

Progetto di robotica

Stato dell'arte dei controllori neurali in artropodi

**Studenti: Calarco Severino 654874
Campo Gianluca 652728**

1. Introduzione

Una delle sfide più grandi per la comunità di ricerca in robotica è lo sviluppo di macchine intelligenti capaci di navigazione autonoma in ambienti naturali. L'obiettivo è quindi quello di riprodurre i comportamenti e/o fenomeni unici delle creature viventi in natura. Tali macchine si baseranno su un sistema sensoriale complesso in grado di raccogliere le caratteristiche importanti dell'ambiente e su delle procedure intelligenti di controllo che genereranno le azioni appropriate all'ambiente percepito.

Negli ultimi anni, è stata data un'importanza sempre più crescente ai ruoli cruciali giocati dal corpo e dall'ambiente dell'animale per comprendere la base neurale del relativo comportamento. Il controllo neurale di alcuni animali può essere studiato usando i modelli del robot i quali sono stati usati (per esempio Zalzala e Morris, 1996) per almeno una decade, con un certo successo. Finora i robot non sono migliori degli animali per quanto riguarda il controllo robusto e flessibile del movimento, così la biologia può fornirci delle idee.

Robot biologicamente ispirati possono essere costruiti in maniera tale che incorporino funzioni di biomeccanica animale e di controllo neurale per migliorare la loro agilità e robustezza su una data operazione.

Malgrado il livello elevato di conoscenza di base, è raramente possibile copiare la biologia poiché non è sempre tecnologicamente fattibile o desiderabile imitare il disegno neuromeccanico di un animale.

Ci sono un gran numero di sistemi di stimoli biologici che sono stati studiati bene sia comportamentalmente che fisiologicamente, ma tuttavia nessuno di questi sistemi è stato completamente capito, poiché, come già detto, comprendere i sistemi biologici è un'impresa alquanto ardua e l'unica tecnica da seguire che può portare a risultati incoraggianti è quella del bottom-up, che consiste nel partire da problemi relativamente semplici nel controllo del movimento.

Come modelli di partenza per lo studio del comportamento animale sono stati utilizzati gli artropodi (in particolare gli insetti), i quali hanno ricevuto livelli di interesse crescente negli ultimi anni perché, malgrado essi siano meno complessi dei più grandi organismi quali i mammiferi, hanno riscosso estremamente successo nella realtà virtuale per ogni tipo di habitat su terra. Gli artropodi sono stati importanti nello studio sul controllo sensomotorio a causa delle loro risposte relativamente stereotipate e veloci e della possibilità di collegamento dei circuiti neurali del comportamento. Come i sistemi sensoriali di tutti gli animali quelli degli insetti servono da filtri che rilevano soltanto un piccolo

sottoinsieme dell'energia ambientale disponibile. Tuttavia, quel sottoinsieme delle informazioni è spesso specificato per mansioni particolari del comportamento necessarie per la loro sopravvivenza e riproduzione. In più, il loro piccolo formato e la possibilità di elaborazione neurali limitati ha condotto a soluzioni altamente efficienti. Inoltre gli insetti hanno una struttura forte, un peso leggero, sono agili in modo da potersi arrampicare sopra a degli ostacoli ed attraversare terreni irregolari ed in più i loro modelli sono energeticamente efficienti in modo da poter funzionare autonomamente abbastanza a lungo per compire una missione utile. Ad esempio un robot con l'agilità ed il rendimento energetico di una blatta ha potuto compiere molti tipi differenti di missioni esplorative su terra e sulle superfici extraterrestri. Per parecchi sistemi di insetti, si hanno informazioni eccellenti sui collegamenti diretti fra le caratteristiche dei neuroni identificati e del comportamento corrispondente dell'animale.

La chiara superiorità degli artropodi semplici su tutti i robot attuali suggerisce continue ricerche. In più, effettuare queste soluzioni sui robot può essere giustificato dal fatto che tali esecuzioni possono essere molto informative per i biologi.

Vari tipi di artropodi sono stati studiati e riprodotti con sistemi di reti neurali ma i più comuni sono mosche, grilli, formiche e lepidotteri.

Molto è conosciuto circa il collegamento fra i neuroni visivi e la coppia di torsione di volo (propri della mosca, ...), gli interneuroni uditivi e la risposta di movimento del grillo e l'attività visiva interneurale discendente modulata tramite il feromone (formica) e l'associata direzione dell'odore modulare durante il volo(per esempio lepidottero).

Nel cervello della mosca comune, oltre metà dei 350.000 neuroni si crede che abbiano un certo ruolo nell'elaborazione visiva.

Le mosche ed altri insetti possono usare i campi visivi di flusso per stabilizzare la loro traiettoria e sembra esserci un sistema neurale dedicato per l'estrazione dei sensi relativi di flusso e produrre la coppia

di torsione adatta dell'uscita. Le mosche contano in modo significativo sulle informazioni visive di movimento per sopravvivere. Nella mosca, le informazioni di movimento sono conosciute per essere alla base di molti comportamenti importanti compresa la stabilizzazione durante il volo, l'orientamento verso piccoli oggetti che si muovono velocemente (Egelhaaf e Borst, 1993) e la valutazione del tempo di contatto per gli atterraggi sicuri (Borst e Bahde, 1988). Alcune mansioni legate al movimento come l'estensione delle zampe per l'atterraggio possono essere eseguite in meno di 70 microsecondi dopo la presentazione dello stimolo. Wagner segnala un tempo di reazione di 30 microsecondi per il maschio che vola inseguendo i futuri compagni (Wagner, 1986).

I grilli femmina possono individuare i maschi della stessa specie camminando o volando verso la canzone prodotta dal maschio aprendo e chiudendo le ali. La frequenza caratteristica e lo schema temporale della canzone influenzano la tendenza di orientamento, suggerendo che siano anche zigoti riconoscibili e differenziando le loro canzoni da altri segnali uditivi. Le canzoni maschili tipiche consistono di gruppi di spari sonori corti prodotti parecchie volte in un secondo. Le femmine sembrano essere particolarmente selettive per la velocità di ripetizione delle sillabe all'interno di ogni stridio.

Per un lepidottero maschio che tenta di seguire un "plume" del feromone (sostanza chimica prodotta nel corpo che stimola una risposta nel sesso opposto) disperso dal vento dalla femmina, il segnale non forma un dislivello conveniente ma è turbolento ed irregolare. Il meccanismo di base sembra coinvolgere l'animale che risulta rivolgersi verso il vento quando incontra l'indicazione chimica ed eseguire un programma di spostamento che viene modulato dai successivi incontri (tra l'animale e il vento). Per esempio, il sistema olfattivo dei lepidotteri maschi è molto ben sintonizzato agli attrattori sessuali specifici della specie prodotti dalle femmine ed adattato per rispondere alla struttura intermittente dei "plumes" di odore negli ambienti naturali.

Un comportamento analogo a quello del lepidottero si può riscontrare nella formica, la quale si serve di sensori chimici per l'individuazione del feromone.

I sensori chimici delle formiche e dei lepidotteri che rintracciano i "plumes" del feromone femminile sono le loro due antenne. Anche se altri gruppi di ricerca già hanno richiamato l'utilizzazione di questi sensori (Ishida, Russell e Deveza, Kuwana e Shimoyama), essi sono di gran lunga i meno adoperati in robotica. I motivi di questo scarso impiego sono da ricercare non soltanto nell'importanza ridotta di questi sensi nel movimento umano, ma anche nel lungo periodo di tempo che i sensori chimici impiegano ad evolversi e dunque a diventare simili alle loro controparti biologiche.

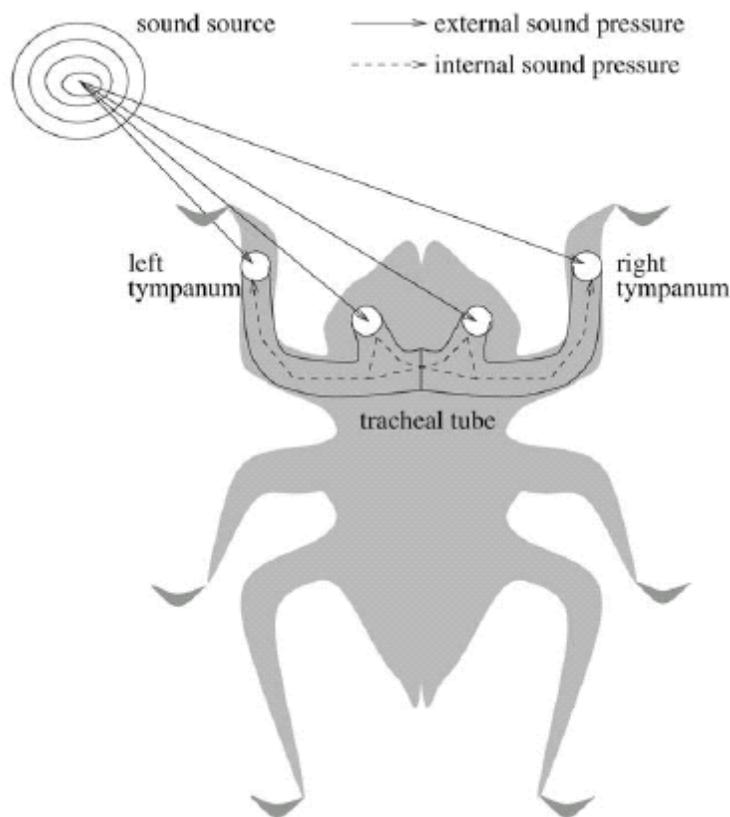
Passiamo ora a descrivere due modelli di controllore neurale di fonotaxis e di chemotaxis che ci sono sembrati più significativi.

2.1 Controllore neurale del grillo (phonotaxis)

Nella fonotaxis, metodo di riconoscimento di una sorgente sonora per mezzo di due sensori, un grillo femmina si avvicina ad un maschio muovendosi verso la canzone che questo produce. Usando solo indicazioni uditive il grillo femmina è capace di captare e differenziare suoni di grilli maschi della propria specie anche a lunghe distanze (10-20 metri). La frequenza caratteristica della canzone corrisponde alla velocità a cui i denti del pettine passano sopra il *plectrum* ed si attesta intorno ai 4-5 chilo hertz per la maggior parte delle specie del grillo. Lo schema temporale consiste di stridii di suono ripetuti regolarmente ("*syllables*") che corrispondono ad ogni chiusura delle ali, seguita da un intervallo silenzioso mentre le ali si aprono nuovamente. Nel *Gryllus bimaculatus*, per esempio, questo provoca una durata della sillaba intorno ai 20 millisecondi, seguita da uno spacco di durata simile. C'è un livello

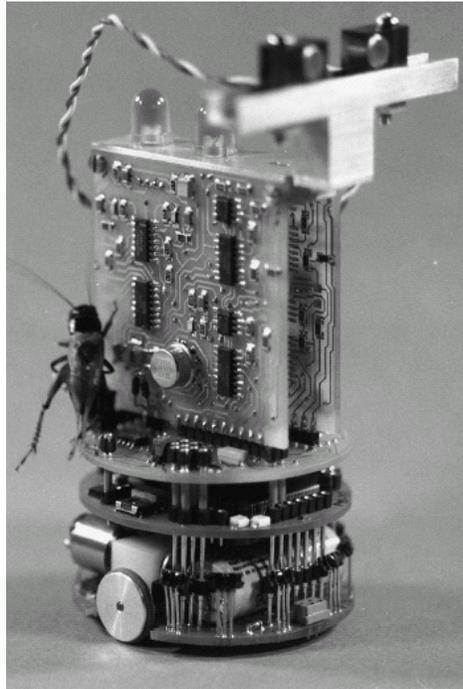
supplementare dello schema temporale con le sillabe in gruppi di tre o di quattro, seguiti da un periodo silenzioso intorno ai 200-500 millisecondi. Questi schemi temporali variano per specie differenti di grillo e così forniscono una base da cui le femmine potrebbero riconoscere il maschio della stessa specie. Una delle più importanti individuazioni è che i grilli si dirigono in modo più diretto verso le canzoni di una specifica frequenza e con una certa velocità di ripetizione delle sillabe.

Il suono raggiunge i timpani sia direttamente che indirettamente (attraverso un tubo tracheale).

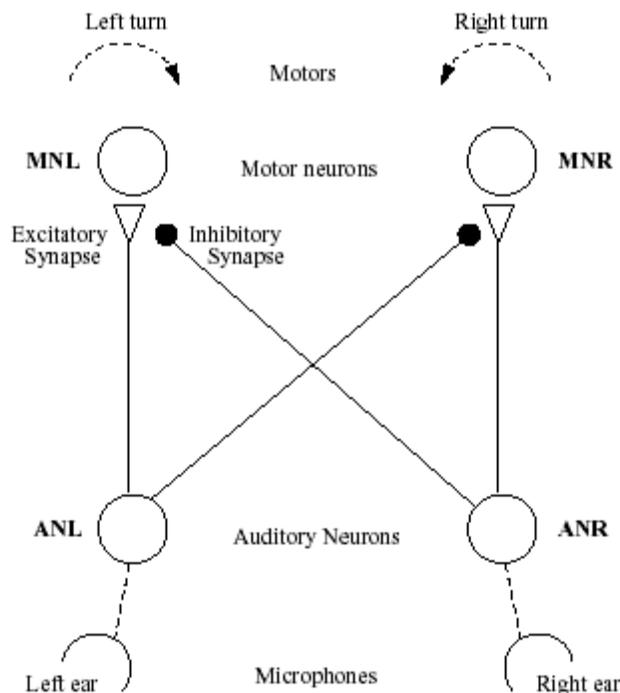


Le principali caratteristiche del modello che discuteremo in dettaglio in seguito sono: un circuito che capta suoni elettronici che mima il sistema uditivo del grillo in tempo reale con un controllo programmabile di parametri e un modello di rete neurale che meglio si adatta a questa

situazione. Il robot base è Khepera al quale si aggiunge il sistema uditivo del grillo ed misura complessivamente dieci centimetri in altezza e sei in diametro (foto sotto).



Il controllore del robot corrente consiste di quattro soli neuroni e quattro sinapsi (vedi figura sotto). I due neuroni di input sono identificati con AN (auditory neurons) e sono associati attentamente con la phonotaxis (Schildberger e Horner, 1988). L'ampiezza del segnale dal circuito uditivo è diminuito di un fattore pari a quattro e gli viene sottratto un rumore costante. Il valore risultante è aggiunto al potenziale della membrana dei rispettivi neuroni in input. Gli AN del grillo hanno spari preimpostati su un potenziale rilevato, così la fase di recupero (capacità di sparare nuovamente) nel modello neurale è settato vicino ad una soglia.



Questo significa che input continui condurranno rapidamente a ulteriori spari per tutta la durata dello stimolo. L'ampiezza dell'input sarà rappresentata sia dalla latenza iniziale per iniziare a sparare che dalla conseguente velocità di sparo. Nel grillo gli AN mandano assoni al cervello, ma sebbene un numero di neuroni del cervello coinvolti nel processo uditivo sono stati identificati (Schildberger, 1984; Bohm e Schildberger, 1982; Staudacher, 1998) la connettività del circuito non è ancora conosciuta. Nel modello del robot ogni AN ha una connessione eccitatoria con un MN (motor neurons) sullo stesso lato. Quindi uno sparo iniziale aumenta il potenziale dell' MN verso la soglia. Comunque la depressione della sinapsi significa che subito dopo lo sparo il potenziale non aumenta in modo ulteriormente veloce. Solo se c'è un vuoto nello sparo di AN, usato per il recupero della sinapsi, può un altro sparo in AN contribuire sufficientemente a MN per spingerlo verso la soglia. Ogni AN ha anche una connessione inibitoria alla sinapsi opposta. Questo

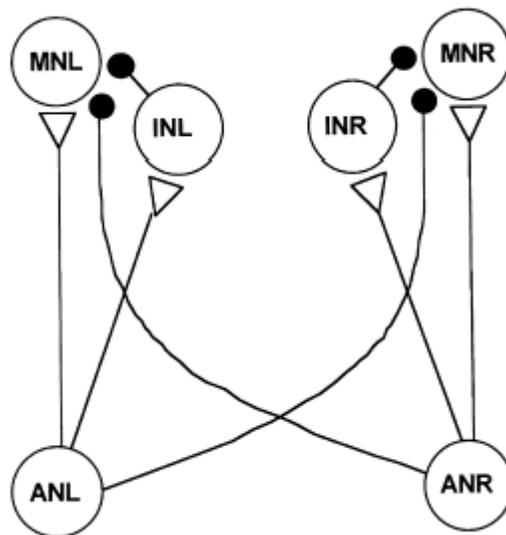
significa che il primo AN che spara sopprimerà ogni effetto dell'opposto AN che spara leggermente dopo.

Se MN spara il robot farà un giro nella direzione corrispondente ad una velocità e un tempo fissati. Se c'è un altro sparo che segue immediatamente il precedente senza che esso sia ancora terminato l'effetto sarà esteso. Se l'opposto MN spara durante la durata il giro sarà invertito. Correntemente la velocità e la durata del giro è settata approssimativamente a 55 giri al secondo per 150 millisecondi.

Sebbene il robot descritto è stato usato per implementare una particolare ipotesi sulla phonotaxis, un'importante caratteristica del disegno è che può essere facilmente usata per testare ipotesi alternative.

Il robot grillo qui descritto dimostra un plausibile, semplice meccanismo dal quale il grillo può fare una selettiva phonotaxis.

Benché questo modello di controllore neurale sia relativamente semplice, ha portato a dei risultati vantaggiosi per comprendere il comportamento animale in determinate situazioni. Ciò ha portato all'implementazione di modelli neurali sempre più complessi che sono tuttora in fase di elaborazione. Per esempio un altro modello di controllore neurale implementato dalla Webb, utilizza sei neuroni (vedi schema sotto) usati



sempre per il controllo della risposta di phonotaxis del grillo. Ogni unità AN riceve l'input del suono e pilota l'MN dello stesso lato. Inoltre esso inibisce l'MN del lato opposto e attraverso l'unità IN inibisce anche l'MN del suo stesso lato. Con questa configurazione qualsiasi AN spari per primo, produrrà un singolo sparo nel corrispondente MN producendo così un movimento.

2.2 Controllore neurale della formica (chemotaxis)

Una forma di controllo del movimento comune a molti animali è seguire delle tracce chimiche. Tuttavia finora è risultato difficile questo comportamento su un robot.

Mentre un certo numero di meccanismi per muoversi lungo un dislivello chimico si presentano efficacemente con un singolo sensore (per esempio *Morse* ed altri, 1998), si crede che le formiche che seguono delle tracce confrontino normalmente la differenza nella risposta dei sensori separati spazialmente (antenne) per effettuare la chemotaxis.

Lo stimolo della scia della formica è una miscela del feromone posta lungo la terra attraverso il trascinarsi delle loro ghiandole (*Holldobler e Wilson*, 1990). Il prodotto chimico lasciato sul terreno, evapora in un periodo di circa 10 minuti, formando una zona semi ellittica di feromone gassoso (*Bossert e Wilson*, 1963). La turbolenza dell'aria può rendere difficile la rilevazione di un gradiente nella concentrazione della molecola di odore.

Il modello neurale della formica che descriviamo, di base ha utilizzato sette neuroni per ogni lato collegato in un'architettura simmetrica

stabilita prima, più un neurone della velocità del motore comune ad entrambi i lati (fig. 1).

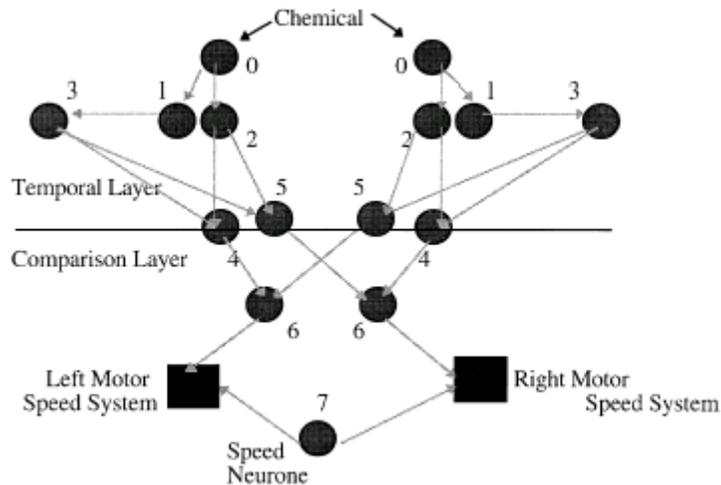


Fig. 1.

Ogni neurone ha una funzione lineare semplice di attivazione (cioè l'uscita è la somma degli input moltiplicati per i pesi del collegamento). L'idea dietro l'architettura è di effettuare differenziazione temporale sull'input ed usare il risultato per controllare le velocità del motore dai due lati tali che il robot girerà verso gli aumenti e via dalle diminuzioni di concentrazione del prodotto chimico. I particolari dell'architettura possono essere considerati in due parti. Il livello temporale è un insieme di collegamenti neurali che effettua differenziazione temporale sull'input. La risposta a concentrazione chimica (0), da ogni lato, è passata a due neuroni (1 e 2). Il neurone 1 si collega ad una deviazione del neurone 3 e l'uscita di questo è unita con collegamento diretto (2) ai neuroni 4 e 5. L'uscita di questo livello rappresenta perciò una semplice media temporale o differenziazione (secondo il segno dei pesi rispettivi) del segnale: cioè unendo il segnale diretto da 2 ed il segnale ritardato di uno step di tempo attraverso il neurone 3. L'uscita dalla differenziazione temporale è usata tramite livello di confronto. Ciò determina la velocità del motore tramite il neurone 6, che

prende l'input dal neurone 4 dallo stesso lato e dal neurone 5 dal lato opposto. L'uscita farà diminuire la velocità quando i neuroni 4 sono attivi, cioè la concentrazione sta aumentando sullo stesso lato e sulla velocità di aumento quando il neurone opposto 5 è attivo, cioè la concentrazione sta aumentando dal lato opposto. Il neurone 7 fornisce una velocità bassa comune ad entrambi i lati.

È stato necessario scoprire sperimentalmente quali quantità di prodotto chimico produrrebbero un range adatto di sensibilità nei sensori e quale separazione dei sensori e velocità di movimento e di rotazione nel robot sarebbero sufficienti per controllare il comportamento.

Il robot è stato costruito con mattoncini di Lego che hanno reso la struttura robusta ma dal telaio facilmente modificabile (fig. 2).

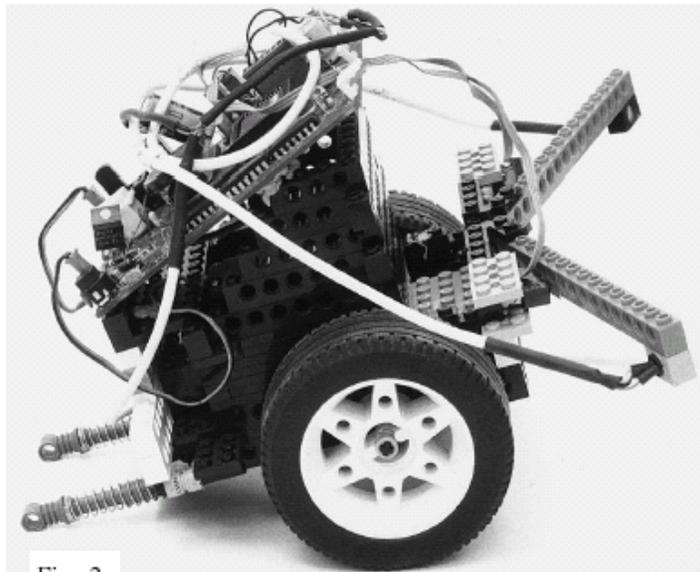


Fig. 2 .

Due motori controllano le due ruote e trascinano due contatti con il terreno che servono a dare stabilità al robot.

La velocità del robot non è molto elevata e si attesta intorno ai dieci centimetri al secondo. La portata delle antenne è di 29 centimetri. I pesi neurali dei collegamenti sono tutti settati a 1.0 tranne i collegamenti tra i neuroni 3-4, 3-5 e 4-6 i cui pesi sinaptici sono posti inizialmente a -0.5 e quelli tra i neuroni 5 - 6 con peso 1.5.

Parecchie condizioni dello stimolo sono state variate per confrontare i risultati del comportamento delle formiche con i modelli matematici precedenti (Calenbuhr e Deneubourg, 1992).

Nella tabella seguente sono riportati i risultati della chemotaxis sul robot: la distanza effettiva percorsa e l'inseguimento della traccia per cinque esperimenti sotto ogni condizione di stimolo.

Experimental variable	Effective distance travelled (metres)	Average number of trail crossings
Amount of chemical (arbitrary units)		
Small	5.3	2.0
Large	4.6	0.8
Starting angle (degrees)		
0	5.3	2.0
22	4.4	0.6
45	2.0	0.0
Speed (arbitrary units)		
0.5	5.3	2.0
1	4.7	0.4
Antennae span (metres)		
0.09	3.2	0.6
0.29	5.3	2.0
0.46	5.5	2.8

Dalla tabella si possono trarre alcune conclusioni interessanti:

1. aumentare la concentrazione chimica nelle tracce della formica oltre un punto ottimale conduce ad una diminuzione in stimoli;
2. è molto più probabile che le formiche comincino a seguire una traccia se la attraversano a meno di un angolo di 30°;
3. lo stimolo è migliore alle basse velocità, cioè più sono veloci, più è probabile che perdano la traccia;
4. le formiche con una più grande portata delle antenne ricevono stimoli migliori.

Anche se il modello esaminato è molto semplice, è abile a riprodurre qualitativamente molti dei comportamenti presi per essere caratteristici della formica segui-traccia.

Esperimenti recenti hanno provato che le formiche possono seguire la traccia (comunque meno efficacemente) con una singola antenna, ipotesi introdotta da Hangartner nel 1967.