Convegno Nazionale
Matematica senza Frontiere
Lecce, 5-8 marzo 2003

Matematica, Musica e Tecnologie: un trinomio possibile

P. Pantano - E. Bilotta,

Centro Interdipartimentale della Comunicazione
Università della Calabria, Cubo 17B, Arcavacata di Rende (CS)
bilotta/piepa@unical.it

Sommario

In questo lavoro descriviamo come le tecnologie dell'informazione e della computazione arricchiscono il classico rapporto tra Matematica e Musica, mettendo a disposizione dell'artista nuovi metodi e strumenti per la creatività musicale. I nuovi modelli della Scienza legati ai frattali, ai sistemi dinamici, alla complessità e al caos forniscono una grande quantità di strutture matematiche che attraverso opportuni codici possono essere tradotti in suoni e musica. L'artista può usare questo contesto per le proprie produzioni, ed il matematico può trovare nelle produzioni musicali una semantica delle strutture matematiche astratte che intervengono nel corso dei suoi studi. In questo lavoro vengono esplorati i rapporti tra Spazi Matematici, Spazi Sonori e Spazi Musicali e come le strutture matematiche possono essere tradotte in musica attraverso opportuni codici.

1 Introduzione

Fin dall'antichitá il rapporto tra Matematica e Musica è stato esplorato. Da sempre la lettura della Natura ha permesso agli Scienziati di desumere le leggi matematiche che modellano i processi che la pervadono. E tali rapporti numerici si ritrovano nel nostro modo di intendere la realtà. La serie di Fibonacci, la sezione aurea, le leggi della Gestalt sono solo alcuni esempi di come i nostri sensi principali, visione e udito, siano sintonizzati sulle dinamiche che gestiscono i processi della Natura, che diventano processi inconsci o consci di conoscenza e rappresentazione.
Pitagora trovò che rapporti tra le lunghezze delle corde vibranti espressi da rapporti tra piccoli numeri (1:2, 1:3, 2:3,...) producevano suoni armoniosi [26] [16]. L'armonia, alla base della teoria della consonanza, risultava pertanto strettamente correlata ai rapporti tra piccoli numeri. Anche se bisognò aspettare il XIX secolo con l'analisi di Fourier perché questo fenomeno fosse compreso, almeno per ciò che concerne la Fisica, la stretta correlazione

[1]Dipartimento di Linguistica, Università della Calabria
[2]Dipartimento di Matematica, Università della Calabria

tra Matematica e Musica ispirò parecchi scienziati e artisti, come Keplero e Bach solo per citarne alcuni. Le strutture matematiche sono presenti in molte opere musicali. Canoni e fughe possono essere spiegati in termini di gruppi di simmetrie e rotture di simmetrie [31]. É meno noto, ma non per questo meno interessante, che strutture frattali siano presenti in molte opere storiche [17] [21] e questo rafforza la convinzione che Matematica e Musica si relazionino tra loro ad un livello molto profondo. Questo articolo mira a mettere in evidenza come il rapporto storico tra Matematica e Musica trova un ulteriore rafforzamento con i nuovi paradigmi della Scienza Contemporanea, fornendo esempi sull'uso delle più avanzate tecniche computazionali che mettono a disposizione importanti strumenti di analisi e di creazione di artefatti musicali. In un certo senso la Musica rappresenta la semantica delle varie strutture matematiche e, in un senso più ampio, della natura del mondo quando questi modelli sono alla base di teorie empiriche che intercettano e spiegano i fenomeni naturali.
L'uso degli elaboratori elettronici ha allargato molto il campo d'indagine degli studiosi della natura ed una nuova categoria di fenomeni, puramente artificiali, sono venuti alla luce. Gli Universi Artificiali dove questi fenomeni intervengono, sono stati creati dalla fantasia degli scienziati, al fine di comprendere, in contesti più limitati e sotto controllo, fenomeni biologici complessi come la riproduzione e l'auto-riproduzione, l'evoluzione, l'auto-organizzazione; in questi settori le classiche teorie della scienza basate sulla previsione certa dell'accadere di alcuni fenomeni non funzionano molto bene a causa della natura complessa del contesto che rende l'impredicibilità una caratteristica costante. Gli Automi Cellulari sono uno dei principali strumenti utilizzati e rappresentano uno degli argomenti di questo lavoro. Vedremo che la Musica è non solo una manifestazione fenomenica ma una delle possibili chiavi interpretative e di indagine del settore. In un certo senso essa rappresenta la Semantica dei fenomeni complessi che via via si manifestano. Per comprendere però appieno tale uso, dovremo procedere per gradi ed introdurre una serie di nozioni e convenzioni.
Questo lavoro riassume studi e ricerche pluriennali condotte all'interno del gruppo di ricerca interdisciplinare sui Sistemi Evolutivi (ESG- Evolutive System Group) presente presso l'Università della Calabria, i cui lavori sono rintracciabili al seguente indirizzo http://galileo.cincom.unical.it/esg/ dove è disponibile anche una galleria di immagini e di musiche direttamente collegate a quanto esposto in questo lavoro. Una ricaduta importante da un punto di vista scientifico di queste attività di ricerca è l'organizzazione dei workshop ALMMA (Artificial Life Models fo Musical Applications), la cui prima edizione si è svolta a Praga nel 2001, la seconda a Sydney nel 2002 e la terza si svolgerà a Dortmund nel 2003.
Il lavoro è organizzato nel modo seguente: nella sezione 2 vengono descritti gli spazi sonori e gli spazi musicali e come essi possono essere matematicamente rappresentati. Questo consentirà di creare analogie tra strutture matematiche e strutture musicali. Nella sezione 3 vedremo come l'emer-

genza del caos in sistemi dinamici può essere rappresentata musicalmente e come la musica può consentire l'esplorazione dei vari fenomeni. Nella sezione 4, utilizzando gli automi cellulari, analizzeremo la complessità dei vari fenomeni emergenti in universi artificiali e vedremo come tale complessità può essere tradotta in musica.
Nella sezione 5 concentreremo la nostra attenzione sugli auto-riproduttori alla base del tentativo di von Neumann di comprendere la logica della vita e come questo può essere fonte di ispirazione di vari costrutti musicali. Nella sezione 6 descriveremo l'evoluzione dei sistemi biologici e come la consonanza pitagorica può essere utilizzata per la creazione di artefatti musicali. Nella sezione 7 trarremo infine delle conclusioni.

2 Spazi Matematici, Spazi Sonori e Spazi Musicali

I principali parametri fisici del suono [16] [29] sono :

- Intensità: è legata all'energia dell'onda sonora che si propaga nell'aria e che viene percepita dal nostro orecchio come volume del suono.
- Altezza: è la frequenza dell'onda sonora.
- Timbro: è legato alla forma dell'onda. Ogni strumento musicale ne ha uno proprio [28].
- Durata: è l'intervallo di tempo nel quale viene emesso il suono.

Per rappresentare formalmente queste grandezze possiamo introdurre il concetto di spazio sonoro che in prima approssimazione può essere rappresentato da uno spazio tridimensionale i cui assi rappresentano frequenza, durata e intensità. Una sequenza sonora è un insieme di punti in questo spazio.
In questa rappresentazione manca il timbro, che manifesta la presenza di armoniche superiori rispetto alla frequenza fondamentale. Se considerassimo anche il timbro, lo spazio sonoro avrebbe un'infinità di dimensioni. La scelta che si fa è considerare un insieme di timbri predefiniti etichettati da un numero ed aggiungere un'ulteriore dimensione allo spazio sonoro.
Questa ulteriore grandezza assume, in generale, valori discreti.
Vediamo ora come si può ottenere uno spazio musicale partendo dallo spazio sonoro precedentemente definito. Le note musicali sono ottenute scegliendo suoni di particolari frequenze. Esse possono essere generate tutte a partire dal LA fondamentale dimezzando o raddoppiando le frequenze e dividendo l'intervallo di ottava in 12 parti uguali nella scala logaritmica [16]. Nelle note musicali, un'ulteriore discretizzazione si effettua sulla durata delle note che ora assumeranno valore 4/4, 2/4, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64. Mantenendo costante l'intensità, lo spazio musicale può essere allora rappresentato come uno spazio discreto bidimensionale dove su un asse abbiamo inserito la durata della nota e sull'altro asse l'altezza della nota stessa.
Come avviene ad esempio nel codice MIDI [29], possiamo associare ad ogni

strumento musicale un numero compreso tra 1 e 128 e pertanto il nostro spazio musicale si trasforma in uno spazio tridimensionale discreto. Una nota corrisponderà allora ad un punto di tale spazio, da ora in poi indicato con M, e sarà individuata da una terna dove il primo numero rappresenta l'altezza della nota, il secondo numero la sua durata ed il terzo numero lo strumento con cui la nota deve essere eseguita:

$$nota = (Altezza, Durata, Strumento). \tag{1}$$

Una melodia allora diventa:

$$f : N \longrightarrow N^3 \tag{2}$$

dove f è un'applicazione che associa ad una sequenza di numeri naturali una terna di numeri naturali, che individuano, in una opportuna codifica binaria, la nota musicale. Pertanto una melodia *Me* può anche essere individuata da una successione di elementi di M:

$$Me = \{m_1, m_2, ..., m_i, ..., m_n | \ m_i \in M\} \tag{3}$$

Riassumendo, possiamo affermare che:

- Gli spazi musicali possono essere considerati come spazi tridimensionali, analoghi agli spazi sonori, solo che ora i valori di tutte le variabili saranno discreti.
- Questi spazi sono anche limitati.
- Il codice MIDI codifica esattamente, in formato binario, i valori (altezze) delle note, la durata e il timbro.

Una volta individuato rigorosamente lo spazio sonoro o musicale e le corrispondenti sequenze sonore o melodie, possiamo operare delle trasformazioni su esse. Ad esempio se consideriamo una melodia *Me*, possiamo costruire una nuova melodia operando con una traslazione sull'altezza della nota. Questo equivarrà a suonare la melodia su una scala melodica differente. Questo processo è alla base della costruzione dei canoni. Sulle sequenze musicali le più frequenti trasformazioni che possono essere fatte sono le seguenti [31]:

a) traslazioni (spostamento delle melodie in altezza o nel tempo)

b) riflessioni (sia in altezza che nel tempo)

c) mezzi giri (simmetrie puntuali).

A questo punto possiamo già stabilire delle corrispondenze tra strutture matematiche e strutture musicali in un modo del tutto naturale.
Ad esempio consideriamo delle curve nel piano o nello spazio individuate da

un parametro λ: considerando i valori λ ad intervalli discreti, un processo di sonificazione può far corrispondere ai punti $\{P_1, P_2, ...P_n, ...\}$ della curva individuata dai successivi valori di λ, una successione di punti nello spazio sonoro creando così una corrispondente sequenza sonora. Nella sezione successiva utilizzeremo un analogo processo per la sonificazione di traiettorie nello spazio delle fasi prodotte da sistemi dinamici. Sequenze musicali possono essere ottenute allo stesso modo.
È ben noto che più suoni o più note possono essere prodotte e ascoltate simultaneamente. Questo consente ad esempio di produrre più melodie che possono essere eseguite contemporaneamente. I canoni utilizzano tecniche di questo tipo: partendo da una successione iniziale di note, tramite una trasformazione, si creano altre melodie che vengono eseguite simultaneamente o con uno spostamento temporale. La possibilità di eseguire più melodie contemporaneamente e la stretta corrispondenza che può essere stabilita tra spazi matematici e spazi musicali, come vedremo con vari esempi nella sezione successiva, consente un'esplorazione molto interessante di strutture matematiche complesse come gli attrattori strani che si manifestano ad esempio nei sistemi dinamici [13], [20]. Ovviamente non sempre può essere stabilita una corrispondenza diretta tra una struttura matematica ed una sequenza sonora o musicale, ma è necessario fare delle operazioni intermedie, costruendo dapprima una successione di elementi e stabilendo, in una fase successiva, una corrispondenza tra questa successione ed una successione nello spazio sonoro o musicale.
Adottando come metafora un triangolo di musificazione [3], [6] che connette le strutture matematiche prodotte all'interno di qualche modello formale o teoria empirica e differenti meccanismi di musificazione o sonificazione, possiamo creare innumerevoli rappresentazioni o artefatti musicali. Questo processo sarà evidenziato nella sezione successiva quando parleremo diffusamente di musica generativa.

3 La musica generativa e l'esplorazione del Caos

Il più famoso esempio storico di composizione algoritmica è il Musikalisches Würfelspiel conosciuto anche come "gioco dei dadi musicali". Attribuita a Mozart, l'idea alla base di questo sofisticato gioco musicale consiste nella creazione di una melodia scegliendo a caso, tramite un lancio di dadi, una sequenza di battute precedentemente definite. Negli anni recenti l'avvento del computer ha reso disponibili alla composizione musicale molti altri strumenti sia concettuali che tecnici [29], [22], [14]. [3]
In particolare nuovi approcci basati sull'uso di iterazioni [18], sulla teoria

[3]Per una breve introduzione alla composizione automatica di musica si faccia riferimento al lavoro di Cope disponibile al seguente indirizzo http://arts.ucsu.edu/faculty/cope/history.html. Una grande lista di riferimenti sulla musica algoritmica è rintracciabile sulla banca dati algorithmic.net al seguente indirizzo http://www.flexatone.com/algoNet/refAuthor.html.

del caos [27], [2], [35], [30], [10], sui frattali [33], [34], [12], [15], [17], [21], sugli automi cellulari [23], [3], [6], sulla vita artificiale [7], [1] consentono ai compositori di allargare le loro possibilità creative nella produzione musicale.
L'approccio generativo o algoritmico alla produzione musicale è basato su due processi

- Generazione di sequenze numeriche
- *Transcodifica* di tali sequenze in musica

Come abbiamo già detto, per la generazione di sequenze numeriche possiamo utilizzare vari modelli matematici come ad esempio i sistemi dinamici. Un sistema dinamico si può scrivere come:

$$\dot{X} = F(X; t; c_1, ...c_n) \tag{4}$$

dove X è un vettore costruito con le variabili di stato del sistema, t, il tempo, è la variabile indipendente, $c_1, ...c_n$ sono i parametri di controllo del sistema e con $\dot{X}$ è indicata la derivata del vettore X rispetto al tempo. Molti modelli fisici, biologici, meccanici, sono rappresentati da sistemi di questo tipo. Anche gli automi cellulari sono sistemi dinamici, in quanto gli stati del sistema variano nel tempo. Essi, però, possono assumere solo un numero finito di stati e il tempo "trascorre" con passi discreti, per cui sono sistemi dinamici discreti.
Per produrre musica a partire da un sistema dinamico è necessario creare una corrispondenza fra le variabili del sistema e i parametri fisici del suono (vedi figura 1). I parametri sonori che utilizzeremo sono la frequenza, l'in-

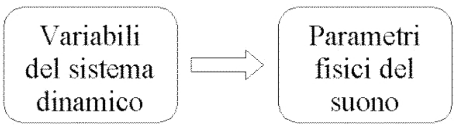

Figura 1: Corrispondenza tra le grandezze di un sistema dinamico e i parametri fisici del suono come intensità, durata e frequenza.

tensità, il timbro e la durata. Volendo musificare le traiettorie nello spazio delle fasi, bisogna associare ai valori continui delle varie grandezze del sistema dinamico i valori discreti relativi ai parametri musicali. Il primo passo in questa direzione consiste nella determinazione dell'intervallo di valori compresi fra il minimo ed il massimo delle grandezze. Il secondo passo prevede l'associazione di una nota musicale quando il valore della grandezza è compreso in un certo intervallo (vedi figura 2). Per vedere nel dettaglio le musiche prodotte con i sistemi dinamici, analizziamo alcuni esempi. I parametri musicali utilizzati sono il tempo e la frequenza. Altri esempi ed

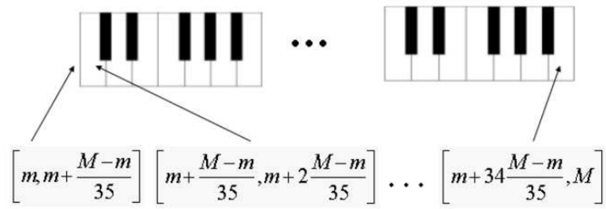

Figura 2: Corrispondenza tra gli intervalli di una grandezza del sistema dinamico e le note musicali di tre ottave. Con M ed m abbiamo indicato il massimo e il minimo rispettivamente della grandezza del sistema dinamico.

altri codici di musificazione sono in [10].[4] Di seguito sono presentate le traduzioni musicali di alcuni sistemi dinamici fra i più noti.

L'oscillatore armonico

Nel caso dell'oscillatore armonico, la (4) rappresenta la seguente coppia di equazioni differenziali

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -kx_1 \end{cases} \tag{5}$$

In questo caso $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ è il vettore relativo alle grandezze dinamiche; il sistema ha un solo parametro di controllo k. Se consideriamo l'andamento (nel tempo) di una sola variabile del sistema otteniamo il grafico di sinistra della figura 3. Associando al valore della grandezza l'altezza delle note a successivi valori del tempo, otteniamo la trascrizione musicale visualizzata nella figura 3b.

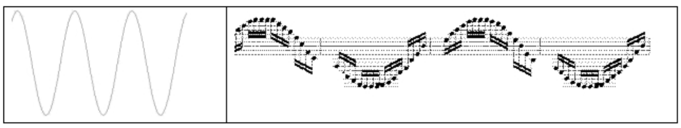

Figura 3: A sinistra l'andamento di una variabile di stato dell'oscillatore armonico; a destra la corrispondente melodia, associando l'altezza di una nota al valore della variabile di stato.

[4] Una galleria di suoni e musiche ottenuta da sistemi dinamici è rintracciabile al seguente indirizzo http://galileo.cincom.unical.it/.

Sistema preda-predatore

Un sistema particolarmente interessante è quello relativo a due popolazioni che interagiscono tra loro (le prede e i predatori). Il comportamento del sistema è regolato da due equazioni differenziali [25]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = k_1 x_1 \left(1 - \dfrac{x_1}{k_2}\right) - k_3 x_1 x_2 \\ \dot{x}_2 = -k_4 x_2 + k_5 x_1 x_2 \end{cases} \tag{6}$$

In questo caso le variabili di stato sono x_1 e x_2, ed i parametri di controllo sono k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 e regolano il tasso di nascita, di morte, di crescita, etc., delle due popolazioni. Nella figura 4 vengono rappresentati due tipi di traiettorie convergenti verso due punti fissi e le corrispondenti melodie.

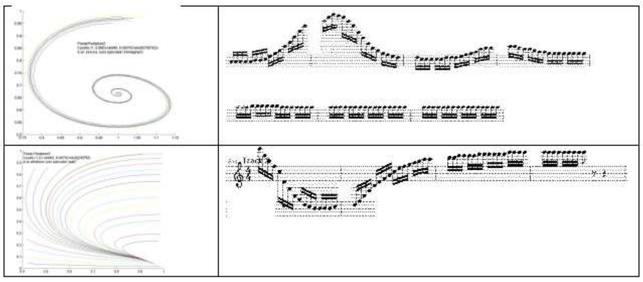

Figura 4: A sinistra le traiettorie convergono verso due punti fissi. A destra le corrispondenti melodie. Nel primo caso la musica prodotta consiste in una melodia le cui note variano ciclicamente in altezza la cui differenza si smorza via via che ci si avvicina al punto critico. Nel secondo caso le note tendono più rapidamente verso il punto fisso.

La musica dal caos: sistema di Lorenz

I sistemi dinamici possono avere più di due variabili dipendenti o nell'equazione (4) il tempo può intervenire esplicitamente rendendo il sistema dinamico non autonomo. In questo caso possono manifestarsi strutture frattali come gli attrattori strani della figura 5a. Anche musicalmente si può manifestare questo caratteristico andamento con la ripetizione di melodie periodiche che si spostano, con sbalzi improvvisi, da una tonalità ad un'altra.

Il comportamento caotico dei sistemi dinamici ha molte interessanti caratteristiche, tra cui una delle più rimarchevoli è la sensibilità alle condizioni iniziali. Questo significa che pur partendo da dati iniziali molto prossimi, il comportamento del sistema può variare molto nella sua evoluzione. Questo fenomeno è ora noto come effetto farfalla. Nella figura 5b, si evidenzia il comportamento melodico di tre dati iniziali differenti per il sistema di Lorenz.

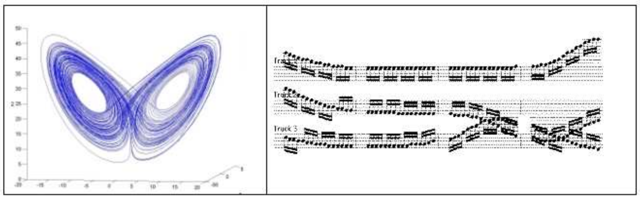

Figura 5: A sinistra il classico attrattore strano presente nel sistema metereologico di Lorenz. A destra tre melodie ottenute in questo sistema partendo da tre dati iniziali vicini. Si noti come le melodie tendono a divergere dopo un certo tempo.

4 I sistemi auto-organizzati

Gli Automi Cellulari (CA) sono sistemi dinamici discreti utili per indagare la complessità e l'auto-organizzazione in sistemi biologici e artificiali. Essi furono inventati da von Neumann negli anni '50 per studiare la riproduzione e comprendere la "logica della vita" [32]. Pur regolati da semplici meccanismi di evoluzione, danno luogo a pattern estremamente diversificati che presentano strutture regolari, cristalline e nidificate in alcuni casi e in molti altri casi presentano strutture caotiche. Tra questi due casi estremi si presentano i CA con comportamento complesso che rivestono un particolare interesse poiché evidenziano meccanismi di auto-organizzazione con la presenza di strutture periodiche e mobili, note come glider [38]. Molti autori hanno tentato di catalogare il comportamento dei CA; particolarmente interessanti sono i lavori di Wolfram [36], [37] dove vengono individuate 4 classi principali di regole per automi cellulari uni-dimensionali. La classificazione di Wolfram si basa sull'osservazione del diagramma di transizione di stato del CA che è ottenuto disegnando la sequenza degli stati nel tempo a partire da una condizione iniziale. Secondo Wolfram le regole che codificano i CA appartengono a 4 categorie:

1. regole che portano il sistema verso un punto fisso;
2. regole che portano il sistema verso un ciclo limite;
3. regole che portano il sistema verso un comportamento caotico;
4. regole che generano strutture "complesse" e localizzate (figura 6).

Abbiamo sviluppato diversi tipi di codici di musificazione, fra i quali i più interessanti sono:

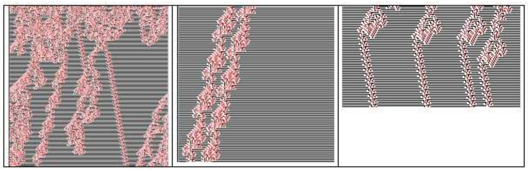

Figura 6: Nella figura a sinistra il pattern generato da un automa cellulare complesso a partire da un dato iniziale casuale. Si notano varie strutture, tra cui glider che viaggiano verso sinistra e glider che viaggiano verso destra. Nella figura di centro due glider interagenti che viaggiano verso sinistra. Nella figura a destra quattro glider che viaggiano verso destra.

a) Codici di musificazione locale, attraverso i quali è possibile leggere il CA sito per sito;

b) Codici di musificazione globale, che codificano la funzione di Input-Entropy e l'andamento delle popolazioni dei CA;

c) Codici di musificazione mista, che leggono porzioni di configurazioni dei CA o con codici binari o con codici colore.

I codici di musificazione locale sono molteplici [5]. Quello che fornisce i risultati più interessanti è il codice colore (vedi figura 7). Il processo di musificazione opera nel modo seguente: ad ogni stato dell'automa corrisponde un colore per ciò che concerne la parte visiva ed una nota per ciò che concerne la parte uditiva; man mano che ci si sposta da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso, vengono suonate le note corrispondenti. Il risultato prodotto da questo processo sarà tanto più apprezzabile quanto maggiore è il numero dei valori dei siti del CA. Un limite dei processi di musificazione locale è

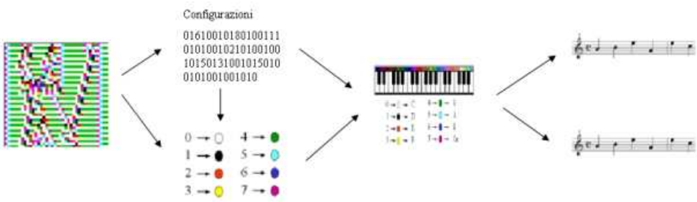

Figura 7: All'evoluzione di un CA corrisponde una sequenza numerica o di siti colorati. Il codice colore stabilisce una corrispondenza tra note e colori o numeri. Il risultato prodotto è una melodia la cui durata delle singole note è uguale.

che la quantità di note prodotte in un pattern o porzioni di pattern è molto elevata (se n è il numero di siti e t sono i passi temporali, le note diventano n*t); siccome le strutture emergenti possono avere anche dimensioni molto

grandi (sono state individuate particelle con periodo superiore a 150 passi temporali e dimensione spaziale maggiore di 50 siti) il numero di note coinvolte è molto elevato e pertanto risulta estremamente complesso costruire strutture sonore coerenti con il comportamento delle particelle emergenti. Per questo abbiamo pensato di considerare delle grandezze globali da valutare ad ogni passo temporale ed associare delle note musicali a queste grandezze numeriche utilizzando il modulo (vedi figura 8).
Le grandezze che abbiamo considerato sono l'input-entropy [38] e le popolazioni. In realtà queste grandezze possono essere musificate contemporaneamente producendo delle armonie che in molti casi risultano piacevoli da ascoltare. Come abbiamo visto precedentemente, la codifica musicale

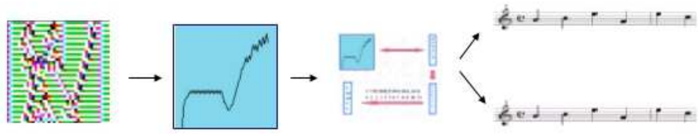

Figura 8: Un processo di musificazione globale. Ad ogni passo temporale viene associato un numero che rappresenta una grandezza globale, ad esempio il numero di caselle colorate con un dato colore in una riga. Dividendo questo valore per il numero di note che possono essere suonate (ad es. 36 corrispondente a tre ottave) si determina il resto; questo numero compreso tra 0 e 35 individua quale nota deve essere eseguita.

deve essere strutturata in modo tale da non distruggere la spontanea ed emergente complessità contenuta nei patterns. I due processi di musificazione descritti in precedenza godono di queste caratteristiche e lavorano su due scale differenti: una a livello di singolo sito ed una a livello di riga (o passo temporale). Possiamo pensare però a delle scale intermedie che raccolgano gruppi di siti senza arrivare all'intera riga.

5 Gli autoriproduttori

A partire dai già citati lavori di von Neumann [32], molti ricercatori si sono interessati al problema di macchine o strutture auto-replicanti. Molti di questi lavori sono motivati dal desiderio di comprendere i principi fondamentali del processo dell'informazione e gli algoritmi coinvolti nell'autoreplicazione, indipendentemente dalla loro realizzazione fisica. Un contributo fondamentale a questo problema è dovuto a Langton [19], il quale osserva che sebbene è sufficiente per l'autoreplicazione, la capacità di costruzione universale non è necessaria. La ricerca sulle strutture con capacità di auto-riprodursi può essere divisa in varie categorie [11][5]:

[5] Un'ampia rassegna di riferimenti relativi a questa problematica sono disponibili su Internet al seguente indirizzo: http://www.cs.bgu.ac.il/ sipper/selfrep/.

- implementazione di costruttori universali seguendo le idee originali di von Neumann;
- ricerca di sistemi minimi capaci di riproduzioni non triviali;
- uso di algoritmi genetici per la ricerca di sistemi con capacità di autoriproduzioni.

In un lavoro recente [11], utilizzando un algoritmo genetico [24], sono stati trovati molti Automi Cellulari che possiedono strutture con capacità di autoriprodursi. La cosa rimarchevole è che tali autoriproduttori possiedono simmetrie frattali e manifestano ritmi di crescita che possono essere opportunamente tradotti in musica [9]. Canoni e fughe, in questo contesto, si manifestano come caratteristiche emergenti. Una galleria di immagini e suoni relativamente a tali autoriproduttori è rintracciabile al seguente indirizzo http://galileo.cincom.unical.it.

6 La musica evolutiva

L'idea di utilizzare concetti, metodi e strumenti tipici della vita artificiale per generare musica ha dato vita ad un settore emergente noto come "Musica Evolutiva" [6]. In questo contesto la musica viene automaticamente prodotta tramite alcuni algoritmi basati sulla ripetuta applicazione di regole e fatta "evolvere" in modo opportuno utilizzando varie procedure che richiamano la riproduzione e la selezione naturale.
Alla base di tutto esiste il problema di come attraverso algoritmi generativi possiamo creare artefatti musicali. In realtà solo il ricorso ad un processo analogo a quello della selezione naturale ci consentirà di selezionare algoritmi di produzione e processi di musificazione utili alla produzione di musica. Questo aspetto rappresenta il cuore della "musica evolutiva" ed il processo di selezione potrà avvenire in vari modi: da parte dell'artista che si preoccuperà di selezionare e ricomporre le sequenze sonore prodotte in modo opportuno; da parte di gruppi di ascolto che esprimeranno una valutazione sul risultato; da parte di regole automatiche basate su funzioni di fitness che automaticamente opereranno la selezione. In [4] è descritto un metodo evolutivo per produrre automaticamente delle musiche utilizzando le consonanze per costruire funzioni di fitness e selezionare le musiche migliori in ogni generazione, che saranno fatte evolvere nella generazione successiva.[6]

[6] Una serie di riferimenti interessanti in questo settore possono essere rintracciati sulla Special Session of Leonardo Journal (MIT Press) "Genetic Algorithms in Visual Art and Music" vol. 35-2 and 35-3, 2002 ed ai seguenti indirizzi Internet:
http://www.mic.atr.co.jp/ rodney/Alife_Music.htm
http://evonet.dcs.napier.ac.uk/eurogp2003/evomusart.html
http://galileo.cincom.unical.it/esg/Music/mus_home.htm

7 Conclusioni

Da sempre idee nate nel contesto delle teorie della complessità e del caos hanno ispirato la produzione artistica, presente in varie manifestazioni, tanto da prefigurare questo settore come uno dei più promettenti dell'arte contemporanea. Difficilmente si sfugge all'apprezzamento delle forme prodotte dai frattali che richiamano in tutta la loro bellezza forme viventi, o le straordinarie immagini prodotte dagli automi cellulari. La caratteristica peculiare di queste espressioni grafiche è che, pur nella loro complessità, sono prodotte da regole semplici, ripetutamente applicate. Il dualismo legato alla semplicità delle regole produttive ed alla complessità e diversità delle forme generate richiama immediatamente alla mente il rapporto tra fenotipo e genotipo tipico della vita e degli organismi viventi. In questo contesto la vita artificiale fornisce molti spunti di riflessione e di ispirazione. La produzione musicale che deriva da questi modelli matematici, pur essendo meno nota al grande pubblico, risulta molto piacevole e densa di significato. In un certo senso, come abbiamo già detto, essa può essere considerata una semantica delle astratte strutture matematiche. Adottando come metafora un triangolo di musificazione che connette ad un vertice le configurazioni matematiche prodotte dai vari modelli, all'altro vertice differenti sistemi di codifica, possiamo creare innumerevoli rappresentazioni o artefatti musicali, allo stesso modo in cui opera un linguaggio.
Questo ci consente di creare musica in accordo alle seguenti caratteristiche:

- produttività e molte regole di produzione
- un infinito numero di produzioni
- carattere generale e astratto delle produzioni
- arbitrarietà delle codifiche e delle rappresentazioni
- molti tipi di semantica collegati alle rappresentazioni
- molteplici tipologie di letture delle configurazioni matematiche
- esplorazione musicale di comportamenti locali e globali
- esplorazione delle dinamiche evolutive.

Quindi l'uso delle tecnologie e della computazione si colloca come terzo polo ideale tra Matematica e Musica, allargando le relazioni classiche e mettendo a disposizione nuovi metodi e strumenti per la produzione artistica.

Riferimenti bibliografici

[1] P.J. Bentley, D.W. Corne 2002, *Creative Evolutionary Systems*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, USA

[2] R. Bidlack 1992, Chaotic systems as simple (but complex) compositional algorithms, *Computer Music Journal* 16, pp. 33-47

[3] E. Bilotta, P. Pantano, V. Talarico 2000: Synthetic harmonies: an approach to musical semiosis by means of cellular automata. In M. A. Bedau, J. S. McCaskill, N. H. Packard and S. Rasmussen, (Eds.), *Artificial Life VII*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 537-546

[4] E. Bilotta, P. Pantano, V. Talarico 2000: Evolutionary Music and Fitness Functions. In *Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2000*, A.M. Anile, V. Capasso, A. Greco (Eds.), pp.126-139, Springer

[5] E. Bilotta, P. Pantano 2001, Artificial Life Music Tells Complexity, *Proc. of Artificial Life Models for Musical Applications*, pp. 17-28

[6] E. Bilotta and P. Pantano 2002, Synthetic Harmonies: Recent results. *LEONARDO*, 35, pp35-42, MIT Press, Cambridge, Massachusetts

[7] E. Bilotta, E. R. Miranda, P. Pantano, and P. M. Todd 2002, Artificial Life Models for Musical Applications: Workshop Report. J. *Artificial Life 8*, 1, pp 83-86

[8] E. Bilotta, A. Lafusa, P. Pantano, 2002, Is self replication an embedded characteristic of Artificial/Living matter?, in R.K.Standish, M.A.Bedau, H.A. Abbass (eds.), *Artificial Life VIII*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 38-48

[9] E. Bilotta, P. Pantano 2002, Self-reproducers use contrapuntal means, in E.Bilotta et al. *Artificial Life VIII* Workshops, pp. 3-8, University of New South Wales, Australia

[10] E. Bilotta, S. Gervasi, P. Pantano 2003, Exploring dynamical Systems through the music, submitted

[11] E. Bilotta., A. Lafusa, P. Pantano 2003, Life-like self-reproducers, *Complexity*, in press.

[12] T. Bolognesi 1983, Automatic Composition: Experiments with self-similar music, *Computer Music Journal*, 7, pp.25-36

[13] J. L. Casti 1992, *Reality Rules*, John Wiley & Sons, USA

[14] D. Cope, D.R. Hofstadter 2001, *Virtual Music: Computer Synthesis of Musical Style*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts

[15] C. Dodge 1988, Profile: A musical Fractal, *Computer Music Journal*, 12, pp.10-14

[16] A. Frova 1999, *Fisica nella Musica*, Zanichelli, Bologna, Italia

[17] J. Leach, J. Fitch 1995, Nature, Music and Algorithmic Composition, *Computer Music Journal*, 19, pp.23-33

[18] M. Gogins 1991, Iterated Functions Systems Music, *Computer Music Journal*, 15, pp. 40-48

[19] C. G. Langton 1984, Self-reproduction in cellular automata, *Physica D*, 10, pp.135-144.

[20] R. C. Hilborn 2000, *Chaos and Nonliear Dynamics*, Oxford University Press, Oxford, UK

[21] W. Manaris, D. Vaughan, C. Wagner, J. Romero, R. Davis 2003, Evolutionary Music and the Zipf-Mandelbrot Law: progress towards Developing Fitness Functions for Pleasant Music, in *EvoWorkshops2003 Proceedings*, in press on Lecture Notes in Computer Science Series, Springer-Verlag, Berlin

[22] K. McAlpine, E. Miranda, S. Hoggar 1999, Making Music with Algorithms: a case study, *Computer Music Journal*, 23, pp. 19-30

[23] E. R. Miranda 2001, *Composing Music with Computers*, Focal Press, Oxford UK

[24] M. Mitchell 1996, *An Introduction to Genetic Algorithms.* MIT Press, Cambridge, Massachusetts

[25] J. D. Murray 1993, *Mathematical Biology*, Springer-Verlag, Berlin

[26] J. R. Pierce 1988, *La Scienza del Suono*, Zanichelli, Bologna, Italia

[27] J. Pressing 1988, Nonlinear maps as generators of musical design, *Computer Music Journal*, 12, pp. 35-45

[28] J. C. Rissett, D. Wessel 1982, Exploration of timbre by analysis and synthesis, in *Psychology of Music* (D. Deutsch, ed.), Academic Press, Orlando

[29] C. Roads 1996, *The computer music tutorial*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts

[30] X. Rodet, C. Vergez 1999, Nonlinear dynamics in physical models: Simple Feedback-Loop systems and properties, *Computer Music Journal*, 23, pp. 18-34

[31] B. Scimemi 2001, Contrappunto Musicale, in *Matematica e Cultura 2001* a cura di M. Emmer, Springer-Verlag Italia, Milano

[32] J. von Neumann 1966, *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, Illinois. Edited and completed by A.W.Burks.

[33] R. F. Voss, J. Clarke 1975, 1/F Noise in Music and Speech, *Nature*, 258, pp. 317-318

[34] R. F. Voss, J. Clarke 1978, Music from 1/F Noise, *Journal of Acoustical Society of America*, 63, pp.258-263

[35] M. Witten 1996, The sounds of science II. Listening to Dynamical systems- towards a musical exploration of complexity, *Computers Math. Applic.*, 32, pp. 145-173

[36] S. Wolfram 1983, Statistical Mechanics of Cellular Automata, *Review of Modern Physics*, 55, pp.601-644

[37] S. Wolfram 1984, Universality and Complexity in Cellular Automata, *Physica D*, 10, pp. 1-35.

[38] A. Wuensche 1999, Classifying Cellular Automata Automatically: Finding gliders, filtering and relating space-time patterns, attractors basins and the Z parameter, *Complexity*, 4.3, pp. 47-66