



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Fisica

Scuola di Dottorato

“ARCHIMEDE” IN SCIENZE, COMUNICAZIONE E TECNOLOGIE

Indirizzo:

Psicologia della programmazione e intelligenza artificiale

XXV CICLO

Settore Scientifico Disciplinare MAT/07

TITOLO TESI

**La genesi del circuito di Chua:
uso della computer animation
per divulgare la teoria del caos**

Direttore:

Ch.mo Prof. PIETRO PANTANO

Firma

Pietro Pantano

Supervisore:

Ch.mo Prof. PIETRO PANTANO

Firma

Pietro Pantano

Dottorando: Dott. GIUSEPPE LARIA

Firma

Giuseppe Laria

Indice

1. INTRODUZIONE	5
2. LA TEORIA DEL CAOS	7
3. LA STORIA DEL CAOS E LE SUE APPLICAZIONI NELL'ARTE E NEI MEDIA	9
3.1. IL CONTESTO STORICO	9
3.2. IL CAOS E L'ARTE	11
3.2.1. IL CAOS NELLA LETTERATURA	11
3.2.2. IL CAOS NELLA PITTURA	13
3.2.3. IL CAOS NELL'ARCHITETTURA	14
3.2.4. IL CAOS NELLA MUSICA	19
3.2.5. IL CAOS NEL CINEMA	20
3.2.6. IL CAOS IN INFORMATICA	22
4. L'INCONTRO TRA LA COMPUTER GRAFICA E LA TEORIA DEL CAOS	25
4.1. LA NASCITA DELLA COMPUTER GRAFICA	26
4.2. LO STATO DELL'ARTE	28
5. LA DIVULGAZIONE DELLA TEORIA DEL CAOS	30
5.1. PROGETTI PER L'EDUTAINMENT REALIZZATI NELL'UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA.	35
6. ASPETTI SCIENTIFICI E TECNOLOGICI	39
6.1. ASPETTI TEORICI E MATEMATICI	41
6.2. DALLE FUNZIONI MATEMATICHE AI MODELLI 3D	43
6.3. TECNICHE DI MANIPOLAZIONE E OTTIMIZZAZIONE DEI MODELLI 3D PROVENIENTI DA SOFTWARE PER LA SIMULAZIONE MATEMATICA	46
7. THE GENESIS OF CHUA'S CIRCUIT	49
7.1. FASI DELLA REALIZZAZIONE E DESCRIZIONE TECNICHE UTILIZZATE	51
7.1.1. MODELLAZIONE DEI PERSONAGGI	51
7.1.2. DEFINIZIONE DEI MATERIALI E CREAZIONE DELLE TEXTURES	55
7.1.3. CREAZIONE DELLE STRUTTURE SCHELETRICHE DEI PERSONAGGI E DELLE SHAPES-ANIMATIONS	57
7.1.4. REALIZZAZIONE DEGLI AMBIENTI	61
7.1.5. DEFINIZIONE DELLE SIMULAZIONI FISICHE PER L'ANIMAZIONE DI TESSUTI E PARTICELLE	63
7.1.6. ILLUMINAZIONE DELLE SCENE E RENDERING DISTRIBUITO SU ARCHITETTURE ETEROGENEE	65
7.2. STRUTTURA DEL FILM	68
7.2.1. ATTO I	73

7.2.2. ATTO II	80
7.2.3. ATTO III	90
7.2.4. ATTO IV	100
7.3. LA VISUALIZZAZIONE STEREOSCOPICA	103
<u>CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</u>	<u>107</u>
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>109</u>
<u>SITOGRAFIA</u>	<u>113</u>
<u>INDICE DELLE IMMAGINI</u>	<u>114</u>

“Non ti sia grave il fermarsi alcuna volta a vedere nelle macchie de’ muri, o nella cenere del fuoco, o nuvoli o fanghi, od altri simili luoghi, ne’ quali... tu troverai invenzioni mirabilissime, che destano l’ingegno del pittore a nuove invenzioni..., perché nelle cose confuse l’ingegno si desta a nuove invenzioni”

(Leonardo da Vinci)

1. Introduzione

Leggendo questa frase scritta da colui che è ritenuto il genio poliedrico per eccellenza, emerge chiaramente che già in tempi remoti l’uomo ha rivolto la propria attenzione alle strutture presenti in natura che apparentemente non presentano alcuna forma di ordine. Di fronte alle forme caotiche l’ingegno avverte insistentemente il bisogno di carpirne i segreti e le leggi alle quali esse sono soggette al fine di comprendere la natura stessa e di servirsene per attuare i propri scopi.

Le forme apparentemente casuali, così come quelle geometriche regolari, hanno da sempre esercitato un fascino sulla nostra percezione. Basti pensare a come rimaniamo ammaliati di fronte a spettacoli naturali quali le formazioni di nuvole, il profilo di una catena montuosa o d’avanti al moto delle onde. Gli interrogativi sul modo in cui gli umani provano piacere di fronte a tali spettacoli naturali e alle correlazioni che intercorrono tra questi ultimi e le opere d’arte, affondano le loro radici nella storia a partire dall’epoca di Platone. Il tentativo di comprendere quanto più possibile ciò che governa questi fenomeni ha dato vita ad uno dei settori scientifici più floridi e affascinanti degli ultimi anni il quale studia le dinamiche dei sistemi non-lineari.

L’obiettivo di questa tesi è proprio quello di descrivere come le formule matematiche utilizzate nello studio del Caos, possano dare vita non soltanto a immagini artistiche ma, partendo dall’assunto che anche le forme più bizzarre che è possibile osservare nella natura, possano essere descritte attraverso formule e sistemi di equazioni. È possibile utilizzare queste ultime in connubio con le tecnologie informatiche e grafiche al fine di generare forme tridimensionali che possono anche essere usate nel campo della realtà virtuale al fine di creare rappresentazioni virtuali di terreni e paesaggi con un rilevante impatto estetico. A tal fine è necessario individuare le tecniche da utilizzare per la creazione e l’ottimizzazione di ambienti tridimensionali.

È necessario è doveroso illustrare il contesto storico culturale in cui lo studio del Caos affonda le proprie radici andando a riportare gli eventi che hanno avuto come protagonisti quelli che sono considerati i “Padri Fondatori” di questo ambito di studi e le grandi personalità che ancora oggi si occupano attivamente di questo ambito scientifico rendendoci partecipi delle loro scoperte e intuizioni, nonché dei vantaggi tecnologici che i continui progressi nella ricerca possono apportare sia alla vita di tutti i giorni che nel contributo al miglioramento della comprensione di come funziona questo infinitamente grande “giocattolo” che è l’universo in cui viviamo.

Emerge, da quanto, detto la necessità di veicolare i concetti complessi che sottendono la teoria del Caos. Per cui è naturale volgere il pensiero alla possibilità di impiegare le nuove tecnologie con la finalità di diffondere in modo comprensibile e intuitivo per tutti tali conoscenze. Molti sono stati gli approcci in tal senso i quali hanno

visto la teoria del Caos protagonista di lezioni, libri e filmati realizzati con l'obiettivo di rendere quanto più facile possibile la comprensione di una disciplina tutt'altro che intuitiva. Altre iniziative hanno reso la conoscenza del Caos accessibile ai più giovani attraverso laboratori in cui veniva spiegato in modo semplice e comprensibile quanto sia facile ricostruire il "circuito di Chua" grazie al quale è possibile osservare e comprendere il Caos in un contesto pratico.

Un ulteriore passo in tal senso è rappresentato dalla realizzazione di un video interamente creato avvalendosi dei benefici della grafica 3D il quale, prendendo spunto da altri lavori precedentemente realizzati all'interno dell'Evolutionary System Group (ESG) dell'Università della Calabria, si propone di narrare le vicende che hanno portato il Professor Leon O. Chua, ordinario dell'università di Berkeley (California) alle intuizioni che hanno dato il via alla realizzazione di dispositivi elettronici in grado di validare quelle che, fino a poco prima degli eventi raccontati, erano congetture e conoscenze che tenevano intrappolata la teoria del Caos nel mondo della pura astrazione matematica. Alla base della realizzazione del video "The genesis of Chua's circuit" c'è uno spiccato approccio alle tecnologie per la realizzazione dei nuovi media e uno studio sull' "eduteinment" come strumento da utilizzare nei casi in cui si vogliono trasmettere contenuti complessi in maniera semplice e comprensibile.

Uno dei punti cardine di questo lavoro consiste nell'individuazione dei concetti e delle tecniche necessari alla progettazione e alla creazione di ambienti virtuali arricchiti di contenuti scientifici espressi tramite le tecnologie 3D. Tra gli obiettivi di questa attività è necessario individuare le metodologie e le tecniche atte a minimizzare, dove possibile, l'utilizzo di risorse computazionali in modo da poter realizzare dei prodotti funzionali allo scopo prefissato in tempi accettabili. A tal fine saranno descritte le modalità in cui può essere realizzata una "render-farm" utilizzando diversi computer con architetture e sistemi operativi differenti.

Linee Guida:

- Alcuni concetti scientifici risultano particolarmente complessi e presentano un livello di astrazione tale per cui la comprensione ne risulta lenta e apparentemente poco interessante per i non esperti.
- La grafica 3D e la realtà virtuale, particolarmente negli ultimi anni, hanno dato luogo a un crescente interesse per attività generalmente poco praticate, introducendo oltre al contenuto puramente matematico, la componente ludica e l'impatto visivo dei fenomeni.
- Gli attuali PC e le tecnologie grafiche permettono un connubio tra grafica 3D e contenuto scientifico e possono veicolare concetti complessi in maniera facilmente e immediatamente comprensibile.

2. La teoria del Caos

Nel senso comune, il termine “*Caos*” è sempre stato associato alla mancanza di ordine, quindi a ciò che avviene in maniera casuale. In realtà l’unico aspetto casuale è rappresentato dal fatto che le parole *Caos* e *Caso* siano l’una l’anagramma dell’altra dal momento che, alla luce degli studi più recenti, i sistemi caotici non sono affatto strutture caratterizzate da assoluta assenza di ordine, ma sono riconducibili ad una logica complessa e prevedibile nel breve termine. Il *Caos* è quindi ordinato, solo che questo ordine è dettato da regole talmente complesse che sfuggono alla percezione e all’immediata comprensione umana, tanto da non essere più riconducibile alle regole classiche dettate dall’idea di armonia platonica.

Il paradigma sul quale si sviluppa la teoria del *Caos*, prende le distanze dalla meccanica classica Newtoniana che si basa su un approccio riduzionista col quale i fenomeni naturali possono essere spiegati in maniera sufficientemente esatta partendo dall’analisi del comportamento dei componenti più semplici che possono essere spiegati con modelli matematici deterministici e lineari.

Per la prima volta nel 1975, in un articolo di Li e Yokes, la parola *Caos* assume un’accezione scientifica. Il termine “*Caos deterministico*” che identifica questo fenomeno è un ossimoro, infatti, la parola “*Caos*” sta ad indicare l’assenza di regole, l’imprevedibilità, mentre l’aggettivo “*deterministico*” significa regolare, prevedibile, e viene riferito a fenomeni ordinati e pianificabili. Un fenomeno descritto mediante un modello matematico deterministico viene in genere considerato prevedibile. Ma la scoperta del *Caos deterministico* mette in crisi questa affermazione: modelli matematici non lineari e deterministici possono generare andamenti in apparenza imprevedibili e estremamente sensibili a piccole perturbazioni. Si parla di “sensibilità alle condizioni iniziali” nel momento in cui ci si trova in presenza di un fenomeno di qualsivoglia natura del quale è nota la legge che ne governa l’evoluzione nel tempo ed è possibile osservare che persino una piccolissima variazione nelle condizioni iniziali del sistema può causare variazioni catastrofiche nell’evoluzione del sistema stesso. In questo modo il sistema evolve in maniera totalmente differente durante diverse osservazioni. Potrebbe sembrare che una qualsiasi previsione dell’andamento del sistema sia impossibile, per questa caratteristica il sistema viene definito caotico. Anche se questi fenomeni si presentano estremamente complessi, esiste comunque una legge ben precisa che li governa e che consente di determinarne l’evoluzione nel tempo.

Tutti i sistemi fisici possono essere ricondotti ad astrazioni che ci consentono di creare dei modelli di comportamento dei fenomeni nello spazio e nel tempo e non è errato dire che la maggior parte dei sistemi fisici risponda a comportamenti non lineari, ovvero che di norma le sollecitazioni applicate alle componenti del sistema non producono effetti proporzionali. Un sistema non-lineare presenta la caratteristica di essere sensibile alle condizioni iniziali e per tale motivo risulta impossibile predirne l’evoluzione su grandi scale temporali in quanto piccole variazioni generano notevoli conseguenze nella dinamica evolutiva del sistema stesso. Si parla in questi casi di sistemi dinamici caotici sui quali non è possibile ottenere previsioni corrette a causa della natura dei fattori in gioco come la possibile presenza di errori di misurazione. In realtà anche modelli definiti da equazioni prive di elementi aleatori possono dar luogo

ad andamenti imprevedibili come avviene nel caso del primo problema relativo al moto caotico studiato matematicamente. Si tratta del problema dei tre corpi di Poincaré il quale determina, dati posizione iniziale, massa e velocità, l'evoluzione futura del sistema da essi costituito. Dopo un certo periodo, è possibile notare che il sistema diverge in maniera imprevedibile rendendo impossibile la determinazione di soluzioni analitiche seppure la traiettoria dei corpi rimane deterministica essendo descritta dalle equazioni del moto.

È sicuramente interessante osservare come, all'interno dei sistemi non-lineari, emerge in maniera spontanea un'organizzazione generata dall'interazione delle componenti elementari in quanto i sistemi complessi sono in grado di reagire alle modificazioni ambientali riorganizzando la propria struttura in modo da sviluppare proprietà innovative atte all'adattamento. Il premio Nobel per la chimica Ilya Prigogine ha scritto: *“Il nostro universo fisico non ha più come simbolo il moto regolare e periodico dei pianeti, moto che è alla base della meccanica classica. È invece un universo di instabilità e fluttuazioni, che sono all'origine dell'incredibile ricchezza di forme e strutture che vediamo nel mondo intorno a noi. Abbiamo quindi bisogno di nuovi concetti e nuovi strumenti per descrivere una natura in cui evoluzione e pluralismo sono divenute le parole fondamentali”*.

Michael Crichton, autore di best-seller dai quali sono stati tratti grandi successi cinematografici del calibro di Jurassic Park, Timeline e Next, ha scritto: *“... I sistemi complessi tendono a situarsi in un punto che definiremo il margine del Caos. Immaginiamo questo punto come un luogo in cui vi è sufficiente innovazione da dare vitalità al sistema, sufficiente stabilità da impedirgli di precipitare nell'anarchia. E' una zona di scompiglio e di conflitto dove vecchio e nuovo si scontrano continuamente ...”*.

3. La storia del Caos e le sue applicazioni nell'arte e nei media

Nel 1986, H.O. Peitgen, riporta in “The beauty of fractals” la seguente frase: *“Scienza ed arte... ci siamo abituati a vederle come poli opposti, ma non dipendono forse l'una dall'altra? Il pensatore, che cerca di comprendere I fenomeni naturali, nel tentativo di ridurre la complessità a poche leggi fondamentali, non è neanche il sognatore che si immerge nella ricchezza delle forme e vede se stesso come parte dell'eterno gioco degli eventi naturali?”*

Con questa considerazione si ha una presa di coscienza del fatto che per la maggior parte del XX secolo, matematica e scienza sono state considerate come discipline troppo complesse e distanti dal mondo reale, per cui poco favorevoli ad essere comprese facilmente. La convinzione che matematica e natura fossero due cose distinte, trae le proprie origini sin dal 300 a.C., quando il matematico greco Euclide, partendo da assiomi intuitivi come il fatto che una retta abbia lunghezza infinita, formalizzò la geometria creando un insieme coerente di regole logiche per descrivere punti, linee e forme semplici. Il fatto che a quell'epoca gli uomini di cultura non ricercassero compromessi tra il proprio intelletto e la realtà, fece in modo che l'osservazione non avesse una parte rilevante nelle scienze.

3.1. Il contesto storico

All'inizio del '600 René Descartes, meglio noto come Cartesio, riportò in vita Euclide nel tentativo di assegnare agli oggetti una posizione precisa nello spazio. A tale scopo egli si servì di tre rette perpendicolari che si intersecano in un punto (gli assi cartesiani) per poter descrivere l'universo come un insieme ordinato. Nel secolo successivo, il lavoro di Cartesio venne portato avanti separatamente da Isaac Newton e da Gottfried Leibniz i quali definirono i principi del calcolo differenziale. In particolare, Leibniz affermò che le curve sono formate da segmenti infinitamente piccoli dette “derivate” e che, man mano che si osserva una curva sempre più da vicino, essa diviene sempre più simile a una retta.

Lo studio dei frattali (dal latino fractus, frammentato, interrotto) prende vita proprio con Leibniz, il quale ipotizzò che esistesse un legame tra funzioni ricorsive e omotetia (o auto similarità). Un frattale è infatti un oggetto geometrico dotato di omotetia interna, in quanto la sua forma si ripete a qualsiasi scala esso venga osservato. In questo contesto si fanno sempre maggiore spazio concetti talmente complessi da richiedere qualcosa di diverso dalla geometria euclidea al fine di essere compresi a pieno. Bisognerà aspettare il 1872 per avere un primo esempio di rappresentazione grafica, fornito da Karl Weierstrass, di una funzione che descrive una curva dalle caratteristiche molto peculiari che mettevano in discussione i concetti di distanza, di area, di spazio e di dimensione considerate addirittura patologiche e sgradevoli dai propri colleghi. Queste forme oggi vengono considerate come i primi frattali della storia.

Nel 1915 Wacław Sierpiński elaborò il suo celebre triangolo, mentre a cavallo tra il diciannovesimo e il ventesimo secolo alcuni scienziati illustri tra i quali Henry Poincaré e Gaston Julia incominciarono a studiare le funzioni iterate nel piano complesso ma, a causa della mancanza dell'aiuto dei moderni calcolatori, non ebbero la possibilità di ammirare gli oggetti da loro stessi scoperti da un punto di vista estetico. In particolare Julia condusse negli anni '20 degli studi finalizzati alla comprensione delle particolari caratteristiche topologiche dei frattali.

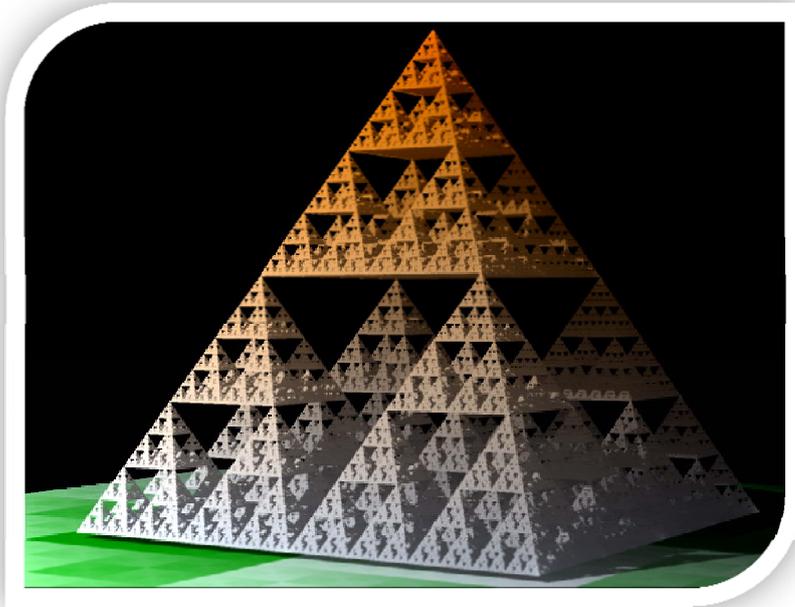


Fig. 1 Rappresenstazione 3D del Triangolo di Sierpinsky.

Tali studi rimasero dominio di un pubblico di nicchia fino agli anni '70 e all'avvento del calcolatore, grazie al quale Benoît Mandelbrot riuscì a rendere visibili le bellissime forme che in precedenza erano rimaste relegate al mondo della matematica. Nel 1958, Mandelbrot fu assunto presso il centro ricerche Tomas J. Watson dell'IBM per lavorare su un progetto che studiava i sistemi per l'eliminazione del rumore che disturbava le trasmissioni digitali. Studiando questo rumore, Mandelbrot, che non era un esperto di comunicazioni, si rese conto che non era possibile tenere sotto controllo o prevedere il fenomeno. Egli giunse a questa conclusione in quanto notò delle analogie tra lo strano tipo di ricorsività presente nel rumore, che stava studiando, e l'andamento grafico del prezzo del cotone. Le variazioni di questo fenomeno, infatti, risultavano simili sia se venivano osservate in riferimento agli anni, sia su scala mensile o decennale. Il particolare andamento ciclico di questi fenomeni prese il nome di "invarianza di scala", ma i tempi non erano ancora maturi per questo tipo di speculazione in quanto negli anni '50 non erano in molti a desiderare una teoria che sosteneva che le cose fossero complesse e caotiche, quindi Mandelbrot, nel proprio tentativo di descrivere matematicamente quanto aveva osservato, non riscosse il successo sperato in quanto le sue equazioni vennero considerate astratte e scomode, almeno fino al 1968. Durante questo anno, Mandelbrot si dedicò allo studio degli schemi ricorrenti delle fluttuazioni del livello d'acqua del Nilo, facendo riferimento anche agli episodi narrati dalla Bibbia. Servendosi dei dati rilevati, produsse una serie di

grafici e allo stesso tempo ne produsse in parallelo altri usando le proprie equazioni senza tenere in conto i dati reali. Un celebre aneddoto narra che egli sottopose le due serie di grafici ad un gruppo di eminenti idrologi e che essi non riuscirono a distinguere i dati ottenuti dalle rilevazioni reali da quelli ottenuti tramite l'utilizzo delle proprie formule. Non di meno, gli idrologi osservarono una serie di grafici prodotti con i sistemi tradizionali e immediatamente li ritennero falsi. Dopo questa esperienza Mandelbrot si sentì incoraggiato a percorrere la strada intrapresa e utilizzò le proprie formule per produrre grafici che facevano riferimento ad altri fenomeni caotici come i prezzi del mercato azionario e dei beni, le montagne e le linee costiere. In seguito a questa esperienza, egli disse: *"prima la gente sfuggiva ai miei scritti, poi nessuno poté sfuggire ai miei grafici"*. Dopo anni dedicati allo studio dell'autosimilarità dei frattali, come strumento per interpretare la natura, finalmente Mandelbrot definì le procedure atte a creare le forme matematiche astratte che oggi conosciamo, grazie alla successiva pubblicazione del libro: *"The Fractal Geometry of Nature"*, completando così il lavoro che K. Weierstrass, G. Cantor, W. Sierpinski e tutti gli altri scienziati che si sono interessati all'argomento avevano iniziato all'inizio del secolo.

3.2. Il Caos e l'arte

Con Mandelbrot, il tempo in cui scienza e matematica erano considerate alla stregua di un terreno arido totalmente separato dalla natura e dall'arte è terminato e il Caos abbandona lo stato di astrazione matematica per entrare a gran voce nei più disparati ambiti della produzione creativa. Le strane forme presenti in natura come, per fare un esempio, le traiettorie dei fulmini, non sono più classificate come versioni imperfette e distorte delle forme geometriche euclidee e, per questo motivo, non sono più considerate come qualcosa di puramente casuale e accidentale. Per Mandelbrot, le forme geometriche euclidee sono entità disumane e non hanno nulla a che vedere con le modalità in cui la natura organizza se stessa, né con gli strumenti che l'uomo adopera per percepirla. Il paradigma della percezione del mondo viene profondamente a modificarsi fino ad arrivare al punto in cui la tecnica perde il proprio secolare intento di soggiogare la natura e i suoi fenomeni che, a differenza del passato, fungono da spunto creativo per la creazione di opere che sempre più si prestano all'integrazione con la natura stessa.

Un tentativo di quantificare la percezione artistica emerge dalla raccolta di saggi di Umberto Eco dal titolo *"Estetica e teoria dell'informazione"* nei quali i metodi della teoria di Shannon sono utilizzati per spiegarne il senso.

In passato la ricerca di una relazione tra matematica ed arte è stata spesso ossessiva. È questo il caso della ricerca del "rapporto aureo" dalle forme delle piramidi egizie alle opere di Raffaello. Molte di queste ricerche sono state smentite da Mario Livio negli scritti dal titolo: *"La sezione aurea"* e *"L'equazione Impossibile"*.

3.2.1. Il Caos nella letteratura

In letteratura, la complessità propria del Caos viene espressa attraverso l'introduzione del concetto di "tempo eterogeneo" contrapposto a quello di tempo omogeneo, ovvero la percezione personale del tempo che compare nel '700 nell'opera:

"*The Life and Opinions of Tristram Shandy*" (1760) di Laurence Sterne. In essa gli eventi non sono più lineari, ma sono narrati attraverso frequenti flash back. Questo stile narrativo è caratterizzato dal rifiuto da parte dell'autore dell'ordine cronologico, in quanto la percezione del tempo soggettivo è da intendersi come alieno al tempo scandito dall'orologio. Per semplificare, basta dire che per i protagonisti della storia, in determinate condizioni, a livello percettivo un minuto può essere più lungo di un'ora.

Persino ne "*Il ritratto di Dorian Gray*" (1890) di Oscar Wilde, vi è una netta frattura tra "tempo personale" e "tempo pubblico". Alla fine dell'800, a causa dell'introduzione dell'ora ufficiale mondiale, il tempo non è più un concetto assoluto, ma viene visto come qualcosa di relativo alla singola persona. Filosofi, psicologi, sociologi e romanzieri iniziarono ad indagare sul modo in cui gli individui creano tanti tempi differenti in base a come vengono concepiti i molteplici stili di vita.

Il concetto di "tempo pubblico" diviene superficiale e inutile in "*Alla ricerca del tempo perduto*" (1922) di Marcel Proust dove la realtà viene descritta come un'entità talmente sfuggente e labile che solo la memoria può cogliere le trasformazioni apportate su uomini e cose dal tempo e solo il rivivere interiormente gli eventi rappresenta l'unica dimensione reale.

Nell'"*Ulisse*" (1922), James Joyce sviluppa il racconto facendo ricorso ad una tecnica di scrittura innovativa chiamata "flusso di coscienza", in cui i pensieri del protagonista scorrono senza punteggiatura, per definire la contemporaneità e l'intricato procedimento cognitivo che sottostà ai processi mentali dell'io narrante. L'eterogeneità del tempo è rappresentata attraverso l'esposizione frammentata e i vent'anni del viaggio di Ulisse narrato da Omero vengono compressi nelle sedici ore dell'esperienza unica di Mr. Bloom.

Nel panorama letterario italiano possiamo citare Italo Svevo con: "*La coscienza di Zeno*" (1923), opera in cui prevale la narrazione degli eventi sotto il dominio del tempo soggettivo in quanto, nonostante gli eventi siano narrati in prima persona, essi non seguono una successione cronologica lineare, ma assecondano un tempo soggettivo, in cui il passato si mescola con il presente. Alla base del racconto vi è la mancanza di punti di riferimento del nevrotico protagonista il quale, così come il tempo è soggetto a continue mutazioni, è disponibile alle trasformazioni, è pronto a scoprire sempre l'originalità della vita, a differenza delle persone "sane" che sono rigide ed immutabili. Così l'intera opera, ambigua e libera, diventa interpretabile in diversi modi.

Tra le opere di narrativa in cui è possibile riscontrare un tipo di narrativa "caotica", è possibile citare:

- "*Finnegans Wake*" di James Joyce
- "*Jurassic Park e Il mondo perduto (The Lost World)*" di Michael Crichton
- "*Uomini vuoti*" di Dan Simmons
- "*La sindrome di Wolverton*" di Alan D. Altieri
- "*E se covano i lupi*" di Paola Mastrocola

La celebre frase di Edward Lorenz, trae ispirazione dal romanzo "*A sound of thunder*" di Ray Bradbury, scritto nel 1952, il quale descrive un futuro in cui grazie a una macchina del tempo vengono organizzati dei safari temporali. Durante uno di questi viaggi, uno dei membri del gruppo calpesta una farfalla e questo evento cambierà radicalmente e in maniera catastrofica l'intera storia dell'umanità.

3.2.2. Il Caos nella pittura

Nella pittura, le forme frattali hanno influenzato in maniera sostanziale sia il movimento impressionista che quello cubista. Le composizioni astratte di Mondrian e alcuni quadri di Paul Klee ne sono un chiaro esempio.

Esiste uno stretto legame tra estetica, arte e ricerca di un significato da attribuire alle forme caotiche e apparentemente casuali riscontrabili in natura o rintracciabili nei maggiori esponenti dell'astrattismo. Questa corrente nasce all'inizio del XX secolo e sancisce la volontà da parte degli artisti di andare oltre ciò che l'uomo riesce a cogliere attraverso l'osservazione e la riproduzione pedissequa del mondo così come esso appare. Tale bisogno è dovuto anche all'avvento della fotografia come strumento per la cattura di ciò che appare, per cui il ruolo dell'artista viene rielaborato e rinasce come esaltatore degli aspetti artistici inaccessibili alla riproduzione meccanica. Secondo Paul Klee *"l'arte non riproduce ciò che è visibile, ma rende visibile ciò che non sempre lo è"*. L'artista è colui che osservando il reale ne dà un'interpretazione soggettiva ed esclusiva così come avviene nell'esperienza *"fauvista"* in cui lo stato d'animo dell'artista viene espresso attraverso l'uso non tradizionale del colore, e in quella *"cubista"* in cui vengono semplificate le forme al fine di ottenere una scomposizione degli oggetti e dello spazio con la sovrapposizione di più vedute secondo angoli visuali diversi.

L'espressionismo astratto americano, proseguendo sulla linea di Kandinsky, fin dagli anni '50 denota una predilezione per un immaginario che rimanda al Caos. Si può parlare di una caoticità organizzata che assume un ruolo centrale nell'elaborazione di una nuova frontiera espressiva. A differenza dell'arte figurativa, l'arte astratta pone significativi problemi di interpretazione, infatti è normale aspettarsi reazioni differenti nel momento in cui osserviamo un Caravaggio o un Kandinsky. Ancor più amplificata è questa differenza se parliamo di Jackson Pollock, esponente dell'Espressionismo astratto o Action Painting, il cui lavoro è descritto da Harold Rosenberg con la seguente definizione: *"Quello che finiva sulla tela non era un quadro, ma un evento. Il punto di svolta c'è stato quando ha deciso di dipingere "solo per dipingere". I gesti che si riflettevano sulla tela erano gesti di liberazione dai valori - politici, estetici e morali"*.



Fig. 2 Pollock, *Enchanted Forest*, (particolare), 1947.

Anche in questo caso possiamo annoverare pareri discordanti, infatti i lavori di Pollock vennero definiti da Nikita Krusciov *“dipinti dalla coda di un asino”*.

Osservando alcune forme particolari presenti in natura (alberi, coste, catene montuose, fiocchi di neve), ci si rende conto del fatto che la geometria euclidea, con la propria regolarità, non è in grado di descriverne adeguatamente le caratteristiche. Solo le forme non convenzionali della geometria frattale sono adatte a descrivere le forme irregolari osservabili in natura. Per meglio comprendere questo passaggio è sufficiente confrontare il pensiero di due menti illustri della storia della scienza. Galileo Galilei, unanimemente riconosciuto come il padre del metodo scientifico, nel *“Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo”* (Firenze 1632) asseriva che: *“Il libro della natura è scritto in lingua matematica ed i suoi caratteri sono triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto.”*

A più di tre secoli di distanza, Benoît Mandelbrot scrive nell'opera *“Les objets fractals”* (1975): *“La geometria euclidea è incapace di descrivere la natura nella sua complessità, in quanto si limita a descrivere tutto ciò che è regolare. Tutti gli oggetti che hanno una forma perfettamente sferica, oppure... mentre osservando la natura vediamo che le montagne non sono dei coni, le nuvole non sono delle sfere, le coste non sono dei cerchi, ma sono oggetti geometricamente molto complessi.”*

Nell'ultimo ventennio si è andata affermando l'Estetica Frattale dalla quale partono le ricerche riguardanti la frattalità all'interno dell'arte astratta. La geometria frattale sembra decisamente più adatta a descrivere il mondo reale rispetto alle forme geometriche regolari ed è applicata all'analisi dei fenomeni caotici e dei sistemi complessi, di conseguenza diventa un passaggio naturale il poter applicare costrutti matematici che descrivono andamenti caotici anche ad opere di artisti come Pollock.

3.2.3. Il Caos nell'architettura

Da tempo ormai l'architettura sta sperimentando nuove tendenze e forme, ne è un esempio il *“decostruttivismo”*, il quale fa del Caos il proprio elemento ordinatore. In questo tipo di architettura, ordine e disordine convivono proprio come nell'ossimoro *“Caos deterministico”*. Scienziati, artisti e architetti basano le proprie ricerche su modelli matematici, geometria frattale, teoria del Caos e casualità, le quali hanno in comune la caratteristica di essere principi non euclidei di interpretazione della realtà in cui viviamo. Il Caos perde l'originale accezione negativa in quanto esso è stato da sempre interpretato come assenza di ordine, precisione e linearità, anche se nella cosmogonia di diverse culture proprio il Caos viene considerato lo stato primordiale da cui ha avuto origine l'universo. In tempi recenti il Caos ha finalmente trovato una spiegazione scientifica grazie alla teoria del Caos e al Caos deterministico che spezzano l'ancestrale dicotomia tra ordine e disordine in quanto è stato dimostrato che modelli matematici deterministici possono dar luogo ad andamenti del tutto imprevedibili. L'architettura si è storicamente basata sull'ordine e sulle rigide proporzioni, quindi verrebbe spontaneo pensare che un legame tra questa disciplina e il Caos sia nato solo in tempi recenti. In realtà è possibile ricondurre a forme frattali buona parte della produzione architettonica dei secoli precedenti l'anno zero, come ha osservato in un suo articolo il tecnico dell'architettura e matematico australiano Nikos Salingaros.

Chiari elementi architettonici riconducibili ai frattali si riscontrano già nei templi egizi risalenti all'“Antico Regno” (2700-2200 a.C.). Il tempio di Edfu dedicato al dio Horus, il quale è giunto a noi in perfette condizioni di conservazione dovute al fatto che per lungo tempo è stato nascosto sotto un enorme cumulo di sabbia. Elementi dominanti della costruzione sono i capitelli con motivi che richiamano il fiore di loto con petali che si ripropongono a partire dalla base in scala sempre più grande fino ad arrivare in cima. Alcuni studi hanno riscontrato nell'andamento dei petali di questi capitelli una chiara similitudine con l'andamento iterativo dell'insieme di Cantor. È sorprendente il fatto che, anche se molto probabilmente in maniera inconsapevole, già millenni di anni fa comparissero applicazioni di studi matematici formalizzati solo in tempi recenti, per cui sarebbe possibile dire che il legame tra uomo, natura e Caos può essere considerato ancestrale e intuitivo.

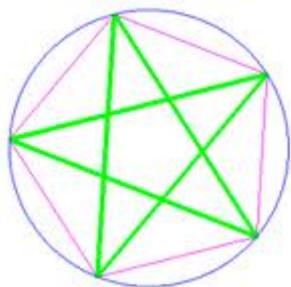


Fig. 3 Il Pentalfa.

Facendo un salto di duemila anni e prendendo in esame l'architettura greca classica, all'interno della quale l'armonia diviene il mezzo per raggiungere la perfezione, è possibile ricondurre l'ordine, anche dal punto di vista teorico e matematico, ai principi dei frattali. Molti sono stati gli studi atti a dimostrare che alla base delle proporzioni tra le varie parti degli elementi architettonici dell'antica Grecia vi fosse il cosiddetto rapporto aureo “ ϕ ” pari a 1,618. Una nota figura geometrica nella quale la proporzione dei lati è scandita da questo rapporto è il “Pentalfa”. Esso è rappresentato da una stella inscritta in un pentagono a sua volta inscritto in un cerchio. Risulta che il cuore della stella sia un pentagono simile a quello in cui la stella è inscritta, all'interno del quale è possibile tracciare all'infinito nuove stelle con all'interno pentagoni sempre più piccoli. Il Pentalfa denota sicuramente la caratteristica di auto-similarità propria dei frattali. Un'altra figura geometrica molto presente nell'architettura dell'antica Grecia è la spirale, per la cui costruzione si parte da un rettangolo le cui dimensioni diano luogo al rapporto aureo, all'interno del quale si disegna un quadrato con lato uguale al minore del rettangolo. La differenza delle due figure sarà anch'essa un rettangolo aureo. Ripetendo l'operazione più volte e tracciando poi degli archi di 90° dal vertice del quadrato che giace sul lato lungo del rettangolo, così da formare una linea continua, si ottiene la spirale, da cui deriva la famiglia delle spirali logaritmiche nella quale è possibile rintracciare l'auto-similarità propria dei frattali. La spirale è un carattere peculiare dello stile ionico poiché tratto distintivo dei capitelli a sostegno del timpano dei templi. Ne è un esempio l'Eretteo di Atene risalente al V secolo a.C.

Nello stesso periodo in cui fiorì lo stile ionico, nella parte ellenica dell'Asia Minore molti matematici e filosofi si dedicarono allo studio della geometria con particolare attenzione alla figura della spirale. Tra questi Archimede, il quale scrisse un intero trattato sull'argomento, riscontrò tale forma geometrica in un gran numero di elementi presenti in natura come conchiglie, piante e galassie.

L'architettura classica è stata comunque dominata dal “Canone” che ne ha stabilito le norme estetiche. Le regole costruttive venivano dettate dalla simmetria e dalla sezione aurea in quanto vigeva la convinzione che, solo attraverso l'osservazione scrupolosa di queste due regole mutuata dalla matematica, fosse possibile raggiungere la perfezione. Per citare alcuni esempi di applicazione di queste regole, basti citare il Partenone, le cattedrali romaniche e gotiche o Castel del Monte.

Andando avanti nel tempo fino ad arrivare all'architettura dello scorso millennio, è possibile osservare elementi frattali nelle piante, nei prospetti e nelle decorazioni di edifici che vanno dalle chiese gotiche alle pagode cinesi nelle quali è evidente il disegno di profili frastagliati, interrotti e complessi che vanno a creare dei motivi di rugosità originata dal ripetersi dello stesso motivo su diversa scala.

L'architettura contemporanea si differenzia dalla parentesi modernista che ha sostituito le forme frattali con linee pulite e continue. Gli edifici divengono organismi dai prospetti irregolari che tendono a mimare le leggi non lineari della natura. Appaiono nuovi elementi costruttivi che si allontanano dalle forme rassicuranti e chiuse come la circonferenza e l'ellisse. All'interno del movimento razionalista prende forma l'architettura organica che trova la propria maggiore espressione nelle opere di Frank Lloyd Wright, considerato il padre di questo movimento che promuove una condizione di armonia tra uomo e natura nella creazione di un nuovo sistema in equilibrio tra ambiente costruito e ambiente naturale. Ne è una chiara espressione Casa Kauffman nella quale il processo che domina l'ambiente circostante governa anche la costruzione. I piani scivolano l'uno sull'altro alla stregua dell'acqua della cascata e la pietra locale si condensa nel costruito ad una scala ridotta.

L'architettura contemporanea è caratterizzata da linee increspate e dalla tendenza alla geometria non euclidea. L'utilizzo massiccio di superfici curve generate dalla rotazione di linee piane trova ampio spazio nei progetti di Oscar Niemeyer, del quale possiamo citare una frase emblematica tratta dall'opera *"Il mondo è giusto"* in cui egli scrive: *"L'architettura è solo un pretesto. Importante è la vita, importante è l'uomo, questo strano animale che possiede anima e sentimento, e fame di giustizia e bellezza"*. Niemeyer è stato uno dei più noti e importanti architetti a livello internazionale del XX secolo e ha collaborato per diversi anni con Le Corbusier.



Fig. 4 Oscar Niemeyer - *Chiesa di Pamphula*.

Quest'ultimo è noto principalmente per aver progettato insieme al musicista e architetto Iannis Xenakis il padiglione Philips, meglio noto come "Il Poema Elettronico" (*Poème électronique*), per l'Esposizione Internazionale di Bruxelles del

1958. La struttura del padiglione venne realizzata con strutture paraboloidi iperboliche e conoidi. Lo stesso Le Corbusier definì l'opera con le seguenti parole:

“Il padiglione sarà dunque uno stomaco capace di digerire 500 ascoltatori/spettatori e di evacuarli alla fine dello spettacolo per far posto ai 500 successivi”.

Il padiglione è stato progettato per essere una *“bottiglia contenente il nettare dello spettacolo e della musica”* all'interno della quale gli spettatori assistevano allo spettacolo realizzato attraverso la proiezione delle seguenti sequenze:

- Genesi (da 0 a 60”)
- Di terra e di spirito (da 61” a 120”)
- Dall'oscurità all'alba (da 121” a 204”)
- Divinità fatte di uomini (da 205” a 240”)
- Così formano gli anni (da 241” a 300”)
- Armonia (da 301” a 360”)
- Per donare a tutti (da 361” a 480”)

Solo per quanto riguarda l'audio, all'interno della struttura sono stati posizionati 350 diffusori acustici. Il *“Poema Elettronico”* è stato, senza alcun dubbio, il primo ambiente elettronico-spaziale in cui architettura, cinema, effetti luce e musica hanno trovato il perfetto connubio.

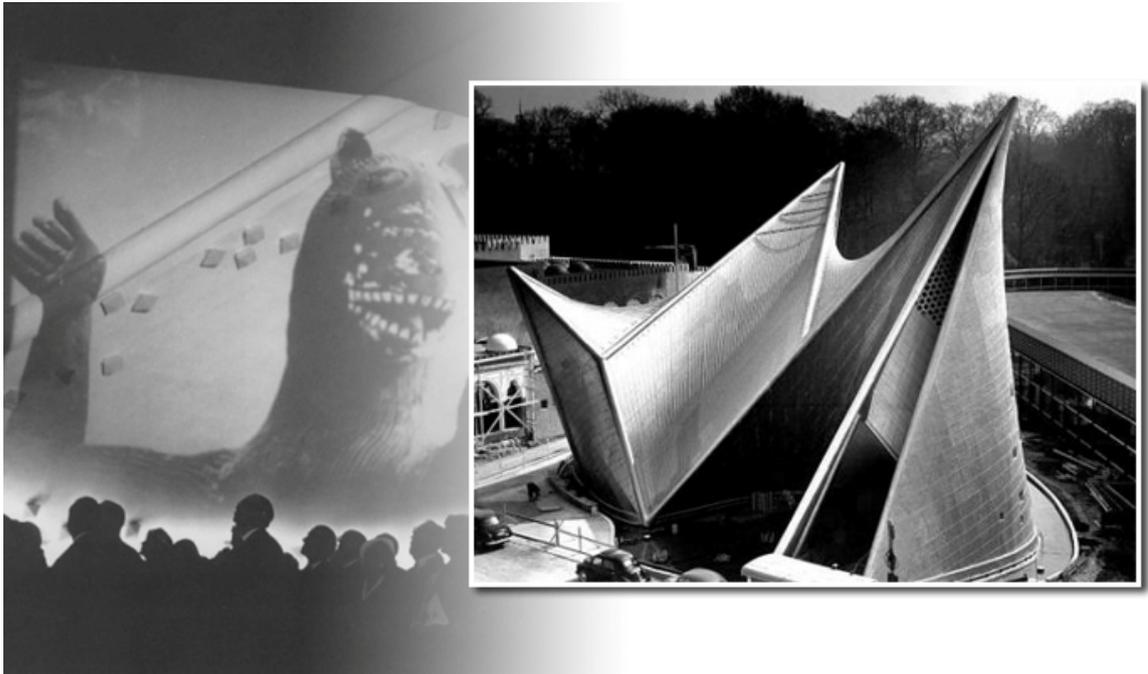


Fig. 5 Particolare dell'interno e visuale esterna del padiglione Philips.

Il drammatico cambiamento della visione della natura apportato dalla teoria del Caos ha investito ogni campo della vita umana, compreso quello della progettazione, con soluzioni che fanno riferimento ai sistemi non-lineari. La risposta architettonica al

problema dei tre corpi si profila nel sistema dinamico di tre volumi, in una sorta di organizzazione ordinata in presenza di Caos. Si affaccia sul panorama dell'architettura una nuova corrente che si contrappone al movimento postmoderno, cioè il “*decostruttivismo*”, il quale troverà nel filosofo francese Jaques Derrida il proprio maggiore teorico. È possibile rintracciare le origini di questo movimento nel 1988, anno in cui si svolse a New York, grazie a Philip Johnson, la mostra in cui ebbe spazio la neonata “*Deconstructivist Architecture*”, all'interno della quale vennero esposti i progetti di Frank O. Gehry, Daniel Libeskind, Rem Koolhaas, Peter Eisenman, Zaha Hadid, Bernard Tschumi e del gruppo Coop Himmelbau. In particolare, secondo Zaha Hadid, la fluidità delle forme deve essere interpretata come l'incarnazione del Caos dell'età moderna nelle sue diverse sfaccettature.

Il connubio tra architettura e Caos deterministico trova la sua massima espressione nelle opere del canadese Frank O. Gehry. Gli edifici progettati da Gehry sono una chiara posposizione dell'effetto farfalla di Lorenz. In maniera analoga al battito d'ali della farfalla che può generare un uragano in un'altra parte del mondo, essi sono colpiti dalla forza dell'ambiente circostante e dalla frenesia della società contemporanea. Ecco perché la loro immagine d'insieme è molto caotica pur non essendo mai casuale. L'apparente mancanza di regole è in realtà il frutto di regole ben precise. Gli elementi negli edifici di Gehry risultano sempre legati da un filo conduttore, come avviene per i ventisei petali di titanio del Guggenheim Museum di Bilbao i quali, seguendo il principio di auto-similarità, si ripropongono in scale diverse per assolvere compiti differenti.



Fig. 6 Frank o. Gehry - Particolare del *Guggenheim* di Bilbao.

Secondo Salingeros, l'architettura frattale non va intesa solo come un'espressione puramente estetica che si limita a lasciare sorpresi di fronte a strutture sinuose e superfici fluide, ma va piuttosto intesa come il bisogno dell'uomo di comprendere a fondo i segreti dell'universo e di poterne riprodurre la complessità nelle proprie opere realizzando un perfetto rapporto tra uomo e natura. Questa finalità è da sempre stata alla base dell'architettura.

3.2.4. Il Caos nella musica

Le funzioni matematiche che stanno alla base dei frattali possono essere opportunamente trattate in modo da ottenere rappresentazioni grafiche attraverso immagini e oggetti tridimensionali. Allo stesso modo, esse possono dar luogo a fenomeni non altrettanto diretti e immediatamente gradevoli attraverso la trasposizione sonora. Le medesime proprietà che vengono utilizzate per assegnare i valori di colore nelle rappresentazioni grafiche, possono essere impiegate per definire altezza e durata delle note. L'autosimilarità che si può cogliere immediatamente nelle immagini, emerge nella regolarità e nella ricorrenza delle melodie generate che riportano al concetto di "ordine nel disordine" che è proprio del Caos deterministico.

In alcuni casi, un brano musicale generato con note scelte a caso può risultare fastidioso allo stesso modo in cui un motivo ripetuto all'infinito risulta esacerbante in seguito all'assenza di una struttura definita e di varietà. Partendo da alcuni concetti basilari del suono, in natura possiamo distinguere tre tipi di rumore: rumore bianco, rumore marrone e rumore rosa.

- Il rumore bianco (white noise) è il suono che si ode, ad esempio, quando la radio non è sintonizzata su una stazione: esso è del tutto casuale, e la sua ampiezza e frequenza a un dato momento è indipendente dagli istanti precedenti.
- Il rumore marrone è più strutturato del white noise. In esso sono presenti ugualmente suoni casuali, ma collegati ognuno al precedente da una regola.
- Il rumore rosa è più strutturato del bianco, ma meno strutturato del marrone; esso è più gradevole all'orecchio di quello bianco, troppo casuale, e di quello marrone, troppo regolare.

Mandelbrot ha dimostrato, studiando i tracciati di un elettroencefalogramma, che esiste una similitudine tra le onde prodotte dalla parte periferica del sistema nervoso centrale e il rumore bianco e che man mano che ci si avvicina all'encefalo il tracciato si avvicina sempre più al rumore rosa.

La "Musica Generativa" nasce dalla generazione di una curva tramite frattali sulla quale viene disegnato un pentagramma e disposte le note in modo tale da ottenere una certa musicalità, mentre la durata dei suoni viene stabilita mediante l'utilizzo di una seconda curva frattale.

Diversamente da quanto ci si potrebbe aspettare, l'idea di musica automatica non è affatto recente in quanto, già nel 1787, il genio austriaco Wolfgang Amadeus Mozart descrisse una serie di regole di un sistema di composizione per minuetto basandole su un gioco di dadi. Il sistema si basava sull'associazione delle note ai risultati delle giocate tenendo conto delle 96 possibili forme ternarie e delle 176 possibili misure per un minuetto creando quello che è considerato il primo algoritmo di composizione generativa.

Risultati significativi riguardanti la musica generativa arriveranno solo in tempi più recenti con artisti del calibro di Brian Eno, il quale già nel 1975 si pose come obiettivo la produzione spontanea di esperienze musicali. Attraverso l'uso di diversi

registratori a nastro, egli incise dei loop di differente durata. I registratori venivano successivamente fatti partire simultaneamente, in modo tale da ottenere lo stesso suono perfettamente sincrono solo in archi di tempo lunghissimi. Questa tecnica fu ripresa e raffinata con l'avvento del digitale con l'introduzione di variabili probabilistiche che variavano l'intero brano ad ogni esecuzione.

A metà degli anni '90, Brian Eno ottenne un contratto con la software house SSEYO per la creazione del programma Konan Audio Vectors in grado di produrre audio generativo sfruttando le schede audio dei normali pc partendo dalla semplice definizione di alcuni parametri. Negli ultimi anni sono fioriti sul web i siti che mettono a disposizione degli utenti strumenti per comporre musica auto generativa. Ne è un esempio il sito del giapponese Yo Kobuta sul quale sono presenti diversi strumenti per comporre Mandelbrot Music utilizzabili in forma gratuita.

Ulteriori risvolti nel settore della musica generativa si trovano nelle creazioni di Susan Alexjander e David Deamer, i quali hanno utilizzato la complessità del DNA per realizzare un legame tra musica e patrimonio genetico. Per questo motivo le loro creazioni rientrano nella sfera di quella che viene definita DNA Music.

Non mancano, come è logico aspettarsi, artisti che si sono ispirati, se pur solo per quanto riguarda la stesura dei testi delle proprie opere, alla teoria del Caos e all'effetto farfalla. È il caso dei Muse che nel 2003 pubblicano il singolo "*Butterflies and hurricanes*" il quale analizza come gli individui possono fare una differenza enorme persino con poche risorse.

3.2.5. Il Caos nel cinema

Anche il cinema, soprattutto negli ultimi decenni, ha subito il fascino della teoria del Caos, sfruttandola per dar vita a veri e propri capolavori. Ne è un chiaro esempio la saga "*Ritorno al futuro*" (1985-1990) di Robert Zemeckis prodotto da Steven Spielberg, nel quale il protagonista, Marty McFly, grazie all'invenzione dello stravagante amico scienziato Emmett "Doc" Brown, riesce a spostarsi nel tempo e in tal modo interferisce con gli eventi del passato e del futuro modificando il corso della propria vita.

Uno dei più noti esempi di film in cui viene citata la teoria del Caos è "*Jurassic Park*" (1993), ed è nota la sequenza nella quale il Dott. Ian Malcolm, un bizzarro matematico e docente universitario specializzato nello studio della teoria del Caos, infatti egli ama definirsi un "Caosologo", spiega come possa essere imprevedibile la direzione che prenderà una goccia d'acqua che cade sulla mano in funzione delle innumerevoli variabili in gioco. Malcom è il primo a criticare le ambizioni di John Hammond, predicendo accuratamente l'instabilità della creazione del parco.

Un caso molto particolare di connubio tra teoria del Caos e cinema è rappresentato dalla commedia francese "*Smoking - No smoking*" (1993), nella quale viene proposto un gioco di incastri, alternative e potenzialità che danno vita a esiti completamente diversi prendendo il via da piccoli gesti come quello di accendere o meno una sigaretta.

Nel 1998 esce nelle sale il film "*π, il teorema del delirio*" nel quale il protagonista crede in alcuni principi fondamentali che regolano la sua vita. Egli è convinto che la matematica sia il linguaggio della natura e che ogni cosa esistente possa essere spiegata e rappresentata attraverso i numeri; in qualsiasi situazione, se analizzata

a fondo, emergono degli schemi. Sulla base di tali principi, cerca di ottenere uno schema che gli permetta di predire le quotazioni in borsa.

Nel film *“Lola corre”* (1998), viene ripresa la riflessione fra linearità e casualità, accennando al ruolo della teoria del Caos nell'interpretazione della realtà contemporanea, ma anche all'influenza dell'intertestualità nella costruzione narrativa e nell'interpretazione del tempo percepito. *“Lola corre”* può essere ricollegato alla tipologia detta delle *“forking-paths narratives”*, che espongono le varie possibilità di sviluppo della narrazione, mettendo in evidenza la scelta arbitraria. I forking-paths rappresentano percorsi alternativi, privi di una motivazione esplicita che si modificano sulla base degli sviluppi della teoria del Caos. Così come prevede la teoria del Caos, una minima variazione nelle modalità dell'incontro tra la protagonista e gli altri personaggi della storia, comporta un radicale cambiamento nelle loro vite a causa dell'imponderabilità delle *“biforcazioni”*.

Uno dei film che più si ricollegano alla teoria del Caos è senz'altro *“Sliding doors”* (1998). La storia inizia con la protagonista, la quale lavora nelle pubbliche relazioni, che viene licenziata. In seguito al licenziamento, si dirige di tutta fretta verso la metropolitana per poter tornare a casa. A questo punto la storia si biforca a causa di un evento insignificante, ovvero, nella prima situazione la protagonista riesce a prendere la metropolitana, nella seconda la perde per aver urtato fortuitamente un'altra persona. Le due storie parallele hanno, come è ovvio, epiloghi nettamente diversi. Nel primo caso la protagonista rientra prima a casa e, avendo scoperto che il proprio fidanzato la tradisce, decide di rifarsi una vita nella quale si innamora di un'altra persona, ma la storia termina con la sua morte a causa di un incidente d'auto. Nella storia parallela, la protagonista perde la metropolitana, per cui è costretta a chiamare un taxi, subisce un tentativo di scippo e rientra a casa non accorgendosi del tradimento del fidanzato. In seguito troverà un lavoro come cameriera e condurrà una vita piena di sacrifici finché non si accorgerà di essere tradita e incontrerà la stessa persona della quale si è innamorata nella storia parallela. Lo sceneggiatore e regista del film racconterà, in seguito, di aver scritto la storia con eventi paralleli del film *“Sliding Doors”* dopo essere stato vittima di un incidente al quale è sopravvissuto miracolosamente.

Se dovessimo chiedere quale è il film che più direttamente si ricollega alla teoria del Caos, la risposta non potrebbe non essere *“The butterfly effect”* (2004). Nella storia, il protagonista Evan è soggetto a stati di amnesia selettiva riguardanti alcuni momenti chiave della sua vita, per questo motivo la madre decide di farlo visitare da uno psicologo che gli consiglierà di scrivere dei diari. Solo in seguito capirà che i suoi vuoti di memoria non sono altro che dei momenti chiave della propria vita e che, grazie ai diari, egli può rivivere e modificare quei determinati eventi nel tentativo di cambiare il proprio presente. Il film presenta cinque percorsi di vita diversi in base agli eventi che Evan cercherà di modificare nel proprio passato. Ognuna delle alternative porterà conseguenze catastrofiche nella vita del protagonista e delle persone a lui care, fino a che egli non capirà che l'unico modo che permetterà a tutti di vivere una vita serena comporterà la scelta di non vivere la propria vita al fianco della persona amata. Nell'ultima alternativa possibile infatti, egli decide di tornare indietro nel tempo fino a quando aveva sei anni e spaventa la piccola Kayleigh che, per questo motivo, deciderà di vivere con la madre anziché col padre, in seguito Evan brucerà i propri diari per impedire a se stesso di apportare ulteriori modifiche catastrofiche alla propria vita. Solo dopo otto anni i due avranno modo di incontrarsi mentre camminano in mezzo alla folla, anche se Evan deciderà di proseguire per la propria strada. Non tutti sanno che esiste

una versione director's cut del film che propone una sesta alternativa nella quale Evan decide di ritornare nel momento in cui non era ancora nato per strangolarsi col proprio cordone ombelicale in modo da modificare in maniera radicale il proprio destino.

Esistono altre numerose pellicole che si ricollegano alla teoria del Caos tra le quali possiamo citare:

- *"Donnie Darko"* (2001).
- *"Match Point"* (2005).
- *"Il risveglio del tuono"* (2005), tratto dal libro che ispirò la celebre frase di Edward Lorenz.
- *"V per Vendetta"* (2005).
- *"Caos"* (2005).
- *"The Oxford murders – Teorema di un delitto"* (2008).
- *"S. Darko"* (2009).

Esulando dal mondo del cinema e prendendo in considerazione altre forme di media, possiamo annoverare lavori di finzione che menzionano la teoria del Caos come la rappresentazione teatrale *"Arcadia"* di Tom Stoppard, i fumetti *"xxxHOLiC"* e *"Tsubasa RESERVoIR CHRoNiCLE"* ed i videogiochi *"Tom Clancy's Splinter Cell"* e *"Clive Barker's Jericho"*.

3.2.6. Il Caos in informatica

L'analisi quantitativa dei fenomeni non lineari ha presentato nel passato un limite significativo, ovvero l'impossibilità di ottenere un'espressione analitica dell'andamento temporale delle traiettorie di stato. Questo limite ha impedito di comprendere molte manifestazioni che si presentavano irregolari e proprio per questo inizialmente venivano interpretati come fenomeni aleatori. Già negli anni '20, Julia era riuscito a comprendere le caratteristiche topologiche dei frattali senza però avere la possibilità di visualizzarli a causa della mancanza di adeguati strumenti di calcolo. Tantomeno era possibile conoscere la forma del "bacino di attrazione" di una funzione che veniva iterata con se stessa. A sessant'anni dalle scoperte di Julia, ciò che ha decretato il successo di Mandelbrot, è stata proprio la possibilità di servirsi del calcolatore per riuscire a visualizzare con successo le strane forme matematiche ottenute dai frattali e associarli alle forme presenti in natura. È proprio grazie all'avvento dei sistemi di calcolo automatico che si è riusciti a valicare questo limite ed è stato possibile esprimere in maniera deterministica quelle che sembravano manifestazioni aleatorie grazie alle simulazioni numeriche dei modelli ad esse associati.

Queste scoperte non possono che far pensare a quanto scritto da Galileo nel *"Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo"* e alla possibilità che una qualche entità superiore abbia realizzato la realtà nella quale viviamo utilizzando strumenti matematici, solamente attraverso i quali l'uomo può avventurarsi a comprenderne le forme e le regole che ne determinano i comportamenti. Grazie al lavoro di Mandelbrot e alle possibilità di visualizzazione offerte dal calcolatore, è divenuto possibile analizzare matematicamente e ricondurre a strutture frattali le forme complesse presenti in natura. Queste regole possono essere applicate in ogni ambito, persino in campo medico, musicale, biologico, finanziario.

Tramite le applicazioni informatiche della geometria frattale, in particolare grazie alla branca che studia i cosiddetti frattali biomorfi, si è arrivati a descrivere matematicamente strutture biologiche complesse.

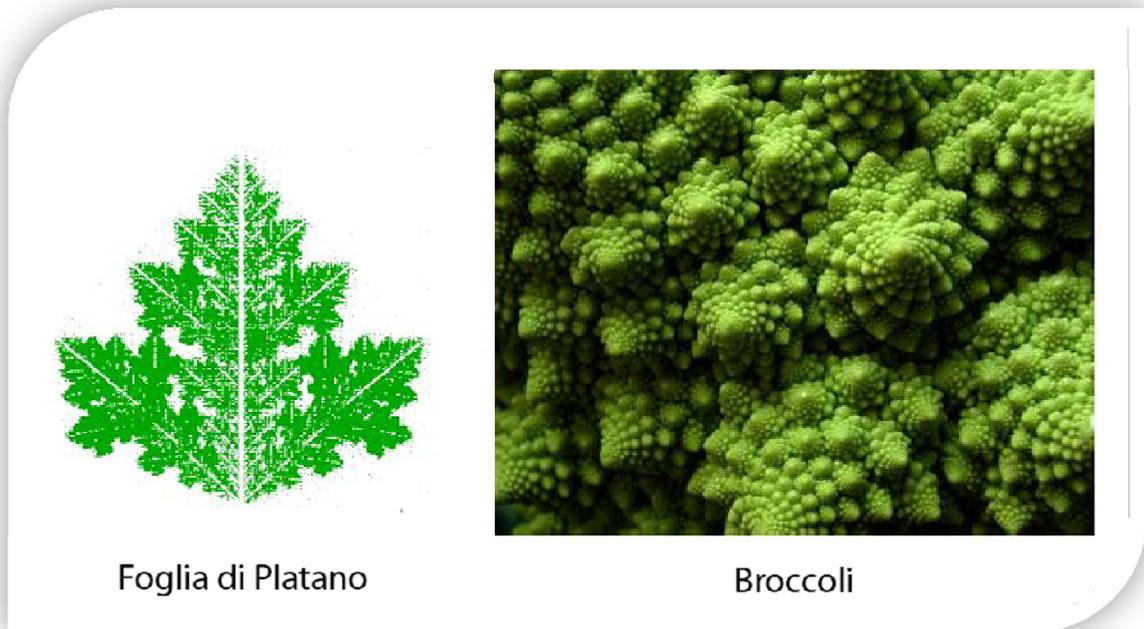


Fig. 7 Esempi di frattali biomorfi.

Quanto detto fin ora non sarebbe comunque sufficiente a porre luce su gran parte dei fenomeni del mondo osservabile. Possiamo prendere in esame la struttura di un albero nel quale, pur facendo parte dello stesso organismo, tronco e rami appaiono palesemente diversi dalle foglie. Questa osservazione potrebbe far sembrare che i frattali possano essere utilizzati come semplice analogia nella rappresentazione di strutture biologiche, almeno finché non viene applicata la tecnica del condensing, la quale prevede di mantenere a schermo la figura trasformata senza cancellarla.

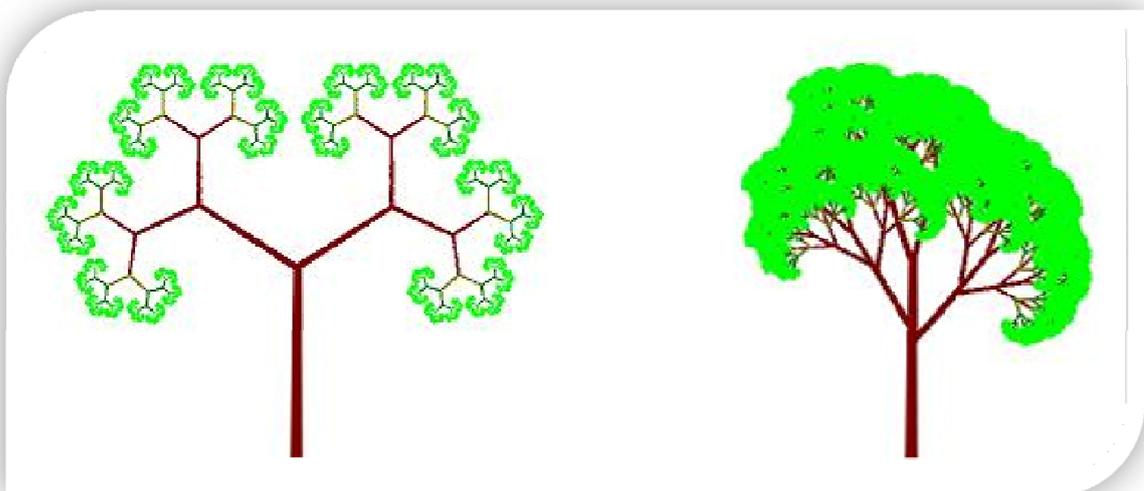


Fig. 8 Alberi creati con frattali che sfruttano il condensing.

La figura dimostra che grazie ai frattali con condensing è possibile ottenere una struttura simile a quella di un albero grazie al fatto che l'insieme di partenza non viene cancellato, ma diventa parte integrante dell'immagine finale. Applicando solo due trasformazioni, come avviene per la prima immagine, otteniamo un albero con fattezze distanti dal reale dopo 22 iterazioni, mentre nel secondo caso in cui vengono applicate quattro trasformazioni, già dopo 9 iterazioni otteniamo un albero dalla struttura significativamente più verosimile e convincente.

Esistono dei sistemi complessi formati da moltitudini di elementi che interagiscono tra di loro. Questi sistemi manifestano una particolare proprietà detta auto-organizzazione, attraverso la quale vengono sviluppate strutture ordinate partendo da situazioni caotiche. L'auto-organizzazione non è una proprietà esclusiva degli esseri viventi, ma si verifica anche in sistemi fisici o chimici complessi. Seppure gli elementi di questo tipo di sistema si muovono in modo autonomo e rispettano regole locali, essi sono capaci di creare organizzazioni strutturate. L'idea di auto-organizzazione dei sistemi complessi fu proposta per la prima volta negli anni '60 da Ross Ashby e Heinz von Foerster, anche se solo successivamente trovò applicazione pratica grazie agli approfondimenti portati avanti dal premio Nobel Ilya Prigogine, il quale per primo studiò le condizioni in cui tali comportamenti si sviluppano. Grazie agli studi di Prigogine è stato possibile comprendere che i comportamenti auto-organizzativi si verificano quando il sistema è attraversato da un flusso di energia che lo allontana dal proprio punto di equilibrio. In questa particolare condizione detta "edge of chaos" il sistema passa da uno stato di ordine a uno caotico attraverso una serie di biforcazioni. Oltre allo studio dei sistemi complessi presenti in natura, è stato possibile studiare tali proprietà con l'aiuto del calcolatore e di programmi in grado di generare immagini e forme che prendono il nome di "automi cellulari", tra i quali troviamo particolari sistemi in grado di mettere in atto principi di adattamento complessi come la selezione naturale.

Negli anni '90, Christopher Langton apportò numerosi contributi ad un nuovo settore di studio, ovvero quello della vita artificiale. In questi anni cambia radicalmente il modo di intendere la vita sociale, riconoscendo nel linguaggio e nei sistemi culturali proprietà auto-organizzative. Alla luce di quanto detto, anche il modo di concepire l'intelligenza cambia. Essa non è più considerata come lo stadio cognitivo o la capacità elaborativa che può raggiungere un individuo nella propria vita, bensì come una proprietà che l'intera specie acquisisce in milioni di anni e di vite attraverso l'evoluzione, le mutazioni genetiche, la selezione e l'auto-organizzazione. Basandosi sulla sensibilità ai dati iniziali propria dei frattali, ovvero da formule semplici che possono dar luogo a un'enorme complessità di comportamento dei sistemi, allo stesso modo è possibile osservare fenomeni complessi riconducibili a comportamenti vitali partendo da programmi tutto sommato semplici.

4. L'incontro tra la computer grafica e la teoria del Caos

Ogni giorno che passa assistiamo alla crescita della potenza di calcolo dei calcolatori. Questo fenomeno ha demolito la concezione del computer come puro strumento di calcolo per trasformarlo in un dispositivo in grado di assolvere ad un numero infinito di compiti. Come diretta conseguenza di ciò e anche grazie allo sviluppo di tecnologie sempre più innovative di interazione, nasce una nuova figura di artista che sfrutta la tavoletta grafica al posto di usare tavolozze e pennelli. In questo contesto, è possibile ammirare la produzione di opere d'arte innovative create mescolando insieme matematica, fisica, informatica. Ne è un esempio la *"Fontana Antigravitazionale"* (1992) di Manolis Maridakis, esposta alla Cité des Sciences et de l'Industrie de La Villette a Parigi. Essa si compone di un corpo sinuoso le cui parti mancanti sono completate da un getto d'acqua. Un'opera così ardita è stata possibile solo grazie all'applicazione di modelli fisici altamente complessi e dell'utilizzo delle moderne tecnologie.

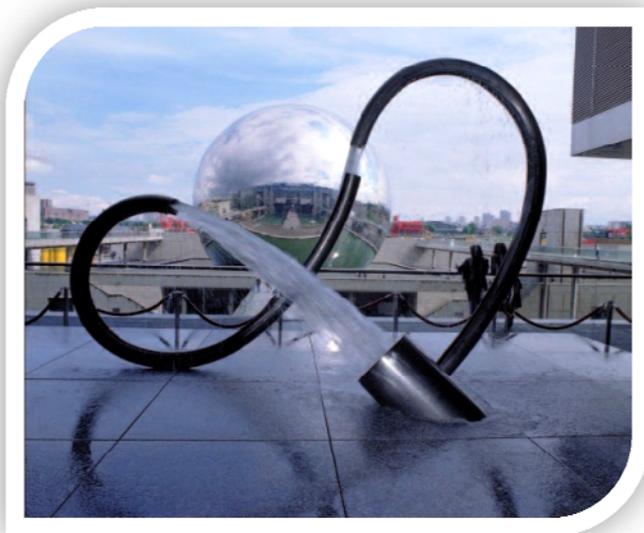


Fig. 9 *Fontana antigravitazionale, Manolis Maridakis, 1992.*

È costantemente in crescita il numero degli artisti che sfruttano le dinamiche caotiche. Xavier Julliot usa le maniche a vento per creare forme sempre imprevedibili grazie alle dinamiche delle turbolenze atmosferiche. In questo panorama, emergono gli artisti digitali, i quali traggono dalle dinamiche caotiche il proprio stile creativo.

Un chiaro esempio del connubio tra arte e scienza è stato il progetto di cooperazione internazionale Scienar (Scientific Scenarios and Art) finanziato nell'ambito del settimo Programma Quadro e gestito dall'Agenzia Esecutiva per l'Istruzione nel campo della Cultura e dell'Audiovisivo (EACEA). Il progetto, della durata di 24 mesi, è stato coordinato dall'ESG dell'Università della Calabria e si è concluso con la mostra intitolata *"Dall'ordine al Caos"* tenutasi il 19 e 20 ottobre 2010

presso l'Aula Magna dell'Università della Calabria. I contenuti dell'evento sono stati ricostruiti in realtà virtuale dall'ESG e sono liberamente fruibili via web all'indirizzo <http://museomg.unical.it/scienar>.



Fig. 10 Ricostruzione virtuale della mostra "Dall'ordine al Caos" (2010).

4.1. La nascita della computer grafica

Come per la maggior parte delle tecnologie informatiche, anche le origini della computer grafica vanno ricercate in ambito militare. Negli anni '50, l'America finanziò un progetto per le proprie forze armate denominato "Whirlwind" il quale prevedeva lo sviluppo dei primi calcolatori digitali. In seno a questo progetto, in maniera quasi accidentale, si ebbe la possibilità di osservare per la prima volta le enormi potenzialità offerte dai computer per la trasformazione di dati numerici in informazioni grafiche. Il settore della computer grafica cominciò a vivere di vita propria nei primi anni '60, quando alcune grandi società americane quali la Boeing Company e la Bell Telephones compresero quelle che potevano essere le capacità grafiche del calcolatore e posero le basi per il futuro della computer animation raggiungendo i primi significativi risultati in questo settore. All'interno dei laboratori della Boeing, proprio in quegli anni, una squadra di ricercatori capeggiati da William Fetter si servì del calcolatore per mettere a punto una nuova tecnologia che permettesse di progettare i velivoli in proiezione. In breve tempo il perfezionamento di questa tecnica, che assunse il nome di "Computer Graphics", portò il gruppo di Fetter a realizzare brevi sequenze animate usate per simulare tridimensionalmente alcune particolari condizioni in campo aeronautico. A Fetter si deve anche la prima realizzazione al computer di un modello tridimensionale di una figura umana in grado di essere animato da sette sistemi di articolazioni distinti.

Nel 1963, Edward Zajac, il quale lavorava alla Bell Telephones, trasformò uno studio sul comportamento dinamico di un satellite intorno al sole in un breve film di quattro minuti il quale ad oggi è riconosciuto come la prima animazione mai realizzata al computer, ovvero “*Simulation of a Two-Gyro, Gravity-Gradient Attitude Control System*”.

Nel corso degli anni ‘70 il filone fantascientifico vive una fase di rilancio nella quale rientra la leggendaria prima trilogia di “*Star Wars*” ideata da George Lucas, il quale decise, prima di intraprendere la lavorazione del primo film, di dotarsi di una struttura interna per la produzione degli effetti speciali che sarà conosciuta in seguito col nome di “Industrial Light and Magic” (ILM). La divisione prenderà ufficialmente vita nel 1975.

Nel 1979, dopo il successo ottenuto grazie al primo film della saga “*Star Wars*”, George Lucas fonda la “*Computer Graphics Division*” affidandola a Ed Cutmull. I sorprendenti risultati ottenuti dalla divisione attirarono al suo interno alcune figure che si sono ritagliate un nome in questo settore come Loren Carpenter e Williams Reaves, nonché un ex-animatore della Disney che divenne una delle figure fondamentali della moderna computer grafica, ovvero John Lasseter.

Nel 1974 nasce a Boulder, nel Colorado, il Siggraph, sotto il patrocinio dell’Institute of Technology della New York University, dove intanto Ed Cutmull fonda il “Computer Lab”. Inizialmente l’iniziativa ha raccolto un pubblico di seicento appassionati contro gli attuali quarantamila provenienti da tutto il mondo. Il Siggraph è tutt’ora considerato il maggiore evento mondiale del settore e ad esso va riconosciuto il merito di rappresentare una finestra per gli appassionati mantenendo così aperto un canale di comunicazione, di scambio e di aggiornamento dell’intero settore. Esso è quindi divenuto in brevissimo tempo l’appuntamento da non perdere per restare informati su cosa succedesse nel campo della computer grafica, e per vedere in anteprima immagini e sequenze animate che anno dopo anno divengono sempre più innovative e sorprendenti. Un anno dopo lo stesso Mandelbroth si è presentato al Siggraph con il suo libro “*A theory of fractal sets*” e i suoi frattali trovarono largo impiego nella computer grafica per la realizzazione di oggetti naturali come nubi, paesaggi montuosi e foreste. Ne è un esempio il celebre lavoro “*Vol Libre*” di Loren Carpenter, presentato al Siggraph del 1980. In esso è possibile assistere a una sequenza di volo sopra un paesaggio generato utilizzando sistemi procedurali.

Il connubio definitivo tra matematica e grafica venne sancito quasi dieci anni dopo la prima edizione del Siggraph dal cortometraggio “*André and Wally B.*” realizzato dalla Computer Graphics Division della Lucasfilm, la quale, successivamente al successo ottenuto, riteneva i tempi maturi per poter affrontare la produzione di un intero lungometraggio totalmente in digitale. Questa prospettiva si andò però a scontrare con gli intenti dello stesso George Lucas, il quale riteneva che la divisione dovesse specializzarsi principalmente nella produzione di effetti speciali per il cinema. La diversità di vedute sul futuro della Computer Graphics Division portò alla rottura definitiva con la LucasFilm. La fuoriuscita del gruppo di Cutmull dalla ILM coincise fortuitamente con l’estromissione dalla guida della Apple Computers del suo fondatore, Steve Jobs, il quale, nel 1986 decide di rilevare l’intera divisione e con essa uno dei più brillanti gruppi di lavoro mai esistiti in campo informatico. La nuova società prenderà il nome di “Pixar Animation Studios” e si occuperà a tempo pieno dello sviluppo di animazioni 3D. Nel 1986 la Pixar presenta il famosissimo cortometraggio “*Luxo Jr.*”

nel quale John Lassater opera con successo la fusione tra animazione digitale e regia cinematografica.



Fig. 11 Luxo Jr., 1986.

Nel 1988 la Pixar presenta l'innovativo motore di rendering *Photorealistic RenderMan*. Finalmente nel 1995 il sogno di realizzare un lungometraggio basato esclusivamente sulla grafica 3D prenderà vita con l'uscita del primo *"Toy Story"* realizzato in collaborazione con la Disney.

4.2. Lo stato dell'arte

Nel 1950, Alan Turing ha scritto in un saggio dal titolo *"Macchine calcolatrici ed intelligenza"*: *"lo spostamento di un singolo elettrone per un milionesimo di centimetro, a un momento dato, potrebbe significare la differenza tra due avvenimenti molto diversi, come l'uccisione di un uomo un anno dopo, a causa di una valanga, o la sua salvezza"*, anticipando la teoria dell'"effetto farfalla" di Lorenz.

Dagli anni '70 in poi si è fatta strada una nuova branca della matematica che propone di dare una spiegazione ai fenomeni naturali altrimenti inspiegabili con il solo utilizzo della geometria euclidea. Per primo, il matematico Benoît Mandelbrot, lavorando agli sviluppi della matematica di Gaston Julia, riuscì a dare inizio alla rappresentazione grafica delle equazioni grazie all'utilizzo del calcolatore dando vita a quella che oggi è conosciuta come geometria frattale. Fu nel 1979 che Mandelbrot scoprì, grazie all'aiuto della computer grafica, un particolare insieme (detto appunto insieme di Mandelbrot) che comprendeva al suo interno anche il frattale di Julia.

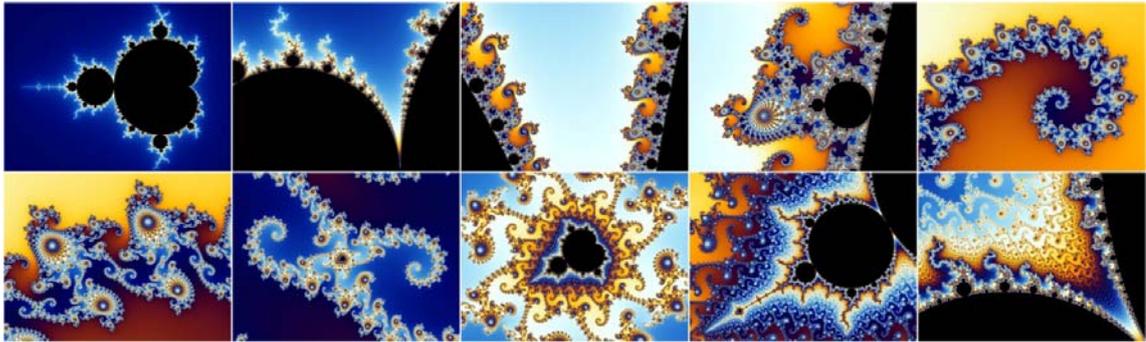


Fig. 12 Autosimilarità nel pattern di Mandelbrot.

Oltre all'indubbio fascino che queste immagini suscitano, Mandelbrot riuscì a dimostrare la correlazione esistente tra i frattali e le forme apparentemente disordinate presenti in natura utilizzando proprio i frattali come chiave di lettura della natura stessa. Da qui si muovono i maggiori studi che fanno parte della branca della matematica che va sotto il nome di Teoria del Caos.

Emblematica l'asserzione di Mandelbrot del 2007:

“Il concetto di base che unisce lo studio dei frattali alle discipline come la biologia e quindi anatomia e fisiologia parte dalla convinzione di un necessario superamento della geometria euclidea nella descrizione della realtà naturale. Volendo essere molto sintetici, i frattali servono a trovare una nuova rappresentazione che parta dall'idea di base che il piccolo in natura non è nient'altro che una copia del grande. La mia convinzione è che i frattali saranno presto impiegati nella comprensione dei processi neurali, la mente umana sarà la loro nuova frontiera”.

Questi oggetti sono definiti da alcune caratteristiche tra cui la dimensione frattale (o dimensione di Hausdorff), la quale determina il grado di irregolarità dell'oggetto, e l'auto-similarità, ovvero dal fatto che a qualsiasi scala si osservi l'oggetto, esso presenta sempre gli stessi caratteri globali. Dal momento che le strutture presenti in natura come formazioni geologiche, fiumi e linee costiere evidenziano almeno empiricamente, caratteristiche frattali, negli ultimi decenni sono fioriti differenti approcci per la creazione di terreni digitali che prendono come punto di partenza proprio i frattali. Queste tecniche di sintesi sfruttano comunemente:

- Filtraggio tramite trasformata di Fourier
- Dislocamento del punto medio
- Sintesi del rumore.

La generazione dei paesaggi che oggi vediamo nei films realizzati in computer grafica e nei videogiochi, fa largo uso dei frattali. Essi vengono largamente usati anche per quanto riguarda la simulazione di fenomeni atmosferici ed effetti particellari. Da qui l'idea di generare particolari paesaggi che potessero rappresentare il connubio tra teoria del Caos e arte digitale partendo dalle mappe di biforcazione.

5. La divulgazione della teoria del Caos

Dal punto di vista della divulgazione, la teoria del Caos presenta aspetti che non sempre ne favoriscono la comprensione e anzi tendono a complicarla. Spesse volte l'attenzione viene focalizzata sull'imprevedibilità dei sistemi complessi con la conseguenza di crearne non volutamente un'immagine associata a qualcosa di non definito, imprevedibile e incomprensibile nel proprio comportamento.

Sia la letteratura che la filmografia non hanno fatto altro che esaltare la complessità della natura di fronte alla quale non possiamo che avvertire un inesorabile senso di impotenza che rende vano qualsiasi tentativo di comprensione. Solo attraverso una presa di coscienza più approfondita è possibile affermare che l'imprevedibilità degli eventi rappresenta solo il "lato oscuro" della teoria del Caos, in quanto essa possiede un'altra facciata fatta di conoscenza, prevedibilità e aspetti evolutivi.

È perfettamente logico aspettarsi una sorta di iniziale sospetto di fronte a modalità innovative di apprendimento non più vincolate agli schemi classici. Questa sensazione di sospetto emerge nello scritto di Umberto Eco *"Apocalittici e integrati"*, la cui prefazione recita: *"È profondamente ingiusto assumere degli atteggiamenti umani - in tutta la loro varietà, in tutte le loro sfumature - sotto due concetti generici e polemici come quelli di apocalittico e integrato [...] D'altra parte a coloro che definiamo come apocalittici o integrati, rimproveriamo proprio di avere diffuso dei concetti altrettanto generici - dei "concetti feticcio" - e di averli usati come teste di turco per polemiche improduttive o per operazioni mercantili di cui noi stessi quotidianamente ci nutriamo"*.

Marshall McLuhan aggiunge: *"Dal momento che il nostro mondo è formato dalle tecniche, gli inconsapevoli, che le considerano come meri strumenti, sono dominati da queste, nella loro percezione del mondo: Ogni medium ha il potere di imporre agli incauti i propri presupposti. Solo un artista autentico può essere in grado di fronteggiare impunemente la tecnologia, proprio perché è un esperto consapevole dei mutamenti che intervengono nella percezione sensoriale"*.

Alla base delle tecnologie dedicate all'edutainment abbiamo un concetto principe detto "Illusione del reale". Tale concetto può essere spiegato in maniera semplice prendendo come esempio la pratica del guidare un'automobile. L'automobilista medio non è al corrente dell'esistenza e delle modalità di funzionamento di tutti i meccanismi che compongono l'automobile, ciò nonostante è in grado di guidarla. Analogamente possiamo dire che non tutti hanno le competenze adatte per comprendere cosa sta avvenendo all'interno del proprio computer mentre si compie una anche banale operazione come utilizzare un programma di videoscrittura o mentre si sta giocando all'ultimo videogioco uscito sul mercato. Queste sono operazioni che svolgiamo regolarmente e che pure non presuppongono la conoscenza dell'architettura del processore del calcolatore, o di come una sequenza di impulsi elettrici possano tramutarsi nella visione di un'ambientazione fittizia che possa darci l'illusione del reale.

Le tecnologie dedicate all'edutainment perseguono l'obiettivo di realizzare prodotti in grado di farci immergere, comodamente seduti di fronte al nostro monitor, all'interno dei più disparati ambienti esistenti o ricostruiti grazie alle testimonianze storiche e ai reperti archeologici. In questo modo, possiamo osservare, quasi come se

fosse reale, un'ambientazione ancora in fase progettuale, ma non ancora esistente, come per esempio, il Ponte sullo Stretto di Messina, o ambientazioni totalmente irreali, fantastiche e futuristiche, come spesso accade nei videogiochi. Dubito fortemente che molta gente, eccetto gli esperti del settore, possano solo farsi un'idea, se pur sommaria, di come può apparire il Colosseo o tutta la città di Roma nella sua maestosità e nei fasti dell'età imperiale, se non attraverso la splendida ricostruzione utilizzata all'interno del film *"Il Gladiatore"* di Ridley Scott. Ovviamente, in questo caso l'attenzione non è concentrata sull'apprendimento, il quale passa in secondo piano rispetto alla spettacolarità, ma chi ha visto il film, sicuramente si sarà fatto in un attimo un'idea di come poteva apparire l'Antica Roma senza il bisogno di impiegare tutto il tempo necessario per leggere ed interpretare da profani i tecnicismi di un libro dedicato all'architettura dell'età di Marco Aurelio.

Per fare un altro esempio, in riferimento ai cultori del genere fantasy, chi ha letto e non approfondito gli scritti di Tolkien, avrebbe solo potuto immaginare, in modo a volte molto confuso, la magnificenza delle fortezze, delle città, delle torri, nonché l'aspetto delle creature che popolano la Terra-di-Mezzo nella saga de *"Il Signore degli Anelli"*.

Le moderne tecnologie ci consentono di trasmettere contenuti estremamente complessi come quelli racchiusi nella teoria del Caos in modo da renderli fruibili alle masse attraverso metodi innovativi. Un gran numero di ricerche hanno dimostrato il successo delle nuove tecnologie multimediali nel processo di apprendimento. Possiamo distinguere tre differenti tipi di approccio nello sviluppo di nuove forme di apprendimento: *"learning by doing"* (Aldrich, 2005), *"learning by collaboration"* (Garton, 2007), *"edutainment"* (Chang, 2009). La ricerca in questo settore muove i propri passi nel tentativo di creare un approccio psicologico efficace. La parola Edutainment è un neologismo coniato da Bob Heyman, un documentarista della società National Geographic, che nasce dalla fusione delle parole *"educational"* e *"entertainment"*. L'edutainment coniuga le nuove tecnologie all'approccio costruttivista al fine di sviluppare metodi di divulgazione che siano al contempo innovativi, stimolanti e divertenti per il soggetto che apprende.

Il collegamento tra educazione e apprendimento con le esperienze ludiche o ricreative non è recente. È noto come già per Cicerone fosse importante collegare l'insegnamento all'intrattenimento al fine di impressionare in modo più efficace coloro che lo ascoltavano: *"De optimo genere oratore: Docere debitum est, delectare honorarium, permovere necessarium"*. In tempi più vicini a noi, Johan Huizinga, storico e ideologo olandese della prima metà del 1900, nel suo *"Homo Ludens"*, sostiene l'idea di *"cultura come gioco"*. Egli individua, infatti, all'interno delle università medievali alcuni esempi lampanti di questa teoria. Le pratiche dello scambio orale di natura dotta erano chiamate *"disputationes"* e si svolgevano seguendo determinate regole ascrivibili alle sfere della gara e del gioco. Huizinga sostiene che: *"la cultura va concepita come evasione ludica di un'élite raffinata che si sottrae al dolore della vita in un sogno atemporale"*.

Un esempio più vicino ai giorni nostri di come le forme di comunicazione destinate all'intrattenimento possano veicolare la conoscenza di contenuti scientifici, è rappresentata senz'altro dall'opera teatrale *"Vita di Galileo"* di Bertolt Brecht, la quale si serve della rappresentazione teatrale per narrare di come Galileo Galilei, dopo aver compiuto diversi esperimenti basandosi sulle innovative teorie di Copernico, inizia a pubblicare i propri trattati sulla nuova scienza e comprende come potersi servire del

cannocchiale per studiare gli astri e i pianeti. Grazie a questa scoperta Galileo riesce a comprendere che, a differenza di ciò che si credeva al tempo, in realtà non è la Terra a rivestire un ruolo centrale nel moto dei pianeti, bensì il Sole, come sosteneva la dottrina aristotelica. Purtroppo il periodo in cui Galileo pubblica i propri scritti è dominato dalla Santa Inquisizione, la quale tenta di impedire la diffusione delle teorie di Copernico e di Keplero in quanto mettono in discussione i dogmi della chiesa cattolica. L'opera di Brecht si incentra proprio sul processo che porterà Galileo ad abiurare le proprie teorie pur essendo consapevole della loro esattezza. L'opera teatrale, in questo caso, si trova in dissonanza con quanto tramandato dagli storici in quanto ci presenta il lato umano dello scienziato che si trova in bilico tra la voglia di combattere per ciò in cui crede e le costrizioni imposte dal potere della Chiesa. Oltre ad essere un valido strumento di diffusione delle scoperte fatte da Galileo, l'opera di Brecht pone anche luce sui rapporti tra la ricerca scientifica come cultura nascente e la cultura del potere.

Nonostante l'avvento dei nuovi media venga spesso associato ai concetti di globalizzazione e di appiattimento culturale, in quanto esse producono un impatto più o meno uniforme in tutto il mondo, colpisce il fatto che si possa far distinzione fra tre linee piuttosto differenti di sviluppo, come quella giapponese, quella americana e quella europea. Prendendo separatamente in esame questi tre casi, si possono comprendere le differenze culturali relative a ciascuna delle suddette linee di sviluppo. In Giappone esiste l'Edutainment Research Institute, il quale conferisce al settore una piena dimensione accademica. Profonde differenze esistono anche nell'utilizzo delle tecnologie, infatti in Oriente viene caldeggiato l'utilizzo dei virtual humans per fini didattici a differenza dell'approccio europeo che spesso incentra i propri sforzi nella riproduzione digitale delle opere reali in modo da facilitarne la fruizione attraverso l'esperienza interattiva.

Passando al panorama americano, risale al 1980 il progetto dei videogames designer Warren Robinett e degli esperti di apprendimento Ann McCormick Piestrup, Leslie Grimm, e Teri Perl Learning, fondatori della Learning Company. Nel 1982, Robinett disegnò un'applicazione per gli studenti delle superiori: "Rocky's Boots", grazie alla quale era possibile, usando un joystick, disegnare circuiti logici digitali.

Nel 1967 Seymour Papert da vita, assieme ai colleghi della Scozia e della Svezia, al progetto "Logo". Questo progetto aveva espressamente l'obiettivo di incoraggiare l'apprendimento nelle fasce di età infantile. Da qui ebbero origine i "Lego Mindstorm". L'approccio di Papert ha indirizzato positivamente le maggiori università americane quali MIT, Carnegie Mellon e Stanford, verso la pratica dell'"imparare facendo". Questa nuova tendenza ha portato a sorprendenti risultati pratici da parte degli studenti anche grazie alla collaborazione dello Xerox Palo Alto Research Campus. Nel 1984, grazie a Saul Wurman, che notò una "forte convergenza tra tecnologia, divertimento e disegno", l'edutainment giunse ad una nuova svolta. Fu proprio la prima conferenza sul TED (Technology, Entertainment and Design) di Monterey, il teatro della presentazione al pubblico del personal computer della Machintosh e del Compact Disc della Sony. In questa occasione, Mandelbrot dimostrò come fosse possibile mappare le linee costiere con l'aiuto dei suoi nuovi frattali e il guru dell'intelligenza artificiale, Marvin Minsky, autore di "*The Society of Mind*", espose il suo nuovo e potente modello della mente. Da questo evento nacque una conferenza annuale dedicata al technotainment che nel 1997 venne spostata a New York. Tra le prospettive di Wurman, quella primaria è sicuramente la creazione di nuovi sistemi di apprendimento provenienti dalla fusione di

tecnologia e industria del divertimento. L'evento vanta la presenza ormai costante di personaggi del calibro di George Lucas e Steven Spielberg.

Seymour Papert afferma, nel suo libro *“Mindstorms, Children, Computers, and Powerful Ideas”*: *“due idee fondamentali percorrono questo libro. La prima è che è possibile progettare degli elaboratori in modo che comunicare con loro può essere un processo naturale, molto più simile all'imparare il francese vivendo in Francia, che al tentare di impararlo con l'innaturale processo di lezioni di lingua straniera praticate nelle classi. La seconda è che imparando a comunicare con un elaboratore può cambiare il modo di apprendere”*.

Certamente, riferendoci all'apprendimento percettivo-motorio, non è molto appropriato parlare di novità, in quanto, questo tipo di apprendimento è senz'altro la prima forma utilizzata dall'uomo, nonché da alcuni primati, per trasmettere la propria conoscenza e le proprie arti. J. Piaget riconosce al gioco una funzione determinante all'interno del processo di sviluppo dell'intelligenza attraverso le varie fasi cognitive distinte in base all'età:

- da 12 a 18 mesi abbiamo una fase caratterizzata dal gioco percettivo-motorio, improntato ad azioni come: afferrare oggetti, collocarli l'uno sopra o dentro l'altro, cessare di tenerli, lanciarli lontano. A tal proposito Piaget parla di “facoltà di produrre eventi” già presente nei primi mesi di vita;
- da 18 mesi a 5 anni, quando la precedente fase viene integrata da un più complesso gioco simbolico, all'interno del quale gli oggetti assumono un significato che si proietta oltre la loro funzione concreta e consueta, per farsi simboli di altri oggetti assenti dalla scena del gioco.

Il video *“The genesis of Chua's circuit”* è stato realizzato con il preciso intento di comunicare, in maniera facilmente comprensibile, i complessi contenuti scientifici propri della teoria del Caos. Questi concetti, normalmente dominio di un settore considerato di nicchia, si prestano particolarmente ad essere dimostrati attraverso l'utilizzo di tecnologie innovative impiegate nell'apprendimento quali l'impiego dei Virtual Humans. Gli agenti virtuali, grazie alle loro potenzialità, vengono impiegati ormai da diversi anni con successo al fine di migliorare l'apprendimento di concetti particolarmente complessi in quanto, come evidenziato da diverse ricerche, gli agenti animati presentano la caratteristica di suscitare emozioni apportando considerevoli benefici agli studenti aumentandone sensibilmente la motivazione. Tenendo conto di quanto detto fin ora, è stata sviluppata un'opera basata sull'articolo originale del Professor Leon Chua del 1983, estrapolandone una sceneggiatura successivamente trasformata in un video realizzato interamente in animazione 3D.

All'interno del mondo simulato in cui la storia si svolge, è stato ricostruito il contesto scientifico nel quale si è realizzata la “Genesi del circuito di Chua”, tenendo in conto i principi del costruttivismo e l'importanza del contesto in cui avviene l'apprendimento. La teoria dei sistemi dinamici è un campo della matematica sviluppatosi negli ultimi 50 anni che ha trovato ampi consensi anche in ambito economico e sociale fornendo paradigmi innovativi per la descrizione dell'universo fisico, dell'evoluzione dei sistemi sociali, economici e finanziari. Questa disciplina è strettamente collegata con diverse aree della matematica e della fisica e i concetti che ne

stanno alla base influenzano e stimolano lo sviluppo della ricerca in molti settori scientifici che studiano i fenomeni non lineari e la teoria del Caos. La moderna teoria dei sistemi dinamici deve la propria nascita alle scoperte di Henri Poincaré, il quale è stato uno dei primi scienziati a dedicarsi allo studio dei comportamenti che possono essere descritti tramite equazioni non lineari accoppiate. Un sistema dinamico può essere definito come un insieme di elementi le cui caratteristiche cambiano nel corso del tempo in funzione di un determinato numero di parametri iniziali. Generalmente i sistemi dinamici sono composti da due parti, ovvero, le condizioni che ne determinano lo stato e la configurazione, e quelle che ne regolano l'evoluzione temporale.

Purtroppo, i metodi di insegnamento tradizionali non risultano particolarmente efficaci nell'insegnamento di concetti particolarmente complessi come quelli relativi alla teoria del Caos in quanto essi fanno largo uso di formule e sistemi matematici eccessivamente complicati che possono essere compresi esclusivamente da ascoltatori altamente specializzati. Per questo motivo si è pensato di ricorrere alle tecnologie offerte dalla computer grafica per la realizzazione di un video che potesse trasmettere i concetti scientifici propri della teoria del Caos anche a spettatori estranei a questo particolare settore disciplinare, attraverso la narrazione della storia di come il circuito di Chua è nato. L'idea alla base della realizzazione del video è quella di combinare l'insegnamento di concetti scientifici, le tecniche di modellazione 3D, le forme di comunicazione come la narrazione teatrale, l'animazione e la simulazione virtuale.

L'utilizzo della computer grafica e delle tecniche di animazione 3D nella realizzazione delle scene, rappresenta un enorme vantaggio grazie alla possibilità di rendere visibili gli oggetti matematici dei quali si parla come gli attrattori strani di Lorenz e di Chua.

Gli esempi che seguono sono tutti caratterizzati da un ampio utilizzo di tecnologie multimediali innovative, ma compatibili con gli attuali standard di trasmissione in rete.

- **Roma tra monumenti e memorie**, si tratta di una guida multimediale ai monumenti della città, realizzata per i centri informativi dell'Agenzia Romana per la preparazione del Giubileo, attualmente consultabile presso il nuovo Multimedia Information Centre.
- **Il museo ebraico di Bologna** è stato istituito dal Jewish Culture Program e dal Comitato organizzatore, formato dal Comune di Bologna, dall'Istituto per i Beni Culturali della Regione Emilia-Romagna, dalla Provincia di Bologna e dalla Comunità Ebraica di Bologna, allo scopo di studiare, valorizzare e conservare il ricco patrimonio culturale ebraico profondamente radicato a Bologna e in molte località dell'Emilia-Romagna. Altair 4 Multimedia ha curato la realizzazione degli strumenti multimediali che forniscono al visitatore un percorso storico-virtuale in grado di fargli comprendere l'autentico spirito della tradizione ebraica dalle origini all'epoca contemporanea.
- **Esploriamo un villaggio preistorico** è un sistema informativo, realizzato per il museo di Valentano con gli archeologi della ARX, che propone la ricostruzione di un abitato dell'età del bronzo. La ricostruzione della

capanna, ispirata alle urne cinerarie, è navigabile virtualmente in 3D ed è corredata di schede esplicative.

- **Esploriamo la Tuscia Preistorica** è un sistema informativo realizzato con gli archeologi della ARX per il Museo della Preistoria della Tuscia e della Rocca Farnese con il patrocinio della Regione Lazio e del Comune di Talentano. Il fine di questa guida è quello di preparare gli utenti a trovare la strada verso gli abitati, le tombe, i santuari preistorici meglio conservati, per conoscerli, amarli ed aiutare a difenderli.
- **SS. Quattro Coronati**, si tratta della realizzazione del sito Web collegato al progetto di restauro del chiostro della basilica dei Ss. Quattro Coronati di Roma.
- **Il teatro di Busseto**, realizzato dalla Fondazione Verdi di Parma. Si tratta della navigazione interattiva, su rete Internet, all'interno del Teatro di Busseto (Pr) appena restaurato.
- **Duckburg Virtual Magazine**, della Walt Disney Interactive, si tratta del prototipo per un periodico internazionale su CD-ROM ed Internet.

5.1. Progetti per l'Edutainment realizzati nell'Università della Calabria.

Nell'ambito dell'edutainment, molti progetti sono stati sviluppati dall'Università della Calabria. Essi si rivolgono principalmente alla produzione di strumenti interattivi destinati alla fruizione dei beni culturali. Tra questi possiamo citare la ricostruzione del sito archeologico di "Hera Lacinia" presso Crotone. La ricostruzione è stata usata come ambientazione per la realizzazione di un videogioco incentrato sulle vicende mitologiche che collegano il personaggio di Eracle alla fondazione del tempio. In seguito ad una sperimentazione, alcune classi di scuola media inferiore sono state divise in due gruppi uno dei quali ha assistito ad una lezione frontale sull'argomento del mito di Hera Lacinia, mentre il secondo gruppo ha giocato con l'applicazione. Alla fine delle due attività, è stato somministrato il medesimo questionario a entrambi i gruppi. I risultati del questionario hanno dimostrato la migliore qualità dell'apprendimento da parte del gruppo che ha usato il videogioco rispetto a quello che ha assistito alla lezione classica.



Fig. 13 Ricostruzione del tempio di Hera Lacinia (2005).

Ad opera dell'ESG dell'università della Calabria, nell'ambito del progetto finanziato dal programma comunitario Culture 2000 "Connecting European Culture through New Technology - NET Connect, è stata prodotta una simulazione che consente di visitare l'intera città di Locri così come sarebbe apparsa nel VI secolo a. C.

Il progetto ha l'obiettivo di favorire la creazione di un'interconnessione culturale del continente europeo attraverso l'uso di nuove tecnologie. Si è partiti da tre siti archeologici: Magna Grecia (Calabria), Glauberg (Germania) e Biskupin (Polonia), con l'intento di creare un sistema di fruizione interattiva in cui coinvolgere i maggiori siti archeologici europei.

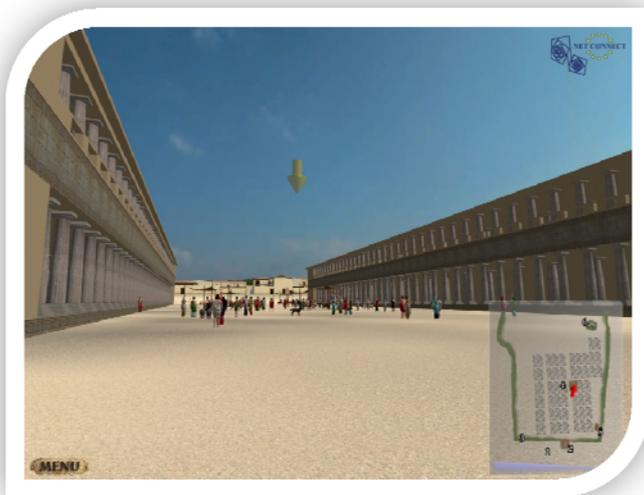


Fig. 14 Ricostruzione della città di Locri.

La creazione del sito web <http://museomg.unical.it/scienar>, ha rappresentato un ulteriore passo in avanti in questo ambito, in quanto offre la possibilità di fruire le ricostruzioni 3D interattive semplicemente collegandosi tramite browser. In esso è possibile esplorare, oltre alla riproduzione virtuale dell'evento "Dall'ordine al Caos",

altri tre scenari, dei quali il più interessante è senz'altro la ricostruzione del Castello Svevo di Cosenza. Ognuno degli scenari offre, oltre alla possibilità di navigare nelle diverse ambientazioni virtuali, la possibilità di fruire di una serie di informazioni di interesse scientifico riguardanti diversi ambiti di ricerca attraverso un excursus temporale che porta dalla geometria euclidea alla teoria del Caos.



Fig. 15 Ricostruzione 3D del Castello Svevo di Cosenza.

Un ulteriore passo in avanti per quanto concerne la diffusione di contenuti di interesse culturale attraverso media innovativi, è stato fatto nell'ambito del progetto di ricostruzione 3D del parco archeologico di Iuvanum nel comune di Montenerodomo (Chieti) a seguito della collaborazione tra l'ESG, SmartSys (Roma) e Tuelv (Cosenza). Il risultato del progetto è stato quello di creare un app per tablet e smartphone che consente la navigazione interattiva in grafica 3D del parco archeologico utilizzando il dispositivo come display per la realtà aumentata. È possibile scaricare l'app su dispositivi mobile Android e IOS.



Fig. 16 Ricostruzione 3D del parco archeologico di Iuvanum.

All'interno ESG, sono stati condotti diversi studi riguardanti il rapporto tra apprendimento e teoria del Caos. In questo contesto, è stato sviluppato un modello di insegnamento e apprendimento indirizzato alle scuole per studiare il Caos attraverso la creazione di suoni e immagini digitali. Questo particolare approccio è basato sull'idea che le creazioni digitali ottenute manipolando il circuito di Chua, sono in grado di motivare gli studenti stimolandone i processi di apprendimento e la creatività con una conseguente riduzione dello sforzo mentale. Alla base di ciò, abbiamo la teoria costruttivista, la quale prevede il contatto diretto con gli oggetti, la manipolazione, che può avvenire anche attraverso simulazioni virtuali, e il lavoro di gruppo che, come è noto, incoraggia gli studenti a pensare ed esprimere ipotesi in netta contrapposizione con le modalità di insegnamento passivo in cui gli studenti non vengono motivati a pensare attivamente. Emerge da ciò che questo tipo di approccio rappresenta un potentissimo strumento per incentivare la comprensione di concetti scientifici rendendo le informazioni maggiormente attrattive soprattutto per i più giovani.



Fig. 17 Gli studenti mentre usano il software Chaos Explorer.

Non mancano le ricerche in campo pedagogico che dimostrano come l'apprendimento attivo può migliorare sensibilmente la quantità e la qualità dei concetti appresi da parte degli studenti. A tale scopo, sono stati realizzati dei laboratori sperimentali basandosi sul concetto di edutainment all'interno dei quali gli studenti hanno la possibilità di costruire fisicamente e testare il circuito di Chua. In questo modo, gli studenti hanno imparato ad assemblare il circuito manipolandone i componenti e ne hanno compreso lo schema elettrico. Attraverso l'utilizzo del software Chaos Explorer, gli studenti hanno dimostrato una profonda comprensione dell'evoluzione dei sistemi dinamici attraverso la simulazione al computer, creando cambiamenti nei modelli derivati dal circuito di Chua.

6. Aspetti scientifici e tecnologici

Malgrado l'accezione negativa che il concetto di Caos ha portato con sé sin dal passato, in quanto considerato il fenomeno contrapposto all'ordine, l'uomo è da sempre stato affascinato sia dalla potenza evocativa del Caos come degradazione dell'ordine, sia dal Caos visto come contesto ricco di potenzialità da cui emerge la creazione.

Molteplici sono le applicazioni che la teoria del Caos trova in svariate discipline come: matematica, fisica, chimica, biologia, dinamica della popolazione, informatica, geologia, ingegneria, economia, finanza, filosofia, politica, psicologia e robotica. In medicina, per esempio, la teoria del Caos viene attualmente applicata anche allo studio medico dell'epilessia e, specificamente, alla predizione di attacchi apparentemente casuali attraverso l'osservazione delle condizioni iniziali.

Nel momento in cui abbiamo a che fare con un insieme di elementi che evolvendo e interagendo tra di loro causano un comportamento complessivo articolato, ci troviamo di fronte a un "sistema complesso", come avviene nel caso della previsione dell'andamento dei titoli di borsa, della propagazione di epidemie virali o della gestione di risorse umane. I sistemi complessi formati da più elementi manifestano una caratteristica fondamentale detta "auto-organizzazione", ovvero hanno la capacità di sviluppare strutture ordinate partendo da situazioni caotiche. Questi concetti sono ampiamente sfruttati nelle tecnologie impiegate per la modellizzazione di agglomerati, sistemi organici e crescita granulare nei materiali.

Secondo G. J. Klir, si definisce auto-organizzante *"un sistema che tende a migliorare le sue capacità nel corso del tempo organizzando meglio i suoi elementi per raggiungere l'obiettivo"*. L'evoluzione di un sistema auto-organizzante è certamente paragonabile a quella dei sistemi formati da individui viventi, per cui diventa naturale il passaggio attraverso il quale la teoria del Caos viene applicata agli studi sulla vita artificiale.

Negli esperimenti sulla vita artificiale, vengono creati dei sistemi composti da specie differenti di individui che vengono lasciati evolvere secondo il meccanismo della selezione naturale e dell'auto-organizzazione. L'interazione tra gli elementi del sistema è generalmente di tipo competitivo e si basa sulla misurazione della "fitness", ovvero della capacità dell'individuo di rimanere in vita in seguito alle capacità di adattamento alle condizioni ambientali maturate con l'evoluzione. Le applicazioni tecnologiche di questi sistemi possono essere innumerevoli, basti pensare ad un sistema in cui la fitness degli individui viene sostituita con una funzione di costo costruita su un compromesso tra rendimento ed emissioni di sostanze inquinanti di un impianto di combustione. È possibile collegare dinamicamente le misure effettuate sui parametri di funzionamento dell'impianto e le caratteristiche genetiche degli individui che nascono. Sarà possibile in questo modo simulare il comportamento dell'intero sistema apportando le dovute modifiche, come sostituzione del tipo di carburante o miglioramento delle performance durante la vita dell'impianto, fino a raggiungere l'ottimizzazione della funzione di costo.

I sistemi di funzioni iterate, meglio noti come IFS (Iterated Function System), rappresentano un campo della teoria del Caos che trova applicazione in molte aree della biologia e dell'informatica. Le loro potenzialità sono molteplici e vengono

enormemente sfruttate nella computer grafica grazie alla loro capacità di imitare alla perfezione diversi oggetti presenti in natura. Uno dei primi a studiare questi particolari sistemi fu il matematico inglese M. Bransley, autore del libro *“Fractals Everywhere”*, il quale se ne servì per riprodurre la forma di una felce praticamente indistinguibile da quella reale.



Fig. 18 La “felce di Bransley” al confronto con l’*Asplenium adiantum-nigrum*.

Gli automi cellulari sono una diretta conseguenza delle ricerche trasversali portate avanti sui sistemi auto-organizzanti da diversi settori scientifici come cibernetica, neuroscienze e biologia. I più significativi contributi in questo settore furono l'avvento delle reti neurali con le prime esperienze di McCulloch e Pitts nel 1943 e gli automi cellulari introdotti da J. Von Neumann nel 1966 al fine di studiare lo sviluppo di macchine in grado di autoriprodursi.

S. Wolfram ne ha approfondito lo studio indagandone i meccanismi di crescita e le caratteristiche di auto-organizzazione. Wolfram giunse alla conclusione che: *“anche partendo da un insieme nel quale ciascuna configurazione possibile appare avere uguale probabilità, l'evoluzione dell'automa cellulare concentra le probabilità per configurazioni particolari riducendo l'entropia”*. Se ne deduce che l'entropia nei sistemi auto-organizzanti come gli automi cellulari può diminuire venendosi così a creare ordine dal disordine.

Gli automi cellulari possono essere definiti come reticoli di celle alle quali viene associato un valore binario dinamicamente dipendente dai

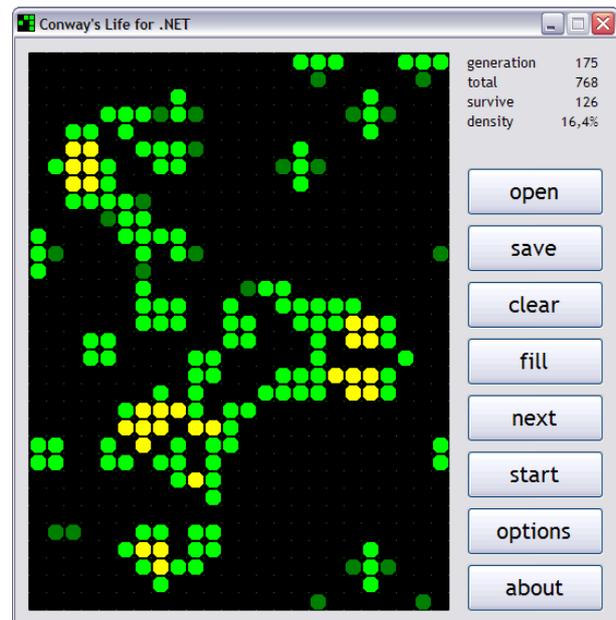


Fig. 19 Il gioco “Game of life” di J. Conway (1970).

valori delle celle adiacenti e dal valore precedente della singola cella. Per fare un esempio possiamo citare il gioco “*Game of life*” di J. Conway.

In biologia, gli automi cellulari sono stati ampiamente utilizzati da S. Kaufmann, il quale si è servito di particolari automi noti come *Random Boolean Networks* per studiare, grazie a queste simulazioni, determinati aspetti dell’adattamento dei sistemi biologici.

6.1. Aspetti teorici e matematici

In campo scientifico, il termine “Caos deterministico” viene riferito a sistemi dinamici non lineari per questo detti anche “sistemi caotici”, i quali presentano un andamento temporale imprevedibile e risultano estremamente complessi e, per tanto, apparentemente incomprensibili.

Le dinamiche evolutive di un sistema dinamico corrispondono a modelli matematici i quali non permettono di ottenere soluzioni esatte. Questa impossibilità di determinare con esattezza le soluzioni analitiche dell’evoluzione dei sistemi dinamici, ha fatto in modo che venissero sviluppati metodi di visualizzazione che potessero rappresentare adeguatamente l’evoluzione del sistema in uno spazio astratto detto “spazio delle fasi”. Nello studio dei sistemi dinamici si intende, per spazio delle fasi, lo spazio astratto del quale i punti rappresentano tutti gli stati del sistema stesso. Il numero di dimensioni dello spazio delle fasi è dato dal numero di gradi di libertà del sistema. In un determinato istante, lo stato del sistema può essere rappresentato come un punto nello spazio delle fasi detto “punto rappresentativo”. L’evoluzione del sistema nel tempo fa in modo che le grandezze che definiscono lo stato del sistema varino causando lo spostamento del punto rappresentativo lungo una traiettoria che può essere definita come “orbita del sistema nello spazio delle fasi”. Un sistema dinamico può essere inteso come un insieme di equazioni che dia come risultato l’evoluzione temporale del sistema tenendo in considerazione gli stati precedenti. L’evoluzione di un sistema dinamico può essere studiata mediante lo studio della traiettoria che il punto rappresentativo percorre nello spazio delle fasi. I comportamenti globali del sistema e i cambiamenti prodotti dai parametri di controllo vengono studiati mediante l’analisi delle proprietà qualitative. La teoria qualitativa dei sistemi dinamici fondata da Poincaré, detta anche teoria topologica, consiste nello studio delle leggi del moto che, rinunciando ad ogni pretesa di conoscenza analitica delle soluzioni, si basa su metodi geometrici e visivi. La modifica dei parametri di controllo di un sistema dinamico, produce trasformazioni significative nelle strutture che caratterizzano lo spazio delle fasi. Grazie allo studio qualitativo dello spazio delle fasi, è possibile analizzare le modifiche indotte nell’evoluzione del sistema al variare dei parametri di controllo. Nel 1903 Henri Poincaré descrisse il fenomeno del Caos deterministico come segue:

“Una causa piccolissima che sfugge alla nostra attenzione determina un effetto considerevole che non possiamo mancare di vedere, e allora diciamo che l’effetto è dovuto al caso. Se conoscessimo esattamente le leggi della natura e la situazione dell’universo all’istante iniziale, potremmo prevedere esattamente la situazione dello stesso universo in un istante successivo. Ma se pure accadesse che le leggi naturali non avessero più alcun segreto per noi, anche in tal caso potremmo conoscere la situazione iniziale solo approssimativamente. Se questo ci permettesse di prevedere la situazione successiva con la stessa approssimazione, non ci occorrerebbe di più e dovremmo dire

che il fenomeno è stato previsto. Ma non è sempre così; può accadere che piccole differenze nelle condizioni iniziali ne producano di grandissime nei fenomeni finali. Un piccolo errore nelle prime produce un errore enorme nei secondi. La previsione diviene impossibile”.

Questi sistemi, pur dimostrandosi imprevedibili, presentano un ordine intrinseco che può essere portato alla luce servendosi di un approccio molto diverso da quello di cui si serve la matematica lineare.

Si dice caotico un sistema dinamico che presenta determinate caratteristiche:

- il suo andamento deve essere imprevedibile nel tempo e la propria evoluzione deve restare confinata entro un certo spazio definito. Ciò comporta che il sistema non potrà mai evolvere verso l'infinito per nessuna variabile.
- il sistema deve essere sensibile ai dati iniziali. Ciò significa che variando anche impercettibilmente le condizioni iniziali, l'evoluzione della dinamica del sistema cambierà notevolmente nel tempo.

Strettamente legato al concetto di Caos vi è quello di “attrattore” come strumento necessario per comprendere il tipo di ordine presente nei sistemi caotici. È possibile definire un attrattore come: “l'insieme definito nello spazio delle fasi di un sistema dinamico verso il quale il sistema stesso evolve dopo un tempo sufficientemente lungo”. Un attrattore può essere costituito da un punto, una curva o da un sistema complesso dotato di struttura frattale. I più semplici attrattori noti sono il “punto fisso” e il “ciclo limite”. Il primo, detto anche punto di equilibrio, rappresenta un punto corrispondente ad uno stato costante del sistema nel tempo. Il secondo è definibile come una curva chiusa nello spazio delle configurazioni di un oscillatore sulla quale le traiettorie del sistema tendono ad avvicinarsi. Tutte le traiettorie del sistema che collasseranno sulla curva rimarranno su un ciclo limite, così come avviene nel tipico caso dell'oscillatore di van der Pol, nel quale è possibile osservare come le traiettorie che partono da punti diversi si avvicinano con l'andare del tempo all'orbita periodica.

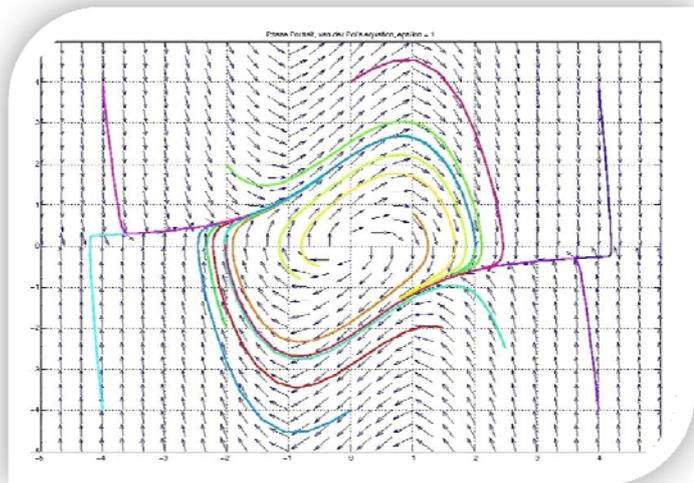


Fig. 20 Esempio di ciclo limite: L'oscillatore di van der Pol.

Quando la dinamica dell'attrattore è caotica, l'attrattore viene definito “strano”. Il più noto ed emblematico esempio di attrattore strano è senz'altro l'attrattore di Lorenz, considerato il primo esempio di un sistema di equazioni differenziali in grado di rappresentare un comportamento complesso.

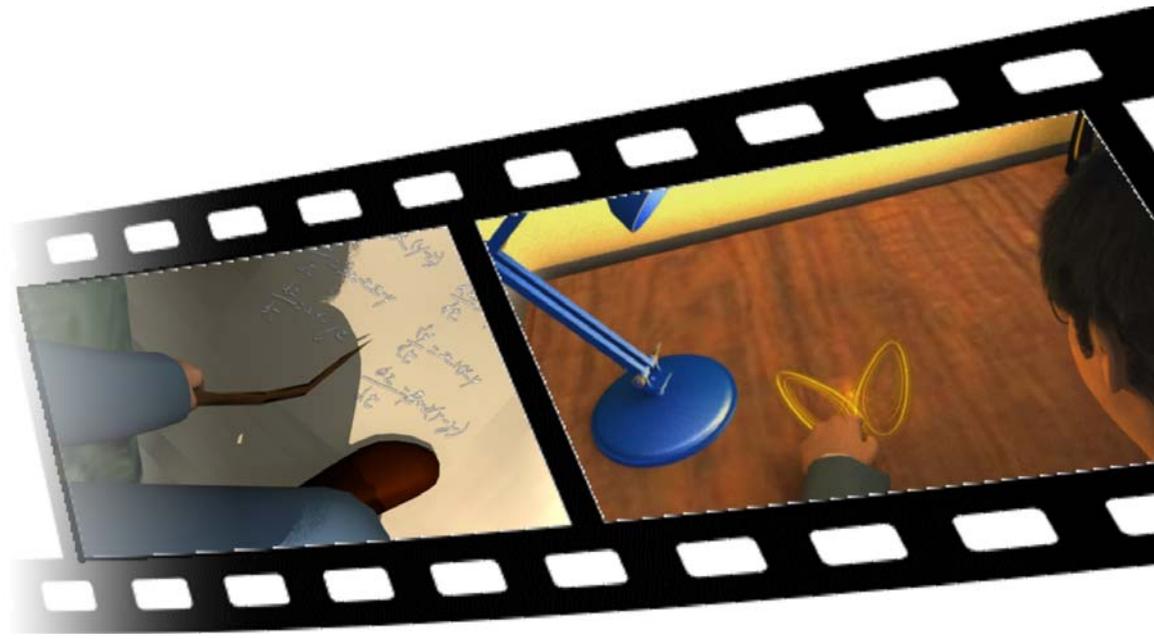


Fig. 21 Chua alle prese con le equazioni e l'attrattore di Lorenz.

La scoperta dell'attrattore di Lorenz porta alla conclusione che, essendo un attrattore strano fortemente dipendente dalle condizioni iniziali, due set di condizioni iniziali, anche con parametri estremamente vicini tra loro, daranno luogo a traiettorie che divergeranno esponenzialmente tra loro. Quanto detto denota l'impossibilità di effettuare previsioni attendibili sull'andamento del sistema a lungo termine, in quanto persino una causa apparentemente irrilevante non prevista può produrre una piccola variazione nei dati iniziali determinando una dinamica qualitativamente differente nell'evoluzione del sistema.

6.2. Dalle funzioni matematiche ai modelli 3D

Un frattale può essere definito come un oggetto formato da tante rappresentazioni di sé stesso in scala diversa che non si sovrappongono mai. Analizzando i frattali di Mandelbrot e Julia, si esce dal mondo della matematica per entrare in una vera e propria dimensione artistica.

Durante il lavoro di produzione del video "The genesis of Chua's circuit" sono state portate avanti numerose attività parallele aventi come punto di partenza il mondo del Caos e i contributi che il Professor Chua ha apportato in questo ambito. Una di queste attività ha riguardato la realizzazione di terreni e paesaggi generati partendo da funzioni matematiche per la generazione di mappe di biforcazione, le quali consistono in rappresentazioni grafiche tramite le quali è possibile osservare qualitativamente l'evoluzione di un sistema dinamico al variare di uno dei parametri di controllo.

Grazie al software ChuaExplorer 2.0 è stato possibile ricreare particolari mappe di biforcazione utilizzando i dati contenuti nel volume "*Discrete chaotic dynamics from Chua's oscillator: Chua machines*", di Eleonora Bilotta e Pietro Pantano.

La creazione del landscape ha come punto di partenza una mappa di biforcazione. Le mappe di biforcazione sono considerate l'esempio di quanto complesso e caotico possa essere il comportamento di una semplice equazione dinamica non lineare. Questa modalità di visualizzazione venne resa popolare nel 1976 dal biologo Robert May e l'equazione che la descrive ha la seguente forma:

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n)$$

Una volta inseriti gli opportuni parametri, il software ChuaExplorer è in grado di restituire le elaborazioni prodotte in formato grafico e di salvarle come immagini raster. Le mappe di biforcazione vengono così salvate come immagini in bianco e nero in formato .BMP ad alta risoluzione. Ciò ne consente una successiva elaborazione tramite software di fotoritocco in modo da ammorbidirne il contrasto ed inserire variazioni graduali sulla scala di grigi.

Ottenuto l'effetto desiderato, l'immagine può essere impiegata in diversi contesti, ovvero, sia per la generazione di contenuti finalizzati al rendering foto realistico, sia per la generazione di paesaggi esplorabili in tempo reale. In entrambi i casi il procedimento è analogo in quanto il punto di partenza è il medesimo sia all'interno dei software di modellazione che in quelli per la creazione di ambienti 3D interattivi. Il modello da cui si parte è una griglia tridimensionale avente una densità di punti tanto maggiore quanto più dettagliato dovrà essere il risultato finale.

Il fatto che i valori in scala di grigio che compongono l'immagine siano codificabili numericamente, consente di utilizzare i valori numerici relativi al colore dei pixel come valore da associare all'altezza dei punti della griglia. In questo tipo di operazione l'immagine assume la funzione di displacement map, ovvero di mappa di dislocamento delle altezze. Questo tipo di approccio si colloca nell'area chiamata "generazione procedurale dei contenuti" indicata dall'acronimo di derivazione anglosassone PCG (Procedural Content Generation). Le tecniche di PCG vengono sfruttate in ambito video ludico al fine di ridurre drasticamente i tempi di sviluppo per favorire l'impiego di risorse dedicate allo sviluppo di effetti grafici realistici e spettacolari con una considerevole riduzione dei costi di produzione. Queste tecniche sfruttano ampiamente i frattali e gli algoritmi genetici e sono da intendersi come strumento ausiliario nella produzione di contenuti grafici in quanto presuppongono un'adeguata programmazione che non può prescindere dall'intervento umano nel processo di produzione. Tra i vantaggi offerti da queste tecniche, oltre a quelli di ordine economico, abbiamo un considerevole riduzione della quantità di dati necessaria per lo stoccaggio di ambientazioni troppo vaste come quelle dei videogiochi delle serie "The Elder Scroll" e "Grand Theft Auto". Tra gli algoritmi di PCG che fanno ricorso ai frattali possiamo citare il "midpoint displacement algorithm" e il "diamond-square algorithm". Così come nel campo video ludico, anche il cinema viene spesso sfruttata la generazione procedurale per creare ambientazioni accurate ed esteticamente interessanti.



Fig. 22 “Vol Libre” di Loren Carpenter (1980).

Ne è un esempio il cortometraggio della durata di due minuti “Vol Libre” di Loren Carpenter, interamente realizzato tramite tecniche di generazione frattale dei paesaggi. Il film fu presentato al SIGGRAPH nel 1980 e fu accolto molto calorosamente. Grazie a questo successo, la Carpenter, che fino a quel momento aveva già lavorato per la Boeing Computer Services apportando parecchie innovazioni informatiche nei processi di progettazione meccanica svolte fino ad allora manualmente, venne immediatamente invitata a lavorare per la Computer Division della Lucasfilm.

Esistono alcune applicazioni dette “Imperfect Factory”, grazie alle quali gli artisti digitali possono generare rapidamente grosse quantità di oggetti simili tra loro, ma mai perfettamente uguali. Per fare un esempio, un artista digitale che deve popolare lo scaffale di un negozio può modellare un singolo prodotto e generare successivamente un gran numero di “copie imperfette” da disporre sullo scaffale.

Attualmente è possibile disporre di un gran numero di software, molti dei quali gratuiti, per la generazione di landscapes che utilizzano immagini raster o procedurali per la definizione delle altezze. Tra questi i più efficienti e specializzati sono Bryce e Terragen, i quali mettono a disposizione una serie di strumenti utili nella definizione delle altezze e, successivamente, nella generazione delle texture. Ottimi risultati possono essere ottenuti all’interno dei modellatori generici come 3DStudio Max e Softimage i quali mettono a disposizione ottimi strumenti per la generazione di terreni che utilizzano sia immagini raster come displacement map oppure eseguono operazioni di triangolazione su curve di livello provenienti da progetti CAD.

Sono stati ottenuti ottimi risultati nella generazione di terreni navigabili in tempo reale grazie all’impiego del software Unity3D, il quale rappresenta un ottimo strumento per la creazione di simulazioni 3D multi-piattaforma. All’interno di Unity3D è presente uno strumento che consente di caricare immagini raster, convertite preventivamente in formato .RAW, e di applicarle ad una griglia tridimensionale per modificarne le altezze. I risultati sono apprezzabili già al primo impatto e possono essere migliorati

notevolmente utilizzando gli strumenti che Unity3D mette a disposizione per definire le caratteristiche dei materiali che si vogliono dare al terreno e per aggiungere particolari come falde acquifere, illuminazione e vegetazione.

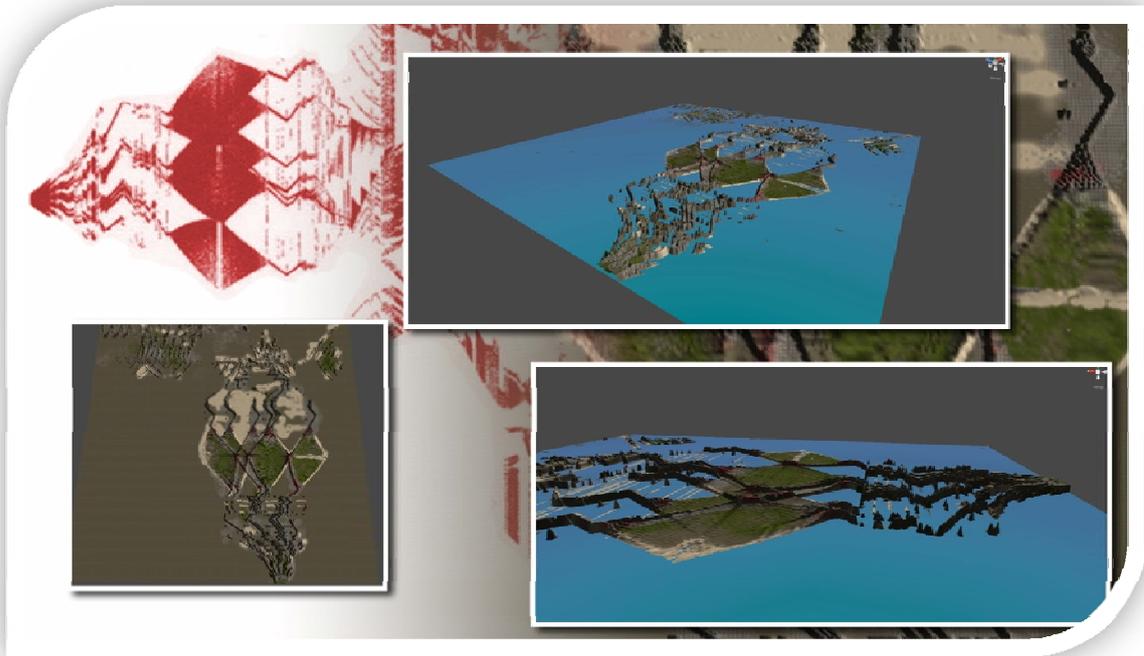


Fig. 23 Terreno generato dalle mappe di biforcazione.

Unity3D consente di realizzare ambienti di navigazione in tempo reale grazie alla compatibilità con i formati di scambio 3D standard e all'implementazione dell'editor Mod Tools attraverso il quale è possibile programmare i comportamenti degli oggetti che compongono la scena utilizzando i più diffusi linguaggi di programmazione come C++, C# e Javascript.

6.3. Tecniche di manipolazione e ottimizzazione dei Modelli 3D provenienti da software per la simulazione matematica

La generazione di terreni a partire dalle mappe di biforcazione ottenute simulando il circuito di Chua è una tecnica alla quale si è pensato per visualizzare e rendere fruibili in un'accezione sia matematica che estetica i risultati delle ricerche sul Caos.

Nell'ottica di sviluppare delle simulazioni interattive utilizzando Unity3D, i terreni sono stati generati utilizzando inizialmente il software ChuaExplorer per la creazione delle mappe di biforcazione salvate successivamente in formato raster. All'interno del programma è possibile agire su un set di dieci parametri, ovvero: Alpha, Beta, Gamma, A, B, K, E, X, Y e Z, in modo da variare le condizioni iniziali del sistema e impostare i range entro i quali sarà effettuata la simulazione. Il software consente di definire la risoluzione che la mappa di biforcazione avrà una volta terminate le operazioni di calcolo.

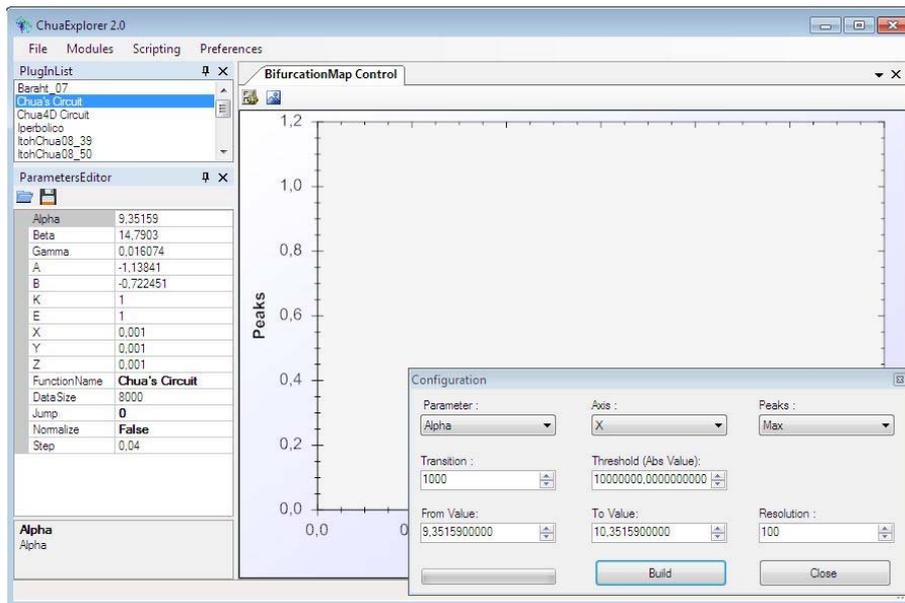


Fig. 24 L'interfaccia del software ChuaExplorer.

In questo modo è possibile ottenere una varietà pressoché infinita di mappe di biforcazione che è possibile salvare come immagini e delle quali si può modificare la risoluzione in base alle esigenze. Le immagini ottenute vengono salvate come bitmap in bianco e nero, per cui dovranno essere opportunamente manipolate in Photoshop per essere sfumate e ottenere una gamma maggiore di sfumature su scala di grigio, in questo modo i terreni generati avranno delle caratteristiche morfologiche più smussate e naturali. Una volta manipolate le immagini, esse potranno essere esportate in formato .RAW in modo da poter essere caricate in Unity3D per essere utilizzate come height-map.

Unity3D mette a disposizione dell'utente un potente strumento per la generazione di terreni che consente di generare griglie a risoluzione variabile delle quali è possibile modificare l'altezza dei singoli vertici semplicemente caricando un file immagine in formato .RAW. L'oggetto così ottenuto può essere ulteriormente manipolato per modificarne manualmente la topologia grazie ad un pennello interattivo. Lo strumento di generazione dei terreni fa in modo che l'oggetto così creato sia predisposto per l'applicazione di più livelli di texture in modo da potergli conferire un aspetto morfologicamente verosimile definendo, sempre grazie all'uso del pennello interattivo, diverse caratteristiche locali dei materiali. Per tanto, l'oggetto finale apparirà composto da zone erbose, rocciose, sabbiose etc. denotando le caratteristiche morfologiche di un terreno reale.

Il paesaggio può essere ulteriormente arricchito in quanto il modello generato in Unity3D viene dotato di strumenti di collisione che consentono di creare diversi tipi di vegetazione in maniera interattiva. È sufficiente caricare nel programma alcuni modelli di oggetti che andranno a comporre la vegetazione, ovvero alberi e piante, impostando i parametri di distribuzione per generare effetti di vegetazione gestibili sia in maniera automatica, sia utilizzando il pennello interattivo. Delle repliche di tali oggetti saranno disposte in corrispondenza delle altezze del terreno in relazione alle variazioni sulla rotazione e sulle dimensioni impostate in precedenza dando luogo ad un effetto di distribuzione casuale. Terminato tale processo, viene inserito un piano con texture

animate per simulare falde acquifere o il mare in caso di larghi spazi con altitudine sotto il livello del piano-acqua.



Fig. 25 Terreno generato in Unity3D partendo da una mappa di biforcazione.

In alternativa al caricamento in Unity3D, le mappe di biforcazione possono essere caricate all'interno di software specializzati nella generazione di terreni come Terragen. Questi software consentono di generare paesaggi con caratteristiche analoghe a quelli creati per la navigazione in tempo reale con Unity3D, aggiungendo maggiore dettaglio in modo da rendere la scena foto realistica. In questo caso si vanno a generare oggetti notevolmente più pesanti e definiti da poter essere utilizzati per il rendering foto realistico all'interno di motori come MentalRay, Maxwell Render o V-Ray, i quali sono integrati nella maggior parte dei software di modellazione più diffusi.

7. The genesis of Chua's circuit

Negli anni '60 alcuni scienziati pionieri nell'uso del calcolatore, lo sfruttarono per comprendere quale ruolo avessero le equazioni differenziali non-lineari nell'interpretazione dei fenomeni naturali e biologici. La scienza classica non è in grado di fornire risposte esatte al verificarsi di certi fenomeni in quanto le leggi che li regolano risultano essere troppo complessi, ecco perché, in taluni casi, si tende a trascurare alcuni aspetti della realtà che non possono essere previsti con esattezza. Questo è il motivo per il quale le irregolarità, che pure fanno parte integrante della natura, venivano relegate nella sfera del disordine.

Proprio in questi anni Edward N. Lorenz riuscì a descrivere con l'utilizzo del calcolatore, l'andamento dei fenomeni meteorologici attraverso l'implementazione di tre equazioni non-lineari semplificando drasticamente le equazioni di Navier-Stokes, usate in meccanica dei fluidi, al fine di trovare un sistema che permettesse di analizzare matematicamente i moti convettivi nell'atmosfera terrestre. Ciò che maggiormente emerge dal lavoro di Lorenz è il fatto che a piccole variazioni nelle condizioni iniziali corrispondono effetti inaspettati su larga scala, il noto effetto farfalla: *"Il battito delle ali di una farfalla in Brasile può scatenare un tornado in Texas"*.

Il problema della scoperta di Lorenz rimaneva l'assenza di strumenti fisici che la potessero confermare, per cui l'effetto farfalla rimase per molto tempo una pura astrazione matematica.

Bisognerà aspettare i primi anni '80 per avere una dimostrazione sperimentale delle equazioni di Lorenz realizzata dal Prof. Leon O. Chua, ingegnere elettronico dell'Università di Berkeley, il quale solo dopo diversi esperimenti non andati a buon fine svolti sia a Berkeley che Waseda, durante una notte del 1983 giunse alla soluzione che lo avrebbe portato alla realizzazione del primo circuito al mondo in grado di esibire comportamenti caotici.

La storia del circuito inizia nel 1983, anno in cui il Professor Chua, ospite presso l'università di Waseda (Tokyo) si convince del fatto che, partendo dalle equazioni di Lorenz e Rössler, può essere realizzato il primo oggetto fisico in grado di permettere di approfondire gli studi sulla teoria del Caos. Attualmente il circuito di Chua rappresenta uno strumento indispensabile per studiare numerosi aspetti fondamentali relativi alla teoria del Caos. Per questo motivo, esso è attualmente oggetto di studio negli ambienti di ricerca scientifica che hanno prodotto una nutrita letteratura relativa ad esso.

Prima del circuito di Chua era possibile studiare e comprendere i fenomeni caotici sotto un profilo puramente matematico e speculativo, pertanto persistevano ragionevoli dubbi sull'autenticità dei risultati ottenuti. Da qui la necessità di realizzare esperimenti reali con oggetti fisici e quindi di realizzare un circuito che fosse in grado di esibire il comportamento caotico di un sistema e al contempo permettesse di analizzare le condizioni che portano il sistema stesso in tale stato.

Il circuito di Chua rappresenta l'unico circuito fisico in cui la presenza del Caos è stata provata analiticamente. Esso è in grado di funzionare senza che vi siano segnali in ingresso. Il circuito si compone di tre elementi di accumulazione dell'energia, ovvero due condensatori passivi lineari, e un induttore passivo lineare. A questi elementi si vanno ad aggiungere un resistore passivo lineare e un resistore non lineare a due

terminali meglio noto come “Diodo di Chua”. Facendo variare il valore della resistenza negativa, il circuito è in grado di esibire una vastissima gamma di possibili dinamiche con una varietà di biforcazioni e di andamenti caotici.

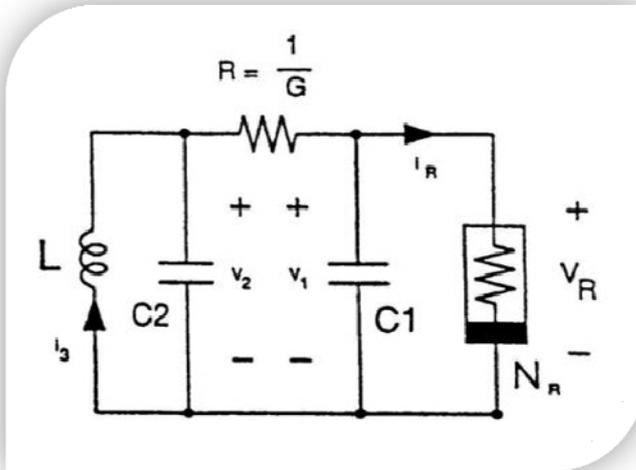


Fig. 26 Scema del circuito di Chua.

Al lavoro del Professor Chua è dedicata la realizzazione del video “The genesis of Chua’s circuit” il quale si presenta come un connubio tra divulgazione del sapere e utilizzo delle tecnologie della computer grafica al fine di migliorare il processo di apprendimento.

Nel film viene presentata una ricostruzione storica del contesto scientifico all’interno del quale, grazie all’invenzione del circuito di Chua, si è avuta la dimostrazione dell’esistenza del Caos non solo in quanto fenomeno matematico, ma anche fisico e sperimentale. I personaggi presenti nel video sono stati caratterizzati con voce ed espressioni emozionali e rappresentano personaggi del mondo scientifico che hanno rivestito un ruolo determinante nella storia della teoria del Caos come Poincaré, Lorenz, Julia, Chua e altri.

La colonna sonora del video è stata interamente costruita utilizzando composizioni musicali realizzate dall’ESG dell’Università della Calabria sfruttando sistemi generativi caotici, mentre, per quanto riguarda il parlato, è stata registrata un’unica traccia in lingua inglese sulla base della quale è stato impostato il lavoro di montaggio video. Grazie ad un software per l’elaborazione audio, la traccia è stata divisa in più parti ognuna delle quali relativa ad una scena del film. Successivamente le singole parti sono state ripulite e filtrate in modo tale da apportare le necessarie modifiche che caratterizzano i singoli personaggi. In seguito, il film è stato doppiato per essere fruibile anche in lingua italiana.

7.1. Fasi della realizzazione e descrizione tecniche utilizzate

Per la realizzazione del film sono stati necessari due anni di lavorazione nei quali il lavoro è stato suddiviso in più fasi. Buona parte del tempo è stato dedicato al lavoro di modellazione di personaggi e ambienti e alla realizzazione delle animazioni. A tale scopo sono stati utilizzati diversi software di modellazione e conversione dei modelli in modo da ottenere strutture facilmente gestibili all'interno di una scena 3D complessa. Vista la potenza di calcolo necessaria per portare a termine il lavoro di rendering finale, sono stati investigate le strategie per distribuire il processo su più macchine con architetture e sistemi operativi eterogenei collegate in rete, per la gestione delle quali, è stato messo a punto un sistema di controllo remoto delle macchine coinvolte che permettesse di controllarle e verificarne lo stato di operatività e l'avanzamento dei processi in qualsiasi momento anche da smartphone. Solo la fase di rendering ha richiesto più di un anno di lavoro. Di seguito sono riportate in dettaglio le varie fasi del lavoro che hanno portato alla realizzazione finale del film:

7.1.1. Modellazione dei personaggi

Parlando di modellazione 3D, possiamo individuare due distinte macroaree in base al genere di modello da realizzare:

- Modellazione organica – usata per realizzare modelli “naturali” quali possono essere: umanoidi, animali, vegetali, rocce etc. In questi casi i modelli devono essere altamente dettagliati e ricchi di particolari. Questo tipo di modellazione viene utilizzata anche nella progettazione di oggetti di design che dalle forme morbide e arrotondate.
- Modellazione geometrica - è un tipo di modellazione meno recente e viene utilizzata per realizzare oggetti tecnici o meccanici, o comunque per qualsiasi cosa di natura artificiale che non rientra nella categoria precedente. Generalmente la complessità dei modelli realizzati con questo genere di modellazione è molto inferiore rispetto a quella organica se si guarda all'aspetto esteriore delle singole forme, ma non se si considerano aspetti legati alla precisione e alla corrispondenza delle parti.

Uno stesso oggetto può essere realizzato ricorrendo contemporaneamente sia alla modellazione organica che a quella geometrica, oppure può essere formato da un insieme di parti contenenti sia modelli organici che geometrici. Basti pensare ad un avatar con occhiali in cui il modello umanoide viene realizzato tramite modellazione organica, mentre gli occhiali vengono realizzati geometricamente. Un modello 3D è tanto più verosimile quanto più è ricco di particolari, i quali inevitabilmente vanno ad aumentare considerevolmente la quantità di poligoni da cui il modello è composto. Ciò può intaccare le performance del programma di modellazione fino a rendere ingestibile l'intera scena su computer non sufficientemente potenti e può voler dire che il modello, reso troppo pesante a causa dei particolari aggiunti, non può essere in alcun modo utilizzato per la creazione di un'applicazione real-time.

Tuttavia, è possibile alleggerire il modello mantenendone le caratteristiche topologiche sfruttando opportunamente alcune tecniche che consentono la rimozione automatica o manuale di poligoni inutili o ridondanti. La riduzione poligonale può essere effettuata sia basandosi sulla trasformazione di poligoni triangolari in poligoni quadrangolari, sia sulla fusione di punti aventi le medesime coordinate spaziali evitando così ridondanze di informazioni all'interno della struttura. Esistono anche algoritmi in grado di eseguire l'eliminazione automatica dei vertici all'interno di una certo range di distanze, in questo modo si ottiene un'approssimazione con minor dettaglio dell'oggetto originale, che però risulta estremamente più facile da gestire all'interno della scena.

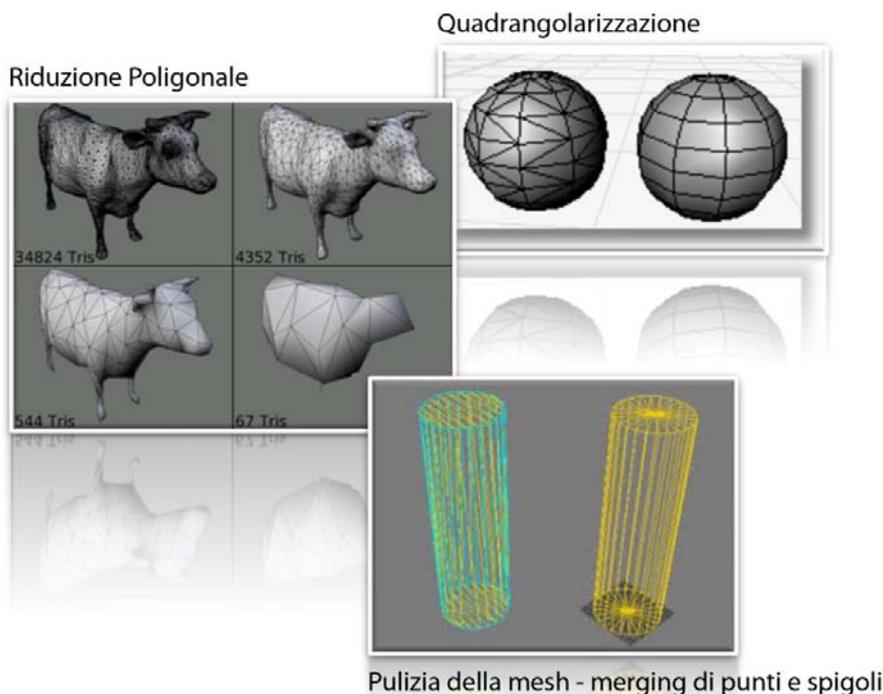


Fig. 27 Esempi di riduzione poligonale.

Nella fase iniziale sono stati modellati gli avatar dei personaggi partendo da fotografie e da materiale reperito nella rete. La difficoltà maggiore è stata rappresentata dalla mancanza di immagini da profili diversi in modo da eseguire una ricostruzione maggiormente accurata. I personaggi antropomorfi che compaiono nel video “The genesis of Chua's circuit” sono stati modellati tenendo conto dei parametri e delle impostazioni necessari alla successiva animazione tramite rigging e shape animation. I modelli di partenza sono ottenuti partendo da poliedri semplici che vengono successivamente modificati andando ad aggiungere particolari fino ad approssimare il più possibile le caratteristiche fisiche degli oggetti di scena e dei personaggi. Gli strumenti usati per aggiungere dettaglio ad un modello 3D sono pressoché identici in qualsiasi software di modellazione. Essi si basano su operazioni trigonometriche che consentono di spostare le entità dalle quali l'oggetto è composto nello spazio attraverso operazioni che hanno effetti sui singoli vertici o su gruppi di essi, oppure su operazioni booleane su più oggetti. Per fare un esempio pratico di sottrazione booleana su oggetti 3D è sufficiente pensare a voler fare un buco in parallelepipedo: in questo caso sarà

sufficiente prendere l'oggetto-parallelepipedo, sovrapporvi un oggetto-cilindro come a simulare la punta di un trapano ed applicare la trasformazione in modo da ottenere un oggetto complesso partendo da due primitive solide. Parliamo, in questo caso, di "CSG" (Constructive Solid Geometry), la quale combina primitive solide (cubi, sfere, cilindri etc.) per formare oggetti complessi tramite operazioni booleane.

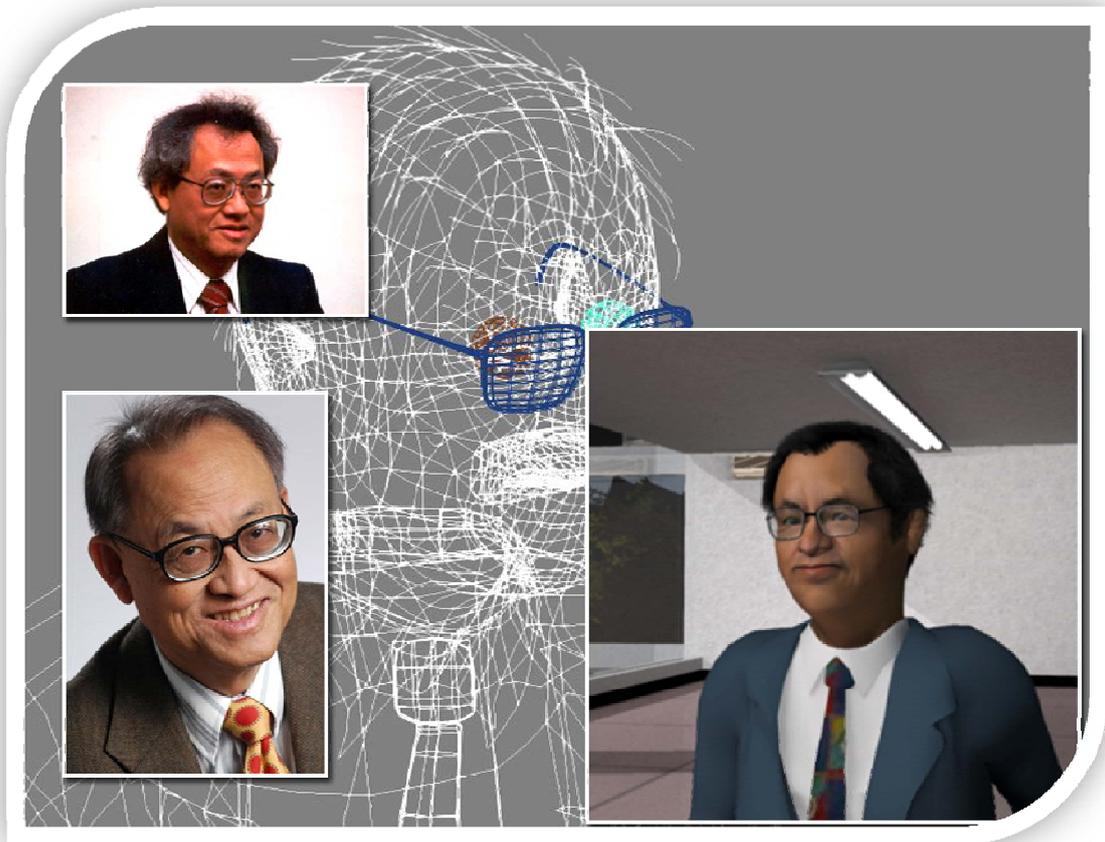


Fig. 28 Ricostruzione dell'avatar del Professor Chua da fotografie.

La risoluzione dei modelli, che rimane tuttavia relativamente bassa, viene incrementata successivamente per mezzo delle subdivision-surfaces delle B-spline di Catmull Clark, le quali furono sviluppate da E. Catmull e J. Clark nel 1978. Questa tecnica fu utilizzata per la prima volta nell'ambito della Computer grafica 3D dalla Pixar nel film di animazione *Geri's Game*, del 1989. Le subdivision-surfaces sono uno strumento di modellazione molto versatile e potente, adatto soprattutto a realizzare modelli organici in quanto congiungono le migliori caratteristiche della modellazione poligonale e della modellazione NURBS (acronimo di Non-Uniform Rational B-Splines); come le superfici NURBS, esse sono smussate e prive di sfaccettature, ma possono gestite con la stessa praticità delle superfici poligonali. Uno dei migliori sistemi per iniziare la modellazione con le superfici di suddivisione è proprio quello di convertire un modello poligonale, l'unico requisito importante è che la mesh da convertire sia il più semplice possibile, formata cioè da un basso numero di poligoni, questo perché non servono molti poligoni per realizzare delle superfici di suddivisione

perfette. I volumi descritti dai modelli poligonali che vengono convertiti in subdivision-surfaces devono essere chiusi, ovvero, deve esistere soluzione di continuità tra tutti i poligoni che compongono l'oggetto. In presenza di volumi aperti, il contorno della mesh rimane invariato laddove i poligoni non sono continui.

Il passaggio da una superficie poligonale a una subdivision-surface è interattivo, e questo vale anche per il processo inverso. Fondamentalmente le superfici di suddivisione utilizzano le stesse tecniche di modellazione impiegate per le mesh poligonali, con qualche distinguo e con molte più possibilità, come, per esempio, poter assegnare un maggiore o minore "peso" a ciascun punto della superficie.

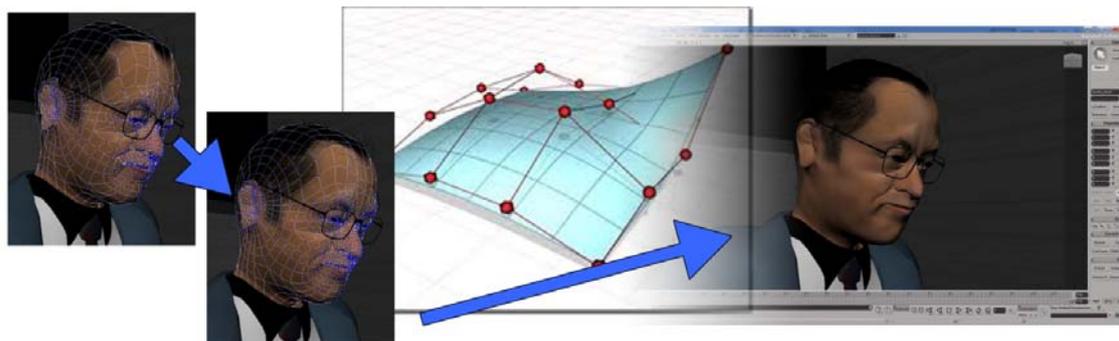


Fig. 29 Modellazione 3D con Subdivision-surfaces.

Per la generazione di capelli e barbe è stato applicato alle superfici interessate un generatore di fibre, il quale consente un'ottima gestione di queste ultime utilizzando delle linee guida che fanno in modo che la scena tridimensionale non diventi troppo pesante da gestire in fase di modellazione e animazione. La tecnica consiste nel creare un set di linee guida sulle quali, in fase di rendering, verranno applicati gli algoritmi per la generazione di fibre. In questo modo è possibile persino animare le linee in modo semplice tramite shape-animation ed ottenere l'effetto del movimento delle ciocche. Deformando le linee guida è possibile gestire in maniera agevole acconciature e proprietà dei capelli. È possibile eseguire una preview in modo da avere l'idea di come le fibre appariranno una volta che la scena sarà renderizzata.

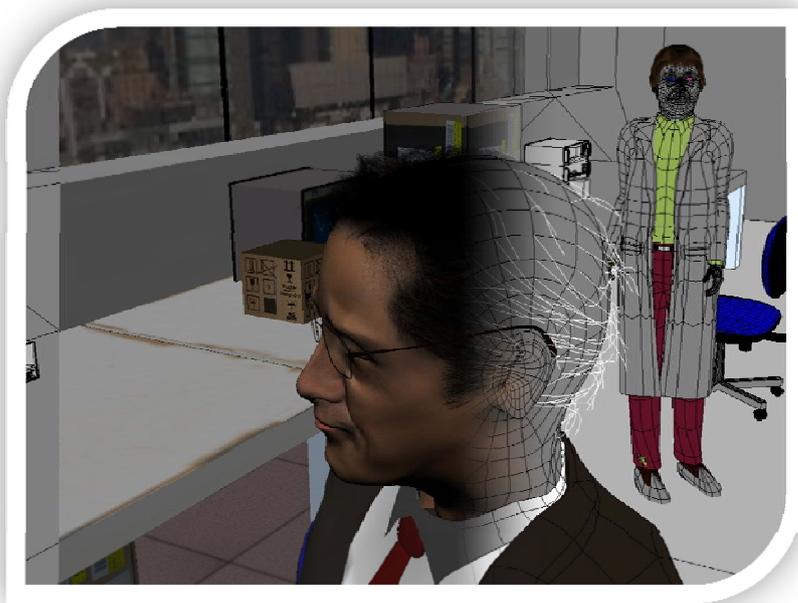


Fig. 30 I capelli dei personaggi realizzati con l'uso di guide-lines.

Lo strumento di creazione delle fibre consente di gestire la densità, le caratteristiche cromatiche e l'andamento delle curve dalle quali le fibre vengono generate in modo da poter utilizzare sia degli shader predefiniti, o di applicare parametri personalizzati a seconda dell'effetto che si vuole ottenere. Grazie all'uso di un pennello interattivo, è possibile gestire le traiettorie delle singole fibre o di interi gruppi. Ciò ha reso possibile la caratterizzazione degli avatar in base alle pettinature prese a modello dalle fotografie dei personaggi reali.

7.1.2. Definizione dei materiali e creazione delle textures

Durante la fase di modellazione, si procede all'operazione di Surfacing, ovvero alla suddivisione del modello 3D in aree alle quali saranno successivamente applicate caratteristiche diverse in base ai materiali. In questa fase vengono solo definite le caratteristiche basilari dei materiali suddividendo l'intera superficie del modello in clusters in modo da poter successivamente gestire i singoli materiali tramite un apposito editor. I materiali vanno dai più semplici, per i quali è stato sufficiente definire il colore di diffusione, di reazione alla luce ambientale e le caratteristiche speculari, a quelli con caratteristiche peculiari come trasparenza, riflessione, rifrazione e incandescenza.

La definizione dei materiali avviene attraverso un apposito editor all'interno del quale è possibile creare una libreria di materiali personalizzati da applicare successivamente anche su oggetti diversi. All'interno dell'editor, si possono creare le più disparate caratteristiche fotometriche tramite un'interfaccia che fa uso di building-blocks. Ogni building-block è deputato a simulare determinate caratteristiche in base ai parametri inseriti dall'utente. Collegando insieme diversi building-blocks, è possibile simulare le caratteristiche fotometriche anche dei materiali complessi.

Per realizzare superfici trasparenti come finestre o vetri di occhiali, è necessario impostare diversi parametri tra cui: colore, coefficiente di specularità, intensità del

riflesso, coefficiente di trasparenza, indice di rifrazione etc. in base alle caratteristiche ottiche reali del materiale che bisogna simulare. I valori relativi alle caratteristiche dei materiali sono facilmente reperibili in rete, per cui non risulta particolarmente complicato ricreare effetti di illuminazione verosimili degli oggetti virtuali. Per alcuni materiali sono state usate tecniche di bump-mapping e aggiunte caratteristiche di ambient occlusion, in modo da ricreare le cosiddette "ombre di contatto", ovvero le zone più scure nei punti in cui vi è il contatto tra due oggetti.

L'ambient occlusion è un metodo di shading che contribuisce ad aumentare il realismo dei modelli di riflessione locali tenendo conto dell'attenuazione luminosa in prossimità di volumi chiusi. Solitamente l'ambient occlusion viene calcolata tracciando raggi in ogni direzione dalla superficie. I raggi che raggiungono lo sfondo o il "cielo" aumentano la luminosità della superficie, mentre quelli che intercettano un altro oggetto non aggiungono alcuna illuminazione. Di conseguenza i punti circondati da molte altre geometrie vengono renderizzati in ombra, mentre i punti più liberi da ingombri risultano più chiari.

Il bump-mapping viene utilizzato quando si vuole ricreare una superficie resa irregolare dalla presenza di rugosità e asperità. Questa tecnica risulta particolarmente utile nel momento in cui è necessario arricchire l'oggetto con particolari increspature senza andarne ad appesantirne la struttura. Per ottenere l'effetto desiderato sarà sufficiente caricare in un apposito building-block un'immagine, in genere in toni di grigio, e applicarla all'oggetto non come texture, ma come bump-map. Questo particolare shader fa in modo che gli angoli con cui le normali dei raggi di luce riflessi dall'oggetto vengano modificati localmente in base all'intensità dei pixel dell'immagine utilizzata, permettendo di ottenere con un artificio l'effetto di increspatura della superficie.

Le textures utilizzate sono sia semplici bitmap che textures procedurali. Nel primo caso vengono utilizzate delle immagini ad alta risoluzione reperite in rete o tramite macchina fotografica e opportunamente modificate in Photoshop. Le textures procedurali sono differenti dalle precedenti in quanto sono frutto di operazione matematiche e possono essere ottenute in maniera analoga ai pattern generati con equazioni non lineari. Le immagini così ottenute potranno essere animate modificando i parametri temporali di generazione e risulteranno estremamente più leggere da gestire all'interno della scena 3D rispetto alle immagini raster. Un esempio pratico riguardante l'utilizzo di textures procedurali all'interno del film è dato dal corso d'acqua all'interno del giardino di Waseda, al quale sono state applicate textures procedurali sia per simularne la variazione di colore dovuta al movimento dell'acqua, sia per simulare le increspature dinamiche servendosi della texture animata come displacement-map.

La procedura di applicazione dipende dalla complessità e dalla topologia dell'oggetto. Nel caso di oggetti geometrici come quelli che fanno parte degli arredamenti, è sufficiente applicare proiezioni planari, cubiche, cilindriche o sferiche. La proiezione delle textures sull'oggetto può essere facilmente modificata utilizzando appositi strumenti di controllo detti "gizmo", i quali prendono la forma dal tipo di proiezione che si intende applicare e possono essere deformati come un qualsiasi altro oggetto 3D presente nella scena in modo da poter ottenere la proiezione desiderata.

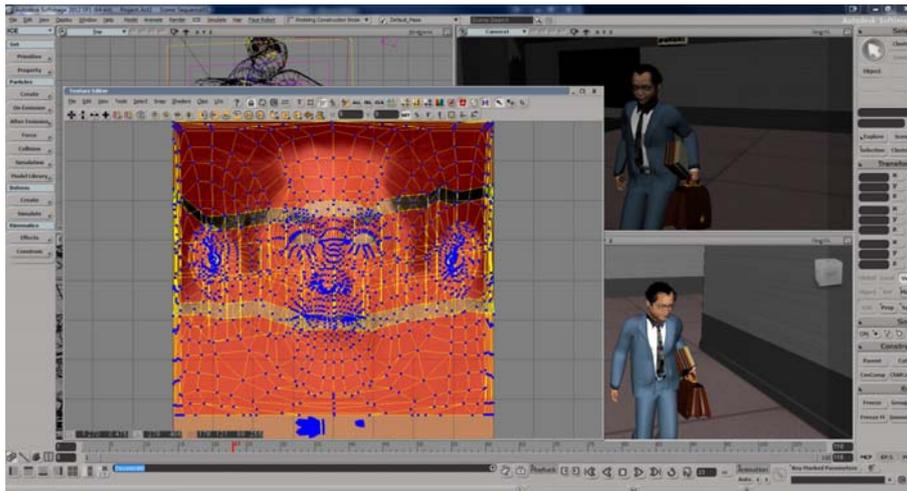


Fig. 31 Applicazione della texture del volto di Chua tramite UVmapping.

Quando si ha a che fare con modelli organici ci si trova davanti a mesh complesse e irregolari, è quindi necessario procedere con mappature UV in modo da collegare localmente i punti dell'immagine a quelli della mesh e poterne modificare l'andamento nei particolari. I programmi di modellazione consentono di ottenere degli esplosi del modello che si possono utilizzare per disegnare le textures. In pratica, se abbiamo bisogno di creare una texture per la faccia di un personaggio, non dobbiamo fare altro che ricorrere allo strumento di UV-mapping del software di modellazione, il quale provvederà a "spalmare" il modello 3D su una superficie bidimensionale. L'immagine così ottenuta può essere usata in Photoshop per disegnare o modificare la texture in base all'effetto che si vuole ottenere. È valido anche il procedimento inverso, attraverso il quale è possibile spostare i singoli punti della mesh esplosa sulla texture facendo opportunamente combaciare la struttura con l'immagine.

7.1.3. Creazione delle strutture scheletriche dei personaggi e delle shapes-animations

I modelli fin ora descritti, compresi i personaggi, sono dei semplici oggetti statici che possono essere liberamente disposti all'interno di una scena 3D. Prima di poter fare in modo che i personaggi siano animabili, ad essi va associato un complesso sistema di articolazioni tramite la fase cosiddetta di rigging, nella quale vengono creati gli oggetti che formeranno una struttura scheletrica, per tanto, questi oggetti saranno imparentati tra loro con opportuni vincoli cinematici, diretti e inversi, volti a simulare il comportamento di un reale scheletro umano. Gli oggetti che compongono la struttura scheletrica prendono per questo motivo il nome di "bones".

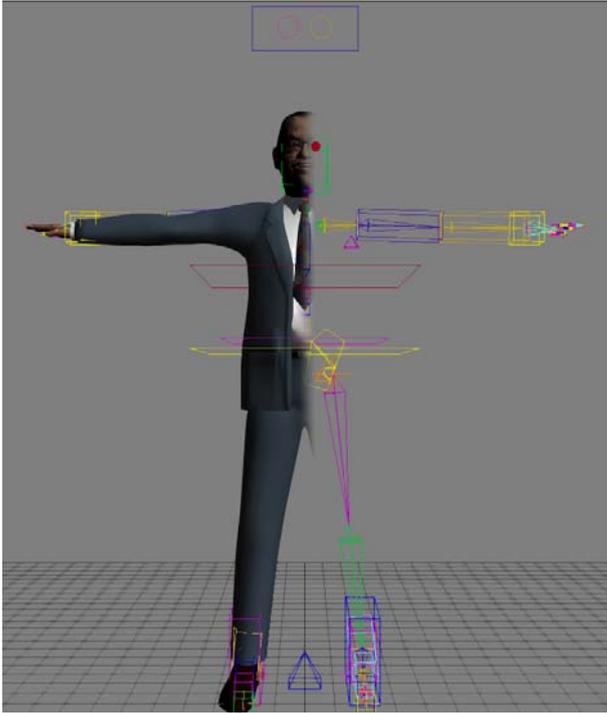


Fig. 32 Rig del modello antropomorfo.

Parliamo di vincoli cinematici diretti quando un singolo elemento può essere spostato o ruotato causando lo spostamento dei punti del modello da esso dipendenti. Tale struttura può essere creata sfruttando semplici vincoli gerarchici, come avviene nel caso del braccio dove muovendo l'omero vengono spostate tutte le ossa dell'avambraccio e della mano. In casi particolari, come avviene per le gambe, spesso volte è necessario che i piedi restino attaccati al terreno mentre il baricentro del personaggio si abbassa causando una flessione delle ginocchia. Per simulare questo tipo di comportamento, è necessario ricorrere a vincoli di cinematica inversa nei quali, gli oggetti che compongono lo scheletro della gamba siano gerarchicamente vincolati tra di loro, così come avviene nelle catene cinematiche dirette, ma in questo caso

l'oggetto con il quale la catena termina, ovvero il piede, è vincolato, oltre che all'oggetto tibia, ad un oggetto di controllo che gli consente di essere spostato e di causare ripercussioni sull'intera catena. In questo modo, avvicinando l'oggetto di controllo al corpo o viceversa, otterremo la flessione della gamba che verrà invece stesa allontanando l'oggetto di controllo dal corpo.

Per ottenere i corretti comportamenti della struttura, è necessario definire dei vincoli di spostamento o rotazione dei singoli componenti. Per fare un esempio pratico, dobbiamo fare in modo che una tibia ruoti su un singolo asse e che la sua rotazione sia limitata entro un certo angolo che le impedisca di sovrapporsi al femore ruotando indietro, o di ruotare in avanti oltre l'asse perpendicolare del femore.

In casi particolari, per esempio per l'animazione di una mano si devono controllare circa venti ossa, per cui sono stati impiegati alcuni script in modo da rendere gruppi di oggetti come quello della mano parametricamente legati ad altri al fine di simulare la rotazione simultanea delle dita. Link cinematici sono usati anche per gli occhi: i modelli sferici di questi ultimi vengono messi in gerarchia all'oggetto che pilota la testa del modello e contemporaneamente il loro orientamento viene vincolato a degli oggetti "null", ovvero oggetti privi di dimensioni, in modo da poter puntare lo sguardo al semplice spostamento di questi oggetti.

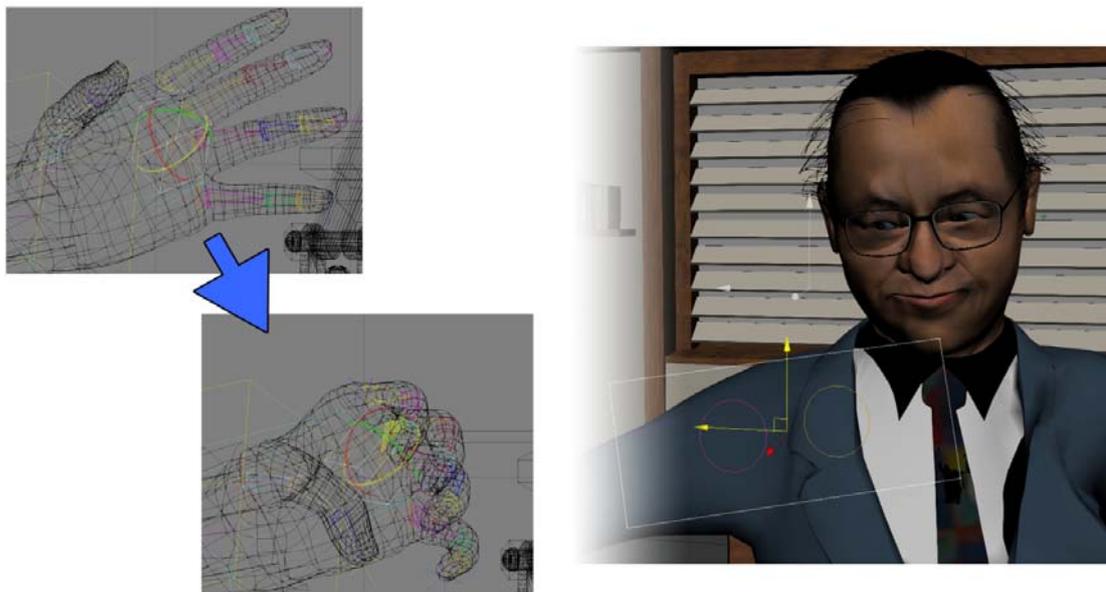


Fig. 33 Azione sull'oggetto di controllo delle dita e sui target degli occhi.

Le parti dell'ossatura vengono animate inserendo dei key-frames (fotogrammi chiave) nella time-line del software di animazione 3D. l'utilizzo dei key-frame consente di animare il modello definendo le trasformazioni spaziali solo in alcuni punti della time-line. Successivamente, il software provvederà a creare il movimento interpolando la posizione tra il primo e il secondo key-frame creato. Per fare un esempio, se vogliamo che il modello alzi un braccio in un secondo, avendo impostato la time-line ad una frequenza di 30 frames per secondo, sarà sufficiente impostare un key-frame al frame 1 in cui il modello ha il braccio abbassato e uno al frame 30 in cui il braccio è alzato. I movimenti così creati possono essere successivamente visualizzati sotto forma di curve, dette f-curves o curve-funzione, delle quali è possibile definire la tipologia di interpolazione, generalmente lineare o esponenziale, in base al tipo di movimento che vogliamo realizzare.

Lo scheletro così creato è provvisto di un modello di associazione alle strutture ossee utilizzate per il motion capture, per cui diventa possibile caricare animazioni eseguite da un attore reale e registrate in opportuni files di testo in formato Biovision Hierarchy (.BVH). Il file così caricato, associa allo scheletro del modello un set di key-frames attraverso i vengono riprodotti i movimenti registrati dall'attore. Una volta impostato lo scheletro per l'associazione con il modello di animazione .BVH, è possibile modificare le animazioni caricate in base alle specifiche esigenze utilizzando l'editor di curve del programma di animazione. Nei casi di animazioni comuni, come per le camminate, è stato possibile caricare dei motion capture preconfezionati opportunamente modificati in base alle scene. In casi di animazioni più particolari non è stato possibile utilizzare questa tecnica, per cui è stato necessario ricorrere all'animazione manuale dei personaggi con risultati più che apprezzabili anche se non così fluidi e naturali come quelli che si ottengono con la tecnica descritta.

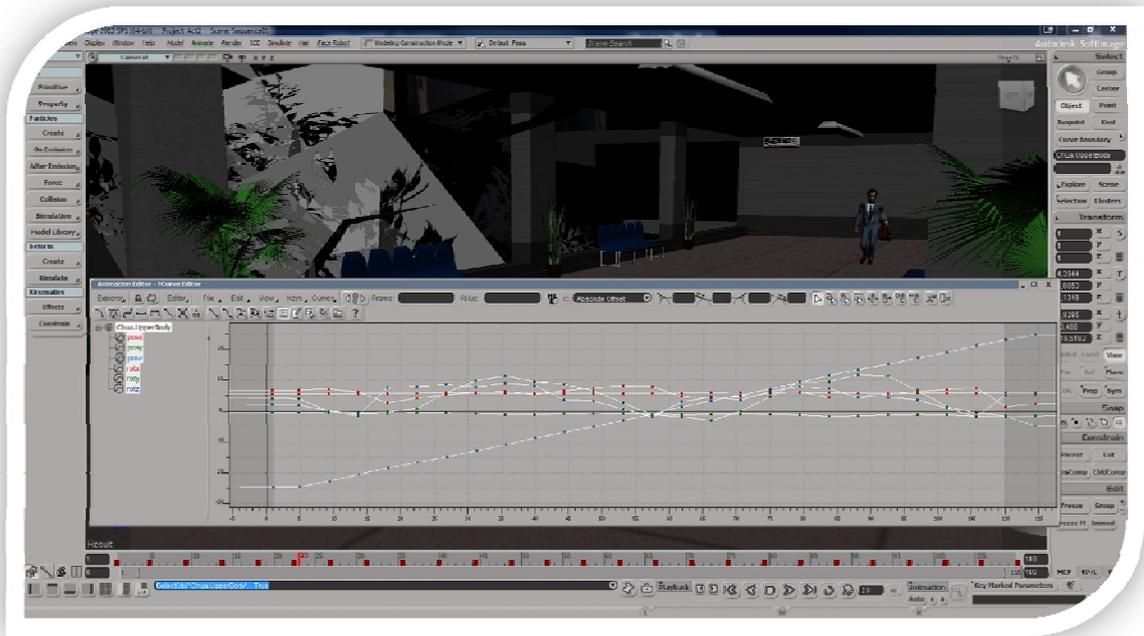


Fig. 34 Visualizzazione delle f-curves dell'animazione di una parte dello scheletro.

La fase successiva alla creazione dello scheletro è lo skinning che consiste nell'associazione di parti della mesh alle singole bones secondo una mappa di influenza che lo scheletro avrà sui diversi punti che compongono il modello tridimensionale, la cosiddetta weight-map. Generalmente i programmi di animazione sono provvisti di strumenti che consentono la creazione automatica delle weight-map in base alla prossimità dell'oggetto-osso ai punti della mesh che però necessita di interventi manuali locali al fine di aumentare, diminuire o sfumare le varie aree di influenza, come avviene nel caso delle articolazioni degli arti e delle dita.

Per l'animazione facciale sono state usate tecniche di shape animation attraverso le quali è possibile deformare un modello tridimensionale in modo da ottenere diversi stati della mesh. attraverso il morphing questi stati vengono opportunamente interpolati in modo da ottenere le espressioni facciali necessarie per la sincronizzazione labiale e per conferire ai personaggi le espressioni emozionali.



Fig. 35 Stati differenti della mesh, utilizzati per le espressioni facciali.

Ognuno dei personaggi è dotato di una decina di stati differenti della mesh in modo da avere un set di espressioni per simulare i movimenti della bocca e del volto durante il parlato. Gli stati vengono creati partendo dal modello di base che viene deformato per simulare la pronuncia di un fonema o un'espressione emozionale. Successivamente essi vengono caricati in un apposito mixer che consente di interpolarli ottenendo come risultato finale un set pressoché infinito di espressioni.

Dopo aver caricato le tracce audio nella time-line del software di animazione 3D, è possibile impostare i key-frame corrispondenti alla pronuncia dei fonemi ottenendo così la sincronizzazione dell'animazione facciale con la traccia audio.

7.1.4. Realizzazione degli ambienti

Per la realizzazione delle ambientazioni è stato necessario adottare diverse tecniche e usare differenti software secondo le particolari necessità. Alcune riprese fanno riferimento a località reali, per cui è stata condotta una ricerca al fine di reperire gli opportuni riferimenti come mappe, fotografie e, la dove possibile, bozze di modelli 3D di edifici in modo da realizzare modelli verosimili sia nell'aspetto che nelle proporzioni. In questo modo sono state realizzate delle riproduzioni sufficientemente fedeli agli ambienti reali in cui le vicende narrate si sono svolte.

Le ambientazioni in cui si svolgono le scene del video "The genesis of Chua's circuit" sono quelle dell'Università di Waseda, Tokyo e quelle dell'Università di Berkeley, ovvero località realmente esistenti, per tanto, è stato necessario reperire tutte le informazioni necessarie per riprodurre i modelli 3D di queste ultime. In primo luogo sono scaricate le foto satellitari sia da Google Maps che da Bing Maps. Grazie alle viste ravvicinate, è stato possibile utilizzare le foto come textures per i modelli 3D dopo un'opportuna elaborazione. Alla base del lavoro di ricostruzione effettuato ci sono le tecniche di Image-Based 3D Modeling. Per facilitare il compito nella modellazione dei

complessi che formano le due ambientazioni in questione si è rivelato estremamente utile lo strumento Google 3D Warehouse il quale consiste in un database perennemente in crescita all'interno del quale vengono salvate e costantemente aggiornate le ricostruzioni 3D di edifici per lo più modellati in Google SketchUp o utilizzando lo strumento Building Maker di Google Earth, tramite il quale si ha la possibilità di creare modelli semplici degli edifici utilizzando le foto satellitari come riferimento e metterli a disposizione degli altri utenti che possono sia scaricarli gratuitamente in formato Collada (.DAE) o SketchUp (.SKP), sia visualizzarli in Google Earth. Tali modelli vengono, dopo opportune conversioni, caricati all'interno del software di modellazione 3D Autodesk Softimage grazie al quale si procede alla rifinitura del modello, dei materiali e delle textures. La vegetazione è stata ottenuta tramite la manipolazione di modelli procedurali usati per modellare i tronchi degli alberi, sui quali vengono creati degli oggetti triangolari a cui è sono applicate delle textures con canale alpha per simulare il colore e la forma delle foglie.

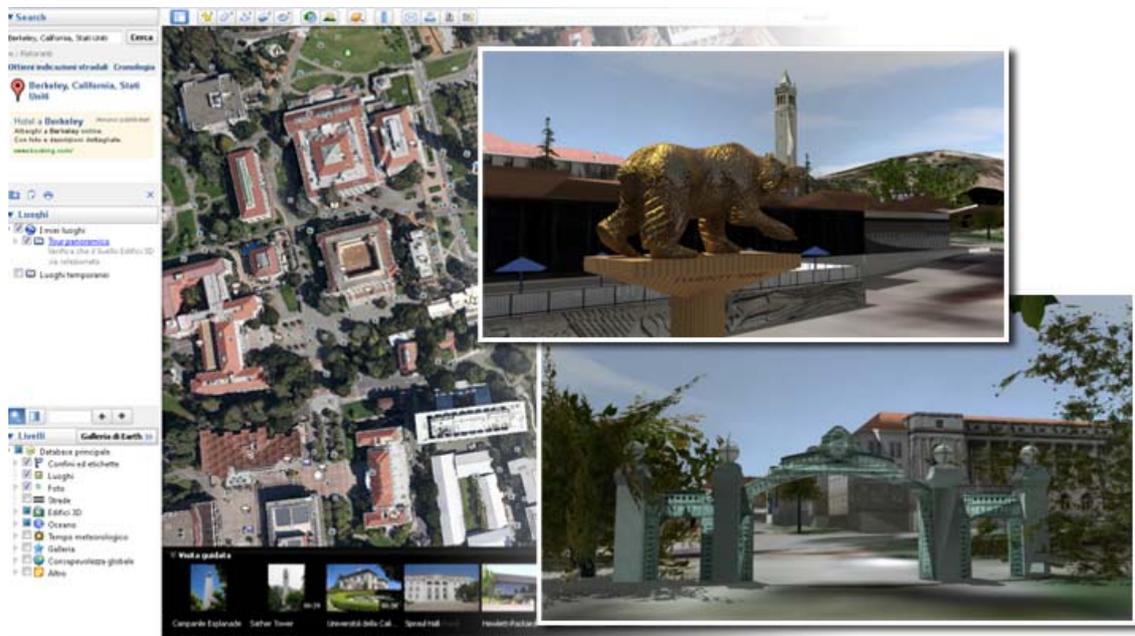


Fig. 36 Ricostruzione dell'esterno dell'università di Berkeley.

Per quanto riguarda le ambientazioni al chiuso, gli unici riferimenti a disposizione sono le descrizioni riportate nella sceneggiatura, per cui è stato necessario fare un'analisi preliminare per definire l'arredamento e, di conseguenza, definire una lista degli oggetti 3D da modellare e inserire nelle scene. In molti casi, soprattutto nel caso di modelli raffiguranti oggetti di uso comune, è stato possibile reperire modelli 3D da siti tematici come Turbosquid (www.turbosquid.com) o Exchange3D (www.exchange3d.com) i quali mettono a disposizione grandi quantità di modelli scaricabili gratuitamente. La modellazione degli interni è stata più semplice dal punto di vista tecnico, ma ha occupato molto tempo per la realizzazione della considerevole quantità di oggetti, apparecchiature e dettagli presenti. Per la creazione dei modelli si è preferito non ricorrere a tecniche di constructive solid geometry basata su operazioni booleane, privilegiando metodi di rifinitura progressiva dei modelli tramite costruzione per estrusione e rivoluzione semplici e avanzate delle primitive.

Dalle forme caotiche è possibile trarre ispirazione per la progettazione di edifici, ne è esempio il modello in figura il quale propone un edificio che richiama nelle sue forme l'insieme di Mandelbrot.

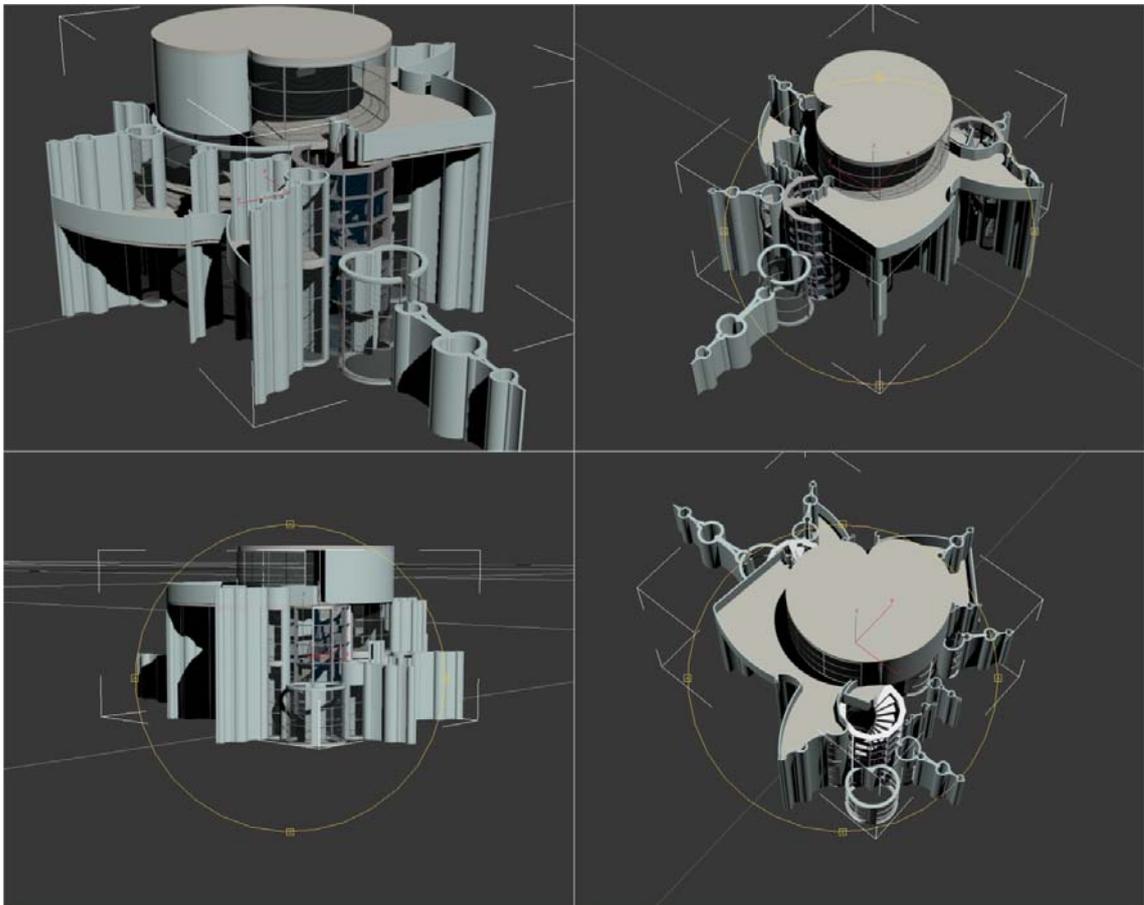


Fig. 37 Edificio realizzato ispirandosi al pattern di Mandelbrot.

L'ormai celebre immagine, utilizzata per descrivere le caratteristiche dei frattali e considerata una delle forme più complesse esistenti in natura, è stata presa a modello per creare edifici che ne richiamassero le caratteristiche estetiche e matematiche. È possibile osservare come le parti della struttura si ripropongano in scala differente assumendo diverse funzioni. Il modello è stato realizzato tracciando inizialmente dei profili basati sull'immagine dell'insieme di Mandelbrot e successivamente è stato impiegato il software Archicad per estrarne i profili e inserire componenti funzionali quali vetrate e scale. La resa finale è stata ottenuta esportando il modello all'interno di 3DStudioMax e Softimage con i quali sono state definite le caratteristiche dei materiali, l'illuminazione e le viste per i rendering finali.

7.1.5. Definizione delle simulazioni fisiche per l'animazione di tessuti e particelle

In alcune inquadrature è stato necessario impiegare effetti particellari. In particolare, sono stati creati degli oggetti in grado di emettere particelle programmabili

che possono rispondere ad algoritmi fisici. Nelle inquadrature in cui viene ripreso Cantor, per esempio, egli appare immerso in una coltre di polvere. Per generare effetti particellari all'interno di una scena 3D è necessario creare un oggetto di qualsiasi genere, anche un oggetto null, ovvero un oggetto aventi dimensioni uguali a zero, e utilizzare quest'ultimo come emettitore di particelle. Nel caso della polvere di Cantor, essa è stata ottenuta inserendo nella scena un cilindro invisibile alla telecamera al quale sono state attribuite proprietà di emissione particellare. L'emissione viene regolata da diversi parametri, è quindi possibile gestire le dimensioni, la quantità, la vita e tutte le altre caratteristiche che il comportamento particellare dovrà avere durante la simulazione.

La realizzazione di questi effetti è stata resa possibile dall'utilizzo di un potente modulo di Softimage, ovvero ICE (Interactive Creative Environment) il quale permette di programmare le emissioni particellari e molto altro in maniera piuttosto intuitiva grazie all'utilizzo di un'interfaccia che fa largo uso di building-blocks.

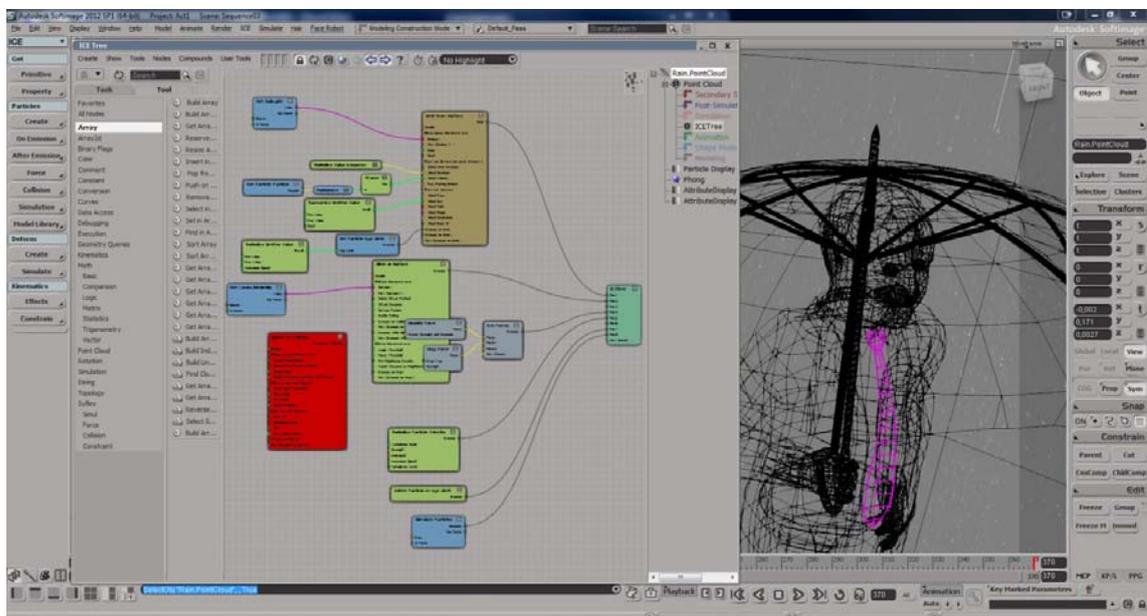


Fig. 38 Simulazione della pioggia realizzata con il modulo ICE di Softimage.

Una volta definite le caratteristiche dell'emissione particellare nella scena sono state inserite forze fisiche per la simulazione del vento e della gravità in grado di influenzare l'evoluzione temporale della simulazione. Grazie alla simulazione particellare è stato possibile ricreare anche la pioggia nelle inquadrature in cui compare Lorenz e in alcune inquadrature all'esterno dell'università di Waseda. Rispetto al caso della polvere, per la pioggia viene cambiato, oltre al materiale delle particelle, il modo in cui queste reagiscono alla gravità e vengono aggiunte le collisioni con l'oggetto ombrello. Al verificarsi della collisione, le particelle sono programmate per scivolare sulla superficie dell'ombrello fondendosi grazie alle proprietà delle blob-particles al fine di simulare il comportamento reale delle gocce d'acqua. Per rendere ancora più realistico l'effetto pioggia, alle particelle è stata conferita la proprietà di spawning, ovvero la capacità di emettere nuove particelle con caratteristiche leggermente diverse dalle generatrici al verificarsi dell'impatto con l'ostacolo. In maniera analoga sono stati riprodotti gli effetti atmosferici nelle riprese all'esterno dell'università di Waseda.

Riguardo all'abbigliamento, solo dove necessario, alcune parti della mesh sono state animate mediante clothing, tecnica più realistica che tiene conto delle forze fisiche di vento e gravità che è possibile aggiungere alla scena e delle caratteristiche fisiche come tensione, viscosità e massa del tessuto. La simulazione fisica dei tessuti può essere integrata con la collisione con altri oggetti per conferire maggior realismo all'animazione, con relativo aumento dei tempi di calcolo necessari. L'animazione tramite clothing è stata utile per ottenere tramite simulazione fisica delle deformazioni realistiche di alcune parti dei vestiti, come le cravatte, in seguito al movimento dell'avatar e all'interazione con gli oggetti e le forze inserite nella scena.

7.1.6. Illuminazione delle scene e Rendering distribuito su architetture eterogenee

I modelli di illuminazione variano considerevolmente a seconda dell'ambiente e dell'atmosfera che si vuole creare. Per ogni singolo ambiente sono state utilizzate fonti luminose con caratteristiche particolari a seconda dell'effetto finale desiderato. Il numero dei parametri che intervengono in questa fase è molto elevato, infatti, bisogna considerare il tipo e il numero di luci, le loro caratteristiche e il modo in cui i materiali reagiscono all'esposizione luminosa. In ogni ambiente, sono state inserite più luci atte a simulare reali condizioni di illuminazione. I software di modellazione 3D offrono la possibilità di inserire nelle scene diverse tipologie di luce in base all'atmosfera che si vuole riprodurre. Possiamo distinguere tra differenti tipologie di luce, tra le quali le più importanti sono:

- **Luce di tipo “distant” o “infinite”** - è un tipo di luce con intensità uniforme la cui sorgente è un piano infinito che emette raggi i quali seguono un percorso parallelo relativo all'orientamento del piano-sorgente. Questo tipo di luce è prevalentemente utilizzata nelle ambientazioni all'esterno per simulare sorgenti luminose poste a grande distanza come il sole.
- **Luce di tipo “point”** - viene emessa da una sorgente puntiforme che emana raggi in tutte le direzioni e viene utilizzata per riprodurre le luci delle lampade da interno. In questo caso, l'intensità della luce può essere impostata in modo tale da diminuire con la distanza in base alla potenza della sorgente luminosa.
- **Luce di tipo “spot”** - è assimilabile al funzionamento di un faro in quanto la sorgente è puntiforme, ma emette luce concentrata in un fascio compreso in un certo angolo. Questo tipo di luce può essere utilizzato per riprodurre luci direzionabili come quella emessa da una lampada da tavolo, oppure, insieme a particolari algoritmi che simulano gli effetti volumetrici dei fasci di luce, per simulare i fasci proiettati dai fari di un'automobile.

Ognuna delle macro-categorie elencate comprende delle varianti da utilizzare in casi particolari come la riproduzione delle luci a neon, della luce emessa da un display o

da una finestra. In questi casi viene inserita una particolare luce di tipo “point” detta “area-light” alla quale viene collegato un oggetto che funge da superficie di diffusione.

Per la resa finale del filmato, sono stati applicati algoritmi di global illumination. Questi algoritmi vengono utilizzati per riprodurre il reale fenomeno di illuminazione e agiscono tenendo conto dei fotoni emessi dalle diverse sorgenti luminose calcolandone i rimbalzi e le componenti cromatiche riflesse impattando sugli oggetti che compongono la scena.

La fase di rendering di una scena 3D è una delle operazioni più onerose dal punto di vista del carico di operazioni che si possa richiedere ad un calcolatore. Essa non è altro che una simulazione fisicamente esatta di come la luce interagisce con le caratteristiche fisiche dei materiali di cui sono composti gli oggetti tridimensionali presenti nella scena e di come infine la luce, dopo un percorso ricco di rimbalzi e interazioni, sia percepita da un punto di osservazione. Il rendering è il processo con il quale vengono prodotte le immagini finali a partire dai modelli matematici che compongono le scene 3D, i quali vengono proiettati su una superficie bidimensionale. In genere si distinguono due tipi di motore di rendering, ovvero “scanline renderers” e “ray tracer”. I primi lavorano sui singoli oggetti disegnandone sullo schermo i poligoni. I secondi lavorano invece sui singoli pixel tracciando dei raggi che partono dal punto di osservazione e determinano il colore del pixel in base alle interazioni con gli oggetti. I calcoli svolti dai motori ray tracing sono particolarmente onerosi, per cui il motore provvede automaticamente a determinare quali sono le superfici nascoste determinando il colore dei pixel in base all'interazione del raggio visuale con il primo oggetto che incontra. Per determinare la distanza degli oggetti dal punto di vista viene usato lo z-buffering, che impiega un buffer per conservare la coordinata z relativa ad ogni pixel elaborato. Se la profondità del poligono che sta per essere elaborato per il pixel è minore di quello in memoria, il pixel viene riscritto; altrimenti l'algoritmo passa al pixel successivo. Il realismo dell'immagine finale viene incrementato impiegando degli algoritmi in grado di riprodurre le imperfezioni alle quali l'occhio umano è abituato come i riflessi sulle lenti (lens flare), la profondità di campo (field of view) e l'effetto movimento (motion blur), senza le quali la scena verrebbe percepita come palesemente artificiale. Il processo di determinazione del colore di un determinato pixel dell'immagine è detto “shading” e comprende il calcolo relativo all'illuminazione che ricostruisce l'interazione tra gli oggetti e le sorgenti luminose.

Nella realtà, gli oggetti vengono bombardati in maniera diretta o indiretta da moltissime sorgenti luminose, in quanto la luce rimbalza da un oggetto all'altro finché non perde energia. Questo fenomeno viene simulato ricorrendo agli algoritmi di “illuminazione globale” (global illumination), la quale calcola sia la componente diffusa della luce, sia quella riflessa, tenendo conto dei contributi luminosi portati dai raggi che colpiscono un oggetto dopo averne già colpito un altro. In base al colore, ogni oggetto assorbe determinate lunghezze d'onda della banda luminosa, pertanto, rimbalzando su un secondo oggetto, la luce diffusa avrà un colore diverso rispetto a quella emessa dalla sorgente.

Esistono alcuni algoritmi, come il “Radiosity” e il “Photon-mapping”, in grado di calcolare in maniera fisicamente esatta l'illuminazione globale. Il punto debole di questi algoritmi è rappresentato dall'enorme capacità di calcolo richiesta, per questo motivo gran parte dei motori di rendering fa largo uso di funzioni che approssimano l'illuminazione globale in modo da ridurre i tempi di calcolo richiesti dai rendering.

Le immagini del film sono state generate tramite ray tracing alla risoluzione di 1920x1080 dpi, ovvero nel formato full-hd, attualmente standard per i filmati ad alta risoluzione, ad una frequenza di 30 frames per secondo. I tempi di rendering per i singoli frames sono stati molto diversi in base alla complessità della scena, passando da pochi secondi fino a impiegare, a volte, diverse ore per singola immagine. Per ridurre significativamente i tempi di rendering, è stata creata un'infrastruttura di calcolatori collegati in rete sui quali l'intero processo è stato distribuito come illustra la figura (fig.37).

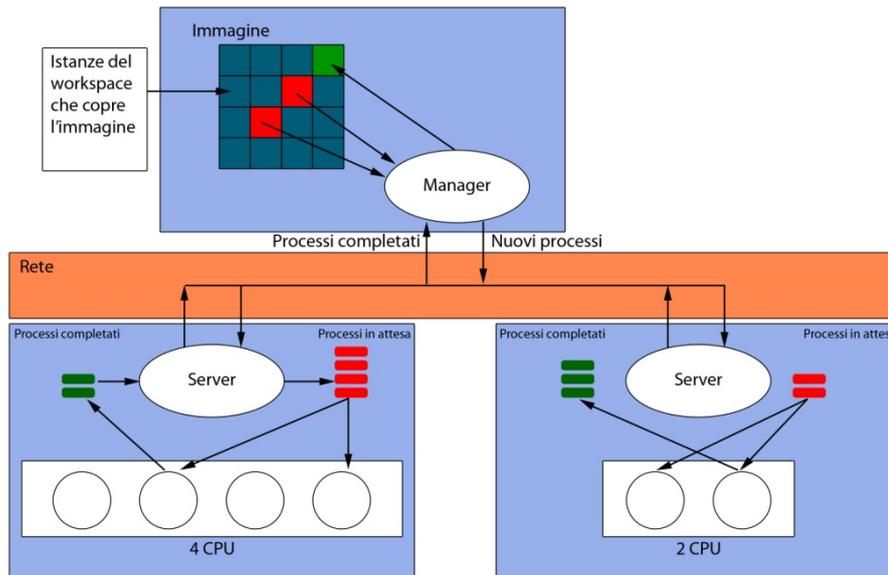


Fig. 39 Schema di funzionamento del rendering distribuito.

Nel caso specifico, l'infrastruttura di rendering distribuito è stata concepita in modo tale da consentire l'utilizzo di calcolatori aventi caratteristiche differenti tra loro, sia dal punto di vista hardware che software. Sono presenti sia processori con architettura a 32 che a 64 bit, il numero di cores varia da calcolatore a calcolatore, così come il sistema operativo che può essere sia Windows che Linux. Il processo di rendering viene lanciato da una macchina che funge da "master", la quale provvede a suddividere l'immagine da renderizzare in processi da distribuire sulle altre macchine, dette "slaves". Tutte le macchine concorrono al rendering di un frame e solo al completamento di questo, passano al frame successivo.

Il processo di rendering restituisce, infine, i singoli fotogrammi in formato Targa Sequence (.TGA). Questo particolare formato, anche se compresso, consente di conservare un'ottima qualità delle immagini alle quali, nel processo di generazione, vengono nominate con il nome scelto al quale segue un numero incrementale per ognuna di esse che permetterà di concatenarle all'interno di un programma per il montaggio video in modo da ottenerne una sequenza in maniera automatica.

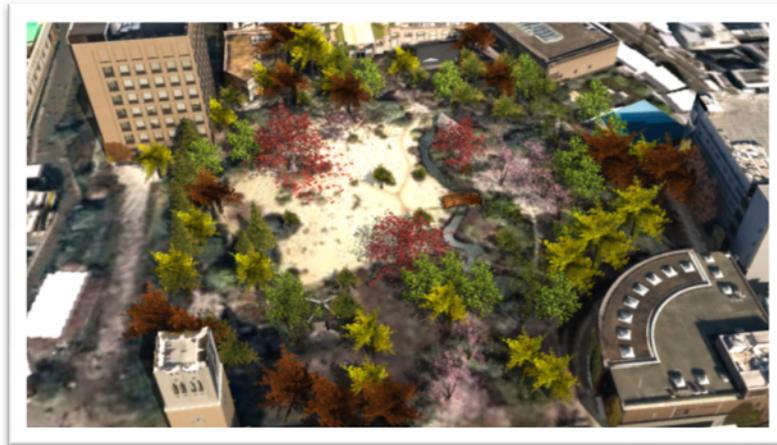
Per poter sfruttare al massimo l'infrastruttura di rendering in modo da accorciare i tempi, tutti i calcolatori coinvolti sono stati dotati di sistemi di controllo remoto che hanno consentito il pieno controllo dello stato dei processi in qualsiasi momento e anche da smartphone. Il sistema di controllo ha previsto l'utilizzo di un client web sul calcolatore master, dal quale è possibile controllare le altre macchine tramite un altro

client di controllo remoto su rete interna. Per evitare perdite di tempo causate da malfunzionamenti della rete elettrica, dei singoli computer o dall'infrastruttura di rete, ogni computer è stato impostato in modo da supportare le funzioni di Wake on Lan. In questo modo è possibile riaccendere da remoto ogni computer inserito nell'infrastruttura di rendering nel caso in cui esso si fosse spento a causa di sbalzi di tensione anche in assenza di stabilizzatori o di gruppi di continuità.

7.2. Struttura del film

Il film della durata complessiva di 34 minuti, si sviluppa in quattro atti all'interno dei quali vengono narrate le vicende che hanno portato alla realizzazione del circuito di Chua. In totale sono state generate 191 sequenze suddivise in 19 per il primo atto, 71 per il secondo, 90 per il terzo e 11 per il quarto. Esso si pone l'obiettivo di espandere il dialogo scientifico verso i limiti dell'immaginazione attraverso l'alternanza tra contenuti scientifici e la presentazione delle scoperte sui fenomeni caotici. In alcuni casi, a causa della collocazione temporale di alcuni personaggi rispetto ai fatti narrati, sono stati rappresentati improbabili dialoghi e monologhi tra personaggi che hanno vissuto in epoche differenti.

Una voce fuori campo accompagna lo spettatore all'interno della narrazione descrivendo gli ambienti, gli eventi e gli stati d'animo dei personaggi. Per le riprese è stato necessario realizzare nove ambientazioni diverse, delle quali tre in esterno e cinque in interno:



- Il giardino dell'università di Waseda



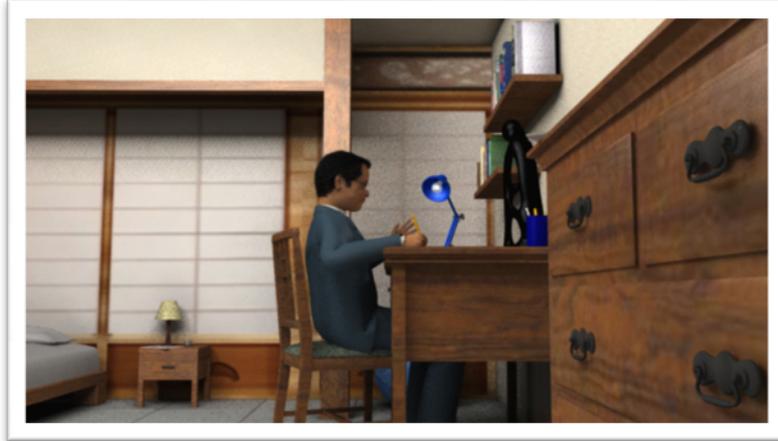
- Il corridoio dell'università



- Il laboratorio del Professor Matsumoto



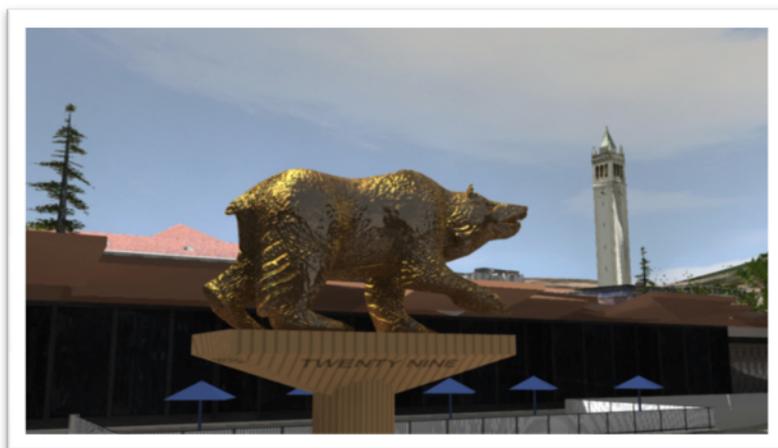
- La strada all'esterno dell'università di Waseda



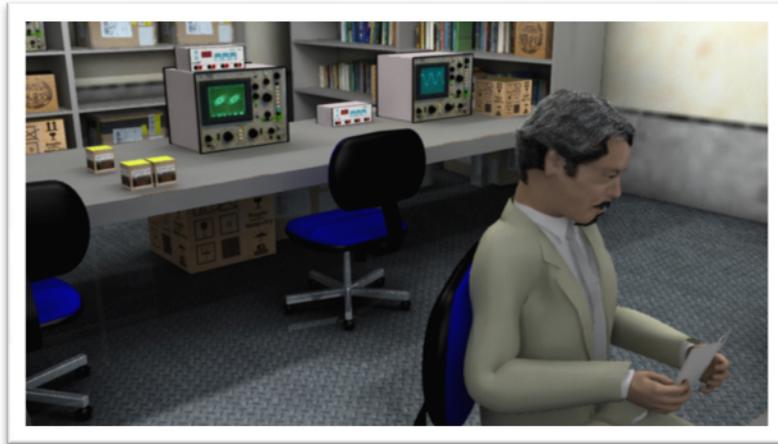
- La stanza del dormitorio dove è ospite il Professor Chua



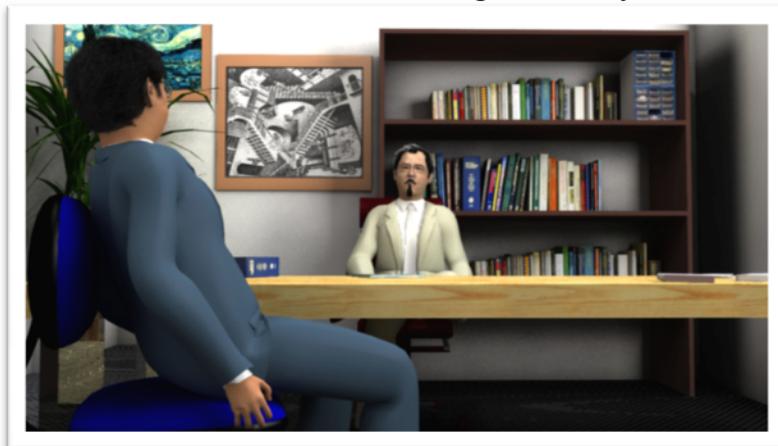
- L'ufficio del Professor Chua a Waseda



- L'esterno dell'università di Berkeley



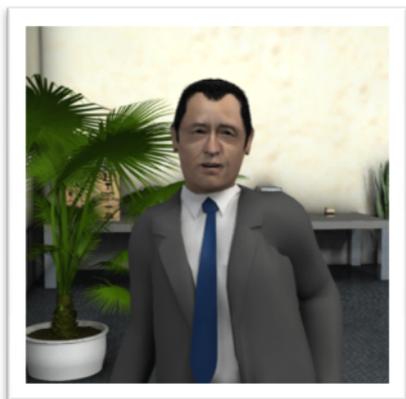
- Il laboratorio del Professor Zhong a Berkeley



- L'ufficio del Professor Zhong a Berkeley

Alle ambientazioni sopra elencate si va ad aggiungere uno scenario neutro all'interno del quale si svolgono i dialoghi tra i personaggi che hanno contribuito in maniera significativa con le loro ricerche a raggiungere i risultati che oggi conosciamo sulla teoria del Caos.

In totale, sono stati modellati quattordici modelli antropomorfi, dei quali otto sono i protagonisti le cui rappresentazioni sono state create basandosi sulle foto dei personaggi reali. Essi sono riportati di seguito in ordine alfabetico:



Farhad Ayrom



Georg Cantor



Leon O. Chua



Gaston Julia



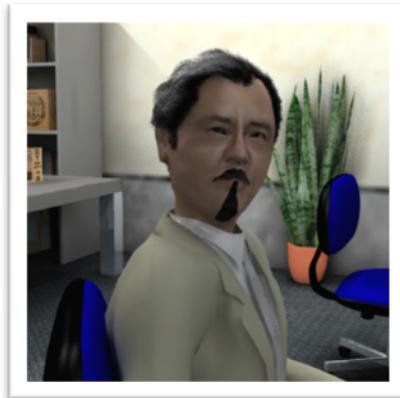
Edward N. Lorenz



Takashi Matsumoto



Henri Poincaré



Guo Qin Zhong

7.2.1. Atto I



Il primo atto si apre all'interno di uno scenario onirico all'interno del quale avviene una discussione tra i quattro personaggi noti come i "Padri Fondatori del Caos deterministico". Questo tipo di scenario è stato ideato in quanto i personaggi reali rappresentati dagli avatar 3D hanno vissuto in epoche e luoghi distinti, per cui si è pensato di ricorrere a questo escamotage per proporre un dialogo introduttivo alla storia della nascita del circuito di Chua. L'ambiente all'interno del quale si svolgono le prime sequenze è composto da una griglia rettangolare che funge da pavimento e da una sfera avente le normali alle superfici rivolte verso l'interno del volume e usata come skydome. La presenza dello skydome consente di utilizzare una singola luce di tipo "infinite" che, grazie all'effetto di illuminazione globale, nasconde l'intersezione tra il pavimento e la sfera dandoci l'impressione di una scena che si svolge in uno spazio infinito. Per ottenere questo particolare effetto, è necessario fare in modo che lo skydome non proietti alcun tipo di ombra e che la luce, pur avendo un'intensità elevata, proietti sul pavimento ombre non eccessivamente marcate.



Fig. 40 Georg Cantor (1845 - 1918).

Il primo dei personaggi ad apparire è Georg Cantor (San Pietroburgo, 3 marzo 1845 – Halle, 6 gennaio 1918), padre della moderna teoria degli insiemi, il quale introdusse la cosiddetta "Polvere di Cantor" creata in modo ricorsivo partendo da un segmento che rappresenta l'intervallo $[0, 1]$, dal quale viene rimosso ad ogni passo un segmento centrale. Ripetendo questa operazione "n" volte, si ottengono infine dei segmenti lunghi $1/n$ tendenti a zero. In

questo modo si ottiene un insieme coincidente con i suoi punti di accumulazione e mai

denso in qualunque suo intervallo. In base a questa scoperta, si è scelto di far apparire il personaggio immerso in un'evocativa nuvola di polvere ottenuta attraverso una simulazione di particellari.

Pur essendo già presente nella matematica classica il concetto di insieme, Cantor sviluppò quello di corrispondenza biunivoca tra insiemi finiti, giungendo così alla definizione di numeri cardinali infiniti. A lui si devono anche l'idea che esistono vari gradi di infinito e la dimostrazione che, come accade per i numeri interi che possono essere ordinati, anche gli infiniti non sono tutti uguali. La teoria degli insiemi elaborata da Cantor, nonostante le critiche, rimane ancora oggi alla base dello studio delle proprietà degli insiemi infiniti.

Cantor si chiede, mentre cerca di scrollarsi di dosso la "polvere" nella quale si trova, se mai qualcuno sarà in grado di creare un dispositivo in grado di dimostrare l'esistenza del Caos e rivelarne i misteri ancora celati alla conoscenza scientifica di quel tempo.



Fig. 41 Edward N. Lorenz (1917 - 2008).

Il secondo personaggio che appare è Edward N. Lorenz (West Hartford, 23 maggio 1917 – Cambridge, 16 aprile 2008), il quale riuscì a descrivere con l'utilizzo del calcolatore, l'andamento dei fenomeni meteorologici attraverso l'implementazione numerica di tre equazioni non-lineari.

Le equazioni che Lorenz formulò sono apparentemente semplici, contenenti solo qualche termine non lineare, ma la loro risoluzione tutt'altro che immediata. Esse sono le seguenti:

$$\frac{dx}{dt} = a \cdot x + a \cdot y$$

$$\frac{dx}{dt} = b \cdot x - y - x \cdot z$$

$$\frac{dx}{dt} = -c \cdot z + x \cdot y$$

dalle quali otteniamo che:

$$X(t+1) = X(t) - a \cdot X(t) \cdot dt + a \cdot Y(t) \cdot dt$$

$$Y(t+1) = Y(t) + b \cdot X(t) \cdot dt - Y(t) \cdot dt - Z(t) \cdot X(t) \cdot dt$$

$$Z(t+1) = Z(t) - c \cdot Z(t) \cdot dt + X(t) \cdot Y(t) \cdot dt$$

A livello grafico, le equazioni danno luogo ad una traiettoria che continua ad avvolgersi infinite volte in uno spazio ben delimitato, senza tuttavia incontrarsi mai, nota come "Farfalla di Lorenz" e considerata il primo attrattore strano mai scoperto.

L'avatar di Lorenz appare sotto una lieve pioggia mentre tiene in mano un ombrello che enfatizza ironicamente il timore suscitato dall'idea che l'effetto farfalla possa generare una tempesta in qualsiasi momento. Con tono risentito, Lorenz afferma di essere egli stesso lo scopritore del Caos grazie alla scoperta della famosa farfalla e dell'imprevedibilità dei sistemi non lineari in seguito alla sensibilità ai dati iniziali.

Nella stessa scena, appare Henri Poincaré (Nancy, 29 aprile 1854 – Parigi, 17 luglio 1912) noto sia come uno degli storici della scienza che come matematico, con in mano un oggetto che simula il moto perpetuo. Tale oggetto indica il lavoro svolto dallo scienziato sul “problema dei tre corpi”. Egli è anche noto per aver posto le basi delle soluzioni qualitative di equazioni differenziali partendo proprio dall'analisi del problema dei tre corpi. Grazie alla sua ricerca, egli riuscì a calcolare, date la posizione iniziale, la massa e la velocità di tre corpi soggetti all'influsso della reciproca attrazione gravitazionale, l'evoluzione futura del sistema da essi costituito trovando una soluzione al problema fino ad allora irrisolto della stabilità del sistema solare.



Fig. 42 Jules Henri Poincaré (1854 - 1912).

L'avatar di Poincaré afferma di essere, grazie alle proprie scoperte sul problema dei tre corpi, il precursore della teoria del Caos a dispetto di quanto affermato da Lorenz, in quanto la famosa farfalla avrebbe un numero molto limitato di varietà, a differenza dei sistemi studiati da Poincaré, i quali si basano sull'analisi di sistemi dai comportamenti più complessi in grado di esibire infinite varietà di forme e dinamiche.

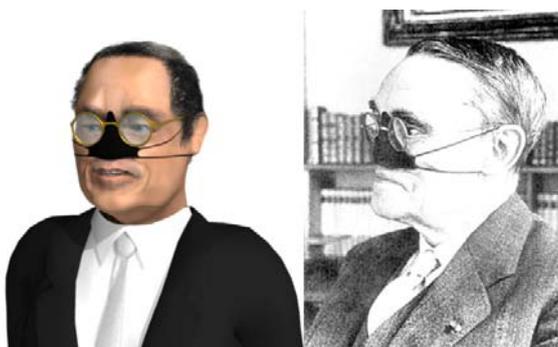


Fig. 43 Gaston Julia (1893 - 1978).

L'ultimo dei personaggi che compaiono nel primo atto è Gaston Julia (Sidi Bel Abbes, 3 febbraio 1893 – Parigi, 19 marzo 1978), il quale afferma di aver svolto un lavoro pionieristico sui frattali scoprendo figure geometriche elaborate da sistemi non lineari. Il suo lavoro fu reso popolare solo successivamente da Benoît Mandelbrot e numerosi sono gli esempi di immagini frattali derivate dall'insieme di Julia, in

quanto, tale insieme denota la capacità di cambiare drasticamente in seguito a piccole perturbazioni iniziali, esattamente come avviene nei sistemi caotici. Da qui la scelta di circondare il personaggio con oggetti creati sfruttando immagini ottenute dall'elaborazione dei cosiddetti “conigli di Douady”, così chiamati per la loro forma caratteristica e in onore del matematico Adrien Douady che dal 1984 è uno dei maggiori studiosi della dinamica complessa e dell'insieme di Mandelbrot. L'effetto degli oggetti che gravitano intorno a Julia è ottenuto mappando le immagini salvate a quattro canali

di colore (RGBA) su semplici poligoni rettangolari. Il quarto canale di colore, detto “canale alpha”, non è altro che un livello in scala di grigi dell’immagine stessa le cui aree chiare vengono visualizzate a differenza di quelli scure che rimangono invisibili.

Non appena Julia invita gli altri ad osservare la bellezza dei “conigli di Douady”, riappare Cantor, il quale insiste sul fatto che è necessaria una dimostrazione fisica e, al contempo, matematica, attraverso la quale l’esistenza del Caos potrà essere finalmente provata. Lorenz, sempre più infastidito, afferma a gran voce che sarebbe stato possibile rintracciare l’essenza del Caos solo nell’attrattore da lui scoperto. Subito Poincaré lo redarguisce dicendogli che, senza una dimostrazione fisica, il suo attrattore sarebbe rimasto solo una simulazione numerica.

La prima scena si conclude con Julia che invita i propri interlocutori ad avere pazienza e ad aspettare l’evento che avrebbe innovato profondamente la comprensione della natura, qualcosa di innovativo che avrebbe permesso di lì a poco di estrapolare il Caos dal mondo delle astrazioni matematiche per portarlo nel mondo reale e intanto li invita a guardare delle suggestive sequenze che inquadrano paesaggi tridimensionali ricreati rielaborando, grazie alla tecnica del displacement mapping, gli insiemi di Mandelbrot proiettate su un display futuristico.

Le sequenze proiettate sul video sono state ottenute costruendo una griglia piana a maglia fitta alla quale sono state applicate le immagini degli insiemi di Mandelbrot e Julia come modificatori delle altezze dei vertici in modo da ottenere delle strutture simili a suggestivi paesaggi. Le immagini vengono applicate anche come texture planare in modo da ottenere la colorazione di tali strutture. Il risultato finale consiste in un volo tramite il quale si va ad esplorare il paesaggio così ottenuto partendo dal particolare fino ad arrivare ad un’inquadratura globale che permette di visualizzare le inconfondibili immagini ottenute dall’elaborazione di questi frattali.



Dopo la parentesi iniziale, la scena si sposta all'università di Waseda nell'ottobre 1983, ed è proprio qui che inizia il racconto dei fatti che hanno visto protagonista il Professor Leon Chua, il quale, in quel periodo, si trovava in Giappone in quanto professore incaricato della Japanes Society for Promoting Science (JSPS). La telecamera esegue un volo sul paesaggio di Waseda per entrare ad inquadrare i particolari del giardino dell'università ricoperto da foglie di acero rosso, caratteristiche dei giardini zen. Le inquadrature propongono una suggestiva visione di insieme dell'ambiente in cui è possibile ammirare l'ordine e al contempo la maestosità della natura. La vegetazione del giardino è stata realizzata facendo riferimento alle foto satellitari dell'università di Waseda, sulla base delle quali, oltre agli edifici, è stata creata una libreria di modelli di alberi dei quali il fogliame viene ottenuto con modelli poligonali semplici, come triangoli o rettangoli, mappati con immagini di foglie opportunamente scontornate e dotate di canale alpha per simulare la trasparenza delle parti non visibili delle immagini stesse. La sequenza culmina con l'entrata nel giardino dell'università del Professor Chua, il quale, dopo diversi tentativi effettuati per poter visualizzare il Caos servendosi di un circuito elettronico, viene invitato dal professor Takashi Matsumoto per assistere all'esperimento che avrebbe cambiato la concezione della ricerca rivolta ai sistemi complessi. Prima di allora non era stato possibile realizzare nessuno strumento fisico che potesse manifestare comportamenti caotici. Nell'entrare, il Professor Chua viene ostacolato da un ramo particolarmente lungo che lo costringe ad abbassarsi. Questo semplice gesto lo induce a contemplare la natura che lo circonda e, dopo aver attraversato il ponte di legno che collega il giardino con l'ingresso dell'università, il suo sguardo viene richiamato dalla "pietra immortale", così chiamata in quanto presente nel luogo di costruzione dell'università ancor prima della realizzazione del giardino. La pietra rappresenta lo stato di semplicità ed equilibrio dell'ambiente. Egli è consapevole di dover fare ciò che andava fatto, ovvero fondersi con lo spirito intimo della pietra immortale. Dopo questa considerazione, si conclude il primo atto mentre la telecamera riprende il Professor Chua che, in preda all'eccitazione per l'esperimento al quale sta per assistere, si appresta ad incontrare il Professor Matsumoto nel laboratorio all'interno dell'università.

Atto I, Scena I

Tuoni e fulmini . Poi un improvviso chiarore.

Entrano: G. **Cantor**, G. **Julia**, E. N. **Lorenz** e H. **Poincarè**.

Cantor: *(avvolto in una nuvola di polvere nell'atto di scuotersela sempre di dosso, come parlando a se stesso, più che al resto del gruppo)* Chissà se qualcuno inventerà mai un sistema capace di dimostrare il caos! Quanti spazi infiniti sono ancora chiusi alla nostra conoscenza, quale perfezione potrebbe esservi celata!

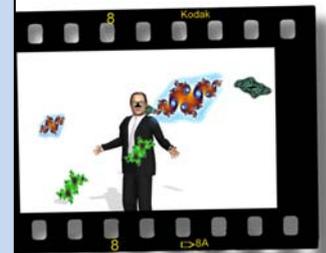
Lorenz: *(con tono risentito e con un vistoso ombrello, per ripararsi da un improvviso uragano scatenato in qualche parte del mondo dal battito delle sue farfalle)* Ma cosa dici!!! Il caos l'ho trovato io! La famosa farfalla, gli effetti imprevedibili, la sensibilità ai dati iniziali....

Poincarè: *(giocando con uno strano giocattolo elettronico, che consente di osservare il moto di tre masse che si attirano secondo la legge di gravitazione di Newton)* *(guardando fisso negli occhi Lorenz, senza tema di essere smentito)* Forse ho iniziato io, con il *problema dei tre corpi*. Ma la tua farfalla, caro il mio Lorenz, non ha che due o tre varietà. Mentre io ho pensato a comportamenti più complessi a infinite varietà di forme e correlate dinamiche.

Julia: *(mentre alcuni conigli di Douady gli corrono incontro)* E io che ho trovato l'insieme di Julia? Riscoperto poi da Mandelbrot nella sua nuova geometria frattale? Guardate *(dice mostrando i conigli di Douady)*, non sono forse bellissimi?

Cantor: *(con aria sofferente)* Quello che ci serve è una dimostrazione del caos sperimentale, che sia anche fisica, ma dimostrabile matematicamente.

Lorenz: *(quasi prossimo a scomporsi e con un tono di voce più alto di prima)* Ma è il mio attrattore strano. In che sistema, se non nel mio attrattore, si può ritrovare l'"essenza del caos", l'icona della complessità?



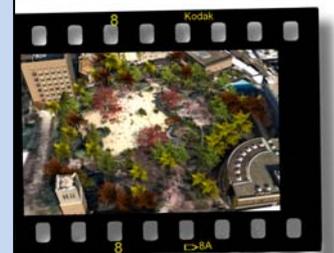
Poincarè: *(con fare saccente)* Congetture. Congetture! Non fare congetture. Per adesso il tuo attrattore è solo una simulazione numerica. Dimostra sperimentalmente che esiste.

Julia: *(rassegnato)* Forse dobbiamo aspettare. I fenomeni caotici sono ancora scarsamente considerati, sono per gli ingegneri pure astrazioni matematiche. Forse dobbiamo aspettare.... *(Tira fuori un visualizzatore touch screen e lo attacca ad una parete).* Nel frattempo vi invito a guardare e toccare la bellezza dei patterns di Mandelbrot, al variare del parametro C.

Voce narrante: Tutti gli altri si avvicinano per interagire col sistema, mentre su una parete vengono visualizzati splendidi patterns, che cambiano in continuazione. Continuano a discorrere e ad osservare. Si sente parlare da lontano. Poi escono.

Ottobre 1983, Tokio

Voce narrante: Il prof. Chua entra in un meraviglioso giardino dell'università di Waseda, a Tokio. Rosse foglie di acero vestono l'ambiente circostante. È eccitato. Sta per assistere ad un evento importante. Entrando, un ramo particolarmente lungo lo costringe ad abbassare la testa. Contempla la semplicità e l'equilibrio dell'ambiente, la forza e la maestosità della Natura. E pensa, con un leggero sorriso, che sta per prendere parte ad un esperimento sulla dimostrazione fisica del caos, che lui è uno studioso del caos. Contempla un sasso, dopo aver attraversato il ponticello che collega il giardino con l'ingresso dell'istituto. "Chissà se quella è una pietra immortale!", pensa. Doveva fare solo quello che doveva essere fatto: fondersi con lo spirito intimo della pietra. Infila la porta dell'istituto.



7.2.2. Atto II



Il secondo atto si apre con il Professor Chua che, mentre cammina nel corridoio che conduce all'ufficio del Professor Matsumoto, viene accolto da uno degli assistenti di quest'ultimo. Per la realizzazione dell'illuminazione dell'ambiente, sono state inserite delle luci di tipo area-light per simulare le sorgenti luminose delle lampade a neon del corridoio e la luce diurna proveniente dalle vetrate. Le area-lights sono particolari tipi di point-lights che emanano fasci luminosi da una superficie geometrica anziché da un singolo punto. Grazie a questa caratteristica esse hanno la peculiarità di generare ombre sfumate che rendono le scene più verosimili. L'effetto delle ombre viene migliorato applicando caratteristiche di ambient-occlusion alle superfici del pavimento e delle pareti. Le vetrate del corridoio danno sul giardino dell'università e, mentre lo attraversa, il Professor Chua prosegue nelle proprie riflessioni, certo della riuscita dell'esperimento. Dopo un breve dialogo, l'assistente si appresta a condurre il Professor Chua nel laboratorio dove già altri colleghi provenienti da diverse università lo aspettano per assistere all'esperimento.

Non appena il Professor Chua entra nel laboratorio, il Professor Matsumoto gli va incontro per salutarlo e sottolinea la mole di lavoro che ha dovuto svolgere insieme alla sua équipe nel corso dell'ultimo anno per raggiungere il risultato sperato. In risposta, il Professor Chua esprime la propria eccitazione per la dimostrazione alla quale sta per assistere. Nelle varie riprese è possibile osservare come l'ambiente sia ricco di particolari oggetti e strumentazioni che caratterizzano il laboratorio. Ognuno degli oggetti, tra i quali abbiamo oscilloscopi, voltmetri e altro materiale tipico di un laboratorio di elettronica, è stato modellato e texturizzato con dovizia di particolari. Particolare attenzione è stata posta sulla realizzazione e il settaggio dei materiali di ogni singolo componente della strumentazione del laboratorio. Come per il corridoio, l'illuminazione è stata realizzata facendo largamente ricorso alle area-lights e all'applicazione dell'ambient-occlusion sulle superfici di pavimento e pareti.

Terminato il dialogo tra i due, Chua si appresta ad ammirare da vicino il primo circuito al mondo costruito basandosi sulle equazioni di Lorenz. Egli è fortemente convinto che finalmente ciò che fino a quel momento era stato solamente teorizzato potesse divenire realtà. Nella sequenza viene ripreso il circuito apprezzabile in tutti i particolari da diverse angolazioni. L'esperimento prende il via, ma dopo un primo tentativo, gli assistenti non riescono ad ottenere alcun risultato. Gli assistenti del

Professor Matsumoto affermano di aver seguito tutti i passaggi in maniera regolare, per cui, questi li invita, con fare preoccupato, a ritentare.

Dopo altri tentativi, sotto gli occhi delusi degli astanti, il Professor Matsumoto è costretto ad ammettere l'inaspettato fallimento.

Mentre tutti si apprestano a lasciare il laboratorio amareggiati, una dissolvenza ci riporta nell'ambiente etereo iniziale dove anche Cantor, Lorenz, Poincaré e Julia manifestano il proprio disappunto per la cattiva riuscita dell'esperimento. Cantor, sempre immerso nella "polvere", esprime il proprio rammarico giacché ancora non esisteva una prova fisica che potesse dimostrare l'esistenza del Caos anche se l'equipe di Matsumoto aveva investito parecchio tempo nella realizzazione del circuito e si era premurata di eseguire un lavoro preciso e accurato. Julia si consola osservando la bellezza dei "conigli di Douady" seppure ancora una volta non era stato possibile dimostrare la loro esistenza. Nel frattempo Lorenz insiste ad affermare che la sua farfalla dovrebbe essere una dimostrazione sufficiente dell'esistenza fisica del Caos, mentre Poincaré invita tutti alla pazienza nella convinzione che presto qualcosa avrebbe modificato l'esito infausto dell'esperimento di Matsumoto.

Intanto la telecamera ritorna ad inquadrare il Professor Chua che ripercorre deluso il viottolo che attraversa il giardino e nemmeno la bellezza e la perfezione dell'ambiente nel quale si trova sono sufficienti a distoglierlo dal pensiero del fallimento al quale ha appena assistito. Egli è pienamente consapevole del fatto che non sono state la capacità di Matsumoto e della sua equipe a far fallire l'esperimento, ma l'assenza di un adeguato componente elettronico in grado di esprimere comportamenti non lineari con caratteristiche che si approssimano a quelle ideali e con la possibilità di creare un'ampia possibilità di dinamiche differenti.



Fig. 44 Visuale dall'alto del ponte di legno nel giardini di Waseda.

Ed è qui che gli viene l'idea di modificare il circuito di Matsumoto inserendo un moltiplicatore analogico. Poggiandosi alla pietra immortale, riflette sulle equazioni di Lorenz e Rössler cercando una possibile soluzione mentre si serve di un ramo trovato

per terra per scriverle sulla sabbia del giardino. Egli prosegue la propria riflessione sul fatto che i due sistemi di equazioni differenziali sono accettati dall'ambiente scientifico come espressioni del Caos. È consapevole del fatto che solo la riuscita dell'esperimento di Matsumoto avrebbe potuto fare in modo che la teoria del Caos fuoriuscisse dal mondo delle speculazioni matematiche. Continua a chiedersi insistentemente come fare per poter portare l'interesse degli ingegneri e dei costruttori di circuiti sulle enormi potenzialità offerte dal circuito e su come esso avrebbe influito nei futuri sviluppi e applicazioni della teoria del Caos, fino a quando, sconsolato, non decide di prendere un taxi che lo riporti al dormitorio.

La scena si riapre all'interno della stanza del dormitorio dove il Professor Chua, dopo una cena frugale, prosegue le proprie riflessioni e medita sul fallimento al quale ha assistito. L'arredamento della stanza è stato realizzato modellando i tipici oggetti presenti in una stanza giapponese e caratterizzato dalla presenza di vasi e piante ornamentali. L'ambiente è arricchito da mensole colme di libri, letto e scrivania che si integrano nel contesto mantenendone lo stile. L'illuminazione è data da un'area-light posta al soffitto e da una spot-light che simula la luce della lampada sulla scrivania con effetti volumetrici che rendono l'atmosfera esteticamente più gradevole. Da solo, chiuso nella sua stanza, il Professor Chua non riesce a dare a se stesso una spiegazione dal momento che le equazioni di Lorenz e Rössler sulle quali il circuito si basa, anche se sono solo delle astrazioni numeriche, esistono. Nel frattempo si appresta a disegnare idealmente con un dito sulla scrivania l'attrattore di Lorenz, fino a che, pensando ai punti di equilibrio delle funzioni di Lorenz e Rössler, finalmente arriva a comprendere quale può essere la soluzione per creare gli elementi in grado di assicurare l'instabilità necessaria per il corretto funzionamento del circuito. Il Professor Chua finalmente si rende conto che la soluzione sta nel ridisegnare il circuito scartando tra le varie possibilità quelle che non esibiscono comportamenti caotici. Nasce così il diodo di Chua, ovvero un componente elettronico in cui l'andamento della corrente è lineare a tratti e può essere rappresentato attraverso linee tratteggiate. Quella stessa notte il Professor Chua giunge all'intuizione che lo porta a disegnare lo schema di quello che sarà il circuito di Chua su una busta da lettera e un fazzoletto.



Atto II, Scena I

Voce narrante: Un assistente in camice bianco, si avvicina accalorato per accompagnare il Prof. Chua nella sala degli esperimenti.

Assistente: Venga, Professore Chua. Il Professore Matsumoto la sta aspettando. È un momento straordinario. È un momento davvero straordinario!

Prof. Chua: (anche lui con fare emozionato) Sì, è davvero un passaggio cruciale della scienza contemporanea. Finalmente avremo una dimostrazione sperimentale del caos. A che punto sono i preparativi?

Assistente: Siamo sul punto di far partire la dimostrazione. Sono già arrivati altri colleghi, da altre università. Stanno aspettando solo Lei.

Prof. Chua: (quasi ansioso) Spero di non essere in ritardo, non vorrei perdere questo momento per nulla al mondo. Questa dimostrazione cambierà il futuro. Potremmo finalmente studiare il caos con strumenti fisici.

Voce narrante: Percorrono un lungo corridoio che porta al laboratorio del Prof. Matsumoto. Sulla sinistra, ampie vetrate aprono sul laghetto, sopra il quale un acero centenario, smisuratamente ornato delle sue foglie, le fa cadere lievemente e poggiare sull'acqua con piccoli vortici eleganti.

Si sentono voci provenire dal laboratorio. Altri colleghi universitari erano stati invitati per il grande evento. Il Prof. Chua e l'assistente di Matsumoto finalmente arrivano. Quello che si presenta ai loro occhi è un angolo ben organizzato del laboratorio e pieno fino all'inverosimile di strumenti, con un gruppo di professori assiepati che parlavano con voci animate.





Fig. 45 Particolare del laboratorio del Professor Matsumoto.

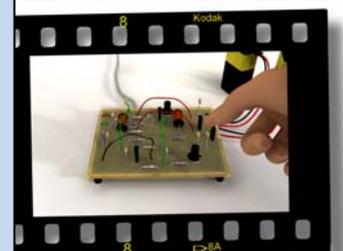
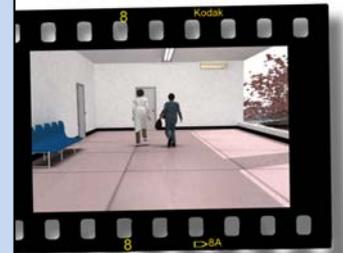
Il Prof. Matsumoto si stacca dal gruppo.

Prof. Matsumoto: (raggiante) Benvenuto mio caro Chua, ti stavamo aspettando. Abbiamo già organizzato tutto.

Prof. Chua: (con simpatia) È un onore per me essere qui oggi per assistere alla prima realizzazione al mondo di un circuito elettronico, costruito sulle equazioni di Lorenz.

Prof. Matsumoto: (con grande enfasi) Eh, ma quanto tempo ci è voluto per arrivare a questo! Pensa che il mio gruppo ha lavorato duramente per più di un anno. Un anno di lotte, di prove, di sconfitte, di rimesse a punto. Ma finalmente ci siamo riusciti. Avvicinati, vieni a vedere il circuito.

Prof. Chua: (con vera ammirazione, sfiorando lievemente il circuito con le dita e muovendosi intorno ad esso per osservare ogni dettaglio dell'apparecchiatura) È davvero un notevole pezzo di elettronica circuitale. È stato costruito e intagliato in modo perfetto, con almeno una dozzina di componenti, e abbellito da molti potenziometri e speciali capacitori (sia per la sintonizzazione fine che per la sintonizzazione manuale), per sfruttare a fondo l'estrema sensibilità della struttura su cui poggia il circuito. I collegamenti tra gli elementi circuitali sono stati poi costruiti con accuratezza e precisione. Sicuramente non ci sarà più bisogno di fare un altro circuito più potente, se questo funzionerà.



Prof. Matsumoto: *(con enfasi)* Allora si comincia. Vediamo se funziona: a lavoro, ragazzi.

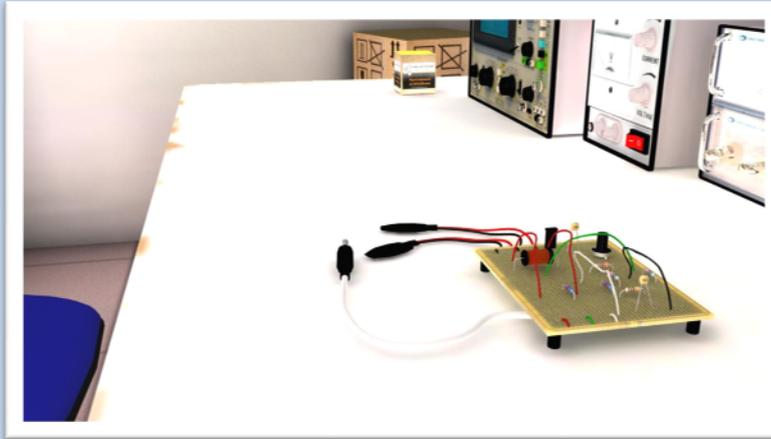


Fig. 46 Particolare del circuito realizzato dal Professor Matsumoto.

Voce narrante: Alcuni assistenti del Prof. Matsumoto si avvicinano e cominciano a far andare la splendida apparecchiatura.

I assistente: Aziona il collegamento.

II assistente: Fatto.

I assistente: Sintonizza il capacitatore.

II assistente: Fatto.

I assistente: Sintonizza manualmente, in modo da ottenere il segnale.

II assistente: Fatto.

I assistente: Abbiamo il segnale.

Prof. Matsumoto: *(seccato)* Qui non si sente e soprattutto non si riesce a vedere niente. Cosa state facendo?

I assistente: *(preoccupato)* Abbiamo fatto tutto in modo regolare, Professore.

Prof. Matsumoto: *(anche lui preoccupato)* Forza, riprovate! Mi raccomando, fate tutto in modo preciso.



I assistente: Ripetiamo tutte le operazioni.

II assistente: Fatto.

Prof. Matsumoto: (*Distretto e disperato nello stesso tempo*) Niente, niente. Il circuito non funziona. Dobbiamo ricominciare tutto daccapo. (Alzando la voce) Abbiamo fallito! Signori, mi dispiace, ma l'esperimento è fallito.

Voce narrante: Mesti tutti escono col sapore della sconfitta intellettuale. Il caos non era stato dimostrato. Il caos era ancora una astrazione matematica realizzato da una simulazione numerica.

Atto II, Scena II

Entrano: G. Cantor, G. Julia, E. N. Lorenz e H. Poincarè.

Cantor: (*sempre scuotendosi dalla polvere*) Non sono riusciti a far partire il circuito. E dire che ne avevano sprecato tempo. Avevano utilizzato i più sofisticati strumenti per poter effettuare fini controlli sui vari parametri del sistema. E i collegamenti tra gli elementi circuitali erano stati costruiti con accuratezza e precisione.... Ma che sfortuna!

Julia: (*Deluso*) E noi che avevamo scommesso su di loro....Venite qui, miei cari (rivolto ai conigli di Daoudy)! fatevi accarezzare! Ancora non esiste prova della vostra esistenza, poverini.

Lorenz: (*cocciuto come al solito*) Siete testardi! Ma cosa vi serve provare il caos, se c'è la mia farfalla.

Poincarè: (*sornione*)Pazienza, pazienza. Aspettiamo, aspettiamo. Io sono fiducioso Forse qualcosa accadrà....

Voce narrante: Escono, Lorenz, sempre più imbronciato, apre il suo ombrello aspettandosi una pioggia torrenziale; Poincarè è ambiguo e interrogativo; Julia gioca con i suoi animalotti simbolici; Cantor è veramente sconsolato.



Atto II, Scena III

Voce narrante: E sconsolato è anche il Prof. Chua. Ritorna a ripercorrere il viottolo del giardino per arrivare sulla via principale. Abbattimento e delusione erano stati cocenti. Neanche la bellezza immobile del paesaggio intorno a lui placa la sua mente.

Prof. Chua: (si ferma, parlando ad alta voce) No, non sono state le abilità sperimentali di Matsumoto a far fallire l'esperimento. No, ci deve essere qualcos'altro. Forse è l'insufficienza di un possibile componente non lineare, con una caratteristica che si approssima all'ideale, e un non sufficientemente ampio spettro di dinamiche. Sì, ci vuole un moltiplicatore analogico. (Gridando) Sì, questa è la chiave per costruire un circuito caotico autonomo adesso nel 1983 (si siede su un sasso, forse il sasso immortale, e prende una piccola verga per scrivere sulla sabbia).

Prof. Chua: (come per spiegare a se stesso) Vediamo di riepilogare. Abbiamo due sistemi autonomi realizzati con equazioni differenziali ordinari e accettati come caotici:

Le equazioni di Lorenz,

(scrive sulla sabbia le equazioni come farebbe un giardiniere zen)

Le equazioni di Rössler,

(scrive sulla sabbia le equazioni, come farebbe ancora un giardiniere zen)

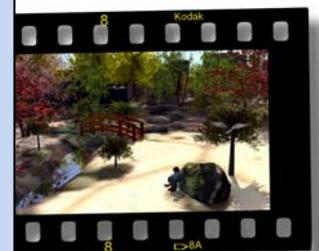
Con i loro parametri α , β e γ .

(aggiunge tra sé, con enfasi)

e la non linearità, in entrambi i sistemi, è data da due variabili, cioè la funzione del prodotto.

(affranto)

Solo la dimostrazione che il circuito di Matsumoto-Lorenz funziona avrebbe potuto dare al caos il posto che veramente gli spetta, e non dove adesso è, relegato a pure astrusità matematiche.



Come faremo a interessare gli ingegneri, i costruttori di circuiti non lineari al caos? Come faremo a far loro apprezzare le sue enormi potenzialità? Come faremo a dimostrare la non-linearità dei fenomeni biologici?

Voce narrante: Uscito dall'università, Chua prende un taxi e si dirige verso il dormitorio.

Atto II, Scena IV

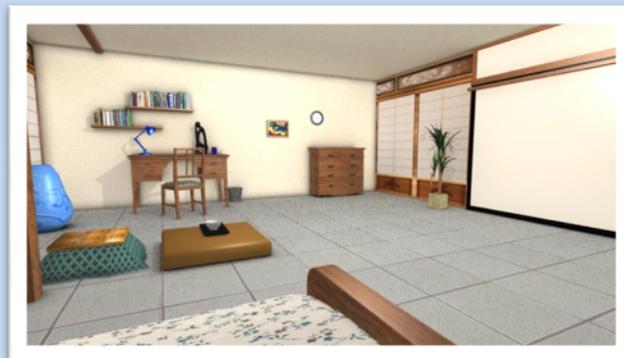
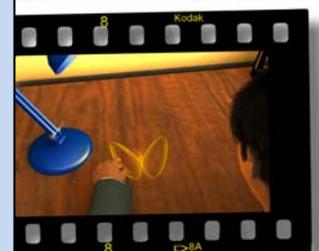
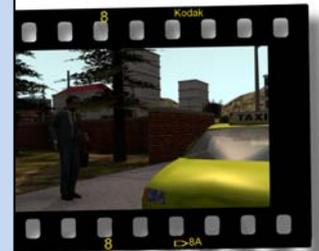


Fig. 47 Viste da diverse angolazioni della stanza del dormitorio di Waseda.

Voce narrante: Dopo una cena frugale, il sentimento di fallimento nel Prof. Chua è ancora cocente, mentre si appresta ad andare a letto.

Chua: (*affranto*) Non ci posso pensare, eravamo sul punto di farcela. Non riesco a rassegnarmi. Eppure la farfalla di Lorenz c'è, anche se solo come simulazione numerica. E anche l'attrattore di Rössler...

(*comincia a disegnare con le dita la farfalla di Lorenz nel vuoto della stanza scarsamente illuminata*)



Qual è l'essenza del caos? Forse risiede nella dinamica di questi due fuochi instabili che passa per tre punti in Lorenz? O per due in Rössler?

E se fossero proprio questi punti ad essere fondamentali?

(con un lampo improvviso e con stupore)

Potrebbe un semplice e più robusto circuito essere progettato con queste caratteristiche?

Sì, forse è così. Ma perché non ci ho pensato prima? A questo punto è solo un banale esercizio di teoria dei circuiti non lineari. E già. Bisogna enumerare tutti i circuiti candidati, fra i quali solo otto possono essere idonei. Poi scartare tutti i circuiti non caotici.

Sì, ci sono solo due circuiti possibili.

Ma, fra questi, solo uno è caotico.

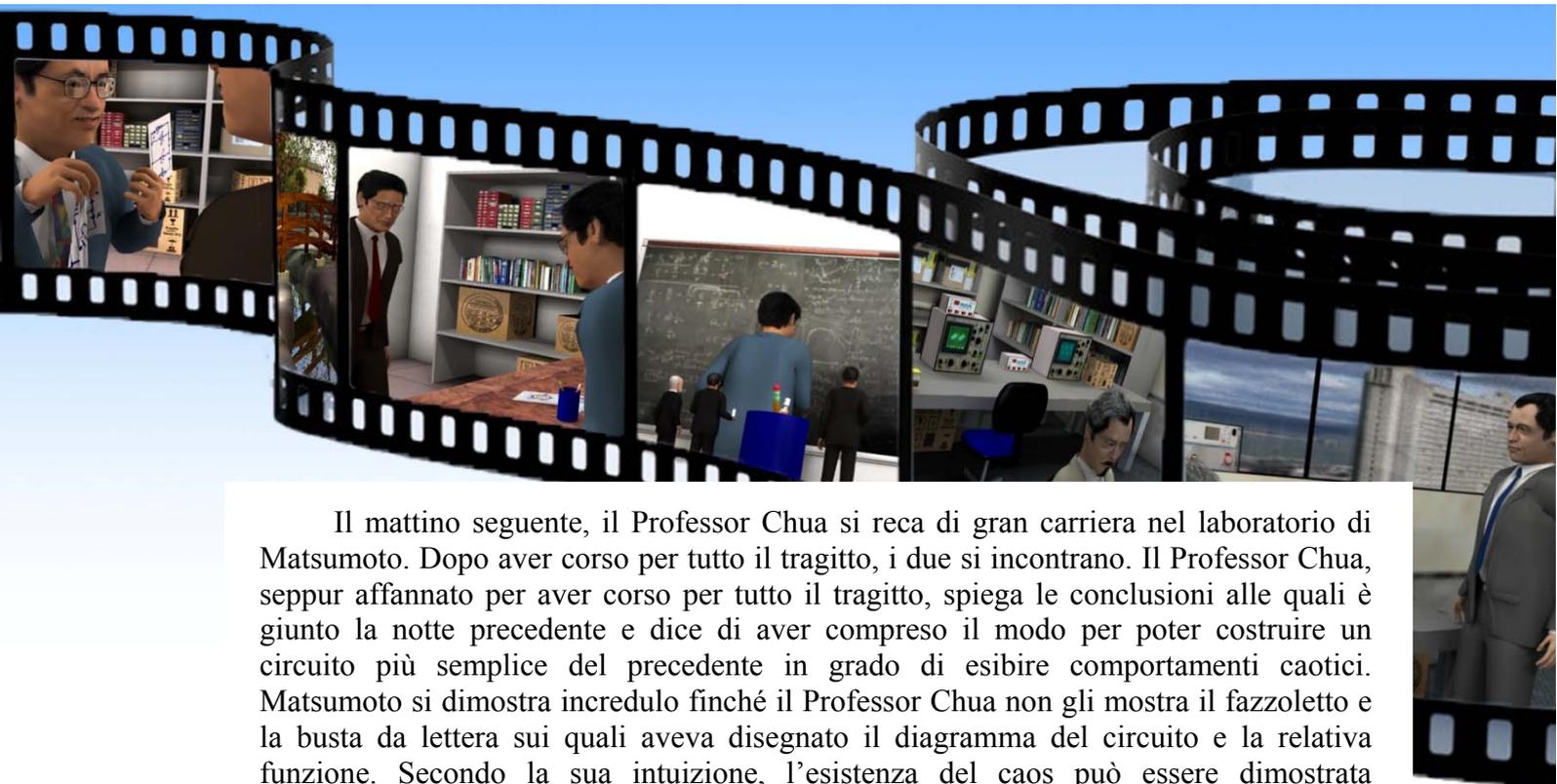
(Chua cerca febbrilmente qualcosa)

Dove è un pezzo di carta, datemi della carta.

Voce narrante: Quell'ottobre del 1983, nel dormitorio dell'università di Waseda sulla parte bianca di una busta e su un tovagliolo di carta fu, in meno di un'ora, disegnato il diagramma e la curva lineare a tratti del circuito di Chua.



7.2.3. Atto III



Il mattino seguente, il Professor Chua si reca di gran carriera nel laboratorio di Matsumoto. Dopo aver corso per tutto il tragitto, i due si incontrano. Il Professor Chua, seppur affannato per aver corso per tutto il tragitto, spiega le conclusioni alle quali è giunto la notte precedente e dice di aver compreso il modo per poter costruire un circuito più semplice del precedente in grado di esibire comportamenti caotici. Matsumoto si dimostra incredulo finché il Professor Chua non gli mostra il fazzoletto e la busta da lettera sui quali aveva disegnato il diagramma del circuito e la relativa funzione. Secondo la sua intuizione, l'esistenza del caos può essere dimostrata costruendo un circuito lineare a tratti che deve possedere almeno due punti di equilibrio instabile che definiscano l'evoluzione della traiettoria di un punto in un arco di tempo.

Eccitato da quello che ha appena sentito, Matsumoto si appresta a creare una simulazione al computer con la quale poter verificare che il circuito ideato dal Professor Chua funzioni realmente. Dopo aver effettuato qualche tentativo, Matsumoto esce di corsa nel corridoio in preda alla felicità per essere riuscito a trovare un attrattore strano e si dirige verso lo studio del Professor Chua. La simulazione scritta in Basic dimostra che il circuito disegnato da Chua può funzionare, ciò nonostante il gruppo di Matsumoto continua ad incontrare serie difficoltà nella realizzazione fisica del circuito a causa dell'inesperienza con i componenti non lineari. Nonostante la felicità per i risultati ottenuti da Matsumoto, il Professor Chua è perplesso in quanto è consapevole dell'inesperienza del collega con i circuiti con dinamica non lineare a tratti, ciononostante, lo invita a fare ulteriori tentativi in modo da verificare che l'attrattore strano trovato con la simulazione non sia solo un artefatto del programma.

Il professor Matsumoto continua ad effettuare esperimenti variando la gamma di parametri della simulazione ma, come aveva previsto il Professor Chua, il suo gruppo non riesce a realizzare fisicamente il circuito.

Dopo alcuni mesi dalla realizzazione delle simulazioni, il Professor Chua si trova nel suo ufficio all'università di Waseda meditando sul fatto che, anche se un primo passo era stato fatto, solo delle simulazioni al computer non sarebbero state sufficienti per trovare delle applicazioni pratiche in grado di aprire nuove strade alla teoria del Caos. Mentre Chua si accinge a scrivere sulla lavagna, riflette sulle implicazioni che l'impossibilità di realizzare fisicamente il circuito avrebbero causato nella comunità dei

ricercatori che studiano la teoria del Caos. È certo che, grazie alle simulazioni di Matsumoto che hanno portato a trovare gli attrattori strani, fosse già stata fornita una conferma numerica delle caratteristiche caotiche dell'attrattore di Lorenz.

Intanto, alle sue spalle appaiono le figure atemporali di Cantor, Lorenz, Poincaré e Julia e, mentre tre di loro incitano Chua e sperano che egli trovi presto una soluzione, il solo Lorenz spera il contrario, consapevole che una tale scoperta sicuramente avrebbe sminuito il ruolo di primo piano che la sua teoria della farfalla e le sue equazioni si erano ritagliate nella storia della teoria del Caos, correndo il rischio di non prendere parte alla rivoluzione che avrebbe di lì a poco portata nelle applicazioni ingegneristiche. Cantor suggerisce che, anche se Matsumoto non possiede le competenze necessarie a costruire il circuito, è possibile pensare a qualcun altro in grado di farlo. Intanto Julia e Poincaré incalzano sul fatto che forse i colleghi di Berkeley avrebbero potuto avere successo nell'impresa.

Come se potesse dare ascolto alle "miniature" dei quattro scienziati di fronte a lui, Chua riflette sulla possibilità di affidare il compito di realizzare fisicamente il proprio circuito ai colleghi dell'università di Berkeley. Finalmente anche Lorenz si convince del fatto che la scoperta di Chua non avrebbe fatto altro che conferire alle proprie teorie un posto di rilievo nelle future ricerche riguardanti il Caos, quindi la telecamera fuoriesce dall'ufficio di Chua salendo fino ad inquadrare l'intero globo terrestre per infine ricadere sull'università di Berkeley.





La scena si riapre all'interno del laboratorio dell'università di Berkeley, dove troviamo il Professor Zhong e il Professor Ayrom. Zhong dice al collega di aver da poco ricevuto una lettera da parte del Professor Chua, nella quale egli racconta del cattivo esito ottenuto dagli esperimenti svolti a Waseda e dei fallimenti nella realizzazione fisica del circuito aggiungendo che comunque Matsumoto è riuscito ad ottenere dei risultati simulando al computer le caratteristiche del circuito grazie alle modifiche suggeritegli. Nella lettera, il Professor Chua afferma di essere riuscito a elaborare una procedura di sintesi per sviluppare un circuito in grado di simulare fenomeni caotici. Egli aggiunge che purtroppo l'equipe del Professor Matsumoto non è riuscita a realizzarlo nonostante le indicazioni fornite. Vengono illustrate nel dettaglio le caratteristiche che il circuito dovrà avere, quindi invita i colleghi di Berkeley a prendere visione del problema e a collaborare con lui per riuscire a realizzare il circuito in modo da dare un significativo contributo al progresso scientifico e agli studi sulla teoria del Caos.

Il Professor Ayrom appare subito entusiasta del fatto che il Professor Chua confidi così tanto nelle loro capacità e si dimostra fiducioso riguardo alle possibilità di riuscita dell'impresa. Dal canto suo, Zhong è convinto che, riuscendo a sviluppare il circuito, essi sarebbero stati i primi a servirsi di uno strumento fisico per poter simulare le dinamiche caotiche. Dalle informazioni fornite dal Professor Chua, egli confida che, a meno della componente non lineare che in seguito prenderà il nome di "diodo di Chua", il circuito potrà essere realizzato molto facilmente.

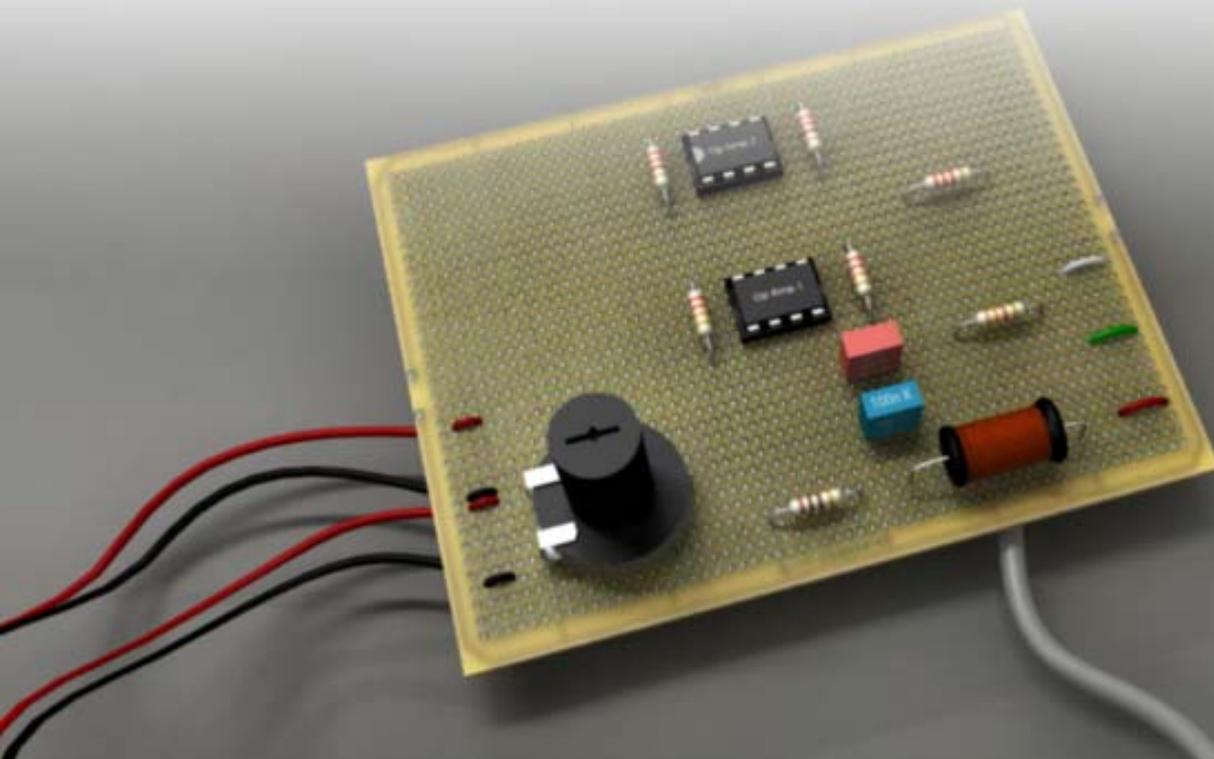
Dopo aver espresso le proprie considerazioni, i due decidono finalmente di apprestarsi a lavorare sul circuito, pensando che se veramente le intuizioni di Chua fossero risultate esatte, essi sarebbero stati i primi a costruire un circuito che avrebbe dato conferma all'esistenza del Caos.

Passato qualche mese, il Professor Chua riceve buone notizie da Zhong, il quale è riuscito a mettere a punto, seguendo le indicazioni ricevute, un circuito funzionante con all'interno una componente non lineare. Finalmente il Professor Chua, soddisfatto per le notizie ricevute, viene invitato a Berkeley, il luogo dove aveva condotto i propri esperimenti sul Caos, per assistere alla dimostrazione pratica che il circuito da lui ideato funziona realmente. Come per l'università di Waseda, anche in questo caso è stato ricostruito l'esterno del campus modellando gli edifici e posizionandoli in base alle foto satellitari.

Dopo aver attraversato un lungo corridoio, il Professor Chua viene accolto nel proprio ufficio dal Professor Zhong, il quale gli spiega che la costruzione del circuito non ha rappresentato un'eccessiva difficoltà. Qualche problema, inizialmente, è sorto nella costruzione del diodo, anche se egli confida che grazie allo sviluppo delle tecnologie elettroniche, in futuro anche questa fase sarebbe risultata meno complessa. Ad ogni modo, il lavoro svolto ha portato ottimi risultati e finalmente il circuito funziona ed è in grado di esibire i cambiamenti qualitativi dei sistemi dinamici. Terminato il colloquio, i due si recano nel laboratorio dove il Professor Ayrom li sta già aspettando per la dimostrazione.

Giunti al laboratorio, vi trovano il Professor Ayrom, il quale è impaziente di far vedere come, grazie al circuito da loro costruito, sia finalmente possibile osservare fenomeni complessi non periodici e andare oltre le teorie di Lorenz grazie all'enorme gamma di variazioni nei parametri offerte dal nuovo strumento.

Il terzo atto si conclude con il Professor Chua che, insieme a Zhong e Ayrom, osserva finalmente su un oscilloscopio, i dati provenienti dal proprio circuito. Finalmente egli può assistere alla dimostrazione tanto attesa che il Caos è un fenomeno riproducibile attraverso un circuito elettronico e che pertanto può essere sfruttato in maniera pratica nel mondo reale e non solo in ambito speculativo come è accaduto fino a quel momento.



Atto III, scena 1

Voce Narrante: Il mattino dopo, il Prof. Chua arriva di gran furia al laboratorio del Prof. Matsumoto.

Prof. Chua: (affannato per aver corso lungo tutto il vialetto del giardino) Matsumoto, forse ho trovato, ho trovato

Prof. Matsumoto: (ancora triste per l'insuccesso di ieri) Calmati Chua, cosa ti succede?

Prof. Chua: (concitato) Ho trovato come realizzare il più semplice circuito per dimostrare il caos.

Prof. Matsumoto: (con grande sorpresa e con uno scatto improvviso del corpo) Cosa mi dici mai ? cosa hai trovato? Non posso crederci!

Prof. Chua: (tirando fuori dalla tasca la busta e il fazzoletto di carta sui quali aveva disegnato il diagramma e la curva lineare a tratti del circuito, che poteva ipoteticamente dimostrare il caos) Si Matsumoto, guarda guarda qui questo diagramma e questa curva. Scegliendo il giusto valore di R, in modo tale che la linea carica intersechi il 3° segmento interno, che ha una curva negativa, noi avremo il caos. In altre parole, il caos può essere prodotto in un circuito lineare a tratti, se questo possiede almeno due punti di equilibrio instabile, uno che provoca l'allungamento e l'altro che realizza le traiettorie.

Prof. Matsumoto: (sempre più allibito e sorpreso) Ma dici davvero? Sei proprio sicuro. Se è così vado a programmare subito le equazioni nel mio computer. Magari fosse così, magari fosse così.

Voce narrante: Esce dal laboratorio e si reca nel laboratorio. Il prof. Chua nel frattempo si dirige nel suo studio, in quanto professore incaricato della Japanes Society for Promoting Science (JSPS). Passa un po' di tempo. Ad un certo punto si sentono delle grida, provenienti dallo studio del Prof. Matsumoto.



Prof. Matsumoto: *(correndo verso la stanza del Prof. Chua e giubilante, come un bambino che per la prima volta entra in una piscina)* Sì, venite, venite a vedere tutti. Ho trovato un attrattore strano. No vi è alcun dubbio.

Prof. Chua: (sorpreso) Davvero! Sono Felicissimo. (Poi tra sé: “Matsumoto non ha esperienza né con circuiti con dinamica lineare a tratti, né con oscillazioni non lineari. Conosce solo gli attrattori strani”). Matsumoto continua a simulare con altri parametri del circuito, in modo da verificare che l’attrattore strano che stai osservando non sia un artefatto del tuo programma, scritto in BASIC. Ti prego poi di mettere a punto il mio circuito. In ogni caso, sono felicissimo che il mio diagramma e la curva che ho disegnato funzionino.

Voce Narrante: Come previsto da Chua, il Prof. Matsumoto continua a simulare il circuito su una vasta gamma di parametri, ma nonostante le sollecitazioni di Chua, il gruppo di Matsumoto non riesce a realizzarlo fisicamente, in quanto non aveva mai sintetizzato uno strumento con caratteristiche non lineari, come quello che sarà chiamato in seguito il diodo di Chua. Ma un primo passaggio verso la dimostrazione fisica del caos era stato fatto.

Atto III, scena 2

Voce narrante: Il Prof. Chua siede nel suo studio dell’Università di Waseda a riflettere. Sono passati alcuni mesi dalla realizzazione delle simulazioni di Matsumoto. Ma lui non è soddisfatto.

Prof. Chua: (Pensieroso) No, no. Non può finire così. Deve esserci una soluzione! Se Matsumoto non realizza il circuito, molti ricercatori sul caos diranno che due missioni importanti, che riguardano il chiarimento di alcuni punti ancora inadeguati delle Equazioni di Lorenz, non sono state ancora raggiunte. La prima missione è quella di sviluppare un sistema di laboratorio che possa essere realisticamente modellato dalle Equazioni di Lorenz.



Si, questo taglierebbe via ogni critica, perché dimostrerebbe che il caos è un fenomeno fisico robusto, e non un mero programma di computer. La seconda missione è quella di provare che l'Attrattore di Lorenz, ottenuto da una simulazione al computer, è in verità caotico in un rigoroso senso matematico.

(Con enfasi) E Matsumoto, trovando gli attrattori caotici dal circuito di Chua, ha fornito una conferma numerica.

Voce narrante: Come deus ex machina, Cantor, Poincarè e Julia guardano la scena cercando di incitarlo in vario modo a muoversi, a prendere qualche decisione. Solo Lorenz resta imbronciato in disparte: la faccenda si sta facendo molto seria. La sua farfalla non avrà più un ruolo di primo piano se Chua costruisce il circuito fisico che dimostra sperimentalmente il caos. Le Equazioni di Lorenz corrono il rischio di non poter essere usate in contesti ingegneristici o in vari contesti applicativi. RISCHIANO di essere dimenticate.....

Cantor: (Come se volesse suggerire una strada da seguire) Se Matsumoto non ha le competenze per costruire il circuito, prova a farlo costruire a qualcun altro. Ci sarà pure qualcuno che riesce a farlo!

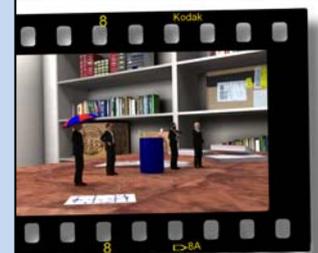
Poincarè e Julia: (insieme) Pensa a chi potrebbe farlo tra i tuoi colleghi, magari a Berkeley

Chua: Sì. Per dare completezza al quadro concettuale, è necessario che gli attrattori vengano osservati sperimentalmente. Ma come fare? Sicuramente bisognerà costruire il circuito fisico. (con forza e determinazione) Sì, è necessario costruire il circuito fisico.

Chiederò a Zhong e Ayrom, due colleghi dell'EECS di Berkeley, di creare il circuito per me. Gli scrivo subito una lettera per spiegargli il problema.

Cantor, Poincarè e Julia: (insieme) Sì, Sì, facciamo il tifo per te. Hai preso la decisione giusta.

Lorenz: (incerto) Mah,... Che posso dire. Forse conviene anche a me, dopotutto sono sempre io l'inventore del caos. E se viene confermato, è sempre di me che si parlerà come iniziatore. Sì, posso essere contento anch'io....



Voce narrante: Laboratorio di Elettronica non lineare a Berkeley. Studio del Prof. Zhong. E' presente anche il Prof. Ayrom.

Prof. Zhong: Caro Ayrom, ti ho convocato perché voglio leggerti la lettera del Prof. Chua, che mi è appena arrivata ed è indirizzata anche a te.

Prof. Ayrom: (con curiosità) L'ascolto volentieri.

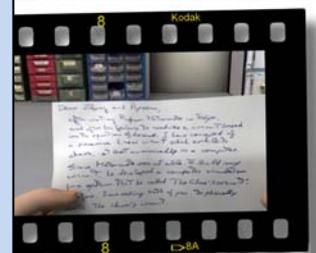
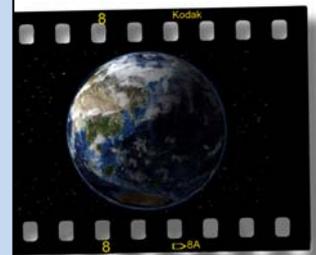
Prof. Zhong: La lettera inizia così:

“Cari colleghi,

dopo essere stato dal Prof. Matsumoto a Tokio, ed aver assistito al fallimento della realizzazione del circuito basato sull'equazione di Lorenz, ho elaborato una procedura di sintesi per sviluppare un circuito idoneo per la simulazione di fenomeni caotici. Il gruppo del Prof. Matsumoto, purtroppo, non è riuscito a realizzare lo strumento fisico, con le caratteristiche non lineari da me indicate, presenti nel modello che ho progettato. Ma ha comunque sviluppato una simulazione al computer, per un sistema che ha chiamato il “Circuito di Chua”, nel 1984. Per cui chiedo ad entrambi, confidando nel vostro interesse e nell'interesse del progresso scientifico, di costruire fisicamente il circuito di Chua. Vi accludo tutte le specifiche che il circuito dovrebbe avere. Sperando nella vostra collaborazione. Il vostro collega, Leon Chua”

Prof. Zhong: Che ne dici?

Prof. Ayrom: (con forza) Mi sembra una sfida veramente interessante. E mi fa piacere che Chua abbia pensato a noi. Mettiamoci subito al lavoro. Forse possiamo davvero farcela, se Chua ha progettato questo circuito, e Matsumoto ha realizzato una versione simulata, costruendo in qualche modo una procedura di sintesi che funziona, possiamo provare a realizzare il circuito fisico. Sarebbe veramente una rivoluzione scientifica.



Prof. Zhong: (eccitatissimo) Pensa, se la cosa funziona, saremo i primi a sperimentare con uno strumento fisico il caos, a vedere le sue forme, la sua evoluzione, a provare su diversi parametri. Chissà quanti comportamenti dinamici potremo osservare! E dalle altre informazioni tecniche che Chua ci ha inviato, mi sembra che il circuito sia molto semplice da costruire, a parte la componente non lineare, il diodo di Chua, che permette la realizzazione della curva lineare a tratti.

Atto III, scena 3

Voce narrante: Dopo qualche tempo, Chua torna a Berkeley e va a trovare i suoi colleghi, che nel frattempo hanno lavorato alla realizzazione del circuito. Finalmente ha ricevuto buone notizie. La sua progettazione di un circuito lineare del terzo ordine, con equazioni diverse da quelle di Lorenz, e con una componente non lineare, funziona davvero. Chua non sa se sentirsi felice o spaventato. Con il carattere ottimista che si ritrova. Opta per la felicità. Ripensa alla pietra immortale. Non ha fatto altro che fare quello che si doveva fare. Sì, in fondo aveva buttato dei semi nel giardino della scienza, che adesso stavano generando tenere piante da coltivare. Si aveva fatto quel che doveva essere fatto

Prof. Zhong: (compiaciuto e sornione) Accomodati Leon, vedrai, vedrai. Il tuo circuito è fantastico. Non ci abbiamo messo molto a costruirlo.

Prof. Zhong: (eccitatissimo) Pensa, se la cosa funziona, saremo i primi a sperimentare

Prof. Chua: (ansioso, ma nello stesso tempo soddisfatto) Ma funziona davvero? Come mi hai scritto? È davvero tutto a posto

Prof. Zhong: Sai, abbiamo avuto qualche problema a costruire il diodo... Forse con l'avvento di sistemi più sofisticati, questo non sarà più un problema. Ma per adesso funziona, e come se funziona. Vedrai, abbiamo anche realizzato la prima strada al caos che ci mostra i cambiamenti qualitativi del sistema dinamico, lungo l'asse del parametro R. È una esperienza fantastica.

Prof Chua: Dove avete organizzato l'esperimento? Riusciamo a vedere qualcosa questa mattina?



Prof. Zhong: Sì, andiamo nel laboratorio. Ayrom sta approntando la sperimentazione da farti vedere. Andiamo.

Voce narrante: Si muovono verso il laboratorio, dove un Ayrom raggante li sta aspettando per avviare la sperimentazione e l'osservazione del chaos dal circuito di Chua.

Prof. Ayrom: (con grande entusiasmo) Carissimo Leon, abbiamo realizzato il più semplice circuito elettronico che mostra il caos, o meglio, il fenomeno delle biforcazioni. Sicuramente diventerà un sistema di enorme importanza, un paradigma nello studio dei fenomeni complessi, non periodici dei circuiti non lineari. E poi, la grande novità, rispetto all'attrattore di Lorenz. Il circuito di Chua manifesta una vasta varietà di fenomeni complessi, ed è anche semplice da costruire.

Prof. Zhong: Sì, il circuito diventerà il paradigma per dimostrare le dinamiche caotiche.

Prof. Chua: (felice) Sono veramente entusiasta del vostro lavoro colleghi, adesso è necessaria soltanto una conferma matematica del circuito di Chua, per dimostrare che il caos è un fenomeno scientifico di grande rilievo. La realizzazione del circuito fisico avrà una grande importanza nella storia del pensiero scientifico. Potremo costruire sistemi che controllano il caos. Non riesco ad immaginare questo. Ma è il futuro...

Voce narrante: Tutti e tre si siedono davanti all'oscilloscopio per osservare le dinamiche caotiche dal circuito di Chua. In tal modo, i Professori Zhong & Ayrom diventano i primi ricercatori ad avere documentato sperimentalmente e osservato il chaos dal circuito di Chua.

In questo modo inizia la storia del circuito di Chua.



7.2.4. Atto IV



Il quarto e ultimo atto del film si apre con alcune inquadrature del giardino di Waseda mentre un temporale cede repentinamente il posto al sole. In questo contesto Cantor, Lorenz, Poincaré e Julia si trovano a discutere sui risultati tramite cui Chua è finalmente riuscito a provare l'esistenza fisica del Caos.

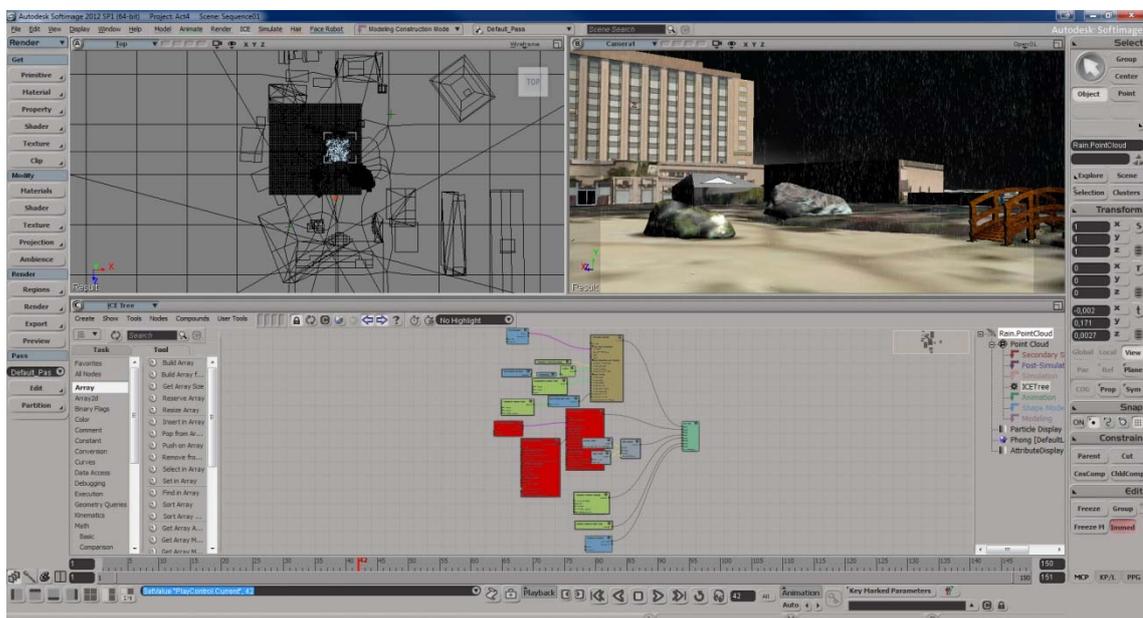
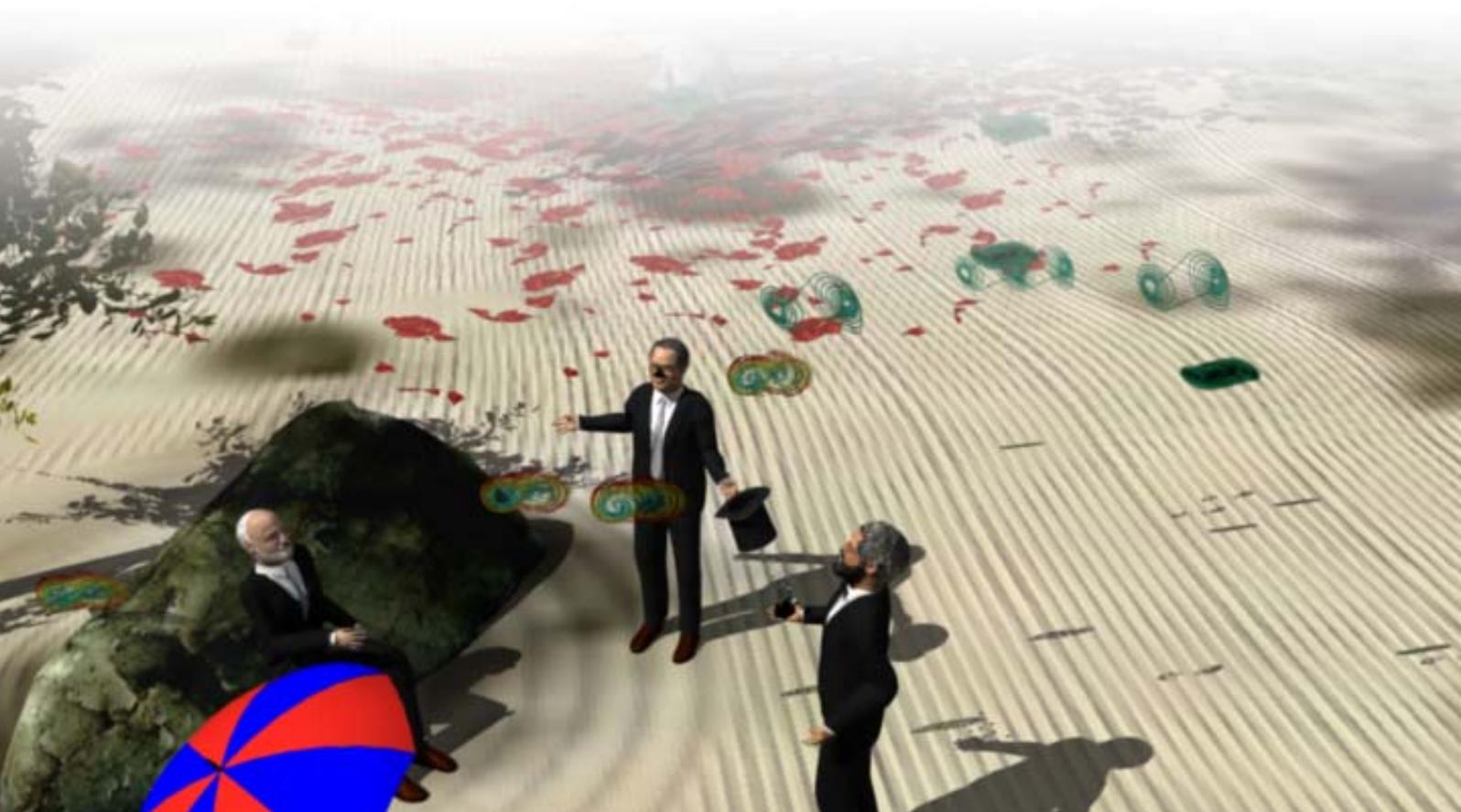


Fig. 48 Programmazione della pioggia nel giardino di Waseda con il modulo ICE.

Cantor, seduto sulla pietra immortale, sottolinea l'importanza dell'evento sottolineando che "ciò che doveva essere fatto è stato fatto". Finalmente l'osservazione delle dinamiche caotiche non è più una mera astrazione matematica e un altro passo era stato fatto nella comprensione dell'universo che ci circonda. Intanto, Lorenz esprime il

proprio rammarico per il fatto che dopo una scoperta di tale importanza, probabilmente di lì a poco, sarebbero stati creati degli strumenti in grado di controllare il Caos e l'interesse per quella disciplina sarebbe lentamente andato a sfumare. Egli rimane comunque consapevole di essere stato colui che, grazie alle proprie intuizioni, è riuscito a inventare un modo nuovo di intendere la natura. Poincaré cerca di consolare Lorenz dicendogli che probabilmente anche le sue equazioni un giorno avrebbero trovato una conferma fisica e che nonostante esse dessero la possibilità di esibire una gamma ristretta di comportamenti caotici, egli poteva continuare a considerarsi a pieno titolo uno dei Padri Fondatori della teoria del Caos. In fine, Julia sottolinea l'importanza scientifica che, grazie alla vasta gamma di dinamiche osservabili, il circuito di Chua avrebbe avuto nello studio del Caos.

Immersi nell'armonia della natura essi si interrogano sui prossimi passi e sui risultati che le ricerche future avrebbero potuto ottenere beneficiando di questa scoperta. Il film si conclude con Julia che si toglie il cappello a cilindro dalla testa e fa uscire da esso, come se fosse un prestigiatore, un gran numero di figure frattali che iniziano a riempire l'ambiente volteggiando liberamente nell'aria.



Atto IV

Voce narrante: Giardino dell'Università di Waseda, Tokio. Tuoni e fulmini . Poi un improvviso chiarore.

Entrano: G. **Cantor**, G. **Julia**, E. N. **Lorenz** e H. **Poincarè**.

Cantor: (seduto sul sasso immortale, a sinistra del ponticello, come cantando una canzone, con voce armoniosa) Sì, quel che si doveva fare è stato fatto. La dimostrazione sperimentale e l'osservazione delle dinamiche del caos si sono concretizzate. Si è compiuto un altro passo verso la conoscenza della Natura. (con enfasi) Sì, quel che si doveva fare è stato fatto.

Lorenz: (con nostalgia) Adesso le simulazioni del caos non saranno più di moda..... Da adesso in poi, si potrà controllare il caos, La mia farfalla, chissà dove volerà. Eppure avevo scoperto l'”essenza del caos”, avevo inventato un nuovo modo di pensare alla Natura, al mondo fisico e a noi stessi. (apre il suo ombrello, questa volta perché sta piovendo davvero).

Poincarè: Dai Lorenz, non essere triste. Forse qualcuno troverà una dimostrazione fisica anche per le tue equazioni. Tutto è possibile. Sai le cose cambiano.... E poi, anche se l'attrattore di Lorenz ha solo due o tre comportamenti caotici, tu poi sempre considerarti il padre fondatore della scienza del caos.

Julia: Adesso è possibile esplorare complesse dinamiche negli spazi dei parametri, seguire infinite strade al caos. Adesso è possibile avere tanti infiniti, che danno inizio a nuovi infiniti, in un infinito divenire.

Narratore: E Julia, come un abile prestigiatore, prende un cilindro e comincia a tirare fuori migliaia di attrattori, tutti prodotti dal circuito di Chua, che come colombe, si librano nel cielo per formare un universo multidimensionale di forme, in numerosi infiniti dimensionali.



7.3. La visualizzazione stereoscopica

Il funzionamento della visione binoculare è stato sin dall'antichità oggetto di studio da parte di scienziati e artisti tra cui possiamo citare Euclide e Leonardo da Vinci. È ormai noto che la percezione stereoscopica viene elaborata dalle cellule binoculari corticali del lobo occipitale e si basa su i seguenti fenomeni:

- **Percezione simultanea** - ovvero la percezione simultanea da parte dei due occhi di due immagini leggermente diverse tra loro.
- **Fusione (visione binoculare)** - la quale avviene ad un livello superiore rispetto al fenomeno precedente e presenta sia una componente motoria, che implica l'azione dei muscoli oculari per il puntamento degli assi visivi su un oggetto, che una sensoria, ovvero la capacità del cervello di formare una singola rappresentazione visiva da due immagini retiniche lievemente differenti tra loro.
- **Stereopsi** - è la capacità percettiva al livello più alto del processo e permette al cervello di sfruttare la disparità dovuta al posizionamento strutturale degli occhi per ottenere informazioni sulla profondità e sulla posizione spaziale degli oggetti.

Queste particolari funzioni si sviluppano nell'uomo sin dall'infanzia, comparendo tra il terzo e il quarto mese di vita, per arrivare al pieno sviluppo intorno ai sei/sette anni.

Le tecnologie per realizzare immagini stereoscopiche sono note da secoli, infatti, risalgono al 1832 le invenzioni di Charles Wheatstone, autore di un trattato sulla visione binoculare, che permettevano di percepire la profondità di una scena guardando un disegno o una fotografia. Nel 1838, Wheatstone presenta il primo stereoscopio alla Royal Society di Londra, col quale non ottenne il successo sperato essendo lo strumento troppo complesso, ingombrante e, per tanto, scomodo. Alla fine dell'Ottocento, dopo un breve periodo di successo, per lo stereoscopio inizierà una fase di declino causato principalmente dalla nascita del cinema.

Solo in tempi molto recenti, a partire indicativamente dal 2003, assistiamo ad un rinnovato interesse nei confronti della visualizzazione stereoscopica in quanto, grazie alle sempre crescenti innovazioni e all'abbattimento dei costi dei dispositivi, queste tecnologie sono arrivate finalmente alla portata di tutti.

Sulla scia dell'ormai crescente utilizzo delle tecniche di stereoscopia all'interno delle produzioni cinematografiche e video ludiche, è stato pensato di realizzare una versione stereoscopica di alcune sequenze del film "The genesis of Chua's circuit".

A tale scopo, le scene sono state rimaneggiate e al loro interno, la telecamera virtuale è stata sostituita con un sistema di due telecamere opportunamente collegate tra di loro in modo da simulare la visione stereoscopica umana. La struttura così creata si compone di due telecamere collegate con una catena cinematica diretta a un terzo oggetto che servirà per muoverle insieme nello spazio. Entrambe le telecamere sono vincolate nella rotazione ad un oggetto che fungerà da bersaglio in modo da essere puntate simultaneamente e in maniera intuitiva su un preciso punto dello spazio virtuale

in cui la scena si svolge. Questo oggetto-bersaglio, tecnicamente detto “target”, farà in modo che le telecamere non rimangano parallele e quindi siano leggermente ruotate l’una verso l’altra di un angolo che dipenderà dalla distanza del target dalle telecamere stesse. In questo modo, tanto più sarà vicino l’oggetto inquadrato alle telecamere, tanto più le telecamere saranno ruotate l’una verso l’altra in maniera analoga a quanto avviene per la visione umana. L’effetto che si ottiene è quello di percepire la fuoriuscita dallo schermo degli oggetti che si trovano tra il target e il punto di vista, mentre quelli oltre il target sembrano sprofondare nello schermo.

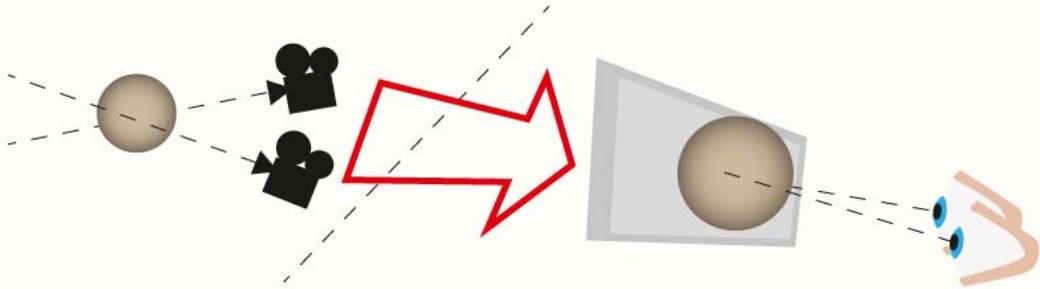


Fig. 49 Rappresentazione schematica della ripresa per la visione stereoscopica.

Per effettuare riprese reali in stereoscopia, la struttura portante delle telecamere deve fare in modo che la distanza tra un punto di ripresa e l’altro sia compreso tra 5,5 e 7,5 cm analogamente alla distanza interpupillare umana, per cui, all’interno delle scene 3D in cui non vengono usate unità di misura standard, le due telecamere sono state poste alla medesima distanza degli occhi di uno dei personaggi. Il risultato finale può essere fruito tramite differenti tecnologie esportando il video con i fotogrammi corrispondenti ai due oculari affiancati. Come conseguenza di questa operazione, il video ottenuto avrà una risoluzione orizzontale doppia rispetto al singolo frame.

Gli attuali dispositivi per la visione stereoscopica permettono di ottenere da questo tipo di video l’effetto di profondità utilizzando differenti tecnologie. In genere esse fanno uso di appositi occhiali che possono essere distinti in attivi e passivi. Gli occhiali usati per la stereoscopia passiva sono in grado di filtrare alcune bande cromatiche, per cui, il dispositivo di proiezione crea due immagini sovrapposte dividendo l’intero frame in due e applicando il filtro complementare corrispondente al singolo oculare su ognuna di esse. Tra le tecnologie impiegate per la stereoscopia passiva, le più diffuse sono:

- **l’anaglifo** - si compone di due immagini stereoscopiche monocromatiche, ognuna delle quali è caratterizzata da una dominante di un colore differente. Le due immagini sono sovrapposte sul medesimo supporto. I filtri degli occhiali per anaglifi sono normalmente montati su degli occhialini di cartone e hanno le lenti di colori diversi. In genere, i colori utilizzati sono: il rosso, il verde, il blu e i loro colori complementari: ciano, magenta e giallo. Le coppie di colori devono essere scelte con il vincolo che uno stesso colore, dal punto di vista della mescolanza additiva, non sia

presente su entrambe le immagini (per esempio, rosso e magenta non possono essere accoppiati).

- **la polarizzazione** – è un sistema molto più complesso del precedente e utilizza due proiettori le cui lenti sono dotate di filtri polarizzatori orientati ortogonalmente l'uno rispetto all'altro. Lo spettatore utilizza degli occhiali con due lenti anch'esse polarizzate che fanno sì che ogni occhio percepisca solo l'immagine ad esso destinata. Gli svantaggi di questo sistema sono da individuare principalmente nel costo, in quanto esso necessita di proiettori, schermi e occhiali appositi, anche se il risultato è nettamente superiore all'anaglifo in quanto permette una buona resa delle immagini a colori e una sensazione di profondità maggiore.
- **l'Infitech** – è l'acronimo di “interferenz filter technik” e si basa sul principio della tricromia, in base al quale, ogni colore può essere riprodotto miscelando tre colori primari. Questa tecnica utilizza sorgenti che emettono luce con una lunghezza d'onda compresa in una banda nell'intorno del massimo di sensibilità dei fotorecettori retinici. Il sistema utilizza due terne di primari colorimetrici diverse tra loro per rappresentare la stessa scena e ogni terna viene associata ad una delle due componenti della coppia stereoscopica. Il costo del sistema è considerevole, in quanto esso necessita di appositi proiettori che filtrano l'immagine tramite filtri dicroici, i quali sono caratterizzati da un'elevata trasparenza nella banda passante, da un'elevata opacità nella banda attenuata e da una ridottissima banda di transizione. Queste caratteristiche, permettono una visione stereoscopica di altissima qualità.

Nel caso della stereoscopia attiva, l'immagine, come avviene per la stereoscopia passiva, viene divisa in due immagini e i fotogrammi così ottenuti vengono proiettati in maniera alternata al doppio della frequenza dei normali video. Questo sistema fu inventato da Laurens Hammond e William F. Cassidy nel 1922, e brevettato con il nome di Teleview. Esso richiede display ad alta frequenza, in genere a 120 Hz, e particolari occhiali a cristalli liquidi in grado di fungere da otturatori che oscurano alternatamente la visuale di ciascun occhio in maniera sincrona alla frequenza di proiezione delle immagini.

Esistono sistemi detti auto-stereoscopici nei quali, a differenza della stereoscopia classica, l'immagine tridimensionale può essere osservata senza essere vincolati all'uso di altri dispositivi quali gli occhiali, poiché il supporto, che può essere stampato su carta o monitor, è munito di un particolare sistema lenticolare che provvede già da sé a nascondere ad ogni occhio l'immagine destinata all'altro. I sistemi auto-stereoscopici possono essere basati su:

- **Reti lineari e lenticolari** - il sistema, inventato nel 1908 da Gabriel Lippmann, è costituito da una rete di lenti che indirizzano a ciascun occhio una combinazione di immagini riprese da più punti di vista. L'immagine così osservata viene ricostruita dal cervello formando un'unica immagine tridimensionale.

- **Barriera di parallasse** - utilizzata nel video, il suo principio è essenzialmente lo stesso dell'auto-stereoscopia a rete lenticolare, al cui posto un filtro che fa da barriera, distribuisce in alternanza i punti di vista destinati all'uno o all'altro occhio. Questa tecnologia è applicata a monitor LCD, in modo tale da permettere una visione stereoscopica senza l'ausilio di apparati esterni come occhialini o visori.

Una categoria a sé stante è quella dei sistemi auto-stereoscopici a illuminazione, i quali si basano sull'olografia. Questa tecnologia prevede la memorizzazione di una informazione ottica sotto forma di un finissimo intreccio di frange di interferenza con impiego di luce laser coerente. Il sistema olografico è stato teorizzato dallo scienziato ungherese Dennis Gabor che realizzò semplici ologrammi utilizzando la luce "verde" dello spettrogramma di una lampada a vapori di mercurio. essa non ebbe applicazioni significative fino all'introduzione del laser negli anni sessanta, quando iniziò lo sviluppo di varie tecniche di registrazione olografica grazie ai contributi di Emmett Leith e Juris Upatnieks, Yuri Denisyuk e George Stroke.

Conclusioni e sviluppi futuri

Tra gli sviluppi futuri vi è quello di fornire strumenti innovativi per la divulgazione scientifica basati su tecnologie e rappresentazioni grafiche coadiuvate dalle moderne tecnologie di sviluppo di interfacce user-friendly. L'obiettivo può essere raggiunto soprattutto attraverso la realizzazione di programmi interattivi 3D fruibili anche da web che consentano di effettuare esperimenti su una piattaforma che simuli i comportamenti elettronici del circuito di Chua.

Sono state già gettate le basi per la realizzazione di un simulatore 3D che consente di montare il circuito di Chua e di effettuare i test realizzato in Unity3D. Grazie a questo simulatore l'utente avrà la possibilità di ricreare il circuito in base a degli schemi proposti in un laboratorio virtuale e di testarne l'efficienza senza dover reperire i componenti fisici e senza avere grosse competenze in campo elettronico. Il sistema potrà essere utilizzato come mezzo divulgativo e potrà essere utilizzato anche via internet. A quanto detto si vanno ad aggiungere la componente video ludica come ulteriore stimolo all'apprendimento e la possibilità di poter esportare il simulatore su piattaforme Windows, Android e IOS rendendone possibile l'utilizzo sia da PC, sia da tablet, sia da smartphone.

Per quanto concerne la realizzazione di video a scopo divulgativo, ci si pone l'obiettivo di ottenere maggior realismo nelle scene grazie all'impiego del motion capture, per ottenere maggiore realismo nelle animazioni dei personaggi, le quali risultano troppo meccaniche a causa della complessità delle scene e della durata complessiva del film. Tale obiettivo si può raggiungere affinando la ricerca sulle modalità di utilizzo di strumenti a basso costo attualmente utilizzati per il motion capture in campo video ludico come Kinect per Xbox360. Il sistema, originariamente noto come progetto Natal, a differenza dei controlli Wiimote di Nintendo e PlayStation Move di Sony, è in grado di percepire il movimento del corpo umano consentendo all'utente di interagire con il sistema senza dover indossare o impugnare alcun tipo di attrezzatura. La ricognizione del movimento avviene tramite una telecamera RGB e a un doppio sensore di profondità a raggi infrarossi accoppiato ad una seconda telecamera sensibile alla medesima banda. Da quanto detto fin ora, emerge la possibilità di utilizzare lo strumento Kinect al fine di catturare i movimenti eseguiti da attori e caricarli sugli avatar 3D per ottenere movimenti dei personaggi più naturali tramite apparecchiature a basso costo.

Sempre nell'ambito della divulgazione di contenuti complessi attraverso le tecnologie grafiche, grazie ad alcuni esperimenti di rendering eseguiti con motori basati su radiosity, in particolare Pov-ray, è stato possibile riprodurre il comportamento dei meta-materiali, ovvero, materiali creati artificialmente e dotati di particolari caratteristiche elettromagnetiche. In questi materiali si verifica che l'indice di rifrazione, dato dal rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e velocità della radiazione nel mezzo, in natura sempre positivo, diventa negativo, col risultato che la luce che colpisce l'oggetto viene deviata rendendo quest'ultimo invisibile.

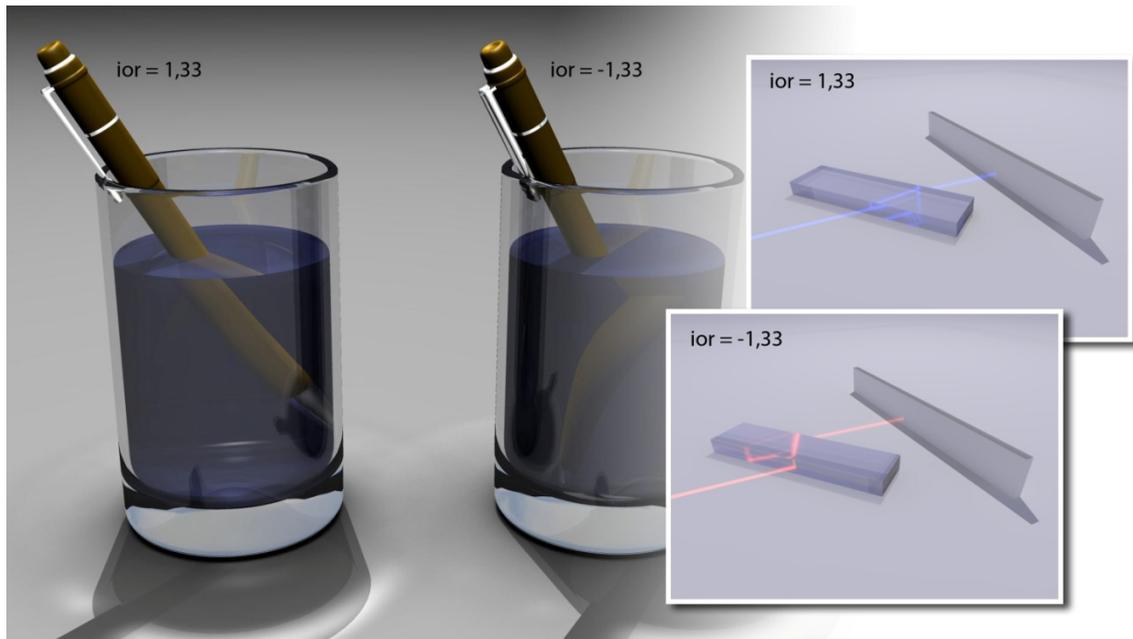


Fig. 50 Esempi di meta-materiali simulati con Pov-ray.

Pov-ray è un motore di rendering open-source sprovvisto di interfaccia grafica basato su algoritmi Radiosity. Questa caratteristica, se da un lato può determinare un grosso ostacolo in quanto gli oggetti e le caratteristiche della scena virtuale possono essere definiti esclusivamente tramite codice, dall'altro consente una gestione molto accurata della scena 3D grazie alla gestione diretta delle proprietà degli shaders. Una volta definite le variabili globali per l'illuminazione, vengono creati degli oggetti ai quali viene assegnata la caratteristica di medium in grado di interferire con il percorso dei fotoni emessi da una sorgente luminosa che simula un laser. I rendering così ottenuti sono molto esplicativi, in quanto permettono di osservare in che modo la luce viene deviata da questi particolari oggetti.

Bibliografia

- Aldrich, C., (2005). *Learning by Doing*, San Diego: Pfeiffer. ISBN 978-0-7879-7735-1
- Amoroso, L., (2000). *Ratio & Aesthetica*, ETS, Pisa, pp. 24-25.
- Annunziato, M. (1998). *Caos, Complessità ed Auto-Organizzazione: Una provocazione al confine tra scienza, tecnologia e cultura*, (ENEA, Dipartimento Energia)
- Bell, J.A., (2004). *3Ds max 6 alla massima potenza*, Mondadori Informatica.
- Bertacchini, F., Bilotta, E., Laria, G., & Pantano, P.S., (2013). *The genesis of Chua's circuit: Connecting Science, Art and Creativity (with a 3D movie)*, In Adamatzky A. & Chen W. (Eds.), *Chaos, CNN, Memristors and Beyond*. Singapore: World scientific.
- Bilotta, E., Bertacchini, F., Laria, G., Pantano, P., & Tavernise, A. (2011). *Virtual Humans in Education: some implementations from research studies*, Atti della EduLearn2011 Conference -IATED, 4-6 Luglio, 2011, Barcellona - Spagna. In L. Gómez Chova, D. Martí Belenguer, A. López Martínez (Eds.) (pp. 6456 - 6464).
- Bilotta, E., Bossio, E., Pantano, P. S. (2010). *Chaos at school: Chua's circuit for students in junior and senior high school*, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 20(1), 1-28.
- Bilotta, E., Pantano, P. S., (2009). *Discrete Chaotic Dynamics from Chua's Oscillator: Chua Machines*, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 19, n. 1, pp. 1-115, World Scientific Publishing Company.
- Bossio, E., Rizzuti, C. (2009). *An Interactive virtual environment to learn Chaos*, *Proceedings of INTED2009 Conference*, 4531- 4538.
- Bilotta, E. & Pantano, P. (2008). *A Gallery of Chua's Attractors*, *World Scientific series on Nonlinear Science, Series A*, Vol.61.
- Bilotta, E., Pantano, P. S., Bertacchini, F., (2008). *Educational Virtual Scenario for Learning Chaos and Complex Theories*, *The International Journal of Virtual Reality*, 7(2), 19-26.
- Birn, J., Maestri, G. (2006). *Digital Lightning and Rendering*.
- Bischi, G. I., Carini, R., Gardini, L., Tent, P. (2003). *Sulle orme del Chaos*.
- Bourg, D.M. (2002). *Physics for game developers*, O'Reilly.

- Bransley, M. F., (2000). *Fractals Everywhere*, Morgan Kaufmann Publishers.
- Brottman, M. A. (1968). *A Multidisciplinary Approach to Education*, The Elementary School Journal, 68(4), 188-194.
- Card, S., Moran, T., & Newell, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*, Lawrence Erlbaum Associates.
- Casti, J. L. (1998). *I cinque di Cambridge*, Cortina Raffaello, Milano.
- Cavin, L., (2003). *Chaos and Fractals, a short trip in fractional dimensions*, © CSE
- Chang, M., Kuo, R., Kinshuk, Gwo-Dong, C., Hirose, M., (2009). *Learning by Playing. Game-based Education System Design and Development*, 4th International Conference on E-Learning and Games, Edutainment
- Chua, L. O. (1983). *The genesis of Chua's circuit*, Archiv fur Elektronik und Uebetragungstechnik, 46(4), 250-257.
- Chua, L. O. (1992b). *A zoo of strange attractors from the canonical Chua circuits*, Proc. 35th Midwest Symp. Circuits and Systems, 916–926.
- Cutri, G., Naccarato, G., Pantano, E., (2008). *Mobile Cultural Heritage: The case study of Locri*, Lecture Notes on Computer Science, 2008, Vol. 5093, pp. 410-420.
- Dempski, K., (2002). *Real Time Rendering Tricks and Techniques in DirectX*, Muska & Lipman/Premier-Trade.
- Gandhi, G., Cserey, G., Zbrozek, J. & Roska, T. (2009). *Anyone can build Chua's circuit: Hands-on experience with chaos theory for high school students*, Int. J. Bifurcation and Chaos 19.
- Catmull, E., Clark, J., (1978). *Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes*, Computer Aided Design, 10(6).
- Eco, U., (1964). *Apocalittici e integrati*, Bompiani, Milano.
- Eco, U., (1972). *Estetica e teoria dell'informazione*, Bompiani, Milano.
- Fiotti, F., *Il Poème électronique, un'opera d'arte totale e il suo contenitore*.
- Garton, A. F., (2007). *Learning through collaboration: Is there a multicultural perspective?*, AIP. pp. 195–216.
- Gleick, J., (1987). *Chaos: Making A New Science*.
- Hamilton, J., (1990). *Effetti Speciali*, De Agostani, Milano.

- Huizinga, J., (1938). *Homo ludens*, traduzione di Corinna von Schendel, Milano: Il Saggiatore, 1967.
- Kerlow, I., (2002). *The art of 3D Computer Animation and Effects*.
- Klir, G.J., (1991). *Facets of Systems Science*, Plenum Press.
- Langton, C., (1992). *Vita Artificiale*, Sistemi Intelligenti / a.IV n.2.
- Lasseter, J., (1987). *Principles of Traditional Animation Applied to 3D Computer Animation*, Proc. ACM Siggraph: Computer Graphics, vol. 21, no. 4.
- Livio, M., (2003). *La sezione aurea*.
- Livio, M., (2005). *L'equazione Impossibile*.
- Lorenz, E. N., (1963). *Deterministic Nonperiodic Flow*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 20, 130-141.
- Lorenz, E.N., (1993). *The Essence of Chaos*. University of Washington Press, Seattle.
- Mandelbrot, B. B., (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman & Co; ISBN 0-7167-1186-9.
- Mazzeo, F., (1997). *Architettura al calcolatore*, Computer Grafica Tecniche & Applicazioni, Anno III, Fascicolo 8.
- McLuhan, M., (1964). *Understanding Media: The Extensions of Man*, New York, New American Library (trad. it. di E. Capriolo, *Gli strumenti del comunicare*, Milano, Il Saggiatore, 1999, pp. 15-30)
- Moler, C., (2011). *Experiment with Matlab*.
- Newell, A. C. S., (1985). *The prospects for psychological science in Human Computer Interaction*, *Human-Computer Interaction* , 1 (3), p. 209-242.
- Papert, S., (1980). *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*.
- Peitgen, H. O., Richter, P. H., (1986) *The Beauty of Fractals*, Springer-Verlag. Alemania.
- Preece, J. R. Y., (1994). *Human Computer Interaction*, Addison-Wesley.
- Robertson, B., *Come nei Film*, CG Computer Gazette, Anno XIX, Numero 10, Ottobre 2004, pp. 40-43.
- Sala, N., Cappellato, G., (2003). *Architettura della Complessità. La geometria frattale tra arte, architettura e territorio*.

- Salingaros, N. A., (2000). *Structure of Pattern Languages*, Architectural Research Quarterly, Vol. 4 pp. 149-161.
- Sanna, A., Zumino, C., (2002). *La Realtà Virtuale e il Commercio Elettronico: le tecnologie per portare il 3D sul Web*, Virtuality 2002.
- Siddi, F., (2011). *Cinema Stereoscopico*.
- Scotti, F., Matlab, *Modelli e realtà virtuale*.
- Shneiderman, B., (1983). *Direct Manipulation: A Step Beyond Programming Languages*, IEEE computer , 16 (8), p. 57-69.
- Soro, A., (2008). *Human Computer Interaction*, Monza: Polimetrica International Scientific Publisher.
- Stanco, F., Tanasi, D., Gallo, G., (2010). *Virtual Restoration of Fragmented Glass Plate Photographs of Archaeological Repertoires*, in *Arqueologica 2.0, II International Meeting on Graphic Archeology and Informatics, Cultural Heritage and Innovation Arqueológica 2.0*, Sevilla.
- Williams, K., (2005). *Architettura e matematica: mille anni di motivi geometrici*, Nexus Network Journal.
- Wolfram, S., (1986). *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific Press

Sitografia

<http://bridgesmathart.org/>
<http://complexityinstitute.wordpress.com/2012/01/02/auto-organizzazione/>
<http://comuneblog.wordpress.com/2011/04/06/il-pollock-frattale/>
<http://cse.cavin.name/fractals.html>
<http://digilander.libero.it/pnavato/frattali/>
http://gmitalia.altervista.org/gmi_forum/
<http://mathworld.wolfram.com/StrangeAttractor.html>
<http://museomg.unical.it/scienar/>
<http://plus.maths.org/content/perfect-buildings-maths-modern-architecture>
<http://unity3d.com/support/>
<http://www.archimagazine.com/afrattai.htm>
<http://www.archweb.it/frattali/frattali.htm>
<http://www.autodesk.it/adsk/servlet/index?siteID=457036&id=12152123>
<http://www.ba.infn.it/~zito/dba.html>
<http://www.edharriss.com/>
<http://www.edu.vrmmp.it/vep/>
<http://www.eos.ubc.ca/~rich/map.html>
<http://www.fractal-landscapes.co.uk/photos.html>
<http://www.lescienze.it/topics/news/metamateriali-1149859/>
<http://www.mathworks.com>
<http://www.marcostefanelli.com/subliminale/frattalimat.htm>
<http://www.panebianco3d.com/>
<http://www.planetside.co.uk/content/view/15/27/>
<http://www.tomshw.it>
http://www.xlab.it/mat_didattico/Storia_CG
<http://www.wikipedia.org>

Indice delle immagini

Fig. 1	Rappresenstazione 3D del Triangolo di Sierpinsky.	10
Fig. 2	Pollock, <i>Enchanted Forest</i> , (particolare),1947.	13
Fig. 3	Il Pentalfa.	15
Fig. 4	Oscar Niemeyer - <i>Chiesa di Pamphula</i> .	16
Fig. 5	Particolare dell'interno e visuale esterna del padiglione Philips.	17
Fig. 6	Frank o. Gehry - Particolare del <i>Guggenheim</i> di Bilbao.	18
Fig. 7	Esempi di frattali biomorfi.	23
Fig. 8	Alberi creati con frattali che sfruttano il condensing.	23
Fig. 9	<i>Fontana antigraavitazionale</i> , Manolis Maridakis, 1992.	25
Fig. 10	Ricostruzione virtuale della mostra " <i>Dall'ordine al Chaos</i> " (2010).	26
Fig. 11	Luxo Jr., 1986.	28
Fig. 12	Autosimilarità nel pattern di Mandelbrot.	29
Fig. 13	Ricostruzione del tempio di Hera Lacinia (2005).	36
Fig. 14	Ricostruzione della città di Locri.	36
Fig. 15	Ricostruzione 3D del Castello Svevo di Cosenza.	37
Fig. 16	Ricostruzione 3D del parco archeologico di Iuvanum.	37
Fig. 17	Gli studenti mentre usano il software Chaos Explorer.	38
Fig. 18	La "felce di Bransley" al confronto con l' <i>Asplenium adiantum-nigrum</i> .	40
Fig. 19	Il gioco "Game of life" di J. Conway (1970).	40
Fig. 20	Esempio di ciclo limite: L'oscillatore di van der Pol.	42
Fig. 21	Chua alle prese con le equazioni e l'attrattore di Lorenz.	43
Fig. 22	" <i>Vol Libre</i> " di Loren Carpenter (1980).	45
Fig. 23	Terreno generato dalle mappe di biforcazione.	46
Fig. 24	L'interfaccia del software ChuaExplorer.	47
Fig. 25	Terreno generato in Unity3D partendo da una mappa di biforcazione.	48
Fig. 26	Scema del circuito di Chua.	50
Fig. 27	Esempi di riduzione poligonale.	52
Fig. 28	Ricostruzione dell'avatar del Professor Chua da fotografie.	53
Fig. 29	Modellazione 3D con Subdivision-surfaces.	54
Fig. 30	I capelli dei personaggi realizzati con l'uso di guide-lines.	55
Fig. 31	Applicazione della texture del volto di Chua tramite UVmapping.	57
Fig. 32	Rig del modello antropomorfo.	58
Fig. 33	Azione sull'oggetto di controllo delle dita e sui target degli occhi.	59
Fig. 34	Visualizzazione delle f-curves dell'animazione di una parte dello scheletro.	60
Fig. 35	Stati differenti della mesh, utilizzati per le espressioni facciali.	61
Fig. 36	Ricostruzione dell'esterno dell'università di Berkeley.	62
Fig. 37	Edificio realizzato ispirandosi al pattern di Mandelbrot.	63
Fig. 38	Simulazione della pioggia realizzata con il modulo ICE di Softimage.	64
Fig. 39	Schema di funzionamento del rendering distribuito.	67
Fig. 40	Georg Cantor (1845 - 1918).	73

Fig. 41	Edward N. Lorenz (1917 - 2008).	74
Fig. 42	Jules Henri Poincaré (1854 - 1912).	75
Fig. 43	Gaston Julia (1893 - 1978).	75
Fig. 44	Visuale dall'alto del ponte di legno nel giardino di Waseda.	81
Fig. 45	Particolare del laboratorio del Professor Matsumoto.	84
Fig. 46	Particolare del circuito realizzato dal Professor Matsumoto.	85
Fig. 47	Viste da diverse angolazioni della stanza del dormitorio di Waseda.	88
Fig. 48	Programmazione della pioggia nel giardino di Waseda con il modulo ICE.	100
Fig. 49	Rappresentazione schematica della ripresa per la visione stereoscopica.	104
Fig. 50	Esempi di meta-materiali simulati con Pov-ray.	108