

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI VERONA
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI



Corso di Laurea in Informatica

Tesi di Laurea

Un modello fisico del pianoforte per la sintesi del suono

Relatore: Prof. Davide Rocchesso
Correlatore: Dott. Gianpaolo Borin

Laureando: Ermes Caramaschi
Matricola: IN000499

Anno Accademico 2003/2004

*“O Freude, nicht diese Töne!
Sondern laßt uns angenehmere
anstimmen und freudvollere!...”*
(Schiller, Beethoven)

Indice

Lista dei simboli	1
1 Introduzione	3
1.1 Sommario	4

Lista dei simboli

Unità di misura espresse nel Sistema Internazionale (SI).

a_1, a_2	coefficienti del filtro IIR
b_1, b_3	coefficienti di dissipazione della corda [kg/(m ³ s)] [kg/(ms)]
B	fattore di inarmonicità
c	velocità dell'onda sulla corda [m/s]
d	diametro della corda [m]
f_0	frequenza fondamentale della corda in assenza di rigidità [Hz]
f_r	frequenza di risonanza [Hz]
f_s	frequenza di campionamento [Hz]
F	forza [N]
H_a	filtro allpass per una delay line lungo a
i	indice della waveguide ($i = 1, 2, \dots, K$)
k	coefficiente di rigidità del feltro
K	numero delle corde (o waveguide)
l, L	lunghezza della corda [m]
m	indice della waveguide
m_h	massa del martelletto [kg]
M	lunghezza del digital waveguide
M_{in}	posizione di ingresso della forza nella digital waveguide
M_{out}	posizione di osservazione nella digital waveguide
n	numero delle parziali inarmoniche
N	numero di ritardi nella digital waveguide ($N = 2M$)
p	esponente di rigidità del feltro
Q	modulo di Young [N/m ²]
r_F	coefficiente di riflessione per la forza dell'onda
r_v	coefficiente di riflessione per la velocità dell'onda
S	l'area di una sezione della corda [m ²]
t	tempo [s]
t_n	istante temporale del passo di campionamento n nel dominio del tempo
T	tensione [N]
T_s	periodo di campionamento [s = Hz ⁻¹]

v	velocità [m/s]
v_s	velocità al punto di giunzione (ponte) [m/s]
x	posizione longitudinale lungo la corda [m]
x_{fret}	posizione longitudinale del punto d'urto [m]
y	posizione trasversale lungo la corda [m]
y_h	posizione trasversale del martelletto [m]
y_s	posizione trasversale della corda [m]
y_{fret}	posizione trasversale del punto d'urto [m]
y^+	componente dell'onda che si sposta verso destra
y^-	componente dell'onda che si sposta verso sinistra
Z	impedenza [kg/s]
Z_0	impedenza caratteristica della corda [kg/s]
Z_S	<i>Driving-Point Impedance</i> della tavola armonica [kg/s]
ε	coefficiente di rigidità della corda
κ	raggio di torsione della corda [m]
λ	lunghezza d'onda [m]
μ	densità di massa lineare [kg/m]
ξ	posizione longitudinale della corda [m]
τ	tempo di decadimento [s]

Capitolo 1

Introduzione

Quando Ludwig van Beethoven lasciò Bonn per recarsi a Vienna, egli era famoso soprattutto come virtuoso del pianoforte. La metamorfosi del vecchio *Hammerflügel* nel moderno pianoforte fu praticamente merito di Beethoven, che fu anche il primo compositore a scrivere per questo strumento. Da allora innumerevoli furono gli artisti che utilizzarono il pianoforte per esprimere il loro pensiero e trasmettere emozioni, cosicché oggi questo timbro riveste un ruolo dominante all'interno della musica occidentale.

Lo scopo di questa tesi è capire e simulare più aspetti della generazione del suono del pianoforte, sperimentando inoltre nuove sonorità sintetiche. Partendo dalla descrizione definita dagli attributi propri della concretezza e fisicità dello strumento e dalle sue leggi fisiche, espresse come formule ed equazioni matematiche, vengono generati degli algoritmi di sintesi sonora in cui il modello simula i fondamentali comportamenti fisici e i parametri caratterizzano le peculiari misure geometriche e fisiche del pianoforte, come ad esempio le masse, le tensioni, le lunghezze e così via. È questo un modo di procedere vantaggioso che a differenza dei metodi classici, i quali partono dal suono reale e ne modificano dei campioni pre-registrati, indaga e modella direttamente la fonte sonora.

I modelli fisici di strumenti musicali in questi ultimi anni hanno avuto grande sviluppo e fortuna diventando uno dei campi più attivi nella ricerca di sintesi sonora,

nell'acustica e nella computer music. Essi danno un maggiore senso di controllo all'utente, mettendo a disposizione tools per controllare e produrre sia suoni tradizionali che sintetici. L'approccio basato su modello fisico, a differenza dei metodi tradizionali costruiti su campioni pre-registrati, permette di modificare e calibrare un ristretto insieme di parametri per ottenere un suono che modelli uno specifico timbro. In questo modo, data la struttura generale, si possono ricostruire gli effetti dei particolari strumenti dai dati fisici che li caratterizzano. Diventa quindi un problema primario la stima dei parametri, obiettivo non banale dato che la struttura generale del modello deve essere costruita a priori. Non è però nostro intento arrivare a modellare un suono specifico che descriva pedissequamente un particolare pianoforte, ma delineare un metodo generale adatto ad una famiglia di strumenti.

Un modello fisico non presuppone che ogni parte implementativa abbia un suo corrispondente fisico che descriva il comportamento di un pianoforte reale; va invece ricercato un connubio che permetta di utilizzare il metodo più vantaggioso per simulare le diverse parti dello strumento.

Uno svantaggio delle tecniche basate su modelli fisici è l'alto costo computazionale, ragione per cui, a parte sporadici prodotti quali ad esempio il sintetizzatore Yamaha VL-1 [?] o il noto VG-8 Guitar Synth della Roland¹ [?], non hanno ancora avuto una grande fortuna commerciale rispetto alla sintesi basata su campioni salvati su wavetable. La potenza computazionale dei digital signal processors cresce di anno in anno, il che spinge a progettare algoritmi che lavorino in real-time. A seconda delle esigenze si cerca un compromesso tra prestazioni e semplicità.

1.1 Sommario

Nel Capitolo 2 vengono descritte le peculiari caratteristiche costruttive, funzionali e timbriche dei pianoforti acustici; contemporaneamente sono trattati cenni storici sullo strumento per far comprendere il suo ruolo nella musica occidentale di questo periodo storico. Le principali componenti fisiche del pianoforte sono delineate separatamente. Viene descritto il funzionamento del martelletto e del feltro, congiuntamente si da

¹Si noti che la fortuna di questo prodotto è data principalmente dal buon risultato in sala di registrazione, poiché il segnale della chitarra non deve passare da un'amplificatore. Ciò nonostante molti musicisti riscontrano un delay nella risposta, dovuto proprio alla complessità di calcolo.

una approssimazione delle leggi fisiche che lo governano. In seguito vengono descritti i comportamenti delle corde che maggiormente influenzano lo spettro armonico: i battimenti, il two-stage decay, l'inarmonicità dovuta alla rigidità che caratterizza in modo particolare le corde gravi, ed i modi longitudinali. Viene considerato l'influsso della tavola armonica e del ponticello sulla tempa, e se ne approssima il comportamento in prospettiva di una simulazione efficace. Infine è descritto accuratamente il comportamento e funzionamento dei pedali.

Nel Capitolo 3 viene trattata la tecnica di sintesi musicale adottata in questo lavoro: la modellazione fisica. Dapprima sono confrontati pregi e difetti delle possibili alternative; successivamente vengono introdotte le *digital waveguide*, struttura portante su cui si basa la riproduzione digitale delle corde di pianoforte. Vengono date le equazioni che governano le onde viaggianti sulle corde e riflessi alle terminazioni. Viene inoltre presentata la giunzione di *scattering* che sta alla base dei reticoli di waveguide, ovvero di waveguide interconnesse, ma che verrà altresì usata per connettere il modello del martelletto ed il modello delle corde.

Nel Capitolo 4 viene analizzato dettagliatamente uno specifico modello di pianoforte implementato secondo le tecniche descritte nei Capitoli precedenti, e che verrà utilizzato per realizzare i sistemi del Capitolo successivo. Il modello verrà scomposto in tre blocchi funzionali: martelletto o eccitatore, corda o risonatore e tavola armonica. Di ognuno di essi viene precedentemente presentata una panoramica di ciò che si trova nella letteratura enfatizzando i vantaggi ed i problemi dati dall'uso dei vari metodi, viene poi esaminata la tecnica adottata nel modello in uso. Particolare attenzione è posta circa tutti i caratteri fisici del pianoforte acustico individuati nel Capitolo 2.

Nel Capitolo 5 sono affrontate tre differenti sezioni. La prima riguarda lo studio dei ritardi tra punto d'impatto e ponte del modello studiato e presentato nel Capitolo 4. Identificate le limitazioni ne viene proposta, implementata e testata una nuova soluzione. La seconda sezione tratta l'analisi dell'urto delle corde contro un oggetto rigido. Il modello del pianoforte viene esteso con una nuova gestione della digital waveguide sinistra che modella fisicamente l'effetto studiato; questo fenomeno, sebbene non sia presente nei pianoforti acustici, è fondamentale nel suono di altri strumenti quali la chitarra basso suonata in *slap* o strumenti orientali quali il *sitar* indiano.

Nella terza sezione viene analizzata una innovativa tecnica per ricreare, attraverso la modellazione fisica, i modi longitudinali delle corde del pianoforte. Individuati alcuni vincoli, ne viene proposta e realizzata una nuova versione che meglio si adatti al modello utilizzato.

Infine il Capitolo 6 contiene le conclusioni del lavoro con i risultati ottenuti ed i possibili sviluppi futuri.