

Il ruolo dell'autonomia nella robotica spaziale

La costruzione di macchine capaci di aiutare l'uomo nel proprio lavoro è sempre stato uno degli obiettivi che hanno guidato lo sviluppo tecnologico. Da sempre, un notevole sforzo tecnico-scientifico è stato profuso rincorrendo il sogno di progettare ed implementare piattaforme robotiche più o meno complesse in grado di supportare le attività di un essere umano, come per esempio le piattaforme mobili robotizzate utilizzate dagli operai per spostare grossi carichi in un magazzino. Ma la ricerca scientifica, nell'ambito della automazione industriale, è andata anche oltre, arrivando alla progettazione di macchine capaci addirittura di sostituire un essere umano in molte mansioni ripetitive e/o pericolose, per esempio le attività di assemblaggio nelle catene di produzione. Tutto questo è stato possibile non solo per lo sviluppo di componenti hardware sempre più sofisticate e precise ma anche grazie alla progettazione di sistemi "intelligenti" capaci di svolgere in maniera autonoma molte attività complesse.

Fiumi di parole sono stati scritti nel tentativo di delineare le caratteristiche distintive dell'intelligenza. Per gli scopi di questo breve articolo, ci limiteremo a sottolineare che "autonomia" ed "intelligenza" possono essere due concetti ortogonali. In generale, il concetto di autonomia va distinto dal concetto di proattività, normalmente legato alla capacità di un agente artificiale di agire razionalmente in base al contesto. In tal senso, si può considerare *autonomo* un robot capace di eseguire con successo una sequenza preordinata di attività, mentre si può definire *proattivo* (e quindi intelligente) un robot il cui sistema di controllo è capace di generare autonomamente una sequenza di attività a fronte di un determinato obiettivo, e successivamente eseguire tale sequenza in modo consistente con le mutevoli condizioni ambientali.

In realtà, la presenza di operatori umani è rimasta cruciale nella maggior parte dei contesti operativi reali, in particolar modo in quei contesti in cui le capacità degli agenti artificiali non permettono di ottenere una risposta "sufficientemente intelligente" in tempi "sufficientemente rapidi". Ad esempio, i robot di sup-

porto alle unità di pronto intervento in scenari di emergenza sono dotati di mobilità autonoma, sebbene la responsabilità delle attività particolarmente critiche, tipo la ricerca di superstiti, rimane di esclusiva pertinenza degli operatori umani. Ciò nonostante, esistono molti scenari in cui i robot autonomi/proattivi ricoprono un ruolo fondamentale rappresentando un più che valido elemento sostitutivo dell'essere umano. Uno di questi scenari, e forse anche il più affascinante, è quello che riguarda le missioni spaziali.

In questo dominio infatti, alle ragioni legate all'estrema inospitalità dell'ambiente di esecuzione, si aggiungono anche le difficoltà di stabilire un controllo continuativo da Terra a causa sia delle enormi distanze coinvolte, sia delle limitate opportunità di comunicazione (*finestre di visibilità temporale*) determinate dalle leggi della meccanica celeste. In altre parole, lo spazio è stato tradizionalmente uno dei domini applicativi nei quali si è manifestata maggiormente la necessità di sviluppare veicoli (ovvero robot mobili) ad alto tasso di autonomia/proattività, macchine cioè che avessero le capacità di autogestire i propri compiti al di là del diretto e continuo controllo dell'uomo.

La strada verso lo sviluppo di tali soluzioni è stata lastricata di notevolissime difficoltà, non ultima lo scetticismo degli ambienti direttamente coinvolti (NASA, e più recentemente anche l'ESA) molto conservatori ed estremamente riluttanti nell'affidare l'esito di missioni del valore di svariati milioni di dollari in mano a delle "macchine" per quanto intelligenti. Di fatto, il livello di autonomia/intelligenza delle sonde e dei robot esploratori attualmente utilizzati nelle missioni è ancora molto limitato, soprattutto se paragonato con quanto spesso divulgato dalla stampa non specializzata la quale spesso tende ad esagerare quelle caratteristiche che sono particolarmente accattivanti per il grande pubblico, sottacendo gli aspetti meno "remunerativi" dal punto di vista dell'impatto mediatico. Innanzitutto, dal punto di vista del livello di autonomia raggiunto dai veicoli spaziali, le missioni nelle quali vengono utilizzati sono comunque progettate per lasciare all'uomo gran par-



Figura 7. La sonda Viking.

te del controllo, il quale viene esercitato attraverso periodiche comunicazioni in cui vengono inviati alle sonde piani e/o programmi alternativi di attività da svolgere; in secondo luogo, i domini di applicazione spaziali, per esempio quello relativo all'esplorazione del suolo marziano, pongono problemi di pianificazione automatica relativamente "semplici" rispetto ai problemi che potrebbero presentarsi nei domini "terrestri", i quali oltre a presentare al pianificatore tutte le difficoltà legate all'incompletezza dell'informazione, sono spesso caratterizzati da altissimi gradi di dinamismo e/o ostilità ambientale.

Nel seguito, ripercorrendo la storia delle principali missioni spaziali che hanno visto come obiettivo l'esplorazione della superficie del pianeta rosso, avremo modo di evidenziare i livelli di autonomia e proattività dei robot utilizzati. In particolare, porremo particolare attenzione all'evoluzione dei sistemi di controllo e delle capacità deliberative di tali sistemi.

MISSIONE VIKING. Il progetto della NASA denominato Viking (figura 7) ha rappresentato il culmine di una serie di missioni per l'esplorazione del pianeta Marte che iniziò nel 1964 con il Mariner 4 e che continuò fino al 1972. Il Viking ha trovato un posto d'onore nella storia diventando il primo progetto americano che riuscì a far atterrare con successo una sonda terrestre sulla superficie di Marte. Furono costruiti due veicoli

spaziali identici, ognuno composto da un *lander* e un *orbiter*. Entrambi i veicoli raggiunsero Marte ponendosi in un'orbita stabile; successivamente, i *lander* si separarono e si posarono con successo sulla superficie del pianeta allo scopo di iniziare le operazioni di analisi per le quali erano stati progettati.

I *lander* erano veri e propri laboratori biochimici approntati per verificare l'eventuale presenza di forme di vita su Marte. Il *lander* Viking 1 atterrò il 20 luglio 1976 a *Chryse Planitia* mentre il Viking 2 compì il suo atterraggio morbido il 3 settembre del 1976 in una zona chiamata *Utopia Planitia*. Vennero scelte volutamente due luoghi distanti tra loro più di 6000 km in modo da esplorare settori della superficie del pianeta rosso aventi diverse caratteristiche. Le due sonde erano in grado di gestire complesse operazioni che permettevano di raccogliere, con bracci estensibili, campioni di suolo e di introdurli nel laboratorio di bordo. Tra gli esperimenti predisposti per rilevare eventuali tracce di vita presente o passata vi erano prove di fotosintesi e di attività metaboliche ideate per evidenziare l'eventuale manifestazione nel suolo marziano di variazioni chimiche dovute a processi biologici causati da microorganismi.

Il "cervello" del *lander* era un calcolatore elettronico che svolgeva il compito di controllare e sequenziare tutte le attività della macchina. Tale calcolatore costituiva il più importante traguardo tecnico rag-



Figura 8. Il rover Sojourner fotografato dal lander.

giunto durante il progetto Viking, ed era composto da due computer general-purpose, uno operativo e l'altro di riserva, da utilizzare in caso di guasto del primo. Le istruzioni necessarie per poter controllare tutte le attività del lander per i primi 22 giorni della missione sulla superficie marziana erano state immagazzinate nella memoria del calcolatore; successivamente, appena stabilite le comunicazioni lander-Terra dopo l'atterraggio, queste istruzioni furono aggiornate e modificate dal centro di controllo sulla Terra.

I lander Viking presentavano un livello di autonomia completo, in quanto erano capaci di operare per più giorni senza l'intervento di alcuno operatore umano. Questi svolsero con successo tutte le attività pianificate, senza però ottenere alcuna prova della presenza di vita su Marte. È necessario sottolineare che il sistema di controllo dei lander non presentava alcuna caratteristica proattiva ma si limitava ad eseguire le operazioni (preordinate) presenti nella memoria del calcolatore di bordo. Di conseguenza, un eventuale fallimento durante l'esecuzione di una istruzione o l'occorrenza di un guasto non potevano essere affrontati se non dopo un contatto con il centro di controllo terrestre che, solo dopo aver diagnosticato la causa del problema, avrebbe inviato nuove istruzioni per proseguire le attività scientifiche pianificate.

Questo poneva un problema di efficienza. Infatti, la comunicazione tra un veicolo spaziale operante su Marte ed il centro di controllo terrestre era possibile solo in determinati intervalli temporali determinati dalla periodica occlusione operata dal pianeta rosso nei riguardi del veicolo orbitante. Una comunicazione per otte-

nere dal lander le informazioni riguardanti sia il suo stato interno che lo stato di avanzamento delle operazioni svolte poteva avvenire esclusivamente all'interno di una determinata finestra temporale. Gli scienziati quindi, una volta ottenuti i dati dalla sonda, erano costretti ad aspettare la successiva opportunità di contatto per predisporre gli aggiornamenti e le nuove istruzioni da comunicare al veicolo. Durante tutto il periodo in cui il veicolo rimaneva "in ombra", non era possibile compiere alcuna operazione ed il lander rimaneva di fatto inutilizzato. Nonostante l'assenza delle capacità deliberative della macchina, la missione Viking fu un grande successo: si era infatti riusciti per la prima volta a raggiungere la superficie di Marte con un veicolo capace di operare *in situ* e ritrasmettere a Terra dati di incalcolabile valore. Come vedremo, la missione Viking sarebbe stata seguita da altre missioni dove il ruolo sempre più importante dall'autonomia di bordo sarebbe stato fondamentale ai fini della massimizzazione del ritorno scientifico.

MISSIONE PATHFINDER-SOJOURNER.

Successivamente alla missione Viking, nel 1997 la NASA lanciò la missione Pathfinder - Sojourner (figura 8), con l'obiettivo di portare su Marte un veicolo equipaggiato con strumenti scientifici (il *lander*) ed un robot esploratore (il *rover*). Scopo della missione era di recuperare più informazioni possibili del suolo marziano; invero, la missione finì con l'aver un successo che superò le più rosee aspettative, visto che Pathfinder riuscì a trasmettere dati molto oltre il periodo previsto di operatività. Anche il metodo utilizzato da Pathfinder per atterrare al suolo fu innovativo, prevedendo l'utilizzo di un paracadute per ridurre la velocità di post-penetrazione dell'atmosfera marziana e di una serie di air-bags per ammortizzare l'impatto finale al suolo, che avvenne il 4 luglio 1997.

Una delle sfide più impegnative della missione Pathfinder-Sojourner era dovuta alla presenza del robot esploratore, il quale doveva essere dotato delle capacità di navigare in sicurezza sul terreno accidentato di Marte. Questa circostanza poneva serissimi problemi legati all'autonomia: infatti, i lunghissimi tempi necessari per completare le comunicazioni da e verso la Terra (20 minuti per mandare ogni comando da Terra e altrettanti per riceverne la conferma) avrebbero reso impraticabile qualsiasi tentativo di controllo diretto del rover (teleoperazione); inoltre, persistevano i pesanti limiti di visibilità temporale da tenere in considerazio-

ne per schedulare qualsiasi tipo di comunicazione con la macchina. Esisteva di fatto una sola opportunità per giorno marziano (*sol*) per effettuare trasmissioni dei dati telemetrici e di comando tra il rover e gli operatori a Terra; era perciò indispensabile dotare la macchina di capacità di navigazione autonome, in modo da limitare il carico di comandi da dover trasmettere e di conseguenza il numero dei collegamenti necessari per ottenere la piena operatività.

L'autonomia era quasi completamente limitata alla possibilità di eseguire dei comandi di tipo "GoTo Waypoint" ricevuti da Terra: una volta ricevuta l'istruzione, era poi compito del rover raggiungere la destinazione analizzando tutti gli ostacoli che eventualmente avrebbe incontrato lungo la strada e decidere autonomamente quale strategia di navigazione (*attitude*, *path*, *wheel orientation*) adottare. Per esempio, una volta ricevuta dagli operatori di Terra la successiva destinazione da raggiungere per quel giorno, il rover aveva la capacità di rilevare ed evitare autonomamente le rocce di grandezza significativa, nonché riconoscere le zone lungo il percorso caratterizzate da un gradiente troppo elevato che avrebbero potuto destabilizzarlo senza possibilità di recupero e conseguentemente decidere eventuali mo-

difiche alla traiettoria, senza perdere di vista l'obiettivo principale. All'epoca della missione Pathfinder-Sojourner, queste capacità di risolvere complessi problemi di *path planning* e *obstacle avoidance*, e di operare in ambienti non modellati scegliendo azioni in risposta all'input fornito dai sensori per perseguire obiettivi predeterminati, rappresentavano un traguardo pionieristico dal punto di vista dell'autonomia. I successi di Pathfinder, misurati a fronte dell'enorme ritorno scientifico della missione, misero in luce l'importanza che le capacità deliberative dei robot esploratori avrebbero rivestito nelle missioni future. L'ultimo ciclo di trasmissione dati utile ricevuto dal Pathfinder fu completato il 27 settembre, dopo ben 83 *sol* di ineccepibile servizio.

MISSIONE SPIRIT & OPPORTUNITY. I rover Spirit e Opportunity (figura 9) atterrarono su Marte rispettivamente il 4 gennaio ed il 25 gennaio 2004. I siti di atterraggio furono scelti l'uno agli antipodi dell'altro (cratere di *Gusev* e *Meridiani Planum*, rispettivamente). A differenza della missione Pathfinder, che prevedeva la presenza di strumenti scientifici sia sul lander che sul rover; i lander di Spirit ed Opportunity avevano il solo scopo di proteggere i rover; ed erano quindi

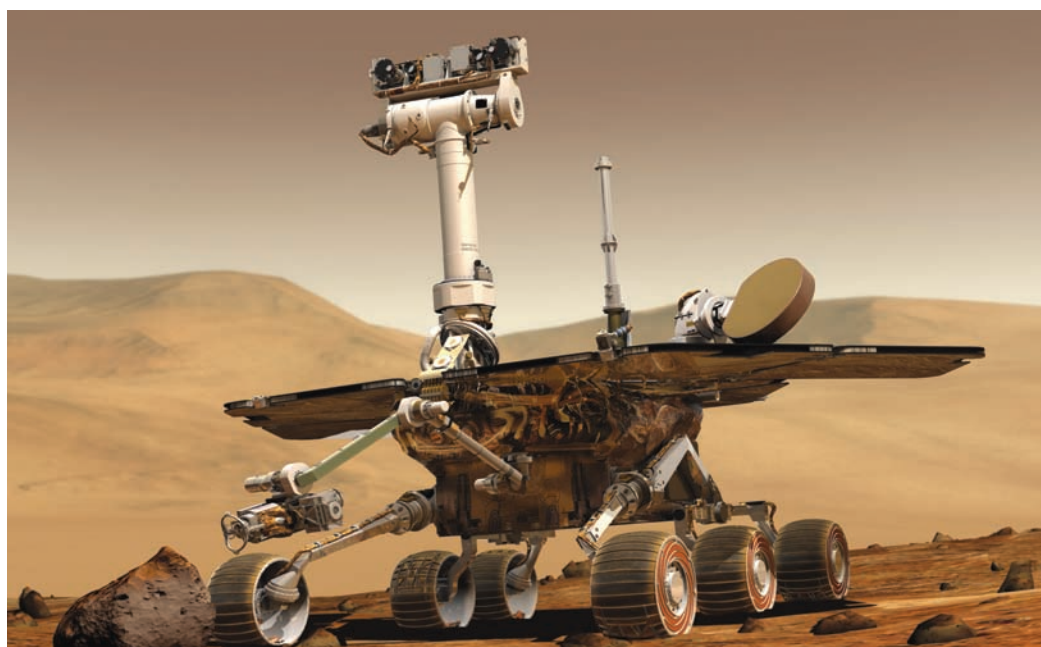


Figura 9. Una rappresentazione del rover Spirit.

sprovisti di ogni strumentazione utile. Dal momento che tutta la strumentazione si trovava a bordo del rover, fu indispensabile intensificare gli sforzi verso un livello più alto di autonomia di quest'ultimo: questa volta infatti, tutta la responsabilità del successo scientifico della missione dipendeva dalle reali capacità della macchina sia di gestire in maniera intelligente tutta la strumentazione di bordo, sia di saper navigare in maniera robusta verso le destinazioni assegnate. Le due precedenti capacità erano strettamente collegate: sarebbe stato infatti inutile saper navigare correttamente verso un oggetto di interesse e fallire nella gestione della strumentazione preposta alla sua analisi; allo stesso modo il saper produrre ed eseguire piani ottimali di gestione delle risorse scientifiche a bordo, senza un'altrettanto efficace capacità di movimento.

Entrambe le sonde si sono comportate egregiamente sin dall'inizio della missione a loro affidata. Anche la loro longevità ha oltrepassato qualsiasi previsione: a dicembre del 2006, dopo tre anni di servizio ininterrotto, la NASA decise di prolungare la durata delle missioni relative alle osservazioni scientifiche, trasmettendo nei computer di bordo di entrambi i robot nuovi programmi allo scopo di testare nuove capacità ed aumentare l'autonomia decisionale dei rover.

Una delle capacità innovative aggiunte riguarda la possibilità di esaminare le immagini acquisite e riconoscere automaticamente la presenza di alcune caratteristiche particolari (*Thinking Spacecraft*). Questa abilità è estremamente utile poiché solleva gli scienziati a Terra dal dover setacciare le molte immagini ricevute dal rover ed individuare quelle di particolare interesse (ad esempio, immagini che contengono mulinelli di polvere o nuvole). Adesso, il rover riesce a riconoscere queste caratteristiche e seleziona autonomamente le parti di immagini scientificamente rilevanti scartando le altre. Questo aumenta l'efficienza operativa in quanto il tempo di trasmissione risparmiato viene invece utilizzato per la ricerca scientifica.

Un'altra capacità aggiuntiva è la cosiddetta "*Visual Target Tracking*", tramite la quale il rover è in grado di riconoscere continuamente una caratteristica del paesaggio nonostante questa cambi continuamente a causa dello spostamento del rover stesso. La macchina aggiorna costantemente il modello della caratteristica di interesse (i.e. una roccia che si ingrandisce all'avvicinarsi del robot, oppure che cambia la sua forma a seconda della direzione di avvicinamento), rendendo la macchina capace

di interpretare tale cambiamento come una caratteristica del medesimo oggetto.

Un'altra nuova capacità, denominata "*Go and Touch*", rende il rover in grado di determinare autonomamente se e dove sia sicuro estendere il braccio robotico verso un oggetto di interesse e permettere il contatto di uno degli strumenti installati sul braccio stesso con l'oggetto. Finora, la squadra di controllo sulla Terra era costretta a ricevere dal rover le immagini dell'oggetto, decidere sulla fattibilità pratica dell'operazione di analisi da parte del robot, e in caso affermativo, segnalare l'OK alla macchina il giorno seguente. Grazie a questa nuova capacità, il rover è invece capace di dirigersi verso l'oggetto e decidere autonomamente se analizzarlo o no, tutto nello stesso giorno, con ovvi vantaggi.

Da questa breve descrizione delle principali missioni spaziali finalizzate all'esplorazione della superficie di Marte, si evince come autonomia e proattività abbiano giocato un ruolo sempre più determinante, all'aumentare della complessità delle attività da svolgere. Nell'arco di trenta anni, gli avanzamenti nell'ambito dell'Intelligenza Artificiale hanno permesso, a partire da un "semplice" lander completamente privo di qualsiasi capacità di spostamento, di progettare veri e propri laboratori scientifici mobili capaci di selezionare e raggiungere direttamente gli obiettivi di interesse e di gestire autonomamente tutti gli strumenti di bordo, compatibilmente con le stringenti limitazioni energetiche. Solo un sensibile incremento delle capacità decisionali autonome ha permesso di poter sfruttare efficientemente le potenzialità dei robot in continua evoluzione, a parità delle condizioni operative al contorno.

Questi successi stanno incoraggiando gli scienziati a raccogliere nuove sfide, e molti sforzi si stanno compiendo nell'ambito dell'intelligenza artificiale per proporre soluzioni sempre più all'avanguardia. Nonostante i ragguardevoli risultati raggiunti, è ragionevole supporre che sarà comunque necessario molto tempo prima di vedere realizzata una missione completamente autonoma, per problemi di natura sia tecnologica che finanziaria, nonché a causa della tradizionale prudenza che gli enti finanziatori continuano a manifestare nei confronti delle nuove tecnologie.

Andrea Orlandini DIA - Università degli Studi Roma Tre
Riccardo Rasconi

Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione - CNR