meccanismo inventato nel 1814 da Blühmel e Stölzel, e perfezionato nel 1839 da Périnet.

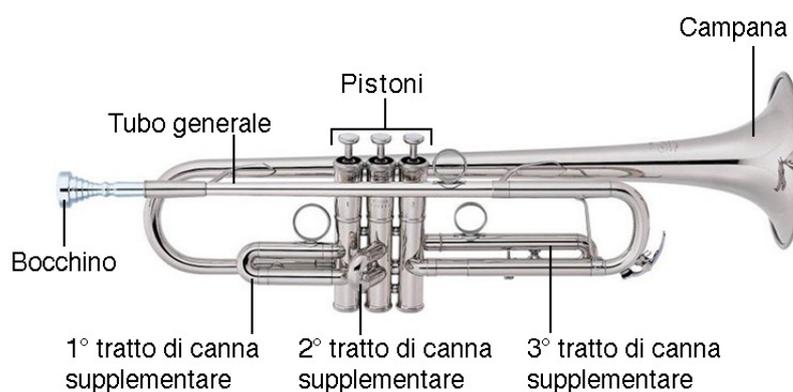


Figura 7: Componenti principali di una tromba

La sorgente delle oscillazioni e del suono generato ha origine dalle labbra del musicista, l'imboccatura dello strumento facilita la loro oscillazione e indirizza l'onda di pressione verso il tubo risonante.

La frequenza fondamentale di risonanza delle labbra normalmente è uguale a quella di un multiplo del tubo risonante, in quanto l'accoppiamento tra labbra e aria nel tubo è piuttosto debole, anche se la frequenza di risonanza di tutto il sistema può essere modificata dal musicista applicando un leggero cambiamento alla tensione che esercita con le labbra. Infatti ad una tensione maggiore corrisponde una oscillazione più elevata che tenderà a canalizzarsi sui multipli relativi alla lunghezza d'onda del tubo. Di fatto per quanto riguarda l'intonazione, nella tromba questo elemento è determinato dalle risonanze proprie del tubo. Prima dell'invenzione delle valvole idrauliche esistevano solo due modi per cambiare intonazione della fondamentale: cambiare tromba (passare da una tromba in Si_b a una in Do) oppure allungare il canneggio con una parte mobile (coulisse). A meno che non si cambiasse strumento, non era possibile ottenere tutte le note della scala cromatica.

La svolta avvenne nella metà del XIX secolo, attraverso l'introduzione dei pistoni si ottenne la piena potenzialità di questo strumento.

Al fine di ottenere l'intonazione desiderata, l'esecutore deve effettuare due azioni sincronizzate:

- premere i tre tasti, i quali hanno la funzione di allungare il canneggio e determinare la frequenza fondamentale; infatti, collegati alla canna principale, ci sono altri tre tubi ricurvi. Ogni tasto aggiunge un tratto di canna supplementare, abbassando così la frequenza fondamentale della canna principale:
 - il primo tasto abbassa la frequenza di un tono;
 - il secondo tasto abbassa la frequenza di un semitono;
 - il terzo tasto abbassa la frequenza di tre semitoni.

Da una sola nota fondamentale si avranno, quindi, sette combinazioni possibili, coprendo un range di sei semitoni.

- modificare la pressione delle labbra che consentirà di eccitare o innescare altri sovratoni (overtone) multipli della frequenza fondamentale consentendo di suonare tutto il range cromatico dello strumento oltre le sette note sopra citate.

Quindi, una volta ottenuta una “fondamentale”, variando la lunghezza del canneggio, le altre note verranno ottenute mediante gli armonici che si andranno a costruire attraverso la modifica di pressione delle labbra.

Le trombe si distinguono principalmente per le dimensioni del canneggio. Infatti la tromba fa parte degli strumenti traspositori, ovvero che cambiano a seconda della dimensione dello strumento e leggono righe trasposte in modo da poter usare la stessa diteggiatura coerente alle loro diverse fondamentali. Per esemplificare si supponga di eseguire un brano con una tromba in Do , ad un certo punto si pensi di eseguire lo stesso brano cambiando strumento e passando ad una tromba in Si_b . Le stesse diteggiature che si usano per la tromba in Do produrranno ora note completamente diverse, quindi note più basse di un tono. Per semplificare l'esecuzione del brano da parte del musicista è quindi utile trasporre la notazione. Quindi uno stesso brano scritto per una tromba in Do appare visivamente del tutto diverso quando viene trasposto per una tromba in Si_b .

2.4 Elementi distintivi acustici

La forma d'onda di una tromba si presenta come illustrato nella figura 8.

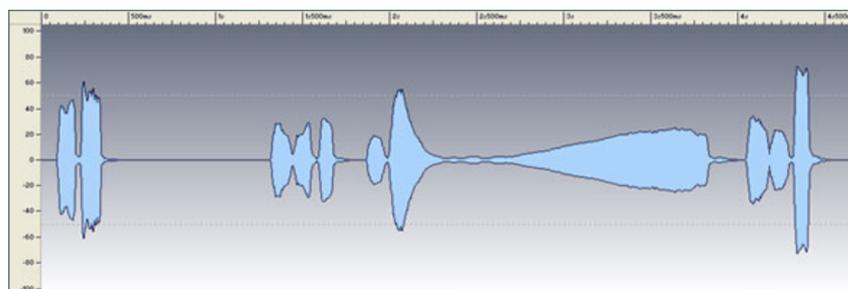


Figura 8: Forma d'onda di una tromba

Per quanto riguarda ampiezza e pitch, essi vengono rappresentati nel grafico di figura 9, dove in blu viene descritto l'andamento dell'ampiezza, in rosso quello del pitch e in verde viene descritto l'andamento dell'inclinazione spettrale (spectral centroid - calcolato attraverso la media ponderata delle frequenze presenti nel segnale).

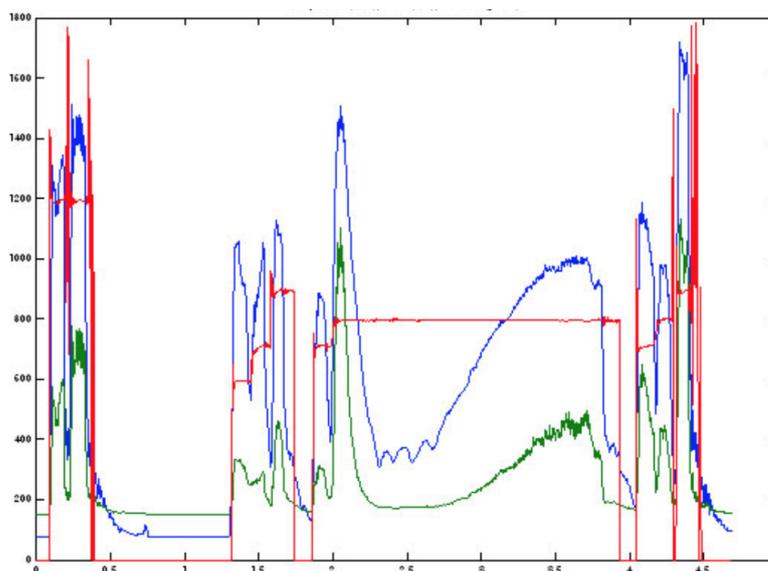


Figura 9: Rappresentazione di: ampiezza, in blu; pitch in rosso; andamento dell'inclinazione spettrale, in verde.

Inoltre in figura 10 è possibile esaminare l'ampiezza delle varie armoniche, rappresentate sull'asse delle ordinate, in funzione del tempo, rappresentato sull'asse delle ascisse e in rosso viene rappresentato il pitch [9].



Figura 10: Ampiezza delle armoniche presenti nel suono generato dalla tromba

Il suono della tromba non è ottenuto tramite il semplice flusso dell'aria nel tubo, perciò soffiare nell'imboccatura dello strumento non basta per ottenere un suono a noi noto, ma deve essere presente anche un'oscillazione regolare della pressione dell'aria prodotta a sua volta dall'oscillazione delle labbra. Se proviamo a soffiare in una tromba otterremo solamente un fruscio. In ogni caso, ascoltando attentamente questo fruscio mentre si muovono i tasti in successione si possono sentire le diverse risonanze prodotte dalle diverse lunghezze del caneggio.

Si deduce quindi che non basta soffiare all'interno dello strumento per produrre un suono. Nel caso contrario, pensiamo di tenere solo il bocchino ed eliminare il corpo dello strumento stesso. Da questo esperimento si nota che il bocchino è costruito con una forma particolare, fatta apposta per facilitare la vibrazione delle labbra dell'esecutore alle diverse frequenze. Il sistema labbra-bocchino, oltre a produrre armonici relativi alla nota suonata, è caratterizzato da larghe bande rumorose (noise).

Utilizzando solo le labbra e un bocchino il suono che verrà prodotto sarà una specie di ronzio, tale suono, che si può ottenere anche con le sole labbra, ha approssimativamente la forma di un'onda a dente di sega e avrà la funzione di exciter. Da questo sistema si deduce l'importanza della corretta impostazione delle labbra per ottenere una giusta intonazione e della risposta risonante del tubo della tromba per quanto riguarda la formazione del timbro.

Come è tipico per altri strumenti musicali, anche nella tromba è possibile ottenere effetti speciali pronunciando fonemi particolari mentre si suona lo strumento. Per esempio per produrre il doppio staccato basta pronunciare "ta-ga-ta-ga-ta-ga..." mentre si esegue una singola nota stabile. Dal punto di vista acustico la "t" alveolare sorda si avverte come una breve interruzione del suono; mentre la velare sonora "g" corrisponde acusticamente ad una attenuazione più morbida. Il risultato ovviamente dipende dalla velocità con cui il musicista pronuncia la sequenza.

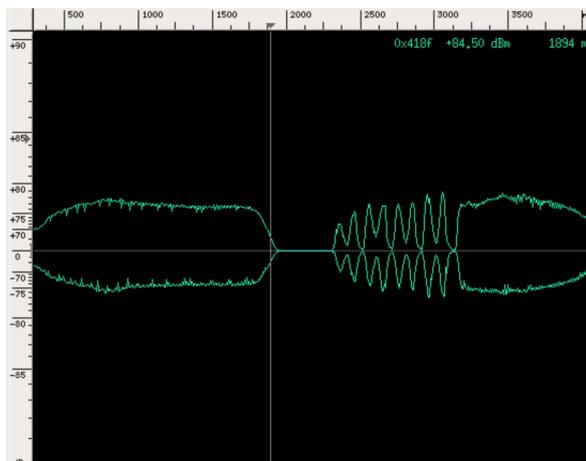


Figura 11: Effetto speciale del doppio staccato

Dalla figura 11 si può chiaramente vedere la differenza della forma d'onda degli inviluppi risultanti dalla pronuncia di "ta" e "ga". Nel primo caso, nel suonare "ta" l'intensità del suono va a zero; mentre nel secondo caso, nel suonare "ga" l'intensità del suono si attenua ma non scende fino a zero.

Come altro esempio sugli effetti speciali che si possono creare basti pensare al frullo, che ha come risultato quello di ottenere una rapida modulazione d'ampiezza semplicemente pronunciando la lettera "r". Nella figura 12 viene illustrata la forma d'onda ottenuta dalla pronuncia della "r".

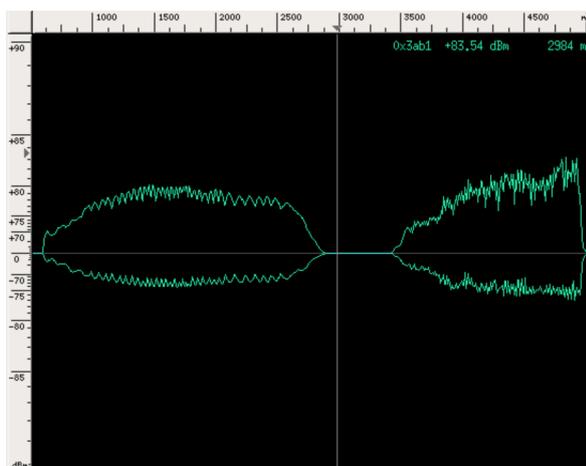


Figura 12: Effetto speciale del frullo

Nell'estremità del tubo troviamo la coulisse, che è la parte di tubo ricurva a forma di "u" che chiude la parte inferiore del canneggio. La coulisse può scorrere avanti e indietro di alcuni centimetri, aumentando di fatto la lunghezza del tubo e consentendo all'esecutore di aggiustare l'accordatura di base dello strumento. Nella tromba la coulisse copre l'escursione di frequenze di circa un semitono e non è utilizzato per ottenere l'effetto del glissato. Strumenti invece che utilizzano la coulisse per l'intonazione e per ottenere vari effetti sono il trombone o la tromba a coulisse (senza pistoni), in questo caso il musicista controlla direttamente la coulisse che si presenta più lungo.

Per quanto riguarda la gamma dinamica, la tromba è uno strumento che può generare una notevole potenza acustica; non a caso veniva utilizzata sui campi di battaglia per inviare segnali acustici in grado di essere percepiti fino a grandi distanze. Grazie a questa ampia gamma dinamica questo strumento può essere usato per realizzare repentini cambi di "umore", ricordando però che per l'emissione iniziale occorre un piccolo impulso: l'intensità cresce rapidamente nei primi 30 centesimi di secondo. Sta poi al musicista scegliere se aumentare l'intensità o stabilizzare il suono.

Un'altra caratteristica di questo strumento è la direzionalità, ovvero quasi tutta l'energia sonora viene irradiata dalla campana, tenendo conto che per il fenomeno della diffrazione² le alte frequenze risultano più direzionali, mentre le basse frequenze tendono a formare onde sferiche. Da questo risulta che, a seconda della posizione dell'ascoltatore, cambierà la percezione del timbro [8].

Come elemento aggiuntivo abbiamo la sordina. Questo meccanismo ha la funzione di attenuare il suono o di modificarne il timbro. Esiste un'ampia varietà di sordine. In particolar modo gli ottoni utilizzano sordine metalliche, ma ne esistono anche di gomma, di cartone o di altri materiali. In ordine di frequenza di utilizzo troviamo le seguenti sordine:

- dritta (straight), è la sordina più comune, ha la forma conica o a "pera" ed è costituita in metallo con alcuni elementi in sughero; essa produce un suono nasale molto penetrante ai volumi alti;
- a tazza (cup), dà un suono più attenuato smorzando le alte frequenze e le basse frequenze;
- solo tone, accentua le frequenze acute;
- buzz-wah, costituita da membrane vibranti;
- wa-wa (o wah-wah) o Harmon (dal nome del fabbricante), producono un suono simile ad un ronzio sulle alte frequenze, sono costituite da un anello di sughero che blocca l'aria proveniente dallo strumento, hanno una forma tonda e sono

²Quando l'onda incontra sulla sua strada un ostacolo è come se si "rompesse" e si ricompone, sparpagliandosi, al di là dell'ostacolo.

cave; la sordina è chiusa da una specie di trombetta detta stem che può essere posizionata in vari modi a seconda del suono che si vuole ottenere;

- a secchio (velvet), è riempita con del materiale soffice, come il cotone, attaccata alla campana con delle mollette o delle strisce di sughero, ha la funzione di attenuare fortemente le alte frequenze;
- nel Jazz degli anni Venti si utilizzava un cappello o una bombetta che avvicinato e allontanato con la mano aveva l'effetto di procurare un suono simile a quello della sordina wa-wa;
- plunger, sordina che simula l'effetto della voce umana;
- da studio (dette anche sordine mute o silenziose), utilizzate per attenuare il volume sonoro dello strumento.

Capitolo 3

Strumenti virtuali e tecnologia MPE

3.1 Strumenti virtuali

Gli strumenti virtuali emulano, attraverso librerie di suoni, campioni o algoritmi, il suono di uno strumento musicale. Questi strumenti danno la possibilità di creare e gestire suoni o melodie senza aver bisogno di veri e propri strumenti musicali. Nel mondo del web sono disponibili parecchi strumenti virtuali: alcuni utilizzabili gratuitamente, altri a pagamento, con caratteristiche più curate e professionali.

Gli strumenti virtuali possono essere suonati e controllati attraverso specifici device MIDI, detti controller, che in alcuni casi consentono anche di manipolare i suoni elaborati dagli strumenti stessi. Questi strumenti spesso necessitano di un host per essere eseguiti, ovvero un programma (ospite) che ne permette l'utilizzo.

Sul mercato troviamo svariati tipi di strumenti virtuali come pianoforti, chitarre, strumenti a fiato, batterie, ecc. Questi tipi di strumenti ricevono quindi flussi MIDI come segnale d'ingresso e, a seconda dello strumento selezionato, generano uno specifico suono in uscita, che può essere quello di uno strumento acustico o elettronico. L'interfaccia grafica di questi strumenti permette l'impostazione di svariati parametri.

Nei moderni software di registrazione è possibile caricare più di uno strumento virtuale, per avere a disposizione più suoni. Ovviamente un occhio di riguardo andrà al carico di memoria RAM e dell'utilizzo della CPU, in quanto molti strumenti virtuali possono risultare molto pesanti con la conseguenza di rallentare l'intero sistema.

3.2 Multidimensional Polyphonic Expression

Nel Gennaio del 2015 Roland Lamb e Geert Bevin si incontrano per discutere della necessità di creare uno standard per gli strumenti multi-dimensione a superficie continua e iniziano a redigere le prime specifiche. Uno dei più recenti sviluppi nel MIDI è il Multidimensional Polyphonic Expression o MIDI Polyphonic Expression (MPE). Con MPE si intende un metodo di utilizzo del MIDI che consente a dispositivi multidimensionali come Lightpad Block di controllare più parametri per ogni nota, all'interno del software compatibile con MPE. Queste nuove tecnologie permettono ai musicisti di controllare attraverso controller tonalità, timbro e altre sfumature per ciascuna nota in tempo reale.

Con controller si intendono tutte le periferiche di cui si dispone per poter influire sui parametri con il nostro corpo (tastiera, rotelle, breath control, pedali, ecc.). Nel caso di strumenti virtuali a modellazione fisica tali controller piloteranno specifici parametri che a differenza delle altre sintesi sono riconducibili al funzionamento di uno strumento acustico, essi possono essere: pressione dell'aria, pressione della bocca sull'ancia, pressione di un archetto, velocità di una percussione, ecc. Con instruments si intende invece l'insieme degli algoritmi che si occupano della generazione primaria del suono; ad esempio, in uno strumento a modellazione fisica, possono essere la bocca e l'ancia che nel caso di uno strumento a fiato producono la prima forma d'onda.

Nel MIDI standard, i messaggi a livello di canale (come il pitch bend) vengono applicati a tutte le note riprodotte su un singolo canale. In MPE, ad ogni nota viene assegnato un proprio canale in modo che tali messaggi possano essere applicati individualmente a ciascuna nota, le specifiche complete dell'MPE sono state aggiornate dal gruppo di lavoro dell'ME dell'MMA¹.

Quando un dispositivo trasmette dati MIDI attraverso la tecnologia MPE, utilizzerà un intervallo di canali:

- il canale più basso, di solito il canale 1, viene usato per i messaggi globali, come per esempio i dati delle le posizioni dei pedali. Essi vengono trasmessi su questo canale per influenzare tutte le note nello stesso modo;
- i canali rimanenti, di solito i canali 2-16, vengono utilizzati per trasmettere note e dati di espressione, questi dati si applicano solo alla nota che si trova sullo stesso canale.

Quindi quando un'applicazione riceve un messaggio MPE, ascolta il canale 1 solo per i messaggi globali, come i messaggi provenienti dal pedale di sustain, e il software ascolta i canali dal 2 al 16 per le note e i relativi messaggi d'espressione [12].

¹MIDI Manufacturers Association, associazione a cui fanno capo tutte le aziende che sviluppano e producono strumenti che adottano il protocollo MIDI.

In sostanza l'MPE non è un nuovo protocollo ma è un modo efficiente per l'utilizzo dei messaggi del protocollo MIDI. Ha il vantaggio di offrire, mediante specifici controller multidimensionali, una maggiore espressività durante l'esecuzione indipendente per ogni nota e quindi facilita l'esecutore nella simulazione di uno strumento acustico reale polifonico.

Tutto questo è possibile riservando un solo canale MIDI ad ogni nota suonata, in questo modo ogni nota potrà disporre dei seguenti parametri:

- messaggi di Velocity (On/Off);
- Control Change;
- Aftertouch;
- Pitch Bend.

Ognuno di questi parametri è trasmissibile, modificabile e controllabile individualmente.

Un presupposto essenziale affinché strumenti hardware e software, come DAW², strumenti virtuali o applicazioni, siano compatibili con l'MPE è che abbiano la possibilità di ricevere messaggi MIDI da canali multipli su una singola traccia.

Ogni canale e ogni nota dell'MPE viene definita come voce d'espressione. Nella tabella 1 vengono elencati i messaggi MIDI ammessi, con i relativi canali di trasmissione.

	Canale Nota	Canale Master (Zona)
Channel Pressure	sì	sì
Pitch Bend	sì	sì
Modulation: CC1 MSB, CC33 LSB	sì	sì
Pitch bend range: RPN 0	sì	sì
Ulteriori dimensioni: CC70-79 MSB, CC102-111 LSB	sì	no
Messaggi generali: CC7 volume, CC64 pedale sustain, RPN, NRPN, All Notes Off	no	sì
Program change	no	sì

Tabella 1: Messaggi MIDI ammessi

²Digital Audio Workstation

Nel protocollo MIDI standard i messaggi di Note On e Off, Control Change, Aftertouch, Pitch Bend vengono trasmessi e ricevuti su un singolo canale e fanno parte della categoria dei messaggi di Channel Voice Message. Questo vuol dire che muovendo il controllo tradizionale del Pitch bend, tale messaggio di controllo influenzerà tutte le note suonate sulla tastiera. Al contrario, in un controller che utilizza l'MPE, ogni singolo tasto trasmette tutti i messaggi di controllo generati su un canale momentaneamente dedicato.

Prendiamo come esempio le tastiere Seaboard prodotte da Roli, un modello di queste viene illustrato in figura 13.



Figura 13: Roli Seaboard RISE 25 MIDI

Eseguendo un movimento orizzontale su un tasto si invierà un messaggio di Pitch bend indipendente; mentre eseguendo movimenti verticali si influenzerà il controllo CC74: Timbre. Per il messaggio di Aftertouch, che regola la sensibilità alla pressione dei tasti, l'MPE utilizza il messaggio Channel Pressure invece del messaggio di Poly Aftertouch; un esempio pratico di un vantaggio che ne deriva direttamente è il poter suonare un accordo con la possibilità di applicare un controllo indipendente su ognuna delle singole note che compongono l'accordo.

Nel Main Channel, ovvero il canale Master, verranno invece indirizzati i seguenti controlli:

- Program Change;
- Volume CC7;
- Sustain CC64;
- altri Control Change, generati da controlli fisici comunemente presenti su hardware, come touch pad o knob;
- Master Pitch bend.

I canali disponibili nello standard MIDI sono 16 e nell'MPE uno di questi canali è riservato al Master Channel. Nel raro caso venissero suonate più di 15 note contemporaneamente, esse verranno distribuite su alcuni canali già in uso, con una

conseguente limitazione: l'impossibilità di interagire sull'espressività individuale della singola nota, dato che, trasmettendo su un canale condiviso, i messaggi di controllo influenzeranno tutte le note associate al medesimo canale.

Per quanto riguarda l'utilizzo degli eventi MPE, bisogna ribadire che questo standard richiede hardware e software che supportino canali multipli sulla singola traccia. Quindi per poter registrare questi eventi si deve impostare come porta di ingresso quella con il nome del controller utilizzato; mentre per quanto riguarda le impostazioni del canale MIDI (In e Out), esse andranno configurate sull'impostazione "qualsiasi", in modo che la traccia MIDI utilizza tutti gli ingressi MIDI configurati.

Parlando invece di editing si è normalmente abituati a lavorare sui dati MIDI che riguardano Pitch Bend e Control Change appartenenti ad un'intera regione e non nota per nota; questo può essere un limite per i messaggi che arrivano da una traccia con dati MPE. Per rendere possibile un editing completo di tutti i dati MPE è necessario intervenire sui messaggi MPE trasmessi dall'interazione sulle singole note/canali differenti. Come esempio si prende in considerazione la DAW Cubase utilizzando la funzione Note Expression nel seguente modo:

- aggiungere una traccia Virtual Instrument nel progetto;
- caricare un VST multi-timbrico a 16 parti;
- verificare le corrette impostazioni nella configurazione dei canali delle porte MIDI precedentemente spiegato;
- aprire nell'Inspector della traccia il tab Note Expression;
- abilitare le voci "MIDI come Note Exp" e "Rotazione del Canale";

A questo punto basterà assegnare ad ogni parte del VST precedentemente caricato lo stesso suono con le stesse impostazioni e sarà pronto per essere suonato in modalità MPE.

Utilizzando invece un VST compatibile MPE, esso sarà già configurato per ricevere eventi MIDI da canali MIDI multipli su un'unica parte.

In entrambi i casi, l'editing degli eventi MPE all'interno della finestra Key Editor di Cubase, sarà possibile grazie alla funzione Note Expression. Ovvero per ogni nota selezionata comparirà un relativo pop-up con gli involucri di tre parametri:

- Aftertouch;
- Timbre (CC74);
- Pitch bend.

È importante notare che nell'applicazione pratica vi è un'enorme differenza fra l'utilizzo e la gestione del MIDI tradizionale da quello del MIDI MPE. Senza provvedere alle apposite configurazioni, si potrebbe riscontrare un comportamento anomalo del controller, come ad esempio suonando un modulo sonoro (expander), senza le corrette impostazioni, ogni nota suonata dal controller produrrà un suono diverso del modulo. Questo comportamento è giustificato dal fatto che nei moduli sonori hardware multi timbrici ogni parte è associata ad un canale MIDI univoco, queste impostazioni sono strutturate appositamente per far suonare ai musicisti differenti timbri in contemporanea.

Per quanto riguarda lo sviluppo pratico dell'MPE, esso è predisposto per essere utilizzato anche in modalità multi-timbrica, infatti nelle specifiche troviamo ammesse le "Zone". In teoria si possono specificare fino a 8 zone, ovvero suddividendo i 16 canali MIDI in otto canali Master e otto canali Nota, ma in pratica, dai documenti rilasciati dall'MMA, si consiglia di non andare oltre la creazione di due zone.

Tramite l'RPN (Registered Parameter Number) "00" trasmesso al primo canale di una zona, è possibile prestabilire un range di valori, multipli di 12 e compresi fra 0 e 96, da associare a diversi parametri di uno strumento MPE. Di norma, per ogni nota/canale, si utilizza un range di 48 semitoni, ovvero 4 ottave. Ad esempio, trasmettendo un RPN 00 seguito dal CC6 con valore 24, si ottiene che il valore del range del pitch avrà un'estensione di $+/- 24$ semitoni [13].

Riassumendo l'MPE offre agli esecutori maggior espressività in quanto:

- ogni nota ha un canale MIDI dedicato;
- ogni canale/nota è definito Voce di Espressione;
- si possono impiegare fino a 15 voci d'espressione;
- ogni tasto della device MPE genera una nota su un particolare canale. La gesture riferita al tasto (e quindi alla nota) genera messaggi midi dedicati sul canale in ascolto;
- i messaggi di controllo sono generati dall'interazione fra più assi sullo stesso tasto del controller MPE;
- i messaggi di controllo generali hanno un canale dedicato (Master Channel).

Le informazioni che riguardano gli aspetti descritti in questo paragrafo sull'MPE sono basate sul documento draft pubblico del 2015 rilasciato dall'MMA. Il 28 Gennaio 2018 a Los Angeles i membri dell'MMA hanno votato e l'MPE è diventato standard ufficiale [14].

3.3 Lightpad Block

Lightpad Block è una piattaforma modulare, distribuita da Roli, per la creazione di musica digitale che apre nuove possibilità per l'espressione musicale attraverso l'uso del 5D Touch. I vari Lightpad Block possono essere fisicamente collegati l'uno all'altro magneticamente, in molteplici configurazioni. In figura 14 viene raffigurata la piattaforma Lightpad Block.



Figura 14: Lightpad Block

Lo strumento si presenta con una matrice LED 15 x 15 dove sovrapposta viene posizionata una superficie in silicone, 5D Touch, utilizzata per controllare la piattaforma. Questo strumento prodotto da Roli può interfacciarsi con diverse applicazioni sviluppate anche da terze parti (molto utilizzate sono quelle prodotte da Audio Modeling - SWAM); presenta la connettività Bluetooth, una batteria ricaricabile e diversi layout di riproduzione. Con Lightpad Block si è in grado di eseguire sequenze, looping, finger drumming e soprattutto molteplici controlli espressivi. Lightpad Block può anche essere utilizzato come hub a cui altri blocchi possono connettersi.

Inoltre è possibile associare a questo dispositivo altri controller come Live Block e Loop Block. Questi blocchi sono utili per facilitare e migliorare il controllo di alcune funzionalità come la registrazione e la manipolazione di esecuzioni in tempo reale delle performance musicali [15].

Di seguito troviamo illustrato in figura 15 Live Block.



Figura 15: Live Block

Live Block dispone di 10 pulsanti, di cui 8 tasti funzione e 2 pulsanti “+” e “-” per variare il valore dei parametri selezionati. In dettaglio sono presenti le seguenti funzioni corrispondenti ai tasti:

- Mode, per passare da uno slot all’altro, utilizzato anche per l’accensione dello strumento;
- Volume, per il controllo del volume;
- Scale, attiva e disattiva l’omonima funzione che obbliga lo strumento a suonare solo le note presenti nella scala selezionata;
- Chord, permette di attivare, disattivare e configurare la modalità accordi/singole note nello strumento selezionato;
- Arp, attiva o disattiva la modalità arpeggio;
- Sustain, simula l’effetto del pedale delle tastiere;
- Octave, selezione della trasposizione dell’ottava;
- Love, per aggiungere nella lista dei preferiti il preset in uso.

Loop Block viene invece illustrato in figura 16.



Figura 16: Loop Block

Anche Loop Block dispone di 10 pulsanti con le medesime caratteristiche strutturali di Live Block ma con diverse funzioni:

- Mode, come in Live Block, consente di selezionare la parte, lo strumento da suonare;
- Volume, sempre come in Live Block, consente di gestire il volume;
- Metronomo, consente di attivare o disattivare il click del metronomo e variarne i BPM attraverso i tasti “+” e “-”;
- Snap, per attivare la quantizzazione;
- Undo, annullare l’ultima operazione effettuata;
- Play/Pausa, per riprodurre o mettere in pausa una traccia;
- Record, per iniziare una registrazione;
- Learn, consente di passare alla modalità didattica che illustra come utilizzare Lightpad Block.

Capitolo 4

Software realizzato

4.1 Sintesi sonora per tromba e trombone

Juce è un framework di sviluppo C++ multipiattaforma (macOS, iOS, Windows, Android, Linux) utilizzato per la programmazione e lo sviluppo dello strumento virtuale descritto in questo capitolo. Juce viene utilizzato sia per la programmazione di interfacce grafiche sia per la realizzazione di applicazioni Audio/MIDI. Infatti, soprattutto negli ultimi anni, molti produttori di software Audio/MIDI hanno scelto Juce per lo sviluppo e la programmazione dei loro prodotti. Juce è stato pensato da Julian Storer nel 2001, acquisito poi da Roli nel 2014, presenta quattro tipi di licenze:

- Personal, versione gratuita ma con Splashscreen;
- Educational, versione gratuita ma con Splashscreen;
- Indie, versione da 35\$ al mese;
- Pro, versione da 65\$ al mese, con supporto dedicato.

Attraverso il framework Juce, precedentemente descritto, per la presente tesi è stato sviluppato e realizzato il modello dello strumento virtuale che emula il suono di tromba e trombone. Prima di arrivare al risultato finale sono stati implementati e testati diversi modelli:

- primo fra tutti si è cercato di ricreare un modello basato sulla sintesi a guida d'onda¹ che utilizza l'equazione di Bernoulli, poi scartato per risultati poco soddisfacenti;
- altro modello preso in esame è quello ideato da Ron Berry², che non è stato preso in considerazione in quanto dai pochi esperimenti fatti non si è riuscito ad ottenere un sistema sufficientemente stabile, con relativi problemi di divergenza, e una sufficiente generazione di armoniche. Anche dopo aver implementato un waveshaper, che cambia mediante distorsione il contenuto del segnale arricchendolo di armonici, il timbro risultava ancora distante da quello di una tromba;
- terzo modello è stato ideato da Stefano Lucato, sviluppato poi nel dettaglio in quanto, dagli esperimenti fatti, è risultato essere quello che ha permesso di ottenere una maggior fedeltà allo strumento preso in esame.

¹Sintesi ideata da J. O. Smith

²“Trumpet Model”, www.ron-berry.co.uk

Lo schema delle varie componenti del modello ideato da Lucato viene illustrato nel dettaglio in figura 17. Questo modello prende il nome di: sintesi sonora per tromba e trombone ad approccio ibrido ottenuto mediante sintesi sottrattiva successivamente filtrata e controllata attraverso modello fisico di tubo risonante.

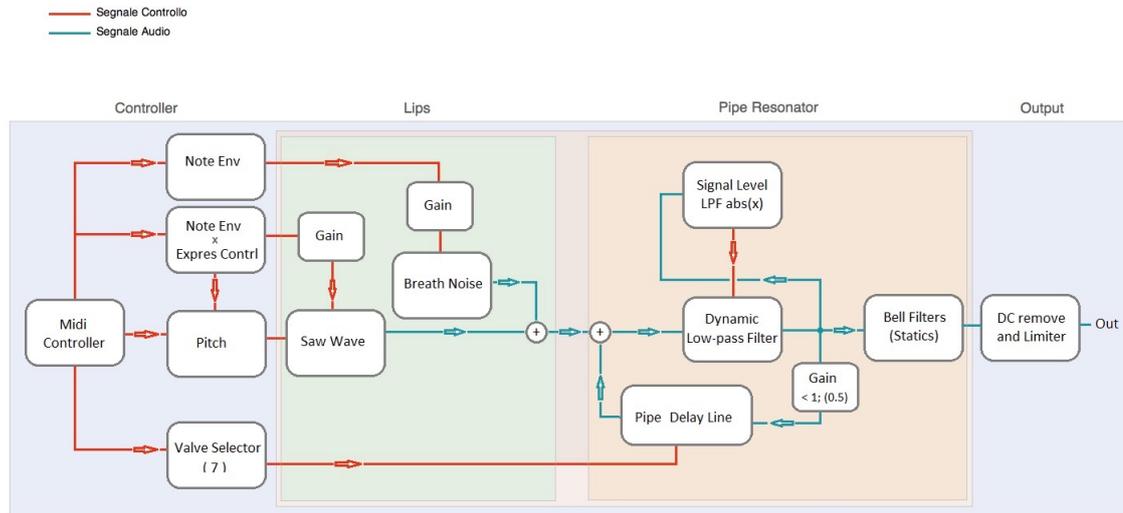


Figura 17: Componenti del modello realizzato di tromba. Vengono rappresentati: nell'area blu i moduli inerenti ai controller e all'output; nell'area verde i moduli inerenti alla modellazione delle labbra (exciter); nell'area arancione i moduli inerenti alla modellazione del tubo risonante (resonator) e della campana (radiator); con frecce rosse i segnali di controllo; con frecce verdi i segnali audio

La costruzione del modello si concentra sullo studio della fisica del tubo risonante della tromba e sulla sintesi sottrattiva partendo da un suono complesso, con il fine di ottenere, attraverso l'uso di filtri, un suono con alcune componenti attenuate o addirittura eliminate.

L'idea è quella di partire dalla generazione di un'onda a dente di sega, per la simulazione delle labbra del musicista, controllata attraverso una tastiera o un controller MIDI, filtrata poi da un filtro passa basso. In questo filtro la frequenza di taglio cambierà a seconda del livello del segnale, calcolato attraverso il valore assoluto del segnale presente nel cuore del modello, ovvero il tubo risonante. Viene generato nel rumore casuale, per emulare il soffio del musicista all'interno dell'imboccatura della tromba, e sommato all'onda a dente di sega. Il volume di questo rumore è indipendente dall'onda generata e può essere controllato a parte attraverso il relativo parametro presente sull'interfaccia grafica.

In *Valve Selector* vengono calcolati i pitch dei sette caneggi presenti nella tromba esclusivamente in relazione alla nota MIDI, mentre il pitch dell'onda a dente di sega

che rappresenta l'exciter (ovvero le labbra del musicista) è dipendente sia dalla nota premuta sul controller MIDI che dal relativo pitch bend. Per calcolare i sette cannecci viene creato un array contenente i valori delle sette lunghezze d'onda distribuite sui dodici semitoni che il tubo della tromba può assumere. Si ottengono così due pitch differenti e indipendenti, uno per l'onda a dente di sega (Saw Wave) e uno per il tubo risonante (Pipe Delay Line). Come ultimi elementi nella catena delle componenti del modello abbiamo un filtro risonante, utile per far risaltare le frequenze medio-alte tipiche della campana della tromba; un DC offset per correggere il posizionamento della forma d'onda in uscita che può risultare sbilanciata riportandola verso lo zero; infine un limiter per essere certi che il livello del segnale in uscita non superi mai un determinato valore e non produca quindi clipping, ovvero la conseguente distorsione della forma d'onda, nei dispositivi che seguono.

È importante sottolineare e ribadire l'indipendenza dei due pitch: quello corrispondente al Saw Wave e quello del Pipe Delay Line. Proprio per la loro indipendenza è possibile produrre gli effetti degli armonici caratteristici della tromba e proprio grazie al Valve Selector possiamo produrre le articolazioni che un trombettista è un grado di suonare con il suo strumento.

Di seguito, elencate in figura 18, troviamo le articolazioni che si possono generare:



Figura 18: Articolazioni

- fall, abbassamento costante e progressivo dell'altezza di un suono;
- quick fall, abbassamento, eseguito rapidamente, dell'altezza di un suono;
- shake, ottenuto oscillando la pressione del bocchino sulle labbra, con il risultato di produrre delle oscillazioni veloci simili all'effetto del vibrato, ma più ampio;
- gliss, consiste nell'innalzamento o nell'abbassamento costante e progressivo dell'altezza di un suono;

- rip, innalzamento costante e progressivo dell'altezza di un suono;
- doit, innalzamento costante e progressivo fino al raggiungimento dell'altezza del suono indicato;
- scoop, innalzamento eseguito rapidamente fino al raggiungimento dell'altezza del suono indicato;
- bend, consiste dell'innalzare l'intonazione della nota di un intervallo imprecisato, non necessariamente raggiungendo il suono di una nota della scala cromatica, a discrezione dell'esecutore.

4.2 Controlli e GUI

L'interfaccia grafica dello strumento virtuale realizzato si presenta come illustrato in figura 19.

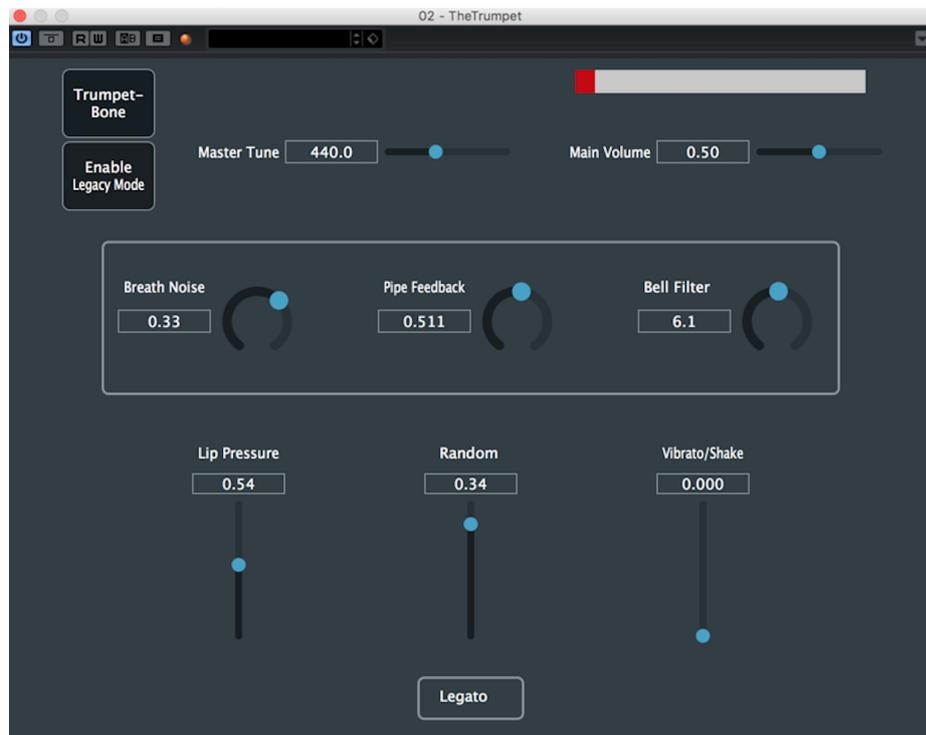


Figura 19: Interfaccia grafica

L'interfaccia presenta i seguenti controlli:

- Trumpet-Bone, permette di scegliere lo strumento da utilizzare fra tromba (bottone non abilitato) o trombone (bottone abilitato);
- Enable Legacy Mode, permette di suonare lo strumento virtuale sia con una tastiera standard (bottone non abilitato), sia con uno strumento MPE (bottone abilitato);
- Master Tune, frequenza principale in Hz, valore di default 440Hz, corrispondenti al valore standard utilizzato in musica;
- Main Volume, controllo del volume generale;
- Breath Noise, controllo del volume del rumore casuale, corrispondente al soffio del musicista;

- Pipe Feedback, controllo della quantità di feedback del tubo risonante, facendo particolare attenzione al fatto che questo gain dovrà essere sempre minore di uno, per evitare fenomeni di divergenza;
- Bell Filter, controllo per il volume (guadagno) del filtro Peak Bell EQ utilizzato per simulare la campana della tromba. Questo filtro ha la caratteristica di avere tre parametri:
 - guadagno, impostato come default a +6dB, agisce sull'ampiezza della campana attenuandone o amplificandone l'effetto;
 - frequenza di taglio, impostata a 4500Hz nella tromba e a 3500Hz nel trombone;
 - fattore di merito Q (Q factor), impostato a 1.0, corrisponde alla larghezza di banda di frequenze di risonanza della campana.
- Lip Pressure, regola la pressione delle labbra usata dal musicista per emettere suoni, valore assegnato al pedale d'espressione (controllo MIDI CC11) oppure al Channel Pressure del controller MPE;
- Random, controllo per l'entità della modulazione che influenza sia pitch che dinamica;
- Vibrato/Shake, controllo dell'intensità del vibrato;
- Staccato/Legato, indica il tipo di articolazione eseguita, può assumere i valori di:
 - staccato, nel caso l'esecutore suoni separatamente due o più note, in modo da differenziarle chiaramente;
 - legato, nel caso non sia presente del silenzio fra l'esecuzione di due note, in questo caso l'esecutore suonerà due o più note in modo ben connesso fra loro.

4.3 Analisi acustica

Viene analizzando nel dettaglio il suono ottenuto dallo strumento virtuale creato, utilizzando il software prodotto da Steinberg: Cubase Pro 8.5. La risultante forma d'onda estrapolata da un paio di secondi di registrazione è illustrata in figura 20.



Figura 20: forma d'onda prodotta dallo strumento virtuale

In figura 21 troviamo invece la forma d'onda generata da una vera tromba. In questo particolare esempio è stato eseguito il brano Amazing Grace.

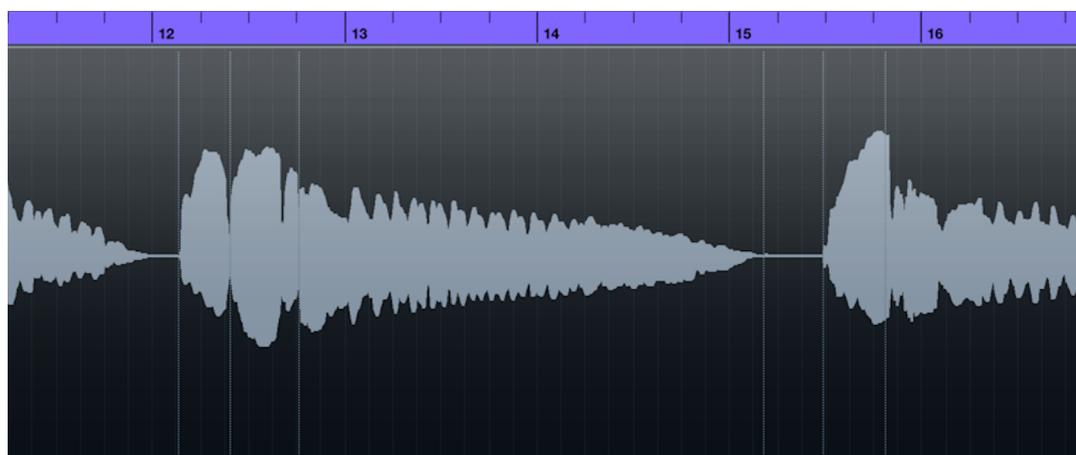


Figura 21: forma d'onda prodotta da una vera tromba

Come possiamo vedere la tipologia di forma d'onda risulta abbastanza simile a quella di uno strumento a fiato reale. Infatti analizzando la forma dell'involucro di questi esempi, troviamo che l'attacco cresce nei primi millisecondi, fino ad arrivare ad un valore di picco, raggiunto il quale il suono decresce rapidamente.

Anche all'ascolto il timbro ottenuto risulta realistico, il suono infatti è squillante e brillante come quello di una vera tromba.

Analizzando la forma d'onda da più vicino possiamo distinguere le ripetizioni dei vari periodi. Un esempio di un estratto di esecuzione lo troviamo in figura 22.



Figura 22: forma d'onda vista da vicino prodotta dallo strumento virtuale

Anche da questa rappresentazione si può notare come la natura della sorgente del suono, ovvero l'onda a dente di sega filtrata e pilotata dal tubo risonante, assomigli alla forma d'onda di uno strumento reale. Quest'ultima la possiamo trovare illustrata in figura 23.



Figura 23: forma d'onda vista da vicino di una vera tromba

Come ultima considerazione vengono prese in analisi le armoniche generate, illustrate nel dettaglio in figura 24.

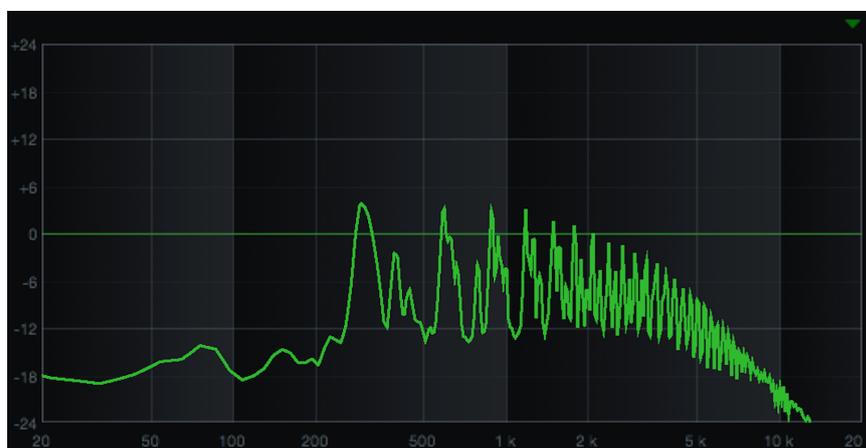


Figura 24: Armonici prodotti dallo strumento virtuale

In questo esempio troviamo la frequenza fondamentale intorno ai 350Hz, seguita dalla moltitudine di armoniche. Dallo spettro delle frequenze possiamo vedere come, intorno ai 2000Hz, le componenti delle parziali alte inizino ad abbassarsi, scomparendo sopra ai 10000Hz.

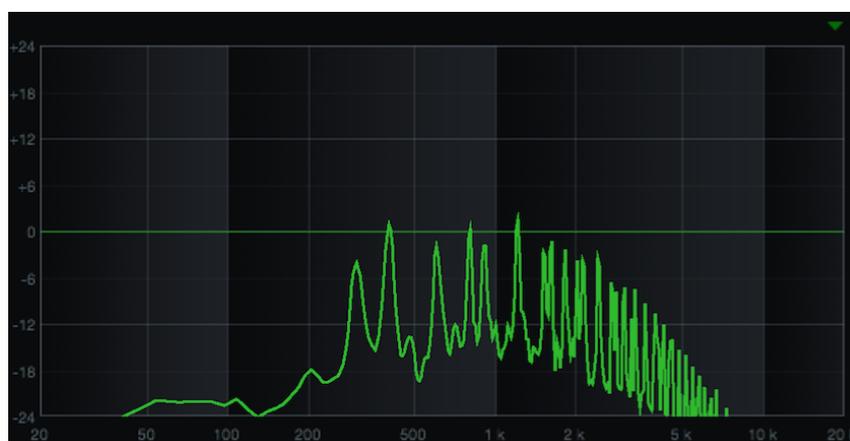


Figura 25: Armonici prodotti da una vera tromba

In figura 24 e 25 vengono confrontate le armoniche prodotte. Le prime generate dallo strumento virtuale; le seconde generate da una vera tromba. Anche in questa figura possiamo notare la somiglianza fra le due figure.

Capitolo 5

Conclusioni

5.1 Risultati ottenuti

In conclusione, anche se la gran parte degli strumenti in produzione è basata su sintesi a campioni, si può affermare che ad oggi la sintesi per modelli fisici sia tra le migliori sintesi emulative, in quanto non solo è in grado di riprodurre con buona approssimazione le caratteristiche timbriche dello strumento, ma è in grado anche di riprodurre i comportamenti e le reazioni dello strumento in funzione del tipo di esecuzione di musicista.

La sintesi per modelli fisici, dal punto di vista del consumo delle risorse del computer in termini di memoria, risulta molto più efficiente rispetto l'utilizzo di una sintesi a campioni, contrariamente la prima richiede in termini di CPU molte più risorse rispetto alla seconda a causa dei numerosi calcoli richiesti per l'elaborazione del modello in tempo reale. D'altro canto, se una buona progettazione e ottimizzazione degli algoritmi può far risparmiare potenza di calcolo, nei sistemi a campionamento, con il passare del tempo, pare invece che le librerie aumentino sempre più le loro dimensioni raggiungendo anche svariati GByte.

Per quanto riguarda i risultati conseguiti dall'implementazione del modello descritto nel Capitolo 4, si è ottenuto uno strumento virtuale sufficientemente aderente, per caratteristiche timbriche e comportamentali, a una vera tromba. Il sistema nel complesso risulta stabile e facile da utilizzare.

5.2 Sviluppi futuri

Il modello sviluppato e descritto nel Capitolo 4 di sintesi sonora per tromba e trombone ad approccio ibrido, è un modello approssimato al quale potranno essere apportate diverse migliorie, ad esempio:

- utilizzare un'onda a dente di sega che non crei aliasing, questo costituisce un serio problema che si riflette direttamente sull'uscita del sistema in esame, distorcendone la forma d'onda;
- implementare un sistema di cross-fade per simulare l'effetto prodotto dall'utilizzo dei pistoni di una vera tromba;
- implementare altre compensazioni comportamentali di vario tipo.

Bibliografia

- [1] “The Karplus-Strong Algorithm”, ccrma.stanford.edu, 08 Febbraio 2018.
- [2] K. Karplus, A. Strong, “Digital Synthesis of Plucked-String and Drum Timbres”, *Computer Music Journal*, Vol. 7, No. 2, pp. 43-55, The MIT Press, 1983.
- [3] G. Albini, “Scolpire il suono”, www.giovanialbini.it, 16 Febbraio 2015, 08 Febbraio 2018.
- [4] “Introduzione alla sintesi del suono”, www.sintetizzatore.com, 15 Gennaio 2018.
- [5] D. Bernoulli, “Hydrodynamica”, Legge sulla conservazione dell’energia, 1738.
- [6] A. Frova, “Fisica nella musica”, Zanichelli, 1999.
- [7] “Modeling the Lips and Mouthpie”, ccrma.stanford.edu, 15 Gennaio 2018.
- [8] “Fisica, onde Musica”, <http://fisicaondemusica.unimore.it>, 2010, 08 Febbraio 2018.
- [9] “Scientific background, analyses, syntheses and audio examples”, www.samplemodeling.com, 14 Dicembre 2017.
- [10] “Tromba e altri ottoni”, <http://www.treccani.it>, 05 Gennaio 2018.
- [11] Peretti, “Metodo per Tromba Volume 1 - Nuova Scuola d’Insegnamento della Tromba in Sib”, Ricordi, 2012.
- [12] “What is MPE?”, <https://support.roli.com>, 10 Gennaio 2018.
- [13] F. A. Simonazzi, “MPE - MIDI - Polyphonic - Expression”, <http://www.alarrecordingstudio.com>, Agosto 2017, 14 Gennaio 2018.
- [14] “MIDI POLYPHONIC EXPRESSION (MPE) SPECIFICATION ADOPTED!”, <https://www.midi.org/articles/midi-polyphonic-expression-mpe>, 08 Febbraio 2018.
- [15] “What are Blocks?”, <https://support.roli.com>, 10 Gennaio 2018.

Ringraziamenti

Ringrazio tutte le persone che in qualche modo hanno contribuito ad aiutarmi in questo percorso, in particolare ringrazio:

Stefano Lucato, Emanuele “Lele” Parravicini e Simone Malacrida per il tempo che mi hanno dedicato malgrado i loro numerosi impegni e per l’entusiasmo che mi hanno trasmesso, senza di loro non sarei mai riuscita a crescere così tanto e a toccare con mano la moltitudine di strade che le nuove tecnologie possono offrirci.

Il professore Luca Andrea Ludovico e Giorgio Presti per l’aiuto concreto nella stesura di questo elaborato.

Le persone a me più care: Giusy, Elisa T., Claudia, Ambra, Rossana, Marta, Elisa C., Francesca, Daniela, Marzia, Alberto “Pongo”, Chiara, Ivan A., Marica, Matteo, Lorenzo, Leonardo, per avermi supportato e sopportato anche in questo cammino.

Alice per avermi rialzata, spronata e trasmesso la forza di continuare.

Mauro e Chiara dello studio 4cmp per avermi indirizzato sulla giusta strada e per la loro fiducia.

I miei amici e compagni di questo percorso universitario Lorenzo, Giulia, Davide P., Roberto, Davide B., Mirko, Nelson, Stefano, Mattia, Dario, Daniele, Manuel, Beatrice e Chiara per avermi aiutata a superare molte difficoltà in questi tre anni.

I ragazzi della Lezard per avermi accolta con entusiasmo e insegnato che con l’arrampicata posso superare ogni ostacolo.

Infine ringrazio la mia famiglia per avermi dato tutti i mezzi per intraprendere questo percorso.