

LA RICERCA DI INFORMATICA MUSICALE
IN ITALIA

Giovanni de Poli
Università di Padova^(*)

(*) Estratto da "Musica e Elaborazione" a cura di A. Vidolin LIMB (Laboratorio permanente per l'Informatica Musicale della Biennale di Venezia).

L'informatica musicale in Italia comincia le sue prime esperienze alla fine degli anni sessanta. Essa nasce stimolata dal progresso tecnologico, dall'incontro di due mondi, la musica e l'informatica.

Va subito detto che lo sviluppo e la diffusione dei nuovi ritrovati tecnologici in Italia avviene per una serie di motivi di ordine economico e culturale, con un certo ritardo rispetto ad altri paesi più avanzati in questo piano. Ad esempio a quell'epoca gli elaboratori sono relativamente pochi e inaccessibili.

Inoltre la tradizione umanistica a livello generale, impedisce alla gente comune di avere una chiara percezione delle reali possibilità degli elaboratori. Dai mezzi di comunicazione di massa venivano chiamati spesso "cervelloni" e purtroppo lo sono chiamati talvolta tuttora. Si sono prodotte così delle false idee sulle possibilità di questi mezzi e si sono create delle false aspettative e soprattutto dei falsi timori.

Si crede, o si fa credere, che essi possono sostituire l'uomo nelle attività intellettuali; mentre invece lo possono sostituire nello svolgimento di compiti soprattutto esecutivi e ripetitivi, a prezzo però di un intenso sforzo intellettuale umano nella programmazione della macchina.

Una volta preparato un programma, si può ottenere il risultato con relativa facilità e questo fa spesso dimenticare il lavoro umano che vi sta dietro.

Sembra che l'elaboratore possa prendere decisioni, ma ci si dimentica che in realtà esso può operare solo nel quadro di quello che è stato previsto da chi lo ha programmato. E che quindi le decisioni sono state fatte a priori prima di scrivere il programma.

Da un punto di vista storico si osserva che il calcolatore, come indica il suo nome, è stato sviluppato inizialmente per fare dei calcoli. Solo in un secondo tempo ci si è accorti che esso, in questo modo, agisce elaborando informazioni, che non sono necessariamente numeriche. Questo si riflette sul nome "elaborazione", che meglio indica le reali possibilità della macchina. Tale nome, pur essendo quello più usato nell'ambito scientifico, non ha ancora se

stituito il termine "calcolatore" nell'uso comune.

In quell'epoca gli elaboratori venivano usati in Italia principalmente nelle banche, e per la gestione delle paghe e dei bilanci. Le informazioni che trattavano erano essenzialmente monetarie. Venivano anche usati nella ricerca scientifica per eseguire calcoli di vario tipo; ma la gente comune li vedeva impiegati principalmente nel campo economico. L'uso dell'elaboratore per ottenere prodotti estetici e tipici della creatività umana, poteva migliorare di molto l'immagine pubblica di tale macchina. Le ditte produttrici aiutarono gli inizi delle ricerche sulla computer music con questo intento. Maggiore supporto venne poi dato da Università e CNR pur nella tradizionale scarsità di persone ed attrezzature, dedicate alla ricerca in Italia.

Anche i ricercatori, d'altra parte, hanno sentito l'esigenza di "umanizzare" il proprio lavoro e la tecnologia moderna. Spesso utenti e programmatori di loro iniziativa avevano cercato, lateralmente al proprio lavoro, mediante un uso non convenzionale di ottenere qualcosa che non fosse solo numeri; ad esempio cioè giochi, disegni e appunto suoni. Quella di produrre suoni, e quindi musica era, pur con questa premessa, un'esigenza avvertita nell'ambito dell'informatica. Il punto era di passare dal dilettantismo dopolavoristico ad un autentico impegno di ricerca.

Nell'ambito musicale l'esigenza di usare l'elaboratore nasce dalla musica elettronica.

In Italia la musica elettronica ha essenzialmente due stagioni. La prima negli anni cinquanta, è caratterizzata dal centro di Fonologia musicale della Rai di Milano e dai compositori che vi operavano.

La seconda, negli anni sessanta, ha luogo in piccoli studi privati dove, in accordo con le aspirazioni delle avanguardie artistiche dell'epoca, si porta avanti un paziente lavoro di sperimentazione più o meno sistematica, sulle possibilità sonore degli strumenti elettronici, ripartendo virtualmente da zero rispetto alle esperienze precedenti e cercando di porre le basi di un nuovo linguaggio musicale.

Si proclama che questa musica, o meglio questi suoni, avrebbero sostituito completamente la musica precedente. Si proclama la superiorità del mezzo elettronico su quello acustico, come più rispondente alla mutata situazione tecnica e sociale. Nell'epoca in cui la maggior parte della musica ascoltata viene riprodotta elettricamente da dischi, radio, registratori, si afferma l'importanza, e la superiorità della musica anche prodotta elettricamente, senza cioè nessuna sorgente acustica. È questo nuovo modo di ascolto che avrebbe imposto la musica elettronica.

La fiducia riposta nelle realizzazioni tecnologiche e nelle conoscenze per applicarle era eccessiva rispetto alla situazione reale e alle forze dei singoli gruppi. Smorzati gli entusiasmi iniziali, una parte di essi cessa ogni attività in questo settore, altri rinunciano alla ricerca sistematica per privilegiare la sperimentazione nel campo dell'improvvisazione e dell'esecuzione dal vivo con sintetizzatori ridando al mezzo elettronico il ruolo di strumento tradizionale ed adattando moduli linguistici più consolidati. Chi continua nella musica elettronica, però, vuole superare le limitazioni trovate nella realizzazione delle proprie aspirazioni, ed intravede nell'elaboratore e nell'informatica una soluzione ai propri problemi. Nel frattempo alcuni musicisti ottengono l'inserimento nei Conservatori, con possibilità quindi di sopravvivenza economica e autonomia didattica, ma restando spesso separati dal resto dell'attività musicale. I corsi di musica elettronica così istituiti erano visti da parte delle autorità come una bandiera da agitare al momento opportuno per avere una patente di modernità, e da riporre poi ed ignorare completamente. Per una serie di ragioni era ed è un'attività più sopportata che sostenuta e, salvo rare eccezioni, con scarsa influenza nella generalità dei musicisti (maestri e allievi). Fine inevitabile, viste le premesse e i rapporti di forza.

Se quindi alcuni Conservatori accettano al loro interno corsi di musica elettronica, da parte di altre istituzioni musicali non ci si rende conto dell'importanza innovativa di questo nuovo modo di far musica. Non si è disposti ad investire una parte delle proprie risorse in questo settore. Pesa forse la delusione dei compositori che vi si erano avvicinati negli anni cinquanta, provenendo da altre esperienze. Essi infatti dopo essersi cimentati

con entusiasmo, ma forse senza un'adeguata preparazione, ottenuti dei primi risultati rimarchevoli, di fronte all'impegno richiesto per proseguire in quella strada e alla grande quantità di lavoro, anche manuale, richiesta, preferiscono abbandonare questo settore e rivolgersi ad altre esperienze con sensazioni di frustrazione. Grandi speranze ed entusiasmi non si erano potuti realizzare. Più che rinnovare il loro linguaggio in modo da sfruttare adeguatamente questa possibilità, essi fanno tesoro di queste esperienze portando alcune sue peculiarità, forse esteriori, nell'uso di strumenti tradizionali.

Se si unisce questa delusione degli innovatori, con la resistenza ai cambiamenti dei tradizionalisti, si ha un quadro della situazione musicale italiana in cui si era dovuto operare.

I centri di ricerca. -

Fatto un quadro della situazione in cui si è inserita l'informatica musicale, possiamo ora ad esaminare l'attività nei vari centri.

Pisa - La sezione musicologia del CNUCE-CNR nasce essenzialmente per opera di Pietro Grossi nel 1969. Insegnante di violoncello e di musica elettronica al Conservatorio di Firenze, dopo alcune prime esperienze presso il Centro di Studi e Ricerche dell'allora Olivetti-General Electric di Pregnana Milanese, ottiene esperti, strumentazione e tempo macchina dal CNUCE e dal Centro Scientifico IBM per avviare un'attività in questo settore. I principi ispiratori fin dall'inizio sono il lavoro interattivo e l'autonomia integrale dei processi.

Va fatta una premessa.

Con un segnale numerico (composto cioè da una sequenza abbastanza fitta di numero) si può rappresentare qualsiasi suono, qualsiasi sequenza di suoni e quindi tutte le possibili musiche.

Per ogni musica si deve produrre la sequenza di numeri che la rappresenta. Bisogna quindi specificare con mezzi opportuni all'elaborazione come calcolare i numeri. Normalmente viene fornita in modo diverso la descrizione

del procedimento per produrre il suono (strumento), dai parametri del procedimento (note).

Le note possono essere fornite una per una mediante un opportuno ingresso, come ad esempio una tastiera, oppure con un opportuno linguaggio. Altra via è invece di individuare e fornire un procedimento, che produce le note agendo a livello compositivo. Questo procedimento può essere guidato dall'uomo o interamente automatico, cioè predeterminato al momento della stesura del programma.

I sistemi sviluppati da Grossi consentono entrambi i modi di operare, anche se egli preferisce l'automatismo integrale. Sua esigenza fondamentale è l'interazione, cioè brevissimo tempo d'attesa tra introduzione di un comando e ascolto del risultato. A questo obiettivo sacrifica anche la qualità sonora, in attesa che la tecnologia consenta di superare questo problema.

A Pisa vengono sviluppati essenzialmente tre sistemi (DCMP, PLAY 1800, TAUMUS-TAU2), tutti rispondenti alle stesse esigenze, pur con differenti possibilità operative e sonore.

Viene dapprima realizzato, da Chignoli, Sommi, Grossi, Paoli e Milani, il programma DCMP su IBM 7090 e IBM 360. Per l'uscita del suono viene prelevato un bit da un registro, ottenendo una sequenza monofonica di forma d'onda rettangolare senza controllo di ampiezza. Poi viene realizzato da Grossi e Farese il programma PLAY 1800 su IBM 1800, che, essendo dotato di convertitori, consente un controllo dell'ampiezza e del timbro. Viene poi costruito, da un'equipe dell'Istituto di Elaborazione delle Informazioni di Pisa diretta dal prof. Denoth, un terminale audio chiamato TAU2. Ad esso è associato il programma di gestione TAUMUS, opera principalmente di Grossi. Il TAU2 è un terminale analogico che riceve i comandi via canale dall'elaboratore e può eseguire fino a dodici voci contemporanee. Ciascun suono è composto da sette armoniche ad ampiezza fissa. Per ottenere suoni con spettro variabile nel tempo si ricorre a successioni rapide di suoni con spettro diverso.

Illustrata la differenza tra i suoni producibili dai tre sistemi, esa-

miniamo come vengono specificati i suoni da produrre. Da questo punto di vista i programmi hanno sostanzialmente le stesse possibilità in quanto rispondenti alle stesse esigenze. Esiste un linguaggio per introdurre partiture ed è stato creato un notevole archivio di trascrizioni di brani musicali classici. Queste partiture possono essere eseguite automaticamente. Un'altra esigenza è la rielaborazione di partiture, modificando nella maniera più varia i parametri delle note. E' possibile quindi scomporre o ricomporre nelle forme più svariate un brano. Per questa rielaborazione viene usata efficacemente l'interattività, che consente di udire subito l'effetto della operazione effettuata.

Accanto a queste possibilità, che chiamiamo deterministiche, esistono altre che sfruttano a fondo l'elemento casualità. Le note vengono generate una per una in base ad un processo aleatorio inserito nel programma o mediante rielaborazioni aleatorie di un testo preesistente. Possono essere distinti due tipi di programmi: quelli in cui l'utente può intervenire allo scopo di orientare il processo compositivo, mediante una serie di opzioni (ad es. ALGOR-DCMP), e quelli in cui il procedimento compositivo è completamente automatico (ad es. CREATE-DCMP).

E' probabilmente quest'ultima la parte più significativa del lavoro di Grossi, anche se quella più discussa. Egli ha realizzato con il comando CREATE-DCMP un'opera musicale, descritta dal suo programma, che può durare un tempo virtualmente infinito senza ripetersi e con possibili infinite variazioni a seconda del genere del processo aleatorio. All'ascoltatore è consentito di decidere quale parte ascoltare e di intervenire con scelte libere, ma inconsapevoli.

Oltre allo sviluppo di questi sistemi l'attività di ricerca si rivolge principalmente allo studio di possibili formulazioni di algoritmi compositivi probabilistici. Sono stati realizzati dai fratelli Tarabella programmi di rielaborazione di testi con le catene di Markov e da Bonussi programmi per l'applicazione del calcolo combinatorio. Bolognesi sta studiando le possibili applicazioni compositive di alcuni processi e principalmente il "rumore 1/f" e il "volto di Lévy". Questi procedimenti presentano la proprietà, che si è rivelata musicalmente significativa, della autosimili-

tudine. Una figura geometrica è detta autosimile quando è scomponibile in parti, simili all'intera figura. L'autosimilitudine vale anche in senso statistico ed è un caso particolare di struttura gerarchica. E' per questa ragione che essa sembra poter offrire molti spunti alle applicazioni di composizione stocastica. Va inoltre segnalato il progetto SINFORM portato avanti da Farese per la gestione automatica dei documenti delle biblioteche musicali e il progetto PRIMULA di Tarabella per un linguaggio interattivo di programmazione musicale per microelaboratori.

Dopo alcuni anni di funzionamento del sistema TAU2-TAUMUS, viene ora avvertita l'esistenza dello sviluppo di un nuovo sistema che tenga conto dei processi dell'elettronica digitale. Esso è in corso di realizzazione all'IROE (Istituto Ricerche Onde Elettromagnetiche) CNR di Firenze e si basa su un sintetizzatore di suoni programmabile interamente digitale pilotato da un minielaboratore.

Padova - L'attività a Padova, che attualmente si svolge presso il CSC (Centro di Sonologia Computazionale) dell'Università, ha inizio nel 1972 presso la facoltà di ingegneria come espansione degli interessi di un gruppo di ricerca sulla sintesi della voce diretto dal prof. Debiasi.

Fin dall'inizio si pone particolare attenzione all'aspetto acustico, cioè alla possibilità di generare qualsiasi tipo di sonorità, rinunciando eventualmente all'interattività. Si vuole inoltre consentire al musicista di poter ottenere esattamente quello che vuole, senza delegare ad altri possibili scelte. Il musicista deve quindi avere a disposizione degli opportuni linguaggi per poter specificare correttamente ed in modo agevole le sue volontà.

Come si vede, le esigenze iniziali e i presupposti sono all'opposto e complementari a quelli di Pisa. Mentre a Pisa si punta all'interazione ed all'automatismo, a Padova si punta alla qualità sonora ed al determinismo.

Va fatta una premessa sui linguaggi per specificare all'elaboratore come e quale musica produrre.

L'informazione musicale può essere rappresentata a vari livelli di astrazione

zione, che costituiscono vari tipi di partiture. Definiamo come partitura operativa l'insieme delle informazioni necessarie alla sintesi, costituite dai parametri acustici del suono e dai parametri per il funzionamento dello strumento.

Comporre a livello di partitura operativa può essere scomodo per il musicista, poiché gli aspetti più meccanici del funzionamento dello strumento non sono determinati direttamente dall'idea musicale.

Spesso il compositore specifica solo alcuni parametri acustici mediante una partitura simbolica, in genere grafica, i cui simboli definiscono le principali caratteristiche degli eventi musicali.

E' possibile infine concepire una partitura strutturale, che non solo rappresenta l'organizzazione e le relazioni fra gli eventi musicali, ma contiene anche le regole compositive.

Il sistema sviluppato a Padova è costituito in modo da permettere al compositore di operare a ciascuno di questi tre livelli di definizione della partitura in stretto collegamento fra loro.

Il linguaggio con cui vengono espresse le informazioni a ciascun livello è organizzato in modo tale che sia possibile far coesistere informazioni di livelli differenti, nonché integrare in un'unità funzionale le informazioni a livelli superiori con quelle a livelli inferiori.

In questo modo si sfruttano i vantaggi della rappresentazione a livelli superiori senza sacrificare la possibilità di determinare con precisione i dettagli operativi.

Il sistema inizialmente batch, poi funzionante in time-sharing, è composto da un insieme coordinato di programmi e linguaggi per la sintesi, la trascrizione di testi musicali e l'aiuto alla composizione.

Per la sintesi in tempo differito sono usati i noti programmi MUSICA V, MUSIC 360 e MUSIC 4 BF. Questi programmi consentono di descrivere qualsiasi strumento (tecnica di sintesi) mediante moduli interagenti. Essi sono molto complessi, esigendo perciò che tutto sia definito all'inizio.

Per ovviare a questo fatto e per rendere agevole l'approccio alla computer

music è stato sviluppato da Tisato il sistema interattivo ICMS. Esso consente la definizione e il controllo dei parametri operativi in modo interattivo, con l'ascolto immediato del suono; consente il messaggio digitale del materiale sonoro prodotto ed una visualizzazione delle caratteristiche acustiche e spettrali dei suoni nel tempo.

Pur avendo meno possibilità operative dei programmi di sintesi in tempo differito, esso si è rivelato molto utile sia dal punto di vista didattico che per la produzione di opere musicali.

Il linguaggio MUSICA, di Debiasi e De Poli, agisce a livello di partitura simbolica, consentendo l'ingresso all'elaboratore di qualsiasi partitura musicale scritta in notazione su pentagramma. Il programma NOTE, di Doardi, interpreta in modo guidato dall'utente i simboli di una partitura così codificata producendo i dati per i programmi di sintesi.

Il linguaggio EMUS è stato sviluppato da De Poli e Vidolin in collaborazione con Dalla Vecchia, come programma di aiuto alla composizione nell'elaborazione di strutture musicali. Esso è caratterizzato da tre funzioni non necessariamente sequenziali. La prima di definizione o generazione del materiale simbolico di base con diversi metodi enumerativi, grafici, pseudoaleatori. La seconda di organizzazione di tale materiale in strutture gerarchiche che vengono poi disposte nel tempo secondo le esigenze del compositore. La terza di interpretazione dei simboli contenuti in tali strutture temporali per generare la partitura operativa. Il compositore è in grado di poter controllare ogni funzione e di determinare con precisione il risultato finale senza dover scendere a livelli operativi.

Accanto alle ricerche per lo sviluppo dei sistemi, si svolgono intense sperimentazioni delle tecniche di sintesi, per porre in evidenza le peculiarità acustiche e le possibili applicazioni musicali. Vanno a questo proposito segnalate le analisi di suoni multifonici svolte da Tisato e il lavoro di Dashow che tende ad una sistemazione teorica e pratica per l'uso di questi suoni in composizioni musicali come accordi. Quest'ultimo considera gli spettri complessi generati con tecniche non lineari come armonizzazione di alcune altezze scelte dal compositore, fra quelle presenti nel

suono, e pone in evidenza le possibili relazioni armoniche fra suoni diversi contenenti le stesse altezze generatrici. E' questo forse l'unico esempio in Italia di ricerca di teoria musicale rivolto ai nuovi tipi di suoni ottenibili con l'elaboratore.

Napoli - A Napoli l'attività parte per opera di G. Di Giugno, un fisico che verso il 1974 inizia a costruire un sistema ibrido per la produzione di musica all'Istituto di Fisica Sperimentale dell'Università.

Suo assunto principale nell'impostazione di questo e dei futuri sistemi è la necessità del tempo reale. Un sistema si dice funzionante in tempo reale quando svolge l'azione richiesta in un tempo utile; cioè, in un certo senso, non fa aspettare chi ha fatto la richiesta. Come si vede, la definizione non è assoluta ma dipende essenzialmente dall'esigenza del singolo utente. Diverso è l'atteggiamento di chi concentra l'interesse sui singoli suoni, da chi ascolta una sequenza di suoni e da chi ascolta una composizione. Ciò che Di Giugno vuole è che il musicista possa intervenire e modificare il suono mentre questo viene prodotto. Deve così esserci una corrispondenza istantanea tra gesto e risultato acustico. Viene in effetti riprodotto lo stesso tipo di rapporto che il musicista ha con gli strumenti di tipo tradizionale e con i sintetizzatori elettronici.

Si osservi che la caratteristica non consiste tanto nel tempo che si deve aspettare tra l'invio del comando e l'ascolto del risultato, ma piuttosto nel fatto che l'introduzione dei comandi e l'ascolto del suono possa avvenire contemporaneamente e non ci sia percettibile ritardo tra quando si pensa di dare il comando e quando se ne ascolta l'effetto.

Di Giugno sviluppa a Napoli un primo sistema consistente in una serie di oscillatori, filtri ed altri apparecchi analogici controllati da un calcolatore PDP 15, il quale poteva ricevere dati e comandi dall'esterno. Dopo questo sistema, Di Giugno costruisce a Napoli un prototipo di banco di oscillatori digitali, finché nel 1976 si trasferisce a Parigi all'IRCAM dove può realizzare, finalmente con mezzi adeguati, le sue idee.

All'IRCAM, Di Giugno ha via via costruito sintetizzatori digitali sempre più sofisticati, che stanno per essere integrati in un unico sistema, chia

mato 4X. Il sistema si presenterà come un insieme di diverse centinaia di oscillatori, generatori di inviluppo, filtri, modulatori ed altre unità, configurabili dinamicamente da programma e con possibilità di controllo manuale di un certo numero di parametri in esecuzione dal vivo.

A Napoli intanto l'attività è continuata, pur con notevole difficoltà operative, per opera soprattutto di Cavaliere dell'Istituto di Fisica e di De Santis del Conservatorio seguendo le linee indicate da Di Giugno, orientandosi attualmente verso i piccoli sistemi a basso costo pilotati da microprocessore.

Milano - A Milano, presso l'Istituto di Cibernetica dell'Università degli Studi, l'attività nel campo dell'informatica musicale inizia nel 1975 essenzialmente ad opera di Haus.

Due sono le esigenze ispiratrici: l'individuazione e l'uso di strumenti formali più rigorosi di quelli normalmente impiegati nel descrivere la musica ed offrire al maggior numero di persone la possibilità di far musica con l'elaboratore.

Uno studio teorico degli strumenti formali necessari per la descrizione di una notazione detta ad "operatori". Essa consente la descrizione di processi musicali in forma gerarchica (a più livelli di astrazione) e compatta (con minima occupazione di memoria). Per operatore viene inteso uno strumento formale che permette di produrre strutture musicali a partire da altre strutture musicali date. Questo periodo è stato sia impiegato per l'analisi di testi musicali, che per la trasformazione di testi preesistenti e per la composizione di nuovi testi.

Accanto a questa attività a carattere teorico, ne viene portata avanti una a carattere applicativo, volta alla individuazione delle tecniche più opportune per la progettazione e lo sviluppo di dispositivi a basso costo e con prestazioni soddisfacenti per la sintesi numerica del suono.

Infatti il progresso della microelettronica, con il conseguente abbassamento dei costi, ha già reso possibile la produzione di elaboratori di uso personale. Si prevede in un tempo non molto lungo, la diffusione ad amatori

e dilettanti, di sistemi digitali per la musica a livello d'uso personale. In questo modo la computer music uscirebbe dai laboratori e dai centri di ricerca per coinvolgere il grosso pubblico.

In attesa di queste prospettive è in corso di costituzione un laboratorio di informatica musicale dotato di un sintetizzatore digitale programmabile DMX-1000 gestito da computer. Sarà così possibile sperimentare anche acusticamente le metodologie di elaborazione dei testi musicali sopra accennate.

Roma - A Roma l'attività comincia nel 1978 dall'incontro di Nottoli, musicista elettronico, con Borruso, Gina, Santoboni dell'Istituto di Acustica "Corbino" del CNR. L'attività è essenzialmente rivolta allo sviluppo di un sistema hardware e software che consenta all'operatore di creare strutture sonore complesse modificando i parametri di controllo in maniera interattiva, ma ha portato alla definizione dei presupposti che il sistema deve soddisfare. Purtroppo, come sempre accade, la fase di realizzazione soffre di molti ritardi e difficoltà impreviste.

Bologna e Modena - Il gruppo composto da Baroni, musicologo dell'Università di Bologna, e Jacoboni, fisico teorico dell'Università di Modena, ha un ruolo tutto speciale nel campo dell'informatica musicale in Italia. Essi infatti non tendono alla creazione di sistemi per produrre musica con l'elaborazione, né offrire un contributo alla produzione musicale di oggi. Il loro è un lavoro di analisi, iniziato verso il 1973, che tende a definire in modo esauriente regole di strutturazione di un corpus musicale dato e stilisticamente omogeneo. L'elaboratore viene usato soprattutto come strumento di verifica e non contraddittorietà delle regole ipotizzate.

Sono state individuate le regole di una grammatica generativa che sia in grado di produrre melodie nello stile dei corali luterani di Johann Sebastian Bach.

Pavia - Presso l'Università di Pavia il Matematico Gagliardo si interessa di composizione automatica. Egli rifiuta decisamente la musica attuale per cui, preso come riferimento il sistema tonale, si è rivolto alla composizione di musiche che imitino lo stile classico. A questo scopo ha sviluppato

il programma ABIOMELOS che produce partiture destinate ad essere eseguite da strumenti tradizionali. Per rimediare alle eventuali imperfezioni, egli ammette, anzi auspica, alcuni ritocchi umani alle musiche composte automaticamente.

Il suo interesse principale non sembra l'analisi musicologica di uno stile musicale, ma il comporre oggi in uno stile del passato.

Istituzioni musicali

Come si è detto prima, scarso è stato il contributo delle istituzioni musicali allo sviluppo dell'informatica musicale in Italia. Va rilevato che il generale disinteresse non riguarda solo la ricerca di informatica musicale, ma anche l'informazione e la diffusione di opere.

Solo alcuni Conservatori, Padova, Venezia e Firenze, stanziavano una piccola parte delle loro scarse risorse, per consentire ad alcuni corsi di giovare dei mezzi di centri di ricerca.

L'utilizzazione avviene soprattutto a fini didattici, consentendo agli allievi di apprendere i concetti e le metodologie che stanno alla base dell'informatica musicale.

Purtroppo attualmente il Conservatorio italiano si configura più come una istituzione di didattica professionale, volta alla perpetuazione di una tradizione musicale del passato, che come un centro di promozione e rinnovamento culturale. In più occasioni le aspettative di inserire nel Conservatorio attività di ricerca sono state deluse.

Solo da pochissimo tempo altre istituzioni musicali o culturali cominciano ad interessarsi alla computer music.

La Biennale di Venezia ha recentemente istituito un Laboratorio permanente per l'Informatica Musicale, affidato a Vidolin, con l'obiettivo di creare un ponte fra il mondo artistico-musicale e quello tecnologico-scientifico. Scopo principale che si prefigge questo Laboratorio, che opera in collaborazione con il CSC dell'Università di Padova, è la produzione di opere musicali realizzate mediante elaboratore. Ciò si concretizza attraverso il supporto didattico, economico e di attrezzatura fornito ai compo-

sitori che intendono approfondire in prima persona il problema della composizione nella computer music.

Con finalità analoghe vari enti culturali e musicali fiorentini stanno per creare un laboratorio chiamato Tempo Reale, dotato di cospicui finanziamenti. Esso si svilupperà in collaborazione con l'IRCAM di Parigi e sarà diretto da Berio e Di Giugno. Il sistema sarà realizzato con le unità di Di Giugno e si propone di essere un autentico centro di produzione e ricerca musicale.

Si spera che queste iniziative non vengano ostacolate e che altre possano aggiungersi.

Linee di tendenza delle ricerche

Dall'esame delle attività dei vari centri emergono essenzialmente due indirizzi di ricerca. Il primo consiste nello studio e nell'analisi della musica esistente. Il secondo nello sviluppo di sistemi per la produzione di musica, in genere nuova. Ciascuno dei due indirizzi si articola su due livelli: quello sonoro e quello compositivo.

L'obiettivo del primo indirizzo (analitico) è quello di trovare dei modelli matematici che possano descrivere la musica. In Italia le ricerche di analisi dei suoni, pur se fatta con l'aiuto dell'elaboratore, in genere non sono considerate appartenenti all'informatica musicale, ma piuttosto all'acustica musicale, e in genere non vi sono molti contatti diretti né rapporti di collaborazione fra le due comunità in questo campo. È auspicabile che questa separazione venga superata in un prossimo futuro, visto che potenzialmente esistono interessi comuni.

L'analisi di opere musicali è principalmente rivolta ad opere del periodo classico, in quanto per esse già esiste una tradizione di tecnica di analisi nonché una forma di notazione che ne rende gli aspetti essenziali. È quindi questo il punto da cui partire. Non altrettanto si può dire per la musica contemporanea, per cui sembra difficile per ora poter pensare a studi in questo campo che non siano implicitamente dei mezzi per comporre musica e quindi necessariamente orientati alle esigenze particolari degli

autori.

Maggiori sforzi vengono rivolti allo sviluppo di sistemi per la musica. E' questo il campo che più risente del rapido sviluppo della tecnologia elettronica. Infatti la continua introduzione nel mercato di nuovi componenti di sempre maggiori prestazioni a costi sempre inferiori, rende realizzabili cose che fino a poco prima erano a stento immaginabili. Ciò fornisce un notevole stimolo a progettare nuovi sistemi che siano quanto più versatili e potenti.

Va rilevato che questo sviluppo crea il problema della rapida obsolescenza di tutte le realizzazioni hardware, per cui spesso queste risultano invecchiate, dal punto di vista tecnologico, ancora prima di essere completamente funzionanti. Ciò pone chi lavora in questo campo nella condizione di una continua rincorsa delle novità tecnologiche, a spese di una concreta sperimentazione delle realizzazioni.

Si avverte poi l'esigenza di un coordinamento delle ricerche in questo campo, per facilitare lo sviluppo dei sistemi e assicurare la compatibilità fra i vari centri attraverso una standardizzazione del software e un effettivo scambio di esperienze e risultati.

Conclusioni

Sono stati illustrati i presupposti storici e le principali realizzazioni dei gruppi di ricerca di informatica musicale italiani. Nel corso di questi dieci anni sono state compiute alcune realizzazioni significative e sono stati sviluppati dei sistemi abbastanza potenti per far musica con l'elaborazione. Le iniziative in questo campo si vanno moltiplicando e lasciano bene sperare per il futuro.

Oltre all'attività di ricerca è stata portata avanti da vari centri un'attività didattica informativa e formativa, pur tra molte difficoltà. Molto scarso è stato infatti il contributo degli enti rivolto alla diffusione della musica e dei mezzi di comunicazione di massa.

Va rilevato che le persone che si occupano del settore, pur provenendo da discipline diverse, operano con i metodi e fini della ricerca scientifi-

ca. Salvo rare eccezioni, in Italia non viene portata avanti in parallelo un'autentica ricerca musicale.

L'elaboratore si presenta al musicista come un nuovo strumento, che non solo produce suoni, ma consente di elaborare informazioni compositive. Il musicista deve quindi sperimentare a lungo per poter ricavare quella padronanza e quella sensibilità nella scelta dei parametri e nei procedimenti che gli consentano di giungere a dei risultati rilevanti dal punto di vista musicale, e non solo da quello acustico. E in questo campo non si può aver fretta. Solo attraverso un lungo e duro lavoro si può giungere a dei risultati validi ed ad una consapevolezza dei mezzi impiegati, altrimenti si deve rinunciare a nuove possibilità ed usare pedestremente i risultati altrui. Come sempre, di fronte alle novità, non esiste ancora, e per un certo tempo non esisterà, una teoria ed una prassi musicale adatta ad orientare chi vuol comporre musica per elaboratore. Ciascuno deve costruirla con il suo impegno personale.

Note Bibliografiche

Memorie del colloquio "Aspetti teorici di Informatica Musicale", Istituto di Cibernetica, Università degli Studi di Milano, 1977.

Atti del 3° Colloquio di Informatica Musicale, Università di Padova, 1979.

Atti del Convegno Musica ed Elaboratore Elettronico, Fast, Milano 1980

Automazione e Strumentazione, vol. XXVIII, febbraio 1980.

Pisa

Grossi, P., *Musical Studies - Instruction Manual of the DCMP*, 1970.

Grossi, P., *Computer and music*, "International review of the aesthetics and sociology of music", vol. 4, n.2, 1973.

Grossi, P. - Sommi, G., *DCMP, versione per il sistema 360/67*, Pubbl. CNUCE n. 53, giugno 1974.

Bertini, G. - Chimenti, M., *Descrizione strutturale e operativa del TAU1*, IEI del CNR, Pisa, nota interna c74-7, maggio 1974.

Tarabella, L. e L., *Studi Musicali - Applicazioni Musicali delle Categorie di Morkov*, Pubbl. CNUCE, n. 55, 1975.

Baruzzi, G. - Grossi, P. - Milani, M., *Studi Musicali - Compendio dell'attività svolta nel periodo 1969/1975*, Pubbl. CNUCE, n. 56, novembre 1975.

Milani, M., *N-tone Systems and Symmetrical Series*, Pubbl. CNUCE, n. 101, febbraio 1976.

Milani, M., *DCMP - Versione per il display 2250 IBM.*, Pubbl. CNUCE, n. 103, febbraio 1976.

Milani, M. - Busico, M., *Forme d'onda e timbri: distinguibilità e criteri di scelta*, Pubbl. CNUCE, n. 119, ottobre 1976.

Bertini, G. - Chimenti, M. - Denoth, F., *TAU 2: un terminale audio per esperimenti di computer music*, *Alta Frequenza*, vol. 12, pag. 600-609, dicembre 1977.

Bolognesi, T. - Milani, M. - Tarabella, L., *Tre esperienze di psicoacustica musicale*, Pubbl. CNUCE, n. 132, novembre 1977.

Farese, S., *SINFORM. Un sistema per la gestione automatica dei dati*, Pubbl. CNUCE, n. 141, febbraio 1978.

Bolognesi, T., Grossi, P., *Modalità operative del TAUMUS, software di gestione del terminale audio TAU2 (seconda versione)*, Pubbl. CNUCE, n. 158, febbraio 1979.

Bolognesi, T., *Composizione automatica: dalla musica 1/f alla musica autosimile*, Pubbl. CNUCE, n. 163, marzo 1979.

Padova

Debiasi, G.B. - De Poli, G., *Linguaggio di trascrizione di testi musicali per elaboratori elettronici*, Supplemento n. 1 degli Atti del IV Seminario di studi e ricerche sul linguaggio musicale. Vicenza, agosto 1974.

Debiasi, G.B. - De Poli, G., *MUSICA, a Musical Texts Coding Language for Computers*, Proc. of First International Conference on Computer Music, MIT Cambridge Mass., ottobre 1976.

Tisato, G.G., *An Interactive Software System for Real-time Sound Synthesis*, Proc. of First International Conference on Computer Music, M.I.T. Cambridge Mass., ottobre 1976.

De Poli, G., - Vidolin, A., *EMUS: un programma per l'elaborazione di strutture musicali*, 1° Colloquio su: Aspetti teorici di informatica musicale, Milano, dicembre 1977.

Tisato, G., *Un sistema interattivo per la sintesi di suoni e la loro analisi mediante un elaboratore*, 1° Colloquio su: Aspetti teorici di informatica musicale, Milano, dicembre 1977.

Dashow, I., *Three Methods for a Digital Synthesis of Harmonic Structures Using non Harmonic Partial*s, in "Interface", vol. 7 n. 23, pp. 69-94, 1978.

De Poli, G., *MUSICA: un programma di codage de la musique* IRCAM, Parigi rapport scientifique 7/78.

Tisato, G., *ICMS (Interactive Computer Music System): manuale d'impiego*, rapporto interno Centro Calcolo, Università Padova 1978.

Dashow, J. - De Poli, G. - Vidolin, A., *Computer Music at Padua University*, Proc. 3rd International Computer Music Conference, Evanston III., novembre 1978.

Tisato, G., Vidolin, A. - De Poli, G., *SISTEMA MUSICA: manuale operativo*, rapporto interno Centro Calcolo, Università di Padova, 1978.

De Poli, G., Doardi, E., *A language for automatic execution of musical scores by computer*, 62nd AES Convention, Preprint n. 1435, 1979.

De Poli, E. - De Poli, G., *Determinazione dei parametri VOSIM di un suono quasi-periodico*, Atti Convegno AIA 79, pp. 41-43, ed. ESA, Roma.

Dashow, J. - De Poli, G., - Tisato, G., Vidolin, A. - *Computer Music all'Università di Padova*, in *Autobiografia della musica contemporanea*, a.c. di M. Mollia, ed. Lerici, 1979.

Vidolin, A., *Interazione fra i livelli di rappresentazione dell'informazione*

musicale nella composizione mediante computer, Automazione e strumentazione, febbraio 1980.

Milano

Bertoni, Haus, Mauri, Torelli, *A Mathematical Model for Analysing and Structuring Musical Texts*, in "Interface", vol. 7, pp. 31-44, 1978.

Bertoni, Haus, Mauri, Torelli, *Analysing and Compacting of Musical Texts*, in "Journal of Cybernetics", vol. 8, pp. 257-272, 1978.

Bertoni, A.-Haus, G.-Mauri, G. Torelli, M., *Compattazione di strutture informative nella descrizione di processi musicali*, Atti del Congresso Annuale AICA, Milano, pp. 497-508, 1976.

Bertoni, A-Haus, G.-Mauri, G.-Tonelli, M., *Analysis and Compacting of Musical Texts*, Journal of Cybernetics, vol. 8, pp. 257-272, 1978.

Bertoni, A.-Haus, G.-Mauri, G. Torelli, M., *A Mathematical Model for Analysing and Structuring Musical Texts*, Interface, vol. 7, pp. 31-44, 1978.

Haus, G., Mauri Torelli, *Analysing and Compacting of Musical Texts*, in "Journal of Cybernetic", vol. 8, pp. 257-272, 1978.

Haus, G., *Transformations of Musical Texts by Means of Operators*, in corso di pubblicazione sul "Computer Music Journal", MIT Press.

Napoli

Di Giugno, G. - Asta, V., *Il sistema di sintesi digitale in tempo reale 4X*, comunicazione presentata al 7 Convegno dell'Ass. Italiana di Acustica (AIA), Siena, ottobre 1979.

Di Giugno, G., *A 256 digital oscillator bank*, Comunicazione presentata a The 1976 International Computer Music Conference, MIT, Cambridge 1976.

Bologna e Modena

Baroni, M. - Jacoboni, C., *Analysis and Generation of Bach's Choral Melodies*, in *Acta du Congres International de Sémiotique Musicale*, Centro di Iniziativa Culturale, Pesaro 1975, pp. 125-134.

Baroni, M. - Jacoboni, C., *Verso una grammatica della melodia*, in "Quadrivium" 17,2, pp. 157-300, 1976.

Baroni, M. - Jacoboni, C., *Proposal for a Grammar of Melody*, Les Presses de l'Université de Montréal, 1978.

Pavia

Gagliardo, E. - Fornasi, P., *Composizione di musica classica mediante elaboratore elettronico*, in "Quaderni di Informatica", n. 2, pp. 28-31, 1978.

Bernardi, M.L. - Gagliardo, E. - Gilardi, G., *ABIOMELOS 1979. Mathematical Structures for Harmony and Melody*, rendiconto dell'Istituto Lombardo di Scienze e Lettere, 1979.

INTRODUZIONE ALLE TECNICHE DI SINTESI
DELLA MUSICA CON ELABORATORE

G. De Poli

C.S.C. - Istituto di Elettrotecnica e di Elettronica
Università di Padova

RIASSUNTO

Per produrre la musica con l'elaboratore si impiegano delle opportune tecniche di sintesi.

In questo lavoro prima vengono esaminate le tecniche di generazione del suono, eventualmente con parametri lentamente variabili nel tempo; poi quelli che trasformano un suono in modo lineare o non lineare. Per ciascun tipo sono presentati i metodi più diffusi e ne vengono discussi vantaggi e svantaggi, cercando di porre in evidenza le possibilità applicative.

INTRODUZIONE

Il suono è lo stimolo all'organo dell'udito prodotto da una vibrazione di particelle d'aria. Queste vibrazioni sono generalmente causate da un oggetto in movimento, la sorgente sonora; esse sono propagate attraverso un mezzo (aria) e possono comunicare informazioni all'ascoltatore. E' questo fatto che giustifica l'uso del termine segnale.

Non viene qui analizzato quando un suono diventa musica, nè la contrapposizione tradizionale tra suono e rumore, in quanto ciò dipende essenzialmente dall'atteggiamento dell'ascoltatore.

Una prima distinzione può essere fatta tra i suoni prodotti senza l'intervento umano, o meglio senza l'intervento volontario e cosciente dell'uomo, e quelli prodotti volontariamente dall'uomo, sia direttamente (voce) sia con opportuni strumenti. Il primo tipo è oggetto di studio di altre discipline, tra cui l'ecologia sonora. I suoni del secondo tipo possono essere ulteriormente distinti rispetto alla fonte di produzione. Abbiamo quindi i suoni di origine acustica e quelli di origine elettrica. Questi ultimi sono quelli che, per esistere, richiedono un altoparlante.

Anche se spesso non ci si pensa, la maggior parte della musica che ascoltiamo è di origine elettrica e sempre più raramente si ascolta musica senza l'intermediazione dell'elettricità. Tutti infatti ascoltano musica dalla radio, dai dischi, dalla televisione ed anche quando si va ad un concerto di musica non elettronica, sempre più spesso il suono viene amplificato elettricamente.

Ma la musica non solo viene riprodotta elettricamente, ma viene anche trasformata elettricamente. Basti pensare alle chitarre elettriche della musica pop che hanno completamente trasformato la musica leggera ed il modo d'ascolto. E' difficile pensare alla musica rock senza l'elettricità. Nel campo della musica colta, si pensi alla musica concreta.

Infine la musica viene anche generata elettricamente, ad esempio negli organi elettronici o nei sintetizzatori: non esiste all'origine nessun tipo di suono acustico. Un intero settore della musica contemporanea è sorto stimolato da questa possibilità: la musica elettronica.

Segnali discreti

Un segnale, e quindi un suono, può essere rappresentato come una funzione del tempo.

A seconda del dominio della funzione i segnali possono essere classificati in:

- segnali continui nel tempo: in cui la variabile indipendente assume tutti i valori in un insieme continuo (ad esempio intervallo di R^1 o tutto R^1);
- segnali discreti nel tempo: in cui la variabile indipendente assume soltanto valori in un insieme discreto (finito o numerabile). In tal caso si parla di sequenze o serie temporali.

Nelle applicazioni musicali generalmente gli istanti di tempo sono equispaziati. Se Z è l'insieme dei numeri interi con segno (relativi), per ogni numero reale T si introduce l'insieme

$$Z(T) = \{\dots, -2T, -T, 0, T, 2T, \dots\} = \{nT : n \in Z\}$$

che verrà considerato l'asse dei tempi discreti con quanto temporale T . In seguito, anche se non specificato, si intende che il dominio delle funzioni del tempo sia $Z(T)$.

Analogamente, per quanto riguarda il codominio della funzione che rappresenta il segnale, si ha:

- segnale continuo in ampiezza in cui la variabile dipendente assume tutti i valori di un insieme continuo;
- segnale discreto in ampiezza (o quantizzato) in cui la variabile dipendente assume soltanto i valori in un insieme discreto, detto alfabeto.

A seconda del tipo di dominio e codominio si hanno quattro classi di segnali. Le più importanti sono i segnali continui nel tempo e in ampiezza detti analogici e quelli discreti nel tempo e in ampiezza detti numerici. Questi ultimi sono quindi rappresentati da sequenze di numeri.

Il calcolatore elabora numeri. Esso può quindi trattare questi segnali. Nella computer music si hanno segnali numerici corrispondenti a sequenze di numeri, detti campioni, rappresentati con un numero finito di cifre e corrispondenti all'ampiezza del segnale acustico in istanti equispaziati di tempo. Sebbene gli elaboratori trattino i segnali numerici, cioè discreti in tempo e ampiezza, la spiegazione delle tecniche di sintesi può essere fatta con riferimento ai segnali discreti nel tempo e non in ampiezza, in quanto, se si usa un numero sufficiente di cifre per rappresentare i numeri, può essere trascurato l'effetto della discretizzazione dell'ampiezza.

In generale la serie temporale, che si ottiene prelevando da un segnale continuo $s(t)$ dei valori in certi istanti t_n , perde parte dell'informazione affidata al segnale continuo. Tuttavia se gli istanti t_n di campionamento sono abba -

stanza fitti la serie temporale conserva esattamente l'informazione, nel senso che dalla serie temporale si può ricostruire esattamente il segnale continuo $s(t)$. Vale infatti il teorema del campionamento di Shannon che afferma: se una funzione $f(t)$ continua nel tempo non contiene componenti a frequenza superiore a B , essa è completamente definita dando le sue ordinate ad una serie di punti spazati T secondi tra loro, con $T = \frac{1}{2B}$.

Esiste quindi un'operazione (D/A), detta conversione numerico-analogica, che consente di costruire il segnale continuo, sotto forma di tensione elettrica, dalla serie temporale rappresentante il segnale discreto. Essa viene realizzata praticamente con un convertitore digitale analogico seguito da un filtro.

USI DELLE TECNICHE NUMERICHE

I suoni rappresentati sotto forma numerica fanno parte della categoria dei suoni di origine elettrica; infatti è necessario l'uso di un altoparlante per ascoltarli. L'uso di tecniche numeriche può essere diviso in tre categorie: riproduzione, trasformazione, generazione.

Nella prima categoria (fig. 1) i suoni vengono trasformati in segnale elet

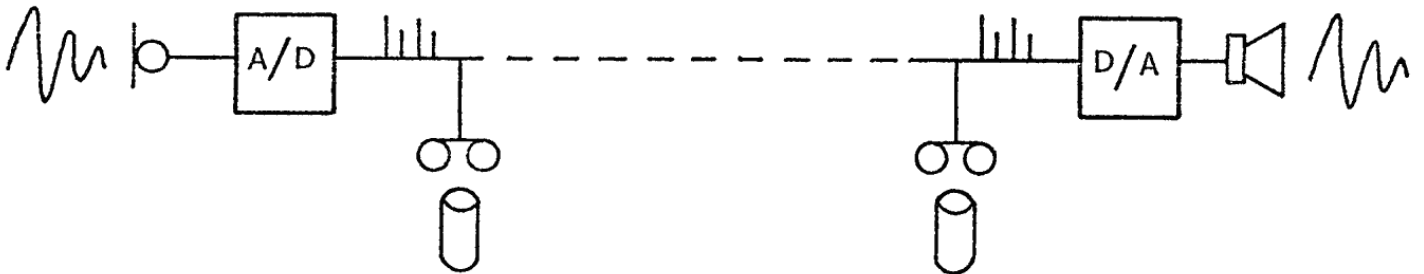


fig. 1

trico dal microfono e poi in sequenza di numeri dal convertitore A/D. Essi possono venir registrati sotto forma digitale su nastro o disco oppure trasmessi in un'altra località. Possono poi essere riprodotti con quanta fedeltà si vuole, se si è usata una frequenza di campionamento maggiore del doppio della banda del segnale e un numero sufficiente di cifre per rappresentare ogni numero. Già esistono studi di registrazione di questo tipo e conversazioni telefoniche sono trasmesse per via numerica.

Nella seconda categoria, modificazioni, non ci si limita a convertire un suono in sequenza di numeri. Si elabora con metodi numerici questa sequenza, trasformando le caratteristiche del suono (fig. 2).

I vantaggi rispetto alle tecniche analogiche sono l'assenza di rumore, la precisione e la disponibilità di tecniche di elaborazione del segnale non facil

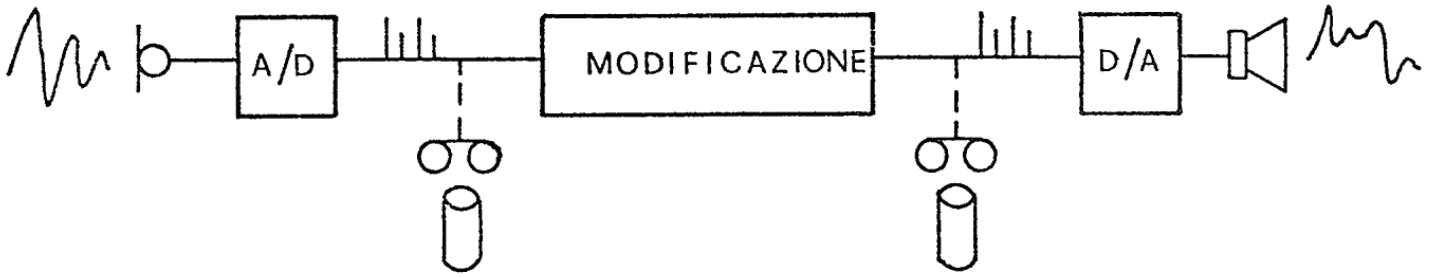


fig. 2

mente realizzabili in maniera analogica. La trasformazione può essere fatta sia sui campioni che rappresentano il segnale nel tempo (fig. 3a), sia analizzando il suono e quindi trasformando i parametri ricavati dall'analisi (fig. 3b). In questo caso si procede poi alla sintesi con i parametri modificati.

Nella terza categoria, generazione, non esiste più un segnale acustico all'origine; si passa direttamente alla sintesi, dopo aver assegnato i parametri. (fig. 4).



fig. 3a



fig. 3b

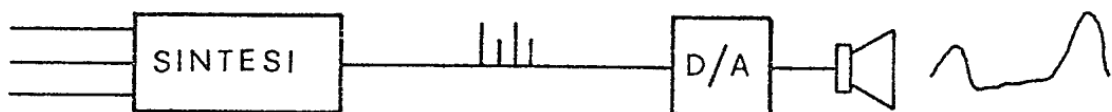


fig. 4

Per via sintetica, si possono produrre un'infinita varietà di nuovi suoni. Adottando particolari accorgimenti, si possono produrre varianti che vengono percepiti come "naturali".

Nel seguito si analizzeranno le tecniche di sintesi.

Tecniche di sintesi

Una tecnica di sintesi è il procedimento che consente di generare un suono. Nel caso di segnali numerici è una formula che consente di calcolare il valore dei campioni che rappresentano il suono. Ad esempio la formula

$$s(n) = \text{sen}(\omega nT)$$

descrive un segnale sinusoidale, essendo:

- s(n) l'ampiezza del campione al tempo nT;
- n il numero d'ordine del campione generato;
- T l'intervallo di tempo tra due campioni successivi;
- ω la pulsazione del suono in rad/sec.

L'unico parametro di questa formula è $\omega = 2\pi/f$, con f frequenza del segnale.

Una tecnica di sintesi è un modo di produrre un segnale campionato e può essere espressa come la valutazione di una formula matematica.

Questa espressione in genere ha vari parametri, è funzione di varie grandezze come ad esempio altezza ed intensità. Spesso si vuole che queste grandezze non siano costanti, ma varino con il tempo lungo la durata del suono. Ciò significa che alcuni parametri possono a loro volta essere funzioni del tempo. Essi vengono chiamati funzioni di controllo e variano molto più lentamente che il segnale generato (con banda <40 Hz). Se le funzioni di ingresso hanno circa la stessa banda del segnale in uscita, la tecnica di sintesi agisce come modificatore di un segnale.

Una tecnica di sintesi può così essere schematizzata come in figura 5.

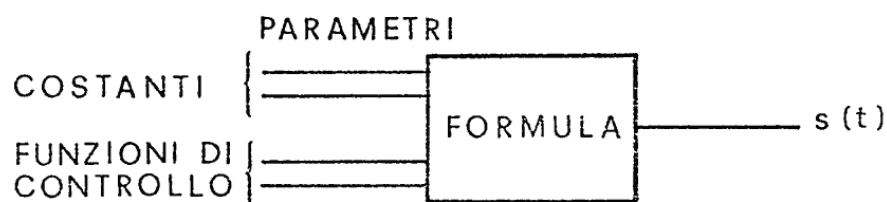


fig. 5

I parametri della sintesi possono essere forniti direttamente dal compositore mediante una partitura e/o con azioni su opportuni dispositivi di ingresso oppure derivare dall'analisi di suoni preesistenti.

La formula della tecnica di sintesi è un modello matematico della forma d'onda. Una tecnica sarà tanto più idonea per produrre un certo suono, quanto meglio il modello rappresenta il suono stesso e quanta più padronanza avrà il compositore nell'uso dei parametri.

La bontà del risultato dipende cioè sia dalla scelta del tipo di tecnica che dai parametri ad essa associati.

Nella musica tradizionale l'esecutore ha a disposizione una partitura e uno strumento. Egli legge le note ed agendo in modo opportuno sullo strumento produce il suono. Ad esempio se deve suonare un do con l'organo, sceglierà un registro e terrà premuto il tasto per tutta la durata del suono. Si hanno così due concetti fondamentali: lo strumento, che è il mezzo per produrre i suoni, e la nota, che è il simbolo scritto di un suono musicale.

Nella computer-music lo strumento è la tecnica di sintesi; la nota è l'insieme dei parametri che individuano il suono.

All'elaboratore va quindi fornita sia la descrizione della tecnica di sintesi che i parametri.

In generale il compositore può sia scegliere solo i parametri di una tecnica di sintesi predeterminata, che costruire la tecnica di sintesi più adatta alle sue esigenze.

Nel seguito vengono prima esaminate le tecniche di generazione del suono, eventualmente con i parametri variabili lentamente nel tempo. Verranno poi esaminate le trasformazioni lineari e non lineari. Per ciascun tipo verranno presentate le tecniche più importanti e discusse le possibilità applicative.

GENERAZIONE

Le tecniche di sintesi si dividono in due tipi: quelle che generano il suono e quelle che trasformano il suono. La differenza sta nel tipo di ingressi. Se questi hanno valore costante o lentamente variabile si parla di generazione, se invece l'ampiezza dell'ingresso varia rapidamente (è cioè un suono udibile) si parla di trasformazione.

La distinzione fra variazione lenta e rapida va fatta su basi psicoacustiche. Infatti i segnali con banda passante superiore a 20-40 Hz sono sentiti come suoni e vengono analizzati in frequenza dall'orecchio, trascurando, in prima approssimazione, la fase. I segnali di banda passante inferiore non sono

sentiti come suoni. Essi vengono analizzati nel tempo; in questo caso la fase ha molta importanza. Essi vengono percepiti solo se modificano (modulano) i parametri di un suono udibile e sono essi che portano la maggior parte dell'informazione musicale.

I due tipi di segnale possono essere prodotti e studiati con le stesse tecniche; è bene però tener sempre presente che vengono percepiti con due meccanismi diversi.

Sintesi granulare

Se le funzioni che descrivono la variazione lenta dei parametri sono, o possono essere pensate, discrete nel tempo, il suono così generato ha caratteristiche costanti a tratti. Esso può quindi essere pensato come una sequenza di suoni elementari di caratteristiche costanti. Questi suoni elementari vengono chiamati, nella computer music, grani, e la tecnica che usa questa possibilità, sintesi granulare. Questo tipo di sintesi è molto usato per la produzione della voce con l'elaboratore, dove i grani durano da 5 a 20 millisecondi. Nella musica finora è stata poco usata, ma, una volta superati alcuni problemi, probabilmente si affermerà.

Il primo problema è effettuare la transizione tra un grano e il successivo. Bisogna infatti evitare che un improvviso cambiamento di un parametro crei discontinuità di ampiezza o di fase nel segnale. Questo problema può essere risolto usando un opportuno inviluppo del grano e avendo cura di effettuare la transizione al momento opportuno e con particolari cautele.

Un secondo problema si presenta in quanto, dovendo fornire i parametri per ogni grano, si ha una grande quantità di dati da specificare. Mentre nella voce questi dati derivano generalmente dall'analisi, nella musica, in cui si vuole produrre suoni nuovi, bisogna inventare delle regole che producano risultati acusticamente validi. Devono quindi essere scritti dei programmi che producano questi dati e che tengano conto anche del problema della transizione cui sopra si accennava. Non va più fornita quindi solo una descrizione di una funzione del tempo, ma un programma che, eventualmente partendo da questa, generi la opportuna sequenza di parametri. Si noti che questo tipo di programma si avvicina di più, come obiettivi e metodi, ai programmi di aiuto alla composizione che alle tecniche di sintesi. Essi sono infatti dei veri e propri programmi di aiuto alla composizione del suono.

Sintesi mediante forma d'onda fissa

Il più semplice metodo di sintesi è quello a forma d'onda fissa. Esso serve per rappresentare i suoni periodici. I parametri di questo modello sono frequenza, ampiezza e forma d'onda. Esso viene rappresentato graficamente (fig. 6) con

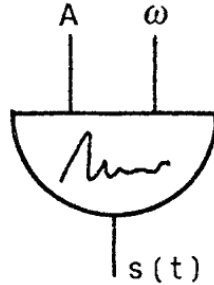


fig. 6

un oscillatore, che ripete con la frequenza specificata la forma d'onda. Nel disegno sono stati evidenziati i parametri ampiezza, pulsazione e forma d'onda.

Se la forma d'onda specificata $g(x)$ è considerata periodica con periodi uguali a 2π , l'espressione della formula è

$$s(t) = A g(\omega t) \quad \text{con } \omega = 2\pi f \quad \text{e } f \text{ è la frequenza del segnale}$$

Generalmente nei metodi di sintesi numerica viene specificato un periodo della forma d'onda sotto forma di tabella contenente le ordinate in punti equispaziati. Il valore della funzione in ogni istante viene poi ricavato con interpolazione di ordine zero (più spesso) o del primo ordine (talvolta).

Il segnale $s(t)$ è periodico e può essere rappresentato con la serie di Fourier

$$s(t) = \sum c_k \cos(k\omega t + \phi_k)$$

essendo

- $\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$ - pulsazione del segnale, T periodo del segnale,
- c_k e ϕ_k - ampiezza in modulo e fase delle singole componenti (armoniche) in cui può pensarsi scomposto il suono, che descrivono quindi la forma d'onda.

E' bene far notare che la serie di Fourier non è l'unica scomposizione possibile di un segnale periodico, ma quella che finora si è rivelata più utile.

Si noti che per i segnali numerici il fatto che il segnale sia periodico non

vuol dire che si ripetano sempre le stesse sequenze di numeri per ogni periodo. Ciò si verifica soltanto se il periodo del segnale T' è multiplo del periodo di campionamento T . I campioni avranno una periodicità solo se il rapporto tra T'/T è un numero razionale. In questo caso il periodo della sequenza numerica sarà il minimo comune multiplo tra i due periodi.

I risultati di questa tecnica non sono particolarmente soddisfacenti, in quanto il suono non ha nessuna variazione nel corso della sua durata.

Una prima variazione di questo modello consiste nel moltiplicare la forma d'onda per un fattore di scala che varia nel tempo: parte da zero, raggiunge il massimo dopo un certo tempo (attacco) e dopo una certa evoluzione raggiunge di nuovo lo zero (decadimento). Questa funzione viene chiamata involuppo. Il modello sarà quindi a forma d'onda fissa con involuppo. L'espressione matematica

$$s(t) = A(t) \cdot g(\omega t) = A(t) \cdot \sum c_k \cos(k\omega t + \phi_k)$$

viene rappresentata graficamente come in fig. 7.

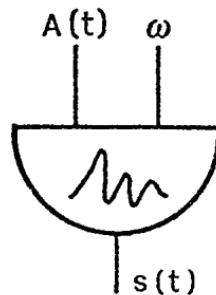


fig. 7

Può venire rappresentata anche come in figura 8 in cui si è evidenziato che l'involuppo può essere generato da un oscillatore a frequenza molto bassa pari all'inverso della durata del suono.

Una seconda variazione consiste nel rendere lentamente variabile la frequenza del suono. L'espressione è

$$s(t) = \sum_{k=1}^M c_k \cos(k \omega(t) \cdot t + \phi_k)$$

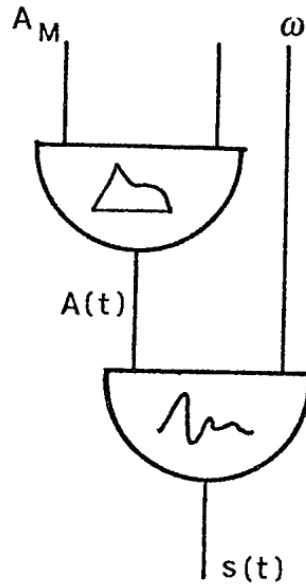


fig. 8

Questo metodo serve per creare l'effetto di tremolo nonchè i glissandi. Le rappresentazioni grafiche sono illustrate in fig. 9.

Queste due variazioni possono essere combinate insieme dando luogo al metodo di sintesi a forma d'onda fissa con ampiezza e frequenza lentamente variabili nel tempo. Esso viene utilmente usato per produrre i suoni quasi periodici.

La formula finale è quindi

$$s(t) = A(t) \cdot \sum_{k=1}^M c_k \cos(k \omega(t) \cdot t + \phi_k)$$

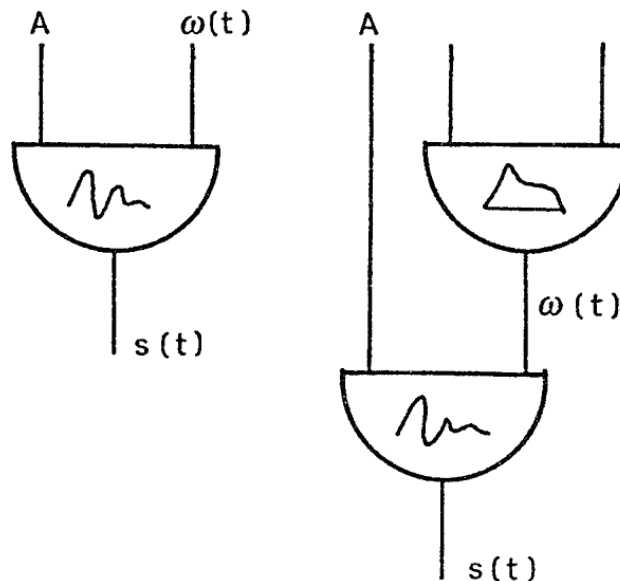


fig. 9

e viene rappresentata graficamente come in fig. 10.

In definitiva la forma d'onda è fissa mentre cambia l'ampiezza e la frequenza.

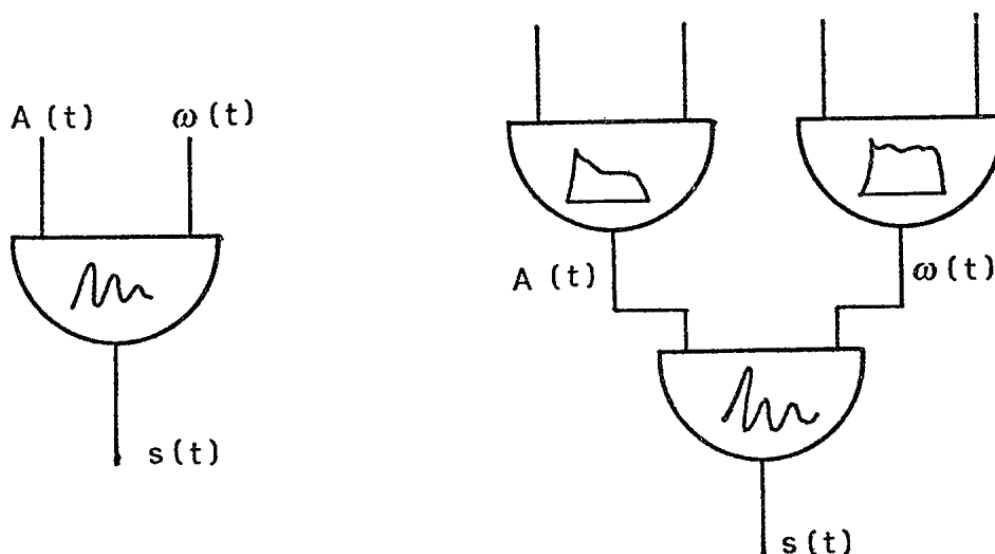


fig. 10

Sintesi additiva

L'idea della sintesi additiva è che si può produrre un suono più complesso mediante la sovrapposizione di più suoni semplici. In opportune condizioni i suoni componenti si fondono e il suono risultante viene percepito come unico. Questo procedimento è già usato negli strumenti tradizionali. Ad esempio nel piano alla maggior parte delle note corrispondono due o tre corde che oscillano a frequenza lievemente diversa. Negli organi l'esecutore può accoppiare ad una tastiera contemporaneamente quanti registri vuole, le cui frequenze sono multiple o sottomultiple di quella suonata; cambiando i registri selezionati cambia la qualità del suono. Nell'orchestra poi una stessa nota viene spesso eseguita contemporaneamente da strumenti diversi.

In genere non si ricorre alla sintesi additiva per produrre un suono periodico. In questo caso basta la sintesi a forma d'onda fissa. La sintesi additiva viene usata, per i suoni periodici, solo quando non si hanno a disposizione oscillatori con la forma d'onda voluta. Negli oscillatori digitali normalmente la forma d'onda viene memorizzata in una tabella e quindi può essere qualsiasi.

Normalmente questa tecnica viene utilizzata per produrre suoni quasi periodici. In questo caso l'ampiezza delle singole componenti varia nel tempo (lentamente) con legge diversa.

Un suono quasi periodico può essere pensato (e analizzato) come una somma di armoniche, di frequenza multipla della fondamentale, che si evolvono nel tempo. Ciò corrisponde alla formula

$$s(t) = \sum_{k=1}^M A_k(t) \cdot \cos(k\omega t + \phi_k)$$

Si confronti con la sintesi per forma d'onda fissa con inviluppo

$$s(t) = A(t) \cdot \sum c_k \cos(k\omega t + \phi_k)$$

Si osservi che ciascun addendo della sommatoria corrisponde ad una forma d'onda fissa (coseno) con il suo inviluppo, tecnica di sintesi già esaminata. La sintesi additiva sarà quindi rappresentata graficamente come in fig. 11.

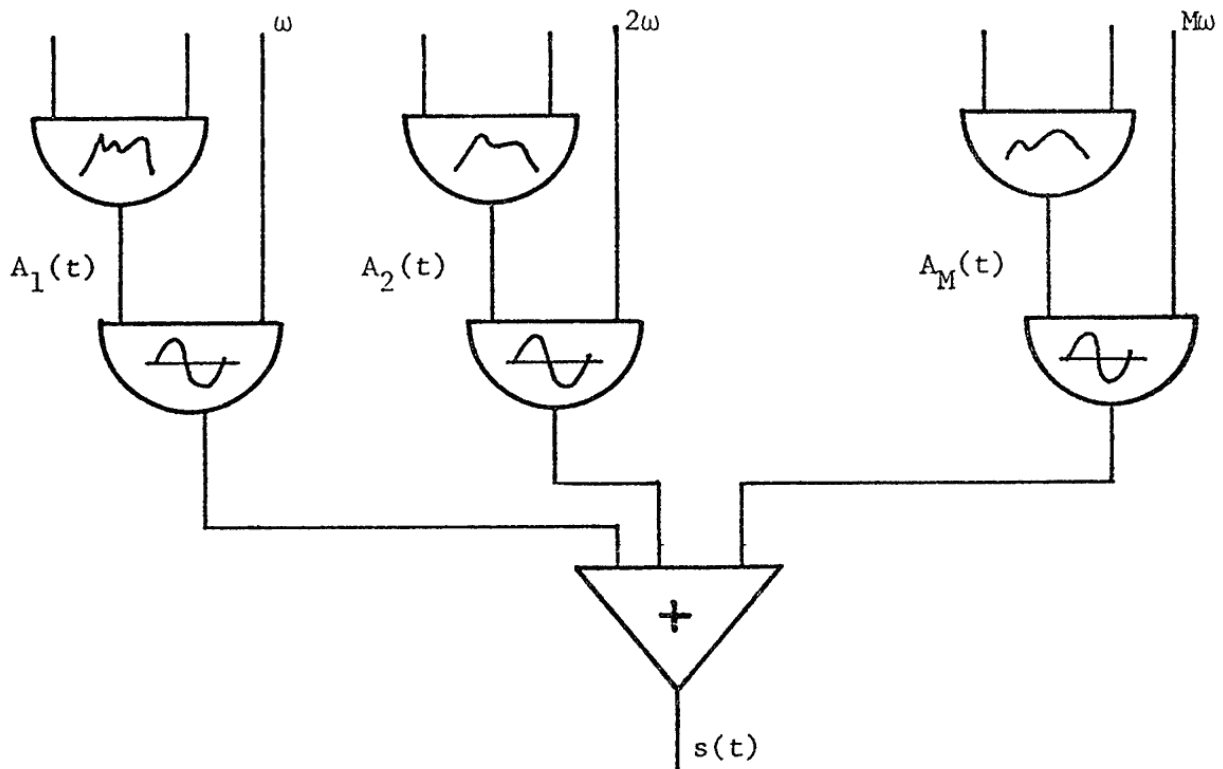


fig. 11

Se alcune componenti hanno inviluppo uguale o proporzionale, invece di sommare le componenti per tutta la durata della nota, possono essere sommate le forme d'onda, utilizzando quindi un unico inviluppo e la forma d'onda risultante.

Si può pensare che anche la frequenza di ogni componente sia lentamente variabile. La formula matematica è

$$s(t) = \sum_{k=1}^M A_k(t) \cos [(k\omega_0 + \bar{\omega}_k(t)) \cdot t + \phi_k]$$

$$= \sum_{k=1}^M A_k(t) \cos [(\omega_k(t)) t + \phi_k]$$

essendo $\omega_k(t)$ la pulsazione della k-esima componente = $k\omega_0 + \bar{\omega}_k(t)$
 ω_0 la fondamentale
 $\bar{\omega}_k(t)$ la deviazione di pulsazione dell'armonica k-esima.

La rappresentazione grafica in generale è indicata in fig. 12. Ogni singolo addendo può essere rappresentato come in fig. 10 o come in fig. 13, usando la deviazione di pulsazione.

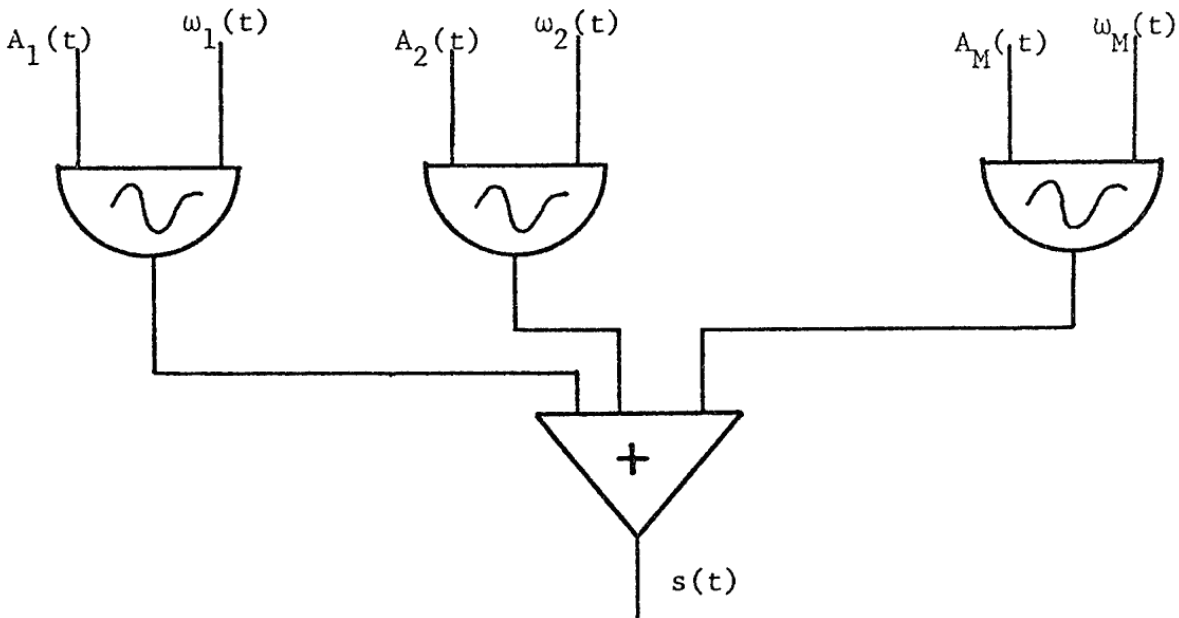


fig. 12

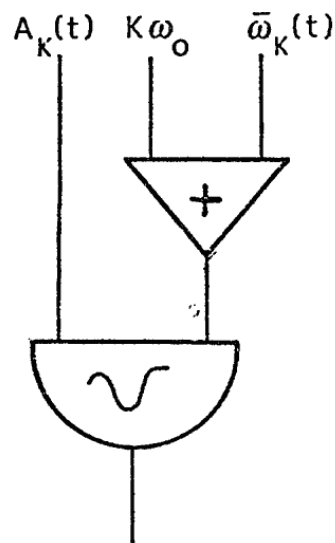


fig. 13

Per analizzare i suoni quasi periodici in termini di questi modelli esistono delle collaudate tecniche di analisi e sono pubblicati molti esempi di suoni strumentali. Ciò può suggerire dei criteri per la scelta delle funzioni di controllo.

Il problema che si pone nell'uso di questa tecnica è la grande quantità di dati che bisogna fornire per una singola nota; bisogna infatti specificare due funzioni di controllo per ogni componente e normalmente le funzioni variano da suono a suono, dipendono dalla durata, dall'intensità ecc.

Questa tecnica si applica utilmente anche ai suoni non periodici, se possono essere pensati come un insieme di oscillazioni non armonicamente legate tra loro. La formula generale è

$$s(t) = \sum A_k(t) \cos [(\omega_k(t))t + \phi_k]$$

essendo $\omega_k(t)$ lentamente variabile nel tempo.

Oscillatore VOSIM

Finora abbiamo visto oscillatori che riproducono periodicamente una forma d'onda assegnata, con la frequenza specificata come parametro. Essi fanno essenzialmente riferimento al modello di rappresentazione mediante analisi di Fourier sincrona con il periodo. E' infatti in base a questo modello che vengono scelti i parametri.

Esistono però altri tipi di oscillatori che fanno riferimento ad altri modelli. Il più importante nelle applicazioni musicali è il VOSIM.

L'oscillatore VOSIM (VOICE SIMulation) viene ideato nell'ambito di un progetto di analisi dei segnali acustici nel dominio del tempo e di sviluppo di un modello con cui sia possibile descrivere e generare i suoni base dei linguaggi indo-europei.

La forma d'onda consiste in una serie di N impulsi sen^2 , di uguale durata T , di ampiezza decrescente, seguiti da una pausa M . L'ampiezza di ogni impulso sen^2 è inferiore a quella dell'impulso precedente di un fattore costante b . In fig. 14 è rappresentata la forma d'onda con $N=8$, $b=0.85$, $T=10\text{ms}$.

Lo spettro del segnale non ripetuto, vale:

$$|S(\omega)| = \frac{\text{sen} \frac{\pi\omega}{\Omega}}{\omega \left(\frac{\omega}{\Omega} - 1 \right)} \sqrt{\frac{1 - 2b^N \cos^2 \pi N \frac{\omega}{\Omega} + b^{2N}}{1 - 2b \cos^2 \pi \frac{\omega}{\Omega} + b^2}}$$

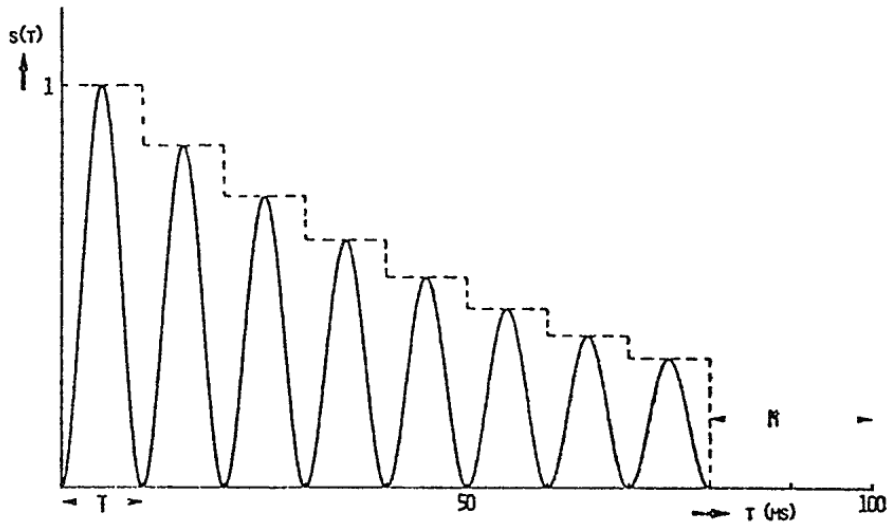


fig. 14

avendo posto $\Omega = \frac{2\pi}{T}$

In fig. 15 è rappresentato lo spettro della forma d'onda di fig. 14. Esso può essere pensato come il prodotto del termine, S_1 , fuori radice, e del termine S_2 costituito dalla radice. Il termine S_1 ha un andamento del tipo $\text{sen } x/x^3$ e non dipende da b nè da N (fig. 16) e si annulla per ω uguale a 2Ω , 3Ω , 4Ω ecc. Il termine S_2 è periodico con periodo Ω e simmetrico rispetto $\Omega/2$. Esso dipende dai valori di b : per $b=0$ il suo valore è costante, per b crescente da 0 ad 1 la sua parte centrale diminuisce via via di ampiezza mentre aumentano i valori la-

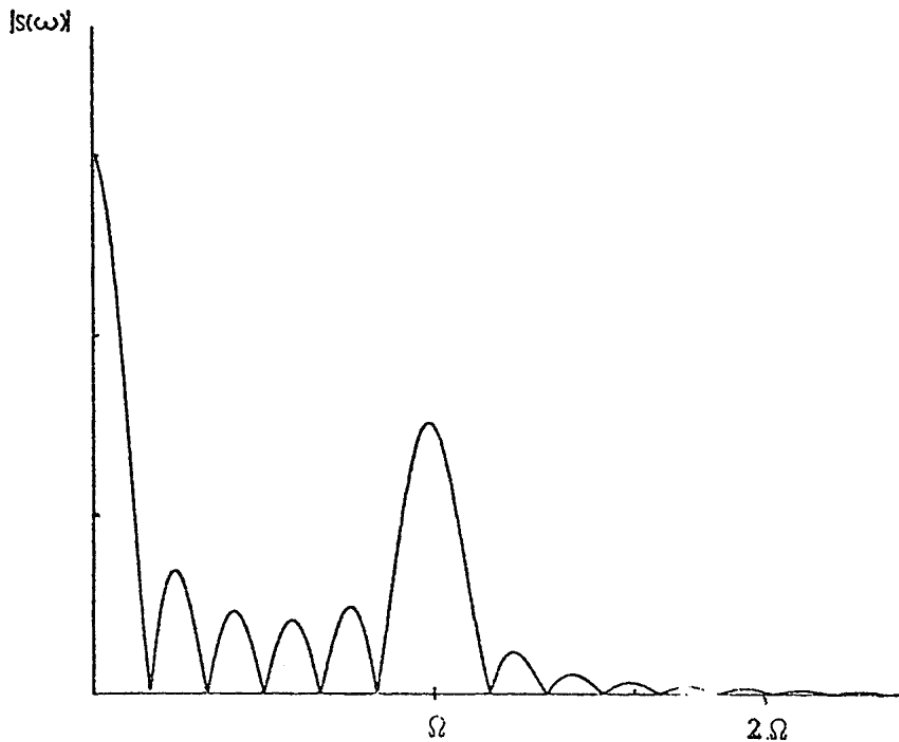


fig. 15

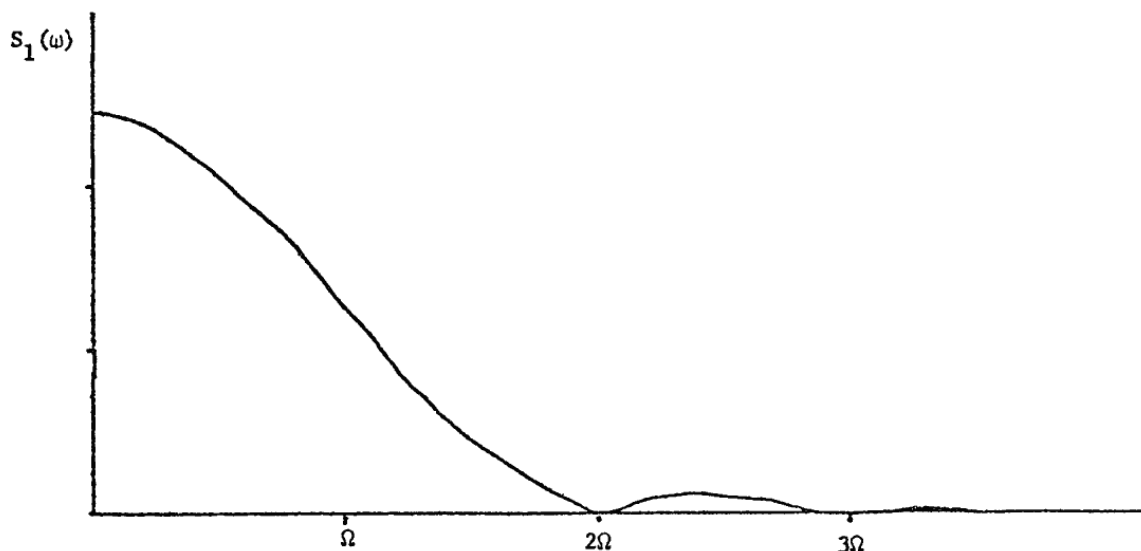


fig. 16

terali. In fig. 17 è rappresentato $|S_2(\omega)|$ per $b=0.8$ e $N=5$. Per $b > 1$, l'ampiezza nel tempo degli impulsi sen^2 è crescente. Invertendo la direzione dell'asse dei tempi si ottiene un segnale con $b' = 1/b$ e con ampiezza aumentata di un fattore b^{N-1} rispetto al precedente. Quindi lo spettro dei due segnali differisce solo per questo fattore moltiplicativo, ma non per la forma. Per b negativo la parte centrale di S_2 cresce quando b si avvicina a -1 , mentre calano i valori agli estremi cioè per $\omega=0$ e $\omega=\Omega$. La zona del formante è quindi in corrispondenza di $\omega=\Omega/2$ ed è più larga che nel caso precedente.

Si osservi che considerando b negativo, equivale ad avere gli impulsi alternati di segno (fig. 18), per cui la componente continua si attenua di molto, fino a sparire per $b=-1$ e N pari. Viene messa in evidenza una forte periodicità a metà frequenza rispetto al caso con b positivo. E' questo effetto che determina lo spostamento del formante.

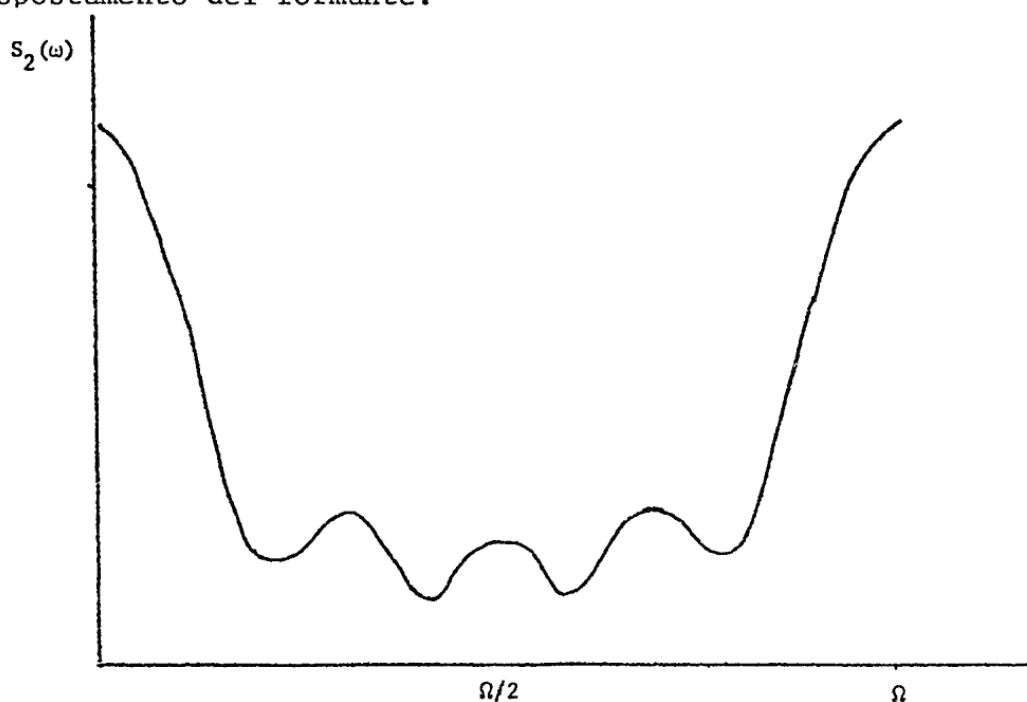


fig. 17

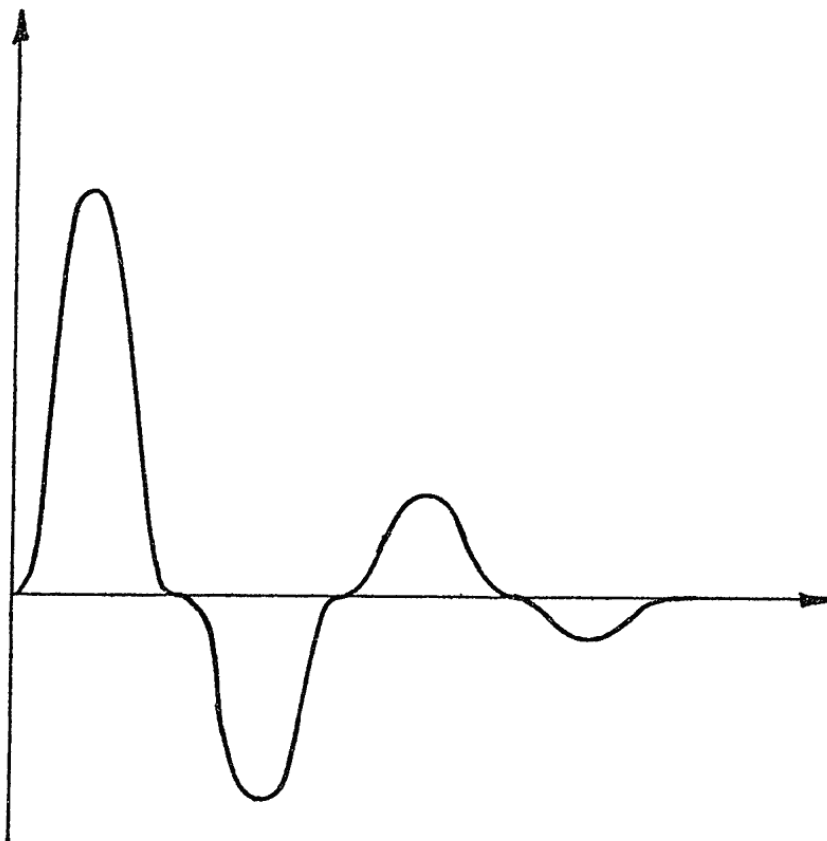


fig. 18

L'influenza del numero N di impulsi consiste nel produrre N oscillazioni in S_2 tra 0 e Ω , maggiormente evidenti per valori di b prossimi a 1 o -1 . Si osservi che per valori di b piccoli non ha senso aumentare di molto N in quanto l'ampiezza di ogni impulso decresce del fattore b e quindi si attenua rapidamente. Oltre ad un certo numero si avrebbero impulsi di ampiezza insignificante.

In conclusione le componenti superiori a 2Ω possono venir trascurate; lo spettro presenta una forte componente in continua e un picco in prossimità di Ω per b positivo e $\Omega/2$ per b negativo quando il segnale viene ripetuto periodicamente, con pulsazione ω_0 , lo spettro diventa discreto e il suo involuopo è dato da $S(\omega)$. Il segnale presenta un formante in prossimità di Ω o $\Omega/2$ e questo lo rende utile per produrre molti suoni musicali, che presentano questa caratteristica.

Ponendo $T' = N \cdot T + M$ periodo del segnale e $\alpha = T'/T$ rapporto tra il periodo del segnale e durata del singolo impulso, risulta anche $\alpha = \Omega/\omega_0$; cioè α indica il numero d'ordine dell'armonica che individua il formante per b positivo, e il doppio del numero d'ordine per b negativo. La banda del segnale è, come visto, circa 2Ω , per cui le armoniche significative sono 2α .

Variando quindi α , la posizione del formante si sposta e variano anche con continuità, ma non nello stesso senso, le ampiezze relative di tutte le armoni-

che, seguendo l'involuppo descritto da $S(\omega)$. E' questa proprietà, oltre alla presenza del formante, che rende l'oscillatore VOSIM efficace nelle applicazioni musicali, in cui le caratteristiche del suono devono essere variabili. L'uso di più oscillatori sincronizzati consente di produrre suoni molto diversi, compresi i principali fonemi delle lingue europee.

Segnali aleatori

Finora sono stati considerati segnali in cui si è supposto di conoscere perfettamente l'andamento in ogni istante; essi vengono chiamati segnali determinati. Accanto ad essi si considerano i segnali aleatori quando l'andamento non è noto, od è noto solo in parte. Si conoscono soltanto alcune caratteristiche medie, dette proprietà statistiche.

Si noti che la distinzione non riguarda l'andamento del segnale, ma soltanto il punto di vista. Le proprietà statistiche sono caratteristiche di una classe di segnali e non di un singolo segnale. Un insieme di segnali aleatori viene rappresentato mediante un processo aleatorio.

Esistono negli elaboratori particolari procedimenti che simulano un processo aleatorio, producendo sequenze di numeri aleatori, o meglio pseudoaleatori. Graficamente vengono rappresentati come in fig. 19. Queste sequenze possono venire usate sia come segnali ad esempio per produrre rumori bianchi o colorati, eventualmente in ingresso ad un filtro; sia come funzione di controllo per dare una variabilità ai vari parametri della sintesi, che risulta molto gradevole all'ascolto. In fig. 20 è rappresentato come si può ottenere un vibrato aleatorio.

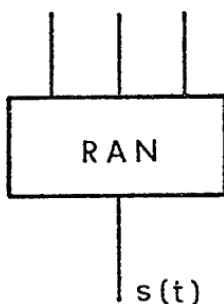


fig. 19

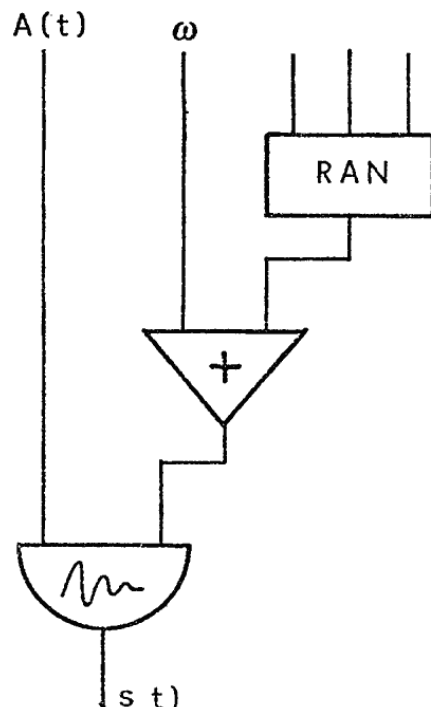


fig. 20

TRASFORMAZIONI LINEARI

Si è visto finora come produrre dei segnali. Vediamo ora come modificarli.

Dato un sistema che trasforma un segnale di ingresso in uno di uscita in base ad un insieme di regole o procedure prefissate, si definisce come trasformazione il modello matematico che descrive il comportamento esterno del sistema.

La trasformazione consiste di due classi di segnali X e Y , che rappresentano rispettivamente la classe dei segnali di ingresso e la classe dei segnali in uscita, e di un funzionale $\phi: x \rightarrow y$ in cui ad ogni segnale $x \in X$ corrisponde uno ed un solo segnale $y = \phi[x] \in Y$. In tale modello le regole di elaborazione sono condensate nel funzionale ϕ .

Una trasformazione si dice lineare se vale il principio di sovrapposizione:

$$\phi[a_1x_1 + a_2x_2] = a_1\phi[x_1] + a_2\phi[x_2]$$

per ogni $a_1, a_2 \in R$ costanti e $x_1, x_2 \in X$

Una trasformazione si dice invariante se la $x(t) \rightarrow y(t)$ implica la $x(t-t_0) \rightarrow y(t-t_0)$ per ogni traslazione t_0 applicabile al segnale di ingresso. Una trasformazione lineare invariante viene chiamata filtro e, nel caso di un ingresso ed una uscita a tempi omogenei, viene descritta nel discreto dalla seguente equazione

$$y(n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} h(n-i) \cdot x(i)$$

La sottoclasse dei filtri numerici più importante nelle applicazioni può venire descritta da un'equazione alle differenze a coefficienti costanti della forma

$$\sum_{k=0}^N a_k y(n-k) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i)$$

dove a_k e b_i sono i coefficienti del filtro

$x(n)$ segnale d'ingresso

$y(n)$ segnale di uscita

Se l'ingresso è una sinusoidale, l'uscita a regime sarà una sinusoidale della stessa frequenza, con ampiezza e fase determinata dal sistema; ciò spiega il nome di filtro attribuito a queste trasformazioni.

Sintesi sottrattiva

Viene chiamata, sebbene impropriamente, sintesi sottrattiva la produzione di suoni mediante filtraggio di una forma d'onda complessa. Prima viene generato con i metodi visti, o altri metodi, un segnale periodico ricco di armoniche o un segnale aleatorio. Esso deve contenere energia in ciascuna frequenza richiesta nel suono finale. Indi vengono usati uno o più filtri per alterare selettivamente le specifiche componenti frequenziali, attenuando (sottraendo) le componenti indesiderate ed eventualmente evidenziando altre. Cambiando i coefficienti del filtro, cambia anche la risposta in frequenza. E' così possibile cambiare le caratteristiche del suono in uscita.

Uno degli aspetti più attrattivi di questa tecnica è che è analoga al funzionamento di molti strumenti musicali acustici e la fisica dello strumento può servire come modello nella sintesi. Ad esempio gli ottoni e i legni usano le labbra o un'ancia vibrante per generare un segnale periodico ricco di armoniche. Le varie cavità e la forma stessa dello strumento funzionano da risuonatori evidenziando certe componenti spettrali e smorzandone altre. Nella voce umana il segnale di eccitazione è costituito da impulsi periodici prodotti dalla glottide per i suoni vocalizzati o da rumore bianco per i suoni non vocalizzati (ad esempio s,z). La gola, la bocca e il naso formano le varie cavità filtranti, che variano di dimensione nel tempo. E' la grande variabilità di queste cavità che rende la voce umana lo strumento musicale più ricco e interessante.

Questo metodo è il più usato attualmente per produrre la voce sintetica. Va però detto che è di uso relativamente difficile e complesso. Infatti i coefficienti del filtro spesso influenzano in maniera complicata e non intuitiva le caratteristiche del filtro. Inoltre i filtri numerici sono molto stabili e precisi ma richiedono molti calcoli.

Una speciale applicazione dei filtri è nella spazializzazione del suono. Si simula cioè un ambiente distribuendo il suono fra i vari altoparlanti e dosando il rapporto tra suono diretto e suono riverberato. Attualmente molti dei riverberatori venduti commercialmente sono numerici. In essi vengono spesso usati speciali filtri, detti passatutto, che non cambiano il contenuto spettrale del suono, ma solo la fase, in modo da separare la riverberazione dalla coloritura del suono.

TRASFORMAZIONI NON LINEARI AD UN INGRESSO

Accanto alle trasformazioni lineari, che hanno larga applicazione anche in altri campi, specialmente nelle ricerche sulla voce e ricerche geologiche, e posseggono una teoria abbastanza matura, vanno diffondendosi da poco nelle applicazioni musicali le trasformazioni non lineari. Più che uno sviluppo omogeneo, in questo campo, si ha l'impiego di alcune particolari trasformazioni tratte principalmente dalla teoria delle comunicazioni elettriche, che si sono rivelate molto promettenti ed efficaci. Basti pensare che da alcuni anni la maggior parte della musica all'elaboratore viene fatta con la modulazione di frequenza.

Le tecniche attualmente impiegate possono distinguersi in due classi:

- trasformazioni istantanee (senza memoria) ad un ingresso in cui se $x(t)$ è il segnale in ingresso e $y(t)$ è il segnale in uscita

$$y(t) = f[x(t)]$$

cioè il valore del segnale in uscita in un certo istante dipende solo dal valore del segnale in ingresso in quell'istante mediante una funzione ad un solo valore. Le tecniche di sintesi di questo tipo sono la distorsione non lineare e la sommatoria discreta;

- modulazioni in cui si hanno due o più ingressi ed un'uscita. Se $x_1(t)$ e $x_2(t)$ sono gli ingressi

$$y(t) = f[x_1(t), x_2(t)]$$

Esempi di questo tipo sono la modulazione ad anello (moltiplicazione), la modulazione di ampiezza e la modulazione di frequenza.

Spesso i segnali di ingresso vengono variati di ampiezza moltiplicandoli per un parametro I , costante o funzione del tempo, chiamato indice di modulazione. Essendo la trasformazione non lineare, il segnale in uscita varia in maniera non banale. E' possibile quindi, agendo su un solo parametro, modificare sostanzialmente le caratteristiche del suono; si rende così estremamente agevole produrre spettri dinamici e variabili.

Si confronti in proposito la quantità di dati necessari per la sintesi additiva.

Queste tecniche si stanno affermando per l'alta efficienza in termini di

calcolo e per la loro versatilità.

I calcoli da effettuare in genere sono pochi ed essendo spesso trasformazione istantanea e invariante nel tempo, essa non viene calcolata ogni volta, ma può essere tabulata all'inizio per tutto il campo di valori che può assumere l'ingresso. Una volta quindi tabulata la funzione, non si fanno più calcoli ma solo si preleva il valore dalla tabella. E' possibile scegliere come si vuole la funzione non lineare ed ottenere interessanti variazioni del timbro agendo su un ridotto numero di parametri (di solito ampiezze) detti indici di modulazione. Ciò offre grande libertà e versalità nell'uso.

Inoltre spesso negli strumenti acustici esistono comportamenti non lineari, che caratterizzano i suoni prodotti. Queste tecniche hanno quindi una corrispondenza nel mondo fisico e realizzano o dilatano queste caratteristiche.

Di seguito verranno trattate abbastanza estesamente le principali proprietà di queste tecniche, in quanto particolarmente rilevanti nell'attuale panorama della computer-music.

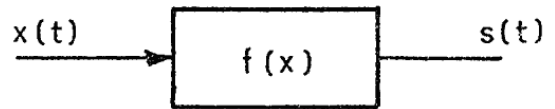
Sintesi per distorsione non lineare

Immaginiamo un segnale di tipo coseno $x(t) = \cos \omega t$ e lo facciamo passare per un amplificatore non lineare (fig. 21). Si verifica una distorsione. La forma d'onda in uscita non sarà più di tipo coseno ma potrà essere scomposta in una somma di termini sinusoidali. Se $f(x)$ è la funzione istantanea ampiezza in ingresso - ampiezza in uscita dell'amplificatore, si otterrà in uscita un segnale $s(t) = f(\cos \omega t)$, trasformato da $f(x)$.

Per analizzare questo segnale e l'influenza del tipo di funzione distorcente, conviene considerare i polinomi di Chebyshev di prima specie.

Posto

$$x = \cos \theta,$$



si definisce il polinomio di Chebyshev di grado n

fig. 21

$$T_n(x) = T_n(\cos \theta) = \cos n \theta$$

Dalla definizione si ricava immediatamente il valore dei primi due polinomi

$$T_0(x) = \cos(0 \cdot \theta) = 1$$

$$T_1(x) = \cos(1 \cdot \theta) = x$$

E' possibile ricavare una relazione ricorsiva che fornisce il valore di un polinomio in funzione dei polinomi di grado inferiore. Infatti dalla relazione trigonometrica

$$\cos n \theta \cdot \cos \theta = \frac{\cos(n+1)\theta + \cos(n-1)\theta}{2}$$

si ricava

$$\cos(n+1)\theta = 2 \cdot \cos \theta \cdot [\cos n \theta - \cos(n-1)\theta]$$

e cioè

$$T_{n+1}(x) = 2 \cdot x \cdot T_n(x) - T_{n-1}(x)$$

Si possono quindi calcolare i successivi polinomi:

$$T_0(x) = 1$$

$$T_1(x) = x$$

$$T_2(x) = 2x^2 - 1$$

$$T_3(x) = 4x^3 - 3x$$

$$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1$$

$$T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x$$

$$T_6(x) = 32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1$$

$$T_7(x) = 64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x$$

Si osservi che questi polinomi pur esistendo su tutto l'asse reale, sono propriamente definiti nell'intervallo $[-1,1]$. E' questo infatti il campo di variabilità di $\cos \theta$.

All'ortogonalità delle funzioni $\cos n \theta$ nell'intervallo $[-\pi, \pi]$ corrisponde l'ortogonalità dei polinomi di Chebishev nell'intervallo $[-1,1]$ secondo la funzione peso $w(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$

Si osservi che se la funzione distortente $f(x)$ coincide con un polinomio di Chebishev

$$f(x) \equiv T_n(x)$$

in corrispondenza ad un segnale in ingresso $x = \cos(\omega t)$ si avrà in uscita $s(t) = f(\cos \omega t) = T_n(\cos \omega t) = \cos n\omega t$ solo l'armonica n-esima. E' possibile quindi produrre qualsiasi spettro composto da coseni

$$s(t) = \sum_i h_i \cos(i \omega t)$$

prendendo come funzione distorcente la corrispondente combinazione lineare di polinomi di Chebyshev

$$f(x) = \sum_i h_i T_i(x)$$

E s e m p i o

Si voglia uno spettro composto dalle prime cinque armoniche con ampiezza $h_1=9, h_2=3, h_3=5, h_4=7, h_5=1$

$$f(x) = 9T_1(x) + 3T_2(x) + 5T_3(x) + 7T_4(x) + 1T_5(x)$$

$$9T_1(x) = \quad \quad \quad 9x$$

$$3T_2(x) = \quad -3 \quad \quad \quad +6x^2$$

$$5T_3(x) = \quad \quad -15x \quad \quad \quad +20x^3$$

$$7T_4(x) = \quad -7 \quad \quad \quad -56x^2 \quad \quad \quad +56x^4$$

$$1T_5(x) = \quad \quad \quad 5x \quad \quad \quad -20x^3 \quad \quad \quad +16x^5$$

$$f(x) = \quad 4 \quad -x \quad -50x^2 \quad \quad \quad +56x^4 \quad +16x^5$$

Nell'intervallo $[-1,1]$ l'ampiezza massima, in valor assoluto, di un polinomio di Chebyshev vale 1. Per cui se gli h_i sono positivi, l'ampiezza massima di questa caratteristica vale $\sum_i h_i$, e cioè alla somma dei pesi di ciascun polinomio di Chebyshev. Nell'esempio precedente il massimo vale: $9+3+5+7+1 = 25$

Esprimiamo ora il calcolo della funzione polinomiale distorcente in forma matriciale. Si supponga di volere in uscita un segnale $s(t) = \sum_j h_j \cos j \omega t$, avendo in ingresso un segnale cosinusoidale. La funzione distorcente vale $f(t) = \sum h_j T_j(x) = \sum_i d_i x^i$. La funzione è sviluppabile sia in termini di polinomi di Chebyshev, sia di serie di potenze. Si tratta di passare da una base all'altra. Vale la relazione

$$\underline{d} = \underline{B} \cdot \underline{h}$$

in cui \underline{d} e \underline{h} sono i vettori colonna contenenti i coefficienti rispettivamente nello sviluppo in serie di potenze e di polinomi di Chebyshev \underline{B} è una matrice avente per prima colonna i coefficienti di T_j secondo x^i (Tab. 1).

$$T_j(x) = \sum_i b_{ij} x^i$$

I coefficienti b_{ij} possono essere ricavati con la stessa relazione vista per i polinomi $T_j(x)$. A partire da

$$b_{00} = 1$$

$$b_{01} = 0$$

$$b_{11} = 1$$

→

$$b_{ij} = 2 b_{i-1,j-1} - b_{i,j-2}$$

confronta

$$T_j = 2x \cdot T_{j-1} - T_{j-2}$$

Si osservi che se invece è dato il polinomio distorto, mediante i coefficienti $\{d_i\}$, è possibile analizzare il risultato, e cioè le armoniche generate risolvendo il sistema

$$\underline{B} \cdot \underline{h} = \underline{d}$$

in cui le h sono incognite. La matrice \underline{B} è triangolare, per cui conviene applicare il metodo di GAUSS, e cioè operare le sostituzioni all'indietro.

In pratica se $P_N(x) = \sum_{i=0}^N d_i x^i$, si calcola anzitutto $h_N = \frac{d_N}{2^{N-1}}$, poi si sottrae $P_{N-1}(x) = P_N - h_N T_N(x)$ abbassando così di 1 il grado del polinomio. Si calcola $h_{N-1} = \frac{d'_{N-1}}{2^{N-2}}$ e si procede iterativamente.

E' possibile esprimere in maniera compatta

$$\underline{h} = \underline{A} \cdot \underline{d} \quad \text{con} \quad \underline{A} = \underline{B}^{-1}$$

La colonna j -esima di A contiene le componenti di x espresse in termine di T_i (Tab. 2).

$$x_j = \sum_{i=0}^j a_{ij} T_i(x)$$

E' possibile ricavare un'espressione ricorsiva, anche se meno semplice. Se

$$(\cos \theta)^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-1} a_{i,n-1} \cos i \theta$$

1	0	-1	0	1	0	-1	0	1	0	-1	0	1
0	1	0	-3	0	5	0	-7	0	9	0	-11	0
0	0	2	0	-8	0	18	0	-32	0	50	0	-72
0	0	0	4	0	-20	0	56	0	-120	0	220	0
0	0	0	0	8	0	-48	0	160	0	-400	0	840
0	0	0	0	0	16	0	-112	0	432	0	-1232	0
0	0	0	0	0	0	32	0	-256	0	1120	0	-3584
0	0	0	0	0	0	0	64	0	-576	0	2816	0
0	0	0	0	0	0	0	0	128	0	-1280	0	6912
0	0	0	0	0	0	0	0	0	256	0	-2816	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	512	0	-6144
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1024	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2048

Tab. 1: Matrice B

1	0	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{3}{8}$	0	$\frac{10}{32}$	0	$\frac{35}{128}$	0	$\frac{126}{512}$	0	$\frac{462}{2048}$
0	1	0	$\frac{3}{4}$	0	$\frac{10}{16}$	0	$\frac{35}{64}$	0	$\frac{126}{256}$	0	$\frac{462}{1024}$	0
0	0	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{4}{8}$	0	$\frac{15}{32}$	0	$\frac{56}{128}$	0	$\frac{84}{512}$	0	$\frac{792}{2048}$
0	0	0	$\frac{1}{4}$	0	$\frac{5}{16}$	0	$\frac{21}{64}$	0	$\frac{84}{256}$	0	$\frac{330}{1024}$	0
0	0	0	0	$\frac{1}{8}$	0	$\frac{6}{32}$	0	$\frac{28}{128}$	0	$\frac{36}{512}$	0	$\frac{495}{2048}$
0	0	0	0	0	$\frac{1}{16}$	0	$\frac{7}{64}$	0	$\frac{36}{256}$	0	$\frac{165}{1024}$	0
0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{32}$	0	$\frac{8}{128}$	0	$\frac{45}{512}$	0	$\frac{220}{2048}$
0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{64}$	0	$\frac{9}{256}$	0	$\frac{55}{1024}$	0
0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{128}$	0	$\frac{10}{512}$	0	$\frac{66}{2048}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{256}$	0	$\frac{11}{1024}$	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{512}$	0	$\frac{12}{2048}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{1024}$	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{2048}$

Tab. 2: Matrice A

$$\cos^n \theta = \cos^{n-1} \theta \cdot \cos \theta = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} a_{i,n-1} \cos(i+1)\theta + \cos(i-1)\theta$$

Vale quindi

$$\begin{aligned} a_{00} &= 1 & a_{0j} &= \frac{1}{2} a_{1,j-1} \\ a_{01} &= 0 & \text{da cui} & a_{ij} = \frac{a_{i+1,j-1} + a_{i-1,j-1}}{2} \quad i \neq 1 \\ a_{11} &= 1 & & a_{ij} = \frac{a_{2,j-1}}{2} + a_{0,j-1} \quad i = 1 \end{aligned}$$

infatti $\cos -\theta = \cos \theta$

Spettri dinamici

Analizziamo cosa succede se variamo l'ampiezza del coseno in ingresso. Se $f(x) = \sum_i d_i x^i$, e $x(t) = I \cos \omega t$ ottengo

$$s(t) = f(I \cos \omega t) = \sum_i d_i (I \cos \omega t)^i = \sum_i d_i I^i (\cos \omega t)^i$$

E' come se avessi cambiato la $f(x)$ e quindi la caratteristica. Posto

$$\bar{d}_i = d_i I^i \quad \text{risulta} \quad s(t) = \sum \bar{d}_i (\cos \omega t)^i$$

$$\underline{h} = \underline{A} \cdot \underline{\bar{d}} = \underline{A} \begin{pmatrix} d_0 \\ d_1 I \\ d_2 I^2 \\ \vdots \\ d_n I^n \end{pmatrix}$$

E' come se ogni coefficiente d_i del polinomio fosse moltiplicato per I^i . L'ampiezza delle armoniche risultanti dipende da I . Si ha che:

$$h_i(I) = \sum_{ij} a_{ij} d_j I^j$$

Essendo A una matrice triangolare, l'ampiezza di ogni armonica è un polinomio in I di grado n . I coefficienti di questo polinomio sono dati dal prodotto della riga i -esima di \underline{A} per i coefficienti del polinomio distorcente.

Sono presenti inoltre solo i monomi, pari per i pari e dispari per i dispari, compresi tra i e n . In particolare l'ampiezza delle ultime due armoniche varia secondo un monomio di I . Questo fatto è caratteristico della distorsione mediante un polinomio. Ogni colonna di A è il contributo, in armoniche di un singolo monomio del polinomio, il cui contributo è proporzionale a d_j (suo coefficiente).

Variando quindi l'indice I varia anche lo spettro risultante e le proporzioni tra le armoniche. E' questa la proprietà che rende interessante questa tecnica di sintesi.

In fig. 22 è rappresentata graficamente la tecnica di sintesi per distorsione non lineare con indice I variabile. Va osservato che si è usato per la derivazione delle formule un ingresso costituito da un coseno. Se si usa invece un seno, non cambia la forma d'onda, a parte una traslazione nel tempo. E' quindi consigliabile in genere usare un seno, in quanto parte da zero. Si evita così una possibile discontinuità all'inizio.

Esempio di calcolo degli spettri dinamici

$$p(x) = 2x^2 + x - 1$$

$$h_2(I) = I^2$$

$$h_1(I) = I$$

$$h_0(I) = I^2 - 1$$

E s e m p i o

$$p(x) = 16x^5 + 56x^4 - 50x^2 - x - 4$$

$$h_5(I) = \frac{16}{16} I^5 = I^5$$

$$h_4(I) = \frac{56}{8} I^4 = 7 I^4$$

$$h_3(I) = \frac{5}{16} 16 I^5 = 5 I^5$$

$$h_2(I) = \frac{4}{8} 56 I^4 - \frac{1}{2} 50 I^2 = 28 I^4 - 25 I^2$$

$$h_1(I) = \frac{10}{16} 16 I^5 - I = 10 I^5 - I$$

$$h_0(I) = \frac{3}{8} 56 I^4 - \frac{1}{2} 50 I^2 + 4 = 21 I^4 - 25 I^2 + 4$$

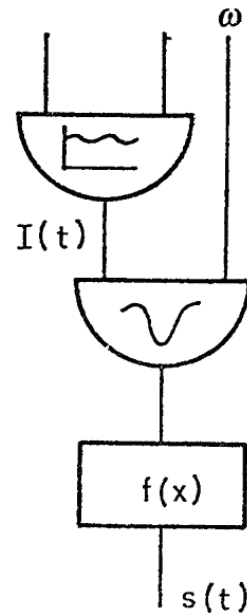


fig. 22

Si osservi che

$$h_5(1)=1, \quad h_4(1)=7, \quad h_3(1)=5, \quad h_2(1)=3, \quad h_1(1)=9, \quad h_0(1)=0$$

come era stato visto precedentemente, nel caso di spettro statico.

Normalizzazione dell'ampiezza

Al variare dell'indice di modulazione I varia anche l'ampiezza del suono in uscita. Questa può essere compensata secondo criteri differenti, mediante un'opportuna funzione di normalizzazione che moltiplichi l'uscita della distorsione. Un criterio è la normalizzazione del valore efficace

$$V_{\text{eff}}(I) = \sqrt{\sum_{i=0}^n h_i^2(I)}$$

Il valore efficace dipende dalla caratteristica distorcente e dall'indice di modulazione. Il segnale normalizzato sarà quindi

$$s_{\text{NORM}}(t) = \frac{f(I \cos \omega t)}{V_{\text{eff}}(I)}$$

Un altro criterio è la normalizzazione rispetto al massimo valore di picco

$$V_{\text{MAX}}(I) = \max_{-I \leq \alpha \leq I} |f(\alpha)|$$

E' questa una funzione non decrescente composta da segmenti di f congiunti da tratti orizzontali.

In genere il segnale non avrà ampiezza costante, ma seguirà un certo inviluppo, e quindi il segnale normalizzato in ampiezza, viene poi ulteriormente variato. Si cerca quindi di evitare la normalizzazione, combinandola nell'involuppo di ampiezza in maniera sperimentale e/o intuitiva, avendo considerate le curve di normalizzazione. E' consigliabile anche scegliere i coefficienti pari del polinomio a segni alternati; analogamente quelli dispari. Convieni seguire cioè questo modello: + + - - + + - - E' consigliabile inoltre non interrompere bruscamente l'ampiezza della h_i e cioè limitare bruscamente la banda. Ciò infatti determina uno spettro molto irregolare al variare dell'indice di modulazione I.

Si osservi inoltre che i parametri pari e dispari sono indipendenti; infatti i coefficienti pari producono solo parziali pari, i coefficienti dispari solo parziali dispari. E' opportuno inoltre porre $d_0=0$ per evitare clic di inizio o alla fine del suono. Si avrebbe infatti una discontinuità.

Ingresso composto

Se il segnale in ingresso è un coseno più una costante $z(t) = \alpha + \beta \cos \omega t$ o, in generale la combinazione lineare di coseni le cui pulsazioni sono multiple di una fondamentale e cioè $z(t) = \sum_{k=0}^n r_k \cos k \omega t$ posto $\bar{x} = \cos \omega t$ e $\underline{q} = \underline{B} \cdot \underline{r}$

$$z(t) = \sum_0^n r_k T_k(\bar{x}) = \sum_0^n q_k (\bar{x})^k$$

Anche $(z(t))^2$, $(z(t))^3$ ecc. sono polinomi trigonometrici in \bar{x} . Pongo quindi

$$(z(t))^i = \sum_0^{i \cdot n} c_{ki} (\bar{x})^k \quad \text{essendo} \quad c_{k1} = q_k \quad \text{per} \quad k=0,1,\dots,n$$

Se la funzione distorcente è un polinomio $f(t) = \sum d_i x^i$ per $x = z(t)$ si ha:

$$s(t) = f(z(t)) = \sum d_i x^i = \sum_i d_i \sum_k c_{ki} (\bar{x})^k = \sum_k \sum_i d_i c_{ki} (\bar{x})^k$$

e posto

$$\bar{d}_k = \sum_i d_i c_{ki} \rightarrow = \sum_k \bar{d}_k (\bar{x})^k$$

In forma matriciale

$$\underline{h} = \underline{A} \cdot \underline{C} \cdot \underline{d}$$

essendo la colonna i -esima di C costituita dalle componenti di $(z(t))^i$ rispetto alle potenze di \bar{x} .

Ad esempio $z(t) = \alpha + \beta \cos \omega t$

$$\underline{C} = \begin{vmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 & \alpha^3 & \cdot \\ & & 2\alpha\beta & 3\alpha^2\beta & \cdot \\ & & \beta^2 & 3\alpha\beta^2 & \cdot \\ & & & \beta^3 & \cdot \end{vmatrix}$$

Se n è il grado del polinomio in ingresso ed m il grado del polinomio di distorcente la matrice C avrà $(n \cdot m + 1)$ righe e $(m + 1)$ colonne.

Se l'ingresso non è una semplice senoide si complica l'analisi del risultato della distorsione. Per una trattazione analitica si rimanda alla bibliografia (Reinhart et al.). Qui interessa dare alcuni risultati qualitativi.

Se l'ingresso è costituito da due coseni di pulsazione rispettivamente ω_1 e ω_2

$$x = I_1 \cos \omega_1 t + I_2 \cos \omega_2 t$$

e la funzione distortente è un polinomio di grado N , saranno presenti tutte le componenti a pulsazione $m\omega_1 \pm n\omega_2$ ($0 \leq m \leq N$ e $0 \leq n \leq N$) e con ampiezza esprimibile come un polinomio di grado N in I_1 e I_2 . Questa situazione si verifica negli strumenti tradizionali quando producono i suoni multifonici, suoni con più altezze distinguibili.

TRASFORMAZIONI NON LINEARI A PIU' INGRESSI

Modulazione ad anello (moltiplicazione)

Si chiama modulazione ad anello o sintesi moltiplicativa il prodotto nel tempo tra due segnali.

Se $x_1(t)$ e $x_2(t)$ sono i due segnali in ingresso, l'uscita vale

$$s(t) = x_1(t) \cdot x_2(t)$$

La rappresentazione grafica è illustrata in fig. 23.

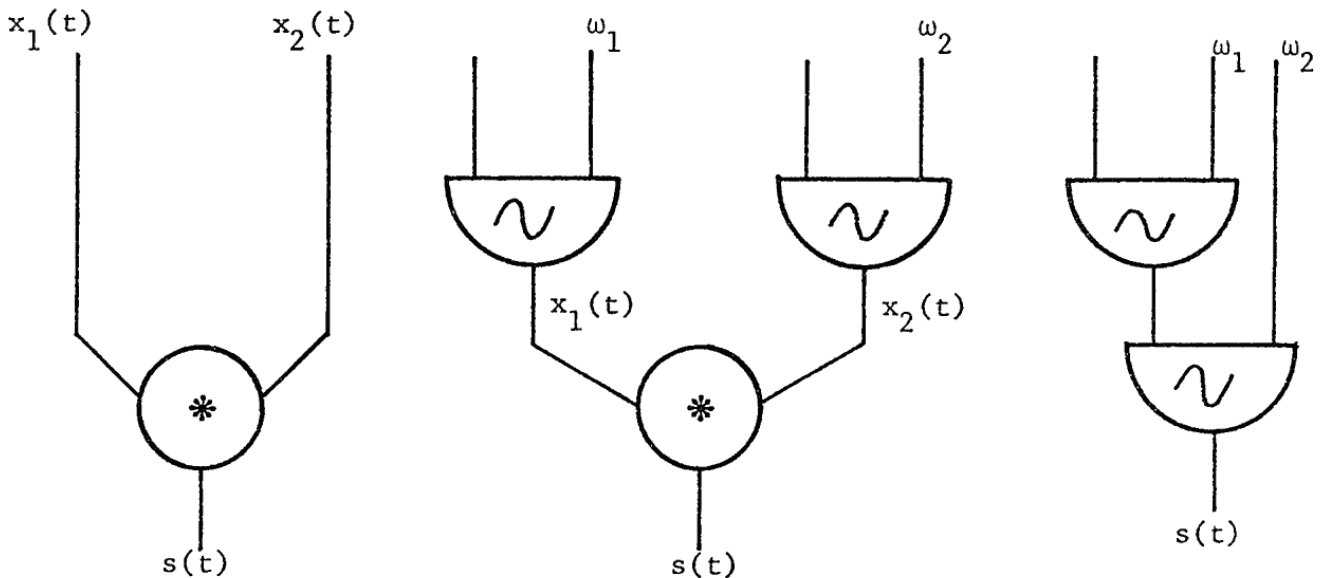


fig. 23

La moltiplicazione di funzioni nel tempo equivale, nel dominio della frequenza, alla convoluzione dei loro spettri.

Vediamo prima un esempio.

Dalla seguente identità trigonometrica

$$\cos\alpha \cdot \cos\beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)]$$

si ricava che nel caso di 2 segnali in ingresso di tipo sinusoidale

$$x_1(t) = \cos(\omega_1 t + \phi_1)$$

$$x_2(t) = \cos(\omega_2 t + \phi_2)$$

$$s(t) = x_1(t) \cdot x_2(t) = \frac{1}{2} \cos [(\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2] + \\ + \frac{1}{2} \cos [(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2]$$

Ciò corrisponde quindi ad avere due segnali sinusoidali di pulsazione $\omega_1 + \omega_2$ e $\omega_1 - \omega_2$. Se ad esempio x_1 ha frequenza 400 Hz e x_2 ha frequenza 100 Hz, il suono risultante ha due componenti di frequenza 500 Hz e 300 Hz.

Se $x_1(t) = \cos \Omega t$ è un segnale cosinusoidale di pulsazione Ω e $x_2(t)$ è un segnale qualsiasi con spettro $X_2(\omega)$, il segnale generato moltiplicando nel tempo i due segnali

$$s(t) = x_1(t) \cdot x_2(t)$$

ha lo spettro dato da

$$S(\omega) = \frac{1}{2} [X_2(\omega + \Omega) + X_2(\Omega - \omega)]$$

Si hanno perciò due bande laterali simmetriche rispetto Ω e di ampiezza metà rispetto a x_2 . In particolare se $x_2(t)$ è periodico, può essere rappresentato con la serie di Fourier

$$x_2(t) = \sum_{k=1}^N b_k \cos(k \omega_2 t + \phi_k)$$

e il segnale risultante

$$s(t) = \cos \Omega t \cdot \sum_{k=1}^N b_k \cos(k \omega_2 t + \phi_k) = \\ = \sum_{k=1}^N \frac{b_k}{2} \{ \cos [(\Omega + k\omega_2)t + \phi_k] + \cos [(\Omega - k\omega_2)t - \phi_k] \}$$

In definitiva a prescindere dalla fase, risulta un segnale composto da parziali di pulsazione $|\Omega \pm k\omega|$ con $k > 0$, formula questa molto tipica dei metodi di sintesi non lineari. Più avanti verranno dati dei criteri di scelta di Ω e ω e di in

interpretazione per questo tipo di suoni. Con riferimento alle comunicazioni elettriche x_1 viene chiamata portante e x_2 modulante,

Se x_1 è un coseno con fase iniziale diversa da zero

$$x_1(t) = \cos(\Omega t + \alpha)$$

questo sfasamento si riproduce nelle singole componenti. Ciò ha importanza solo se vi sono sovrapposizioni di componenti ad ugual frequenza. In tal caso si deve fare la somma tenendo conto delle fasi degli addendi.

Se x_1 è periodico anche esso può essere scomposto in serie di Fourier

$$x_1(t) = \sum_1^M a_k \cos(k\Omega t + \theta_k)$$

Vi saranno quindi attorno ad ogni parziale di x_1 le bande laterali con ampiezza proporzionale all'ampiezza delle parziali. Le componenti presenti hanno pulsazione del tipo $|k\Omega \pm i\omega|$.

Se $\Omega \leq M \cdot \omega$, cioè se Ω è minore della banda di x_2 , allora le varie bande laterali si intersecano, con possibili sovrapposizioni delle componenti. In questo caso va fatta la somma delle ampiezze tenendo conto delle fasi.

Modulazione d'ampiezza (AM)

Con la modulazione ad anello eseguendo il prodotto tra un segnale sinusoidale (portante) ed uno qualsiasi, nello spettro risultante scompare la componente corrispondente alla portante. E' possibile introdurla eseguendo un differente tipo di modulazione, chiamato modulazione di ampiezza.

La formula della modulazione di ampiezza è

$$s(t) = x_1(t) \cdot (1 + x_2(t)) = x_1(t) + x_1(t) \cdot x_2(t)$$

La rappresentazione grafica è illustrata in fig. 24.

L'effetto risultante è quello della modulazione ad anello con sommata la portante. Nel caso di portante sinusoidale e modulante periodica si ottiene uno spettro composto da parziali di pulsazione $|\Omega \pm k\omega|$ con $k=0,1,\dots,M$. Si è usato il modulo in quanto può risultare che la pulsazione di alcune componenti sia negativa, ma ciò equivale ad un cambiamento di fase. All'ascolto la fase non ha importanza, se non vi sono componenti sovrapposte. Variando l'ampiezza della modulante, in uscita varia proporzionalmente l'ampiezza delle bande laterali ri-

spetto alla portante.

Con questo tipo di modulazione è possibile trasformare uno spettro armonico (contenente cioè parziali con frequenza multipla della fondamentale, secondo numeri interi) in suoni di spettro inarmonico. Usata quindi in combinazione con le altre tecniche, ne arricchisce di molto le possibili applicazioni.

Sintesi per modulazione di frequenza e di fase

Consideriamo un segnale sinusoidale caratterizzato da pulsazione ω_c e fase iniziale ϕ . Immaginiamo che la fase non sia costante nel tempo. Si avrà

$$s(t) = \text{sen}(\omega_c t + \phi(t))$$

Analizziamo ora lo spettro nel caso che anche $\phi(t)$ sia sinusoidale con pulsazione ω_m e ampiezza I

$$\phi(t) = I \text{sen} \omega_m t$$

Posto $C = \omega_c t$, $\theta = \omega_m t$, risulta

$$s(t) = \text{sen}(C + I \text{sen} \theta) = \text{sen} C \cos(I \text{sen} \theta) + \cos C \cdot \text{sen}(I \text{sen} \theta)$$

Per sviluppare questa espressione si usano le seguenti relazioni

$$\cos(I \text{sen} \theta) = \sum_{k \text{ pari}} J_k(I) \cos k \theta = J_0(I) + 2[J_2(I) \cos 2 \theta + J_4(I) \cos 4 \theta + \dots]$$

$$\text{sen}(I \text{sen} \theta) = \sum_{k \text{ dispari}} J_k(I) \text{sen} k \theta = 2[J_1(I) \text{sen} \theta + J_3(I) \text{sen} 3 \theta + \dots]$$

dove $J_k(x)$ è la funzione di Bessel del primo tipo e del k-esimo ordine. Le funzioni di Bessel hanno le seguenti proprietà

$$J_k(-x) = J_k(x) \quad \text{simmetria}$$

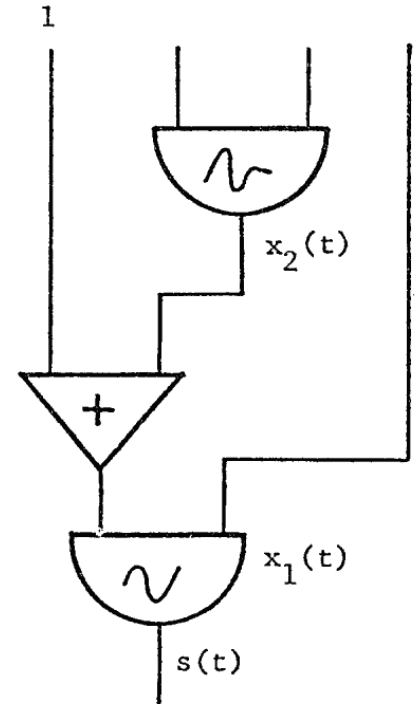


Fig. 24

$$J_{-k}(x) = (-1)^k J_k(x) \rightarrow \begin{array}{l} k \text{ pari} \quad J_{-k}(x) = J_k(x) \\ k \text{ dispari} \quad J_{-k}(x) = -J_k(x) \end{array}$$

Sostituendo queste espressioni nel segnale si ottiene

$$s(t) = \sin C \cdot \sum_{k \text{ pari}} J_k(I) \cos k\theta + \cos C \cdot \sum_{k \text{ dispari}} J_k(I) \sin k\theta$$

che può essere vista come la somma di due modulazioni ad anello

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \sum_{k \text{ pari}} J_k(I) \sin(C+k\theta) + \frac{1}{2} \sum_{k \text{ pari}} J_k(I) \sin(C-k\theta) + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{k \text{ dispari}} J_k(I) \sin(C+k\theta) - \frac{1}{2} \sum_{k \text{ dispari}} J_k(I) \sin(C-k\theta) \end{aligned}$$

Le sommatorie si estendono da $-\infty$ a $+\infty$ per cui si può sostituire k con $-k$ nel secondo addendo,

$$\sum_{k \text{ pari}} J_k(I) \sin(C-k\theta) = \sum_{k \text{ pari}} J_{-k}(I) \sin(C+k\theta) = \sum_{k \text{ pari}} J_k(I) \sin(C+k\theta)$$

essendo $J_{-k} = J_k(x)$, risulta quindi uguale al 1° addendo.

Analogamente nel 4° addendo

$$\sum_{k \text{ dispari}} J_k(I) \sin(C-k\theta) = \sum_{k \text{ dispari}} J_{-k}(I) \sin(C+k\theta) = - \sum_{k \text{ dispari}} J_k(I) \sin(C+k\theta)$$

essendo $J_{-k} = -J_k$ per k dispari, risulta quindi uguale al 2° addendo.

Risulta infine

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{k \text{ pari}} J_k(I) \sin(C+k\theta) + \sum_{k \text{ dispari}} J_k(I) \sin(C+k\theta) = \\ &= \sum J_k(I) \sin(C+k\theta) = \sum J_k(I) \sin(\omega_c + k\omega_m)t \end{aligned}$$

Lo spettro di un'onda modulata in fase contiene quindi componenti alla frequenza somma e differenza della portante ω_c con le varie armoniche intere della modulante ω_m ($\omega_c + k\omega_m$ con $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

E' dimostrato dalla proprietà delle funzioni di Bessel che le ampiezze delle componenti alle frequenze laterali cadono rapidamente non appena l'ordine delle armoniche supera l'indice di modulazione.

Pulsazione istantanea

Dato un segnale del tipo $s(t) = \text{sen}(\psi(t))$ la derivata della fase viene chiamata pulsazione istantanea

$$\omega_i(t) = \frac{d\psi(t)}{dt}$$

Nel caso della modulazione di fase sopra esaminata

$$s(t) = \text{sen}(\omega_c t + I \text{sen } \omega_m t)$$
$$\omega_i(t) = \frac{d(\omega_c t + I \text{sen } \omega_m t)}{dt} = \omega_c + I \omega_m \cos \omega_m t$$

la pulsazione istantanea varia attorno ω_c proporzionalmente a $d = I \omega_m$, che è la massima deviazione della pulsazione istantanea attorno a ω_c .

Modulazione di frequenza

Si parla di modulazione di frequenza quando la pulsazione istantanea non è costante, ma varia nel tempo attorno ad un certo valore secondo una funzione del tempo, detta modulante.

$$\omega_i(t) = \omega + \xi(t) \quad \text{essendo } \xi(t) \text{ la modulante}$$

La fase istantanea di questo segnale è l'integrale della pulsazione istantanea

$$\psi(t) = \int (\omega + \xi(t)) dt = \omega t + \int \xi(t) dt$$

e cioè

$$s(t) = \text{sen}(\omega t + \int \xi(t) dt)$$

Attraverso l'integrazione della funzione modulante in frequenza si passa alla modulazione di fase.

Se si sceglie come modulante di frequenza

$$\xi(t) = d \cos \omega_m t = I \omega_m \cos \omega_m t$$

si ottiene

$$s(t) = \text{sen}(\omega_c t + I \text{sen } \omega_m t)$$

che è l'espressione prima studiata nella modulazione di fase. Lo spettro sarà quindi lo stesso

$$s(t) = \sum J_k(I) \text{sen}(\omega_c + k\omega_m)t$$

Nella figura 25 sono riportati gli andamenti delle funzioni di Bessel del primo tipo e di ordine 0,1; 2,3; 4,5. Con questi grafici è possibile ricavare lo spettro risultante.

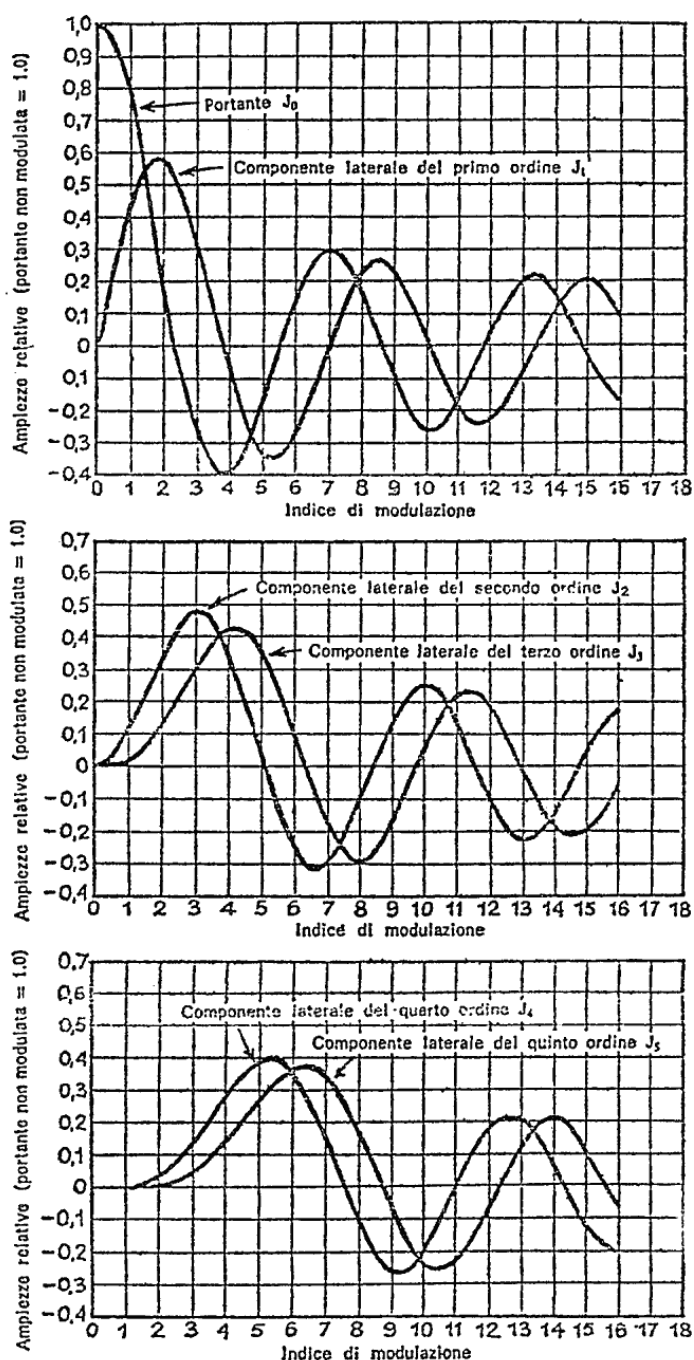


fig. 25

In fig. 26 è illustrato come varia lo spettro al variare dell'indice di modulazione.

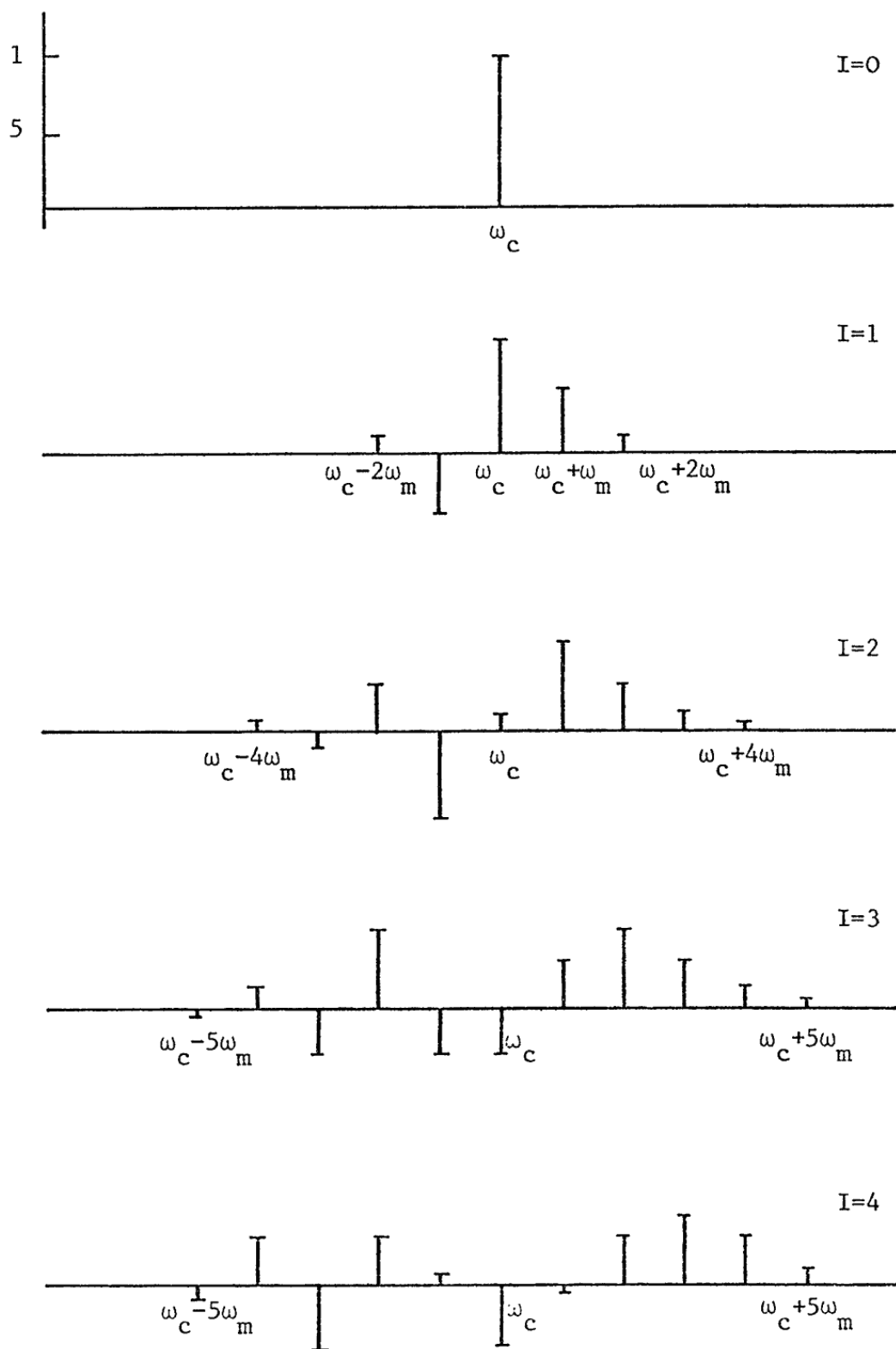


fig. 26

Se ω_c non è molto maggiore di ω_m , può accadere che, per alcuni valori di k , le frequenze dei termini componenti lo spettro siano negative. Essendo lo spettro composto da una somma di termini sinusoidali e valendo la relazione

$$\text{sen}(-\theta) = -\text{sen}\theta = \text{sen}(\theta-\pi)$$

una frequenza negativa può essere interpretata come una frequenza positiva con inversione di fase. Ciò corrisponde a pensare, quando si studia uno spettro di termini sinusoidali che deriva da una formula del tipo $\omega_c + k\omega_m$, con k intero qualsiasi, che le componenti si ribaltano attorno allo zero cambiando segno. Queste componenti ribaltate vanno a sommarsi algebricamente con quelle eventualmente preesistenti alla stessa frequenza.

Nella figura 27 è illustrato il caso di $\omega_m = \omega_c$ ed $I=4$ prima e dopo il ribaltamento della frequenza negativa.

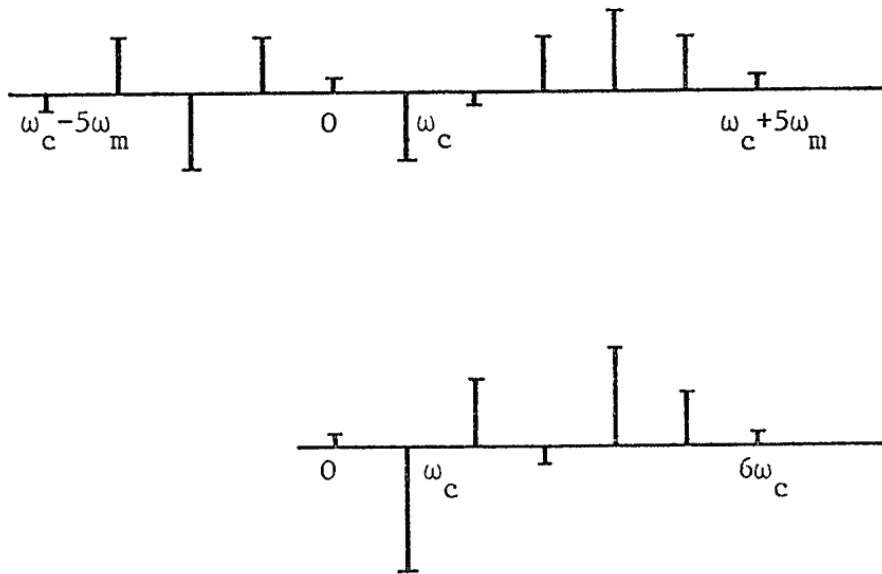


fig. 27

Al variare dell'indice di modulazione I , varia non solo l'ampiezza delle componenti laterali ma anche il modo di combinarsi in presenza di ribaltamenti.

E' da osservare che se le componenti fossero di tipo coseno, il ribaltamento avverrebbe senza inversione di fase. Infatti

$$\cos(-\theta) = \cos\theta$$

In figura 28 e 29 sono riportate le rappresentazioni grafiche della modula-

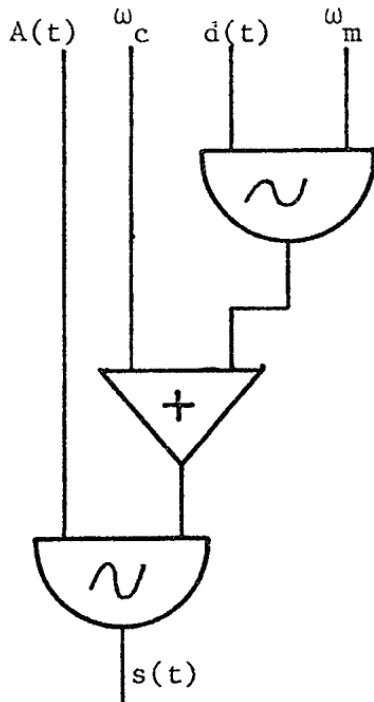


fig. 28

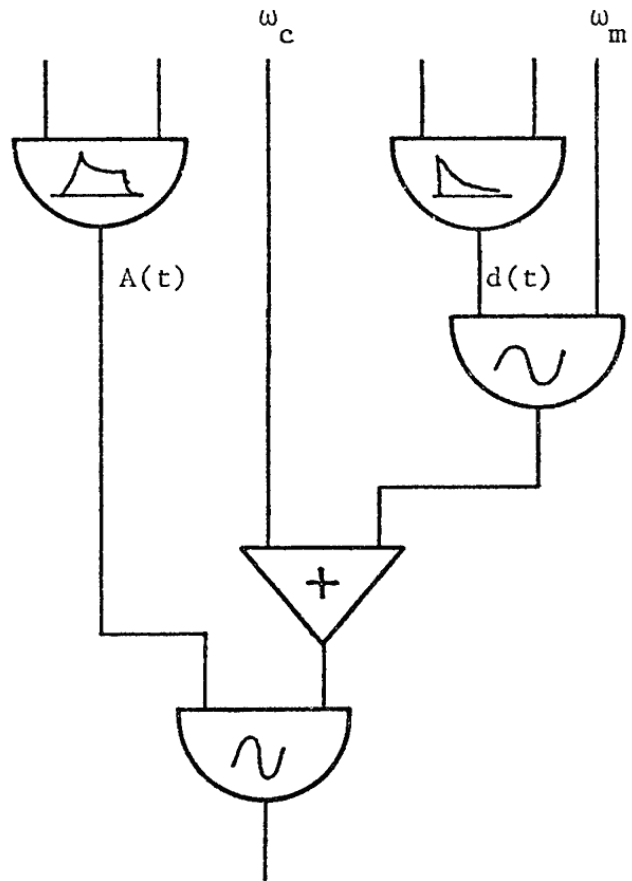


fig. 29

zione di frequenza nel caso di portante e modulante semplici.

Scelta del rapporto portante-modulante

Le considerazioni che seguono valgono per tutti gli spettri, le cui componenti abbiano frequenze del tipo $|C+km|$ dove

- C = frequenza portante
- m = frequenza modulante
- k = intero qualsiasi

Vale quindi anche per i suoni trasformati mediante modulazioni di tipo multiplicativo. Lo spettro è caratterizzato dal rapporto C/m. Se questo rapporto è un numero razionale, può essere espresso come una frazione irriducibile

$$\frac{C}{m} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{dove} \quad N_1 \text{ e } N_2 \text{ sono numeri interi primi tra loro.}$$

In questo caso il suono risultante è armonico, nel senso che le varie componenti sono multiple, secondo fattori interi, di una fondamentale.

La frequenza della fondamentale è data da:

$$f_0 = \frac{C}{N_1} = \frac{m}{N_2}$$

e la portante è la N_1 -esima armonica.

Se $N_2 = 1$ sono presenti tutte le armoniche e le bande laterali si sovrappongono fra di loro.

Se $N_2 = 2$ sono presenti solo le armoniche dispari e le bande laterali si sovrappongono fra di loro.

Se $N_2 = 3$ mancano le armoniche multiple di 3.

Il rapporto è anche indice dell'armonicità o "armoniosità" dello spettro, intendendo con questo termine la gradevolezza all'ascolto data dalla fusione delle componenti. Intuitivamente, più il rapporto C/m è semplice, più il suono è armonioso. Formalmente, minore è il minimo comune multiplo, più il suono è armonioso. Quindi se N_1/N_2 è in forma irriducibile, minore è il prodotto $N_1 \cdot N_2$.

I rapporti possono essere raggruppati in famiglie. Tutti i rapporti del tipo $\frac{|C+km|}{m}$, $k \in \mathbb{Z}$, producono le stesse componenti del rapporto C/m . Cambia solo quella parziale coincide con la portante (C).

E s. $\frac{2}{3}$ $\frac{5}{3}$ $\frac{1}{3}$ $\frac{4}{3}$ $\frac{7}{3}$ ecc.

Sono assenti solo le armoniche multiple di 3 (cfr. $N_2 = 3$) e la portante sarà rispettivamente la seconda, la quinta, la prima, la quarta, la settima ecc. armonica.

Il rapporto che individua una famiglia si dice in forma normalizzata se è minore od uguale ad $\frac{1}{2}$.

Nell'esempio precedente

$$\frac{C}{m} = \frac{1}{3}$$

Ogni famiglia è quindi caratterizzata da un rapporto in forma normalizzata. Se il numeratore del rapporto in forma normalizzata è 1 allora in quella famiglia la fondamentale è presente e quindi il suono risulta più armonioso. Per avere spettri diversi si ricorre a suoni di famiglie diverse.

Se il rapporto C/m è irrazionale, il suono risultante non è periodico e quindi sarà inarmonico. E' adatto quindi alla simulazione delle percussioni.

Influenza della fase iniziale

Esaminiamo come si modificano le formule sopraricavate se cambia la fase iniziale della portante o della modulante

$$s(t) = \text{sen}(C + I \text{ sen}\theta) = \sum_k J_k(I) \text{sen}(C+k\theta)$$

Il cambiamento della fase iniziale della portante equivale a sostituire a $C \rightarrow C'+\alpha$.
Si ottiene

$$s(t) = \text{sen}(C' + \alpha + I \text{ sen}\theta) = \sum_k J_k(I) \text{sen}(C'+\alpha+k\theta)$$

Ad esempio se $\alpha = \frac{\pi}{2}$ equivale ad avere portante cosinusoidale

$$\begin{aligned} \cos(C' + I \text{ sen}\theta) &= \text{sen}(C' + \frac{\pi}{2} + I \text{ sen}\theta) = \\ &= \sum_k J_k(I) \text{sen}(C' + \frac{\pi}{2} + k\theta) = \sum_k J_k(I) \cos(C'+k\theta) \end{aligned}$$

Il segnale invece che in sommatoria di seni, viene scomposto in sommatoria di co seni. Quando le componenti si ribaltano attorno allo zero, non c'è inversione di fase.

Il cambiamento della fase iniziale della modulante di fase equivale a sostituire a $\theta \rightarrow \theta'+\alpha$. Si ottiene

$$s(t) = \text{sen}(C + I \text{ sen}(\theta'+\alpha)) = \sum_k J_k(I) \text{sen}(C+k(\theta'+\alpha))$$

Ad esempio, se $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$$\text{sen}(C + I \cos\theta') = \text{sen}(C + I \text{ sen}(\theta'+\frac{\pi}{2})) = \sum_k J_k(I) \text{sen}(C+k(\theta'+\frac{\pi}{2}))$$

Doppia modulante

Finora si è esaminato il caso in cui sia la portante che la modulante sono semplici sinusoidi. Esaminiamo ora il caso in cui il segnale modulante sia composto da due sinusoidi (fig. 30), ciascuna con il suo indice di modulazione. Ciò dà luogo alle seguenti due equazioni

$$s(t) = \text{sen}(\omega_c t + I_1 \text{ sen } \omega_1 t + I_2 \text{ sen } \omega_2 t) \quad \text{modulazione di fase}$$

$$s(t) = \text{sen}(\omega_c + d_1 \cos \omega_1 t + d_2 \cos \omega_2 t) \quad \text{corrispondente modulazione di frequenza ove } d_1 = \omega_1 I_1 \quad d_2 = \omega_2 I_2$$

Le due equazioni descrivono lo stesso segnale. Per ricavare lo spettro, consideriamo la modulazione di fase.

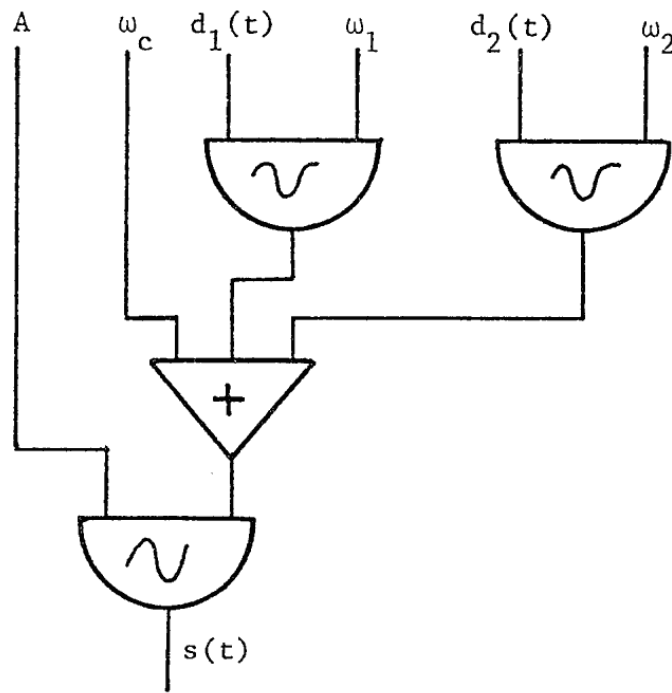


fig. 30

Posto

$$\begin{aligned} \omega_1 t &= \theta_1 \\ \omega_2 t &= \theta_2 \\ \omega_c t &= C \end{aligned}$$

si ha

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{sen}(\omega_c t + I_1 \text{sen} \omega_1 t + I_2 \text{sen} \omega_2 t) = \\ &= \text{sen}(C + I_1 \text{sen} \theta_1 + I_2 \text{sen} \theta_2) \end{aligned}$$

Posto inoltre $C_1 = C + I_2 \text{sen} \theta_2$, normale modulazione di fase con una modulante,

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{sen}(C_1 + I_1 \text{sen} \theta_1) = \\ &= \sum J_k(I_1) \text{sen}(C_1 + k\theta_1) = \\ &= \sum_k J_k(I_1) \text{sen}(C + I_2 \text{sen} \theta_2 + k\theta_1) \end{aligned}$$

Posto ora $C_2 = C + k\theta_1$

$$= \sum_k J_k(I_1) \text{sen}(C_2 + I_2 \text{sen} \theta_2)$$

corrisponde cioè ad una modulazione di fase usando come portanti tutte le compo-

nenti generate dalla prima modulante. Sviluppando si ha

$$\begin{aligned} &= \sum_k J_k(I_1) \sum_n J_n(I_2) \text{sen}(C_2 + n\theta_2) = \\ &= \sum_k \sum_n J_k(I_1) J_n(I_2) \text{sen}(C + k\theta_1 + n\theta_2) = \\ &= \sum_k \sum_n J_k(I_1) J_n(I_2) \text{sen}(\omega_c + k\omega_1 + n\omega_2)t \end{aligned}$$

Si hanno perciò tutte le componenti con pulsazione

$$|\omega_c + k\omega_1 + n\omega_2| \quad \text{con} \quad \begin{aligned} k &= 0 \pm 1 \pm 2 \dots \\ n &= 0 \pm 1 \pm 2 \dots \end{aligned}$$

e ciascuna componente ha ampiezza $J_k(I_1)J_n(I_2)$.

Modulante composta

In generale se la modulante è composta da più componenti (fig. 31) si ha

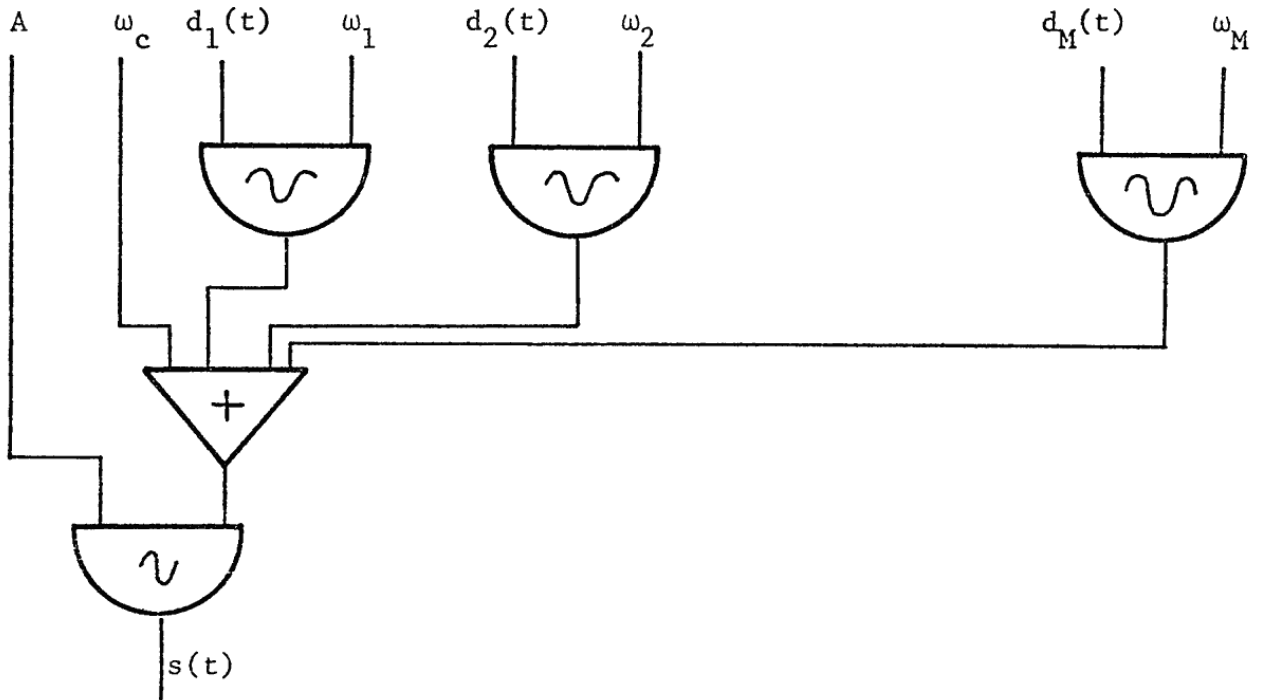


fig. 31

$$s(t) = \text{sen}(\omega_c t + \sum_{i=1}^N I_i \text{sen} \omega_i t) =$$

Applicando lo stesso procedimento di prima si ottiene

$$= \sum_{k_1} \sum_{k_2} \dots \sum_{k_N} J_{k_1}(I_1) J_{k_2}(I_2) \dots J_N(I_N) \text{sen}(\omega_c + k_1 \omega_1 + \dots + k_N \omega_N)$$

Si hanno cioè tutte le componenti di pulsazione

$$|\omega_c + k_1 \omega_1 + \dots + k_N \omega_N| \quad \text{con} \quad k_i = 0 \pm 1 \pm 2 \dots$$

$$|\omega_c + \sum_{i=1}^N K_i \omega_i| \quad \text{e ampiezza} \quad \prod_i J_{k_i}(I_i)$$

Alcune di queste componenti possono coincidere come frequenza. In questo caso le rispettive ampiezze vanno sommate vettorialmente per tener conto dello sfasamento.

Se non ci sono relazioni semplici tra le varie componenti, il suono che si ottiene è quasi un rumore.

Possiamo quindi considerare due casi particolari

- modulante periodica (fig. 32)

$$\phi(t) = I_1(t) \sum_i C_i \text{sen} i \omega_1 t$$

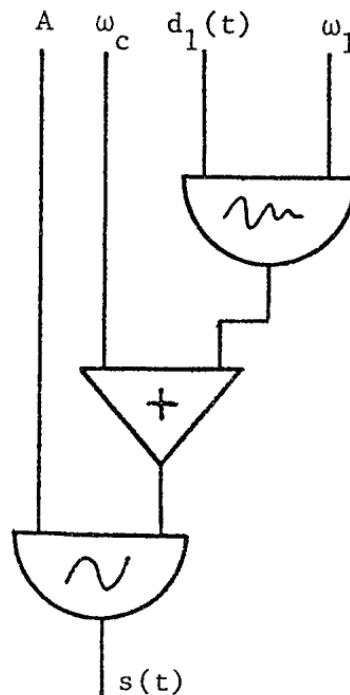


fig. 32

Dal punto di vista dello spettro del segnale prodotto equivale al caso di modulazione semplice con modulante quasi periodica. Si hanno quindi tutte le componenti con pulsazione

$$|\omega_c + \sum_i k_i (\omega_1 + i\omega_2)| \quad \text{con} \quad \begin{aligned} k_i &= 0 \pm 1 \pm 2 \dots \\ i &= 0 \pm 1 \pm 2 \dots \end{aligned}$$

Portante composta

Se la portante non è semplice, ma è costituita da una somma di componenti, l'effetto della modulazione è che ogni componente viene modulata.

Consideriamo una portante periodica (fig. 34)

$$s_c(t) = \sum_{1^n}^M a_n \text{sen}(n\omega_c t + \xi_n)$$

modulata in fase da

$$\phi(t) = I \text{sen}\omega_m t$$

Il segnale risultante è

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{1^n}^M a_n \text{sen}(n\omega_c t + \xi_n + \phi(t)) = \\ &= \sum_{1^n}^M a_n \text{sen}(n\omega_c t + \xi_n + I \text{sen}\omega_m t) \end{aligned}$$

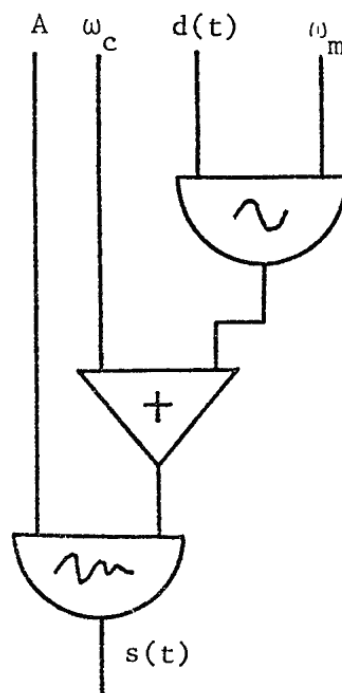


fig. 34

attorno ad ogni armonica della portante si hanno le bande laterali prodotte dalla modulazione

$$= \sum_{n=1}^M \sum_k a_n J_k(I) \text{sen} [(n\omega_c + k\omega_m)t + \xi_n]$$

Si hanno cioè tutte le componenti con pulsazione

$$|n\omega_c + k\omega_m| \quad \text{con} \quad n = 1 \dots M \\ k = 0 \pm 1 \pm 2 \dots$$

e ciascuna con ampiezza $a_n J_k(I)$.

Si osservi che spesso si hanno molte sovrapposizioni di componenti risultanti, per cui l'ampiezza complessiva va calcolata facendo la somma e tenendo conto della fase.

Nel caso in cui la portante sia quasi periodica e cioè esprimibile con

$$s_c(t) = \sum_{n=1}^M a_n(t) \text{sen}(n\omega_c t + \xi_n(t))$$

essendo $a_n(t)$ ampiezza della n-esima componente

$\xi_n(t)$ sfasamento della n-esima componente

lentamente variabili.

Il segnale modulato risulta

$$s(t) = \sum_{n=1}^M a_n(t) \text{sen}(n\omega_c t + \xi_n(t) + I \text{sen}\omega_m t) = \\ = \sum_{n=1}^M \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_n(t) J_k(I) \text{sen} [(n\omega_c + k\omega_m)t + \xi_n(t)]$$

Si hanno per ciò le stesse componenti del caso periodico ma con ampiezze variabili nel tempo. Se poi si hanno sovrapposizioni, in frequenza, di più componenti, l'ampiezza risultante varia non solo perchè varia l'ampiezza di ciascuna componente, ma anche perchè varia lo sfasamento reciproco.

Per realizzare la portante quasi periodica si ricorre a più parziali, la cui ampiezza varia lentamente nel tempo.

Due o più portanti

Nel caso che ci siano due o più portanti, si estende il ragionamento del caso di portante composta. Il risultato complessivo è la somma dell'effetto di ciascuna portante presa separatamente e modulata. E' una specie di sintesi additiva.

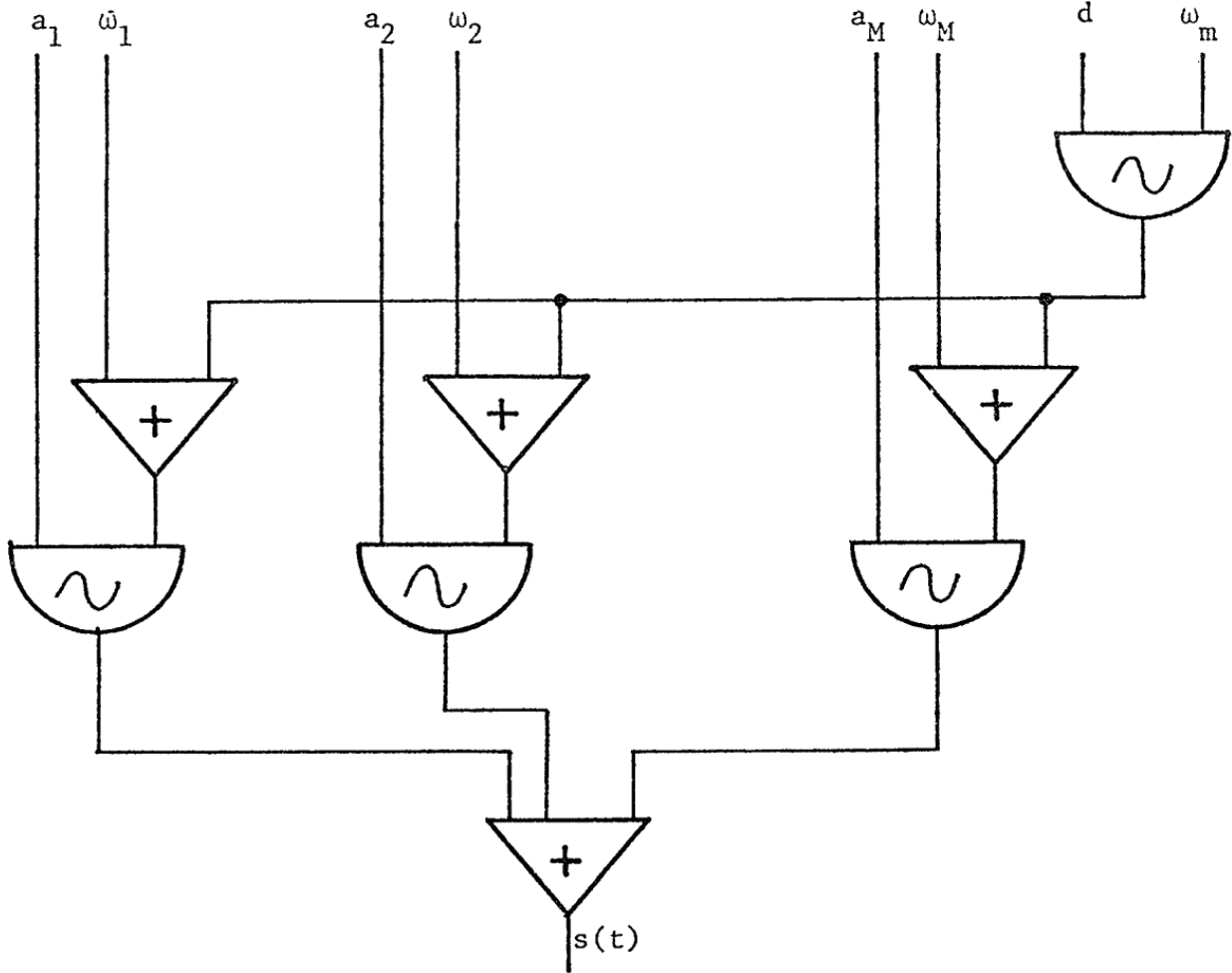


fig. 35

La rappresentazione grafica è illustrata in fig. 35.

La formula è.

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \sum_{n=1}^M a_n \text{sen}(\omega_n t + I \text{sen} \omega_m t) \\
 &= \sum_{n=1}^M \sum_k a_n J_k(I) \text{sen}(\omega_n + k\omega_m)t
 \end{aligned}$$

Gli a_n (ampiezze delle singole portanti) possono essere costanti, variabili ma uguali fra loro nel tempo, variabili nella stessa maniera e con un coefficiente di proporzionalità tra loro, variabili in modo totalmente indipendente. Per ogni caso si possono usare tecniche diverse di generazione.

Anche gli indici di modulazione di ciascuna portante possono variare in maniera diversa, in modo proporzionale o completamente libero. Se la variazione a_n viene in modo proporzionale per ciascuna componente, una volta generata la legge di variazione, basta moltiplicarla per i vari fattori di scala per ottenere tutti i parametri variabili. Graficamente si può rappresentare come in fig. 36 in

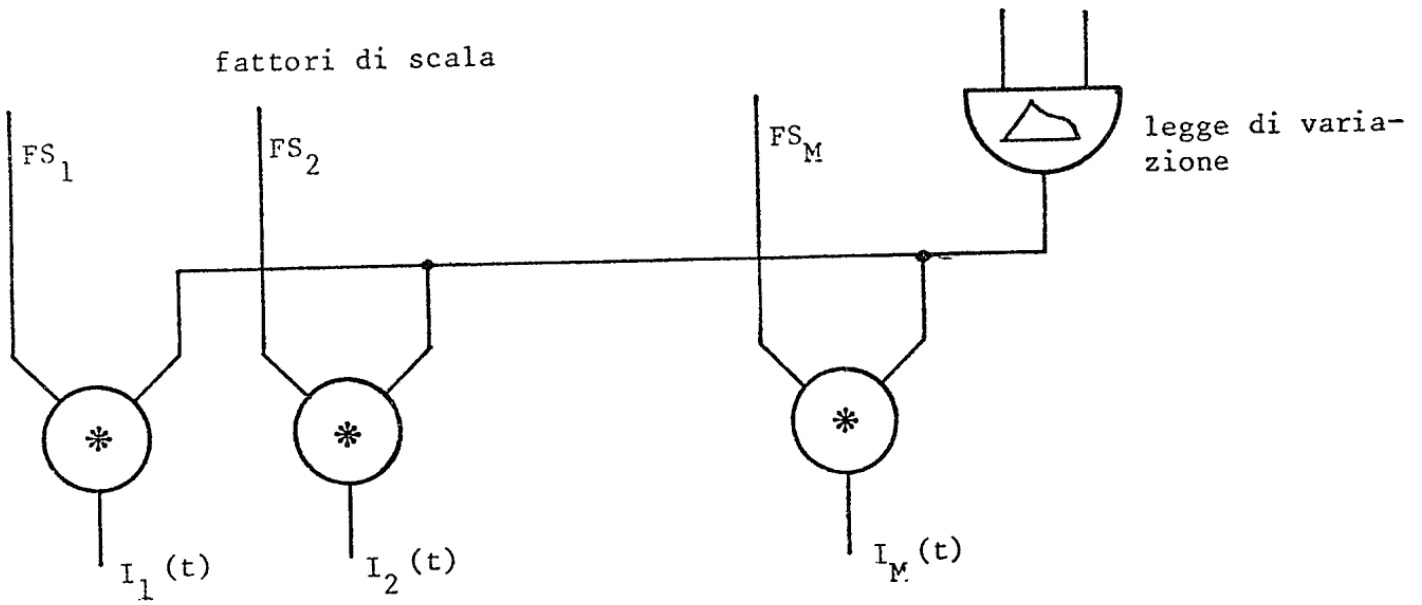


fig. 36

in cui risulta

$$I_n(t) = FS_n f(t) \quad \text{con } n=1,2,\dots,M$$

Nel caso generale, ciascuna portante ha la modulante con il suo indice che varia indipendentemente (fig. 37).

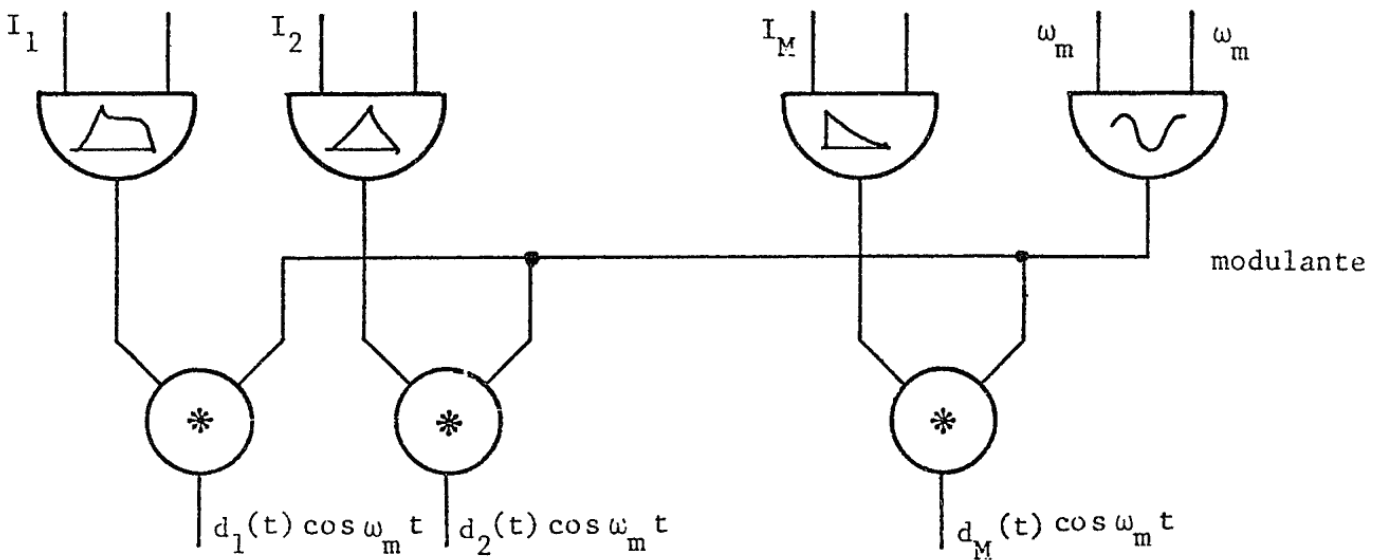


fig. 37

Nell'esempio precedente la modulante ha ampiezza 1 quando viene impiegata nella modulazione di fase, ω_m quando viene impiegata nella modulazione di frequenza. Siccome, nella simbologia grafica adottata, si modula la frequenza, si è posta l'ampiezza della modulante uguale ad ω_m . In tal caso si ottengono le deviazioni per ogni portante.

Generalizzando ulteriormente, non è detto che tutte le portanti debbano avere le modulanti con la stessa frequenza, anzi può essere diversa per ogni portante. Ciò corrisponde ad avere una somma di moduli FM separati tra loro (fig. 38). Se le varie frequenze hanno rapporti razionali tra loro vi saranno sovrapposizioni tra componenti.

Applicazioni della portante composta

Viene usata la modulante composta o la portante composta, quando lo spettro prodotto da modulante e portante semplice non è sufficiente o deve essere arricchito.

Già nella prima esposizione della FM Chowning consigliava l'uso della doppia portante per introdurre nello spettro un formante o addensamento di potenza nelle armoniche superiori. Ad esempio per ottenere uno spettro del tipo di figura 39. può essere conveniente aggiungere una portante in corrispondenza della 9^a

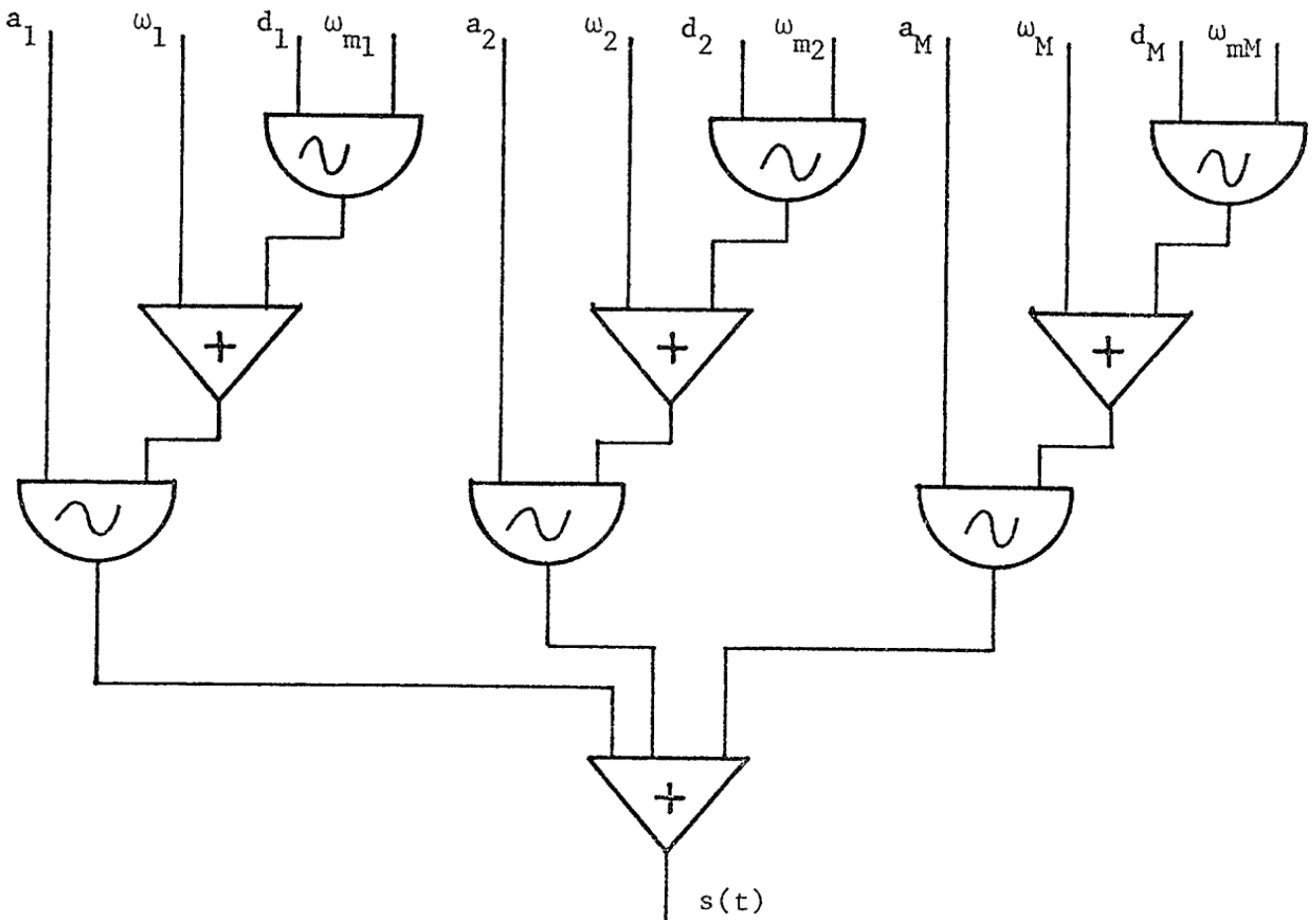


Fig. 38

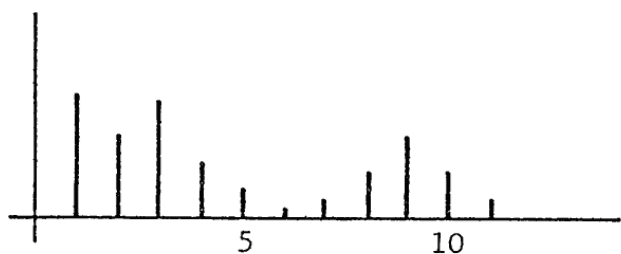


fig. 39

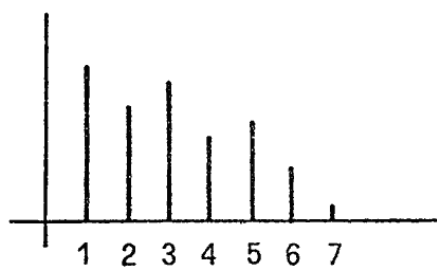


fig. 40

armonica modulata con indice circa 1 per produrvi il formante.

Se si vuol tener circa ferma la frequenza del formante al variare della fondamentale, bisognerà cambiare in maniera opportuna la posizione della portante rispetto al numero di armonica. Se ad esempio la frequenza del suono raddoppia, il formante cade tra la quarta e la quinta armonica, confondendosi quindi con lo spettro base (fig. 40). Se la frequenza si dimezza, allora la portante sarà fatta coincidere con la 18^a armonica (fig. 41). Da notare che in questo caso alcune delle armoniche superiori possono cadere nella stessa banda critica.

Con questo metodo si è scomposto lo spettro del suono da produrre in due componenti della stessa famiglia. Infatti la frequenza delle due portanti differiscono tra loro di un multiplo della frequenza modulante

$$C_2 - C_1 = k m \quad k \in \mathbb{Z}$$

Si ricordi che la famiglia di suoni FM è prodotta da rapporti portante modulante del tipo

$$\left| \frac{C + k m}{m} \right|$$

Larghezza di banda

Se noi consideriamo la formula della modulazione di fase

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{sen}(\omega_c t + I(t) \text{sen} \omega_m t) = \\ &= \sum_k J_k(I(t)) \text{sen}(\omega_c + k \omega_m) t \end{aligned}$$

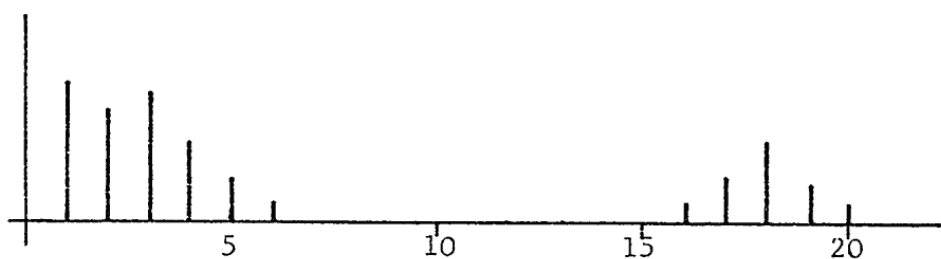


fig. 41

si vede che la struttura armonica consiste di infinite componenti di tipo sinusoidale con frequenza $\omega_c + k\omega_m$ e peso $J_k(I(t))$ con $-\infty < k < +\infty$. Quindi teoricamente la banda del segnale modulato è illimitata. In pratica una componente in un segnale può essere ignorata se il suo peso è inferiore ad una certa soglia. Generalmente si definisce la banda di un segnale FM come la larghezza dello spettro di frequenza che contiene tutte le componenti che hanno peso superiore od uguale all'un per cento dell'ampiezza del segnale non modulato.

Siccome i pesi sono dati dalle funzioni di Bessel valutate all'indice di modulazione I , basta considerare solo il comportamento delle funzioni di Bessel. Le tavole delle funzioni di Bessel mostrano che per piccoli valori dell'indice I solo poche funzioni di basso ordine sono significative. Al crescere dell'indice, cresce il numero e l'ordine delle funzioni aventi ampiezza significativa. Lo spettro diventa così sempre più ricco e la banda più larga. E' questa infatti la caratteristica principale dei suoni FM e che all'ascolto risulta più determinante nella qualità del suono. Se infatti si impiega nella sintesi la tecnica FM con indice variabile, il suono ottenuto è caratterizzato, e quindi riconoscibile, dalla larghezza di banda che si allarga e si stringe e dal fatto che le ampiezze delle singole componenti non hanno andamento omogeneo con questa variazione. Se un suono FM è prodotto con indice fisso, allora la banda e lo spettro sono fissi; è quindi meno riconoscibile la tecnica di sintesi.

Esistono varie formule pratiche che danno il numero di bande laterali significative

$$M = I + 2.4 \cdot I^{0.27}$$

oppure

$$M = I + \frac{1}{2} \quad \text{per valori di } I \text{ piccoli}$$

ove M = numero di bande laterali significative

I = indice di modulazione

Nelle formule sopra calcolate per gli spettri le sommatorie delle componenti

$$\begin{aligned} & \sum_{-\infty}^{+\infty} J_k(I) \text{sen} (\omega_c + k\omega_m)t = \\ & = \sum_{-M}^M J_k(I) \text{sen} (\omega_c + k\omega_m)t \end{aligned}$$

possono essere calcolate invece che da $-\infty$ a $+\infty$, da $-M$ a $+M$, in cui M dipende da I . Nel caso di modulante composta, la cui formula è

$$s(t) = \text{sen}\left(\omega_c + \sum_{i=1}^N J_i \text{sen}\omega_i t\right) =$$

$$= \sum_{k_1} \sum_{k_2} \dots \sum_{k_N} J_{k_1}(I_1) J_{k_2}(I_2) \dots J_{k_N}(I_N) \text{sen}(\omega_c + k_1 \omega_1 + \dots + k_N \omega_N) t$$

ciascuna sommatoria, invece che essere estesa per tutti gli interi, può essere fatta tra $-M_i$ e $+M_i$ in cui M_i dipenda da I_i , indice di modulazione della i -esima componente della modulante.

Inoltre ciascuna componente ha peso dato dal prodotto di N funzioni di Bessel

$$J_{k_1}(I_1) J_{k_2}(I_1) \dots J_{k_N}(I_N) .$$

Ciascuna funzione è ≤ 1 per cui diminuisce ancora di molto il numero di componenti significative.

Potenza

Dato il segnale modulato in fase calcoliamo la potenza istantanea (specificata)

$$s(t) = \text{sen}(C + I \text{sen}\theta) = \sum J_k(I) \text{sen}(C + k\theta)$$

$$p(t) = s^2(t) = \text{sen}(C + I \text{sen}\theta)^2 =$$

$$= \frac{1}{2} [1 - \cos(2C + 2I \text{sen}\theta)] =$$

$$= \frac{1}{2} [1 - \sum_k J_k(2I) \cos(2C + k\theta)]$$

La potenza media (specificata)

$$P_m = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T p(t) dt =$$

$$= \frac{1}{2} [1 - \sum_k \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T J_k(I) \cos(2C + k\theta) dt]$$

Si noti che il valor medio dei termini che variano sinusoidalmente è nullo. Per cui l'unico termine diverso da zero sarà quello per cui $\cos(2C + k\theta)$ non dipende dal tempo.

Se poniamo

$$C = \omega_c t + \phi_c$$

$$\theta = \omega_m t + \phi_m$$

$$\cos(2C+k\theta) = \cos(2\omega_c t + k\omega_m t + 2\phi_c + k\phi_m)$$

La condizione per cui il valor medio non sia nullo è che $2\omega_c + k\omega_m = 0$.

Se

$$\frac{\omega_c}{\omega_m} = \frac{N_1}{N_2} \quad \omega_c = N_1 \omega_o \quad \omega_m = N_2 \omega_o$$

la condizione diventa

$$2N_1 \omega_o + kN_2 \omega_o = 0$$

da cui

$$k = -\frac{2N_1}{N_2} = \frac{-2\omega_c}{\omega_m}$$

ma k deve essere intero, ed essendo $\frac{N_1}{N_2}$ irriducibile, l'unica condizione che de termina una componente costante nel tempo è N_2 uguale ad 1 od a 2.

$$\text{Se } N_2 = 1 \quad k = -2N_1$$

$$\text{Se } N_2 = 2 \quad k = -N_1 \quad (N_1 \text{ dispari})$$

La componente in continua diminuisce la potenza di

$$\frac{1}{2} J_k(2I) \cos(2\phi_c + k\phi_m)$$

$$P_m = \frac{1}{2} [1 - J_k(2I) \cos(2\phi_c + k\phi_m)]$$

Esempio:

caso normale - portante: seno

$$\phi_c = 0$$

- modulante fase: seno

$$\phi_m = 0$$

$$P_m = \frac{1}{2} [1 - J_k(2I)]$$

- portante:

$$\phi_c = \frac{\pi}{4}$$

- modulante fase: seno

$$\phi_m = 0$$

$$P_m = \frac{1}{2} [1 - J_k(2I) \cos(\frac{\pi}{2})] = \frac{1}{2}$$

Se le relazioni precedenti non sono soddisfatte esattamente non si ha sovrapposizione di componenti, per cui la potenza media, in un tratto sufficientemente lungo di tempo è costante e pari a $\frac{1}{2}$. Nell'ascolto si sente una fluttuazione, che può essere spiegata pensando ad un battimento fra le componenti prodotte.

Consideriamo

$$\omega_c = \frac{N_1}{N_2} \omega_m + \varepsilon \quad \text{con } N_2 = 1 \text{ oppure } N_2 = 2$$

ε piccola rispetto ω_m

Se $\varepsilon = 0$ la condizione che determina il termine della potenza che non dipende dal tempo è

$$2\omega_c + k\omega_m = 0 \quad k = -\frac{2N_1}{N_2}$$

Per questo valore di k la potenza ha un termine di pulsazione

$$2\omega_c - \frac{2N_1}{N_2} \omega_m = \frac{2N_1}{N_2} \omega_m + 2\varepsilon - \frac{2N_1}{N_2} \omega_m = 2\varepsilon$$

piccola rispetto ω_m . Se è dell'ordine degli hertz il suono viene quindi sentito con intensità variabile

$$P = \frac{1}{2} [1 - J_k(2I) \cos(2\varepsilon t + 2\phi_c + k\phi_m)]$$

esempio

$$\omega_c = 301 \text{ Hz} \quad \omega_m = 200 \text{ Hz} \quad \varepsilon = 1 \text{ Hz} \quad k = -3 \quad \phi_c = 0 \quad \phi_m = 0$$

$$P = \frac{1}{2} [1 - J_{-3}(2I) \cos(4\pi t)]$$

Si noti che l'ampiezza della fluttuazione di potenza dipende dall'indice di modulazione e da k .

Se $J_k(2I) = 0$, la potenza è costante. I battimenti fra le varie componenti si compensano. Si ha il cosiddetto battimento del secondo tipo dovuto a variazione periodica della forma d'onda e non dell'ampiezza.

CONCLUSIONE

Sono state descritte le principali tecniche di sintesi del suono impiegato per scopi musicali e sono stati discussi i vantaggi e svantaggi di ciascun metodo, cercando di mettere in evidenza le possibilità applicative.

Ancora molto lavoro resta da fare per esplorare a fondo le varie tecniche, soprattutto quelle non lineari, e per sviluppare criteri e mezzi, teorici e pratici, per scegliere i parametri più opportuni per produrre i suoni desiderati. La stessa analisi di Fourier, che è la forma più usata per rappresentare i suoni, si è rivelata non sufficiente per descrivere in maniera utile e significativa l'andamento dinamico dei suoni. Vanno quindi elaborati e applicati strumenti concettuali più perfezionati, che tengano conto dell'aspetto aleatorio dei suoni.

Per quanto riguarda il musicista si vuol porre qui in evidenza che ogni nuova tecnica si presenta come un nuovo strumento. Egli deve quindi sperimentare a lungo per poter ricavare quella padronanza e quella sensibilità nella scelta dei parametri che gli consentano di giungere a dei risultati rilevanti dal punto di vista musicale e non solo da quello acustico. E in questo campo non si può aver fretta. Solo attraverso un lungo e duro lavoro si può giungere a dei risultati validi ed ad una consapevolezza dei mezzi impiegati, altrimenti si deve rinunciare a nuove possibilità ed usare pedestremente i risultati altrui. Come sempre, di fronte alle novità, non esiste ancora, e per un certo tempo non esisterà, una teoria ed una prassi musicale adatta ad orientare chi vuol comporre musica per elaboratore. Ciascuno deve costruirselo con il suo impegno personale.

RIFERIMENTI

- H.G. ALLES: "Music Synthesis Using Real Time Digital Techniques", Proc. IEEE, vol. 68, n. 4, p. 436-449, 1980.
- G.L. CARIOLARO: "Teoria dei segnali determinati", ed. Patron, 1977.
- J.A. MOORER: "Signal Processing Aspects of Computer Music: A Survey", Proc. IEEE vol. 65, n. 8, p. 1108-1132, April 1977.
- M.V. MATHEWS: "The technology of computer music", ed. Mit Press, 1969.
- A.V. OPPENHEIN, R.W. SHAFER: "Digital Signal Processing", ed. Prentice-Hill, 1975.

Sintesi granulare

- C. ROADS: "Automatic Granular Synthesis of Sounds", Computer Music Journal, p. 61-

-62, vol. II, n. 2, 1978.

Forma d'onda fissa

B. MAILLART: "Les distorsions de Music V", Cahiers recherche/musique, n. 3, p. 207-246, 1977.

Sintesi additiva

J. BEAUCHAMP: "A computer System for Time-Variant Harmonic Analysis and Synthesis of Musical Tones", in Music by Computer, H. Van Foerster and J. Beauchamp, Eds (J. Wiley, New York, pp. 19-62, 1969).

J.C. RISSET: "An Introductory Catalog of Computer Synthesized Sounds", Bell Laboratories, Murray Hill, n.J. 1969.

J. RISSET, M. MATHEWS: "Analysis of Musical Instrument Tones", Physical Today, vol. 22, n. 2, p. 23-30, 1969.

VOSIM

W. KAEGI: "A Minimum Description of the Linguistic Sign Repertoire (part 1)", Interface, vol. 2, pp. 141-156, 1973.

W. KAEGI: "A Minimum Description of the Linguistic Sign Repertoire (part 2)", Interface, vol. 3, pp. 132-158, 1974.

W. KAEGI, S. TEMPELAARS: "VOSIM: - A New Sound Synthesis System", J. Audio Eng. Soc., vol. 26, n. 6, pp. 418-424, 1978.

S. TEMPELAARS: "The VOSIM Signal Spectrum", Interface, vol. 6, pp. 81-96, 1976.

E. DE POLI, G. DE POLI: "Identificazione di parametri di un oscillatore VOSIM a partire da una descrizione spettrale", Atti del 3° Coll. di Inf. Mus., p. 161-177, 1979.

Sintesi sottrattiva

J. M. CHOWNING: "The Simulation of Moving Sound Sources", J. Audio Eng. Soc., vol. 19, n. 1, p. 2-6, 1971.

J.A. MOORER: "The use of the Phase Vocoder in Computer Music Application", J. Audio Eng. Soc., vol. 26, n. 2, p. 42-49, 1978.

J.A. MOORER: "The use of Linear Prediction of Speech in Computer Music Application" J. Audio Eng. Soc., vol. 27, n. 3, p. 134-14L, 1979.

J.A. MOORER: "About this Reverberation Business", Rapp. IRCAM, n. 17/78.

L.R. RABINER, B. GOLD: "Theory and Application of Digital Signal Processing",
Prentice-Hall, 1975.

Distorsione non lineare

- D. ARFIB : "Digital Synthesis of Complex Spectra by Means of Multiplication of Nonlinear Distorted Sine Waves", J. Audio Eng. Soc., vol. 27, n. 10, p. 757 - 768, ott. 1979.
- J. BEAUCHAMP: "Brass Tone Synthesis by Spectrum Evolution Matching with Nonlinear Functions", Comp. Mus. Jour., vol. 3, n. 2, 1979.
- J. DASHOW: "Three Methods for the Digital Synthesis of Chordal Structures with non-harmonic partials", Interface, vol. 7, n. 2-3, p. 69-94, 1978.
- M. LE BRUN: "Digital Waveshapping Synthesis", J. Audio Eng. Soc., vol. 27, n. 4 , p. 250-265, nov. 1979.
- J.A. MOREER: "The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Discreta Summa - tion Formulas", J. Audio Eng. Soc., vol. 24, p. 717-727, nov. 1976.
- P. REINHARD, F. ROPELATO, A. VECELLI: "Distorsione non lineare tramite polinomi", relazione d'esame, Istituto di Elettrotecnica e di Elettronica, Università di Padova, 1979.
- G. WINHAN, K. STEIGLITZ: "Input Generators for Digital Sound Synthesis", J. Acoust. Soc. Am., vol. 47, p. 665-666, $\frac{1}{2}$ 1970.

Modulazione di frequenza

- J.M. CHOWNING: "The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation", J. Audio Eng. Soc., vol. 21, n. 7, p. 526-534, sett. 1973.
- M.S. CORRINGTON: "Variation of Bandwidth with Modulation Index in Frequency Modulation", Proc. IRE, p. 1013-1020, 1947.
- J.M. JUSTICE: "Analytic Signal Processing in Music Computation", IEEE Trans. ASSP, vol. 27, n. 6, p. 670-684, dic. 1979.
- M. LE BRUN: "A Derivation of the Spectrum of EM with Complex Modulating Wave", Comp. Music Journ., vol. 1, n. 4, p. 51-52, nov. 77.
- B. TRUAX: "Organizational Techniques for C:M Ratios in Frequency Modulation", Comp. Music Journ., vol. 1, n. 4, p. 39-45, nov. 1977.

Tommaso Bolognesi ⁽⁰⁾

COMPOSIZIONE MUSICALE ASSISTITA DA ELABORATORE

Automatismi, processi stocastici ed interazione uomo-macchina

Riassunto. - *Il fattore "caso" riveste un ruolo importante nella musica contemporanea e trova nella computer music un fertile campo di applicazione. Vengono illustrate alcune esperienze di composizione musicale mediante computer, con particolare riferimento a tecniche compositive non-deterministiche basate sulla simulazione e l'impiego di sorgenti di numeri casuali, catene di Markov e di grammatiche.*

(⁰) CNUCE - C.N.R. - Reparto Musicologia - Via S. Maria 36

56100 Pisa - Tel. (050) 45245

1. Musica e caso: esperienze precedenti all'impiego del computer.

L'"Arca musarithmica" (fig.1), descritta in un testo del 1660, è forse il più antico dispositivo meccanico per la composizione di musica casuale. Essa consisteva in una scatola di legno con una fila di paletti sui quali erano marcati i suoni della gamma diatonica e indicazioni per la battuta e il ritmo. Per comporre musica a quattro voci bastava combinare casualmente i paletti in uno degli innumerevoli modi possibili⁽¹⁾.

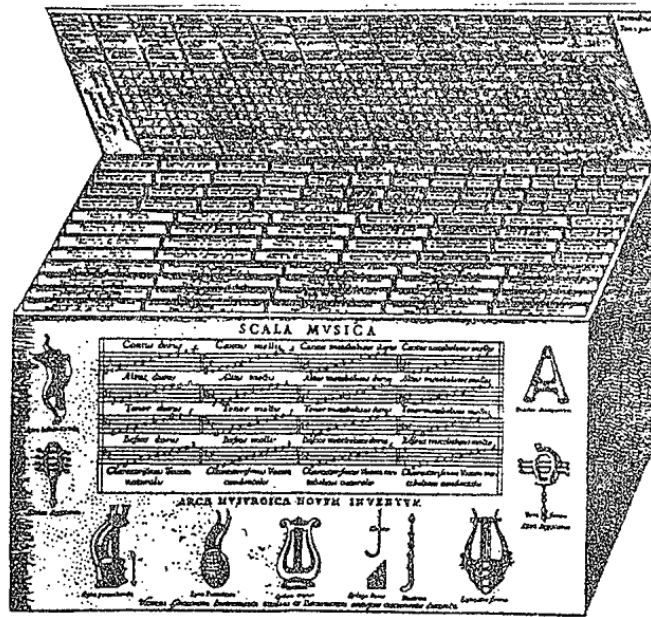


Fig. 1 - L'Arca Musarithmica

Nella seconda metà del '700 vennero pubblicati in diverse città europee manuali di composizione musicale basati sull'impiego dei dadi. Tali pubblicazioni erano legate ai nomi di musicisti anche famosi, come Mozart, Carl Philipp Emanuel Bach, Haydn. Quest'ultimo, ad esempio, scrisse "Il gioco filarmonico; facile metodo per comporre un infinito numero di minuetti e trii anche senza conoscere il contrappunto".

Tutti questi metodi erano basati sullo stesso principio, quello di scegliere e porre in sequenza, con il lancio dei dadi, un certo numero di battute fra quelle "prefabbricate" e organizzate in tabelle dall'autore del manuale.

L'importanza assunta dal fattore caso nella musica contemporanea può essere osservata da più punti di vista e spiegata in più modi. Molto in generale il fenomeno appare come lo stadio finale estremo del processo di progressivo rigetto delle restrizioni imposte dalle regole musicali tradizionali (si pensi ad esempio al progressivo abbandono del concetto di tonali-

tà). Una delle posizioni più estreme, in questo senso, è quella del compositore John Cage, la cui intenzione è di creare una musica indipendente dal gusto personale e dalla tradizione artistica. Una fonte di casualità utilizzata da Cage è data, ad esempio, dalle leggere irregolarità dei fogli di carta, che il compositore pone in evidenza grafica per poi codificare in notazione musicale.

Il fatto poi che alcune partiture contemporanee prevedano un comportamento aleatorio da parte dell'esecutore può essere posto in relazione, per contrasto, con l'eccessiva rigidità e complessità di certe partiture ai limiti dell'eseguibilità; in questo senso il compositore, rinunciando alla dettagliata specificazione di alcuni parametri, cioè lasciandoli al caso, restituisce libertà all'esecutore.

Infine il non-determinismo, in forma di distribuzione probabilistica, diventa lo strumento formale più adeguato alla generazione e al trattamento di grandi masse di eventi sonori.

Così Iannis Xenakis⁽²⁾, padre della "musica stocastica", introduce nella sua pratica compositiva la densità di probabilità:

$$P(x) = ce^{-cx}$$

(degli intervalli di Poisson) per calcolare durate delle note o distanze fra gli attacchi di note successive, o la densità:

$$G(v) = \frac{2}{a\sqrt{\pi}} e^{-v^2/a^2}$$

(Gaussiana) per calcolare la velocità dei glissando degli strumenti ad arco nel brano "Pithoprakta" (1955/56), del quale sono riportate alcune battute in fig. 2.

Naturalmente l'esigenza dei musicisti di maneggiare il caso e di utilizzare la teoria delle probabilità poteva iniziare a trovare nei primi computers un valido strumento di ausilio alla composizione. Tuttavia un impulso ancora maggiore all'impiego compositivo degli elaboratori venne dato dalla diffusione della teoria dell'informazione di Shannon e Weaver, e dalla curiosità, da parte di ricercatori di formazione prevalentemente scientifica, di applicare la nuova teoria alla linguistica ed alla musica, in senso analitico ed in senso generativo.

The image shows a page of a musical score for the piece "Pithoprakta" by Iannis Xenakis. The page is numbered 84 at the top center. The score is written for a large ensemble, including woodwinds (W. B.), violins (V. I and V. II), violas (V. A), violas (Vc), and cellos (B.). The notation is highly complex, featuring dense rhythmic patterns, slurs, and dynamic markings. The woodwind section (W. B.) is marked with "pizz. gliss." and "fff". The string sections (V. I, V. II, V. A, Vc, B.) also feature "pizz. gliss." and "fff" markings. The score is divided into measures, with some measures containing multiple notes and rests. The overall style is characteristic of Xenakis's serialist and stochastic compositional techniques.

B AU 19583

Gif. 2 - Alcune battute di "Pithoprakta" di I. Xenakis

2. Il continuo ordine-caos ed il concetto di entropia in relazione alla composizione musicale.

Ogni oggetto che susciti un certo interesse, in senso estetico, in chi lo osserva, può essere collocato idealmente in qualche zona intermedia del continuo che collega i due estremi opposti dell'ordine e del caos. Qualsiasi quadro è meno ordinato di una scacchiera ma più ordinato di un metro quadrato di ghiaia.

Herbert Brun ⁽³⁾: "... La musica è il risultato di un continuo tentativo di ridurre all'ordine il caos del sistema degli elementi e degli eventi acustici...".

Sorge il problema di esprimere numericamente, cioè di misurare, la proporzione di ordine e di caos presente nelle strutture di una data classe. A livello di percezione sonora, al momento dell'ascolto di un dato brano musicale, i concetti di ordine e di caos si identificano rispettivamente con i concetti di prevedibilità e non-prevedibilità: consideriamo ordinato un brano del quale siamo in grado di prevedere gli sviluppi e disordinato un brano dagli sviluppi costantemente imprevedibili. Prevedere gli sviluppi, poi, significa poter assegnare a priori ad un solo evento una alta probabilità di succedere all'evento percepito al presente; una situazione comporta invece imprevedibilità quando tutti gli sviluppi sono ugualmente probabili.

E' chiaro allora come la teoria dell'informazione (che si basa sulla teoria delle probabilità) e il suo concetto fondamentale di entropia, che rappresenta una misura di disordine, o di non prevedibilità, abbiano avuto un ruolo importante nelle ricerche sulla struttura musicale.

Nel 1958 J.E.Youngblood ⁽⁴⁾ misura l'entropia di tre gruppi di melodie, di Schubert, Mendelsohn e Schumann (tabella 1) sulla base delle frequenze di occorrenza dei gradi della scala cromatica (dalle quali si ricavano le probabilità dei gradi stessi).

L'entropia H di una sorgente senza memoria che emette i simboli di un alfabeto $\alpha = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ con assegnate probabilità $p(a_i) = p_i$ è definita come

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

Essa rappresenta l'informazione media per simbolo emesso (essendo $I(a_i) = - \log_2 p(a_i)$ l'informazione associata al generico simbolo a_i).

L'entropia relativa H_r è il rapporto fra l'entropia effettiva e l'entropia massima che la sorgente può esprimere (a simboli equiprobabili):

$$H_r = H / \log_2 n$$

La ridondanza R è definita come: $R = 1 - H_r$.

Tones	Schubert	Mendelssohn	Schumann
I	182	103	215
II	7	4	16
III	168	84	148
IV	23	6	13
V	124	84	144
VI	83	52	66
VII	16	7	22
VIII	203	104	208
IX	30	7	5
X	78	68	118
XI	29	8	23
XII	$\frac{82}{1025}$	$\frac{50}{577}$	$\frac{88}{1066}$
	H = 3.127 H _r = 0.87 R = 13%	H = 3.03 H _r = 0.846 R = 15.4%	H = 3.05 H _r = 0.85 R = 15%

Tabella 1 - Misure di entropia in melodie di Schubert, Mendelssohn e Schumann.

Se oltre alle probabilità assolute $p(a_i)$ dei simboli sono note le probabilità di transizione $p(a_i|a_j)$, cioè le probabilità che dopo l'emissione di a_j (contesto) la sorgente emetta a_i , l'entropia (condizionale) è data da

$$H_c = - \sum_{i,j=1}^n p(a_j a_i) \log_2 p(a_i|a_j)$$

Essa esprime l'informazione media per simbolo emesso, noto il simbolo emesso in precedenza.

Misurare l'entropia di una lingua, o di un insieme di melodie, significa analizzare statisticamente il corpus in esame, ricavare le probabilità assolute o condizionali (a contesto di data lunghezza) di emissione dei simboli, assumere come modello generativo della lingua o delle melodie una sorgente S che incorpori i valori di probabilità ricavati, e misurare l'entropia di S . E' naturale che dopo essere giunti, attraverso l'analisi, alla costruzione della sorgente stocastica S (induzione), sorga l'idea di applicare lo stesso modello in senso generativo per sintetizzare sequenze di elementi dell'alfabeto omogenee a quelle del corpus analizzato (deduzione).

3. Composizione musicale mediante catene di Markov e prime esperienze con il computer.

Una catena di Markov è una sequenza di simboli di un dato alfabeto (finito) emessa da una sorgente per la quale le probabilità di emissione dei simboli sono condizionate dalla emissione precedente (ma ci si può ricondurre a catene di Markov anche quando le probabilità dipendono da un prefissato numero $k > 1$ di simboli emessi in precedenza).

Quasi tutte le prime esperienze di composizione con il computer si basano sulla analisi statistica di un corpus di melodie e sulla sintesi di catene di Markov. Prima ancora di impiegare gli elaboratori, Pinkerton⁽⁵⁾ analizzò statisticamente 39 canzoncine per l'infanzia e ne rigenerò di nuove col metodo probabilistico, ed Olson e Belar⁽⁶⁾ costruirono un sintetizzatore che incorporava la statistica di 11 canzoni di Stephen Foster, e componeva e suonava canzoni nello stile del compositore americano.

Uno dei primi esperimenti di composizione markoviana con il computer è quello di Brooks, Hopkins, Newmann e Wright⁽⁷⁾. Essi analizzano un campione di 37 semplici inni, tutti in tempo 4/4 e senza note di durata inferiore all'ottavo ($\frac{1}{8}$). Tutti gli inni vengono trasposti nella tonalità di D0, e segmentati in 64 celle della durata di un ottavo ciascuna. Ogni cella viene codificata con il nome della nota o porzione di nota che contiene, specificando se si tratta di nota 'struck' (colpita, iniziata in quella cella), o 'held' (tenuta, continuata dalla cella precedente). Ogni inno diventa così una sequenza di 64 simboli. L'analisi statistica viene estesa fino all'ottavo ordine, cioè fino alle sequenze di 8 simboli, o otto-grammi, ciò che consente, in fase di sintesi, di emettere i simboli sulla base delle 7 emissioni precedenti, essendo

$$p(a_i | p_j^7) = \frac{p(b_j^7 a_i)}{p(b_j^7)}$$

(b_j^7 è il generico epta-gramma, $b_j^7 a_i$ indica la giustapposizione di b_j^7 ed a_i) ed essendo la statistica degli epta-grammi implicita in quella degli otto-grammi.

Il processo di sintesi viene anche sottoposto a vincoli di natura ritmica. Fig. 3 mostra alcuni inni artificiali ricavati con diversi valori crescenti dell'ordine m dell'analisi statistica.

Example 1 (m=1)

Example 2 (m=2)

Example 3 (m=4)

Example 4 (m=6)

Example 5 (m=8)

The image displays five examples of artificial hymns, each consisting of two staves of musical notation. Example 1 (m=1) shows a single note per staff. Example 2 (m=2) shows two notes per staff. Example 3 (m=4) shows four notes per staff. Example 4 (m=6) shows six notes per staff. Example 5 (m=8) shows eight notes per staff. The notes are arranged in a regular, repeating pattern across the staves.

Fig. 3 - Inni artificiali dall'esperimento di Brooks, Hopkins, Newmann e Wright

Le conclusioni degli autori sono, sinteticamente, le seguenti:

- l'analisi-sintesi di ordine troppo basso fornisce inni non riconosciuti come appartenenti alla classe degli inni analizzati; l'analisi è troppo superficiale e la sintesi, di conseguenza, non è in grado di riprodurre le proprietà del campione;
- l'analisi-sintesi di ordine troppo alto produce inni che tendono a duplicare quelli del campione, senza fornire risultati originali;
- con l'analisi-sintesi di ordine intermedio viene estratta sufficientemente informazione dal campione per poter riprodurre inni omogenei a quelli originali, ma la sintesi non impone vincoli tali da ottenere la indesegnata duplicazione del materiale analizzato.

Per riprendere il discorso sul continuo ordine-caos in relazione a questo esperimento si può concludere che si ottengono composizioni soddisfacenti quando la sorgente markoviana ha un comportamento intermedio fra quello eccessivamente preordinato e vincolante dell'analisi-sintesi di ordine troppo alto e quello eccessivamente incontrollato, o caotico, dell'analisi-sintesi di ordine basso.

Il modello compositivo markoviano presenta naturalmente delle limitazioni. La più evidente è quella di non poter controllare le macrostrutture della composizione, per ottenere ad esempio una strutturazione gerarchica: le catene di Markov infatti rendono conto soltanto dalle interazioni a corto raggio fra gli eventi sonori.

4. L'uso combinato di sorgenti di numeri casuali e di grammatiche.

Il principio compositivo markoviano consiste nel limitare la casualità delle sequenze generate dalla sorgente stocastica (dunque, nel diminuirne l'entropia) imponendo restrizioni di natura probabilistica (le probabilità condizionali). Un altro metodo di riduzione del caos consiste nel sottoporre il processo di generazione di eventi casuali a restrizioni di natura deterministica, cioè nel confrontare (ed eventualmente scartare) gli eventi via via generati casualmente, con insiemi di regole, o grammatiche.

Uno dei più famosi esperimenti di composizione mediante computer, la 'Illiac Suite for String Quartet' di Hiller e Isaacson⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾, del 1957, è appunto basato sulla implementazione e sul progressivo impiego di 14 regole dello 'stretto contrappunto di prima specie' (16° secolo). Aumentando le restrizioni, cioè il numero di regole impiegate, aumenta la correttezza formale della musica generata dall'elaboratore, ma aumenta anche il numero di tentativi falliti: succede infatti che la macchina, durante il processo compositivo, si possa trovare in un vicolo cieco, cioè non riesca a generare un nuovo evento sonoro, anche iterando i tentativi, senza violare qualche regola. In questo caso la composizione, incompleta, viene scartata ed il processo riparte da capo.

Un interessante metodo per ovviare a questo inconveniente è stato da S. Gill⁽¹⁰⁾. I brani, a tre voci e in stile dodecafonico, vengono ottenuti con un generatore di eventi casuali e una grammatica: parte delle regole vengono incorporate nel generatore, e la parte rimanente viene impiegata per valutare le note via via generate in relazione alla parte già composta.

Ad ogni passo il programma conserva otto composizioni parziali e concorrenti, non necessariamente della stessa lunghezza.

L'algoritmo di composizione è presto riassunto:

- una delle otto sequenze parziali presenti in memoria viene scelta a caso e prolungata della durata di una croma (p) con la subroutine di generazione;

- la sequenza risultante viene valutata e confrontata con le altre otto sequenze in memoria (vengono infatti conservata anche la sequenza scelta, nella sua forma non ancora estesa);
- la sequenza valutata peggiore fra le nove viene scartata ed il processo viene ripetuto con le otto rimaste.

Fig. 4 mostra i primi 100 passi nello sviluppo di una composizione. In ogni fase del processo di crescita dell'albero solo otto nodi sono correnti.

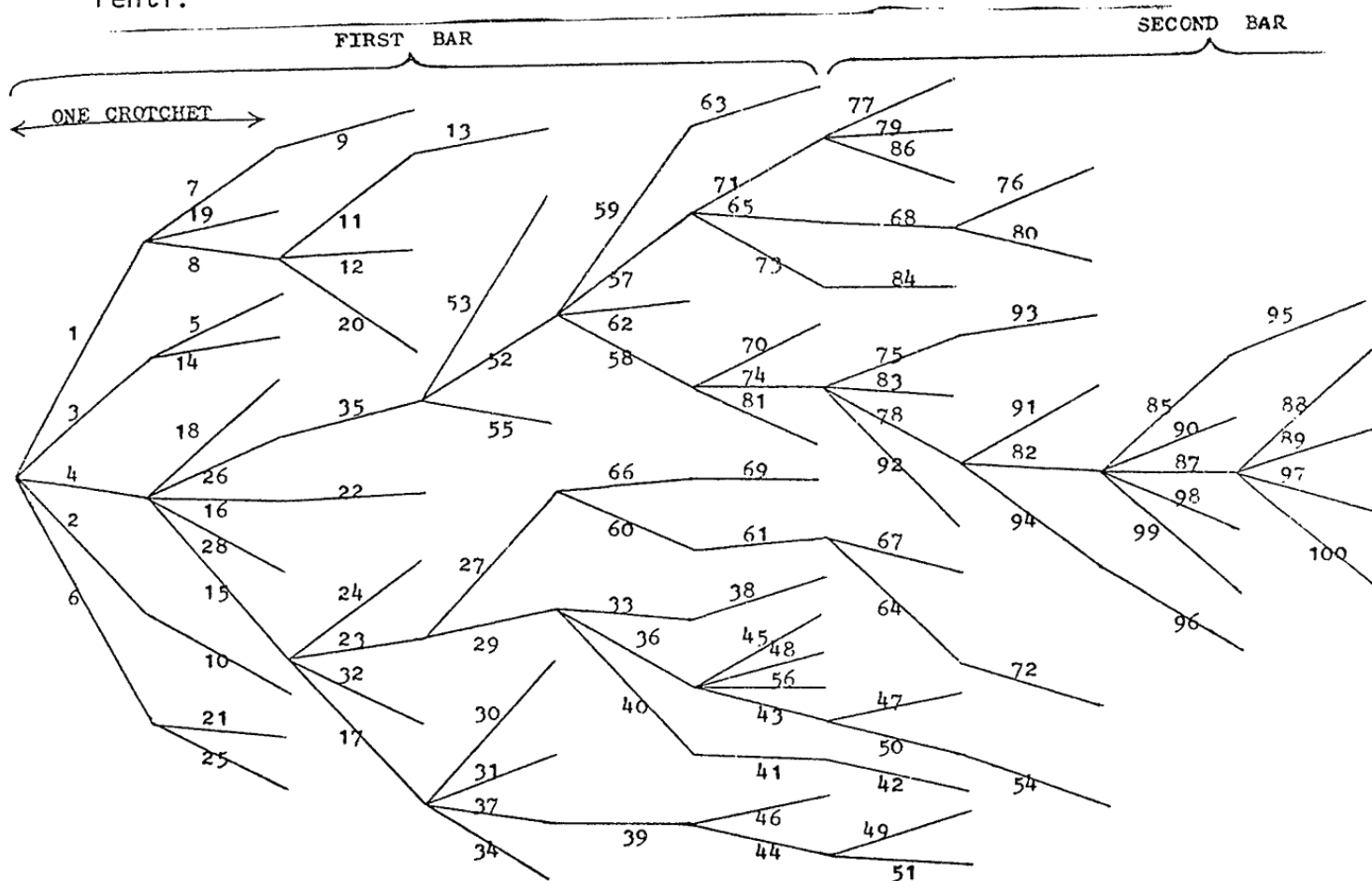


Fig. 4 - La ramificazione degli sviluppi di una composizione nell'esperienza di Gill

Un'altra esperienza di composizione automatica di melodie mediante grammatica (generativa di Chomsky) e generatore di scelte casuali è dovuta a Lidov e Gabura (11).

Il tentativo di estendere l'automazione alla sintesi digitale del suono (in tempo reale) è stato affrontato, fra gli altri, da S.R.Holtzman (12). Il 'Generatore di programmi' impiegato in quest'esperienza, è un programma che genera automaticamente brevi programmi, chiamati 'Funzioni'; a loro volta le Funzioni, eseguite ciclicamente, generano sequenze di campioni del

segnale audio.

5. Simulazione di distribuzioni probabilistiche.

Molte esperienze di composizione musicale non deterministica mediante elaboratore elettronico fanno uso di subroutines di generazione di numeri pseudo-casuali. La subroutine Fortran RANDU, ad esempio, genera ad ogni sua chiamata un numero reale YFL a densità uniforme nell'intervallo (0,1) e un numero intero IY random fra 0 e $2^{31}-1$ (fig. 5).

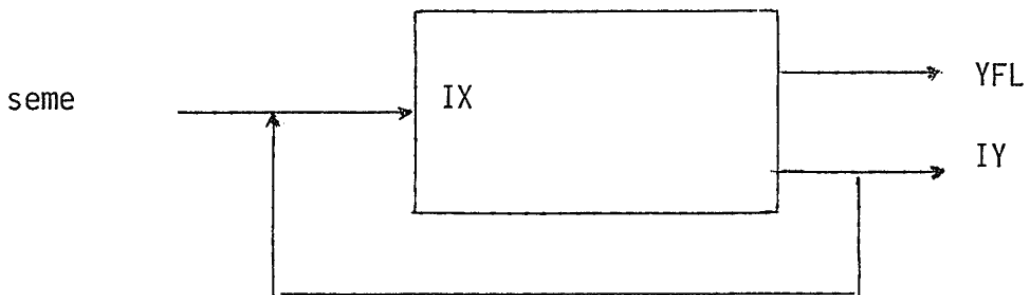


Fig. 5 - Ingressi e uscite della subroutine RANDU

Il processo di generazione dei numeri pseudo-casuali viene inizializzato con un primo valore (seme) assegnato a IX. In seguito come input IX alla subroutine viene impiegato lo stesso output, IY.

Questa stessa subroutine può venire impiegata per simulare distribuzioni probabilistiche più complesse di quella a densità uniforme. Per ottenere una variabile aleatoria a densità gaussiana, ad esempio, è sufficiente sommare un certo numero di volte una variabile aleatoria a densità uniforme in (0,1), come YFL, (sfruttando il teorema del limite centrale), e scalare opportunamente il risultato.

Per ottenere variabili aleatorie di altro tipo, sempre a partire da YFL, si può sfruttare il seguente risultato: se $F_y(y)$ è una funzione monotona crescente (con $0 \leq F_y(y) \leq 1$) ed x è una variabile aleatoria a densità uniforme in (0,1), come YFL (fig. 6), la variabile aleatoria $y \equiv y(x) = F_y^{-1}(x)$ ammette, come funzione di distribuzione proprio la $F_y(y)$.

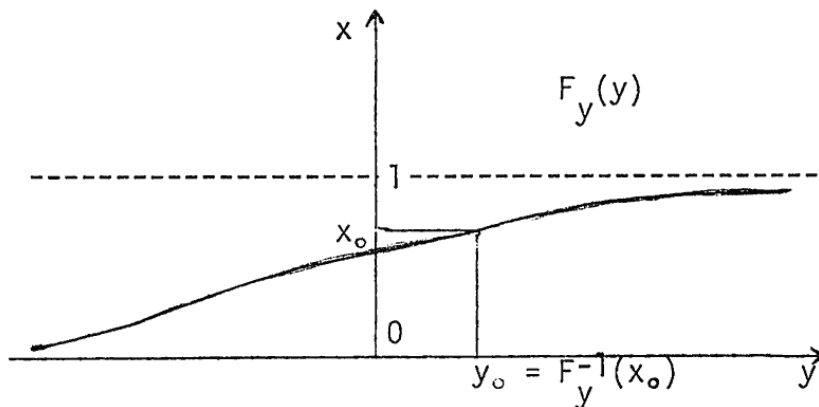


Fig. 6 - Generazione di una variabile aleatoria y di data distribuzione a partire dalla variabile aleatoria x , uniforme in $(0,1)$

Si consideri ad esempio la distribuzione di Poisson di punti sull'asse reale, in base alla quale la probabilità di trovare k punti in un prefissato intervallo \overline{AB} di ampiezza T è:

$$\text{Prob}\{k \text{ punti in } \overline{AB}\} = e^{-\lambda T} \cdot \frac{(\lambda T)^k}{k!}$$

(essendo λ la densità di punti sulla retta). Si dimostra che la distanza y fra due punti successivi è una variabile aleatoria a densità di probabilità

$$f_y(y) = \lambda e^{-\lambda y} \quad (y \geq 0)$$

(cioè a distribuzione $F_y(y) = 1 - e^{-\lambda y}$) e che viceversa una variabile aleatoria di tale densità può essere utilizzata per costruire (per salti successivi) una distribuzione di punti di Poisson.

Ebbene, per ottenere una siffatta variabile aleatoria y a partire da x uniforme in $(0,1)$, basta porre

$$y(x) = F_y^{-1}(x) = - \frac{\ln(1-x)}{\lambda}$$

La distribuzione di Poisson riveste un ruolo molto importante nelle esperienze di composizione musicale stocastica, per il suo carattere di "non-causalità": si può dimostrare infatti che in una successione temporale

di punti di Poisson, il numero di punti in un intervallo di tempo non influenza in alcun modo il numero di punti in qualsiasi intervallo successivo (purché gli intervalli siano disgiunti).

La distribuzione di Poisson è stata impiegata, fra gli altri, da I. Xenakis (2), da J. Myhill (13) ed è alla base del programma di composizione non deterministica POD, di B. Truax.

6. POD e PILE - un programma e un linguaggio di composizione non deterministica.

Alcune delle recenti ricerche sulla composizione musicale non deterministica tendono a creare programmi, o linguaggi, che offrano ai musicisti strumenti per risolvere di volta in volta i propri problemi compositivi.

Il POD, di Barry Truax (14), è un programma per la sintesi di strutture musicali monofoniche (in tempo reale) e polifoniche (in tempo differito), implementato su diversi mini-sistemi (PDP-15, PDP-11, HP-2116, NOVA-3) in Europa ed in America.

Il principio fondamentale del programma è quello per cui l'utente specifica soltanto i parametri macrostrutturali del brano (come la densità degli eventi sonori) lasciando ad un algoritmo di distribuzione (di Poisson) la collocazione dei singoli eventi sonori nello spazio tempo/frequenza/intensità. I vincoli imposti dall'utente sono ad esempio espressi in forma di 'maschera' (fig. 7), cioè regioni del piano frequenza/tempo all'interno delle

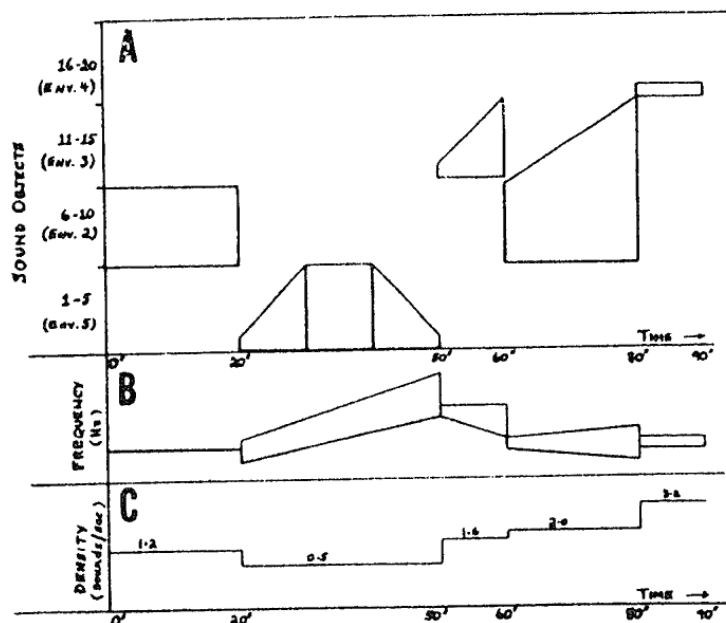


Fig. 7 - L'uso delle maschere timbriche (A) e di frequenza (B) nel programma POD

quali l'algoritmo di distribuzione sceglie gli eventi sonori. Le maschere possono anche venire impiegate per indirizzare la associazione non-deterministica dei timbri ('sound objects') in fig. 7 agli eventi sonori.

Una interessante possibilità offerta da questo e da altri programmi è quella di generare varianti statisticamente equivalenti di una unica strut-

tura, come accade utilizzando lo stesso insieme di maschere ma variando il seme di inizializzazione della sorgente di numeri casuali. In questo senso viene recuperata ed estesa la prerogativa della musica strumentale tradizionale di poter offrire, attraverso diverse esecuzioni ed interpretazioni, varianti di una stessa struttura (la partitura), che era stata perduta con la musica elettronica su nastro magnetico.

Questa possibilità è offerta anche dal linguaggio PILE, scritto da P.BERG⁽¹⁵⁾ e residente sul PDP-L5 dell'Istituto di Sonologia di Utrecht. Il linguaggio è particolarmente adatto alla esplorazione di nuovi metodi non-deterministici di sintesi del suono in tempo reale.

L'esecuzione di un programma scritto in PILE (e compilato) coincide con l'esecuzione musicale, e si può dire che la vera partitura del brano è proprio rappresentata dal programma. Fig. 8 mostra un programma-partitura in PILE. Come si vede, la prima istruzione assegna valore 7 al seme di inizializzazione

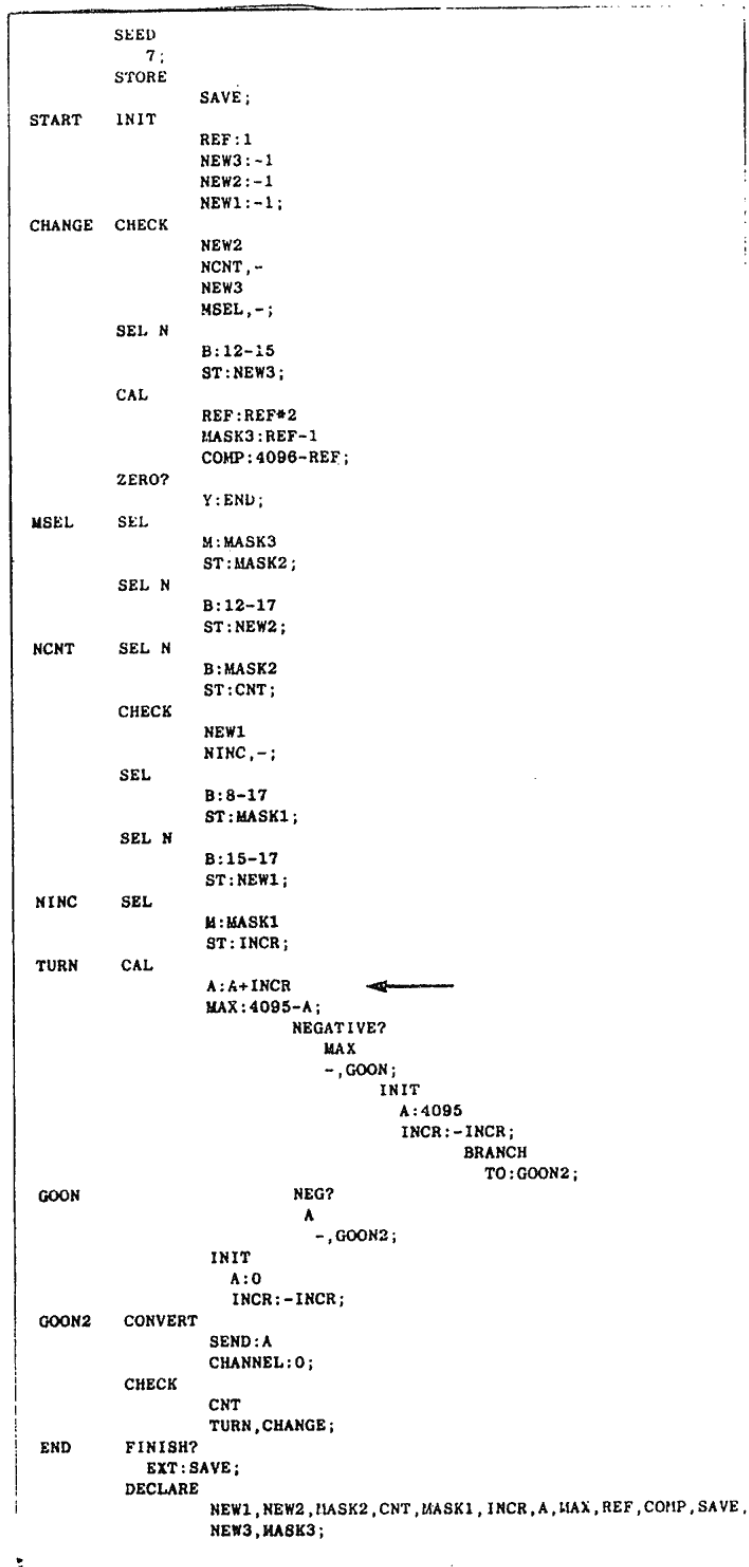


Fig. 8 - Un programma-partitura in linguaggio PILE

del generatore (hardware, in questo caso) di numeri casuali. Cambiando questo valore si ottiene un'altra versione del brano, statisticamente equivalente.

7. Musica 1/f e musica autosimile

L'idea di applicare sequenze numeriche casuali a quattro di potenze 1/f (rumore rosa) anziché a spettro costante (rumore bianco) per la generazione di melodie è dovuta a due ricercatori statunitensi, J. Clarke e R.F. Voss. In un recente articolo (¹⁶) essi hanno messo in luce come le fluttuazioni di due grandezze fisiche associate a brani musicali di svariati stili (potenza e frequenza istantanea del segnale audio) mostrino spettri di potenza $P(f)$ ad andamento iperbolico (1/f) su intervalli che si estendono, inferiormente, fino a frequenze (f) di 10^{-3} Hz, corrispondenti a periodi dell'ordine di alcuni minuti. In altri termini, l'analisi di Clarke e Voss ha mostrato come l'evoluzione temporale 'lenta', cioè delle strutture macroscopiche a lungo periodo, dei brani analizzati sia modellata correttamente dalla casualità del rumore 1/f e non da quella del rumore bianco. (Si osservi che si sta parlando della macrostruttura musicale, e non della microstruttura: i rumori bianco e rosa intesi come caratteristici effetti timbrici non hanno nulla a che vedere con tutto ciò).

E' interessante notare come lo spettro 1/f, che compare anche in numerosi fenomeni fisici, sia associato in generale alla presenza contemporanea di fluttuazioni su più scale temporali anziché su una unica scala. Sulla base di questa considerazione lo stesso Voss ha proposto un metodo per la generazione di sequenze numeriche a spettro approssimativamente 1/f (¹⁷) che impiega un unico processo stocastico elementare (il lancio di un dado) riportato contemporaneamente su più scale temporali in progressione geometrica.

D'altra parte, molte strutture musicali di svariati stili presentano una evidente organizzazione gerarchica (movimenti, frasi, sottofrasi, incisi,...), e ogni sequenza temporale organizzata gerarchicamente in sottosequenze incorpora per l'appunto più scale temporali in progressione (approssimativamente) geometrica. In questo senso si può forse concludere che la presenza di fluttuazioni a spettro 1/f in vari generi musicali non è così sorprendente.

Le figure che seguono illustrano alcune melodie stocastiche generate dall'algoritmo di Voss e da una sua variante; i grafici rappresentano le fluttuazioni nel tempo del parametro acustico frequenza (la gamma utilizzata comprende 85 frequenze a distanza di semitono, ed è un sottoinsieme della gamma del terminale audio TAU2 impiegato per questi esperimenti). La melodia di fig. 9a è generata dall'algoritmo originale di Voss; in figg. 9b e 9c l'algoritmo è stato generalizzato per ottenere varianti della prima linea melodica (utilizzando lo stesso seme) nelle quali apparisse più evidente la suddivisione gerarchica in frasi e sottofrasi.

Sono stati scritti programmi per la generazione di musica a più voci; è stata sperimentata la possibilità di controllare con sequenze numeriche $1/f$ anche le durate delle note e di stabilire una interdipendenza fra le fluttuazioni delle voci (o dei parametri acustici di una voce). Due esempi sonori generati dai programmi di questa serie sono contenuti in un disco dimostrativo (18)

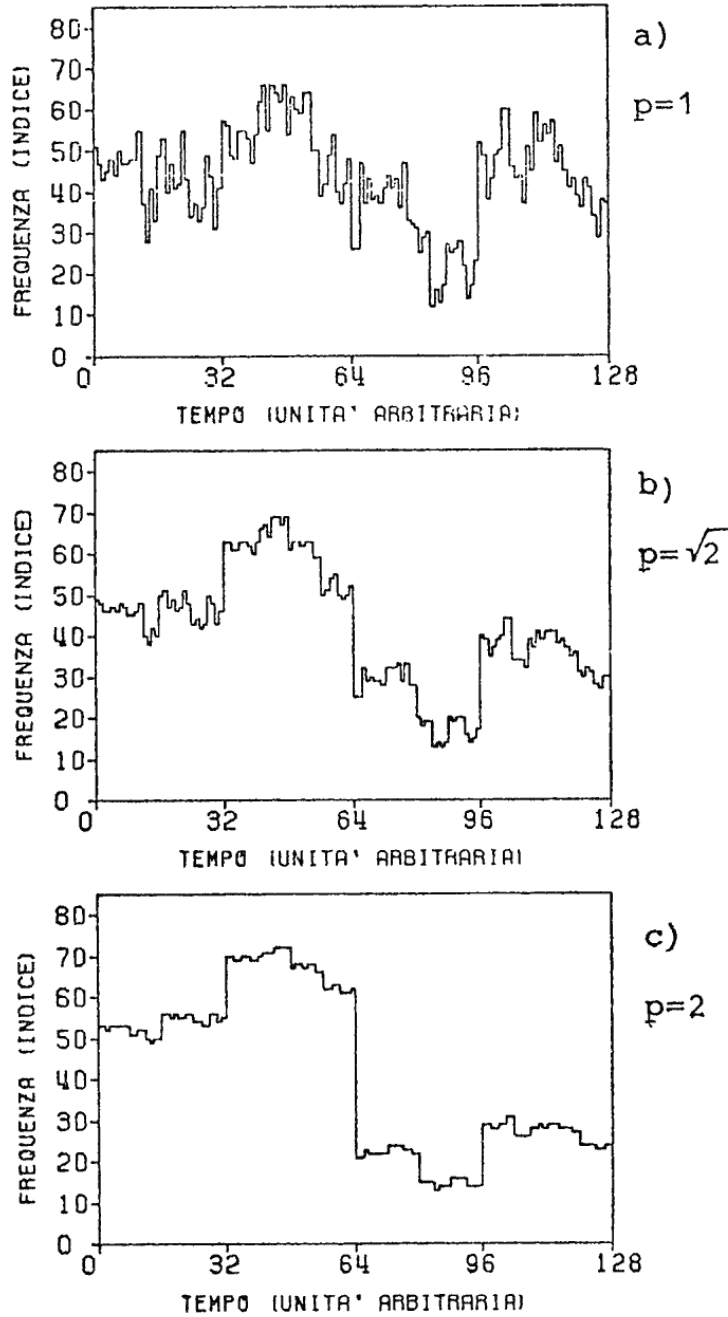


Fig.9 - Tre melodie stocastiche ottenute con l'algoritmo dei dadi.

Una figura geometrica è detta 'autosimile' quando è scomponibile in parti simili all'intera figura. Fig. 10 è autosimile.

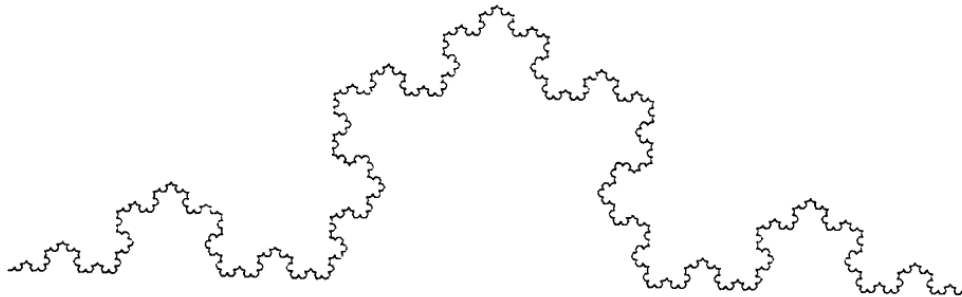


Fig. 10 - Una figura autosimile (curva di Koch)

L'autosimilitudine può valere anche in senso statistico. Fig. 9c è statisticamente autosimile; la prima metà del grafico, ad esempio, se ingrandita di un fattore 2, riflette lo stesso comportamento statistico dell'intero grafico.

Come si vede facilmente, l'autosimilitudine è un caso particolare di strutturazione gerarchica e, come tale, può essere interessante applicarla alla composizione automatica di sequenze musicali. A questo scopo è stata scritta una serie di programmi per la implementazione di un particolare processo stocastico, il volo di Lévy, e per il suo impiego in senso compositivo. (I programmi, scritti in Fortran, generano sequenze musicali immediatamente eseguibili al terminale audio TAU2).

Un punto mobile L compie un volo di Lévy quando si muove in uno spazio n -dimensionale per salti successivi che siano:

- statisticamente indipendenti
- isotropi
- distribuiti con probabilità

$$\text{Prob}(r > x) = \begin{cases} x^{-D} & \text{per } x \geq 1 \\ 1 & \text{per } x < 1 \end{cases} \quad (D > 0, \text{ reale})$$

per quanto riguarda il modulo r (si parlerà allora, più precisamente, di volo di Lévy ad esponente D).

Mandelbrot⁽¹⁹⁾ ha mostrato come l'insieme infinito dei punti occupati dal

punto mobile L (i vertici della poligonale che rappresenta la traiettoria del volo) sia statisticamente (ed asintoticamente) autosimile e presenti una organizzazione gerarchica tale da consentirne l'uso come modello della distribuzione delle stelle nell'universo, con galassie aggregate in ammassi di galassie, a loro volte aggregati in ammassi di ordine superiore, e così via. Inoltre la diminuzione dell'esponente D provoca un aumento delle distanze relative tra le galassie (in rapporto alle loro dimensioni), ad ogni livello gerarchico, o, da un differente punto di vista, un aumento del loro grado di aggregazione (la contraddizione è solo apparente), e pone in maggior evidenza la struttura gerarchica: il fenomeno è del tutto analogo a quanto si osserva in fig. 9, dove nel passare dal caso a) al caso c) aumenta la distinguibilità fra sottofrasi continue.

Fig. 11 mostra degli aggregati di galassie simulati da Mandelbrot mediante voli di Lévy. Il valore di D decresce (inizialmente $D = 2$) accentuando la

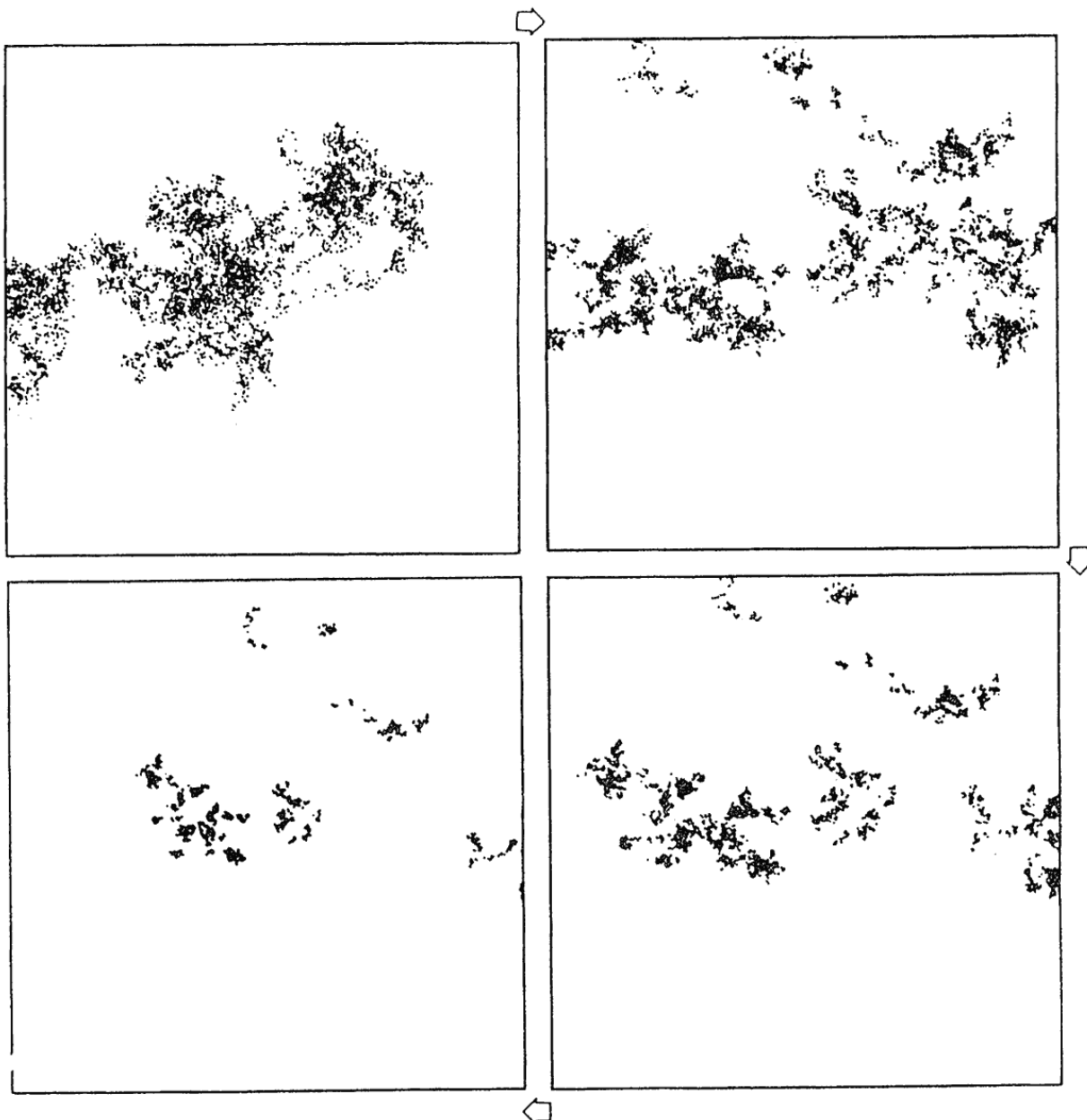


Fig. 11 - Galassie di Mandelbrot con diversi gradi di aggregazione

separazione fra le galassie. Essendo stato utilizzato lo stesso seme (per inizializzare il processo di generazione dei numeri casuali) per tutti gli esempi, questi appaiono come varianti di una unica configurazione.

E' possibile ottenere musica stocastica autosimile (dunque dotata di struttura gerarchica) ambientando un volo di Lévy in uno spazio n-dimensionale nel quale ogni asse sia stato associato ad un parametro acustico (frequenza, durata, intensità). Ogni salto del punto mobile L porta ad un nuovo vertice del volo le cui n coordinate rappresentano altrettanti nuovi valori dei parametri acustici, cioè un nuovo evento sonoro ⁽²⁰⁾.

Fig. 12 illustra un esempio di sequenza polifonica a 4 voci generata da un volo di Lévy in uno spazio quadridimensionale nel quale tutti e quattro gli assi sono stati associati al parametro frequenza (per semplicità si può pensare di mantenere fissi timbri, intensità e durate delle note). Fig. 12a mostra una delle quattro voci; in fig. 12b le voci sono confrontate a due a due. E' evidente la mutua dipendenza delle linee melodiche per la quale spesso (ma non sempre) grandi intervalli di frequenza nelle voci risultano sincronizzati.

In virtù della metrica assegnata allo spazio, l'autosimilarità è presente anche nelle proiezioni dei vertici del volo sugli assi dello spazio, cioè nelle fluttuazioni melodiche.

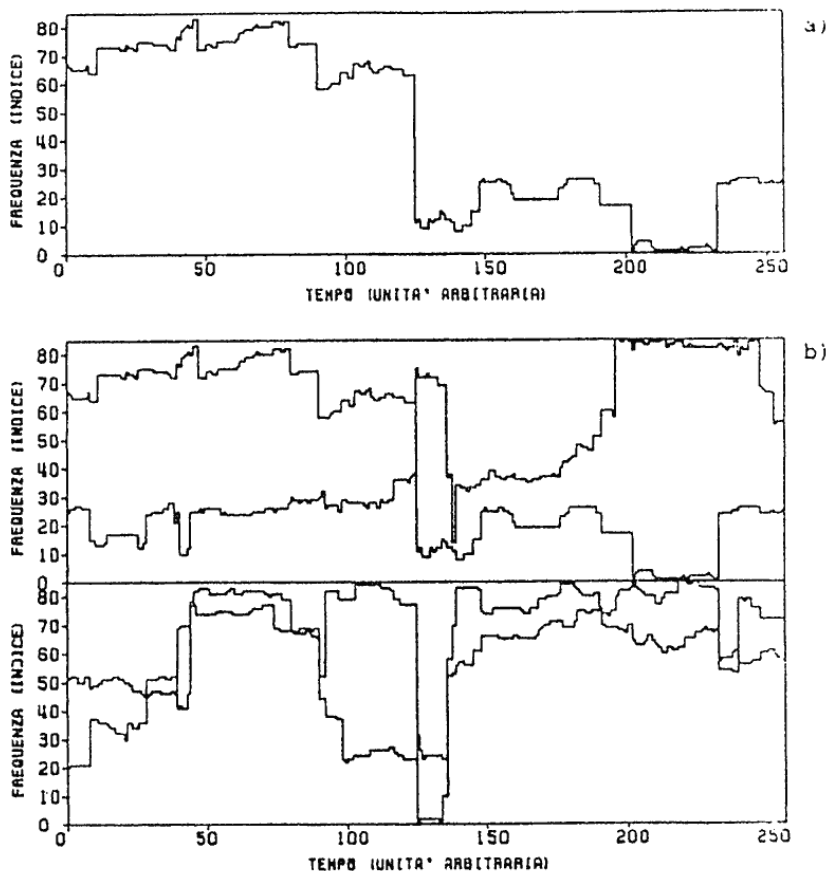


Fig.12 - Una sequenza polifonica a 4 voci generata da un volo di Lévy ($D=1$) in uno spazio acustico a 4 dimensioni (tutti e 4 gli assi sono stati associati al parametro frequenza).

BIBLIOGRAFIA

- 1) F.K.Prieberg "Musica ex machina", Einaudi (Torino) 1963
- 2) I.Xenakis "Formalized music", Indiana Univ. Press - 1970
- 3) H.Brün "From Musical Ideas to Computers and Back", su The Computer and Music (ed.Harry B. Lincoln) Cornell Univ. Press.1970
- 4) J.E.Yougblood "Style as Information", J.of Music Theory, Vol.2,n°1-1958
- 5) R.C.Pinkerton "Information Theory and Melody", Sci.Am.,Vol.194,2,pag.77-1956
- 6) H.F.Olson,H.Belar "Aid to Music Composition Employing a Random Probability System", J.of the Acoust. Soc.Am.Vol.33,pag.1163-1961
- 7) F.P.Brooks et Al. "An Experiment in Musical Composition", IRE Trans.on Electronic Computers EC - 6, pag.175 - 1957
- 8) L.A.Hiller,L.M.Isaacson "Experimental Music", McGraw-Hill NY. - 1959
- 9) L.A.Hiller "Computer Music", Sci.Am.Vol.201,n°6 - 1959
- 10) S.Gill "A Technique for the Composition of Music in a Computer", The Computer Journ.Vol.6, pag. 129-1963.
- 11) D.Lidov,J.Gabura "A Melody Writing Algorithm Using a Formal Language Model", Comp.Stud.Hum.and Verbal Behaviour, Vol.4 n° 3-4,pag.138-1973
- 12) S.R.Holtzman "An Automated Sound Synthesis Instrument", Computer Music Jour.,Vol.3,n°3 - 1979
- 13) J.Myhill "Controlled Indeterminacy - A first Step Towards a Semi-Stochastic Music Language", Computer Music Jour.,Vol.3 n° 3 - 1979
- 14) B.Truax "A Communicational Approach to Computer Sound Program", J.of Music Theory, Vol. 20, n° 2, pag. 227 - 1976 (Versione ridotta su Computer Music J., Vol. I, n° 3 - 1977).
- 15) P.Berg "PILE - A Language for Sound Synthesis", Computer Music J., Vol. 3, n° 1 - 1979
- 16) R.F.Voss,J.Charke "'1/f noise' in Music: Music from 1/f noise",J.Acoust.Soc. Am.,Vol.63,n°1 - 1978
- 17) M.Gardner "Musica bianca, musica scura, curve fratte e fluttuazioni uno-su-effe", Le Scienze, Agosto 1978
- 18) P.Grossi et Al. "Computer Music", disco dimostrativo, CNUCE-C.N.R.,1979
- 19) B.B.Mandelbrot "Fractals,Form, Chance and Dimension", Freeman & Co - 1978
- 20) T.Bolognesi "Composizione automatica: dalla musica 1/f alla musica autosimile", pubbl. CNUCE n° 163 - 1979

IL SISTEMA TAUMUS TAU2

P. GROSSI

Conservatorio di Firenze

Un'importante realizzazione del gruppo di lavoro pisano è costituita dal sistema TAUMUS-TAU2, un complesso di apparecchiature elettroniche (hardware) e di programmi per computer (software), che consente la memorizzazione, composizione, rielaborazione ed esecuzione in tempo reale di brani musicali.

Il sistema, basato sul metodo ibrido (cioè in parte digitale e in parte analogico), fa uso, per la sintesi del suono, di un terminale audio appositamente progettato e costruito negli anni '74-'75 all'IEI, il TAU2 e, per l'elaborazione musicale, del programma TAUMUS, residente sul sistema IBM 370/168 del CNUCE.

IL TAU2 può esser visto come lo strumento musicale sul quale vengono eseguite le strutture sonore elaborate tramite il TAUMUS; il TAUMUS, a sua volta crea, manipola, brani musicali sulla base di istruzioni o comandi assegnati dall'utente mediante la tastiera alfanumerica del terminale (scrivente o video) collegato all'elaboratore.

IL TERMINALE AUDIO TAU2

Il TAU2 è uno strumento polifonico, politimbrico e che esegue musica in tempo reale sotto il controllo di un elaboratore del tipo generale.

Il TAU2 è composto da un'unità di interfaccia e di controllo interamente digitale, che riceve dall'elaboratore le istruzioni musicali contenenti i parametri acustici e scambia con esso i comandi necessari alla corretta trasmissione dei dati musicali, e da un'unità digitale-analogica (unità audio) che produce i segnali in banda audio in base alla codifica binaria dei parametri fornita in sequenza dall'unità di controllo.

Elenchiamo brevemente le prestazioni musicali del terminale tralasciando le altre caratteristiche operative.

I segnali audio sono ottenuti sommando un certo numero di segnali sinusoidali con frequenza in rapporto armonico con la fondamentale e con ampiezze regolabili dinamicamente e individualmente tramite le apposite istruzioni musicali del programma TAUMUS e che contengono in ordine opportuno i parametri:

- frequenza fondamentale delle note da emettere (F)
- ampiezza delle componenti armoniche (A)
- Intensità dei suoni (I)
- durata dei suoni (D)
- effetti speciali dei suoni (ES)

Il TAU2 dispone di una gamma di 324 frequenze comprese fra 32,4 e 16,425 Hertz (9 ottave) il cui rapporto intervallare di base è di 1/6 di tono temperato, sufficiente a provare all'ascolto una sensazione quasi continua della variazione del tono.

Le durate dei suoni sono regolabili via software a multipli di 10ms e via Hardware si possono ridurre a multipli di 1ms tramite un regolare manuale posto sul pannello di comando del TAU2.

Per simulare l'effetto di differenti sorgenti distribuite nello spazio il TAU2 genera suoni su tre canali distinti e simultaneamente.

Da ogni canale si possono emettere fino a quattro note contemporaneamente, ciascuna corredata automaticamente delle prime sette armoniche (28 segnali distinti messi insieme per canale).

La forma d'onda di ciascun canale può essere definita tramite apposita istruzione detta timbro, controllando l'ampiezza di ciascuna formante entro sette livelli di ampiezza, con una dinamica di 27db.

Il volume generale del canale è regolabile anch'esso tramite software entro 15 livelli d'intensità (29dB).

Considerando le dinamiche possibili per i suddetti parametri si possono ottenere complessivamente 2^{21} combinazioni spettrali per canale e con opportune successioni dalle quali si ottengono numerosi timbri diversi e in una qualsiasi successione durante l'esecuzione dello stesso brano. Analogamente, agendo sui canali di intensità di canale, si possono ottenere modulazioni degli sviluppi del suono. La scelta dei timbri (successione distribuzione timbro) e la forma degli involucri (evoluzione delle intensità) può essere fatta fra alcuni modelli precedentemente memorizzati in archivio del TAUMUS,

oppure è lasciata alla facoltà dell'utente (compositore la ricerca e la programmazione delle forme d'onda che ritiene più adatte per il suo brano.

BREVE NOTA SUL TAU2

Il progetto e la realizzazione del TAU2 risalgono agli anni '73-'74-'75.

Le caratteristiche strutturali e operative del TAU2 furono scelte tenendo conto dei componenti disponibili in quell'epoca e con l'obbiettivo di ottenere l'esecuzione automatica di brani polifonici in tempo reale con un ridotto valore del tempo di calcolo dell'elaboratore, così da poter svolgere esperienze di musicologia, didattica, produzione di computer music nella maniera più economica, agevole, immediata possibile.

Tra l'altro fu deciso di non scegliere fra gli obbiettivi, quello dell'imitazione di strumenti o sintetizzatori di tipo tradizionale o di sperimentazione di nuovi modelli di sintesi, ma l'impegno fu rivolto verso l'acquisizione di un'estesa gamma di valori dei parametri acustici e la loro completa programmabilità via software. Perciò fu adottato il principio della semplice sintesi additiva armonica a componenti sinusoidali.

Mediante originali soluzioni circuitali dell'unità audio e grazie all'interfacciamento con il computer mediante una memoria tampone e una opportuna organizzazione dell'unità di controllo si sono potute ottenere interessanti prestazioni quali:

- sintesi armonica a spettri variabili a brevi intervalli di tempo
- segnali audio con modulazioni complesse in modo pressoché ininterrotto per brani di lunghezza qualsiasi.
- esecuzione di un numero di note sufficiente per produrre brani musicali polifonici senza ricorrere all'uso del "playback.
- esecuzione di musica indipendentemente dalla velocità di arrivo dei comandi dall'elaboratore, che può essere così utilizzato da altri utenti.
- rapporto fra tempo di calcolo e tempo di esecuzione della musica che è mantenuto nei limiti di qualche secondo di elaborazione (anche complessa) per un minuto di musica eseguita dal TAU2. Per questi due ultimi requisiti

specialmente, l'uso del TAU2 è tuttora valido in quanto consente lo sfruttamento in tempo reale delle ampie risorse del sistema 370/168 del CNUCE (per esempio dell'archivio e del "teleprocessing") cui il terminale è attualmente collegato come una qualunque periferica di uscita.

IL PROGRAMMA TAUMUS

Il TAUMUS è un programma attualmente residente sul sistema IBM370/168, che interpreta ed esegue le istruzioni, o comandi, assegnati di volta in volta dall'utente tramite un terminale (video o scrivente) collegato al sistema. Le funzioni principali che l'utente può esplicare per mezzo dei comandi del TAUMUS sono tre: composizione, rielaborazione, gestione dell'archivio di brani. Per poter svolgere queste funzioni il TAUMUS è stato dotato di due principali zone di memoria: l'area operativa e l'archivio. L'area operativa è la sede di tutte le elaborazioni del materiale sonoro; essa può contenere brani fino a 12 voci (come è permesso dalla struttura del TAU2) a un massimo (attualmente) di 2000 suoni per voce. Il materiale sonoro contenuto nell'area operativa, dopo aver subito eventuali rielaborazioni può venire indirizzato all'archivio per la conservazione definitiva e/o al TAU2 per l'esecuzione. Il richiamo di un brano dall'archivio all'area operativa o la composizione di un brano (che avviene direttamente in area operativa) può provare o meno (a discrezione dell'utente) la cancellazione del contenuto precedente dell'area.

L'archivio può contenere brani per un totale di circa tre milioni di suoni, ma tale limite è facilmente superabile mediante supporti periferici del computer come nastri o dischi (memorie di massa).

Attualmente l'archivio contiene più di mille testi fra brani di ogni epoca e stile, modelli timbrici da impiegare in processi di modulazione del suono ed esperimenti di varia natura, e rappresenta, per dimensioni e modalità d'impiego, un esempio probabilmente unico nel suo genere.

I comandi dal TAUMUS possono essere visti come un insieme di strumenti per il trattamento dell'informazione contenuta nell'area operativa e nell'archivio, e per il suo trasferimento.

I comandi per la composizione di strutture sonore permettono la realizza-

zione di esse secondo due differenti criteri. In un caso (assegnazione testo) è possibile codificare e memorizzare in archivio brani dal testo completamente definito (ad esempio partiture classiche); nell'altro caso autogenerazione) le strutture sonore vengono generate automaticamente dal programma sulla base di processi di generazione di numeri casuali che possono venire controllati dall'utente a vari livelli.

I comandi di rielaborazione consentono all'utente di apportare modifiche sul materiale sonoro contenuto nell'area operativa, sia esso il frutto di precedenti operazione di composizione o di prelevamento diretto dall'archivio. Possono venir modificati in vario modo i valori dei parametri acustici delle note del brano (timbri, frequenze, durate, volumi), e il loro ordine.

I comandi di gestione dell'archivio mettono l'utente del TAUMUS in condizione di manipolare i brani archiviati e di inviarli all'area operativa in vari modi. E' possibile ad esempio cancellare brani, caricarne nell'area operativa più di uno in sequenza, o caricare in sovrapposizione singole voci da brani diversi, e così via.

E' poi possibile utilizzare tale funzione in modo automatico. Con opportuni comandi, infatti, l'utente può dare il via alla esecuzione di una serie prescelta di brani che il programma preleva in ordine casuale dall'archivio; l'esecuzione di ogni brano viene fatta seguire da un certo numero di variazioni le quali vengono realizzate dal programma utilizzando, sempre in modo casuale, le procedure dei comandi di rielaborazione. In questo modo il TAUMUS simula l'operato di un utente che, ininterrottamente, sceglie brani di archivio, li modifica in vario modo e li esegue.

DISCOGRAFIA PIETRO GROSSI.

Computer Music - FONOS TNC 30001/2 (album doppio)

Dimostrazione al terminale - Preludio II (Bach) - Sei Canoni (Bach) - Virtuosità - Combinatoria - Polifonia - Monodia - Unending Music.

Computer Music - CNUCE-CNR (album doppio)

Toccata per clavicembalo (Paradisi) - Suite in sol maggiore per violoncello (Bach) - 5 sonate per clavicembalo (Scarlatti) - Sonata con variazioni per clavicembalo (Scarlatti) - Sonata op. 25, n. 3 (Hindemith) - Algoritmi - 3 capricci per violoncello (Piatti) - 5 studi per violino (Dont) - 12 capricci per violino (Paganini) - Octofonia (Milani).

Computer Music - CNUCE-CNR e IEL-CNR (album doppio)

Contrappunto 5 dall'Arte delle Fuga (Bach) - Der Mond ist Aufgegangen (Mayr) - TAUMUS-Musikalischer Spass (Rampazzi) - 3 mappe (Bolognesi) - Aegror (Belfiore) - Contrappunto o dall'Arte della Fuga (Bach) - Bourrée da 'Water Music' (Haendel) - Sonata in mi magg. (Scarlatti) - Il cigno (Saint-Saens) - Studio 5 (Chopin) - Preludio (Debussy) - Change of tune da 'Mikrokosmos' (Bartok) - Trio Satz (Webern) - preludio 3 (Gershwin) - Tema e variazioni da 'Variazioni sopra un tema di Haydn' - Il volo del calabrone (Rimsky-Korsakov) - Improvvisazione 1 - Galop da il ballo 'Excelsior' (Marenco).

Computer music - AYMA Records ABL 30/1 e 30/2 (album doppio)

L'arte della fuga (Bach) - L'offerta musicale (Bach).

Un processo può essere visto come la sequenza di un certo tipo di eventi.

Siano dati un generico alfabeto ed un'operazione di composizione interna +; allora sequenza si definisce ricorsivamente con:

- a) $\sigma \in \Sigma$ è una sequenza;
- b) se x è una sequenza, $x\sigma$ è una sequenza.

Con Σ^* si indica l'insieme delle sequenze su Σ .

Con ϵ si indica la sequenza vuota.

Con Σ^+ si indica l'insieme delle sequenze su Σ non vuota.

Si dice monoide libero la tripla $\langle \Sigma^*, \circ, \epsilon \rangle$ in cui Σ^* è l'insieme delle sequenze su Σ , \circ è la operazione di giustapposizione, ϵ è la sequenza (o stringa) vuota.

Dati due monoidi liberi $\langle M, \circ, l \rangle$ e $\langle M', \circ', l' \rangle$ si dice morfismo di monoidi una applicazione

$$\phi : \langle M, \circ, l \rangle \rightarrow \langle M', \circ', l' \rangle$$

tale che

- a) $\phi(l) = l'$
- b) $\phi(x \circ y) = \phi(x) \circ' \phi(y)$

Si dice isomorfismo una applicazione che gode delle proprietà di un morfismo e di una corrispondenza biunivoca.

Le strutture algebriche definite possono essere interpretate in senso musicale.

Si possono definire alcuni operatori su Σ^* in Σ^* particolarmente utili al fine di produrre evoluzioni di stringhe.

Σ è un sottoinsieme dell'insieme \mathbb{N} dei numeri interi in corrispondenza biunivoca con i diversi simboli dei valori di uno dei parametri sonori.

Ad esempio, le dodici note del sistema temperato possono essere rappresentate dall'insieme $\{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11\}$.

Vogliamo quindi definire un insieme di operatori a partire dal gruppo abeliano $\langle \Sigma, +, \circ \rangle$.

L'operazione di composizione interna $+$ è definita da:

$$a) \quad \sigma_1 + \sigma_2 = \begin{cases} \sigma_1 + \sigma_2 & \text{se } \sigma_1 + \sigma_2 < 12 \\ \sigma_1 + \sigma_2 - 12 & \text{se } \sigma_1 + \sigma_2 \geq 12 \end{cases}$$

con $\sigma_1, \sigma_2 \in \Sigma$

$$b) \quad \sigma_0 + x = (\sigma_0 + \sigma_1) (\sigma_0 + \sigma_2) \dots (\sigma_0 + \sigma_n)$$

con $\sigma_0 \in \Sigma$ e $x = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n \in \Sigma^*$.

Si dice operatore di trasposizione su Σ^+ di grado t e si indica con $T(t)$ un operatore così definito:

$$T(t) : \Sigma^+ \rightarrow \Sigma^+ \quad \text{con } t \in \Sigma$$

tale che

$$a) \quad T(t)(\sigma) = t + \sigma$$

$$b) \quad T(t)(x\sigma) = T(t)(x) T(t)(\sigma) .$$

L'operatore di trasposizione $T(t)$ è un isomorfismo di Σ^+ in sé stesso.

Ad esempio: siano $1,2,3,4,5 \in \Sigma$; allora

$$2345 = T(1)(1234) = T(1)(12) T(1)(34) = 2345.$$

Si dice classe di operatori \mathcal{C} la classe degli operatori $T(t)$ tali che $T(t) \in \mathcal{C}$ e $t \in \Sigma$.

La cardinalità dell'insieme \mathcal{C} è uguale alla cardinalità di Σ .

Un particolare operatore della classe è l'operatore $T(0)$ che traspone $\sigma \in \Sigma$ in sé stesso; cioè

$$T(0)(\sigma) = 0 + \sigma = \sigma$$

$T(0)$ si può chiamare operatore di identità I definito da:

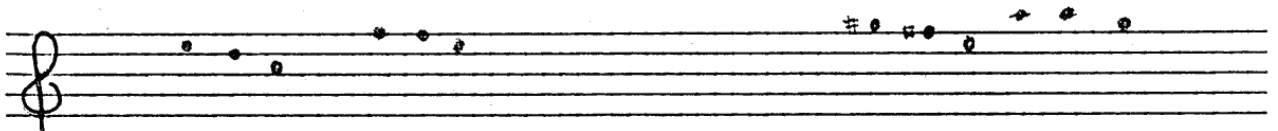
- a) $I(\sigma) = \sigma$
- b) $I(x\sigma) = I(x) I(\sigma)$.

L'operatore di trasposizione è particolarmente utile se applicato alle altezze dei suoni; serve per compiere funzioni della musica tradizionale quali le progressioni o le modulazioni.

Ad esempio, le progressioni possono essere di due tipi (Schoenberg, 1967):

- a) progressioni modulanti;
- b) progressioni tonali.

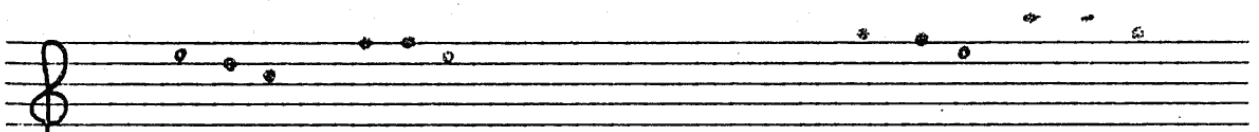
Se si assume come alfabeto l'insieme $\Sigma = \{0,1,\dots,11\}$ l'operatore di trasposizione $T(t)$ produce una modulazione di t semitoni su una sequenza $x \in \Sigma^+$.



$x=420554$

$T(4)(420554)=864998$

Se si assume come alfabeto l'insieme $\Sigma = \{0,1,2,3,4,5,6\}$, in cui i sette numeri rappresentano i sette gradi di una tonalità maggiore (ad esempio il "do maggiore"), l'operatore di trasposizione $T(t)$ produce una progressione tonale di grado t -esimo su una sequenza $x \in \Sigma^+$.



$x=210332$

$T(2)(210332)=432554$

Si dice operatore di inversione speculare su Σ^+ rispetto ad i e si indica con $S(i)$ un operatore così definito:

$$S(i) : \Sigma^+ \rightarrow \Sigma^+ \quad \text{con} \quad i \in \Sigma$$

tale che

- a) $S(i)(\sigma) = 2i - \sigma$
- b) $S(i)(x\sigma) = S(i)(x) S(i)(\sigma)$.

L'operatore di inversione speculare $S(i)$ è un isomorfismo di Σ^+ in sé stesso.

Infatti: sia $\Sigma = \{0, 1, \dots, 11\}$; allora

$$2345 = S(1)(0 \ 11 \ 10 \ 9) = S(1)(0 \ 11) S(1)(10 \ 9) = 2345$$



Si dice classe di operatori \mathcal{J} la classe degli operatori $S(i)$ tali che $S(i) \in \mathcal{J}$ e $i \in \Sigma$.

La cardinalità dell'insieme \mathcal{J} è uguale alla cardinalità di Σ .

L'operatore di inversione speculare applicato alle sequenze di altezze compie la funzione di invertire tutti gli intervalli di una sequenza data.

Questa funzione è molto importante nella musica degli ultimi secoli; J.S. Bach utilizzò molto spesso questa funzione, soprattutto nelle ultime opere quali l'"Arte della fuga" e l'"Offerta musicale"; anche Beethoven utilizzò spesso la inversione nelle sue ultime composizioni quale il "Quartetto per archi in fa maggiore, Op. 135; l'inversione è diventata anche una delle forme di manipolazione del materiale seriale sonoro fondamentali; i musicisti della scuola dodecafonica di Vienna, infatti, hanno assunto que

sto tipo di variazione come strumento tra i basilari per la composizione (Rufer, 1954).

Ad esempio, nelle "Variazioni per orchestra, Op. 31" di Arnold Schoenberg la serie dodecafonica di base è

A musical staff in treble clef showing a sequence of 12 notes. Below the staff, the numbers 4, 6, 3, 5, 9, 2, 1, 7, 8, 11, 0 are aligned with the notes. The first note is labeled 'x=10'.

e viene spesso usata la sua inversione speculare rispetto ad $i = 4$ cioè rispetto al mi :

A musical staff in treble clef showing the specular inversion of the series. Below the staff, the numbers 4, 2, 5, 3, 11, 6, 7, 1, 0, 9, 8 are aligned with the notes. The first note is labeled 'S(4)(x)=10'.

Gli operatori di inversione speculare su alfabeti di cardinalità pari sono uguali a due a due.

Infatti se si prende $\Sigma = \{0,1,\dots,11\}$, si ha che

$$S(i)(\sigma) = S(i+6)(\sigma)$$

Si dice operatore di retrogradazione su Σ^* e si indica con R un operatore così definito:

$$R : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$$

tale che

- a) $R(\wedge) = \wedge$
- b) $R(\sigma) = \sigma$
- c) $R(x\sigma) = \sigma R(x)$

L'operatore di retrogradazione R è una corrispondenza biunivoca tra coppie di elementi di Σ^* , ma non è un isomorfismo di Σ^* in sé stesso.

Infatti: sia $\Sigma = \{0,1,\dots,11\}$; allora

$$4321 = R(1234) \neq R(12) R(34) = 2143 .$$

L'operatore di retrogradazione applicato ad uno qualunque dei parametri del suono compie la funzione di rovesciare l'ordine delle sequenze di simboli relative ai diversi parametri.

Applicato alle altezze dei suoni ha la stessa importanza storica dell'operatore di inversione speculare, essendo stato ampiamente usato da compositori come Bach, Beethoven, Schoenberg, Berg, Webern e perfino dai compositori delle correnti seriali d'avanguardia (Boulez, Stockhausen, etc.).

Ad esempio, nelle "Variazioni per orchestra, Op. 31" di Arnold Schoenberg la serie dodecafonica di base riportata precedentemente viene spesso utilizzata nella sua forma retrogradata.

R(x)=0 11 8 7 1 2 9 5 3 6 4 10

Applicato alla sequenze di durate, l'operatore di retrogradazione R nella manipolazione di strutture ritmiche è di particolare utilità.

Ad esempio, se si prende $\Sigma = \{0,1,2,3,4,5\}$ dove $0 \leftrightarrow \rho$, $1 \leftrightarrow \rho$, $2 \leftrightarrow \rho$, $3 \leftrightarrow \rho$, $4 \leftrightarrow \rho$, $5 \leftrightarrow \rho$, si possono descrivere facilmente alcune figure ritmiche.

Nel "Canone perpetuo" dalla "Offerta musicale" di J.S.Bach la struttura ritmica di alcune battute è data dalla sequenza:

x = 34433

Nel corso della composizione viene spesso utilizzata la sequenza:

p p p p p

$$R(x) = 33443$$

Considerazioni analoghe valgono per le sequenze che descrivono l'evoluzione del volume del suono.

Si indica con $t_i(s,m)$ un operatore che compie un'azione di trasposizione sulla sottosequenza che va dallo s -esimo elemento allo m -esimo elemento della sequenza $x \in \Sigma^+$ e che giustappone la stringa trasposta alla sequenza data x .

Ad esempio, se $x = 1\ 2\ 3\ 4\ 5$, $s = 2$, $m = 3$, $i = 1$, con $s, m \in \mathbb{N}$ allora

$$xt_i(s,m) = 1\ 2\ 3\ 4\ 5 \quad t_1(2,3) = 1\ 2\ 3\ 4$$

Si indica con $s_i(s,m)$ un operatore che compie un'azione di inversione speculare rispetto ad i sulla sottosequenza che va dallo s -esimo elemento allo m -esimo elemento della sequenza $x \in \Sigma^+$ e che giustappone la stringa invertita specularmente alla sequenza data x .

Ad esempio, se $x = 2\ 5\ 7\ 8$, $s = 1$, $m = 3$, $i = 4$, con $s, m \in \mathbb{N}$ allora

$$xs_i(s,m) = 2\ 5\ 7\ 8 \quad s_4(1,3) = 2\ 5\ 7\ 8\ 6\ 3\ 1 .$$

Si indica con $r(s,m)$ un operatore che compie un'azione di retrogradazione sulla sottosequenza che va dallo s -esimo elemento allo m -esimo elemento della sequenza $x \in \Sigma^*$ e che giustappone la stringa retrogradata alla sequenza data x .

Ad esempio, se $x = 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9$, $s = 2$, $M = 6$ con $s, m \in \mathbb{N}$ allora

$$xr(s,m) = 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9 \quad r(2,6) = 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 7\ 6\ 5\ 4 .$$

Gli operatori t_i, s_i, r possono essere composti tra loro, cioè possono

essere applicati più operatori alla stessa sottosequenza di una sequenza data x .

Si dice classe di operatori Π la classe degli operatori $\pi(s,m)$ tali che $\pi(s,m)$ sia scomponibile in uno o più operatori t_i, s_i, r con $s, m \in \mathbb{N}$.

La cardinalità dell'insieme Π è uguale a quattro volte la cardinalità di Σ .

Infatti, dalle possibili combinazioni degli operatori che sono stati definiti si possono ottenere solo quattro sottoclassi della classe Π ciascuna avente cardinalità uguale alla cardinalità di Σ .

Se si indica con t_i^n, s_i^n, r^n la applicazione per n volte degli operatori t_i, s_i, r rispettivamente, gli operatori π e Π si possono indicare con i seguenti quattro tipi:

- a) operatori t_{i+} : si ottengono dalla combinazione di un numero pari o dispari di operatori t_j con un numero pari di operatori a_k , in un ordine qualunque;
- b) operatori t_{i-} : si ottengono dalla combinazione di un numero pari o dispari di operatori t_j con un numero dispari di operatori s_k , in un ordine qualunque;
- c) operatori rt_{i+} : si ottengono dalla combinazione di un numero dispari di operatori r con un operatore t_{i+} , in un ordine qualunque;
- d) operatori rt_{i-} : si ottengono dalla combinazione di un numero dispari di operatori r con un operatore t_{i-} , in un ordine qualunque.

E' opportuno ricordare che:

a) $r^n(s,m) = t_0(s,m)$ se n è un numero pari;

ad esempio, se $x = 2\ 3\ 4\ 5$, $s = 1$, $m = 4$, $n = 2$ si ha

$$2\ 3\ 4\ 5\ r(r(1,4)) = 2\ 3\ 4\ 5\ r(5\ 4\ 3\ 2) = 2\ 3\ 4\ 5\ 3\ 4\ 5 = 2\ 3\ 4\ 5\ t_0(1,4)$$

b) $t_i(t_k(s,m)) = t_{i+k}(s,m) = t_k(t_i(s,m)) = t_{(i+k)+}(s,m)$

c) $t_i(s_k(s,m)) \neq s_k(t_i(s,m))$

d) $s_i(s_k(s,m)) \neq s_k(s_i(s,m))$

e) $r(s_i(s,m)) = s_i(r(s,m))$

f) $r(t_i(s,m)) = t_i(r(s,m))$

g) $t_i(s_k(s,m)) = t_{(i+2k)-}(s,m)$

h) $s_k(t_i(s,m)) = t_{(2k-i)-}(s,m)$

i) $s_i(s_k(s,m)) = t_{(2i-2k)+}(s,m)$

l) $s_k(s_i(s,m)) = t_{(2k-2i)+}(s,m)$

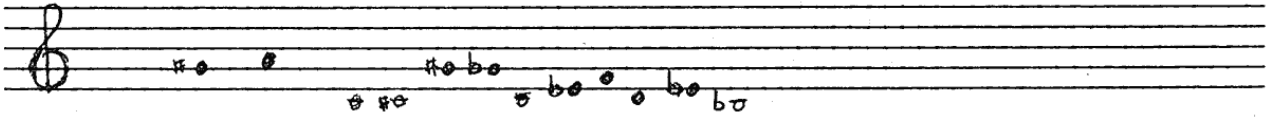
Gli operatori π così costruiti permettono di compiere funzioni più complesse sulle sequenze; nella musica si è fatto spesso riscontro in funzioni (soprattutto melodiche ed armoniche) di complessità di questo tipo.

La forma di composizione più usata è la retrogradazione di sottosequenze che sono la inversione speculare di sottosequenze di sequenze date (o, che è lo stesso, la inversione speculare di sottosequenze che sono la retrogradazione di sottosequenze di sequenze date).

Questa funzione complessa è stata molto usata da J.S.Bach e da tutti i suoi epigoni, e da tutti i compositori che abbiano fatto uso delle tecniche compositive dodecafoniche o, più in generale, seriali.

Ad esempio, nelle "Variazioni per orchestra, Op. 31" di Arnold Schoenberg la serie dodecafonica di base (che è, come abbiamo già ricordato,

$x = 4 6 3 5 9 2 1 7 8 11 0$) viene spesso utilizzata retrogradata ed invertita specularmente rispetto al mi; cioè:



$$r(s_4(s, s+11)) = s_4(r(s, s+11)) = rt_{8-}(s, s+11) =$$

$$= 8 9 0 1 7 6 11 3 5 2 4 10$$

essendo la sottosequenza che va dallo elemento s -esimo allo elemento $(s+11)$ -esimo la serie x .

Possiamo dare ora una sintassi che generi delle liste finite di elementi di Σ che chiameremo processori $\rho \in \mathcal{P}$.

A questa sintassi assoceremo poi una interpretazione dei processori così definiti su Σ .

Sintassi

$$a) \sigma \in \Sigma \implies \sigma \in \mathcal{P}$$

$$b) x \in \mathcal{P} \implies b1) x\sigma \in \mathcal{P}$$

$$b2) \omega(x) \geq m \implies x\pi(s, m) \in \mathcal{P} \quad \forall \pi \in \Pi$$

dove ω è una misura a valori in \mathbb{N} e definita su \mathcal{P} che indica la lunghezza della sequenza che il processore x realizza; ω è tale che:

$$a) \omega(\sigma) = 1$$

$$b) \omega(x\sigma) = \omega(x) + 1$$

$$c) \omega(xt_j(s, m)) = \omega(x) + m - s + 1$$

$$d) \omega(xs_j(s, m)) = \omega(x) + m - s + 1$$

$$e) \omega(xr(s, m)) = \omega(x) + m - s + 1$$

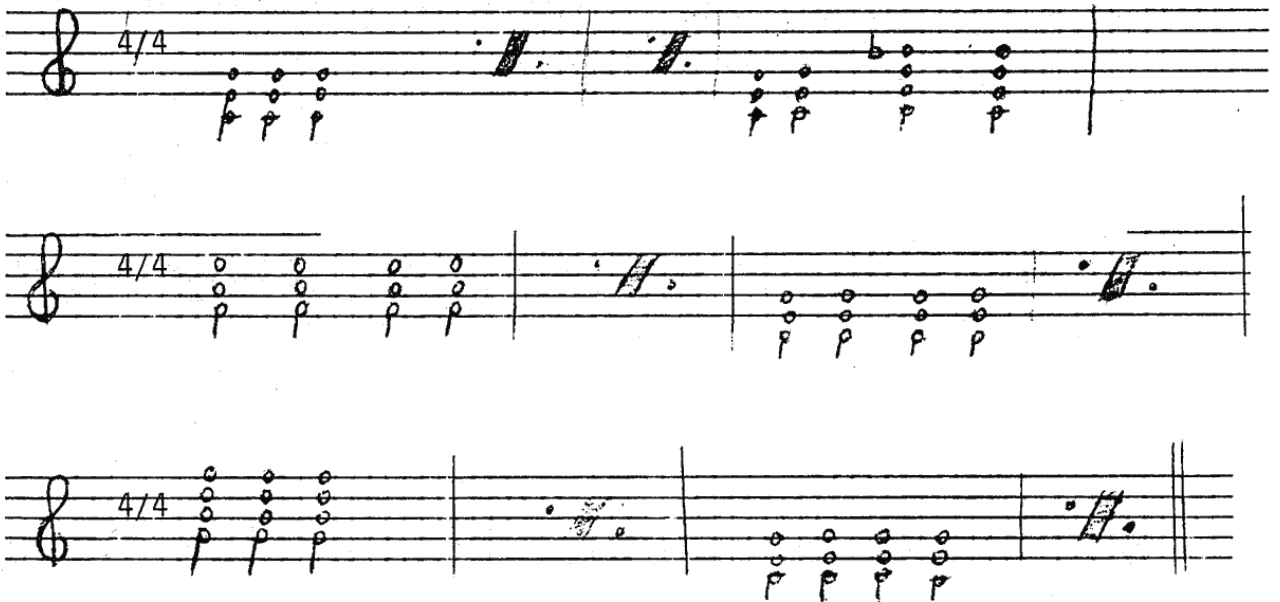
$$f) \omega(x(x, m)) = \omega(x) + m - s + 1$$

Si definisce $\ell(x)$ una misura a valori in \mathbb{N} che indica il numero di elementi di un processore (o, più in generale, di una sequenza).

Vediamo due esempi di processori.

1) Sia $\Sigma = \{0,1,2,3\}$ l'alfabeto in cui $0 \leftrightarrow$ accordo di do maggiore, $1 \leftrightarrow$ accordo di do maggiore con la settima diminuita, $2 \leftrightarrow$ accordo di fa maggiore, $3 \leftrightarrow$ accordo di sol maggiore settima.

Allora, il semplice "giro" di blues



può essere realizzato dal processore

$P = 0 t_0(1,1) t_0(1,2) t_0(1,4) t_0(1,6) 1 t_0(15,15) 2 t_0(17,17)$
 $t_0(17,18) t_0(17,20) t_0(1,8) 3 t_0(33,33) t_0(33,34) t_0(33,36)$
 $t_0(1,8).$

Il processore P ha $\ell(P) = 17$ ed $\omega(P) = 48$.

2) Lo stesso "giro" di blues può essere realizzato dal processore

$$P' = 0 \ t_0(1,1) \ t_0(1,2) \ t_0(1,4) \ t_0(1,6) \ t_1(1,2) \ t_2(1,8) \ t_0(1,8) \\ t_3(1,8) \ t_0(1,8).$$

Il processore P' ha $\ell(P') = 10$ ed $\omega(P') = 48$.

Sia $\Sigma = \{0,1,\dots,11\}$.

Il seguente esempio è una stringa che non è un processore:

$$x = 2 \ 4 \ 3 \ 5 \ r(3,8) \ 5 \ 8 \ \dots$$

Infatti, $\omega(x') < m$ essendo $x' = 2 \ 4 \ 3 \ 5$, poiché $\omega(x') = 4$ ed $m = 8$.

Per verificare che una stringa sia un processore, è sufficiente controllare, procedendo da sinistra a destra, che m non sia superiore ad $\omega(x)$ ogni volta che si incontra un operatore nella sottostringa x del processore P , di cui è già stata controllata la correttezza della sottostringa y tale che $\omega(y) + 1 = \omega(x)$.

Semantica

Si dice semantica l'interpretazione dei processi sullo insieme delle sequenze di elementi di Σ .

La semantica che definiremo sarà ottenuta assegnando delle regole che associano sequenze ad ogni processore.

Le regole sono:

$W : P \rightarrow \Sigma^+$ è definita da:

a) $W(\sigma) = \sigma$

b) $W(x\sigma) = W(x)\sigma$

c) $W(x\pi(x,m)) = W(x)y$

dove y è la stringa generata dall'applicazione dello operatore $\pi \in \Pi$ alla sottosequenza di $W(x)$ che va dallo s -esimo al m -esimo elemento.

La definizione del semplice linguaggio P dei processori che sono generati dalla sintassi ed interpretati dalla semantica suddette, permette di formulare alcuni teoremi.

Teorema (1) - Ad ogni processore $P \in \mathcal{P}$ è associata una e una sola sequenza $W(P) \in \Sigma^+$, ed inoltre $\omega(P) = \ell(W(P))$.

Dim. - (a) Ai processori di tipo $\sigma \in \Sigma$ è associata l'unica sequenza σ , cioè $W(\sigma) = \sigma$ (regola a), semantica), ed inoltre $\omega(\sigma) = 1 = \ell(\sigma) = \ell(W(\sigma))$

(b) Supponiamo, per ipotesi di induzione, che il teorema sia verificato per il processore x : allora al processore x è associata la sequenza $W(x)$ ed inoltre $\omega(x) = \ell(W(x))$.

Si hanno due casi:

i) sia $x\sigma$ un processore: allora $W(x\sigma) = W(x)\sigma$ (regola b), semantica); poiché $W(x)$ è unica, allora anche $W(x\sigma)$ è unico, ed inoltre:

$$\omega(x\sigma) = \omega(x) + 1 = \ell(W(x)) + 1 = \ell(W(x)\sigma) = \ell(W(x\sigma)).$$

ii) sia $x\pi(s,m)$ un processore, allora $m \leq \omega(x)$ (regola b), sintassi); esiste allora una unica sottosequenza tra il posto s ed il posto m ; diciamo y tale sottosequenza; allora $W(x\pi(s,m)) = W(x)y$ (regola c), semantica); quindi, poiché $W(x)$ è unica, anche $W(x\pi(s,m))$ è unica ed inoltre:

$$\begin{aligned} \omega(x\pi(s,m)) &= \omega(x) + m - s + 1 = \ell(W(x)) + m - s + 1 = \\ &= \ell(W(x)y) = \ell(W(x\pi(s,m))) . \end{aligned}$$

c.v.d.

Teorema (2) - Se x è un processore, si ha $\omega(x) \geq \ell(x)$.

Dim. - (a) Per i processori di tipo $\sigma \in \Sigma$ vale:

$$\omega(\sigma) = 1 = \ell(\sigma)$$

(b) Ammettendo per ipotesi di induzione che il teorema sia verificato per il processore x , cioè che $\omega(x) \geq \ell(x)$, allora:

i) se x è un processore:

$$\omega(x\sigma) = \omega(x)+1 \geq \ell(x) + 1 = \ell(x\sigma)$$

ii) se $x\pi(s,m)$ è un processore:

$$\begin{aligned} \omega(x\pi(s,m)) &= \omega(x)+m-s+1 > \ell(x)+m-s+1 \geq \ell(x)+1 = \\ &= \ell(x\pi(s,m)). \end{aligned}$$

c.v.d.

Il teorema (1) mette in evidenza che la definizione data di semantica è adatta ai nostri scopi; infatti dalla definizione data risulta che ogni processore è una particolare descrizione di una sequenza di elementi dello alfabeto Σ .

Il teorema (2) dimostra che la descrizione di sequenze per mezzo dei processori che sono stati definiti produce una economia nella descrizione stessa.

La presenza di questa economia induce a cercare di dare una valutazione delle grandezza che essa può assumere.

Introduciamo perciò una misura della complessità di descrizione di una sequenza di elementi di Σ rispetto al linguaggio dei processori P .

Si dice complessità descrittiva della sequenza $S \in \Sigma^+$ rispetto al linguaggio dei processori P il numero reale $\Phi(S)$ dove

$$\begin{aligned} \Phi : \Sigma^+ &\rightarrow (0,1] \\ \Phi(S) &= \min_{\{P \mid W(P)=S\}} \frac{\ell(P)}{\omega(P)} \end{aligned}$$

$\Phi(S)$ ha le seguenti proprietà:

a) se $S = \sigma$ allora $\Phi(\sigma) = 1$

b) $\phi(S) \leq 1$ per il teorema (2)

c) $\phi(S) \geq \frac{\log_2 \ell(S)}{\ell(S)}$ poiché se si prende la sequenza S che ha intuitivamente la complessità descrittiva minima, cioè σ ripetuto per P^n volte, si può vedere che il processore di lunghezza minima che la produce ha lunghezza $n+1$;

$$\sigma t_{0+}(1,1) t_{0+}(1,2) t_{0+}(1,4) \dots t_{0+}(1,2^{n-1})$$

(P) 1 2 3 4 $n+1$

(P) 1 2 4 8 2^n

posto $2^n = \ell(S)$, per $n \rightarrow \infty$ si ha la c).

$\phi(S)$ può essere considerato anche una misura del tasso di informazione della stringa S di lunghezza $\ell(S)$.

Per dare una valutazione più approssimata dello estremo inferiore di $\phi(S)$ è utile definire una nuova variabile.

Si dice complessità descrittiva minima sulle sequenze di lunghezza n il numero:

$$\psi(n) = n \inf_{\ell(S)=n} \phi(S)$$

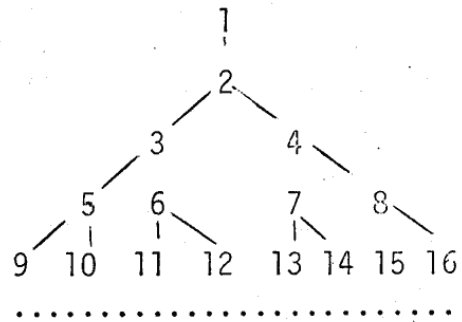
Allora vale il seguente teorema.

Teorema (3) - $\psi(n) = k$ è tale che si ha sempre

$$2^{k-2} + 1 \leq n \leq 2^{k-1}$$

Dim. - E' immediato verificare l'enunciato se si considera il seguente schema:

$k = 1 \quad n = 1$
 $K = 2 \quad n = 2$
 $k = 3 \quad 3 \leq n \leq 4$
 $k = 4 \quad 5 \leq n \leq 8$
 $k = 5 \quad 9 \leq n \leq 16$



Corollario (1) - $\psi(n)$ è asintotico a $\log_2 n$.

Corollario (2) - $\psi(n) > \log_2 n$

Infatti, per il teorema (3), si ha:

$$n \leq 2^{k-1} \quad \text{da cui}$$

$$\log_2 n \leq k - 1 < k$$

Tenendo conto della definizione di complessità minima di descrizione di sequenze di lunghezza $\ell(S)$ e del corollario (2), è immediato verificare il seguente teorema.

Teorema (4) -
$$\frac{\log_2 \ell(S)}{\ell(S)} < \frac{\psi(\ell(S))}{\ell(S)} \leq \Phi(S) \leq 1$$

dove $\psi(\ell(S))$ è asintotico a $\log_2 \ell(S)$.

Dim. - Per la definizione di $\psi(\ell(S))$ si ha

$\psi(\ell(S)) \leq \Phi(S) \ell(S)$; per il corollario (2) si ha

$$\log_2 \ell(S) < \psi(\ell(S)) \quad \text{e quindi} \quad \frac{\log_2 \ell(S)}{\ell(S)} < \frac{\psi(\ell(S))}{\ell(S)}$$

Ricordando il corollario (1), segue l'enunciato.

Abbiamo dato una valutazione dell'intervallo entro cui possono variare i valori della complessità descrittiva di una sequenza S rispetto al linguaggio dei processori P .

Ora vogliamo cercare quale è il numero $N(k)$ di processori per cui $\omega(P) = k$, cioè il numero di processori che produce sequenze di lunghezza k .

Ricordiamo che abbiamo definito un insieme di operatori la cui cardinalità è 48; (vedi nota ++).

Analizzando la definizione ricorsiva di processori, si ottiene facilmente il seguente sistema:

$$\begin{aligned} N(1) &= 12 \\ (1) \quad N(k) &= 48 \sum_j^{[k/2]} (k-2j) N(k-j) . \end{aligned}$$

Si può valutare un semplice estremo inferiore per i valori di $N(k)$.

Dal sistema (1) si ottiene facilmente:

$$\begin{aligned} N(k) &\geq 48(k-2)N(k-1) \\ N(k) &\geq 48^j (k-2)(k-3)(k-4)\dots(k-j-2)N(k-j-1). \end{aligned}$$

Ed in particolare si ha:

$$N(k) \geq 48^{k-3} (k-2)! N(3) .$$

Sviluppando il fattoriale di $(k-2)$ secondo Stirling si ottiene che

$$N(k) \geq \frac{48^k}{3^k} k^k$$

Tenendo presente che le sequenze di lunghezza k sono 12^k , si può concludere che, quindi, esiste almeno una sequenza di lunghezza k processata da almeno

++ Nota: ammesso di avere scelto $\Sigma = \{0,1,\dots,11\}$

$$\frac{N(k)}{12^k} \geq \frac{4^k}{3^k} k^k \quad \text{processori.}$$

Essendo il risultato trovato estremamente alto, è necessario costruire un algoritmo che, data una sequenza $S \in \Sigma^+$, trovi un processore che descrive la sequenza S in $\psi(S)$ passi, cioè tale che sia $\psi(S) = \ell(P)$ con $P \in P$, con un numero di passi di ordine inferiore a k^k .

Ecco un algoritmo che presenta questa proprietà.

Algoritmo (1)

Siano $x = S$ e $P = \cdot$ le condizioni iniziali.

(1) E' $x = \sigma$? Se SI poni $P = \sigma P$ - ALT
SE NO va a (2)

(2) Esiste il massimo x_1 tale
che $x = ax_1bx_2$ con $\pi(x_k) = x_2$
per qualche $\pi \in \Pi$? Se SI va a (3)
Se NO va a (4)

(3) Poni $x = a_1b$
 $s = \ell(a)+1$
 $m = \ell(ax_1)$
 $P = \pi(s,m)P$

Va a (1).

(4) Sia $x = y\sigma$ ($\sigma \in \Sigma$)
Poni $x = y$
 $P = \sigma P$
Va a (1) .

Se, ad esempio, fosse $S = 121231234$ si avrebbero i seguenti passi di esecuzione:

$$x = 121231$$

$$P = t_{1+}(3,5)$$

$$x = 12123$$

$$P = t_{0+}(3,3) t_{1+}(3,5)$$

$$x = 121$$

$$P = rt_{1+}(2,3) t_{0+}(3,3) t_{1+}(3,5)$$

$$x = 12$$

$$P = t_{0+}(1,1) rt_{1+}(2,3) \dots$$

$$x = 1$$

$$P = t_{1+}(1,1) t_{0+}(1,1) \dots$$

$$P = 1 t_{1+}(1,1) t_{0+}(1,1) rt_{1+}(2,3) t_{0+}(3,3) t_{1+}(3,5)$$

ALT

L'algoritmo descritto opera con un numero di passi proporzionale a

$$\sum_1^n k = \frac{n(n-1)}{2} \quad \text{che è asintetico a } \frac{n^2}{2}$$

su una sequenza di lunghezza n ed è quindi molto conveniente se si confronta l'ordine di grandezza di n^2 con l'ordine di grandezza di n^n .

Vediamo ora due diverse valutazioni del tempo di calcolo necessario per la determinazione di un processore di una sequenza S di lunghezza n con l'algoritmo (1), e quindi con le proprietà richieste.

La seconda strada che è stata seguita rende conto della proporzionalità del tempo di calcolo con il quadrato della lunghezza della sequenza.

1) Dato S tale che $\ell(S) = n$, determiniamo un algoritmo intuitivo per calcolare il massimo x_1 tale che $S = ax_1 bx_2$ con $\pi(x_1) = x_2$ per un operatore $\pi \in \Pi$ fissato.

a) Si fissi σ_n (l'ultimo elemento di S) e si determini se σ_n è ottenibile per mezzo dell'operatore π fissato dalla stringa $S - \sigma_n$.
L'esecuzione di a) richiede al più $n-1$ passi.

b) Si fissi $\sigma_{n-1} \sigma_n$ (gli ultimi due elementi di S) e si determini se $\sigma_{n-1} \sigma_n$ è ottenibile per mezzo dello operatore π fissato dalla stringa $S - \sigma_{n-1} \sigma_n$.

L'esecuzione di b) richiede al più $n-3$ passi.

c)

Il processo di ferma quando non esiste alcun $\sigma_{n-s_i-1} \dots \sigma_n$ ottenibile per mezzo dell'operatore π fissato dalla stringa $S - \sigma_{n-s_i-1} \dots \sigma_n$.

Il tempo di calcolo necessario per trovare il massimo x_1 con le proprietà che abbiamo richiesto) dato da:

$$t_0(n, s_i) = (n - 1) + (n - 3) + \dots + (n - 2s_i + 1)$$

che è circa uguale a

$$s_i^2 \left(\frac{n}{2} - \frac{2s_i}{3} \right)$$

quindi

$$t_c(n, s_i) \leq n \frac{s_i^2}{2} .$$

Il procedimento va avanti fino alla fine della costruzione del processo, trovando di volta in volta i diversi s_j .

Supponiamo allora che sia

$$n = s_1 + s_2 + \dots + s_j + \dots + s_i .$$

Il tempo di calcolo necessario per la determinazione completa del proces-

sore sarà allora tale che

$$T_{C\pi}(n) \leq \frac{n}{2} \sum_{j=1}^i s_j^2 \leq \frac{n^3}{2} .$$

Poiché inoltre tali operazioni devono essere compiute tante volte quanti sono gli operatori, si avrà in definitiva:

$$T_C(n) \leq 24n^3 .$$

2) Applicando una semplice estensione dell'algoritmo introdotto in (Paterson, 1973), si osserva che il tempo di calcolo necessario per calcolare il massimo x_1 tale che $S = ax_1 bx_2$ con $\pi(x_1) = x_2$ per qualche $\pi \in \Pi$ può essere valutato in un tempo proporzionale ad n , essendo n la lunghezza di S .

Cioè

$$t'_C(n, s_i) = \alpha n .$$

Allora, supponiamo che sia

$$n = s_1 + s_2 + \dots + s_j + \dots + s_i .$$

Il tempo di calcolo necessario per la determinazione completa del processo sarà allora tale che

$$T(n) \leq i \alpha n$$

e poiché $i \leq n$, segue

$$T(n) \leq \alpha n^2$$

E' quindi dimostrato che l'algoritmo (1) opera con un numero di passi di calcolo proporzionale al quadrato della lunghezza della sequenza S di cui si vuole costruire il processore con le note proprietà che abbiamo richiesto.

Si può infine dimostrare che $\ell(P) \leq \text{Cost.} \cdot \frac{n}{\log n} .$

Infatti, prendiamo per semplicità $\Sigma = \{0,1\}$;

Le stringhe di lunghezza $2^k k$ sono le stringhe di lunghezza massima che non contengono ripetizioni di stringhe di lunghezza k .

Se $\ell(S) = 2^k k$ si avrà però che saranno ammesse in S ripetizioni di stringhe di lunghezza $\frac{k}{2}$:

Sostituendo la stringa di lunghezza $\frac{k}{2}$ con l'operatore di ripetizione nel processore ed erodendo la stringa considerata da S si ha

$$\ell(S) = 2^k k - \frac{k}{2}.$$

Iterando questo procedimento si ottiene che la lunghezza di S che è stata erosa è:

$$2^k k - 2^{k/2} \frac{k}{2}$$

erodendo ogni volta $\frac{k}{2}$ simboli.

Il numero di erosioni che si ottiene con questo procedimento è il rapporto

$$\frac{2^k k - 2^{k/2} \frac{k}{2}}{\frac{k}{2}} = 2 \cdot 2^k - 2^{k/2}.$$

Proseguendo ad applicare il procedimento alla stringa di lunghezza $2^{k/2} \frac{k}{2}$, alla stringa di lunghezza $2^{k/4} \frac{k}{4}$, e così via fino alla stringa di lunghezza $2^{k/2^s} \frac{k}{2^s}$ con $k = 2^s$, si avranno i seguenti rapporti:

$$\begin{aligned} \frac{2^{k/2} \frac{k}{2} - 2^{k/4} \frac{k}{4}}{\frac{k}{4}} &= 2 \cdot 2^{k/2} - 2^{k/4} \\ \dots &= \dots \\ \frac{2^{k/2^{j-1}} \frac{k}{2^{j-1}} - 2^{k/2^j} \frac{k}{2^j}}{\frac{k}{2^j}} &= 2 \cdot 2^{k/2^{j-1}} - 2^{k/2^j} \\ \dots &= \dots \end{aligned}$$

fino a $2^j = k$ cioè $j = \log k$.

Sommando tutti i rapporti si ottiene quindi il numero totale di erosioni e maggiorando questa sommatoria con una serie geometrica si ottiene:

$$2^k + 2^{k/2} + 2^{k/4} + \dots + 2^{k/2^s} \leq 2^k + \sum_{j=1}^k 2^j \leq 2^k + 2^{k+1} - 1 \leq 3 \cdot 2^k$$

Quindi abbiamo trovato un estremo superiore per la lunghezza del processore P che dipende dalla lunghezza della sequenza:

$$\begin{aligned} \ell(P) &\leq 3 \cdot 2^k \\ \ell(S) &= k \cdot 2^k = n \end{aligned}$$

Passando ai logaritmi si ha:

$$\log n = k + \log k$$

e quindi

$$\frac{1}{2} \log n \leq k$$

$$\frac{\ell(P)}{\ell(S)} \leq \frac{3}{k} \leq \frac{3 \cdot 2}{\log n}$$

Abbiamo quindi trovato il risultato desiderato

$$\ell(P) \leq \text{Cost.} \cdot \frac{n}{\log n}$$

E' stato realizzato un programma in APL che costruisce un processore di lunghezza minima su una stringa di lunghezza n e che calcola la complessità descrittiva $\phi(S)$ sulla stringa data.

Ecco alcuni risultati sperimentali ottenuti con questo programma su sequenze di 72 simboli dell'alfabeto $\Sigma = \{0,1,\dots,11\}$ di alcuni brani per piano.

Sono stati scelti brani formati da note di uguale durata.

Chopin - Studio 25, n. 10 (prime 6 battute)

S = 6 5 6 7 8 9 8 7 8 9 10 11 10 9 10 11 0 1 2 3 2 3
4 3 4 5 4 6 5 6 7 6 7 8 7 8 9 7 8 9 8 9 10 11 10
11 10 9 8 9 8 9 8 7 6 7 6 7 6 5 4 3 2 1 11.

$$\phi(S).72 = 14$$

Chopin - Studio 25, n. 8 (prime 6 battute)

S = 3 5 3 5 3 5 1 3 4 6 5 1 5 3 5 3 5 3 1 3 4 6 5 1 3
5 6 7 8 10 11 0 0 3 1 8 0 10 0 10 0 10 8 10 6 8 5
6 3 5 3 5 3 5 1 3 4 6 5 1 5 3 5 3 5 3 1 3 4 6 5 1 .

$$\phi(S).72 = 17$$

Czerny - Studio 849, n. 1 (prime 6 battute)

S = 7 0 2 4 2 0 7 0 2 4 2 0 7 0 2 4 2 0 7 0 2 4 2 0
7 2 4 5 4 2 7 2 4 5 4 2 7 2 4 5 4 2 7 2 4 5 4 2
7 4 5 7 5 4 7 4 5 7 5 4 5 2 4 5 4 2 5 2 4 5 4 2 .

$$\phi(S).72 = 18$$

Czerny - Studio 849, n. 6 (prime 6 battute)

S = 7 2 0 7 0 11 7 2 0 7 0 11 7 2 0 7 0 11 7 2 0 11 0 4
7 4 2 7 2 1 7 4 2 7 2 1 7 4 2 7 2 1 7 4 2 1 2 5 7 5
4 7 2 0 7 0 11 7 2 5 7 5 4 7 2 0 7 0 11 7 2 5 .

$$\phi(S).72 = 18$$

Clementi - Gradus ad Parnassum, Studio n

(prime 4 battute e mezzo)

S = 10 9 0 10 2 0 3 2 5 4 7 5 3 2 0 10 10 9 0 11 2 0 3 2
5 3 2 0 10 9 7 5 5 4 7 5 3 2 0 10 11 0 2 0 9 10 0 10
5 4 7 5 9 7 10 9 0 11 2 0 10 9 7 5 5 4 7 6 9 7 10 9 .

$$\phi(S).72 = 16$$

Clementi - Gradus ad Parnassum, Studio n. 7

(4 battute e mezzo centrali)

S = 7 6 7 6 7 5 4 2 1 2 1 2 1 2 4 5 7 6 7 6 7 5 4 2 1 2
4 2 1 9 11 1 5 4 5 4 5 2 9 5 7 6 7 6 7 4 10 7 7 6 7
6 7 4 1 7 9 8 9 8 9 5 2 9 3 2 3 2 3 0 5 3 .

$$\phi(S).72 = 22$$

Stringa pseudocasuale di 72 elementi.

$$\phi(S).72 = 31$$

I risultati ottenuti sono da considerare esemplificativi; per studio valido si dovrà fare una classificazione di più autori, di stringhe più lunghe e più corte.

Il tempo di calcolo necessario per trovare il processore e per valutare $\phi(S)$ per una stringa di 72 caratteri è stato circa di dieci secondi per stringa.

Il tempo di calcolo necessario per la determinazione del processore può essere limitato superiormente da un termine inferiore, per n grande, ad αn^2 .

Infatti, in base ai risultati precedentemente ottenuti si ha:

$$T(n) \leq i \alpha n$$

$$\ell(P) = j \leq \text{Cost.} \cdot \frac{n}{\log n}$$

e quindi si ottiene:

$$T(n) \leq \text{Cost.} \cdot \frac{n^2}{\log n}$$

PROSPETTIVE

La descrizione formale di processi musicali è lo strumento necessario per affrontare e risolvere diversi tra i più significativi problemi concernenti il mondo musicale odierno.

Le ambiguità dei vecchi sistemi notazionali vengono eliminate necessariamente nell'atto del compositore o dell'interprete informatico di descrivere i fenomeni musicali e tutti i parametri che li determinano.

La complessità dei fenomeni e la possibilità di descriverli in forma parametrica inducono all'utilizzo di strumenti di descrizione formale che garantiscano la completa determinazione e la economia descrittiva degli eventi sonori che si desiderano.

Il compositore ha la possibilità di essere interprete delle sue stesse composizioni senza dover ricorrere ad intermediari.

L'interprete, cioè chi si accinge alla descrizione di testi musicali preesistenti, ha la possibilità di rendere oggetto inalterabile la sua interpretazione o le sue diverse interpretazioni dello stesso testo; non è più il supporto sonoro il testimone di un'interpretazione.

L'approccio formale alla descrizione dei fenomeni musicali permette lo sviluppo di uno strutturalismo della concezione musicale.

Questo strutturalismo dovrebbe portare a due risultati:

- a) alla definizione di alcuni concetti di base sulle forme musicali ottenuta per mezzo di uno studio approfondito delle forme stesse;
- b) alla possibilità di classificazioni più significative e strutturate di materiale sonoro ai fini di indagini musicologiche e di creazioni di archivi musicali economici ed ordinati.

Un sistema informatico rivolto allo studio di processi musicali potrebbe essere un valido strumento per la didattica delle conoscenze e delle esperienze musicali ed offrirebbe senz'altro enormi vantaggi di tempo per gli

interessati ad un'attività di questo tipo (basta confrontare, ad esempio, il tempo necessario per imparare a suonare uno strumento qualsiasi con il tempo necessario ad imparare a programmare con un linguaggio qualunque).

Per arrivare ad avere degli strumenti informatici validi nel campo musicale è necessario che si rivolgano gli sforzi individuali verso una partecipazione ben maggiore delle diverse conoscenze che vengono ottenute.

Si deve rendere accessibile a tutti un centro che offra la possibilità di conoscere:

- a) bibliografia;
- b) discografia;
- c) conoscenze attorno ai diversi centri che operano nel settore specifico;
- d) conoscenze attorno ai sistemi di analisi e di sintesi ed ai programmi elaborati in questi centri;
- e) introduzione nelle scuole di musica di nozioni attorno alle discipline di informatica musicale;
- f) sovvenzioni alla ricerca teoretica ed applicata.

Lo scarbio di queste informazioni è indispensabile per uno sviluppo più rapido e per evitare lo spreco di sforzi ripetuti in direzioni già percorse.

DESCRIZIONE FORMALE DI PROCESSI MUSICALI

Goffredo HAUS

Istituto di Cibernetica - Milano -

Riferimenti bibliografici

- Paterson, M.S. - "*String-Matching and Other Products*" - Atti del Convegno
Annuale AICA - Pisa - 1973
- Rufer, J. - *Composition with twelve Notes* - Barrie & Rockliff Ed. -
1954
- Schoenberg, A. - "*Funzioni strutturali dell'armonia*" - Il Saggiatore - 1967.

** Desidero ringraziare il Prof. Alberto Bertoni, il Prof. Giovanni Degli
Antoni, il Prof. Giancarlo Mauri ed il Dott. Mauro Torelli senza l'aiu
to ed i suggerimenti dei quali non sarebbe stato possibile realizzare
questo lavoro.

LA RICERCA SULLA SINTESI MUSICALE

Giorgio NOTTOLI

Istituto di Acustica "O.M. Corbino" C.N.R. ROMA.

Da circa due anni presso l'IDAC è in corso lo sviluppo di una ricerca che ha come scopo quello di mettere a disposizione della composizione musicale le risorse della scienza acustica e della moderna tecnologia.

L'ipotesi da cui si è partiti è che un incontro fra il pensiero musicale contemporaneo e gli strumenti della ricerca scientifica possa portare sia ad una evoluzione del linguaggio artistico, che all'acquisizione di nuove conoscenze sulla percezione delle strutture sonore ed alla messa a punto di nuovi metodi e tecnologie per la sintesi e la diffusione del suono.

Non è tenendo conto soltanto del sistema temperato e degli strumenti tradizionali che si possono soddisfare le esigenze della musica di oggi e, ancor di più, neppure la mentalità compositiva del passato può essere resuscitata senza le dovute estrapolazioni in quanto il futuro della musica e soprattutto di quella che fa uso delle risorse dell'informatica, dovrà vedere la conquista di altre possibilità espressive diverse da quelle legate al concerto tradizionale ed ai parametri che sono stati la base dell'organizzazione del suono nella musica strumentale.

La storia della musica occidentale, d'altra parte, la si può vedere anche come la conquista progressiva dell'universo dei suoni: i nuovi mezzi possono consentirci di fare un passo avanti in questa conquista.

Per prima cosa fra le possibilità percettive e quelle del gesto strumentale, fino ad ieri il solo tramite per la generazione, c'è uno spazio che le moderne macchine elettroniche possono riempire. Questo spazio contiene quei parametri che fino ad ieri è stato impossibile controllare. Ci si riferisce in particolare al timbro e, in generale, a tutte le caratteristiche che definiscono la microstruttura di un oggetto musicale.

In secondo luogo, per organizzare tali parametri, è necessario acquisire nuovi strumenti di pensiero che consentano di tenere sotto controllo strutture di complessità così elevate.

Il programma di ricerca si articola in tre parti, ciascuna delle quali dovrà contribuire alla acquisizione delle conoscenze e alla realizzazione dei mezzi atti a soddisfare tali necessità.

Per realizzare una particolare idea musicale è necessario un particolare processo che presieda all'organizzazione del materiale sonoro scelto. Un tale processo fa uso, ed è vero anche nella musica del passato, di automatismi almeno in una certa misura.

Mentre ieri tali automatismi erano forniti dalla pratica musicale corrente, oggi vengono spesso scelti in base all'idea musicale particolare e rappre

sentano quindi parte integrante dell'atto creativo.

Per di più, il controllo di quel campo espressivo che si vuole conquistare comporta la gestione di una tale quantità di variabili da rendere necessario un elevato grado di automazione.

E' alla semiotica, alla matematica ed all'informatica che si chiedono gli strumenti necessari alla formalizzazione dei processi compositivi.

Obiettivo di questa prima parte del programma è la realizzazione di un sistema basato sul software in grado di interagire con il compositore consentendogli di creare strutture complesse conservando il controllo del risultato e la possibilità di modifica interattiva.

La seconda parte riguarda l'acquisizione di nuove conoscenze nel campo della psicologia della percezione riferendosi in particolare alle grandezze acustiche di quel nuovo spazio espressivo.

Davanti alle numerose possibilità di costruzione delle strutture che ci offre la matematica, nella scelta delle variabili di controllo e delle relazioni che governano la microstruttura del suono, è necessario imparare a conoscere, cioè a riconoscere, oggetti sonori così costruiti associando via via le caratteristiche fisiche di tali oggetti (gli stimoli) con le "sensazioni" che il loro ascolto produce.

Soltanto un'ampia casistica che raccolga risultati sperimentali ottenuti proponendo ciascun particolare modello rappresentativo ad un sufficiente numero di soggetti può portare alla definizione di leggi generali riguardanti la percezione del suono organizzato.

Questo è l'obbiettivo di questa seconda parte del programma.

La terza parte riguarda l'hardware che costituisce il supporto pratico essenziale allo sviluppo dell'intera ricerca.

Scopo finale è la progettazione e realizzazione di un sistema di sintesi in tempo reale capace di portare al massimo delle disponibilità le risorse operative del programma per la composizione di cui la prima parte si occupa.

E' prevista una fase intermedia che prevede l'utilizzazione di un elaboratore per impieghi generali che consenta la messa a punto, mediante simulazione, delle procedure critiche riguardo ai tempi di esecuzione. Il sistema disponibile in questa prima fase consente, in pratica, di ottenere il risultato sonoro in tempo differito: i valori numerici che descrivono le variazioni della pressione acustica (campioni) vengono calcolati mediante il software e immagazzinati su di una memoria di massa per poi essere inviati in tempo reale ad un convertitore digitale-analogico. La tensione variabile in uscita dal convertitore viene quindi inviata ad un filtro passa-basso allo scopo di spianarne i gradini e quindi ad un sistema di riproduzione sonora.

Il posto che la composizione musicale occupa in questo programma è, in base alle ipotesi di partenza, di importanza sostanziale.

I risultati ottenuti nelle tre parti descritte dovranno essere frutto di una interazione continua con la pratica compositiva intesa come campo interdisciplinare e terreno di verifica anche al di là del laboratorio: si dà, infatti, particolare importanza al contatto diretto con il pubblico attraverso ascolti all'interno di manifestazioni promosse dalle associazioni o enti che diffondono la cultura contemporanea, anche allo scopo di conoscere e confrontare nel modo più diretto i risultati ottenuti nei laboratori che in tutto il mondo affrontano problemi analoghi.

Allo stato attuale, sta per essere portata a termine la prima fase del programma, che consiste nell'assemblaggio del laboratorio e nella messa a punto della prima versione del programma per la composizione.

E' stato, inoltre, realizzato un piccolo sistema per la sintesi del suono basato sull'uso di un microelaboratore, allo scopo di valutare alcune delle possibilità che offrono i microprocessori in questo campo.

L'inizio della ricerca in campo psicoacustico e le prime realizzazioni musicali sono previste per il secondo semestre 1980.

DESCRIZIONE DELLE APPARECCHIATURE UTILIZZATE.

Tutte le apparecchiature fanno capo ad un minielaboratore elettronico Digital PDP II (fig. I). Esso si compone di una CPU modello II/04, di una memoria centrale di 32k e di numerose periferiche, alcune standard ed altre appositamente progettate e costruite presso l'IDAC.

Sono periferiche standard le consuete Decwriter (TT) un secondo terminale (VT) dotato di graphic video display e hardcopy, quattro convertitori digitali analogici a 12 bit, un convertitore analogico digitale a 12 bit dotato di un multiplexer a 16 ingressi e le memorie di massa, costituite da due disquette da 256k bytes ciascuna e da due dischi rigidi da 5M bytes ciascuno.

Le periferiche appositamente costruite sono un orologio programmabile, per la generazione delle frequenze di campionamento ed interrupt e un insieme di latch e multiplexer digitali che, utilizzando per il collegamento con l'unibus dell'elaboratore una interfaccia digitale standard a 16 bit, ne estendono l'impiego permettendo il collegamento fino ad otto utenze diverse.

Nella fig. I ne sono state rappresentate quattro: il su menzionato orologio programmabile, due convertitori digitali analogici a 10 bit (anch'essi realizzati presso l'IDAC) utilizzati per pilotare un registratore XY e un sintetizzatore di suoni funzionante in tempo reale. Tale sintetizzatore, la cui realizzazione è prevista in un prossimo futuro, sarà la versione hardware del metodo di sintesi software ora utilizzato. Le altre apparecchiature sono di tipo elettroacustico e trattano i segnali di ingresso e in uscita dall'elaboratore elettronico.

Vengono correntemente utilizzati due registratori magnetici a nastro da 1/4" a due e a quattro tracce indipendenti, due mixer a 5 ingressi, due atte

uatori calibrati a passi da 1 dB, 4 amplificatori di potenza e quattro sistemi di altoparlanti opportunamente collocati in una saletta di ascolto trattata acusticamente.

E' in fase avanzata di costruzione una consolle che contiene stabilmente i suddetti mixer e attenuatori, 4 preamplificatori di segnale e 4 potenziometri per ottenere tensioni continue di riferimento.

Per quanto riguarda l'impiego del registratore a quattro piste esso viene spesso impiegato in modo particolare quando si vuole ottenere la sincronizzazione di segnali prodotti in tempi successivi dal computer e inviati su piste diverse.

In questi casi si provvede ad incidere su una delle quattro tracce un segnale sinusoidale di frequenza pari a quella di campionamento che si vuole utilizzare. Si fa quindi scorrere il nastro in lettura su tale pista e in registrazione su un'altra delle tre rimaste disponibili. La frequenza fissa di campionamento, opportunamente squadrata in un circuito trigger, viene utilizzata come frequenza di interrupt per l'elaboratore, al posto del normale clock. In questo modo, per successivi passaggi, è possibile avere fino a tre segnali contemporanei perfettamente (campioni per campioni) sincronizzati tra loro.

DESCRIZIONE DEI PROGRAMMI UTILIZZATI. -

Il programma MSYS (Music System: realizzato interamente presso l'IDAC) fa uso di una sintesi additiva controllata da una struttura a più livelli, in relazione fra loro. Sia il numero di livelli che il tipo di relazioni che tra di essi intercorrono sono definibili dal compositore. Lavorando con questo sistema si può progettare l'evoluzione temporale del suono, definendo i materiali, le relazioni, i parametri e la loro distribuzione ed evoluzione nel tempo.

La struttura è divisa in un numero definibile di livelli più due obbligatori: il macrolivello, che contiene tutti gli altri e la componente elementare che è legata al tipo di sintesi prescelto.

Il metodo sopradescritto consente un controllo cosciente del risultato in quanto esso utilizza leggi imposte esternamente dal compositore e non leggi rigidamente imposte dal sistema stesso.

Inoltre, è possibile minimizzare la quantità di informazione necessaria al controllo di un sistema di sintesi additiva, come quello da noi impiegato. Esso consiste nel generare il suono controllando l'evoluzione spettrale per quanto riguarda i parametri frequenza e ampiezza. Ciò può essere espresso con la formula:

$$x(n) = \sum_{k=1}^K A_k(N) \text{ SIN}\{nT[\omega_k + 2\pi F_k(n)] + \alpha_k\}$$

dove:

$X(n)$ è il segnale al tempo nT

T è l'intervallo di campionamento

n è un intero

$A_k(n)$ è l'ampiezza della K -esima armonica

$\omega_k = 2\pi_k F$ è la pulsazione corrispondente alla K -esima armonica

$F_k(n)$ è la deviazione in frequenza della K -esima armonica

$\alpha(n)$ è la fase iniziale della K -esima armonica

MSYS sintetizza il risultato in base a tre tipi di informazioni in ingresso (fig. 2):

- a) sequenziali, costituenti la partitura.
- b) dati di riferimento, costituenti il materiale di base.
- c) relazioni, relative alla struttura.

La versione attuale (MSYS-VOI) è costituita da tre blocchi principali più una libreria di sottoprogrammi: (Fig. 3).

MSYSI : consente di definire le relazioni ed i parametri di controllo.

Riceve in ingresso informazioni simboliche e fornisce in uscita le informazioni operative da un punto di vista strutturale.

MSYS2 : costruisce la partitura operativa a livello della sintesi elaborando le informazioni sequenziali (partitura) e i dati di riferimento (materiale) in base alle relazioni definite da MSYSI.

MSYS3 : sintetizza i campioni che descrivono l'andamento della pressione acustica nel tempo mediante sintesi additiva e li immagazzina su di una memoria di massa. Esso "vede" il supporto fisico (disco magnetico) come un intervallo di tempo e può inserire i campioni fra due istanti qualsiasi compresi in tale intervallo, permettendo così anche una costruzione "pezzo per pezzo" del risultato o il rifacimento di singoli eventi. MSYS3 utilizza un numero definibile di oscillatori sinusoidali "virtuali" realizzati secondo il principio della "table look-up": una forma d'onda sinusoidale viene memorizzata in un vettore; si legge poi il vettore in maniera circolare con un passo variabile. La frequenza di oscillazione dipende dal passo secondo la relazione

$$\text{STEP} = \frac{F \cdot \emptyset * VL}{FC}$$

dove F_0 = frequenza (Hz)
VL = lunghezza del vettore (campioni)
FC = frequenza di campionamento (Hz)
STEP = passo (campioni).

I parametri frequenza e ampiezza sono controllati da integratori digitali che consentono una riduzione dell'informazione utilizzando un valore costante per generare una rampa.

MLIB : contiene i sottoprogrammi per la generazione delle strutture e la gestione del materiale; può essere aggiornata in qualsiasi momento per soddisfare alle necessità che possono presentarsi durante la sperimentazione.

IL GRUPPO DI RICERCA E' COSTITUITO DA:

Piero Borruso	ingegnere elettronico
Paolo Giua	fisico
Giorgio Nottoli	compositore
Silvia Santoboni	ingegnere elettronico

Si avvale della collaborazione di:

Guido Baggiani	compositore	Conservatorio "Morlacchi" Perugia
Sandro Biagiola	musicologo	Conservatorio "Refice" Frosinone
Francesco Galante	compositore	Associazione "Musica Verticale"
Enrico Cocco	laureando in psicologia	
Pier Luici Marrama	laureando in ingegneria elettronica	
Stefano Petrarca	laureando in matematica.	

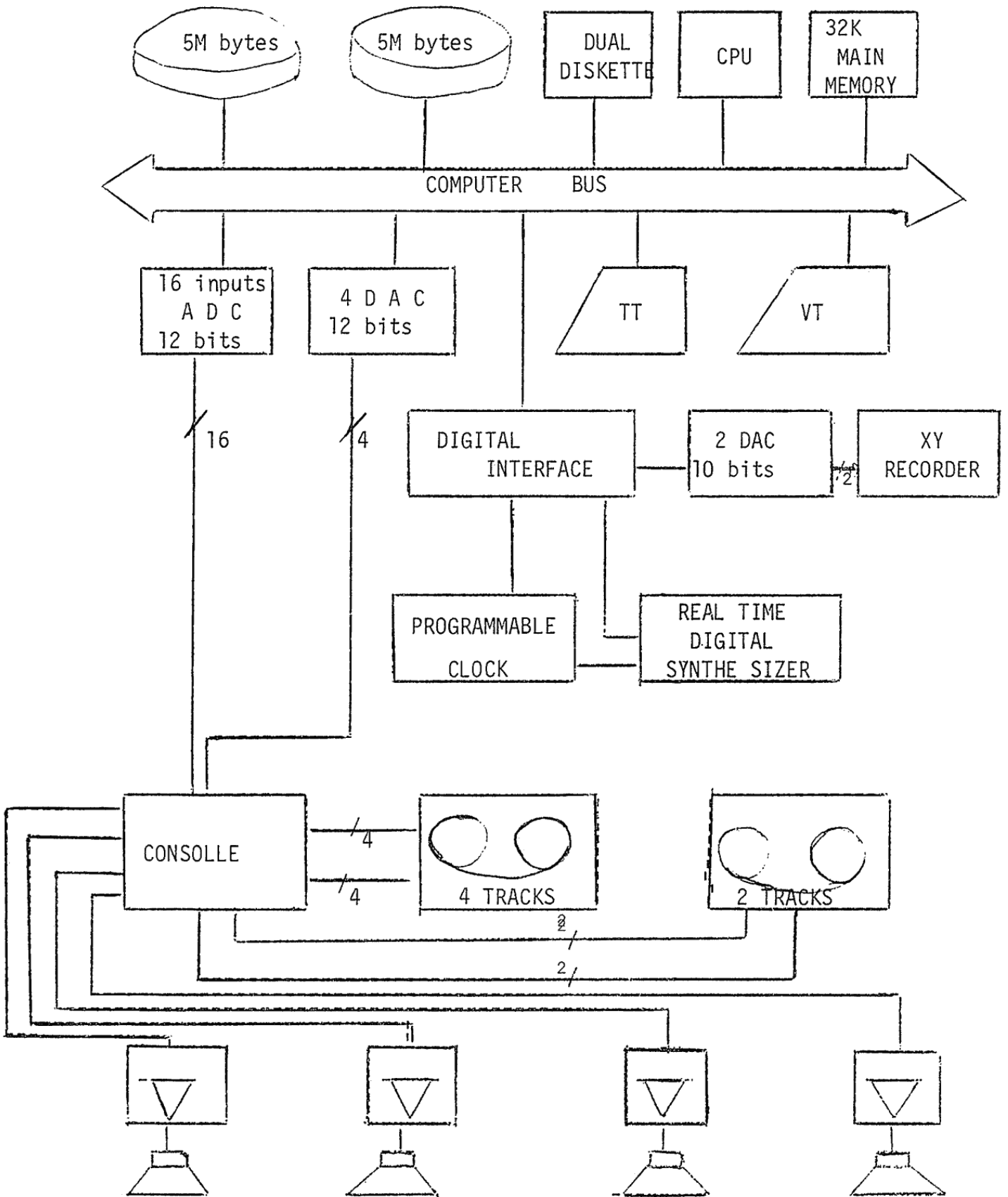


FIG. 1

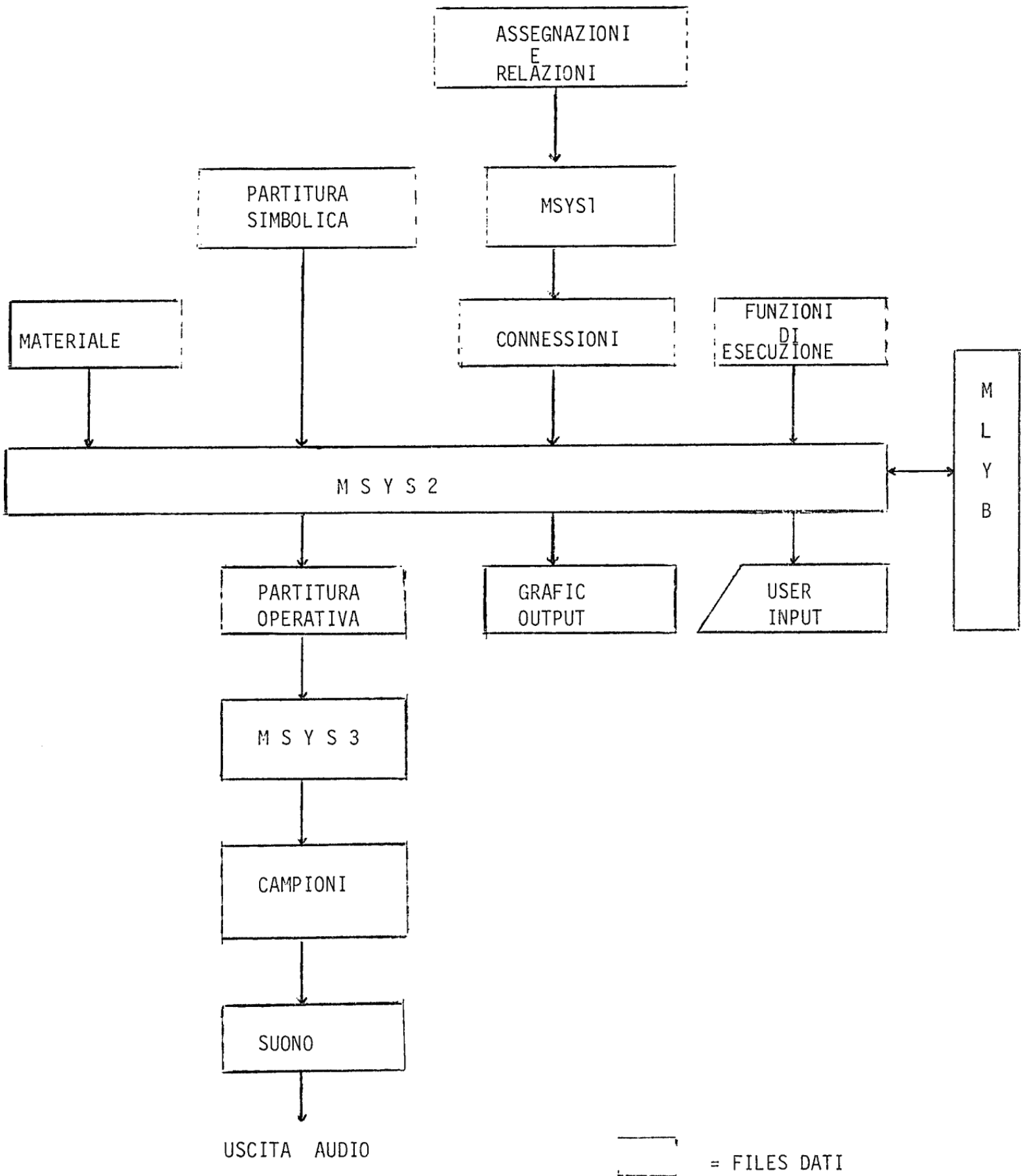


FIG. 3

SISTEMA COMPOSITIVO

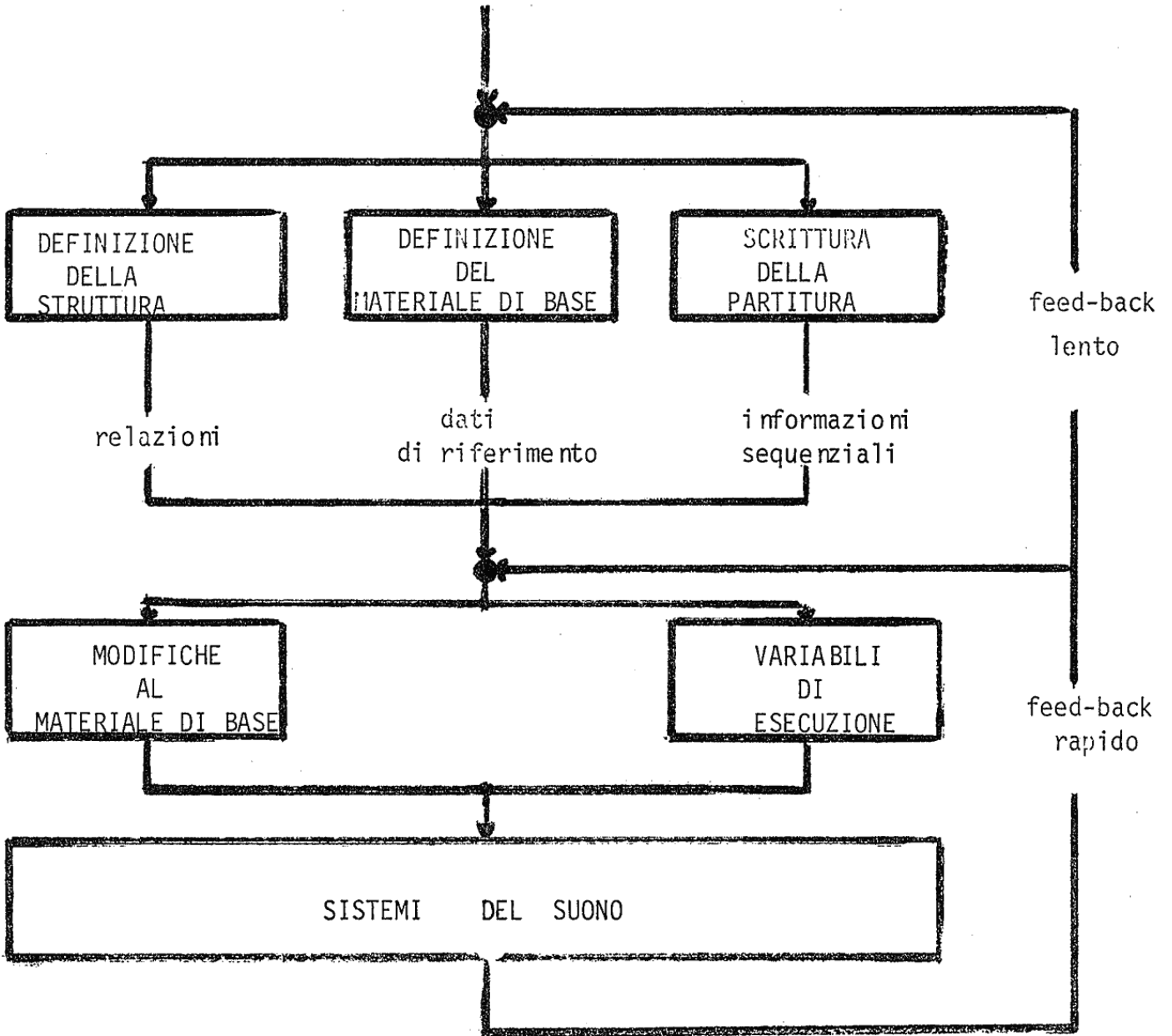


FIG. 2

BIBLIOGRAFIA:

Max Mathews: the technology of computer music. Boston 1969

H.Alles G.Di Giugno: A one-card 64 channels digital synthesizer.
Computer Music Journal, vol. 2 n. 4.

Vito Asta: tecniche di sintesi per la musica elettronica. Memoria presentata
al Convegno AIA, Ivres 1978

P.Borruso,P.Giua,G.Nottoli,S.Santoboni : il sistema per la sintesi del suono
in corso di realizzazione presso l'IDAC C.N.R. Roma, Atti del III
Colloquio di Informatica Musicale, Padova 1979

B.Truax: "The Polyphonic POD system". Summer Workshop In Computer Music.
Institute of Musicology, University of Aarhus Denmark 1978.

I N D I C E G E N E R A L E

G. de Poli - <i>La ricerca di informatica musicale in Italia</i>	pag. 1
G. de Poli - <i>Introduzione alle tecniche di sintesi della musica con elaboratore</i>	" 22
T.Bolognesi- <i>Composizione musicale assistita da elaboratore Automatismi, processi stocastici ed interazione uomo-macchina</i>	" 81
P. Grossi - <i>Il sistema TAUMUS TAU2</i>	" 101
G. Haus - <i>Descrizione formale di processi musicali</i>	" 108
G. Nottoli - <i>La ricerca sulla sintesi musicale</i>	" 138