

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**Corso di Laurea in
Ingegneria Elettronica, Informatica e Telecomunicazioni**

Principi e metodi della robotica evolutiva

**Elaborato in
Fondamenti di Informatica B**

Relatore:

ANDREA ROLI

Presentato da:

ALESSANDRO FANTINI

III Sessione

Anno Accademico 2012/2013

*Alla mia famiglia,
in particolar modo ai miei nonni,
e alla mia ragazza. . .*

Indice

Introduzione	1
1 Robotica e biologia	3
1.1 Vita artificiale	3
1.2 Evoluzione artificiale	4
2 La robotica evolutiva	5
2.1 Le motivazioni e gli obiettivi	5
2.2 Algoritmi evolutivi	6
2.3 Simulatori e valore di fitness	6
2.4 La funzione di fitness	7
2.5 Robotica tradizionale e robotica evolutiva	7
2.6 Biorobotica e biorobotica evolutiva	8
2.7 La robotica dello sviluppo	9
2.8 La robotica degli sciame	12
2.9 Robotica modulare	14
2.10 Soft robotics	14
3 Formalismi	17
3.1 Morfologia computazionale	17
3.2 Teoria dei sistemi dinamici	18
3.3 Teoria dell'informazione	18
4 Sfide	21
4.1 Il problema del divario dalla realtà	21

4.1.1	Un nuovo approccio bidirezionale	23
4.2	Calcolo combinatorio	25
4.3	Il concetto di evolvibilità	26
4.4	La progettazione delle funzioni di fitness	27
4.5	La novelty search	29
	Conclusioni	31
	Bibliografia	33

Introduzione

I contenuti del presente elaborato sono basati principalmente sulle slide (si veda [1]) gentilmente rese disponibili dal docente relatore Andrea Roli e su uno degli articoli di Josh Bongard ([2]) in merito alla robotica evolutiva.

L'intelligenza artificiale, ovvero lo studio e la progettazione di sistemi intelligenti, mira a riprodurre alcuni aspetti dell'intelligenza umana, come il linguaggio e il ragionamento deduttivo, nei computer. La robotica, invece, cerca spesso di ricreare nei robot comportamenti adattativi, come l'abilità di manipolare oggetti o camminare, mediante l'utilizzo di algoritmi in grado di generare comportamenti desiderati. Una volta realizzato uno di questi algoritmi specificamente per una certa abilità, si auspica che tale algoritmo possa essere riutilizzato per generare comportamenti più complessi fino a che il comportamento adattativo del robot non si mostri ad un osservatore esterno come intelligente; purtroppo questo non risulta sempre possibile e talvolta per generare comportamenti di maggiore complessità è necessario riscrivere totalmente gli algoritmi. Appare quindi evidente come nel campo della robotica l'attenzione sia incentrata sul comportamento, perché le azioni di un robot generano nuove stimolazioni sensoriali, che a loro volta influiscono sulle sue azioni future. Questo tipo di intelligenza artificiale (chiamata propriamente *embodied cognition*) differisce da quella propriamente detta per il fatto che l'intelligenza non emerge dall'introspezione ma dalle interazioni via via più complesse che la macchina ha con l'ambiente circostante. Gli esseri viventi presenti in natura mostrano, infatti, alcuni fenomeni che non sono programmati a priori nei geni, bensì frutto dell'interazione che l'organismo ha con l'ambiente durante le varie fasi del suo sviluppo.

Volendo creare una macchina che sia al contempo autonoma e adattativa, si devono affrontare due problemi: il primo è relativo alla difficoltà della progettazione di macchine autonome, il secondo agli ingenti costi di sviluppo dei robot. Alla fine degli anni '80 nasce la *robotica evolutiva* che, traendo ispirazione dall'evoluzione biologica, si basa sull'utilizzo di software in grado di rappresentare popolazioni di robot virtuali e la capacità di farli evolvere all'interno di un simulatore, in grado di rappresentare le interazioni tra mente e corpo del robot e l'ambiente, per poi realizzare fisicamente solo i migliori. Si utilizzano algoritmi evolutivi per generare robot che si adattano, anche dal punto di vista della forma fisica, all'ambiente in cui sono immersi. Questo nuovo approccio evolutivo alla robotica si discosta da quello più comunemente adottato, che sfrutta tecniche di apprendimento per migliorare i comportamenti di un certo robot ideato dall'uomo, in quanto cerca di creare un sistema evolutivo in grado di progettare continuamente ed autonomamente nuovi robot e di realizzarne diversi dotati di un numero sempre maggiore di abilità.

Nel primo capitolo si tratterà di vita ed evoluzione artificiali, concetti che verranno ripresi nel secondo capitolo, dedicato alle motivazioni che hanno portato alla nascita della robotica evolutiva, agli strumenti dei quali si avvale e al rapporto che ha con la robotica tradizionale e le sue declinazioni. Nel terzo capitolo si presenteranno i tre formalismi mediante i quali si sta cercando di fornire un fondamento teorico a questa disciplina. Infine, nel quarto capitolo saranno mostrati i problemi che ancora oggi non hanno trovato soluzione e le sfide che si devono affrontare trattando di robotica evolutiva.

Capitolo 1

Robotica e biologia

Ispirandosi all'evoluzione biologica, la robotica evolutiva nasce e si sviluppa attorno ai due concetti fondamentali di *vita* ed *evoluzione artificiali*, con l'intento di adottare un approccio ispirato alla biologia nella progettazione di macchine autonome e adattative. Prima di procedere alla trattazione dei motivi e dei problemi della robotica evolutiva è innanzitutto opportuno mettere in luce il contenuto di questi due concetti base.

1.1 Vita artificiale

In una sua famosa pubblicazione del 1989 (si veda [3]), Langton diede la definizione di vita artificiale di seguito riportata.

“Artificial Life is the study of man-made systems that exhibit behaviors characteristic of natural living systems. It complements the traditional biological sciences concerned with the analysis of living organisms by attempting to synthesize life-like behaviors within computers and other artificial media. By extending the empirical foundation upon which biology is based beyond the carbon-chain life that has evolved on Earth, Artificial Life can contribute to theoretical biology by locating life-as-we-know-it within the larger picture of life-as-it-could-be.”

La *vita artificiale* è un campo di studio relativo a sistemi, creati dall'uomo, che mostrano comportamenti caratteristici dei sistemi viventi naturali. Tale studio completa le scienze biologiche tradizionali, che si occupano dell'analisi di organismi viventi, cercando di sintetizzare, nei computer e in altri dispositivi artificiali, comportamenti simili a quelli della vita. Estendendo il concetto empirico secondo il quale la biologia si fonda sulla vita così come si è evoluta sulla Terra (ovvero basata sulle catene di atomi di carbonio), l'intelligenza artificiale può contribuire alla biologia teorica sostituendo il concetto di *vita così come la conosciamo* con quello più ampio di *vita così come potrebbe essere*.

1.2 Evoluzione artificiale

L'*evoluzione artificiale* nasce dal tentativo di applicare la teoria dell'evoluzione biologica al concetto di *vita artificiale* appena esposto. Così come per quella tradizionale, l'evoluzione artificiale si basa sull'*ereditarietà* e sulla *selezione naturale*^a. L'*ereditarietà* si manifesta nel fatto che i figli assomigliano ai genitori, mentre la *selezione naturale* è la capacità dei nuovi tipi di organismi, adattati all'ambiente in cui vivono, di svilupparsi e riprodursi, il che comporta una progressiva estinzione dei soggetti che non sono stati in grado di adattarsi adeguatamente all'ambiente. Ne deriva il fatto che, con l'evoluzione, gli organismi risultano fatti in modo tale da adattarsi perfettamente all'ambiente naturale nel quale vivono, massimizzando quindi le possibilità di avere numerosi figli. Come conseguenza del fatto che i figli assomigliano ma non sono uguali ai propri genitori, si ha la maggiore diffusione, di generazione in generazione, dei tratti che caratterizzano gli individui più adatti al proprio ambiente.

^a Il concetto di selezione naturale fu introdotto da Charles Darwin nel 1859 nel famoso libro *L'origine delle specie*.

Capitolo 2

La robotica evolutiva

La robotica evolutiva è un campo di ricerca innovativo che si colloca nel contesto più ampio degli studi relativi ai robot autonomi. La ricerca è rivolta alla creazione di metodi automatizzati in grado di produrre robot autonomi e adattativi, le cui possibili applicazioni potrebbero essere innumerevoli.

2.1 Le motivazioni e gli obiettivi

La progettazione automatica, la costruzione e la distribuzione di macchine autonome e adattative è un problema ancora oggi irrisolto. Negli ultimi anni si è assistito ad una progressiva diffusione di macchine, che tuttavia risultano essere autonome ma non adattative; un esempio sono i robot impiegati nelle missioni spaziali per esplorare i pianeti del sistema solare. Altri tipi di macchine che stanno riscuotendo successo, come i droni, non sono tuttavia autonome e le uniche capacità adattative che mostrano si limitano a quelle possedute dall'operatore umano che le controlla.

Ad oggi, gli unici esempi di macchine autonome e adattative allo stesso tempo provengono dall'evoluzione biologica. Quelli naturali, infatti, sono sistemi che si organizzano autonomamente sviluppando una serie di strategie che permettono agli individui la sopravvivenza e quindi la riproduzione.

Uno degli obiettivi principali della robotica evolutiva è di sviluppare metodi automatizzati, che non richiedano l'intervento dell'uomo, per la creazione

di robot intelligenti, autonomi e adattativi. L'utilizzo di questi metodi renderebbe quindi possibile non effettuare assunzioni a priori riguardo alla struttura del robot. Il principale vantaggio è che in futuro si potrebbero creare robot in grado di lavorare in ambienti inadatti all'uomo e che la mente umana probabilmente non avrebbe mai ideato.

Si è quindi pensato che le conoscenze disponibili riguardo all'evoluzione in ambito biologico potessero essere utili per formulare un nuovo tipo di approccio al problema.

2.2 Algoritmi evolutivi

La robotica evolutiva utilizza algoritmi basati sulle popolazioni di individui per ottimizzare, a seconda dei casi, uno o tutti gli aspetti di un robot autonomo; questo nuovo approccio alla robotica si discosta dalla robotica tradizionale, che utilizza invece algoritmi di apprendimento per migliorare le politiche di controllo del robot, ovvero le funzioni che controllano gli attuatori sulla base dei segnali provenienti dai sensori. L'utilizzo di questi algoritmi ha lo svantaggio di non garantire, dato un robot, che verrà trovata una politica di controllo ottima per lo stesso. Il principale vantaggio è invece la possibilità, dato un problema, di fare pochissime assunzioni; questo perché gli algoritmi evolutivi possono migliorare non solo i parametri e l'architettura della politica di controllo del robot ma anche la sua forma fisica.

2.3 Simulatori e valore di fitness

Per motivi di tempo e di costi, gli esperimenti sono spesso svolti all'interno di *simulatori software*: gli algoritmi evolutivi generano popolazioni di robot virtuali che vengono testati all'interno dell'ambiente del simulatore, che deve essere il più aderente possibile alla realtà. A ciascun robot viene poi assegnato un giudizio (valore di *fitness*) sulla base del risultato del test nell'ambiente simulato. Al termine del test sull'intera popolazione, gli individui che hanno ottenuto un valore basso di *fitness* sono eliminati (analogamente alla selezione

naturale) mentre gli individui sopravvissuti al test vengono copiati e leggermente modificati in maniera casuale (analogamente alle mutazioni genetiche). I robot così modificati costituiscono l'input dell'iterazione successiva del simulatore. Il ciclo si ripete per un periodo di tempo prestabilito, al termine del quale si può realizzare il robot con il valore di *fitness* più elevato per vedere come si attegga nell'ambiente reale.

2.4 La funzione di fitness

Lo sviluppo di un sistema di controllo per macchine autonome implica la valutazione di un numero molto alto di individui, il che rende necessaria l'adozione di un meccanismo automatizzato che esegua le valutazioni degli stessi. Il metodo con il quale avviene tale valutazione, che esprime l'adeguatezza del robot a svolgere il proprio compito nell'ambiente attraverso la formulazione di un valore di *fitness*, deve essere basato esclusivamente sulle informazioni che il robot è in grado di percepire attraverso i suoi sensori. Si ricorre quindi a una *funzione di fitness*, il cui criterio di valutazione utilizzato durante le simulazioni può essere stabilito arbitrariamente in quanto tutte le informazioni disponibili sono utilizzabili. Qui sorge un problema: nel caso venga scelta una funzione di *fitness* calcolabile solo all'interno della realtà simulata, la valutazione delle prestazioni del robot nell'ambiente reale può essere difficile, se non addirittura impossibile. Una parziale soluzione a questo tipo di problema si ha utilizzando dei sensori dedicati esclusivamente alla valutazione della funzione di *fitness*.

2.5 Robotica tradizionale e robotica evolutiva

Il miglioramento della capacità di un robot dotato di arti di muoversi su un terreno ruvido costituisce un campo di studio molto popolare della robotica. A tal proposito, esistono algoritmi di apprendimento, che si nutrono dei dati captati dai sensori del robot, in grado di migliorare tale tipo di movimento con un dispendio di risorse computazionali relativamente limitato

e in tempi brevi (nell'ordine dei minuti). Recenti simulazioni nel campo della robotica evolutiva mostrano come robot amorfi che siano fatti evolvere in un ambiente con terreno irregolare sviluppino prima o poi accenni di quelli che possono considerarsi una prima forma rudimentale di arti, che abilitano i robot a camminare. Questi ultimi esperimenti sono quindi in grado di produrre continuamente robot diversi adatti ad ambienti diversi.

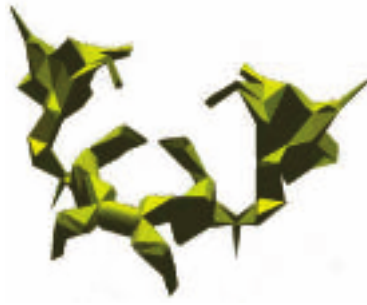


Figura 2.1: Robot dotato di arti (si veda [4])

In sintesi, la robotica tradizionale si occupa di migliorare costantemente il comportamento di un dato robot, sia esso umanoide o di altro tipo. La robotica evolutiva, invece, ha l'obiettivo di creare, nel lungo termine, algoritmi universali per generare nuovi robot, che potrebbero distare in tutto o in parte da qualsiasi altro robot ideato direttamente dall'uomo.

2.6 Biorobotica e biorobotica evolutiva

In biorobotica, si studiano e si realizzano robot simili ad animali presenti in natura. Si cerca di riprodurre fedelmente i dettagli anatomici dell'animale considerato, in modo da poter utilizzare il robot come modello dello stesso. Anche se gran parte degli studi finora svolti si concentrano sugli animali, esistono esperimenti fatti su robot umanoidi. Per via della complessità della forma umanoide, tutt'oggi è ancora un problema realizzare robot in grado di camminare in maniera aderente a quella di un uomo. I biorobotici, cercano quindi di modellare nei robot i prodotti dell'evoluzione. La biorobotica

evolutiva ha invece l'obiettivo di ricreare il processo di evoluzione nelle macchine, che possono assomigliare o meno agli animali esistenti in natura.

2.7 La robotica dello sviluppo

La robotica dello sviluppo (in inglese, *developmental robotics*) presenta molti tratti comuni alla robotica evolutiva. Trae ispirazione dalla psicologia e dalla neuroscienza dello sviluppo, campi di studio che affrontano problemi legati al modo in cui individui semplici, crescendo, riescono a sviluppare nuove capacità, sia fisiche che mentali, che li rendono più complessi. L'esempio più comune è costituito dall'infante, che gradualmente cresce fino a diventare adulto. Analogamente alla robotica evolutiva, questo campo di studio può anche essere uno strumento scientifico, in quanto i robot possono essere utilizzati come modelli fisici per le ricerche nell'ambito dello sviluppo biologico. Gli ingegneri, a loro volta, sfruttano i nuovi progressi dello sviluppo biologico per costruire robot migliori.

In questa disciplina, l'attenzione è interamente rivolta ai cambiamenti che avvengono nel cervello e nel corpo del robot a partire dalla nascita, di man in mano che vengono apprese nuove abilità. Gli esperimenti di robotica evolutiva generano invece robot che diventano più complessi di generazione in generazione, ma che tipicamente rimangono inalterati durante il loro ciclo vitale. Ciò dista enormemente da quanto accade in natura: i sistemi biologici presentano diverse fasi di crescita durante la loro vita, fasi che nel lungo termine subiscono leggere variazioni. Questo processo prende il nome di *evoluzione dello sviluppo* (in inglese, *evolution of development* o *evo-devo*) e recentemente ha permesso alla robotica di effettuare nuovi passi in avanti: agli inizi dell'evoluzione, i robot si trasformano durante la loro vita da esseri che gattonano in macchine dotate di gambe e in grado di camminare; in seguito, grazie al progresso dell'evoluzione, questa prima forma da infante gradualmente scompare e al termine dell'evoluzione si hanno robot dotati di gambe, in grado di camminare correttamente da subito, senza il bisogno di passare prima attraverso la fase in cui ci si muove gattonando (si veda [5]).

Nei primi esperimenti di robotica evolutiva dello sviluppo era prassi codificare le istruzioni genetiche come specifiche classi di grammatiche formali^a conosciute con il nome di *Lindenmayer systems*^b (o *L-systems*), per via della loro natura ricorsiva con la quale era possibile riprodurre forme simmetriche. È dimostrato che i robot fatti evolvere utilizzando tali classi di grammatiche producono forme ripetute, il che facilita il compito agli algoritmi evolutivi che si occupano di migliorare tali robot.

La robotica evolutiva presuppone l'esistenza di un robot fisicamente realizzato: l'utente fornisce un metro di giudizio per misurare le performance del robot e i parametri dell'ambiente nel quale il robot deve svolgere il compito assegnato, e l'algoritmo produce in uscita la struttura corporea del robot e la politica di controllo per un robot in grado di svolgere tale compito. L'algoritmo in questione potrebbe ipoteticamente ricevere costantemente nuove richieste di comportamenti desiderati insieme alla descrizione dei relativi ambienti nel quale il compito verrà svolto e potrebbe produrre in uscita robot sempre nuovi. Questo modo risulta vantaggioso per gli ingegneri robotici che possono fare un minor numero di assunzioni relativamente alla forma finale del robot, essendo consapevoli, allo stesso tempo, che il robot automaticamente generato sarà sicuramente consono all'ambiente in cui dovrà operare. Ad esempio, uno degli interrogativi più frequenti riguarda il tipo di robot che deve essere costruito per operare efficientemente su una data superficie: è più appropriato un individuo dotato di gambe o uno dotato di ruote? Preso un algoritmo evolutivo, esso dovrebbe generare un robot dotato di ruote se il terreno è piatto e abbastanza uniforme, uno dotato di gambe in presenza di una superficie irregolare e scabra. Dal ramo principale della robotica è noto, inoltre, che esistono vantaggi nel combinare i due tipi di locomozione, fornendo quindi ai robot sia gambe che ruote; un sistema evolutivo ben costruito dovrebbe essere in grado, da solo, di scegliere se presentare nelle generazioni

^a Nella teoria dei linguaggi formali, una grammatica formale è una struttura astratta che descrive un linguaggio formale in modo preciso, è cioè un sistema di regole che delineano matematicamente un insieme (di solito infinito) di sequenze finite di simboli (stringhe) appartenenti ad un alfabeto anch'esso finito.

^b I *Lindenmayer systems* erano in origine utilizzati per modellare la crescita delle piante.

future arti, ruote o la combinazione delle due cose.

Un altro grande vantaggio dell'utilizzo di questo approccio rispetto a quello del ramo principale della robotica è rappresentato da una maggiore scalabilità potenziale: mediante la codifica di istruzioni strutturali nei geni è possibile far evolvere macchine semplici in altre più complesse fornendo, a seconda dei casi, nessuna o poche informazioni aggiuntive al genoma. Si prenda, ad esempio, un robot descritto da una grammatica formale in modo tale che l'invocazione di una regola di riscrittura rimpiazzi una parte del robot con due o più parti. Il risultato, ad ogni invocazione della regola di riscrittura, è un robot sempre più complesso. In questo modo macchine semplici possono diventare, evolvendosi, più complesse senza incrementare il numero delle informazioni contenute nei genomi.

Benché questo tipo di approccio sia promettente, esistono oggi pochissimi esempi concreti di algoritmi funzionanti. Ciò accade per cinque principali motivi che verranno qui esposti. Innanzitutto occorre puntualizzare che implementare tali algoritmi è un compito estremamente difficile, perché è richiesta la presenza di un robusto simulatore che si attenga fedelmente alla realtà fisica. Secondo, vi è da dire che la potenza computazionale attualmente disponibile, seppur enorme rispetto al passato, è ancora insufficiente a valutare le migliaia o i milioni di candidati robot in competizione per ottenerne uno di discreta qualità. Terzo, un algoritmo evolutivo deve essere concepito in modo tale da essere sufficientemente espressivo da codificare robot di forme diverse ed evolvibile così che piccole mutazioni possano di conseguenza generare robot più complessi e con maggiori abilità. Quarto, non è detto che un robot virtuale possa poi essere costruito attenendosi fedelmente al modello virtuale. Infine, bisogna constatare che i robot realizzati automaticamente in questa maniera sono ancora meno complessi e abili di quelli progettati e costruiti manualmente. Quest'ultimo punto è una sfida aperta, al superamento della quale si sta intensamente lavorando.

2.8 La robotica degli sciami



Figura 2.2: *Swarmrobot Project*, University of Stuttgart

La robotica degli sciami (in inglese, *swarm robotics*), è una branca della robotica che studia gli esseri intelligenti presenti in natura, in modo particolare gli insetti sociali^c, per poter implementare delle macchine in grado di riprodurre parte delle funzioni di tali esseri per l'esecuzione di determinati compiti. Lo scopo di questa scienza è studiare la possibilità di costruire un grande numero di robot semplici in grado di mostrare un comportamento collettivo molto complesso quale quello degli insetti sociali. Ideare una politica di controllo che, quando eseguita da tutti i membri dello sciame, dia luogo ad

^c Gli insetti sociali sono divisi in due ordini; il più antico è quello degli isotteri (termiti) ed è interamente sociale, il secondo è quello degli imenotteri (comprendente vespe, api e formiche), che presentano anche forme sociali.

una sorta di comportamento collettivo desiderato è una delle maggiori sfide in questo ramo della robotica. Ad esempio, è stato dimostrato (si veda [6]) che se si vuole programmare un gruppo di robot con l'obiettivo di farli muovere collettivamente come gli stormi di uccelli o i banchi di pesci, è necessario che ciascun robot bilanci l'attrazione verso quelli nei paraggi con la repulsione verso i robot troppo vicini. Tale necessità nasce dal fatto che se si pesasse troppo l'attrazione, lo sciame potrebbe stringersi creando ingorghi, se invece si fornisse un maggior peso alla repulsione, il gruppo potrebbe sfaldarsi. Questo tipo di approccio nel controllo di gruppi di robot si basa sul principio di auto-organizzazione individuale, in modo tale da non aver bisogno di un entità di controllo centrale. Esso è, infatti, preferibile in robotica, nella quale per via dei limiti nella comunicazione e l'elevato pericolo di guasti potrebbe essere rischioso nominare un robot come leader del gruppo e far dipendere tutti gli altri da quest'ultimo.

L'ottimizzazione dei comportamenti individuali all'interno degli sciame mediante approcci evolutivi e la sperimentazione dei medesimi nei simulatori ha fatto sì che i ricercatori potessero investigare più a fondo comportamenti di gruppo più complessi, come la caccia. Subentra quindi il concetto di *coevoluzione*: l'abilità di un gruppo di prevalere su di un altro genera una reazione evolutiva nel secondo per difendersi dal gruppo dominante. Questo, a sua volta, ha come conseguenza che il primo gruppo debba sviluppare una nuova strategia per difendersi dalla nuova minaccia. La *coevoluzione* comporta quindi la competizione tra gruppi e al contempo la cooperazione tra i singoli membri degli stessi. La robotica evolutiva è stata utilizzata per scoprire sotto quali condizioni nasca la cooperazione e come di conseguenza evolva la comunicazione per supportarla. Recenti studi relativi a popolazioni di robot simulati hanno dimostrato come siano possibili differenti strategie di comunicazione e progressi dal punto di vista evolutivo verso strategie più complesse (si veda [7]). Questo tipo di studi potrebbe fornire utili strumenti allo studio dell'evoluzione delle strategie di comunicazione biologica, in modo particolare il linguaggio umano.

2.9 Robotica modulare

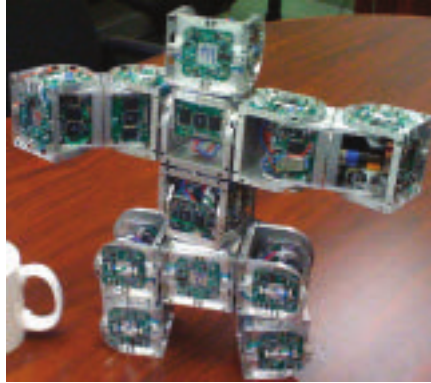


Figura 2.3: Un robot modulare (si veda [8])

Tecnologie avanzate hanno reso possibile la robotica modulare: singoli robot (moduli), possono dinamicamente attaccarsi o staccarsi l'uno dall'altro per creare un robot la cui forma è in continua mutazione. Seppur gli algoritmi evolutivi possano essere utilizzati per ottimizzare i comportamenti di un robot modulare che assuma una forma fissata, recentemente si è iniziato ad utilizzarli per far sì che i robot siano in grado di assemblarsi da soli a partire dalle loro parti costituenti o di riconfigurarsi autonomamente in forme diverse a seconda delle necessità.

2.10 Soft robotics



Figura 2.4: Un *soft robot* (si veda [9])

Fatta eccezione per i veicoli dotati di ruote, i robot sono tipicamente costituiti da parti rigide assemblate insieme, imitando le strutture scheletriche

dei grandi animali e dell'uomo. I progressi nelle scienze dei materiali hanno, tuttavia, reso possibile nuovi tipi di strutture corporee diverse da quelle tradizionali; nuovi robot costruiti mediante parti rigide collegate tra loro da parti elastiche hanno mostrato nuove abilità, come la capacità di ritornare alla loro forma originaria a fronte di una perturbazione.

I robot morbidi stanno prendendo piede come nuova classe di macchine che combinano tra loro parti rigide con materiali continui e morbidi. Queste macchine potrebbero, ad esempio, scorrere attraverso fori o salire lungo le pareti di un muro. Il controllo di queste macchine non è semplice perché il movimento di una parte del robot può propagarsi verso altre parti del corpo in modo inaspettato. Per ovviare al problema si rendono quindi necessari nuovi metodi di ottimizzazione, che potrebbero presto arrivare visto l'improvviso interesse che questa branca della robotica sta suscitando negli studiosi che si occupano di ottimizzazione.

Capitolo 3

Formalismi

La robotica evolutiva è una pratica empirica, tuttavia esistono tre formalismi che stanno contribuendo alla creazione di una teoria per questo campo di studio e sono: la *morfologia computazionale*, la *teoria dei sistemi dinamici* e la *teoria dell'informazione*.

3.1 Morfologia computazionale

Nel capitolo introduttivo si è affermato che la robotica evolutiva è costruita attorno al concetto di *embodied cognition*, secondo il quale i comportamenti intelligenti nascono dalle interazione tra mente, corpo e ambiente. Un suo importante corollario afferma che, avendo a disposizione la corretta struttura fisica, un robot può eseguire un certo compito con una politica di controllo di minore complessità rispetto a quella di un altro robot in possesso di un corpo inappropriato. Ad esempio, un *soft robot* dotato di mani avrà meno difficoltà nell'afferrare oggetti, in quanto la parte interna della mano può adattarsi alla forma degli oggetti senza romperli, in confronto ad un altro robot con mani fatte di materiali rigidi, che deve invece calcolare in che modo afferrare l'oggetto e l'intensità della forza da applicare. In pratica, un robot dotato di un'adeguata morfologia può risparmiare computazioni che altrimenti dovrebbero essere eseguite dalla sua politica di controllo. Il compito da eseguire viene pertanto distribuito tra la mente (sistema neurale),

il corpo (forma, materiali, sensori, attuatori) e l'ambiente. Questo fenomeno, poiché strettamente legato ai materiali e alla forma del robot, non può essere isolato dalla descrizione fisica della macchina.

3.2 Teoria dei sistemi dinamici

La teoria dei sistemi dinamici è un ramo della matematica che viene anche utilizzato per descrivere il comportamento di sistemi dinamici complessi mediante equazioni e altri modelli computazionali. Il suo impiego nel campo della robotica riguarda la creazione di controllori per robot autonomi; questi controllori spesso si materializzano in reti neurali artificiali, che mostrano spontaneamente *pattern temporali* complessi. Gli algoritmi evolutivi sono impiegati per modellare i parametri di queste reti in modo tale che i segnali provenienti dai sensori possano spingerle a cadere nello stato ad attrattore desiderato^a. Una rete neurale potrebbe, ad esempio, essere utilizzata per dare luogo ad un passo ritmico in un robot dotato di gambe.

3.3 Teoria dell'informazione

In un esperimento di robotica evolutiva, il *fitness* di un robot è calcolato su parametri che quantificano il grado di abilità nell'eseguire un certo comportamento, che possono essere, ad esempio, la distanza percorsa camminando o la corretta manipolazione di un oggetto. Con sorpresa, è stato provato che massimizzare alcune misure d'informazione all'interno della rete neurale di

^a Una rete neurale ad attrattori è una rete di nodi, spesso interconnessi in modo ricorsivo, la cui dinamica nel tempo stabilisce un assetamento in un particolare modo di oscillazione. Questo modo di oscillazione può essere stazionario, variante nel tempo o di tipo stocastico ed è chiamato il suo *attrattore*. La descrizione delle reti in reti ad attrattori è utile ai ricercatori poiché permette loro di investigare la teoria dei sistemi dinamici per analizzarne le caratteristiche. Più precisamente, una rete ad attrattori è una rete di N nodi connessi in modo che la loro intera dinamica diventi stabile in uno spazio D dimensionale, dove usualmente $N \gg D$. Ciò assume che non vi sia più input dall'esterno del sistema. La stabilità in questo stato ad attrattore indica che lo stato persiste in una qualche varietà algebrica (es: linea, cerchio, piano, toroide).

robot in evoluzione può condurre a comportamenti utili. Il perché si mostrino comportamenti utili piuttosto che inutili o casuali è un fenomeno, ancora oggi, in gran parte inspiegato. Oltre a fornire un aiuto nella sintesi del comportamento, la teoria dell'informazione si presta anche ad essere adoperata nell'analisi di comportamenti evoluti; il flusso di informazioni^b si presta ad essere utilizzato come metro di giudizio per misurare il modo in cui i robot distribuiscono le informazioni calcolate al loro corpo e/o al loro ambiente. Si pensa quindi che questa tecnica possa in futuro formalizzare il concetto di morfologia computazionale.

^b Con flusso di informazioni si intende il trasferimento di informazioni da una variabile ad un'altra.

Capitolo 4

Sfide

Il campo della robotica evolutiva presenta attualmente un gran numero di problemi irrisolti; tra questi si trovano il trasferimento di robot evoluti da macchine simulate a robot fisici, i problemi di scalabilità e le difficoltà nella definizione di funzioni di *fitness* adeguate per misurare automaticamente i comportamenti.

4.1 Il problema del divario dalla realtà

Sia l'evoluzione biologica sia quella artificiale sono note per sfruttare la potenziale relazione tra l'animale (il robot) e il relativo ambiente per produrre nuovi comportamenti. Per fare un esempio, la leggerezza delle piume, proprietà che in origine doveva molto probabilmente servire per facilitare la regolazione termica, è stata in seguito sfruttata per volare. Analogamente, gli algoritmi evolutivi generano politiche di controllo in grado di sfruttare determinate caratteristiche fisiche; prendendo in considerazione il caso di un robot umanoide munito di una grossa batteria posta sulla schiena, si avrà che gli algoritmi evolutivi produrranno gradualmente politiche di controllo sempre più in grado di facilitare la locomozione del robot sfruttando il peso delle batterie e il moto oscillatorio del centro di massa.

I problemi potrebbero presentarsi nel caso in cui, durante l'ottimizzazione dei robot al simulatore, l'evoluzione artificiale agisca sfruttando semplifica-

zioni o inaccurately relative a come viene simulata la realtà. Le politiche di controllo così evolute potrebbero quindi non riprodurre il comportamento desiderato una volta trasferite dal simulatore ai robot fisici. Per esempio, se nel software di simulazione i segnali provenienti dai sensori sono privi di rumore, una politica di controllo potrebbe evolvere per generare un comportamento basato su un ristretto intervallo di valori provenienti dai sensori; questa politica di controllo, se trasferita ad un robot fisico i cui sensori siano in grado di registrare un insieme di valori più ampio a causa delle limitazioni delle componenti elettroniche o meccaniche, potrebbe generare un comportamento indesiderato. Il fallimento nel trasportare dalla simulazione alla realtà le soluzioni ottenute mediante l'applicazione di algoritmi evolutivi è conosciuto come *reality gap problem* ed è una delle maggiori sfide storiche della robotica evolutiva. In un primo momento si è tentato di ovviare al problema utilizzando campioni provenienti da sensori fisici durante le evoluzioni al simulatore. Un'alternativa possibile consiste nell'introdurre nel simulatore margini di errore non solo alle varie parti del robot ma anche all'ambiente: si introduce rumore ai segnali che provengono dai sensori, agli effetti generati dagli attuatori e alla posizione del robot stesso. In questo modo si vieta agli algoritmi evolutivi di sfruttare le semplificazioni presenti nella realtà simulata. Tuttavia nessuno dei due approcci risulta scalare adeguatamente. Si consideri, ad esempio, un robot il cui compito è maneggiare oggetti sempre più complessi e di forma asimmetrica: per raggiungere tale obiettivo si renderà necessario un numero crescente di campioni provenienti dai sensori per far in modo che l'oggetto sia rilevato con un grado di dettaglio adeguato; ciò si traduce in più frequenti richieste di informazioni (*polling*) ai sensori. Se si aggiunge rumore alla simulazione, ciascuna politica di controllo dovrà essere valutata più volte per fare sì che i controllori evolvano in modo da essere robusti al rumore presente nella simulazione. Robot più complessi richiedono che venga aggiunto rumore a un numero e a un tipo di sensori e di attuatori sempre maggiore, comportando quindi ulteriori valutazioni da eseguire per fare assumere ai controllori un buon grado di robustezza a questo grande numero di sorgenti di rumore.

4.1.1 Un nuovo approccio bidirezionale



Figura 4.1: Robot in grado di guarire dai danni (si veda [10])

Visto il parziale insuccesso dell'approccio unidirezionale, che consiste nel fare evolvere le politiche di controllo all'interno del simulatore per poi trasferirle in un secondo momento al robot fisico, si è pensato di adottarne uno nuovo, bidirezionale, che alterni l'ottimizzazione al simulatore con quella reale. In [10] sono stati impiegati tre algoritmi evolutivi differenti. Il primo è stato utilizzato per ottimizzare una popolazione di simulatori fisici per rappresentare più fedelmente la realtà: il grado di *fitness* di ciascun simulatore consisteva nella capacità di predire il comportamento del robot fisico. Il secondo algoritmo ha invece ottimizzato i comportamenti esplorativi che la macchina fisica doveva eseguire. A questi comportamenti è stato assegnato un alto livello di *fitness* se, quando eseguiti dalla macchina fisica, sono stati in grado di estrarre il maggior numero di nuove informazioni riguardo al modo in cui il robot era in grado di interagire con l'ambiente. Queste nuove informazioni in seguito sono diventate nuovi dati di apprendimento per il primo algoritmo evolutivo. Gradualmente, dopo aver alternato più volte questi due metodi di ottimizzazione, una simulazione fisica che fosse adatta ai dettagli del robot fisico quadrupede che era stato utilizzato nell'esperimento sarebbe emersa automaticamente. Il terzo algoritmo evolutivo poi, sfruttando questi simulatori, fa evolvere le politiche di controllo del robot. È stato dimostrato che gran parte dei comportamenti fatti evolvere in questa maniera sono stati in grado di essere trasferiti dalla simulazione alla realtà.

Questo nuovo approccio presenta quindi un vantaggio rispetto ai precedenti: il robot ora dovrebbe essere in grado di guarire da un danno fisico come, ad

esempio, la separazione meccanica di uno dei quattro arti. Se gli venisse arrecato tale danno, il robot non potrebbe percepirlo direttamente ma di certo ci sarebbero cambiamenti nei valori in ingresso forniti dai sensori. Questi cambiamenti sarebbero quindi automaticamente rilevati e integrati dal primo algoritmo evolutivo nelle nuove simulazioni, dove un robot dotato di tre arti andrebbe gradualmente a sostituire il robot originario, con quattro arti. Le nuove simulazioni, a loro volta, verrebbero utilizzate per produrre nuove politiche di controllo per il robot danneggiato in modo da compensare automaticamente la perdita dell'arto.

Recentemente (si veda [11]) è stato proposto un nuovo tipo di approccio al problema. Tale consiste nel trasferire alla macchina fisica le politiche di controllo evolute durante le simulazioni per poi misurare il divario tra il comportamento atteso (quello simulato) e quello realmente ottenuto. Replacando il tutto per diversi controllori e utilizzando le misure effettuate, si crea poi un modello in grado di predire il divario delle politiche di controllo che devono ancora essere validate sulla macchina fisica. Segue poi un processo di ottimizzazione volto a massimizzare il comportamento desiderato nella simulazione e a minimizzare il divario predetto, in quanto si richiedono politiche di controllo che generino il comportamento richiesto nel robot simulato e auspicabilmente anche in quello fisico. Questo tipo di approccio cerca di risolvere nel migliore dei modi quello che appare come un compromesso tra l'efficienza e la trasferibilità dei comportamenti: più il robot risulta efficiente nell'esibire un comportamento desiderato più è probabile che quel comportamento non sia poi effettivamente trasferibile alla macchina fisica. Ad esempio, se al simulatore si richiedesse una veloce locomozione su arti, risulterebbe preferibile correre al posto di camminare; tuttavia, è noto che un robot, per correre senza cadere, necessita di un'adeguata politica di controllo in grado di gestire attentamente il moto del centro di massa. Se la distribuzione della massa al simulatore e nella realtà mostrano anche solo lievi differenze, è probabile che il robot non sia poi in grado di correre correttamente, mentre invece è probabile che il robot riesca comunque a camminare perché in questo caso la distribuzione della massa del robot risulta essere meno rilevante.

Tutte le soluzioni al problema finora espone presuppongono che venga

trasferita alla macchina fisica solo la politica di controllo. Due studiosi, Lipson e Pollack, cercando una nuova soluzione (si veda [12]), hanno pensato di integrare una simulazione di robotica evolutiva con una tecnologia che preveda un rapido sviluppo di prototipi, in modo da automatizzare sia la progettazione sia la produzione dei robot. Inizialmente hanno fatto evolvere la forma corporea e le politiche di controllo di robot formati da insiemi connessi di attuatori lineari; successivamente, le parti meccaniche del candidato migliore sono state stampate su plastica e assemblate a mano insieme ai circuiti, ai motori e alle batterie. La maggior parte dei robot così prodotti sono stati quindi in grado di riprodurre i vari tipi di movimento così come mostrati al simulatore.

4.2 Calcolo combinatorio

Gli algoritmi evolutivi, per svolgere il loro compito, effettuano un alto numero di valutazioni per ogni robot che si voglia far evolvere per essere adatto ad un determinato ambiente. Basandosi, dunque, sul calcolo combinatorio, questi algoritmi richiedono un numero di valutazioni che cresce esponenzialmente con il numero di parametri utilizzati per descrivere l'ambiente in cui il robot deve svolgere il proprio compito. Per esempio, un robot creato per afferrare m oggetti differenti sotto n condizioni di luce ambientale richiederà un numero di valutazioni pari a $m \times n$. Prendendo un ambiente descritto da p parametri, ciascuno dei quali ha s possibili configurazioni diverse, allora il numero di valutazioni necessarie è s^p . Di solito, poi, non si fa evolvere un solo robot, bensì una popolazione, comportando quindi un ulteriore incremento nel numero di valutazioni da effettuare. Questo costituisce un grande problema ancora irrisolto in quanto le capacità di calcolo oggi disponibili, seppur enormi rispetto al passato, sono comunque generalmente insufficienti. Una soluzione al problema potrebbe arrivare nei prossimi anni se, nel frattempo, gli studi e le ricerche relative alla computazione quantistica saranno stati in grado di produrre computer quantistici funzionanti. Ritornando al presente, una soluzione possibile potrebbe provenire dall'applicazione alla robotica dei principi della

coevoluzione^a. Se si considerano, ad esempio, due popolazioni in competizione tra loro, una formata da robot e l'altra dagli ambienti in cui devono svolgere i loro compiti, i robot evolveranno per essere in grado di adempiere ai loro incarichi negli ambienti appartenenti alla suddetta popolazione e, a loro volta, gli ambienti evolveranno in modo da vanificare le nuove abilità dei robot che si stanno evolvendo. Questa tecnica è del tutto analoga al meccanismo biologico in base al quale la preda si evolve per eludere il predatore e al contempo il predatore cerca nuovi modi per catturare la preda. Le potenzialità di questo nuovo approccio potrebbero portare, in futuro, ad avere robot in grado di affrontare un sottoinsieme degli ambienti che potrebbero incontrare una volta fabbricati e utilizzati nel mondo reale.

4.3 Il concetto di evolvibilità

Nel paragrafo precedente si è parlato dei problemi di complessità computazionale che si devono affrontare quando si tratta di robotica evolutiva. Fare evolvere tutti gli aspetti di un robot risulta quindi essere un problema di ottimizzazione troppo grande da affrontare con le tecniche tradizionali. Ci si è chiesti come faccia l'evoluzione biologica ad affrontare il problema e la risposta è racchiusa nel concetto di *evoluzione dell'evolvibilità*: si afferma che una specie possiede un alto livello di evolvibilità se è in grado di adattarsi più rapidamente ai cambiamenti nell'ambiente rispetto ad una specie simile con minore evolvibilità.

Uno degli obiettivi della robotica evolutiva e, in generale, del campo della computazione evolutiva, è creare algoritmi evolvibili in modo incrementale. Piuttosto che ottimizzare indipendentemente i parametri individuali di una soluzione proposta, tali algoritmi dovrebbero essere in grado di scoprire rapi-

^a La coevoluzione è definita come il processo di evoluzione congiunto di due o più specie che appartengono alla stessa comunità e che interagiscono tra loro tanto strettamente da costituire ciascuna un forte fattore selettivo per l'altra (o le altre). Il risultato è che le specie si condizionano a vicenda. Esistono tre tipi di rapporto tra le specie in coevoluzione e sono: predatorio (preda e predatore), parassitico (ospite e parassita) e simbiotico (ospite e simbiote).

damente utili *pattern* di aggregazione tra le soluzioni proposte, che saranno elaborate di conseguenza. Si è dimostrato che i genomi che codificano grammatiche formali, ad esempio, producono robot con strutture regolari e che tali genomi risultano essere più evolvibili rispetto ad altri che producono strutture irregolari. Analogamente, un algoritmo evolutivo in grado di produrre *pattern* regolari è stato utilizzato nel processo di evoluzione di reti neurali artificiali per robot e si è infatti dimostrato come tali reti siano in grado di trovare più rapidamente i comportamenti richiesti rispetto ad altri metodi evolutivi che non producono strutture regolari. Visto il successo, si è pensato di estendere l'utilizzo di questo algoritmo anche alla struttura fisica del robot (si veda [4]).

Il problema ancora da risolvere riguarda la progettazione di algoritmi evolutivi che riescano a riorganizzare le rappresentazioni genetiche per ottimizzare l'evolvibilità e, di conseguenza, generare macchine complesse adattive in tempi ragionevoli.

4.4 La progettazione delle funzioni di fitness

La corretta evoluzione di controllori per robot intelligenti e autonomi dipende essenzialmente dalla formulazione di adeguate funzioni di *fitness* che riescano a riconoscere comportamenti utili e intelligenti senza che siano specificati a priori i dettagli implementativi (di basso livello) di tali comportamenti. La funzione di *fitness* è quindi l'elemento basilare attorno al quale un'applicazione di computazione evolutiva si articola, in quanto determina quali soluzioni all'interno di una popolazione siano le migliori nel risolvere il particolare problema in oggetto. Nel tentativo di fare evolvere controllori in grado di svolgere compiti complessi per robot autonomi, la funzione di *fitness* spesso costituisce il fattore limitante al raggiungimento di buoni risultati. Riuscire a definire una funzione di *fitness* che sia al contempo semplice, espressiva, efficace e a basso costo computazionale è, infatti, anche nel caso di problemi relativamente poco complessi, un'impresa ardua. Una funzione di *fitness* mal formulata potrebbe quindi tradursi in comportamenti indesiderati. Si prenda il caso di un robot che debba muoversi su una superficie piana

limitata, sulla quale sono presenti ostacoli, facendo attenzione a non urtarli: una funzione di *fitness* errata potrebbe far evolvere il robot in modo tale da farlo rimanere fermo o muovere in maniera circolare su sé stesso; in questi casi, anche se il requisito che il robot non colpisca gli ostacoli è soddisfatto, si ha che il comportamento ottenuto non è quello desiderato.

Malgrado lo sviluppo di una piattaforma di ricerca sperimentale in grado di supportare l'evoluzione di robot autonomi rimanga una pratica decisamente complicata, alcune delle preoccupazioni e delle critiche iniziali relative alla *embodied cognition* e al passaggio da robot virtuali a macchine fisiche sono state risolte. Esistono infatti alcuni esempi di piattaforme che sono riuscite con successo a dimostrare come sia possibile produrre controllori funzionanti per robot fisici. Sono presenti, inoltre, alcuni esempi di controllori che, fatti evolvere al simulatore, una volta trasferiti al robot hanno dato luogo a comportamenti desiderati. Uno dei traguardi conquistati dalla robotica evolutiva è la scoperta del fatto che strutture di controllo evolvibili per robot (come le reti neurali) possono essere impiegate per creare comportamenti funzionali nei robot autonomi fisicamente realizzati.

Quello che non si è riusciti ad ottenere è la possibilità di estendere i metodi evolutivi per generare controllori che mostrino comportamenti autonomi complessi. In particolare, nessuno studio in robotica evolutiva ha finora dimostrato che sia possibile fare evolvere controllori complessi nel caso generico o comunque per compiti generici. I problemi collegati alla valutazione del grado di *fitness* sono tutt'ora praticamente irrisolti. Gran parte della ricerca presentata nei libri impiega alcune forme di funzioni di *fitness*, formulate a mano e impiegate per compiti specifici, che definiscono in modo approssimativo come raggiungere il compito o il comportamento richiesto. L'obiettivo che la robotica evolutiva cerca di conseguire fin dalla sua nascita è, tuttavia, di fare il minor numero possibile di assunzioni riguardo alla forma fisica finale del robot o al tipo di comportamento che deve essere generato. Vista la difficoltà nel progettare una funzione di *fitness* che trovi buone soluzioni senza farle prediligere soluzioni particolari, si è provato ad aggirare il problema eliminando del tutto l'utilizzo delle funzioni di *fitness*. Un esempio di come ciò sia possibile proviene dalla *novelty search*, che sarà discussa nel prossimo

paragrafo.

4.5 La novelty search

La *novelty search* è un nuovo tipo approccio alla ricerca che trae ispirazione dalla propensione illimitata dell'evoluzione naturale a scoprire continuamente cose nuove. Piuttosto che convergere verso un'unica soluzione ottima, la natura scopre un'ampia varietà di modi differenti per far fronte alle sfide della vita.

Come astrazione della scoperta della novità in natura, la *novelty search* premia direttamente il fatto di comportarsi diversamente al posto di ricompensare i progressi effettuati verso il raggiungimento di un obiettivo finale, che costituisce l'approccio tradizionale alla ricerca.

Scendendo nel dettaglio, la ricerca evolutiva viene tipicamente accompagnata dalla misurazione del divario tra il candidato corrente e l'obiettivo. Tale divario determina quindi se il candidato debba essere premiato e utilizzato per produrre nuove generazioni, o scartato. Contrariamente, la *novelty search* non misura mai i progressi ma premia semplicemente gli individui che sono differenti.

Si può quindi affermare che questo nuovo approccio, piuttosto che perseguire un obiettivo, cerca la novità. Con sorpresa, a volte non puntare direttamente al raggiungimento di un obiettivo porta a raggiungerlo in maniera più rapida e consistente. Anche se può sembrare strano, si ha che, nel trattare alcuni problemi, ignorare del tutto l'obiettivo potrebbe dare risultati migliori di quelli che si sarebbero ottenuti cercando di raggiungerlo. La spiegazione di questo fenomeno deriva dal fatto che talvolta i passaggi intermedi che si effettuano per raggiungere l'obiettivo si discostano dall'obiettivo stesso.

La validità di questo approccio è provata anche dal fatto che, mediante il suo utilizzo, si è riusciti con successo a fare camminare dei robot bipedi al simulatore, un problema noto in robotica per via della sua grande difficoltà.

Conclusioni

Una delle principali caratteristiche che rendono l'approccio della robotica evolutiva adatto allo studio di comportamenti adattativi nei sistemi naturali e artificiali è la possibilità di fare affidamento su di un processo in grado di organizzarsi autonomamente. Infatti, utilizzando l'evoluzione artificiale, il ruolo del progettista potrebbe limitarsi alla stesura delle sole specifiche relative alla funzione di *fitness*, anche se tale compito, come si è mostrato nei paragrafi precedenti, non risulta affatto semplice e privo di problemi. Non è infatti necessario che il comportamento richiesto, anche se complesso, sia specificato mediante la sua suddivisione in comportamenti più semplici perché gli individui promossi dalla funzione di *fitness* sono tutti in grado di mostrare il comportamento desiderato, frutto dell'interazione tra il robot e l'ambiente, nella sua totalità. Gli esperimenti di robotica evolutiva, nei quali i robot sono liberi di scegliere autonomamente il modo in cui risolvere i loro compiti attraverso l'interazione con l'ambiente, potrebbero così rivelarsi utili alla comprensione di come gli organismi presenti in natura siano in grado di produrre comportamenti adattativi.

Le applicazioni della computazione evolutiva nel campo della robotica sono oggi numerose e rivestono un ruolo importante nel tentativo di risolvere i problemi storicamente irrisolti ad essa legati. Nei primi vent'anni trascorsi dalla sua nascita, la robotica evolutiva è sempre rimasta un po' in ombra, pur avendo prodotto alcuni risultati promettenti. Anche se non è ancora stata in grado di fare evolvere un robot a tal punto da renderlo migliore di uno prodotto utilizzando i comuni metodi di ottimizzazione della robotica tradizionale, la robotica evolutiva è comunque riuscita a produrre una più

ampia varietà di robot e in maniera del tutto automatizzata. Gli studiosi di robotica, nel corso degli anni, hanno dato vita ad alcune centinaia di robot progettati e costruiti a mano, dalla forma umanoide o simile a quella degli animali. I metodi evolutivi hanno invece prodotto milioni di robot diversi tra loro e in grado di svolgere svariati compiti come camminare o afferrare oggetti. Si auspica che l'analisi della moltitudine dei possibili modi in cui i robot sono in grado di svolgere questi compiti possa portare alla formulazione di nuove idee su come poter fare scalare i robot per far loro svolgere compiti più complessi. Una sfida aperta consiste nel creare robot in grado di vivere e lavorare in sicurezza a fianco dell'uomo. I recenti progressi in campi esterni alla robotica stanno fornendo nuove opportunità per mostrare i vantaggi dell'adozione di questo nuovo approccio evolutivo. Dalle scienze dei materiali provengono, ad esempio, tecnologie abilitanti per la creazione di robot flessibili e modulari, anche se la progettazione di tali robot, così come lo sviluppo di adeguate politiche di controllo, non è né semplice né intuitiva. Gli sviluppi recenti nell'ambito della fabbricazione automatizzata hanno consentito la progettazione e la fabbricazione di robot a livelli mai raggiunti in precedenza. Algoritmi evolutivi e simulatori all'avanguardia stanno rendendo possibile l'ottimizzazione simultanea di tutti gli aspetti della struttura fisica di un robot e della sua politica di controllo utilizzando risorse computazionali e tempi di calcolo più ragionevoli rispetto al passato. Infine, le nuove scoperte nei campi della biologia evolutiva e della neuroscienza sono insegnamenti utili alla creazione di macchine sempre più complesse, autonome e adattative.

Nei prossimi anni i robot sono destinati a diffondersi tra le persone così come è accaduto in passato con gli elettrodomestici e i computer. L'approccio della robotica evolutiva, che si ispira ai meccanismi evolutivi presenti in natura, al problema della progettazione e della fabbricazione di tali robot è di certo promettente: non è forse vero che l'evoluzione biologica ha prodotto le macchine più autonome, adattative, complesse e intelligenti che conosciamo, ovvero noi umani?

Bibliografia

- [1] A. Roli, *Evolutionary robotics* slides. 2013.
<http://campus.unibo.it/128653>
- [2] J. C. Bongard, *Evolutionary Robotics*. Communications of the ACM, Vol. 56 No. 8, Pages 74–83, August 2013.
- [3] C. G. Langton, *Artificial Life: Proceedings of an interdisciplinary workshop on the synthesis and simulation of living systems*. Addison-Wesley, 1989.
- [4] J. E. Auerbach, J. C. Bongard, *On the Relationship Between Environmental and Morphological Complexity in Evolved Robots*. Proceedings of the 2012 Genetic and Evolutionary Computation Conference, Pages 521–528, July 2012.
- [5] J. C. Bongard, *Morphological change in machines accelerates the evolution of robust behavior*. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 108 No. 4, Pages 1234–1239, January 2011.
- [6] C. W. Reynolds, *Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model*. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol. 21 No. 4, Pages 25–34, July 1987.
- [7] S. Wischmann, D. Floreano, L. Keller, *Historical contingency affects signaling strategies and competitive abilities in evolving populations of simulated robots*. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 109 No. 3, Pages 864–868, January 2012.

-
- [8] M. Yim, W.-M. Shen, B. Salemi, D. Rus, M. Moll, H. Lipson, E. Klavins, G. S. Chirikjian, *Modular Self-Reconfigurable Robot Systems (Grand Challenges of Robotics)*. IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 14 No. 1, Pages 43–52, March 2007.
- [9] J. Rieffel, F. Saunders, S. Nadimpalli, H. Zhou, S. Hassoun, J. Rife, B. Trimmer, *Evolving Soft Robotic Locomotion in PhysX*. Proceedings of the 11th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation Conference: Late Breaking Papers, Pages 2499–2504, July 2009.
- [10] J. C. Bongard, V. Zykov, H. Lipson, *Resilient Machines Through Continuous Self-Modeling*. Science, Vol. 314, Pages 1118–1121, November 2006.
- [11] S. Koos, J.-B. Mouret, S. Doncieux, *The Transferability Approach: Crossing the Reality Gap in Evolutionary Robotics*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 17 No. 1, Pages 122–145, February 2013.
- [12] H. Lipson, J. B. Pollack, *Automatic design and manufacture of robotic lifeforms*. Nature, Vol. 406, Pages 974–978, August 2000.

Ringraziamenti

Ringrazio i miei genitori, che mi hanno permesso di frequentare l'università e si sono sempre mostrati fiduciosi nei miei confronti. Ringrazio Greta, la mia ragazza, che mi ha sempre sostenuto. Ringrazio i miei amici, i miei compagni di corso e tutte le persone che durante questi tre anni universitari hanno creduto nelle mie capacità, talvolta sovrastimandole. Ringrazio infine tutti i docenti del mio corso di studio, in modo particolare il relatore Andrea Roli per la gentilezza e la disponibilità che mi ha sempre mostrato.