

La sfida della complessità: alla scoperta dell'intelligenza artificiale

Note sulla conferenza di Paolo Alessandrini
(Dolomiti in Scienza, Belluno, 21 marzo 2009)

Sommario

1. <i>Statuine preistoriche e macchine antiche</i>	1
2. <i>Automi e macchine calcolatrici</i>	2
3. <i>Turing e l'avvento dell'intelligenza artificiale moderna</i>	3
4. <i>Intelligenza artificiale forte e debole</i>	3
5. <i>Programmi intelligenti</i>	4
6. <i>Colorare le carte geografiche</i>	5
7. <i>Rompicapi difficili</i>	5
8. <i>Il problema del commesso viaggiatore</i>	6
9. <i>Caratteristiche dell'intelligenza debole</i>	6
10. <i>Reti neurali</i>	7
11. <i>Metodi euristici</i>	7

1. Statuine preistoriche e macchine antiche

Che cos'è l'intelligenza artificiale?

Rispondendo in modo molto semplice, potremmo dire che l'intelligenza artificiale è il tentativo di riprodurre in una macchina (ad esempio in un computer) le facoltà intellettive tipiche dell'uomo (diapositiva 2).

L'indagine su cosa siano veramente queste facoltà intellettive, cioè di che cosa sia l'intelligenza, è una questione totalmente al di là degli scopi di queste note: si tratta infatti di una questione ancora non completamente risolta perfino per i neuroscienziati e per gli psicologi.

Il termine "intelligenza artificiale" venne coniato nel 1956 dal matematico americano John McCarthy, ma il sogno di rendere intelligenti le macchine affonda le sue origini addirittura nella preistoria.

L'uomo preistorico costruiva infatti statuine e artefatti antropomorfi (diapositiva 3), e la ragione profonda di ciò è sicuramente legata al suo desiderio più o meno inconscio di comprendere il mistero delle nascite, e di sostituirsi a Dio, riproducendo artificialmente l'atto divino della creazione e il misterioso fenomeno della riproduzione.

Nell'antichità questa aspirazione umana si sviluppa, e comincia la sfida di realizzare artefatti in grado di riprodurre non solo le sembianze umane ma anche, e soprattutto, l'intelligenza umana.

Vennero costruiti meccanismi sempre più sofisticati che avevano scopi diversi: idoli religiosi per impressionare i fedeli, strumenti didattici per dimostrare principi scientifici, e congegni per eseguire calcoli astronomici, come ad esempio il famoso “meccanismo di Anticitera” (diapositiva 4): un meccanismo sofisticatissimo, una specie di computer dei tempi antichi, mosso da ruote dentate e ingranaggi, costruito intorno al 150 a.C. per calcolare il sorgere del sole, le fasi lunari, i movimenti dei 5 pianeti allora conosciuti, gli equinozi, i giorni della settimana e perfino le date dei giochi olimpici.

La sua scoperta, avvenuta nel 1900 non lontano da Creta, dimostrò che, contrariamente a quanto si era creduto in precedenza, nella Grecia del II secolo a.C. esisteva un centro di altissima tecnologia.

2. Automi e macchine calcolatrici

Dalle statuine antropomorfe della preistoria si passa, nel corso dei secoli, ad automi sempre più sensazionali: dagli Arabi ai Cinesi, da Leonardo da Vinci agli orologiai europei del Seicento, le cronache di ogni epoca e di ogni paese sono piene di automi a forma di uccello in grado di battere le ali e di volare, orchestre formate da musicisti artificiali, cavalieri meccanici semoventi, statue parlanti, suonatori di flauto, scrivani e disegnatori, ed ogni genere di animale artificiale.

E' doveroso dire che molti degli automi dei quali abbiamo notizia erano in realtà imbrogli, falsi prodigi che nascondevano trucchi e non avevano nulla di prodigioso, come il famoso “Turco” (diapositiva 5): un automa giocatore di scacchi che ebbe grande successo nel Settecento presso le corti europee. Molti anni dopo si scoprì che in realtà il Turco non era affatto un miracolo di tecnologia, bensì una truffa ben congegnata: era azionato nell'interno da un uomo di piccola statura, che si nascondeva dietro gli ingranaggi, percepiva i movimenti dei pezzi sul tavolo grazie ad alcuni magneti e rispondeva manovrando il braccio mobile.

Che si tratti di imbrogli o di veri automi funzionanti, è comunque significativo che in ogni epoca ci sia stata un grandissimo interesse nei confronti del tentativo di riprodurre in modo artificiale le sembianze e l'intelligenza umana.

Il già citato meccanismo di Anticitera, invece, fu l'antico progenitore di tutti quei meccanismi che avevano lo scopo di fare calcoli, senza necessariamente imitare le sembianze umane o di animali: questo filone conobbe nel Seicento un momento di grande sviluppo, con le prime calcolatrici meccaniche che funzionavano grazie a complicati congegni a orologeria, con ingranaggi e ruote dentate. Tra queste la più famosa è la “pascalina” (diapositiva 6), così chiamata perché costruita dal matematico e filosofo francese Blaise Pascal. E' giusto ricordare anche le calcolatrici costruite in quello stesso periodo dagli scienziati tedeschi Wilhelm Schickard e Gottfried Leibniz.

In quegli anni anche uno scienziato agordino, Tito Livio Burattini, costruì una calcolatrice meccanica, la prima in Italia, che riprendeva le idee della Pascalina. Questo Burattini si occupò anche di automi, e progettò una macchina, nota come “Dragone volante”, che avrebbe dovuto permettere il volo umano.

Per assistere a qualche novità significativa dopo queste calcolatrici seicentesche, bisogna arrivare nell'Ottocento, quando il matematico inglese Charles Babbage progettò i primi calcolatori programmabili, la “macchina differenziale” e soprattutto la “macchina analitica”, che però per problemi tecnici non vennero mai costruite. La macchina analitica si basava su una architettura straordinariamente moderna e del tutto analoga a quella degli attuali computer.

3. Turing e l'avvento dell'intelligenza artificiale moderna

Gli studi moderni sull'intelligenza artificiale vera e propria ebbero inizio dopo la comparsa dei primi calcolatori elettronici, che potevano garantire una ben maggiore potenza di calcolo, cioè appena dopo la seconda guerra mondiale. Il primo calcolatore elettronico della storia, completato nel 1946, si chiamava ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator). Era enorme: occupava una stanza di 9 metri per 30 e pesava 30 tonnellate! (diapositiva 7)

Pochi anni dopo l'entrata in funzione dell'ENIAC apparve sulla rivista "Mind" un famoso articolo scritto dall'inglese Alan Turing, uno dei più grandi matematici del Novecento, nonché uno dei padri dell'informatica teorica (diapositiva 8).

L'articolo era intitolato "*Computing machinery and intelligence*" (Macchine calcolatrici e intelligenza), e in esso Turing affrontò in maniera scientifica la questione dell'intelligenza artificiale. L'articolo iniziava con questa frase: "*Mi propongo di considerare la domanda: Le macchine possono pensare?*".

Turing si propose di individuare un criterio per poter stabilire se una data macchina debba essere considerata intelligente oppure no: il criterio che descrisse viene indicato come "test di Turing".

In altri termini, come possiamo distinguere una macchina davvero intelligente da una macchina qualsiasi? Qual è il confine tra un comune utensile e una macchina "pensante"?

Il test ideato da Turing consiste in un gioco, noto come "gioco dell'imitazione", a tre partecipanti (diapositiva 9): un uomo A, una donna B, e una terza persona C, che ha il ruolo dell'intervistatore. L'intervistatore è tenuto separato dagli altri due e tramite una serie di domande deve stabilire qual è l'uomo e quale la donna. Le risposte di A e B non possono essere dette a voce o scritte a mano, ma vengono stampate, per non dare facili indizi all'intervistatore. Anche A e B, cioè l'uomo e la donna, hanno dei compiti: una delle due persone deve ingannare l'intervistatore e portarlo a fare un'identificazione errata, mentre l'altra deve aiutarlo.

Il gioco viene ripetuto più volte, e, dopo un certo numero di giocate, una macchina si sostituisce all'uomo oppure alla donna, senza che l'intervistatore lo venga a sapere. Se la percentuale di volte in cui l'intervistatore indovina chi sia l'uomo e chi la donna è simile prima e dopo l'ingresso della macchina, allora la macchina stessa dovrebbe essere considerata intelligente, dal momento che, in questa situazione, sarebbe indistinguibile da un essere umano.

4. Intelligenza artificiale forte e debole

Oggi il test di Turing non è più considerato uno strumento adatto per stabilire se una macchina sia intelligente o no. Il test di Turing ha infatti un grosso difetto: descrive l'intelligenza artificiale in base all'apparenza esteriore della macchina, non preoccupandosi dei meccanismi profondi che governano il funzionamento della macchina stessa. Ecco che torniamo alla formidabile domanda iniziale "che cos'è l'intelligenza?", che poi è anche la domanda di Turing "le macchine possono pensare?"

Non ci interessa il comportamento apparente della macchina, ma la comprensione di cosa accada all'interno della stessa: capire se si verificano dei fenomeni che rendono veramente intelligente la macchina. Supponiamo di avere un supercomputer che ha superato il test di Turing: non possiamo essere del tutto sicuri che la macchina non ci stia in qualche modo ingannando, apparendo intelligente senza esserlo veramente. Chi ci garantisce che al suo interno non c'è un omino come quello che muoveva i pezzi sulla scacchiera dall'interno del "Turco"? Fuor di metafora, chi ci assicura che la macchina non sta semplicemente eseguendo delle istruzioni in modo "stupido", dando un'impressione di intelligenza, ma in realtà senza avere la minima comprensione vera del problema che sta risolvendo e senza avere un briciolo di consapevolezza di sé?

Ad esempio, il computer “Deep Blue” della IBM (diapositiva 11), che qualche anno fa fece parlare di sé perché riuscì a battere il campione del mondo di scacchi Garry Kasparov, si è mai reso conto di avere vinto quella partita? Aveva una reale comprensione e consapevolezza del gioco che stava conducendo? Aveva una coscienza? In una parola, “pensava”? Probabilmente no.

Ecco che quindi arriviamo ad una distinzione molto più moderna e accettata rispetto a quella proposta da Turing: la distinzione tra intelligenza artificiale forte, cioè un ipotetico livello di intelligenza artificiale in grado di sviluppare una propria autoconsapevolezza e una comprensione profonda del problema che deve essere risolto, e intelligenza artificiale debole, che è il massimo livello di intelligenza artificiale finora raggiunto, in grado di risolvere problemi anche molto difficili, che però non rappresenta una intelligenza vera e propria in quanto incapace di arrivare ad una autoconsapevolezza e ad una comprensione profonda delle proprie azioni (diapositiva 12).

Una questione oggi molto dibattuta dai ricercatori è se riusciremo mai a costruire programmi dotati di intelligenza artificiale forte, cioè se avremo un giorno dei computer pensanti, autocoscienti e in grado di ragionare e comprendere profondamente il mondo e i problemi che risolvono, o se invece dovremo accontentarci di quella debole, che è una sorta di imitazione dell’intelligenza.

Deep Blue è sicuramente un eccellente giocatore di scacchi, ma affermare che esso “pensi” agli scacchi è come affermare che gli organismi unicellulari “pensino” al processo di sintesi proteica: in realtà entrambi sono ignari di tutto, e semplicemente eseguono un programma.

Ecco quindi un colpo di scena: l’intelligenza artificiale, quella vera, cioè quella forte, *non esiste*.

Forse un giorno ci arriveremo, ma per il momento non esiste alcun esempio di intelligenza artificiale forte, cioè non si ha notizia di computer autocoscienti.

5. Programmi intelligenti

Qui sono necessarie due precisazioni molto importanti. La prima è che l’intelligenza artificiale, quando esiste, esiste soprattutto nel software, nei programmi dei computer, nelle istruzioni che vengono impartite ai computer per funzionare, e non tanto nell’hardware, cioè nella parte “materiale” dei computer. La seconda precisazione è che questi programmi vengono scritti da esseri umani, da ricercatori, e che quindi la ricerca dell’intelligenza artificiale è sempre opera di uomini e donne: non sono i computer che diventano da soli più intelligenti. O per lo meno non siamo ancora arrivati a questo!

Ora, la stragrande maggioranza dei programmi, che usiamo tutti i giorni in ufficio e a casa, non ha alcuna forma di intelligenza, né debole né tantomeno forte: se dobbiamo ricevere o spedire la posta elettronica, leggere un elenco di indirizzi da un file e stamparli, eseguire calcoli matematici ben definiti, o gestire gli acquisti e le vendite di una azienda, non ho bisogno di alcun tipo di intelligenza artificiale: posso usare programmi che lavorano in modo “stupido”, cioè eseguono una successione predefinita di passi senza imparare dai propri errori o adottare strategie particolarmente creative. Ecco quindi che la maggior parte dei programmi esistenti si pone ad un livello sottostante il livello dell’intelligenza artificiale debole, che a sua volta sta sotto l’ipotetico livello “forte” (diapositiva 13).

Quali sono allora le applicazioni o i problemi che richiedono l’utilizzo di procedimenti intelligenti? Ebbene, esiste una piccola percentuale di problemi che, per una serie di ragioni, sono molto particolari, molto difficili. Nell’linguaggio tecnico dell’informatica teorica si dice che questi problemi sono caratterizzati da una alta complessità (da cui il titolo di questa conferenza): la sfida della complessità è quella che i ricercatori affrontano per escogitare strategie alternative, intelligenti, creative, allo scopo di risolvere in qualche modo questi problemi difficili.

Ad esempio: giocare a scacchi è sicuramente un problema molto complesso (diapositiva 14). Se dovessimo risolvere il problema senza ricorrere a strategie furbe o creative, come dovremmo istruire il computer? Forse dovremmo insegnargli a considerare, ad ogni turno, tutte, ma proprio tutte, le mosse possibili, e tutte le loro conseguenze sui turni successivi. E' chiaro che il problema diventerebbe spaventosamente complesso, richiederebbe una memoria pressoché infinita e sarebbe risolvibile in tempi di miliardi di anni anche utilizzando il computer più potente del mondo.

Ecco che quindi che i ricercatori devono affrontare problemi di questo tipo con un approccio diverso, che sfrutti metodologie più raffinate e più ingegnose, allo scopo di impiegare un tempo ragionevole e una quantità di risorse limitata.

Vediamo ora alcuni esempi di problemi che rientrano in questa categoria di problemi “difficili” o “complessi”.

6. Colorare le carte geografiche

Un esempio interessante è quello dei colori delle carte geografiche (diapositiva 15).

Immaginate di dover colorare alcune carte geografiche politiche, cioè raffiguranti i confini degli stati (o delle regioni), ma di dover fare i conti con due complicazioni:

1. i colori scarseggiano, per cui occorre cercare di usare meno colori possibili;
2. se due stati sono confinanti, non si possono colorare con lo stesso colore.

Ebbene, questa è una questione matematica famosa, che ha appassionato molti matematici in passato. E' un tipico esempio di problema di ottimizzazione, perché lo scopo è trovare una soluzione che si avvicini il più possibile a quella “ottima”, cioè a quella migliore di tutte. Curiosamente, questo problema ha una struttura matematica molto simile a quella del gioco del sudoku.

Il problema complesso in questo caso è trovare, data una certa carta geografica, qual è il modo migliore di colorarla usando meno colori possibili e rispettando il vincolo sugli stati confinanti.

Anche in questo caso, trovare la soluzione migliore di tutte potrebbe essere un problema proibitivo anche per il computer più potente del mondo: ma se usiamo un programma un po' intelligente, creativo, che sappia cercare in modo furbo nello spazio delle soluzioni, potremmo arrivare molto rapidamente ad una soluzione che forse non è la migliore ma ci si avvicina molto.

7. Rompicapi difficili

Uno dei rompicapi più famosi è il cosiddetto gioco del quindici (diapositiva 16).

Il gioco consiste di una tabellina di forma quadrata, solitamente di plastica, divisa in quattro righe e quattro colonne (quindi 16 posizioni), sulla quale sono posizionate 15 tessere quadrate, numerate progressivamente a partire da 1. Le tessere possono scorrere in orizzontale o verticale, ma ogni tessera può spostarsi soltanto se c'è uno spazio vuoto vicino. Lo scopo del gioco è riordinare le tessere partendo da una situazione disordinata: la posizione da raggiungere è quella con il numero 1 in alto a sinistra e gli altri numeri a seguire da sinistra a destra e dall'alto in basso, fino al 15 seguito dalla casella vuota. Il problema complesso, in questo caso, non è semplicemente risolvere il puzzle (che è facile), ma trovare il modo più veloce per risolverlo.

Un rompicapo ancora più famoso, diventato celebre nei primi anni Ottanta, è il cubo di Rubik (diapositiva 17). Esistono circa 43 miliardi di miliardi di configurazioni diverse in cui può trovarsi

il cubo. Solo una però, tra tutte queste configurazioni, è quella “ordinata”, con tutte le facce di colore uniforme, e lo scopo del gioco è proprio muovere le facce del cubo per ottenere questa configurazione ordinata.

Anche qui il problema complesso non è risolvere il cubo, perché sono noti molti metodi per farlo. Con una semplice ricerca su internet si trovano moltissimi metodi risolutivi per risolvere completamente il cubo di Rubik, partendo da una situazione qualsiasi, cioè disordinata. Il problema complesso è invece, come nel caso del quindici, trovare, a partire da una configurazione qualsiasi, il modo più veloce per risolverlo. Partendo da una configurazione disordinata, potremmo riuscire a risolverlo, seguendo uno dei numerosi metodi esistenti, diciamo in una trentina di mosse. Un campione potrebbe riuscire a risolverlo, supponiamo, in 20 mosse. Potrebbe esserci un modo di risolverlo, ad esempio, in sole 15 mosse, o forse il modo usato dal campione per risolverlo in 20 mosse potrebbe essere quello il più veloce. Nessuno al mondo può stabilire quale sia il modo più veloce per risolverlo, a partire da una data configurazione. In questo caso un programma intelligente deve saper rinunciare a trovare il procedimento più veloce, ma trovarne uno che ci si avvicini il più possibile.

8. Il problema del commesso viaggiatore

Finora abbiamo visto esempi di problemi “giocosi”, che forse non hanno molte applicazioni pratiche: non si deve pensare però che l’intelligenza artificiale (debole) si applichi soltanto a problemi astratti o a giochi matematici. In realtà ci sono applicazioni molto più “serie” e “pratiche”, ma abbiamo visto esempi di tipo “ludico” per fare capire i concetti di base ed evitare discussioni troppo complicate. Ecco un esempio molto “pratico” di problema complesso: il famoso problema del “commesso viaggiatore” (diapositiva 18).

Immaginate di essere un commesso viaggiatore, o come si dice oggi un venditore o un agente di commercio, che deve consegnare della merce ad alcuni clienti che si trovano in città diverse, e dovete trovare un percorso che congiunge queste città in modo tale da impiegare il minor tempo possibile.

Anche se può sembrare banale, invece è anch’esso un problema complesso che non sappiamo risolvere in tempi ragionevoli.

9. Caratteristiche dell’intelligenza debole

Dopo questa carrellata, abbiamo capito che esiste una categoria di problemi complessi per i quali abbiamo bisogno di metodi creativi e intelligenti, che spesso rinunciano a trovare la soluzione migliore di tutte ma che riescono però ad avvicinarsi ad essa, impiegando tempi ragionevoli.

Questi algoritmi non arrivano all’autoconsapevolezza e all’autocoscienza che contraddistingue l’intelligenza artificiale forte, che ancora non esiste, ma hanno alcune caratteristiche che potrebbero rappresentare un primo seme per arrivare un giorno a quel traguardo ambizioso (diapositiva 19). Ne indichiamo in particolare due:

1. la capacità di *imparare*, cioè di apprendere dalla propria esperienza per affinare le proprie tecniche e tarare meglio i propri parametri interni;
2. la capacità di *ricercare* la soluzione attraverso procedimenti *euristici*: in altri termini, la capacità di eseguire una ricerca intelligente attraverso le possibili soluzioni, che proceda anche per tentativi e che sappia tornare sui propri passi quando ci si accorge di avere imboccato una strada

poco promettente, e che soprattutto rinunci all'illusione di arrivare alla soluzione migliore di tutte, che spesso non è raggiungibile in tempi ragionevoli.

E' importante notare che queste due caratteristiche sono anche alla base dell'intelligenza umana: tutti noi siamo tanto più intelligenti e riusciamo meglio nelle nostre cose quanto più siamo capaci di imparare dai nostri errori e migliorarci diventando più saggi e più esperti col tempo, e inoltre quando dobbiamo cercare qualcosa non andiamo a colpo sicuro in un certo luogo dopo avere calcolato le coordinate esatte con una formula, ma ci avviciniamo per tentativi, accontentandoci a volte di arrivare soltanto vicino, tornando indietro di tanto in tanto.

10. Reti neurali

Concentriamoci sulla prima di queste caratteristiche dell'intelligenza (umana e artificiale), cioè sulla possibilità di apprendere, di imparare dall'esperienza e affinare progressivamente la propria intelligenza. Questa capacità, nell'intelligenza artificiale, è tipica soprattutto di alcuni sistemi noti come reti neurali.

Senza addentrarci in dettagli matematici complicati, una rete neurale (artificiale) è un modello matematico di calcolo che si ispira alle reti neurali biologiche, cioè alle interconnessioni presenti nel nostro sistema nervoso, in particolare nel cervello (diapositiva 20).

Le reti neurali, questo è il fatto interessante, sono fatte in modo che, mano a mano che risolvono dei problemi, riescono a modificare la struttura delle proprie interconnessioni interne per adattarsi meglio al problema che devono risolvere.

Oggi le reti neurali vengono utilizzate in moltissimi campi: sistemi di controllo, sistemi radar, riconoscimento di oggetti o di volti, riconoscimento vocale, OCR, applicazioni mediche o bioinformatiche, applicazioni finanziarie, previsioni del tempo, programmi antispam, e anche simulatori di giochi come gli scacchi.

11. Metodi euristici

Anche la seconda capacità, quella legata alla ricerca euristica delle soluzioni (diapositiva 21), è molto importante nella moderna intelligenza artificiale, ed è alla base di alcune tendenze che vengono indicate con diversi nomi, come "soft computing", "intelligenza computazionale", "computazione evolutiva", "intelligenza a sciami", ecc.

Consideriamo ad esempio il problema difficile della colorazione delle mappe. Un procedimento euristico per affrontare questo problema potrebbe consistere nell'assegnare inizialmente i colori agli stati della mappa in un modo casuale, allo scopo di ottenere una combinazione di partenza, e poi provare a cambiare ripetutamente il colore di uno stato e verificare se la nuova combinazione ottenuta è migliore di quella precedente. Migliore vuol dire che sono stati usati meno colori di prima, fermo restando che non ci devono essere stati confinanti colorati con lo stesso colore. In altre parole, il metodo euristico esegue alcune "mosse" per passare da una configurazione all'altra, e cerca di migliorare ad ogni mossa la qualità della soluzione.

Esistono moltissime tecniche che partono da questo schema base: algoritmi genetici, tabu search, simulated annealing, e chi più ne ha più ne metta. Nei minuti che rimangono accennerò soltanto a due di queste.

Per progettare queste tecniche euristiche, i ricercatori si sono ispirati a diversi fenomeni del mondo reale, e hanno preso spunto da cose diverse: fenomeni fisici, biologici, la struttura del sistema nervoso, il comportamento degli animali, e perfino le dinamiche che si verificano in un complesso musicale.

Uno dei metodi euristici utilizzati per risolvere problemi di ottimizzazione prende spunto dalla tecnica dell'improvvisazione che viene impiegata in taluni gruppi musicali, soprattutto in ambito jazz, allo scopo di cercare un'armonia interessante tra le note che vengono suonate da ogni strumento. Si pensi ancora al problema della colorazione delle carte geografiche, e si immagini che ogni musicista corrisponda ad uno stato sulla carta geografica, e che la nota suonata da quel musicista sia il colore assegnato a quello stato. Ebbene, la nostra tecnica euristica considera l'armonia che si crea tra le note scelte dai musicisti, e la giudica in base a criteri opportuni (nel nostro caso, come sappiamo, tutto è volto a fare in modo che vengano usati il minor numero di colori possibile e ad evitare stati confinanti colorati allo stesso modo): se l'armonia è giudicata buona, come un accordo piacevole suonato dai musicisti di un complesso jazz che fa improvvisazione, allora la configurazione viene considerata promettente e inserita tra quelle interessanti, altrimenti viene scartata.

Questa tecnica viene chiamata "harmony search" (diapositiva 22), cioè "ricerca di armonie": è stata proposta nel 2001, quindi si tratta di un'idea di ricerca molto recente. Viene utilizzata in molti problemi di ottimizzazione, come ad esempio problemi simili a quello del commesso viaggiatore e moltissimi altri.

Un'altra tecnica euristica che viene utilizzata attualmente per risolvere problemi difficili di ottimizzazione si ispira al comportamento degli animali, nello specifico delle formiche.

Nel mondo reale, le formiche si muovono in modo casuale, ma quando trovano del cibo lo prendono e tornano nel nido lasciando tracce di una sostanza chimica chiamata feromone. Se altre formiche trovano un percorso per raggiungere il cibo, è probabile che non lo facciano per caso, ma piuttosto perché sono attratte dalle tracce di feromone lasciate dalle altre formiche: tracce che in questo modo vengono rinforzate più volte perché le formiche alla fine tendono a concentrarsi sugli stessi percorsi. Dopo un po' di tempo, però, le tracce di feromone tendono ad evaporare, diventando meno attraenti. Più tempo le formiche impiegano per andare e tornare dal cibo, e più tempo avrà il feromone per evaporare: al contrario, sui percorsi brevi il feromone non farà in tempo ad evaporare perché le formiche impiegano poco a percorrerli, e quindi la maggior parte delle formiche saranno attratte proprio da questi percorsi più brevi.

Questo fatto ha ispirato nel 1991 gli ideatori della tecnica detta "Ant colony optimization" ("Ant colony" vuol dire "formicaio"): imitando questo comportamento "intelligente" i ricercatori hanno sviluppato algoritmi che risolvono in modo molto efficiente alcuni problemi difficili.