



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia Generale

Corso di laurea in Scienze Cognitive

Psicologiche e Psicobiologiche

Elaborato finale

**Studio cinematografico sull'*intertwining* come azione congiunta nelle
piante di Pisello**

A kinematic study on intertwining as evidence of joint actions in Pea plants

Relatore

Prof. Umberto Castiello

Correlatrice

Dott.ssa Bianca Bonato

***Laureanda:* Sara Sgaggero**

***Matricola:* 2023247**

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: LO STUDIO DELLA COGNIZIONE SOCIALE ATTRAVERSO IL MOVIMENTO	2
1.1 Il movimento di raggiungimento e prensione come finestra sperimentale.....	2
1.2. Intenzioni sociali nel movimento	3
1.3 Muoversi insieme: <i>Joint action</i>	3
CAPITOLO 2: UN NUOVO MODELLO COMPARATO LE PIANTE	5
2.1.Cognizione senza un cervello	5
2.1.1 La cognizione nelle piante.....	6
2.2 La cognizione sociale vegetale	7
2.3 Il movimento nelle piante	9
CAPITOLO 3: LA MIA RICERCA STUDIO CINEMATICO <i>SULL'INTERTWINING</i> COME AZIONE CONGIUNTA NELLE PIANTE DI PISELLO	12
3.1 Le ipotesi sperimentali	12
3.2 Metodi e procedura sperimentale	12
3.2.1 Soggetti.....	12
3.2.2 Condizioni sperimentali.....	13
3.2.3 Condizioni di germinazione e di crescita	13
3.2.4 RegISTRAZIONI video ed analisi dei dati	14
3.2.5 Variabili dipendenti	16
3.3 Analisi statistica.....	16
3.4 Risultati.....	17

3.4.1 Risultati qualitativi	17
3.4.2 Risultati cinematici	18
3.4.3 Correlazione bayesiana per misure cinematiche e spaziali	20
CAPITOLO 4: DISCUSSIONI E CONCLUSIONE.....	21
BIBLIOGRAFIA	23

INTRODUZIONE

Le piante sono, senza ombra di dubbio, la specie vivente più diffusa sul pianeta terra. Il regno vegetale, infatti, rappresenta il 99,7% della biomassa del nostro pianeta, mentre umani ed animali ne occupano solo lo 0,3% (Bar-On et al., 2018). Eppure, l'umanità le ha sempre relegate all'ultimo gradino evolutivo come riportato da Aristotele nel *De anima* (Aristotele, 1965), considerandole evolutivamente e strutturalmente inferiori al regno animale (Bonato & Castiello, 2020). Tuttavia, negli ultimi decenni, la ricerca empirica ha rilevato come i vegetali siano molto più di semplici entità passive (Baluška & Mancuso, 2020). Le piante, infatti, sono tutt'altro che passive in quanto presentano livelli di adattabilità, interattività con l'ambiente e capacità decisionali altamente superiori a moltissime altre specie viventi (Bonato & Castiello; 2020).

A tal proposito, in questo elaborato, verrà proposto uno studio che mira a dimostrare per la prima volta che anche le piante, pur essendo organismi aneurali, sembrerebbero essere capaci di agire intenzionalmente, in particolare agendo coordinatamente e congiuntamente al fine di raggiungere un obiettivo comune. Nel dettaglio, in questo studio, attraverso l'impiego dell'analisi cinematica, abbiamo esaminato come due piante di Pisello (*Pisum sativum* L.) cresciute insieme in assenza di un potenziale supporto nell'ambiente, coordinino le loro azioni esibendo un particolare e complesso comportamento di intreccio (i.e. *intertwining*) che sembrerebbe possedere tutti i requisiti per poter essere considerato un'azione congiunta.

CAPITOLO 1:

LO STUDIO DELLA COGNIZIONE SOCIALE ATTRAVERSO IL MOVIMENTO

1.1 Il movimento di raggiungimento e prensione come finestra sperimentale

La mano è un organo squisitamente versatile, capace di eseguire svariati movimenti che ci permettono di interagire con gli oggetti quotidiani, nonché di comunicare attraverso la comunicazione non verbale. Tra le molteplici funzioni che la mano può svolgere, ce n'è una che è di particolare interesse per i nostri studi: la funzione prensile, in cui la mobilità è principalmente distale e si concretizza nella sequenza di raggiungimento, prensione e manipolazione dell'oggetto con una o entrambe le mani (Tubiana, 1981). Questa funzione è stata ampiamente studiata in ambito neuroscientifico attraverso tecniche e ricerche sempre più sofisticate di osservazione e registrazione del movimento di raggiungimento e prensione (*reach-to-grasp*). Il movimento di raggiungimento e prensione (*reach-to-grasp*) è costituito da due componenti coordinate tra loro: una componente prossimale (fase di trasporto o *reaching*) e una componente distale (fase di manipolazione o *grasping*). La prima componente (*reaching*) consente di trasportare la mano verso l'oggetto *target*. Quest'azione richiede l'integrazione della posizione della mano e dello stimolo in un unico sistema di riferimento, al fine di combinare le informazioni propriocettive e visive (Vingerhoets, 2014). La seconda componente (*grasping*) consiste invece nell'apertura graduale delle dita, seguita da una progressiva chiusura di quest'ultime, fino a combaciare con la grandezza dell'oggetto *target* e ottenere una presa ottimale (Castiello, 2005). Grazie all'estrazione di queste caratteristiche è possibile anticipare strategicamente l'apertura delle dita durante il movimento di raggiungimento, adattare la velocità della prensione durante il contatto e chiudere le dita intorno all'oggetto applicando una forza di presa corretta (Vingerhoets, 2014).

In ambito neuroscientifico le tecniche maggiormente utilizzate per l'indagine del movimento di raggiungimento e prensione sono le tecniche di registrazione cinematografica. Attraverso le tecniche di registrazione cinematografica è possibile ricavare una precisa analisi della geometria del movimento (Castiello, 1995).

1.2. Intenzioni sociali nel movimento

Il modo in cui un oggetto viene afferrato dipende anche dall'intenzione dell'agente (Ansuini et al, 2014). Questo è stato dimostrato per la prima volta da Marteniuk e colleghi (1987). Nel loro studio Marteniuk e colleghi chiedevano ai partecipanti di compiere alcune azioni con un oggetto *target* (un disco), ovvero afferrare il disco e lanciarlo oppure afferrare il disco e posizionarlo dentro una piccola scatola. Le successive analisi hanno rilevato che il tempo di decelerazione era più lungo quando l'afferramento avveniva per il posizionamento piuttosto che per il lancio del disco (Marteniuk et al., 1987). Questo a dimostrazione dell'influenza esercitata dall'intenzionalità dell'agente, che orienta e modifica il comportamento di raggiungimento e prensione di un oggetto. Georgiou e colleghi (2007), invece, con lo scopo di indagare l'influenza del contesto sulla cinematica del movimento di raggiungimento e prensione, hanno condotto una serie di esperimenti in cui i partecipanti dovevano raggiungere e afferrare un blocco di legno in due diverse condizioni sperimentali. Nella prima condizione i soggetti dovevano raggiungere e afferrare il blocco di legno per poi cooperare con l'altro soggetto al fine di unire i due blocchi per formare una torre. Nella seconda condizione, invece, i soggetti erano chiamati a raggiungere e afferrare il blocco di legno per poi competere contro l'altro soggetto (Georgiou et al., 2007). Grazie all'analisi cinematica si è rilevato come il comportamento di raggiungimento e prensione mostrava caratteristiche cinematiche differenti in base al contesto (cooperativo o competitivo) in cui i soggetti erano inseriti. Ad esempio, l'esecuzione di un'azione cooperativa comportava un tempo di decelerazione più lungo del movimento di *reach-to-grasp*, rispetto ad un'azione naturale eseguita da un solo agente. All'opposto, la velocità di picco era più elevata nel contesto competitivo in cui non veniva richiesta particolare accuratezza e precisione (Georgiou et al., 2007).

1.3 Muoversi insieme: *Joint action*

Una situazione cooperativa per eccellenza è quella in cui sono previste delle *joint actions*. L'azione congiunta (*joint action*) può essere considerata come una qualsiasi forma di interazione sociale in cui due o più individui coordinano le loro azioni nello spazio e nel tempo con l'obiettivo di attuare insieme un cambiamento

desiderato nell'ambiente (Sebanz et al., 2006). Quando un individuo deve svolgere un compito (che sia questo individuale o che richieda il contributo di un altro agente) si forma una rappresentazione dei compiti che deve eseguire e degli obiettivi che deve raggiungere. Se consideriamo un'azione congiunta, però, l'obiettivo può essere raggiunto soltanto con il supporto di un altro agente (*shared goals*) (Vesper et al., 2010; Vesper et al., 2017). Uno dei modi per informare i co-attori circa aspetti cruciali caratterizzanti il compito congiunto è attraverso la comunicazione basata sull'azione e, quindi, tramite il movimento. Durante un compito congiunto, infatti, un co-attore può colmare l'asimmetria di informazioni esistente tra lui e il proprio partner modulando oppure esagerando determinati parametri della propria azione (Sebanz & Knoblich, 2021). L'assunzione dei ruoli nei comportamenti motori complementari può essere considerato un meccanismo generale alla base del coordinamento umano nelle azioni congiunte. In particolare, tale coordinamento richiede ai partner di attuare una strategia comune di segnalazione: una "segnalazione strategica sensomotoria" che sia in grado di sostituirsi alla parola e di disambiguare l'azione di ciascun partner, migliorandone la prevedibilità. (Van der Wel et al., 2011; Vesper et al., 2011; Clark 1996, 2002; Sacheli et al., 2013).

L'abilità di implementare *joint actions* è stato un processo evolutivo che si è diffuso anche in numerosi animali non-umani vicini come, ad esempio, alcuni primati, ma anche in specie filogeneticamente più lontane da noi, come le formiche (Gelblum et al., 2015; Clutton-Brock, 2009; Trivers, 1971; Heesen et al., 2017, 2021). Questo suggerisce che l'implementazione di azioni coordinate e condivise si basa su un'architettura cognitiva minima che può consentire di perseguire un obiettivo comune anche in assenza di rappresentazioni mentali o abilità cognitive d'ordine superiore.

Un aspetto che, tuttavia, rimane inesplorato riguarda gli organismi a-neurali, come le piante. Osservazioni su numerose piante rampicanti hanno rivelato che spesso i viticci di piante diverse tendono ad intrecciarsi a vicenda (Rowe & Speck, 2015), al fine di fornire un mutuo supporto quando c'è la necessità di aggrapparsi per crescere verso l'alto e aumentare così le proprie chances di sopravvivenza in assenza di supporti nell'ambiente. Può questo comportamento essere identificato come *joint actions*? Lo studio riportato in questo elaborato ha provato a rispondere a questa domanda.

CAPITOLO 2

UN NUOVO MODELLO COMPARATO: LE PIANTE

2.1. Cognizione senza un cervello

Quando si parla di cognizione, generalmente, si fa riferimento ad un insieme di capacità quali: il linguaggio e la comunicazione, il ragionamento e il pensiero, la memoria e l'apprendimento o, ancora, alle capacità di *problem-solving* e di *decision-making*. Tutte capacità che permettono agli individui di raccogliere, immagazzinare, valutare e trasformare le informazioni provenienti dall'ambiente, per poi utilizzarle con lo scopo di agire sul mondo esterno (Galimberti, 2004). L'obiettivo di queste capacità, che nel loro insieme generano i fenomeni cognitivi, è quello di riuscire a produrre un comportamento capace di rispondere alle esigenze dell'ambiente, oppure di modificare attivamente l'ambiente esterno per perseguire i propri scopi (Galimberti, 2004). Solitamente, l'insieme di tutte queste funzioni viene attribuito agli umani e, in alcuni casi, anche agli animali in quanto forme di vita dotate di un sistema nervoso. Tuttavia, l'abilità di apprendere e valutare la realtà circostante ha un significato evolutivo cruciale in quanto ha permesso ad una moltitudine di organismi (anche se privi di un sistema nervoso) di adattarsi efficacemente all'ambiente in cui vivono. Dal momento che, secondo una definizione generale di cognizione, un buon adattamento all'ambiente rappresenta un esempio di intelligenza (Galimberti, 2004), allora anche un organismo privo di sistema nervoso, ma ben adattato al suo ambiente, potrebbe essere definito intelligente. È qui da intendersi che, quando parliamo di intelligenza, intendiamo la capacità di elaborare e utilizzare le informazioni ambientali al fine di adattarsi all'ambiente per sopravvivere (Darwin, 1859).

Oggigiorno, infatti, numerose ricerche empiriche sostengono l'esistenza di una "cognizione senza cervello", sottolineando come sia possibile osservare comportamenti raffinati, complessi ed intelligenti anche in assenza di un sistema nervoso.

Negli ultimi anni, l'interpretazione di Duijn e colleghi (2006) considera la cognizione minima come "un accoppiamento sensomotorio incarnato" ("*embodied sensorimotor coupling*"). Secondo questa interpretazione, tutti i comportamenti sostenuti da una qualche forma di percezione sensoriale che permette all'organismo di

recepire l'ambiente circostante e di rispondere adeguatamente alle sue richieste (*affordances* ambientali), modificando attivamente il proprio comportamento in azioni motorie, possono essere definiti cognitivi. A partire da questa prospettiva, il classico ruolo del cervello come generatore di fenomeni cognitivi viene messo in discussione, a favore di un dinamismo relazionale fra le *affordances* provenienti dall'ambiente e la capacità del corpo (e delle sue caratteristiche) di rispondervi. L'azione motoria, intrinsecamente legata alla percezione, rappresenterebbe quindi (secondo il modello della cognizione minima) una forma di capacità cognitiva.

2.1.1 La cognizione nelle piante

Nelle piante il fatto di non possedere un cervello rappresenterebbe un risultato evolutivo (Castiello & Guerra 2020). Difatti, in seguito all'interazione delle piante con l'ambiente, per queste ultime non è stato utile sviluppare un cervello, ma piuttosto una struttura modulare capace di rispondere in modo estremamente flessibile alle condizioni ambientali (Castiello & Guerra 2021).

Fin dall' antichità, le piante erano descritte come *anime* passive che si nutrono, crescono e si riproducono e per questo relegate all'ultimo gradino della piramide evolutiva (Aristotele, 1965). Le posizioni sono rimaste le stesse, stabili per migliaia di anni fino a quando, nel 1880, Charles Darwin pubblicò uno scritto estremamente rivoluzionario per il regno vegetale: "*The power of movement in plants*" (Darwin, 1880). Inizia, proprio da questo trattato, il cammino verso l'intelligenza vegetale.

Per esempio, il costrutto di *decision-making* negli ultimi anni è stato indagato all'interno del mondo vegetale e ha permesso di tracciare numerose analogie tra il comportamento vegetale e i processi psicologici attribuiti agli esseri umani (Silvertown e Gordon, 1989; Gagliano, 2015). Le piante, infatti, sono in grado di valutare quando è il momento migliore per germogliare e fiorire (Boss et al., 2004). Questa decisione rappresenta un momento cruciale nella vita della pianta poiché, nel caso quest'ultima germogliasse precocemente oppure in ritardo, potrebbe subire importanti danni che si ripercuoterebbero per tutta la durata della sua vita.

Un'altra abilità cognitiva per antonomasia è quella dell'apprendimento e, dunque, della memoria. Una delle prime evidenze sulle capacità mnemoniche delle piante proviene dagli studi di Pfeffer (1873) che per primo applicò il paradigma dell'abituazione alla pianta di *Mimosa pudica* (*mimosa pudica* L.). Egli osservò che, in

seguito ad una stimolazione ripetuta, la pianta diminuiva progressivamente la risposta difensiva. Successivamente Gagliano e collaboratori (2014) hanno sottoposto piante di *Mimosa pudica* a ripetute cadute verticali da una certa altezza, registrando che dopo un certo numero di prove la pianta smetteva di mettere in atto la risposta difensiva, poiché aveva “appreso” che le conseguenze della caduta non rappresentavano un rischio per la propria sopravvivenza.

Anche la comunicazione, definita come “la capacità di trasmettere un messaggio da un mittente ad un ricevente” (Castiello & Guerra, 2020), si è rivelata essere una capacità di fondamentale importanza adattiva all’interno del regno vegetale. Ad esempio, quando vengono infettate da un insetto erbivoro, le piante, grazie ad una comunicazione radicale, sono in grado di trasferire segnali di lunga portata a vicini conspecifici e non (Hettenhausen et al., 2017; Kong et al., 2018). In particolare, l’emissione e ricezione di composti organici volatili (VOCs) si è dimostrato essere il meccanismo comunicativo per eccellenza nel regno vegetale (Castiello & Guerra 2020), responsabile della maggior parte delle interazioni di segnalazione tra piante in superficie (Erb, 2019). Molecole che, una volta emesse nell’aria, trasportano dei veri e propri “messaggi” capaci di fornire informazioni (ad esempio, sullo stato di salute delle piante) e agiscono quindi come un vero e proprio “vocabolario vegetale” (Bonato et al., 2021).

2.2. La cognizione sociale vegetale

Grazie a questi meccanismi comunicativi, infatti, le piante rispondono interattivamente all’ambiente circostante, innescando una complessa rete di interazioni sociali (Castiello & Guerra 2020). A tal proposito, la letteratura sulle capacità sociali delle piante si è sviluppata considerevolmente negli ultimi anni al punto che, oggi, la pianta viene considerata come un organismo sociale (Baluška e Mancuso, 2009). Attraverso tecniche sempre più sofisticate di registrazione ed analisi, infatti, numerosi studi hanno evidenziato la capacità delle piante di generare e promuovere interazioni sociali (Bonato et al., 2023). Come indicato da Castiello (2020; 2021), i fattori in grado di attribuire un’attitudine sociale alle piante sono essenzialmente due: la capacità di distinguere “il Sé” dal “non Sé” e il riconoscimento del legame parentale. La capacità di distinguere “il Sé” dall’altro è testimoniata dall’evitamento dell’autofecondazione (Nasrallah, 2002). L’autofecondazione, infatti, può essere

davvero svantaggiosa in quanto non permette di generare ricombinazione. Di conseguenza, la pianta potrebbe dar vita ad una discendenza meno vigorosa in termini di struttura e fecondità, rispetto ad una discendenza di fiori incrociati (Castiello & Peressotti, 2021). Per questo motivo, durante il processo di fecondazione, le piante devono essere in grado di valutare e distinguere l'identità genetica fra polline e pistillo, così da poter respingere quello geneticamente simile ed accettare quello geneticamente non correlato (Kao e McCubbin, 1996; Nasrallah, 2002). Inoltre, la capacità di distinguere “il Sé” dal “non Sé” permette alle piante di differenziare i propri familiari (*kin recognition*) dagli organismi estranei (Dudley & File, 2007).

La competizione tra piante

Secondo la teoria dell'evoluzione proposta da Charles Darwin, l'obiettivo di ogni singolo organismo è quello di massimizzare la propria fitness all'interno dei vincoli posti dal potenziale genetico e dall'ambiente locale in cui essi vivono (Trewavas, 2005). Da questo punto di vista le piante, essendo in natura strettamente circondate da altre piante (Casper & Jackson, 1997), al fine di incrementare la propria fitness, devono sostenere una “lotta” nei confronti dei propri vicini per riuscire ad ottenere l'accesso alle risorse (Trewavas, 2005). In particolare, la competizione per l'accesso alle risorse (quali, ad esempio, acqua, suolo, luce, anidride carbonica e altre sostanze minerali fondamentali per la crescita delle piante) si intensifica quando quest'ultime scarseggiano. Nel regno vegetale, la competizione tra piante può verificarsi a livello aereo quando, per esempio, le piante competono per ricevere più luce attraverso l'allungamento del fusto, dei rami e delle foglie (Brisson, 2001; Beall et al., 1996), mettendo in ombra le piante vicine (Dudley et al., 2013). La competizione può avvenire anche nel sottosuolo quando, per accedere ad un maggior numero di risorse nutritive, le piante favoriscono la propria crescita (a discapito di piante estranee concorrenti) aumentando notevolmente la propria massa radicale (Callaway e Mahall, 2007).

La cooperazione tra piante

Numerosi studi hanno evidenziato la capacità delle piante di sostenere interazioni sociali con gli altri vegetali finalizzate all'aumento del benessere reciproco (Dudley, 2015). Per le piante di una stessa famiglia (in quanto geneticamente simili) la cooperazione è estremamente vantaggiosa in termini di fitness complessiva. Quando si

parla di fitness complessiva ci si riferisce all'insieme di comportamenti cooperativi o altruistici che vanno a sfavorire il singolo individuo (colui che mette in atto il comportamento) ma che, allo stesso tempo, portano benefici in termini riproduttivi al gruppo familiare (Hamilton, 1963). Esempi di cooperazione mutualistica sono più evidenti in piante che vivono in habitat poco "praticabili" (scarsi in acqua e nutrienti) che ostacolano la crescita e la sopravvivenza delle piante (Callaway e Mahall 2007; He, Bertness & Altieri 2013).

2.3. Il movimento nelle piante

Tra le varie abilità cognitive messe in atto dal regno vegetale, ce n'è una che con fatica si attribuisce alle piante, considerate da sempre immobili e passive: il movimento. Dalla loro nascita (e per la durata di tutta la loro vita) le piante sono in continuo movimento al punto che, se una pianta smettesse di muoversi, quest'ultima morirebbe (Castiello 2020;2021). La notevole capacità delle piante di muoversi fu descritta in dettaglio per la prima volta da Charles e Francis Darwin (1880). I Darwin individuaronò le principali categorie di movimento comuni a tutti gli organismi vegetali: i movimenti tropici, i movimenti nastici e la circumnutazione. In questo elaborato mi concentrerò sulla descrizione di quest'ultimo.

La circumnutazione è un movimento universalmente presente all'interno del regno vegetale (Darwin & Darwin, 1880). È un movimento oscillatorio di forma ellittica, che caratterizza la parte apicale della pianta durante la sua fase di crescita (Stolarz et al., 2008) ed è particolarmente caratteristico delle piante rampicanti. La circumnutazione, come ipotizzato dai fratelli Darwin, potrebbe essere funzionale all'esplorazione dell'ambiente circostante e al raggiungimento di un obiettivo (Tronchet, 1946). Per mezzo dei movimenti di circumnutazione, le piante rampicanti sono in grado di identificare ed aggrapparsi ad un supporto esterno, in modo da raggiungere una fonte luminosa con maggiore facilità (Castiello & Guerra, 2021). Per poter fare ciò, le rampicanti utilizzano delle strutture a forma allungata, caratteristiche della parte terminale di rami e foglie, ovvero i cirri (o viticci). Come osservato da Darwin, queste strutture (i cirri), dopo aver identificato un potenziale supporto nell'ambiente per mezzo della circumnutazione, modificano progressivamente la loro morfologia prima della fase di aggrappo, in modo da assumere la forma più "adatta" per

entrare in contatto con il supporto ed “afferrarlo” efficacemente (Darwin, 1875). Per quest’ultima capacità delle rampicanti (di identificare le varie caratteristiche dei potenziali supporti e modellare di conseguenza la morfologia dei propri cirri per potersi aggrappare ad essi), numerosi studiosi, dopo Darwin, hanno esplorato e indagato i movimenti delle piante rampicanti, cercando di evidenziare delle analogie esistenti tra umani, animali e piante, per quel che riguarda la pianificazione dei movimenti di raggiungimento e prensione.

Infatti, i movimenti che le rampicanti eseguono prima di afferrare un potenziale supporto nell’ambiente esterno sono (per certi versi) simili ai movimenti di raggiungimento e prensione eseguiti da umani ed animali (Simonetti et al., 2021). In un recente studio, infatti, è stato evidenziato che le piante di pisello non solo percepiscono il supporto a cui aggrapparsi, ma sono anche capaci di ridimensionare il loro movimento di afferramento in base alle caratteristiche strutturali del supporto (Guerra et al., 2019). In particolare, è stato rilevato che i cirri si muovono in direzione del supporto attraverso movimenti estremamente sofisticati, adeguando la velocità e l’apertura massima dei cirri in relazione allo spessore del supporto (Guerra et al., 2019). Per stimoli più sottili, ad esempio, è stata registrata una velocità massima dei cirri significativamente maggiore rispetto a quella per gli stimoli più spessi (Guerra et al., 2019), suggerendo quindi che le piante siano in grado di elaborare le proprietà del supporto in quanto dotate di una percezione dettagliata (Guerra et al., 2019). Inoltre, in un recente studio, Ceccarini e colleghi (2021) hanno evidenziato come i comportamenti delle piante siano opportunamente pianificati, controllati e corretti “online” in base alle caratteristiche del supporto, per mezzo di sotto-movimenti di tipo secondario (Ceccarini et al., 2021). Inoltre, come dimostrato in un recente studio (Wang et al., 2023), se le piante rampicanti vengono messe nella condizione di poter “scegliere” tra supporti sottili o supporti spessi, esse mostrano una distinta preferenza per supporti più sottili, rispetto a quelli più spessi (Wang et al., 2023). Nel complesso, l’insieme di questi risultati evidenzia come il comportamento motorio delle piante non sia semplicemente una mera risposta riflessa, quanto piuttosto il risultato di un più sofisticato insieme di azioni *goal-oriented* caratterizzate da monitoraggio, intenzionalità ed anticipazione.

Il comportamento motorio delle piante, come evidenziato nel paragrafo precedente, sembrerebbe quindi produrre risposte differenti a partire dall’intenzionalità sottostante

l'azione motoria (Wang et al., 2021). A partire da queste considerazioni, in un recente studio, Bonato e colleghi (2023) con l'obiettivo di estendere il dominio dell'intenzionalità oltre il regno animale, hanno indagato i movimenti di raggiungimento e prensione in piante di pisello (*Pisum sativum* L.) poste all'interno di diverse condizioni che richiedevano l'esecuzione di azioni intenzionali in contesti sociali e individuali. Nella condizione individuale le piante crescevano da sole e dovevano afferrare un potenziale supporto posto nell'ambiente. Nella condizione sociale, invece, due piante sono state messe all'interno di uno stesso vaso con un potenziale supporto posizionato nel mezzo. I risultati hanno suggerito come nella condizione individuale i movimenti fossero più veloci, mentre nella condizione sociale le piante raggiungevano velocità massime minori e i movimenti di circumnauzione erano più lenti. I risultati di questo studio dimostrano che il comportamento motorio risulta essere più cauto e preciso, se analizzato all'interno di una situazione che richiede un'interazione sociale (quindi in presenza di un altro individuo con cui si condivide un obiettivo comune).

CAPITOLO 3: LA MIA RICERCA

STUDIO CINEMATICO SULL'INTERTWINING COME AZIONE CONGIUNTA NELLE PIANTE DI PISELLO

3.1 Le ipotesi sperimentali

Nel presente studio è stata indagata, per la prima volta, l'intenzionalità ad agire all'interno di un contesto sociale in cui veniva richiesta una cooperazione tra i due agenti per raggiungere uno scopo comune. Ovvero questa ricerca si promette di indagare, attraverso l'analisi cinematica 3D del movimento la presenza di *joint actions* nel mondo vegetale. Per fare questo sono state cresciute due piante insieme, in uno stesso vaso, senza la presenza di un potenziale supporto nell'ambiente. Data la condizione sperimentale (descritta nel dettaglio in seguito), le nostre ipotesi sperimentali vanno a considerare che, vista la necessità per le piante rampicanti di doversi aggrappare ad un potenziale supporto per poter crescere verticalmente verso la luce, in assenza di quest'ultimo esse si aggrappano l'una all'altra (i.e., *intertwining*), per supportarsi a vicenda e crescere verso la luce, ai fini della sopravvivenza. Nel dettaglio ci aspettiamo che, similmente a quanto accade durante le azioni congiunte (*joint action*) per gli umani, le piante mostrino un'assunzione di ruoli per coordinare i loro movimenti con quelli del loro "*partner*" (ovvero l'altra pianta), al fine di raggiungere un obiettivo comune condividendo la stessa intenzionalità motoria, cosiddetta, *shared-intentionality*. Allo stesso modo ipotizziamo che essendo le *joint actions* delle azioni complementari, le piante mostrino dei pattern cinematici simili tra loro, mirati alla sincronizzazione cinematica del movimento al fine di eseguire delle azioni nelle stesse scale di velocità, accelerazione e numero di movimenti

3.2 Metodi e procedura sperimentale

3.2.1 Soggetti

Come soggetti per il presente studio sono state scelte 16 piante di pisello (*Pisum Sativum* var. *saccharatum* cv *Carouby de Maussane*). I semi di pisello sono stati selezionati, piantati in vaso e mantenuti alle condizioni descritte di seguito. La dimensione del nostro campione è stata determinata sulla base di studi precedenti (Bonato et al., 2023; Guerra et al., 2019; Ceccarini et al., 2020, 2021).

3.2.2 Condizioni sperimentali

È stata considerata una condizione in cui due piante di pisello sono cresciute nello stesso vaso senza la presenza di un potenziale supporto nell'ambiente (Figura 1). In queste circostanze le piante erano in qualche modo costrette a raggiungersi e ad afferrarsi l'un l'altra per arrampicarsi verso la luce.

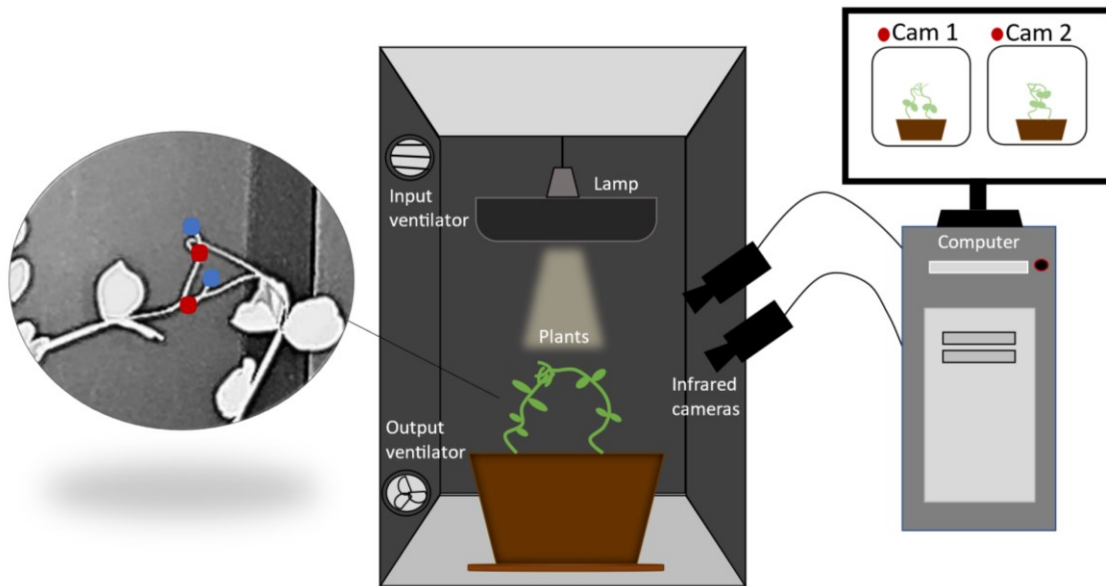


Figura 1. Rappresentazione grafica del set sperimentale per la condizione sperimentale. I cerchi rossi e blu rappresentano i punti anatomici di riferimento e di interesse per la nostra analisi (cioè, i cirri). I cerchi rossi rappresentano i cirri della pianta *grasper*. I cerchi blu rappresentano i cirri della pianta *handler*.

Tra le due piante abbiamo identificato due diversi comportamenti. In tutti i casi, una pianta, che chiameremo *handler*, si protende chiaramente verso l'altra pianta al fine di diminuire le distanze e raggiungerla. L'altra pianta, che chiameremo *grasper*, tende a protendersi di meno verso la *handler*, muovendosi leggermente dal proprio e finalizzando la fase di aggrappo.

3.2.3 Condizioni di germinazione e di crescita

I semi sono stati fatti germogliare in carta assorbente per sei giorni. Successivamente le piante sane e della stessa altezza sono state scelte e trapiantate in vaso. Il vaso utilizzato aveva un diametro di 30 cm e un'altezza di 14 cm. I vasi sono stati riempiti con sabbia silicea (tipo 16SS, dimensione 0.8/1.2 mm, peso 1.4). All'inizio

di ogni trattamento, i vasi sono stati annaffiati e fertilizzati con una soluzione nutritiva (Murashige and Skoog Basal Salt Micronutrient Solution; 10x, liquid, plant cell culture tested; SIGMA Life Science). Il volume del terreno e della soluzione nutritiva erano tali da consentire adeguate condizioni di suolo e fertilizzazione per le due piante. Le piante sono state annaffiate tre volte alla settimana. Ogni vaso è stato inserito in una camera di crescita (Cultibox SG combi 80x80x160 cm) così che le piante potessero crescere in condizioni ambientali controllate. La temperatura dell'aria della camera è stata fissata a 26 °C. Era presente un aspiratore dotato di termoregolatore (TT125; 125 mm di diametro; max 280 MC/H vents) e vi erano ventilatori che garantivano il circolo dell'aria (Blauberg Tubo 100 - 102m³/h). La combinazione dei due ventilatori ha consentito un flusso d'aria costante in ogni camera di crescita con un tempo medio di permanenza dell'aria di 60 secondi. Si è prestata attenzione a posizionare i ventilatori in modo che il movimento dell'aria non influisse sui movimenti delle piante. Le piante sono state coltivate con un fotoperiodo di 11,25 ore (dalle 5:45 alle 17:00) illuminate da una lampada a led a luce bianca e fredda (V-TAC innovative LED lighting, VT-911-100W, Des Moines, IA, USA or 100W Samsung UFO 145lm/W - LIFUD) che è stata posizionata 50 cm sopra ogni vaso garantendo un flusso di fotoni, la cui densità era di 350 $\mu\text{mol}_{\text{ph}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (quantum sensor LI-190R, Lincoln, Nebraska USA). Le pareti di ogni camera di crescita sono state rivestite con una pellicola riflettente in Mylar® e quest'ultima ha consentito una migliore uniformità nella distribuzione della luce (Figura 1).

3.2.4 Registrazioni video ed analisi dei dati

Per ogni camera di crescita è stata posta una coppia di videocamere RGB a infrarossi (es. IP 2.1 Mpx outdoor varifocal IR 1080P) a 110 cm da terra, distanziate di 45 cm una dall'altra, in modo da registrare immagini stereo della pianta. Le videocamere sono state collegate tramite cavi Ethernet a un *router wireless* a 10 porte (es. D-link Dsr-250n) collegato mediante *Wi-Fi* a un PC. Il processo di acquisizione e salvataggio dei *frames* è stato controllato dal software CamRecorder (Ab.Acus s.r.l., Milan, Italy). Per massimizzare il contrasto tra i punti anatomici di riferimento delle piante (ad esempio, i cirri) e lo sfondo, su alcuni settori delle pareti dei Box è stato fissato del velluto nero. La distorsione intrinseca, quella estrinseca e i parametri della lente di ciascuna fotocamera sono stati stimati utilizzando l'applicazione Matlab Camera Calibrator. La calibrazione

della profondità dalle singole immagini è stata effettuata scattando 20 foto di una griglia a scacchiera (quadrati con lato di 18mm, 10 colonne, 7 righe) da più angolazioni e distanze in condizioni di luce naturale non diretta. Per la calibrazione delle immagini stereo è stata inserita la stessa scacchiera utilizzata per il processo di calibrazione di ogni singola videocamera posizionandola al centro della camera di crescita. Le foto sono state poi scattate dalle due videocamere per estrarre i parametri della calibrazione stereo. In linea con il protocollo sperimentale, le videocamere acquisivano sincronicamente un nuovo *frame* ogni 3 minuti (con una frequenza di 0,0056 Hz). Per ogni nodo selezionato sono stati studiati i cirri che da esso si sviluppavano. Nei casi in cui la pianta, in seguito ai vari movimenti, si è aggrappata all'altra pianta, è stata analizzata la foglia coinvolta nella presa e quindi i cirri che da essa si sviluppavano. Il *frame* iniziale è stato definito come il *frame* in cui i cirri della foglia considerata erano visibili dall'apice. La fine del movimento della pianta è stata definita come il *frame* in cui i cirri della foglia hanno iniziato ad avvolgersi attorno ai cirri dell'altra pianta. Un *software* ad hoc (Ab.Acus srl, Milano, Italia) sviluppato in Matlab è stato utilizzato per posizionare i *marker*, tracciandone la posizione fotogramma per fotogramma, sulle immagini acquisite dalle due videocamere, in modo da ricostruire la traiettoria 3D di ogni punto di interesse. I *marker* sui punti di riferimento anatomici di interesse, vale a dire le estremità dei cirri, sono stati inseriti ad hoc successivamente (Figura 1). I *marker* di riferimento sono stati posizionati anche sul fondo del fusto della pianta, sulla seconda foglia e sull'internodo. Le procedure di tracciamento sono state dapprima eseguite automaticamente durante l'intero corso temporale della sequenza di movimento utilizzando l'algoritmo di Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) sui *frame* acquisiti da ciascuna videocamera, previa rimozione della distorsione. Il tracciamento è stato poi verificato manualmente dallo sperimentatore, controllando la posizione dei *marker* fotogramma per fotogramma e la traiettoria 3D di ciascun *marker* tracciato è stata calcolata triangolando le traiettorie 2D ottenute dalle due fotocamere (Figura 2).

3.2.5 Variabili dipendenti

Le variabili dipendenti per testare la nostra ipotesi sperimentale sono state scelte sulla base di precedenti studi cinematici (Simonetti et al., 2021) circa il movimento di raggiungimento e prensione nelle piante di *Pisum sativum*, sono: (i) le traiettorie spaziali disegnate dalla punta del cirro (Figura 2); (ii) il numero totale di circumnutazioni dei cirri; (iii) la velocità massima dei cirri durante le circumnutazioni; (iv) il momento in cui velocità massima dei cirri è stata raggiunta durante la circumnutazione (in percentuale %); (v) il numero totale di cambi di direzionalità delle circumnutazioni in senso orario o antiorario; (vi) la distanza del centro di gravità della circumnutazione dall'origine della pianta; (vii) la distanza del centro di gravità della circumnutazione dall'origine dell'altra pianta.

3.3 Analisi statistica

Le statistiche descrittive calcolate comprendono: la media, la deviazione standard (SD), l'errore standard (SE) e il coefficiente di variazione. Le analisi statistiche sono state eseguite utilizzando l'approccio bayesiano. L'obiettivo del processo di stima bayesiana è di attribuire credibilità ad una distribuzione di possibili valori alternativi di un dato parametro (distribuzione a posteriori) in modo che sia coerente con i dati osservati, questo tramite la generazione di un numero elevato di campioni con il metodo "Catena di Markov Monte Carlo" (MCMC). Nel presente studio abbiamo adottato il test U di Mann-Whitney a due fattori, dal momento che le variabili dipendenti non sono normalmente distribuite. Il test U di Mann-Whitney è un test non parametrico che non richiede l'assunzione di normalità. L'analisi è stata eseguita utilizzando JASP (JASP team, 2022) inserito all'interno dell'ambiente R (R Development Core Team, 2004). È stata scelta la prior di default (default prior) definita da una distribuzione di Cauchy centrata su uno zero-effect size (δ) e una scala di 0.707 (Van Doorn, 2021). La generazione di un numero elevato di campioni è stata conseguita con 5 catene di 1000 iterazioni che consentono una simulazione di distribuzione a posteriori verosimile. Nelle analisi, W è stato calcolato nel test U di Mann-Whitney come il minore dei ranghi totali tra le due condizioni. Il *Bayes factor* (BF) è stato ricavato per quantificare la capacità predittiva relativa alle due ipotesi (van Doorn, 2021). In questo studio il *Bayes factor* (BF) evidenzia prove a supporto della presenza o assenza di differenze esistenti tra due

piante che si muovono insieme. L'ipotesi nulla, in questo caso, prevede che non ci siano differenze, a livello cinematico, tra le due piante (la *grasper* e la *handler*). L'ipotesi alternativa, invece, prevede che ci sia una differenza. Il valore di BF10 viene definito come probabilità di un risultato data l'ipotesi alternativa (H1) divisa la probabilità dello stesso data l'ipotesi nulla (H0). I risultati sono riportati sulla base dello schema di Jeffery, che propone una serie di etichette tali per cui uno specifico *Bayes factor* può essere considerato “nullo”, “aneddotico (1-3)”, “moderato (3-10)”, “forte (10-30)”, “molto forte (30-100)” o “decisivo (> 100)” in relazione all'ipotesi alternativa (Jeffreys, 1998). R-hat viene riportato per verificare il grado di convergenza degli algoritmi MCMC sulla base della stabilità dei risultati. Quando il valore di R-hat /si avvicina ad uno, migliore è la convergenza alla distribuzione sottostante. L'intervallo credibile (CI) è impostato al 95%, che è la porzione centrale della distribuzione a posteriori che contiene il 95% dei valori. Abbiamo anche eseguito la correlazione bayesiana per dati non parametrici utilizzando la correlazione Tau di Kendall. Le analisi sono state eseguite utilizzando JASP (JASP Team, 2022).

3.4 Risultati

3.4.1 Risultati qualitativi

Per tutte le piante, i cirri hanno mostrato un *pattern* di crescita caratterizzato da circumnutazione (Figura 2). Una volta che la pianta *grasper* rilevava la pianta *handler*, modificava strategicamente la traiettoria dei propri cirri in modo che si piegassero verso i cirri dell'altra pianta per afferrarli (Figura 2). Nello specifico, è interessante notare come la *grasper* tenda ad avere un pattern di movimento classico, con le circumnutazioni tendenzialmente perpendicolari al proprio asse e leggermente inclinate nella parte finale per la fase di grasping del supporto di interesse. La *handler* invece presenta delle circumnutazioni che sono esageratamente protese verso la *grasper*, le circumnutazioni non sono perpendicolari al proprio asse, ma oblique e sempre inclinate verso la pianta di interesse. È importante sottolineare come il movimento della *handler* si discosti molto dal classico movimento di circumnutazione delle piante rampicanti verso un supporto. Questo slancio dall'inizio alla fine del movimento, e la permanente ricerca del cirro della *grasper*, esplicitata in un'inclinazione innaturale del movimento, rende questo pattern comportamentale un chiaro segnale di navigazione spaziale,

riconoscimento della posizione spaziale dell'altro e un tentativo di seguire le sue posizioni nello spazio al fine di condividere lo stesso obiettivo e unirsi per supportarsi a vicenda.

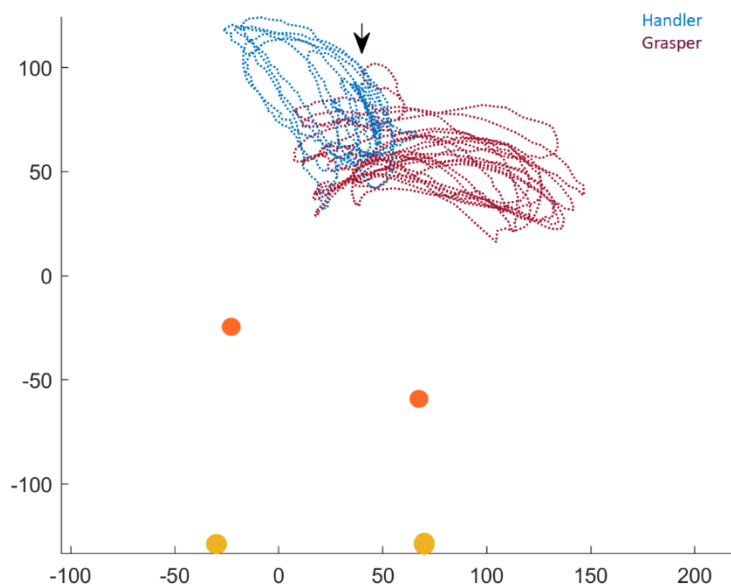


Figura 2. Esempio di traiettorie per una coppia di piante *grasper* e *handler*. punti gialli e arancioni rappresentano lo stelo delle piante.

3.4.2 Risultati cinematici

Di seguito vengono riportati i risultati cinematici dei *pattern* di movimento di *handler* e *grasper*.

Numero totale di circumnutazioni

Riguardo al numero totale di circumnutazioni, le piante che mostravano un *pattern* di movimento di *handler* hanno compiuto in media 8.119 (SD = 5.185, SE = 0.497, 95% CI [7.135, 9.104]) circumnutazioni, mentre le piante che esibivano un *pattern* di movimento di *grasper* hanno compiuto in media 7.629 (SD 4.625, SE = 0.451, 95% CI [6.734, 8.534]) circumnutazioni. L'analisi Bayesiana eseguita con il test U di Mann-Whitney ha rilevato un Bayes factor (BF10) di 0.181, suggerendo che non

c'è una differenza decisiva tra le due piante rispetto al numero di circumnutazioni (BF10 = 0.181, W = 5933, R-hat = 1.000).

Velocità massima di circumnutazione

La velocità massima raggiunta dai cirri durante le circumnutazioni, per la “*handler*” è in media di 3.327 mm/min (SD = 2.592, SE = 0.248, 95% CI [2.835, 3.819]), mentre per la “*grasper*” è in media di 3.114 mm/min (SD 2.406, SE = 0.235, 95% CI [2.648, 3.579]). L'analisi Bayesiana eseguita con il test U di Mann-Whitney ha rilevato un Bayes factor (BF10) di 1.771, suggerendo che non c'è una forte differenza tra le due piante per quanto riguarda la velocità massima di circumnutazione (BF10 = 1.771, W = 53.000, R-hat = 1.006).

Tempo impiegato per raggiungere il picco di velocità massima.

Il tempo impiegato dalla “*handler*” per raggiungere il picco di velocità massima è in media di 1240.500 min (SD=582.033, SE=205.780, 95% CI [753.908, 1727.092]), mentre per la “*grasper*” è in media di 690.750 min (SD=313.446, SE=110.820, 95% CI [428.702, 952.798]). L'analisi Bayesiana eseguita con il test U di Mann-Whitney ha rilevato un Bayes factor (BF10) di 0.153, suggerendo che non c'è una differenza sostanziale tra le due piante per quanto riguarda il tempo impiegato per raggiungere il picco di velocità massima (BF10 = 0.153, W = 5892.000, R-hat = 1.000).

Numero di cambi di direzionalità durante le circumnutazioni

Le piante che mostravano un *pattern* di movimento “*handler*” hanno eseguito in media 1.625 (SD = 1.061, SE = 0.375, 95% CI [0.738, 2.512]) cambi di direzionalità durante le circumnutazioni, mentre le piante che mostravano un *pattern* di movimento di “*grasper*” ne hanno eseguiti in media 1.375 (SD 1.685, SE = 0.596, 95% CI [-0.034, 8.534]). L'analisi Bayesiana eseguita con il test U di Mann-Whitney ha rilevato un Bayes factor (BF10) di 2.784, suggerendo che non ci sia una differenza decisiva tra le due piante rispetto al numero di cambi di direzionalità durante le circumnutazioni (BF10 = 0.501, W = 37.500, R-hat = 1.000).

Centro di gravità della circumnutazione e sua distanza rispetto all'origine

La distanza del centro della circumnutazione dall'origine della pianta per la *handler* è in media di 57.470 mm (SD = 38.777, SE = 3.714, 95% CI [50.108, 64.832]), mentre per la *grasper* è in media di 26.348 mm (SD 14.779, SE = 1.442, 95% CI [23.488, 29.209]). L'analisi Bayesiana eseguita con il test U di Mann-Whitney ha

rilevato un Bayes factor (BF₁₀) di 3760.976, suggerendo che c'è una differenza decisiva tra le due piante rispetto alla distanza del centro delle circumnutazioni dall'origine della pianta (BF₁₀ = 3760.976, W = 8402.000, R-hat = 1.023).

Centro di gravità della circumnutazione e sua distanza rispetto all'origine dell'altra pianta

La distanza del centro della circumnutazione della pianta *handler* rispetto all'altra pianta (cioè, la *grasper*) è in media di 74.761 mm (SD = 26.284, SE = 2.518, 95% CI [69.771, 79.751]), mentre per la *grasper* la distanza del centro della circumnutazione rispetto all'altra pianta (cioè, la *handler*) è in media di 99.231 mm (SD 24.253, SE = 2.367, 95% CI [94.538, 103.925]). L'analisi Bayesiana eseguita con il test U di Mann-Whitney ha rilevato un Bayes factor (BF₁₀) di 2745.388, suggerendo che c'è una differenza decisiva tra le due piante per quanto riguarda la distanza del centro della propria circumnutazione rispetto al fusto dell'altra pianta (BF₁₀ = 2745.388, W = 3179.000, R-hat = 1.006).

3.4.3 Correlazione bayesiana per misure cinematiche e spaziali

La correlazione Tau di Kendall è un indice statistico che quantifica la covariazione di due valori nel tempo e indica la relazione lineare tra di essi. In generale, la correlazione è una misura di prova della sincronia globale. La tabella 1 riporta tutte le correlazioni.

Tabella 1. Correlazioni bayesiane Kendall' Tau

Variabile 1		Variabile 2	Kendall's tau	BF ₁₀
Velocità media <i>grasper</i>	-	Velocità media <i>handler</i>	0.172	7.135*
Durata circumnutazione <i>grasper</i>	-	Durata circumnutazione <i>handler</i>	0.643	6.914*
Totale circumnutazioni <i>grasper</i>	-	Totale circumnutazioni <i>handler</i>	0.889	43.878**
Distanza dall'origine	-	Distanza dall'altra pianta	-0.296	1.561 × 10 ⁸ ***

Nota. BF₁₀* indica una correlazione moderata; BF₁₀** una correlazione forte; BF₁₀*** una correlazione decisiva.

CAPITOLO 4

DISCUSSIONI E CONCLUSIONE

I risultati ottenuti da questo studio dimostrano che le piante, durante l'*intertwining*, si comportano in maniera non casuale, muovendosi in modo flessibile ed anticipatorio. Le piante di Pisello, riuscendo a percepirsi l'un l'altra come potenziale supporto, agiscono congiuntamente scegliendosi come mutuo supporto al fine di crescere insieme verso la luce e dunque incrementare le possibilità di sopravvivenza. Il fenomeno dell'*intertwining* qui descritto è testimoniato dalla capacità delle due piante di coordinare le loro azioni nel tempo, con l'obiettivo di incontrarsi in uno specifico punto dello spazio al fine di raggiungere una perfetta sincronizzazione cinematica. Questa coordinazione cinematica è un indice molto importante in quanto dimostra che le piante agiscono congiuntamente. Dai risultati ottenuti, infatti, è evidente che le due piante della coppia generino pattern motori specifici e allo stesso tempo complementari. La pianta *handler*, si protrae in modo sproporzionale verso la *grasper*, esagerando i suoi movimenti per facilitare l'*intertwining*. Sembra quindi che l'inizio dell'intreccio sia segnalato dal comportamento motorio della *handler*, che attraverso l'esagerazione dei suoi movimenti segnala all'altra pianta (*grasper*) il "potenziale congiunto" dei loro movimenti, coordinandone l'azione. L'assunzione di ruoli, resa esplicita dall'assunzione di pattern motori specifici, suggerisce che non siamo in presenza di un comportamento imitatorio. I risultati riportati segnalano, piuttosto, che anche le piante sono in grado di generare comportamenti motori complementari al fine di compiere l'azione comune.

Un altro aspetto interessante emerge dalle analisi delle traiettorie delle due piante nel tempo. L'approccio progressivo tra le due piante, dimostrato attraverso le analisi correlazionali, evidenzia come le due piante, avvicinandosi progressivamente nel tempo l'una all'altra sincronizzano i loro movimenti in termini cinematici. Questo risultato rafforza ulteriormente l'ipotesi che le piante non si avvicinano l'una all'altra casualmente, ma piuttosto esse sono guidate dalla stessa intenzione (*shared intentionality*), ovvero quella di coordinare i propri movimenti al fine di attaccarsi saldamente l'una all'altra per poter crescere insieme verso la luce.

I risultati ottenuti contribuiscono a rafforzare l'ipotesi già sostenuta in studi precedenti (Calvo e Friston, 2017; Guerra et al., 2019; Ceccarini et al., 2020; Ceccarini et al., 2021; Wang et al., 2021, Wang et al., 2023, Bonato et al., 2023), circa

l'intenzionalità motoria delle piante. Si propone di interpretare i risultati ottenuti a partire dalla teoria della cognizione incarnata (*embodied cognition*; Wilson, 2002; Clark, 2008), secondo la quale le intenzioni ad agire non necessitano di una rappresentazione mentale, piuttosto si spiegano i comportamenti osservati in termini di *affordance* (Gibson et al., 1979). Secondo il costrutto di *affordances* (che implica la complementarità tra l'organismo e l'ambiente) (Gibson et al., 1979), un organismo percepisce l'ambiente che lo circonda a partire dalle azioni che può effettivamente eseguire. Gli oggetti, dunque, non vengono percepiti per le loro caratteristiche fisiche ma per la loro *affordance*, ovvero per cosa possono essere utilizzati e maneggiati (Gibson, 2014). Secondo questa prospettiva le piante sono capaci di una forma intenzionalità che si riflette nel flusso dei movimenti generati dall'interazione con l'ambiente e le sue caratteristiche (o meglio, *affordances*). In particolare, per i risultati ottenuti da questo studio, le *affordances* rappresentano una parte essenziale della socializzazione, in quanto forniscono l'opportunità di promuovere interazioni sociali nell'ambiente (Becchio et al., 2008; Ferri et al., 2011).

In conclusione, per la prima volta, attraverso questo studio viene descritto il comportamento di *intertwining* come possibile esempio di *joint action* tra due piante di pisello, dimostrando che anche le piante sono in grado di agire congiuntamente coordinando i loro movimenti al fine raggiungere un obiettivo comune (ovvero quello di afferrarsi saldamente per crescere insieme). L'insieme dei risultati ottenuti da questo e da studi precedenti (Guerra et al., 2019; Ceccarini et al., 2020; Ceccarini et al., 2021; Wang et al., 2021, Wang et al., 2023, Bonato et al., 2023) aprono la strada a nuove domande di ricerca circa l'intenzionalità motoria *across taxa*.

BIBLIOGRAFIA

- Ansuini, C., Cavallo, A., Bertone, C., & Becchio, C. (2014). The visible face of intention: why kinematics matters. *Frontiers in psychology*, 5, 815.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00815>
- Aristoteles, P. (1965). R. Kassel.
- Baluška, F., & Mancuso, S. (2009). Plant neurobiology: from sensory biology, via plant communication, to social plant behavior. *Cognitive processing*, 10, 3-7.
- Baluška, F., & Mancuso, S. (2020). Plants, climate and humans: plant intelligence changes everything. *EMBO reports*, 21(3), e50109.
- Bar-On, Y. M., Phillips, R., & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(25), 6506-6511.
- Beall, F. D., Yeung, E. C., & Pharis, R. P. (1996). Far-red light stimulates internode elongation, cell division, cell elongation, and gibberellin levels in bean. *Canadian Journal of Botany*, 74(5), 743-752.
- Becchio, C., Sartori, L., Bulgheroni, M., & Castiello, U. (2008). Both your intention and mine are reflected in the kinematics of my reach-to-grasp movement. *Cognition*, 106(2), 894-912.
- Bonato, B., & Castiello, U. (2020). Dagli abeti ai piselli. Storie di ordinaria resilienza. *Psiche*, 7(1), 113-121.
- Bonato, B., Peressotti, F., Guerra, S., Wang, Q., & Castiello, U. (2021). Cracking the code: a comparative approach to plant communication. *Communicative & Integrative Biology*, 14(1), 176-185.
- Bonato, B., Simonetti, V., Bulgheroni, M., Wang, Q., Guerra, S., Quaggiotti, S., Ruperti, B., & Castiello, U. (2023). Evidence of motor intentions in plants: A kinematical study. *Journal of Comparative Psychology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1037/com0000351>
- Boss, P. K., Bastow, R. M., Mylne, J. S., & Dean, C. (2004). Multiple pathways in the decision to flower: enabling, promoting, and resetting. *The Plant cell*, 16 Suppl (Suppl), S18–S31. <https://doi.org/10.1105/tpc.015958>

- Brisson, J. (2001). Neighborhood competition and crown asymmetry in *Acer saccharum*. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(12), 2151-2159. <https://doi.org/10.1139/x01-161>
- Callaway, R. M., & Mahall, B. E. (2007). Family roots. *Nature*, 448(7150), 145-146.
- Calvo, P., & Friston, K. (2017). Predicting green: really radical (plant) predictive processing. *Journal of the Royal Society Interface*, 14(131). <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.009>
- Casper, B. B., & Jackson, R. B. (1997). Plant competition underground. *Annual review of ecology and systematics*, 28(1), 545-570.
- Castiello, U. (1995). *Tecniche sperimentali di ricerca in psicologia*. Piccin-Nuova Libreria.
- Castiello, U. (2005). The neuroscience of grasping. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(9), 726-736.
- Castiello, U., & Guerra, S. (2020). La psicologia vegetale: alle radici della cognizione. *Giornale italiano di psicologia*, 47(3-4), 683-708.
- Castiello, U., & Peressotti, A. (2021). Cognizione e intelligenza delle piante: applicazioni nelle produzioni agricole? *Rivista di divulgazione di cultura agraria*, 2, 6-14.
- Ceccarini, F., Guerra, S., Peressotti, A., Peressotti, F., Bulgheroni, M., Baccinelli, W., Bonato, B., & Castiello, U. (2021). On-line control of movement in plants. *Biochemical and biophysical research communications*, 564, 86–91. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2020.06.160>
- Ceccarini, F., Guerra, S., Peressotti, A., Peressotti, F., Bulgheroni, M., Baccinelli, W., Bonato, B., & Castiello, U. (2020). Speed-accuracy trade-off in plants. *Psychonomic bulletin & review*, 27(5), 966–973. <https://doi.org/10.3758/s13423-020-01753-4>
- Clark, A. (2008). *Supersizing the mind: Embodiment, action, and cognitive extension*. OUP USA.
- Clark, H. (1996). *Using Language* ('Using' Linguistic Books). Cambridge: Cambridge University Press.
- Clark, H. H. (2002). Speaking in time. *Speech communication*, 36(1-2), 5-13.
- Clutton-Brock, T. (2009). Cooperation between non-kin in animal societies. *Nature*, 462(7269), 51-57.
- Darwin, C. (1875). *The movements and habits of climbing plants*. John Murray.
- Darwin, C., & Darwin, F. (1880). *The power of movement in plants*. John Murray.
- Darwin's, C. (1859). On the origin of species. *published on*, 24, 1.

- Dudley, S. A. (2015). Plant cooperation. *AoB Plants*, 7, plv113.
- Dudley, S. A., & File, A. L. (2007). Kin recognition in an annual plant. *Biology Letters*, 3(4), 435-438.
- Dudley, S. A., Murphy, G. P., & File, A. L. (2013). Kin recognition and competition in plants. *Functional Ecology*, 898-906.
- Erb, M., & Reymond, P. (2019). Molecular interactions between plants and insect herbivores. *Annual review of plant biology*, 70, 527-557.
- Ferri, F., Campione, G. C., Dalla Volta, R., Gianelli, C., & Gentilucci, M. (2011). Social requests and social affordances: how they affect the kinematics of motor sequences during interactions between conspecifics. *PloS one*, 6(1), e15855.
- Gagliano, M. (2015). In a green frame of mind: perspectives on the behavioural ecology and cognitive nature of plants. *AoB Plants*, 7.
- Gagliano, M., Renton, M., Depczynski, M., & Mancuso, S. (2014). Experience teaches plants to learn faster and forget slower in environments where it matters. *Oecologia*, 175, 63-72.
- Galimberti, U. (2004). Enciclopedia di psicologia. Garzanti
- Gelblum, A., Pinkoviezky, I., Fonio, E., Ghosh, A., Gov, N., & Feinerman, O. (2015). Ant groups optimally amplify the effect of transiently informed individuals. *Nature communications*, 6(1), 7729.
- Georgiou, I., Becchio, C., Glover, S., & Castiello, U. (2007). Different action patterns for cooperative and competitive behaviour. *Cognition*, 102(3), 415-433.
- Gibson, J. J. (2014). The ecological approach to visual perception: classic edition. Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781315740218>
- Gibson, J. J. (2014). The Theory of Affordances:(1979). In *The people, place, and space reader* (pp. 56-60). Routledge.
- Guerra, S., Peressotti, A., Peressotti, F., Bulgheroni, M., Baccinelli, W., D'Amico, E., Gómez, A., Massaccesi, S., Ceccarini, F., & Castiello, U. (2019). Flexible control of movement in plants. *Scientific reports*, 9(1), 16570. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53118-0>
- Hamilton, W. D. (1963). The evolution of altruistic behavior. *The American Naturalist*, 97(896), 354-356
- He, Q., Bertness, M. D., & Altieri, A. H. (2013). Global shifts towards positive species interactions with increasing environmental stress. *Ecology letters*, 16(5), 695-706.

- Heesen, R., Bangerter, A., Zuberbühler, K., Iglesias, K., Neumann, C., Pajot, A., Perrenoud, L., Guéry, J. P., Rossano, F., & Genty, E. (2021). Assessing joint commitment as a process in great apes. *iScience*, 24(8), 102872. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102872>
- Heesen, R., Genty, E., Rossano, F., Zuberbühler, K., & Bangerter, A. (2017). Social play as joint action: a framework to study the evolution of shared intentionality as an interactional achievement. *Learning & behavior*, 45, 390-405.
- Heesen, R., Zuberbühler, K., Bangerter, A., Iglesias, K., Rossano, F., Pajot, A., Guéry, J. P., & Genty, E. (2021). Evidence of joint commitment in great apes' natural joint actions. *Royal Society open science*, 8(12), 211121. <https://doi.org/10.1098/rsos.211121>
- Hettenhausen, C., Li, J., Zhuang, H., Sun, H., Xu, Y., Qi, J., Zhang, J., Lei, Y., Qin, Y., Sun, G., Wang, L., Baldwin, I. T., & Wu, J. (2017). Stem parasitic plant *Cuscuta australis* (dodder) transfers herbivory-induced signals among plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(32), E6703–E6709. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704536114>
- Kao, T. H., & McCubbin, A. G. (1996). How flowering plants discriminate between self and non-self pollen to prevent inbreeding. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(22), 12059-12065.
- Karban, R. (2008). Plant behaviour and communication. *Ecology letters*, 11(7), 727-739.
- Kong, C. H., Zhang, S. Z., Li, Y. H., Xia, Z. C., Yang, X. F., Meiners, S. J., & Wang, P. (2018). Plant neighbor detection and allelochemical response are driven by root-secreted signaling chemicals. *Nature communications*, 9(1), 3867.
- Marteniuk, R. G., Mackenzie, C. L., Jeannerod, M., Athenes, S., & Dugas, C. (1987). Constraints on human arm movement trajectories. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 41(3), 365.
- Nasrallah, J. B. (2002). Recognition and rejection of self in plant reproduction. *Science*, 296(5566), 305-308.
- Pfeffer, W. (1873). *Physiologische untersuchungen*. W. Engelmann.
- Rowe, N. P., & Speck, T. (2015). Stem biomechanics, strength of attachment, and developmental plasticity of vines and lianas. *Ecology of lianas*, 323-341.
- Sacheli, L. M., Tidoni, E., Pavone, E. F., Aglioti, S. M., & Candidi, M. (2013). Kinematics fingerprints of leader and follower role-taking during cooperative joint actions. *Experimental brain research*, 226, 473-486.

- Sebanz, N., & Knoblich, G. (2021). Progress in joint-action research. *Current Directions in Psychological Science*, 30(2), 138-143.
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in cognitive sciences*, 10(2), 70-76.
- Silvertown, J., & Gordon, D. M. (1989). A framework for plant behavior. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20(1), 349-366.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.20.110189.002025>
- Simonetti, V., Bulgheroni, M., Guerra, S., Peressotti, A., Peressotti, F., Baccinelli, W., Ceccarini, F., Bonato, B., Wang, Q., & Castiello, U. (2021). Can Plants Move Like Animals? A Three-Dimensional Stereovision Analysis of Movement in Plants. *Animals : an open access journal from MDPI*, 11(7), 1854. <https://doi.org/10.3390/ani11071854>
- Stolarz M. (2009). Circumnutation as a visible plant action and reaction: physiological, cellular and molecular basis for circumnutations. *Plant signaling & behavior*, 4(5), 380–387.
<https://doi.org/10.4161/psb.4.5.8293>
- Stolarz, M., Krol, E., Dziubinska, H., & Zawadzki, T. (2008). Complex relationship between growth and circumnutations in *Helianthus annuus* stem. *Plant signaling & behavior*, 3(6), 376-380.
- Trewavas, A. (2005). Plant intelligence. *Naturwissenschaften*, 92(9), 401-413.
- Trivers, R. L. (1971). The evolution of reciprocal altruism. *The Quarterly review of biology*, 46(1), 35-57.
- Tronchet, A. (1946). Suite de nos observations sur le comportement des vrilles en présence de tuteurs. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 93(1-2), 13-18.
- Tubiana, R. (1981). Architecture and functions of the hand. *The Hand 1*, 19-93.
- Van der Wel, R. P., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2011). Let the force be with us: dyads exploit haptic coupling for coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(5), 1420.
- van Doorn, J., van den Bergh, D., Böhm, U., Dablander, F., Derks, K., Draws, T., Etz, A., Evans, N. J., Gronau, Q. F., Haaf, J. M., Hinne, M., Kucharský, Š., Ly, A., Marsman, M., Matzke, D., Gupta, A. R. K. N., Sarafoglou, A., Stefan, A., Voelkel, J. G., & Wagenmakers, E. J. (2021). The JASP guidelines for conducting and reporting a Bayesian analysis. *Psychonomic bulletin & review*, 28(3), 813–826.
<https://doi.org/10.3758/s13423-020-01798-5>

- Van Duijn, M., Keijzer, F., & Franken, D. (2006). Principles of minimal cognition: Casting cognition as sensorimotor coordination. *Adaptive Behavior*, *14*(2), 157-170.
- Vesper, C., Abramova, E., Bütepage, J., Ciardo, F., Crossey, B., Effenberg, A., Hristova, D., Karlinsky, A., McEllin, L., Nijssen, S. R., Schmitz, L., & Wahn, B. (2017). Joint Action: Mental Representations, Shared Information and General Mechanisms for Coordinating with Others. *Frontiers in psychology*, *7*, 2039. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.02039>
- Vesper, C., Butterfill, S., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2010). A minimal architecture for joint action. *Neural Networks*, *23*(8-9), 998-1003.
- Vesper, C., Van Der Wel, R. P., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2011). Making oneself predictable: Reduced temporal variability facilitates joint action coordination. *Experimental brain research*, *211*, 517-530.
- Vingerhoets, G. (2014). Contribution of the posterior parietal cortex in reaching, grasping, and using objects and tools. *Frontiers in psychology*, *5*, 151.
- Wandersee, J. H., & Schussler, E. E. (1999). Preventing plant blindness. *The American biology teacher*, *61*(2), 82-86.
- Wandersee, J. H., Schussler, E. E., & Blindness, P. P. (2001). Originally written by Anna Kell & Jonathan Frey, Department of Art & Art History, Bucknell University for *Lloydiana* magazine, a publication of the Lloyd Library in Cincinnati, OH: Volume 21, Issue 1 2019. *Science Bulletin*, *47*(1), 2-9.
- Wang, Q., Guerra, S., Bonato, B., Simonetti, V., Bulgheroni, M., & Castiello, U. (2023). Decision-making underlying support-searching in pea plants. *Plants*, *12*(8), 1597.
- Wang, Q., Guerra, S., Ceccarini, F., Bonato, B., & Castiello, U. (2021). Sowing the seeds of intentionality: Motor intentions in plants. *Plant Signaling & Behavior*, *16*(11), 1949818.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic bulletin & review*, *9*(4), 625-636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>