

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

CAMPUS DI CESENA

SCUOLA DI SCIENZE

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE

INFORMATICHE

**ANIMAZIONE DI PERSONAGGI MEDIANTE  
CINEMATICA INVERSA  
IN MAYA**

Relazione finale in

**Metodi Numerici per la Grafica**

Relatore

**Dott.sa Damiana Lazzaro**

Presentata da

**Francesca Cangini**

I Sessione

Anno Accademico 2014-2015



努力の精神を養うこと  
Hitotsu! doryoku no seishin o yashinau koto!

“Maestro Gichin Funakoshi”



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1: COMPUTER GRAPHICS</b>	<b>3</b>
<b>1.1 LA COMPUTER GRAPHICS</b>	<b>3</b>
<b>1.2 BREVE STORIA</b>	<b>7</b>
<b>1.3 CRESCITA DELLA GRAFICA DIGITALE</b>	<b>9</b>
<b>1.4 SVILUPPO NEL CINEMA</b>	<b>11</b>
<b>CAPITOLO 2: ANIMAZIONE</b>	<b>15</b>
<b>2.1 CENNI STORICI</b>	<b>15</b>
<b>2.2 TECNICHE DI ANIMAZIONE E CLASSIFICAZIONI</b>	<b>17</b>
2.2.1 ANIMAZIONE TRADIZIONALE	17
2.2.2 ANIMAZIONE COMPUTERIZZATA	18
<b>2.3 PRINCIPI DELL'ANIMAZIONE</b>	<b>20</b>
2.3.1 SQUASH AND STRETCH	20
2.3.2 ANTICIPAZIONE	20
2.3.3 STAGING (MESSA IN SCENA)	21
2.3.4 AZIONE DIRETTA E AZIONE DA POSA A POSA	21
2.3.5 FOLLOW THROUGH AND OVERLAPPING ACTION	21
2.3.6 RALLENTAMENTO IN ENTRATA E IN USCITA	22
2.3.7 ARCHI	22
2.3.8 AZIONE SECONDARIA	22
2.3.9 TEMPORIZZAZIONE	23
2.3.10 ESAGERAZIONE	23
2.3.11 DISEGNO SOLIDO	23
2.3.12 ATTRATTIVA	23
<b>2.4 FIGURE ARTICOLATE</b>	<b>24</b>
<b>2.5 ANIMAZIONE COMPUTERIZZATA PER FOTOGRAMMI</b>	<b>26</b>
<b>2.6 CINEMATICA</b>	<b>29</b>
2.6.1 CINEMATICA DIRETTA	29
2.6.2 CINEMATICA INVERSA	30
<b>2.7 CONFRONTO TRA CINEMATICA DIRETTA E CINEMATICA INVERSA</b>	<b>33</b>
<b>2.8 ANIMAZIONE INTERATTIVA</b>	<b>35</b>
<b>2.9 DINAMICA DEI CORPI RIGIDI</b>	<b>36</b>
<b>2.10 ANIMAZIONE DINAMICA</b>	<b>38</b>
<b>2.11 ANIMAZIONE AUTOMATIZZATA</b>	<b>39</b>

<b>CAPITOLO 3: SOFTWARE UTILIZZATO</b>	<b>41</b>
<b>BREVE INTRODUZIONE A MAYA</b>	<b>41</b>
<b>3.1 INTERFACCIA</b>	<b>42</b>
<b>3.2 MODELLAZIONE</b>	<b>46</b>
<b>3.3 RENDERING</b>	<b>51</b>
<b>CAPITOLO 4: SVILUPPO DEL PROGETTO</b>	<b>53</b>
<b>4.1 IL PERSONAGGIO OLAF</b>	<b>53</b>
<b>4.2 SVILUPPO DEL PERSONAGGIO</b>	<b>53</b>
<b>4.3 COSTRUZIONE DELLA SCENA</b>	<b>57</b>
<b>4.4 MATERIALI IN MAYA</b>	<b>62</b>
<b>4.5 LUCI IN MAYA</b>	<b>63</b>
4.5.1 MODELLI LOCALI	63
4.5.2 MODELLI GLOBALI	63
4.5.3 PROPRIETÀ DELLA LUCE	64
4.5.4 OGGETTI LUCE	64
<b>4.6 ANIMAZIONE IN MAYA</b>	<b>65</b>
<b>4.7 RELAZIONI DI BASE DELL'ANIMAZIONI IN MAYA</b>	<b>66</b>
<b>4.8 SCENA FINALE</b>	<b>68</b>
<b>4.9 ALTRE IMMAGINI</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>77</b>
<b>INDICE FIGURE</b>	<b>79</b>
<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>83</b>

## INTRODUZIONE

Lo sviluppo di questa tesi è nato dalla mia volontà di intraprendere un cammino nel campo dell'animazione computerizzata e della grafica in generale.

L'idea è stata concretizzata grazie anche alla prof Damiana Lazzaro che ne ha permesso la realizzazione.

La tesi tratta in generale della nascita dell'animazione, del suo sviluppo, delle principali tecniche e ne applica i principi nella realizzazione di un'animazione.

Il progetto consiste nella modellazione di un personaggio di un cartone animato attraverso il programma Autodesk Maya, e nella sua successiva animazione, ossia nel rendere il movimento del personaggio in una scena realizzata sempre con gli strumenti di Maya.

Nel primo capitolo viene presentata una breve storia della computer grafica, come e dove è nata e i ricercatori che hanno contribuito a svilupparla. Si parla del suo sviluppo, di cortometraggi e film d'animazione che hanno reso possibile il suo sviluppo sia nel cinema, sia in altri settori. In breve vengono descritte anche alcune applicazioni e uno schema che racchiude i rami della grafica.

Nel secondo capitolo viene messa in rilievo una differenza tra animazione tradizionale e animazione computerizzata. Inoltre vengono elencati i principi cardini dell'animazione, particolare rilievo viene dato alle figure articolate e alle principali articolazioni importanti per l'animazione. Viene trattata la cinematica che permette lo studio del moto del corpo e viene descritta la differenza tra cinematica diretta e inversa, i tre approcci per utilizzarla e un confronto finale tra le due. Infine viene fatta una breve descrizione dell'animazione interattiva, della dinamica dei corpi e dell'animazione automatizzata.

Il terzo capitolo tratta del software utilizzato per la realizzazione del progetto Autodesk Maya. È stata inserita una breve guida base sugli strumenti di Maya.

Nel quarto capitolo vengono esposti i passi seguiti per la realizzazione del progetto. Il personaggio che è stato modellato è Olaf, il pupazzo di neve del film d'animazione Frozen. In questo capitolo vengono presentati anche i passi per lo sviluppo della scena, e le tecniche utilizzate per animare il personaggio.



# CAPITOLO I: COMPUTER GRAPHICS

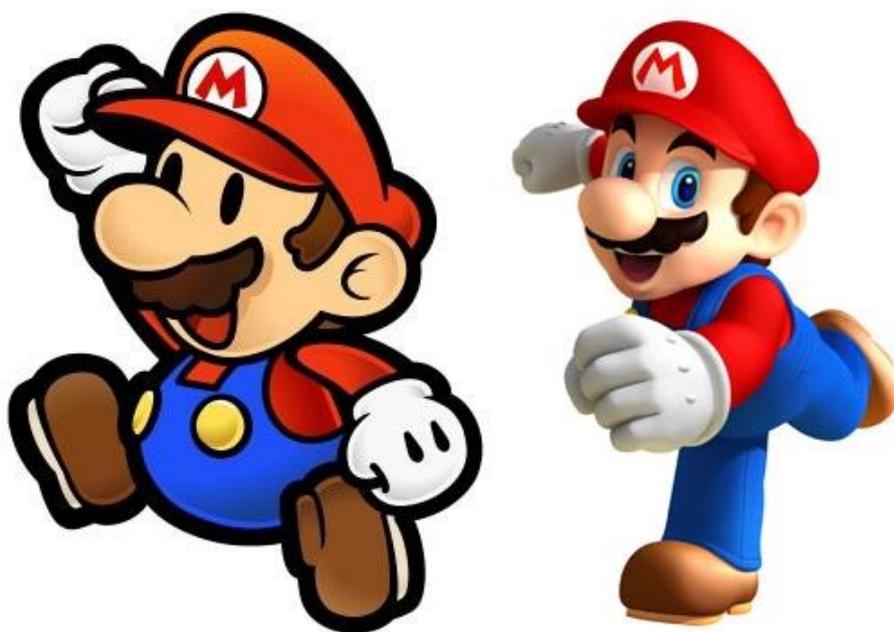
Nel primo capitolo viene affrontata una breve storia sulla computer grafica, dalla nascita ai primi sviluppi di cortometraggi. Inoltre viene fatta una panoramica sullo sviluppo della computer grafica nel cinema, negli anni '70, '80, '90 fino ai giorni nostri, citando le opere più importanti. Infine vengono citate alcune applicazioni grafiche.

## I.1 LA COMPUTER GRAPHICS

La prima grande divisione della grafica è di tipo dimensionale (*Figura 5*).

Grafica 2d: in questa categoria rientra tutta la grafica che utilizza due sole dimensioni, tipicamente lo spazio bidimensionale dello schermo. Esiste una corrispondenza biunivoca tra lo spazio da rappresentare e lo spazio fisico dello schermo.

Grafica 3d: si costruisce un modello tridimensionale e lo si proietta sullo spazio bidimensionale dello schermo. Le operazioni sono più complicate, ma i risultati sono più interessanti e ricchi di applicazioni. <sup>[4]</sup>



*Figura 1: 2d vs 3d*

Un'immagine al computer deve sembrare reale oppure può risultare artificiale. Gli algoritmi per ottenere immagini fotorealistiche sono computazionalmente onerosi. Invece per immagini non-fotorealistiche si possono ottenere buoni risultati con algoritmi semplici e veloci. Ad esempio i cartoni animati richiedono immagini non fotorealistiche, ma comunque onerosi in termini di algoritmi e di tempo (Figura 6).<sup>[4]</sup>

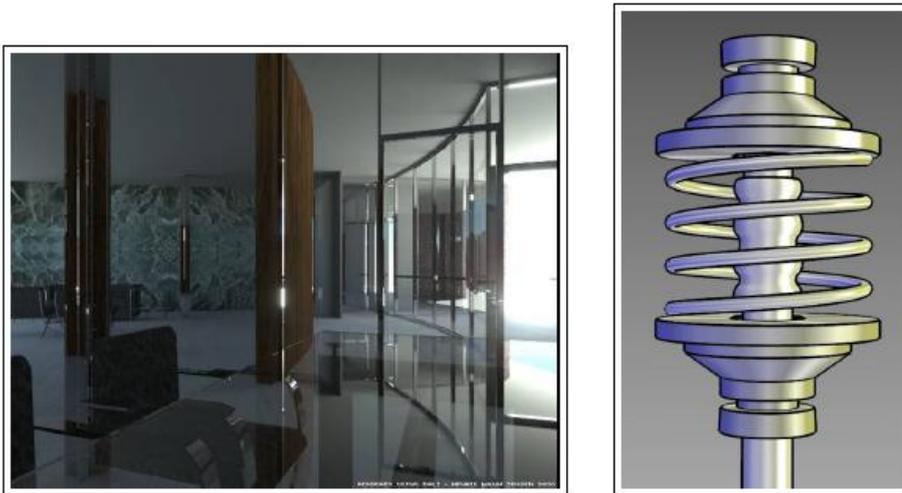


Figura 2: fotorealismo vs non fotorealismo

La grafica generata con un computer può essere più o meno interattiva, ossia può permettere o meno ad un operatore esterno di interagire in tempo reale con uno dei parametri della rappresentazione grafica (Figura 7). Nel caso di grafica interattiva si richiede una risposta in tempo reale, questo implica la necessità di hardware particolari e un modello semplificato di resa grafica.<sup>[4]</sup>

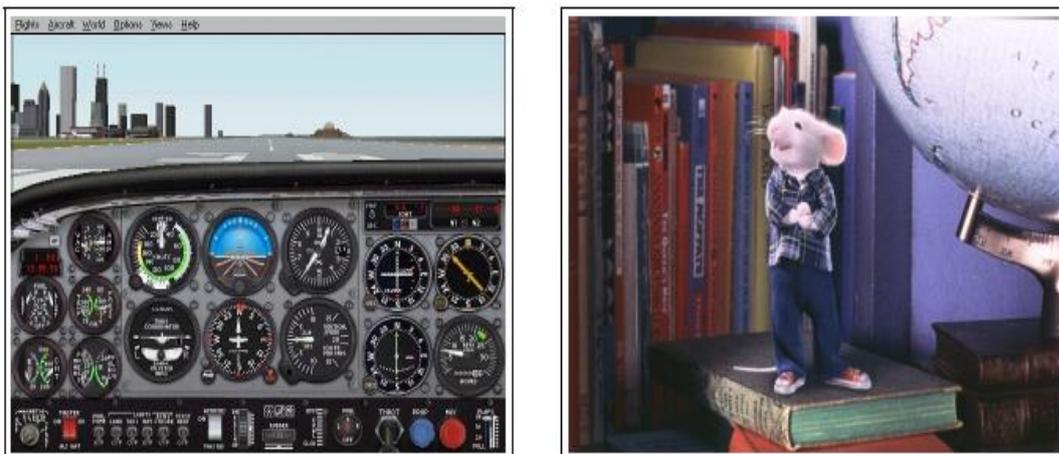


Figura 3: grafica interattiva vs non interattiva

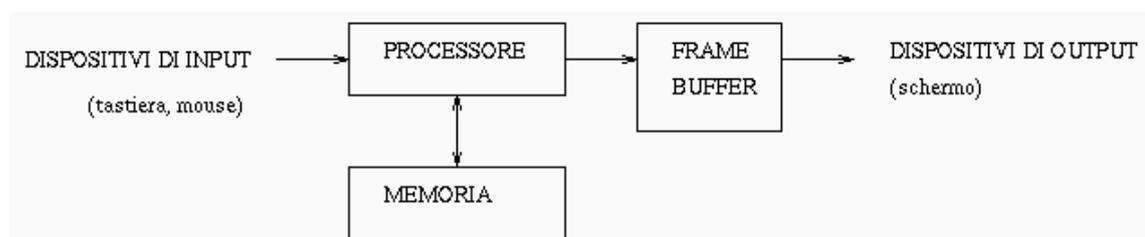
La computer grafica è uno dei campi più ricchi di applicazioni. La maggior parte dei software che utilizziamo hanno interfacce grafiche basate su sistemi desktop-window, che consentono di gestire diverse attività, di selezionare articoli di un menu, icone e oggetti. Altre applicazioni riguardano la creazione di schemi e diagrammi, descrizione di funzioni e modelli matematici, produzione di mappe, l'analisi dei dati generati negli esami di medicina (TAC), sistemi di progettazione assistita al calcolatore (CAD), per disegnare parti meccaniche, circuiti stampati. Svolge un ruolo molto importante anche nello sviluppo di sistemi multimediali e per dispositivi di simulazione e animazione di visualizzazioni scientifiche e ingegneristiche, ed è strumento essenziale per la creazione di videogiochi.

Una possibile definizione di computer graphics è “insieme delle tecniche digitali di elaborazione dell'informazione (hardware, software, organizzative) per produrre immagini statiche e in movimento in formato digitale”. [5]

L'applicazione della computer graphics si può sviluppare principalmente in quattro rami: visualizzazione di informazioni, progettazione, simulazione, interfacce utente.

Per visualizzazione di informazione si intende la visualizzazione di dati medici prodotti da apparecchiature e strumenti visuali per aiutare l'interpretazione di dati generati da simulazione mediante elaborazione di fenomeni fisici. La progettazione riguarda l'uso di strumenti grafici interattivi nella progettazione assistita da calcolatore. La simulazione nasce dalla capacità dei sistemi grafici di generare immagini sofisticate in tempo reale. L'interfaccia utente è l'interazione con l'elaboratore dominata da un paradigma visuale che include finestre, menu, icone. [5]

Un sistema grafico ha cinque componenti principali:



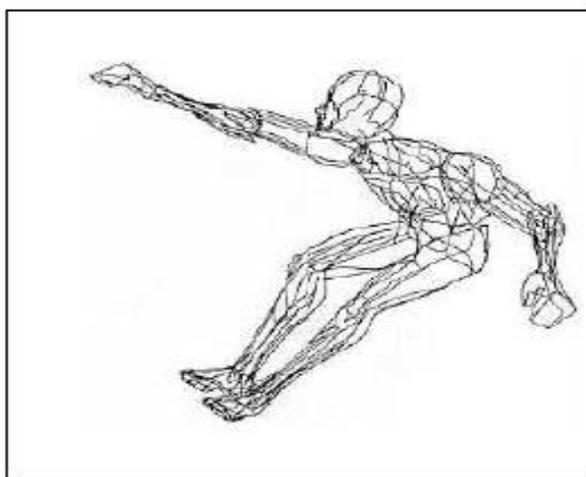
In sintesi i rami della computer grafica:

<b>Area di elaborazione visuale</b>	<b>Tipo di dati in ingresso</b>	<b>Tipo di elaborazioni svolte</b>	<b>Tipo di dati in uscita</b>
Computer Grafica	Modelli geometrici, modelli di illuminazione, modelli di ripresa fotografica, interpolazioni temporali. Dati numerici	Elaborazione dell'interazione tra modelli, luci, telecamere e deformazioni dinamiche di tutti gli oggetti coinvolti in una scena.	Sequenze di immagini con risoluzione spaziale e temporale che supporti il livello di dettaglio e/o fotorealismo richiesti nell'applicazione.
Computer Vision	Informazioni provenienti da sensori sotto forma di immagini singole o multiple, a scala di grigio o multispettrali come ottenute da telecamere digitali di varia natura e qualità. Dati visuali.	Calcoli matematici che ottengono modelli geometrici e modelli della telecamera in grado di spiegare i dati ricevuti in ingresso in maniera precisa.	Informazioni numeriche sullo stato della scena che viene ripresa.
Image Processing	Immagini ottenute con varie forme di sensori e digitalizzate. Dati visuali.	Calcoli matematici sulla rappresentazione numerica delle immagini in ingresso.	Immagini migliorate per specifici utilizzi.
Information visualization	Grandi collezioni di dati numerici. Dati eterogenei.	Organizzazione dei dati in strumenti che consentano di eseguire efficientemente query sui dati.	Grafici, diagrammi e altri tipi di immagini di natura astratta che guidano l'intuizione umana a cogliere regolarità e fare scoperte sui dati.

## I.2 BREVE STORIA

Le origini della Computer Graphics derivano dal campo della ricerca militare. All'inizio degli anni '50 fu finanziata dalle forze armate degli USA una ricerca sullo sviluppo dei primi calcolatori elettronici digitali. Durante queste ricerche fu osservato che questi calcolatori avevano particolari capacità grafiche. Da qui si aprì la strada alla nascita della computer grafica. Tuttavia passeranno diversi anni prima che le potenzialità grafiche si trasformino in applicazioni pratiche.

La ricerca in campo grafico si sviluppa grazie ad alcune grandi società statunitensi come la Boeing Company e la Bell Telephones. Nei laboratori della Boeing un gruppo di ricercatori con a capo William Fetter svilupparono una tecnica di elaborazione chiamata "computer graphics" che permetteva di disegnare velivoli in proiezione. Lo sviluppo di questa tecnica portò il gruppo di ricercatori a realizzare brevi sequenze animate usate per simulare in modo tridimensionale alcune condizioni in campo aeronautico. Il progetto più importante di Fetter fu la realizzazione al computer di un modello tridimensionale di una figura umana in grado di essere animato da sette sistemi di articolazioni distinte (*Figura 1*).<sup>[1]</sup>



*Figura 4: William Fetter - Primo modello di uomo al computer*

Mentre nei laboratori della Bell, lo scienziato Zajac trasforma uno studio sul comportamento dinamico di un satellite intorno al sole, in un breve film di quattro minuti denominato "Simulation of a Two-Gyro, Gravity-Gradient Attitude Control System" (1963), questo filmato è la prima animazione realizzata con un computer.

Un altro passo importante si deve a *Ken Knowlton* che, dopo aver scomposto un'immagine in un mosaico di unità discrete e registrate in base alla loro luminosità, scrive un elementare linguaggio di programmazione, denominato "*Beflix*", con cui è possibile visualizzare su schermo sequenze animate di immagini precedentemente memorizzate.

In campo cinematografico furono molto importanti le tecniche di compositing, ovvero fotomontaggio e fusione di immagini diverse. Grazie a *Pederson* e *Trumbull* nel 1968 si realizzò la celebre sequenza dello stargate nel film "2001: Odissea nello spazio".

Le tecniche che vennero utilizzate sono la base per le tecniche di oggi.

Un ruolo di fondamentale importanza per lo sviluppo del settore della computer grafica si deve a *Evans*, dirigente del dipartimento di informatica dell'università dello Utah. Negli anni '60 egli definì diverse aree di ricerca della grafica, prestando attenzione alle tecniche di modellazione geometrica e agli algoritmi di rendering. Qui studiarono persone come *Warnok*, fondatore di *Adobe System* e *Clark*, fondatore della *Silicon Graphics* e della *Netscape*.

Negli anni '70 le ricerche si spostarono nel laboratorio della *New York Institute of Technology*, dove si raggiunsero altri risultati importanti.

Negli stessi anni venne realizzata un'importante saga, quella di *Star Wars* ideata da *George Lucas*. Grazie al successo ottenuto dal primo episodio, *Lucas* decise di estendere la ricerca della computer grafica creando all'interno della *Lucas Film* la *Computer Graphics Division*. In questa divisione si riunirono grandi esperti come *Loren Carpenter*, che fu il primo ad applicare lo studio dei frattali alle animazioni digitali per realizzare paesaggi naturali, e *William Reaves*, padre delle tecniche di animazione particellare. <sup>[2]</sup>

### I.3 CRESCITA DELLA GRAFICA DIGITALE

Un evento che favorì la crescita dell'animazione digitale fu la nascita del *Siggraph* (*Special Interest Group in Computer Graphics*). Esso nacque come evento annuale di confronto e discussione di un ristretto gruppo di appassionati, ma con il passare degli anni divenne un importante palco per presentare nuove opere grafiche e mettersi in discussione con altri professionisti.

Negli anni '80 si creò una nuova società la *Pixar Animation Studios*. L'impegno di questa società fu quello di applicare l'arte dell'animazione tradizionale al digitale riscrivendo così le metodologie per animare i personaggi. Nel 1984, la *Pixar* creò il primo cortometraggio d'animazione in 3D della storia: *Andrè and Wally b*, (Figura 2).



Figura 5: primo cortometraggio "Andrè and Wally b"

Anche il Giappone si affaccia sulla scena virtuale grazie alla prima simulazione di un animale, che si muove all'interno di una breve fiction di fantascienza, creata nel 1984 da *Yoichiro Kawaguchi*.<sup>[1]</sup>

Nel 1986 al Siggraph la Pixar presentò il corto "*Luxo Jr*" in cui due lampade da tavolo, padre e figlio, prendono vita. Questi due personaggi sono fortemente caratterizzati, grazie ai movimenti e alle sfumature psicologiche che riescono ad attribuirgli. Una piccola lampada da tavolo, Luxo Jr, gioca saltellando con una palla, passando davanti ad una lampada più grande, Luxo, (il genitore di quella più piccola), il quale, tramite i propri movimenti, esprime la sua frustrazione nel non riuscire a fermare il figlio. Preso dalla foga, Luxo Jr comincia a saltare continuamente sopra la palla che, alla fine, si sgonfia, ponendo fine ai suoi giochi. Mentre Luxo osserva la palla bucata, controllando se sia possibile rigonfiarla, improvvisamente una palla ancora più grande della precedente entra in scena, rincorsa subito da Luxo Jr, ancora più divertito di prima.<sup>[3]</sup>

Il corto termina con Luxo che guarda verso il telespettatore, per poi abbassare la testa scuotendola in segno di disappunto. Grazie a questo cortometraggio si scopre quindi il valore fondamentale di una regia cinematografica e il valore della narrazione (*Figura 3*).



*Figura 6: prima animazione Pixar*

Questo corto fu la prima opera artistica della Pixar, il personaggio di Luxo Jr infatti verrà poi adottato come simbolo della compagnia, tanto da inserirlo nel logo degli studios e la palla con la quale gioca Luxo Jr apparirà come tributo, in altri film della Pixar.

La grafica si sviluppa sempre di più e in diversi campi. Inizia la stagione dei “*flying logo*” in cui le nuove tecniche di animazione trovano sbocco in sigle televisive, videoclip musicali e spot pubblicitari. Il momento positivo stimola anche la nascita di nuove società e la formazione di nuove figure professionalizzanti.

## I.4 SVILUPPO NEL CINEMA

Negli anni '70 molti produttori cinematografici guardano con interesse la grafica computerizzata come strumento per realizzare effetti speciali nuovi e sorprendenti.

Nel 1973 viene realizzata una sequenza completamente in computer grafica in un film di Hollywood: si tratta di una scena, realizzata con la tecnica della pixellization, che simula la visione del mondo percepita dal robot, nel film “*Westworld*”. L'utilizzo della computer graphics dilaga, sono sempre più presenti effetti 3d nei film.

Un film che è passato alla storia per i suoi effetti speciali è “*Alien*” (1979), il quale presenta una scena di atterraggio su un pianeta rappresentato in 3D tramite un modello wireframe i cui effetti visivi furono curati dalla casa inglese Filmfex Animation.

All'inizio degli anni '80 esce “*Tron*” (1982) il primo film ad utilizzare prepotentemente l'animazione 3d. Il film affronta per la prima volta il rapporto tra la realtà e la sua dimensione virtuale. La Disney fu impegnata in primo piano in questo lavoro, il progetto vide coinvolte anche le principali società di animazione allora presenti. Le parti più sorprendenti sono le scene d'azione riprese in live action e combinate in post-produzione con sfondi realizzati in computer grafica. La parte più rilevante sono 15 minuti di film interamente generati in 3d.

Nel 1984 esce un altro film straordinario “*The Last Starfighter*” dove vengono utilizzati i software grafici realizzati negli anni precedenti. Gli effetti ottenuti sono sbalorditivi, gli aspetti più rilevanti riguardano il dettaglio dei modelli raggiunto, la resa dei materiali e la simulazione della luce che rendono le scene realizzate estremamente fotorealistiche.

Nonostante il progresso fatto dal punto di vista grafico, questi due film non ebbero molto successo.

Alla fine del decennio Cameron fece uscire il film “*The Abyss*” dove viene messa in scena la prima creatura acquatica digitale, che diventa un vero e proprio personaggio.

All'inizi degli anni '90 viene prodotto il film “*Terminator II*” dove vengono utilizzate tecniche di morphing 3d combinato con la motion capture, attraverso le quali si porta l'immagine numerica a elevati livelli qualitativi. Nel 1993 viene prodotto il film “*Jurassic Park*” di Spielberg, dove vengono animati i vari personaggi. Dal film viene poi realizzato anche il videogioco. <sup>[2]</sup>

La rivoluzione dell'utilizzo della grafica nella cinematografia ci fu con la realizzazione del capolavoro "Toy Story" (1995). Nasce da una collaborazione tra la Disney e Lasseter. Questo cartone è un lungometraggio in animazione digitale realizzato interamente con tecniche digitali 3D (Figura 4).



*Figura 7: I personaggi di Toy Story*

L'anno 1997 fu un anno fortunato per il cinema e per lo sviluppo della grafica 3d. Un film campione di incassi fu "Titanic" di Cameron. Qui è digitale la ricostruzione del cedimento della nave, ma anche alcune comparse.

La fine degli anni novanta comporta l'utilizzo sempre più massiccio di tecniche di grafica, vengono utilizzati il bullet-time, il morphing, il ritocco digitale di tutta la pellicola, le esplosioni, i voli, le acrobazie. Il bullet time (letteralmente "tempo del proiettile") è un effetto speciale e tecnica cinematografica che consente di vedere ogni momento della scena al rallentatore mentre l'inquadratura sembra girare attorno alla scena alla velocità normale. Il morphing consiste nella trasformazione fluida, graduale e senza soluzione di continuità tra due immagini di forma diversa, che possono essere oggetti, persone, volti, paesaggi. [2]

Per quanto riguarda gli anni 2000 un riuscitissimo esempio di integrazione tra animazione tradizionale e digitale è “La Sposa Cadavere” (2005) di Burton, capolavoro in stop-motion (tecnica di animazione, chiamata anche ripresa a passo uno) con pupazzi, utilizzando riprese digitali per un più agevole movimento di camera e per un feedback quasi immediato sul lavoro di ripresa. Poi in seguito con l’uscita di vari cartoons la Pixar ha segnato altri punti a suo favore.

La realizzazione di effetti speciali è diventata una componente così importante e complessa nella realizzazione di un film che sono spesso coinvolte più di una casa di produzione per portare a termine il lavoro. <sup>[2]</sup>



## CAPITOLO 2: ANIMAZIONE

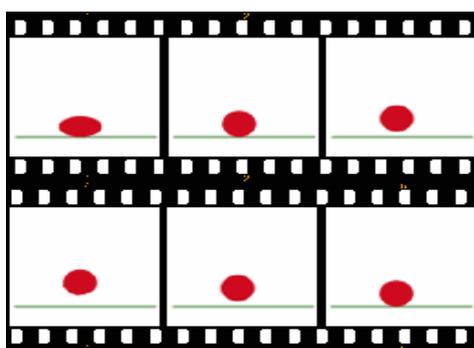
In questo capitolo verrà affrontato l'argomento dell'animazione, le tecniche che vengono utilizzate, le sue applicazioni e una breve classificazione dell'animazione.

### 2.1 CENNI STORICI

La parola “Animazione” deriva dalla parola latina “anima”. Il significato è “spirito che dà vita” che si è trasmesso all'italiano “animare”, cioè “dare vita”. Oggi l'animazione è l'arte di creare immagini che poi sembrano muoversi.

L'animazione è quindi la tecnica con la quale si crea l'illusione del movimento fotografando una serie di singoli disegni sui fotogrammi successivi di un filmato. L'illusione è ottenuta proiettando il filmato ad una certa velocità. Un'altra definizione, è il processo di generare dinamicamente una serie di fotogrammi relativi ad un insieme di oggetti, dove ogni fotogramma è un'alterazione del precedente.

L'animazione è basata sull'effetto fisico denominato “fenomeno phi”, che consiste nel rapido accostamento di immagine statiche per dare l'illusione del movimento. L'animatore è la figura professionale che crea l'animazione mediante disegni animati o animazioni a *passo uno*. La tecnica *passo uno* sfrutta una particolare cinepresa che prende un fotogramma alla volta. L'illusione dell'animazione si produce mediante la rapida successione di pose, che superando il tempo di percezione dell'occhio umano (soglia compresa tra le 18 e le 24 volte al secondo), dà l'impressione di osservare qualcosa in movimento. Questo è un fenomeno fisico chiamato “persistenza della visione”, che sfuoca le immagini, facendole percepire come una unica. Si verifica perché le immagini sono mantenute dal cervello più a lungo che dalla retina. Per sfruttare questo principio, per la realizzazione dei filmati vengono fotografate su pellicola una serie di immagini distinte fisicamente ma legate da una progressione temporale (*Figura 8*).



*Figura 8: cerchio palleggiante costituito da 6 fotogrammi*

La frequenza di scambio dei disegni si misura in fotogrammi al secondo (fps), anche definito come frame rate. La frequenza standard è di 24 fotogrammi al secondo, questo valore verrà poi adattato a seconda del media utilizzato. Per la televisione viene utilizzata una frequenza di 30 fotogrammi al secondo, l'adattamento è fatto proiettando ogni quarto fotogramma due volte. La frequenza dei fotogrammi viene misurata in hertz, nei monitor a scansione progressiva. La scansione progressiva è un sistema per la visualizzazione, memorizzazione o trasmissione di immagini in cui tutte le linee di ciascun fotogramma vengono visualizzate in sequenza.

Una nuova tecnica di ripresa e proiezione è High Frame Rate (hfr). Ha un'elevata frequenza di fotogrammi. È stata introdotta dal regista Jackson nel 2012 con il film *lo Hobbit*. Introduce una nuova velocità, dai 48 ai 60 fotogrammi al secondo, in questo modo si ottengono immagini più fluide.

Un fenomeno associato ai fotogrammi al secondo è lo “sfarfallio” dell'immagine, è un cambiamento di luce che può infastidire l'osservatore. Questo effetto è dovuto alla bassa frequenza con cui vengono usati i fosfori sullo schermo, aumentando il frame rate si è cercato di eliminarlo. È stato quindi introdotto l'interlacciamento, senza aumentare la larghezza di banda. Attraverso questa tecnica ogni fotogramma viene suddiviso in due semiquadri, ossia vengono prima visualizzate le righe dispari poi quelle pari. Ogni zona dell'immagine viene quindi tracciata due volte. <sup>[7]</sup>

Quindi per ottenere il movimento continuo di un singolo oggetto, ogni singolo frame deve differire solo minimamente da quello che lo precede e segue. Più il frame è elevato più il movimento risulta migliore. Per aumentare la frequenza però si richiede un alto numero di disegni all'animatore. Ad esempio un filmato che ha una durata di due ore con una frequenza di 24 frame al secondo, ha 1.440 frame per un minuto di animazione, 86.400 per un'ora e quindi 172.800 per due ore. Tutto questo una volta veniva fatto a mano. Con l'introduzione della computer grafica si è velocizzato a dismisura il lavoro dell'animatore. È stata eliminata completamente la fase di registrazione su pellicola. Oggi l'animatore disegna i fotogrammi chiave per descrivere il movimento perché tutti i fotogrammi di riempimento o intercalatori vengono generati automaticamente usando meccanismi di interpolazione. Chiunque oggi, utilizzando opportuni strumenti di grafica, può creare filmati di buona qualità.

La comunità di persone legate al mondo dell'animazione è in larga crescita, grazie anche allo sviluppo di queste tecniche nel mondo del cinema e dell'intrattenimento. Anche nel mondo della medicina, della ricerca scientifica, dell'architettura e nel mondo dell'educazione l'animazione ha avuto un forte sviluppo.

Direttamente collegata all'animazione si può parlare di "realtà virtuale" che ha rivoluzionato le metodologie dell'apprendimento e ha limitato alcuni individui ad affrontare situazioni pericolose.

## 2.2 TECNICHE DI ANIMAZIONE E CLASSIFICAZIONI

### 2.2.1 ANIMAZIONE TRADIZIONALE:

è la tecnica classica dei disegni animati chiamata anche "cel animation". I "cel" sono fogli lucidi sintetici di acetato, utilizzati per sovrapporre le parti da animare a quelle fisse.

L'animazione tradizionale si divide in animazione piena, limitata, rotoscopio. L'animazione piena viene utilizzata nei film di animazione in alta qualità ed utilizza molti dettagli. L'animazione limitata è più economica, le pose dei personaggi sono limitate. La tecnica del rotoscopio, brevettata nel 1917 da Fleischer, si basa sul tracciamento di contorni per i disegni dai fotogrammi di riprese dal vivo.

La tecnica di "Stop-motion", anche definita passo uno fa parte dell'animazione tradizionale. Viene utilizzato un modellino animato dagli animatori, sul quale vengono realizzate delle fotografie, che verranno utilizzate per l'animazione. È stata poi utilizzata anche in cinematografia, come fonte di creazione per effetti speciali. La Stop-motion include la Claymation, Cutout animation, Graphic animation, Model animation, Object animation, Pixilation, Puppet animation. <sup>[8]</sup>

Le regole cardine dell'animazione tradizionale sono codificate nel documento storico scritto da John Lasseter nel 1987. Brevemente di seguito alcune regole. Una delle regole descritte è la conservazione del volume degli oggetti durante le deformazioni e il mantenimento delle caratteristiche fisiche legate ai materiali, conosciuta anche con il nome di "Squash and Stretch", effetto di schiacciamento-stiramento. La regola del "Timing", ossia un corretto utilizzo del tempo di animazione, che viene impostato in modo coerente rispetto al peso e alle dimensioni dell'oggetto. La regola dello "Slow-in e Slow-out" che riguarda l'impostazione dei parametri matematici che regolano l'interpolazione tra i fotogrammi per ottenere velocità di movimento realistiche.

## 2.2.2 ANIMAZIONE COMPUTERIZZATA:

le immagini sono create usando grafica bitmap o grafica vettoriale. Il computer integra tutte le tecniche manuali come la sovrapposizione, il morphing e il rotoscopio. Il corpo solido viene manipolato dall'animatore. Con il termine rigging vengono indicate le problematiche della movimentazione. Esso viene rivestito con delle texture e poi vengono create delle scenografie con la tecnica del Matte painting.

Al calcolatore possono essere affidati i seguenti compiti:

- Nella creazione dei disegni, possono essere digitalizzati i disegni fatti a mano oppure si può disegnare su pc, con programmi grafici o attraverso la programmazione;
- Per il moto degli oggetti da animare si possono derivare i frame di riempimento oppure usare movimenti generati dal pc;
- Per la colorazione è possibile utilizzare il pc utilizzando sistemi che permettano l'interazione con l'utente;
- Per il puntamento della telecamera, il pc ne può controllare una fisica, oppure programmarla;
- Nella post-produzione sia l'editing che la sincronizzazione del filmato possono essere fatte interamente al pc.

I sistemi di animazione possono essere classificati in cinque livelli. I sistemi di livello 1 sono utilizzati per creare, gestire e modificare disegni. Riguardano gli editor grafici utilizzati dai designer. I sistemi di livello 2 permettono di calcolare fotogrammi di riempimento e definiscono le traiettorie di movimento degli oggetti. I sistemi di livello 3 producono animazioni in cui è possibile applicare traslazioni e rotazioni. I sistemi di livello 4 definiscono attori virtuali, i quali hanno una propria animazione ed è possibile regolare e vincolare il moto. Infine i sistemi di livello 5 sono estendibili. Ogni volta che vengono utilizzati diventano più performanti.

Un'importante differenza è tra “Computer-Assisted Animation” e “Modeled Animation”. L'animazione computerizzata assistita, definita come “Keyframe”, aiuta l'animatore nella creazione dei fotogrammi e nel montaggio del filmato. Utilizza principalmente sistemi di livello 2. L'animazione di modellazione richiede la manipolazione di una realtà che si muove nello spazio 3d. Vengono utilizzati sistemi di livello 3 o 4.

Un'ultima distinzione importante è tra “Real-Time Animation” e “Frame-by-Frame Animation”. Entrambe riguardano la produzione del movimento. Per esempio si può pensare alla differenza di creazione di un cartone animato e un videogioco. Per la realizzazione del cartone animato è necessario ideare e produrre ogni singolo frame di animazione. I fotogrammi creati ad alta qualità verranno poi montati e proiettati per avere il movimento finale. In un videogioco, il movimento deve essere immediato, il risultato viene mostrato direttamente a terminale e il moto di un personaggio è la risposta ad un comando dato dall'utente e deve avvenire in tempo reale. Quindi il momento in cui l'utente prende una decisione deve coincidere con il momento della visualizzazione a monitor dell'azione richiesta. L'animazione fotogramma per fotogramma è la diretta trasposizione dell'animazione tradizionale al computer. Altri esempi di animazione in tempo reale sono i simulatori per l'addestramento dei piloti, oppure sistemi che vengono utilizzati in campo medico.

Quando si definisce l'animazione spesso si fa riferimento solo al movimento del personaggio nello spazio, ma è necessario considerare anche tutte le modifiche di forme, colori, dimensioni, luminosità e viste delle telecamere. <sup>[6]</sup>

## 2.3 PRINCIPI DELL'ANIMAZIONE

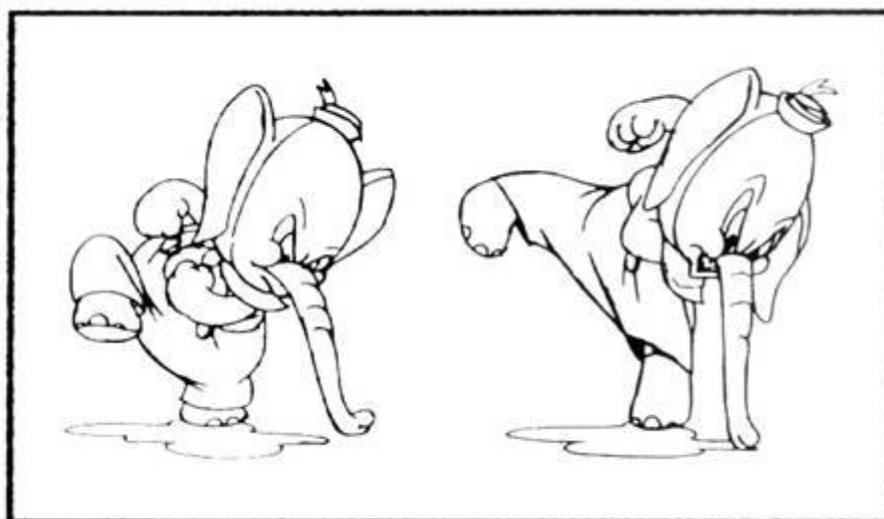
Esistono 12 principi fondamentali dell'animazione. Si tratta di principi estetici che sono stati messi a punto nei Disney Studios dai disegnatori, quando ancora i disegni bidimensionali venivano prodotti manualmente. Oggi vengono considerati dei principi universali. Possono essere applicati a qualsiasi disegno, qualsiasi personaggio, portando alla realizzazione di animazioni di buona qualità, discostandosi dallo stile disneyano. <sup>[9] [10]</sup>

### 2.3.1 SQUASH AND STRETCH

Descritto anche in precedenza, è stata un'importante scoperta. Viene visto come schiacciamento o stiramento di un oggetto, la forma può essere modificata ma il volume deve essere conservato. Questo può accadere perché molti corpi che vengono animati hanno una notevole elasticità. Questo principio, per ovvi motivi, non può essere applicato a tutti gli oggetti. Un esempio dove viene utilizzato questo principio è una palla che rimbalza.

### 2.3.2 ANTICIPAZIONE

Le persone che guardano l'animazione devono essere preparate al movimento successivo e aspettarselo prima che accada. Viene risolto precedendo un'azione principale con un movimento che anticipi, ciò che sta per accadere. Può essere piccola come un cambio di espressione oppure grande con un'ampia azione fisica. Ad esempio prima che un uomo inizi a correre, si schiaccia, muove le spalle, le gambe, per mirare a destinazione (*Figura 9*).



*Figura 9: esempio di anticipazione*

### 2.3.3 STAGING (MESSA IN SCENA)

È la rappresentazione di un'idea in modo che sia completamente chiara. Un'azione deve essere capita, una personalità riconosciuta, un'espressione vista. Ogni fotogramma deve aiutare la costruzione della storia. Per aiutare a capire un'idea, l'intera scena deve essere riempita di elementi che aiutino a capire. È un tentativo di persuasione a concentrarsi su un dettaglio piuttosto che un altro.

### 2.3.4 AZIONE DIRETTA E AZIONE DA POSA A POSA

Con "l'azione diretta" l'animatore lavora in modo diretto, dal suo disegno alla scena. Conosce il punto della storia, ma non ha un piano ben preciso di come tutto verrà realizzato. Con questo metodo c'è spontaneità. Il secondo approccio "da posa a posa" l'animatore pianifica la sua azione, calcola quanti disegni serviranno. Con questo metodo c'è chiarezza e forza. Vengono utilizzati entrambi i metodi, ma molte volte vengono combinati.

### 2.3.5 FOLLOW THROUGH AND OVERLAPPING ACTION

Quando un personaggio entra in scena e raggiunge il punto della sua prossima azione, arriva ad un improvviso e completo stop. Ci sono cinque categorie:

- Se il personaggio ha lunghe orecchie, una coda, ampio cappotto, queste parti continuano a muoversi anche quando il resto della figura è fermo;
- Il corpo non si muove tutto ma è composto da più parti che interagiscono, si allungano, ruotano mentre procede l'azione (*Figura 10*);

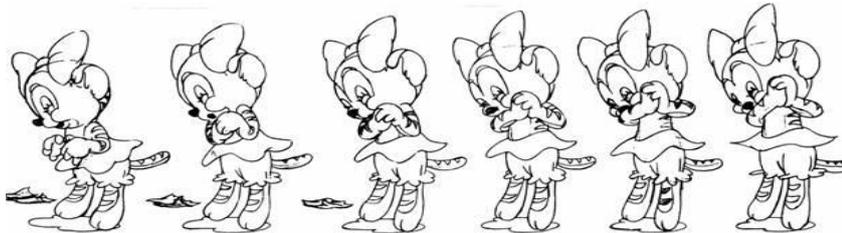


*Figura 10: held drawing*

- Le parti come le guance, si muovono ad una velocità inferiore rispetto alle parti dello scheletro. Questo viene spesso chiamato drag. Se viene eseguita bene non viene percepita dal pubblico;
- Molto importante è la conclusione di un'azione;
- Infine è meglio evitare delle pose fisse alla fine di un'azione per mostrare un determinato sentimento.

### 2.3.6 RALLENTAMENTO IN ENTRATA E IN USCITA

Le azioni di un personaggio non vengono eseguite in velocità uniforme. Ogni gesto comincia lentamente, raggiunge nel mezzo dell'azione una velocità uniforme e poi si rallenta. Questa variazione di velocità può essere realizzata con le curve di Bezier. È preferibile usare però l'interpolazione lineare che permette un maggior controllo (*Figura 11*).



*Figura 11: esempio rallentamento*

### 2.3.7 ARCHI

Pochi organismi viventi sono capaci di movimenti seguendo una perfetta linea retta. È uno dei più grandi problemi quello di disegnare l'intermedio non esattamente in centro ma spostato lungo un arco di cerchio in modo da rendere l'azione più reale.

### 2.3.8 AZIONE SECONDARIA

Supportano l'azione principale. La difficoltà principale sta nel rendere unificato qualcosa che è stato disegnato in due momenti diversi. L'azione secondaria può essere anche l'espressione stessa (*Figura 12*).



*Figura 12: azioni secondarie*

### **2.3.9 TEMPORIZZAZIONE**

Il numero di disegni usato in qualsiasi movimento determina l'ammontare di tempo totale dell'azione sullo schermo. Se i disegni sono semplici, chiari ed espressivi, la scena può fluire velocemente. L'attitudine e la personalità possono essere ritratte correttamente prendendo in considerazione la temporizzazione.

### **2.3.10 ESAGERAZIONE**

Effettuare una caricatura del realismo.

### **2.3.11 DISEGNO SOLIDO**

Il disegno deve aver peso, solidità, profondità e bilanciamento. È necessario trovare una forma che sia possibile animare, ma che sia allo stesso tempo flessibile e robusta.

### **2.3.12 ATTRATTIVA**

È molto importante. È qualsiasi cosa che una persona ama vedere, una qualità di bellezza, fascino, semplicità.

## 2.4 FIGURE ARTICOLATE

Una figura articolata è una struttura che ha elementi rigidi che vengono collegati tra loro attraverso giunture. Si parla quindi di *scheletro*, *ossa*, *articolazioni*. Con lo scheletro ci riferiamo a una struttura gerarchica di elementi interconnessi, detti ossa. Un altro termine utilizzato è *catena*; il nodo iniziale della catena è detto *ancora*, il punto terminale è detto *effettore finale*. L'*effettore finale* è l'estremità libera della catena e viene spostata per realizzare l'animazione. L'*ancora* invece ha sempre una posizione fissa.

La gerarchia che viene utilizzata è quella ad albero: in una catena l'*ancora* rappresenta la radice dell'albero e l'*effettore finale* la foglia.

Vengono definiti dei gradi di libertà che in una struttura articolata sono il numero di variabili posizione indipendenti necessarie per la struttura.

Nell'animazione quando si parla di articolazioni si considerano le articolazioni rotazionali e di scorrimento. In quelle rotazionali il punto terminale di un osso ruota attorno al punto terminale di un altro osso. Ha un solo grado di libertà, ne esistono di tre tipologie.

Considero due ossa, A e B, concatenate tra loro: (*Figura 13*)

- articolazione di tipo R1: l'asse di rotazione è perpendicolare sia ad A che a B (esempio il ginocchio);
- articolazione di tipo R2: l'asse di rotazione è parallelo sia ad A che a B (polso umano)

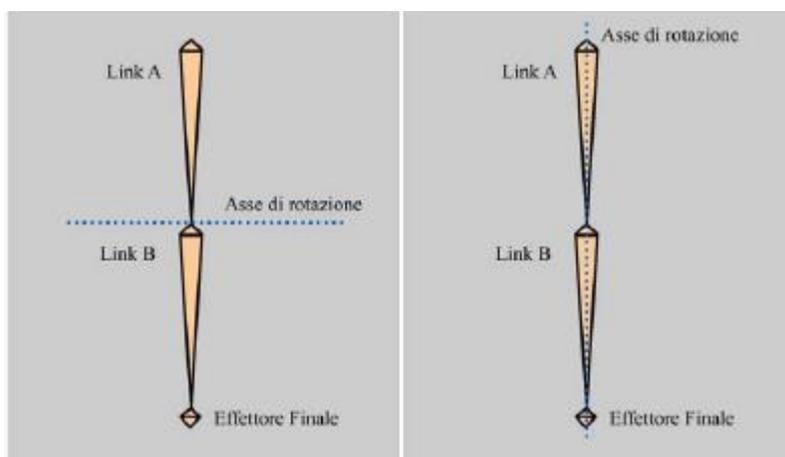


Figura 13: articolazione R1 a sinistra, articolazione R2 a destra

- articolazione di tipo R3: è una variante di R2. L'asse di rotazione è lo stesso, ma A è riposizionato per essere perpendicolare a B (Figura 14).

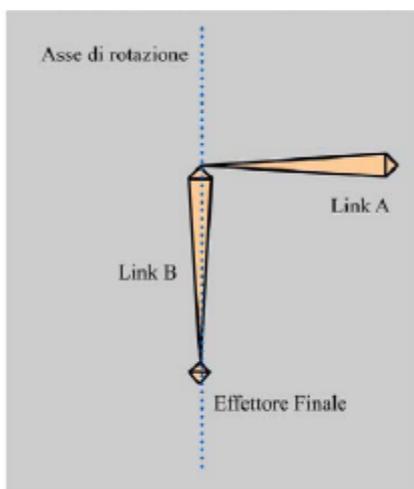


Figura 14: articolazione R3

Mentre le articolazioni di scorrimento hanno un movimento traslatorio, questa traslazione è vincolata a un solo asse, per cui ha un solo grado di libertà.

Per esempio uno scheletro umano ha 200 gradi di libertà, ma ne sono sufficienti un numero minore per ottenere un'approssimazione simile alla realtà. Vista la difficoltà viene definita una radice assoluta della struttura articolata. Essa è posta in coincidenza con il joint più vicino al baricentro della struttura.

Il concetto di radice generale (“*Root*”) coesiste con quello di radice “*locale*” rappresentata dalle ancore delle catene che compongono la struttura, quindi l'applicazione delle trasformazioni geometriche verrà differenziata a seconda del joint che si vorrà manipolare. Le rotazioni e trasformazioni che vengono applicate alla radice modificano la posizione dell'intera figura nel sistema di riferimento del mondo (*World Coordinate System*), mentre quelle che vengono applicate ad un altro elemento, avranno effetto locale che si propagherà agli elementi figli.

Animare una struttura consiste, quindi, nel definire al variare del tempo i valori di rotazione locale dei joint o i valori di trasformazione globale dell'intero umanoide. <sup>[11]</sup>

## 2.5 ANIMAZIONE COMPUTERIZZATA PER FOTOGRAMMI

È una tecnica di animazione che lavora attraverso fotogrammi. Il compito dell'animatore è quello di specificare il movimento dell'oggetto indicando solo alcuni fotogrammi che sono detti "fotogrammi chiave". Il sistema poi in automatico genera i restanti fotogrammi per comporre la sequenza. Da qui prende il termine Key-Frame. In genere vengono prodotti 24 fotogrammi per un secondo di animazione, il numero di fotogrammi generati dipende dalla frequenza di riproduzione video detto anche frame rate. Tutti i maggiori software includono un modulo di realizzazione per fotogrammi.

La tecnica "Inbetweening" è quella che differenzia un procedimento dall'altro. Genera in automatico i fotogrammi intermedi. Viene realizzata interpolando la posizione dell'oggetto tra un fotogramma chiave e il successivo, per lo spazio, e per il tempo. Un umano ricrea i fotogrammi conoscendo l'intero movimento, mentre il computer conosce solo il punto di partenza e di arrivo che sono definiti dai fotogrammi chiave. Per realizzare un'animazione molto vicino alla realtà la tecnica di interpolazione che verrà utilizzata deve essere molto buona.

Risolvere un problema di interpolazione consiste nel trovare una curva che passi per alcuni punti campione definiti nello spazio. Nell'animazione la successione di fotogrammi chiave definisce l'intervallo temporale in cui il personaggio o l'oggetto devono muoversi. La posizione del personaggio viene registrata tramite alcuni punti presi a campione e la traiettoria del movimento può essere ricostruita come interpolazione dei punti individuati.

L'interpolazione lineare è quella più semplice, la curva di movimento è ricostruita muovendo linearmente un parametro tra un punto campione e il successivo. Se identifichiamo con  $X_{start}$  e  $X_{end}$  i valori di un attributo del personaggio, il suo valore  $X_t$ , nei fotogrammi intermedi è dato dalla relazione:

$$X_t = (1-t)X_{start} + tX_{end}$$

dove  $t$  è un parametro che varia linearmente tra 0 e 1.

Però la curva prodotta da questa interpolazione non realizza un movimento molto realistico.

Ad esempio se si vuole animare una pallina che rimbalza sul piano orizzontale, utilizzando l'interpolazione lineare, si ottiene un movimento innaturale. La pallina sale accelerando fino all'altezza massima, poi scende cambiando direzione a causa dell'angolo formato dalla curva di movimento. Nella realtà la pallina dovrebbe salire in modo graduale, decelerare, poi avere un momento di stasi in aria e poi avere un graduale cambio di direzione e iniziare la discesa. Quindi nella realtà si avrebbe una curva smussata e parabolica, non spezzata come si ottiene dall'interpolazione. Il problema può essere ricondotto alla non continuità della derivata prima indotta dall'interpolazione lineare, che produce bruschi cambi di velocità. Per evitare questi problemi l'inbetweening utilizza l'interpolazione di funzioni spline.

La curva è così definita:

$$X_t = (1-f(t))X_{start} + f(t)X_{end}$$

dove  $f(t)$  è una funzione spline.

L'interpolazione spline è migliore, produce una traiettoria molto dolce, senza spigoli e senza brusche variazioni di pendenza. Questa interpolazione gode della continuità della derivata prima.

L'inbetweening nel caso di animazione di corpi rigidi è leggermente diversa. Un corpo rigido è descritto dalla sua posizione e orientazione sullo spazio tridimensionale. Per interpolare la posizione si può considerare la posizione del centro del corpo rigido e muoverla lungo una curva spline che viene usata come traiettoria. La velocità di movimento viene specificata tramite una funzione del tempo da associare alla percorrenza della traiettoria.

Più complicata è l'interpolazione dell'orientazione del corpo rigido. L'orientazione è il risultato delle rotazioni attorno ai tre assi principali, è dipendente dall'ordine in cui sono eseguite le rotazioni. Effettuare una rotazione sull'asse y e poi una negativa sull'asse z non è la stessa cosa che invertire le operazioni. Una formulazione dell'orientazione di un corpo rigido è mediante l'utilizzo delle "quaterne".

Una rotazione quaternaria è definita:

$$a + bi + cj + dk$$

dove a, b, c, e d sono numeri reali che soddisfano:  $a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = 1$

Le quaterne sono moltiplicate usando la proprietà distributiva e queste regole:

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1$$

$$ij = k = -ji$$

$$jk = i = -kj$$

$$kj = j = -ik$$

Una rotazione di un angolo  $\phi$  rispetto al vettore unitario  $[b \ c \ d]^T$  corrisponde alla quaterna:

$$\cos \phi / 2 + b \sin \phi / 2i + c \sin \phi / 2j + d \sin \phi / 2k$$

Effettuare una serie di rotazioni corrisponde a moltiplicare le quaterne.

Ogni quaterna è come un punto sulla sfera unitaria nello spazio 4d e l'interpolazione tra due quaterne è la ricerca del più breve cammino che congiunge i punti. Esistono alcuni problemi dovuti alla non unicità della rappresentazione dell'orientazione e al fatto che il concetto di orientazione e quello di orientazione non spesso coincidono. <sup>[11]</sup>

## 2.6 CINEMATICA

Per il controllo del movimento di una figura articolata in animazione esistono due approcci quello dinamico e quello cinematico. In questo paragrafo prendiamo sotto esame l'approccio cinematico.

La cinematica è uno dei grandi settori della meccanica e studia il moto dei corpi senza considerare le forze che l'hanno prodotto. Si occupa degli aspetti geometrici e temporali come la posizione, la velocità e l'accelerazione.

In animazione la cinematica si divide in due metodi: la cinematica diretta e la cinematica inversa. È possibile definire ciascuno dei due metodi attraverso un modello matematico, introducendo il concetto di "Spazio degli Stati della figura", definito come spazio vettoriale di tutte le possibili configurazioni che la figura può assumere. Una base dello spazio è formata da un insieme di parametri indipendenti, che definiscono la posizione, l'orientazione e la rotazione di tutte le articolazioni della figura. Una figura articolata viene descritta dal vettore di stato:

$$\theta = (\theta_1, \dots, \theta_N)$$

La dimensione del vettore è legata ai gradi di libertà della struttura articolata. Realizzare l'animazione di una figura articolata si riduce a trovare il cammino N-dimensionale nello spazio degli stati.

### 2.6.1 CINEMATICA DIRETTA

Nella cinematica diretta il modellatore posiziona gli oggetti applicando delle sequenze di rotazioni. Il modello diretto è una descrizione delle relazioni tra le posizioni dei giunti e la postura di un membro della struttura, chiamato end-effector. Lo spostamento dell'effettore finale è determinato in modo indiretto dalla combinazione di tutte le trasformazioni. Nella figura c'è un esempio di cinematica diretta, dove prima viene ruotata la parte superiore del braccio, poi l'avambraccio, la mano ed infine il polso (*Figura 15*).

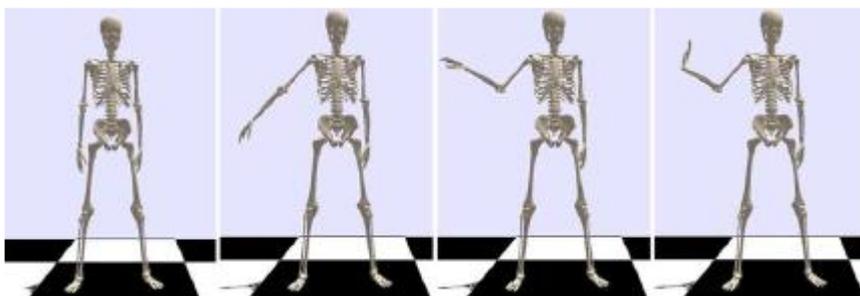


Figura 15: esempio di cinematica diretta

La cinematica diretta utilizza un procedimento “dall’alto verso il basso”.

Matematicamente:

$$X = f(\theta)$$

date le trasformazioni applicate alle articolazioni, si ricava la posizione.

L’animatore specifica posizione e orientazione degli elementi della figura a un dato istante temporale, generando delle pose. L’interpolazione lineare è la soluzione più semplice, ma produce risultati scarsi.

## 2.6.2 CINEMATICA INVERSA

La cinematica inversa invece utilizza un metodo per arrivare subito al risultato finale. Vengono determinati i vari parametri per ottenere la posa desiderata. La cinematica è anche chiamata “Goal-Directed-Motion”. Viene utilizzata molto nella programmazione di videogiochi e nella modellazione tridimensionale. Una figura articolata ha una serie di segmenti connessi per mezzo delle articolazioni. Vengono quindi sviluppate una serie di configurazioni al variare degli angoli d’articolazione per ottenere la posizione desiderata. Il problema può essere risolto attraverso la programmazione non lineare. L’animatore definisce la posizione dell’effettore finale, mentre la posizione e l’orientazione di tutti i joint nella gerarchia vengono calcolati automaticamente. Ad esempio per l’animazione di un braccio umano basta posizionare il polso nella locazione finale, il resto verrà svolto dal programma. Questo procedimento è molto più semplice e veloce.

Matematicamente è possibile definire questo concetto:

$$\theta = f^{-1}(X)$$

avendo la posizione finale di X, si derivano gli stati delle articolazioni che portano la struttura a quella posizione. <sup>[11]</sup>

La risoluzione del problema cinematico inverso necessita di un frequente utilizzo delle funzioni trigonometriche inverse. Presentano però alcuni problemi pratici. Il seno, il coseno e la tangente non ammettono funzione inversa univoca. Gli angoli non vengono determinati con molta accuratezza. Per risolvere il problema viene utilizzata la funzione trigonometrica inversa  $\text{atan2}(y, x)$ . La funzione calcola l’angolo utilizzando due argomenti. Il segno di questi argomenti viene utilizzato per determinare il quadrante del risultato. Inoltre la funzione garantisce un’accuratezza uniforme in tutto il campo di definizione.

In linguaggio matematico posso definire con X il vettore che contiene le coordinate dell'effettore e con Q il vettore che contiene le coordinate dei giunti. Ottengo  $X = F(Q)$ .

Mentre l'analisi della velocità può essere eseguita derivando rispetto al tempo l'equazione precedente:

$$dX/dt = J(Q) * dQ/dt$$

$J(Q)$  è la matrice jacobiana del sistema:  $J(Q) = dF/dQ$ , se il jacobiano è invertibile il problema cinematico inverso viene risolto da:  $dQ/dt = J^{-1} dX/dt$ .

Per spiegare meglio la cinematica inversa useremo il seguente esempio. Consideriamo due membri rigidi (link) collegati da accoppiamenti rotoidali per effettuare i movimenti nel piano x,y e da un terzo elemento per effettuare i movimenti verticali. Un altro accoppiamento consente la rotazione attorno l'asse.

È possibile applicare tre approcci con la cinematica inversa. <sup>[12]</sup>

### **Primo approccio:**

Per quanto riguarda le posizioni utilizzo la funzione  $Q = F^{-1}(X)$  (Figura 16).

Viene applicato il teorema di Carnot, che correla la lunghezza dei lati di un triangolo al coseno di uno dei suoi angoli. Vale l'equazione:

$$OP^2 = OA^2 + AP^2 - 2OA \cdot AP \cos(\pi - \beta)$$

ovvero:

$$x_p^2 + y_p^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2 l_1 l_2 \cos(\pi - \beta)$$

L'angolo  $\alpha$  si ricava per differenza:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos(\pi - \beta) = -\frac{x_p^2 + y_p^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 l_1 l_2} \\ \alpha = \widehat{POx} - \widehat{POB} \end{array} \right.$$

Infine:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta = \pm \arccos \frac{x_p^2 + y_p^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 l_1 l_2} \\ \alpha = \text{atan2}(y_p, x_p) - \text{atan2}(l_2 \sin \beta, l_1 + l_2 \cos \beta) \end{array} \right.$$

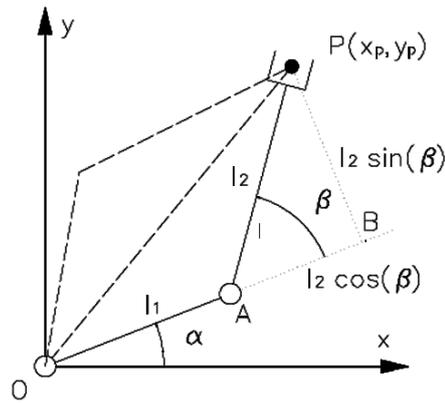


Figura 16: cinematica inversa applicata ad un robot

La funzione “atan2” è la tangente inversa a 4 quadranti. L’equazione che consente di ricavare l’angolo  $\beta$  presenta due soluzioni a causa della funzione “arccos()”, si ottiene comunque una corrispondente soluzione di  $\alpha$  per entrambe le soluzioni.

**Secondo approccio:**

$$\begin{cases} x_p = l_1 \cos \alpha + l_2 [\cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta)] \\ y_p = l_1 \sin \alpha + l_2 [\sin(\alpha) \cos(\beta) - \cos(\alpha) \sin(\beta)] \end{cases}$$

invertendo la matrice quadrata si possono ottenere i valori di  $\sin \alpha$  e  $\cos \alpha$ :

$$\begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix} = 1/D * \begin{bmatrix} l_2 \sin \beta & -(l_1 + l_2 \cos \beta) \\ -(l_1 + l_2 \cos \beta) & l_2 \sin \beta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix}$$

con D viene indicato il determinante della matrice:

$$D = -(l_2 \cos \beta)^2 - (l_1 + l_2 \cos \beta)^2$$

$$\alpha = \text{atan2}(\sin \alpha, \cos \alpha)$$

e visto che  $D \leq 0$ :

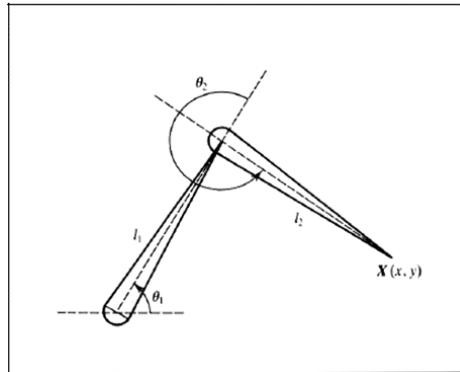
$$\alpha = \text{atan2}(-x_p l_2 \sin \beta + y_p (l_1 + l_2 \cos \beta), x_p (l_1 + l_2 \cos \beta) + y_p l_2 \sin \beta)$$

**Terzo approccio:** un metodo alternativo consiste nel calcolo dell’angolo  $\psi$ , utilizzando il teorema di Carnot. [12]

$$\begin{cases} d = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \\ \alpha = \text{atan2}(y_p, x_p) \pm \arccos\left(\frac{-l_2^2 + l_1^2 + d^2}{2 l_1 d}\right) \\ \beta = \text{atan2}(y_p, l_1 \sin \alpha, x_p - l_1 \cos \alpha) - \alpha \end{cases}$$

## 2.7 CONFRONTO TRA CINEMATICA DIRETTA E CINEMATICA INVERSA

Attraverso un esempio si può capire la differenza tra cinematica diretta e inversa. Prendiamo in considerazione una struttura formata da due ossa connesse da una giuntura. Un lato della catena è fissato e entrambe le ossa si muovono nel piano dello schermo (*Figura 17*).



*Figura 17: esempio figura articolata*

Con la cinematica diretta la soluzione  $X = (x,y)$  è data da

$$X = (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2), l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2))$$

la relazione deriva da:

$$x = a+b$$

$$a = l_1 \cos \theta_1$$

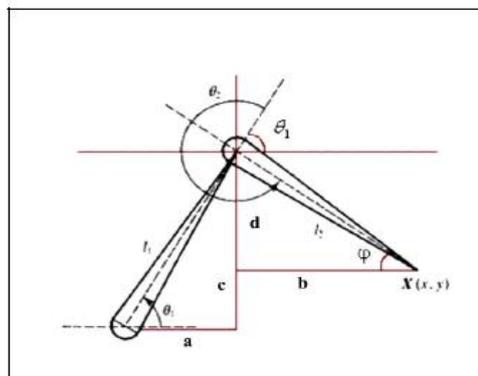
$$b = l_2 \cos \psi$$

vale la relazione:

$$\cos x = \cos(\pi - x)$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \psi = \pi \Rightarrow \cos \psi = \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

Un ragionamento analogo viene fatto anche per calcolare la y.



*Figura 18: parametri per le relazioni di cinematica*

Entrambe le tecniche aumentano di complessità al crescere del numero di articolazioni.

Nel caso della cinematica diretta, è possibile lavorare su singole trasformazioni da applicare alle giunture. Nel caso della cinematica inversa, bisogna risolvere un problema indefinito, ricavando l'intero sottospazio  $\theta$  ( $\theta_1 \dots \theta_N$ )  $\in \theta_X$  dalla soluzione  $X=(x,y)$ . Ogni vincolo corrisponde ad un sottospazio e l'intersezione dei vincoli con  $\theta_X$  è lo spazio delle soluzioni. Si cerca quindi di ridurre il sottospazio delle soluzioni possibili.

Viene definito "grado di ridondanza" la differenza tra il numero di gradi di libertà del sistema e il numero dei vincoli introdotti.

Per considerare anche la velocità e l'accelerazione del movimento della figura si deve introdurre il concetto Jacobiano. Lo jacobiano è l'estensione in più dimensioni della differenziazione di una singola variabile. Se si considera la funzione:

$$X = f(\theta)$$

dove  $X$  è di dimensione  $n$  e  $\theta$  di dimensione  $m$ , lo Jacobiano  $J$  è la matrice di dimensione  $n*m$  delle derivate parziali che legano le variazioni di  $\theta$  con le variazioni di  $X$ .

Quindi:

$$dX = J(\theta)d\theta$$

dove l'elemento  $(i,j)$  di  $J$  è dato da:

$$J_{i,j} = (\theta f_i) / (\theta x_j)$$

Si ottiene  $X' = J(\theta) \theta'$

dove la derivata di  $X$  rappresenta la velocità dell'effettore finale.

La matrice Jacobiana mappa le velocità delle giunture nello Spazio degli Stati, nella velocità dell'effettore finale nello Spazio Cartesiano. Queste due quantità sono collegate attraverso  $J$ , che a sua volta varia nel tempo al variare di  $\theta$ .

Applicando Jacob al problema di cinematica inversa descritto si ha:

$$X = f(\theta)$$

$$\theta = f^{-1}(X)$$

dove  $\theta$  è risolto dando una posizione dell'effettore finale.

La complessità della funzione aumenta molto velocemente con l'incremento del numero di articolazioni. Viene quindi considerato un intorno locale della catena. Viene calcolata la matrice Jacobiana locale e la si inverte:

$$d\theta = J^{-1}(dX)$$

Ad ogni passo di iterazione si calcola  $dX$ , invertendo si calcola  $d\theta$  e poi  $\theta$  per integrazione. Si ripete l'operazione finché l'effettore finale raggiunge la sua posizione obiettivo. Se il problema è ridondante si devono imporre dei vincoli per ridurre la dimensione del problema e nel procedimento iterativo si sostituisce la matrice Jacobiana con la sua inversa.

[11]

## 2.8 ANIMAZIONE INTERATTIVA

Un'applicazione importante nella cinematica inversa è lo sviluppo di interfacce grafiche che permettono una gestione dell'animazione da parte dell'utente. Il personaggio viene posizionato a piacimento nello spazio spostando le estremità delle sue membra.

Animare con la cinematica significa esprimere angoli di rotazione per le articolazioni, ma avendo molti gradi di libertà da gestire, il processo è molto lento. Al contrario se l'animatore potesse settare le rotazioni, trascinando il corpo del personaggio, l'animazione sarebbe più veloce. Per fare questo bisogna creare una corrispondenza biunivoca tra i gradi di libertà del personaggio e i gradi di libertà del dispositivo in input. Il problema è gestire questo alto numero di gradi di libertà cercando di trovare un dispositivo in input che gestisca il problema o semplificando il numero di parametri. Per la risoluzione, sono in corso diversi studi. [6]

## 2.9 DINAMICA DEI CORPI RIGIDI

Un corpo rigido è descritto dal vettore di stato:

$$Y(t) = \begin{cases} x(t) \text{ rappresenta la posizione} \\ R(t) \text{ rappresenta l'orientazione} \\ P(t) \text{ momento lineare} \\ L(t) \text{ momento torcente} \end{cases}$$

Le dimensioni di un corpo rigido sono definite nello “Spazio del Corpo”, cioè lo spazio tridimensionale in cui il corpo è immerso. Il vettore  $x(t)$  descrive la posizione del corpo rigido verificando la traslazione dall'origine allo spazio del mondo (spazio in cui il corpo rigido è immerso), in sintesi è la posizione del centro di massa al tempo  $t$  (Figura 19).

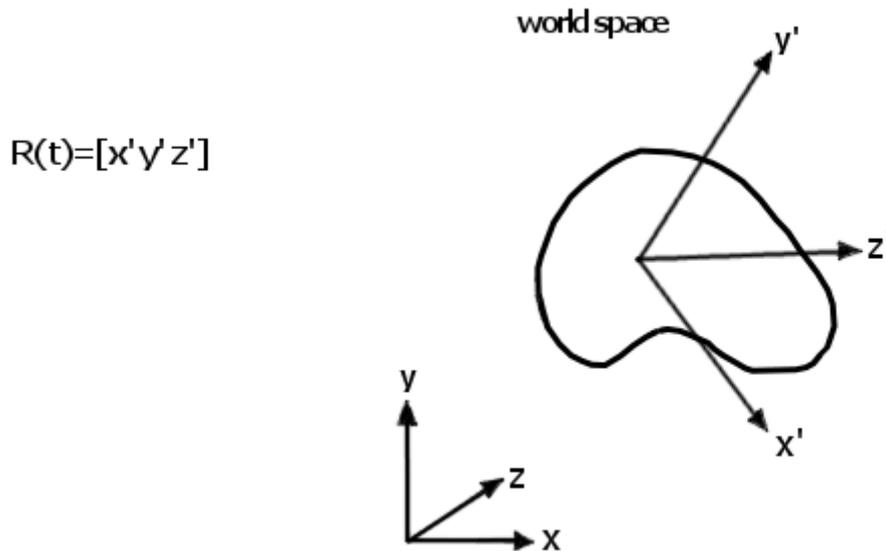


Figura 19: il corpo rigido nel sistema di coordinate

$X(t)$  e  $R(t)$  sono definite Variabili Spaziali. Queste due variabili permettono di vedere al variare del tempo le modifiche alla posizione e all'orientazione. Il corpo rigido subisce l'effetto di forze esterne producendo una velocità lineare e torsioni esterne che a loro volta producono una velocità angolare (Figura 20).

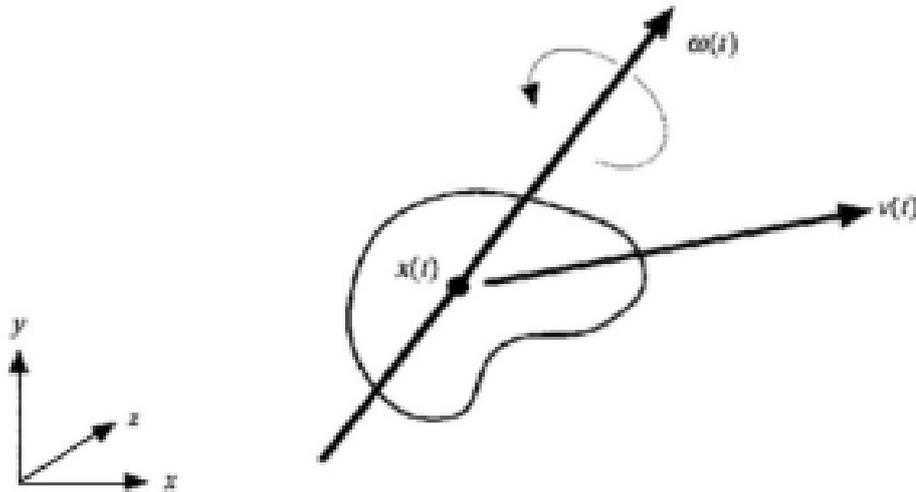


Figura 20: velocità lineare e angolare

Il movimento lineare è una quantità definita come segue:

$$P(t) = M v(t)$$

dove  $M$  è la massa del corpo e  $v(t)$  è la sua velocità lineare.

Si ricava:

$$P(t) = v(t)M$$

$$\dot{P}(t) = \tilde{v}(t) M$$

e dalla legge della dinamica si ottiene  $F = m * a$

$$\dot{P}(t) = F(t)$$

ossia il movimento lineare è equivalente alla forza totale agente sul corpo.

Il movimento angolare è la quantità:

$$L(t) = I(t)w(t)$$

dove  $w(t)$  è la velocità angolare applicata al corpo e  $I(t)$  è una matrice chiamata “tensore di Inerzia” che descrive come la massa del corpo è distribuita rispetto al centro di massa.

In conclusione lo stato del corpo rigido è definito dalla sua posizione e orientazione e dal suo movimento lineare e angolare. La massa del corpo e la sua densità vengono considerate costanti. Quando vengono determinate le variabili di stato, è possibile animare il corpo rigido. <sup>[11]</sup>

## 2.10 ANIMAZIONE DINAMICA

La tecnica dell'animazione dinamica è molto recente, ed è quella che si avvicina di più alla realtà. Il moto dell'attore virtuale è gestito da forze e torsioni applicate alle sue membra e al personaggio vengono attribuite massa, centro di massa e densità. Conoscendo posizione e orientazione in un preciso istante è possibile calcolare la velocità e l'accelerazione del corpo. Per ottenere il movimento deve essere associata un'equazione del moto ad ogni grado di libertà dell'articolazione. Questo richiede un alto tempo di CPU e altri svantaggi come l'innaturalità del moto prodotto e molte difficoltà che l'animatore può incontrare.

Nell'animazione dinamica ci sono due tipi di approcci, uno diretto e uno inverso.

### Animazione dinamica diretta:

in questo tipo di animazione vengono specificate le forze e i momenti torcenti applicati all'ossatura al variare del tempo, ossia i parametri del moto. Nel caso di strutture antropomorfe vanno considerati tutti i contributi al moto derivanti dall'interazione delle diverse parti interconnesse. Tutti gli elementi vengono considerati per la formulazione del sistema di equazioni di moto associato al corpo scheletrico, verificando che non aumenti la complessità.

### Animazione dinamica inversa:

in questo tipo di animazione si cerca di individuare le forze e i momenti torcenti richiesti per produrre all'interno di una scena un movimento prefissato. In generale, si procede con lo scrivere le equazioni che definiscono la velocità e torsione per ogni elemento dello scheletro, e poi si calcolano i contributi sugli elementi vicini. Tutti i calcoli sono fatti in confronto al sistema di coordinate locali del link che si considera. Il metodo rimane molto costoso e difficilmente generalizzabile a diversi casi di articolazioni. <sup>[6]</sup>

## 2.11 ANIMAZIONE AUTOMATIZZATA

Lo scopo dell'animazione automatizzata è quella di esonerare l'animatore da tutte le mansioni che non riguardano il processo creativo. Essa garantisce un alto livello di gestione, una buona aderenza automatica ai principi base dell'animazione e un controllo migliore sul movimento. L'automatizzazione però è ancora un problema aperto. L'idea è considerare le figure articolate come fossero robot simulati all'interno dell'ambiente dinamico e pensare di controllarle tramite programmi di controllo detti “*controllori*”. L'animazione è derivata dalla diretta simulazione di processi fisici. L'animazione particellare e la simulazione di effetti fisici è giusta per singoli corpi ma non è adeguata per personaggi con strutture articolate più complesse.

Una strada intrapresa dai ricercatori è la realizzazione di controllori che determinino le forze e le torsioni da applicare alle giunture dell'oggetto. La limitazione è che non è possibile generalizzarli a situazioni diverse.

Una strada diversa è stata l'animazione tramite ottimizzazione, per minimizzare l'energia interna del sistema sotto simulazione. Associando una funzione energia, per esempio, un vincolo di contatto tra due oggetti può essere espresso da una funzione di energia che cresce quando i due oggetti sono separati.

Infine altri ricercatori hanno animato strutture bidimensionali usando una rete di attivazione sensoriale, costituita da una rete neurale a topologia fissa. I dati in ingresso determinano lo stato in determinati punti della struttura e rilevano gli angoli delle articolazioni e guidano i controllori applicati alle giunture del personaggio. <sup>[6]</sup>

Molte altre tecniche sono in fase di sviluppo.



# CAPITOLO 3: SOFTWARE UTILIZZATO

## BREVE INTRODUZIONE A MAYA

Autodesk Maya è un software di computer grafica 3d. Viene utilizzato principalmente per la modellazione, animazione e rendering. È uno dei software più utilizzati per la realizzazione di film d'animazione e per effetti speciali. Produce le immagini grazie a sistemi di rendering integrati come Maya Software, Maya Hardware, Maya Vector e Mental Ray, e grazie al supporto di altri prodotti. È molto interessante la personalizzazione dei pulsanti, dei menu e delle procedure, c'è la possibilità di creare dei tool di modellazione e animazione molto complessi e la programmazione di nuove funzioni attraverso il linguaggio di scripting MEL (Maya Embedded Language). Inoltre è supportato anche il linguaggio di programmazione Python attraverso il quale è possibile ampliare ancora di più le funzioni.

Per ogni progetto viene definita una scena dove costruire e sviluppare i vari oggetti. Si possono poi salvare in vari formati, quello predefinito di Maya è Maya Binary (.mb).

La parte grafica di molti film d'animazione e alcuni effetti visivi presenti in alcuni programmi sono stati creati con Autodesk Maya.

Maya si basa sull'utilizzo di figure geometriche curve, piane, le quali verranno poi modificate con i vari comandi. Ad esempio possono essere estruse e modificate, selezionando ogni singolo vertice, faccia o edge dell'oggetto.

Per la creazione degli oggetti è possibile utilizzare la modellazione Nurbs, che si basa su curve parametriche, la modellazione poligonale, basata su curve chiuse a n lati definite da spigoli e da linee che li congiungono, infine superfici di suddivisione che incorporano il meglio delle prime due. Con le superfici di suddivisione si parte con superfici poligonali per poi arrotondarle con le Nurbs. Il vantaggio è che la superficie non tenderà a piegarsi, lo svantaggio è che richiedono un calcolo maggiore e molta memoria. <sup>[13]</sup>

## 3.1 INTERFACCIA

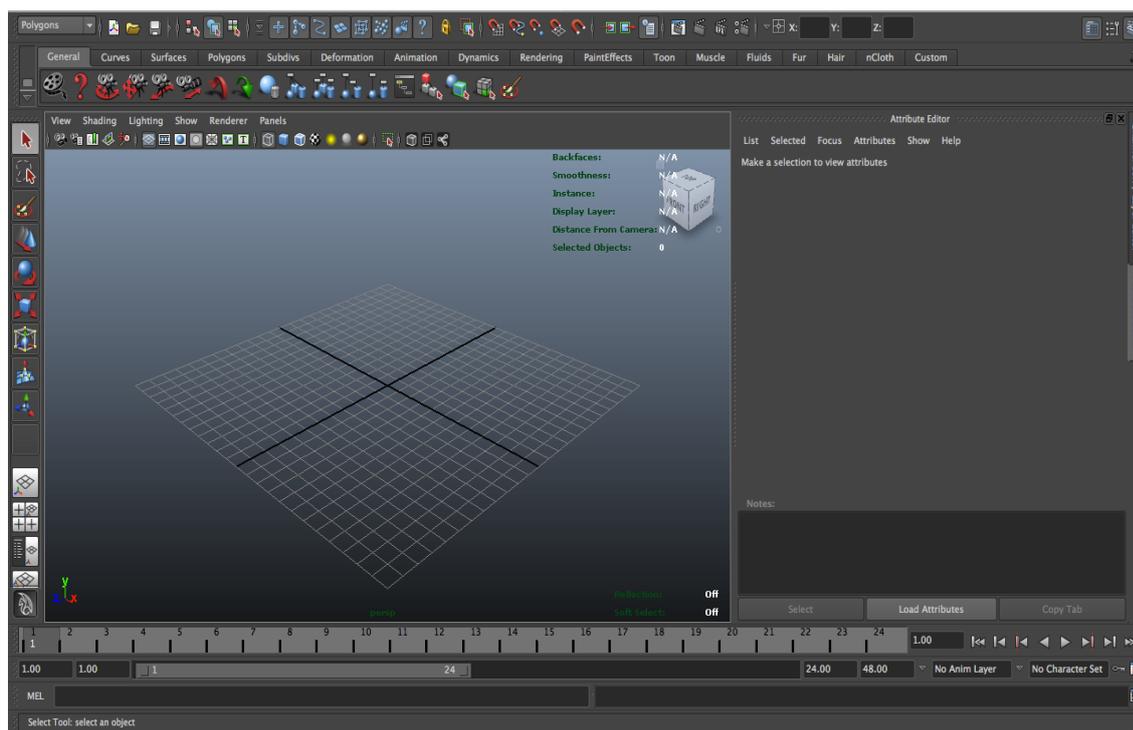


Figura 21: interfaccia di Maya

Quando si vuole creare un nuovo lavoro in MAYA la prima cosa da fare è creare un progetto. Un progetto è una directory nella quale vengono memorizzati tutti i file che possono essere diverse scene, immagini, materiali, texture che verranno utilizzati nel lavoro. Per creare un nuovo progetto basta utilizzare il menu File e selezionare la voce Project Window. È fondamentale salvare spesso la scena che stiamo creando. La scena è tutto quello che viene realizzato nel Workspace. Fanno parte della scena anche le luci, oggetti e telecamere associate.

Quando si apre il programma come possiamo vedere dall'immagine, si apre la vista prospettica, visualizzando la scritta "persp". Questa vista ha un proprio menù in alto a sinistra. L'incrocio dei due assi cartesiani viene chiamato punto Origin. Gli assi cartesiani che troviamo in Maya sono X, Y, Z e l'origine che è nel punto 0,0,0. L'asse delle X viene indicata con il colore rosso, quello delle Y con il colore verde e quello delle Z con il colore blu (Figura 21).<sup>[16]</sup>

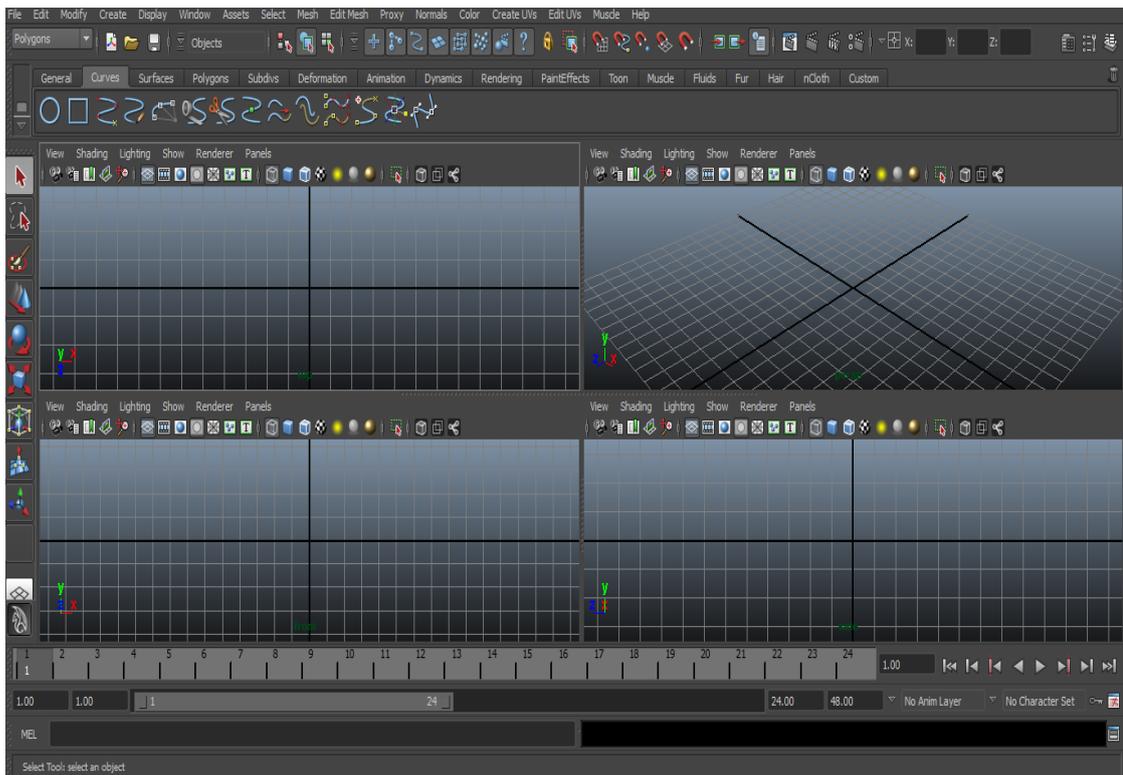


Figura 22: viste di Maya

L'immagine qui sopra mostra le quattro viste messe a disposizione da Maya. La vista prospettica, la vista frontale, la vista top e la vista side. Per passare da una vista all'altra basta selezionarla e premere lo spazio sulla tastiera. Avere quattro viste è molto comodo nella creazione di un oggetto perché permette di vedere l'oggetto da ogni angolatura. Ogni vista inoltre è indipendente perché ha anche un proprio menu (Figura 22).

I menu sono raggruppati in set e per ogni operazione c'è un menu dedicato. Il "Menu Bar" è quello tipico che utilizzano i software di grafica, con in più dei menu specifici di Maya relativi alla creazione ed alla modifica degli oggetti (Figura 23-24).

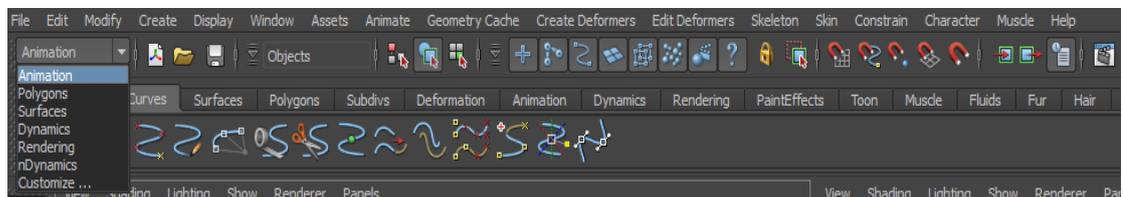


Figura 23: menu ad elenco della Status Bar



Figura 24: menu polygons

Il menu a tendina che viene mostrato in figura 23 fa parte della “Status Bar”. Ogni parte dell’elenco corrisponde ad un modulo in Maya: Animation, Polygons, Surfaces, Dynamics, Rendering, nDynamics, ognuno dei quali raggruppa una serie di tool e funzioni.

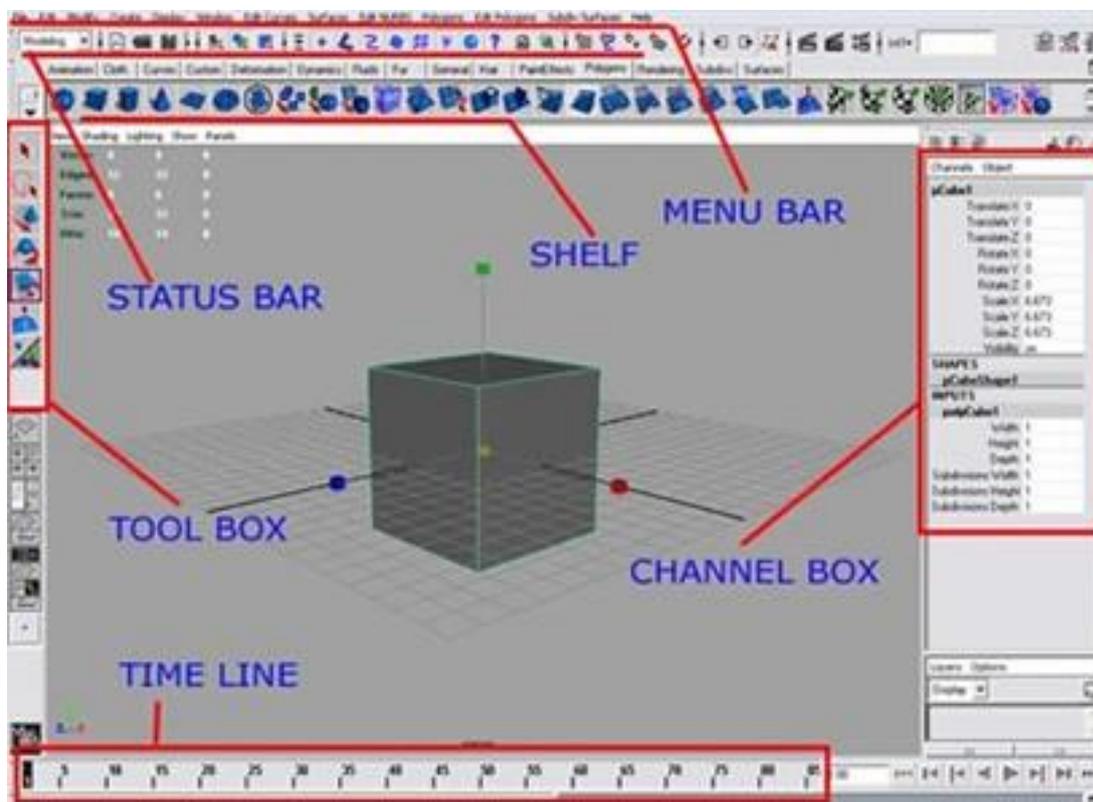


Figura 25: rappresentazione dei menu

Nella “Status Bar” troviamo anche i pulsanti comuni di un programma, strumenti di selezione, aggancio alla griglia ed i pulsanti per lanciare il rendering della scena. Sotto la “Status Bar” c’è la “Shelf”. È una barra che consente di creare, modificare degli oggetti predefiniti in Maya, inoltre è possibile creare dei pulsanti personalizzati per automatizzare dei processi che vengono effettuati spesso durante il processo di creazione.

Il “Tool box” è un menu posto a sinistra dell’interfaccia che contiene i pulsanti di selezione per manipolare gli oggetti. Sono presenti lo strumento di selezione, il Move tool per muovere gli oggetti, il Rotate tool per ruotarli, lo Scale tool per modificare le dimensioni dell’oggetto (Figura 26).<sup>[14]</sup>

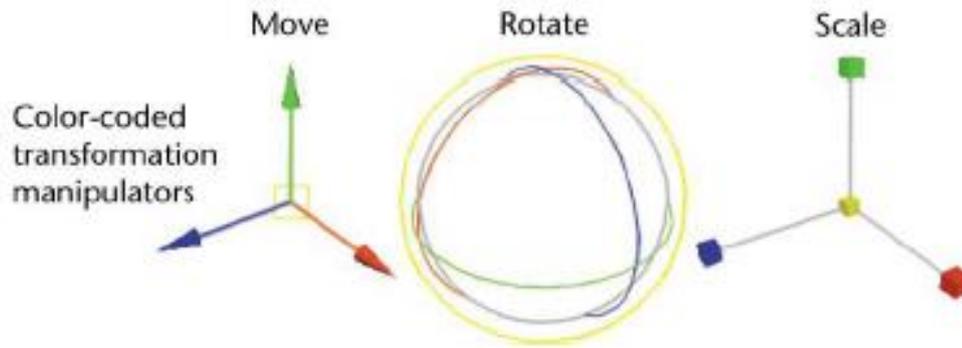


Figura 26: tool di modifica degli oggetti

Il “Channel Box” quando un oggetto è selezionato, mostra le caratteristiche principali divise in tre aree principali: Transformation node, Shape node, Input node. Agendo su questo pannello possiamo modificare il nome, la traslazione, la scala, la rotazione e altre caratteristiche dell’oggetto. Infine il “Time Line” è un box che indica l’avanzamento dell’animazione con i pulsanti tipici. <sup>[14]</sup>

## 3.2 MODELLAZIONE

Con modellazione 3d si indica un processo atto a definire una qualsiasi forma tridimensionale in un spazio virtuale generata su computer, questi oggetti chiamati modelli 3d, vengono realizzati utilizzando particolari programmi di grafica, chiamati anche modellatori 3d. La modellazione 3d può anche essere fine a sé stessa, ma generalmente la modellazione rappresenta il primo step di una serie di operazioni successive che determineranno il risultato finale.

La modellazione della computer grafica viene applicata in diversi campi: esistono applicazioni a carattere scientifico o tecnico che sono relative alle scienze del territorio, storiche, medicina, architettura e applicazioni artistiche che comprendono l'industria del cinema, la televisione, i videogame, la grafica.

Tutta la modellazione 3d rientra in due grandi famiglie: la modellazione organica e la modellazione geometrica. La modellazione organica viene utilizzata per realizzare essere umani, animali o umanoidi. Viene usata per tutti i soggetti come rocce, piante, alberi. Vengono creati anche molti oggetti di industrial design. La modellazione geometrica viene utilizzata per realizzare oggetti tecnici o meccanici, in generale per tutte quelle cose che sono artificiali. Uno stesso oggetto però può contenere sia una modellazione organica che una modellazione geometrica. Le tecniche di modellazione sono: procedurale, manuale, scansione. A loro volta possono essere suddivise in modellazione solida, volumetrica, di superfici.

Ogni software come anche Maya ha integrate delle primitive che possono essere utilizzate per modellare gli oggetti. In Maya si può utilizzare la modellazione poligonale, la modellazione Nurbs (Non-Uniform Rational B-Spline) e le superfici di suddivisione. La modellazione poligonale si basa su poligoni che sono composti da vertici, spigoli e facce. Le tecniche che vengono usate sui poligoni si occupano di modificare gli oggetti in modo da renderli il più realistici possibili. Le primitive poligonali messe a disposizione da Maya sono: cube, sphere, cylinder, cone, plane, prism, pyramid, helix, soccer ball e platonic solid. Le principali tecniche per la modellazione di poligoni sono cinque. La prima riguarda lo spostamento di elementi, dove lo spostamento di un singolo elemento o di un gruppo di essi determina una modifica della mesh di partenza. <sup>[15]</sup>

La selezione di un componente della mesh e il suo spostamento nello spazio è la tecnica più semplice di modellazione poligonale.

Un'altra tecnica consiste nel partire da primitive di base e poi spostarle, ruotarle e scalarle fino ad ottenere l'oggetto desiderato. È una tecnica semplice ma genera modelli poco complessi. Con il metodo della mesh piana viene creata una griglia di poligoni posizionati in piano e aventi la struttura, il profilo e la conformazione generale dell'oggetto finale. In seguito si determina la tridimensionalità. Il metodo a tela di ragno è una variante della tecnica descritta prima nella quale si modellano i poligoni partendo da una zona centrale e procedendo poi verso l'esterno. È complesso ma molto preciso. Infine la tecnica di rifinitura progressiva permette di avere a disposizione tutti i passaggi intermedi di modellazione.

La modellazione Nurbs è un tipo di modellazione matematica basata su curve. Sono superfici matematiche perfettamente smussate e sono facilmente modificabili attraverso i punti di controllo chiamati Control Vertex. Il grado della curva identifica quanti control vertex sono presenti in un segmento. Il grado tre è quello più utilizzato. I parametri sono i valori numerici dei punti di una curva. I punti di una curva vengono identificati all'interno di una coordinata detta  $u$ , che percorre tutta la curva dall'inizio alla fine. I due strumenti che vengono utilizzati sono edit point che crea la curva posizionando gli edit point e control vertex che permette di creare la curva posizionando i vertici. Con l'utilizzo di questi strumenti c'è un maggior controllo da parte dell'utente. La tecnologia Nurbs fu introdotta dalla Boeing nel 1975. È adatta per rappresentare superfici organiche, ad esempio per la creazione di personaggi e oggetti di design. Una superficie Nurbs può essere generata o dalle stesse curve Nurbs, attraverso operazioni di estrusione, rivoluzione, lofting, patching, oppure da primitive di tipo Nurbs come sfere, cilindri. Le modifiche consistono nel editare i punti della superficie o i vertici e dove è necessario si possono aggiungere o rimuovere curve, come si possono aggiungere e rimuovere i vertici di controllo nelle curve.

Esistono diversi strumenti che posso essere utilizzati con le curve. Lo strumento "Planar", genera una superficie planare all'interno di una curva chiusa. Lo strumento "Revolve" genera una superficie effettuando una rivoluzione a  $360^\circ$  di una curva. Lo strumento "Loft" genera una superficie passante per un numero arbitrario di curve, dette profili. "Extrude" genera una superficie effettuando un'estrusione di una curva su un percorso rappresentato da una seconda curva.

“Biral” permette di generare una superficie effettuando un’estrusione di una o più curve su due profili. “Boundary” genera una superficie utilizzando come lati quattro curve definite dall’utente. “Bevel” crea una superficie estrusa su una distanza definita dall’utente e ne arrotonda gli estremi. Viene generata una superficie di estrusione con i bordi smussati. Infine “Snap” è uno strumento che permette di trasformare gli oggetti o i componenti in modo da agganciarli alla griglia, a curve o a punti di altri oggetti. Uno snap si comporta come un magnete. Lo snap può essere alla griglia, alle curve, ai punti o ai piani di visualizzazione. <sup>[9]</sup>

Infine la modellazione attraverso le superfici di suddivisione. Esse furono utilizzate per la prima volta dalla Pixar nel 1989. Sono uno strumento molto versatile. Unificano le migliori caratteristiche della modellazione poligonale e della modellazione Nurbs. Sono perfettamente smussate come le Nurbs, ma possono avere anche come base forme dalla topologia irregolare tipiche dei poligoni. <sup>[15]</sup>

Ora verranno esaminate più nel dettaglio alcune operazioni svolte sui poligoni (Figura 28-29).

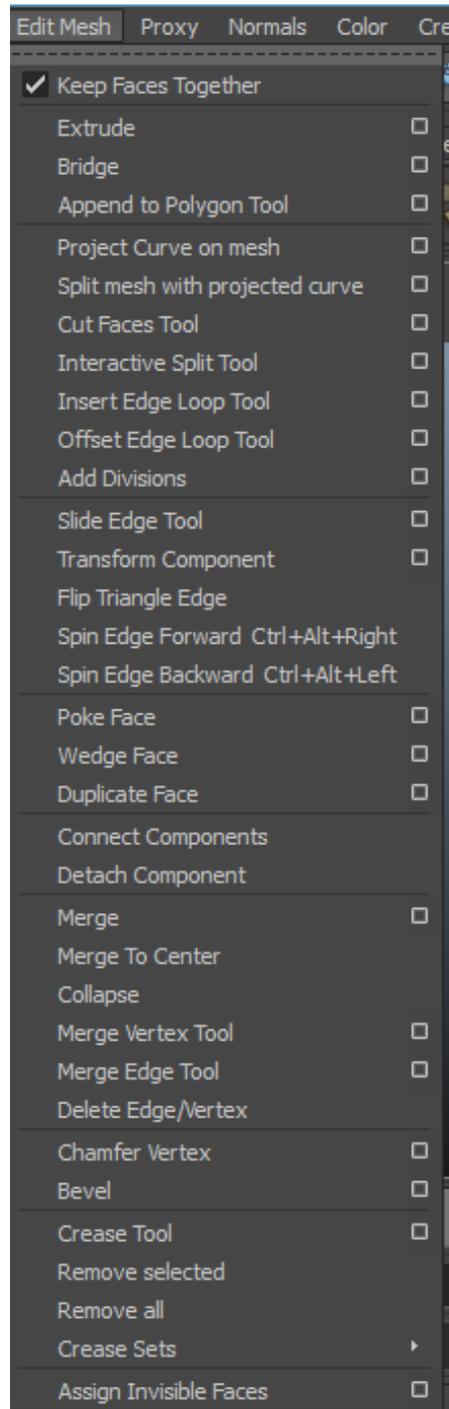


Figura 27: menu Edit mesh

Questo è il menu “Edit mesh” dove si trovano i vari strumenti di modifica degli oggetti. (Figura 27)

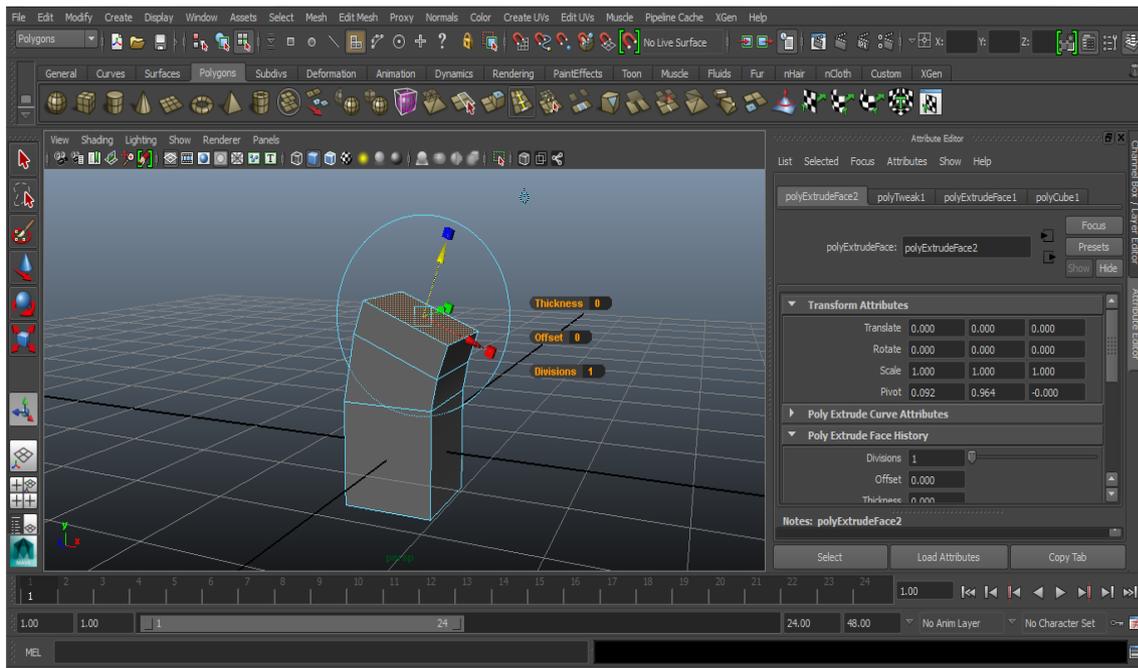


Figura 288: caso di estrusione

*Estrusione*: con questa tecnica posso aggiungere delle facce al poligono lasciando però invariato l'oggetto principale (Figura 28).

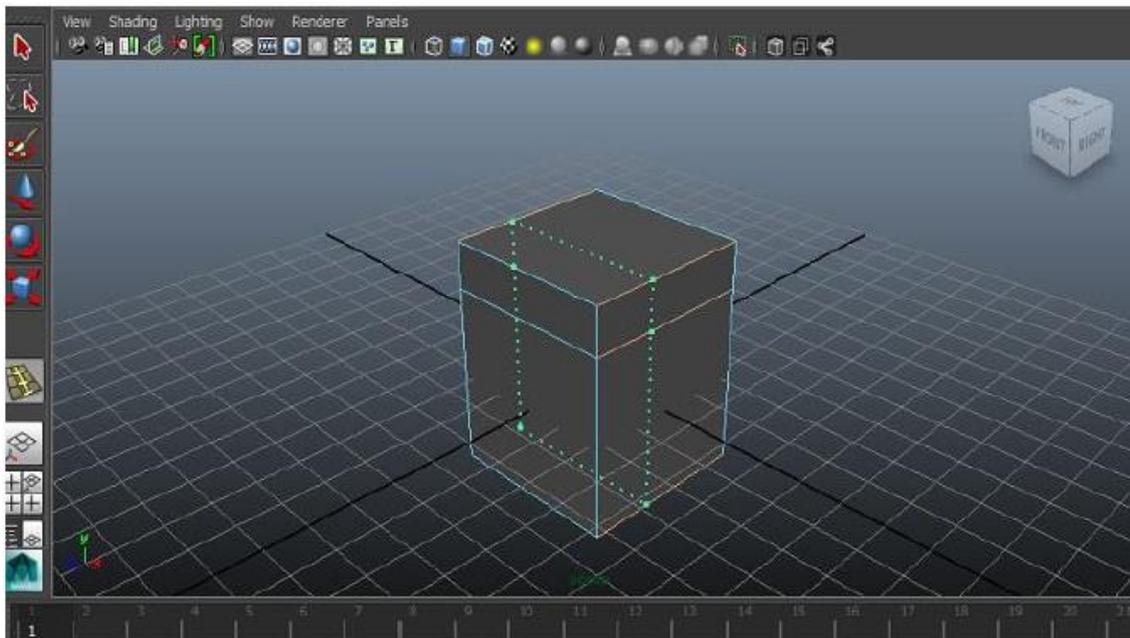


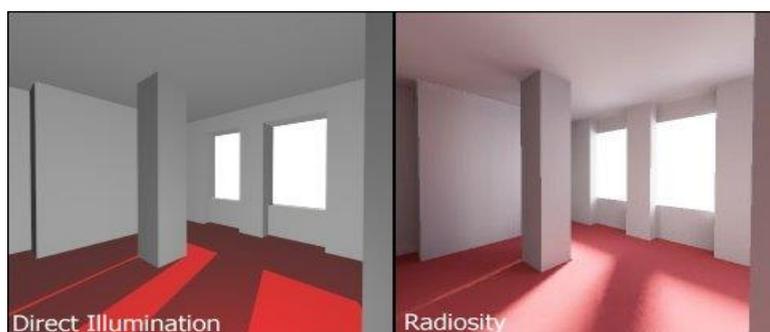
Figura 29: insert edge loop

*Insert edge loop*: con questo strumento inserisco un'ulteriore edge. Viene utilizzato quando si vuole modificare la forma dell'oggetto oppure per suddividerlo in più parti (Figura 29).

### 3.3 RENDERING

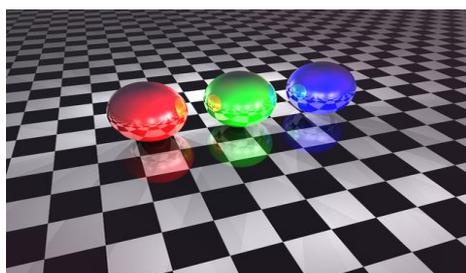
Il rendering è un termine inglese che indica resa grafica, ovvero un'operazione effettuata dal disegnatore per produrre in buona qualità un oggetto. Nell'ambito della computer grafica identifica la generazione di un'immagine a partire da una descrizione matematica di una scena tridimensionale interpretata da algoritmi che definiscono il colore di ogni punto dell'immagine. Nel processo di generazione grafica è l'ultimo stadio e fornisce l'aspetto finale al modello e all'animazione. Viene utilizzato per il montaggio dei video, dei giochi, per gli effetti visivi per film e serie tv. Il rendering è un processo lento e richiede un numero elevato di elaborazioni da parte della CPU. Quando la scena è completa inizia la fase di rendering che aggiunge texture, luci, e posizioni di altri oggetti. Il risultato è l'immagine completa.

I due algoritmi principali che vengono utilizzati per il rendering sono il radiosity e il ray tracing. L'algoritmo radiosity è un algoritmo di illuminazione globale (*Figura 30*). La scena viene suddivisa in più patch e vengono studiate le interazioni luminose tra le varie superfici.



*Figura 30: applicazione dell'algoritmo di radiosity*

L'algoritmo *ray tracing* descrive un metodo per la produzione di immagini costruite in sistemi di computer grafica. Produce una serie di raggi che determinano il colore da assegnare ad ogni pixel. A seconda di dove il raggio incontra l'oggetto viene assorbito o riflesso (*Figura 31*).<sup>[15]</sup>



*Figura 31: algoritmo di ray tracing*



# CAPITOLO 4: SVILUPPO DEL PROGETTO

In questo capitolo viene descritto il processo eseguito per la realizzazione del progetto. Nello specifico verrà mostrata la creazione del personaggio e dei componenti della scena.

## 4.1 IL PERSONAGGIO OLAF

Il personaggio che ho deciso di modellare è il pupazzo di neve tratto dal film d'animazione Frozen. Nel film il pupazzo di neve, chiamato Olaf, viene creato dalla protagonista Elsa, attraverso magici poteri. È un personaggio molto divertente perché è molto innocente ed è molto abile nel smontarsi nel momento giusto o anche in momenti non appropriati.



Figura 32: personaggio Olaf

## 4.2 SVILUPPO DEL PERSONAGGIO

La modellazione del personaggio è avvenuta utilizzando gli strumenti messi a disposizione dal programma grafico Maya. La creazione è iniziata dalle componenti del corpo, in seguito delle braccia e poi la faccia, la parte più complessa. Per le varie parti sono stati utilizzati gli strumenti poligon. Per il corpo è stata utilizzata la primitiva cilindro che è stata poi arrotondata utilizzando il comando smooth, e successivamente scalata. Il comando smooth suddivide equamente la superficie poligonale o le facce selezionate, creando diverse facce per arrotondare e smussare l'oggetto originale. Stessa procedura per la creazione dei piedi.

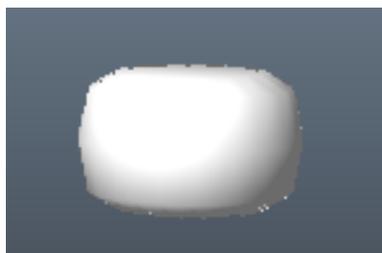


Figura 33: prima parte del corpo

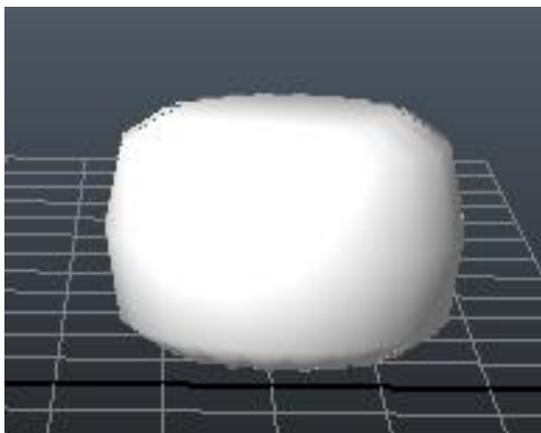


Figura 34: seconda parte del corpo



Figura 35: piedi di Olaf

Per la modellazione delle braccia e delle mani è stato utilizzato il comando extrude. Con lo strumento extrude è possibile ricavare una faccia o un bordo dalla superficie di un poligono. È possibile utilizzare anche la direzione e la forma di una curva.



Figura 36: braccia

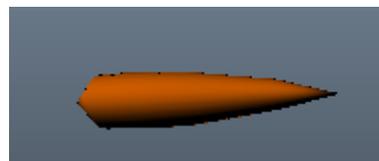
Per quanto riguarda i bottoni è stata modificata e opportunamente scalata la primitiva sphere. Stessa primitiva utilizzata per creare la faccia del personaggio. Sia per la creazione degli occhi, del naso, e dei “capelli” sono state modificate delle primitive già presenti in Maya. Per arrotondare gli angoli acuti dei poligoni viene utilizzato lo strumento Bevel, che richiede la selezione di uno o più bordi.



*Figura 37: bottoni*



*Figura 38: occhio*



*Figura 39: naso*



*Figura 40: "capelli"*

La parte più complessa è stata la modellazione della faccia, resa però più semplice dallo strumento Sculpt Geometry Tool:

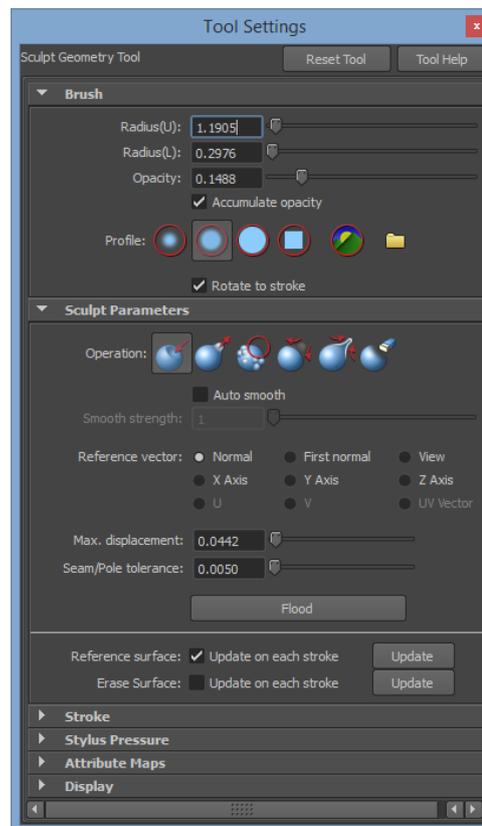


Figura 41: Menu Sculpt Geometry Tool

Questo strumento ha permesso la modellazione delle varie parti della faccia, permettendo di ingrandire o smussare determinati punti.

È possibile scolpire manualmente superfici Nurbs, poligoni, o suddivisioni con un pennello. Basta dipingere sulla superficie per spostare vertici e ottenere la forma desiderata. Ci sono sei principali operazioni: push/pull, smoothing, relaxing, pinching, sliding, erasing.



Figura 42: faccia di Olaf prima delle modifiche

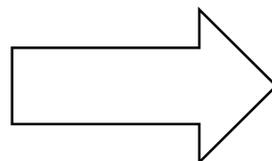


Figura 43: faccia di Olaf dopo le modifiche



Figura 44: Olaf realizzato

### 4.3 COSTRUZIONE DELLA SCENA

Olaf, il personaggio creato verrà poi fatto muovere in una scena ghiacciata. La scena che è stata creata è totalmente di fantasia, in essa ci sono degli alberi innevati, creati attraverso uno strumento di Maya, che ricordano alcune scene del film; inoltre è presente una fontana, la quale permette di portare Olaf in una scena di città. Questi due elementi creano lo sfondo per l'animazione della camminata del pupazzo.

Per la creazione degli alberi innevati sono stati utilizzati i *paint effect*. Sono un effetto di rendering. Utilizzano calcoli dinamici propri per creare del movimento. Questo strumento utilizza pennelli per tracciare gli effetti nella scena. I pennelli creano tubi renderizzati attraverso il motore di rendering di Maya. I tubi hanno proprietà dinamiche. Questo strumento viene renderizzato come post process, viene elaborato e renderizzato dopo il rendering degli altri oggetti della scena. È possibile anche convertire i paint effect in superfici poligonali che verranno poi renderizzate nella scena. Dipingendo sulla superficie le pennellate rimangono collegate alla geometria anche durante gli spostamenti. <sup>[16]</sup>

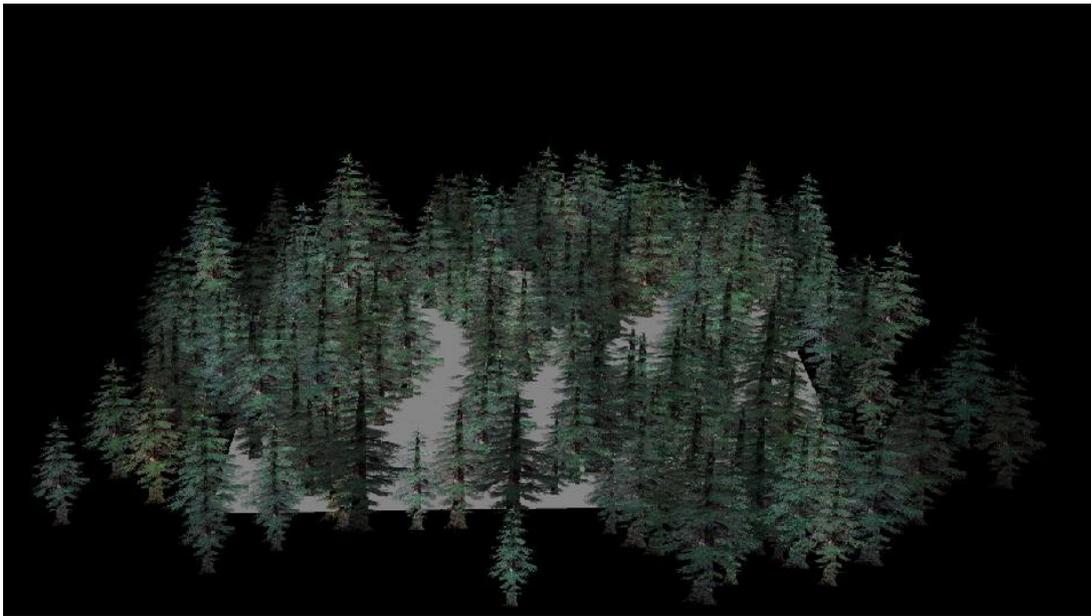


Figura 45: rendering foresta

Nella scena è stata inserita anche della neve, per far sembrare più realistico il paesaggio ghiacciato.

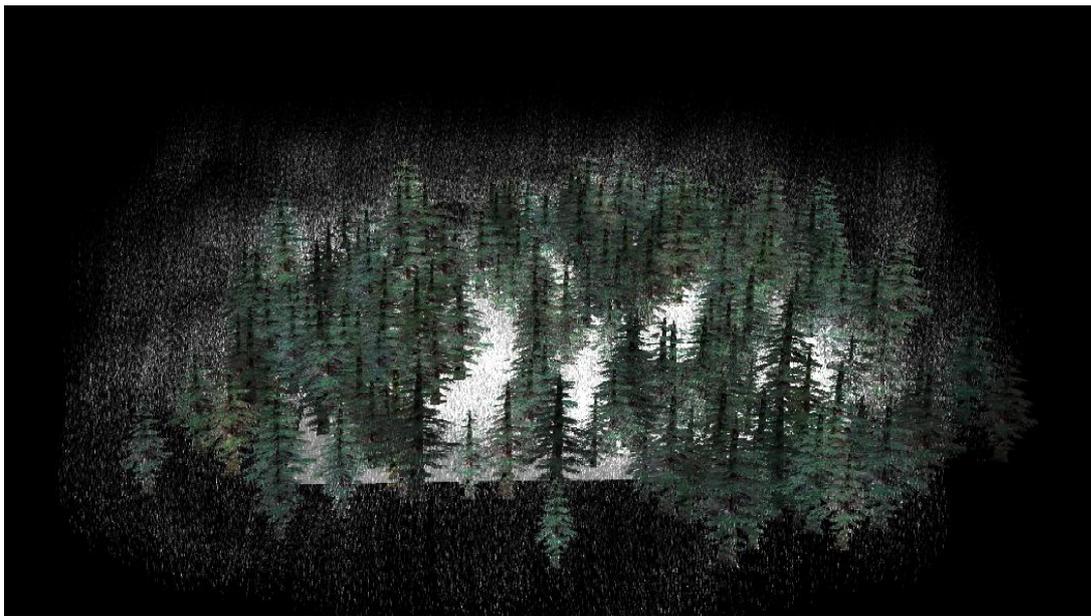


Figura 46: rendering foresta e neve

Per la costruzione della fontana è stata utilizzata la primitiva torus. È una geometria a cerchio 3d. Modificando le dimensioni e applicando lo smooth è stato possibile creare la base della fontana. La fontana a cui ci si è ispirati è quella che si trova nella piazza di Santarcangelo di Romagna.



Figura 47: fontana di Santarcangelo

Per prima cosa è stata creata l'acqua che scorre, attraverso lo strumento Particle di Maya. Questo strumento fa parte del ramo dinamico del programma. Sono state create delle relazioni tra acqua e piano della fontana in modo da far collidere le particelle su un piano. È stato ricreato l'effetto vero della fontana, ossia la fuoriuscita dell'acqua, attraverso l'emettitore di particelle. Un emettitore è un oggetto di Maya, dopo la creazione delle particelle, si assegna alle particelle dei valori per definirne l'aspetto. È possibile impostare velocità, direzione, volume. Dopo la creazione le particelle si basano su proprie proprietà. Esse definiscono collisioni e relazioni con la scena.

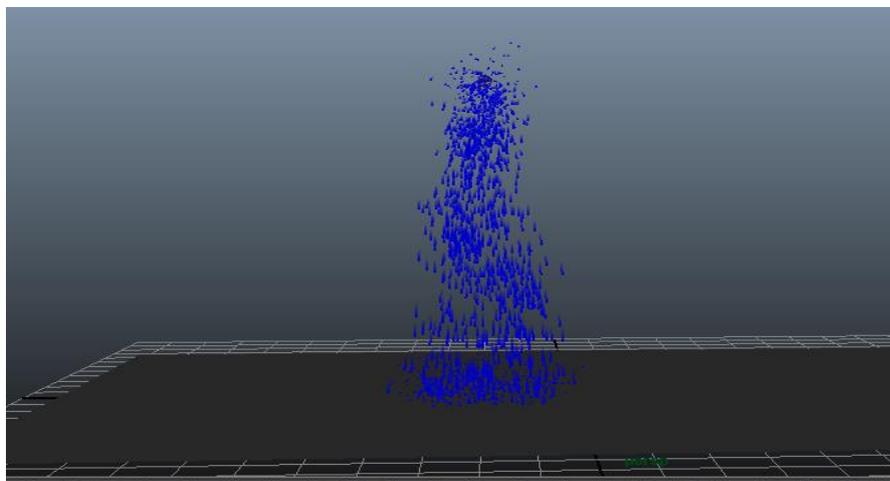


Figura 48: particelle che ricreano l'effetto dell'acqua che scorre

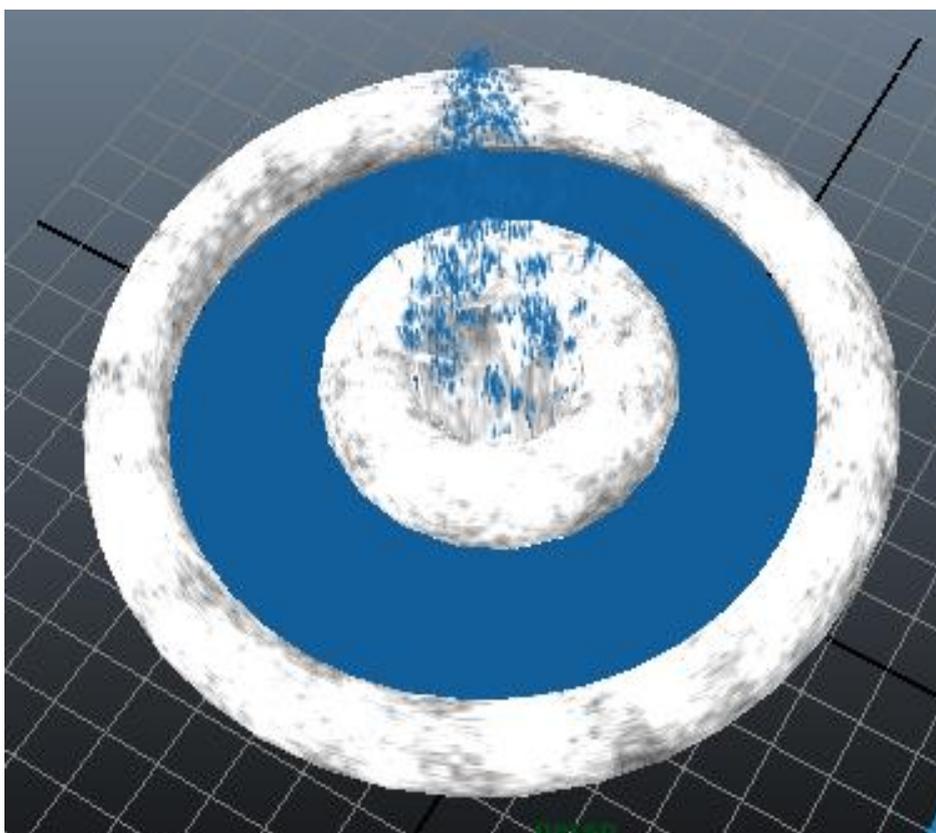
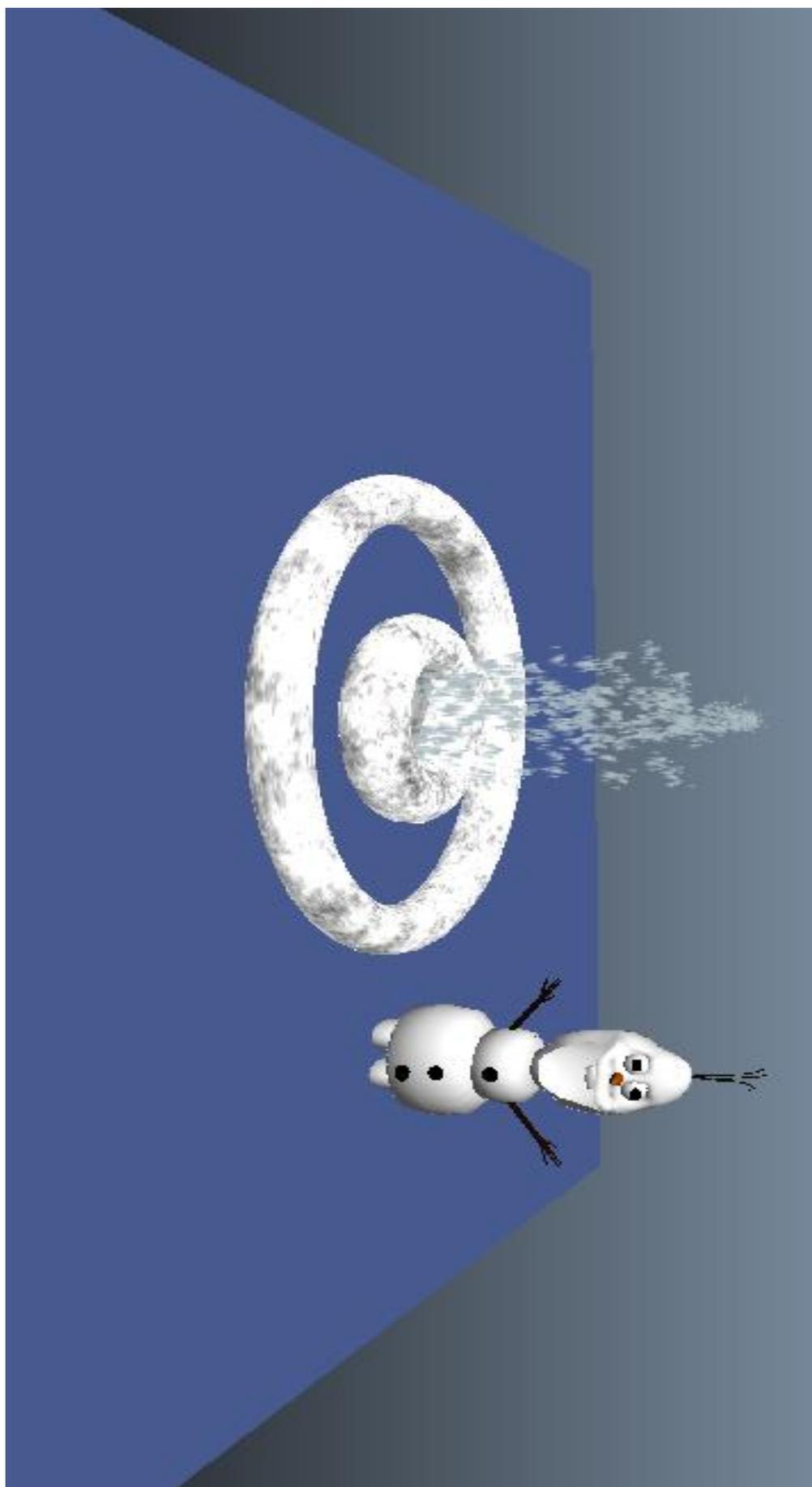


Figura 49: fontana

Attraverso lo strumento torus è stata ultimata la fontana, in seguito sono stati applicati dei colori, per renderla il più possibile reale. La fontana viene poi inserita al centro della scena tutta ghiacciata.



Figura 50: fontana innevata



*Figura 51: scena Olaf e fontana*

## 4.4 MATERIALI IN MAYA

I materiali aiutano a rendere la scena il più reale possibile. Un materiale descrive come un oggetto riflette la luce, infatti le proprietà dei materiali sono strettamente collegate a quelle della luce. L'editor dei materiali in Maya è l'Hypershade, attraverso il quale si creano i materiali e si attribuiscono alla scena.

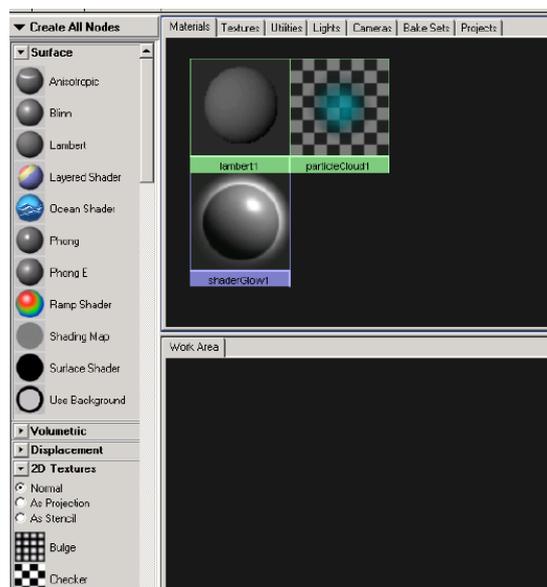


Figura 52: finestra Hypershade

I vari tipi di materiali sono:

- *Lambert*: è un materiale piatto, non ha zone di illuminazione speculare. Viene attribuito di default al momento della creazione dell'oggetto;
- *Phong*: considera la curvatura della superficie, la direzione della luce e la posizione della camera per ottenere un risultato più accurato che tiene in considerazione come il materiale riflette la luce; produce quindi zone di riflessione speculare;
- *Blinn*: è simile al Phong ma l'area di illuminazione speculare riflette la luce in modo più accurato;
- *Anisotropic*: è caratterizzato da una zona di illuminazione irregolare, allungata e ruotata.

Le proprietà di ogni materiale vengono definite nell'Attribute Editor. Le proprietà sono divise in due menu: il “*common material attributes*” e “*specular shading*”.

Nel “*common material attributes*” è possibile modificare il colore, la trasparenza, l'ambient color, incandescence, diffuse, traslucente, traslucente focus.

Nello “*specular shading*” viene modificata la larghezza della zona di riflessione speculare, l'intensità, il colore, la capacità di una superficie di riflettere oggetti in scena. <sup>[16]</sup>

## 4.5 LUCI IN MAYA

Le luci sono oggetti che simulano l'effetto dell'illuminazione delle case o dei riflettori cinematografici. Se non vengono inserite, Maya utilizza la luce di default. Lo scopo delle luci è quello di rendere più credibile la scena. Per mettere in evidenza l'intero oggetto è necessario utilizzare un modello di illuminazione, cioè un modello matematico che descrive l'interazione tra la luce e gli oggetti della scena. Esistono due categorie di modelli: i *modelli locali* e i *modelli globali*. I *modelli locali* descrivono le caratteristiche delle sorgenti luminose, degli oggetti e la loro interazione. I *modelli globali* considerano in modo molto accurato le interazioni che avvengono tra le sorgenti di luce, gli oggetti e la luce riflessa dagli oggetti.

### 4.5.1 MODELLI LOCALI

Modello di Lambert: è il più semplice e descrive il comportamento di superfici prive di riflessioni. In una superficie diffusa la luce viene diffusa in tutte le direzioni in modo che l'intensità sia maggiore quando viene riflessa nella direzione della sorgente e minima nella direzione ortogonale. Questa proprietà viene espressa con una equazione che fa variare l'intensità della luce riflessa in base al coseno dell'angolo fra il raggio luminoso e la normale alla superficie. Lo svantaggio è che si ottengono immagini molto in contrasto con parti molto illuminate e altre in ombra.

Luce ambientale: attraverso questa luce viene ridotto lo svantaggio del modello di Lambert, la luce ambientale aumenta la luce nella scena in modo diffuso.

Modello di Phong: esso introduce la riflessione speculare, origina bagliori dovuti a riflessioni delle sorgenti luminose. La superficie non riflette più in tutte le direzioni ma ha una direzione privilegiata a seconda dell'orientamento dell'osservatore.

### 4.5.2 MODELLI GLOBALI

I modelli globali tengono conto della luce che proviene indirettamente sugli oggetti della scena. Esistono due metodi che garantiscono un'elevata accuratezza: *il ray-tracing* (tracciamento dei raggi) e *radiosity* (metodo della radiosità).

Il *ray-tracing* determina il valore del colore e la luminosità di ogni elemento dell'immagine finale, basandosi sulla storia dei raggi luminosi che hanno determinato quel valore. Per il calcolo della storia dei raggi vengono utilizzate le leggi dell'ottica geometrica.

Il limite di questo metodo è la complessità di calcolo, inoltre non è adatto per il calcolo in tempo reale, come le applicazioni di videogiochi.

Il metodo della radiosità consiste nella soluzione del problema del bilancio dello scambio di energia radiativa che si svolge tra tutti gli elementi in una scena chiusa.

### 4.5.3 PROPRIETÀ DELLA LUCE

L'*intensità della luce* in natura influisce sull'oggetto illuminato dandogli colori smorti o accesi. Una luce fiavole, invece proiettata su un oggetto dai colori vivaci mostra colori pallidi.

L'*angolo di incidenza* è molto importante. Se c'è una forte inclinazione della superficie rispetto ai raggi luminosi verrà ricevuta una luce minore.

L'*attenuazione*, la luce diminuisce con l'aumentare della distanza.

La *radiosità*, la luce riflessa da un oggetto illumina altri oggetti.

Il *colore*.

### 4.5.4 OGGETTI LUCE

In Maya esistono 6 tipi di oggetti luce:

*Ambient*: illumina tutti gli oggetti in scena in modo uniforme. Viene effettuato un appiattimento della scena.

*Directional*: una luce direzionale che emette raggi paralleli in un'unica direzione.

*Point*: emette luce in tutte le direzioni da un singolo punto nella scena in modo uniforme.

*Spot*: emette un fascio di luce come un flash.

*Area*: emette luce da una superficie rettangolare che può essere scalata.

*Volume*: illumina lo spazio tridimensionale all'interno di una sfera, illumina gli oggetti che si trovano entro i propri limiti. Può essere scalata.

È possibile inserire anche delle ombre. Le ombre aumentano il realismo della scena e l'effetto 3D. Il calcolo delle ombre aumenta però il tempo di rendering. Esistono due tipi di ombre, le *mappe d'ombra* e le *ombre ray-tracing*.<sup>[16]</sup>

## 4.6 ANIMAZIONE IN MAYA

Uno strumento fondamentale per l'animatore è la finestra Graph Editor che fornisce la maggior parte degli artifici dell'animazione. Attraverso questa finestra, leggendo le curve di animazione è possibile giudicare la direzione, la velocità, l'accelerazione e la collocazione nel tempo di un oggetto. Le curve sono simili a curve Nurbs. I punti presenti in una curva di animazione rappresentano i fotogrammi chiave e controllano la curvatura attraverso le maniglie di tangenza. Selezionandola e trascinandola si modifica la curva. Il grafico invece è la rappresentazione della posizione dell'attributo di un oggetto nel tempo. Ogni punto della curva rappresenta il punto in cui si trova l'oggetto. Inoltre la forma della curva rappresenta il modo in cui l'oggetto si muove.

Due termini sono importanti nell'animazione: il *movimento secondario* che comprende tutti i piccoli elementi di una scena che si muovono perché qualcosa nella scena si sta muovendo e il *follow-through*, è l'azione dell'animazione che segue l'azione principale di un oggetto o di un personaggio.

È possibile anche animare su percorso. Consente di muovere un oggetto lungo una curva, denominata percorso.

Per animare un personaggio è necessario creare uno scheletro. Lo scheletro è un'armatura creata in 3d che guida la geometria. Viene creato lo scheletro e collegato al personaggio. Le ossa dello scheletro si animano e a loro volta animano le parti desiderate. Grazie alle giunture collegate con lo scheletro è possibile piegare e deformare la geometria.

Gli scheletri si basano sulle gerarchie. Viene creata una *giuntura padre* che coordina tutte le altre. Un *osso* è la lunghezza tra due giunture. Facendo riferimento alla cinematica, la cinematica diretta consente di ruotare le ossa direttamente in corrispondenza della giuntura per assumere le pose. Viene animato fotogramma per fotogramma. La rotazione di una giuntura influisce sulla posizione delle ossa e delle giunture della gerarchia. Nella cinematica inversa invece vengono create maniglie collegate alle giunture. Le ossa e le giunture sono influenzate solo dal movimento della maniglia.

Con la cinematica inversa esistono strumenti che permettono di spostare una parte del corpo dove deve stare senza muovere ogni volta tutto lo scheletro.

Nel progetto sono stati utilizzati gli scheletri utilizzando la cinematica inversa. <sup>[16]</sup>

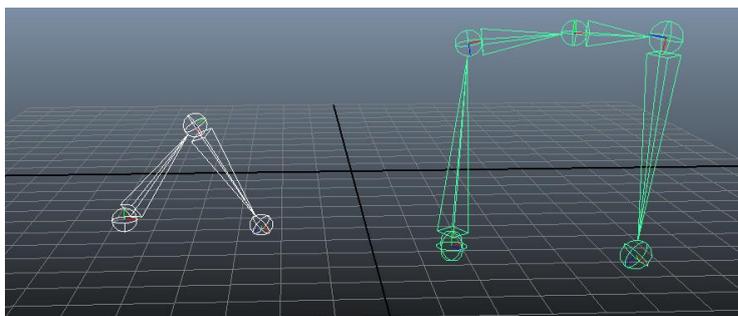


Figura 53: scheletri da applicare ad Olaf

## 4.7 RELAZIONI DI BASE DELL'ANIMAZIONI IN MAYA

È possibile creare l'animazione di un oggetto in base all'animazione di un altro oggetto impostando una relazione tra i due. Vengono utilizzati i constraint per effettuare relazioni tra origine e destinazione. Esistono sei tipi di constraint.

### POINT CONSTRAINT

Il point constraint collega solo l'attributo Translate dell'origine alla destinazione. I constraint si basano sui perni di rotazione, per questo un point assocerà l'origine in corrispondenza del relativo perno di rotazione al perno di rotazione della destinazione.

### ORIENT CONSTRAINT

Collega gli attributi Rotation dell'origine a quelli destinazione. Attraverso il parametro Offset è possibile impostare una compensazione in tutti gli assi.

### SCALE CONSTRAINT

Collega gli attributi Scale origine a quelli destinazione. Il parametro Offset imposta una compensazione di scalatura su tutti gli assi. È utile per far corrispondere le dimensioni degli oggetti.

### AIM CONSTRAINT

Modifica le rotazioni dell'origine per far puntare sempre all'oggetto di destinazione. Ha molte opzioni. I valori dell'Offset creano una compensazione per gli attributi Rotation dell'origine.

## GEOMETRY E NORMAL CONSTRAINT

Vincolano l'oggetto di origine alla superficie dell'oggetto destinazione. L'oggetto si collega a livello del perno di rotazione alla superficie della destinazione. È utile ad esempio per far galleggiare una barca. Il normal constraint è simile all'aim constraint.

## PARENT, TANGENT E POLE VECTOR CONSTRAINT

Un parent constraint vincola la traslazione e la rotazione di un oggetto a un altro oggetto in una relazione padre-figlio. Un tangent constraint mantiene l'orientamento di un oggetto per fare in modo che l'oggetto punti sempre lungo la direzione di una curva. <sup>[16]</sup>

*L'animazione del personaggio Olaf è avvenuta applicando i due scheletri della figura sopra (figura 53), uno per la parte superiore e uno per la parte inferiore. L'applicazione dello scheletro deve essere fatta direttamente sopra il personaggio ed è una cosa di alta precisione. Se una parte dello scheletro non è all'interno del corpo del personaggio gli spostamenti non avvengono. Utilizzando tutte le viste è possibile applicare con cura le varie parti dello scheletro. Le varie ossa vengono create utilizzando lo strumento join tool dal menu skeleton, dopo la creazione deve essere unito al corpo. Selezionando la parte dello scheletro interessata e il corpo si clicca sul pulsante bind skin -> smooth bind del menu skin. <sup>[16]</sup>*

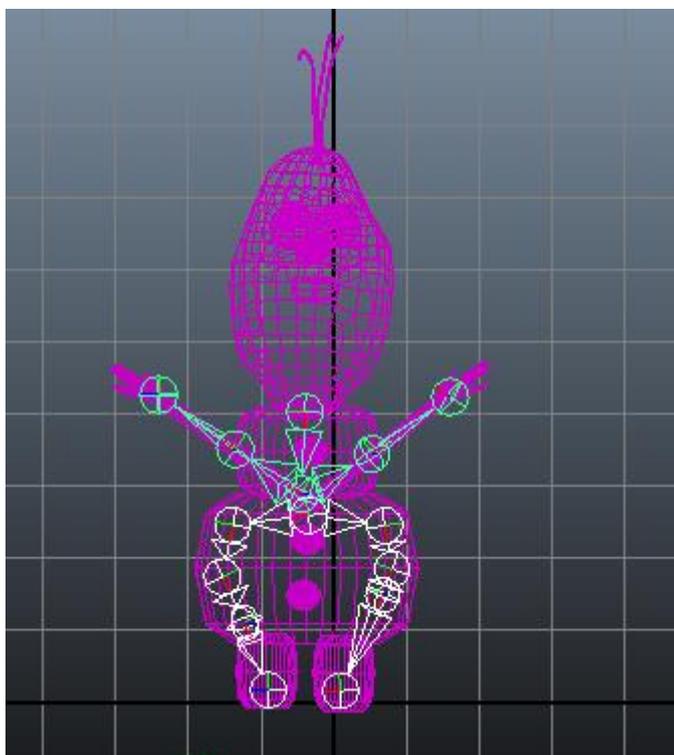
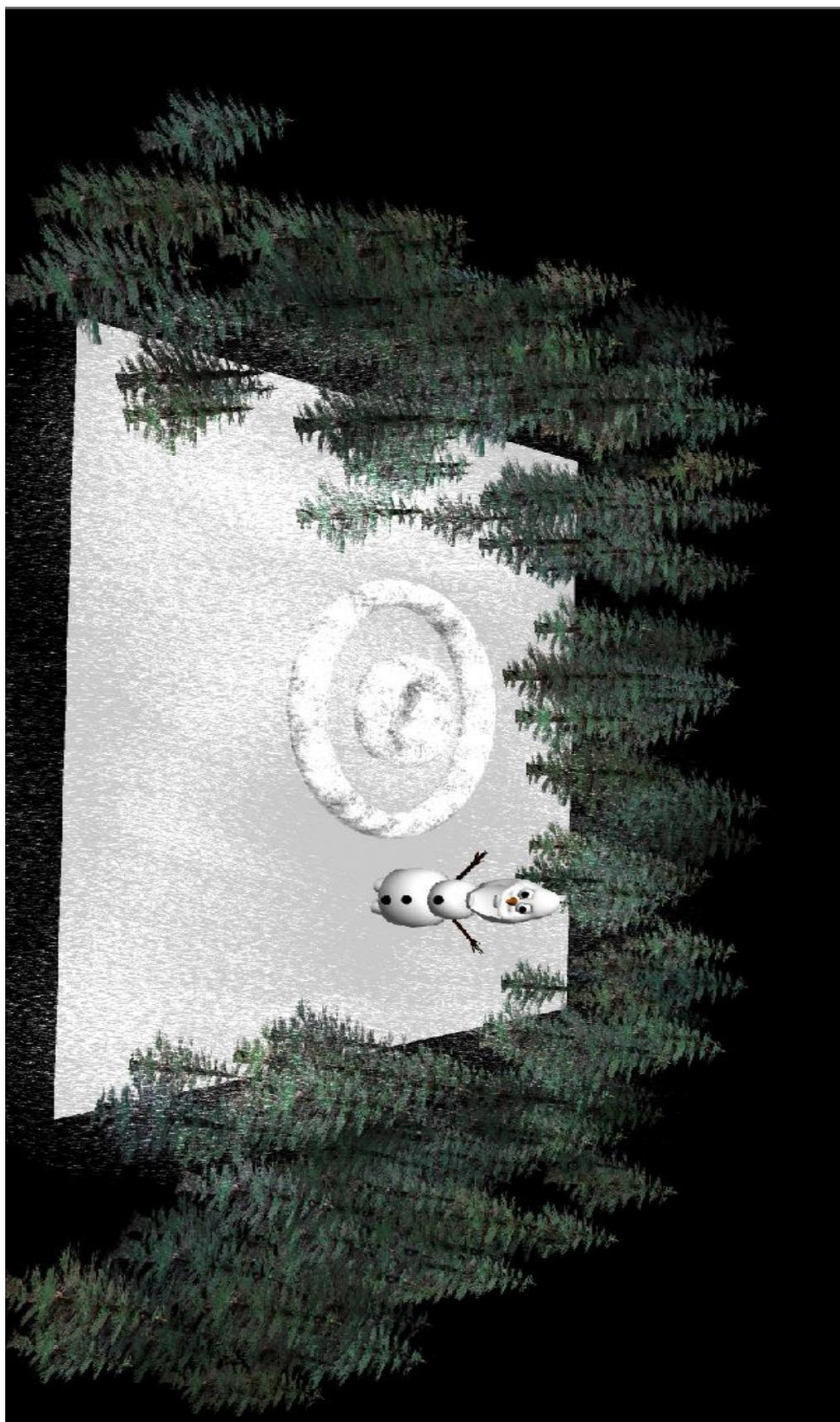
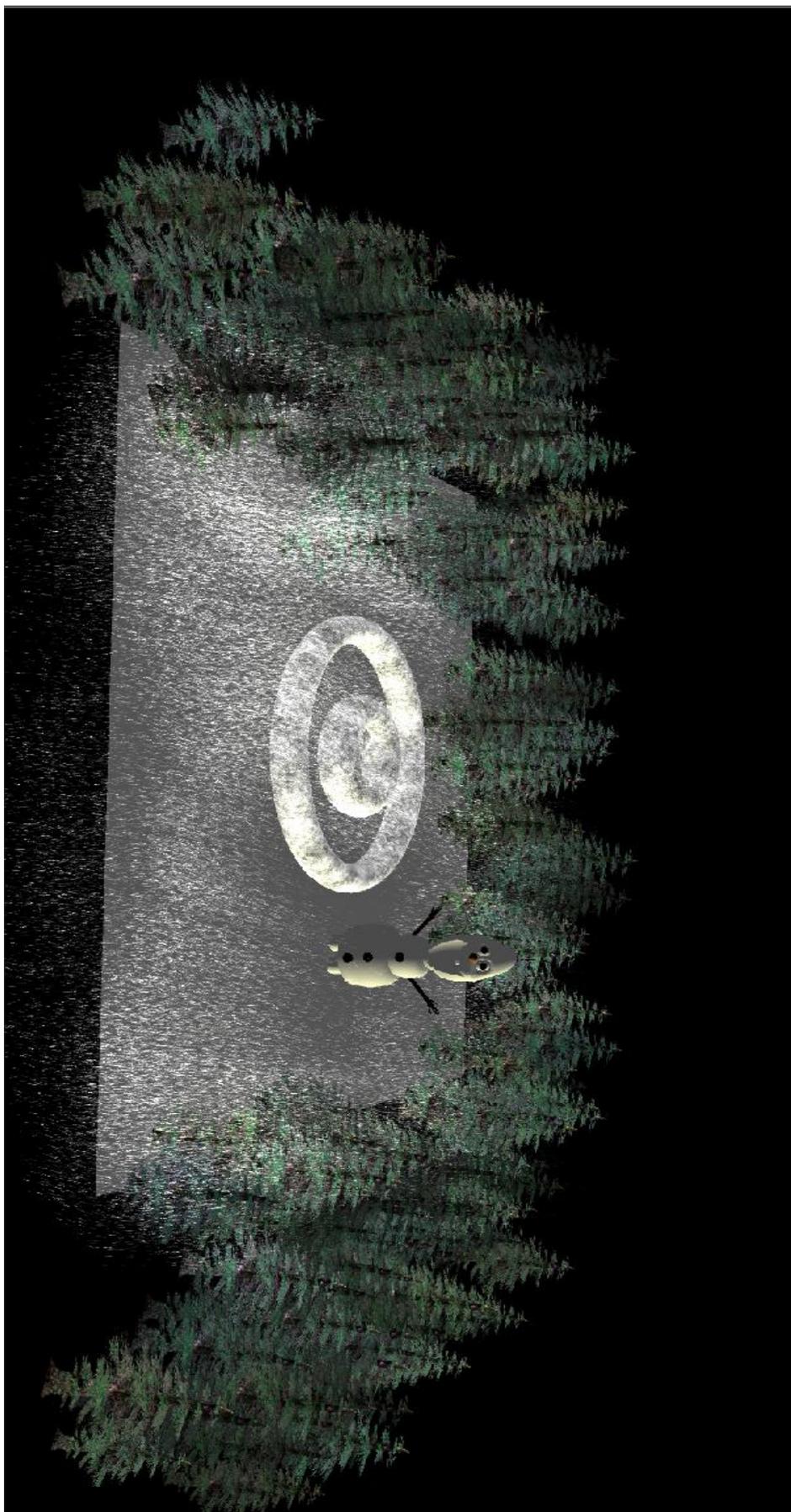


Figura 54: scheletro Olaf

## 4.8 SCENA FINALE

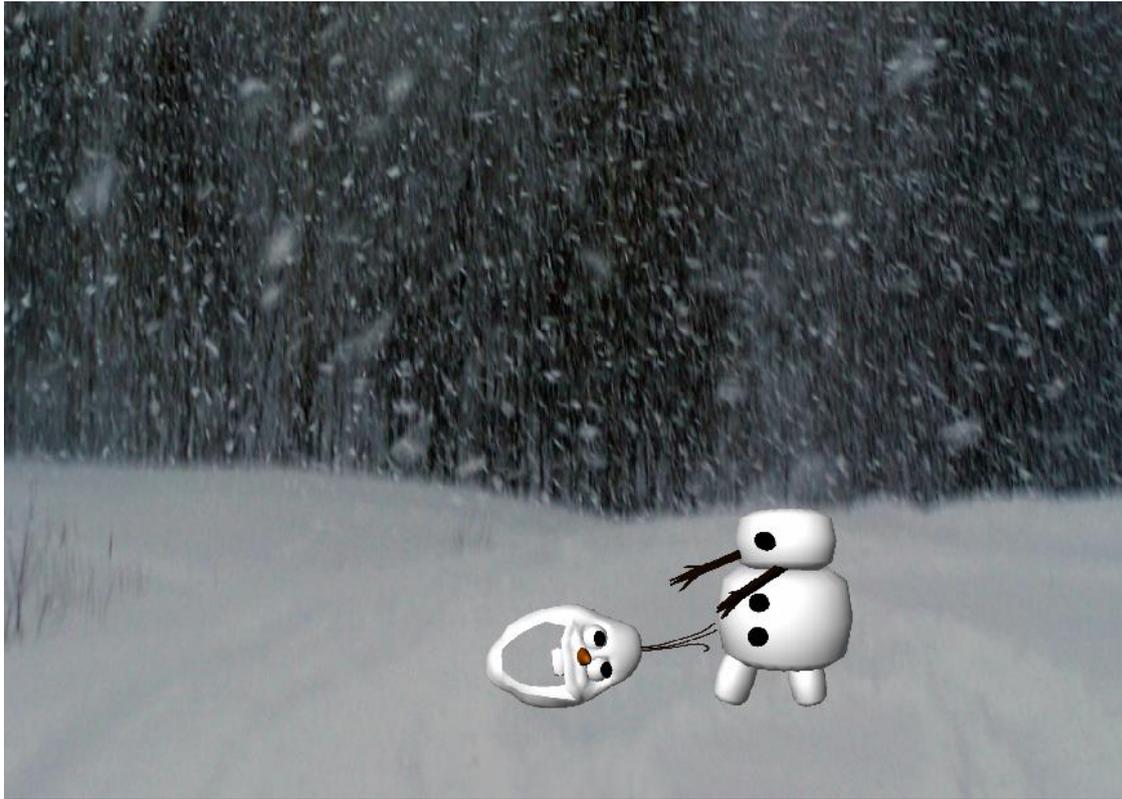


*Figura 55: scena finale*

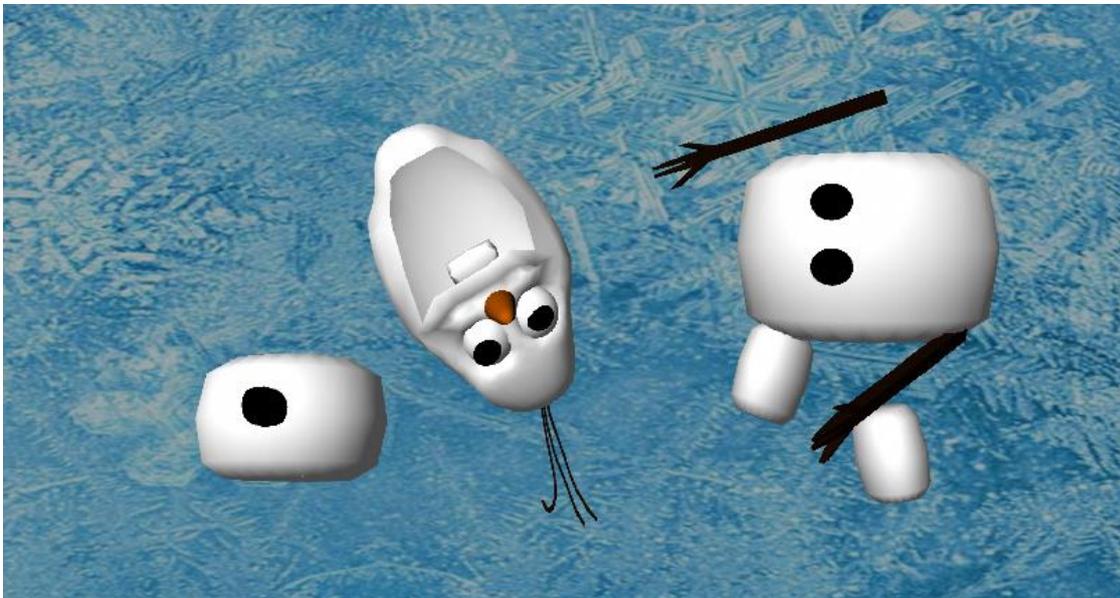


*Figura 56: scena finale con luce*

## 4.9 ALTRE IMMAGINI



*Figura 57: Olaf "rotto" in scena innevata*



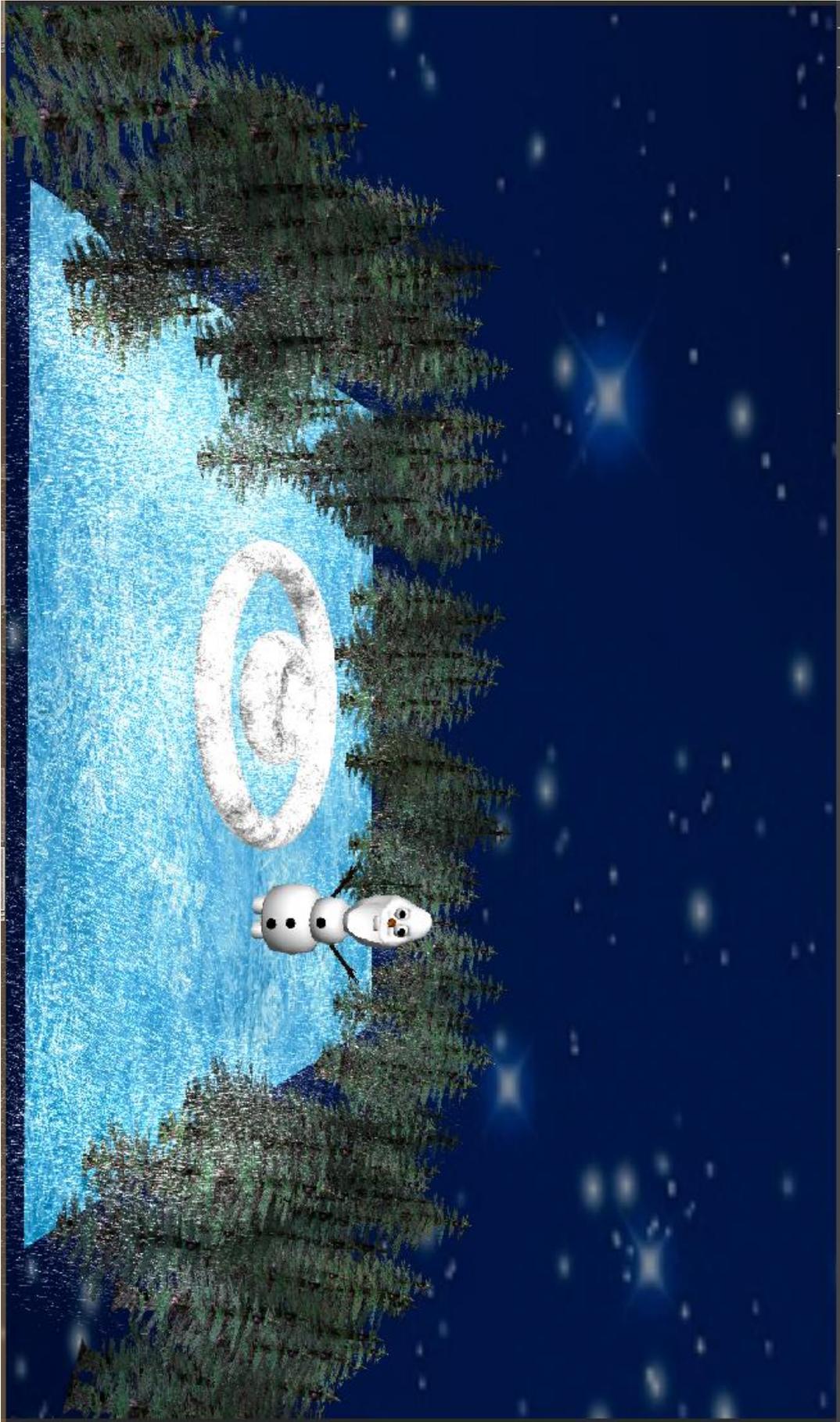
*Figura 58: Olaf "rotto"*



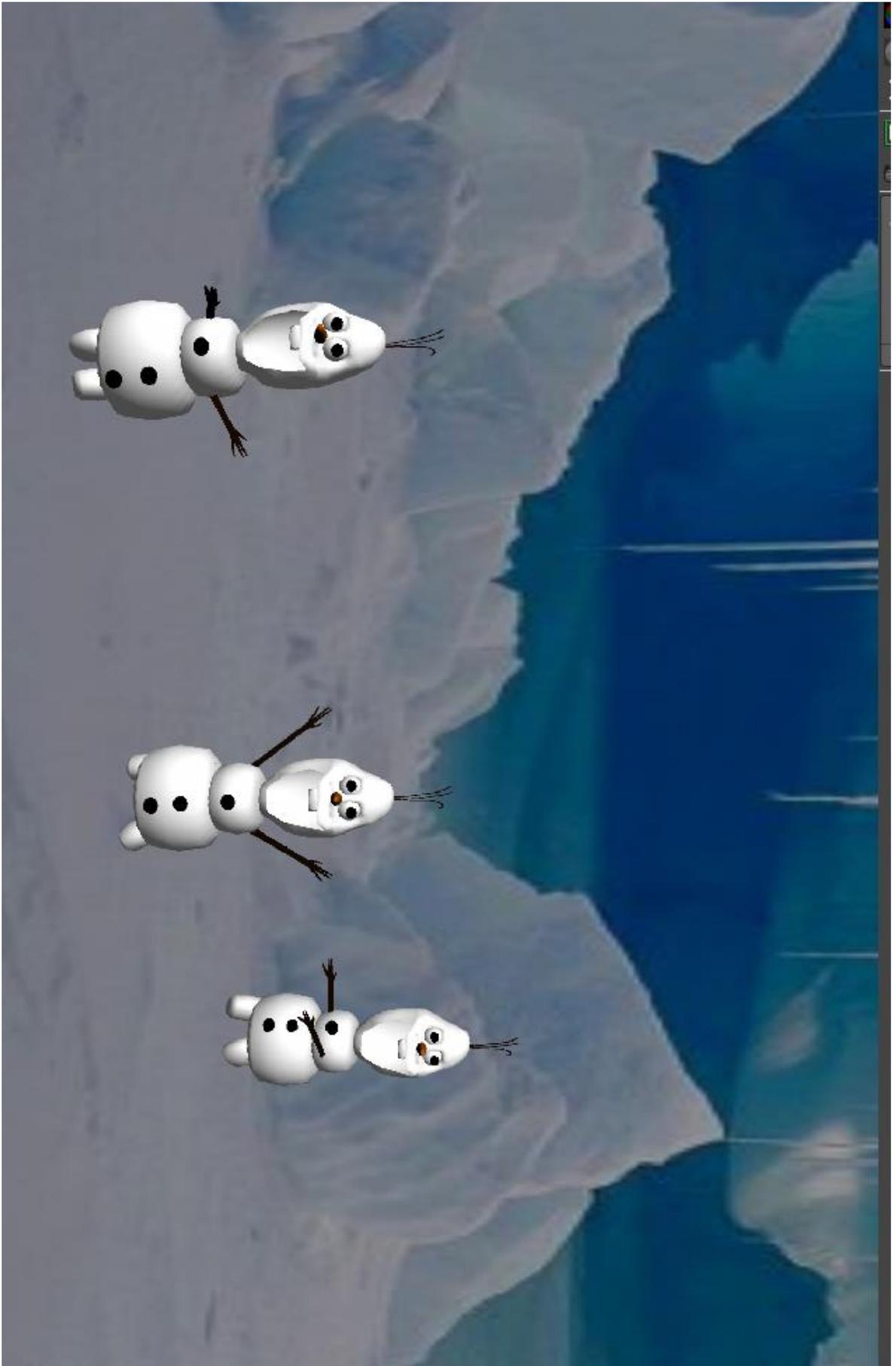
*Figura 59: Olaf in primo piano nella piazza di Santarcangelo*



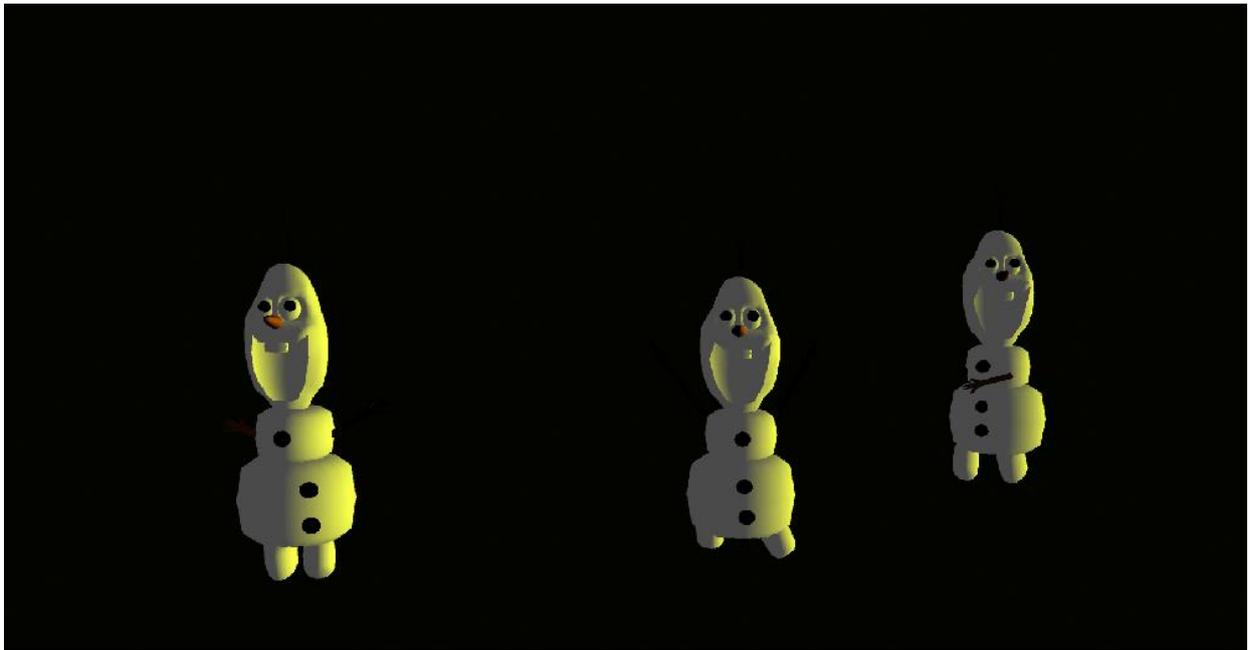
*Figura 60: Olaf che salta sotto l'arco*



*Figura 61: scena finale notturna*



*Figura 62: Olaf ballerino - animazione -*



*Figura 63: inserimento luci*



*Figura 64: Olaf in movimento*



*Figura 65: Olaf in montagna*



## BIBLIOGRAFIA:

- [1] Alessandro Amaducci - “Computer grafica. Mondi sintetici e realtà disegnate” - Kaplan 2010
- [2] Dariush Derakhshani “Maya 7. Introduzione alla grafica 3D” - MacGrawHill
- [3] [http://it.wikipedia.org/wiki/Luxo\\_Junior](http://it.wikipedia.org/wiki/Luxo_Junior)
- [4] John F. Hughes, Andries van Dam, Morgan McGuire, David F. Sklar - “Computer Graphics: Principles and Practice”- (3rd Edition) - Addison-Wesley Professional (2013)
- [5] <http://epiantohobbies.jimdo.com/la-computer-grafica/applicazioni-della-computer-grafica>
- [6] Dariush Derakhshani - “Introducing Autodesk Maya 2013” - Wiley
- [7] [http://it.wikipedia.org/wiki/Frequenza\\_dei\\_fotogrammi](http://it.wikipedia.org/wiki/Frequenza_dei_fotogrammi)
- [8] John Kundert-Gibbs, Peter Lee - “Maya 5” - Apogeo
- [9] <http://www.ilcorto.it/CAnimazione.html>
- [10] Riccardo Scateni, Paolo Cignoni, Claudio Montani, Roberto Scopigno - Fondamenti di grafica tridimensionale interattiva - MacGrawHill 2005
- [11] David Baraff, “Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies,” SIGGRAPH 89-91-92, Petros Faloutsos - “Composable Controllers for Physics-Based Character Animation”
- [12] Giovanni Legnani: “Robotica Industriale” - Casa Editrice Ambrosiana, 2003
- [13] <http://www.autodesk.com/products/maya>
- [14] [http://www.digitaldesignstudio.it/tutorials/interfaccia\\_maya3d/interfaccia-maya3d.html](http://www.digitaldesignstudio.it/tutorials/interfaccia_maya3d/interfaccia-maya3d.html)
- [15] John Kundert-Gibbs, Peter Lee - “Maya 5” - Apogeo
- [16] Raimondo Della Calce - “Maya 5 Elaborazione e animazione grafica 3d” - Apogeo



# INDICE FIGURE:

- (1) Figura 1: William Fetter – Primo modello di uomo al computer
- (2) Figura 2: primo cortometraggio “Andrè and Wally b”
- (3) Figura 3: prima animazione Pixar
- (4) Figura 4: i personaggi di Toy Story
- (5) Figura 5: 2d vs 3d
- (6) Figura 6: fotorealismo vs non fotorealismo
- (7) Figura 7: grafica interattiva vs non interattiva
- (8) Figura 8: cerchio palleggiante costituito da 6 fotogrammi
- (9) Figura 9: esempio di anticipazione
- (10) Figura 10: held drawig
- (11) Figura 11: esempio di rallentamento
- (12) Figura 12: azioni secondarie
- (13) Figura 13: articolazione R1 a sinistra, articolazione R2 a destra
- (14) Figura 14: articolazione R3
- (15) Figura 15: esempio di cinematica diretta
- (16) Figura 16: cinematica inversa applicata ad un robot
- (17) Figura 17: esempio figura articolata
- (18) Figura 18: parametri per le relazioni di cinematica
- (19) Figura 19: il corpo rigido nel sistema di coordinate
- (20) Figura 20: velocità lineare e angolare
- (21) Figura 21: interfaccia di Maya
- (22) Figura 22: viste di Maya
- (23) Figura 23: menu ad elenco della Status Bar

- (24) Figura 24: menu polygons
- (25) Figura 25: rappresentazione dei menu
- (26) Figura 26: tool di modifica degli oggetti
- (27) Figura 27: menu Edit mesh
- (28) Figura 28: caso di estrusione
- (29) Figura 29: insert edge loop
- (30) Figura 30: applicazione dell'algoritmo di radiosity
- (31) Figura 31: algoritmo di ray tracing
- (32) Figura 32: personaggio Olaf
- (33) Figura 33: prima parte del corpo
- (34) Figura 34: seconda parte del corpo
- (35) Figura 35: piedi di Olaf
- (36) Figura 36: braccia
- (37) Figura 37: bottoni
- (38) Figura 38: occhio
- (39) Figura 39: naso
- (40) Figura 40: capelli
- (41) Figura 41: Menu Sculpt Geometry Tool
- (42) Figura 42: faccia di Olaf prima delle modifiche
- (43) Figura 43: faccia di Olaf prima dopo le modifiche
- (44) Figura 44: Olaf realizzato
- (45) Figura 45: rendering foresta
- (46) Figura 45: rendering foresta e neve
- (47) Figura 47: fontana di Santarcangelo
- (48) Figura 48: particelle che ricreano l'effetto dell'acqua che scorre

- (49) Figura 49: fontana
- (50) Figura 50: fontana innevata
- (51) Figura 51: scena Olaf e fontana
- (52) Figura 52: finestra Hypershade
- (53) Figura 53: scheletri da applicare ad Olaf
- (54) Figura 54: scheletro Olaf
- (55) Figura 55: scena finale
- (56) Figura 56: scena finale con luce
- (57) Figura 57: Olaf “rotto” in scena innevata
- (58) Figura 58: Olaf “rotto”
- (59) Figura 59: Olaf in primo piano nella piazza di Santarcangelo
- (60) Figura 60: Olaf che salta sotto l’arco
- (61) Figura 61: scena finale notturna
- (62) Figura 62: Olaf ballerino - animazione -
- (63) Figura 63: inserimento luci
- (64) Figura 64: Olaf in movimento
- (65) Figura 65: Olaf in montagna



# RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare alla Professoressa Damiana Lazzaro per aver accolto fin da subito la mia idea di tesi, e per avermi aiutato e sostenuto nei mesi di realizzazione. La ringrazio per la disponibilità che ha dimostrato nel seguirmi nelle varie fasi del progetto e nella scrittura della tesi.

Ringrazio tutti i compagni di facoltà che ho conosciuto in questi anni, grazie a loro è stato tutto molto più semplice. Un grazie speciale a chi mi è stato più vicino, Andrea, Marco, Erica, Pierpaolo.

Grazie...