

認識身旁的小傢伙(12)-- 利用心電圖與影像分析法探討美洲蟑螂 心臟因應體位變化的調節作用

高家敏 蔡任圃*

臺北市立中山女子高級中學

壹、前言

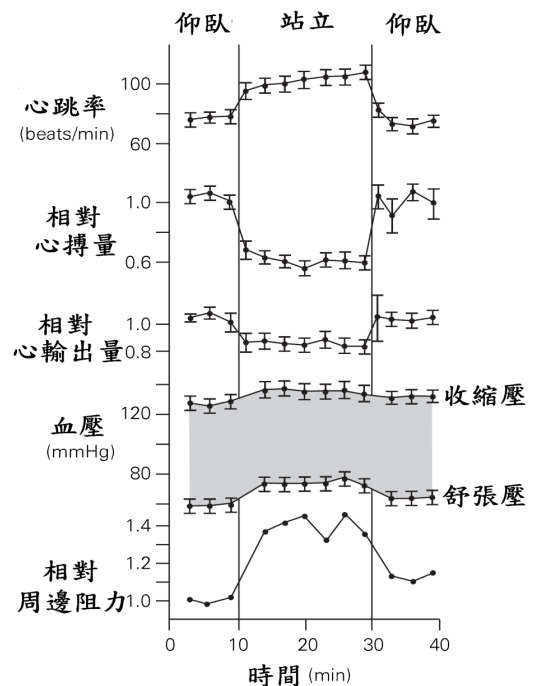
我們都有這樣的經驗：劇烈運動過後，即使不用觸碰胸部，也能清楚感覺到心臟劇烈急促的跳動。人體的循環系統(心臟為主要器官)會隨著腦幹發出的指令而有所變化，而發出的指令則因應環境因子、身體狀況進行調整，因此人體的心臟活動並非一直維持不變，而受各項因子影響。

人體的姿勢改變後，循環系統會因應而改變血壓，以維持腦部的血液供應，例如：由躺姿改為站姿時，人體的心搏量會下降，心輸出量會下降，心跳率會增加，血管會收縮，造成血壓的上升(圖一)(Smith, *et al.*, 1970)。

人體屬於閉鎖式循環(closed circulatory system)，血壓較開放式循環(open circulatory system)的動物為高，且運輸效率較佳，在姿勢改變時，可快速調節循環系統的生理反應，維持循環系統的正常運作功能。屬於開放式循環之昆蟲的演化歷史雖然較長，但是循環系統卻仍十分簡單，我們好奇：開放式循環相對於閉鎖式循環有何特

別之處?其心臟活動是否也會受體位改變的影響，而調節其生理反應?

本文主要以美洲蟑螂作為實驗動物，透過建立美洲蟑螂心臟活動的記錄方法，探討體位變化對心臟生理的影響。為了與其他昆蟲進行比較，亦嘗試以短角外斑腿蝗作為實驗動物。



圖一 人體姿勢改變時，心臟生理表現與血壓的改變情形(修改自 Smith, *et al.*, 1970)。

*為本文通訊作者

貳、研究方法與過程

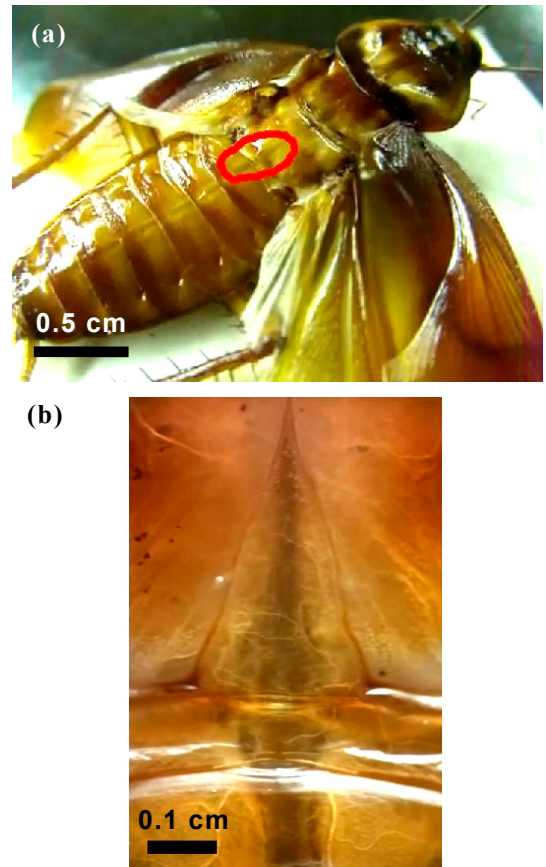
一、研究設備及器材

表一 實驗裝置與器材

編號	名稱 (型號或規格)	備註 (廠牌或用途)
1	複式顯微鏡(Primo Star)	SEISS
2	解剖顯微鏡	
3	照相機(Super Steady Shot DR-SR11)	Sony
4	生理訊號記錄儀(PowerLab 26T)	ADInstrument (USA)
5	蟑螂屋貼紙與膠帶	上黏蟑螂屋
6	試管木夾	
7	解剖器材 (鑷子、小剪)	
8	載玻片、蓋玻片	
9	二氧化碳鋼瓶	用以麻醉昆蟲

二、實驗動物

美洲蟑螂(American cockroach, 學名: *Periplaneta americana*): 飼養於室內昆蟲箱, 為本校自行飼養繁殖。飼養之環境溫度約 25~28°C, 定期換水、提供充足飼料(玉米、大麥磨成粉製成)。實驗的進行皆以色澤明亮、身體外表無破損之雄性成蟲作為實驗動物, 以避免母蟲生殖週期或攜夾卵鞘的干擾, 且實驗過的動物不再進行實驗。成蟲體長約 3-4 公分。本研究觀察胸腹部背側體壁交界之三角形區域下的心臟活動, 即記錄、分析胸部第三節心臟(T3)的生理活動(圖二)。



圖二 美洲蟑螂胸部第三節心臟(T3)的位置。(a)蟲體胸部與腹部交接處(橢圓圈表示 T3 位置)。(b)T3 心臟為位於胸腹部交界之三角形區域下。

三、研究過程或方法

(一)建立心臟活動的記錄方法

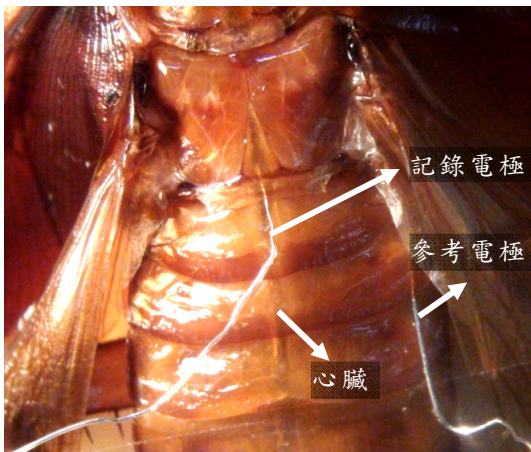
1. 心電圖的紀錄

將實驗動物固定於蟑螂屋貼紙, 在解剖顯微鏡下進行操作。參考 Hertel 等人(1985)的方法, 將一電極穿過心臟壁, 另一電極插入蟲體腹部(作為參考電極)(圖三), 然後將蟲體固定於一金屬板上, 金屬板連接接地線及蓋上金屬網以隔離干擾, 電極與接地線皆連

接至生理訊號記錄儀(Power Lab)。以木夾夾住金屬板，方便翻轉金屬板與其上之蟲體(避免人體身上的電流干擾)，以改變實驗動物體位，同時記錄體位改變前、中、後的心肌電位變化(即心電圖，簡稱 ECG)，據此計算姿勢改變前後的波形頻率(心跳率)及電位振幅的變化。

心電圖所測量的心臟生理數據如下：

- a. 心跳率：由 ECG 中一次心動週期推算單位時間所產生的心動週期數量，單位為次/分鐘。
- b. 電位振幅：由 ECG 中一次心動週期電位最高與最低之差值，單位為毫伏特(mV)或微伏特(μV)。

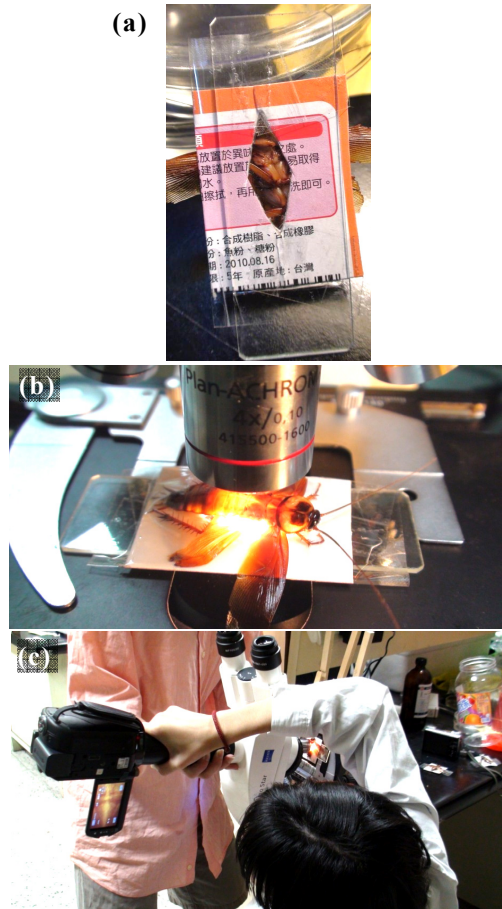


圖三 電極插入美洲蟑螂心臟與腹部位置的照片。

2. 影像分析系統的建立

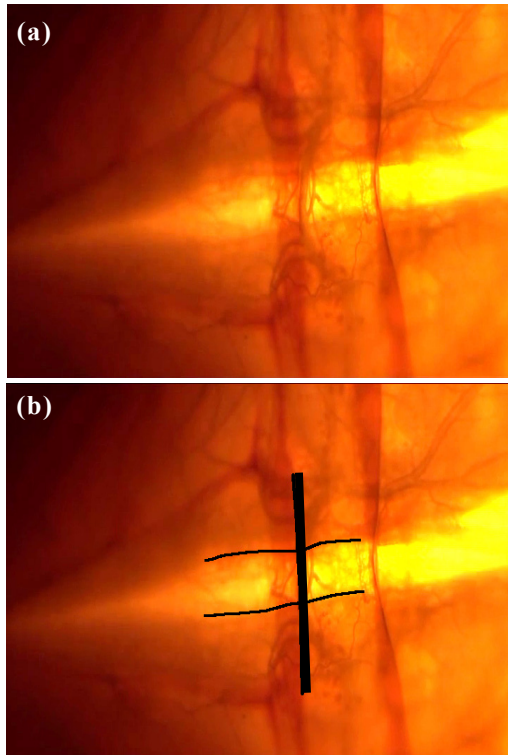
把市售之蟑螂屋貼紙剪出一個菱形缺口(圖四 a)，以利顯微鏡光源穿透，並利用紅色玻璃紙將顯微鏡光源濾成紅光，避免蟲體受到白光刺激時的劇烈掙扎。利用二氧化碳將美洲蟑

螂麻醉後，將背部朝上固定於貼紙上，並使兩對翅膀黏貼於兩旁的貼紙上，露出心臟以利觀察。將貼紙與蟲體一併固定於載玻片上，放置於顯微鏡下進行心臟活動的觀察(圖四 b)，待美洲蟑螂從麻醉中恢復後(約 5~10 分鐘)，以攝影機記錄心臟體壁之運動過程。實驗過程中將顯微鏡、攝影機與蟲體一同進行 90 度的翻轉(圖四 c)，以改變美洲蟑螂體位，同時記錄體位改變前、中、後的心臟活動影像。



圖四 進行美洲蟑螂心臟影像記錄的方法
(a)固定於玻片上的美洲蟑螂
(b)放置於載物臺上的美洲蟑螂
(c)進行 90 度的翻轉以改變蟲體體位

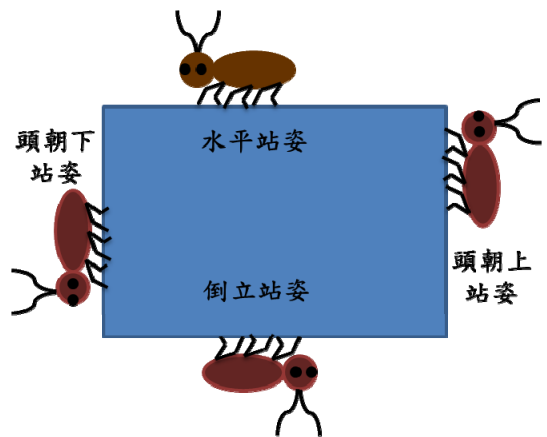
所記錄的影片以軟體(Tracker 4.71)逐畫格播放並記錄座標，分別測量心臟壁與背板骨片邊緣的交點座標(圖五)，以計算心臟收縮與舒張時的內徑，進而推算心搏量。同時記錄其時間，以計算心臟舒張與收縮時間，進而推算心跳率。



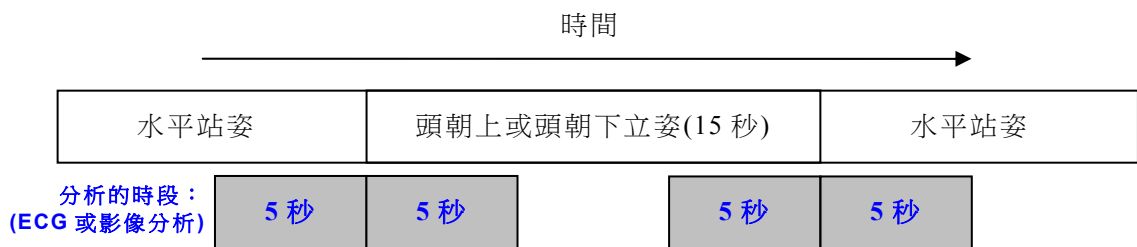
圖五 心臟壁與背板骨片邊緣的交點位置。(a)顯微鏡下的 T3 心臟影像。(b)心臟壁(細線)與背板骨片邊緣(粗線)的交點示意圖。

如前述方法(心電圖或影像分析記錄)將美洲蟑螂固定後，使美洲蟑螂保持水平站姿。在美洲蟑螂常出現的四種體位中(圖六)，本研究所探討的體位因子分為水平站姿轉為頭朝上站姿再恢復水平站姿，或水平站姿轉為頭朝下站姿再恢復水平站姿時對心臟生理活動的影響。

實驗流程為：美洲蟑螂水平站姿 15 秒→頭朝上/下站姿 15 秒→恢復水平站姿 15 秒，同時進行心臟活動的 ECG 或影像記錄，最後分析體位改變前 5 秒、後 5 秒與體位恢復前 5 秒、後 5 秒的心臟活動數據(圖七)。



圖六 美洲蟑螂在自然情況下有多種體位



圖七 本研究的實驗流程與分析心臟生理活動的時段

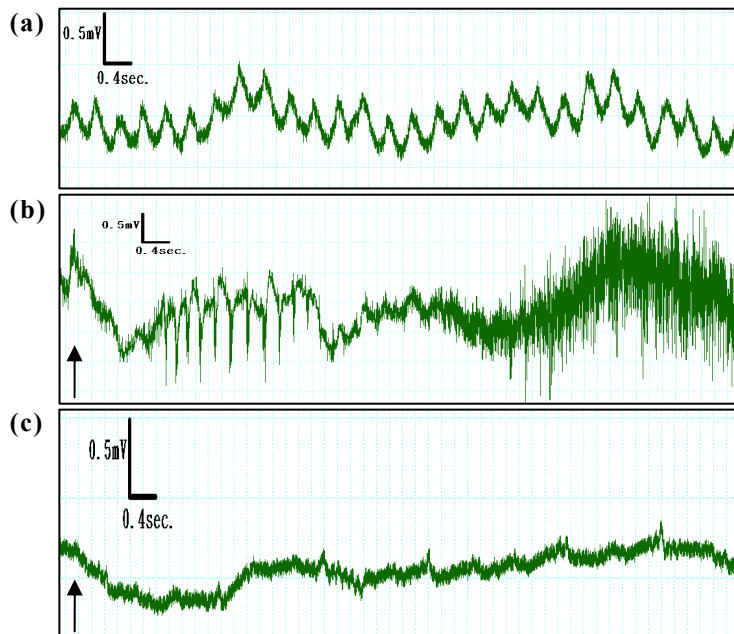
影像分析所測量的心臟生理數據如下：

- a. 心臟收縮時間：心臟由最大舒張時至最大收縮所經歷的時間，單位為秒。
- b. 心臟舒張時間：心臟由最大收縮時至最大舒張所經歷的時間，單位為秒。
- c. 心跳率：由每次心動週期(心臟收縮時間 + 心臟舒張時間)推算單位時間所產生的心動週期數量，單位為次/分鐘。
- d. 心臟收縮內徑：心臟於最大收縮時的心臟內徑，以百分比表示，對照組的心臟收縮內徑平均值訂為 100%。
- e. 心臟舒張內徑：心臟由最大舒張時的心臟內徑，以百分比表示，對照組的心臟收縮內徑平均值訂為 100%。
- f. 心搏量：心臟一次收縮所搏出的血淋巴體積，為(心臟舒張內徑² - 心臟舒

張內徑²)的數值推算而來，以百分比表示，對照組訂為 100%。

- g. 心輸出量：單位時間內心臟所搏出的血淋巴體積，為(心跳率 × 心搏量)的數值推算而來，以百分比表示，對照組訂為 100%。

記錄美洲蟑螂心臟活動期間，我們發現蟲體時有掙扎的情形，原設計於實驗期間皆以二氧化碳麻醉蟲體以避免其活動(如：扭動身體)的干擾。以二氧化碳麻醉後，蟲體會先經歷一段全身抽蓄後才靜止不動，而麻醉過後的美洲蟑螂，由影像記錄可看出心搏明顯停止，上述過程亦可於心電圖的記錄中觀察到(圖八)。因此本研究在固定好美洲蟑螂後，便不再進行麻醉，雖然偶有劇烈掙扎的情形，但等美洲蟑螂適應一段時間後，心搏會漸漸穩定。

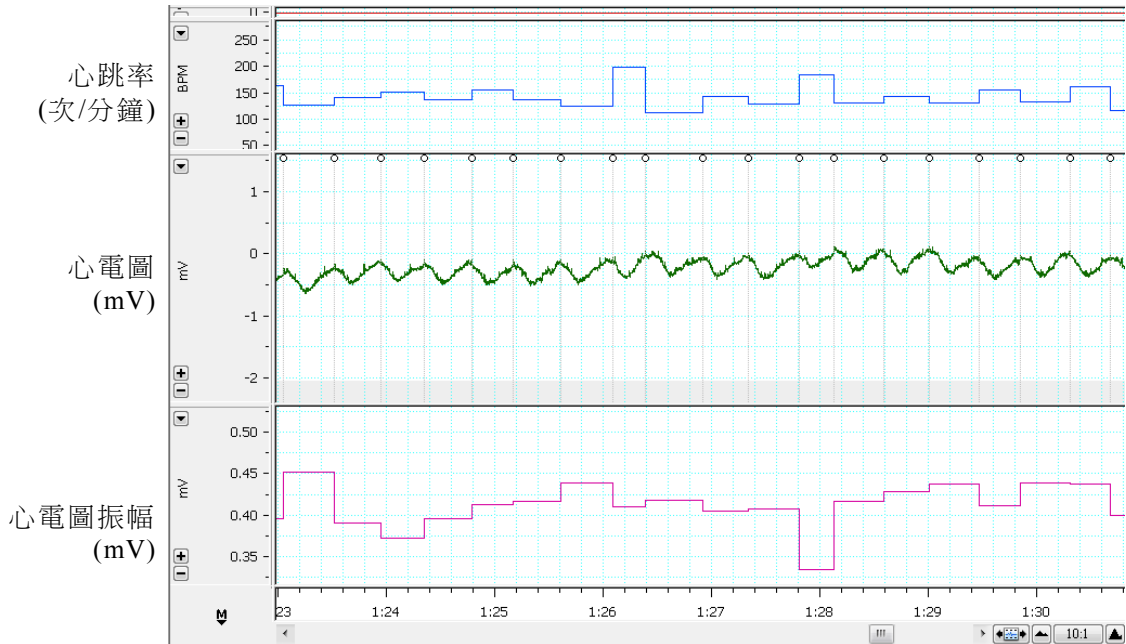


圖八 二氧化碳麻醉美洲蟑螂期間與麻醉成功後的心電圖記錄。(a)麻醉前的 ECG。(b)開始麻醉時的 ECG，箭頭代表蟲體周圍開始灌入二氧化碳氣體的時間。(c)麻醉成功(蟲體靜止不動)時的 ECG，箭頭代表灌入二氧化碳氣體後 20 秒時。

參、研究結果

一、心電圖(ECG)記錄結果

(一) 美洲蟑螂(圖九)的心電圖記錄。

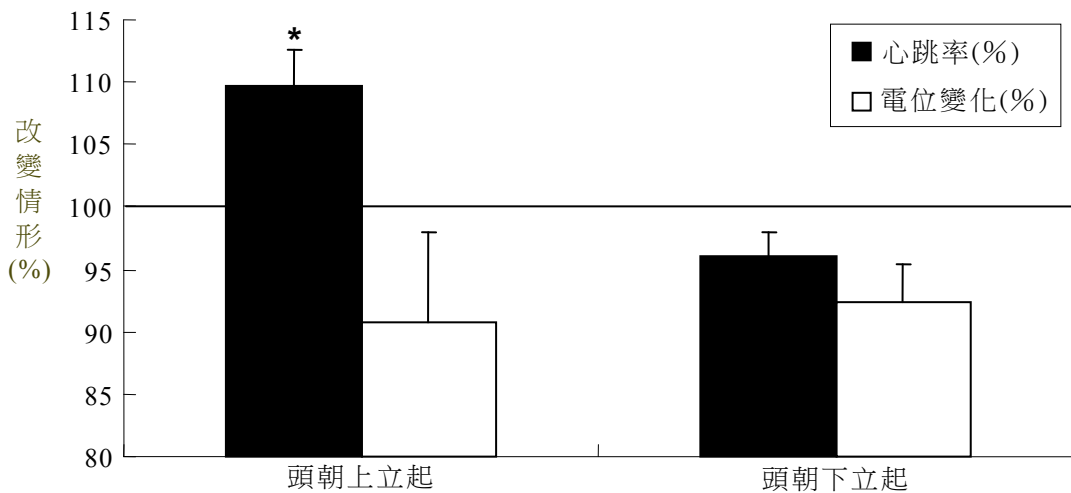


圖九 美洲蟑螂 ECG 紀錄

(二) 美洲蟑螂體位改變時的 ECG 記錄結果(圖十與表二)。

當美洲蟑螂頭朝上站姿立起時，其心跳率增加約 10%，但電位振幅沒有明顯變化。

當美洲蟑螂頭朝下站姿立起時，其心跳率與電位振幅皆沒有明顯變化。



圖十 美洲蟑螂的體位由正常水平體位轉換成頭朝上/下站姿時，其心電圖測量出的心跳率與電位改變的分析結果(平均 ± 標準誤，各 10 個心動週期)。與正常組相比(單尾 t 檢定)：*： $p < 0.05$ 。

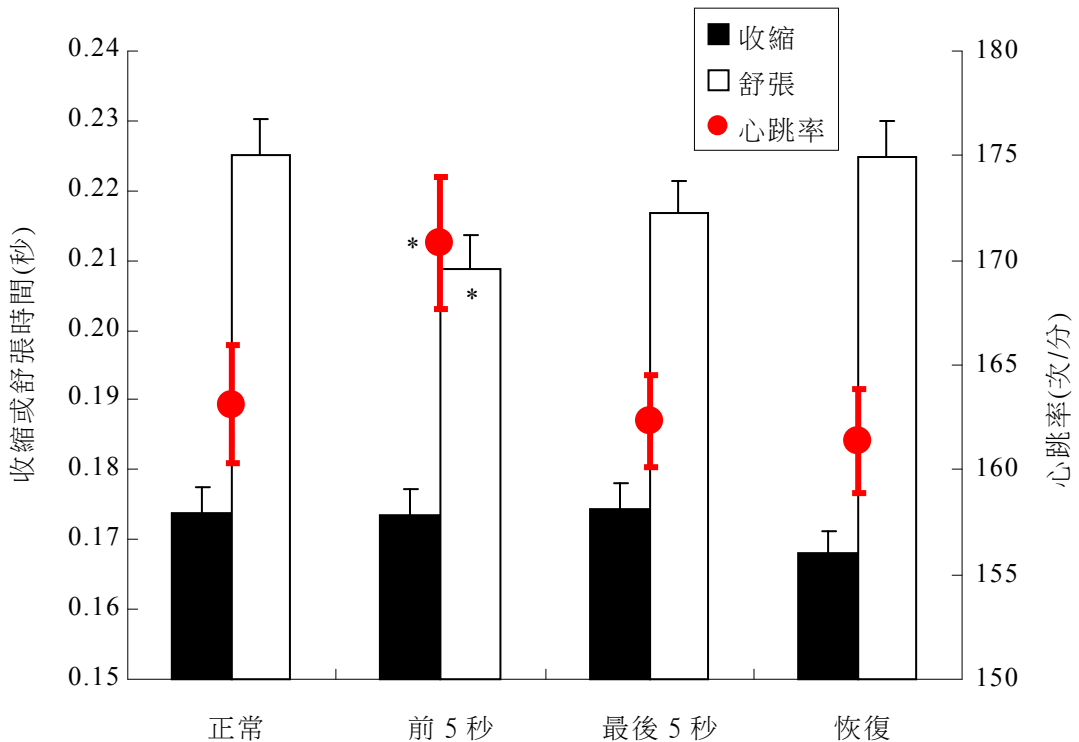
二、影像分析法的記錄結果(表三)

(一) 美洲蟑螂頭朝上站姿與恢復體位的情形

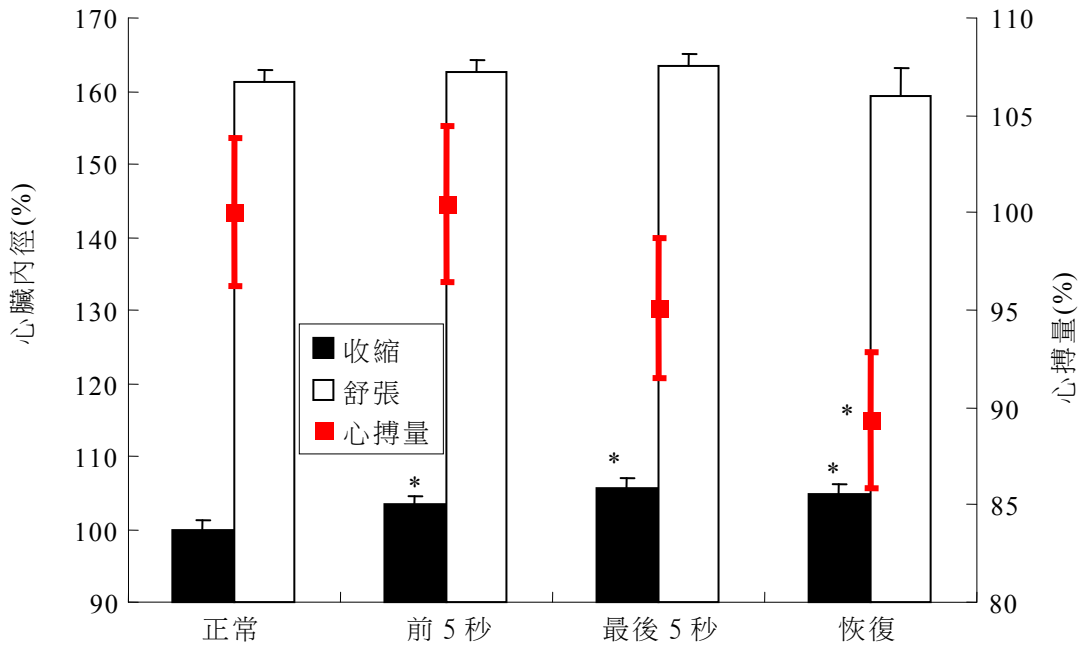
比較體位轉變成頭朝上站姿的前、後與恢復正常水平體位前、後的心臟生理活動，發現頭朝上站姿後心臟舒張時間減少，而後逐漸回升，心跳率上升，而後逐漸回降(圖十一)，心臟收縮內徑持續增加；恢復體位後，心臟收縮與舒張時間無明顯變化，心臟收縮內徑增加，心搏量減少(圖十二)，心輸出量減少(圖十五)。

(二) 美洲蟑螂頭朝下站姿與恢復體位的情形

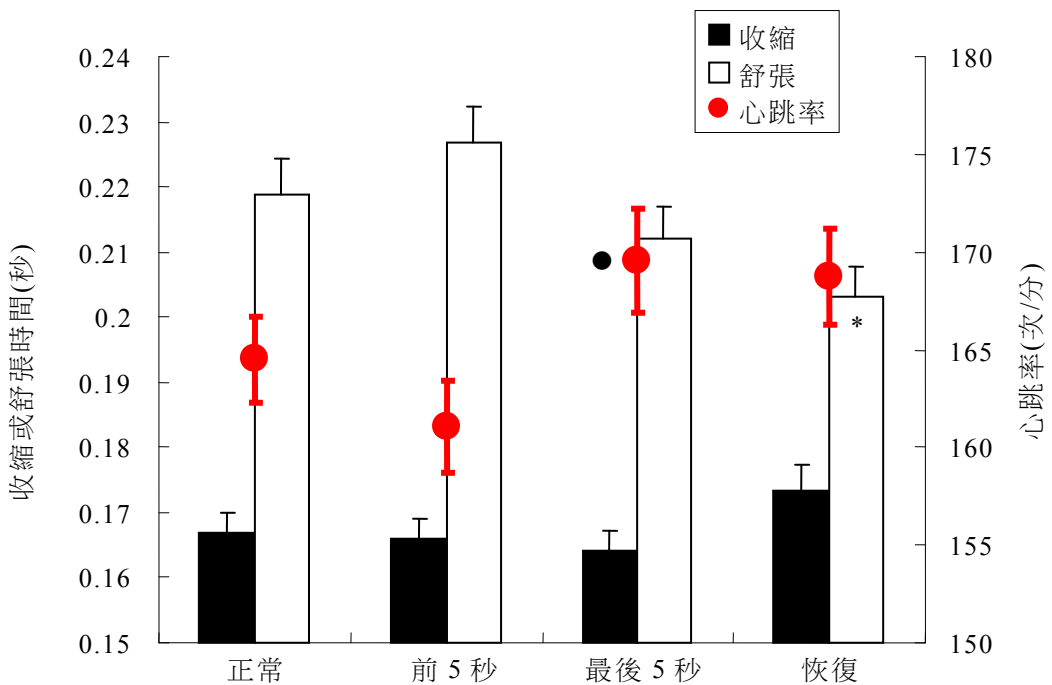
比較體位轉變成頭朝下站姿的前、後與恢復正常水平體位前、後的心臟生理活動，發現頭朝下站姿後心臟舒張時間略微增加(圖十三)，心臟舒張內徑減少，心搏量減少(圖十四)，而心輸出量減少；恢復體位後，舒張時間減少(圖十五)。



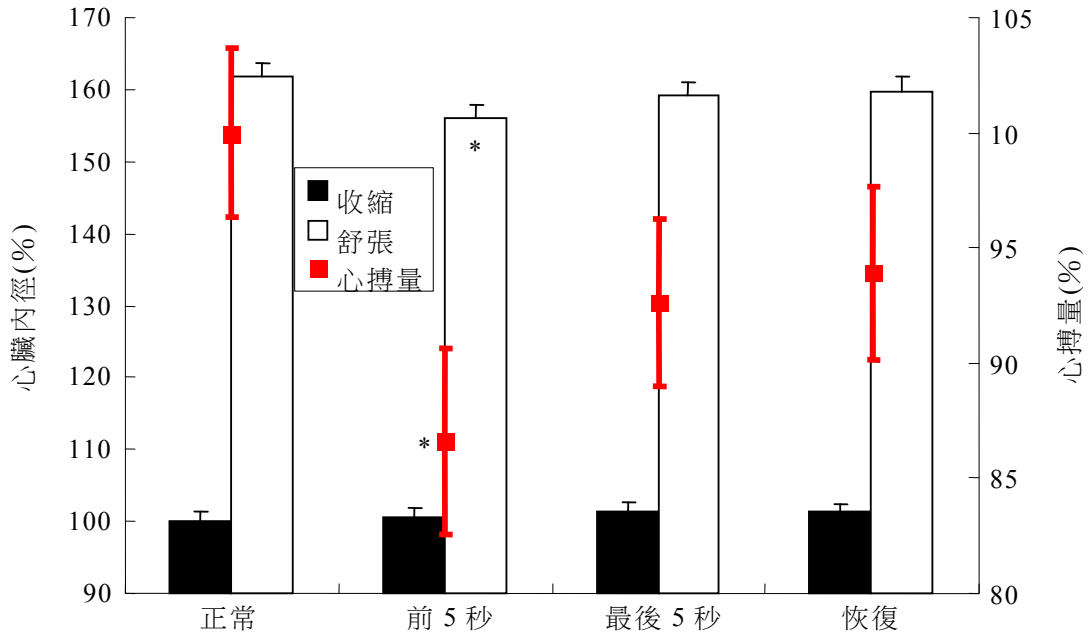
圖十一 美洲蟑螂由水平體位轉變成頭朝上立姿前、中、後的心臟收縮、舒張時間與心跳率變化(平均 ± 標準誤, n = 22)。與正常組相比(單尾 t 檢定)：*：p < 0.05。



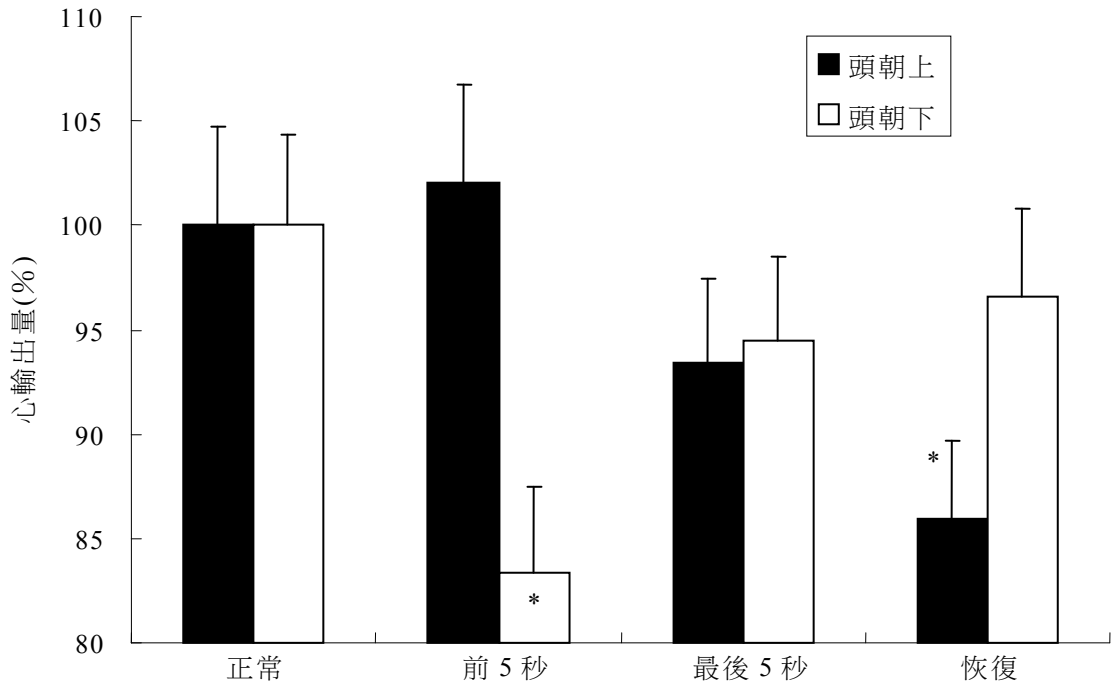
圖十二 美洲蟑螂由水平體位轉變成頭朝上立姿前、中、後的心臟收縮、舒張內徑與心搏量變化(平均 ± 標準誤, n = 22)。與正常組相比(單尾 t 檢定): * : $p < 0.05$ 。



圖十三 美洲蟑螂由水平體位轉變成頭朝下立姿前、中、後的心臟收縮、舒張時間與心跳率變化。(平均 ± 標準誤, n = 22)。與正常組相比(單尾 t 檢定): ● : $p < 0.075$; * : $p < 0.05$ 。



圖十四 美洲蟑螂由水平體位轉變成頭朝下立姿前、中、後的心臟收縮、舒張內徑與心搏量變化(平均 ± 標準誤, n = 22)。
與正常組相比(單尾 t 檢定): * : $p < 0.05$ 。



圖十五 美洲蟑螂由水平體位轉變成頭朝上與頭朝下立姿前、中、後的心輸出量的變化。(平均 ± 標準誤, n = 22)。
與正常組相比(單尾 t 檢定): * : $p < 0.05$ 。

表二 利用心電圖分析體位改變時對美洲蟑螂心臟生理活動的影響。

	心跳率	ECG電位振幅
頭朝上站姿	↑	—
頭朝下站姿	—	—

表三 利用影像分析法分析體位改變時對美洲蟑螂心臟生理活動的影響。

	收縮時間	舒張時間	收縮內徑	舒張內徑	心跳率	心搏量	心輸出量
頭朝上站姿	—	↓	↑	—	↑	—	—
頭朝下站姿	—	—	—	↓	—	↓	↓

肆、討論

一、心電圖記錄

我們由參考資料中得知，人體在躺姿、站姿、坐姿的心肌電位相差不大 (Lidman, et al., 1994)。我們也發現美洲蟑螂的心肌電位變化在姿勢改變時無明顯變化，由此可知，心電圖記錄法對我們探討體位改變時循環系統的調節作用，幫助並不大。

二、影像分析實驗

本研究證實體位(重力方向)的改變會影響美洲蟑螂的心臟生理活動，為第一個探討體位因子對閉鎖式循環及開放式循環影響的研究。

我們將影像分析所得到的參數變化整理成表三並以圖形表現(圖十六)，從圖十六中可比較重力方向改變後，對美洲蟑螂心臟活動的影響：當美洲蟑螂頭朝上站姿時，由於重力方向不利血淋巴由心臟前方搏出，反而將血淋巴滯留於心臟中，此

時舒張時間減少，心跳率增加，使頭部能及時獲得足夠的血淋巴。頭朝下站姿時，心搏量減少，進而減少心輸出量，我們認為此時血淋巴受重力影響，能順利流至頭部，為避免頭部獲得過多的血淋巴，因此心搏量、心輸出量皆減少。

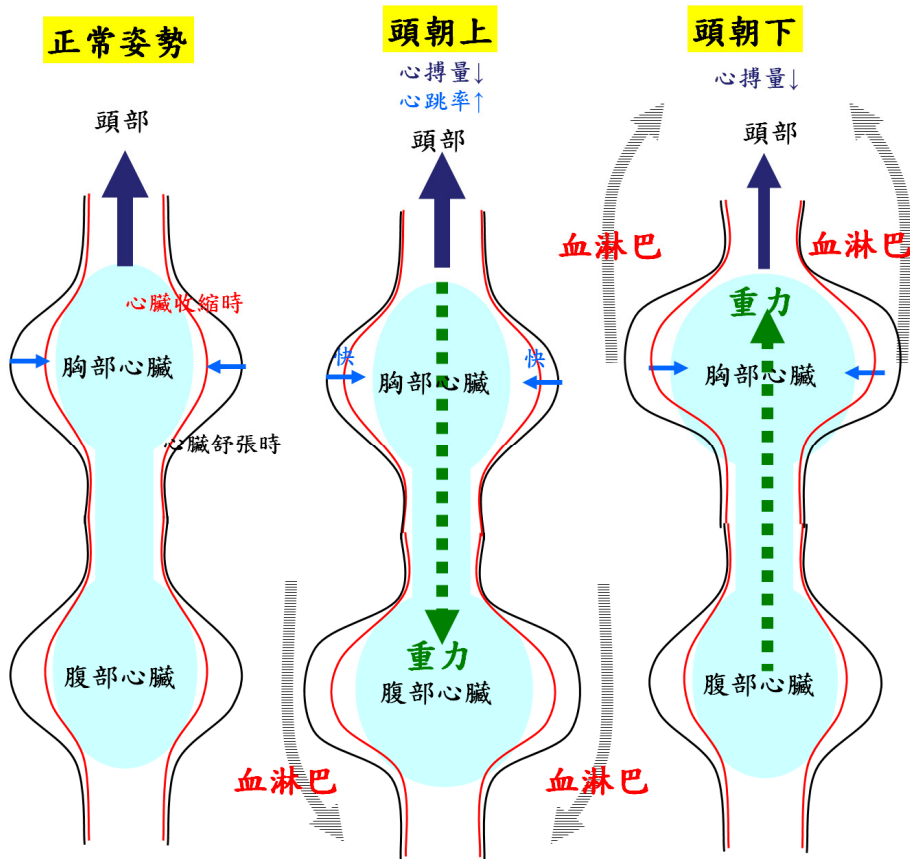
我們亦從參考資料中得知的人體姿勢改變時的參數變化以圖形表現(圖十七)，當人體姿勢由坐姿轉變成立姿時，由於重力的拉力，造成回心血減少，進而使得心搏量被動地下降，此時為了避免頭部缺血，心跳率主動地增加，但是由於心臟在人體循環系統中所佔的體積小，因此所能做出的改變並不大，心輸出量仍略微減少，此時閉鎖式循環動物遍布全身的血管就扮演了重要的角色，血管增加了其收縮程度，使得血壓升高，讓血液流速加快，讓頭部能及時獲得足夠血量。而當人體由坐姿轉為平躺時，由於躺姿有利血液回流，此時回心血增加，心搏量也就被動地增加，此時為避免上半身獲得過多血量，

心跳率會主動地減少，血壓也會減少，減緩血液流速。

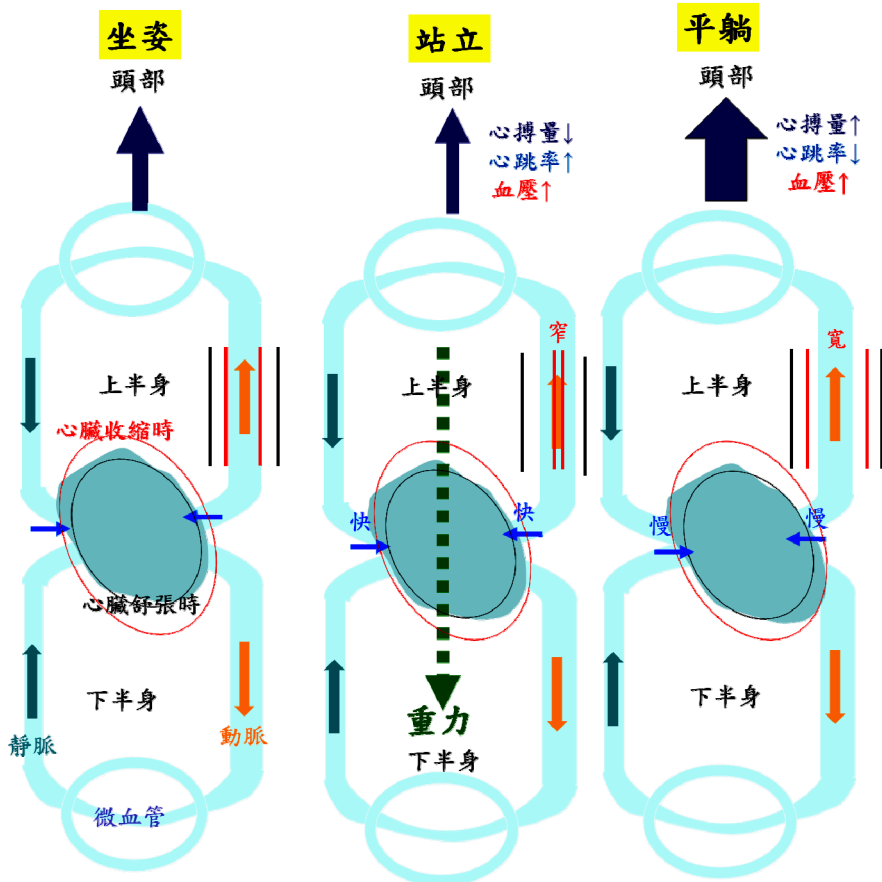
將美洲蟑螂與人體的循環系統的參數變化整理成表四進行比較，舉例來說，同樣是頭朝上站姿時，受重力的影響，兩者的心搏量皆會被动地減少，為避免頭部缺血，人體會增加其心跳率，但是心搏量減少的幅度較大，因此心輸出量仍下降，此時人體主要靠增加血壓來幫助血液循環

維持恆定；而美洲蟑螂雖然心搏量減少，仍可透過心跳率的增加，而維持了心輸出量的恆定。另外，由於美洲蟑螂循環系統只有心臟及少量之環節血管，較無法調控全身性的血壓。

由上述可歸納出，屬閉鎖式循環的人體主要透過調節血管之血壓來因應體位變化，而屬開放式循環的美洲蟑螂則是由心臟本身進行主動調節。



圖十六 重力方向改變時對美洲蟑螂循環系統的調節作用示意圖。



圖十七 重力方向改變時對人體循環系統的調節作用示意圖。

表四 體位改變時人體(閉鎖式循環系統)與蟑螂(開放式循環系統)之比較。

項目	心跳率	收縮時間	心搏量	心輸出量	周邊血管阻力	血壓
人體 (閉鎖式循環) Cybulski <i>et al.</i> , 2009 MacWilliam, 1933	立起後	↑	↑	↓ (回心血)	↓	↑
	平躺後	↓	↓	↑	↑	↓
蟑螂 (開放式循環)	頭朝上立起	↑	—	—	—	?
	頭朝下立起	—	—	↓	↓	?

伍、結論

- (一) 本文提供美洲蟑螂心臟活動的記錄方法，包含心電圖 (Electrocardiogram, ECG)與影像分析(Image analysis)法。此兩種方法可作為往後研究昆蟲循環系統之用。
- (二) 閉鎖式循環系統與開放式循環系統面對體位改變時的調節作用不同，前者主要透過動脈的收縮以調節血壓，進而改變血液流速；後者則在心搏活動上有較主動性的改變進而調節心跳率及心搏量，使心輸出量維持恆定。兩種循環系統不同的調節方式皆可使循環系統維持恆定。

陸、致謝

本文部分實驗由臺北市 101 年度中等學校學生科學研究獎助計畫(高中職組生物

科編號 B09)支持經費，本研究曾獲得第 51 屆全國科展第三名、2013 年臺灣國際科學展覽會動物科四等獎，謹此致謝。

參考文獻

- Cybulski, G., Niewiadomski, W., Strasz, A., Laskowska, D. and Gąsiorowska, A. 2009. Relationships between systolic time intervals and heart rate during initial response to orthostatic manoeuvre in men of different age. *J. Hum. Kinet.* 21: 57-64.
- Hertel, W., Pass, G. and Penzlin, H. 1985. Electrophysiological investigation of the antennal heart of *Periplaneta americana* and its reactions to proctolin. *J. Insect Physiol.* 31(7): 563-572.
- MacWilliam, J. A. 1933. Postural effects on heart-rate and blood-pressure. *Exp. Physiol.* 23 (1): 1-33.
- Smith, J. J., Bush, J. E., Wiedmeier, V. T. and Tristani, F. E. 1970. Application of impedance cardiography to study of postural stress. *J. Appl. Physiol.* 29:133-137.