

參、結果

一、不同實驗狀態下個體運動速度的比較

在本實驗中所設計的四種狀態：無照光、無照光+觸碰蟑螂身體、照光、照光+觸碰蟑螂身體，蟑螂運動速度並不相同(圖六，表一，表二)，無論是個體運動平均速度與前 10%最大速度均是無照光無觸碰最低，照光+觸碰蟑螂身體最高。經由雙因子變異數分析，照光與觸碰身體二項因子均可顯著地使蟑螂的個體運動平均速度增加(光照： $p<0.05$ ；觸碰身體： $p<0.01$)，但兩者間的加成性不顯著($p>0.05$)；照光與觸碰身體二項因子亦可顯著地使蟑螂的前 10%最大運動速度增加(光照： $p<0.001$ ；觸碰身體： $p<0.001$)，兩者間的加成性仍不顯著($p>0.05$)。因此，接下來的實驗以這四種狀態，分別誘導蟑螂產生不同的個體運動速度。

二、個體運動與觸角擺動的關係

(一)個體運動速度與觸角擺動位置及幅度的關係

蟑螂靜止時觸角擺動幅度較大，擺動也不規則，大部分時間觸角是在同側擺動(左右觸角分別在身體左側及右側擺動)，偶爾有擺到對側(右觸角在身體左側擺動或左觸角在身體右側擺動)的情形(圖七 a-c)。隨著個體運動速度的增加，觸角擺動的幅度會逐漸縮小，擺動位置也會逐漸固定在身體前方特定(水平約 40~50 度，垂直約 0 度)位置(圖八 a)，個體運動速度增快時，水平擺動位置依然在 40~50 度左右，而垂直擺動位置有下移的現象(圖八 b,c)。為了詳細了解運動速度與觸角擺動之間的關係，以下將觸角擺動情形分垂直擺動(擺動高度)和水平擺動(張開程度)兩方面進一步分析。

垂直擺動

蟑螂在靜止時，觸角垂直擺動高度明顯高於運動時期的垂直擺動高度(圖九)，隨著運動速度增加，觸角擺動高度漸降，擺動高度與運動速度為反比的趨勢(右觸角： $R^2=0.5560$ ， $p<0.0001$ ；左觸角： $R^2=0.3995$ ， $p<0.0001$)(圖九 a,b)。在高速度運動時，垂直擺動高度略低於 0 度(即略微向下擺)。

垂直擺動幅度亦是靜止時較運動時大，在運動時的垂直擺動幅度具有與個體

運動速度成反比的趨勢(右觸角： $R^2=0.4643$ ， $p < 0.001$ ；左觸角： $R^2 = 0.1508$ ， $p < 0.0001$)(圖十)，高速運動時，觸角垂直擺動幅度約維持在 5 度附近。

水平擺動

靜止時，蟑螂觸角水平擺動位置變異非常大，雖然大部分的時間是在身體同一側擺動(右觸角在身體主軸的右側擺動或左觸角在身體主軸的左側擺動)，但是偶爾會有擺動到對側的情形。運動時，水平位置與運動速度幾乎沒有相關(右觸角： $R^2=0.0001$ ， $p > 0.05$ ；左觸角： $R^2=0.02$ ， $p > 0.05$)(圖十一)，無論運動速度快或慢，左右觸角分別維持與身體主軸約 40-50 度的位置，但沒有出現在對側擺動的情形。

水平擺動幅度方面，靜止時與慢速運動時的水平擺動幅度差異不大，但在運動時，水平擺動幅度有隨運動速度增加而減小的趨勢(右觸角： $R^2=0.5543$ ， $p < 0.0001$ ；左觸角： $R^2=0.7241$ ， $p < 0.0001$)(圖十二)。

兩觸角的夾角與夾角變化

靜止時，兩觸角的平均夾角由圖十三(a)的盒鬚圖(box plots)可見資料分布非常分散，代表在各個實驗片段之間的變異非常大；在運動時，兩觸角平均夾角通常維持在約 80-100 度的範圍，各片段間的變異比靜止時小，但兩觸角夾角與運動速度相關性低($R^2=0.0392$ ， $p < 0.05$)(圖十三 a)。

靜止時，單一實驗片段中兩觸角夾角的變化情形和個體慢速運動差異不大，但隨著運動速度的增加，單一實驗片段中兩觸角的夾角變化有漸減的趨勢($R^2 = 0.6977$ ， $p < 0.0001$)，在個體高速運動時，單一實驗片段中的夾角變化約為 5 度(圖十三 b)。

(二)個體運動速度與觸角擺動角速度的關係

靜止時的觸角擺動角速度和低速(100mm/sec)運動擺動的角速度差異不大。雖然隨者運動速度增加觸角擺動角速度也有增加的趨勢，但二者的相關性並不高(右觸角： $R^2=0.2324$ ， $p < 0.0001$ ；左觸角： $R^2=0.2687$ ， $p < 0.0001$)(圖十四)。

(三)個體運動速度與觸角垂直擺動頻率的關係

挑選觸角上下規則擺動、可計算上下擺動頻率的片段進行分析，結果發現蟑螂觸角垂直擺動頻率與運動速度成正相關(不包含靜止狀態下擺動， $R^2=0.8369$ ， $p<0.0001$ ，分析 3 隻蟑螂共 45 個影像片段)(圖十五)。

靜止時蟑螂觸角垂直擺動頻率每秒約 3~5 次(分析 3 隻蟑螂共 23 個影像片段)和個體低速(100mm/sec)運動時的垂直擺動頻率十分接近。

(四)個體運動速度與前腳跨步頻率的關係

從同步紀錄中分析觸角擺動的同時，可見前腳向前伸出的動作。因而分別計算左右腳向前伸出的次數，以求得前腳步伐與個體運動速度之間的關係，結果發現兩者的相關性非常高($R^2=0.9093$ ， $p<0.0001$ ，分析 3 隻蟑螂分析 41 個影像片段，趨勢線設定無截距)(圖十六)。

(五)觸角垂直擺動與前腳跨步的關係

雖然由前面的結果得知，蟑螂觸角垂直擺動頻率和前腳跨步頻率，皆與個體運動速度有高度的相關性，然而觸角的擺動和前腳跨步之間的協調性並非永遠存在。本研究結果得知蟑螂之觸角垂直擺動與前腳跨步間的協調情形，可歸為三大類。第一類是具有明顯協調性：觸角的垂直擺動與前腳的跨步頻率相同，而且均是交互性地週期運動；在前腳伸到最前方時，同側觸角恰好擺到最高點附近(圖十七 a,b)。第二類是步伐與觸角擺動具有相同週期，但是兩觸角是同步擺動而非交互性擺動(圖十八 a,b)。第三類是觸角垂直擺動不具規則性或觸角垂直擺動與前腳跨步的頻率不相同。此三種類型的比例大約 2:1:2(分析 3 隻蟑螂共 65 個影像片段)。由於蟑螂運動時，觸角垂直擺動幅度較小而且經常有小幅度不規則擺動，因此這部分的結果認定不易，僅能以約略的比例呈現。

三、觸角擺動方向與觸角關節活動的關係

經過公式計算將影響觸角方向各因素獨立觀察之後，發現蟑螂觸角水平擺動主要受柄節擺動的影響(圖十九 a；圖二十 a)，垂直擺動主要受梗節擺動的影響(圖十九 b)。此外，尚有一些可能影響蟑螂觸角方向的因素。水平擺動方面，蟑螂在大部分的狀況下頭部不會左右擺動或旋轉，而鞭節因 SP 關節結構的限制(圖二十一 b)，無法左右擺動，因此二者均不會影響觸角的水平擺動；而在可能影響

觸角垂直擺動的因素方面，蟑螂頭部垂直面的角度變化(頭部上下擺動)是影響觸角垂直位置的一項因素，然而除了極少數狀況下，蟑螂試圖用觸角探測頭部後上方才會有明顯的頭部上擺之外(結果未呈現)，其餘時候頭部上下擺動的幅度很小。在靜止時，頭部保持向後(下)30~50度(圖十九 b)；運動時雖會略為抬起，但梗節在運動時擺動角度大幅降低(圖二十 b)，因此整體觸角垂直擺動高度仍然降低。快速行走時，鞭節角度和頭部角度的總和約為0度，這是導致觸角垂直擺動高度接近0度的主要原因。

從整個觸角、單獨柄節和梗節的擺動軌跡分析結果，可知當觸角在三度空間任意擺動時(圖二十二 a)，柄節擺動的方向仍是水平方向為主(圖二十二 b)，梗節擺動的方向則是以垂直方向為主(圖二十二 c)。

若將數個(包含靜止與運動中)柄節與鞭節擺動的位置圖合併在一起(圖二十三 a,b)，發現柄節無論是運動或靜止時期，大多在相對於頭部 20~55 度的水平位置擺動，靜止時偶爾水平擺動位置會與中軸夾角小於 20 度或大於 55 度；柄節相對於頭部的上下擺動幅度不超過 20 度，靜止時柄節相對於頭部的角度較高，運動時柄節會略微下擺；當柄節水平擺動位置小於 20 度或大於 55 度時，柄節的垂直角度都明顯下降，因此，柄節可活動的軌跡是倒 U 字型，這個結果和 HS 關節的特殊構造吻合(圖二十一 a)。鞭節相對於柄節的垂直位置約為 10~70 度，水平擺動則在 -10~20 度間，鞭節所能擺動的範圍呈略微左上-右下的狹長分布，這是 SP 關節構造影響的結果(圖二十一 b)。圖二十三 b 中亦可看出靜止時與運動時觸角垂直擺動高度的差異。