

# FACE E LA SUA MENTE

**Autori:** Silvia Casalini, Giovanni Pioggia, Marcello Ferro, Claudia Caudai, Danilo De Rossi.

*Centro interdipartimentale di ricerca “E. Piaggio”, Università di Pisa.*

## Capitolo 1. Introduzione

### 1.1 IL COSTRUTTORE DI MACCHINE

Fin dall'antichità l'uomo si è confrontato con la natura in modo controverso, si è rapportato ad essa in molteplici maniere, si è sentito nei suoi confronti sia amico che nemico, a tratti alleato, a volte dominatore, altre vittima; sempre a cavallo tra l'istinto di venerarla, il desiderio di assoggettarla e il timore di subirla.

Se si va a guardare indietro nella storia si scopre che è esistito fin dall'antichità uno sforzo umano volto a costruire strutture e sistemi inanimati ispirati agli organismi biologici e finalizzati ad imitarli.[1]

Nel mondo greco la macchina era vista come un qualcosa che si opponeva alla natura, e assumeva in questo senso caratteri “magici”. [2] La figura del bioingegnere nel mondo ellenistico (il *mekanopoios*, il meccanico) si rispecchiava in un personaggio ambiguo, quasi un mago, un demone, che è rimasto incastrato tra la *thecnè* e l'*episteme* senza riuscire a tradurre le sue creazioni in un ponte che fungesse da intermediario tra le due discipline, restando così, nell'immaginario del suo tempo, un inquietante fabbricatore di automi ambigui e demoniaci.

L'associazione mentale costruttore di macchine-mago è rimasta radicata per moltissimo tempo. La vera svolta in questo senso è avvenuta con la Rivoluzione Industriale: da allora la tendenza è diventata quella di ridefinire la

fisica e la tecnologia per vagliare le infinite possibilità di costruire tutte le macchine possibili, di realizzare qualcosa a partire da qualsiasi altra cosa, e il costruttore ha iniziato a rivestire un ruolo di uomo che pensa, inventa, verifica e produce macchine in funzione della loro utilità e del loro valore economico.

Quindi, con l'inizio dell'era moderna viene superata l'interpretazione dell'ingegneria in termini di apparenti meraviglie della natura, ed ha invece inizio una contestualizzazione della tecnica e della scienza nell'ambito del divenire storico e dei cambiamenti sociali e culturali figli dell'incalzante industrializzazione; contestualizzazione che ha portato ad una profonda accettazione e ad una nuova considerazione nei confronti del costruttore, ormai visto come artefice di progresso, conoscenza e di innovazione utilitaristica e funzionale.

Da allora ai giorni nostri il percorso della tecnologia è stato impetuoso e articolato, contraddittorio, precipitoso, ha invaso violentemente tutti i settori della società e ha intrecciato variopinte trame multidisciplinari impregnate di interpretazioni etiche, storiche e filosofiche.

L'impresa più stimolante e più recente è senza dubbio quella della creazione di macchine dotate di una qualche forma di intelligenza, modelli possibili per neuroscienziati e neurorobotici e anche, finalmente, utili operatori in mondi reali o virtuali. [3]

Il tentativo di realizzare modelli materiali della realtà pensante nasce principalmente dalla tentazione di comprendere i meccanismi biologici, di semplificarli e racchiuderli in schemi, verificando, tramite il grado di verosimiglianza dei modelli costruiti, quali siano le caratteristiche dominanti dei fenomeni presi in considerazione. Ma il costruttore di macchine incontra molte difficoltà nel cammino verso la creazione di un artefatto simil-umano. Perché questo? Pensiamo ad un altro tipo di costruttore: il pittore. Perché nella pittura la più difficile delle opere in cui cimentarsi è l'autoritratto? Perché troppi sono i risvolti psicologici, i coinvolgimenti emotivi che alterano

l'immagine di noi stessi quando la guardiamo riflessa nello specchio. È complicato distogliere lo sguardo dai nostri occhi, staccare i pensieri che si attaccano ai profili dei nostri lineamenti, che li piegano, li distorcono, li muovono continuamente, rendendo così difficile la schematizzazione di noi stessi, la nostra semplificazione, la costruzione di un modello che, già lo sappiamo, non arriveremo mai ad ammettere che ci assomigli in un modo di cui possiamo ritenerci soddisfatti.

Anche per il costruttore il progetto più ambizioso, più interessante, più inquietante, è quello di riprodurre se stesso, di creare un automa, un robot a sua immagine e somiglianza, di guardarsi negli occhi in qualcosa che non sia uno specchio, di dar vita ad una creatura che riesca a parlargli di se stessa, e anche di noi stessi.

## **1.2 IL ROBOT**

L'origine semantica del termine Robot, coniato nel 1921 dal romanziere e commediografo ceco Karel Čapek e derivante dal vocabolo "robota" che significa "lavoro forzato", riflette il fine utilitaristico con il quale questi automi sono stati inizialmente creati, in risposta a necessità di carattere sociale ed economico, partendo da una tecnologia basata su teorie descrittive e su assemblaggi di materiali elementari.

La mentalità ingegneristica, fedele alla filosofia del "costruire per capire", ha portato al tentativo di tradurre in macchine le più interessanti caratteristiche di varie specie animali. [4]

L'intreccio tra mondo biologico e ingegneristico necessita di un connubio tra natura interna ed esterna, di equilibri tra macchine e ambiente circostante, di una contestualizzazione che ricrei le condizioni per lo sviluppo non delle dinamiche stesse del fenomeno che si vuole riprodurre, ma di altre che si adattino all'ambiente virtuale e producano in esso i risultati cui si vuole pervenire.

Nella progettazione di macchine dotate di una qualche forma d'intelligenza artificiale l'ingegnere deve andare a ricercare strumenti che gli permettano di raggiungere da un lato una soddisfacente "believability", una credibilità fenomenica di natura biologica, e dall'altro una contestualizzazione adeguata della macchina nel micromondo naturale o virtuale in cui si sceglie di situarla e di esporla a stimoli esterni per far emergere comportamenti adeguati.

Ma la questione è più che complicata. L'interpretare le dinamiche evolutive naturali seguendo una logica ottimizzatrice sarebbe un errore: gli organismi biologici non sono degli ottimizzatori; l'ambiente in cui essi operano cambia e si evolve continuamente, e quelle che risulterebbero caratteristiche comportamentali ottimali in un determinato ambiente, potrebbero risultare incompatibili nello stesso contesto modificato. Nella maggior parte dei casi gli organismi biologici non tendono all'ottimizzazione, ma conservano ampie strutture, funzioni archetipali e margini di adattabilità su vari livelli. Occorre quindi pensare ad artefatti e strutture che non risolvano i problemi in modo perfetto, ma che lascino comunque un margine che contempra variazioni più o meno significative delle condizioni iniziali. [5]

Il rigore strutturale viene messo volentieri da parte se si pensa che lasciare un po' di gioco ad ogni variabile è la chiave per creare macchine che abbiano la possibilità di "svilupparsi" e di imparare, che siano capaci di affrontare situazioni non previste... e ciò è affascinante perché imprevedibile, inquietante perché fuori dal nostro controllo.[6]

### **1.3 EMERGENZA E COMPORTAMENTO**

Prima di procedere è importante porre le basi di un senso comune ai concetti di emergenza e di comportamento relazionati alla macchina, al fine di delineare lo scenario in cui affioreranno gradualmente le idee alla radice del tentativo di una vera e propria realizzazione costruttiva di una macchina "presente" [7] ma

anche capace di comportamenti non deterministici, innovativi ma pur sempre pertinenti.

Come deve essere quindi intesa la nozione di imprevedibilità in una macchina?

Le strutture emergenti si riscontrano in molti fenomeni naturali e i fenomeni meteorologici come gli uragani sono proprietà emergenti. In un esempio fornito da Varela è descritto un tornado come un'entità che esiste soltanto nelle relazioni delle sue componenti molecolari, e la cui esistenza è tuttavia comprovata dal fatto che distrugge tutto ciò che incontra sul suo passaggio. In natura ci sono numerosi processi, retti da regole locali, che, messi in condizioni opportune, danno origine ad un nuovo livello cui bisogna riconoscere una specifica identità. Ecco perché per noi la nozione di emergenza assume un ruolo assolutamente fondamentale. "Perché ci permette di passare da un livello più basso ad un livello più alto, all'emergenza di un nuovo livello ontologico." La vita stessa è la sorgente di maggiore complessità, ma l'evoluzione creatrice [8] è il suo principio guida ed è proprio l'aspetto dinamico dell'evoluzione, dello sviluppo, il cuore del nostro progetto. Nella nostra idea anche la risposta ad una forma di imponderabilità della macchina è in termini di emergenza di comportamenti.

Vediamo ora che cosa intendiamo per comportamento di un artefatto. Possiamo interpretarlo come la facoltà di reazione agli stimoli sensoriali acquisiti, che si espletano nella produzione di movimenti appropriati. Nell'uomo è il sistema nervoso che analizza ed elabora gli input del percetto estraendone le informazioni utili per un'adeguata coordinazione stimolo-risposta; ma nella macchina? La macchina, nell'accezione più comune della parola, è un congegno opportunamente costruito affinché possa compiere delle operazioni atte a ridurre la fatica fisica o mentale del lavoro meccanico o computazionale. Ora, la mente umana non è una macchina che manipola simboli; riprendendo le parole di Parisi [9]: "L'uomo non è due macchine, una fisica ed una simbolica. L'uomo è una sola macchina, una macchina fisica". Nell'ambito

dell'intelligenza artificiale assistiamo ad una progressiva automaticità istruzionista delle macchine la cui configurazione le rende adeguate a un numero limitato di operazioni: elaborazione d'informazioni, osservazione, classificazione, apprendimento, decisione. Sebbene tali caratteristiche analitiche e predittive siano proprie della mente umana, la macchina agisce pur sempre in modo prevedibile, metodico, accurato, puntuale, orchestrando l'interazione tra le sue componenti secondo le leggi della fisica in forma causale. Cos'è quindi che differisce negli aspetti comportamentali l'uomo e la macchina? L'uomo è in grado di eseguire azioni a partire da schemi deterministici, tuttavia non è sempre sufficiente fornirgli una griglia metodologica di istruzioni per far sì che le esegua correttamente. È infatti necessario, che sia capace di comprendere ciascuna istruzione, di svolgerla e soprattutto di "volarla" attuare; inoltre, approfondiremo in seguito, anche lo stato emotivo influisce marcatamente sulle facoltà di esecuzione di un compito. Riteniamo che nel momento in cui su un substrato deterministico cognitivo sbocci una forma volitivo-emotiva, possa prendere forma una macchina con capacità "emergenti".

Questo è il punto di partenza per l'apertura dello scenario che segue.

#### **1.4 I PILASTRI DELLA MENTE**

Le attività cosiddette mentali non sono isolabili dai contesti e dagli intrecci delle loro numerose componenti, si può solo tentare di semplificarle e individuarne tre categorie principali, quelle che sono conosciute come i *pilastri della mente*, e cioè l'attività cognitiva, l'attività emotiva, e quella conativa o volitiva.

Qualsiasi modello finalizzato alla realizzazione di una macchina intelligente deve tener conto, in qualche misura, di queste tre componenti e dei riscontri che ognuna di esse può avere sul percetto e sulle sue azioni, si tratta di adottare

una metodologia che crei relazioni complesse partendo da componenti elementari.

Per arrivare a far emergere in un automa comportamenti da esso stesso controllati, occorre conferire al suo sistema di controllo un ruolo predittivo della volizione, cioè la capacità di interpretare quelle che sono le proprie intenzioni conative e di elaborare risposte sensori-motorie adeguate. Per indicare la combinazione di azione e intenzione si utilizza il termine di *enazione*, coniato da Varela. In un modello comportamentale enattivo sarà importante analizzare la selezione delle risposte etologiche adeguate all'interazione attiva col mondo esterno.

## **Capitolo 2. FACE**

La fantascienza ha tradotto in chiave letteraria [10], spesso con estrema abilità nella ricerca del dettaglio e della credibilità, le ambizioni più perseguite e agognate dall'ingegneria bioispirata; la domanda che sta più a cuore è sempre la stessa: come si fa a costruire un androide biologicamente ispirato che interagisca con gli esseri umani in modo credibile? La risposta forse non è poi così lontana; sicuramente è necessario un approccio progettuale differente da quello usato nella robotica tradizionale. È necessario seguire la strada del "comprendere la biologia per costruire macchine e costruire macchine per comprendere la biologia".[4] Per raggiungere questo ambizioso obiettivo, dovranno essere studiate le interazioni dinamiche uomo-macchina, con particolare attenzione all'eventuale insorgere di comportamenti emergenti connotati emotivamente e razionalmente. Con FACE stiamo cercando di seguire questo tipo di filosofia progettuale.

Cinque anni fa, nei nostri laboratori, ha preso vita il progetto F.A.C.E. (Facial Automaton for Conveying Emotions), una realizzazione artificiale ipodotata intesa ad operare su un ambiente minimo. FACE è un automa facciale credibile

realizzato con materiali, strutture e algoritmi di controllo che riproducono alcune delle funzioni e dei responsi degli organismi viventi, volto all'implementazione di un insieme molto limitato di comportamenti. Si tratta di un sistema robotico in grado di interagire con l'ambiente esterno, interpretando e restituendo segnali emotivi attraverso forme di comunicazione non verbale.[11]

FACE raccoglie dal suo interlocutore correlati vitali espressivi e biovegetativi, li elabora e attua risposte comportamentali adeguate tramite movimenti vincolati e ridotti a livello di mimica facciale e gestualità degli arti superiori. Per adesso è inserito in un contesto ben determinato che lo dota di uno scopo preciso, e cioè quello dell'interazione terapeutica con bambini affetti da autismo. [12]

La finalità della realizzazione di tale struttura robotica è infatti duplice, da un lato, tramite un protocollo terapeutico per l'autismo (FACET: FACE Therapy), stiamo portando avanti un progetto con forti riscontri di carattere sociale; dall'altro, tramite l'investigazione di comportamenti emergenti nell'interazione bambino-robot, stiamo esplorando le possibilità di costruire macchine con presenza interattiva quale fondamento portante di agenti intelligenti artificiali.

## **2.1 CHE COSA È FACE?**

FACE è un automa facciale prossemico interattivo, dotato di un volto antropomorfo tramite il quale gestisce l'interazione comunicativa.

FACE è capace di interpretare ed elaborare informazioni emotive, acquisendo informazioni minime sull'ambiente in cui si trova ed interagendo con esso. È una macchina antropomorfa dotata di strumenti per operare in una nicchia relazionale mediante processi cognitivi "umanizzati". È un automa contestualizzato e vincolato da movimenti ridotti, dotato della capacità di elaborare informazioni raccolte dai suoi sistemi sensoriali. In chiave

pragmatica FACE è un artefatto equipaggiato con sistemi biomimetici di sensorizzazione e di attuazione.

## **2.2 IL CORPO E LA MENTE: UMWELT E ADDESTRAMENTO**

Nella realizzazione di una macchina socialmente interattiva è necessario tenere presente che l'utilizzo di un robot in un ambiente umanizzato impone precisi requisiti riguardanti la corporeità, la percezione sensoriale, la mobilità, e la capacità di assolvere compiti. La mente umana risponde e si adatta al mondo reale permettendo all'organismo di sentire, agire e sopravvivere; l'applicazione dell'intelligenza umana deriva pertanto primariamente dall'interpretazione dell'esigenza corporea. È preferibile pertanto perseguire un monismo mente-corpo, cioè una mente incorporata (embodied mind) che porti avanti i processi di elaborazione in rapporto al dominio di esperienze in cui la macchina si trova; processi che influenzano e sono influenzati dalle forme della propria "presenza". Il nostro approccio con le sue finalità costruttive individua quindi una visione materialistica non dualista. Il percorso per realizzare, o anche solo per pensare di realizzare, una macchina dotata di un qualche livello di emergenza, si sviluppa su piani convergenti che devono portare ad una sinergia tra aree scientifiche attualmente non dialoganti.

La contestualizzazione del robot con il suo ambiente necessita di meccanismi d'interazione dinamica: è necessario che FACE sia dotato di sistemi di esterocezione in modo da interiorizzare ciò che lo circonda e avere la possibilità di rispondere in maniera adeguata alle diverse situazioni, è necessario che sia in possesso di strutture corporee che diano un adeguato supporto per l'interocezione e l'attività motoria. L'architettura corporea di FACE è fornita di un apparato minimo di sensorizzazione tramite il quale percepisce degli stimoli esterni ed elabora segnali di risposta. L'automa avverte il contatto con la realtà attraverso dei sistemi di stimolo dell'attenzione, di visione artificiale e di propiocezione cinestetica. Un sistema di rilevamento di

correlati fisiologici e cinestetici è indossabile dall'interlocutore ed ha il compito di insegnare a FACE a correlare l'effetto indotto dalle sue azioni. Così come nell'uomo anche nel robot occorre creare una "infanzia" che gli consenta di realizzare processi autonomi di apprendimento e di adattamento all'ambiente in cui si troverà ad agire.[13]

La progettazione di una macchina siffatta non prevede solo un corpo sensibile e mobile, ma anche un ambiente, un microcosmo in cui l'automa verrà situato, non necessita solamente di un processore che elabori informazioni e dati secondo algoritmi prestabiliti, ma deve possedere anche egocentricità e allocentricità spazio-temporale, non deve contemplare solo l'attuazione di movimenti preprogrammati, ma andrà incontro anche ad un apprendimento imitativo.

L'emergere all'interno di una macchina di un campo di relazioni che assomigli a quello umano rende necessario un alto grado di verosimiglianza biologica, e prevede l'emergere di una forte fisicità all'interno di una nicchia ecologica prestabilita, naturale o virtuale che sia.

Nasce così il concetto di *Umwelt* [14], cioè di realtà spazio-temporale in cui la macchina viene inserita e in cui ha la possibilità di ricevere stimoli, interagire, recepire ed agire contestualizzandosi in un proprio microcosmo.

Una forma di emergenza in una macchina sarà rappresentata non da un fenomeno globale e univoco, ma da un insieme di attività distinte e di componenti semplici e locali che adattandosi insieme potrebbero dare l'impressione di un fenomeno centralizzato, ma che in realtà rimangono comunque separate e non riconducibili ad una matrice comune.[15]

### **2.3 LA TESTA DI FACE**

La struttura scheletrica di supporto è la ricostruzione in resina del teschio di un soggetto reale per mezzo di tecniche di tomografia assiale e progettazione assistita al calcolatore. I tessuti molli del teschio sono stati ricostruiti con

materiali che derivano dal mondo degli animatroni per l'intrattenimento. Sarà in futuro dotato di braccia artificiali antropomorfe che gli consentiranno di esplorare più agilmente lo spazio dell'espressività gestuale, conferendogli al contempo maggiore credibilità. Un'architettura di muscoli artificiali e servomotori è allocata nei tessuti molli e l'intera struttura è ricoperta da una pelle artificiale dotata di un sistema distribuito di propriocezione cinestetica. L'architettura muscolare artificiale permette la movimentazione della testa e consentirà quella delle braccia conferendo a FACE una mimica credibile. Inoltre, la struttura sottostante movimenta gli occhi, realizzati anch'essi con tecniche di animatronica, e, attraverso i muscoli dell'area orbitale, conferisce loro un'espressività. Il resto del corpo è passivo. FACE vede il mondo che ha di fronte attraverso un sistema visivo in grado solamente di riconoscere l'espressione facciale di un interlocutore, e di seguirne lo sguardo.

#### **BOX A – LA TESTA DI FACE**

La realizzazione della testa di FACE riguarda gli aspetti tecnici relativi alla pelle e a quelli della realizzazione della meccanica.

Presentiamo quindi un approfondimento della realizzazione della pelle di FACE.

La fase iniziale consiste nella fabbricazione di una copia in gesso della testa di una donna usata come modella. Attraverso una tecnica nota come *life casting*, è stato preso dal vivo un negativo (calco) della testa della modella ed è stata preparata una miscela di alginato ed acqua calda. Questa miscela è stata successivamente applicata sulla testa partendo dalla nuca per finire con la parte frontale.

È seguita la preparazione di un positivo in gesso (figura A1) a partire dal negativo in alginato, il quale risulterà irrimediabilmente distrutto al termine della fase. Questo stadio è estremamente delicato: dalla precisione del positivo in gesso risentirà tutto il resto della lavorazione.



*Figura A1*

Una seconda fase costruttiva porta alla produzione di un negativo in silicone con madreforma in resina della testa in gesso; tale negativo risulta necessario al fine di ottenere in “pongo” la testa della modella.

La testa viene così lavorata allo scopo di ottenere le aperture degli occhi e della bocca, e nel procedimento di forgiatura l'obiettivo è stato farle assumere una posizione neutra; per questo tale lavorazione è stata curata nei minimi particolari. Finite le modifiche, la scultura è stata preparata per la fase di stampaggio: essa è stata divisa secondo una linea ipotetica inserendo una serie di lamelle di plastica che permetteranno di dividere in due sezioni lo stampo negativo successivo, realizzato in gelcoat, resina e fibra, materiali leggeri ma molto resistenti.

Dal negativo in resina sono stati ottenuti dei controstampi, stampi cioè, che vengono fatti dentro le due metà dei negativi. Come primo passo per la realizzazione dei controstampi viene messo uno strato uniforme di plastilina all'interno del negativo su cui viene deposta della resina con lo stesso procedimento usato per gli stampi. Alla fine di questa fase, la deposizione di uno strato di plastilina fra stampo e controstampo ha permesso di ottenere un'intercapedine vuota, riempita da ciò che sarà la futura pelle praticando un foro sul controstampo da dove poter iniettare la schiuma di lattice (figura A2) La schiuma è stata quindi iniettata negli stampi in modo da riempire l'intercapedine e plasmare così la pelle di FACE. Il tutto è stato infine fatto cuocere in un forno. Il risultato della cottura è la pelle artificiale da colorare con pigmenti minerali.

*Figura A2*

La pelle artificiale finale è illustrata in figura A3



*Figura A3*

Analizziamo infine alcuni stadi relativi alla realizzazione della meccanica.

La meccanica facciale di FACE è il substrato materiale del suo apparato espressivo. L'accurata architettura di FACE presenta un'impalcatura simil-umana costituita dalla zona mandibolare, dalla sezione oculare, dalla regione sopraccigliare e dall'area zigomatica.

Il congegno meccanico è realizzato a partire dai controstampi tenendo conto degli ingombri delle guaine, dei cavi e soprattutto degli attriti. Uno strato di fibra di resina deposto sui controstampi si è trasformato in una scocca rigida che calza perfettamente con la pelle artificiale.

L'asse di rotazione della mandibola è stato incernierato con un asse passante da parte a parte della scocca congiungendo i punti estremi dell'altezza della mandibola (figura A4). La scocca è così tagliata al fine di ricavare la mandibola; su di essa è stata montata la protesi dentaria che fa da battuta per la chiusura della bocca. Una volta sistemato il meccanismo di blocco della bocca ed accertata la funzionalità, è stato montato un cavo di acciaio flessibile, del tipo usato nel cambio delle biciclette, in grado di trasmettere il movimento, e sulla scocca è stata montata una molla che permette il ritorno della chiusura della bocca.

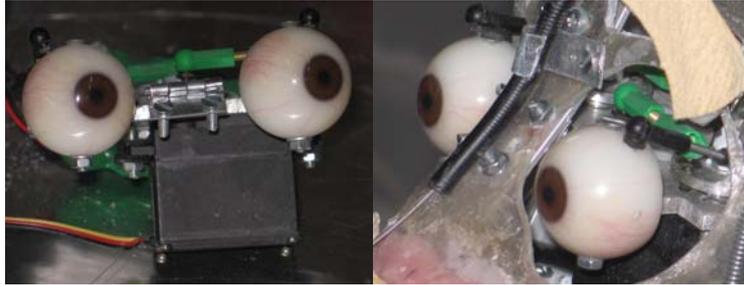


*Figura A4*

La meccanica della zona mandibolare supporta la movimentazione dei labiali superiori ed inferiori realizzati per mezzo di cavi rigidi di acciaio armonico passanti da parte a parte all'altezza del labbro superiore e del labbro inferiore. Un tirante intermedio permette di modulare con precisione l'apertura delle labbra.

La sezione oculare prevede l'attuazione del movimento oculare sull'asse orizzontale tramite un

micro servomeccanismo vincolato ad entrambi gli occhi; l'intera struttura viene interamente movimentata sull'asse verticale per mezzo di un secondo micro servomeccanismo (figura A5).



*Figura A5*

La regione delle arcate sopracciliari, realizzate tagliando due porzioni di scocca all'altezza delle sopracciglia, consente la loro movimentazione tramite cavi di acciaio armonico.

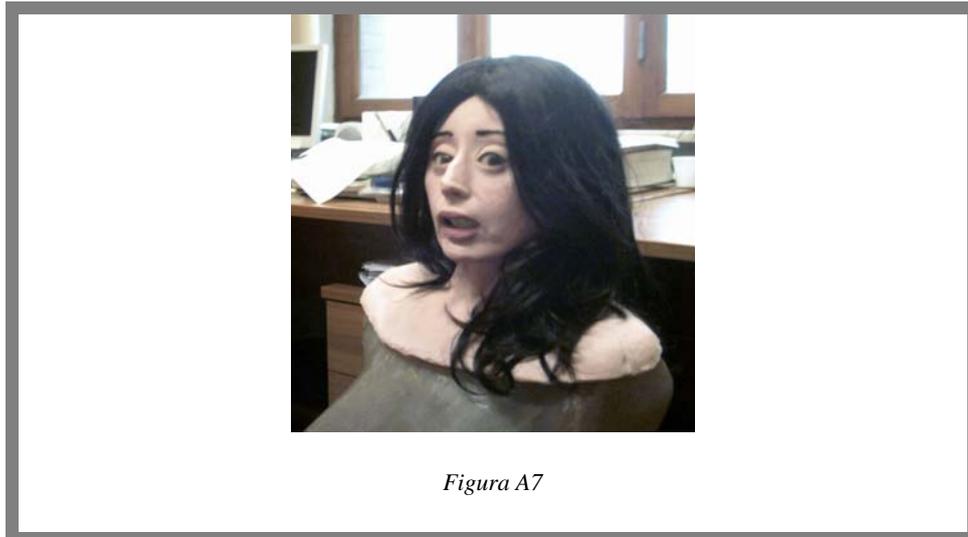
Infine per la realizzazione del movimento del muscolo zigomatico è stato montato un cavo all'altezza del taglio della bocca.

Otteniamo così la meccanica completa mostrata nella figura A6. È opportuno osservare che un asse vincolato ad un giunto sferico permette la rotazione e l'inclinazione della testa.



*Figura A6*

La testa finale è illustrata nella figura A7



## **2.4 GLI STIMOLI RECEPITI DA FACE**

### **SISTEMA DI TRACCIAMENTO DEL VISO E DELLO SGUARDO**

Il modulo di visione artificiale di cui FACE è dotato fornisce al sistema di controllo centrale informazioni vaghe sull'intera scena che si presenta di fronte al robot. Particolari elaborazioni sono condotte su tali dati al fine di estrarre informazioni dettagliate riguardanti un soggetto umano presente nel campo visivo di FACE. A tale scopo l'immagine fornita dal modulo di visione artificiale viene continuamente analizzata facendo uso di tecniche classiche tramite le quali è possibile tracciare nel tempo la posizione e l'orientazione del volto all'interno dell'immagine. Gli algoritmi utilizzati consentono una elaborazione in tempo reale e limitano l'utilizzo della mappa di curvatura alla sola regione del volto.[16] All'interno di tale area le pupille dell'osservato vengono individuate sfruttando la presenza di discontinuità di curvatura riportate dal sistema di contouring 3D e dovute alla discontinuità del coefficiente di riflessione delle pupille umane, sulla cui superficie le frange di interferenza generate dal sistema di visione artificiale, presentano una riflessione con forti discontinuità. Le informazioni così ottenute consentono di

tracciare nel tempo gli spostamenti del volto e dello sguardo dell'interlocutore di FACE e sono rese disponibili per successive elaborazioni quali il riconoscimento delle espressioni facciali.

#### **SISTEMA DI VISIONE**

FACE è dotato di un sistema visivo: i suoi occhi sono il frutto di tecniche animatroniche e la loro espressività è realizzata mediante una struttura muscolare artificiale che circonda la regione orbitale. Diversamente dall'uomo, FACE possiede una visione stereoscopica frequenziale e non spaziale. Un apparato di contouring tridimensionale, dotato di una sezione di elaborazione dati, ricostruisce, in una rappresentazione interna, una porzione del mondo che ha davanti fino ad una distanza che dipende dalla qualità dei componenti utilizzati. Il sistema di visione artificiale acquisisce una scena tramite una videocamera digitale CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) a 10 bit che scatta due fotografie a pochi millisecondi di distanza l'una dall'altra illuminando il campo attraverso due onde sinusoidali sfasate fra loro di  $180^\circ$  prodotte da una lampada all'infrarosso non visibile. Dallo sfasamento locale fra le due immagini "riflesse" acquisite dalla videocamera è possibile risalire alla curvatura tridimensionale della porzione di spazio illuminato. [17] Attualmente FACE rileva la curvatura tridimensionale del volto osservato una volta al secondo. La tecnica utilizzata per il riconoscimento automatico delle espressioni facciali dell'interlocutore si basa sull'estrazione dei lineamenti dal mondo tridimensionale visto da FACE. Da esso vengono individuate quattro regioni facciali ed attraverso una rete neurale gerarchica viene classificata l'espressività della persona. [16]

#### **BOX B – LO SGUARDO DI FACE: IL GAZE MONITORING**

Un aspetto fondamentale nella comunicazione tra un interlocutore umano e FACE è la capacità, da parte di quest'ultimo, di avere delle indicazioni sullo stato di attenzione della persona con cui interagisce. A tale scopo FACE è dotato di un sistema di visione artificiale mediante il quale è in

grado di individuare il punto di attenzione visiva (*gaze*) del soggetto, ovvero la direzione del loro sguardo del proprio interlocutore. Per eseguire tale compito FACE elabora i dati inviati dal sistema di visione artificiale in appositi processi di *face-tracking* e *eye-tracking*. Le informazioni fornite dal modulo di *gaze-tracking* vengono utilizzate da FACE per controllare il proprio sistema di attenzione.

L'architettura fa uso di un sistema di visione artificiale, realizzato tramite una o due videocamere che operano nello spettro visibile o nello spettro infrarosso, a seconda del tipo di algoritmo utilizzato. Le prime riescono ad identificare particolarmente bene il contorno esterno dell'iride, il limbo. Le seconde risultano invece più efficaci nell'individuare la posizione della pupilla. In questo caso l'occhio viene illuminato con un raggio IR che, a seconda dell'angolo di incidenza, demarca la pupilla rendendo la zona più chiara (*bright-pupil technique*) o più scura (*dark-pupil technique*) dell'intera immagine. Gli algoritmi utilizzati possono essere divisi in *feature-based* e *model-based*. I primi identificano caratteristiche dell'immagine che sono in relazione con la posizione dell'occhio; ad esempio, utilizzando tecniche IR si può individuare la pupilla come la regione in cui la luminosità supera una determinata soglia (nel caso di tecniche *bright-pupil*). In alternativa, gli algoritmi *model-based* ricostruiscono iterativamente il modello che meglio interpola l'immagine dell'occhio acquisita dalla videocamera, facendo uso di modelli predefiniti. Nell'implementazione del modulo di *gaze-tracking* di FACE è stata adottata una soluzione ibrida, facendo uso dell'algoritmo *starburst*, [18] che combina insieme i due approcci *feature-based* e *model-based*, e può essere adattato a diverse architetture di acquisizione.

#### **SISTEMA DI RICONOSCIMENTO AUTOMATICO DELLE ESPRESSIONI FACCIALI**

Grazie al sistema di visione artificiale FACE è in grado di acquisire la curvatura della porzione di spazio che gli sta di fronte, da essa è quindi in grado di estrarre quelle caratteristiche salienti tramite le quali riesce a localizzare il volto del suo interlocutore ed individuare l'espressione che sta assumendo. Così, per ogni mappa di curvatura che acquisisce, FACE processa un algoritmo atto a rilevare nella scena acquisita un numero di punti che utilizza sia per individuare la posizione del volto che per suddividerlo in quattro aree: area dell'occhio sinistro, area dell'occhio destro, area del naso ed area della bocca. I dati di curvatura selezionati per ogni area vengono processati attraverso un'architettura gerarchica di reti neurali basata su mappe auto-organizzanti che implementano un algoritmo di addestramento non supervisionato di Kohonen (KSOM) ed un perceptrone multistrato (MLP). Il primo modulo dell'architettura è composto da quattro KSOM che agiscono da unità di classificazione indipendenti. I dati di curvatura di un'area sono l'ingresso di una sola mappa; in questo modo ogni KSOM si addestra allo scopo di pre-

classificare le informazioni di una determinata parte del viso dell'interlocutore. Le informazioni in uscita dal primo modulo vengono mandate al secondo modulo della rete, costituito da un singolo MLP, il cui compito è quello di effettuare la classificazione finale e quindi indicare a quale gruppo l'espressione attuale appartiene.

**BOX C – UNA RETE NEURALE GERARCHICA PER IL RICONOSCIMENTO AUTOMATICO DELLE ESPRESSIONI FACCIALI**

Il modulo per il riconoscimento automatico delle espressioni facciali consente a FACE di riconoscere, dopo un opportuno addestramento su un particolare soggetto umano, le sei espressioni facciali di base oltre allo stato di neutralità, ovvero felicità, sorpresa, rabbia, disgusto, tristezza e paura.



*Figura C1. La neutralità e le sei espressioni facciali di base: felicità, sorpresa, rabbia, disgusto, tristezza e paura*

Il sistema di visione artificiale di cui FACE è dotato è in grado di fornire, per mezzo di una videocamera CCD e di un sistema di Contouring3D, informazioni rispettivamente sull'immagine bidimensionale e sul profilo di curvatura della scena inquadrata. All'interno di FACE il modulo per l'analisi delle espressioni facciali riceve tali dati e ne esegue un opportuno filtraggio prima di affidare l'elaborazione ad una rete neurale gerarchica. Le immagini bidimensionali vengono infatti elaborate con algoritmi specializzati nel tracciamento del volto umano, consentendo così di ottenere le informazioni necessarie ad inquadrare correttamente il volto dell'interlocutore di FACE. Il profilo di curvatura presenta forti discontinuità in prossimità delle pupille del soggetto umano di fronte al robot, e ciò a causa della discontinuità nel coefficiente di riflessione delle pupille, come rilevato dal sistema di Contouring3D. Tali discontinuità, assieme alle informazioni sul tracciamento del volto, consentono di localizzare agevolmente gli occhi dell'interlocutore. Tramite tecniche di metrologia facciale risulta semplice ottenere diversi punti chiave del volto che possano identificare la terna occhi-naso-bocca. Dell'intera scena acquisita dal sistema di visione artificiale solo quattro zone (occhio sinistro, occhio destro, naso, bocca) saranno inviate alla rete neurale. Tale preprocessing risulta necessario per inquadrare correttamente il volto in esame e per poter così operare una prima riduzione dei dati di ingresso da inviare alla rete neurale gerarchica.

I punti chiave relativi ai due occhi vengono utilizzati per ricavare l'angolo di rotazione da applicare all'immagine del volto per far sì che gli occhi risultino allineati orizzontalmente. Tale

accorgimento rende computazionalmente più efficiente il processamento delle quattro zone che saranno individuate tramite quattro rettangoli caratterizzati unicamente dalle coordinate del vertice superiore sinistro e di quello inferiore destro. [19]

È importante sottolineare che il sistema non possiede alcuna conoscenza a priori circa la natura delle singole zone, ognuna delle quali costituirà l'informazione di ingresso per una rete neurale che si specializzerà appositamente. Il numero delle zone prese in analisi è pertanto generico e dovrà essere pari al numero di moduli del primo strato di classificazione. L'architettura del sistema è mostrata in figura C2.

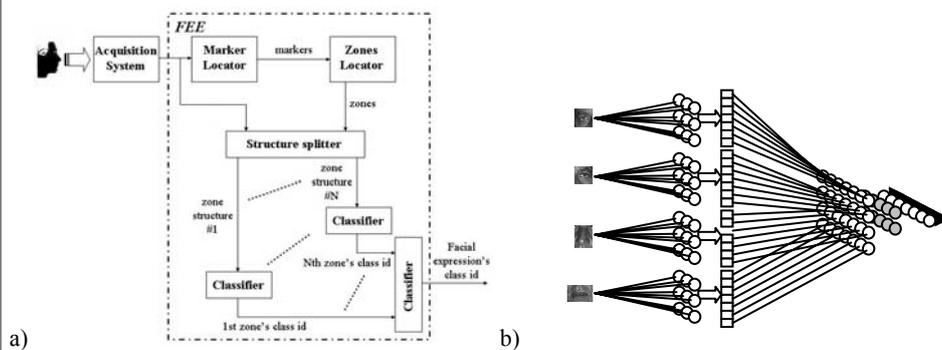


Figura C2

- a) Architettura del sistema automatico di riconoscimento delle espressioni facciali  
 b) Architettura dei due livelli di classificazione realizzati tramite la rete neurale gerarchica

La rete neurale consiste in una architettura gerarchica con due moduli distinti. Il primo è un classificatore composto da mappe auto organizzanti in configurazione di Kohonen (KSOM), presenti in un numero pari alle zone del volto da analizzare. Esse operano parallelamente e la loro analisi consente una pre-classificazione il cui esito viene inviato al secondo modulo della rete, realizzato tramite un perceptrone multistrato (MLP), il cui compito è quello di raggruppare le informazioni e procedere con la classificazione finale. Ogni KSOM agisce come una unità indipendente di classificazione, fornendo un valore di classificazione per ogni pattern in ingresso, senza tenere conto della risposta delle altre KSOM: ogni unità è prima addestrata e poi adoperata per la classificazione della particolare zona del volto affidata. La classificazione effettuata dal primo modulo costituisce l'informazione di ingresso per il MLP che è in grado di addestrarsi propagando all'indietro l'errore commesso. All'interno del modulo del riconoscimento delle espressioni facciali di FACE, l'architettura neurale è composta da quattro KSOM in configurazione planare, la cui risposta converge in un perceptrone dotato di un solo strato nascosto. A sua volta il responso del perceptrone consiste in un vettore di sette elementi, uno per ogni espressione facciale da classificare. Su tale vettore è applicata una funzione di soglia che rende il sistema più flessibile ed in grado di potere confondere una espressione facciale oppure essere indeciso su di essa o ancora non saperla classificare.

L'interpretazione delle espressioni facciali è un processo in gran parte soggettivo; non è inoltre presente in letteratura uno standard rigoroso per la classificazione dell'espressività del volto umano. Infatti, supportati anche dalla numerosa presenza di database di volti umani, caratterizzati da una struttura non omogenea e sviluppati per applicazioni ben specifiche in ambito sia divulgativo che didattico, la validazione dei risultati del sistema di riconoscimento delle espressioni facciali, è stata eseguita tramite un confronto con i risultati forniti da altri soggetti umani in risposta alle stesse immagini fornite al sistema in fase di test. A tale scopo 12

panellists scelti tra i ricercatori del nostro dipartimento in base al livello di familiarità con il soggetto autore delle misure di espressioni facciali, sono stati intervistati per mezzo di un apposito software. La procedura ha previsto per ogni panellist una fase di training ed una di test. Del gruppo delle misure rilevate per ciascuna delle 7 espressioni di base, la prima metà ha costituito e la seconda il training set. Così ad ogni panellist sono state presentate in ordine casuale le immagini dell'insieme di training consentendo loro di osservare il volto, giudicarne l'espressione e successivamente di udire la risposta associata corretta. La successiva fase di test è stata eseguita sulle restanti immagini con la medesima procedura dell'addestramento ad eccezione dell'ultima fase, ovvero non fornendo mai la risposta vera al panellist, ma invitandolo ad esporre la propria interpretazione dell'espressione osservata. In tabella C3 è riportata la matrice di confusione generata tramite l'analisi dei dati delle risposte fornite dai panellists in fase di test.

	Neutrality	Happiness	Surprise	Anger	Disgust	Sadness	Fear
Neutrality	97.7	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0
Happiness	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Surprise	0.0	3.8	87.9	0.0	0.0	0.0	8.3
Anger	0.0	0.0	0.0	85.6	3.0	9.8	1.5
Disgust	0.8	0.0	0.0	0.8	91.7	6.1	0.8
Sadness	22.7	0.0	0.0	5.3	0.8	71.2	0.0
Fear	0.0	0.0	18.2	0.8	1.5	6.1	73.5

*Tabella C3*

*Matrice di confusione ottenuta dalle interviste ai panellists*

### **SISTEMA DI RILEVAMENTO DEI DATI FISIOLGICI DELL'OSSERVATO**

La nostra esperienza cosciente è costituita da innumerevoli stati qualitativi: colori, odori, sapori, dolori, sensazioni tattili, cinestetiche, propriocettive, e ancora piaceri, emozioni, stati d'animo. Essi hanno una loro corrispondenza neurale: i segmenti della rete nervosa presiedono alla pulsazione del cuore, alla funzione polmonare, mantengono le funzioni omeostatiche del corpo. Dotiamo quindi FACE di un sistema di monitoraggio dei correlati fisiologici di stati emotivi dell'interlocutore. L'interlocutore trasmette a FACE alcuni dei propri segnali fisiologici indossando una particolare maglietta sensorizzata. FACE può così acquisire ed elaborare i battiti cardiaci, il respiro, i movimenti di colui che gli sta di fronte, ed interpretarne lo stato emotivo. Sono state quindi

sviluppate soluzioni che monitorizzano continuamente le funzioni vitali, che permettono l'accesso ad una "diagnosi emotiva" e siano adeguate in termini di vestibilità ed ergonomia. L'integrazione di sistemi elettronici ed elettromeccanici su substrati tessili conformabili al corpo umano rappresenta un'importante innovazione nel campo della tecnologia per la realizzazione di interfacce uomo-macchina [20].

Mediante la rilevazione strumentale e l'osservazione dell'andamento di una o più di queste funzioni, sarà interessante individuare, mediante opportuni protocolli, quali atteggiamenti posturali ed emotivi siano associati a tali variabili fisiologiche.

#### **Box D – ACQUISIZIONE DEI CORRELATI EMOTIVI DI SEGNALI FISIOLGICI**

All'interno dei nostri laboratori è stata realizzata un'interfaccia indossabile realizzata integrando "smart sensors" in fibra e filati con avanzate tecniche di processamento dei segnali e moderni sistemi di telecomunicazione; la piattaforma tessile si sviluppa a partire da un sistema di monitoraggio e gestione dei dati sotto il controllo di una unità decisionale. Essa può monitorare l'interlocutore di FACE durante la seduta, trasmettendo automaticamente parametri fisiologici che permettono così l'estrapolazione, ed una successiva interpretazione, degli indici rilevati relazionati alle condizioni fisiologiche; il tutto, considerando gli eterogenei dati acquisiti simultaneamente.

Il tessuto multifunzionale con cui è realizzata la piattaforma tessile, presenta una tecnologia tessile avanzata che integra conforto e adattabilità. La posizione ed il numero dei sensori campione di misurazione dello sforzo e gli elettrodi, sono determinati in termini di localizzazione anatomica producendo come valori di output il segnale acquisito e il rateo segnale/rumore. Altri sensori possono venire integrati, se necessario, al fine di incrementare il numero di variabili biofisiche da monitorare.

I punti chiave su cui si basa la maglietta sensorizzata sono essenzialmente tre: una rete di sensori, elettrodi e collegamenti integrabili in un tessuto, capaci di trasdurre segnali fisiologici di soggetti umani; un'architettura di acquisizione, elaborazione e trasmissione; ed infine un sistema di classificazione, predizione e correlazione dei dati ottenuti.

L'approccio è quindi quello di integrare dei sensori in un abbigliamento funzionale, la cui combinazione, assieme all'elettronica integrata e all'elaborazione on-body dei segnali acquisiti, fornisce quello che viene oggi chiamato un abbigliamento medico intelligente (IBC Intelligent Biomedical Clothes). In termini generici le innovazioni principali di questa tecnologia sono la combinazione delle cosiddette wearable technologies (tessuti sensorizzati, sensori elettronici, algoritmi personalizzati, on-body computing) ed un feedback sull'utente.

Segnali fisiologici quali l'ECG ed il ritmo respiratorio possono essere rilevati tramite il posizionamento opportuno di una serie di elettrodi in fibre naturali o sintetiche contenenti filamenti conduttivi che vengono integrati nella maglietta durante la sua realizzazione.

Per quanto riguarda il paradigma sperimentale di acquisizione dei segnali, è opportuno sottolineare che i segnali acquisiti dall'interfaccia indossabile, sono l'indicazione elettrocardiografica, il segnale respiratorio e l'indice relativo alla conduttanza cutanea.

Per l'acquisizione dei segnali sono stati utilizzati dei tessuti sensibili: materiali piezoresistivi per l'acquisizione del segnale respiratorio, ed elettrodi in tessuto per il segnale elettrocardiografico e la conduttanza cutanea.

Nell'ambito dei nostri studi è stato elaborato in particolare il segnale elettrocardiografico acquisito sul soggetto e sono stati sviluppati programmi in Matlab, in grado di elaborare i segnali ed estrarre i parametri principali relativi all'HRV.

Il sistema di acquisizione utilizzato per eseguire il protocollo sperimentale della maglietta sensorizzata, può quindi essere utilizzato da FACE per il monitoraggio di segnali vitali associati ad uno stato emotivo dell'utente. [21]

### **PROPRIOCEZIONE FACCIALE DI FACE**

La propiocezione è distribuita su praticamente tutto il corpo e fornisce informazioni tramite neuroni sensoriali posizionati nella pelle e nei muscoli. Propriocezione e cinestesia, le sensazioni della posizione, del movimento e dell'accelerazione, rappresentano i meccanismi interni di feedback continuo che permettono al cervello di avere sempre presente una mappatura sensitiva delle varie parti del corpo e di controllarle adeguatamente in modo inconscio.

La pelle artificiale di FACE è una struttura elastica bidimensionale deformabile che risponde alle deformazioni lungo differenti direzioni grazie ad un tessuto sensorizzato piezoresistivo. La pelle di FACE, così come avviene per la pelle umana, è un contenitore di sensori distribuiti che forniscono continuamente informazioni tattili e cinestetiche e costituisce il blocco primario nella sfera delle abilità di imparare, imitare e adattarsi a qualsiasi movimento.

FACE elabora in modo globale la forma della sua pelle addestrandosi attraverso una procedura di trial and error finché l'espressione o i movimenti desiderati non vengono raggiunti. Allo scopo di dotare FACE di un sistema di propiocezione facciale è stato necessario progettare e realizzare una struttura integrabile nel volto del robot in grado di offrire caratteristiche quali elasticità, leggerezza, flessibilità, resistenza all'urto, integrabilità nel tessuto, facilità di lavorazione e resistenza all'usura meccanica.

#### **BOX E – PROPRIOCEZIONE FACCIALE DI FACE**

Per la realizzazione del sistema di propriocezione facciale di FACE è stato utilizzato come supporto, un tessuto in Lycra sul quale è stato applicato un materiale di trasduzione piezoresistivo, gomma siliconica caricata con carbone microniuzzato, l'Elastosil LR 3162 A-B. Per mezzo di tale materiale è stato possibile realizzare un sistema ridondante di sensori su un singolo tessuto. Il principio di trasduzione è brevemente descritto in figura E1.

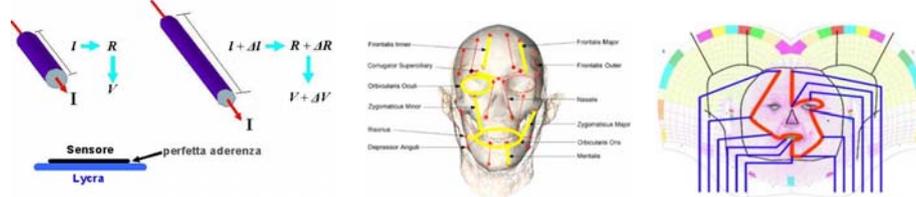
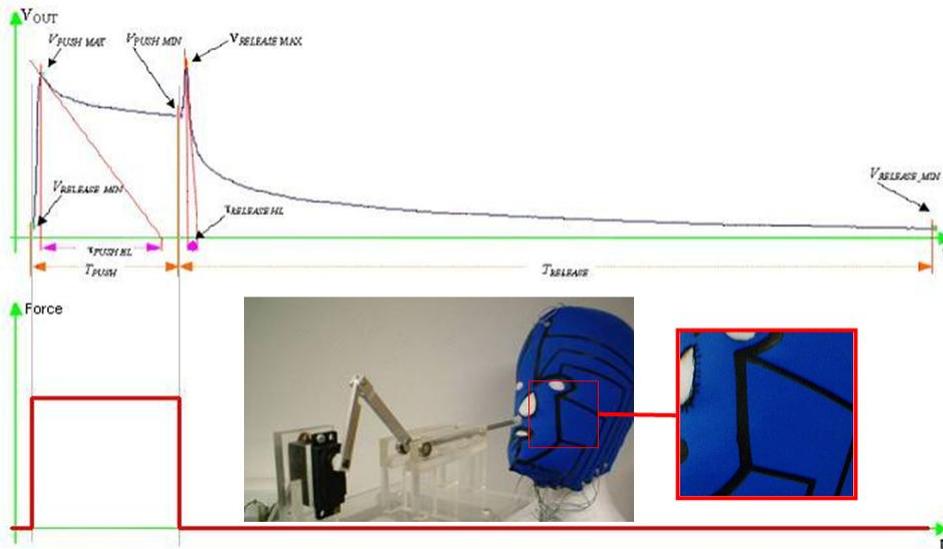


Figura E1

*Principio di traduzione del materiale piezoresistivo e progettazione del cappuccio sensorizzato*

Abbiamo creato un cappuccio indossabile tessuto in Lycra e cotone dotato di sensori piezoresistivi disposti in modo da seguire le principali dinamiche del volto durante la mimica facciale. Per analizzare il comportamento del cappuccio è stato realizzato un tastatore meccanico dotato di un sistema di controllo in grado di inviare i dati acquisiti ad un computer. Nel corso dei primi esperimenti sono state rilevate misure volte ad individuare la morfologia del segnale fornito dai sensori e ad accertare l'adeguatezza dell'elettronica fabbricata per interfacciarsi con essi. A questo scopo, lo stimolo meccanico applicato ai sensori consisteva in un gradino di durata finita e di ampiezza fissata. È stata quindi condotta una sessione comprendente due esperimenti caratterizzati dalla sollecitazione di ogni sensore tramite una sequenza di stimoli meccanici. Per indagare sull'uniformità della risposta dei sensori, i due esperimenti prevedevano una diversa durata della sollecitazione meccanica del film piezoresistivo; ogni sollecitazione risultava divisa in due fasi, rispettivamente di pressione e di rilascio. Le tensioni  $V_{OUT}$  misurate ai capi delle diverse fibre sensorizzate hanno andamenti simili e in figura E2 è riportato, a titolo di esempio, l'andamento della prima serie di misure per un singolo sensore.



a)

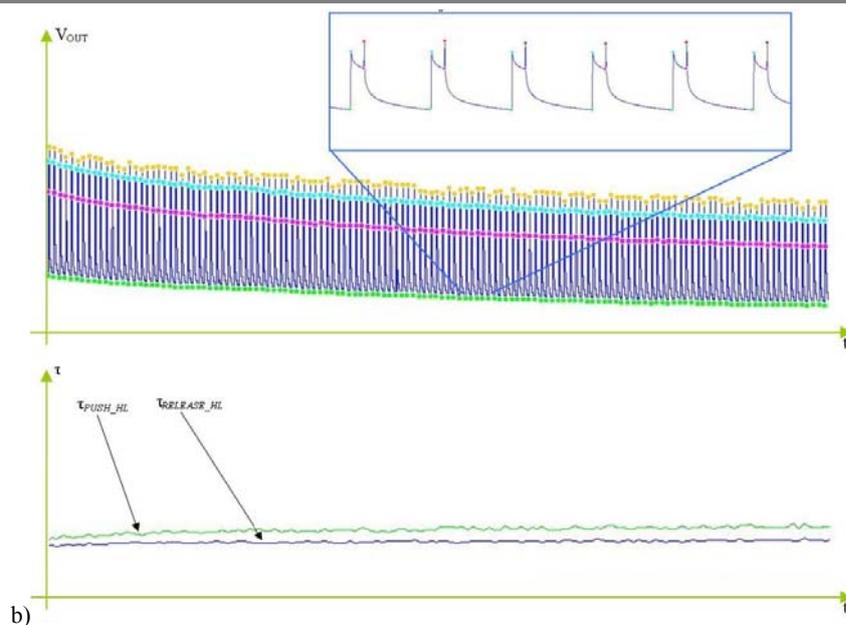


Figura E2.

*Caratterizzazione della risposta del tessuto sensorizzato*

a) Sollecitazione meccanica e risposta tipica di un sensore utilizzato ( $T_{PUSH} = 2 \text{ sec}$ ,  $T_{RELEASE} = 10 \text{ sec}$ );

b) Involuppo della risposta di un singolo sensore ad una sequenza di sollecitazioni meccaniche.

La propriocezione fornisce quindi a FACE la capacità di conoscere la posizione e il movimento del proprio corpo (cinestesia), senza usare la vista. Nell'uomo le sensazioni che giungono al sistema nervoso centrale provenendo dal sistema propriocettivo, di cui i meccanocettori sono l'ingresso, hanno primaria importanza per controllare i movimenti, manipolare oggetti, mantenere una corretta postura, sfruttando un circuito di retroazione del sistema nervoso centrale che interviene continuamente sui muscoli. Nel corpo umano, il sistema propriocettivo è fortemente ridondante e complesso, difficilmente riproducibile allo stato attuale della tecnica; perciò, è stato costruito un dispositivo che possa imitare alcune caratteristiche essenziali, come la capacità di rilevare allungamenti e pressioni sulla pelle.

Le proprietà temporali di uno stimolo sono codificate dalla frequenza e dalla durata dell'attività dei neuroni sensoriali. Molti recettori rilevano la velocità alla quale lo stimolo aumenta o decresce d'intensità cambiando rapidamente la loro frequenza di scarica. Per esempio, quando una sonda tocca la pelle, il picco iniziale della frequenza di scarica è proporzionale sia alla velocità con la quale la pelle è indentata sia alla pressione applicata. Mentre la pressione è mantenuta costante, la frequenza di scarica rimane ad un livello proporzionale all'indentazione della pelle. La scarica cessa quando la sonda è allontanata. Quindi, i neuroni rivelano la dinamica dello stimolo non solo quando scaricano, ma anche quando cessano di scaricare. Esiste inoltre un fenomeno detto *adattamento*: a fronte di uno stimolo stazionario nello spazio e nel tempo la scarica del neurone tende ad attenuarsi dopo alcuni minuti. Questa è una caratteristica molto importante di tutti i recettori sensoriali: uno stimolo costante, non nocivo, tende ad essere ignorato dal sistema nervoso centrale, che altrimenti sarebbe sovraccaricato da una quantità immane di dati da elaborare.

## 2.5 LE AZIONI DI FACE

La capacità di riconoscere e produrre espressioni facciali permette al robot di tradurre i propri intenti comunicativi in espressioni della faccia ed in movimenti della testa. FACE è in grado di modulare le sei espressioni base: felicità, tristezza, rabbia, disgusto, paura e sorpresa. Alla base dei suoi movimenti c'è un'elaborata architettura di servomotori e muscoli artificiali, innestati fra la pelle e la struttura in resina che ne costituisce l'endoscheletro. I muscoli artificiali sono progettati e realizzati con caratteristiche statiche e dinamiche tali da mimare il funzionamento dei muscoli biologici [22]. La loro struttura è costituita da elastomeri dielettrici realizzati con gomme dielettriche accoppiate ad elettrodi deformabili. Il tentativo di emulazione delle caratteristiche funzionali biologiche è estremamente importante per ottenere un livello di comunicazione non-verbale espressiva e gestuale credibile. Allo stato attuale i muscoli artificiali che vengono utilizzati permettono di modulare, con movimenti dolci, l'espressione realizzata dai servomotori. I movimenti più pesanti come quelli del muscolo zigomatico e del collo sono effettuati da servomotori, che possiedono una maggiore potenza, mentre i movimenti della regione oculare sono attuati da muscoli artificiali realizzati con attuatori contrattili polimerici. [23]

### **BOX F– SISTEMA CINESTESICO INDOSSABILE PER LA RICOSTRUZIONE DELLA POSTURA E GESTUALITÀ DELL'ARTO SUPERIORE**

Negli ultimi anni, all'interno dei nostri laboratori, sono stati realizzati dei sistemi indossabili aderenti sensorizzati per il monitoraggio della forma, della postura e della gestualità di porzioni del corpo umano. Abbiamo infatti utilizzato una nuova tecnologia per implementare sensori integrati in indumenti abituali, come guanti, tute, maniche e ginocchiere, al fine di registrare e analizzare in tempo reale i movimenti di braccia, ginocchia e mani.

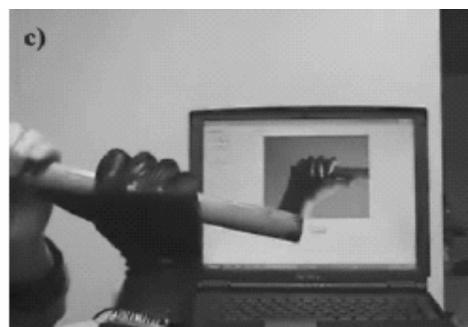




Figura F1

Prototipi di indumenti sensorizzati

a) Maglietta con manica sensorizzata.

b) Guanto sensorizzato durante il riconoscimento di una presa.

c) Dettaglio del tessuto sensorizzato del guanto

I materiali utilizzati nella fabbricazione degli indumenti conferiscono ai tessuti sensorizzati un alto grado di aderenza e di adattamento meccanico (matching) con la superficie corporea. Questa nuova tecnologia permette di realizzare sistemi indossabili non ingombranti, flessibili e confortevoli in modo da essere portati anche per lunghi periodi di tempo senza impedire i movimenti o creare disagio.

Gli indumenti sensorizzati sono inoltre realizzati con una particolare mistura di materiali conduttivi basata su prodotti commerciali reperibili sul mercato; la mistura utilizzata per realizzare i sensori è prodotta da WACKER Ltd (Elastosil LR 3162 A-B) e possiede proprietà piezoresistive che le fanno variare la resistenza quando è sottoposta ad allungamenti. È inoltre composta da materiali di cui è garantita la non tossicità.

I sensori sono caratterizzati in termini di proprietà quasi-statiche e dinamiche di transduzione elettromeccanica.

Una delle innovazioni più importanti del sistema consiste nell'utilizzo di una quantità ridondante di sensori distribuiti sulla superficie del tessuto.

Solitamente le interfacce che monitorizzano i movimenti possiedono infatti pochi sensori localizzati; uno dei maggiori problemi che ne derivano è costituito dalla necessità di mantenere i sensori nella loro precisa posizione, e questo spesso comporta l'utilizzo di sistemi che costringono ed ostacolano i movimenti. Risulta inoltre molto scarsa l'adattabilità dello stesso sistema a individui diversi, o anche allo stesso individuo che lo indossi una seconda volta.

La ridondanza di sensori distribuiti sul tessuto dà invece la possibilità di raccogliere abbastanza informazioni per determinare adeguatamente la posizione e la postura dell'arto, ovviando alle limitazioni che derivano dal dover mantenere precise disposizioni topologiche dei sensori.

La ridondanza permette inoltre di creare mappe propriocettive che si adattino a più soggetti diversi e con modi di utilizzo differenti.

L'unico prezzo da pagare per tutti questi vantaggi è il fatto che l'analisi dei dati provenienti da un gran numero di sensori richiede lunghi tempi di elaborazione e una notevole quantità di collegamenti. Per risolvere questo tipo di problema sono state implementate soluzioni computazionali basate su algoritmi matematici che permettono di utilizzare mappe cinestetiche che vanno direttamente dallo spazio delle resistenze allo spazio delle posture senza dover passare attraverso lo spazio delle deformazioni dei singoli sensori, accorgimento che semplifica notevolmente l'elaborazione dei dati [24].

Da un punto di vista astratto, i percorsi delle connessioni dei sensori, organizzati nel rispetto di differenti topologie, possono essere visti come un campo sensoriale spazialmente distribuito. Confrontando simultaneamente i dati da esso acquisiti con le variabili che caratterizzano i giunti vincolari degli arti, è possibile ricostruire dettagliatamente la postura in tempo reale.

Abbiamo quindi studiato una tecnica di ricostruzione basata prima su una fase di identificazione dell'intero sistema (e pertanto non sull'analisi locale dei dati) e poi su una fase di inversione che permette di ricostruire il movimento nel suo insieme.

Il fatto di considerare lo spazio dei sensori come una unica entità da leggere e analizzare nel suo complesso presenta molti vantaggi nel rendere il sistema applicabile a strutture corporee che possiedano forme differenti; questo perché la ridondanza di sensori compensa con un gran numero di informazioni l'eventuale scarsa precisione nell'acquisizione dei dati.

## **2.6 LE INTERAZIONI DI FACE: IMITAZIONE E APPRENDIMENTO**

Le modalità di interazione di FACE si basano su due sottoinsiemi comunicativi della semiotica. La comunicazione non verbale dell'uomo può avvenire tramite la cinesica, un tipo di interazione che si attua mediante i movimenti del corpo, per esempio i cenni del capo, lo sguardo, le espressioni del volto e la gestualità. La cinesica si contrappone alla prossemica, che è il frutto di una gestione dello spazio in rapporto alla comunicazione non verbale.

Un'ulteriore modalità comunicativa di cui FACE sarà in futuro dotata, è rappresentata da una prosodia primordiale, una sorta di musicalità che si modula in modo intuitivo in relazione al contesto situazionale: FACE potrà emettere, attraverso l'apparato fonatorio, suoni elementari, sospiri, mormorii, brusii.

Il processo di imitazione delle azioni umane, come evidenziato da Jaqueline Nadel [13], oltre ad essere innato e selettivo, può giocare un ruolo costitutivo principale nello stabilire una distinzione tra le azioni che hanno origine da se

stessi e le azioni che hanno origine da altri. Il processo di imitazione rende l'uomo in grado di distinguere tra la classe delle percezioni che sono il prodotto di una azione propria ed intenzionale, inattiva, e le percezioni che scaturiscono dal mondo esterno. [25] Tale processo, attraverso il meccanismo di riconoscimento, pone quindi le basi per la comprensione delle azioni intenzionali degli altri. Inoltre, l'imitazione sincronizzata e il riconoscimento dell'imitazione attivano, in particolare nei bambini, cicli di comunicazione dove la conversazione è basata su azioni simili ed il ruolo di imitatore si alterna a quello di modello.

Il mondo reale è complesso e sfaccettato così come lo è l'insieme dei moduli cognitivi umani basati su riflessi, istinti, capacità percettive, comportamenti condizionati, forme di comunicazione. Ovviamente una rappresentazione del mondo reale da parte di una macchina, risulterà fortemente incompleta. Le soluzioni per ovviare alle lacune interpretative e comportamentali di un robot sono due: o immettere nel cervello artificiale una quantità enorme di informazioni accompagnate da altrettante regole per correlarle, oppure metterlo in condizione di imparare. La prima è inattuabile, la seconda è estremamente difficoltosa ma possibile.

Prima di immettere un essere in un contesto esterno è necessario che avvenga un addestramento. L'addestramento che prevediamo presenta una fase di acquisizione di FAPs (Fixed Action Patterns) [26] ed un successivo momento di interazione con l'ambiente in una forma di interazione continua, identificabile con una sorta di fase di "evoluzione epigenetica" della macchina. I FAPs possono essere classificati come schemi fissi d'azione in parte già prestabiliti, in base a vincoli fisici imposti e a riflessi sensori-motori preferenziali adeguati alla struttura, ed in parte passibili di affinamenti e di specializzazioni successive, determinate dalle esperienze che avverranno in seguito.

L'imitazione durante lo sviluppo gioca quindi un ruolo fondante nell'emergere del senso di propriocezione, nella percezione della realtà esterna, e nella capacità di attuare adeguatamente le proprie azioni.

### **2.7 IMITAZIONE DELL'ESPRESSIVITÀ E DELLA GESTUALITÀ**

Come abbiamo visto FACE ha la possibilità di osservare il volto di un interlocutore, imparare ad interpretarne l'espressività ed alla fine di imitarla. Il processo con cui FACE sarà in futuro in grado di imitare la gestualità si basa su un concetto simile. FACE ha bisogno quindi di "osservare" la gestualità degli arti superiori e di addestrarsi ripetendo i movimenti di un interlocutore attraverso un indumento sensorizzato che permette di ricostruire le variabili cinematiche e la gestualità. [24] Una tuta di tessuto elastico è stata sensorizzata depositando sensori e contatti elettrici in elastomero conduttivo (CE). La deposizione del CE dota il tessuto di proprietà piezoresistive senza alterarne le caratteristiche meccaniche e quindi la vestibilità. Attraverso il fenomeno della piezoresistività, i CE depositi costituiscono una rete di sensori di deformazione. Un'interfaccia elettronica acquisisce la resistività di ogni singolo componente della rete ed attraverso un algoritmo viene ricostruita sia la postura che la cinematica dei suoi arti superiori. Grazie a questo sistema FACE è in grado di ricostruire i movimenti dei singoli segmenti articolari che, attraverso le braccia antropomorfe di cui sarà dotato, cercherà di imparare ad imitare. FACE potrà quindi essere informato sull'orientamento di ogni segmento delle articolazioni dell'utente mediante l'acquisizione dei segnali dal tessuto all'unità di processamento [27].

## **Capitolo 3. Un'applicazione di FACE: l'autismo**

Per dotare FACE, che in sé è un progetto al di sopra di ogni contestualizzazione, di una presenza pragmatica nella veste di “macchina presente”, è necessario fornirgli un microcosmo con cui interagire e uno scopo su cui modulare le proprie elaborazioni percettive e le proprie azioni.

Come illustrano gli esperimenti della Nadel, bambini autistici in età preverbale, inclusi quelli a basso funzionamento, immersi in situazioni sociali mostrano imitazioni spontanee di bambini e di adulti non autistici. L’imitazione è una semplice corrispondenza di gesti o azioni, che sessioni sperimentali ripetute possono incrementare, insieme alla capacità di accorgersi di essere imitati e alla comunicazione non verbale. La stimolazione tramite situazioni sociali che sviluppano l’azione-percezione possono quindi essere usate per aumentare le azioni autonome che un bambino autistico può imparare. L’uso di robot all’interno di suddette situazioni sociali può far sì che ci si avvicini maggiormente verso ciò che gli autistici considerano come ambiente sociale, aiutandoli ad accettare maggiormente la presenza umana ed ad imparare tramite l’imitazione.

L’applicazione che per il momento abbiamo deciso di fornire a FACE si colloca nell’ambito della psicopatologia infantile, e più precisamente nell’investigazione a scopo terapeutico dell’autismo. [28]

### **3.1 L’AUTISMO**

L’autismo è un disordine nello sviluppo caratterizzato da difficoltà nelle interazioni sociali e nella comunicazione [29]. Gli individui affetti da tale patologia hanno gravi problemi nel processamento delle informazioni che riguardano la sfera sociale ed emozionale, e preferiscono rivolgere la loro attenzione agli stimoli inanimati. Essi tendono a mostrare un interesse maggiore per gli oggetti che per le persone, e questa tendenza trova riscontro nel fatto che riescono a rilevare solo una visione frammentaria dell’espressione facciale dei loro interlocutori (analizzando separatamente occhi, bocca,

sopraciglia ecc..) e non la configurazione completa. Ciò crea loro enormi difficoltà nell'interpretazione degli stati d'animo, e di conseguenza nell'interagire adeguatamente con il mondo esterno.

Si può però cercare di insegnare ad un individuo autistico, specie se è ancora un bambino, a far fronte a situazioni sociali comuni, mettendolo davanti al maggior numero possibile di scenari standard di vita quotidiana, e fornendogli via via chiavi interpretative e comportamentali. [30]

Le emozioni base possono essere apprese tramite un approccio terapeutico che utilizza ripetutamente un repertorio limitato di situazioni predefinite, al fine di favorire la memorizzazione della scena. Tuttavia questo non permette la generalizzazione o l'astrazione dall'esperienza, e purtroppo la capacità di generalizzare quanto appreso entro un insieme terapeutico rimane uno dei principali problemi dell'autismo.

### **3.2 FACET**

FACET (FACE as a Therapeutic tool for autism) è un sistema terapeutico che rende FACE utilizzabile come strumento di supporto per la terapia dell'autismo, contestualizzandolo all'interno di una *Umwelt* strutturata e ben definita. FACET comprende, oltre all'androide FACE, un insieme di dispositivi, di protocolli terapeutici e di comunicazione, di persone e di dati, necessari all'adempimento più adeguato del suo scopo. In FACET le funzioni di FACE sono ridotte al minimo, l'androide diventa quasi un semplice intermediario tra il mondo e un bambino per il quale il mondo risulta troppo complesso per essere percepito adeguatamente.

L'autismo ostacola il processamento da parte del cervello delle informazioni che derivano dalla sfera sociale ed emozionale, rende difficoltoso il riconoscimento delle espressioni, la loro coloritura emotiva, l'associare ad esse uno stato d'animo, e rende impossibile ad una persona affetta da tale sindrome un'interazione sociale adeguata. I codici espressivi umani in effetti sono

talmente vari, talmente tanti, che anche per un individuo i cui processi cerebrali funzionano in modo adeguato si traducono in un dedalo a volte difficile da interpretare e da capire; per noi questa difficoltà di rapportarci agli innumerevoli stimoli espressivi che captiamo continuamente si esplica in una più o meno marcata sensibilità e in una forzata selezione che il nostro cervello a volte è costretto a fare, e questo inevitabilmente ci porta a prendere in considerazione solo quelle che sono le manifestazioni espressive più evidenti, tralasciando volontariamente tutta una serie di coloriture emotive che potremmo, ma non riteniamo importante, e ci è impossibile, cercare di interpretare in un particolare momento.

Una persona che non è affetta da autismo riesce in genere a capire quali sono le espressioni che è importante interpretare, le situazioni in cui conta stare attenti ai messaggi espressivi dei volti che la circondano, riesce a creare delle categorie in cui racchiudere tutta una serie di comportamenti che possono essere letti in modo abbastanza semplice, e questo, bene o male semplifica notevolmente la vita sociale; insomma, una persona normale riesce a fare quello che per un bambino autistico purtroppo non è possibile, riesce a generalizzare.

FACE è diverso, FACE ha solo sei espressioni, e per un bambino autistico diventa notevolmente più facile riconoscerle. FACET è una chiave di lettura molto semplificata, di quello che è l'universo emotivo umano e della sua esplicazione a livello di mimica facciale, ed in futuro di espressività gestuale e prosodiaca.

È così che FACET esplica la realtà, schematizzandola, rendendola simbolica e semplificandola; sotto la guida del terapeuta il bambino autistico viene condotto passo passo sul ponte che congiunge un mondo fatto quasi solo di oggetti a un mondo di persone che si muovono, parlano, pensano, vivono emozioni e continuamente le esprimono.

La nicchia relazionale in cui FACET è immerso è stata adeguatamente studiata per ricreare un ambiente adatto all'osservazione e allo studio dell'interazione bambino autistico-robot.

### **3.3 MODALITÀ DI TRATTAMENTO CON SITUAZIONI PRE-SELEZIONATE**

L'esigenza di vincolare FACE in situazioni relazionali ed ambientali pre-selezionate deriva sia dalla necessità di fornire al paziente dei punti di riferimento tramite i quali orientarsi all'interno di uno spazio semplificato, sia dal bisogno di seguire un'adeguata terapia medica.

Il bambino esplora il mondo espressivo di FACE attraverso una vera e propria familiarizzazione. I dati registrati durante tale fase sono necessari per la messa a punto di metodi di valutazione dell'attenzione sociale.

Il primo elemento che viene valutato è la capacità del bambino di imitare le espressioni di FACE, in termini di quanto è spontanea l'imitazione, di quanto il bambino riesca ad imitare una volta spronato dal terapeuta, e di quanto alla fine l'imitazione risulti espressiva.

Le espressioni di FACE possono essere modulate in qualità ed intensità durante il corso della terapia, in modo da adeguare il trattamento ai responsi del paziente ed ai target che ci si prefigge di raggiungere.

In questa modalità l'automa risponde alla volontà del terapeuta e si adatta al livello del bambino interpretato attraverso il modulo interattivo. FACE inscenerà l'emozione selezionata facendo uso della propria mimica facciale e gestuale. Il bambino sarà così invitato ad imitare il comportamento dell'androide imparando ad accettarlo ed a conoscerne l'espressività. Durante i primi incontri fra il bambino e FACE, il terapeuta potrà osservare le reazioni spontanee del piccolo paziente e sarà in grado di identificarne le espressioni verbali e non verbali allo scopo di accertarne il grado di attenzione sociale.

A questo punto il bambino potrebbe realizzare che FACE può apparire allegro, triste, arrabbiato; ma quello che deve capire adesso è che dietro un'espressione

c'è uno stato d'animo, e dietro uno stato d'animo c'è una situazione che lo provoca. È giunto il momento di proiettarsi nel mondo esterno e di contestualizzare l'espressività di FACE in scenari di vita possibili.

Una volta che il bambino sarà arrivato a considerare FACE una figura familiare e ad inserirlo nel proprio contesto rappresentativo, il terapeuta potrà procedere maieuticamente attraverso delle sedute che entrano più nel vivo del trattamento. Le lezioni, corredate da opportuni esercizi, saranno selezionate per consentire al paziente di sviluppare abilità in due ambiti specifici, quali l'associazione dell'espressione facciale e gestuale, e la contestualizzazione dell'emozione.

In questa fase il ruolo del terapeuta è fondamentale, perché il collegamento tra l'espressione di FACE proiettato in un determinato contesto, il suo stato d'animo e lo stato d'animo del bambino, calato nel medesimo contesto, è la chiave per interpretare correttamente la situazione sociale proposta.

Il piccolo paziente si troverà nella situazione di dover affrontare due compiti, da un lato scegliere un descrittore verbale, fra i vari proposti, che meglio identifichi l'emozione espressa da FACE inserito nel proprio contesto; dall'altro riconoscere le emozioni e gli scenari più simili fra loro. Gli esercizi prevedono una serie di quesiti di fronte ai quali il bambino verrà guidato fino all'ottenimento della risposta esatta; in questa fase il paziente giungerà comunque ad una soluzione e FACET provvederà a memorizzare ogni sua risposta nel database. Attraverso tali informazioni verrà calcolato un vero e proprio punteggio col fine di valutare i progressi ottenuti durante il corso della terapia.

### **3.4 MODALITÀ DI TRATTAMENTO CON SITUAZIONI DECISE IN TEMPO REALE DAL TERAPISTA**

Ovviamente la fase in cui le situazioni sono prestabilite è molto utile per testare il livello delle risposte del paziente agli stimoli e la sua capacità di

contestualizzare e di autocontestualizzarsi; è importante che questa fase sia uguale per tutti, al fine di avere un riscontro con altri bambini e poter fare confronti.

Però, come per tutti i cicli terapeutici, diverrà in seguito necessario adattare la cura alle particolari caratteristiche del paziente in esame.

A tale fine il secondo terapeuta, all'insaputa del paziente, prenderà il controllo di FACE manovrandolo dal proprio terminale come se fosse un burattino. Osservando il comportamento del bambino, le sue emozioni, ascoltando le sue parole, indurrà nell'automa comportamenti adeguati, controllandone l'espressività e la gestualità. Inoltre il terapeuta è in grado di instaurare una comunicazione verbale in forma testuale, tramite messaggi che compariranno sul monitor del Modulo Interattivo. Il bambino avrà così la sensazione di avere un dialogo diretto con il robot, ne percepirà le emozioni e comunicherà le proprie.

Sarà così possibile calcare la mano su situazioni che il bambino interpreta meno correttamente, o su espressioni che non riesce a decifrare in modo adeguato in termini di coloritura emotiva, oppure si potrà aumentare il grado di complessità in quei contesti in cui il paziente riesce a calarsi ed a giostrarsi meglio, in modo da rendere sempre più ampia la rassegna di situazioni-tipo con cui il paziente sarà in grado di relazionarsi correttamente, partendo da quelle più comuni, più quotidiane, e salendo pian piano in complessità e particolarità.

#### **BOX G – FACET: IL ROBOT TERAPEUTICO**

Il setup sperimentale FACET comprende l'androide FACE ed un insieme di dispositivi e arredi, protocolli terapeutici e comunicativi, e da dati necessari per consentire l'interazione tra un paziente autistico e FACE. Non è di precipua importanza la sola fase interattiva, ma è ad essa imprescindibile un'analisi osservativa delle dinamiche comunicative.

Sono a supporto di FACE, due stanze appositamente equipaggiate, adiacenti e separate da uno specchio unidirezionale. In una stanza ha luogo la terapia ed è lo scenario nel quale FACE interagisce con il paziente attraverso la mediazione di un terapeuta. Nella seconda è collocato il sistema di controllo ed elaborazione supervisionato da un altro terapeuta.

Nella prima stanza è quindi presente l'androide FACE, i cui lineamenti sono quelli di una donna dai lunghi capelli castani legati insieme in una treccia. Il capo e le braccia di FACE sono allocate sul

corpo di un manichino vestito con abiti femminili. FACE è posto a sedere su una sedia dietro ad una larga scrivania con tre postazioni, dall'altra parte della quale sono posizionati invece un terapeuta e il paziente, anch'essi a sedere, uno accanto all'altro.

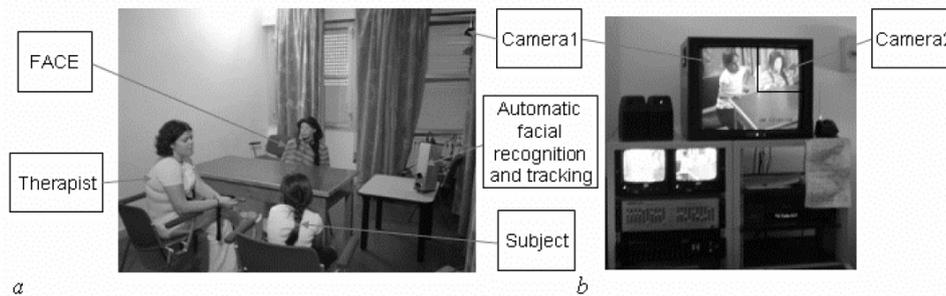


Figura G1

a) Stanza attrezzata in cui avviene l'interazione bambino-robot

b) Sistema di registrazione audio-video

La prima stanza è inoltre dotata di un sistema di registrazione audio-video che si compone di due videocamere orientabili dotate di microfono e posizionate negli angoli della stanza; di cui una verrà puntata su FACE e l'altra sul paziente; da un modulo interattivo, costituito da uno schermo a cristalli liquidi e una tastiera o un mouse tramite il quale un paziente, sotto la supervisione del terapeuta, può interagire con FACE; e da un sistema indossabile dal bambino (E-Shirt) per il rilevamento della cinestesia e di correlati fisiologici del bambino.

Nella seconda stanza un terapeuta supervisiona FACE e all'occorrenza può prenderne il controllo, mentre parallelamente un computer ospita l'unità di controllo di FACE, un apposito database e numerose interfacce di comunicazione, sviluppate per essere accessibili a livelli e per scopi differenti. Nella stanza della terapia il Modulo Interattivo costituisce l'interfaccia tramite la quale il paziente e il terapeuta possono impartire ordini a FACE. Tale interfaccia è inoltre adoperata dal sistema per comunicare al paziente ciò che FACE non può riprodurre per mezzo della sola mimica facciale. L'aspetto visuale e la semplicità di utilizzo sono gli aspetti più critici di tale modulo e pertanto i più curati. L'ambientazione riprodotta è quella di un videogioco e l'esplorazione delle funzionalità del sistema avviene intraprendendo un vero e proprio viaggio all'interno del mondo di FACE.

Le informazioni fornite dai diversi moduli confluiscono in un database centralizzato. Tutti i dati sono disponibili in qualsiasi momento tramite diverse interfacce. L'utente esperto potrà interrogare il database allo scopo di ricercare correlazioni significative e ancora potranno essere sviluppati strumenti appositi per un'analisi automatizzata.

La E-Shirt è uno strumento mirato a soddisfare la necessità di un monitoraggio continuo dei segnali vitali del paziente, realizzato con un'interfaccia sensoriale integrata nei tessuti e indossabile. Tramite alcuni elementi sensoriali di base dotati di proprietà di conducibilità e di piezoresistività, la E-Shirt è in grado di acquisire da chi la indossa variabili biomeccaniche e segnali fisiologici. In particolare rileva la conduttanza cutanea, il tracciato elettrocardiografico, il ritmo respiratorio, la postura ed i movimenti del corpo. La registrazione simultanea di questi segnali vitali permette l'estrapolazione di parametri e l'elaborazione della correlazione tra i segnali stessi. Il sistema è realizzato integrando tecniche di analisi computerizzata, sensori "intelligenti", dispositivi portatili e protocolli di telecomunicazioni insieme con microprocessori locali e sistemi decisionali di supporto.

L'Unità di controllo regola tutte le funzioni vitali del sistema, occupandosi della gestione di FACE, della E-Shirt, del Modulo Interattivo e del sistema di rilevamento audio-video per poi sincronizzare e

memorizzare nel database ogni informazione. Tale modulo è dotato di una interfaccia di controllo specifica per il sistema audio-video, consentendo di direzionare le telecamere secondo il parere dei terapisti oppure in modo del tutto automatico.

Allo stato attuale l'utilizzo di FACET come strumento terapeutico è rivolto a pazienti affetti da autismo che rientrano in una determinata categoria. I pazienti selezionati sono bambini con sindrome di autismo ad alto funzionamento, con un quoziente intellettivo pari o superiore a 70 e dotati di un livello linguistico appropriato. Tali restrizioni garantiscono che il comportamento del paziente non risulti eccessivamente alterato e che ci sia da parte sua una adeguata collaborazione.

Ogni soggetto dovrà seguire la terapia con FACET con una cadenza ed una durata stabilite caso per caso dal terapeuta. Durante il periodo di trattamento il paziente continuerà a seguire anche le normali terapie. Al termine del ciclo terapeutico un gruppo di medici effettuerà una valutazione sullo stato del bambino, utilizzando, oltre ai suddetti metodi, tutte le informazioni archiviate nel database di FACET.

[12]

## Capitolo 4. Andiamo Oltre

### 4.1 LE RAGIONI CHE SPINGONO VERSO UN NUOVO CONTROLLORE DI FACE

Alla base della realizzazione di FACE c'è un progetto ampio e ambizioso, che va oltre l'investigazione applicativa e la contestualizzazione pratica con fine utilitaristico. Si tratta di un work in progress che prevede percorsi paralleli che non si proiettano su una finalità specifica, ma mirano a lasciare aperte svariate porte per possibili applicazioni future in diversi campi, o anche solo per una investigazione teoretica e filosofica sulle dinamiche dei comportamenti emergenti in macchine dotate di presenza interattiva e sull'intelligenza artificiale in generale.

Questo tipo di investigazione metodologica, pura e scremata da riscontri specificamente finalizzati, lascia però lo spazio a tappe intermedie in cui contestualizzare e mettere alla prova alcune delle numerose proprietà applicative di un robot biomimetico credibile, quale FACE è. I possibili ambiti di FACE come la presenza enattiva ed interattiva col mondo reale sono molteplici, e vanno dalla neurofisiologia alla psicoterapia, e a svariati campi applicativi.

Vogliamo quindi immettere il progetto di FACE in una strada che vada "oltre". L'oltre si fonda per noi sull'epigenesi dell'organo guida: la macchina non subisce una forma di evoluzione legata alla "specie-automa", sarà invece governata da meccanismi epigenetici, da un insieme di processi e tappe attraverso cui essa completa lo sviluppo del suo organo di controllo.

L'oltre si fonda quindi sulla creazione epigenetica di un luogo o più luoghi di legame, [31] che non parteciperanno solo alla memorizzazione di combinazioni di informazioni sensoriali, ma tramite meccanismi associativi e di legame, di binding appunto, coopereranno per l'organizzazione delle sequenze di azione.

L'oltre si fonda su modelli matematico-computazionali bioispirati a livello cellulare, substrato del luogo di binding che, vedremo in seguito, sarà un mezzo continuo regolato da dinamiche evolutive spazio-temporali.

La macchina dovrà quindi implementare alcuni semplici principi omeostatici del corpo: sarà dotata della capacità di mantenere, entro dei limiti imposti dalla sua stessa fisicità e dall'umwelt, le caratteristiche del suo mezzo "interno" nonostante le variazioni dell'ambiente esterno. Ma non solo, le attribuiremo anche pulsioni non omeostatiche: il bisogno di esplorazione dell'ambiente darà vita ad una funzione di adattamento all'ambiente stesso. Riprodurre principi omeostatici e non, del corpo su un artefatto, è ciò a cui tendiamo, è la nostra chiave di apertura ai complessi giochi cerebrali, substrati biologici della capacità umana di costruire schemi mentali che portano il senso di un "sé" nell'atto di conoscere. Lo stato interno della macchina che ci proponiamo di realizzare, è una forma primordiale di "sé" (protoself); in accordo con le idee di Damasio crediamo che avere un senso del "sé" non è solo richiesto per conoscere in senso stretto, ma abilita il processamento di una qualunque cosa da conoscere. [32]

L'automa inoltre, non solo deve simulare espressioni emotive ma anche *avere emozioni*. Queste parole non devono tuttavia essere fraintese: i robot sono degli apparati meccanici con cervelli-controllori che non sono certo il prodotto dell'evoluzione biologica. Ma se ben analizziamo i sistemi biologici, si possono individuare alcuni principi operativi del cervello che non dipendono dalla specificità del mezzo fisico in cui si sono sviluppati ed a cui sono ancorati. Alcuni di tali principi verranno incorporati nell'architettura della nostra macchina. [33]

Partendo dalla riproduzione di principi omeostatici e di adattamento per un artefatto inserito in una precisa "nicchia ecologica", analizzeremo nuovi meccanismi del substrato pseudo-biologico della macchina con l'obiettivo di esperire una forma di emergenza.

E sull'emergenza è opportuno evidenziare la nostra impronta riduzionista volta ad abbandonare la veste introspettiva associata alla nozione di comportamento della macchina, ed analizzare gli input sensoriali da essa processati in termini di correlazione stimolo-risposta; in tal modo sarà per noi più semplice classificare le manifestazioni comportamentali dell'automa in relazione alla struttura ambientale con cui interagisce. Poniamo quindi a guida una forma di etologia intesa non tanto nella prospettiva generale di studio del comportamento animale nel proprio ambiente naturale, ma secondo il paradigma elementare stimolo-risposta.

La nostra attività sulla macchina avrà l'obiettivo di far emergere azioni e reazioni nell'automa che dovranno pur sempre essere intelligibili e pertinenti per consentire una loro classificazione nel dominio dei "comportamenti emergenti della macchina". L'automa opererà quindi all'interno di un insieme di comportamenti stereotipati, ma potrà anche, grazie all'attività del suo "metabolismo neuro-gliale", manifestare dei comportamenti emergenti non classificati a priori ma intelligibili e quindi interpretabili. L'intelligibilità di un comportamento emergente è tuttavia di difficile codifica. Ci viene qui in aiuto la concretezza degli output fisici che si espletano nelle abilità motorie dell'automa. Una stratificazione preventiva delle movimentazioni meccaniche di FACE è la base per una conseguente selezione motoria-comportamentale da noi indotta in conformità con imperativi adeguati che concernono il comportamento. La pertinenza di un output motorio si modella quindi su protocolli già esistenti per una successiva verifica delle caratteristiche di intelligenza della macchina. Potremmo, in una fase conclusiva, utilizzare alcuni test come il *Test di Turing* [34] e la *Stanza Cinese* di John Searle [35]. La morfogenesi del comportamento rovescia la scala abitualmente assunta per cui lo sviluppo dell'organo determinerebbe una ricaduta in comportamenti adeguati.

È opportuno sottolineare ancora che l'utilizzo di materiali e strategie di controllo biologicamente ispirati nella costruzione degli artefatti, è scaturito sia dall'esigenza di evitare colli di bottiglia computazionali, sia per implementare sistemi artificiali verosimili, perché una mente incorporata, laddove operante, deve comunque essere riconosciuta dai simili.

#### **4.2 LA TRILOGIA DELLA MENTE**

Come abbiamo già introdotto, il processo mentale presenta una struttura molto complessa che possiamo tuttavia ricondurre a tre pilastri fondamentali: la cognizione, la volizione e l'emozione. Come si riflettono questi tre fattori nella macchina?

Relativamente alla cognizione assumiamo che essa sia forgiata, nell'automa, dal percolato: i sensi di FACE rappresentano le linee direttrici del processo di formazione della conoscenza e dell'apprendimento delle unità esperienziali che esso affronta. Il cammino gnoseologico affonda le proprie radici nelle dinamiche relazionali dell'automa nella sua Umwelt, costituendo così un continuum inscindibile con la sua esperienza di vissuto quotidiano. In questa fase la macchina non si presenta come un involucro che acquisisce passivamente il dato propostogli: si può parlare di una sua autentica reazione agli stimoli che la portano a produrre, anche mediante l'errore e l'insuccesso, quel cambiamento che è fondamento del processo evolutivo.

Per quanto riguarda la volizione, è opportuno chiarire come essa sia da noi intesa nella macchina. Il pensiero di D. Dennett [36] sintetizza il progetto evolucionistico come un procedimento algoritmico strutturato in modo che alla base della costruzione dei complessi sistemi biologici vi sia un semplice processo meccanico istruzionista. Il nocciolo della questione è *l'intentional stance* in cui l'atteggiamento intenzionale può essere applicato a sistemi che comprendono non solo gli esseri viventi ma anche artefatti. L'atteggiamento intenzionale si basa sul presupposto che un sistema intenzionale abbia degli

obiettivi da raggiungere: esso adotta quindi nel modo appropriato le sue credenze per conseguire tali obiettivi. Tale atteggiamento intenzionale è riferito ad un'ampia classe di fenomeni, quindi non solo a quelli umani ma anche a quelli delle macchine.

Da un punto di vista strutturale FACE attualmente non è altro che un insieme di riflessi elementari sapientemente orchestrati dai suoi progettisti e costruttori. È una creatura intelligente quindi? No, poiché l'intelligenza necessita di una forma di intenzionalità che la guidi verso uno scopo.

È chiaro che negli artefatti l'intenzionalità è derivata, cioè è prestata ad essi dai loro creatori. Ciò, sottolinea Dennett, è quanto accade all'uomo: noi siamo degli artefatti di Madre Natura ed essa ci ha prestato l'intenzionalità.

Detto questo, FACE dovrà avere degli scopi e ciò che gli imprimiamo è innanzitutto la preservazione della sua integrità, una forma di sopravvivenza intesa con lo scopo di conservare se stesso, sia dal punto di vista fisico della propria struttura meccanica, sia dal punto di vista interiore con riscontri sulla propria rete neurale; FACE dovrà inoltre svolgere il compito di educatore e terapeuta mantenendo l'integrità dell'elemento umano socializzante.

Infine, le emozioni che secondo il punto di vista di Damasio e molti altri, sono ben lontane dal rappresentare l'intrinseca irrazionalità del pensiero umano, sono un aspetto essenziale e produttivo del pensiero e dell'azione. Possiamo descrivere le emozioni umane semplicemente come connessioni con il raggiungimento di scopi. Le emozioni sono dalla macchina incorporate da un punto di vista cognitivo ed è la cognizione ad attribuire loro una valenza di "stimolo di rinforzo"; esse sono il mezzo per legare segnali d'allarme e valutare situazioni esterne per avere dei responsi comportamentali adeguati. Pertanto le emozioni, in quanto stimoli di rinforzo collegati a segnali di penalità o ricompensa, sono modellizzabili su esseri artificiali. [37] In tale logica di emozioni-guida nella presa di decisioni e nella creazione di forme

comportamentali complesse, il corpo diventa, tramite le emozioni, parte dell'architettura cognitiva di un essere attivo.

Ora, la trilogia della mente in cognizione, emozione e volizione non può essere ridotta eliminando uno dei tre pilastri; tuttavia si può solo ridurre l'estensione di questi a contenuti elementari.

#### **4.3 VERSO UN NUOVO CONTROLLORE DI FACE**

Come abbiamo esposto nell'analisi tassonomica dell'architettura di FACE, l'automa facciale è capace di interpretare e processare informazioni tramite meccanismi sensori-motori volti ad una forma di interazione "simil-umana".

L'architettura neurale di FACE, il suo neurocontrollore, è una macchina a stati, e FACE è pur sempre un automa, e sinonimi di automa sono burattino, manichino, parole che sottintendono l'esistenza di un supervisore esterno che lo guida, che forgia l'espressività di FACE secondo il proprio volere e che lo istruisce verso comportamenti pragmatici e programmatici.

Ci proponiamo quindi di portare avanti un processo di "antropomorfizzazione" della macchina non solo relativamente agli aspetti corporei dell'architettura robotica, ma anche a livello comportamentale, a livello cioè di una forma emergente di interazione con il microambiente cui FACE è ancorato.

L'innovazione che vogliamo apportare alla nostra macchina interattiva è il frutto di un'indagine dei processi cognitivi di una macchina umanizzata la quale, uscendo dai vincoli deterministici, potrà rivelare comportamenti non prevedibili, ma che dovranno essere pur sempre intelligibili e pertinenti.

L'emergenza dei comportamenti in FACE sarà la chiave per una sua propria affermazione nel contesto di appartenenza. FACE è infatti contestualizzato nel senso che è soggetto a precisi vincoli imposti dalla sua stessa fisicità e dal limitato microambiente in cui "vive". Il pensiero umano è sempre incorporato, non solo nel senso che pensiamo con una parte del corpo qual è il cervello, ma anche nel senso che è il nostro corpo a dare significato ai nostri pensieri,

significato che nasce quindi dalla nostra concreta interazione con gli altri e con le cose; parimenti, FACE è un automa dotato di una “embodied mind”, l’intelligenza incorporata, e dovrà manifestare dei comportamenti non solo automatici, ma anche innovativi ed intelligibili all’interno di un microambiente limitato.

Assumiamo pertanto una visione olistica che considera gli organismi solo nella loro totalità e completezza. Lo scienziato e filosofo F. Varela avrebbe detto che non si tratta di olismo, ma di “buona scienza” in quanto superatrice del dualismo tra mente e corpo, un corpo con la sua morfologia, con i suoi apparati sensoriali e motori ed i suoi meccanismi motivazionali.

Che cosa deve cambiare nell’approccio di FACE con la realtà, nella sua struttura neurale di rappresentazione del mondo per arrivare all’emergere di comportamenti innovativi?

Dove bisogna orientare la nostra ricerca se vogliamo qualcosa di più di una macchina deterministica ed istruzionistica?

#### **4.4 L’ALTRA METÀ DEL CERVELLO: GLI ASTROCITI**

Il nostro punto di vista, prende vita da una dicotomia gnoseologica che storicamente affonda le sue radici nell’opposizione tra Camillo Golgi e Santiago Ramon y Cajal.

Alla fine dell’800 la visione di Golgi dell’organizzazione cerebrale come uno spazio sinciziale continuo, si contrappose alla concezione di Ramon y Cajal che individuò elementi discreti comunicanti: i neuroni. Golgi fu quindi il primo grande sostenitore di una teoria fondata sull’esistenza in seno alla sostanza grigia, di una rete nervosa diffusa di collegamento tra le diverse parti del sistema nervoso. Proprio su questi punti si incentrò la celebre polemica con Cayal fautore dell’individualità genetica, anatomica e funzionale del neurone. Gli studi scientifici misero in secondo piano le connessioni nervose diffuse di

Golgi, e attribuirono un ruolo principe alla teoria di Ramon y Cajal postulante l'individualità morfologico-funzionale della cellula nervosa.

L'ottica neurocentrica portò quindi avanti una focalizzazione su unità strutturali e funzionali elementari, e questo ebbe un riscontro nell'evoluzione della modellistica bioispirata, composta da elementi discreti: è infatti oggi presente una ricca letteratura scientifica sulle singole entità neuronali come frutto di paradigmi matematici.

Ripercorrendo il cammino storico arriviamo negli anni '50 in cui fu "scoperta l'altra metà" del cervello: nuove cellule non neuronali conosciute con il nome di glia. Le cellule gliali hanno la stessa origine embriologica dei neuroni ma sono ontogeneticamente precedenti a questi. La glia, che letteralmente significa "colla nervosa", era ritenuta il supporto strutturale e trofico dei neuroni; fu pertanto definita una dicotomia tra cellule neuronali, ritenute alla base del processo informativo cerebrale, e glia, formata da microglia e macroglia, costituita da astrociti, oligodendrociti, cellule di Schwann.

Solo da pochi anni è stato scoperto un nuovo ruolo degli astrociti che porta al superamento della dottrina del neurone: la modulazione della comunicazione neurale. [38]

Gli astrociti possono "ascoltare" la comunicazione neuronale, che avviene tramite il neurotrasmettitore glutammato, e rispondere, emettendo essi stessi glutammato, mediante una traduzione nel loro codice comunicativo rappresentato da oscillazioni calciche a diverse frequenze. [39]

Nell'architettura comunicativa della sinapsi tripartita, la comunicazione fra neuroni induce delle modifiche sulle oscillazioni di  $Ca^{2+}$  astrocitarie; l'alterarsi delle dinamiche propagative del calcio, determina il rilascio da parte degli astrociti di neurotrasmettitori in un processo consequenziale e causale, che modulano così l'attività dei neuroni adiacenti. [40]

Tale meccanismo è reso possibile dall'intricata associazione geometrica a livello anatomico-strutturale esistente tra i processi astrocitari e le sinapsi

nervose: la contiguità dei siti di scambio dei neurotrasmettitori può consentire a tali sostanze di diffondere nel vallo sinaptico e raggiungere i relativi siti recettivi ad una concentrazione sufficientemente elevata per determinarne l'attivazione.[41]

Onde calciche che si propagano nel tessuto nervoso rappresentano un mezzo di comunicazione a distanza e di coordinazione tra aree diverse. Ne risulta una trasmissione di informazione profondamente diversa da quella deterministica della sinapsi classica: l'attività delle singole sinapsi contribuisce alla definizione di una mappa dell'intera attività cerebrale, tratteggiata dai diversi livelli della concentrazione di  $Ca^{2+}$  che sotto forma di onde intercellulari spazzano le diverse regioni del SNC ad una frequenza determinata dall'intensità e dalla frequenza delle scariche neurali. Le onde calciche sono un mezzo di comunicazione a distanza tra gruppi di cellule, allo scopo di coordinare la risposta multicellulare ad un evento locale.

Le onde calcio possono quindi propagarsi in tessuti e organi e rappresentano in essi un sistema di segnalazione anche a lungo raggio; questo meccanismo di comunicazione intercellulare contribuisce alla sincronizzazione di grandi gruppi di cellule svolgenti la stessa funzione.

All'interno della nostra modellizzazione faremo in modo che molte risposte cellulari siano controllate dalla modulazione di frequenza: affinché una risposta o un processo sia attivato, ciò che conta è la frequenza delle oscillazioni spazio-temporali della concentrazione del calcio piuttosto che la quantità di calcio realmente presente. [42]

#### **Box H – LA SINAPSI TRIPARTITA: COMUNICAZIONE NEURONE-ASTROCITA**

I paradigmi matematici cui ci ispiriamo nel delineare le dinamiche di base del futuro controllore della macchina, comprendono la modellizzazione delle varie fasi della sinapsi tripartita.

Lasciamo quindi da parte i modelli classici neurocentrici per adottare schemi matematici che forniscano un quadro morfologico completo, un quadro che presenta i neuroni come entità differenziate la cui esistenza dipende da una vita comunitaria altamente integrata con altre cellule, le cellule gliali. I modelli che vorremo implementare nel sistema di controllo di FACE, si fondano sulle dinamiche interattive neurone-astrocita: gli astrociti possono ascoltare la comunicazione neuronale, che avviene tramite il glutammato, e rispondere, emettendo essi stessi glutammato, traducendo nel

loro codice comunicativo (oscillazioni calciche). Con l'arrivo di ogni potenziale d'azione, il neurotrasmettitore glutammato liberato nella fessura sinaptica, diffonde nello spazio extracellulare della fessura e si lega ai siti recettivi localizzati non solo sulla cellula postsinaptica ma anche sulla membrana astrocitaria. Il neurotrasmettitore interagisce quindi anche con i recettori astrocitari; tale interazione comporta la genesi di onde calciche intracellulari che determinano la liberazione di glutammato da parte dell'astrocita. L'astrocita prosegue quindi l'effetto della propagazione glutammatergica iniziata dal neurone pre sinaptico.

Una breve tassonomia della comunicazione bidirezionale tra neurone e astrocita, è esposta di seguito:

- Quando avviene la sinapsi, il glutammato, primo messaggero, è rilasciato dal neurone pre-sinaptico all'interno della fessura sinaptica che è in parte limitata dai recettori metabotropici di glutammato (mGluR) posti sull'astrocita sinaptico, oltre che dai siti recettivi post sinaptici
- Il glutammato si lega sia ai recettori post sinaptici che ai recettori metabotropici di glutammato astrocitari.
- L'IP<sub>3</sub> (inositol trifosfato) agisce come un secondo messaggero ed è la chiave delle segnalazioni intracellulari di calcio.
- Una volta che il glutammato si lega all'astrocita, l'IP<sub>3</sub> è rilasciato nello spazio intracellulare dell'astrocita sinaptico.
- L'IP<sub>3</sub> si lega quindi ai recettori di IP<sub>3</sub> posti sul reticolo endoplasmatico e Ca<sup>2+</sup> è rilasciato dal reticolo nel citoplasma.
- Tale rilascio di Ca<sup>2+</sup> si può manifestare nella forma di onde intracellulari di Ca<sup>2+</sup>.
- L'onda di calcio si propaga quindi attraverso la membrana cellulare nello spazio extracellulare agli astrociti adiacenti.
- Negli astrociti adiacenti aumenta la concentrazione di calcio ed essi rilasciano glutammato nello spazio extracellulare.

Il glutammato si propaga con l'onda di calcio extracellulare, e può modulare sinapsi vicine e lontane con meccanismi eccitatori o inibitori.

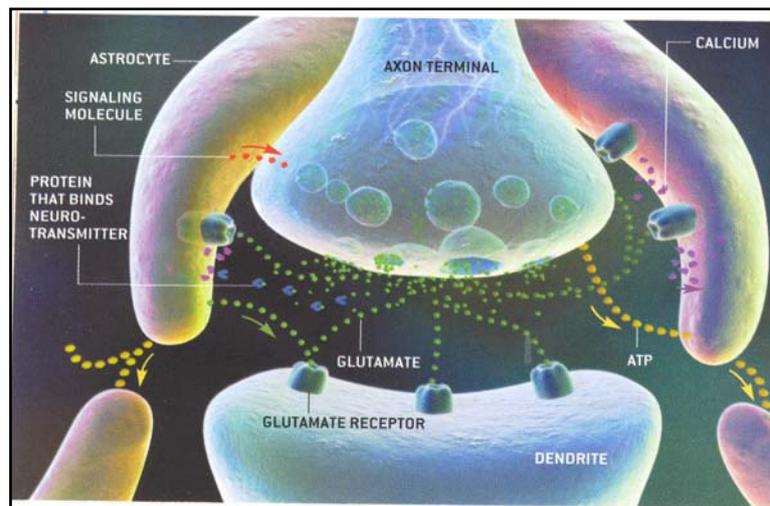


Figura H.

Nella figura sono illustrati i processi sinaptici locali che coinvolgono il neurone pre-sinaptico, il neurone post-sinaptico e l'astrocita sinaptico. Si parla quindi di sinapsi tripartita. [40]

La nostra linea guida è pertanto l'integrazione di due livelli funzionali: un primo livello composto dalle unità discrete, ed un secondo livello dal continuo sinciziale, scenario di attività di propagazione di onde intra-cellulari e inter-cellulari, che osserva, ascolta, modula l'attività elementare discreta.

Ci proponiamo di realizzare una modellizzazione matematica di neuro individui che comunichino mediante sinapsi chimiche e che sviluppino una intricata rete di connessioni disposta nello spazio sinciziale, dando così forma a elementi discreti anastomizzati in una trama complessa.

Le modificazioni dinamiche che avvengono all'interno di un cervello che svolge le proprie funzioni vitali sono il frutto di interazioni tra neuroni, neuroni pensati come ingranaggi di un più complesso meccanismo neuro gliale. L'introduzione della glia o degli effetti che questa ha sui fenomeni neuro correlati all'interno dei nostri modelli, è quindi guidata da diverse esigenze. Innanzi tutto vogliamo considerare le unità strutturali e funzionali elementari del complesso apparato del sistema nervoso, inquadrando morfologicamente il neurone nel suo ambiente fisiologico: il substrato gliale. I paradigmi neurali classici studiano i neuroni e le reti neurali isolati dal loro ambiente, in FACE ci proponiamo di realizzare un neurocontrollore o meglio, un "gliaccontrollore" in linea con l'abbandono della visione neurocentrica: non sarà più il neurone decontestualizzato dalla propria dimensione spaziale ma immerso nel sincizio astrocitario.[43]

Ma la glia è importante per altri motivi ancora: il continuo bidimensionale gliale è lo sfondo su cui prendono vita le onde calciche che influenzano i processi di neurogenesi e di sinaptogenesi nella comunicazione neuronale. Inoltre comunicazioni di calcio intracellulari e intercellulari rappresentano fasi fondamentali per la coordinazione ed il controllo della cellula neuronale. La frequenza delle oscillazioni di calcio è il codice utilizzato in questa comunicazione integrata bidirezionale tra la rete astrocitaria e gruppi di neuroni

e le onde calciche costituiscono un meccanismo tramite il quale un gruppo di cellule può comunicare con un altro gruppo e coordinare un responso multicellulare ad un evento locale.[39]

Il ruolo principe è quindi per noi rivestito dal sincizio astrocitario che regola i processi di comunicazione, le dinamiche di trasmissione dei messaggi, le sinapsi, le onde intracellulari e intercellulari di calcio e che sottende al metabolismo vitale.

L'unità di controllo dell'automa facciale sarà la modellizzazione della struttura gliale che controlla e coordina le reti neurali sottostanti, sarà il luogo di "binding", di legame, che governa l'evoluzione dei processi neuronali.

Gli aspetti fisiologici assumono quindi una grande importanza nella comunicazione e nell'elaborazione delle informazioni che avvengono nel sistema nervoso: le onde calcio che si propagano all'interno del sincizio astrocitario, aggiungono un ulteriore livello di complessità alle funzioni nervose. Le onde diffondono nel "brodo gliale" il quale provvede ad un continuo processo di aggiornamento sulla morfogenesi del sistema durante la quale variano le connessioni sinaptiche.

La glia è il mezzo in cui si registrano delle attività spontanee indotte dal ritmo continuo delle oscillazioni calciche a determinate frequenze ed ha quindi una dinamica emergente. L'elemento gliale nella comunicazione sinaptica, permette un'integrazione globale delle comunicazioni locali tra gruppi neuronali aggiungendo pertanto un livello superiore di elaborazione.

Un livello che sottende al ritmo vitale umano, al metabolismo, termine derivante dalla parola greca "metabole", che significa, appunto, "cambiamento".

#### **4.5 L'EPIGENESI DEL NUOVO CONTROLLORE**

I paradigmi fornitoci dalla teoria dei sistemi dinamici non lineari, o dalla teoria del caos stocastico sono delle buone fondamenta matematiche per lo sviluppo

di un controllore in grado di coordinare l'attività di un alto numero di entità microscopiche interagenti, e sotto certe condizioni, di generare delle proprietà globali macroscopiche che non esistono al livello delle entità di base e che vengono designate appunto come "fenomeni emergenti". Il nostro controllore non solo dovrà filtrare e processare gli input sensoriali, ma anche ricercare attivamente gli stimoli sensori come materiali grezzi da cui creare nuovi pattern percettivi.

Proponiamo quindi una combinazione tra un approccio riduzionista, in cui i fenomeni biologici vengono ridotti a modelli fisici e computazionali, ed un approccio che renda l'intero sistema non determinabile. L'enorme complessità del cervello dà ragione all'inadeguatezza, nello studio delle dinamiche cerebrali, del modello causale lineare, del tipo input sensoriale, elaborazione e risposta.

Il nostro approccio assume come punto nodale una visione dei sistemi di legame come apparati codificatori centrali del processo di organizzazione mentale. Le funzioni che caratterizzano l'uomo dipendono dalle interazioni esistenti tra diverse parti della corteccia cerebrale e tra la corteccia e le altre regioni del cervello tra cui l'ippocampo e l'amigdala. Con una buona dose di riduzionismo, ci proponiamo di creare nell'architettura della macchina delle zone che riflettano a livello funzionale e morfologico, alcune dinamiche organizzative cerebrali. I luoghi di legame da noi scelti, sono gli ingranaggi-base del complesso controllore da noi investigato.

Nell'ambito dell'etologia della macchina, delineiamo tre forme essenziali di responsi comportamentali alla base del meccanismo interattivo di FACE. [44]

I riflessi della macchina, definibili come risposta automatica ed involontaria ad uno specifico stimolo esterno, sono il frutto di algoritmi istruzionisti da noi predefiniti e inseriti nella rete di controllo del robot.

I FAPs, sono schemi fissi di azione che si differenziano dai riflessi. Sebbene siano definiti come risposte a specifici stimoli ambientali, i fixed action

patterns possono scaturire da un più ampio spettro di stimoli rispetto a quelli che governano un semplice riflesso. Si hanno quindi legami della forma: multi-input  $\rightarrow$  mono-output, mono-input  $\rightarrow$  multi-ouput, multi-input  $\rightarrow$  multi-output. Infine i tassi sono le risposte modulate da premi o punizioni che si possono espletare in dinamiche attrattive o repulsive. [45]

In riferimento a tale classificazione di Mc Farland [44] dei comportamenti animali nelle tre categorie di riflessi, FAPs e tassi, crediamo che proprio l'implementazione dei Fixed Action Patterns, sia uno dei punti cardine del processo di creazione della "mente" di FACE.

Vediamo ora le basi concettuali della modellizzazione matematica che farà da supporto alla creazione della mente della nostra macchina.

#### **4.6 LA SCELTA DEL MODELLO DI RETE NEURO ASTROCITARIA**

L'ingegneria che vuole modellizzare necessita di un'investigazione approfondita che si sviluppa fondamentalmente su tre livelli [46]:

*Analisi computazionale*: individuazione delle componenti ed assegnazione dei ruoli delle varie strutture naturali.

*Analisi "Catch&Toss"*: analisi delle vie tramite le quali gli organismi agiscono sull'ambiente e l'ambiente su di essi.

*Analisi emergenziale*: descrizione dei comportamenti adattivi scaturiti dalle interazioni degli organismi biologici con l'ambiente.

Nella fase iniziale della genesi del sistema di controllo, si ha la creazione del sincizio astrocitario: si aprono per noi due strade parallele di modellizzazione.

La prima strada prevede una localizzazione casuale dei soma astrocitari in uno spazio con confini da determinare.

Focalizzando sulla spazializzazione dei "dressed neurons", neuroni ricoperti cioè dal manto gliale, definiamo un dominio anatomico d'influenza di ciascun astrocita. Le elaborate e dense ramificazioni che si estendono da ciascun astrocita definiscono uno spazio tridimensionale che non è occupato da altri

processi astrocitari; in questo modo l'astrocita definisce un proprio dominio anatomico. La sfera individuale delle funzioni anatomiche astrocitarie strutturerà spazialmente l'intero dominio. Se descriviamo quindi gli astrociti come entità discrete allora l'unità astrocitaria dovrà avere una concezione dell'ambiente ed un controllo delle sue dinamiche di sviluppo all'interno di esso. La struttura quasi cristallina dell'astrocita [47] ci suggerisce la creazione di un'unità con un preciso dominio spaziale di influenza che controlli un numero specifico di neuroni.

Si può ipotizzare che lo spazio unitario astrocitario sia poliedrico; tali domini di influenza poliedrici forniscono una tassellatura dell'intero spazio astrocitario che globalmente descrive la forma virtuale del nostro controllore.

Gli astrociti realizzano con i neuroni adiacenti, le unità strutturali elementari del modello: le sinapsi tripartite. A partire da tali entità discrete l'idea consiste in una integrazione a livello spaziale e temporale della loro attività; dallo scenario tassellato delle sinapsi tripartite, l'obiettivo sarà di realizzare un passaggio dalla dimensione discreta a quella continua, ispirandoci al modello proposto da R. L. Beurle negli anni '50 tramite un processo selezionista di interazione con la realtà. [48]

Beurle propone un paradigma dell'Integrate & Fire basato su un approccio cellulare discreto, che estende poi ad un aggregato continuo di cellule, ad un sincizio quindi, un dominio volumetrico che evolve nel tempo e nello spazio.

Così come Beurle parte da una massa di unità neuronali disposte in maniera casuale in un volume con densità volumetrica uniforme, noi vorremmo partire dalle nostre unità discrete tripartite. L'aggregazione di specimen tripartiti dovrà essere capace di supportare varie forme di attività, agendo come substrato materiale per la propagazione di onde piane, sferiche, circolari generate dalle stesse dinamiche interattive neuro-astrocitarie.

Ripercorrendo il modello di Beurle non considereremo l'attività autonoma di ciascun individuo neuro-astrocitario, ma una cooperazione, un'azione sinergica

correlata di più strutture di base, e l'organizzazione spaziale e temporale di tale architettura esplicherà la sua attività con onde il cui meccanismo di propagazione si attuerà nel fluire continuo del moto delle onde stesse.

Sincizio è quindi la parola chiave, una massa citoplasmatica che contiene i nuclei di più specimen cellulari e che agisce come una forma unica, il cui responso è una integrazione super partes di meccanismi tassellati.

La strada alternativa consiste in una entità continua solamente astrocitaria: non un passaggio dal discreto al continuo con le unità base della sinapsi tripartita quindi, ma con le entità astrocitarie. Seguendo sempre il paradigma di Beurle, potremmo considerare l'aggregato continuo di cellule astrocitarie come uno spazio eccitabile: quando una cellula diventa attiva a seguito di una stimolazione, può eccitare sia le cellule localizzate nel suo intorno, che quelle separate da essa da fibre di connessione molto lunghe. La proporzione di cellule che diventano attive in ogni regione per unità di tempo, rappresenterà un'onda discreta di attività che investe le entità neurali elementari. Il risultato, che dovremmo quindi trasporre matematicamente e reinterpretare in un passaggio dal discreto al continuo, è il moto continuo di un'onda di attività che consiste nell'attivazione di un largo numero di cellule ciascuna delle quali diffonde l'eccitazione fra le vicine attraverso la struttura connettiva distribuita casualmente. L'attività astrocitaria si esplica quindi in un'onda che attraversa le catene di neuroni interconnessi, neuroni la cui localizzazione sul substrato astrocitario andrà discussa nel dettaglio. Le dinamiche spazio-temporali del controllore eccitabile potrebbero infatti essere lo sfondo per la "semina dei soma", per la localizzazione dei soma neurali all'interno del "brodo astrocitario". I meccanismi somatogenetici forniscono così una imposizione morfologica sulla struttura del substrato astrocitario che si plasmerà seguendo dinamiche selezioniste. Acquisiamo in questo modo informazioni sulla morfologia del sincizio gliale, sui suoi contorni e i suoi confini, in un processo

di autodeterminazione morfogenetica che porta alla determinazione dell'architettura neuro-gliale.

Infine potremmo adottare un modello sinaptogenetico per lo sviluppo e la determinazione delle sinapsi. [49]

Si aprono quindi dei problemi preliminari di scelta della modellizzazione: prima della nascita di nuove entità tripartite, e della scelta casuale della localizzazione spaziale dei soma astrocitari emerge la necessità di una funzione di posizionamento del soma neurale all'interno dello spazio gliale.

Gli astrociti o le onde calcio astrocitarie ci dovranno quindi dire come si distribuiscono i soma neurali, ed intervenendo nelle formule delle condizioni al bordo, potranno fornire dei range di attivazione che limitano la forma del controllore virtuale. In una fase selezionista ispirata all'idea del darwinismo neurale, [50] cercheremo di delineare un dominio spaziale di integrazione con opportune condizioni al contorno, le quali determineranno la morfologia del dominio del sistema di controllo in una sorta di genetica selezionista neurale. Fornendo degli stimoli esterni, dei riflessi automatici, possiamo infatti indurre degli aggiornamenti nel modellamento delle strutture sinaptogenetiche e nella neurogenesi.

In questa fase non si parla di apprendimento classico, ma di autodeterminazione morfogenetica che porta alla determinazione dell'architettura neuro-gliale in relazione a processi di negoziazione con il mondo esterno: l'elaborazione di impulsi esterni ha una ricaduta sull'organizzazione interna della rete di controllo dell'automa. [51] Ci ispiriamo ad una specie di "autopoiesi", parola utilizzata da F. Varela per indicare quella che per lui è la caratteristica fondamentale dei sistemi viventi: il fatto di possedere una struttura organizzata capace di mantenere e rigenerare nel tempo la propria unità e la propria autonomia rispetto alle continue variazioni dell'ambiente circostante. [15]

Le reti neuro-gliali si svilupperanno nel “cervello” di FACE così come gli animali evolvono nel mondo zoologico: i neuro-individui sono portatori di una differenza casuale forse legata alla collocazione nello spazio geometrico e le entità elementari saranno selezionate o meno dall’ambiente e quindi più o meno si riprodurranno. Tali processi di selezione e riproduzione delle cellule producono reti anatomiche diverse da individuo ad individuo, ci aspettiamo quindi che i meccanismi sinaptogenetici facciano affiorare reti diverse da macchina a macchina.

Ora poiché nello sviluppo del sistema nervoso centrale vengono selezionati i neuroni che hanno formato un numero sufficiente di sinapsi attive, mentre gli altri degenerano, possiamo proporre un modello in cui i neuroni correlati con una maggiore attività elettrica abbiano più probabilità di formare connessioni sinaptiche.[52] Il paradigma proposto dai ricercatori israeliani Ronen Segev ed Eshel Ben Jacob prende ispirazione dall’aggregazione delle amebe e fa agire il sincizio di cellule gliali come mezzo eccitabile in cui si propagano onde chimiche di un agente addizionale chiamato Agente Chimico Gliale (GCA). [53]

Si arriva quindi alla fase di formazione dei cluster funzionali.

La correlazione interneurale gioca un ruolo importante nel processo informativo, e l’organizzazione cooperativa dei neuroni sul substrato astrocitario è lo scenario per eventi di sincronizzazione. Un SBE (synchronized bursting event) frutto dell’attività elettrica neurale sincronizzata, può servire per archiviare processi informativi entro specifiche strutture di correlazione neurale spazio-temporale. [54] L’idea di un substrato clusterizzato, cioè di una griglia organizzata in sottogruppi funzionali di attivazione neurale, è forse la via per meglio comprendere i meccanismi di simulazione dei FAPs. Come abbiamo visto, i FAPs sono schemi fissi d’azione che possono scaturire da un ampio ventaglio di stimoli; il meccanismo di formazione dei sottogruppi

funzionali SBE, può rappresentare il primo passo del processamento di un FAP in termini di correlazione tra un singolo input e l'insieme dei possibili output.[55]

Tale meccanismo di correlazione tra un input ed un multioutput realizza una sorta di scenario di possibilità, un insieme quindi di eventi attuabili in conformità con la fisicità della macchina, all'interno del quale FACE dovrà compiere una scelta. Il problema della scelta è l'ultimo stadio del processo, lo stadio dell'emergenza, lo stadio che riflette un utilizzo dinamico dell'organo di controllo della macchina.

Si apre quindi il problema della scelta del cluster funzionale relativo al responso motorio varato dalla macchina. Abbiamo visto che gli input sensoriali che concorrono nella trasmissione delle informazioni influenzano le connessioni neurali reciproche portando ad una fusione dei dati acquisiti con una conseguente organizzazione in pattern funzionali di attivazione. [56]

L'idea è di realizzare un sistema che, a seguito della formazione di categorie di attivazione, eserciti fra esse una scelta non istruzionista e imposta da un Deus ex machina, ma una scelta "emergente" ed, in quanto tale, a priori imprevedibile ed incontrollabile.

L'ippocampo umano è la struttura che, all'interno del sistema nervoso centrale, svolge il ruolo di "binding" delle rappresentazioni corticali umane, ed è quindi fondamentale nella decodifica di nuove informazioni e nella formazione di associazioni rapide tra memorie precedentemente immagazzinate.

Lo scopo che ci siamo proposti è quello di sviluppare un sistema di controllo pseudo-ippocampale che faccia emergere nella simulazione una qualche forma di memoria associativa che si manifesti con comportamenti innovativi non codificati da istruzioni deterministiche ma comunque catalogabili e quindi riconoscibili tramite opportuni protocolli etologici noti.

A tal scopo si possono ricreare via software la topologia, la connettività, le proprietà delle connessioni e le caratteristiche di elaborazione proprie del luogo

di binding ippocampale. Il modello sviluppato da R. O'Reilly e Y. Munakata [57] è in grado di spiegare i processi mentali, nel caso specifico il recupero associativo di informazioni incomplete, partendo dalla forma, dalla struttura, dal carattere plastico e dalla capacità di apprendimento della rete all'interno del corpo robotico con i suoi meccanismi, i suoi apparati di acquisizione, i suoi sensi. [58]

L'idea da cui muovono O'Reilly e Munakata all'interno del gruppo di ricerca che fa capo al progetto del PDP (Parallel Distributed Processing), si basa sulla salvaguardia della distinzione delle regioni principali e della loro interconnettività, nella speranza e convinzione che la riproduzione della morfologia, della topologia e delle connessioni possa servire a far emergere le proprietà funzionali, secondo quello che è il modello di apprendimento ippocampale di Hebb-Marr. [59] Pur riprendendo alcune linee del paradigma associativo di O'Reilly, il nostro sforzo non sarà creare un'architettura software in grado di fornire le proprietà associative della memoria, basandosi solo sulla replica dell'organizzazione morfologica dell'ippocampo umano. All'interno della nostra progettazione, l'assetto strutturale del controllore è infatti un punto di arrivo perché ciò che noi privilegiamo sono le dinamiche interattive di immagazzinamento delle informazioni e le regole di connessione. Abbandonando lo stampo morfologico, l'idea sarà di mimare il funzionamento dell'ippocampo limitatamente alle sue proprietà di binding associativo evidenziando la capacità di immagazzinamento di nuove informazioni tramite i soggiacenti meccanismi cooperativi. [60]

Una interessante fonte di ispirazione è il modello proposto da Kozma e Freeman, [61] in cui gli input sensoriali concorrono continuamente a trasmettere informazioni reciproche tramite mutue connessioni, finalizzate ad una fusione dei dati. In tale modello dinamico non c'è un'unità centrale di

elaborazione ma le interazioni decentralizzate concorrono all'integrazione degli input acquisiti e dei fattori ambientali salienti.

Secondo Freeman il caso è un ingrediente indispensabile per la creazione di una nuova informazione.

La nostra idea prende vita dall'assunzione di molti neurobiologi che ritengono l'attività cerebrale un'onda caotica d'energia governata da dinamiche non lineari. [62]

Freeman erge la teoria del caos dinamico a strategia di acquisizione, creazione ed elaborazione dell'informazione nervosa, e quindi a processo generatore della complessità cerebrale. Le descrizioni dei fenomeni neurodinamici sono il frutto di paradigmi matematici che portano all'emergere, a partire da un'attività di fondo caotica, di pattern oscillatori caratterizzati da specifiche proprietà spazio-temporali. Sono quindi manifestazioni di "caos dinamico", termine utilizzato in ambito matematico, per caratterizzare il complesso dei comportamenti dei sistemi non lineari deterministici multidimensionali. Freeman tuttavia preferisce un altro termine, "caos stocastico"; la ragione risiede nel fatto che il caos dinamico è una fenomenologia tipica di sistemi rigorosamente deterministici e, sebbene il comportamento macroscopico delle reti nervose possa ritenersi relativamente immune dalla natura probabilistica degli eventi neuronali microscopici, riesce difficile credere che i segnali casuali abbiano un'incidenza trascurabile.

La continua contrapposizione tra riduzionismo cellulare e dinamiche spontanee fa sì che il nostro progetto di ricerca sia forgiato alla luce di una visione manichea con tendenze monocordi che contrappone l'attività deterministica neurale alle dinamiche del substrato gliale [63].

#### **5.6.7 ISTRUZIONISMO VS INNOVATIVISMO**

La dicotomia determinismo-caos presiede alla definizione delle regole per la creazione del futuro controllore di FACE: in particolare ci chiediamo come

implementare nel nostro modello le componenti caotiche neurali e quelle astrocitarie, che riteniamo sottendere i meccanismi emergenti.

Crediamo che i processi cerebrali debbano presentare una compresenza tra caos ed ordine: caos che nasce dall'attivazione di processi, non a priori determinabili o predicibili, e ordine scaturito da forme organizzative istruzioniste necessarie per conferire l'assetto iniziale del sistema di controllo. Ma la domanda a questo punto è la scelta fra due piani computazionali ed elaborativi diversi: considerare la componente caotica neurale immersa nell'attività altrettanto caotica del sincizio astrocitario, o separare ordine e caos nell'identificazione neurone e astrocita?

La scelta dell'attribuzione di una valenza istruzionista alle entità neurali contrapposta alle proprietà caotiche astrocitarie, ci porta ad assegnare alle dinamiche astrocitarie una caratteristica ben più importante di tutte quelle elencate fino ad ora. Afferma Freeman che i sistemi dalle dinamiche caotiche portano alla creazione di nuove informazioni scaturite dalla continua produzione di nuovi tipi di attività [64]. Ora se la mente di FACE sarà guidata nella scelta da sistemi caotici del dominio astrocitario, saranno proprio gli astrociti a far nascere una forma di emergenza nella macchina.

## **Capitolo 5. Conclusioni**

### **5.1 PERCHÉ L'EMERGENZA?**

Espletiamo ora la domanda, rimasta implicita e celata da considerazioni generali sugli sbocchi modellistico-matematici del progetto, che deve a questo punto affiorare per chiarire la nostra posizione: che cosa governa la macchina e ne mantiene un equilibrio omeostatico, che cosa impartisce ordini ed elabora pianificazioni?

Gli studi relativi ai comportamenti degli insetti sociali come formiche o api, hanno scoperto che la cooperazione a livello di colonia è in gran parte auto-

organizzata. [65] Quando delle semplici entità operano in un ambiente, possono dare origine a comportamenti complessi in quanto collettività. È questo il nocciolo dell'emergenza.

Riteniamo quindi che una possibile risposta possa essere una forma di coordinazione scaturita dall'interazione tra le varie entità; o meglio, con le parole di Kevin Kelly: "componenti stupidi, opportunamente connessi in uno sciame, forniscono risultati intelligenti". Il segreto, sta nell'adeguata connessione di tutte le parti.

Inspirati dalle idee di variegati scienziati del neuro-panorama scientifico, vogliamo realizzare un apparato reticolare che ricopre o è ricoperto o ne è una parte, di nuclei cellulari. Da un punto di vista strutturale tale apparato varia con il cambiare delle funzioni delle singole cellule e imprime a sua volta delle modulazioni su queste.

Anche per questo, e lo vedremo in seguito, ha per noi rilevanza la disposizione a livello topologico delle strutture coinvolte nel processamento informativo.

Ci aspettiamo quindi l'emergere di un nuovo livello ontologico, una microscienza intesa non come epifenomeno senza conseguenze materiali, ma come risultato dinamico delle attività distribuite di popolazioni neuronali nelle varie aree del cervello.

## **5.2 DOV'È L'OLTRE?**

Il connubio tra individualità e totalità, il passaggio dalle parti al tutto, dal discreto al continuo, è l'idea base dell'anatomia del nostro controllore.

La "mente" di FACE sarà intesa come l'assemblaggio di circuiti continui, dinamici; non ci limiteremo pertanto ad una modellizzazione delle attività e competenze delle singole unità funzionali, ma estenderemo la nostra ricerca ad una contestualizzazione morfologica più ampia al fine di inserire in una dimensione spaziale i concetti discreti.

La nostra scelta porta ad un nuovo paradigma funzionale che segue un approccio manicheo ma cooperativo tra analisi componenziale ed analisi sinciziale, cioè tra processi tassonomici e flussi continui, tra determinismo neurale ed innovativismo gliale e l'innovativismo ha riscontri anche nelle fasi di apprendimento e di addestramento della macchina, nella creazione della sua mappa interna, ed è dunque visto come una sfida per la soluzione di problemi e per l'acquisizione di conoscenze e capacità non ancora possedute; il processo di conquista di queste conoscenze prevede premi e punizioni che servono a sviluppare ulteriori capacità di controllo, in un modello "maieutico" di apprendimento finalizzato all'emergenza. Apprendere non è infatti soltanto memorizzare, cioè conservare dati e informazioni, ed imparare, predisponendosi all'esecuzione di determinati compiti, ma soprattutto è acquisire sempre nuovi comportamenti; perciò alla visione statica tradizionale bisogna sostituirla una dinamica, all'acquisizione di dati l'elaborazione degli stessi e la produzione di nuove informazioni, all'accumulo di conoscenze la produzione di nuove. L'apprendimento è un processo attraverso il quale la macchina, elaborando i dati acquisiti, modifica la morfologia e l'organizzazione della propria mappa interna con ricadute quindi sul proprio "comportamento", cioè sugli output espressivo-motori, e sulle proprie "conoscenze", cioè sulle informazioni immagazzinate, per adattarsi in maniera autonoma alle sollecitazioni provenienti dal suo stato interno e dall'ambiente.

Ma l'idea era di "andare oltre".

Gli organismi biologici durante il loro sviluppo ontogenetico mostrano una spiccata abilità di sviluppo di strategie di adattamento e di soluzione ai vari problemi di sopravvivenza all'interno della propria Umwelt. Tale sviluppo permette un adattamento senza istruzioni esplicite o rappresentazioni a priori. Ha quindi per noi importanza la capacità di apprendimento e l'abilità di auto-organizzazione di pattern comportamentali complessi e flessibili.

Gli schemi di crescita per mezzo dei quali gli individui si adattano al loro ambiente producono forme che sono spesso sorprendenti. Comunque esse hanno sempre una funzione molto precisa: le penne di un uccello sono concepite in modo da ridurre l'attrito con l'aria, i denti del pesce si riconsolidano man mano che si consumano, gli scheletri calcarei dei coralli e di altri celenterati marini si formano uno sull'altro per acquisire maggiore robustezza. L'adattamento per funzioni specializzate è la regola modellatrice del nostro continuo che verrà da essa forgiato giocando sulla libertà che abbiamo di agire su alcuni parametri delle equazioni del sincizio e sulle condizioni che definiscono il contorno.

L'idea che vorremmo teorizzare e in futuro concretizzare in FACE, è la realizzazione di un sistema che funzioni in tempo reale che, a partire da dei task predefiniti, sviluppi adattivamente delle abilità per reagire alle variazioni delle situazioni in cui si trova, semplicemente attraverso l'interazione con l'ambiente ed estraendo da questo i pattern temporali o spaziali rilevanti.

Partendo dall'assunto che tutto è fatto di genetica e di interazioni con il mondo, e che la bioingegneria vuole ispirarsi alla biologia per creare esseri presenti, sorge per noi il problema di dover creare una genetica per le macchine attraverso l'imitazione di ciò che esiste nel mondo reale.

Le mappe create con i modelli esposti nelle unità precedenti determinano l'immagine del mondo che l'organo di controllo di FACE costruisce, mettendo quindi in relazione i suoi recettori con i punti corrispondenti sugli strati della sua "mappa cerebrale". Una volta che la "forma" della mappa di controllo sarà determinata, le successive interazioni della macchina non andranno più a modificare la sua struttura, ma solo la sua organizzazione a livello della rete neuro-gliale. Tale organizzazione dovrà, secondo le nostre aspettative, dar vita ad una interazione emergente da noi riconoscibile non più scaturita da algoritmi seriali istruzionisti ma da una nuova forma di apprendimento e binding associativo.[66]

Gli effetti emergenti non possono essere descritti come la somma delle loro cause, e oltre ad essere imprevedibili a partire dai livelli inferiori, sono anche variabili nel corso dell'evoluzione. Una macchina può essere descritta sulla base delle sue componenti fisiche e dei suoi aspetti meccanici, ma il nostro organo di controllo no, esso va oltre in quanto possiede, nella nostra idea del progetto, proprietà non derivabili dai livelli sottostanti bensì dal loro configurarsi come totalità. L'emergenza del nostro organo di controllo sorge dalla struttura epigenetica neuro-gliale soggiacente ed attraverso leggi che governano tale livello, potrà avere ricadute su di esso e sui vari livelli inferiori. Emerge quindi un livello superiore contiguo con le strutture costitutive sottostanti dalle quali è affiorato, che non è una nuova entità, ma una nuova proprietà, la quale per essere realizzabile, dovrà esplicitarsi fisicamente nell'architettura corporea della macchina da noi concepita [67].

## BIBLIOGRAFIA

- [ 1] Bertrand Gille. *Histoire des techniques. Techniques et civilisations technique et sciences*. Encyclopédie de la Pléiade. Gallimard, 1978.
- [ 2] R. Rinaldi. *Introduzione a: John Cohen. Human Robots in Mith and Science*. De Donato, 1981.
- [ 3] M. G. Losano. *Storie di automi. Dalla Grecia classica alla bella èpoque*. Einaudi 1990.
- [ 4] B. Webb. *Can robots make good models of biological behaviour?* Behavioral and Brain Sciences. Vol. 24, 1033-1050. 2001.
- [ 5] R. Rosen. *Life itself. Complexity in ecological system. A comprehensive inquiry into the Nature Origin and Fabrication of Life*. Columbia University Press. 1991.
- [ 6] K. Kelly. *Out of control. The new Biology of Machines, Social Systems and the Economic World*. Perseus Books Group, 1995.
- [ 7] A. Camurri. Progetto FP6-IST: HUMAN-MACHINE INTERACTION NETWORK ON EMOTION (HUMAINE). <http://icadc.cordis.lu>
- [ 8] H. Bergson. *L'evoluzione creatrice*. Raffaello Cortina Editore. 2002.
- [ 9] D. Parisi *Mente. I nuovi modelli della vita Artificiale*. Il Mulino. Saggi 1999.
- [ 10] V. Tagliasco. *Dizionario degli esseri umani fantastici e artificiali*. Mondadori. 1999.
- [ 11] G. Pioggia, A. Ahluwalia, F. Carpi, A. Marchetti, M. Ferro, W. Rocchia, D. De Rossi. *FACE: Facial Automaton for Conveying Emotions*. Applied Bionics and Biomechanics. Vol. 1(2). 2004.
- [ 12] G. Pioggia, R. Igliazzi, M. Ferro, A. Ahluwalia, F. Muratori, D. De Rossi. *An Android for Enhancing Social Skills and Emotion Recognition in Autistic patients*. IEEE Transaction on Neural System and Rehabilitation Engineering. Vol. 3 (4) 2005.
- [ 13] J. Nadel, A. Revel, P. Andry, P. Gaussier. *Towards communications: first imitation in infants, children with autism and robots*. Interaction Studies. Vol. 1, 45-75. 2004.
- [ 14] J. Von Uexküll. *Umwelt and Innenwelt der Tiere*. Berlin, 1921.
- [ 15] F. Varela, H. Maturana. *Autopoiesi e cognizione: la realizzazione del vivente*. Marsilio. 1985.
- [ 16] M. Ferro, G. Pioggia, D. De Rossi. *A Hierarchical Neural Network for Automatic Facial Expression Recognition*. Pattern Recognition Letters, inviato.

- [ 17] J. Kozlowski, G. Serra. *Complex phase tracing method for fringe pattern analysis*, Appl. Optics. Vol. 38, 2256-2262. 1999.
- [ 18] D. Li, D. Winfield, D. J. Parkhurst. *Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches*. Vision for Human-Computer Interaction Workshop, IEEE Computer Vision and Pattern Recognition conference. 2005.
- [ 19] F. Carpi, D. De Rossi, *Electroactive polymer-based devices for e-textiles in biomedicine*, IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed. Vol. 9, no. 3, 295–318. 2005.
- [ 20] M. Trulsson, R. S. Johansson. *Orofacial mechanoreceptors in humans: encoding characteristics and responses during natural orofacial behaviours*. Behavioural Brain Research. Vol. 135, 27-33. 2002.
- [ 21] J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, G. G. Berntson. *Handbook of Psychophysiology*. Second edition. Cambridge University Press 2000.
- [ 22] Y. Bar-Cohen. *Electroactive Polymer (EAP). Actuators as artificial muscles. Reality, Potential and Challenges*. Yoseph Bar-Cohen Editor. SPIE Press. 2001.
- [ 23] F. Carpi, A. Migliore, G. Serra, D. De Rossi. *Helical dielectric elastomer actuators*. Smart Materials and Structures. Vol.14, 1210-1216. 2005.
- [ 24] F. Lorussi, W. Rocchia, E. P. Scilingo, D. De Rossi. *Wearable, Redundant Fabric-Based Sensors Arrays for Reconstruction of Body segment Posture*. IEEE Sensors Journal. Vol 4, n.6. 2004.
- [ 25] G. Rizzolati, L. Fadiga, L. Fogassi, V. Gallese. *Resonance behaviors and mirror neurons*. Archives of Italian Biology. Vol. 137, 85-100. 1999.
- [ 26] R. L. Linas. *I of the vortex. From neurons to self*. MIT Press Cambridge. 2001.
- [ 27] A. Tognetti, F. Lorussi, R. Bartalesi, D. De Rossi. *Wearable kinesthetic system for capturing and classifying upper limb gesture in post stroke rehabilitation*. Journal of neuroengineering and rehabilitation. 2005.
- [ 28] G. Metta, G. Sandini, L. Natale, F. Panerai. *Development and Robotics*. In IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. 33-42. 2001.
- [ 29] S. Baron-Cohen. *Mindblindness. An Essay on Autism and Theory of Mind*. MIT Press Cambridge 1997.
- [ 30] Mind Reading. The interactive guide to emotions based on research by Cambridge University. Windows & Mac DVD-ROM/CD-ROM SET. University of Cambridge. Human Emotions. 2004.

- [ 31] R. Llinas et al. *Content and context in temporal thalamo-cortical binding*. In *Temporal Coding in the Brain* (Buzaki, G. et al., eds). 251–272. Springer-Verlag. 1994.
- [ 32] A. Damasio. *The feeling of what happens. Body, emotion and the making of consciousness*. Harvest Books. 2000.
- [ 33] G. Sandini, R. Manzotti, G. Metta, F. Panerai. *Development: is it the right way towards humanoid robotics?* Paper presented at the ISA-6. 2000.
- [ 34] Numerico Teresa, *Alan Turing e l'intelligenza delle macchine*. Franco Angeli, Milano. 2005.
- [ 35] J. R. Searle. *The mystery of consciousness*. New York Review Book. 1997.
- [ 36] D. C. Dennett. *La mente e le menti*. Rizzoli. 2000.
- [ 37] L. Berthouze, H. Kozima, C. G. Prince, G. Sandini, G. Stojanov, G. Metta, C. Balkenius. *Modeling Cognitive Development in Robotic System*. Proceeding of the Fourth International Workshop on Epigenetic Robotics. Lund University Cognitive Studies. Vol. 117. 2004.
- [ 38] R. D. Fields. *In the middle of the brain*. Scientific American, 2004.
- [ 39] G. Carmignoto, M. Zonta. *Calcium oscillations encoding neuron-to-astrocyte communication*. Journal of Physiology. 2002.
- [ 40] S. Nadkarni, P. Jung. *Dressed neurons: modeling neural-glia interactions*. Physical Biology. Vol. 1. 2004.
- [ 41] M. Wilkins, J. Sneyd. *Intercellular spiral waves of calcium*. J. Theor. Biol 191, 1997.
- [ 42] M. Wilkins, J. Sneyd. *Calcium waves and oscillations driven by an intercellular gradient of inositol (1,4,5)-triphosphate*. Biophysical Chemistry Vol. 72. 1998.
- [ 43] M. Marhl, S. Schuster. *Modelling of simple and complex calcium oscillations*. Eur. J. Biochem. Vol. 269 (5), 1333-1355. 2002.
- [ 44] D. McFarland, T. Bossert. *Intelligent Behavior in Animals and Robots*. Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books 1993.
- [ 45] R. Manzotti, G. Metta, G. Sandini. *Emotions and learning in a developing robot*. Proceeding of emotions, Qualia and Consciousness. 1998.
- [ 46] A. Clark. *Being there: Putting Brain, Body, and World Together Again*. MIT Press Cambridge. 1997
- [ 47] M. Nedergaard, B. Ransom, S. A. Goldman. *New roles for astrocytes: Redefining the functional architecture of the brain*. TN 38152, USA. Journal of Integrative Neuroscience, Vol. 2, No. 1. 2003.

- [ 48] R. L. Beurle. *Properties of a mass of cells capable of regenerating pulses*. Radar Research establishment. Graet Malvern. Vol. 240. B. 669. Published 23 August 1956.
- [ 49] R. J. Field, W. C. Troy. *The Existence of Solitary Traveling Wave Solutions of a Model of the Belousov-Zhabotinskii Reaction*. SIAM Journal on Applied Mathematics. Vol. 37. No. 3. 561-587. Dec. 1979.
- [ 50] G. M. Edelman (1987). *Neural Darwinism. The Theory of Neuronal Group Selection*. New York, Basic Books.
- [ 51] R. J. Field, M. Burger. *Oscillations and Traveling Waves in Chemical Systems*. A Wiley Interscience publication, John Wiley&Sons, 1995.
- [ 52] R. Segev, E. Ben-Jacob. *Generic modeling of chemiotactic based self-wiring of neural networks*. Neural Networks Vol. 13, 185-199. 2000
- [ 53] R. Segev, E. Ben-Jacob. *Chemical waves and internal energy during cooperative self-wiring of neural nets*. Neurocomputing Vol. 38-40, 875-879. 2001
- [ 54] S. Ronen, E. Ben-Jacob. *From Neurons to Brain: Adaptive Self-Wiring of Neurons*. Journal of Complex Systems Vol. 1(1). 1998.
- [ 55] R. Segev, E. Ben-Jacob et al. *Observations on modeling of synchronized bursting in two-dimensional neural networks*. Physical Review, E 64. 2001.
- [ 56] R. Segev. *Formation of Electrically Active Clusterized Neural Networks*. Physical Review letters. Vol. 90, No. 16. 25 April 2003.
- [ 57] R. O'Reilly, Y. Munakata. *Computational Explorations in Cognitive Neuroscience: Understanding the Mind by Simulating the Brain*. MIT Press. Cambridge 2000.
- [ 58] R. O'Reilly, K.A. Norman. *Modeling Hippocampal and Neocortical Contributions to Recognition Memory: A Complementary Learning Systems Approach*. Psychological Review. Vol 110. 611-646. 2003.
- [ 59] D.O. Hebb. *L'organizzazione del comportamento*. Franco Angeli Editore. 1975.
- [ 60] A. Damasio *Emotion in the perspective of an integrated nervous system*. Brain Research Reviews Vol. 26, 83-86. 1998
- [ 61] W. J Freeman. *Come pensa il cervello*. Einaudi, Milano. 2000.
- [ 62] W.J. Freeman. *Neurodynamics: An Exploration in Mesoscopic Brain Dynamics*. Springer-Verlag, Berlin. 2000.
- [ 63] W.J. Freeman. *Mesoscopic neurodynamics: from neuron to brain*. J.Physiol. Vol. 94, 303-322. 2000.

- [ 64] R. Kozma, W.J. Freeman *Basic principles of the KIV model and its application to the navigation problem*. Journal of Integrative Neuroscience Vol. 2 (1), 125-145. 2003.
- [ 65] S. Johnson. *La nuova scienza dei sistemi emergenti. Dalle colonie di insetti al cervello umano, dalle città ai videogame e all'economia, dai movimenti di protesta ai network*. Garzanti, 2004.
- [ 66] V. Tagliasco e R. Manzotti. *Coscienza e Realtà. Una teoria della coscienza per costruttori e studiosi di menti e cervelli*. Bologna, Il Mulino. 2001.
- [ 67] R. Manzotti e V. Tagliasco. *Si può parlare di coscienza artificiale?* Sistemi Intelligenti XIV (1), 89-108. 2002.