

# Coordinamento distribuito mediante auto-organizzazione

Baldassarre Gianluca, Parisi Domenico, Nolfi Stefano  
Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione  
Viale Marx 15, 00137 Roma

## Introduzione

La robotica collettiva è una disciplina in rapida espansione nel campo della robotica bio-ispinata (Bonabeau et al., 1999; Grabowski, 2003). Un tema di grande interesse della robotica collettiva è il problema del coordinamento distribuito di robot che debbono realizzare compiti collettivi (Baldassarre et al., 2002; Ijspeert et al., 2001). Il coordinamento distribuito richiede che vari aspetti dell'azione di gruppo, come i ruoli dei singoli robot, la sincronizzazione delle singole attività, l'organizzazione spaziale, siano il risultato di un processo di auto-organizzazione piuttosto che il frutto delle decisioni centralizzate di pochi robot capi. In alcuni compiti, il coordinamento distribuito presenta notevoli vantaggi rispetto al coordinamento centralizzato, ad esempio: a) resistenza ai guasti dei singoli robot; b) ridotti bisogni di comunicazione; c) semplicità dei singoli robot in termini di sensori, effettori, e capacità computazionali.

Il coordinamento distribuito è centrale anche per lo studio di comportamenti di gruppo negli animali. Negli insetti sociali, ad esempio, delle semplici regole di azione seguite dai singoli animali può portare a comportamenti collettivi complessi come la formazione di strutture tridimensionali (Anderson et al., 2002), la costruzione collettiva di nidi (Camazine et al., 2001), il trasporto collettivo di cibo (Kube and Bonabeau, 1998). Questi comportamenti tendono a basarsi su meccanismi auto-organizzativi (Camazine et al., 2001) come feedback positivi (es.: "fai ciò che fa la maggioranza") o feedback negativi (es.: "non eseguire più un comportamento se un certo stimolo va sotto una certa soglia"). Questi meccanismi sono anche importanti per l'auto-organizzazione di gruppi di animali più complessi (ad esempio i babbuini usano dei "grugniti di movimento" per coordinare la transizione del gruppo dal riposo al movimento, Seyfarth and Cheney, 2003) e, spesso inconsapevolmente, per l'uomo (si consideri il coordinamento distribuito degli agenti economici realizzato attraverso i mercati ed i prezzi, Von Hayek, 1945). Il lavoro presentato qui dovrebbe contribuire ad approfondire la conoscenza dei meccanismi auto-organizzativi generali che possono essere alla base di questi diversi comportamenti.

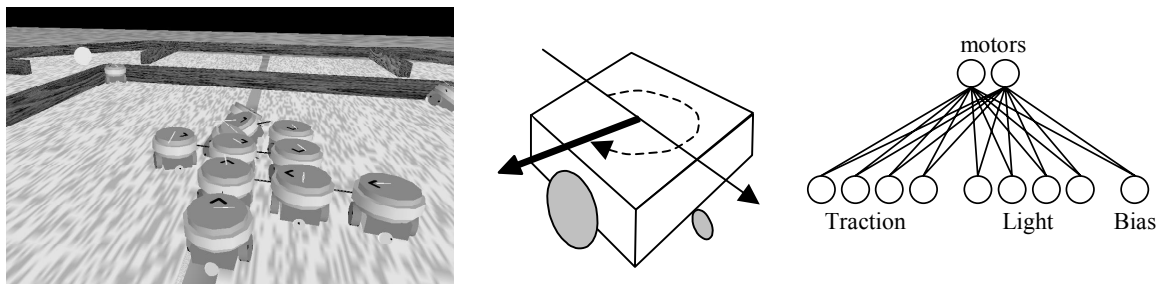


Figura 1. *Sinistra*: scenario simulativo utilizzato nella ricerca (il target luminoso è in alto a sinistra): si noti come i robot isolati rimangono incagliati nei buchi e nelle fessure. *Centro*: Il sensore di trazione. *Destra*: la rete neurale utilizzata per controllare i robot.

Questo lavoro è stato condotto nell'ambito del progetto *Swarm-bots* finanziato dalla Commissione Europea (finanziamento IST-2000-31010, v. anche Dorigo et al., in press). Il progetto ha come obiettivo la costruzione ed il controllo di robot in grado di agganciarsi fisicamente tra loro mediante una pinza in modo da formare gruppi in grado di fare cose che non possono essere fatte da singoli robot. La ricerca qui presentata si è concentrata sul problema della navigazione collettiva in un'arena bidimensionale. In particolare, partendo da gruppi formati da quattro-dieci robot assemblati manualmente, l'obiettivo è stato quello di produrre un sistema di controllo dei robot stessi che consentisse un movimento coerente e coordinato dell'intero gruppo. L'idea esplorata per raggiungere questo obiettivo è stata quella di utilizzare il principio auto-organizzativo del feedback positivo mediante l'utilizzo di uno speciale sensore chiamato "sensore di trazione", di un sistema di controllo dei robot costituito da una semplice rete neurale a due strati, e di un processo evolutivo per la ricerca dei pesi della rete. Il feedback positivo è un meccanismo di auto-organizzazione che consente ad un insieme di agenti di convergere su una stessa scelta tra diverse scelte possibili. Esso è basato sul fatto che quando ogni agente tende ad imitare altri agenti del gruppo, o comportamenti medi di gruppo, il comportamento di tutti gli agenti si uniforma rapidamente.

## Metodi

Visto che i robot fisici del progetto sono attualmente disponibili solo in forma di prototipi, la ricerca ha costruito una simulazione di tali prototipi basata sulla libreria di funzioni scritte in linguaggio C chiamata *Vortex<sup>TM</sup>*. Queste funzioni consentono di simulare in tre dimensioni le interazioni dinamiche, le collisioni e gli attriti tra corpi fisici, nonché

l'azione di forze torcenti (motori) tra tali corpi. Lo scenario simulativo utilizzato è illustrato in figura 1. Dei robot assemblati a formare una struttura a stella debbono navigare in un labirinto cosparso di ostacoli, fessure e "crepacci" dove robot che agiscono singolarmente possono rimanere incagliati. Il compito del gruppo è esplorare il labirinto superando i buchi e "rimbalzando" contro gli ostacoli alla ricerca di un target luminoso, e poi raggiungere tale target quando questo diventa visibile. Ogni singolo robot è costituito da una torretta, che può essere agganciata alla torretta di altri robot mediante una "pinza", e da uno chassis dotato lateralmente di due ruote motrici indipendenti che può ruotare liberamente sotto la torretta consentendo così al robot di cambiare liberamente direzione di movimento anche quando la torretta è agganciata ad altri robot. Ogni robot è dotato di quattro sensori di luce che lo informa su visibilità e posizione del target luminoso, e di un sensore appositamente ideato per risolvere il compito, chiamato "sensore di trazione". Il sensore di trazione consente al robot di percepire l'intensità e la direzione (sul piano) della forza che la torretta esercita sullo chassis. Questa informazione è particolarmente importante per il singolo robot in quanto, essendo il resto del gruppo agganciato alla sua torretta, essa lo informa della direzione nella quale il gruppo stesso intende andare e gli consente così di muoversi nella stessa direzione o in una direzione diversa.

Il controllo del singolo robot è costituito da una rete neurale a due strati (v. figura 1) il cui strato di entrata codifica i quattro sensori di luce (solidali con lo chassis), l'informazione relativa alla trazione (attraverso quattro unità sensibili alle quattro direzioni della trazione allineate rispetto i quattro punti cardinali solidali con lo chassis) ed un bias pari ad uno. Le due unità dello strato di output della rete codificano la velocità delle due ruote motrici. I pesi della rete neurale sono evoluti mediante un algoritmo genetico diverso da quello standard (per questo, v. Nolfi e Floreano, 2000): esso tende a favorire l'emergere di comportamenti cooperativi all'interno del gruppo. In particolare viene creata una popolazione di 100 genotipi corrispondenti a 100 squadre di robot. Ogni genotipo codifica una rete neurale come quella descritta. La rete neurale viene quindi introdotta (identica a se stessa) in tutti i robot che compongono una squadra. La *performance di squadra* (fitness) viene poi misurata sulla base di come essa riesca a risolvere una versione semplificata del compito descritto sopra (per maggiori dettagli v. Baldassarre et al., submitted). La performance delle squadre viene poi utilizzata per selezionare le 20 squadre migliori. Il genotipo di ognuna di queste squadre viene quindi utilizzato per produrre cinque genotipi "figli" con l'aggiunta di piccole mutazioni casuali, così da formare una seconda "generazione" di reti neurali, ovvero di squadre di robot. Questo processo viene poi ripetuto per 100 generazioni di popolazioni in modo da sviluppare squadre di robot sempre più coordinate ed abili nel risolvere il compito.

## Risultati

I risultati mostrano non solo che i gruppi migliori che emergono durante l'evoluzione riescono a risolvere il compito del labirinto con successo (v. figura 2), ma interessanti anche che le strategie che essi adottano sono basate su un

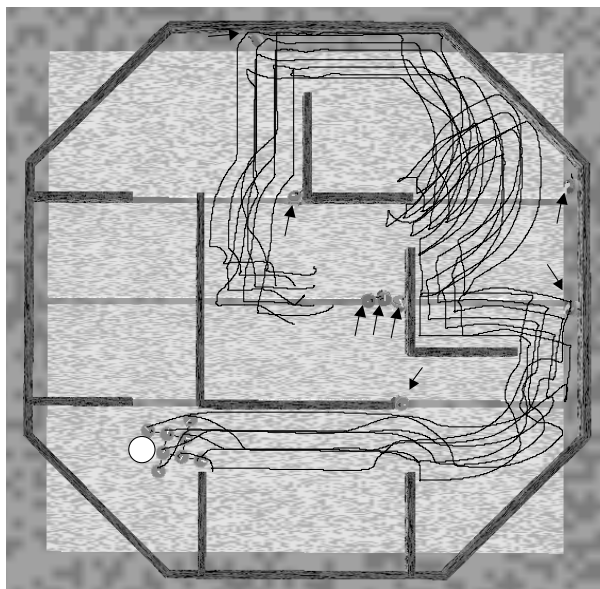


Figura 2. Lo scenario simulativo visto dall'alto. Il gruppo di robot raggiunge il target in basso a sinistra dopo aver esplorato il labirinto. Le frecce indicano i robot singoli incagliati nei buchi e nelle fessure (create dal fatto che il suolo grigio chiaro è più alto rispetto al suolo grigio scuro).

meccanismo conformistico del tipo "vai nella direzione in cui va il gruppo", cioè sul principio auto-organizzativo del feedback positivo. Un'analisi dettagliata del mostra che comportamento complessivo può essere diviso in tre sottocomportamenti ben identificabili. Ad inizio del test di una squadra, i robot che la compongono hanno gli chassis con un orientamento casuale, per cui per riuscire a muoversi in modo coordinato essi debbono allinearli lungo la stessa direzione. Per fare questo sfruttano un comportamento conformista che consiste nel far girare lo chassis verso la direzione di moto del gruppo indicata dal sensore di trazione (si noti che la direzione del movimento del gruppo che emerge dipende solo dall'orientamento casuale iniziale degli chassis, ed è diversa se si ripete il test più volte). Una volta che l'intero gruppo inizia a muoversi, esso si sposta in modo coerente, passando sopra eventuali fessure del suolo che incontra, finché non urta contro un muro. Quando questo avviene, scatta il secondo comportamento: i robot cambiano direzione in modo molto sincronizzato. Questo avviene perché l'urto con il muro causa una segnale di trazione opposto alla direzione del muro: questa viene interpretata dai robot come il fatto che il gruppo intende muoversi in un'altra direzione (si noti che questo effetto viene prodotto dal fatto che i robot urtano i muri con la torretta che risulta sporgente rispetto lo chassis). Il terzo

comportamento scatta quando i robot vedono la luce. A questo punto essi orientano i propri chassis verso di essa, ed il gruppo rapidamente la raggiunge in modo coerente. E' interessante notare che una dettagliata analisi di questi

comportamenti mostra che il meccanismo di conformismo basato sul sensore di trazione opera non solo nel primo comportamento (navigazione collettiva) ma anche nel caso del secondo (evitamento di ostacoli) e del terzo (raggiungimento della luce), nel senso che esso contribuisce a mantenere la coerenza del gruppo quando il movimento di un robot è ostacolato o quando qualche robot non può vedere la luce. Ad esempio, un particolare test mostra come, grazie al sensore di trazione, un solo robot in grado di vedere la luce riesca a condurre un gruppo di robot “ciechi” non troppo numeroso verso di essa.

## Conclusione

Questa ricerca ha studiato il problema di come alcuni robot fisicamente collegati tra loro possano coordinare la propria azione sulla base di meccanismi auto-organizzativi. In particolare ha mostrato che se i robot sono dotati di sensori che consentono loro di percepire il movimento del resto del gruppo, e se una tecnica evolutiva viene utilizzata per far evolvere il sistema di controllo dei robot stessi, si assiste all'emergenza di strategie comportamentali conformiste che sfruttano il meccanismo auto-organizzativo basato sul feedback positivo. Le simulazioni hanno inoltre mostrato come questo meccanismo consenta di ottenere un coordinamento distribuito del gruppo dotato di una notevole robustezza rispetto al rumore ed alle perturbazioni esterne.

## Bibliografia

- Anderson C., Theraulaz G., Deneubourg J.-L. (2002). Self-assemblages in insect societies. *Insectes Sociaux*, vol. 49, pp. 1-12.
- Baldassarre G., Nolfi S., Parisi D. (2002). Evolving mobile robots able to display collective behaviour. In Hemelrijk C. K. (ed.), *International Workshop on Self-Organisation and Evolution of Social Behaviour*, pp. 11-22. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology.
- Baldassarre G., Nolfi S., Parisi D. (2003). Evolution of collective behaviour in a group of physically linked robots. In Raidl G., Guillot A., Meyer J.-A. (eds.), *Applications of Evolutionary Computing - Proceedings of the Second European Workshop on Evolutionary Robotics*, pp. 581-592. Berlin: Springer Verlag.
- Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. (1999). *Swarm intelligence*. Oxford: Oxford University Press.
- Camazine S., Deneubourg J.L., Franks N.R., Sneyd J., Theraulaz G., Bonabeau E. (2001). *Self-organization in biological systems*. Princeton, NJ.: Princeton University Press.
- Dorigo M., Trianni V., Sahin E., Labella T.H., Gross R., Baldassarre G., Nolfi S., Deneubourg J.-L., Mondada F., Floreano D., Gambardella L.M. (in press). Evolving self-organising behaviour for a swarm-bot. *Autonomous Robots (Special issue on Swarm intelligence)*.
- Grabowski R., Navarro-Serment L.E., Khosla P.K. (2003). An army of small robots. *Scientific American*, November, pp. 42-47.
- Ijspeert A.J., Martinoli A., Billard A., Gambardella L.M. (2001). Collaboration through the exploitation of local interactions in autonomous collective robotics: The stick pulling experiment. *Autonomous Robots*, vol. 11, pp. 149-171.
- Kube R.C., Bonabeau E. (1998). Cooperative transport by ants and robots. *Robotics and autonomous systems*, vol. 30, pp. 85-101.
- Nolfi S., Floreano D. (2000). *Evolutionary Robotics*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Seyfarth R.M., Cheney D.L. (2003). Signallers and receivers in animal communication. *Annual Review of Psychology*, vol. 54, pp. 145-173.
- Von Hayek F. (1945). *American Economic Review*, vol. 35, pp. 519-30.