

Pattern di Turing e complessità: problemi e possibilità di sonificazione

Luca Bimbi

Abstract. Assunto un pattern di Turing generato per reazione-diffusione, in una, due o tre dimensioni, e assunta la possibilità che più pattern interagiscano sullo stesso dominio, si discutono tre modi di renderlo in suono, ordinati come gradazione di una crescente adesione al processo più che come categorie separate. Il primo quantizza il pattern in sintesi additiva; il secondo ne estrae descrittori globali — densità, gradiente, anisotropia, entropia — e li mappa, per via non lineare e mediante logica fuzzy, su parametri percettivi; il terzo tratta il pattern come legge del movimento di un corpo sonoro, riconducibile alla nozione di ipergesto. Un sistema neuro-fuzzy che apprenda dai descrittori del suono dell'ambiente colloca la mappatura al confine tra il secondo e il terzo modello, e lega l'operazione alla circostanza. Se ne discutono i fondamenti, dal rapporto con la complessità algoritmica alla cornice del suono organizzato di Varèse, fino all'affinità, per valori ecocentrici, con la sensibilità ecologica di Walter Branchi.

Parole chiave: pattern di Turing, sonificazione, logica fuzzy, ipergesto, ecologia sonora.

In un precedente contributo si è descritto il modello di reazione-diffusione di Turing, la sua discretizzazione su griglia in una, due o tre dimensioni, e la possibilità che più pattern interagiscano sullo stesso dominio. Là si erano anche indicate, in forma di programma, alcune possibilità di sonificazione: la quantizzazione di un pattern in sintesi additiva, l'estrazione di descrittori di densità per righe e colonne con mappature non lineari e l'idea del pattern che descrive il movimento di eventi sonori in uno spazio. Questo lavoro riprende quelle tre vie, le sviluppa e ne discute i fondamenti, mostrando che non sono necessariamente alternative ma tre modi di crescente aderenza al processo, capaci di agire anche insieme.

Le tre vie suddette si ordinano lungo un asse preciso, ossia quanto della natura del pattern, come processo vivo, sopravviva nella traduzione sonora. Conviene precisare fin d'ora che si tratta di una gradazione e non di tre categorie separate. I modelli sono tappe di una crescente adesione al processo, e i confini tra l'uno e l'altro sono sfumati, al punto che certe tecniche, come si vedrà, stanno in bilico tra essi. La

cornice entro cui questo asse acquista senso è l'idea di suono organizzato di Varèse, che va richiamata prima di procedere. Si tratta di un'analogia, come accostamento suggerito da chi scrive, che aiuta a inquadrare perché la morfogenesi di Turing possa interessare la composizione.

L'idea di suono organizzato attraversa l'intera opera di Edgard Varèse. Al suo centro sta ciò che Varèse chiamava la liberazione del suono, ossia l'affrancamento della musica dal sistema delle altezze temperate e dalla nota come unità elementare, in favore del suono considerato nella sua interezza fisica come timbro, massa, densità, grana, movimento. Il materiale della composizione è il suono in quanto corpo, pensato per analogie fisiche, come masse che si compenetrano e si respingono, formazioni che nascono, si espandono o si dissolvono. Il compito del compositore diventa allora organizzare corpi sonori, dando loro forma e mettendoli in relazione e movimento. Il suono, nella sua concezione, è «materia vivente», forse addirittura dotata di una propria volontà.

Due aspetti di questa concezione toccano da vicino il nostro problema e il primo è l'idea stessa di organizzazione. Per Varèse la parola musica era inadeguata, ed egli preferiva parlare, come detto, di suono organizzato. La forma non preesiste al suono, ma si genera tramite l'organizzazione del suono stesso. Un processo morfogenetico, che produce ordine a partire da uno stato privo di struttura, offre un'immagine fisica affine a questa idea, poiché nel pattern di Turing l'organizzazione emerge dalla dinamica interna del sistema. L'affinità è parziale, e non va forzata, poiché Varèse pensava in termini di intenzione compositiva, mentre nel pattern non vi è alcun compositore direttamente al lavoro. Tuttavia, il fatto che una struttura possa nascere dall'interno di un processo, senza essere disposta dall'esterno, tocca qualcosa di ciò che Varèse cercava.

Il secondo aspetto è lo spazio. Varèse concepiva il suono come un corpo che occupa e attraversa lo spazio e immaginava una musica proiettata, in cui i suoni si spostano su traiettorie definite, un'intuizione che solo l'avvento dell'elettronica e della diffusione multicanale, con opere come il *Poème électronique* e con *Étude pour Espace* (eseguita per la prima volta nel 2009), gli permise di realizzare in parte. È questa immagine del suono come materia dotata di una direzione, a suggerire l'accostamento con la morfogenesi. Sonificare un pattern significa chiedersi quanto della sua vita interna passi nel suono, e i tre modelli che seguono danno risposte via via più aderenti, dal pattern trattato più come sorgente di valori da mappare al pattern lasciato agire come legge di un movimento sonoro.

Prima di venire alla sonificazione occorre formalizzare le relazioni tra pattern, che nel contributo precedente erano state solo descritte. Ciò serve ai tre modelli, poiché il caso di maggiore interesse è quello in cui la sonificazione muove ma da almeno due pattern accoppiati. Si considerino due sistemi reazione-diffusione sullo stesso dominio, indicizzati da $k = 1, 2$, ciascuno con la propria coppia di morfogeni e i propri coefficienti di diffusione:

$$\begin{aligned}\partial_t u_k &= D_u \nabla^2 u_k + f(u_k, v_k) + C_k \\ \partial_t v_k &= D_v \nabla^2 v_k + g(u_k, v_k)\end{aligned}$$

Il simbolo ∂_t indica la rapidità con cui la concentrazione di un morfogeno cambia nel tempo in un punto. Il termine con l'operatore ∇^2 , il Laplaciano, rappresenta la diffusione, cioè la tendenza della concentrazione a livellarsi verso quella dell'intorno. Le funzioni f e g descrivono le reazioni chimiche locali, che di per sé manterrebbero stabile l'equilibrio. L'unica aggiunta rispetto a un sistema isolato è il termine C_k , che dà conto dell'effetto dell'altro sistema. Quando è nullo i due pattern si sviluppano indipendenti, quando non lo è ciascuno interviene nell'evoluzione dell'altro. È la forma di C_k a distinguere i tre casi già descritti nel contributo precedente.

Nel caso gerarchico, un pattern lento, di grande lunghezza d'onda, modula un parametro di un pattern rapido, di piccola lunghezza d'onda. L'accoppiamento è unidirezionale, dal primo verso il secondo, e proporzionale alla concentrazione del primo:

$$C_1 = 0, \quad C_2 = \kappa u_1$$

Il primo sistema evolve per conto proprio, mentre il secondo ne è modulato, con intensità regolata da κ . Poiché il pattern lento varia poco entro l'estensione di una struttura del pattern veloce, esso agisce come un fondo che orienta localmente il pattern rapido. Di conseguenza si ottiene una forma a due scale, in cui la morfologia grande del primo — macchie, strisce, lamelle a seconda dei parametri — ospita al proprio interno la morfologia fine del secondo, seguendo il già citato meccanismo con cui Maini et al. spiegano come un pattern a grana fine possa formarsi su un sostrato già modulato da uno a grana maggiore. Nel caso che potremmo definire competitivo, due sistemi di scala simile consumano una risorsa comune e ciascuno è inibito dalla concentrazione dell'altro. L'accoppiamento è simmetrico e negativo:

$$C_1 = -\gamma u_1 u_2, \quad C_2 = -\gamma u_1 u_2$$

Il segno negativo e il prodotto $u_1 u_2$ fanno sì che la sottrazione agisca solo dove entrambi i pattern sono presenti, in proporzione alla presenza di ciascuno, mentre γ ne fissa l'intensità. Le due lunghezze d'onda entrano in conflitto e il risultato non è la somma dei due pattern, ma una terza forma «irregolare» in cui le due scale si «scontrano» l'una contro l'altra. Nel caso sequenziale, il secondo sistema resta inattivo finché il primo non supera una soglia θ . La funzione a gradino di Heaviside H , che vale 0 al di sotto della soglia e 1 al di sopra, accende l'accoppiamento nel momento in cui il primo pattern è abbastanza pronunciato:

$$C_2 = \kappa H(u_1 - \theta)$$

Il secondo pattern si sviluppa così sul primo già stabilizzato, dando una successione temporale di regimi. Resta da capire se, e quando, il pattern accoppiato cresca davvero, ossia se sia instabile nel senso richiesto dalla teoria. La domanda si affronta come per un sistema isolato, con una sola differenza, data dal fatto che si considerano insieme i quattro campi in gioco, raccogliendoli in un unico vettore:

$$\mathbf{w} = (u_1, v_1, u_2, v_2)^T$$

riunente i due morfogeni di ciascun sistema. Fin quando il pattern è vicino allo stato omogeneo di partenza, cioè agli inizi della sua formazione, le equazioni si possono approssimare con una forma lineare, molto più trattabile:

$$\partial_t \mathbf{w} = \mathbf{D} \nabla^2 \mathbf{w} + \mathbf{J} \mathbf{w}$$

Qui D raccoglie i coefficienti di diffusione dei quattro campi, mentre J , la matrice jacobiana, si può intendere come la tavola delle influenze reciproche, dove ogni casella dice di quanto un piccolo aumento di un campo faccia crescere o diminuire la variazione di un altro. Le caselle sulla diagonale riguardano l'effetto di un campo su se stesso, mentre quelle fuori diagonale, gli effetti incrociati. Sono queste ultime, nella parte dovuta all'accoppiamento, a contenere l'informazione nuova rispetto ai due sistemi presi separatamente.

Per sapere se una piccola perturbazione dello stato omogeneo cresce o si spegne si ricorre al fatto che qualunque perturbazione, per quanto irregolare, si può scomporre in una somma di onde spaziali semplici, ciascuna con un proprio passo. Un'onda a passo fitto varia rapidamente nello spazio, mentre una a passo ampio lentamente. Il passo si misura con il numero d'onda k , grande per le onde fitte e piccolo per quelle ampie. Il vantaggio è che, nella forma linearizzata, ogni onda evolve per conto proprio, e per ciascuna si può calcolare un tasso di crescita $\lambda(k)$,

cioè la velocità con cui essa si amplifica o si smorza. Il pattern che emerge è dominato dall'onda che cresce più in fretta, e la scala di quell'onda fissa la lunghezza d'onda del pattern.

I tassi $\lambda(k)$ sono imposti dalla struttura del sistema, e per ciascun k si ottengono risolvendo la cosiddetta relazione di dispersione, che si scrive annullando un determinante:

$$\det(\mathbf{J} - k^2 \mathbf{D} - \lambda \mathbf{I}) = 0$$

Il determinante è lo strumento algebrico che segnala quando un sistema di questo tipo ammette un'onda capace di riprodursi amplificata di un fattore λ . Annullarlo equivale appunto a chiedere che una tale onda esista. La matrice identità I serve solo a confrontare λ con ciascun campo, e il termine $k^2 D$ esprime il fatto che la diffusione agisce tanto più fortemente quanto più l'onda è fitta, smorzando le onde a passo piccolo. Risolvendo l'equazione per ogni k si ottengono i valori di λ .

Un tasso λ con parte reale positiva indica che le onde di quel passo si amplificano nel tempo; viceversa, con parte reale negativa, che si smorzano fino a sparire. Il pattern accoppiato emerge se esiste almeno un passo che si amplifica, cioè se il più grande dei tassi di crescita, al variare di k , è positivo:

$$\max_k \operatorname{Re} \lambda(k) > 0$$

Questa è la condizione di instabilità. Finché tutti i $\lambda(k)$ restano negativi il sistema ritorna all'omogeneità e nessun pattern si forma. Appena uno diventa positivo, la corrispondente onda cresce e dà origine alla struttura. Rispetto al caso di un solo sistema, la novità sta tutta nei termini fuori diagonale di J , che possono rendere positivo un tasso che, nei due sistemi isolati, resterebbe negativo, producendo così regimi che nessuno dei due mostrerebbe da solo. La stabilità del sistema accoppiato non è mai garantita a priori e va verificata di volta in volta.

Prima di descrivere i modelli occorre chiedersi perché sonificare proprio un pattern di Turing, e non una qualunque distribuzione spaziale. La risposta ha due lati, uno che riguarda la natura del pattern come processo e uno che riguarda la sua complessità.

Il primo lato è già implicito in quanto detto. Un pattern di Turing è il risultato di una dinamica, e porta iscritta nella propria forma la storia della propria genesi, fatta della lunghezza d'onda selezionata dall'instabilità, della competizione tra i modi, della successione di formazione, saturazione ed eventuale collasso. Sonificare un

pattern di Turing significa quindi disporre non di un'immagine ma di un divenire, con un tempo interno e una direzione, e questo è ciò che lo rende un materiale musicale e non semplicemente «grafico». Una distribuzione spaziale arbitraria non offre nulla di simile, perché manca del tempo e della necessità interna che lega ogni fase alla precedente.

Il secondo lato riguarda la complessità, e collega la morfogenesi all'altro grande contributo di Turing, la teoria del calcolo. Come si è ricordato nel contributo precedente, il modello discreto dell'anello è a un passo da un automa cellulare, e Zenil ha mostrato che i pattern di Turing rientrano in una classe più ampia di strutture generabili per via computazionale. Su questo terreno la teoria dell'informazione algoritmica fornisce un linguaggio utile poiché essa assegna a ogni struttura una complessità, misurata dalla lunghezza del più breve programma che la genera. Sarà bassa per le strutture regolari e comprimibili, alta per quelle casuali e incompressibili. Nel quadro della probabilità algoritmica, il teorema di codifica, come detto, lega poi questa misura alla frequenza con cui una struttura emerge da una macchina universale alimentata a caso, e mostra che le forme regolari, a bassa complessità, vi compaiono più spesso di quelle casuali.

Questo risultato, tuttavia e a rigore, non si trasferisce in modo assolutamente diretto ai pattern di Turing. Il teorema riguarda la distribuzione universale sulle macchine di Turing e non il campionamento dei parametri di un particolare sistema di reazione-diffusione. Vale però a titolo orientativo, e coglie una tendenza che nei sistemi di Turing si osserva di fatto. Esplorando lo spazio dei parametri di un sistema di reazione-diffusione, i pattern che si incontrano più spesso sono i più regolari, con pochi modi dominanti, contorni ordinati, simmetrie ricorrenti, mentre le forme meno comprimibili occupano regioni più ristrette e particolari dello spazio stesso. La complessità di un pattern diventa allora un parametro compositivo. Cercare forme più ricche richiede di spingersi verso i regimi di competizione tra scale o di accoppiamento instabile, dove il battimento tra i modi e le biforcazioni della dinamica producono strutture meno regolari. La scelta del pattern da sonificare è già, in questo senso, una scelta di complessità, e la teoria algoritmica offre un vocabolario per pensarla, anche là dove non fornisce una derivazione.

Il già citato limite segnalato da Zenil riguarda il fatto che la complessità algoritmica spiega la tendenza di un processo a produrre struttura, ma non determina quale, tra due strutture ugualmente semplici, prevalga. Trasferito alla composizione, ciò significa che il processo garantisce struttura, ma la sua orientazione non è offerta dal

modello: resta una decisione che il compositore, potenzialmente, prende fissando le condizioni iniziali e i parametri.

Il modo più diretto di sonificare un pattern, e il primo indicato nel contributo precedente, consiste nel quantizzarlo in sintesi additiva. La sintesi additiva, come noto, determina un timbro come somma di componenti sinusoidali, le parziali, ciascuna con la propria frequenza e la propria ampiezza:

$$s(t) = \sum_{p=1}^P a_p(t) \sin(2\pi f_p t + \varphi_p)$$

dove $a_p(t)$ è l'ampiezza della p -esima parziale nel tempo, f_p la sua frequenza, φ_p la sua fase, e P il numero di parziali. L'idea è che il pattern fornisca, istante per istante, le ampiezze di queste parziali, così che l'evoluzione della struttura spaziale diventi evoluzione del contenuto sonoro.

La corrispondenza più naturale associa a ogni cella, o a ogni riga, una parziale, dove la posizione lungo un asse della griglia determina la frequenza, la concentrazione/intensità in quel punto determina l'ampiezza. Le frequenze vengono quantizzate su un sistema scelto dal compositore, cioè su un reticolo di altezze definito da un sistema d'intonazione. La quantizzazione confronta le altezze in cent, l'unità logaritmica in cui un'ottava vale 1200, poiché è in cent che si misura correttamente la vicinanza tra due altezze:

$$f_p = f_0 \cdot 2^{q/1200}$$

dove f_0 è una frequenza di riferimento e q lo scostamento in cent. A ogni parziale si assegna quindi il grado del reticolo più vicino, in cent, alla frequenza suggerita dalla sua posizione.

SINTESI-ADDITIVA(colonna, reticolo, $f_{\min}$, $f_{\max}$)

parziali $\leftarrow \emptyset$

$N \leftarrow \text{lunghezza}(\text{colonna})$

for $i \leftarrow 0$ **to** $N - 1$

do $f_{\text{ideale}} \leftarrow \text{MAPPA-FREQUENZA}(i, N, f_{\min}, f_{\max})$

$f \leftarrow \text{QUANTIZZA-CENT}(f_{\text{ideale}}, \text{reticolo})$ // grado più vicino in cent

 inserisci PARZIALE(f , colonna[i]) in parziali

return parziali

EVOLVI-SUONO(storia, reticolo, $f_{\min}$, $f_{\max}$)

```

timbro  $\leftarrow \phi$  // un timbro per ogni stato del pattern
for each stato in storia
    do inserisci SINTESI-ADDITIVA(stato, reticolo, f_min, f_max) in timbro
return timbro

```

Seguendo l'evoluzione temporale del pattern si ottiene un timbro che si trasforma, con parziali che emergono quando le corrispondenti concentrazioni crescono, che si spengono quando calano, che si spostano se il pattern si sposta. La formazione della struttura è l'accendersi progressivo di un evento sonoro, la sua saturazione un timbro stabile, il suo eventuale collasso lo spegnersi o il ridistribuirsi dell'energia spettrale. In un pattern accoppiato, le due scale danno due strati spettrali sovrapposti, e il battimento del caso competitivo può tradursi, fra le varie cose, in battimenti tra parziali vicine secondo il livello di quantizzazione selezionato.

Questo modello è già molto più aderente al processo di quanto lo sarebbe una lettura del pattern come partitura grafica, poiché ne segue il divenire. Il suo limite è di altro genere. La corrispondenza posizione-frequenza e concentrazione-ampiezza è fissata dal compositore una volta per tutte, e in questo senso il pattern riempie uno schema predisposto e ne fornisce i valori, ma la grammatica che li accoglie (quali posizioni, quali frequenze, quale reticolo) gli è esterna. Inoltre, nella dimensione temporale vi è un divario tra quello che sarebbe il tempo di evoluzione del pattern e la sua interpretazione musicale. È tuttavia un primo passo verso una sonificazione che rispetti il processo, non ancora un modo di lasciarlo agire.

La seconda via rinuncia a leggere ogni cella e ricava dal pattern descrittori globali, che ne seguono l'evoluzione e controllano la generazione di eventi sonori. Il descrittore più immediato è la densità media, calcolata per righe e per colonne, che misura dove la struttura si addensa lungo ciascun asse:

```

DENSITÀ-RIGHE(U)
for i  $\leftarrow$  0 to righe(U) - 1
    do d[i]  $\leftarrow$  MEDIA(U[i])
return d

DENSITÀ-COLONNE(U)
for j  $\leftarrow$  0 to colonne(U) - 1
    do d[j]  $\leftarrow$  MEDIA(U[o..righe(U)-1][j])
return d

```

La densità da sola non basta a caratterizzare la forma, poiché non distingue un pattern a macchie da uno a strisce, né uno fine da uno grossolano, che pure suonano diversi. Conviene quindi affiancarle altri descrittori. Il gradiente medio, cioè quanto rapidamente la concentrazione varia da una cella alla vicina, misura la nettezza dei contorni; l'anisotropia misura quanto il pattern è orientato in una direzione, ed è prossima a zero per le macchie isotrope, elevata per le strisce parallele; l'entropia locale, calcolata sulla distribuzione dei valori in un intorno di ciascuna cella, ne quantifica il disordine e separa le zone regolari da quelle irregolari. Calcolati per ciascun istante discreto, questi descrittori formano un flusso di grandezze che accompagna la vita del pattern.

GRADIENTE-MEDIO(U)

somma $\leftarrow$ 0

for i $\leftarrow$ 0 **to** righe(U) - 1

do for j $\leftarrow$ 0 **to** colonne(U) - 1

do gx $\leftarrow$ (U[i+1][j] - U[i-1][j]) / 2 // bordo toroidale

 gy $\leftarrow$ (U[i][j+1] - U[i][j-1]) / 2

 somma $\leftarrow$ somma + $\sqrt{(gx^2 + gy^2)}$

return somma / (righe(U) · colonne(U))

ANISOTROPIA(U)

Jxx $\leftarrow$ 0; Jyy $\leftarrow$ 0; Jxy $\leftarrow$ 0 // tensore di struttura

for i $\leftarrow$ 0 **to** righe(U) - 1

do for j $\leftarrow$ 0 **to** colonne(U) - 1

do gx $\leftarrow$ (U[i+1][j] - U[i-1][j]) / 2

 gy $\leftarrow$ (U[i][j+1] - U[i][j-1]) / 2

 Jxx $\leftarrow$ Jxx + gx·gx

 Jyy $\leftarrow$ Jyy + gy·gy

 Jxy $\leftarrow$ Jxy + gx·gy

tr $\leftarrow$ Jxx + Jyy

d $\leftarrow$ sqrt((Jxx - Jyy)² + 4·Jxy²)

$\lambda_1 \leftarrow$ (tr + d) / 2; $\lambda_2 \leftarrow$ (tr - d) / 2 // autovalori

if $\lambda_1 + \lambda_2 = 0$ **then return** 0

else return ($\lambda_1 - \lambda_2$) / ($\lambda_1 + \lambda_2$)

ENTROPIA(U, B) // B = numero di intervalli

for k $\leftarrow$ 0 **to** B - 1 **do** conteggio[k] $\leftarrow$ 0

for i $\leftarrow$ 0 **to** righe(U) - 1

```

do for j ← 0 to colonne(U) - 1
    do k ← INTERVALLO(U[i][j], B)
        conteggio[k] ← conteggio[k] + 1
N ← righe(U) · colonne(U); H ← 0
for k ← 0 to B - 1
    do if conteggio[k] > 0
        then p ← conteggio[k] / N
            H ← H - p · log2 p
return H

```

Va sottolineato come questi descrittori siano funzioni del tempo. Ciascuno va calcolato a ogni passo dell'evoluzione del pattern, sullo stato corrente, così che la successione dei valori formi una serie temporale che accompagna la morfogenesi e ne guidi la sonificazione. Per l'entropia questo è mostrato esplicitamente dalla procedura seguente, che itera il calcolo lungo la storia del pattern; per densità, gradiente e anisotropia vale in modo analogo.

```

ENTROPIA-NEL-TEMPO(storia, B)    // storia = successione degli stati U(t)
H ← 0
for each U in storia
    do inserisci ENTROPIA(U, B) in H // un valore per ogni passo
return H                          // la serie temporale H(t)

```

Il problema comune è la funzione che porta un descrittore su un parametro sonoro. La mappa lineare è quasi sempre inadeguata, poiché la percezione, ad esempio, di frequenza e intensità è tendenzialmente logaritmica. Una mappa logaritmica può essere quindi più utile, e per le concentrazioni di un pattern di Turing, spesso distribuite in modo disuguale, comprime le zone omogenee e fa risaltare le variazioni deboli. Una mappa esponenziale, all'opposto, tenderebbe a esaltare i picchi e ad appiattire il resto.

```

MAPPA-LOG(x, x_min, x_max, y_min, y_max)
x ← max(x_min, min(x, x_max))    // vincola x all'intervallo
t ← (log x - log x_min) / (log x_max - log x_min)
return y_min + t · (y_max - y_min)

```

Una possibilità più ricca, tratta il valore del descrittore come un campione a cui applicare una funzione di trasferimento derivata da una distribuzione di probabilità.

Data una distribuzione desiderata per il parametro di uscita, la si realizza trasformando il descrittore attraverso l'inversa della sua funzione di ripartizione:

$$y = F^{-1}(x)$$

dove x è il descrittore normalizzato, F la funzione di ripartizione della distribuzione voluta e y il valore di uscita. In questo modo il compositore decide come i valori del descrittore debbano distribuirsi statisticamente sul parametro, invece di fissare una curva rigida. Ciò consente di modellare la statistica complessiva del risultato sonoro. Tutte le mappature suggerite restano però decisioni prese a monte e applicate rigidamente all'intero pattern. Il compositore, inoltre, non pensa «per numeri» ma per qualità percettive. Tradurre un giudizio come "la regione è densa" in una soglia netta, per cui una concentrazione è densa appena supera un valore e non lo è appena sotto, introduce discontinuità artificiali ed è lontano dalle modalità percettive effettive. La logica fuzzy è lo strumento adatto a questo punto, perché è nata proprio per trattare l'appartenenza graduata.

Nella logica fuzzy un valore appartiene a un insieme con un grado di appartenenza compreso tra 0 e 1. Una concentrazione può appartenere per 0,3 all'insieme "rada" e per 0,7 all'insieme "densa", e le due appartenenze convivono senza contraddizione. Il grado è assegnato da una funzione di appartenenza, che a ogni valore del descrittore associa un numero tra 0 e 1. La forma di questa funzione incide sul risultato sonoro tanto quanto le regole. La funzione triangolare, definita da tre soli parametri, è la più economica e produce un'appartenenza massima in un unico punto, con crescita e decrescita lineari. Essa è adatta quando il descrittore ha un valore ideale netto attorno a cui l'appartenenza cala simmetricamente. La trapezoidale aggiunge un quarto parametro e assegna appartenenza piena a un intero intervallo. Questa si usa quando una qualità percettiva si mantiene stabile su una fascia di valori, come, ad esempio, una regione che resta udibilmente densa entro un ampio margine di concentrazioni. La gaussiana, definita da un centro e da un'ampiezza, dà transizioni morbide e derivabili ovunque, ed è la scelta naturale quando si vuole un passaggio percettivamente continuo tra i descrittori. Le funzioni sigmoidali, infine, sono monotone e modellano qualità che crescono verso una saturazione, come "molto denso" senza un limite superiore. La scelta tra queste forme traduce in termini matematici il modo in cui il compositore concepisce ciascuna qualità: netta e puntuale, stabile su una fascia, morbida, o crescente verso una soglia.

Una funzione di appartenenza triangolare si scrive come funzione a tratti di tre parametri a , b , c , che ne fissano rispettivamente l'estremo sinistro, il vertice e l'estremo destro:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \text{ oppure } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x < c \end{cases}$$

Su uno stesso descrittore, per esempio la densità normalizzata tra 0 e 1, si dispongono più insiemi di questo tipo, parzialmente sovrapposti — quali, ad esempio, μ_{rada} , μ_{media} , μ_{densa} — così che ogni valore attivi contemporaneamente, in gradi diversi, gli insiemi vicini. Insiemi con ampie sovrapposizioni producono passaggi graduali, mentre insiemi più stretti li rendono netti. È qui che il compositore fissa il proprio «vocabolario percettivo».

Questo «vocabolario», tuttavia, non va improvvisato. Dove le qualità in gioco sono già state descritte, il musicista può attingere alla terminologia elaborata dalla ricerca sul suono, in particolare alla teoria dell'oggetto sonoro di Schaeffer, con la sua tipomorfologia della grana, dell'allure, del profilo, e alla spettromorfologia di Smalley, con il suo lessico del movimento spettrale e dei gesti. Sono descrittori qualitativi e graduati, e si prestano perciò a diventare insiemi fuzzy. Un'articolazione può appartenere in vario grado agli insiemi "grana fine" o "grana spessa" nel senso di Schaeffer. Solo dove la qualità voluta non trova un termine codificato si ricorre a descrittori generici. Ancorare così il vocabolario fuzzy a una terminologia condivisa, fondata sullo studio dell'ascolto ridotto, rende le regole meno arbitrarie e più comunicabili.

Sui gradi di appartenenza, poi, si costruisce un sistema di regole - e si propone un esempio introduttivo banale - nella forma "se densità è alta e variazione è rapida, allora brillantezza è alta", dove però il conseguente designa il valore di uscita che la regola suggerisce. È la forma di Takagi-Sugeno, quella adottata nell'implementazione che segue. Ogni regola combina le appartenenze dei suoi antecedenti per stabilire quanto essa sia attiva. La combinazione segue le operazioni della logica fuzzy. Conseguentemente, la congiunzione "e" si realizza di norma prendendo il minimo dei gradi coinvolti, la disgiunzione "o" prendendo il massimo. Sono le t-norme e le t-conorme, che estendono al caso graduato l'and e l'or della logica ordinaria, e minimo

e massimo ne sono la scelta più comune. Una regola con antecedente "densità alta e variazione rapida" è quindi attiva nella misura del minimo tra il grado di appartenenza a "densa" e quello a "rapida".

```

REGOLE-BRILLANTEZZA(densità, variazione)
  D ← DENSITÀ-FUZZY(densità)    // gradi in {rada, media, densa}
  V ← VARIAZIONE-FUZZY(variazione) // gradi in {lenta, rapida}
  R ← ∅
  inserisci (min(D.densa, V.rapida), 1.0) in R  // 'e' logico = minimo
  inserisci (min(D.densa, V.lenta), 0.6) in R
  inserisci (D.rada, 0.1) in R
  return R                                // coppie (peso, valore suggerito)

```

Le regole attive suggeriscono ciascuna un valore di uscita, valori che vanno poi ricomposti in un solo numero da inviare alla sintesi, nel passo di defuzzificazione. Il metodo più semplice è la media dei valori suggeriti, pesata per il grado di attivazione di ciascuna regola, dove w_r è il peso della regola r e v_r il valore che essa suggerisce:

$$y = \frac{\sum_r w_r v_r}{\sum_r w_r}$$

così che le regole più attive pesino di più. Il risultato è un parametro che varia con continuità al variare dei descrittori, senza i salti che una soglia netta introdurrebbe. La forza del modello sta nel poter legare ciascun descrittore ad attributi sonori percettivamente affini, componendo nel linguaggio delle qualità. La densità può controllare, ad esempio, il numero di voci attive o la ricchezza dello spettro. Il gradiente può potenzialmente governare le caratteristiche dell'attacco o il contenuto di alte frequenze. L'anisotropia può regolare la direzionalità nello spazio. Infine l'entropia locale può controllare la quantità di rumore o l'instabilità del suono.

Fin qui le funzioni di appartenenza e le regole sono fissate dal compositore in anticipo. Esiste però la possibilità che il sistema le apprenda e le adatti da sé, ed è il campo dei sistemi neuro-fuzzy, in cui una rete adattiva regola i parametri di un sistema fuzzy sulla base di esempi o di un obiettivo. Nel modello più noto, l'ANFIS — di tipo Takagi-Sugeno, coerente con l'impianto adottato — la struttura del sistema fuzzy è riscritta come una rete a strati, e i parametri delle funzioni di appartenenza, cioè i vertici dei triangoli, i centri e le ampiezze delle gaussiane, vengono aggiustati minimizzando uno scarto, esattamente come i pesi di una rete neurale. L'adattamento non si ferma alle funzioni di appartenenza, poiché può

estendersi ai pesi e alla forma delle regole if-then, rafforzando quelle che contribuiscono all'obiettivo e indebolendo le altre, fino a modificare la struttura stessa del sistema di regole.

Nel nostro contesto questo significa che il sistema di mappatura può evolvere mentre il pattern evolve, invece di restare dato una volta per tutte. Resta però la domanda decisiva: rispetto a che cosa apprende il modello? Un adattamento che inseguisse un obiettivo puramente interno resterebbe un esercizio chiuso, avvitato su un criterio deciso a tavolino. La direzione più feconda è un'altra, e lega questa parte tecnica al senso complessivo del lavoro, ossia che il modello apprenda dall'ambiente.

L'idea è di dare come riferimento all'adattamento i descrittori audio codificati nella letteratura specialistica, quelli con cui l'analisi del suono descrive un segnale reale. Calcolati sul suono dell'ambiente in cui la musica si trova a esistere, forniscono al sistema neuro-fuzzy un obiettivo che viene *da fuori*. Le funzioni di appartenenza e le regole si adattano per porre il suono generato dal pattern in una determinata relazione con il suono dell'ambiente, di «consonanza», di «contrasto», di «complemento». Il pattern continua a governare la forma interna del suono, ma il modo in cui questa forma si rapporta al contesto è appreso, e cambia col contesto. Così inteso, l'adattamento rafforza in modo diretto il collegamento con la circostanza. La musica non solo è pensata per un ambiente, come vuole una concezione ecologica «tradizionale», ma vi si accorda ascoltandolo, sicché lo stesso pattern può suonare diversamente in luoghi diversi, perché diverso è il contesto sonoro con cui si mette in relazione. L'accidentale dell'ambiente entra quindi nel sistema e ne orienta il comportamento. La mappatura, da statica, diventa un oggetto in movimento, e per giunta un movimento guidato dall'esterno, dalla circostanza stessa.

Questo apre una questione teorica, da enunciare con cautela come ipotesi da verificare. Se i parametri del sistema fuzzy si muovono astrattamente con continuità nel proprio spazio, quel movimento può essere descritto come un gesto nel senso di Mazzola, con l'avvertenza però che un gesto, in quella teoria, non è una curva continua qualsiasi ma una curva dotata di una struttura precisa, ossia uno scheletro discreto di punti connessi da frecce (grafo orientato) realizzato con continuità. Perché l'adattamento sia davvero un gesto occorrerebbe mostrare che possiede quella struttura. Ammesso ciò, se il movimento è a sua volta guidato dall'evoluzione del pattern, o dai descrittori dell'ambiente, o da entrambi, se cioè è il pattern o il contesto a muovere la mappatura mentre la mappatura muove il suono, si avrebbe

un movimento che governa un movimento, che è la forma dell'ipergesto. In questa lettura, l'adattamento neuro-fuzzy occupa una posizione di confine sul *continuum* che va dalla mappatura all'ipergesto, e questo è il suo aspetto più interessante. Nella sua meccanica interna resta un sistema fuzzy, cioè una mappatura, e appartiene quindi al secondo modello. Tuttavia, nel momento in cui i suoi parametri si mettono in moto, guidati dal pattern o dall'ambiente, esso comincia a comportarsi come qualcosa dotato di movimento e in questo sporge verso il terzo modello che si propone. Non è né pienamente l'uno né pienamente l'altro, ma sta in bilico tra i due, e questa ambiguità mostra come il confine tra mappatura e gesto possa essere graduale. Resta da stabilire se l'analogia con il gesto regga con rigore, ossia se la struttura formale del gesto si applichi effettivamente allo spazio dei parametri di un sistema fuzzy adattivo. La questione è aperta e merita un esame a sé.

Il modello segue l'evoluzione del pattern e ne rispetta la struttura assai più del primo. Resta però, in fondo, una mappatura per quanto complessa. Infatti, per quanto raffinata e «percettivamente accorta», una funzione mette in corrispondenza il pattern e il suono, e il pattern controlla il suono dall'esterno, come una causa che agisce su un effetto separato. È esattamente questo presupposto che la terza via mette in discussione.

La terza via anticipata nel contributo precedente descriveva il pattern come ciò che regola il movimento di eventi sonori in uno spazio a una, due o tre dimensioni, e non come sorgente di valori da mappare. Questa formulazione, vicina alle precedenti e insieme spinta un passo oltre, sposta l'accento. Nei primi due modelli si guarda al pattern soprattutto come a un dato che una regola traduce in suono, mentre qui si guarda a esso soprattutto come alla regola stessa, alla legge secondo cui qualcosa di sonoro si muove. È lo stesso pattern, letto con un'enfasi diversa, quindi non tanto ciò che si mappa sul suono, quanto ciò che governa un divenire sonoro.

Per rendere precisa questa idea occorre definire l'oggetto che si muove. Lo si chiama, qui, corpo sonoro come un oggetto sonoro dotato di una struttura interna, un insieme di relazioni tra le sue componenti, ossia tra le parziali di uno spettro, tra i gesti di un'articolazione, tra gli stati di un processo di sintesi. Un corpo sonoro è un piccolo sistema di dipendenze capace di assumere molte configurazioni. Il pattern, in questo modello, diventa il principio che porta il corpo da una configurazione alla successiva, invece di fissarne dall'esterno le componenti una per una.

La definizione di un corpo sonoro è essa stessa una forma di mappatura? La domanda è legittima, poiché anche qui si stabilisce una corrispondenza tra stati del pattern e configurazioni del corpo. La risposta chiede una distinzione e conviene formularla con cura. Nel secondo modello la mappatura è una funzione che a ogni valore del descrittore associa un valore del parametro, e il significato sta nel valore associato, punto per punto. La corrispondenza è statica e vale istante per istante, indipendentemente da ciò che viene prima e dopo. Nel terzo modello il significato si sposta invece sulla continuità del movimento che collega le configurazioni lungo l'evoluzione del pattern. La corrispondenza tra un singolo stato e una singola configurazione conta meno del modo in cui le configurazioni si concatenano, della forma della traiettoria che il corpo sonoro percorre. Nel secondo modello si guarda soprattutto a che cosa il suono è in ogni istante, mentre nel terzo a come il suono passa da un istante al successivo. La differenza, si badi, è di grado, poiché anche una mappatura, seguita nel tempo, disegna una traiettoria e anche un ipergesto, campionato in un istante, dà una configurazione. Ciò che cambia è dove si colloca il senso dell'operazione, se nel valore o nel movimento, e per pensare l'estremo in cui il senso è tutto nel movimento serve un concetto apposito, quello, a cui già si è fatto accenno, di ipergesto.

L'ipergesto va costruito per gradi. In questa teoria di Mazzola, un gesto è un movimento continuo dotato di forma. Esso è un sistema di curve continue disposte su uno «schema» di punti connessi da frecce. L'esempio più immediato è il gesto fisico dell'esecutore, la cui mano descrive nel tempo una curva continua, ma sono gesti, in questo senso, anche la traiettoria di un glissando, l'andamento di un inviluppo, il percorso di un qualunque parametro nel tempo. Ciò che conta è che si tratti di un movimento continuo entro uno spazio dotato di senso.

Un ipergesto è un gesto i cui punti sono a loro volta gesti. Se un gesto ordinario è una curva in uno spazio di configurazioni, un ipergesto è una curva in uno spazio i cui punti sono gesti interi, un movimento che connette con continuità un gesto a un altro. La costruzione si può reiterare, in ipergesti di ipergesti, ed è questa possibilità di stratificazione a renderla adatta a descrivere non solo movimenti, ma movimenti di movimenti, e dunque trasformazioni di trasformazioni.

Questa costruzione ha una motivazione che va al di là della tecnica e che chiarisce perché sia adatta al nostro scopo. La teoria del gesto nasce dall'osservazione che la notazione musicale, e più in generale la rappresentazione simbolica della musica, perde qualcosa di essenziale, perché riduce a punti e simboli discreti ciò che

nell'esecuzione e nell'ascolto è movimento continuo. Un simbolo dice dove, ma non come si arriva. Il gesto restituisce quel come, cioè la connessione tra gli stati, che il simbolo «cancella». La partitura è un gesto congelato, e l'interpretazione è l'atto di scongelarlo, di ritrovare il movimento continuo che il segno aveva ridotto a punto. Lo spazio in cui questi movimenti vivono è uno spazio topologico, cioè uno spazio dotato di una nozione di vicinanza e di continuità, ed è la continuità a costituire il contenuto musicale del gesto. Due gesti sono simili se l'uno si deforma con continuità nell'altro.

Il rapporto con i tre modelli di sonificazione diventa allora leggibile in questa luce. Il primo modello, che legge il pattern come sequenza di timbri, e in parte il secondo, che ne estrae descrittori istante per istante, pur seguendone l'evoluzione la trattano come successione di stati discreti — punti, valori — cioè nell'aspetto che, nei termini di Mazzola, è quello del simbolo. Il terzo modello, con l'ipergesto, sposta l'accento sull'operazione inversa a quella della notazione, e mette in primo piano il movimento continuo che collega gli stati, ciò che essi hanno di gestuale in sé più che di simbolico. In questo senso il terzo modello è meno una mappatura e più un gesto, senza che la linea di confine sia netta. La mappatura, come detto, privilegia l'associazione punto a punto, mentre l'ipergesto la continuità del divenire. Tuttavia l'una sfuma nell'altra a seconda di quanto peso si dia al singolo valore o al movimento che lo lega ai vicini. Il legame con il pattern è ora diretto. Il corpo sonoro è definito da un insieme di gesti, ossia le traiettorie dei suoi stati. Un singolo stato del pattern ottenuto su applicazione di regole che operano nel continuo, proiettato su questo insieme, corrisponde a un gesto, cioè a una configurazione completa del corpo. L'evoluzione del pattern nel tempo diventa una successione continua di configurazioni, quindi un ipergesto. Il pattern non specifica i valori singolarmente, ma la legge del concatenarsi dei gesti.

Le fasi del processo morfogenetico acquistano allora un senso gestuale preciso. La formazione, in cui la struttura emerge dal fondo omogeneo, è l'avvio dell'ipergesto, il momento in cui il corpo sonoro comincia a muoversi. La competizione tra due scale, o tra due pattern accoppiati, è una biforcazione nel cammino, un punto in cui la curva potrebbe procedere in direzioni diverse. Il collasso, in cui un morfogeno si esaurisce e la struttura si rompe, è un punto singolare, una discontinuità del movimento. Il pattern dice al suono come passare da un gesto al successivo, non che cosa essere in ciascun istante.

// Un corpo sonoro è una collezione di gesti (traiettorie di stati).

```
// REALIZZA sintetizza il suono da una singola
// configurazione, cioè da un gesto.
```

```
IPERGESTO-DA-PATTERN(storia, corpo)
```

```
  curva  $\leftarrow \emptyset$ 
```

```
  for each stato in storia
```

```
    do gesto  $\leftarrow$  PROIETTA-SU-SPAZIO-GESTI(stato, corpo)
```

```
    inserisci gesto in curva
```

```
  return curva          // l'ipergesto: una curva di gesti
```

È qui che l'immagine di Varèse trova la corrispondenza più stretta con il modello, pur restando un'analogia. Il suono organizzato, in questa lettura, non è più mosso da fuori come una nota collocata su una griglia, ma segue una direzione che sembra propria. Nei primi due modelli il compositore decide la corrispondenza tra pattern e suono e la applica, mentre nel terzo definisce un corpo e un processo, e ciò che il suono diventa emerge dallo svolgersi del processo. Non è più deciso interamente in anticipo. Si potrebbe dire, con un'immagine, da prendere come tale, che il pattern manifesta attraverso il corpo sonoro qualcosa di simile a una «volontà»: non un'intenzione, ma una tendenza interna, la dinamica propria di una materia in evoluzione. È una metafora, e come ogni metafora illumina un aspetto e ne tace altri. Resta però utile a segnalare che qui il rapporto tra compositore e materiale si è spostato.

Il modello di Turing si estende senza difficoltà a tre dimensioni, dove il Laplaciano discretizzato contrappone a ogni cella la somma dei suoi sei vicini ortogonali, meno sei volte il valore centrale e le morfologie si arricchiscono, e oltre a macchie e strisce compaiono lamelle, reti di canali, strutture bicontinue che nessun pattern piano mostra. I primi due modelli si adattano al caso tridimensionale senza cambiamenti concettuali. La sintesi additiva può disporre le parziali secondo le tre coordinate del volume, o secondo sezioni successive di esso. La mappatura fuzzy procede identica, con descrittori più ricchi.

È il terzo modello a sollevare la questione più interessante. Un pattern bidimensionale che evolve genera un ipergesto in cui interviene, oltre alle due dimensioni spaziali della griglia, il tempo dell'evoluzione. Un pattern tridimensionale aggiunge una terza dimensione spaziale, e verrebbe da chiedersi se

l'ipergesto risultante non sia quadridimensionale. La domanda, posta così, è mal impostata, e va chiarito perché.

Nella teoria del gesto, un gesto è già una curva che si sviluppa nel tempo, e il tempo non è una dimensione dello spazio in cui il gesto vive, ma il parametro lungo cui il gesto si dispiega. Il tempo, in un ipergesto, è sempre presente e ha uno statuto particolare, distinto da quello delle dimensioni spaziali. Aumentare la dimensione spaziale del pattern arricchisce lo spazio delle configurazioni del corpo sonoro, perché vi sono più gradi di libertà da animare, ma non aggiunge un tempo, poiché il tempo resta uno, quello lungo cui l'ipergesto si svolge. Non si tratta dunque di passare da un ipergesto tridimensionale a uno quadridimensionale, ma di riconoscere che, in ogni caso, la coordinata temporale non è omogenea alle altre.

Il punto critico è allora un altro, e riguarda quale sia questo tempo. Il pattern possiede un proprio tempo intrinseco, quello della reazione-diffusione, scandito dal ritmo della morfogenesi. L'ascolto possiede a sua volta un tempo, quello in cui il gesto sonoro si dispiega davanti a chi ascolta. La questione è se questi due tempi coincidano o vadano tenuti distinti, e ammette almeno due risposte, entrambe legittime.

Secondo la prima, il tempo dell'ipergesto è il tempo proprio del pattern. L'ipergesto eredita allora il ritmo interno della morfogenesi, e accelera dove il pattern accelera, indugia dove esso indugia, si spezza dove la struttura collassa. Il suono è quantizzato, per così dire, secondo la scansione temporale del processo, e la sua articolazione ritmica non è imposta ma emerge dalla dinamica di reazione-diffusione. È la lettura più coerente con l'idea del suono che si muove da sé, poiché anche il suo tempo gli appartiene.

Per la seconda, il tempo dell'evoluzione del pattern e il tempo dell'ascolto si disaccoppiano. In questo caso l'intera storia del pattern, compreso il suo svolgersi, viene trattata come un dato già fornito, un volume di configurazioni che l'ascolto percorre secondo un tempo proprio, imposto dal compositore. Il tempo del pattern diventa una coordinata come le altre, da attraversare a velocità variabile, in avanti o all'indietro, mentre il tempo del gesto è quello della lettura. Questa via sacrifica il ritmo intrinseco della morfogenesi e riavvicina il terzo modello alla dimensione esplorativa propria dei primi due.

Le due posizioni non si escludono, e definiscono piuttosto gli estremi di un intervallo, poiché si può far seguire all'ipergesto il tempo proprio del pattern in certe fasi e disaccoppiarlo in altre, oppure far scorrere il tempo del pattern a una velocità

che sia essa stessa funzione dello stato del pattern. Quale via prevalga è una potenziale scelta compositiva e il concetto di ipergesto le accoglie entrambe. Tale scelta, ha però la responsabilità diretta di intervento che sposta il baricentro in una direzione antropocentrica.

I tre modelli proposti non si escludono, e la loro combinazione è anzi il caso di maggiore interesse, tanto più con pattern accoppiati. Un pattern gerarchico offre due scale. Potenzialmente, la scala grande può governare la forma complessiva attraverso il primo modello, come spettro additivo del divenire d'insieme, mentre la scala piccola alimenta, con il secondo modello, la mappatura fuzzy dei descrittori percettivi locali. Il terzo modello può agire sul corpo sonoro che ne risulta, di modo che l'ipergesto sia definito dalla dinamica accoppiata dei due sistemi e non da uno solo.

La formalizzazione dell'accoppiamento data sopra è ciò che rende possibile questa integrazione, poiché fornisce un unico processo, il sistema accoppiato, da cui i tre modelli attingono simultaneamente, ciascuno a un diverso livello di descrizione.

Tutta questa architettura pone un problema di efficienza computazionale, poiché gran parte di ciò che si è descritto acquista senso solo se avviene in tempo non differito. Integrare i sistemi di reazione-diffusione, estrarre a ogni passo i descrittori dal pattern e dall'ambiente, far girare l'inferenza fuzzy e sintetizzare il suono è un carico che cresce con la risoluzione della griglia, con il numero di pattern accoppiati e con il caso tridimensionale. Se il sistema deve reagire all'ambiente, e non eseguire un decorso precalcolato, il vincolo diventa stringente e impone scelte pratiche di implementazione, dalla risoluzione della griglia al ritmo di aggiornamento dell'adattamento, che condizionano quali configurazioni siano realizzabili dal vivo e quali restino confinate al differito.

Su questo versante l'elaborazione grafica offre un margine considerevole, poiché quasi tutte le operazioni in gioco sono parallele sui dati. L'integrazione della reazione-diffusione aggiorna ogni cella leggendo solo i vicini, e il calcolo dei descrittori ripartisce il lavoro su migliaia di celle indipendenti. Entrambi si prestano quindi a essere eseguiti su GPU, dove il vantaggio sta nell'evitare il trasferimento continuo della griglia verso il processore centrale, tenendo l'intera catena, dalla dinamica ai descrittori fino alla mappatura fuzzy, sullo stesso dispositivo. Tuttavia, il calcolo dell'istogramma per l'entropia richiede accumulazioni concorrenti, gestite dalle librerie di calcolo parallelo ma da non trascurare in un'implementazione

diretta. Inoltre, i descrittori non vanno aggiornati al ritmo del segnale audio ma alla scala temporale propria del pattern, interpolandone i valori tra un passo e il successivo per pilotare la sintesi. Con questi accorgimenti il margine di calcolo diventa potenzialmente ampio anche per griglie di grandi dimensioni.

Vi è infine una dimensione che appartiene meno alla mera tecnica e più al senso complessivo dell'operazione.

Un pattern di Turing si presta bene a valori ecocentrici, non nel suo esito stazionario ma nei regimi dinamici in cui produce una variazione che non è né ripetizione né sviluppo. Le sue strutture restano riconoscibili senza essere identiche, mutano di continuo entro un equilibrio dinamico, con quella combinazione di costanza e differenza che caratterizza i processi viventi. Un processo morfogenetico offre una durata che può prolungarsi potenzialmente senza ripetersi e senza concludersi, restando aperta a essere parte del proprio esterno.

Il terzo modello apre una questione che qui ci si limita a enunciare. Se il pattern muove il corpo sonoro da uno stato al successivo, la domanda pertinente non è più quale valore assuma un parametro, ma che cosa operi il passaggio. È la domanda al centro della teoria delle reti trasformazionali di Lewin, i cui grafi hanno per nodi stati musicali e per frecce trasformazioni, e in cui alla misura statica dell'intervallo tra due stati si sostituisce l'operatore che compie il movimento. L'ipergesto generato dal pattern è una risposta possibile a questa domanda. La morfogenesi di Turing può allora divenire un generatore di reti trasformazionali sonore? Ciò sarà materia di futuro contributo.

Riferimenti

- Branchi, W. (2017). *Il pensiero musicale sistemico. Scritti 1975-2014*, a cura di L. Pizzaleo. Aracne, Roma.
- Gierer, A. e Meinhardt, H. (1972). A theory of biological pattern formation. *Kybernetik*, 12, 30–39.
- Jang, J.-S. R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665–685.
- Lewin, D. (1987). *Generalized Musical Intervals and Transformations*. Yale University Press.

- Maini, P. K., Woolley, T. E., Gaffney, E. A. e Baker, R. E. (2016). Turing's Theory of Developmental Pattern Formation. In S. B. Cooper e A. Hodges (a cura di), *The Once and Future Turing*. Cambridge University Press, pp. 131–143.
- Mastrogiacomo, A. (a cura di) (2020). *Utopia dell'ascolto. Intorno alla musica di Walter Branchi*. Il Sileno Edizioni, Lago (CS).
- Mazzola, G. (2002). *The Topos of Music: Geometric Logic of Concepts, Theory, and Performance*. Birkhäuser.
- Mazzola, G. e Andreatta, M. (2007). Diagrams, gestures and formulae in music. *Journal of Mathematics and Music*, 1(1), 23–46.
- Peeters, G., Giordano, B. L., Susini, P., Misdariis, N. e McAdams, S. (2011). The Timbre Toolbox: extracting audio descriptors from musical signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(5), 2902–2916.
- Schaeffer, P. (1966). *Traité des objets musicaux*. Éditions du Seuil, Paris.
- Smalley, D. (1997). Spectromorphology: explaining sound-shapes. *Organised Sound*, 2(2), 107–126.
- Turing, A. M. (1952). The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B*, 237(641), 37–72.
- Varèse, E. e Chou Wen-chung (1966). The Liberation of Sound. *Perspectives of New Music*, 5(1), 11–19.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.