

Grazie ai risultati ottenuti negli ultimi anni nel campo dell'Intelligenza Artificiale è sempre più esteso l'utilizzo di macchine capaci di affiancare l'uomo in attività fondamentali

## **Sistemi autonomi e applicazioni swarm: il futuro passa da queste rivoluzionarie tecnologie**

Interazioni artificiali inimmaginabili solo fino a pochi decenni fa hanno profondamente modificato regole caratteristiche e identità della nostra esistenza



**Gianluigi Greco**

Docente di Informatica  
Direttore Dipartimento di Matematica e Informatica (DeMACS)  
Università della Calabria



**Francesco Calimeri**

Docente di Informatica  
Dipartimento di Matematica e Informatica (DeMACS)  
Università della Calabria



**Francesco Ricca**

Docente di Informatica  
Dipartimento di Matematica e Informatica (DeMACS)  
Università della Calabria

## Alle origini dell'Intelligenza Artificiale

Il termine "Intelligenza Artificiale" venne coniato nei primi anni '50 del secolo scorso da John McCarthy, con l'obiettivo di sistematizzare in un rigoroso contesto formale le riflessioni speculative e i tentativi sperimentali che allora si stavano conducendo per automatizzare, mediante l'uso di macchine e calcolatori, attività intellettive proprie dell'uomo. Sgombrando il campo da questioni filosofiche (che riportano inevitabilmente a Platone e Aristotele), i ricercatori iniziarono a porsi l'obiettivo pragmatico di sviluppare macchine in grado di "manifestare" comportamenti intelligenti, senza necessariamente avere una mente o essere dotati di una qualche forma di coscienza. Sotto la spinta di visionari pionieri, primo tra tutti Alan Turing, vennero avviate ricerche di lungo respiro grazie alle quali, nel giro di pochi decenni, sarebbero stati realizzati sistemi in grado di giocare autonomamente a scacchi o di elaborare il nostro linguaggio. Si trattava di sistemi messi a punto codificando in modo esplicito le regole concettuali che potevano essere utilizzate per manipolare conoscenze in specifici domini applicativi. Questo approccio (noto come Intelligenza Artificiale *simbolica*) fu il paradigma dominante – con alti e bassi – fino a tutti gli anni '80, inizialmente grazie alla spinta propulsiva di Marvin Minsky, successivamente, grazie alla diffusione dei cosiddetti "sistemi esperti", capaci cioè di aiutare il management di grandi aziende e compagnie a prendere efficaci decisioni strategiche. Notevole fu il livello degli investimenti. Basti pensare che, nel 1985, nelle nuove tecnologie di intelligenza artificiale si arrivò a investire circa 1 miliardo di dollari ogni anno. Tuttavia, i vantaggi competitivi attesi tardavano a manifestarsi. Anzi, si capì ben presto non solo che i "sistemi esperti" erano costosi da mantenere, ma avevano difficoltà a gestire grosse moli di informazioni e potevano essere applicati in domini molto ristretti. A partire dagli anni '90, le tematiche dell'intelligenza artificiale iniziarono a registrare una drastica riduzione degli investimenti e una pesante caduta di appeal, rimanendo confinate nello specifico ambito scientifico e degli addetti del settore. Il lungo inverno dell'Intelligenza Artificiale ebbe termine solo attorno al 2010. Un peso importante in questa inversione di tendenza hanno avuto i risultati ottenuti da tre gruppi di ricerca, guidati da Geoffrey Hinton, Youshua Bengio e Yann LeCun, che hanno mostrato come utilizzare sistemi di *reti neurali artificiali* (che simulano cioè il comportamento dei neuroni presenti nel cervello umano) per risolvere problemi di riconoscimento di immagini con precisione e accuratezza sbalorditive. L'impatto di questi studi è stato enorme e ha consentito di fissare nuovi paradigmi di sviluppo grazie ai quali possono essere realizzati a costi ridotti sistemi di traduzione simultanea, riconoscimento video e traduzione di testi (solo per citare alcuni esempi). E' stato a questo punto che le grandi multinazionali hanno ripreso a investire con forza nel settore, puntando sulla tecnologia delle reti neurali artificiali (oggi comunemente identificata come tecnologia del *deep learning*) e sulla sua integrazione in sistemi più tradizionali di Intelligenza Artificiale simbolica (che, sottotraccia, hanno oggi raggiunto un eccellente livello di maturità). Il risultato di questa spinta propulsiva è che oggi la nostra vita è piena di interazioni con diverse intelligenze artificiali: piloti automatici, sistemi che ci raccomandano la prossima serie TV o il prossimo brano da ascoltare, programmi per il supporto alla diagnosi delle malattie e alla messa a punto di nuovi farmaci, applicazioni che consegnano i pacchi nel minor tempo possibile,

altri che gestiscono i turni lavorativi in modo efficiente, navigatori satellitari e applicazioni "smart" di ogni tipo. Si è concretizzata, in sostanza, la visione dell'Intelligenza Artificiale *debole* (chiamata così proprio dai pionieri del settore) in base alla quale l'obiettivo della ricerca non è quello di realizzare macchine che abbiano un'intelligenza umana e che possano sostituire l'uomo nel complesso delle sue attività, quanto invece sistemi che prendano in considerazione specifiche attività e agiscano con successo limitatamente ad esse; il che significa anche che, in relazione a queste specifiche attività, le macchine possono essere (e spesso sono) significativamente più "brave" degli esseri umani.

## I risultati ottenuti dal dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università della Calabria

Il mondo dell'Intelligenza artificiale è dunque variegato e non esiste un unico "mainstream" sul quale i ricercatori concentrano le proprie attenzioni. Ogni attività umana "intelligente" è diventata oggetto di studio e di analisi per sviluppare tecniche in grado di automatizzarla. I campi di applicazione sono molteplici, al punto da risultare difficile, per gli stessi ricercatori, mantenere un costante e "globale" livello di aggiornamento in una realtà che vede nascere di continuo sotto-comunità interessate a specifici problemi e vengono promosse conferenze o workshop internazionali mirati a divulgare velocemente i successi ottenuti in specifici domini applicativi.

In questo dinamico e variegato contesto, attraverso il gruppo di Intelligenza Artificiale che dispiega i propri interessi in numerosi ambiti applicativi, il dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università della Calabria è diventato un importante punto di riferimento internazionale. Il gruppo vanta una forte caratterizzazione sia per le proprie ricerche sui fondamenti logici e teorici dell'Intelligenza Artificiale, sia per le ricadute pratiche legate alla realizzazione di sistemi di supporto in ambiti quali *smart cities*, bioinformatica, reti sociali, sistemi multiagente (solo per fare alcuni esempi). Negli ultimi dieci anni, le ricerche del dipartimento hanno ottenuto importanti riconoscimenti internazionali, come il *distinguished paper award* nella conferenza IJCAI (principale forum internazionale del settore, che coinvolge migliaia di ricercatori). A conferma dell'impatto scientifico delle ricerche condotte dal dipartimento di Matematica e Informatica, è significativo osservare che ben due lavori prodotti dal gruppo di Intelligenza Artificiale compaiono nella sezione *Most Cited* (cioè figurano nell'elenco dei 25 articoli più citati nell'ultimo quadriennio) della rivista *Artificial Intelligence*. Si tratta di un risultato che non è esagerato definire eccezionale. Sin dal 1970, infatti, *Artificial Intelligence* è con-



siderata la più importante rivista generalista per la divulgazione di ricerche nell'ambito dell'intelligenza artificiale e ha ospitato fondamentali pubblicazioni del settore, dai primi esperimenti per la realizzazione di sistemi in grado di competere nel gioco degli scacchi al livello dei più celebrati campioni di questo sport, ai recenti sviluppi di sofisticate tecniche di *deep learning* per l'apprendimento automatico. E' possibile, dunque, comprendere la qualità e il peso scientifici (ancorché non esaustivi) delle attività condotte nel Dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università della Calabria analizzando questi due importanti lavori scientifici così apprezzati dalla comunità.

### **Intelligenza Artificiale e Teoria dei Giochi** di Gianluigi Greco

“Ho realizzato questo lavoro insieme con i ricercatori Georgios Chalkiadakis e Evangelos Markakis. Si tratta di un contributo scientifico in cui metodi e concetti propri della *Teoria dei Giochi* vengono applicati all'Intelligenza Artificiale per studiare il problema della formazione di coalizioni in sistemi multiagente, mediante la definizione di incentivi alla cooperazione per realizzare compiti più articolati e complessi di quelli che singoli agenti intelligenti possono eseguire individualmente.

Il contesto formale è quello dei *giochi cooperativi* in cui, dato un insieme  $N$  di agenti intelligenti (umani o artificiali), si associa ad ogni sottoinsieme  $C$  di  $N$  il profitto che i membri di  $C$  possono ottenere congiuntamente attraverso la propria cooperazione. Si tratta di capire come gli agenti possano dividersi il profitto complessivo a disposizione in modo socialmente accettabile. In particolare, diventa cruciale nel processo di ripartizione garantire il rispetto di principi di equità e di stabilità che incentivino tutti gli agenti a partecipare al meccanismo. Tradizionalmente questo problema è stato studiato nell'ambito della *Teoria dei Giochi*, ma recentemente ha guadagnato popolarità nell'Intelligenza Artificiale in quanto consente di formalizzare molto bene le interazioni tra sistemi autonomi e intelligenti. E' il caso delle numerose applicazioni realizzate negli ultimi anni per progettare protocolli intelligenti e algoritmi *middleware* per reti di comunicazione wireless. Un esempio molto interessante è quello dei sistemi di condivisione file in un contesto wireless cooperativo, in cui gli abbonati mobili possono raggrupparsi per scaricare (porzioni di) file di interesse sul cellulare per poi scambiarseli su una rete wireless ad-hoc.

Nel contesto sopra delineato, il nostro lavoro è stato stimolato dalla constatazione che, per ragioni varie: limitazioni, vincoli fisici e requisiti normativi, alcuni agenti potrebbero non essere autorizzati a formare coalizioni con altri agenti. Reti di sensori, reti di comunicazione o reti di trasporto rappresen-

tano significativi esempi in cui emergono vincoli di questo tipo naturalmente. Un altro esempio è fornito dalle gerarchie dei dipendenti all'interno di un'impresa, in cui i dipendenti dello stesso livello lavorano insieme nell'ambito di supervisione, ovvero di un dipendente di livello immediatamente superiore nella gerarchia. Nonostante la pervasività di questo importante aspetto, tuttavia, l'esistenza di vincoli sulla formazione delle coalizioni era stata sostanzialmente ignorata negli studi classici. Il nostro lavoro supera queste limitazioni e analizza tecniche di ripartizione di profitto in grado di incentivare la cooperazione anche in presenza di ulteriori vincoli sulla formazione delle coalizioni. In particolare, lo studio caratterizza le proprietà di esistenza delle ripartizioni desiderabili e propone metodi e algoritmi per il loro calcolo, utilizzabili in reali contesti applicativi.

E' un lavoro che ha suscitato l'interesse della comunità scientifica internazionale per numerose ragioni: sia perché esso ha reso più concretamente utilizzabili risultati propri della *Teoria dei Giochi* nel contesto di applicazioni intelligenti, sia perché ha definito una solida base formale e teorica per la realizzazione di sistemi in cui più entità intelligenti devono collaborare per realizzare una attività complessa. Questa tematica è, infatti, oggi molto rilevante nell'ambito dell'Intelligenza Artificiale, in cui il coordinamento delle macchine sta diventando uno dei problemi centrali da affrontare in un modo sempre più automatizzato e pervaso da dispositivi intelligenti. Come estremizzazione di questa prospettiva basti pensare all'interesse che inizia a suscitare la *swarm intelligence*, termine coniato da Gerardo Beni, Susan Hackwood e Jing Wang per descrivere sistemi auto-organizzati, nei quali un'azione complessa deriva da un'intelligenza artificiale collettiva (come accade in natura nel caso di colonie di insetti o stormi di uccelli)”.

### **Intelligenza Artificiale e Logica**

di Francesco Calimeri e Francesco Ricca

“Il contesto in cui si colloca il nostro lavoro, realizzato assieme a Martin Gebser e Marco Maratea (quest'ultimo docente dell'Università di Genova, ma più volte ospite del nostro dipartimento), riguarda l'utilizzo della logica matematica per la realizzazione di sistemi intelligenti, la cui origine può essere fatta risalire al 1958, anno in cui John McCarthy pubblicò l'articolo “Programs with Commonsense”. In questo contributo venne riconosciuto per la prima volta che lo sviluppo di un artefatto intelligente richiede di formalizzare il ragionamento del “senso comune”: si riconobbe come necessaria, in altre parole, la proposizione di una rappresentazione del mondo limitatamente alla piccola parte rilevante per il problema in oggetto tramite una teoria logica, per poi risolvere tale problema attraverso meccanismi inferenziali propri della logica stessa, la cui esecuzione è demandata ad una macchina. Negli ultimi 25 anni, la comunità scientifica ha lavorato molto per definire formalismi di questo tipo e, tra essi, l'*Answer Set Programming* (ASP) è oggi uno tra i più solidi ed efficaci. La principale idea dietro l'approccio della ASP è che un problema complesso sia modellato da un programma logico. I risultati della sua esecuzione sono gli insiemi delle risposte (in inglese *answer sets*) che risolvono il problema. In



altri termini, ciascun *answer set* modella una possibile risposta corrispondente a uno scenario della realtà codificata nel programma. Naturalmente, affinché la potenza del formalismo possa essere sfruttata per l'impiego in applicazioni del mondo reale, è necessario disporre di sistemi in grado di calcolare gli *answer set* di un programma logico in modo efficiente. Negli ultimi anni la ricerca scientifica del settore ha prodotto numerosi sistemi solidi, efficienti e affidabili in grado di calcolare gli *answer set* dei programmi ASP (uno dei più diffusi ed accreditati, DLV, è sviluppato proprio dal dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università della Calabria). Oggi, la ASP è impiegata in vari settori di ricerca e ambiti dell'Intelligenza Artificiale, come la soluzione di problemi di Ottimizzazione combinatoria, la Schedulazione, la Robotica, il Web Semantico, le *Smart City*, la Bioinformatica e la Diagnostica. La ASP è pertanto uno strumento pratico e potente per realizzare sistemi intelligenti. Tuttavia, la ricerca non si ferma: le attuali tecnologie, pur protagoniste di successi importanti, mostrano in diversi contesti i propri limiti, soprattutto di fronte alle sfide che l'industria e la società si troveranno ad affrontare nel prossimo futuro. È per questo motivo che la comunità scientifica necessita di strumenti e metodi per "tirare le fila" degli sforzi che i propri membri approfondono a livello internazionale.

In tale contesto, abbiamo organizzato una *ASP Competition*, cioè una competizione tra i sistemi di ASP, con l'obiettivo di valutare in modo preciso i progressi dello stato dell'arte, identificando sia i punti di forza sia i punti

di debolezza dei vari software di intelligenza artificiale. In sostanza, abbiamo messo alla prova l'intera comunità scientifica del settore, confermando in laboratorio l'efficacia dei risultati delle ricerche condotte negli ultimi anni e identificando potenziali sfide future. La messa a punto e poi lo svolgimento dei test di performance, assolutamente rigorosi, sono stati lunghi e complessi, e hanno richiesto molto impegno. Basti pensare che nella competizione sono stati identificati, classificati e risolti più di 37 problemi (benchmark) di intelligenza artificiale, ognuno con caratteristiche differenti (dalla schedulazione, al ragionamento automatico, all'interrogazione intelligente di basi di conoscenza) e definiti per sollecitare i differenti moduli di cui è costituito un esecutore di programmi ASP. La misura delle prestazioni dei 14 sistemi partecipanti (sviluppati da università di tutto il mondo) ha richiesto più di sei mesi consecutivi di esecuzione utilizzando un sistema hardware con performance equivalenti a 60 computer dotati di processori *Intel Xeon* di ultima generazione. I risultati ottenuti testimoniano il progresso costante che le tecnologie sviluppate in questo settore hanno avuto negli ultimi anni. Il sistema vincitore è stato in grado di risolvere in tempo utile problemi così complessi che solo due anni prima non erano alla portata dei migliori metodi di risoluzione disponibili".



## Conclusioni

Abbiamo riportato in estrema sintesi i principali contributi di due lavori scientifici del dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università della Calabria, inseriti tra quelli più citati negli ultimi quattro anni su "Artificial Intelligence", la principale rivista del settore. Il risultato raggiunto dimostra l'elevato livello delle ricerche condotte nel dipartimento e l'ampio raggio di azione di tali ricerche, che spaziano da sistemi ispirati alla Teoria dei Giochi a sistemi basati su meccanismi logici. Tuttavia, in un settore così dinamico come quello dell'Intelligenza Artificiale, questo risultato non può essere assolutamente considerato un punto d'arrivo. Tutt'altro: esso costituisce una solida base su cui avviare nuove ricerche mirate a dare risposte concrete ai nuovi problemi che oggi con forza emergono nel settore informatico.

I sistemi di Intelligenza Artificiale stanno diventando, infatti, sempre più complessi e difficili da prevedere e controllare. Con il rischio di provocare conseguenze

gravissime. Errori nella progettazione di questi sistemi, infatti, possono causare serie minacce per l'uomo, come è accaduto recentemente negli incidenti mortali dovuti alle auto a guida completamente automatica. Per queste ragioni, diventa oggi quanto mai necessario dispiegare uno sforzo collettivo per migliorare il livello di affidabilità di questi sistemi, renderli più trasparenti e definire, anche giuridicamente, i confini della loro applicabilità. Un nuovo orizzonte di una Intelligenza Artificiale "Trustworthy" deve essere tracciato: una sfida che il dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università della Calabria prenderà in carico per i prossimi anni e alla quale dedicherà ogni energia. (GG, FC, FR).