

Interpretazione musicale e signal processing

Alvise Vidolin

Centro di Sonologia Computazionale dell'Università di Padova

Via S. Francesco, 11 - 35121 Padova

Tel. ++39 49 8283757, Fax ++39 49 8283733

Email: vidolin@dei.unipd.it

Riassunto

Le mutazioni del linguaggio musicale del '900 e l'avvento della tecnologia elettronica hanno favorito la nascita di una nuova figura di musicista: l'interprete agli strumenti musicali elettronici che affianca le tradizionali competenze musicali a quelle sonologiche dell'esperto in *signal processing*. La sua funzione non è solo quella di esecutore in concerto ma anche di progettista degli ambienti esecutivi del brano e di interfaccia fra l'idea musicale del compositore e la sua realizzazione sonora.

L'ambiente esecutivo è l'insieme di strumenti *hardware* e *software* che trasformano un sistema tecnologico in uno "strumento" musicale sviluppato dall'interprete per eseguire in concerto uno specifico brano musicale. Gli elementi principali di progettazione sono le tecniche di elaborazione del suono, l'interfaccia uomo macchina, l'ergonomia dei controlli gestuali, la sincronizzazione dei tempi fra esecutori tradizionali e processi elettronici, la rapida transizione da un ambiente esecutivo ad un altro.

In questo articolo vengono presentate le tecniche dell'interpretazione musicale con strumenti elettronici privilegiando il lavoro diretto sul suono anziché sul testo (partitura) e partendo dalla loro incidenza sui parametri musicali primari di durata, altezza, intensità, timbro e spazio. Molte delle tecniche discusse in questo articolo sono nate in laboratorio e ampiamente divulgate in letteratura; pertanto viene privilegiata prevalentemente la loro applicazione nell'esecuzione dal vivo fornendo esempi tratti da opere musicali contemporanee.

La funzione dell'interprete

Nella musica tradizionale l'interprete traduce in suono ciò che il compositore ha notato su carta mediante un linguaggio grafico-simbolico che discretizza nel tempo il continuo sonoro dell'opera musicale. Egli svolge un ruolo in parte operativo, nel senso che deve realizzare esattamente ciò che è scritto, e in parte creativo poiché deve completare in maniera stilisticamente corretta e talvolta anche inventare, gli elementi e i gesti esecutivi che il linguaggio di notazione non consente di esprimere in termini dettagliati, o che il compositore ha volutamente lasciato arbitrari.

Nel corso del '900 il linguaggio musicale si è arricchito di nuovi materiali sonori e di tecniche esecutive che trovano difficoltà ad essere notate con il linguaggio tradizionale. Il concetto stesso di nota, che è stato il pilastro di molti secoli di musica viene sempre più spesso sostituito da quello di *evento sonoro*, necessario per poter descrivere il mondo dei suoni ad altezza indeterminata e dei suoni-rumore. La prassi sperimentale del comporre, adottata oggi con maggior frequenza, fa precedere la fase di stesura della partitura definitiva da un lungo lavoro di sperimentazione realizzato in collaborazione con gli interpreti. Con la nascita della musica elettronica, poi, il concetto di evento è stato affiancato a quello di *processo* in quanto una parte musicale non è più definita dalla semplice successione degli eventi ma anche dal processo di trasformazione a cui essi vengono sottoposti, non tanto singolarmente quanto nella loro globalità.

È inevitabile che consistenti mutazioni del linguaggio musicale e delle tecniche di realizzazione della musica comportino altrettanto radicali trasformazioni del ruolo di chi la esegue ovvero dell'interprete, delle sue competenze e funzioni. Nel corso di questo secolo, l'interprete degli strumenti tradizionali si è specializzato imparando nuove tecniche esecutive (si pensi ad esempio alla tecnica dei suoni multifonici negli strumenti a fiato) ed è nato l'interprete agli strumenti musicali elettronici (Davies, 1984) il cui ruolo e le cui competenze non sono ancora ben definite in quanto spaziano dal suonatore di sintetizzatori al ricercatore in *signal processing* con molti livelli intermedi di specializzazione. In molti casi infatti egli non suona uno strumento bensì programma e controlla un insieme di apparecchiature; non si limita a tradurre in suono una partitura, ma trasforma in fatti operativi progetti musicali astratti del compositore; opera con metodologie scientifiche avvalendosi della tecnologia digitale e delle nuove conoscenze sulla sintesi ed elaborazione dei segnali (Vidolin, 1993).

Questa varietà di funzioni svolte dall'interprete viene riscontrata anche ripercorrendo le varie tappe della musica prodotta con gli strumenti elettrofoni. Molto probabilmente ciò è dovuto alla rapida evoluzione tecnologica e del linguaggio musicale che porta a fare convivere in un'unica persona alcune delle figure di ricercatore, inventore di strumenti, esecutore e compositore. Nella prima metà del '900 è prevalsa la coincidenza fra l'inventore di strumenti musicali elettronici e il virtuoso degli stessi; è questo il caso di Lev Termen per il Theremin e di Maurice Martenot per le Ondes Martenot, solo per citare i primi e i più famosi inventori e interpreti di strumenti elettronici degli anni '30. A partire dagli anni '50 con la nascita della musica elettroacustica prodotta in studio è invece il compositore a dominare la scena rendendo quasi sempre intrecciate le fasi ideativa e realizzativa del brano. Questa metodologia di lavoro, che è tipica della musica sperimentale, è stata adottata successivamente anche da quei compositori di computer music che hanno scelto il computer come proprio strumento di aiuto alla composizione.

Interprete in studio

Il fatto che un'unica persona possa essere l'artefice dell'intero prodotto musicale, ben nota utopia in voga negli anni '50, ha dato importanti risultati musicali ma ha anche dimostrato i suoi limiti. Se prevale la figura del compositore ciò che a lui importa è la concretizzazione sonora dell'idea musicale senza curare eccessivamente la qualità del dettaglio, inoltre, una volta realizzata l'opera, cade

l'interesse di mantenerla in vita attraverso nuove esecuzioni, in quanto l'attenzione si sposta immediatamente verso l'opera successiva. Viceversa se prevale l'interprete il lavoro di costruzione formale viene sopraffatto dal piacere dell'effetto e dall'intento dimostrativo della propria abilità tecnica. Inoltre il vantaggio di poter controllare l'intero processo di composizione e realizzazione dell'opera ha come risolto il fatto che troppo spesso il compositore-interprete viene distratto dai frequenti e banali problemi tecnici del proprio sistema informatico e che riducono le sue letture alla arida consultazione di manuali, i suoi passatempi all'aggiornamento del software e le proprie fantasie alla implementazione di un nuovo algoritmo.

La necessità di mantenere separati i ruoli di compositore e di interprete è stata avvertita ancora negli anni '50 allo Studio per la musica elettronica della WDR di Colonia e, a quei tempi, tale ruolo era svolto principalmente dal giovane Gottfried Michael Koenig che doveva realizzare elettronicamente le partiture grafiche prodotte dai vari compositori invitati a lavorare nello studio. Analogamente allo studio di Fonologia Musicale della Rai di Milano troviamo Marino Zuccheri, il quale si è sempre rivelato un prezioso assistente dei vari compositori, ricco di sensibilità e capacità musicali (Doati and Vidolin, 1986).

Negli anni più recenti i vari compositori che sono invitati all'IRCAM di Parigi per produrre una composizione musicale avvalendosi delle moderne tecnologie informatiche vengono affiancati da un assistente musicale il cui compito, per analogia, può ancora considerarsi parte del ruolo tradizionale dell'interprete. E questo modo di operare è praticato in quasi tutti i centri di produzione musicale ad elevato contenuto tecnologico.

Interprete al live-electronics

Le tecniche digitali di generazione e di elaborazione dei segnali acustici consentono di dare corpo sonoro a molte fantasie timbriche che hanno affascinato la mente dei compositori del '900. La conoscenza del suono, dei meccanismi percettivi e lo sviluppo di una tecnologia atta alla manipolazione dell'universo acustico cambiano il processo di creazione e di realizzazione dell'opera musicale.

L'orchestra tradizionale, vista in termini di segnali, realizza il continuo sonoro mediante somma di sorgenti complesse. L'elettronica, in aggiunta a ciò, consente di trasformare singolarmente o a gruppi tali sorgenti per ottenere una moltiplicazione degli eventi, e quindi un aumento di densità, oppure al contrario una sottrazione dei contenuti spettrali o altre forme di trattamento che in termini musicali possono essere considerati un ampliamento del concetto tradizionale di *variazione*.

Analogamente, il ruolo del compositore, del direttore d'orchestra e degli esecutori, che riflettono il *modus operandi* della società meccanicistica del secolo scorso, viene modificato seguendo i mutamenti dei sistemi di organizzazione del lavoro che si attuano nel mondo della produzione industriale. Le grandi masse orchestrali vengono oggi sostituite da grossi sistemi di generazione e/o vengono ridotte a pochi solisti i cui suoni vengono elaborati elettronicamente dal vivo; nasce una nuova figura di interprete agli strumenti elettrofoni che ha il compito di realizzare il sistema di elaborazione e di progettare l'ambiente esecutivo. Buona parte del suo lavoro si svolge nella fase di preparazione dell'opera, mentre durante l'esecuzione dal vivo egli controlla il corretto funzionamento delle macchine, gestisce l'interazione con gli eventuali solisti, tara i livelli dinamici globali e realizza la proiezione spaziale dei suoni. Questo interprete, spesso chiamato regista del suono, svolge un ruolo concettualmente più vicino al direttore d'orchestra che all'esecutore.

Nella produzione di un'opera musicale riveste grande importanza il lavoro di sperimentazione che precede e accompagna la fase vera e propria di composizione dell'opera. Il compositore così come spesso deve fare affidamento su virtuosi degli strumenti tradizionali altrettanto frequentemente ricorre ad esperti delle moderne tecnologie affinché lo aiutino nelle diverse fasi di progettazione dell'opera. L'interprete agli strumenti elettronici, quindi, diventa una sorta di interfaccia fra l'idea compositiva e il suono: un suono che non nasce più dalla sola gestualità vocale o dal gesto su di uno

strumento acustico, ma dalla progettazione di un algoritmo di sintesi, di un processo di elaborazione, di un ambiente esecutivo, opportunamente "suonati".

Ambiente esecutivo

Come è noto, l'esecutore tradizionale suona strumenti codificati e stabili da secoli, impara per imitazione dal maestro e sviluppa una abilità gestuale che sfrutta lo strumento come fosse una estensione del proprio corpo.

Nel mondo del *signal processing*, invece, i dispositivi si evolvono seguendo il passo della tecnologia e quindi le generazioni tecnologiche si inseguono con ritmi meno che decennali. Inoltre pochi apparecchi sono autonomi, come invece lo sono gli strumenti musicali acustici, bensì ognuno di essi fa parte di un insieme di apparecchiature che, opportunamente collegate fra loro e programmate, costituiscono l'entità che può essere assimilata al vecchio concetto di strumento e che nel mondo tecnologico viene chiamata *sistema*.

Nel nostro caso il sistema prende come ingresso i segnali audio da elaborare, è dotato di dispositivi di controllo che consentono di variare i parametri di trattamento o di generazione del suono e infine fornisce in uscita i segnali elaborati. Per trasformare questo sistema in strumento musicale è necessario rendere i controlli funzionali alla *performance*. Pertanto essi dovranno variare secondo unità di misura sonologico-percettive o meglio ancora musicali (ad esempio, per l'intensità: dB, phon, sone o la scala dinamica da *ppp* a *fff*), avere un campo di variabilità predefinito e poter seguire una opportuna legge di variazione (ad esempio lineare, esponenziale o arbitraria) in modo da rendere più semplice ed efficace l'esecuzione di quella specifica parte musicale.

L'interprete, che è spesso anche il progettista dell'ambiente esecutivo, deve effettuare la scelta dei dispositivi che andranno a costituire il sistema di elaborazione. Inoltre deve costruire l'interfaccia che mette in relazione i *controlli del performer*, ovvero i parametri musicali che devono essere variati durante l'esecuzione e che sono fissati dalla composizione, con i *controlli del sistema* che dipendono dalle apparecchiature scelte. Molto spesso conviene rendere multifunzionale lo stesso dispositivo di controllo, in modo tale che attraverso un singolo gesto si possano variare contemporaneamente e in maniera coerente più parametri di sistema. Continuando con l'esempio precedente, per ottenere una variazione della dinamica che vada da *ppp* a *fff* è utile associare a un unico controllo del performer la variazione di più controlli di sistema quali l'ampiezza, il filtraggio passa basso per ottenere il *piano* e la presenza dell'*exciter* per il *forte*. Inoltre, sul piano esecutivo, per taluni parametri è più efficace l'uso di dispositivi di controllo gestuale con reazione, che estraggono più informazioni da un singolo gesto e che addirittura impongono una fatica fisica all'interprete per raggiungere le zone estreme di esecuzione (Cadoz, Luciani, and Florens, 1984). La necessità di disporre di controlli gestuali che favoriscano una azione naturale dell'esecutore e che consentano di ottenere con un singolo gesto la variazione coerente di più parametri musicali ha portato allo sviluppo di nuovi dispositivi di controllo che si vanno ad affiancare o che addirittura sostituiscono i tradizionali potenziometri, tastiere, e pulsanti. In letteratura si trovano molti esempi (Mathews, and Abbott, 1980; Davies, 1984; Waiwiz, M. 1985; Chabot, 1990; Rubine, and McAvinney, 1990; Bertini, and Carosi, 1991; Genovese, Cocco, De Micheli, and Buttazzo, 1991).

I controlli del performer devono essere contenuti nel numero per favorire un rapido apprendimento dell'ambiente esecutivo e un accesso immediato alle principali funzioni esecutive. Ad esempio, il mixer tradizionale, che è uno degli strumenti più usati nei concerti di live electronics, non è ergonomicamente adatto alla esecuzione dal vivo in quanto i controlli sono tutti monodimensionali e si trovano allo stesso livello controlli di taratura e controlli di esecuzione. Di conseguenza delle centinaia di potenziometri e interruttori di cui esso dispone, nel corso della esecuzione in concerto del singolo brano nella maggioranza dei casi ne vengono variati poco più che una decina e questi ultimi non sono facilmente raggruppabili in un'unica zona e accessibili senza essere guidati da una

attenta analisi topologica. Conviene quindi riportare in un dispositivo di controllo remoto gli elementi soggetti a variazione.

Nel corso della esecuzione di un brano e ancora di più nella successione dei diversi brani che costituiscono il concerto, si avvicinano diversi ambienti esecutivi. Di questo bisogna tenere conto sia nella scelta delle apparecchiature che nella progettazione degli ambienti stessi. Ad esempio, la transizione da un ambiente ad un altro deve essere istantanea e senza disturbi, e i controlli del performer devono essere organizzati in modo tale da ridurre al minimo il cambiamento. Inoltre l'interprete deve poter scegliere con libertà la propria posizione nella sala in dipendenza dalle caratteristiche architettoniche della stessa o dal luogo che gli viene imposto dalla partitura. Talvolta la migliore posizione è a centro sala in altri casi è necessario che egli sia sul palcoscenico assieme agli altri musicisti. Pertanto è necessario disporre di un dispositivo di controllo remoto avente dimensioni contenute e pertanto facilmente trasportabile anche da una sola persona, nonché dotato di feedback visivo con il sistema tecnologico principale. In taluni casi, per favorire la libertà di movimento, può essere utile il collegamento radio al posto della tradizionale linea via cavo. Per ambienti esecutivi relativamente semplici il controllo remoto via MIDI può essere una soluzione economica e semplice da attuare con apparecchiature e software di facile reperibilità commerciale. Purtroppo la quantità di informazione che può transitare su una linea MIDI è molto limitata (31250 bit/s) e i dati sono organizzati in modo tale da trattare agevolmente solo campi di escursione da 0 a 127. Queste limitazioni riducono notevolmente i vantaggi derivanti della ampia diffusione del codice MIDI nel mondo degli strumenti musicali e del *signal processing*. Pertanto se l'ambiente esecutivo richiede molte variazioni continue di parametri piuttosto che la semplice commutazione fra situazioni prefissate è necessario usare più linee MIDI indipendenti o per casi particolarmente complessi adottare sistemi diversi di controllo.

In conclusione, un ambiente esecutivo è l'interfaccia musicale (hardware e software) che consente di trasformare un complesso sistema tecnologico in una sorta di strumento musicale generalizzato, adatto alla esecuzione di una specifica composizione musicale da parte dell'interprete. La progettazione di tale ambiente è affidata all'interprete stesso in modo da poter conciliare lo stile esecutivo personale con le caratteristiche della singola opera.

La prassi esecutiva di un ambiente non può essere paragonata a quella tradizionale di uno strumento acustico in quanto un ambiente è intrinsecamente legato alla musica che deve produrre e all'interprete che lo ha progettato. Pertanto l'apprendimento non può avvenire per via intuitiva o per imitazione di prassi consolidate; anzi deve svilupparsi nell'interprete la capacità di apprendere in base a considerazioni di natura analitica sulle tecnologie e sulle tecniche di elaborazione dei segnali e deve formarsi l'abilità nel passare rapidamente da situazioni e configurazioni molto diverse che si possono succedere anche nel corso della esecuzione del singolo brano.

Gli ambienti esecutivi, a differenza delle partiture musicali, sono soggetti a mutazione nel tempo in quanto molti dispositivi, nell'arco di una decina d'anni, diventano obsoleti e devono essere sostituiti con nuove apparecchiature, concettualmente analoghe alle precedenti, ma diverse sul piano operativo. Su archi di tempo più lunghi, cambia anche la struttura del sistema, come è avvenuto nel passaggio dagli ambienti esecutivi analogici a quelli misti (analogici a controllo digitale) e successivamente a quelli completamente digitali. Questo vincolo di costante aggiornamento degli ambienti esecutivi in dipendenza dalla continua evoluzione tecnologica, può migliorare l'esecuzione dell'opera musicale in quanto la necessità di riprogettare l'ambiente esecutivo può perfezionare le soluzioni tecniche o rendere più efficaci alcuni passi della partitura attraverso una nuova "orchestrazione" della parte elettronica.

Modelli del segnale per l'interprete

La musica tradizionale del repertorio colto utilizza diverse tecniche per lo sviluppo del discorso musicale (ripetizione, variazione, sviluppo, contrappunto, armonia, figura, sfondo, ecc.) e queste

sono applicate nella fase di scrittura del testo ovvero durante la composizione della partitura. Con gli strumenti del *signal processing*, invece, è possibile organizzare il discorso musicale agendo direttamente sul suono anziché sul testo.

Ad esempio, con le tecniche tradizionali la variazione di una frase si realizza mediante la sua riscrittura modificando gli elementi voluti. Con il *signal processing* la variazione si ottiene elaborando direttamente il suono, partendo dalla realizzazione acustica della frase originaria e procedendo con trasformazioni successive sia dell'originale che dei vari elaborati.

Nella tabella 1 sono elencate le principali tecniche di elaborazione dei suoni organizzate secondo i parametri musicali di tempo, altezza, dinamica, timbro e spazio. Per una introduzione a tali tecniche si vedano i testi citati in bibliografia (De Poli, Piccialli, and Roads, eds. 1991; Mathews, 1969; Mathews, and Pierce, ed. 1989; Moore, 1990; Roads, and Strawn, eds. 1985; Roads, ed. 1989; Strawn, ed 1985; Wasserman, ed. 1985). Anche se molti processi sono simili sul piano teorico, esistono delle diversità operative fra il lavoro in tempo differito che si realizza in studio e l'esecuzione dal vivo. Pertanto nel *live electronics* alcuni processi non si possono realizzare oppure danno risultati meno controllabili. Un caso emblematico è la compressione della durata di un suono che, se realizzata in tempo reale, dovrebbe agire nel futuro. Al contrario l'interazione dal vivo fra strumenti acustici e mezzi elettronici può essere migliorata in sede di concerto grazie alla positiva tensione che sia crea per la presenza del pubblico e per l'aspettativa legata all'evento.

Nella seguente tabella sono elencate le principali tecniche di elaborazione del suono seguendo il punto di vista dell'interprete ovvero in base alla loro incidenza sui parametri musicali primari di durata, altezza, intensità, timbro e spazio. E' importante notare che la separazione dei parametri qui attuata per chiarezza espositiva lo è molto meno nei fatti, in quanto sono rari i casi in cui variando un solo parametro non si vadano ad influenzare in maniera più o meno forte anche gli altri.

Time processing

<i>Processing</i>	<i>Technique</i>	<i>Results</i>
translation	delay, $t > 50$ ms	eco semplice, ripetizione
accumulation	feedback delay, $t > 50$ ms, gain < 1 . Nel feedback si possono inserire altri elementi di trasformazione come filtri, trasposizioni, ecc	ripetizione con accumulazione. Struttura a canone con eventuali variazioni in presenza di trasformazioni nel feedback.
slowing down and quicking the pace	sampling	the pitch goes down when the time slows down and viceversa
backward	backward sampling	inversione temporale del suono; transient inversion
augmentation or diminution of duration	sampling with looping or skipping segment	prolungamento o accorciamento della durata di un suono mantenendo inalterate le caratteristiche di attacco e di decadimento. Vale per suoni con steady state.

freezing	asynchronous granular feedback delay, grain duration > 1 s; loop time $<$ grain time; gain < 1	prolungamento di una finestra temporale di un suono. Per non avere disturbi usare una finestra temporale di tipo gaussiano
foot tapping	adaptive and/or cognitive system	estrazione del beat da una musica ritmica
stretching and shrinking	phase vocoder; wavelet ; lpc	la durata di una sezione musicale viene allungata o compressa senza variarne l'altezza. Transient modification

Pitch processing

<i>Processing</i>	<i>Technique</i>	<i>Results</i>
detection (pitch follower)	zero crossing; Tunable IIR filter; FFT	estrae il pitch di un suono. Funziona solo con suoni periodici
transposition	harmonizer; phase vocoder; wavelet	varia la altezza del suono senza variarne la durata. Formant transpositions
transposition	lpc	varia la altezza del suono senza variarne la durata. Constant formants
vibrato	low frequency (4 ÷ 8 Hz) frequency modulation	periodic pitch fluctuation

Dynamics processing

<i>Processing</i>	<i>Technique</i>	<i>Results</i>
increment or reduction	amplitude scaling	più che una variazione di dinamica talvolta può dare l'effetto di allontanamento o l'avvicinamento della sorgente
increment	distorsion; excitement	si arricchisce il suono di armoniche supplementari nel registro acuto
reinforcement	doubling by FIR comb filter, delay < 30 ms	rinforzo del suono. Aggiunge una prospettiva di spazio
reduction	low pass filtering, cutoff frequency = 1 ÷ 10 KHz	si riduce l'energia delle armoniche superiori
tremolo	low frequency (4 ÷ 8 Hz) amplitude modulation	lenta variazione periodica di ampiezza
expansion or compression	amplitude scaling dependent on signal power	i segnali forti vengono più amplificati dei segnali deboli; viceversa per la compressione
gate	interruttore a soglia	vengono fatti passare solo i segnali che superano una certa soglia di ampiezza
detection (envelope follower)	low pass filtering the RMS value	segue le variazioni dell' ampiezza estraedone l'involuppo
hybridization	amplitude scaling by the envelope detected from an other signal	fragmentation of a signal by another one

Timbre processing

<i>Processing</i>	<i>Technique</i>	<i>Results</i>
spectral transformation	linear filtering: low pass, band pass, high pass, rejection, ecc.	spectral deformation by amplitude scaling of a signal band
flanger effect; chorus effect	low frequency (0.05 ÷ 10 Hz) time varying recursive comb filter, delay (1 ÷ 30 ms), and amplitude modulation	suono più ricco, variabile timbricamente
specular spectrum translation	ring modulation by audio sinusoidal carrier	suono inarmonico la cui energia è centrata sulla portante e la larghezza di banda è il doppio della banda del segnale modulante
spectrum translation	one side ring modulation	lo spettro viene traslato in frequenza di un valore costante rendendo inarmonico un suono armonico
transformation (harmonic traslation)	pitch synchronous ring or frequency modulation of an harmonic sound. Portante multipla del pitch	il suono resta armonico e viene traslato con combinazione delle armoniche
periodic part amplification or attenuation	pitch synchronous FIR comb filter of an harmonic sound, delay = 1/f	separazione della parte armonica e inarmonica di un suono
hybridization	pitch synchronous resonant filtering. Control: harmonic sound, controlled: any sound	il suono controlled viene filtrato in base al pitch del control sound
hybridization	vocoder; convolution; lpc	il suono controlled viene filtrato in base allo spettro del suono control

Space processing

<i>Processing</i>	<i>Technique</i>	<i>Results</i>
room reverberation	multi-tap delays, recursive comb and allpass filters	vengono simulati i primi echi e la riverberazione diffusa di una sala
stereo placing	stereo balance; stereo delay; stereo low pass filtering	interaural difference simulation of intensity, time delay and timbre
stereo phasing effect	low frequency time varying stereo comb filter	effetto timbrico e spaziale
near-far placing	balancing direct to reverberated signal	il suono riverberato fissa la distanza massima, aggiungendo progressivamente il segnale diretto si ha l'avvicinamento

movement speed	frequency transposition	doppler effect simulation
resonant room cavità risonante	multi speaker feedback delays	simulazione delle riflessioni multiple di una cavità risonante
auralization	binaural filtering and convolution by the room impulse response	collocazione di un suono in un punto qualsiasi di una sala reale; ascolto in stereofonia
sound placing	multi speakers distribution	la provenienza del suono dipende dall'altoparlante di diffusione. Si possono applicare dinamicamente le tecniche stereofoniche e di movimento a coppie di altoparlanti

Esempi di ambienti esecutivi

Nel mondo musicale accademico l'interesse non è tanto rivolto alla novità tecnologica o scientifica fine a se stessa quanto alle possibilità offerte dalle nuove tecnologie di raggiungere precisi risultati espressivi o estetici. Gli ambienti esecutivi che seguono sono stati scelti come esempi significativi di integrazione fra tecnologia del *signal processing* e musica contemporanea privilegiando tre opere musicali dell'ultimo decennio che sono già entrate nel repertorio di teatri e festival di musica contemporanea. Negli esempi che seguono, anche se la tecnologia usata non sempre è la più sofisticata, essa assume un ruolo importante per l'evoluzione del linguaggio e del pensiero musicale. I tre lavori prevedono l'interazione fra strumenti tradizionali ed elettronici, e le partiture sono notate utilizzando il sistema tradizionale. Questo non sempre è adeguato alle esigenze del live electronics in quanto i parametri da controllare non sono rappresentabili sul pentagramma. La mancanza di un sistema di notazione adeguato per il live electronics fa pensare che il ruolo svolto dall'interprete agli strumenti elettronici sia meno importante, e che goda di gradi di libertà superiori. Ciò non è vero in quanto i compiti che deve svolgere sono altrettanto precisi e deterministici, a meno che l'improvvisazione non sia esplicitamente richiesta dal compositore. La difficoltà di notare la parte del live electronics deriva dal fatto che non esiste ancora una convenzione che consenta di tradurre i fatti tecnico-operativi in simboli grafici che esprimano il risultato acustico che si deve ottenere. Pertanto la maggior parte delle partiture di live electronics sono composte da una sezione tecnica iniziale in cui vengono disegnati gli schemi operativi degli algoritmi di sintesi o di trattamento dei suoni e dalla partitura vera e propria in cui convivono i pentagrammi tradizionali e le indicazioni per l'elettronica. Queste ultime in genere ricordano le antiche intavolature in quanto sono più legate alla azione tecnica da realizzarsi su alcuni dei parametri previsti dall'ambiente esecutivo che al risultato musicale desiderato.

***Ofanim* di Luciano Berio**

per voce, coro di bambini, orchestra e live electronics

Ofanim di Luciano Berio è un *work in progress* la cui prima esecuzione è avvenuta a Prato nel 1988 (Berio, 1988) ed è stata seguita da numerose repliche che corrispondono ad altrettante nuove versioni dell'opera. In alcuni casi le differenze fra due successive versioni sono minime in altri sono sostanziali. Per la nostra analisi prenderò come riferimento l'ultima esecuzione avvenuta alla Philharmonia di Berlino nel dicembre 1993 facendo riferimento, quando necessario, ad altre versioni. Il live electronics, che è curato dal Centro Tempo Reale di Firenze (Bernardini and Otto, 1989a), svolge tre funzioni principali: il movimento dei suoni nello spazio, le trasposizioni del coro e dell'orchestra, la elaborazione dei suoni dei solisti. L'ambiente esecutivo è abbastanza complesso in quanto è necessario captare via microfono il suono di tutti gli esecutori riducendo al minimo il rientro nei microfoni di suoni indesiderati ed effettuare mixaggi separati dei diversi gruppi (orchestra I, orchestra II, coro I, coro II, percussioni I, percussioni II, ecc.) sia per la spazializzazione che per le trasformazioni. Nella esecuzione di Berlino si è utilizzato un mixer principale di 40 in e 8 out, un mixer ausiliario 12 in 4 out e un mixer controllabile via MIDI 8 in 2 out; questi ultimi due per l'elaborazione dei suoni. Il movimento dei suoni nello spazio è realizzato da Minitrails (Bernardini and Otto, 1989b) una matrice di 8X8 VCA controllata da computer che consente il movimento di 8 linee indipendenti su 8 canali di amplificazione operando il bilanciamento dinamico fra i canali. La sequenza dei movimenti è memorizzata su una *playlist* le cui varie partenze vengono attivate manualmente seguendo gli attacchi del direttore. La taratura fine del livello di amplificazione delle diverse linee era controllato a distanza da Luciano Berio seduto a centro sala con un piccolo banco di 8 potenziometri.

Ofanim è suddiviso in 12 sezioni che si susseguono senza interruzioni. Le fasi più critiche per il live electronics sono proprio le transizioni da una sezione a una successiva. Per facilitare le commutazioni ed eventuali variazioni di livello si è scelto di utilizzare il programma MAX (Puckette, 1988; Opcode, Inc. 1990) che gestisce sequenze di messaggi MIDI attivati da controllo manuale.

La prima sezione è dominata dal duetto fra la voce di bambino e il clarinetto i quali sono soggetti a varie trasformazioni elettroniche: linee di ritardo con feedback, trasposizioni, filtraggi, e ibridizzazioni. La parte di ibridizzazione è stata oggetto di vari esperimenti e risulta interessante riassumere i risultati principali. Nelle intenzioni di Berio la voce del bambino deve poter diventare un clarinetto e viceversa il clarinetto si deve trasformare nella voce di bambino ed entrambi si devono trasformare in un trombone. L'interesse musicale, comunque, non risiede nella mimesi terminale quanto nelle varie situazioni sonore intermedie fra il punto di partenza a quello di arrivo. Inoltre va sottolineato il fatto che i due solisti cantano e suonano contemporaneamente e pertanto il suono ibrido deve essere molto più marcato del necessario per poter emergere dall'originale. Il sistema di trasformazione utilizzato per entrambi si basa sull'estrazione dell'altezza per mezzo di un *pitch detector* e sulla successiva generazione sintetica o manipolazione del suono originale. Le prime versioni si basavano sulla generazione dei suoni mediante campionatore sfruttando la dissolvenza incrociata fra campioni di voce e campioni di clarinetto. Successivamente con l'acquisizione da parte del Centro Tempo Reale della workstation Mars (Andrenacci, Favreau, Larosa, Prestigiaco, Rosati, and Sapor, 1992) si sono sperimentati diversi algoritmi.

Prendiamo ad esempio le trasformazioni della voce. Una prima soluzione completamente sintetica sfrutta la generazione dei suoni in modulazione di frequenza; la frequenza estratta dal *pitch detector* va a controllare la portante e la modulante (con rapporto 3:2) mentre i valori di ampiezza estratti da un *envelope follower* vengono utilizzati sia per il controllo d'ampiezza che per l'indice di modulazione. Assegnando a un controllore esterno un fattore moltiplicativo dell'indice si può passare da un suono sinusoidale a uno più ricco di armonici dispari. Un'altra soluzione adottata si basa sulla modulazione ad anello in cui la portante è sempre un generatore sinusoidale controllato dal *pitch*

detector mentre la modulante è il segnale stesso. Adottando un rapporto 1:2 si ha un prevalere di armoniche dispari che nel registro grave evoca i suoni di clarinetto. Una terza soluzione sfrutta la tecnica del *waveshaping*: la voce viene filtrata in modo da ottenere un suono sinusoidale che viene successivamente distorto con una appropriata funzione di distorsione.

Queste tre soluzioni, comunque affrontano la trasformazione solo da un punto di vista sonologico. Invece si è visto che per avvicinarsi alle caratteristiche del suono del clarinetto è necessario tenere conto anche degli aspetti esecutivi, come, ad esempio, eliminare tutti i glissandi di portamento tipici della voce e ottenere una transizione più rapida da una nota ad un'altra. Ciò si realizza inserendo un *sample and hold* che mantenga la nota attuale fino allo stabilizzarsi di quella successiva. Viceversa nel passaggio da clarinetto a voce è necessario realizzare il contrario introducendo i glissandi di portamento, ossia filtrando con un filtro passa basso avente una frequenza di taglio di pochi Hz l'uscita del *pitch detector* in modo da smussare le transizioni rapide.

Questi esperimenti hanno messo in luce come la riconoscibilità di una voce o di uno strumento non dipenda solo dallo spettro del suono e dai fattori microtemporali che ne definiscono i tratti sonologici ma soprattutto dalla gestualità e dalla agogica della esecuzione. Inoltre anche la scrittura musicale è molto legata alla tecnica dello strumento; pertanto le frasi scritte per un clarinetto saranno morfologicamente diverse da quelle scritte per una voce. Nella trasformazione da voce a clarinetto, sempre per restare nel nostro esempio, ciò che si può ottenere in tempo reale è la trasformazione sul piano sonologico ma sono ancora molto deboli gli strumenti per poter elaborare i tratti agogico-esecutivi.

Prometeo di Luigi Nono

per soli, coro, orchestra e live electronics

La prima esecuzione di *Prometeo* risale alla Biennale di Venezia del 25 settembre 1984 (Nono, 1984; Cacciari, 1984). Lo spazio d'ascolto prescelto fu molto particolare e degno di nota per le implicazioni sul piano compositivo dell'opera. Innanzitutto non si tratta di una tradizionale sala da concerto ma di una chiesa sconsecrata e completamente vuota di Venezia: la chiesa di San Lorenzo. Questa fu trasformata dall'architetto Renzo Piano in un congeniale spazio musicale costruendo al suo interno una struttura lignea sospesa (che d'ora in poi sarà chiamata semplicemente struttura), che ricorda per dimensioni lo scafo di una nave ma che sarebbe più appropriato paragonarla, per la sua funzione, alla cassa armonica di uno strumento musicale. Essa fu destinata a contenere sia il pubblico, seduto sul fondo della struttura, che gli esecutori, disposti a varie altezze su tre piani di balconate (Simonelli, 1985).

Il tema della musica nello spazio, molto caro a Luigi Nono e di lontane radici nella cultura veneziana (basta citare i cori battenti nelle musiche del '500 dei Gabrieli), trova in San Lorenzo e nella Struttura di Piano un felice momento di sperimentazione. In *Prometeo*, infatti, troviamo l'interazione fra la composizione spaziale dei suoni acustici dell'orchestra (suddivisa in quattro gruppi posti asimmetricamente ai quattro angoli della struttura e a diverse altezze) e la diffusione elettroacustica multicanale dei suoni prodotti dalle voci e dai solisti che vengono manipolati e moltiplicati elettronicamente dal vivo con varie tecniche (Haller, 1985). Grazie alla struttura e al sistema elettroacustico di diffusione, Nono poté organizzare i suoni nello spazio mediante la contrapposizione di diverse dimensioni: acustico / elettroacustico, interno / esterno, orizzontale / verticale, statico / dinamico, lontano / vicino. Inoltre le voci e i solisti, grazie al trattamento del live electronics, assumono una ricchezza fonica tale da contrastare quella dell'orchestra.

Il sistema del live electronics utilizzato è dello Experimental Studio Heinrich Strobel Stiftung SWF, Freiburg BRSG, Germania ed è completamente gestito da controlli remoti e da commutazioni automatiche dei collegamenti tramite una matrice attiva 48X48 pilotabile da computer. Le principali elaborazioni dei suoni usate da Nono sono il *delay* con feedback; la trasposizione in altezza; il filtraggio con banchi di filtri molto stretti (di seconda e di quinta); il vocoder a 48 filtri; la variazione

automatica di ampiezza secondo l'inviluppo estratto da una voce o da uno strumento; il movimento dei suoni nello spazio con variazione automatica o manuale dell'ampiezza su 12 canali indipendenti. Un passo molto affascinante di *Prometeo* è la sezione dedicata a Hölderlin per due soprani, flauto basso, clarinetto contrabbasso, voci recitanti e live electronics. Tale sezione è dominata dal canto dei due soprani che attraverso due linee indipendenti di ritardo con accumulazione, rispettivamente di 4 e 8 s, si trasformano progressivamente in un coro virtuale, ipnotico e ossessivo. La tessitura vibrante e densa delle voci si contrappone ai suoni ricchi di soffi e di inarmonicità dei due fiati che subiscono un processo di ibridazione attraverso il vocoder: il suono del clarinetto contrabbasso viene analizzato dal banco di filtri di analisi per ottenere l'impronta spettrale su cui plasmare il suono-rumore del flauto attraverso i filtri di sintesi. In Hölderlin, la relazione lineare che normalmente lega i filtri di analisi del vocoder a quelli di sintesi è stata da Nono ribaltata, associando i filtri gravi a quelli acuti e viceversa. In questo modo le sonorità gravi del clarinetto contrabbasso vanno ad aprire i filtri corrispondenti ai suoni del registro acuto del flauto. Infine le voci recitanti sono solo amplificate. Un altro passo interessante per la nostra analisi è l'Isola I in cui ai suoni acustici dell'orchestra ed elettroacustici dei solisti vengono aggiunti anche dei suoni sintetici generati in tempo reale dal Sistema 4i (Di Giugno, 1984; Sapir, 1984; Azzolini, and Sapir, 1984) del CSC dell'Università di Padova (Debiasi, De Poli, Tisato, and Vidolin, 1984). L'ambiente esecutivo per la sezione sintetica doveva garantire un'ampia libertà in quanto l'interprete doveva improvvisare sonorità vocali e corali interagendo con la parte degli archi solisti (Sapir and Vidolin, 1985). A tale scopo si è sviluppato un ambiente di sintesi granulare composto da 24 voci in modulazione di frequenza. I grani sono molto lunghi, hanno un inviluppo trapezoidale con i transitori di 200 ms e una durata di tenuta variabile aleatoriamente fra 0.5 e 1s; i parametri del grano vengono aggiornati all'inizio di ogni nuovo inviluppo. Mediante 6 potenziometri si controllano i vari parametri. Per rendere più sicura l'esecuzione, si è preferito limitare il campo di variazione di alcuni potenziometri ad un preciso intervallo ed aggiungere dei controlli predefiniti, selezionabili mediante tasti di funzione della tastiera del computer di controllo (Digital PDP 11/34). Un esempio di configurazione dei campi di escursione dei potenziometri è il seguente: densità polifonica (0÷24 voci), ampiezza globale (0÷90 dB), frequenza base per il calcolo delle portanti (116.5÷232 Hz), fattore moltiplicativo della portante per il calcolo della modulante (0.5÷2), l'ampiezza della modulante (0÷500 Hz) e la percentuale di deviazione aleatoria dei vari grani rispetto la frequenza base per ottenere microintervalli (0÷0.08). Con i tasti di funzione, invece, è possibile effettuare delle trasposizioni e assegnare a gruppi di voci delle strutture armoniche. Un gruppo di strutture utilizzato è il seguente: tonica; tonica e seconda minore; tonica e tritono; tonica e quinta; tonica e seconda minore discendente; tonica e quarta discendente; tonica e ottava; tonica, quinta e ottava; sette ottave. Mediante questo ambiente, quindi, è possibile passare da una dolce corallità all'unisono di soli suoni sinusoidali con piccole deviazioni di frequenza, a vocalità più pronunciate trasponendo la portante di un'ottava e dosando leggere pennellate di indice di modulazione; il coro all'unisono può evolversi secondo le strutture armoniche predefinite e selezionabili mediante i tasti funzione per diventare completamente inarmonico spostando la modulante in un rapporto irrazionale rispetto la portante. Nella versione di *Prometeo* eseguita a Venezia nel 1984, Nono ha voluto iniziare evocando l'accordo che apre la prima Sinfonia di Mahler ed è stato proprio il Sistema 4i ad intonare il Sib 116.5 Hz, diffuso dagli altoparlanti posti sotto il fondo della struttura, ad espanderlo lentamente su sette ottave ed a trasformarlo infine in un velato suono di coro lontano.

***Perseo e Andromeda* di Salvatore Sciarrino**

per soprano, mezzosoprano, due baritoni e suoni di sintesi

Perseo e Andromeda di Salvatore Sciarrino sarebbe un'opera lirica del tutto tradizionale se l'orchestra non fosse completamente sintetica e suonata dal vivo da due soli esecutori. I suoni di sintesi comunque non sono un'imitazione di quelli acustici tradizionali anzi sono tutt'altro che

orchestrali; hanno come obiettivo il gioco musicale astratto o diventano evocativi delle sonorità che costituiscono il paesaggio sonoro dell'isola di Andromeda: il vento, il mare, i gabbiani, l'orizzonte, i ciottoli, le gocce d'acqua, ecc.

Tutti i suoni nascono da un unico algoritmo di sintesi che nella forma più elementare è costituito da un rumore bianco filtrato con un filtro passa basso risonante del secondo ordine. Pertanto i parametri di tale algoritmo sono l'ampiezza, la frequenza di taglio e il fattore di risonanza del filtro che possono essere variati con opportune funzioni del tempo.

Sciarrino ha scritto in notazione tradizionale tutta la partitura aggiungendo, per le parti sintetiche, la descrizione quantitativa della risonanza del filtro e i grafici stilizzati per gli andamenti dinamici dei tre parametri (Sciarrino, 1990).

La prima rappresentazione di quest'opera avvenne il 29 gennaio 1990 allo Staatstheater di Stuttgart, Germania e successivamente venne ripresa, con un nuovo allestimento scenico dal Festival di Gibellina (luglio 1991) e dal Teatro Alla Scala di Milano (aprile 1992).

Per quanto riguarda l'esecuzione, se fosse stato possibile utilizzare un nastro magnetico con la registrazione integrale delle parti sintetiche su cui le voci avrebbero cantato dal vivo, l'ambiente esecutivo di quest'opera sarebbe stato decisamente semplice. Ma una soluzione di questo tipo avrebbe provocato una rigidità esecutiva inaccettabile per i condizionamenti negativi, anche sul piano psicologico, dei vari cantanti che si sarebbero sentiti imbrigliati nella maglia temporale del nastro e avrebbero perso la naturalezza del canto richiesta dalla partitura. Inoltre, anche per la parte scenica ci sarebbero state analoghe difficoltà in quanto nell'opera ci sono diverse parti musicali libere la cui durata non è fissabile a priori.

I suoni di sintesi, d'altra parte, non potevano essere suonati completamente dal vivo da più esecutori di tastiere commerciali per vari motivi: la inesistenza di sintetizzatori commerciali in grado di generare le sonorità sperimentate in laboratorio, la quantità di parti reali simultanee (che spesso supera le dieci), la difficoltà esecutiva di alcuni passi musicali, l'aumento dei costi di produzione dovuto all'elevato numero di esecutori e alla necessità di un elevato numero di prove. Inoltre non sarebbe stato assicurato un migliore risultato sul piano musicale.

Fra le varie soluzioni studiate è stato scelto un *ambiente esecutivo* che consentisse sia la libertà temporale che la precisione esecutiva delle partiture eseguite con i sistemi informatici in tempo differito. Il sistema adottato è costituito da un processore *general purpose* in tempo reale, Sistema 4i (successivamente sostituito con MARS), suonato mediante controlli gestuali e da due personal computer (W1 e W2) dotati di schede audio di buona qualità in grado di suonare mediante *playlist* sequenze indipendenti di *files* sonori pre-calcolati e attivati da tasti funzione della normale tastiera del computer (Vidolin, 1991). Il sistema è stato sviluppato presso il CSC dell'Università di Padova. La tecnica di esecuzione che ne scaturisce non è poi molto lontana da quella tradizionale.

Infatti, nella esecuzione orchestrale classica il direttore fissa la scansione temporale e dà gli attacchi a singoli o gruppi di strumentisti i quali, una volta partiti suonano un segmento della loro parte in maniera "automatica" fino al prossimo punto d'incontro. Pertanto si può pensare una partitura tradizionale come un insieme di segmenti in successione che vengono attivati al momento opportuno (mediante il gesto d' attacco) e poi si sviluppano in evoluzione libera seguendo il tempo generale dell'esecuzione.

Anche nel nostro caso c'è un direttore che dà gli attacchi ai cantanti sulla scena e agli esecutori al computer in corrispondenza di particolari punti chiave. Pertanto la partitura di Sciarrino è stata sezionata in vari segmenti affidando al processore in tempo reale quelli di durata non prevedibile e agli altri due computer i restanti. La lunghezza temporale di ciascuno di essi dipende dalla musica stessa, ovvero dalla possibilità e nello stesso tempo dalla necessità di segmentazioni sempre più minute in relazione alla parte dei cantanti: se necessario si può scendere a una segmentazione a livello di singolo evento sonoro.

L'ambiente esecutivo prevede anche il movimento nello spazio dei suoni di sintesi. La maggior parte dei suoni dell'isola, nell'idea di Sciarrino, sono oggetti sonori che passano sopra la testa degli

ascoltatori partendo da un orizzonte frontale lontano per sparire alle loro spalle. In altri casi i suoni devono avvolgere completamente l'ascoltatore dando l'impressione che arrivino da tutte le parti. Tutti i movimenti dei suoni sono segnati in partitura e la loro complessità non consente una esecuzione manuale. Pertanto viene utilizzato un quarto computer per automatizzare i movimenti nello spazio ovvero per generare i segnali di controllo per un banco di potenziometri controllabili via MIDI. Anche per lo spazio si è scelta una filosofia esecutiva simile a quella dei suoni di sintesi. Si è stesa una partitura dei movimenti che è stata tradotta e memorizzata su computer sezionandola in segmenti. Durante l'esecuzione vengono attivati i segmenti di spazio corrispondenti ai segmenti di suono.

Conclusioni

Come emerge da questi tre esempi, un'opera musicale è un lavoro complesso che coinvolge diverse tradizioni musicali e/o teatrali. La pratica musicale del *live electronics* è ancora molto giovane e richiede da parte di tutti un atteggiamento flessibile per ottenere dei validi risultati sul piano artistico. In genere i direttori d'orchestra sono attenti a ciò che suonano i propri strumentisti senza preoccuparsi del risultato globale con l'elettronica. Pertanto è compito della regia del suono curare il giusto equilibrio fra i suoni acustici e quelli elettroacustici e tale equilibrio si può trovare solo attraverso un adeguato numero di prove, che va programmato in numero superiore a quello che normalmente si dedica alle esecuzioni di musiche di repertorio.

Questi esempi hanno messo in luce anche le caratteristiche dell'interprete agli strumenti musicali elettronici. La sua attività prevalente riguarda la progettazione degli ambienti esecutivi per l'esecuzione in concerto di musiche di *live electronics*. Questo richiede, oltre le tradizionali competenze musicali, una buona conoscenza delle tecniche del *signal processing*, un continuo aggiornamento sui dispositivi *hardware* e sui pacchetti *software* esistenti in commercio, la capacità di assemblare i vari dispositivi e di ottimizzare l'ambiente esecutivo creando un'interfaccia musicale immediata e potente.

Nel corso di questo secolo sono state composte molte opere per strumenti elettronici e buona parte di queste non vengono più eseguite per la difficoltà di ricreare l'ambiente esecutivo a causa della obsolescenza dei mezzi o della inadeguatezza della partitura lasciata dal compositore. E' compito dell'interprete mantenere in vita il patrimonio musicale eseguendolo e facendolo conoscere al grande pubblico. Oggi che esistono sistemi digitali in grado di simulare qualsiasi strumento del passato diventa possibile dare vita a molti dei lavori elettronici scomparsi con la fine di uno strumento o con la morte del rispettivo compositore. Pertanto è auspicabile che i nuovi interpreti si facciano carico anche del ruolo di trascrittori di ambienti esecutivi sia per conservare le musiche del passato ma anche per garantire la sopravvivenza di quelle d'oggi, dato che in pochi anni anch'esse diventeranno "obsolete".

Bibliografia

- Andrenacci, P., E. Favreau, N. Larosa, A. Prestigiacomo, C. Rosati, and S. Sapis. 1992. "MARS: RT20M/EDIT20 - Development Tools and Graphical User Interface for a Sound Generation Board." *Proceedings of the 1992 International Computer Music Conference*. San Francisco: Computer Music Association, pp. 344-347.
- Azzolini, F. and S. Sapis. 1984. "Score and/or Gesture - The System RTI4i for Real Time Control of the Digital Processor 4i." *Proceedings of the 1984 International Computer Music Conference*. San Francisco: Computer Music Association, pp. 25-34.
- Berio, L. 1988. *Ofanim*. Score. Vienna: Universal.
- Bernardini N., and P. Otto 1989a. "Il Centro Tempo Reale: uno Studio Report." In Casti F. and Doro A., Eds. *Atti dell' VIII Colloquio di Informatica Musicale*. Cagliari: Spaziomusica, pp.111-116.
- Bernardini, N., and P. Otto 1989b. "TRAILS: An Interactive System for sound location." *Proceedings of the 1989 International Computer Music Conference*. San Francisco: Computer Music Association.
- Bertini, G., and P. Carosi. 1991. "The Light Baton: a System for Conducting Computer Music Performance." *Proceedings of the International Workshop on Man-Machine Interaction in Live Performance*. Pisa: CNUCE/CNR, pp. 9-18.
- Cacciari, M., ed. 1984. *Verso Prometeo. Luigi Nono*. Venezia: La Biennale.
- Cadoz, C., A. Luciani, and J.L. Florens. 1984. "Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms: The Cordis System." *Computer Music Journal* 8(3): 60-73. Reprinted in C. Roads, ed. 1989. *The Music Machine*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, pp.495-508.
- Cadoz, C., L. Lisowski, and J.L. Florens. 1990. "A Modular Feedback Keyboard Design." *Computer Music Journal* 14(2): 47-51.
- Chabot, X. 1990. "Gesture Interfaces and Software Toolkit for Performance with Electronics." *Computer Music Journal* 14(2): 15-27.
- Davies, H. 1984. "Electronic instruments." In *The New Grove Dictionary of Musical Instruments*. London: Macmillan.
- Debiasi, G.B., De Poli G., Tisato G., and Vidolin A. 1984. "Center of Computational Sonology (CSC) Padova University ." *Proceedings of the 1984 International Computer Music Conference*. San Francisco: Computer Music Association, pp. 287-297.
- De Poli, G., A. Piccialli, and C. Roads, eds.1991. *Representation of Musical Signals*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Di Giugno, G. 1984. "Il Processore 4i." In *Bollettino LIMB* 4. Venezia: La Biennale, pp.25-27.
- Doati, R., and Vidolin A., eds. 1986. "Lavorando con Marino Zuccheri." *Nuova Atlantide. Il Continente della Musica Elettronica*. Venezia: La Biennale.
- Genovese, V., M. Cocco, D.M. De Micheli, and G.C. Buttazzo. 1991. "Infrared-Based MIDI Event Generator." *Proceedings of the International Workshop on Man-Machine Interaction in Live Performance*. Pisa: CNUCE/CNR, pp. 1-8.
- Haller, H.P. 1985. "Prometeo e il trattamento elettronico del suono." *Bollettino LIMB* 5. Venezia: La Biennale, pp.21-24.
- Mathews, M.V. 1969. *The Technology of Computer Music*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Mathews, M.V., and C. Abbott. 1980. "The Sequential Drum." *Computer Music Journal* 4(4): 45-59.
- Mathews, M.V., and J.R. Pierce, ed. 1989. *Current Direction in Computer Music Research*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Moore, F. R. 1990. *Elements of Computer Music*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall
- Nono, L. 1984. *Prometeo. Tragedia dell'Ascolto*. Score. Milano: Ricordi.
- Opcode, Inc. 1990. *Max Documentation*. Palo Alto, California: Opcode, Inc.
- Puckette M. 1988. "The Pacher." In C. Lischka and J. Fritsch, eds. *Proceedings of the 1988 International Computer Music Conference*. San Francisco: Computer Music Association, pp. 420-425.

- Rubine, D., and P. McAviney. 1990. "Programmable Finger-tracking Instrument Controllers." *Computer Music Journal* 14(1): 26-41.
- Roads, C. and J. Strawn, eds. 1985. *Foundations of computer music*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Roads, C., ed. 1989. *The music machine*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Sapir, S. 1984. "Il Sistema 4i." In *Bollettino LIMB* 4. Venezia: La Biennale, pp.15-24.
- Sapir, S., and A. Vidolin 1985. "Interazioni fra tempo e gesto. Note tecniche alla realizzazione informatica di Prometeo." In *Bollettino LIMB* 5. Venezia: La Biennale, pp.25-33.
- Sciarrino, S. 1990. *Perseo e Andromeda*. Score. Milano: Ricordi.
- Simonelli, G. 1985. "La Grande Nave Ligna." In *Bollettino LIMB* 5. Venezia: La Biennale, pp.15-19.
- Strawn, J., ed. 1985. *Digital Audio Signal Processing: An Antology*. Madison: A-R Editions.
- Vidolin, A. 1991. "I suoni di sintesi di Perseo e Andromeda." In R. Doati ed. *Orestiadi di Gibellina 1991*. Milano: Ricordi.
- Vidolin, A. 1993. "Problematiche e prospettive dell'esecuzione musicale con il mezzo elettronico." In R. Favaro ed. *Suono e Cultura. CERM-Materiali di ricerca 1990-92*. Quaderni M/R 31. Modena: Mucchi.
- Waiwysz, M. 1985. "THE HANDS, a Set of Remote MIDI-Controllers." *Proceedings of the 1985 International Computer Music Conference*. San Francisco: Computer Music Association, pp. 313-318.
- Wasserman, A., ed. 1985. "Computer music." *Computing Surveys* 17 (2). New York : ACM.