

2007 Istituto di Filosofia Arturo Massolo
Università di Urbino
Isonomia



La coscienza e l'organizzazione funzionale dei sistemi fisici

Nicola Toro

nicola.toro78@gmail.com

Abstract

In the first part of the article is Chalmers 's consciousness theory and the applications in the field of artificial intelligence are shown. He proposes that physical systems which share the same functional organization have the same conscious experience (principle of organizational invariance). Starting from this principle Chalmers defends the thesis of strong artificial intelligence: the execution of some algorithms by a physical system generates conscious experiences. In the second part the reasons for which the thesis of Chalmers cannot be true and therefore also the implications in the field of artificial intelligence are shown. The definition of functional organization coincides with the modelling inputs-states-outputs (ISO) of the physical systems which is used in the field of automatic controls. Analyzing some properties of ISO systems we can see how a system can be represented by a lot of models, so there are more functional organizations (considering Chalmers 's definition) which describe the same system. According to the principle of organizational invariance a system will cause a multiplicity of conscious experiences, but this looks absurd.

1. Introduzione

Le teorie funzionaliste della coscienza sostengono la tesi che i fenomeni di natura cosciente sono generati in qualche modo dall'organizzazione di un sistema fisico. Non è importante di che materiale è fatto il sistema, ciò che conta è solamente il modo in cui funziona, il modo in cui gli elementi costituenti il sistema interagiscono tra loro. Queste interazioni sono regolate da equazioni che determinano il comportamento del sistema in

funzione degli stimoli esterni (ingressi) e in funzione dello stato interno del sistema stesso.

La coscienza degli uomini scaturisce quindi dal tipo di organizzazione funzionale del cervello, cioè non dipende dal materiale di cui è fatto il cervello, ma solo dalle interazioni che vi sono tra i suoi elementi che a livello più basso sono i neuroni. Il funzionamento del cervello può essere riprodotto da altri sistemi che non sono composti da materiale organico e che non possono quindi essere classificati come biologici. Questi sistemi possono essere costituiti da elementi a semiconduttori come chip e transistor oppure da elementi elettromeccanici. I sistemi che riproducono il funzionamento del cervello hanno una coscienza nonostante siano fatti di materiali diversi? Secondo le teorie funzionaliste questo è possibile.

I funzionalisti sostengono che il cervello può essere considerato come una grande macchina che esegue algoritmi, quindi se si riesce a costruire un'altra macchina, fatta ad esempio di tanti chip collegati tra loro come lo possono essere i neuroni cerebrali, e se si fa eseguire a questo sistema gli stessi tipi di algoritmi che esegue il cervello, allora questa macchina avrà lo stesso tipo di esperienze coscienti di una mente umana. La visione funzionalista della coscienza è alla base della teoria dell'intelligenza artificiale forte, il cui obiettivo è quello di costruire in un prossimo futuro dei computer che possano agire come gli uomini imitando il funzionamento del cervello. I teorici dell'IA forte non si limitano a dire che sarà possibile costruire delle macchine che eguaglieranno gli uomini dal punto di vista comportamentale, ma sostengono anche che queste macchine avranno lo stesso tipo di esperienze coscienti degli esseri umani. Questa tesi però ha avuto numerose obiezioni soprattutto per il fatto che sembra assurdo che l'esecuzione di un semplice algoritmo possa far scaturire un'esperienza cosciente.

Secondo il funzionalismo la coscienza è dovuta all'organizzazione di un sistema perciò è di fondamentale importanza la definizione del concetto di organizzazione perché, se questa nozione non viene individuata con certezza e in modo rigoroso, è facile cadere in ambiguità e la teoria non può affrontare una prova che ne stabilisca con sicurezza la veridicità o la falsità. Che cosa si intende per organizzazione di un sistema? L'organizzazione viene definita quando si divide il sistema in un certo numero di

componenti e si trovano le relazioni causali tra questi componenti ossia il modo in cui interagiscono tra loro. Due sistemi apparentemente diversi perché costituiti da materiali diversi, quali possono essere un sistema elettrico e uno biologico, potrebbero condividere la stessa organizzazione. Questo avviene quando le relazioni causali che regolano i rapporti tra le componenti dei due sistemi sono le stesse.

La tesi funzionalista afferma che se due sistemi sono organizzati allo stesso modo devono condividere la stessa esperienza cosciente. Ma per verificare se due sistemi *A* e *B* sono organizzati allo stesso modo è necessaria una definizione di organizzazione funzionale in modo che si possa stabilire se davvero i due sistemi stanno funzionando nella stessa maniera. Una volta data questa definizione si potrà dire che se *f* è l'organizzazione di *A*, e se *B* ha anch'esso un'organizzazione *f*, i due sistemi sono isomorfo-funzionali e per questo danno origine alla stessa esperienza cosciente.

Questa concezione sta alla base della tesi dell'intelligenza artificiale forte. L'idea è che la coscienza ha origine quando un sistema esegue particolari algoritmi, ossia quando sta portando a termine delle computazioni. Ma quando si può dire che un sistema fisico sta eseguendo una computazione? E viceversa quando si può dire che una computazione descrive l'organizzazione di un sistema? Solitamente l'attenzione dei sostenitori dell'IA forte viene concentrata sul concetto di algoritmo. Si dice che la coscienza scaturisce quando un sistema esegue algoritmi, ma non è specificato con chiarezza quando si può dire che un dato sistema fisico sta eseguendo un particolare algoritmo. Chalmers focalizza l'attenzione proprio sulla nozione di implementazione e stabilisce una serie di regole rigide con lo scopo di mettere un ponte tra la teoria dei sistemi fisici e la teoria della computazione in modo da poter dire con certezza quando un sistema fisico esegue una computazione e quando una computazione descrive la struttura causale di un sistema fisico. Per fare questo però, è necessario definire cosa si intende per struttura causale di un sistema fisico, ossia serve una definizione di organizzazione funzionale.

Nel paragrafo 2 di questo articolo viene brevemente illustrata la definizione di organizzazione funzionale data da Chalmers e il legame tra questa e l'esperienza cosciente. Nel paragrafo 3 verrà data una definizione di automa a stati combinatori, si discuterà del legame tra la sua struttura formale e la struttura causale di un sistema fisico e dell'implementazione di computazioni da parte dei sistemi fisici. Nel paragrafo

4 viene descritto il formalismo che si utilizza per i sistemi ISU e si illustrano i legami tra questi e l'organizzazione funzionale di Chalmers. Nel paragrafo 5 viene mostrato come la descrizione di un sistema secondo il formalismo ISU cambi a seconda della scelta delle variabili di stato e come quindi un sistema può essere descritto da più organizzazioni funzionali. Nel paragrafo 6 viene mostrato l'esempio di un sistema elettrico il cui modello cambia a seconda delle variabili di stato che si scelgono per descriverlo.

2. L'organizzazione funzionale e il principio di invarianza organizzativa

L'organizzazione funzionale di un sistema fisico rappresenta in modo formale tutte le interazioni che ci sono tra le componenti del sistema. L'organizzazione funzionale è una sorta di modello matematico che mostra tutte le relazioni causa-effetto esistenti tra le componenti di un sistema, pertanto ne descrive in qualche modo la struttura causale. Un sistema fisico è composto da un certo numero di componenti e in generale ognuno di questi può assumere un certo numero di stati. Ad esempio prendiamo il sistema costituito da un tavolo e da un libro che vi è poggiato sopra: possiamo considerare la posizione del libro sul tavolo come lo stato del sistema. Il sistema tavolo-libro può quindi trovarsi in un certo numero di stati determinati dalle coordinate del libro sul piano del tavolo.

Lo stato nel quale un elemento del sistema si trova in un dato momento è dovuto alle interazioni che questo componente ha con gli altri elementi. In generale possiamo individuare tre tipi di influenze che determinano lo stato di un componente:

- influenze degli ingressi del sistema. Gli ingressi di un sistema incidono su tutte le componenti. Ad esempio consideriamo un'automobile. Lo stato di tutti i suoi elementi è influenzato dall'azione dell'uomo che dà gli input necessari alla guida. Per l'automobile i comandi dell'uomo sono un ingresso;
- influenze delle altre componenti del sistema. Ogni elemento è legato a tutte le altre parti del sistema attraverso delle leggi, pertanto ne subirà l'influenza. Il motore è un componente dell'automobile e il suo stato dipende dall'azione che gli altri elementi

esercitano su di esso. Uno di questi potrebbe essere la pompa della benzina che inietta carburante nel motore per la combustione e ne determina quindi lo stato;

- auto-influenza del componente su se stesso. Lo stato di un elemento è dovuto anche alla sua stessa azione. Ad esempio la temperatura è una variabile di stato per il motore, ma questo attraverso la combustione ne determina l'aumento pertanto modifica il suo stesso stato.

Ogni sistema è meccanicistico, pertanto ci sono delle regole che determinano l'evoluzione dello stato delle varie componenti di un sistema e quindi dello stato complessivo del sistema stesso. Queste regole o leggi legano tutti gli elementi di un sistema tra di loro, stabilendo anche in quale misura questi vengono influenzati dagli ingressi e in quale misura si auto-influenzano. L'organizzazione funzionale di un sistema è una rappresentazione complessiva di queste leggi che regolano le reciproche interazioni delle componenti e che decidono quindi i passaggi di stato.

Chalmers concentra la sua attenzione sulla definizione formale di organizzazione funzionale (cfr. Chalmers 1996c, p. 247). Secondo Chalmers l'organizzazione funzionale viene definita quando di un sistema fisico si specificano:

- un certo numero di componenti astratti che costituiscono gli elementi del sistema;
- per ognuno di questi componenti, un certo numero di possibili stati distinti che il componente può assumere;
- un sistema di relazioni di dipendenza che stabiliscano come lo stato di ciascun componente in un dato istante dipenda dai valori dello stato di tutti i componenti nell'istante precedente nonché dagli ingressi del sistema. Queste relazioni costituiscono la struttura causale del sistema.

Per determinare l'organizzazione funzionale di un sistema occorre quindi dividerlo in tante parti. Ognuna di queste parti può trovarsi in un certo numero di stati. L'insieme degli stati nei quali si trovano le parti in un particolare momento danno lo stato complessivo del sistema. Infine bisogna trovare un insieme di leggi che regolano i rapporti tra queste parti, in modo che si possa determinare che, se il sistema si trova

nello stato S_1 in un particolare istante, si troverà nello stato S_2 nell'istante successivo. In questa definizione di organizzazione funzionale non viene specificato di che materiale è costituito il sistema, quindi la stessa organizzazione funzionale può essere realizzata con sostrati fisici diversi; può essere realizzata mediante una simulazione al computer, con uno congegno elettromeccanico o con elementi organici e biologici. Se è possibile creare un'analogia tra gli elementi che costituiscono due sistemi in modo che nello stesso istante si trovino in stati corrispondenti questi sistemi condividono l'organizzazione funzionale e sono quindi definiti isomorfo-funzionali.

Ad esempio consideriamo un sistema con tre elementi e un ingresso. La rappresentazione della sua organizzazione funzionale è mostrata in figura 1. Non è specificato che cosa siano le tre componenti, né di che tipo di sistema si tratti. Ogni componente può assumere un certo numero di stati, i quali sono rappresentati da una barra colorata al lato di ciascun elemento con un segno che ne indica lo stato in un generico istante. Ogni componente influenza gli altri e ne è a sua volta influenzato; inoltre ogni componente è influenzato dall'ingresso del sistema. Le leggi che regolano le relazioni tra gli elementi sono rappresentate dalle R_{ij} . Ad esempio l'influenza della componente 1 sulla componente 2 è regolata dalla legge R_{12} , mentre quella della componente 2 sulla componente 1 è regolata dalla legge R_{21} . Ogni componente si può anche auto-influenzare e questo aspetto è regolato dalla legge R_{11} . La divisione del sistema in queste componenti e l'insieme delle relazioni causali tra le componenti rappresentate dalle R_{ij} costituiscono l'organizzazione funzionale del sistema. La natura delle componenti del sistema non è stata specificata, quindi non è importante per stabilire la sua organizzazione funzionale. Ciò che conta sono solo gli stati che possono assumere le componenti e le relazioni tra loro, perciò tutti i sistemi che condividono le stesse R_{ij} e i cui stati degli elementi possono essere messi in corrispondenza tra loro condividono la stessa organizzazione funzionale e sono pertanto isomorfi funzionali. Nel sistema in questione per specificare la sua organizzazione funzionale non è importante stabilire che cosa sia la componente 1 o qual è la sua natura, ma ciò che conta sono solo i possibili stati che può assumere e le R_{ij} che lo legano alle altre componenti.

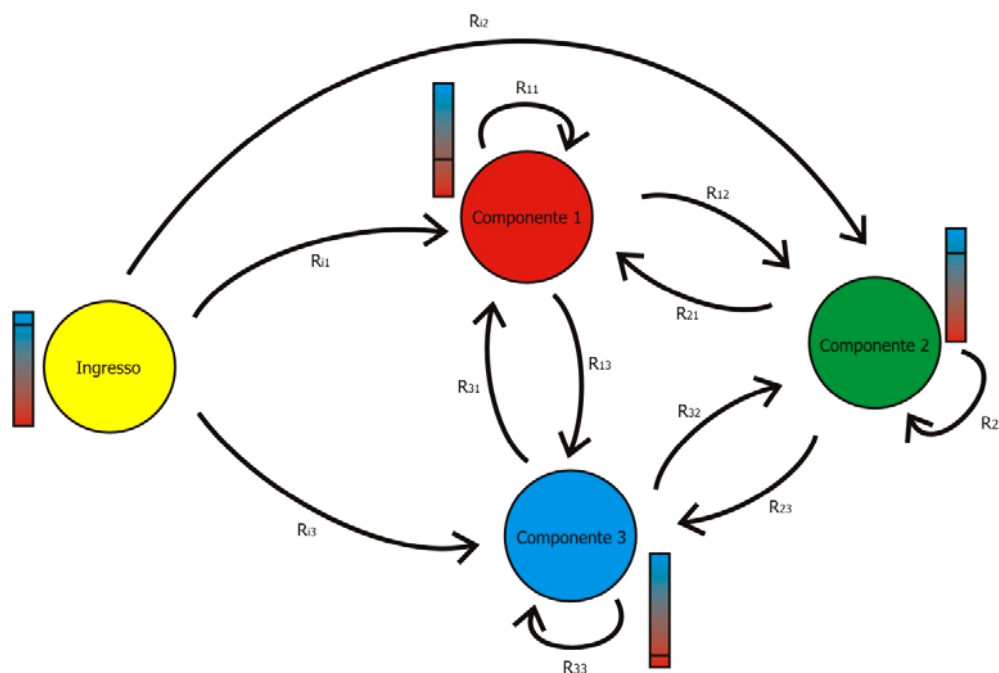


Figura 1: rappresentazione dell'organizzazione funzionale di un sistema con tre componenti e un ingresso. Lo stato di un elemento può assumere un certo numero di valori. Tutti gli elementi si influenzano tra loro e queste relazioni sono rappresentate dalle leggi R_{ij} .

Stabilito che cosa è un'organizzazione funzionale attraverso questa definizione formale, possiamo analizzare la teoria della coscienza di Chalmers. La sua proposta è che gli eventi coscienti e quindi tutte le possibili esperienze fenomeniche siano legate all'organizzazione funzionale di un sistema. La coscienza scaturisce dal modo di funzionamento di un sistema, non dipende assolutamente dai componenti o dal tipo di sistema. Quindi dei sistemi molto diversi quali possono essere un computer, un sistema biologico, oppure meccanico o idraulico potrebbero tutti generare un qualche ente cosciente la cui esperienza deriva esclusivamente dall'organizzazione del sistema. In particolare Chalmers propone un principio di invarianza organizzativa. Secondo questo principio a ogni particolare organizzazione funzionale sono associate delle esperienze coscienti pertanto sistemi che condividono la stessa organizzazione funzionale condivideranno anche le stesse esperienze coscienti (cfr. Chalmers, 1996c, pp. 248-9). Prendiamo due sistemi molto diversi tra loro, uno biologico e uno elettronico, ad esempio un cervello e un computer. Se questi due sistemi condividono la stessa organizzazione funzionale ossia se le leggi che regolano le relazioni tra i loro componenti interni sono le stesse, siano essi chip di silicio o neuroni, allora questi

sistemi possono avere esperienze coscienti qualitativamente identiche. Non ha importanza il fatto che un cervello e un computer siano fatti di materiali completamente diversi, se condividono l'organizzazione funzionale allora possono avere le medesime esperienze fenomeniche. Chalmers afferma:

Dato un sistema dotato di esperienza cosciente, qualsiasi sistema avente la stessa organizzazione funzionale a grana fine avrà esperienze qualitativamente identiche. Secondo il principio di invarianza funzionale la coscienza è un invariante organizzativo, una proprietà che resta costante in tutti gli isomorfi funzionali di un sistema dato. Chalmers (1996c, pp 249).

In particolare quando si può dire che questi due sistemi stanno generando la stessa esperienza? Poiché sono isomorfo-funzionali allora è possibile, per ogni stato del sistema cervello, trovare il corrispettivo stato del sistema computer. Quando i due sistemi si troveranno nel medesimo stato allora le due esperienze coscienti saranno qualitativamente identiche.

3. L'implementazione di computazioni dei sistemi fisici

Attraverso la formulazione del principio di invarianza organizzativa Chalmers sostiene la tesi dell'intelligenza artificiale: la coscienza è generata dal fatto che un sistema fisico sta implementando una computazione. Secondo la teoria dell'IA possiamo vedere il problema mente-corpo, o meglio il problema mente-cervello, nei termini del problema hardware-software di un computer. Il cervello è la parte hardware all'interno del quale gira un programma, un particolare algoritmo che ne costituisce il software. Questo algoritmo, questo software non è altro che la mente, ossia la coscienza. Il cervello quindi non sarebbe altro che una macchina che esegue un calcolo molto complicato. Ma un programma può essere implementato da più di una macchina, inoltre questa macchina può essere di qualsiasi tipo, può essere un computer, ma anche un sistema meccanico, oppure biologico. Ci sono più sistemi che possono implementare il medesimo algoritmo. Secondo l'IA forte tutti i sistemi che implementano la stessa computazione condividono la stessa esperienza cosciente. Come dice Chalmers due sistemi implementano la stessa computazione solo se condividono la stessa

organizzazione funzionale, pertanto il principio di invarianza organizzativa e la tesi dell'IA forte coincidono.

La computazione però ha a che fare con oggetti astratti, mentre i sistemi fisici sono sistemi concreti, quindi bisogna trovare un modo per collegare oggetti astratti con oggetti concreti. Il software infatti è un qualcosa di astratto che manipola simboli, mentre un sistema fisico è fatto di elementi concreti che subiscono un'evoluzione temporale. Chalmers sostiene che ci deve essere qualcosa che colleghi sistemi e gli elementi astratti di una computazione con gli oggetti concreti di un sistema fisico. Questo collegamento è stabilito mediante la nozione di implementazione che è definita come la relazione che sussiste tra un sistema fisico e una computazione quando il sistema fisico sta eseguendo quella computazione o viceversa quando quella computazione descrive il sistema fisico. Qui però sorge un problema: quando possiamo dire che un sistema fisico sta implementando una computazione? Per un computer è facile capire che algoritmo sta eseguendo la macchina perché siamo stati proprio noi a scrivere il software, ma per un sistema fisico le cose sono più complicate. Secondo Chalmers perché un sistema fisico implementi una computazione occorre che la struttura causale del sistema rifletta la struttura formale della computazione. La struttura causale di un sistema fisico è il complesso di leggi che regolano le interazioni tra le varie parti di un sistema, mentre la struttura formale di una computazione è data dalle regole che governano la manipolazione degli oggetti astratti propri della computazione. Quindi occorre trovare una classe di computazioni tali che le sue regole interne possano essere associate facilmente alle leggi che governano le interazioni tra le componenti di un sistema fisico.

Ci sono varie classi di computazioni che corrispondono a vari formalismi computazionali. C'è quello delle macchine di Turing, quello degli automi a stati finiti, quello degli automi cellulari ecc. Il tipo di computazione più adatto per essere associato ai sistemi fisici è quello degli automi a stati combinatori (ASC), per i quali è molto facile trovare una corrispondenza con l'organizzazione (secondo la definizione prima esposta) di un sistema fisico.

Un ASC (figura 2) è una struttura formale caratterizzata da un vettore degli ingressi, un vettore di stato e un vettore delle uscite. Il vettore di stato rappresenta lo stato interno del sistema ed è composto da un certo numero di elementi che possono essere intesi

come sottostati dello stato complessivo. Il vettore di stato può essere scritto come: $[X_1, \dots, X_n]$. Ogni elemento X_i è un sottostato e può assumere un certo numero di valori. Il vettore degli ingressi, $[I_1, \dots, I_p]$, e quello delle uscite, $[O_1, \dots, O_r]$, sono composti da tanti elementi quanti sono rispettivamente gli ingressi e le uscite dell'ASC.

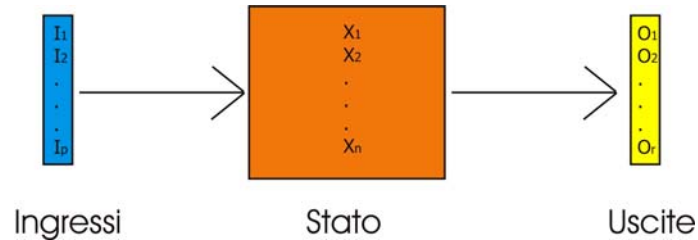


Figura 2: rappresentazione schematica di un ASC. Un ASC è definito dal suo vettore di stato, dal vettore degli ingressi e da quello delle uscite.

La struttura di un ASC è definita da una serie di leggi di transizione di stato che regolano l'evoluzione degli elementi del vettore di stato istante per istante. Il valore di un elemento in un particolare istante $n+1$ è determinato dalla legge di transizione dello stato in base al valore che assumono, nell'istante precedente n , tutti gli elementi dello stato e tutti gli elementi del vettore degli ingressi. Ad esempio consideriamo un ASC con un vettore di stato di tre elementi, un vettore degli ingressi con un elemento e un vettore delle uscite anch'esso con un elemento. Nell'istante n il vettore di stato è $[1, 5, 2]$, quello degli ingressi è $[3]$ e quello delle uscite è $[4]$. Nell'istante $n+1$ lo stato diventa $[0, 7, 4]$. Questo vuol dire che c'è una legge che stabilisce che quando lo stato è $[1, 5, 2]$ e l'ingresso è $[3]$ lo stato nell'istante dopo è $[0, 7, 4]$ (figura 3).

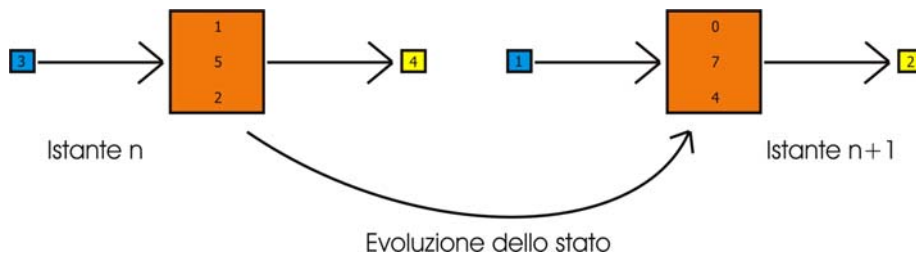


Figura 3: evoluzione dello stato di un ASC. Lo stato in un determinato istante è dovuto alle leggi di transizione dello stato che stabiliscono il valore del nuovo stato in base al valore dello stato e dell'ingresso nell'istante precedente.

Le computazioni come quelle degli ASC sono oggetti astratti con una struttura formale determinata dal suo stato interno e dalle relazioni di transizione di stato, mentre un

sistema fisico è un oggetto concreto con una struttura causale determinata dal suo stato interno e dalle relazioni causali tra gli stati. Secondo Chalmers c'è un'analogia tra un sistema fisico descritto mediante un'organizzazione funzionale e una computazione come un ASC descritto mediante le leggi di transizione di stato. Infatti l'ASC è caratterizzato da stati il cui valore cambia seguendo le leggi dettate dal software, mentre il sistema fisico è caratterizzato dagli stati delle componenti che variano seguendo le leggi descritte dall'organizzazione funzionale. Quindi un sistema fisico può essere descritto mediante un ASC corrispondente e allo stesso tempo si può dire quel sistema fisico implementa quel particolare ASC. Ad esempio immaginiamo di scrivere un software per simulare la caduta di un grave attratto dalla forza gravitazionale terrestre. Si può dire che il software è la descrizione formale del sistema fisico formato dal corpo che precipita al suolo e dalla Terra, e allo stesso tempo il sistema grave-Terra è un'implementazione di quel software.

Da ciò si conclude che un sistema fisico implementa una computazione quando la struttura causale del sistema rispecchia la struttura formale della computazione. Un sistema fisico implementa una computazione se c'è un modo per mettere in corrispondenza gli stati del sistema con gli stati della computazione tali che gli stati fisici connessi causalmente corrispondano agli stati formali connessi dalle leggi di transizione dello stato viste prima. Detto in maniera formale il modo per implementare un ASC secondo Chalmers è:

un sistema fisico P implementa un ASC M se c'è una scomposizione degli stati interni di P in componenti $[s_1, \dots, s_i]$ e un'applicazione f dei sottostati s_i di P sui sottostati corrispondenti S_i di M , assieme ad analoghe scomposizioni e applicazioni per gli ingressi e per le uscite tali che, per ogni regola di transizione di stato $([I_1, \dots, I_p], [S_1, \dots, S_n] \rightarrow [S'_1, \dots, S'_n], [O_1, \dots, O_r])$ di M , se P è uno stato interno $[s_1, \dots, s_n]$ e riceve l'ingresso $[i_1, \dots, i_p]$ corrispondenti rispettivamente allo stato formale $[S_1, \dots, S_n]$ e all'ingresso $[I_1, \dots, I_p]$, ciò fa sì che esso entri in uno stato interno $[s'_1, \dots, s'_n]$ e produca un'uscita $[o_1, \dots, o_r]$ corrispondenti rispettivamente a $[S'_1, \dots, S'_n]$ e $[O_1, \dots, O_r]$. Chalmers (1996a).

Per maggior chiarezza occorre specificare cosa si intende quando si dice che lo stato $[s'_1, \dots, s'_n]$ deve corrispondere allo stato $[S'_1, \dots, S'_n]$. Questo non viene specificato da Chalmers, ma estrapolando la definizione di implementazione di un automa a stati finiti (ASF) data in [1] si deduce che, se f è l'applicazione dei sottostati s_i di P sui sottostati corrispondenti S_i di M , allora si deve avere che $f(s_i) = S_i$. Lo stesso vale per gli ingressi e

le uscite. Ogni singolo ingresso e ogni singola uscita del sistema fisico P deve essere messo in relazione con il corrispettivo ingresso e la corrispettiva uscita dell'ASC M mediante la funzione f (figura 4).

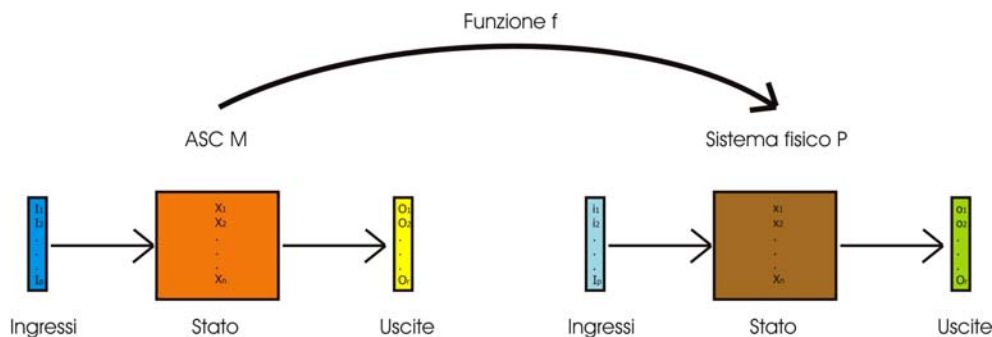


Figura 4: un sistema fisico P è legato a un'ASC M da un'applicazione f . Perché l'ASC sia una rappresentazione formale della struttura causale del sistema e viceversa perché il sistema implementi l'ASC si deve avere $f(s_i)=S_i$, $f(i_i)=I_i$, $f(o_i)=O_i$.

Il sistema fisico P è quindi legato all'ASC M dall'applicazione f . Questo legame può essere visto da due punti di vista. Il primo è che il sistema fisico P implementa l'ASC M , mentre il secondo è che l'ASC M è una descrizione formale del funzionamento del sistema fisico P . Il sistema fisico P però non è il solo a implementare l'ASC M , infatti ne possono esistere molti altri che eseguono la stessa implementazione e che sono legati a M mediante un'applicazione diversa da f . Ad esempio ci può essere un sistema fisico Q legato a M da un'applicazione g e un sistema fisico R legato a M da un'ulteriore applicazione h (figura 5). I sistemi P , Q ed R implementano tutti e tre l'ASC M , quindi vuol dire che la struttura formale di quest'ultimo rispecchia la struttura causale dei tre sistemi fisici. In altre parole l'ASC M può essere visto come una descrizione dell'organizzazione funzionale dei tre sistemi fisici e da ciò se ne deduce che P , Q ed R condividono la stessa organizzazione funzionale e sono pertanto tre sistemi isomorfi funzionali. Magari sono sistemi di natura molto diversa, ad esempio P è un sistema biologico, Q è un sistema idraulico e R un sistema elettronico, quindi la funzione f può essere vista come l'applicazione di M a un sistema biologico, la funzione g come l'applicazione a un sistema idraulico e la h come l'applicazione a un sistema elettronico. Tutti e tre i sistemi stanno però implementando lo stesso ASC, quindi la loro struttura causale è la stessa, cambiano solo gli elementi che eseguono l'implementazione. Questa conseguenza non è altro che la realizzabilità multipla. Un'organizzazione funzionale

può essere realizzata da sistemi fisici di varia natura. Allo stesso modo un software come un ASC può essere implementato da sistemi fisici diversi, quali possono essere un tessuto biologico, un circuito elettrico o un'insieme di chip di silicio. La cosa importante è che la struttura formale dell'ASC rifletta la struttura causale del sistema fisico.

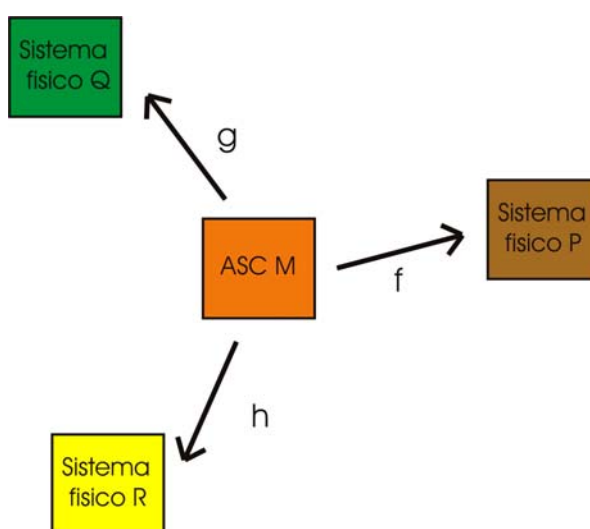


Figura 5: un ASC M può essere implementato da più sistemi fisici di natura diversa. Ogni sistema fisico è legato all'ASC da un'applicazione diversa.

I sistemi P , Q ed R sono degli isomorfo-funzionali. Secondo il principio di invarianza organizzativa esposto prima tutti i sistemi isomorfo-funzionali generano le stesse esperienze coscienti. Secondo questo principio infatti la coscienza dipende dall'organizzazione funzionale di un sistema, perciò tutti i sistemi isomorfo-funzionali causano il medesimo fenomeno cosciente e anche P , Q ed R obbediranno a questa regola. Da ciò si deduce che poiché l'ASC M è una descrizione dell'organizzazione funzionale dei tre sistemi P , Q ed R , tutti i sistemi che implementano M sono isomorfi funzionali di P , Q ed R e avranno esperienze coscienti qualitativamente identiche a quelle generate dai tre sistemi. Chalmers afferma:

Dato un sistema conscio M la sua organizzazione funzionale a grana fine può essere astrattamente modellizzata tramite un ASC M per cui ogni sistema che implementa M realizzerà la stessa organizzazione funzionale e avrà pertanto esperienze coscienti qualitativamente indistinguibili da quelle del sistema originario. Chalmers (1996c, p. 321).

In conclusione si può dire che se il principio di invarianza organizzativa è vero devono essere vere le seguenti conseguenze:

- a ogni ASC M sono associate delle particolari esperienze coscienti;
- ogni sistema fisico che implementa l'ASC M genera necessariamente le stesse esperienze coscienti associate a quell'ASC.

Estendendo il discorso a sistemi molto complessi, quale può essere un cervello umano, se il principio di invarianza organizzativa di Chalmers è vero, se ne deduce che:

- è possibile trovare un ASC la cui struttura formale corrisponde alla struttura causale di un cervello;
- ogni sistema fisico che implementa quell'ASC avrà esperienze coscienti qualitativamente uguali a quelle di una mente umana.

Questo è il sunto della teoria di Chalmers sulla coscienza. I sistemi fisici funzionano seguendo una determinata organizzazione funzionale ed è questa la responsabile dell'origine dei fenomeni coscienti. Sistemi di diversa natura possono condividere la stessa organizzazione funzionale perciò i sistemi la cui organizzazione è la stessa di un cervello umano avranno le stesse esperienze fenomeniche proprie di una mente umana. La teoria dell'intelligenza artificiale trova forza da questa concezione di Chalmers perché un'organizzazione funzionale può essere facilmente relazionata a delle computazioni quali gli ASC.

Una conseguenza del principio di invarianza organizzativa è la realizzabilità multipla: più sistemi possono condividere la medesima organizzazione funzionale e quindi avranno esperienze qualitativamente identiche. La realizzabilità multipla è un argomento che è stato usato spesso contro la teoria dell'intelligenza artificiale. Ad esempio Putnam sostiene che un qualsiasi sistema può essere considerato come un calcolatore: anche le pareti di casa o il processo digestivo possono essere considerate dei sistemi che eseguono un algoritmo, anche molto complicato, quale quello che, secondo i sostenitori dell'IA, esegue un cervello. Basterebbe infatti mettere in relazione gli stati delle componenti di questi sistemi con gli stati delle componenti del cervello. Per ovviare a queste critiche Chalmers concentra la sua attenzione sul concetto di

implementazione, in modo da porre dei limiti alle interpretazioni che vedono in un qualsiasi sistema un calcolatore che esegue algoritmi: non basta mettere in relazione gli stati di un sistema con gli stati di una computazione per dire che ci sia un'implementazione, ma è necessario anche che le leggi che regolano il passaggio di stato del sistema fisico riflettano le leggi che regolano il passaggio di stato della computazione (cfr. Chalmers 1996b). Quindi attraverso la definizione di organizzazione funzionale e di implementazione viene superato il problema della realizzabilità multipla. La realizzabilità multipla rimane sempre una conseguenza della teoria dell'IA, ma ora è molto più limitata e non porta a conseguenze assurde. Una computazione come un ASC può essere implementata solo da quei particolari sistemi la cui organizzazione funzionale riflette la struttura formale dell'ASC e non da qualsiasi sistema fisico. La critica che viene fatta all'IA è che se ogni sistema può essere visto come un'implementazione di un software come quello che fa girare il nostro cervello allora ogni sistema ha esperienze coscienti umane. Chalmers però dà una definizione più stringente di implementazione, e pertanto viene ristretto il campo dei possibili sistemi che possono implementare un software. Se il cervello implementa una particolare computazione, un muro non potrà mai fare altrettanto, perché la struttura causale del muro non riflette quella del cervello. In altre parole il muro e il cervello non hanno la stessa organizzazione funzionale.

Anche se la visione di Chalmers supera alcune delle critiche rivolte all'intelligenza artificiale, nei prossimi paragrafi vedremo che la sua teoria della coscienza non può essere vera. Infatti il principio di invarianza organizzativa porta a un paradosso, il quale non è determinato tanto dal principio in sé, quanto dalla definizione data da Chalmers di organizzazione funzionale. Poiché il principio poggia proprio sulla definizione di organizzazione funzionale, se questa non risulta essere corretta allora dal principio si giunge a una conclusione paradossale. La definizione di organizzazione di Chalmers non ha nulla di scorretto, ma gli viene attribuita una proprietà che non possiede, ossia quella di essere l'unica descrizione della struttura causale di un sistema fisico. Vedremo che non c'è una sola organizzazione funzionale possibile per descrivere un sistema, ma ce ne sono tantissime. Questo introduce un problema di più difficile soluzione rispetto a quello della realizzabilità multipla: l'implementazione multipla.

4. Modellistica dei sistemi ingressi-stato-uscite (ISU)

Per mostrare che la definizione di organizzazione funzionale data da Chalmers porta alla conseguenza che un sistema può essere descritto da più organizzazioni funzionali, analizzeremo il modello classico usato per rappresentare i sistemi fisici nei problemi di controllistica. Infatti questo modello è molto simile a quello che abbiamo visto essere un'organizzazione funzionale. In generale un sistema fisico ha un certo numero di ingressi e di uscite. Possiamo rappresentarlo come una scatola che riceve segnali dall'esterno e a sua volta ne manda altri all'ambiente. Tra i segnali di ingresso e quelli di uscita sussiste un legame che può essere espresso per mezzo di equazioni matematiche. In generale per descrivere un sistema di questo tipo occorre scrivere un sistema di equazioni differenziali tante quante sono le uscite. Solitamente però si preferisce fare ricorso a un insieme di variabili intermedie dette variabili di stato.

Le variabili di stato sono grandezze fisiche interne al sistema e questa modellizzazione risulta particolarmente comoda, perché è possibile eseguire il controllo del sistema agendo non tanto sull'uscita di interesse, che spesso è problematico, quanto sulle variabili di stato. Ad esempio per controllare la velocità di un'automobile non si agisce direttamente sulla velocità di rotazione delle ruote, ma si regola l'afflusso della benzina nel motore. Questo perché il controllo diretto sulla velocità delle ruote sarebbe di difficile realizzazione da parte dell'uomo. Un ciclista può invece attuare un controllo diretto sulla velocità della bicicletta perché la sua azione è esercitata direttamente sulle ruote. Un automobilista non può farlo, per questo è stato inventato l'acceleratore, il quale regola una variabile di stato, che in questo caso è il flusso di benzina.

Le variabili di stato sono grandezze di sistema e ve ne sono tantissime per ogni particolare sistema fisico. Per rappresentare un sistema non è necessario tener conto di tutte, ma solo di un numero limitato, ossia tante quanti sono gli elementi con memoria del sistema. Generalmente sono scelte a piacere in modo da rendere il calcolo e quindi le soluzioni dei problemi le più semplici possibili. Il vettore di stato è tale per cui la sua conoscenza è necessaria e sufficiente per determinare l'evoluzione libera del sistema. Detto in un altro modo nel vettore di stato ci sono le informazioni sulla storia passata del sistema fisico, quindi può essere considerato come la memoria del sistema. Il modello generale di un sistema ISU è:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} = \bar{F}[\bar{x}(t); \bar{u}(t)] \\ \bar{y}(t) = \bar{G}[\bar{x}(t)] \end{cases}$$

$$\bar{u}(t) = [\bar{u}_1(t), \bar{u}_2(t), \dots, \bar{u}_p(t)]$$

vettore degli ingressi (p = numero delle variabili di ingresso)

$$\bar{y}(t) = [\bar{y}_1(t), \bar{y}_2(t), \dots, \bar{y}_r(t)]$$

vettore delle uscite (r = numero delle variabili di uscita)

$$\bar{x}(t) = [\bar{x}_1(t), \bar{x}_2(t), \dots, \bar{x}_n(t)]$$

vettore di stato (n = numero delle variabili di stato)

La prima equazione è quella che regola l'evoluzione delle variabili di stato. Il vettore $\bar{x}(t)$ è il vettore di stato ed è formato dalle variabili di stato, mentre $\bar{u}(t)$ è il vettore degli ingressi formato dalle variabili di ingresso del sistema. La variazione dello stato è rappresentata dalla derivata del vettore di stato rispetto al tempo $\frac{d\bar{x}(t)}{dt}$ ed è determinata dalla funzione F le cui variabili sono il vettore di stato stesso e il vettore degli ingressi. La prima equazione dice quindi che la variazione delle variabili di stato è funzione del vettore di stato (ossia delle variabili di stato stesse) e del vettore degli ingressi, quindi l'andamento di una grandezza di stato è determinato dai valori che assumono nel tempo tutte le altre variabili di stato e tutti gli ingressi. La seconda equazione è quella che lega le uscite di interesse $\bar{y}(t)$ con le variabili di stato. La funzione che relaziona vettore di stato e vettore delle uscite è G .

In figura 6 è mostrato uno schema a blocchi di come funziona un generico sistema. Il blocco F riceve in ingresso il vettore di stato $\bar{x}(t)$ e quello degli ingressi $\bar{u}(t)$. Presi questi due vettori calcola la variazione dello stato $\frac{d\bar{x}(t)}{dt}$. Il blocco "integrazione" prende in ingresso la variazione dello stato $\frac{d\bar{x}(t)}{dt}$ e calcola il nuovo stato $\bar{x}(t)$ nell'istante successivo. Questo nuovo valore dello stato viene mandato nuovamente al

blocco F per il calcolo della nuova variazione dello stato e inoltre viene mandato al blocco G che calcola il valore delle uscite $\bar{y}(t)$.

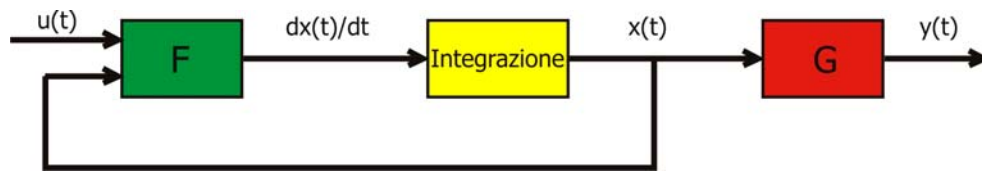


Figura 6: schema a blocchi di un generico sistema descritto secondo il metodo ISU. La variazione dello stato è dovuta allo stato stesso e agli ingressi elaborati dal blocco F . Attraverso l'operazione di integrazione si ottiene il nuovo stato. Questo viene poi elaborato dal blocco G per ottenere l'uscita di interesse.

La rappresentazione dei sistemi ISU si adatta molto bene alla definizione di organizzazione funzionale data da Chalmers, infatti:

- ogni variabile di stato rappresenta un componente astratto del sistema;
- di ciascuno di questi componenti è possibile specificare un certo numero di valori che le variabili possono assumere in modo da determinare i possibili stati del sistema. In un sistema fisico le grandezze sono per lo più continue, quindi i valori possibili per una variabile sono in generale infiniti, ma non è un problema ottenere un modello discreto del sistema in modo da far sì che ogni variabile possa assumere solo un numero finito di valori e rispettare così i criteri imposti da Chalmers per la definizione di organizzazione funzionale;
- la funzione F stabilisce quelle relazioni di interdipendenza tra gli elementi del sistema che fanno sì che il valore di una variabile di stato in un dato istante dipenda dai valori di tutte le altre variabili e dal valore degli ingressi nell'istante precedente.

Un sistema modellizzato secondo il metodo ISU può essere scritto in maniera molto compatta mediante l'uso di matrici. Ad esempio prendiamo un sistema S lineare; le equazioni scritte in forma matriciale sono:

$$S : \begin{cases} \frac{d\bar{x}}{dt} = A \cdot \bar{x} + B \cdot \bar{u} \\ \bar{y} = C \cdot \bar{x} \end{cases}$$

Le matrici che caratterizzano il sistema sono tre: A , B e C . Come detto precedentemente la prima equazione stabilisce la dipendenza dell'evoluzione dello stato dai valori assunti dallo stato stesso e dagli ingressi, quindi la variazione dello stato è dovuta a due contributi distinti. La matrice A rappresenta l'influenza del vettore di stato sulla variazione del vettore di stato stesso, mentre la matrice B rappresenta l'influenza degli ingressi. Lo stato di un sistema in un dato momento è sempre dovuto a due fattori. Il primo è lo stato del sistema nell'istante precedente, il secondo sono gli stimoli esterni, ossia gli ingressi. Ad esempio prendiamo una bicicletta e consideriamo la velocità come una variabile di stato. Nell'istante iniziale la velocità ha valore V_1 e trascorsi 10 secondi ha valore V_2 . Questo valore finale è dovuto in parte alla velocità iniziale della bicicletta, in parte all'energia che il ciclista ha trasmesso ai pedali per farla aumentare. Il primo contributo al valore finale della velocità è dato dallo stato iniziale V_1 , mentre il secondo è dato dall'energia del ciclista che può essere considerata come un ingresso del sistema. A e B rappresentano quindi il peso dei contributi di questi due distinti fattori.

Infine la matrice C rappresenta il legame che sussiste tra lo stato e le uscite. Questa matrice non è importante per la dinamica del sistema perché è relativa, cioè dipende da cosa interessa considerare come uscita. Ad esempio in un'automobile l'uscita di interesse per il guidatore è la velocità, mentre per un meccanico che controlla il motore le uscite sono molte di più, ad esempio i flussi nelle pompe o le variabili elettriche. A seconda delle uscite considerate la matrice C cambia, ma la dinamica del sistema rimane la stessa ed è rappresentata dalle matrici A e B .

Stabiliamo che S sia un sistema con tre variabili di stato, un ingresso e un'uscita. Possiamo scrivere le equazioni che regolano il sistema in forma matriciale, ma in una maniera meno compatta esplicitando le matrici:

$$S : \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \\ \frac{dx_3}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \cdot u \\ y = (c_1 \quad c_2 \quad c_3) \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \end{cases}$$

Le variabili di stato sono x_1 , x_2 e x_3 , l'ingresso è u e l'uscita è y . La matrice A ha tre righe e tre colonne, quindi in tutto è composta da nove elementi. Ogni elemento indica il contributo di una variabile di stato all'evoluzione di un'altra variabile di stato. Ad esempio l'elemento a_{11} indica l'influenza che ha la variabile x_1 all'evoluzione di x_1 ossia all'evoluzione di se stessa. L'elemento a_{12} indica l'influenza che ha la variabile x_2 all'evoluzione di x_1 e così via.

La matrice colonna B è formata da una colonna e tre righe. I suoi elementi indicano il contributo dell'ingresso all'evoluzione delle grandezze di stato. Per esempio b_1 indica il contributo dell'ingresso u all'evoluzione di x_1 .

La matrice riga C ha una riga e tre colonne e i suoi elementi indicano quanto le tre variabili di stato influiscono sull'uscita y .

Abbandonando la forma matriciale possiamo scrivere direttamente le equazioni che regolano l'evoluzione dello stato:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_3 + b_1 \cdot u \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + a_{23} \cdot x_3 + b_2 \cdot u \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot x_2 + a_{33} \cdot x_3 + b_3 \cdot u \\ y &= c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 \end{aligned}$$

Questo sistema di equazioni è molto simile al modello di organizzazione funzionale di Chalmers, però è ancora un sistema continuo. Per fare in modo che si adatti alla

definizione data in precedenza occorre discretizzarlo e per farlo bisogna dividere il tempo in intervalli. Le equazioni del sistema riscritte in forma discreta sono le seguenti:

$$x_1(n+1) = a_{11} \cdot x_1(n) + a_{12} \cdot x_2(n) + a_{13} \cdot x_3(n) + b_1 \cdot u(n)$$

$$x_2(n+1) = a_{21} \cdot x_1(n) + a_{22} \cdot x_2(n) + a_{23} \cdot x_3(n) + b_2 \cdot u(n)$$

$$x_3(n+1) = a_{31} \cdot x_1(n) + a_{32} \cdot x_2(n) + a_{33} \cdot x_3(n) + b_3 \cdot u(n)$$

$$y(n) = c_1 \cdot x_1(n) + c_2 \cdot x_2(n) + c_3 \cdot x_3(n)$$

In un sistema discreto il conteggio del tempo viene fatto dalla variabile n che conta gli istanti trascorsi. Il tempo è discretizzato ed è diviso in istanti di ampiezza T_c generica mentre n indica l'istante nel quale si trova il sistema. Le equazioni mostrano come il valore delle variabili di stato nell'istante $n+1$ dipenda dal valore di tutte le altre variabili nell'istante precedente n . Ad esempio la variabile x_1 nell'istante $n+1$ è data dai valori di tutte le variabili x_1, x_2, x_3 , nell'istante n opportunamente pesate per i coefficienti della matrice A corrispondenti a_{11}, a_{12}, a_{13} . È possibile riscrivere le equazioni discrete in forma compatta matriciale:

$$S : \begin{cases} \bar{x}(n+1) = A \cdot \bar{x}(n) + B \cdot \bar{u}(n) \\ \bar{y}(n) = C \cdot \bar{x}(n) \end{cases}$$

Così modellizzato il sistema rispecchia la definizione di organizzazione funzionale. È interessante notare come gli elementi della matrice A coincidono con le leggi di interazione mostrate nella rappresentazione dell'organizzazione funzionale del sistema di figura 1. Le a_{ij} coincidono con le R_{ij} che indicano le relazioni e le rispettive influenze tra componenti.

Poiché è facile passare da l'organizzazione funzionale di un sistema a un ASC è molto semplice associare un ASC a un sistema descritto secondo il modello ISU. L'ASC associato avrà una struttura formale che rispecchia la struttura causale del sistema fisico, quindi il vettore di stato avrà una correlazione con lo stato dell'ASC, l'ingresso e l'uscita del sistema saranno correlati rispettivamente con l'ingresso e l'uscita dell'ASC. Inoltre le leggi di transizione dello stato dell'ASC devono rispecchiare le equazioni di evoluzione dello stato del sistema fisico. Le leggi di

transizione derivano direttamente dalle equazioni del sistema, e poiché queste sono rappresentate dalle matrici A e B se ne deduce che la struttura formale di un ASC dipende da queste due matrici. Da tutto ciò ne deriva che:

- due sistemi fisici che implementano lo stesso ASC, se rappresentati secondo il modello ISU, sono caratterizzati dalle stesse matrici A e B ;
- due sistemi fisici che, rappresentati secondo il modello ISU, sono caratterizzati dalle stesse matrici A e B sono isomorfo-funzionali secondo la definizione di organizzazione funzionale data da Chalmers;
- se il principio di invarianza organizzativa è vero ne consegue che due sistemi fisici caratterizzati dalle stesse matrici A e B danno origine necessariamente alla stessa esperienza cosciente.

5. La rappresentabilità multipla dei sistemi fisici

Abbiamo visto come è possibile modellizzare un sistema fisico secondo lo schema ISU, come questo modello corrisponda alla definizione di organizzazione funzionale di Chalmers e come si possa facilmente associare un ASC a questo sistema. Affrontiamo ora uno dei problemi nei quali ci si imbatte quando si vuole utilizzare un modello di tipo ISU: la scelta delle variabili di stato. All'interno di un sistema ci sono tantissime grandezze fisiche di svariata natura. Possono essere meccaniche, elettriche, chimiche, termiche e così via. Anche un sistema molto semplice contiene al suo interno molte variabili. Fortunatamente per trovare il modello di un sistema non è necessario tener conto di tutte queste grandezze, perché molte sono legate tra loro, quindi basta considerarne solo tante quanti sono i gradi di libertà del sistema. Un grado di libertà può essere visto come una possibile direzione nella quale il sistema può evolvere. Ad esempio una ruota che gira è un sistema che ha un solo grado di libertà perché può effettuare un solo movimento di rotazione. La ruota anteriore di un'automobile invece ha due gradi di libertà perché oltre che girare attorno al proprio asse può anche sterzare a destra o a sinistra. Per ogni grado di libertà di un sistema ci deve essere un componente con memoria, o meglio, sono le componenti di un sistema che hanno una

memoria che generano i gradi di libertà. Come abbiamo visto precedentemente il vettore di stato rappresenta la memoria del sistema, pertanto per rappresentare un sistema con un modello ISU occorre scegliere una variabile di stato per ogni componente che ha memoria. Per ogni grado di libertà (o per ogni componente che ha memoria) occorre scegliere una variabile di stato e da ciò ne consegue che per ogni variabile ci sarà un'equazione corrispondente che ne determina l'evoluzione. Il sistema visto in precedenza ha tre variabili di stato, tre equazioni e quindi tre gradi di libertà.

Una volta che si conoscono i gradi di libertà di un sistema occorre scegliere le variabili di stato tra le tante grandezze fisiche interne al sistema, ma quali scegliere? Non c'è una regola generale, si può scegliere qualsiasi combinazione tra le tante variabili di sistema, basti che siano linearmente indipendenti tra loro. Linearmente indipendenti significa che tra le variabili scelte non deve sussistere un legame che fa sì che se si conosce il valore di una variabile non è dato automaticamente il valore dell'altra variabile. Due variabili linearmente indipendenti possono comunque influenzarsi e dipendere l'una dall'altra, ma devono essere in qualche modo slegate. L'indipendenza lineare implica che conoscendo il valore di una variabile non si può conoscere a priori quello dell'altra. Ad esempio nelle normali funzioni come $Y = 3 \times X$ oppure $Y = X^2$ o anche $Y = \cos X$ le variabili X e Y sono linearmente dipendenti perché dato un valore di X il valore di Y è determinato. Viceversa nella funzione di derivata $Y = \frac{dX}{dt}$ le variabili X e Y sono linearmente indipendenti perché dato un valore di X il valore di Y non è comunque determinato.

Per avere un'idea concreta del concetto di indipendenza lineare consideriamo due sistemi, ciascuno dei quali è formato da due palline poste dentro un tubo verticale all'interno del quale possono scorrere in alto e in basso. In un sistema le due palline sono legate tra loro da un'asta rigida, mentre nell'altro sono collegate da una molla. Consideriamo come variabili le posizioni delle due palline all'interno del tubo. Nel primo sistema avremo che se conosciamo la posizione di una pallina conosceremo automaticamente anche quella dell'altra perché sono attaccate mediante un'asta rigida di lunghezza fissa. Nel secondo caso invece, se conosciamo la posizione della prima palla non sappiamo automaticamente la posizione dell'altra, perché anche se sono collegate mediante una molla, questa non ha una lunghezza fissa. Il primo sistema ha un

solo grado di libertà e un solo componente con memoria (una pallina dentro il tubo), quindi il vettore di stato avrà una sola variabile che possiamo scegliere indifferentemente tra la posizione della prima o della seconda pallina. Il secondo sistema ha due gradi di libertà e quindi due componenti con memoria (le due palline dentro il tubo), perciò il vettore di stato avrà due variabili, le quali sono le posizioni delle due palline nel tubo (figura 7).

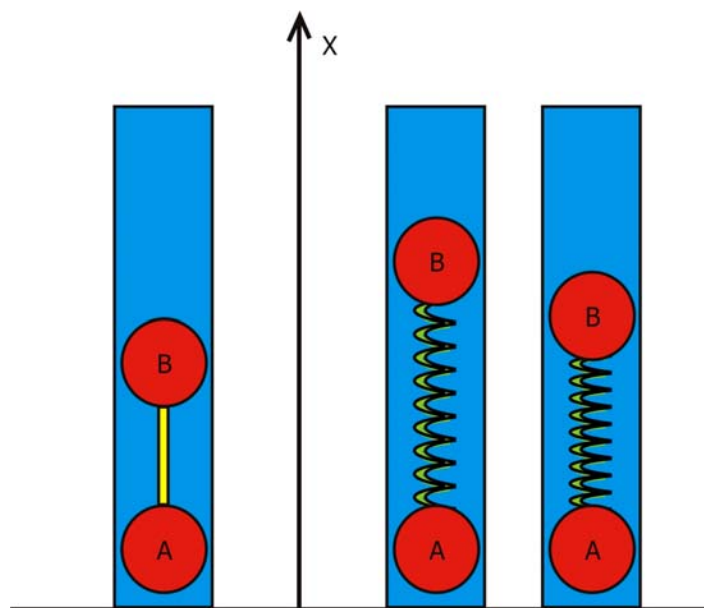


Figura 7: il sistema di sinistra ha un solo grado di libertà perché l'asta rigida vincola le due palline. Conoscendo la posizione di A, quella di B è univocamente determinata. Il sistema di destra ha due gradi di libertà perché la molla non vincola rigidamente le palline. Conoscendo la posizione di A, la pallina B può trovarsi in qualsiasi punto del tubo.

Nella costruzione del vettore di stato di un sistema fisico, a parte la restrizione dell'indipendenza lineare, si può scegliere qualsiasi combinazione di variabili, ed è possibile anche inventarne di fittizie con lo scopo di facilitare i calcoli. Per ogni scelta delle variabili di stato ci sono tre matrici A , B e C differenti. Infatti le tre matrici che caratterizzano il sistema cambiano a seconda delle grandezze scelte. La scelta delle variabili di stato viene solitamente fatta in modo da ottenere una matrice A molto semplice per facilitare la computazione. Infatti se A non è complicata i calcoli da fare per determinare l'evoluzione dello stato sono pochi e facili da eseguire.

Consideriamo il sistema S che abbiamo detto avere tre gradi di libertà. Per scegliere le variabili di stato non ci sono vincoli particolari a parte quello dell'indipendenza lineare. Per ogni tripla di variabili di stato x_1, x_2, x_3 , che scegliamo il sistema S è rappresentato da matrici A, B e C diverse. In realtà la matrice C non interessa molto ai fini del discorso, perché è quella che mette in relazione le uscite con le variabili di stato, ma le uscite sono in parte arbitrarie, nel senso che in un sistema può essere considerata uscita qualsiasi variabile a seconda dello scopo. In effetti anche qualsiasi variabile di stato è di per se un uscita del sistema. Ciò che interessa è parlare del funzionamento di un sistema e delle interdipendenze che vi sono tra le variabili al suo interno e questo è rappresentato dalla matrice A . Inoltre le variabili sono influenzabili anche da agenti esterni al sistema, gli ingressi, e questo legame è rappresentato dalla matrice B . A seconda delle variabili di stato che vengono scelte cambiano le matrici A e B , ossia cambia la rappresentazione che viene data del sistema.

Consideriamo una rappresentazione del sistema S visto in precedenza nella quale le variabili di stato scelte sono date dalla tripla x_1, x_2, x_3 . In seguito a questa scelta troviamo le matrici corrispondenti che descrivono il sistema: A_1 e B_1 . Definiamo un ASC M_1 le cui leggi di transizione di stato derivano dalle matrici A_1 e B_1 . Consideriamo poi una seconda rappresentazione nella quale le variabili scelte sono z_1, z_2, z_3 , e le matrici corrispondenti sono A_2 e B_2 . Definiamo per quest'altra rappresentazione un secondo ASC M_2 le cui leggi di transizione derivano dalle matrici A_2 e B_2 . I due ASC M_1 e M_2 sono diversi, perché le due matrici A_1 e A_2 sono diverse, per cui per rappresentare formalmente A_1 occorre una computazione diversa da quella che serve per rappresentare A_2 .

Secondo il principio di invarianza organizzativa tutti i sistemi che implementano l'ASC M_1 generano la stessa esperienza cosciente. Anche tutti i sistemi che implementano M_2 generano la stessa esperienza cosciente, ma poiché M_1 e M_2 sono diversi i sistemi che li implementano generano esperienze coscienti differenti. Ora abbiamo visto che M_1 e M_2 che sono due rappresentazioni del medesimo sistema S , quindi si può dire che il sistema S li implementa entrambi. Ma se così fosse allora ad S sono associate entrambe le esperienze coscienti associate a M_1 e M_2 . Pertanto il sistema S genererebbe due esperienze coscienti diverse, ma non solo. Poiché le possibili combinazioni di scelta delle variabili di stato sono tantissime si può rappresentare un

sistema in molti modi e un singolo sistema implementerebbe più ASC contemporaneamente. Quindi se il principio di invarianza organizzativa è vero un sistema genererebbe una molteplicità di esperienze coscienti, tante quante sono le possibili scelte per le variabili di stato. Si potrebbe obiettare che è normale che un sistema implementi più ASC contemporaneamente perché questo è divisibile in più parti e ogni parte sta implementando un ASC diverso. Ma quello che voglio dire è che un sistema preso nella sua totalità implementa più ASC contemporaneamente a seconda di come lo si guardi e non che la sua implementazione complessiva è data dall'unione di tutte le implementazioni in esso contenute.

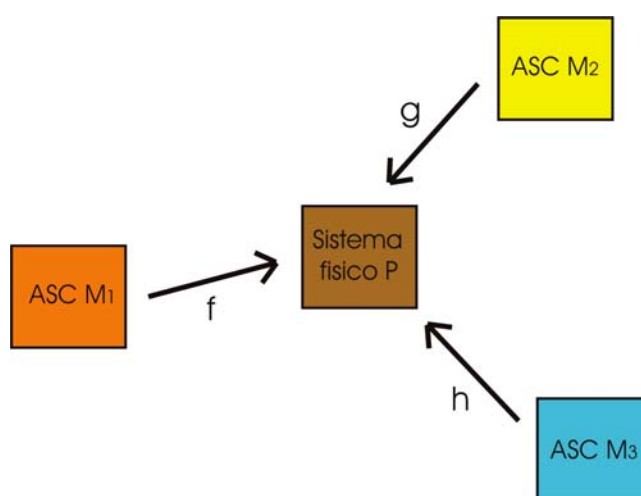


Figura 8: un sistema fisico implementa più ASC allo stesso tempo. La relazione tra il sistema e un'ASC è data da un'applicazione diversa per ogni ASC.

Consideriamo tre diverse rappresentazioni del sistema fisico P dovute a tre diverse scelte delle variabili di stato (figura 8). Per ogni rappresentazione è possibile trovare un ASC corrispondente. Ci si ritrova quindi con tre ASC diversi M_1 , M_2 e M_3 che sono rappresentazioni formali della struttura causale del sistema fisico P . In particolare il sistema è legato all'ASC M_1 dall'applicazione f , all'ASC M_2 dall'applicazione g e all'ASC M_3 dall'applicazione h . Tutti e tre gli ASC sono rappresentazioni formali lecite del sistema P e non c'è motivo perché uno debba prevalere sugli altri. Ora secondo Chalmers a ogni ASC è associata un'esperienza cosciente per cui il sistema P che li implementa deve generare una molteplicità di esperienze.

Prima si è visto che il fatto che un'ASC possa essere implementato da più sistemi crea un problema di realizzabilità multipla. Questo problema è stato superato da

Chalmers dando una definizione di implementazione più dettagliata in modo che solo un numero limitato di sistemi fisici possa implementare un ASC. La conseguenza della definizione di organizzazione funzionale porta però a un altro problema: l'implementazione multipla. Un sistema fisico implementa più ASC contemporaneamente e questo è una conseguenza diretta del fatto che ci sono più organizzazioni funzionali che possono rappresentare la sua struttura causale. Un sistema fisico è rappresentabile mediante più modelli matematici, pertanto ci sono più organizzazioni funzionali a esso collegato. Poiché a ogni organizzazione funzionale è possibile associare un ASC allora un sistema fisico, rappresentabile da più organizzazioni funzionali, implementa più ASC. Ma da questo ne consegue, per il principio di invarianza organizzativa di Chalmers, che un sistema fisico genera una molteplicità esperienze coscienti.

Questa conclusione è un paradosso soprattutto se riportiamo questo ragionamento a sistemi più grandi come un cervello. Infatti anche questo è un sistema fisico e pertanto avrà una sua organizzazione funzionale e sta implementando un ASC. Abbiamo appena visto però che un sistema fisico è descritto da più organizzazioni funzionali e quindi implementa più ASC, perciò è possibile trovare più ASC che possono essere associati al sistema cervello e che quindi rappresentano la sua organizzazione. Ogni ASC sarà legato al sistema cervello da un'applicazione f diversa e per ogni ASC che il cervello implementa ci deve essere un'esperienza cosciente diversa. All'interno di un cervello ci dovrebbero essere un certo numero di coscienze che provano esperienze diverse e ciò appare assurdo.

Questo paradosso deriva dalla definizione di organizzazione funzionale data da Chalmers. Infatti, creando un collegamento tra l'organizzazione funzionale e la rappresentazione di tipo ISU, abbiamo visto la struttura causale di un sistema fisico può essere descritta mediante più organizzazioni funzionali. Forse è possibile definire in maniera diversa l'organizzazione funzionale in modo che descriva in maniera univoca una struttura causale. In questo modo un sistema può essere rappresentato mediante una sola organizzazione funzionale e il principio di invarianza organizzativa potrebbe essere valido. Per fare un'operazione di questo tipo occorrerebbe trovare delle proprietà che rimangono invariate qualsiasi rappresentazione possiamo dare al sistema. Un sistema è rappresentabile mediante molti modelli matematici, ma forse tutti questi modelli

potrebbero avere qualcosa in comune e da questo si potrebbe partire per costruire una definizione di organizzazione funzionale più adatta al principio di invarianza.

5. Esempio di un circuito elettrico descritto secondo un modello ISU

Analizziamo un esempio per vedere dal punto di vista pratico quanto esposto finora. Consideriamo il sistema in figura 9. Si tratta di un circuito elettrico con un generatore di tensione due induttanze, L_1 e L_2 , e una capacità C . Il generatore di tensione impone un segnale di tensione v_{in} al circuito e quindi circola una corrente. Le capacità e le induttanze si comportano nei confronti della tensione e della corrente in base a determinate equazioni. In particolare le induttanze si oppongono alle variazioni di corrente e le capacità si oppongono alle variazioni di tensione.

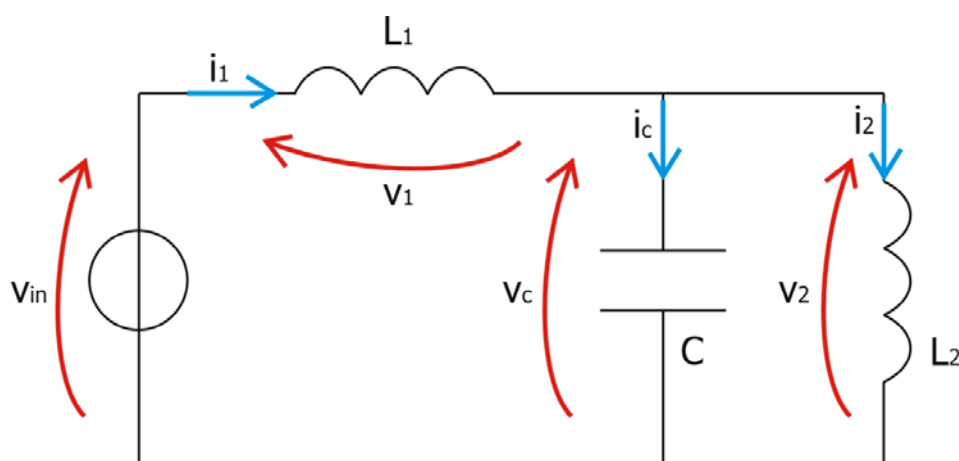


Figura 9: circuito elettrico con un generatore di tensione, due induttanze e una capacità.

Il comportamento complessivo del circuito dipende da come i componenti sono collegati tra loro. Le induttanze e le capacità sono i componenti del circuito che hanno una memoria perché possono immagazzinare energia, quindi poiché il numero di variabili di stato deve essere un numero pari almeno ai componenti con memoria il vettore di stato che rappresenta il sistema deve essere composto da tre variabili. Per modellizzare i sistemi elettrici secondo il metodo ISU è pratica comune utilizzare come variabili di stato le correnti che circolano nelle induttanze e le tensioni ai capi delle capacità. Se seguiamo questo procedimento le variabili di stato per questo sistema sono v_c , i_1 e i_2 . Le equazioni che determinano l'evoluzione dello stato sono le seguenti:

$$\begin{aligned}\frac{dv_c}{dt} &= \frac{1}{C} \cdot i_1 - \frac{1}{C} \cdot i_2 \\ \frac{di_1}{dt} &= -\frac{1}{L_1} \cdot v_c + \frac{1}{L_1} \cdot v_{in} \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{1}{L_2} \cdot v_c\end{aligned}$$

Riscritte in forma matriciale le equazioni diventano:

$$\begin{pmatrix} \frac{dv_c}{dt} \\ \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_c \\ i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot u$$

Le stesse equazioni possono essere riscritte in forma discreta per adattare il sistema alla definizione di organizzazione funzionale:

$$\begin{aligned}v_c(n+1) &= \frac{1}{C} \cdot i_1(n) - \frac{1}{C} \cdot i_2(n) \\ i_1(n+1) &= -\frac{1}{L_1} \cdot v_c(n) + \frac{1}{L_1} \cdot v_{in}(n) \\ i_2(n+1) &= \frac{1}{L_2} \cdot v_c(n)\end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} v_c(n+1) \\ i_1(n+1) \\ i_2(n+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_c(n) \\ i_1(n) \\ i_2(n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot u(n)$$

Abbiamo quindi trovato le matrici A_I e B_I che corrispondono alla scelta delle variabili di stato fatta. Queste equazioni rappresentano perfettamente il sistema e se associamo a esse un ASC M_I il cui vettore di stato coincide con quello dello stato del sistema avremo una rappresentazione formale di come funziona il sistema.

La tripla di variabili di stato considerate, v_c , i_1 , i_2 , è solo una delle tante che è possibile scegliere. Ad esempio un'altra soluzione molto comune è quella di prendere

come spazio di stato una variabile e le sue derivate successive, le quali hanno anch'esse un significato fisico ben definito. Ad esempio si può scegliere v_c , la sua derivata prima

$\frac{dv_c}{dt}$, e la sua derivata seconda $\frac{d^2v_c}{dt^2}$. La scelta delle variabili di stato è quindi:

$$x_1 = v_c$$

$$x_2 = \frac{dv_c}{dt}$$

$$x_3 = \frac{d^2v_c}{dt^2}$$

Con questa scelta il modello ISU del sistema risulta essere:

$$\begin{pmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \\ \frac{dx_3}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{CL_1} - \frac{1}{CL_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{CL_1} \cdot \frac{d^2}{dt^2} \end{pmatrix} \cdot u$$

Come si può vedere le matrici A_2 e B_2 legate a questa scelta delle variabili di stato sono molto diverse da quelle precedenti, quindi se associamo un ASC M_2 a questa seconda rappresentazione possiamo essere certi che sarà molto diverso da quello associato alla prima. Sebbene siano diversi, i due ASC sono rappresentazioni entrambe valide del circuito elettrico considerato. Nessuno può dire che un modello è più giusto di un altro, dal punto di vista matematico sono corretti tutti e due. Ci troviamo quindi con due ASC differenti che rappresentano lo stesso sistema. Poiché gli ASC sono strutture formali ne consegue che un sistema è descrivibile da più strutture formali allo stesso tempo le quali sono tutte lecite.

Si potrebbe obiettare che quest'ultima rappresentazione non è lecita perché considera una variabile legata a un solo componente del sistema, la capacità C , e non tiene conto degli altri componenti come le induttanze L_1 e L_2 . Quindi per ottenere una vera rappresentazione del sistema bisogna scegliere per ogni componente una grandezza a esso legata direttamente. Ad esempio le derivate successive di v_c sono legate solo in maniera indiretta alle induttanze. Quest'interpretazione però è piuttosto dubbia, perché

se un modello è lecito dal punto di vista matematico non si capisce perché debba essere escluso. Comunque, anche tenendo conto di questa obiezione, è possibile creare un gran numero di modelli. Infatti se imponiamo il vincolo che le variabili di stato scelte devono essere legate direttamente a un componente del sistema rimangono sempre molte soluzioni per trovare uno spazio di stato. Ad esempio le variabili associate all'induttanza sono la corrente, la tensione, l'energia immagazzinata, la carica elettrica circolata attraverso l'induttanza e tutte le derivate di queste grandezze. Il numero di combinazioni ottenibili con le variabili corrispondenti agli altri componenti è comunque molto grande.

Si può essere tentati di pensare che in realtà i due ASC sono uguali, e solo apparentemente sono diversi. Ad esempio si potrebbe pensare che i calcoli che vengono implementati per eseguire l'ASC M_1 sono gli stessi di quelli che occorre eseguire per implementare l'ASC M_2 , ma visti in modo superficiale sembrano diversi. Sarebbe un po' come dire che un ASC esegue il calcolo "2 + 6" mentre l'altro esegue "2 + (3 × 2)". In realtà le differenze sono più sostanziali, infatti la struttura delle due matrici A è molto diversa, quindi i calcoli che devono essere eseguiti per implementare uno o l'altro ASC sono sostanzialmente diversi. Inoltre la scelta delle variabili di stato viene fatta proprio per facilitare la computazione, proprio perché a seconda dello stato che si sceglie i calcoli da fare per simulare un sistema possono essere più o meno complicati.

A questa argomentazione si potrebbe obiettare che è vero che è possibile scegliere tra molte variabili di stato, ma molte tra quelle che si possono scegliere non hanno significato fisico perché sono solamente delle variabili di comodo che si usano per facilitare i calcoli. Questo è vero, ma anche se consideriamo le sole variabili con significato fisico le combinazioni possibili per scegliere lo spazio di stato sono comunque tantissime, e qualsiasi di queste combinazioni può essere scelta come rappresentazione del sistema. Per ognuna di queste combinazioni ci sarà una matrice A particolare e un ASC corrispondente.

Un'altra possibile obiezione è che un ASC che rappresenta veramente il sistema deve tener conto di tutte le variabili fisiche presenti al suo interno e non solo delle tre scelte per lo spazio di stato. Se si dovesse però tener conto di tutte le variabili fisiche di un sistema sarebbe impossibile riprodurlo con una simulazione perché queste sono

tantissime anche se consideriamo solo quelle che hanno un significato fisico. Inoltre questa rappresentazione è superflua, perché se si vuole descrivere un sistema è sufficiente considerare tante variabili tra loro indipendenti quante sono le componenti di quel sistema che posseggono una memoria.

Sembra esserci un paradosso nell'argomentazione fin qui sostenuta. Dopotutto le equazioni che regolano un sistema fisico sono sempre le stesse e il funzionamento del sistema non cambia a seconda di come viene visto il sistema. Come è possibile quindi che un sistema possa essere rappresentato da più modelli matematici? A prima vista un sistema deve funzionare secondo un determinato schema, una determinata organizzazione funzionale. In realtà però ci sono più modelli matematici che possono descrivere un sistema e non vi è nessun paradosso in questo. Infatti in qualunque modo venga visto un sistema la relazione ingresso-uscita è costante, ossia la relazione matematica tra due determinate variabili è sempre la stessa. Ma spetta a chi descrive il sistema la scelta se rappresentarlo mediante il legame che c'è tra l'ingresso e una variabile oppure tra l'ingresso o un'altra variabile.

È normale che ci siano più modelli matematici che rappresentano un sistema, questo perché un sistema con un certo numero di variabili può essere descritto considerando un numero inferiore di grandezze di quelle che esso contiene. Il legame che c'è tra un ingresso e ognuna di queste variabili è sempre diverso e per ogni legame c'è un'equazione matematica diversa. Quindi a seconda che si voglia descrivere il sistema attraverso l'equazione che lega l'ingresso con la variabile x_1 oppure attraverso quella che lega l'ingresso con la variabile x_2 il modello del sistema cambia perché cambia l'equazione. Anche per lo stato si può fare questo discorso. Se un sistema ha 100 variabili e tre gradi di libertà si può dare una rappresentazione del sistema considerando le equazioni che legano le variabili x_{15} , x_{34} , x_{92} oppure le equazioni che legano le variabili x_{21} , x_{55} , x_{61} oppure una qualsiasi altra combinazione di tre variabili. Queste equazioni sono diverse, quindi il modello matematico è diverso nei vari casi.

La definizione di organizzazione funzionale di Chalmers non è adatta perché una sola organizzazione possa essere l'unica descrizione di un sistema. Rappresenta un sistema solo da un punto di vista mentre ce ne sono tantissimi altri. La definizione si adatta bene a modelli computazionali, nel senso che è facile trovare una computazione

tale che si adatti a un'organizzazione funzionale. Non è possibile però dire che una particolare organizzazione funzionale è la sola rappresentazione di un sistema. Di conseguenza non c'è solo un modello computazionale che descrive un sistema fisico. Il modello matematico di un sistema cambia a seconda del punto di vista dal quale lo si guarda, quindi se si vuole simulare un sistema al computer bisogna scegliere quale modello matematico simulare, e per ogni modello la computazione sarà diversa. Ogni modello matematico ha il suo corrispondente modello computazionale quindi non si può dire che un sistema è descritto da una sola computazione come può essere un ASC, ma ce ne sono tante e tutte ugualmente lecite.

6. Conclusioni

Secondo il principio di invarianza organizzativa proposto da Chalmers tutti i sistemi che condividono la stessa organizzazione funzionale modello formale produrranno la stessa esperienza cosciente. Un'organizzazione funzionale è molto simile a una computazione come un ASC, che pertanto quale può essere considerato come un modello formale della struttura causale di un sistema fisico. Abbiamo appena visto però che un sistema può essere rappresentato da più modelli formali a seconda delle variabili che scegliamo, e che questi modelli sono tutti leciti. Quindi ci sono più ASC che possono descrivere un sistema. Se a ogni ASC è associata una particolare esperienza cosciente e se un sistema fisico che implementa quell'ASC genera quell'esperienza cosciente associata allora un sistema fisico genera un grande numero di esperienze coscienti perché implementa un gran numero di ASC. Questa situazione appare paradossale perché vorrebbe dire ad esempio che nel cervello di una persona non c'è una sola coscienza ma tantissime, a seconda che si voglia descrivere il funzionamento della rete neurale utilizzando una certa combinazione di variabili piuttosto che altre.

Da questo discorso si può pervenire a due tipi di conclusioni. La prima conclusione è che la definizione di organizzazione funzionale data da Chalmers non soddisfa gli intenti della sua teoria funzionalista della coscienza. Secondo questa infatti tutti i sistemi che condividono lo stesso tipo di organizzazione devono avere esperienze coscienti uguali, ma per dimostrare questa tesi occorre dare una definizione di

organizzazione che si basa su caratteristiche assolute di un sistema. La definizione di organizzazione funzionale analizzata ora non è sufficiente a descrivere un sistema in maniera assoluta perché come si è visto questa descrizione cambia a seconda delle variabili che si considerano. Una definizione di organizzazione funzionale che possa servire al funzionalismo dovrebbe basarsi sui parametri di un sistema fisico che rimangono immutati anche quando questo viene visto sotto diversi punti di vista.

Attraverso questa teoria della coscienza Chalmers sostiene l'intelligenza artificiale creando un collegamento tra la sua idea di organizzazione funzionale e gli ASC. Dà inoltre una definizione di implementazione, che si basa sulla struttura causale dei sistemi fisici, in modo da restringere le possibilità di implementazione di computazioni da parte dei sistemi fisici. In questo modo supera il problema della realizzazione multipla. Il difetto nella definizione di organizzazione funzionale però si trasmette anche agli ASC, pertanto un sistema può essere rappresentato da più ASC e si viene creare un problema di implementazione multipla.

La seconda conclusione, alternativa alla prima, è che il principio di invarianza organizzativa non è vero e il funzionalismo proposto da Chalmers è sbagliato, quindi l'origine dei fenomeni coscienti non è da attribuire al tipo di organizzazione funzionale di un sistema, ma a qualcos'altro. Magari l'organizzazione funzionale è qualcosa di necessario perché si abbia la formazione di una coscienza, ma non è sufficiente. In questo caso solo alcuni sistemi potrebbero, organizzati in maniera opportuna, generare fenomeni coscienti. Personalmente propendo per questa seconda soluzione, ma anche la prima è un'opzione che non va scartata a priori sebbene non so se possa esistere una definizione assoluta di organizzazione funzionale.

Bibliografia

- Chalmers, D.J., 1996a, «Does a rock implement every finite-state automaton?», in *Synthese*, n. 108, pp. 309-33. Available in <http://consc.net/papers/rock.html>
- , 1996b, «A Computational Foundation for the Study of Cognition». Unpublished, but available in <http://consc.net/papers/computation.html>

—, 1996c, *The Conscious Mind*, Oxford University Press. («La Mente Cosciente», trad. it. Mc Graw Hill 1996).

Putnam, H., 1988, *Representation and Reality*, MIT Press.