

Modellazione digitale del pianoforte

Carmine-Emanuele Cella

Conservatorio "G. Rossini" - Pesaro

26 gennaio 2010

Introduzione

Il pianoforte

Modelli digitali

Modellare: processo a tre fasi

Creare un modello digitale di uno strumento significa:

1. Estrarre gli elementi chiave della meccanica strumentale
(astrazione)

Modellare: processo a tre fasi

Creare un modello digitale di uno strumento significa:

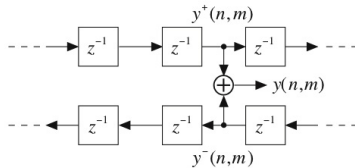
1. Estrarre gli elementi chiave della meccanica strumentale **(astrazione)**
2. Rappresentare tali nel dominio digitale **(mapping)**

Modellare: processo a tre fasi

Creare un modello digitale di uno strumento significa:

1. Estrarre gli elementi chiave della meccanica strumentale
(astrazione)
2. Rappresentare tali nel dominio digitale **(mapping)**
3. Realizzare un prototipo digitale dello strumento esaminato
(implementazione)

Un esempio



```
class KarplusStrong {  
public:  
    KarplusStrong (double sr) {  
        srand (time (NULL));  
        m_delay = new DelayLine (4096);  
        if (sr <= 0) sr = 44100;  
        m_sr = sr;  
        m_avg = 0;  
        m_decay = 1;  
    }  
}
```

Elementi fondamentali (1)

Sequenze digitali (es. 3 1 5 3 64 2 23 5 .4 -2 ...):

1. Si usano per rappresentare tutti i concetti coinvolti

Elementi fondamentali (1)

Sequenze digitali (es. 3 1 5 3 64 2 23 5 .4 -2 ...):

1. Si usano per rappresentare tutti i concetti coinvolti
2. Sono finite

Elementi fondamentali (1)

Sequenze digitali (es. 3 1 5 3 64 2 23 5 .4 -2 ...):

1. Si usano per rappresentare tutti i concetti coinvolti
2. Sono finite
3. Godono di importanti proprietà (es. periodicità)

Elementi fondamentali

Per rappresentare digitalmente si usano (tra gli altri):

1. Linee di ritardo (ripetono una sequenza dopo un tempo t)

Elementi fondamentali

Per rappresentare digitalmente si usano (tra gli altri):

1. Linee di ritardo (ripetono una sequenza dopo un tempo t)
2. Filtri di ordine basso (ritardano la sequenza e la modificano)

Elementi fondamentali

Per rappresentare digitalmente si usano (tra gli altri):

1. Linee di ritardo (ripetono una sequenza dopo un tempo t)
2. Filtri di ordine basso (ritardano la sequenza e la modificano)
3. Operazioni con sinusoidi (sequenze periodiche)

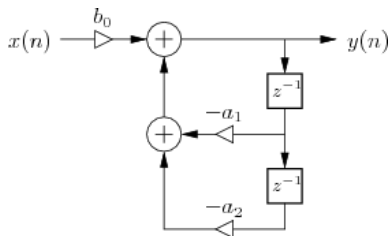
Elementi fondamentali

Per rappresentare digitalmente si usano (tra gli altri):

1. Linee di ritardo (ripetono una sequenza dopo un tempo t)
2. Filtri di ordine basso (ritardano la sequenza e la modificano)
3. Operazioni con sinusoidi (sequenze periodiche)
4. Convoluzione (somma e moltiplicazione di sequenze)

Due casi importanti (1)

Filtro a soli poli del 2 ord.: $y(n) = b_0x(n) - a_1y(n) - a_2y(n)$



Questa struttura contiene 2 linee di ritardo (z^{-1}), è un filtro e sotto particolari condizioni genera una sinusoide smorzata.

Due casi importanti (2)

Convoluzione: date due sequenze f e g la loro convoluzione $(*)$ è:

$$(f * g)(m) = \sum_n f(n)g(m - n) \quad (1)$$

In generale, *convolvere* due sequenze significa applicare le caratteristiche di una sequenza sull'altra.

Caratteristiche sonore

- ▶ Natura complessa

Caratteristiche sonore

- ▶ Natura complessa
- ▶ Il suono è prodotto (principalmente) dalle vibrazioni trasversali delle corde

Caratteristiche sonore

- ▶ Natura complessa
- ▶ Il suono è prodotto (principalmente) dalle vibrazioni trasversali delle corde
- ▶ È essenzialmente un suono armonico con un coefficiente di disarmonicità

Caratteristiche sonore

- ▶ Natura complessa
- ▶ Il suono è prodotto (principalmente) dalle vibrazioni trasversali delle corde
- ▶ È essenzialmente un suono armonico con un coefficiente di disarmonicità
- ▶ L'interazione corda-martello è non lineare

Caratteristiche sonore

- ▶ Natura complessa
- ▶ Il suono è prodotto (principalmente) dalle vibrazioni trasversali delle corde
- ▶ È essenzialmente un suono armonico con un coefficiente di disarmonicità
- ▶ L'interazione corda-martello è non lineare
- ▶ Varia nel tempo e segue un decadimento a due fasi (double decay)

Frequenze dei modi trasversali

È possibile calcolare la frequenza dell n -esimo modo trasversale di una corda con la seguente formula:

$$f_n = nf_1 = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\tau}{\rho A}} \quad n = 1, 2, \dots \quad (2)$$

dove τ è la tensione della corda, l la sua lunghezza e n il numero del modo.

Disarmonicità

Le corde tuttavia hanno una certa rigidità (stiffness) che crea un effetto non lineare chiamato *disarmonicità*. Tale effetto cambia la frequenza dei ogni modo come segue:

$$f_n = nf_1 \sqrt{1 + Bn^2} \quad n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

dove B è un fattore determinato da proprietà fisiche della corda come materiale, dimensioni, ecc. (modulo di Young).

Sistema corda-martello (1)

- ▶ Quando il martello viene azionato contro la corda, genera un treno di impulsi che si diffondono sulla corda e si riflettono sulle estremità.

Sistema corda-martello (1)

- ▶ Quando il martello viene azionato contro la corda, genera un treno di impulsi che si diffondono sulla corda e si riflettono sulle estremità.
- ▶ Gli impulsi riflessi cambiano l'accelerazione del martello causando impulsi secondari e separando temporaneamente il martello dalla corda.

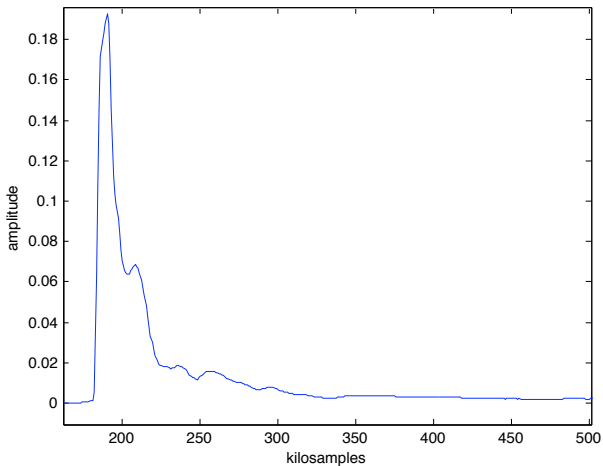
Sistema corda-martello (2)

Tutta l'interazione dura tipicamente da 0.5 ms a 5 ms ed è descritta dalla seguente formula:

$$F(t) = k \left[x(t)^p - \epsilon \int_0^t x(t - \zeta)^p e^{(\zeta/\tau_0)} d\zeta \right] \quad (4)$$

dove, p è la costante di non-linearità, x è il coefficiente di compressione, τ_0 è la costante di isteresi.

Il doppio decadimento



Altri fattori importanti

- ▶ Vibrazioni longitudinali
- ▶ Punto di percussione
- ▶ Radiazione della tavola armonica
- ▶ Scala duplex
- ▶ Battimenti
- ▶ *Phantom partials*
- ▶ Effetto quadratico
- ▶ Transitorio d'attacco rumoroso (*hammer noise*)

Breve panoramica

1. Modello a campionamento PCM

Breve panoramica

1. Modello a campionamento PCM
2. Modello mediante sintesi additiva

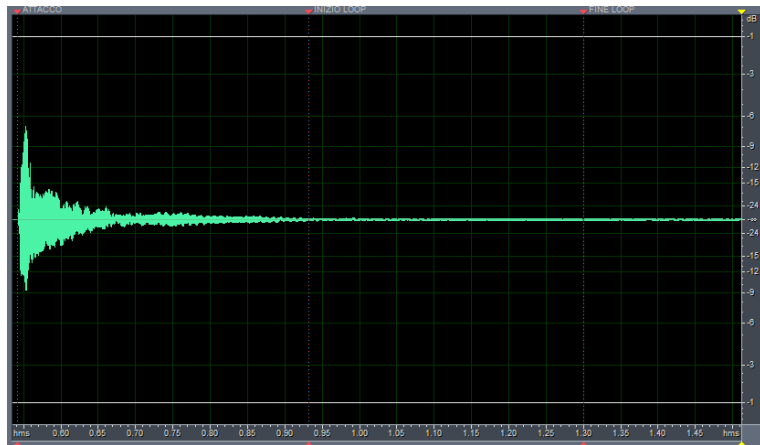
Breve panoramica

1. Modello a campionamento PCM
2. Modello mediante sintesi additiva
3. Modello mediante sintesi FM (Schoettstaedt)

Breve panoramica

1. Modello a campionamento PCM
2. Modello mediante sintesi additiva
3. Modello mediante sintesi FM (Schoettstaedt)
4. Modello fisico (Smith, ecc.)

Modello a campionamento PCM (1)



Modello a campionamento PCM (2)

1. Non è un vero e proprio modello

Modello a campionamento PCM (2)

1. Non è un vero e proprio modello
2. Problema del loop

Modello a campionamento PCM (2)

1. Non è un vero e proprio modello
2. Problema del loop
3. L'interattività con la dinamica va simulata

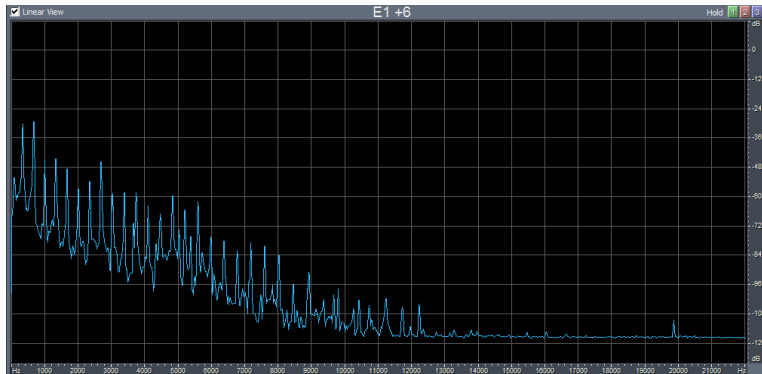
Modello a campionamento PCM (2)

1. Non è un vero e proprio modello
2. Problema del loop
3. L'interattività con la dinamica va simulata
4. Molto usato commercialmente (GENERAL MIDI)

Modello a campionamento PCM (2)

1. Non è un vero e proprio modello
2. Problema del loop
3. L'interattività con la dinamica va simulata
4. Molto usato commercialmente (GENERAL MIDI)
5. Risultati eccellenti con campioni lunghi (es. VST)

Modello mediante sintesi additiva (1)



Modello mediante sintesi additiva (2)

1. Richiede un'analisi efficace

Modello mediante sintesi additiva (2)

1. Richiede un'analisi efficace
2. Dispendioso dal punto di vista del calcolo

Modello mediante sintesi additiva (2)

1. Richiede un'analisi efficace
2. Dispendioso dal punto di vista del calcolo
3. Non facile da gestire

Modello mediante sintesi additiva (2)

1. Richiede un'analisi efficace
2. Dispendioso dal punto di vista del calcolo
3. Non facile da gestire
4. Non modella le componenti rumorose (es. hammer noise) che quindi vanno aggiunte

Modello mediante sintesi additiva (2)

1. Richiede un'analisi efficace
2. Dispendioso dal punto di vista del calcolo
3. Non facile da gestire
4. Non modella le componenti rumorose (es. hammer noise) che quindi vanno aggiunte
5. Richiede la convoluzione con la risposta impulsiva della tavola

Modello mediante sintesi FM (1)

Proposto negli anni '70 da B. Schottstaedt si basa sulla modulazione di frequenza con modulante complessa:

$$e = A(t)\sin[2\pi f_c t + I_1 \sin 2\pi(f_{m1} + S)t + I_2 \sin 2\pi(f_{m2} + S)t] \quad (5)$$

dove:

$$I_1 = 17(8 - \log_e f_c) / (\log_e f_c)^2$$

$$I_2 = 20(8 - \log_e f_c) / f_c \quad f_c : f_{m1} : f_{m2} = 1 : 1 : 4$$

$$S = f_c / 200$$

Modello mediante sintesi FM (2)

1. Molto efficiente dal punto di vista del calcolo

Modello mediante sintesi FM (2)

1. Molto efficiente dal punto di vista del calcolo
2. Modella la disarmonicità

Modello mediante sintesi FM (2)

1. Molto efficiente dal punto di vista del calcolo
2. Modella la disarmonicità
3. Sebbene semplice si può espandere facilmente aggiungendo: martelli, convoluzione con la tavola, modi longitudinali, ecc.

Modello mediante sintesi FM (2)

1. Molto efficiente dal punto di vista del calcolo
2. Modella la disarmonicità
3. Sebbene semplice si può espandere facilmente aggiungendo: martelli, convoluzione con la tavola, modi longitudinali, ecc.
4. Potrebbe essere riletto in chiave moderna per nuovi spunti

Modello fisico

1. Basato sull'idea di simulare il movimento meccanico dello strumento e non il suo suono

Modello fisico

1. Basato sull'idea di simulare il movimento meccanico dello strumento e non il suo suono
2. Le varie componenti fisiche vengono modellate (vedi sopra) mediante equivalenti digitali

Modello fisico

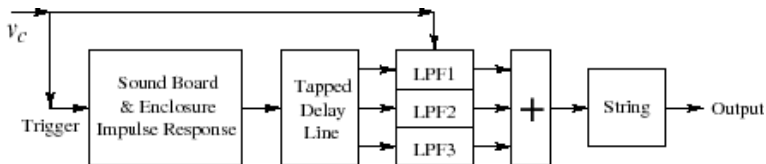
1. Basato sull'idea di simulare il movimento meccanico dello strumento e non il suo suono
2. Le varie componenti fisiche vengono modellate (vedi sopra) mediante equivalenti digitali
3. Esistono diverse formulazioni: waveguide, sintesi commutata, sintesi modale

Modello fisico

1. Basato sull'idea di simulare il movimento meccanico dello strumento e non il suo suono
2. Le varie componenti fisiche vengono modellate (vedi sopra) mediante equivalenti digitali
3. Esistono diverse formulazioni: waveguide, sintesi commutata, sintesi modale
4. Proposto per la prima volta da J. Smith all'università di Stanford negli anni '80

Sintesi commutata

Non è propriamente fisica bensì *physically inspired*:



Sintesi modale (1)

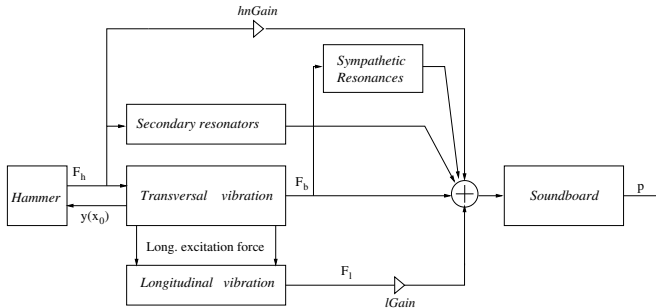
Si basa sulla discretizzazione della soluzione modale dell'equazione della corda:

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} w_k(x) y_k(t) \quad (6)$$

dove $w_k(x)$ sono pesi dipendenti dalla posizione spaziale e $y_k(t)$ sono le componenti temporali dei *modi normali* di vibrazione.

Sintesi modale (2)

Una possibile architettura:



Ciascun modo è una oscillazione smorzata e può essere implementato mediante strutture a soli poli (vedi sopra).

Grazie per l'attenzione... (domande?)