

STEFANO MANCUSO\*, BARBARA MAZZOLAI\*\*

## Il plantoide: un possibile prezioso robot ispirato al mondo vegetale

Lettura tenuta il 6 aprile 2006

### INTRODUZIONE

Le piante sono organismi estremamente sensibili all'ambiente circostante, che competono attivamente per le limitate risorse disponibili nel suolo e nell'atmosfera, calcolano accuratamente le circostanze, usano sofisticate analisi costi-benefici e, infine, definiscono e intraprendono le appropriate azioni in risposta agli stimoli ambientali.

La complessa organizzazione anatomica e le principali funzionalità della pianta necessitano di un sistema sensoriale ben sviluppato che permetta all'organismo di esplorare efficacemente l'ambiente e di reagire velocemente ad avvenimenti potenzialmente dannosi. Per poter efficacemente utilizzare le risorse distribuite nell'ambiente, le piante si avvalgono di una sofisticata rete radicale formata da apici in continuo sviluppo che esplorano attivamente il suolo.

L'uomo ha sempre imitato la natura per la costruzione delle sue macchine. Dagli studi di Leonardo sul volo degli uccelli, alle odierne tecniche della robotica. In particolare, la Robotica Bioispirata o Biorobotica è una nuova area scientifico-tecnologica dai profondi connotati interdisciplinari, che trova i propri fondamenti metodologici principalmente nei settori della Robotica e della Bioingegneria Industriale, ma che allarga il proprio ambito culturale e applicativo verso numerosi settori dell'ingegneria, verso le scienze di base e applicate (in particolare la medicina, le neuroscienze, l'economia, il diritto, le bio/nanotecnologie), e anche verso le discipline umanistiche (la filosofia, la psicologia, l'antropologia, l'etica).

\* LINV - Laboratorio Internazionale di Neurobiologia Vegetale, Dip. Ortoflorofrutticoltura, Università di Firenze

\*\* CRIM - Centro per la Ricerca Applicata in Micro e Nanoingegneria, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa

La Biorobotica si pone come obiettivo quello di approfondire le conoscenze sul funzionamento dei sistemi biologici da un punto di vista “biomeccatronico”, e di utilizzare tali migliori conoscenze al fine di sviluppare metodologie e tecnologie innovative sia per la progettazione e la realizzazione di macchine e sistemi bioispirati (di dimensioni macro, micro e nano) caratterizzati da prestazioni molto avanzate (ad esempio robot “animaloidi” e “umanoidi”), sia per sviluppare dispositivi, anche realizzabili industrialmente. In questo contesto, del tutto innovativa risulta la realizzazione di robot ispirati al mondo vegetale. Partendo dalle recenti acquisizioni della neurobiologia vegetale, siamo oggi in grado di costruire robot che simulino l’attività delle piante: *i plantoidi* utilizzabili per le esplorazioni di regioni difficilmente raggiungibili dall’uomo, sia sulla terra che nello spazio.

L’esplorazione planetaria rappresenta una fra le principali, ma anche più difficoltose applicazioni della ricerca spaziale. Attraverso l’osservazione ravvicinata dei pianeti è possibile acquisire informazioni sulla storia degli stessi e in rari casi, come per esempio per Marte, cercare possibili tracce di vita extraterrestre. Robot ispirati alle piante o *plantoidi*, distribuiti su grandi aree della superficie planetaria e capaci di esplorare il suolo in una maniera simile a quella utilizzate dalle piante sulla Terra, potrebbero rappresentare una brillante soluzione a numerosi problemi tipici posti dall’esplorazione planetaria.

#### PERCHÉ LE PIANTE

Le piante sono organismi multicellulari eucariotici e fotosintetizzanti caratterizzati, sebbene esistano eccezioni, da una parte aerea e da un sistema radicale. Per compensare alla loro natura sessile, e quindi, adattarsi alle mutevoli condizioni ambientali senza potersi spostare, le piante hanno sviluppato la possibilità di muoversi attraverso la crescita, dimostrando una straordinaria plasticità fenotipica. L’insieme delle risposte all’ambiente che si manifestano con un movimento sono comunemente note con il nome di *tropismi*. Questi sono caratterizzati da una marcata crescita direzionale degli organi della pianta, soprattutto della radice, in risposta a stimoli esterni i principali fra i quali sono la luce (fototropismo), la gravità (gravitropismo), il contatto (tigmomorfismo), il gradiente di umidità (idrotropismo), l’ossigeno (ossitropismo), e il campo elettrico (eletrotropismo). La combinazione di questi tropismi permette alla pianta di sopravvivere in ambienti ostili e di colonizzare il suolo attraverso la creazione di un sistema radicale che ne assicura la sopravvivenza e la stabilità e che spesso è rappresentato da una quantità di materiale che eccede di gran lunga in massa

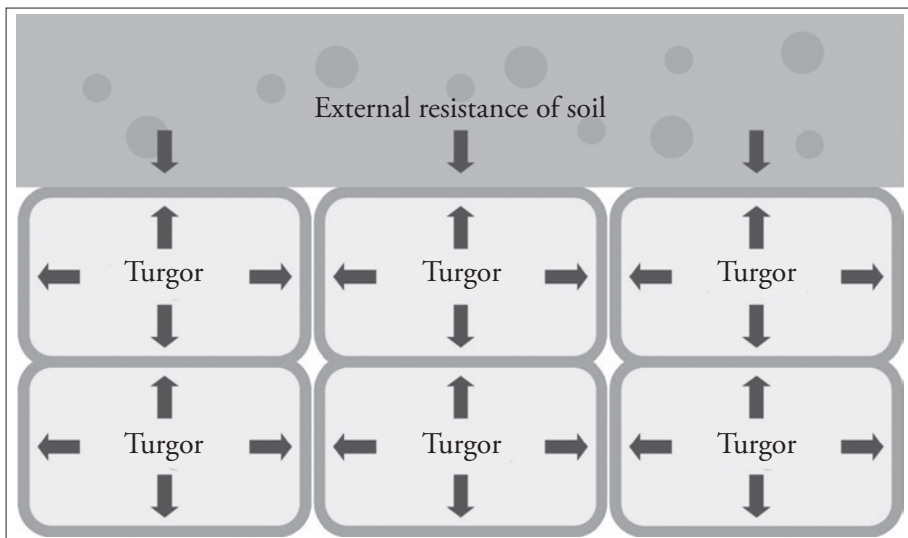


Fig. 1 *Diagramma schematico che mostra come le pressioni agiscono sull'epidermide di una radice che cresce nel suolo*

e lunghezza la chioma della pianta. Soprattutto la lunghezza delle radici può raggiungere dimensioni difficilmente immaginabili.

Per aumentare a dismisura la superficie assorbente delle radici, la natura è ricorsa a un trucco simile a quello attribuito da una poetica leggenda a Didone, la fondatrice di Cartagine. Si narra che il re Iarba avesse concesso a Didone tutta la terra che fosse possibile coprire con una pelle di bue. Si trattava, evidentemente, di un inganno che, tuttavia, la futura regina di Cartagine seppe risolvere a suo favore: essa, infatti, tagliò la pelle di bue in strisce sottilissime che legò fra loro riuscendo, così, a circondare interamente l'altura su cui doveva sorgere la città. Così, considerando la lunghezza totale dei peli radicali, una singola pianta di grano può raggiungere uno sviluppo lineare superiore ai venti chilometri. Se d'altra parte misuriamo il volume di questi stessi peli, ci accorgiamo che possono comodamente accomodarsi in un cubo di 1,5 centimetri di lato.

Un'altra fondamentale caratteristica degli apici radicali è la loro capacità di trovare una via di crescita anche in materiali estremamente resistenti. Gli apici radicali nonostante l'apparenza fragile e la delicata struttura, sono in grado di esercitare pressioni straordinarie, capaci di fratturare anche la roccia più solida, grazie alla divisione ed espansione cellulare. Perché le radici possano crescere, la grandezza dei pori o fessure nel suolo deve essere maggiore delle dimensioni dell'apice radicale. I fattori che controllano la crescita delle radici

in queste situazioni (suoli estremamente compatti) sono il turgore cellulare e la pressione esterna del suolo. Il turgore delle cellule della zona di elongazione della radice (fig. 1) spinge in avanti l'apice radicale, che è contrastato in questo movimento dalla pressione del suolo e dalla tensione delle pareti cellulari. La pressione esterna del suolo consiste della pressione richiesta per deformare il suolo più una componente di frizione fra il suolo e la radice, quest'ultima componente è tuttavia, probabilmente molto piccola in conseguenza dell'effetto lubrificante esercitato dalla cuffia radicale. La pressione esercitata dalla radice può raggiungere 1-3 MPa (a seconda della specie) e spiega come mai le radici delle piante siano in grado di spaccare materiali estremamente resistenti come l'asfalto, il cemento e addirittura il granito.

#### INDIVIDUALITÀ NELLE PIANTE

Una caratteristica dei vegetali, non sufficientemente nota e dalla quale la robotica potrebbe trarre ispirazione, è la loro costruzione modulare reiterata, che li rende, da questo punto di vista, decisamente differenti dagli animali.

Il corpo di un albero è costituito da unità replicate che, insieme, ne costituiscono l'architettura generale e ne definiscono la fisiologia. Così, la definizione di individuo che adoperiamo per definire gli individui animali, ha poca attinenza con il mondo delle piante.

Esistono per lo meno tre differenti definizioni di individuo, nessuna delle quali può ritenersi valida per le piante:

- 1) *Etimologica*: un individuo è un'entità biologica che non può essere divisa in due parti senza morire.
- 2) *Genetica*: un individuo è un'entità biologica che dispone di un genoma stabile nello spazio e nel tempo. Nello spazio perché questo genoma è lo stesso in qualunque cellula dell'organismo; nel tempo perché questa stabilità genetica si prolunga per tutta la durata della vita.
- 3) *Immunologica*: un individuo è un'entità funzionale chiaramente delimitata, singola, differente dalle altre, che possiede un "sé" chiaramente distinto da un "non-sé".

È facile dimostrare come per quasi tutte le piante, tali definizioni non abbiano molto senso. Cominciamo con la definizione *etimologica*: una pianta divisa in due non muore, ma anzi si moltiplica. Scriveva Fabre alla fine del XIX secolo "relativamente agli animali, nella stragrande maggioranza dei casi,

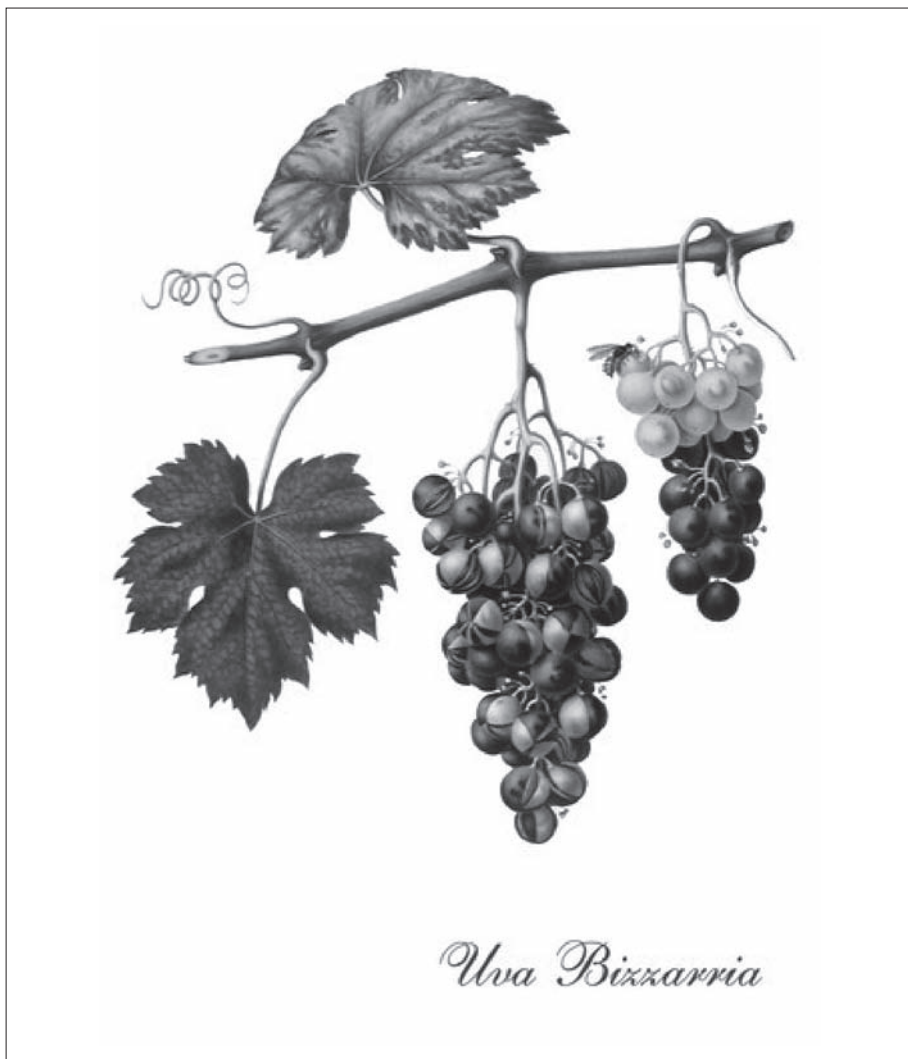


Fig. 2 *L'uva bizzarra è una delle tante chimere presente nel mondo vegetale che dimostrano la possibile coesistenza di genomi diversi sulla stessa pianta*

dividere significa distruggere; relativamente ai vegetali, dividere è moltiplicare” (Fabre, 1874). Non è il caso di dilungarsi su una nozione che è ben chiara non solo agli studiosi delle piante ma anche ai semplici appassionati: dividendo una pianta la si può moltiplicare. La produzione vivaistica basata sulla propagazione per talea o per innesto sfrutta proprio questa prerogativa delle piante.

Riguardo alla stabilità *genetica*, questa sembra essere una qualità più degli animali, che delle piante. In un animale, qualunque sia la sua dimensione, il genoma è stabile in tutte le sue cellule e per tutto l'arco della sua vita. Nelle piante, questa regola non sembra essere valida come ben sa qualunque arboricoltore che abbia studiato le cosiddette "mutazioni gemmarie" degli alberi da frutto. Nella storia dell'arboricoltura da frutto è capitato frequentemente che su un albero da frutto siano state individuate delle branche "mutanti" i cui frutti erano di speciale interesse. Molti sono gli esempi in tal senso: numerose varietà di agrumi si sono originate da mutazione gemmaria; le nettarine provengono quasi certamente da una mutazione gemmaria di pesco; il Pinot grigio è una mutazione gemmaria del Pinot nero ecc. Ma non solo, le chimere, sono un altro esempio di genomi differenti che coesistono nella stessa pianta. Le numerose "bizzarrie" comuni in molte specie da frutto come l'arancio o la vite (fig. 2), rappresentano un esempio lampante di questa "particolarità" della vita vegetale. Meno noto è che non solo nei sopraccitati casi, ma ordinariamente negli alberi, soprattutto di una certa età, sia comune reperire differenze genetiche fra le branche della stessa pianta (Murawski, 1998).

Un sistema di difesa *immunitaria*, più o meno perfezionato, infine, è una caratteristica comune a tutti gli animali che permette una protezione della identità individuale attraverso la eliminazione di cellule malate o geneticamente devianti. Le piante, pur possedendo un rudimentale sistema immunitario che le rende capaci di identificare le specie differenti, non sono tuttavia in grado di distinguere fra piante della stessa specie. Anche qui l'arboricoltura può venirci in soccorso. È ben noto, infatti, che non vi sono, normalmente, difficoltà nell'innesto quanto i due bionti sono della medesima specie, a dimostrazione della mancanza di risposte specifiche immunitarie di rigetto, simili a quelle presenti negli animali.

È, quindi, difficile definire una pianta come un individuo e già alla fine del '700, iniziò a circolare l'idea che la pianta (pensiamo soprattutto a un albero) potesse essere considerata come una vera e propria colonia, costituita da unità architetture reiterate. Nel 1790, Goethe, brillante botanico oltre che sommo poeta, scriveva: «le branche laterali che si originano dai nodi di una pianta possono essere considerate come delle giovani piante singole che si attaccano al corpo della loro madre, nella stessa maniera con cui quest'ultima si fissa al suolo». Erasmus Darwin, padre del più noto Charles riprendendo il pensiero di Goethe scriveva (1800): «ciascuna gemma di un albero è una pianta individuale; un albero è, dunque, una famiglia di piante singole». E il figlio Charles nel 1839, aggiungeva: «sembra stupefacente che individui diversi possano essere uniti fra di essi, eppure gli alberi ne sono la conferma; in

effetti le sue gemme devono essere considerate come delle piante individuali. Possiamo considerare i polipi dentro un corallo, o i germogli di un albero, come degli esempi nei quali la separazione fra gli individui non è completa». Infine nel 1855 il botanico tedesco Alexander Braun scriveva: «la vista delle piante, e soprattutto quella degli alberi, porta a pensare che non si tratti di un essere unico e individuale, come un animale o un uomo, ma piuttosto di un insieme di individui riuniti gli uni agli altri».

Il concetto di “pianta-colonia” implica l’idea, estremamente interessante per qualunque applicazione di robotica, di longevità accresciuta della colonia rispetto ai suoi costituenti: il singolo polipo all’interno del corallo ha una vita estremamente corta, qualche mese soltanto, mentre il corallo stesso è potenzialmente immortale. L’albero mostra una situazione simile in cui l’unità architettureale di base ha una vita breve, mentre la colonia (l’albero) può essere virtualmente immortale.

Il concetto di unità reiterate è valido non soltanto per la parte aerea della pianta, ma anche per l’apparato radicale. Le scoperte della neurobiologia vegetale hanno messo in evidenza una funzione di centro di comando, comune a tutti gli apici radicali (Mancuso, 2005; Baluska et al., 2006; Brenner et al., 2006; Mancuso e Shabala, 2007). È interessante notare come ogni singola radice abbia un suo proprio autonomo centro di comando, che agisce guidando la direzione della radice, ma che, come in una vera e propria colonia, coopera con gli altri apici radicali alla risoluzione dei problemi che riguardano la vita complessiva della pianta.

#### BIOISPIRAZIONE AI MECCANISMI DI ATTUAZIONE DELLE RADICI DI UNA Pianta

I processi di accrescimento e di movimento delle radici di una pianta sono attuati essenzialmente tramite due meccanismi: attraverso una divisione cellulare nell’apice meristematico immediatamente al di sotto della punta della radice, e mediante un allungamento cellulare nella zona posteriore all’apice (Clark et al., 2003).

Il flusso dell’acqua all’interno delle cellule genera un turgore ( $P$ ), che fornisce la forza necessaria per l’allungamento e quindi la crescita radicale (fig. 1). Il potenziale osmotico all’interno delle cellule nella zona di allungamento di una radice genera un gradiente di potenziale dell’acqua che favorisce l’ingresso di acqua all’interno delle cellule (Bengough et al., 1997). Il turgore ( $P$ ) è generato come flusso di acqua che pressa il protoplasto contro la parete cellulare “rigida”. Il turgore ( $P$ ) è quindi dato da:

$$P = \pi_o - \pi_i \quad (1)$$

dove  $\pi_i$  è il potenziale osmotico all'interno della cellula e  $\pi_o$  è il potenziale osmotico all'esterno di questa.

Questa equazione suppone che il flusso di acqua nelle cellule non sia limitato alla crescita, che non ci sia traspirazione nella parete, e che i soluti abbiano un coefficiente di riflessione vicino all'unità. La capacità dell'acqua di espandere le cellule è stata ampiamente studiata (Pritchard, 1994). Un valore tipico per il potenziale osmotico del vacuolo (pari a  $\pi_i$ ) all'interno della cellula nella zona di crescita di una radice che sta crescendo in condizione idroponiche è di circa -0.7 MPa (~ 7 Atm).

Tipicamente, sulla base di esperimenti compiuti su pareti cellulari isolate da cellule di alghe giganti (Propine e Preston, 1962), l'allungamento cellulare è stato considerato come flusso plastico del materiale della parete sotto stress (Lockhart, 1965).

Dove i canali del suolo hanno un diametro più piccolo di quello della radice, le radici devono esercitare una pressione di crescita al fine di allargare le particelle del suolo, esercitare una frizione e allungarsi attraverso il suolo stesso. La pressione di crescita ( $\sigma$ ) è pari in ampiezza alla pressione che il suolo oppone alla crescita della radice. Nella punta di una radice che si accresce nel suolo, il turgore cellulare ( $P$ ) genera una pressione di crescita ( $\sigma$ ), che risulta dalla differenza tra  $P$  e la pressione della parete ( $W$ ), così che (Greacen e Oh, 1972):

$$\sigma = P - W \quad (2)$$

In radici che si muovono senza ostacoli,  $\sigma$  è per definizione zero e  $P$  è bilanciata da  $W$ . Quando le radici sono completamente ostacolate nel loro movimento e non possono allungarsi,  $\sigma$  raggiunge il valore massimo ( $\sigma_{max}$ ). Le radici esercitano una pressione di crescita sia in direzione assiale che radiale, ma nella trattazione che segue sarà considerata unicamente la pressione di crescita assiale. Quando il trasporto dell'acqua all'interno delle cellule in crescita non è limitato, il tasso di allungamento della radice può essere considerato in termini dell'equazione semplificata di Lockhart (1965), modificata da Greacen e Oh (1972) per tenere in considerazione l'impedenza del suolo:

$$R = m[W - W_c] = m[P - W_c - \sigma] \quad (3)$$

dove  $R$  è il tasso di allungamento,  $m$  è il coefficiente di estensione della parete cellulare,  $W$  è la pressione della parete,  $W_c$  è la soglia di cedevolezza della

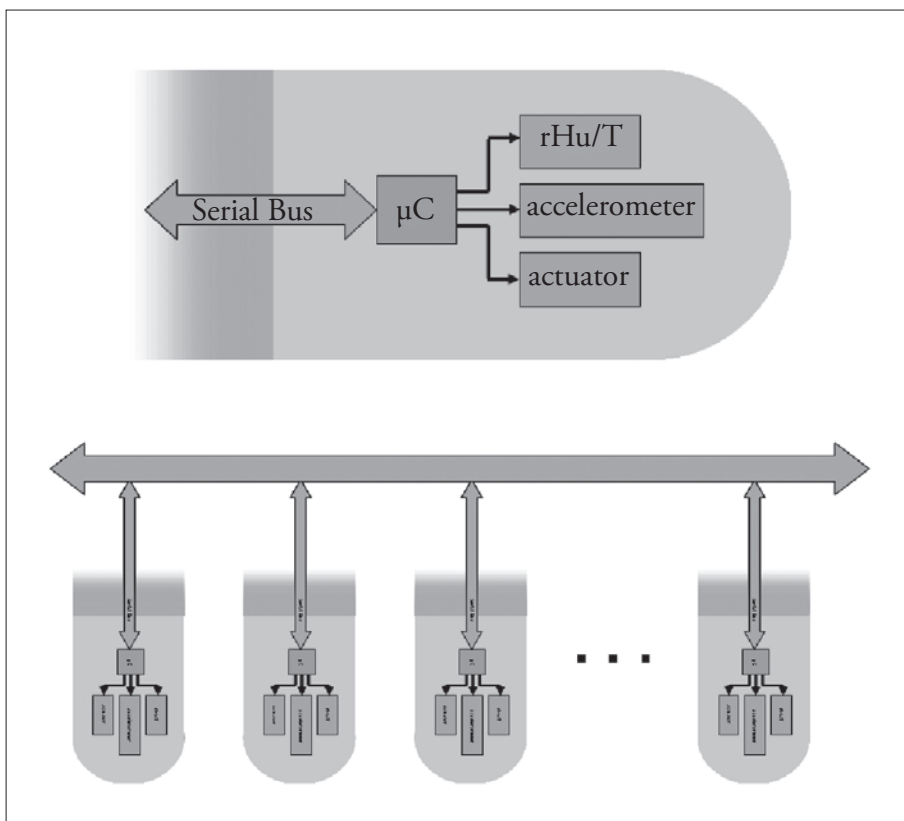


Fig. 3 Una rappresentazione schematica dell'apice radicale del plantoide (sopra) e lo schema dell'interconnessione tra i diversi apici radicali del plantoide

parete cellulare,  $P$  è il turgore e  $\sigma$  l'impedenza del suolo (o la pressione di crescita).

Questo presuppone che non sia presente un gradiente del potenziale di crescita indotta dall'acqua tra il simplasto e l'apoplasto che è generalmente considerato essere una buona approssimazione nelle radici. In questo semplice modello meccanico, il tasso di crescita è quindi funzione di  $P$ , della resistenza del suolo e delle proprietà reologiche delle pareti cellulari.

#### PROGETTAZIONE BIOMECCATRONICA

Le radici e in particolare l'apice radicale rispondono ai cambiamenti ambientali attraverso meccanismi noti come tropismi. L'apice ha sensori per la

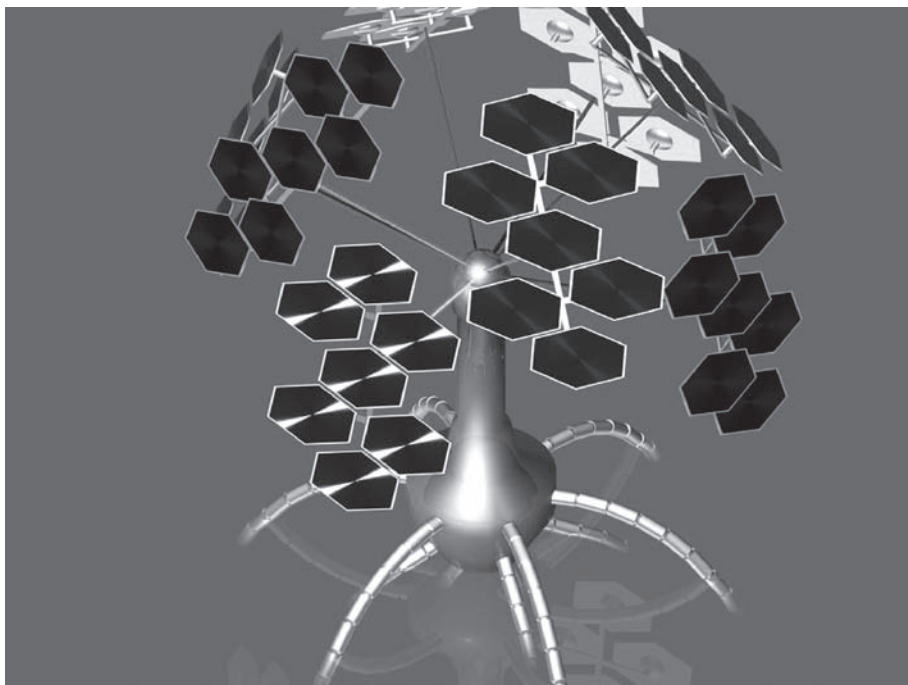


Fig. 4 *Una versione artistica del plantoide (disegno di Virgilio Mattoli)*

gravità (statoliti), per l'umidità del suolo e per sostanze chimiche presenti nel terreno, che producono rispettivamente il gravitropismo, l'idrotropismo e il chemiotropismo. Al fine di imitare il comportamento della pianta, l'apice radicale robotico proposto dagli autori includerà i seguenti componenti (fig. 3):

- un accelerometro per replicare la capacità della radice di seguire la gravità;
- un sensore di umidità del suolo per seguire il gradiente di umidità del terreno;
- un microcontrollore per ricreare l'intelligenza distribuita della pianta;
- un numero variabile di attuatori (osmotici) per il direzionamento e la penetrazione della radice nel suolo;
- sensori per analisi chimiche del terreno.

Il plantoide, proprio come una pianta, sarà racchiuso in un "seme" che si "schiuderà" dopo aver penetrato il suolo come conseguenza dell'impatto sulla superficie dopo la fase discendente. La figura 4 mostra una versione artistica del plantoide.

Il robot sarà costruito su base modulare. Le “foglie” del robot saranno rappresentate da celle fotovoltaiche, che assicurano l’energia necessaria per svolgere le funzioni operative. Una piccola batteria sarà aggiunta al sistema fotovoltaico per accumulare l’energia solare, per ottimizzare le risorse energetiche e garantire le funzionalità del robot in assenza di luce. Le radici del plantoide si accresceranno seguendo stimoli diversi, come la direzione della gravità.

Gli apici radicali conterranno un sensore di gravità, e diversi sensori per il monitoraggio di parametri chimico-fisici e della presenza di forme di vita. Ciascun apice radicale conterrà al suo interno anche un microcontrollore per emulare il comportamento “neurale” delle radici attraverso l’implementazione locale di una rete (Haykin, 1999) usando come modelli il comportamento degli apici radicali reali. Imitando la strategia adattativa della pianta, il robot si muoverà lentamente, così da esplorare in modo efficiente l’ambiente mostrando elevate forze di attuazione e basso consumo energetico. L’apice del plantoide crescerà e si muoverà nel terreno attraverso una nuova classe di attuatori osmotici, controllati da piccole scariche elettriche.

Le radici delle piante saranno connesse a una rete centrale che guiderà la crescita delle radici in direzioni preferenziali, attraverso le informazioni acquisite dai sensori presenti nell’apice. Questa rete inoltre raccoglierà i dati provenienti da ciascun apice e consentirà la comunicazione tra i diversi apici.

Il plantoide sarà, così, in grado di espandere e attuare le proprie radici, implementando *de facto* un meccanismo di crescita bioispirato.

In conclusione, le piante sono un modello a cui ispirarsi per il disegno di robot da utilizzare nella esplorazione di regioni difficilmente raggiungibili dall’uomo. L’applicazione pratica di queste idee è attualmente in corso e ci auguriamo nei prossimi mesi di poter produrre un primo prototipo funzionante di plantoide.

#### BIBLIOGRAFIA

- BALUSKA F., MANCUSO S., VOLKMANN D. (2006): *Plant communications. Neuronal aspects of plant life*, Berlin, Springer.
- BENGOUGH A.G., CROSER C., PRITCHARD J., (1997): *A biophysical analysis of root growth under mechanical stress*, «Plant and Soil», 189, pp. 155-164.
- BRAUN A. (1855): *The vegetable individual in its relation to the species*, «Am. J. Sci. Arts», 19, pp. 233-256.
- BRENNER E.D., STAHLBERG R., MANCUSO S., VIVANCO J., BALUŠKA F., VAN VOLKENBURGH E. (2006): *Plant Neurobiology: an Integrated View of Plant Signaling*, «Trends in Plant Science», 11, pp. 413-419.

- CLARK L.J., WHALLEY W.R. BARRACLOUGH P.B. (2003): *How do roots penetrate strong soil?*, «Plant and Soil», 255, pp. 93-104.
- DARWIN C. (1839): *Journal of researches into geology and natural history of the various countries visited by H.M.S. Beagle, under the command of captain FitzRoy from 1832 to 1836*, Colburn, London.
- DARWIN E. (1800): *Phytologia, or the philosophy of agriculture and gardening*, Johnson, London.
- FABRE J.H. (1874): *La plante*, Paris.
- GOETHE, J.W. Von. (1790): *Versuch die Metamorphose der Pflanzen zu erklären. Gotha: bey Carl Wilhelm Ettinger*.
- GREACEN E.L. & OH J.S. (1972): *Physics of root growth*, «Nature New Biol.», 235, pp. 24-25.
- HAYKIN F. (1999): *Neural Networks, a comprehensive foundation*, Prentice Hall, New York.
- LOCKHART J.A. (1965): *An analysis of irreversible plant cell elongation*, «J. Theor. Biol.», 8, pp. 264-275.
- MANCUSO S. (2005): *Gli apici radicali come centri di comando della pianta: lo stato "neural-simile" della zona di transizione*, «I Georgofili. Quaderni», VIII, pp. 23-44.
- MANCUSO S., SHABALA S. (2007): *Rhythms in Plants – Phenomenology, mechanisms and adaptative significance*, Berlin, Springer, in stampa.
- MURAWSKI D. (1998): *Genetic variation within tropical tree crowns*, in *Biologie d'une canopée de forêt équatoriale*, F. Hallé, Pronatura & Opération Canopée (ed.), pp. 104-113.
- PRITCHARD J. (1994): *The control of cell expansion in roots*, «New Phytol.», 127, pp. 3-26.
- PROBINE M.C. & PRESTON R.D. (1962): *Cell growth and the structure and mechanical properties of the wall in internodal cells of Nitella opaca. II. Mechanical properties of the walls*, «J. Exp. Bot.», 13, pp. 111-127.