

Dalla swarm robotics ai super-organismi: sviluppo di modelli e meccanismi di adattamento online per lo sviluppo di colonie di robot caratterizzati da eterogeneità fenotipica

Introduzione

Gli attuali sistemi di *swarm robotics* mancano di un livello sufficiente di complessità e capacità di adattamento per portare a termine con successo missioni nel mondo reale.

Le attuali tecnologie robotiche mettono a disposizione micro-robot che possono formare una colonia di robot a basso costo; tuttavia, questi dispositivi non possono essere programmati in modo convenzionale, principalmente a causa della limitatezza delle risorse computazionali che offrono.

La metafora dei super-organismi, quali le colonie di formiche o gli olobionti (meta-organismi composti da organismi di vario tipo, come per esempio gli esseri umani con il loro microbiota), suggerisce di esplorare concetti biologici e cibernetici come la plasticità fenotipica, la creazione di novità e la composizione funzionale di moduli computazionali adattativi per superare tali limiti e progettare gruppi (*swarm*) di robot in grado di adattarsi a situazioni e ambienti diversi.

L'obiettivo di questo progetto è quello di studiare questi modelli e meccanismi in gruppi di micro-robot controllati da modelli di rete (per esempio, reti booleane, reti di neuroni artificiali e reti a *nanowire*).

Descrizione del progetto

Le colonie di organismi biologici come formiche, api e termiti, sono da sempre fonte di ispirazione per il campo della robotica e dell'intelligenza artificiale (AI) in generale, in quanto capaci di esibire comportamenti complessi benché costituite da individui con capacità cognitive molto limitate. In particolare, i cosiddetti super-organismi [Wheeler] mostrano comportamenti emergenti complessi e coordinati al punto da essere considerati singoli individui, sia dal punto di vista evolutivo che fisiologico [Zambonelli]. Inoltre, super-organismi composti da organismi che non condividono la stessa struttura genetica, denominati olobionti [Margulis & Fester], sono di particolare interesse per le applicazioni in robotica poiché rappresentano un esempio efficace di gruppi di entità eterogenee capaci di cooperare e adattarsi. In generale, i super-organismi sono in grado di adattare il loro comportamento alle specifiche condizioni ambientali, che possono anche modificarsi nel tempo. L'identificazione dei meccanismi generali alla base di questi sistemi, ancora poco conosciuti, può fornire ai progettisti di sistemi robotici strumenti per aumentare le capacità di tali sistemi.

La *swarm robotics* (SR) può essere considerata una prima approssimazione dei super-organismi naturali nel campo della robotica. Uno dei principali limiti delle attuali applicazioni della SR è che il grado di complessità dei comportamenti è ben lungi dall'essere adeguato alle applicazioni del mondo reale. Ciò è particolarmente importante per le applicazioni in ambienti ostili all'uomo, come per esempio zone colpite da un terremoto, in cui gruppi di semplici (micro-)robot devono svolgere una determinata missione. All'uopo è necessario ideare meccanismi di adattamento *online* (cioè, sul campo, mentre i robot agiscono e operano nell'ambiente della missione) sia a livello individuale sia di gruppo per sfruttare la complessità dei comportamenti dei gruppi di robot e la loro capacità di adattare in modo flessibile il loro comportamento in base ai cambiamenti ambientali.

Riteniamo che i meccanismi chiave che consentono ai super-organismi di raggiungere comportamenti di alto livello di complessità siano da ricercarsi nell'eterogeneità fenotipica degli individui (osservabile ad esempio sotto forma di diverse morfologie e specializzazione comportamentale [O'Shea-Wheller et al.]) e nella possibilità di sfruttare opportunisticamente i comportamenti e le capacità di elaborazione delle informazioni degli altri agenti o organismi [Margulis & Fester], in un modello di interazione che ricorda quello di una rete dinamica di nodi computazionali, eventualmente diversi, che si scambiano informazioni per raggiungere obiettivi condivisi o comunque con sotto-obiettivi comuni.

Visto ad un alto livello di astrazione, questo fenomeno è la somma non lineare degli effetti di:

- I. plasticità fenotipica (cioè la capacità di esibire comportamenti diversi in risposta ad ambienti diversi);
- II. la creazione di novità (ovvero l'attribuzione di un significato diverso da quello attribuito dal progettista umano a nuovi tipi di segnali che emergono dall'interazione tra questi sistemi e l'ambiente);
- III. la composizione funzionale dei moduli computazionali adattativi (cioè la combinazione delle capacità dei robot).

Nel progetto si intende esplorare diversi meccanismi e modelli per conferire plasticità fenotipica e allo stesso tempo consentire lo scambio di informazioni tra robot in modo da generare comportamenti coordinati di complessità paragonabile a quella di un singolo individuo dotato di elevate capacità cognitive [Canciani et al.].

Lo scambio di informazioni è un aspetto cruciale di questo approccio: i robot appartenenti alla colonia non devono necessariamente essere "Agenti Autonomi Completi" [Pfeifer & Scheier], cioè non devono essere muniti di tutto ciò che serve per svolgere un compito. Saranno invece i gruppi di robot, emergenti attraverso lo scambio di segnali, e la collaborazione tra loro a più livelli, a dare origine al comportamento o ai comportamenti complessivi di interesse.

Questo può essere visto come un cambio di paradigma rispetto alle tecniche allo stato dell'arte per la progettazione di applicazioni robotiche, in particolare alla SR, e apre la strada all'emergere di dinamiche ricche e complesse tipiche di molti fenomeni biologici in

un contesto artificiale: l'endosimbiosi (come quella che si verifica con cellule e mitocondri), parassiti e altre forme di interazione che si verificano negli organismi multicellulari in generale, solo per citarne alcuni.

Allo stesso tempo l'applicazione di modelli di interazione e meccanismi di adattamento con ispirazione biologica (multicellularità, plasticità fenotipica, ecc.) in robotica può essere un mezzo per verificare e formulare nuove ipotesi in ambito biologico.

Dal punto di vista cibernetico, le capacità di adattamento di queste colonie robotiche è corrisponde alla creazione di un modello interno del mondo esterno. In particolare, la visione proposta in questo progetto ha l'obiettivo di tradurre nel campo della robotica i concetti di creazione di novità e nuovi stati semantici [Ashby; Cariani; Pask].

In sintesi, questo approccio ha l'obiettivo di unificare le proprietà che si possono trovare nei campi dell'informatica, dell'IA, della biologia e della cibernetica con l'obiettivo di consentire ai singoli nodi computazionali (robot) di essere in grado di auto-adattarsi e regolare le interazioni tra di loro.

Piano delle attività

Le attività previste per i 12 mesi di questo progetto hanno lo scopo di effettuare studi esplorativi nella direzione descritta in precedenza. In particolare, si prevedono le seguenti attività:

T1. Studio di meccanismi di adattamento capaci di conferire contemporaneamente specializzazione comportamentale e plasticità.

Come primo meccanismo di controllo per i robot, nel progetto saranno utilizzate le reti booleane (BN, da *Boolean networks*), che combinano efficacemente semplicità e capacità espressiva. Inoltre, l'uso delle BN è supportato da risultati promettenti riguardanti la *BN-robotics* [Roli et al.]. Nel progetto saranno comunque considerati altri meccanismi di controllo simili, come le reti a neuroni artificiali e le reti a *nanowire*, che si sono recentemente dimostrate efficaci come sistemi di *reservoir computing* [Milano et al.]. Una prima proposta per un meccanismo di adattamento online nella BN-robotics è già stata descritta in [Braccini et al.]. Esperimenti, prevalentemente in simulazione, saranno volti ad indagare le potenzialità di questo meccanismo nel contesto proposto.

Periodo: M1-M6.

T2. Studio di meccanismi di adattamento presenti in natura, con particolare riferimento alla plasticità fenotipica e ai fenomeni di simbiosi.

L'obiettivo di questa attività è quello di trovare meccanismi alternativi o complementari a quelli sviluppati in T1.

Periodo: M1-M3.

T3. Studio di modelli semplificati di interazione.

Con lo scopo di affrontare la complessità di questi sistemi in modo progressivo, il primo passo verso la definizione di meccanismi adattativi consisterà nello studio di modelli semplificati di interazione che prevedano l'adattamento di unità computazionali al fine di creare nuovi tipi di segnale, e quindi novità e creazione di significato [Roli & Kauffman].

Ciò è possibile ad esempio attraverso lo studio del concetto di *meta-sensore*. Attraverso diversi meccanismi di adattamento online, nel progetto si studieranno gli effetti dell'introduzione di uno strato computazionale che ha come input tutti i sensori disponibili e che si collega al controller del robot vero e proprio (ovvero il meta-sensore) con lo scopo di fornire ai robot capacità di specializzazione e plasticità comportamentale. Questo meta-sensore funge da strato intermedio tra l'ambiente e il controller del robot vero e proprio e può essere concepito anche come una generalizzazione dello schema percettivo (*perceptual schema*) introdotto da Arkin [Arkin].
Periodo: M4-M9.

T4. Sviluppo e studio di sistemi composti da robot eterogenei.

Successivamente verranno condotti esperimenti in simulazione costituiti da complessità gradualmente crescente: da colonie formate da pochi robot (per esempio, solo due robot) a colonie di numerosi robot eterogenei. Ispirazione principale in questa fase saranno i sistemi biologici che mostrano plasticità fenotipica e i sistemi viventi denominati olobionti.
Periodo: M8-M12.

Riferimenti bibliografici

Arkin, R. (1987) Motor Schema Based Navigation for a Mobile Robot: An Approach to Programming by Behavior'. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 4, Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 264–71.

Ashby, W. (1969) *Design for a brain: The origin of adaptive behaviour*. John Wiley & Sons.

Blackiston D. et al. (2021) A Cellular Platform for the Development of Synthetic Living Machines'. *Science Robotics*, vol. 6, no. 52, p. eabf1571.

Braccini M. et al. (2020) Online Adaptation in Robots as Biological Development Provides Phenotypic Plasticity. *ArXiv Preprint ArXiv:2006.02367*.

Canciani M. et al. (2019) Revising the Superorganism: An Organizational Approach to Complex Eusociality'. *Frontiers in Psychology*, vol. 10, Dec. 2019, p. 2653.

Cariani P. (1993) To Evolve an Ear. Epistemological Implications of Gordon Pask's Electrochemical Devices'. *Systems Research*, vol. 10, no. 3, pp. 19–33.

Margulis L., Fester R. (1991) *Symbiosis as a source of evolutionary innovation : speciation and morphogenesis*. MIT Press.

Milano, G. et al. (2022) In materia reservoir computing with a fully memristive architecture based on self-organizing nanowire networks. *Nature Materials*, 21.2:195-202.

O'Shea-Wheller T.A. et al. (2021) Functional Heterogeneity in Superorganisms: Emerging Trends and Concepts. *Annals of the Entomological Society of America*, vol. 114, no. 5, pp. 562–74.

Pask G. (1958) Physical analogues to the growth of a concept. *Mechanization of Thought Processes*, Symposium. Vol. 10. 1958.

Pfeifer R., Christian S. (2001) *Understanding Intelligence*. MIT Press.

Roli, A., Kauffman, S. A. (2020). Emergence of organisms. *Entropy*, 22(10), 1163.

Roli, A., Manfroni, M., Pinciroli, C., Birattari, M. (2011). On the design of Boolean network robots. In *European Conference on the Applications of Evolutionary Computation* pp. 43-52. Springer, Berlin, Heidelberg.

Wheeler W.M. (1911) The Ant-Colony as an Organism. *Journal of Morphology*, vol. 22, no. 2, pp. 307–25.

Zambonelli F. (2015) Engineering Self-Organizing Urban Superorganisms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 41, pp. 325–32.