

Swarm Cognition: comportamenti collettivi, auto-organizzazione e processi cognitivi

Vito Trianni[†], Elio Tuci[‡]

[†]*IRIDIA-CoDE - Université Libre de Bruxelles, Belgium*

[‡]*Department of Computer Science, Aberystwyth University, UK*

Abstract

In studi recenti, è stato possibile identificare alcuni dei processi di base della cognizione nel comportamento di gruppi di animali, da sciame di api a società umane. Non a caso, le grandi colonie di insetti sono considerate dei “super-organismi” che presentano comportamenti cognitivi frutto delle interazioni tra i singoli insetti e tra gli insetti e l’ambiente circostante. Il recente progresso in discipline come le neuroscienze, la psicologia cognitiva, l’etologia sociale e la swarm intelligence ha permesso di riconoscere e modellare alcuni comportamenti collettivi come processi cognitivi veri e propri, spingendosi fino a tracciare un parallelo tra il comportamento degli insetti sociali e le dinamiche neurali. In questo articolo, discutiamo le premesse teoriche e le basi biologiche della *Swarm Cognition*, che si propone come un nuovo approccio allo studio della cognizione in quanto fenomeno “distribuito”. Discuteremo alcuni casi di studio disponibili in letteratura, e in particolare ci soffermeremo sulle potenzialità offerte dall’approccio sintetico allo studio della Swarm Cognition, tramite l’utilizzo di simulazioni ad agenti e di sistemi robotici collettivi.

Keywords: Swarm Cognition, swarm intelligence, etologia sociale, auto-organizzazione, vita artificiale

1 Introduzione

Da un punto di vista prettamente sintattico, *Swarm Cognition* è la giustapposizione di due concetti relativamente indipendenti che da una parte evocano la varietà dei comportamenti collettivi che si possono osservare in gruppi di animali (e.g., sciame, branchi, stormi), e dall’altra riportano alla complessità dei processi cognitivi propri del sistema nervoso centrale. In pratica, questi sistemi apparentemente molto diversi fra loro sono l’oggetto di studio di un nuovo approccio alle scienze cognitive, che cerca i meccanismi fondanti della cognizione nelle interazioni sociali e nei processi auto-organizzativi. Da qualche anno, alcuni ricercatori afferenti a diverse discipline scientifiche sostengono che, ad un certo livello di descrizione, i meccanismi che generano i comportamenti collettivi osservati in società animali possono rivelarsi estremamente utili come strumenti per identificare i principi operativi della cognizione. In altri termini, questi studi sostengono che le interazioni tra animali sociali sono funzionalmente simili alle interazioni tra neuroni. Di conseguenza, è possibile tracciare un parallelo tra i

comportamenti collettivi del gruppo e i processi cognitivi del singolo individuo (Couzin, 2009; Marshall and Franks, 2009). L'auto-organizzazione è l'elemento comune che permette a unità semplici (formiche, api o neuroni) di generare complesse strutture spazio-temporali.

Nell'approccio Swarm Cognition, la cognizione è intesa come un processo distribuito che si estende al di là del singolo individuo, inglobando quindi sistemi sociali e comportamenti collettivi (Goldstone and Gureckis, 2009). Per esempio, è possibile parlare di cognizione riguardo al processo decisionale di una colonia di formiche in cerca di un nuovo sito di nidificazione: la colonia valuta le differenti possibilità, ne compara le qualità ed effettua una scelta ottimale. Il tutto senza che nessun individuo della colonia abbia informazioni su ciascuna delle differenti possibilità (Franks et al., 2003). In questo approccio distribuito, la cognizione riguarda tanto il livello comportamentale quanto il livello di elaborazione dell'informazione. Nei sistemi biologici, questi due aspetti sono profondamente interconnessi, per cui si rende necessario un approccio olistico e inclusivo, che permetta di esplorare in parallelo sia i fenomeni comportamentali che i meccanismi sottostanti i processi cognitivi. Per questo motivo, la Swarm Cognition studia la cognizione come un fenomeno distribuito ed emergente dall'auto-organizzazione di un insieme di unità semplici in interazione con la propria nicchia ecologica.

La ricerca condotta all'interno dell'approccio Swarm Cognition è intrinsecamente inter-disciplinare. Ci sono due possibili metodologie per affrontare le tematiche proposte: comparativista e sintetica. Il metodo comparativista si basa sul riconoscimento di processi cognitivi comparabili in sistemi anche molto differenti tra loro, come colonie di insetti e popolazioni di neuroni. L'obiettivo è quello di identificare dei meccanismi universali che possono produrre determinati processi cognitivi, che quindi abbiano un potere esplicativo a differenti livelli di complessità. Le regole identificate sarebbero abbastanza generali da permettere una comprensione profonda dei meccanismi e dei processi cognitivi, in modo da poter sfruttare questa conoscenza per la progettazione di sistemi artificiali intelligenti basati su cognizione distribuita. Il metodo sintetico, invece, effettua un percorso opposto, che è poi quello caratteristico degli studi sulla vita artificiale (Langton, 1988): si generano sistemi artificiali dotati di capacità cognitive, senza necessariamente una plausibilità biologica. L'obiettivo è quello di creare dei modelli minimali del processo cognitivo sotto osservazione e di studiarne le caratteristiche in modo da distillarne i meccanismi basilari. Le regole così identificate devono quindi essere confrontate con quelle pertinenti ai sistemi naturali, secondo una metodologia comparativista, in modo da tentare una generalizzazione dei risultati ottenuti. Chiaramente, sistemi naturali e artificiali potrebbero essere profondamente incompatibili a livello microscopico (individuale). Tuttavia, a livello macroscopico (di sistema), dovrebbe essere possibile identificare caratteristiche comuni che permettano di isolare i meccanismi sfruttati in entrambi i casi per produrre la risposta cognitiva osservata. Ciò costituisce il maggior risultato scientifico dell'approccio Swarm Cognition.

L'articolo è organizzato come segue. Nella Sezione 2 descriveremo brevemente il quadro scientifico che supporta l'approccio Swarm Cognition. Nella Sezione 3 presenteremo due studi in cui si traccia un parallelo tra comportamenti collettivi e processi cognitivi. Nella Sezione 4 presentiamo l'approccio sintetico e proponiamo un modello specifico: la robotica collettiva o swarm robotics. La Sezione 5 chiude l'articolo.

2 Auto-organizzazione, Swarm Intelligence e Swarm Cognition

La Swarm Cognition trova le sue origini negli studi dei processi di auto-organizzazione, osservabili sia in sistemi fisici e fisico-chimici che biologici. L'auto-organizzazione si riferisce alla generazione di strutture spazio-temporali in un sistema (e.g., strutture fisiche o sequenze temporali), come risultato emergente delle numerose interazioni tra le componenti del sistema. Queste ultime agiscono in base a semplici regole individuali, che sono eseguite con approssimazione sulla base delle informazioni che possono essere raccolte a livello locale, senza il supporto di alcuna mappa o visione globale del sistema. Meccanismi di retroazione permettono di amplificare gli effetti delle interazioni microscopiche tra individui, e permettono di bilanciare perturbazioni provenienti dall'esterno. I primi studi sull'auto-organizzazione si sono focalizzati soprattutto su sistemi fisici (Nicolis and Prigogine, 1977). In seguito, è stato dimostrato che molti sistemi biologici si basano sull'auto-organizzazione. È ormai ben noto—anche grazie ai molti studi in Swarm Intelligence (Bonabeau et al., 1999)—che alcuni comportamenti in popolazioni di insetti e altri animali sociali sono auto-organizzati (Camazine et al., 2001). In questi sistemi, le capacità cognitive dei singoli individui aumentano il numero e la complessità delle strutture auto-organizzate che è possibile osservare, molto al di là dei sistemi non-biologici (Detrain and Deneubourg, 2006). Infatti, il comportamento del singolo individuo non è determinato da leggi fisico-chimiche, e può quindi variare sotto l'influenza di fattori ambientali o interni alla colonia (ad esempio, tramite ripetute interazioni con altri individui). Di conseguenza, anche l'organizzazione del sistema può cambiare drasticamente in risposta a influenze esterne o interne (Garnier et al., 2007). In questi casi, il sistema auto-organizzativo può essere considerato come un complesso sistema dinamico vicino ad un punto di biforcazione: in seguito alla variazione di alcuni parametri come la temperatura o la concentrazione di sostanze chimiche, il sistema cambia rapidamente la sua struttura spazio-temporale, mostrando ad esempio un diverso comportamento sociale o una nuova struttura fisica. La formazione di queste strutture spesso dipende da fluttuazioni casuali di alcune variabili di stato del sistema, che permettono al sistema di “scegliere” tra le differenti opzioni possibili. Infine, i sistemi auto-organizzativi sono spesso distribuiti su una certa regione dello spazio. Di conseguenza, meccanismi di retroazione positiva permettono di amplificare l'informazione localizzata in alcune parti dell'ambiente e disponibile ad un numero limitato di componenti del sistema, e di trasmettere rapidamente questa informazione al resto del sistema, in modo che esso possa complessivamente reagire alle nuove condizioni.

Le caratteristiche appena descritte sono alla base dell'approccio Swarm Cognition. Se gli insetti sono capaci di recuperare, distribuire e processare le informazioni rilevanti alla sopravvivenza e al benessere della colonia, grazie ad una sofisticata rete di interazioni tra i vari individui (Detrain and Deneubourg, 2006; Garnier et al., 2007), allora è possibile attribuire ad una colonia di insetti delle vere e proprie capacità cognitive, come il risultato emergente di un processo di auto-organizzazione. Il punto di partenza della Swarm Cognition è quindi il riconoscere e studiare le capacità cognitive in sistemi sociali osservabili in Natura (Passino et al., 2008; Turner, 2011). L'obiettivo ultimo è l'identificazione di

meccanismi universali che spieghino comportamenti cognitivi a differenti livelli di complessità biologica. Come vedremo, grazie all'identificazione di regole generali la Swarm Cognition si propone inoltre di progettare sistemi distribuiti intelligenti dotati di capacità cognitive.

3 Processi cognitivi in sistemi naturali: l'approccio comparativo

I processi di ricerca di un luogo adeguato dove nidificare da parte dei api (*Apis mellifera*) e formiche (genere *Temnothorax*) rappresentano i fenomeni naturali che più si prestano ad una interpretazione funzionale basata su concetti derivanti dalle scienze cognitive (e.g., memoria a breve termine, decisione). I fenomeni in sé sono frutto di processi sociali auto-organizzati che si sviluppano attraverso le interazioni e la comunicazione tra le api/formiche, mentre le interpretazioni "cognitive" riguardano il comportamento dello sciame/gruppo inteso come unità funzionale. Da qui nasce il paragone che vede le api/formiche all'interno dello sciame/gruppo come neuroni all'interno del cervello. Questi paragoni sono stati chiaramente illustrati in due distinti lavori scientifici che si focalizzano sul riconoscimento di processi cognitivi in sistemi naturali molto diversi tra loro, come popolazioni di neuroni, di api e di formiche (Passino et al., 2008, 2010; Marshall et al., 2009).

Uno sciame di api appena formatosi per scissione da uno sciame più grande invia le api esploratrici alla ricerca dei luoghi idonei per la costruzione del nuovo alveare. Non appena un sito adeguato viene scoperto, l'ape esploratrice ritorna allo sciame di origine, e inizia la danza per comunicare alle api operaie posizione e qualità del sito. L'intensità della danza è proporzionale alla bontà del sito scoperto, e permette di reclutare altre api esploratrici, che visiteranno il sito per stimarne a loro volta la qualità. Ogni ape esploratrice che abbia trovato un sito adeguato ripete varie volte il percorso da e verso il sito scoperto e la relativa danza, eventualmente reclutando altre api operaie. L'intensità della danza dell'ape esploratrice decresce dopo ogni viaggio, in modo tale che anche la durata del processo di reclutamento da parte dell'ape esploratrice è proporzionale alla bontà del sito scoperto. Il reclutamento avviene nei confronti delle api operaie che aspettano il ritorno delle esploratrici. La loro probabilità di incontrare un ape esploratrice che danza è proporzionale al numero di siti adeguati presenti nella zona dello sciame: più siti adeguati offre l'ambiente, più api esploratrici ritorneranno allo sciame per danzare, maggiore è la probabilità che un ape operaia si imbatte in una ape danzante. Le api operaie diventano a loro volta esploratrici se non si imbattono in nessuna ape danzante per un certo lasso di tempo. Varie esplorazioni, danze e reclutamenti avvengono simultaneamente, e la scelta finale del sito avviene quando, in un determinato sito, il numero delle api reclutate supera una certa soglia (*quorum*). A quel punto, le api reclutate tornano tutte verso lo sciame e sollecitano tutte le api dello sciame a seguirle verso il sito scelto. La decisione sul sito di nidificazione avviene quindi attraverso un processo distribuito, in cui ogni ape viene a conoscenza solo di una parte delle possibili opzioni, mentre la decisione finale che riguarda tutto lo sciame viene presa una volta raggiunto il quorum in un certo sito.

In (Passino et al., 2008, 2010), gli autori mostrano come il processo appena

descritto possa essere qualitativamente interpretato attraverso l'identificazione di meccanismi cognitivi collettivi nello sciame, come capacità sensoriali, di memoria e decisionali, che emergono dal comportamento e dalle interazioni multiple tra le singole api. Quest'ultime sono rappresentate sia come unità sensoriali che cercano e valutano la bontà di nuovi luoghi dove nidificare, sia come singole unità cognitive che interagiscono attraverso la danza. Le informazioni sui siti esplorati si accumulano in maniera parallela e progressiva per ciascun sito, e vengono immagazzinate in una memoria collettiva a breve termine che è rappresentata da tre elementi: il numero di api esploratrici che danzano nello sciame per un singolo sito, il numero di api reclutate che stazionano nei vari siti individuati, e il numero di api operaie costrette a trasformarsi in api esploratrici in assenza di api che danzano nello sciame. Questi tre elementi servono a tenere memoria, durante il processo decisionale, delle qualità di ciascun sito. Questo perché tanto maggiore è la bontà del sito tanto più grande è il numero di api che danzano in favore di quel sito, così come il numero di api reclutate che stazionano nel sito stesso. Inoltre, più numerosi sono i siti adeguati, maggiore è il numero di api operaie che restano tali e quali nello sciame. In (Passino et al., 2008, 2010), il parallelo ape-neurone e la prospettiva cognitiva sulle dinamiche di gruppo delle api vengono sostenute anche attraverso una serie di dati sperimentali raccolti sul campo, e attraverso l'uso di modelli di simulazione che mostrano come lo sciame sia capace di valutare ed eliminare siti non adeguati o di qualità minore, e di individuare il sito migliore anche in presenza di ridotte capacità sensoriali delle api esploratrici.

In (Marshall et al., 2009) l'analisi e la comparazione tra sistemi collettivi diversi si basa su un approccio quantitativo volto a sviluppare modelli analitici di carattere generale. Gli autori intendono spiegare, attraverso un modello descrittivo comune, fenomeni funzionalmente simili ma strutturalmente differenti. Il modello analitico descritto in (Marshall et al., 2009) è costruito attraverso il confronto di due modelli a equazioni differenziali ordinarie: il primo descrive le dinamiche neuronali di soggetti umani registrate durante compiti di scelta percettiva con l'utilizzo di tecniche di registrazione di segnali neuronali; il secondo descrive i processi di scelta del sito dove nidificare in api e formiche. Nonostante i due modelli appaiano sostanzialmente diversi, gli autori mostrano come si riesca ad analizzarne e compararne le dinamiche attraverso l'utilizzo della "optimality theory". In breve, l'analisi mostra che sia il modello neuronale sia il modello decisionale del comportamento degli insetti sociali tendono entrambi a sviluppare delle soluzioni statisticamente ottimali per quanto riguarda il bilanciamento di fattori quali "velocità" e "accuratezza" della scelta. Ciò dimostra come da un punto di vista funzionale i due processi siano assolutamente identici.

4 Swarm Cognition: l'approccio sintetico

Come accennato nella Sezione 1, uno degli obiettivi della Swarm Cognition è quello di riconciliare all'interno di un paradigma teorico comune spiegazioni neurofisiologiche e comportamentali della cognizione che spesso appaiono sovrapporsi anziché integrarsi. La Swarm Cognition si propone come un approccio teorico e metodologico complementare agli strumenti attualmente utilizzati nelle scienze cognitive, con lo scopo di facilitare la sintesi tra la dimensione neurale e quella comportamentale della cognizione. Nello specifico, la Swarm Cogni-

tion si propone di sviluppare prospettive olistiche ed inclusive utilizzando anche modelli di simulazione meglio conosciuti come Artificial Life models (modelli ALife). I modelli ALife rappresentano un tentativo di ricreare dei fenomeni biologici all'interno di un medium digitale, per poterli poi studiare ed analizzare attraverso un processo di ingegneria inversa. Cioè, si tenta di capire la biologia dando vita a processi simili a quelli biologici, ma utilizzando materie prime diverse (Langton, 1988).

I modelli "swarm robotics" sono tra i modelli ALife quelli che meglio si prestano ad uno studio olistico della cognizione collettiva. La swarm robotics identifica un particolare tipo di modelli robotici in cui vari robot agiscono in maniera autonoma, guidati da un sistema di controllo individuale, allo scopo di produrre un comportamento collettivo che emerge dalle interazioni e dalla cooperazione tra singoli individui. In questi modelli, i robot sono caratterizzati da capacità senso-motorie limitate. L'interazione e la cooperazione tra i robot hanno lo scopo di permettere al gruppo di eseguire compiti che vanno oltre i limiti sensoriali e motorii dei singoli individui, così come avviene nei gruppi di insetti sociali o nel cervello umano, dove le capacità cognitive non sono riconducibili al funzionamento di un singolo neurone o di una singola popolazione di neuroni.

Ci sono varie motivazioni alla base dell'approccio "swarm robotics" allo studio della cognizione. Innanzitutto, è necessario ricordare l'importanza dei robot nello studio di processi cognitivi. I robot sono artefatti con un corpo fisico, con sensori e attuatori utili per percepire l'ambiente esterno e agire di conseguenza. Queste proprietà rappresentano un aspetto fondamentale per lo studio di comportamenti cognitivi complessi che scaturiscono da interazioni dinamiche tra attività cerebrale, corpo e ambiente. I robot sono quindi strumenti essenziali per lo studio delle dinamiche mente-corpo-ambiente e del conseguente emergere di capacità cognitive complesse come la categorizzazione, i processi decisionali, l'attenzione e l'apprendimento. Inoltre, una particolare caratteristica dei sistemi "swarm robotics" è il trasporto della complessità comportamentale dal livello del singolo individuo al livello delle interazioni tra individui. Questa caratteristica è fondamentale dal punto di vista della Swarm Cognition, poiché permette di considerare i robot come singole unità cognitive, più simili di volta in volta agli insetti o ai neuroni, e permette di studiare il processo cognitivo come risultato dell'auto-organizzazione del sistema in interazione con l'ambiente. I modelli swarm robotics hanno quindi in sé sia il livello comportamentale della cognizione, sia il livello di interazione tra unità cognitive e di elaborazione delle informazioni. Tuttavia, non tutti i lavori in swarm robotics possono contribuire alla ricerca in Swarm Cognition. Il risultato atteso da questa attività di costruzione di modelli robotici corrisponde al design e all'implementazione di comportamenti collettivi in gruppi di robot, descrivibili come processi cognitivi (Santana and Correia, 2010, 2011; Morlino et al., 2010). È quindi importante che il modello abbia un valore esplicativo dei meccanismi che sottostanno a determinati processi cognitivi. A tal fine, è fondamentale procedere ad una analisi comprata dei risultati ottenuti con l'approccio sintetico rispetto ai meccanismi noti a livello neuroscientifico o etologico. Ciò può essere fatto sia sviluppando ipotesi a partire dallo studio del sistema sintetico, che in questo caso fa da generatore di ipotesi. Oppure, il modello robotico può servire a dimostrare la plausibilità dei meccanismi cognitivi ipotizzati.

5 Conclusioni

La Swarm Cognition si propone come un approccio promettente all'interno delle Scienze Cognitive. La possibilità di riconoscere e studiare sistemi differenti permette di identificare delle regole generali che sottostanno alla produzione di determinate risposte cognitive. Per uscire dal campo delle semplici analogie, è necessario strutturare il lavoro sperimentale in modo da poter identificare potenzialità e limiti della Swarm Cognition. In particolare, è necessario dimostrare la validità dell'approccio sintetico e il suo potere esplicativo nei confronti dei fenomeni reali. A tal fine, riteniamo sia necessario selezionare con cura gli strumenti che permettono di effettuare comparazioni tra sistemi tanto differenti, poiché anche se non fosse possibile tracciare un parallelo diretto tra due sistemi differenti, potrebbe essere possibile dimostrarne l'equivalenza da un punto di vista funzionale.

References

- E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, New York, NY, 1999.
- S. Camazine, J.-L. Deneubourg, N. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz, and E. Bonabeau. *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2001.
- I.D. Couzin. Collective cognition in animal groups. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(1):36–43, 2009.
- C. Detrain and J.-L. Deneubourg. Self-organized structures in a superorganism: do ants “behave” like molecules? *Physics of Life Reviews*, 3:162–187, 2006.
- N.R. Franks, A. Dornhaus, J.P. Fitzsimmons, and M. Stevens. Speed versus accuracy in collective decision-making. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270(1532):2457–2463, 2003.
- S. Garnier, J. Gautrais, and G. Theraulaz. The biological principles of swarm intelligence. *Swarm Intelligence*, 1:3–31, 2007.
- R.L. Goldstone and T.M. Gureckis. Collective behaviour. *Trends in Cognitive Science*, 1(3):412–438, 2009.
- C.G. Langton. Artificial Life. In C.G. Langton, editor, *Artificial Life*, pages 1–47. Addison-Wesley, Reading, MA, 1988.
- J.A.R. Marshall and N.R. Franks. Colony-level cognition. *Current Biology*, 19(10):395–396, 2009.
- J.A.R. Marshall, R. Bogacz, A. Dornhaus, R. Planqué, T. Kovacs, and N.R. Franks. On optimal decision-making in brains and social insect colonies. *Journal of the Royal Society Interface*, 6:1065–1074, 2009.
- G. Morlino, V. Trianni, and E. Tuci. Collective perception in a swarm of autonomous robots. In J. Filipe and J. Kacprzyk, editors, *Proceedings of the International Conference on Evolutionary Computation (ICEC 2010)*, pages

- 51–59. SciTePress, Science and Technology Publications, INSTICC, Setubal, Portugal, 2010.
- G. Nicolis and I. Prigogine. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*. John Wiley & Sons, New York, NY, 1977.
- K.M. Passino, T.D. Seeley, and P.K. Visscher. Swarm cognition in honey bees. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 62(3):401–414, 2008.
- K.M. Passino, T.D. Seeley, and P.K. Visscher. Honey bee swarm cognition: Decision-making performance and adaptation. *Int. J. Swarm Intelligence Research*, 1(2):80–97, 2010.
- P. Santana and L. Correia. A swarm cognition realization of attention, action selection and spatial memory. *Adaptive Behavior*, 2010. In Press.
- P. Santana and L. Correia. Swarm cognition on off-road autonomous robots. *Swarm Intelligence*, 5(1):45–72, 2011.
- S. Turner. Termites as models of swarm cognition. *Swarm Intelligence*, 5(1): 19–43, 2011.