

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 生物（生命科學）科

第三名

040712

蟑螂心世界－利用心電圖與影像分析法探討
蟑螂心臟因應體位變化進行的調節作用

學校名稱：臺北市立中山女子高級中學

作者： 高一 高家敏 高一 曾鈺婷	指導老師： 蔡任圃
-------------------------	--------------

關鍵詞：美洲蟑螂、心電圖、體位變化

摘要

本研究以心電圖(Electrocardiogram, ECG)與心臟影像分析(Image analysis)法，探討美洲蟑螂體位改變前、後對其心臟生理活動的影響。當頭朝上立起時，血淋巴受重力影響而不易搏出，此時心跳率增加，進而增加心輸出量；減少心臟收縮時間，同時心搏量不變，增加血淋巴單次搏出流度。頭朝下立起時，血淋巴受重力影響而更易流向頭部，此時心搏量減少，進而減少心輸出量；增加心臟收縮時間，同時心搏量下降，減少血淋巴單次搏出流度，以維持血淋巴循環的恆定。我們亦發現相對於心電圖記錄，影像分析法可收集較多數據，亦不傷害蟲體。比較文獻可知姿勢改變後，人體(閉鎖式循環系統)主要透過動脈收縮以調節血壓，蟑螂(開放式循環系統)主要改變心搏活動以維持血淋巴循環的恆定。

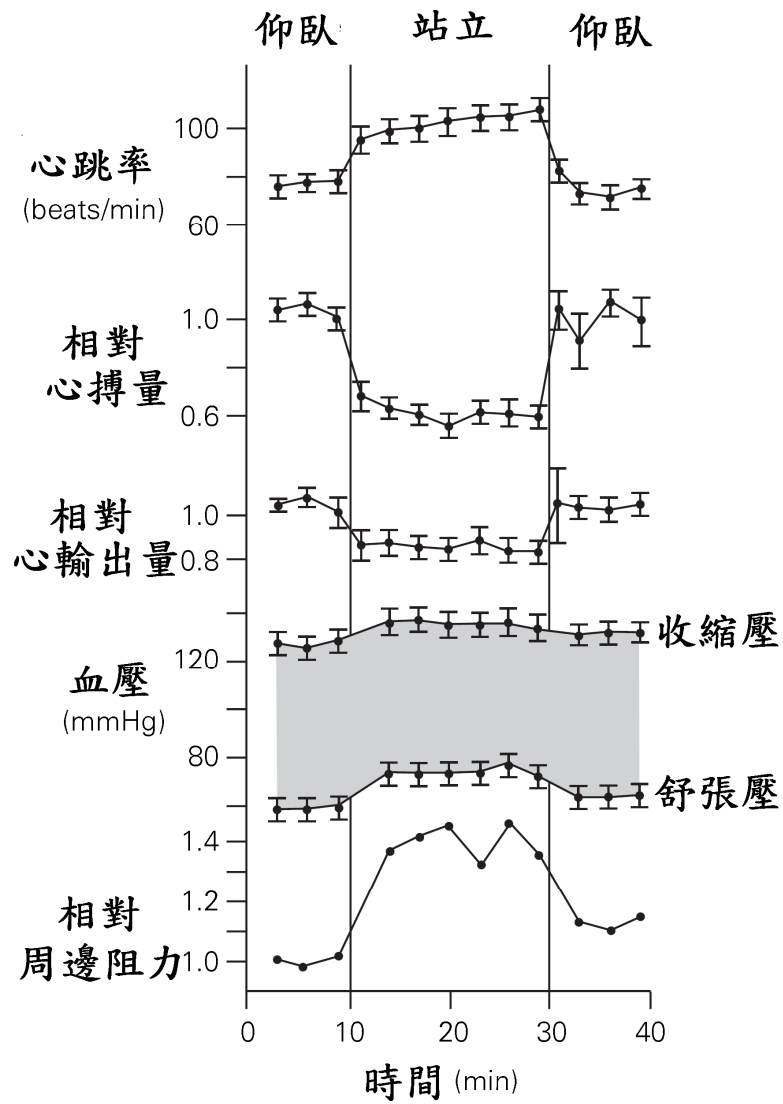
壹、研究動機

我們曾在生物課學習過動物的循環系統(高一基礎生物第5章「動物體的構造與功能」第1節「循環」；高三選修生物第5章「動物的循環」)，了解到人類、魚、蛙和蚯蚓等動物的血液只在心臟和血管內流動，稱為「閉鎖式循環」(closed circulatory system)，而蝦、蜘蛛和昆蟲等動物的血液會由血管流入體腔，稱為「開放式循環」(open circulatory system)。

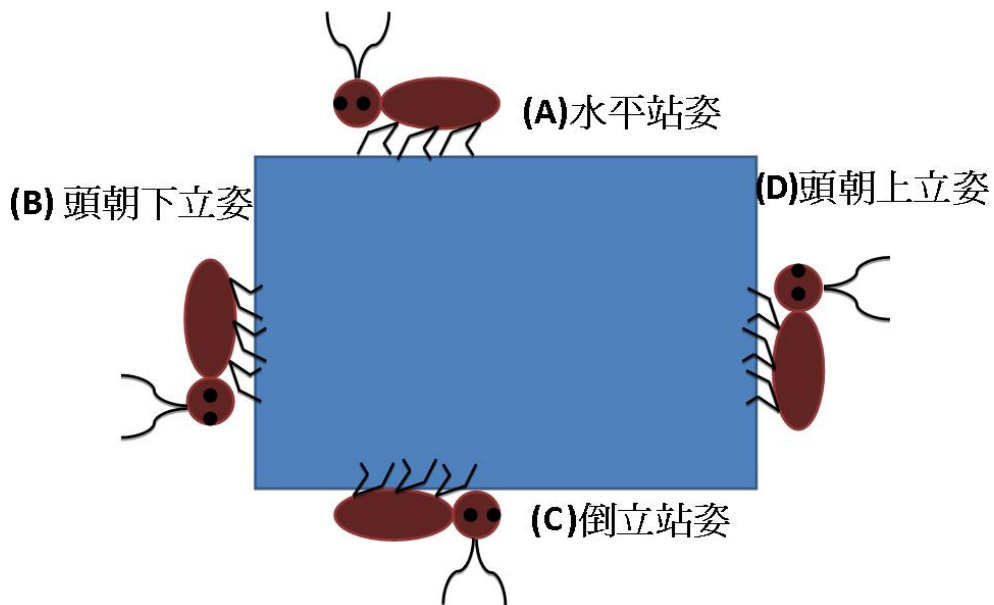
我們都有這樣的經驗：劇烈運動過後，即使不用觸碰胸部，也能清楚感覺到心臟劇烈急促的跳動。人類的循環系統(心臟)會隨著腦幹發出的指令而有所變化，而發出的指令則因環境因子、身體狀況進行調整，因此人類的心臟活動並非一直維持不變，而受各項因子影響。

人體的姿勢改變後，循環系統會立即改變血壓，以維持腦部的血液供應，例如：由躺姿改為站姿時，人體的心跳率增加、血管收縮，造成血壓上升，但心搏量卻下降，造成心輸出量下降(圖一)(Smith, *et al.*, 1970)。人體屬於閉鎖式循環，血壓較開放式循環的動物為高，且運輸效率較佳，在姿勢(體位)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功能。另一方面，開放式循環的動物，其心臟活動是否也會受體位(重力方向)改變的影響，而調節其生理反應？這個問題引起我們的好奇與興趣，查詢文獻後發現沒有科學家針對此題進行探討，故本研究擬以此題進行探討。

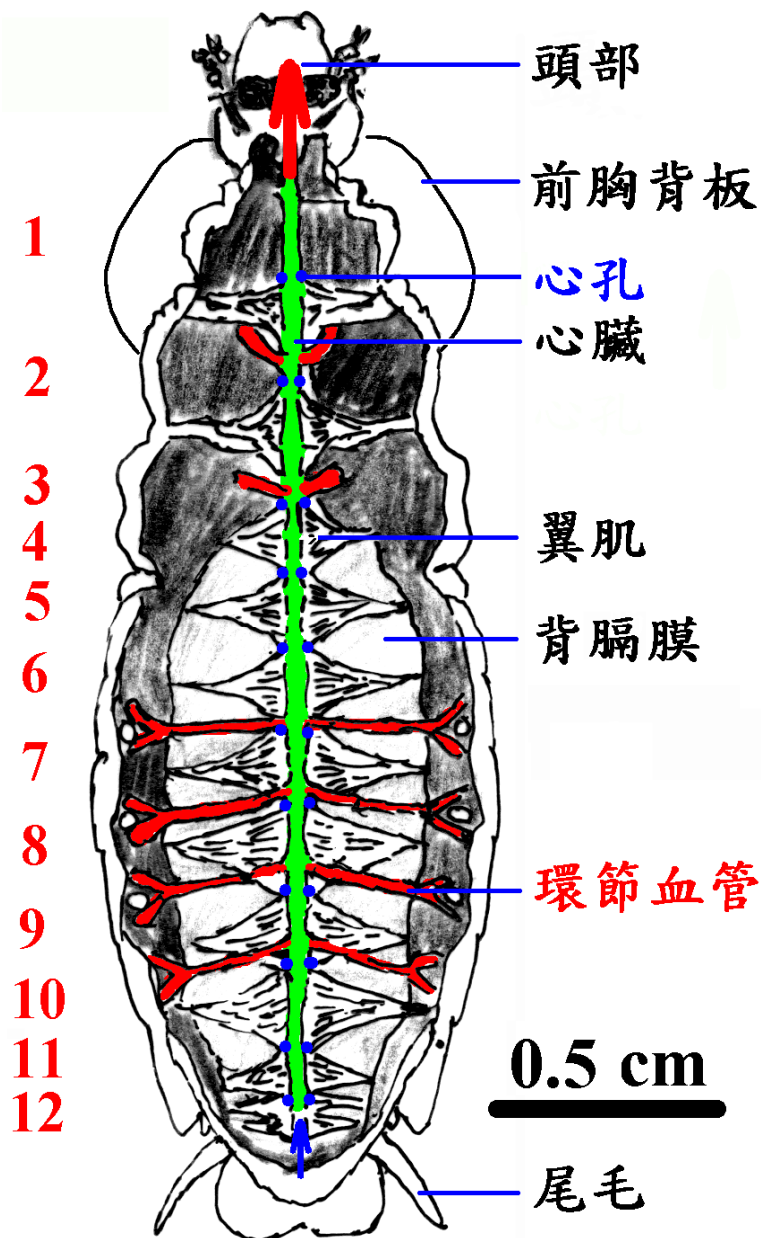
本實驗以美洲蟑螂作為實驗動物，美洲蟑螂取得方便、易安置、活動力強，在自然情況下有多種體位(圖二)，且體型適中，在顯微鏡下操作十分方便，其長管狀的心臟及透明的體壁，皆方便心臟活動的觀察與記錄。蟑螂的循環系統中有一條最大的動脈血管，位於背側中央稱為背血管，其中膨大且具規律性收縮能力的構造稱為心臟；心臟所搏出的血淋巴直接注入體腔，血流速率較閉鎖式循環的動物慢，血壓亦較低。美洲蟑螂的心臟從胸部背側一直延伸到腹部背側，其心臟共十二節，胸部三節，腹部九節(圖三)。心臟搏動時，血淋巴在心臟中向前推進，將血淋巴推向頭部，再由頭部流至胸部、腹部等體腔。蟑螂的心搏活動容易受生理狀態與環境因子的影響(蔡，2003)，適合用來探討各項因子的調節作用。本研究探討屬開放式循環動物的蟑螂之心臟因應體位變化所進行的調節作用。



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



圖二 蟑螂在自然情況下有多種體位。



圖三 蟑螂身體結構與心臟位置示意圖(腹面觀)，左側數字代表心臟的編號，其中第1至3號心臟位於胸部(又可表示成T1~3)，第4至12號心臟位於腹部(又可表示成A1~9)(修改自黃與蔡，2007)。

貳、研究目的

- 一、建立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)方法。
- 二、利用心電圖與影像分析法探討蟲體體位對心臟生理的影響。

參、研究設備與器材

一、研究器材與設備(表一)：

表一 實驗裝置與器材

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

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, 大小適中且背部透明, 放置於顯微鏡下容易觀察及操作, 蟑螂心跳速率約 70~120 次/分鐘, 速率適中而利於測量。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(圖四)。



圖四 蟑螂胸部第三節心臟(T3)的位置。

(a)蟲體胸部與腹部交接處。(b)T3心臟為位於胸腹部交界之三角形區域下。

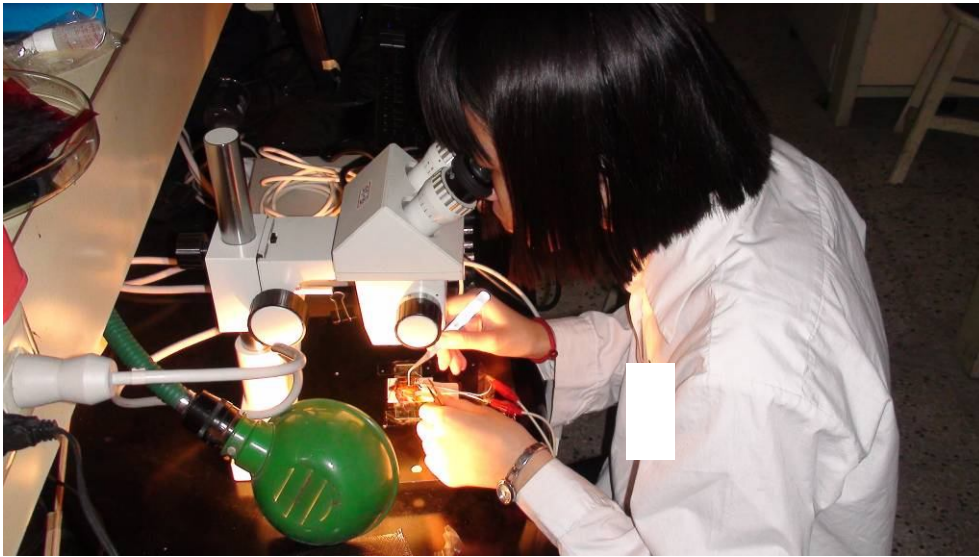
肆、研究方法與實驗步驟

一、建立蟑螂心臟活動的記錄方法

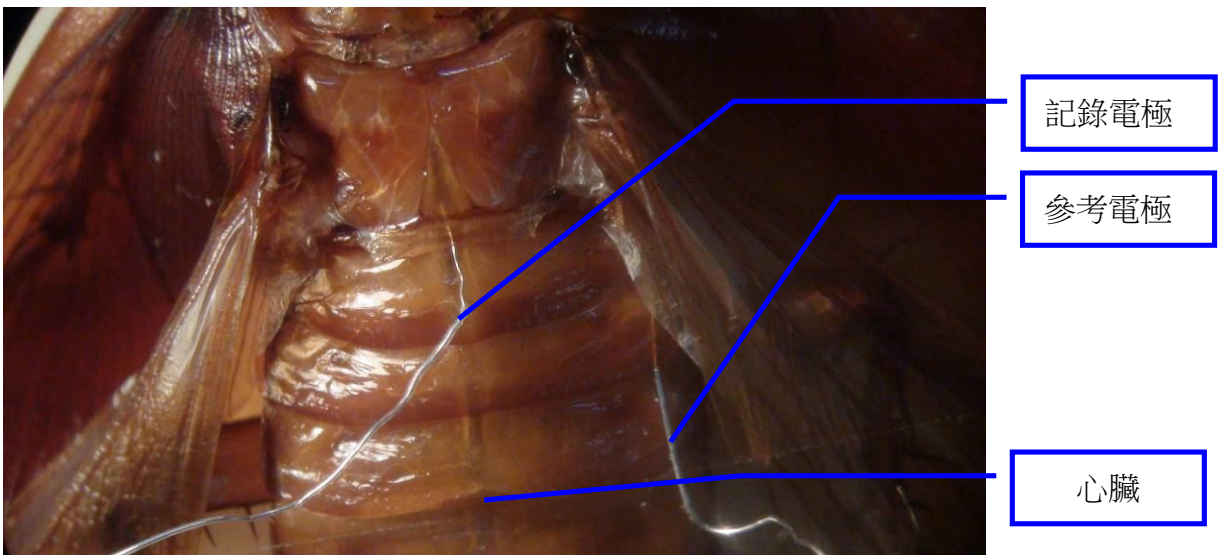
(一)、心電圖的測量

將蟑螂固定於蟑螂屋貼紙後，在解剖顯微鏡下進行操作(圖五a)。參考Hertel等人(1985)的方法，將一電極穿過心臟壁(圖五b)，另一電極插入蟲體腹部(作為參考電極)，然後將蟑螂固定於一金屬板上，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, ADInstrument, USA)，以測量心臟肌肉電位變化(圖六)。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)，以改變蟑螂體位，同時記錄體位改變前、中、後的心肌電位變化。

(a)

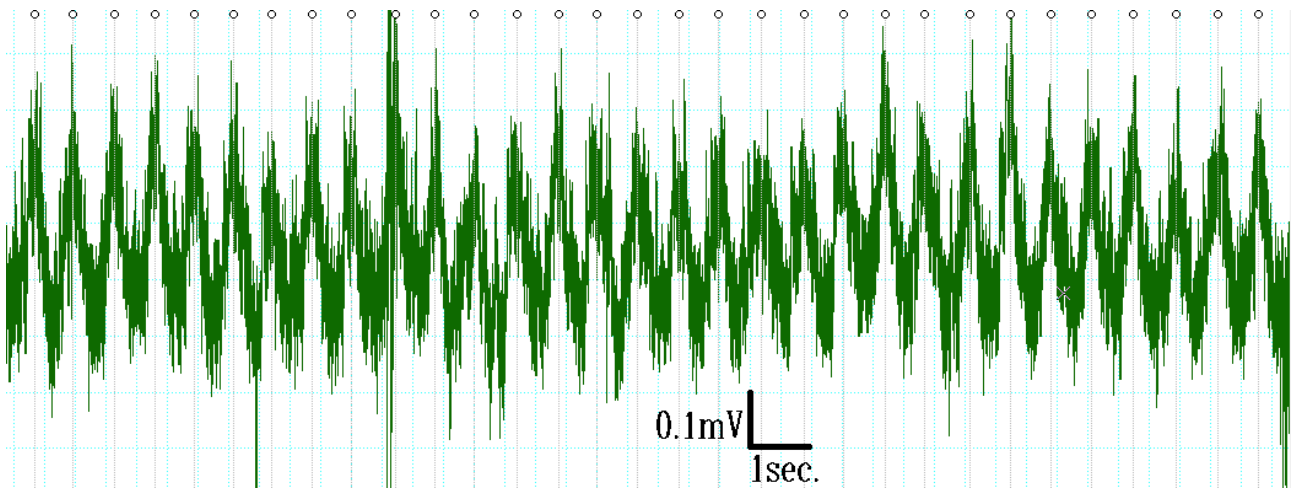


(b)



圖五 蟑螂心電圖的測量方法。

(a)將電極插入心臟內的操作過程照片。(b)電極插入蟲體心臟與腹部位置的照片。



圖六 蟑螂的心電圖圖形。

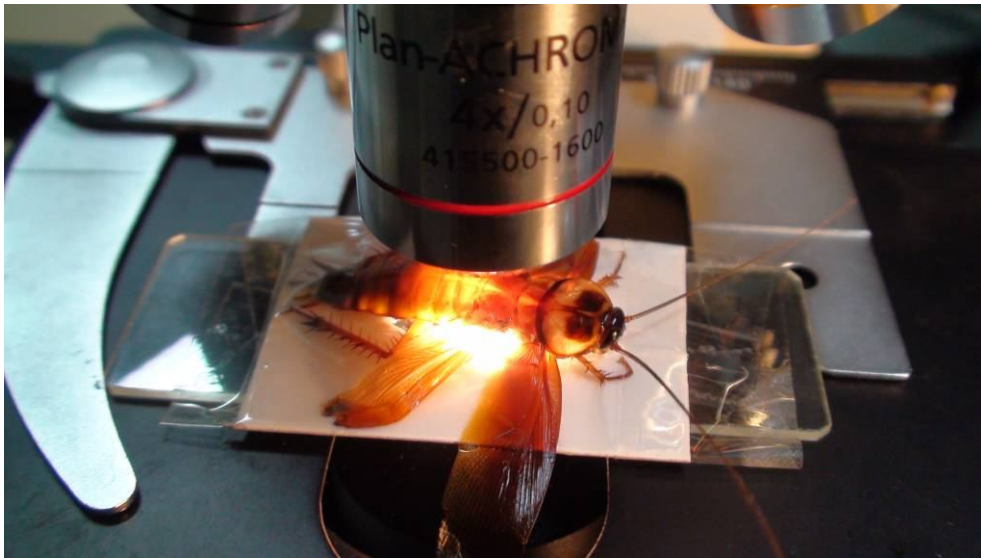
(二)、影像分析系統的建立

把蟑螂屋貼紙剪出一個菱形缺口(圖七a)，以利顯微鏡光源穿透。利用二氧化碳將美洲蜚蠊麻醉後，將蟑螂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(圖七b)，待蟑螂從麻醉中恢復後(約5~10分鐘)，以攝影機記錄蟑螂心臟容積變化。實驗過程中將顯微鏡、攝影機與蟲體一同進行90度的翻轉(圖六c)，以改變蟑螂體位，同時記錄體位改變前、中、後的心臟活動影像。

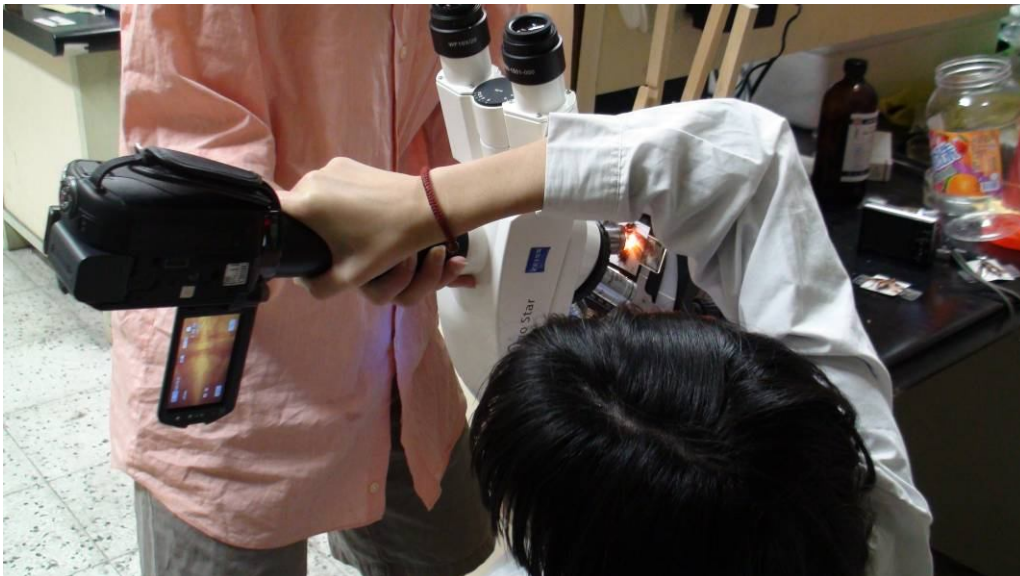
(a)



(b)



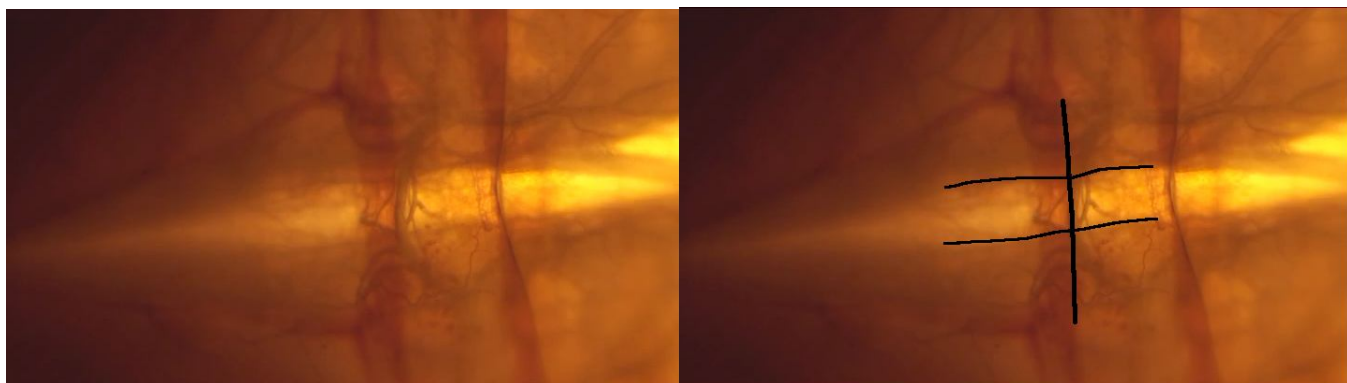
(c)



圖七 進行蟑螂心臟影像記錄的方法。

(a)固定於玻片上的蟑螂。(b)放置於載物臺上的蟑螂。(c)進行90度的翻轉以改變蟲體體位。

所記錄的影片以QuickTime Player逐畫格(frame)播放，並利用個人電腦螢幕的座標系統，分別測量心臟壁與背板骨片邊緣的交點座標(圖八)，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。



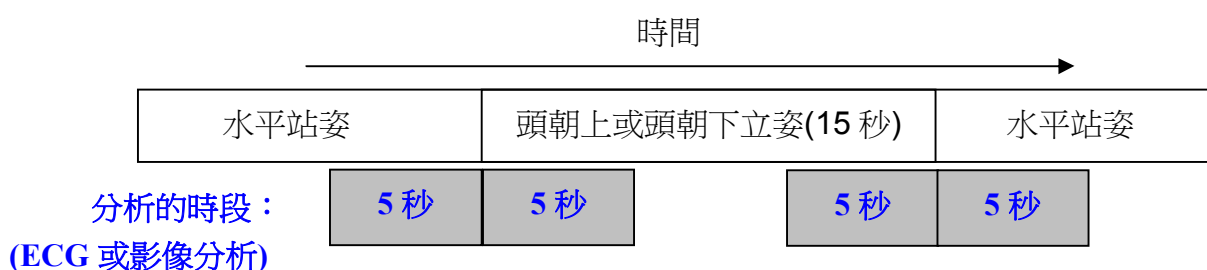
圖八 心臟壁與背板骨片邊緣的交點位置。

(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。

二、探討蟲體體位對心臟生理表現的影響

如前述方法(心電圖或影像分析記錄)將蟑螂固定好後，使蟑螂保持水平站姿(圖二中之A)。本研究所探討的體位因子分為水平站姿轉為頭朝上立姿(圖二中之D)或頭朝下立姿(圖二中之B)，以及體位恢復成水平站姿時對心臟生理活動的影響。

實驗流程為：蟑螂水平站姿15秒→頭朝上/下立起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(圖九)。



圖九 本研究的實驗流程與分析心臟生理活動的時段。

心電圖所測量的心臟生理數據如下：

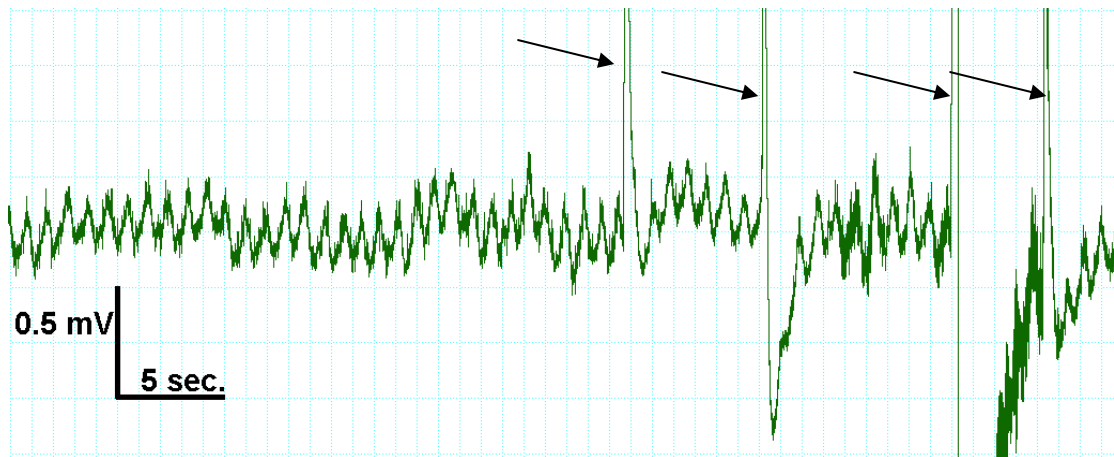
- (一)、心跳率：由ECG中一次心動週期推算單位時間所產生的心動週期數量，單位為次/分鐘。
- (二)、電位振幅：由ECG中一次心動週期電位最高與最低之差值，單位為毫伏特(mV)或微伏特(μV)。

影像分析所測量的心臟生理數據如下：

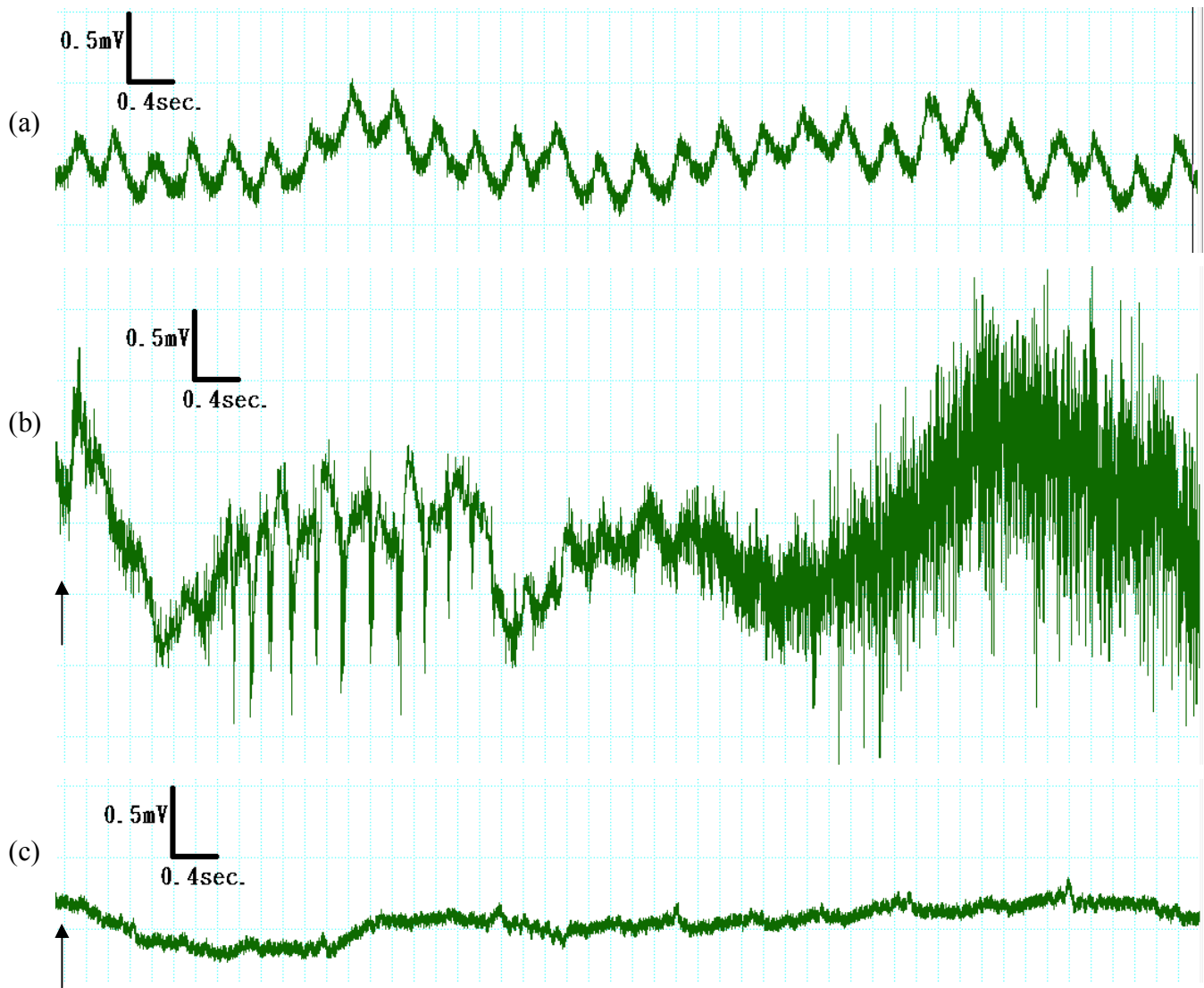
- (一)、心臟收縮時間：心臟由最大舒張時至最大收縮所經歷的時間，單位為秒。
- (二)、心臟舒張時間：心臟由最大收縮時至最大舒張所經歷的時間，單位為秒。
- (三)、心跳率：由每次心動週期(心臟收縮時間 + 心臟舒張時間)推算單位時間所產生的心動週期數量，單位為次/分鐘。
- (四)、心臟收縮內徑：心臟於最大收縮時的心臟內徑，以百分比表示，對照組的心臟收縮內徑平均值訂為100%。
- (五)、心臟舒張內徑：心臟由最大舒張時的心臟內徑，以百分比表示，對照組的心臟收縮內徑平均值訂為100%。
- (六)、心搏量：心臟一次收縮所搏出的血淋巴體積，為(心臟舒張內徑² - 心臟舒張內徑²)的數值推算而來，以百分比表示，對照組訂為100%。
- (七)、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%。

三、心臟活動記錄期間，蟲體不予麻醉

記錄蟑螂心臟活動期間，我們發現蟑螂時有掙扎的情形(圖十)，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。但以二氧化碳麻醉後，蟲體會先經歷一段全身抽蓄後才靜止不動，而麻醉過後的蟑螂，其心搏明顯停止，上述過程亦可於心電圖的記錄中觀察到(圖十一)。因此本研究在固定好蟑螂後，便不再進行麻醉，雖然偶而會有劇烈掙扎的情形，但等蟑螂適應一段時間後，心搏也漸漸穩定。



圖十 蟑螂掙扎時的心電圖(箭頭所指)。



圖十一 二氧化碳麻醉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。

三、蟑螂頸部的加壓實驗

如前述將蟑螂固定好後，利用鑷子用力夾住蟑螂頸部，以探討心臟血流受阻後對心臟生理活動的影響。實驗流程為：正常情形30秒→以鑷子夾壓頸部30秒→恢復正常30秒，同時進行心臟活動的錄影，最後分析所記錄之影片。

伍、研究結果

一、心電圖的記錄結果(表二)

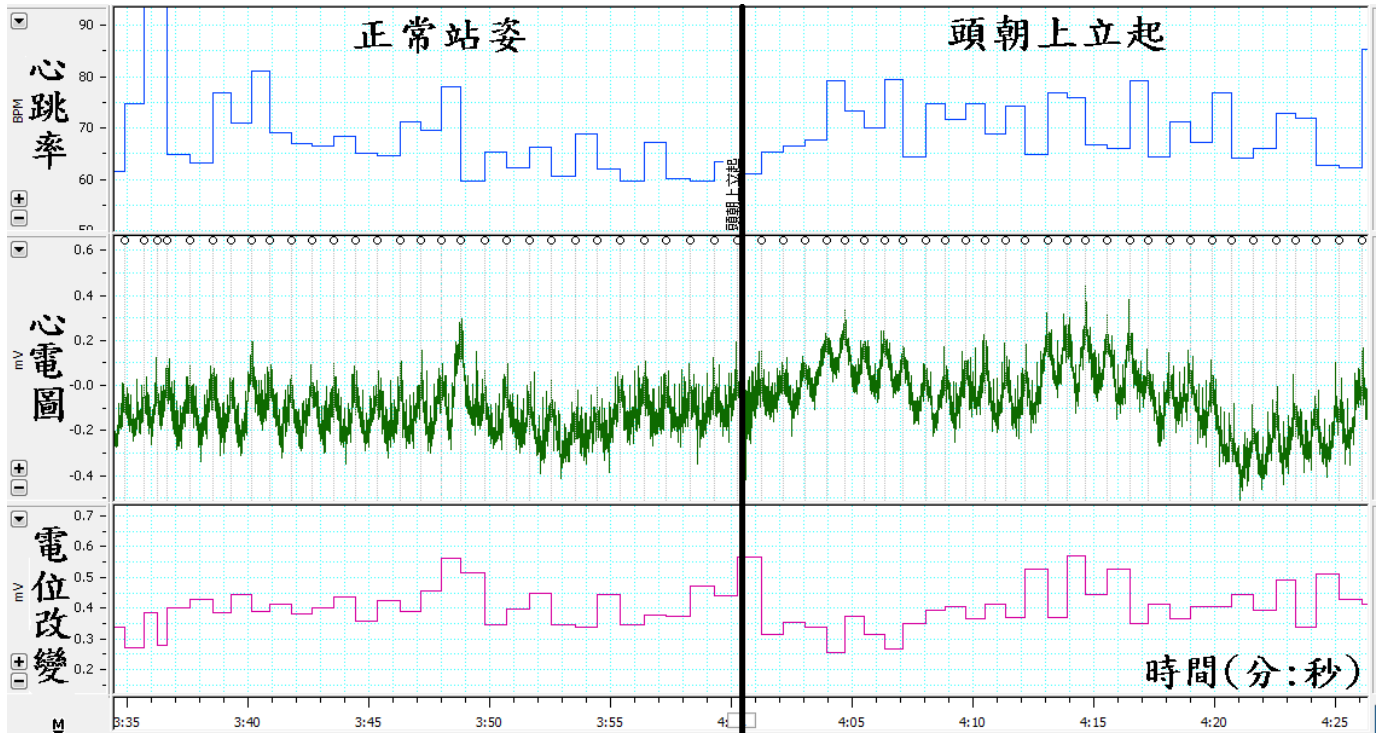
(一)、蟑螂頭朝上立起與恢復體位的情形

蟑螂的體位由正常水平姿勢轉換成頭朝上立起，與恢復成正常水平姿勢時的ECG記錄如圖十二。當蟑螂頭朝上立起時，其心跳率下降(圖十四)，但電位振幅沒有明顯變化。

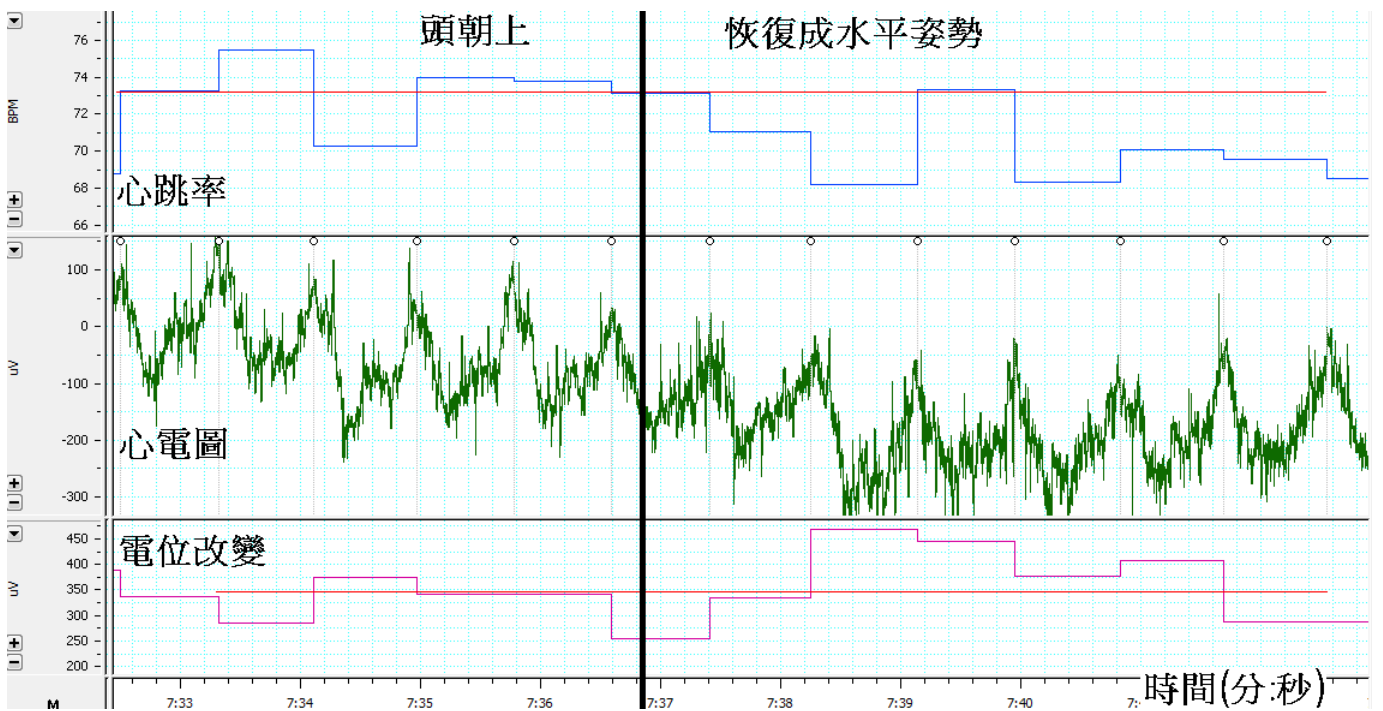
(二)、蟑螂頭朝下立起與恢復體位的情形

蟑螂的體位由正常水平姿勢轉換成頭朝下立起，與恢復成正常水平姿勢時的ECG記錄如圖十三。當蟑螂頭朝下立起時，其心跳率與電位振幅皆沒有明顯變化(圖十四)。

(a)

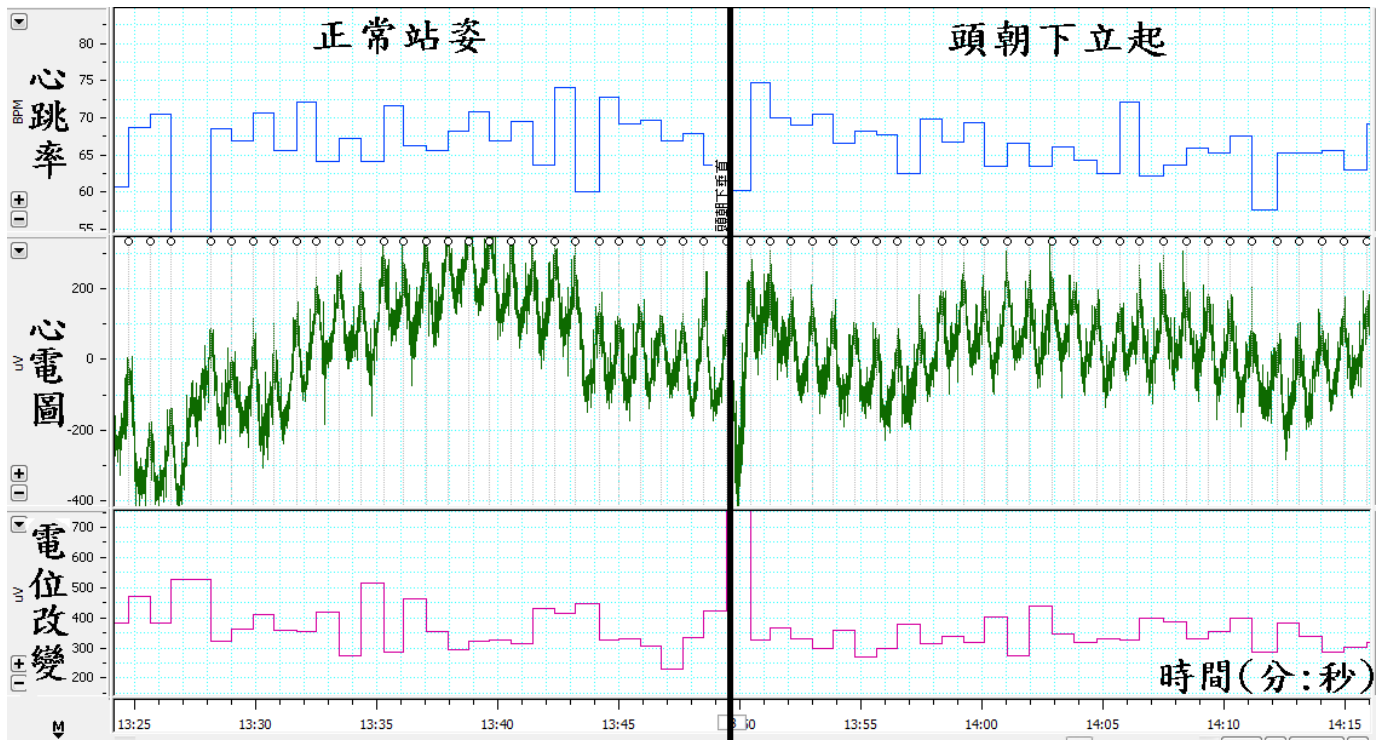


(b)

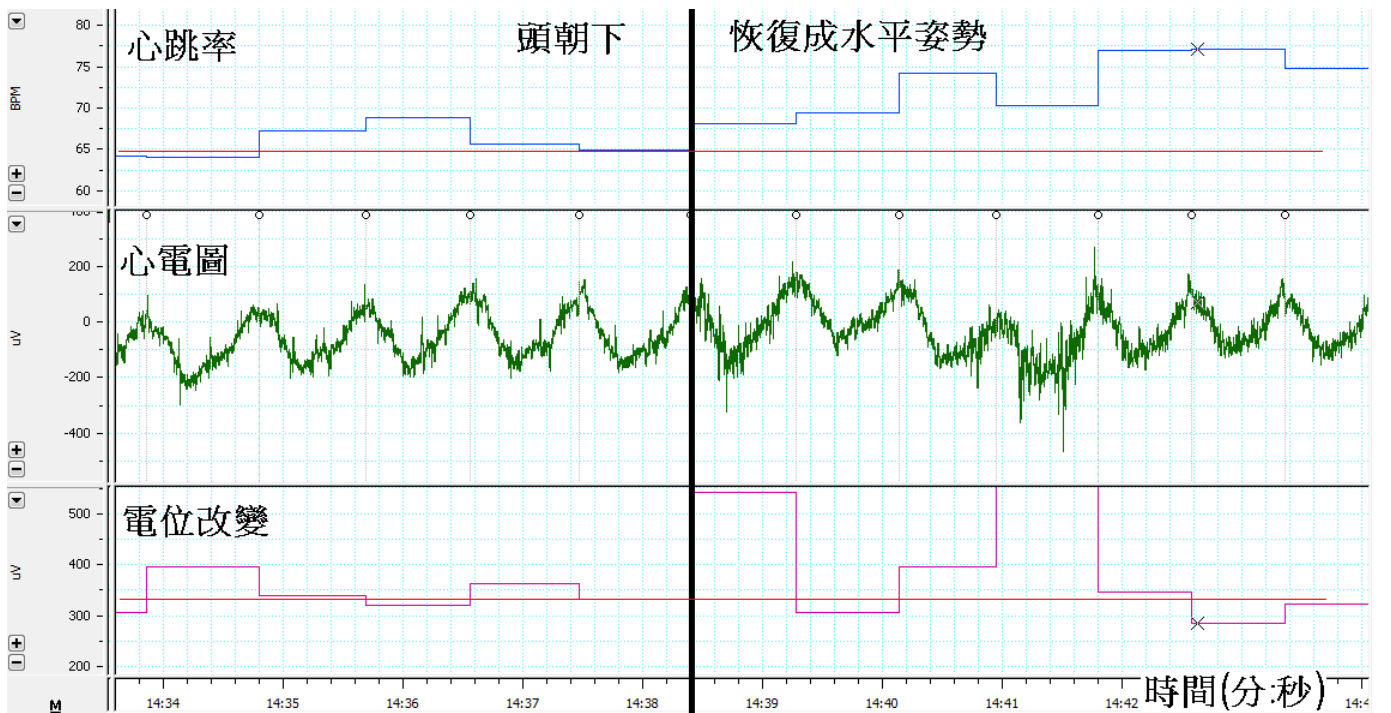


圖十二 螳螂頭朝上立起與恢復姿勢時的ECG記錄。(a)頭朝上立起。(b)恢復姿勢。

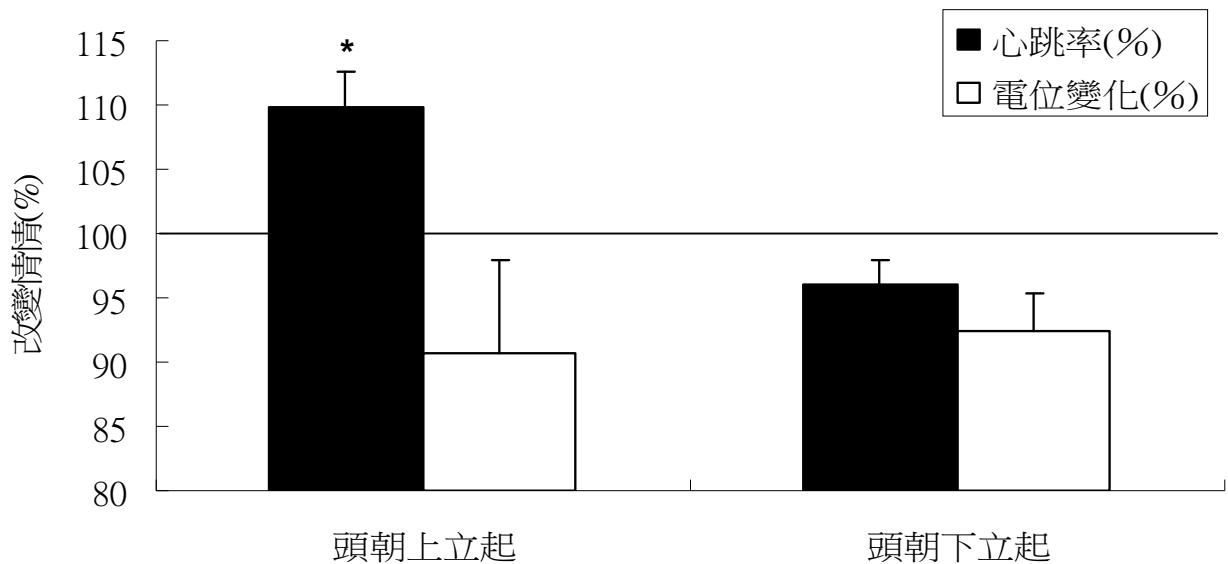
(a)



(b)



圖十三 螳螂頭朝下立起與恢復姿勢時的ECG記錄。(a)頭朝下立起。(b)恢復姿勢。

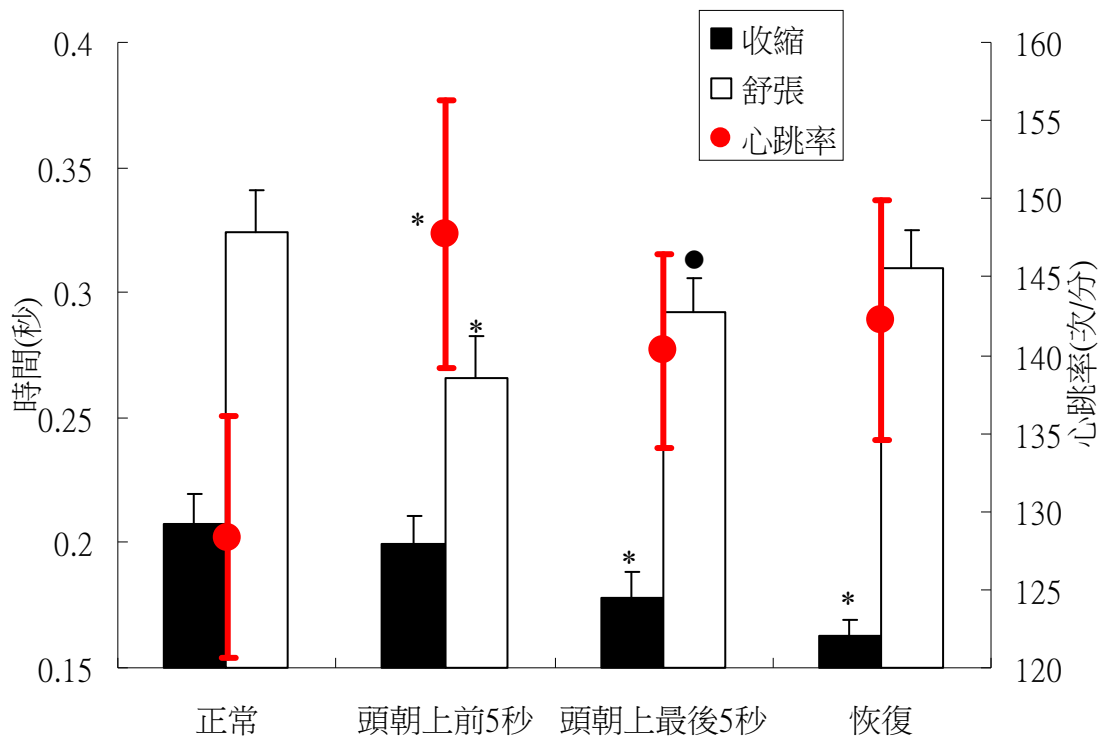


圖十四 蟑螂的體位由正常水平姿勢轉換成頭朝下立起時，其心電圖測量出的心跳率與電位改變的分析結果(平均 ± 標準誤，各10個心動週期)。與正常組相比(單尾t檢定)：*： $p < 0.05$ 。

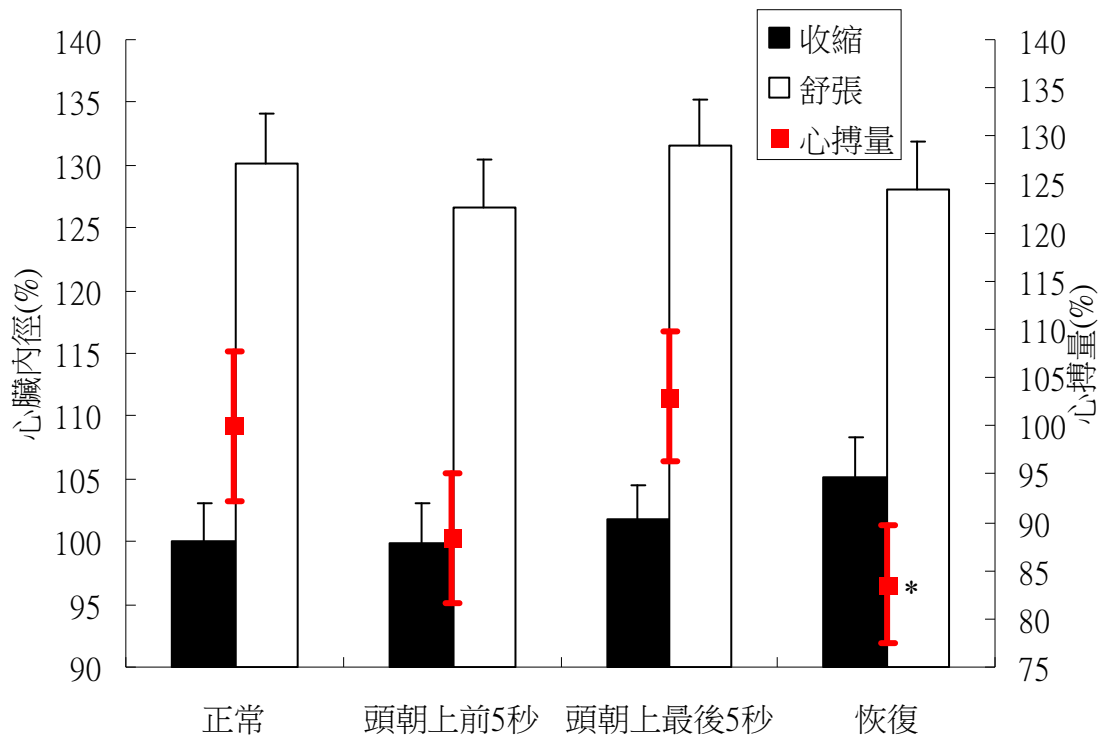
二、影像分析方法的記錄結果(表三)

(一)、蟑螂頭朝上立起與恢復體位的情形

比較頭朝上立起後的前五秒與恢復正常水平姿勢前、後的心臟生理活動，發現頭朝上立起後心臟收縮、舒張時間下降，而後逐漸回升，心跳率上升；而恢復體位後，心臟收縮的時間下降(圖十五)。心臟收縮、舒張內徑與心搏量(圖十六)並無明顯改變，而心輸出量小幅上升(圖十九)。



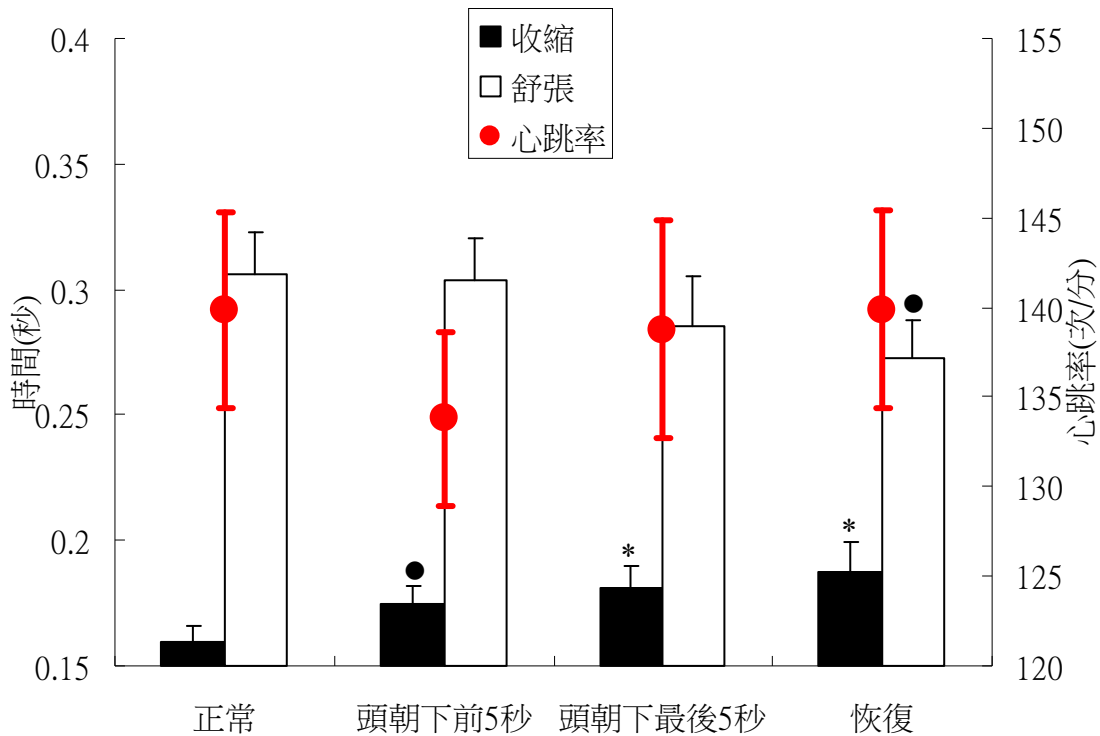
圖十五 蟑螂由水平姿勢轉變成頭朝上立姿前、中、後的心臟收縮、舒張時間與心跳率變化 (平均 ± 標準誤, n = 5)。
與正常組相比(單尾 t 檢定)：● : $p < 0.075$; * : $p < 0.05$ 。



圖十六 蟑螂由水平姿勢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 = 5)。
與正常組相比(單尾 t 檢定)：* : $p < 0.05$ 。

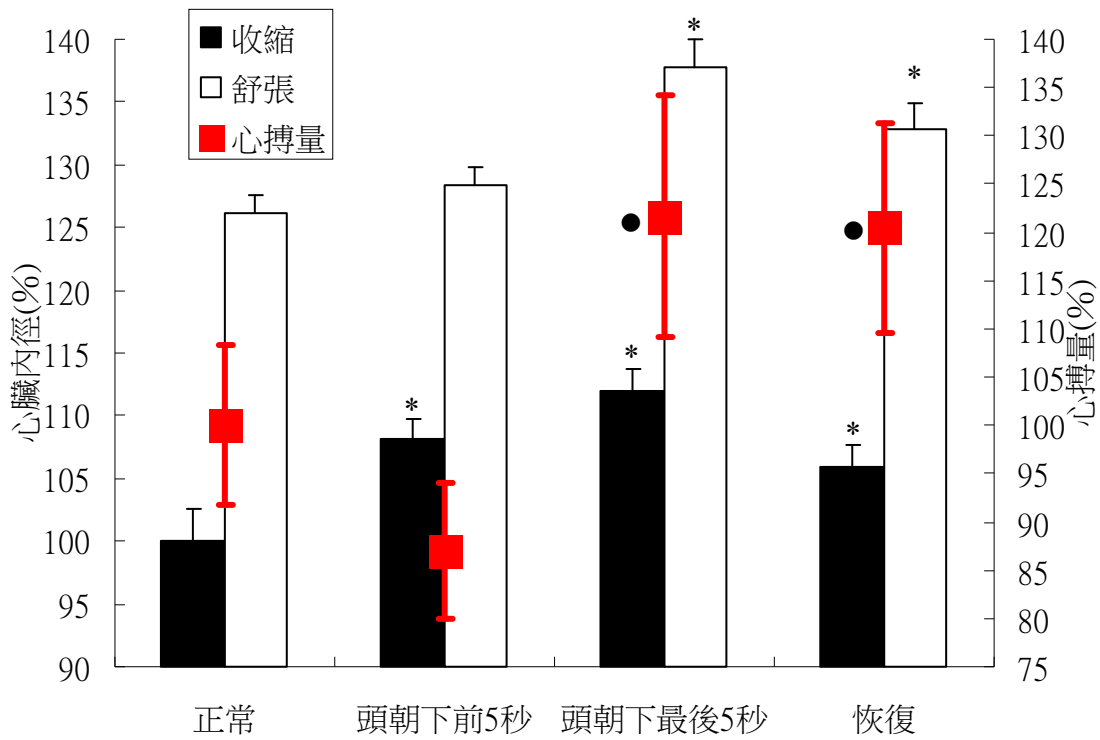
(二)、蟑螂頭朝下立起與恢復體位的情形

比較頭朝下立起後的前五秒與恢復正常水平姿勢前、後的心臟生理活動，發現頭朝下立起後心臟收縮的時間增加(圖十七)，而心臟收縮、舒張內徑皆增加，心搏量增加(圖十八)。而心輸出量下降(圖十九)。

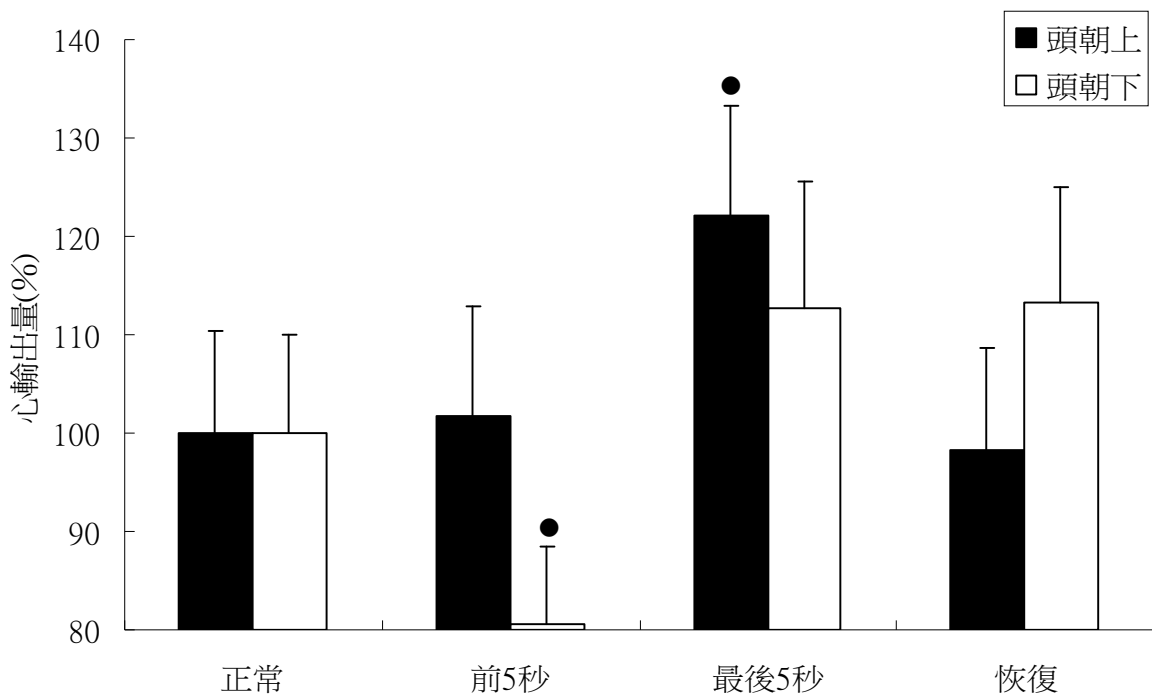


圖十七 蟑螂由水平姿勢轉變成頭朝下立姿前、中、後的心臟收縮、舒張時間與心跳率變化。(平均 ± 標準誤，n = 5)。

與正常組相比(單尾 t 檢定)：●：p < 0.075；*：p < 0.05。



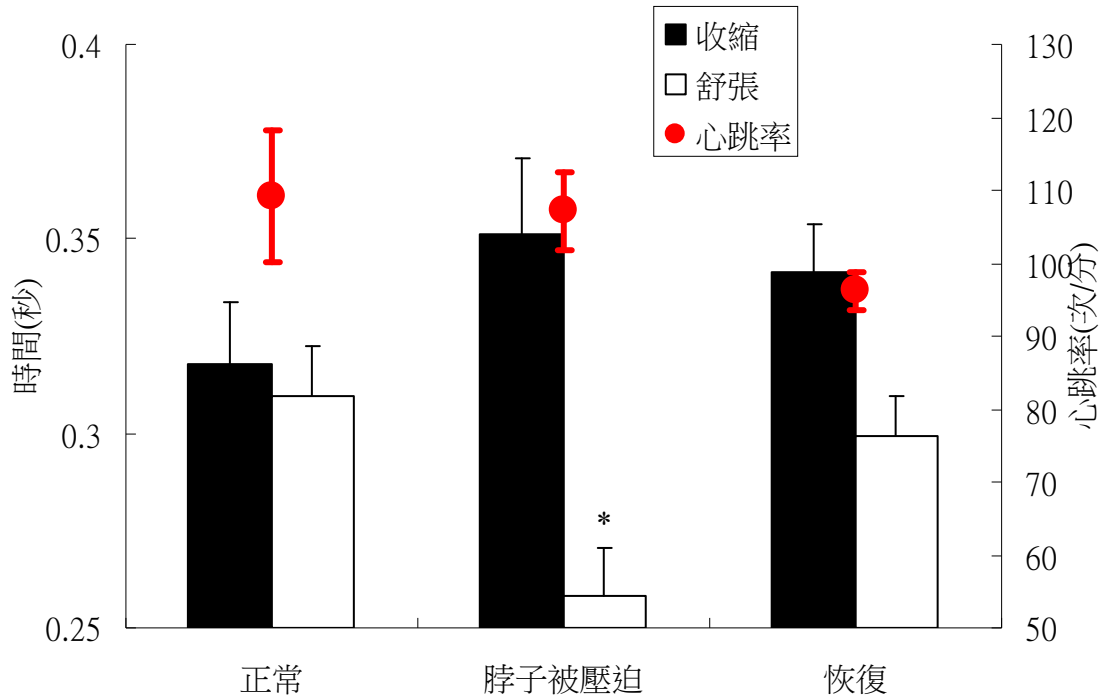
圖十八 蟑螂由水平姿勢轉變成頭朝下立姿前、中、後的心臟收縮、舒張內徑與心搏量變化 (平均 ± 標準誤, n = 5)。
與正常組相比(單尾 t 檢定)：●：p < 0.075；*：p < 0.05。



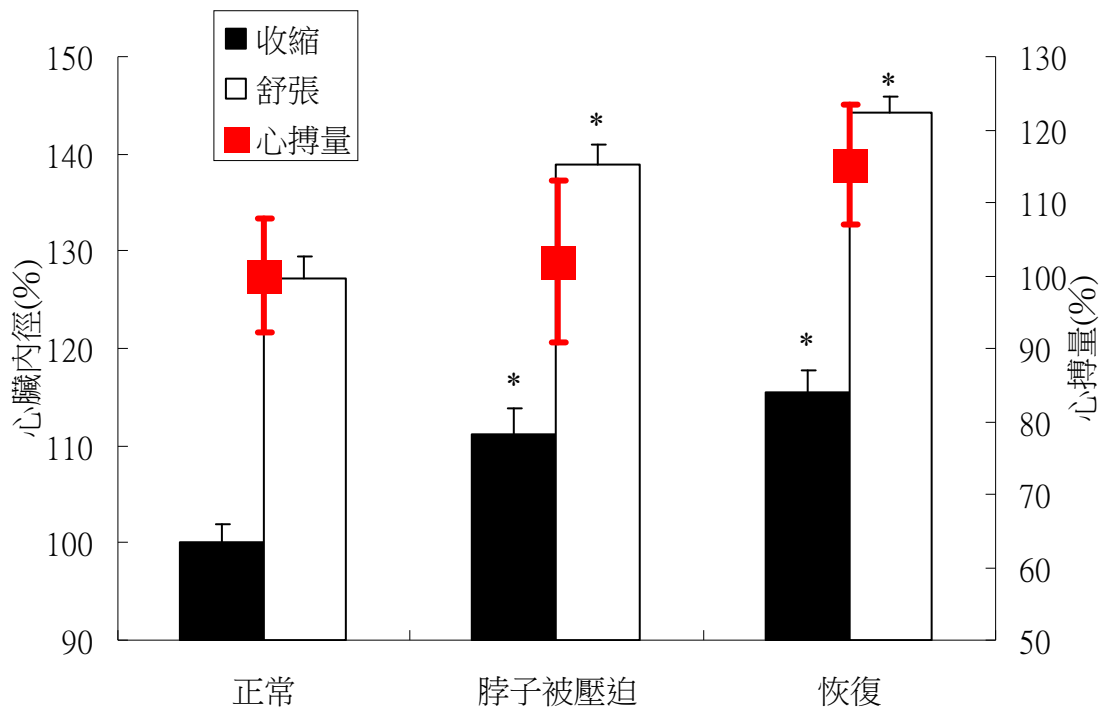
圖十九 蟑螂由水平姿勢轉變成頭朝上與頭朝下立姿前、中、後的心輸出量的變化。(平均 ± 標準誤, n = 5)。
與正常組相比(單尾 t 檢定)：●：p < 0.075。

(三)、蟲體頸部加壓對蟑螂心臟活動的影響

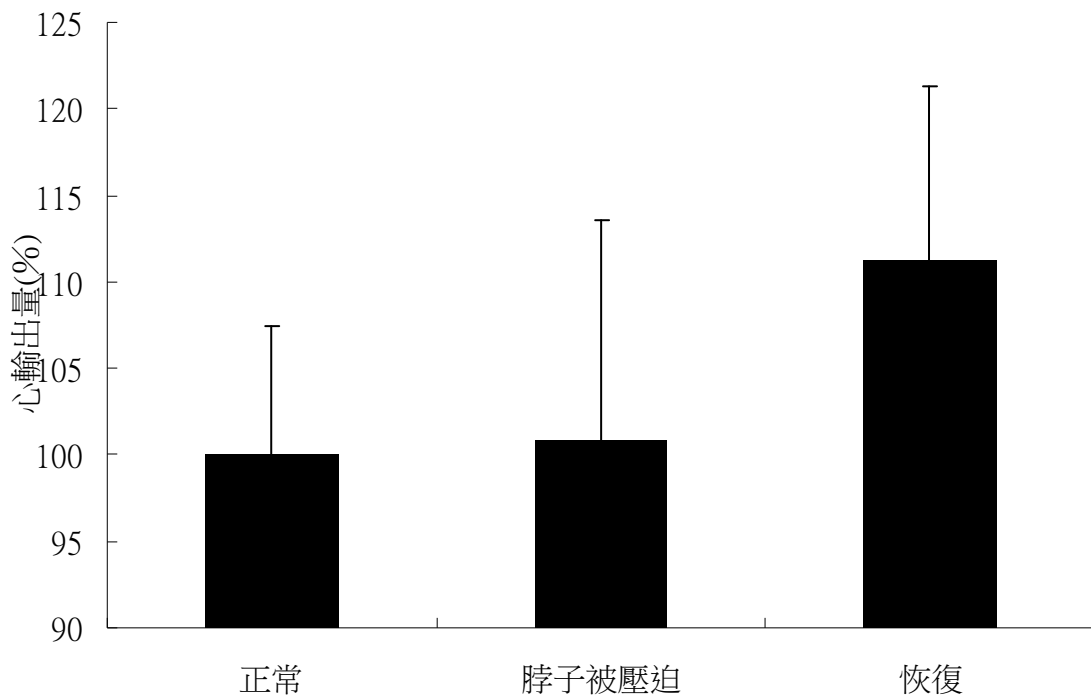
蟑螂頸部被壓迫時，心臟舒張時間減少(圖二十)，心跳率無明顯變化。心臟收縮與舒張時的內徑皆增加(圖二十一)，心搏量、心輸出量無明顯變化(圖二十一、圖二十二)。



圖二十 壓迫蟑螂頸部對心臟收縮、舒張時間與心跳率的影響(平均 ± 標準誤)。與正常組相比(單尾t檢定)：*： $p < 0.05$ 。



圖二十一 壓迫蟑螂頸部對心臟收縮、舒張內徑與心搏量的影響(數據轉換成百分比，平均 ± 標準誤)。與正常組相比(單尾t檢定)：*： $p < 0.05$ 。



圖二十一 壓迫蟑螂頸部對心輸出量的影響(數據轉換成百分比，平均 ± 標準誤)。與正常組相比(單尾t檢定)：皆未達顯著差異水準。

表二 利用心電圖記錄分析體位改變對蟑螂心臟生理活動的影響。

	心跳率	ECG電位振幅
頭朝上 立起	↑	—
頭朝下 立起	—	—

表三 利用影像分析法分析體位改變對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 立起	↓	↓	—	—	↑	—	↑
頭朝下 立起	↑	—	↑	—	—	↓ ($p = 0.116$)	↓
脖子加壓	—	↓	↑	↑	—	—	—

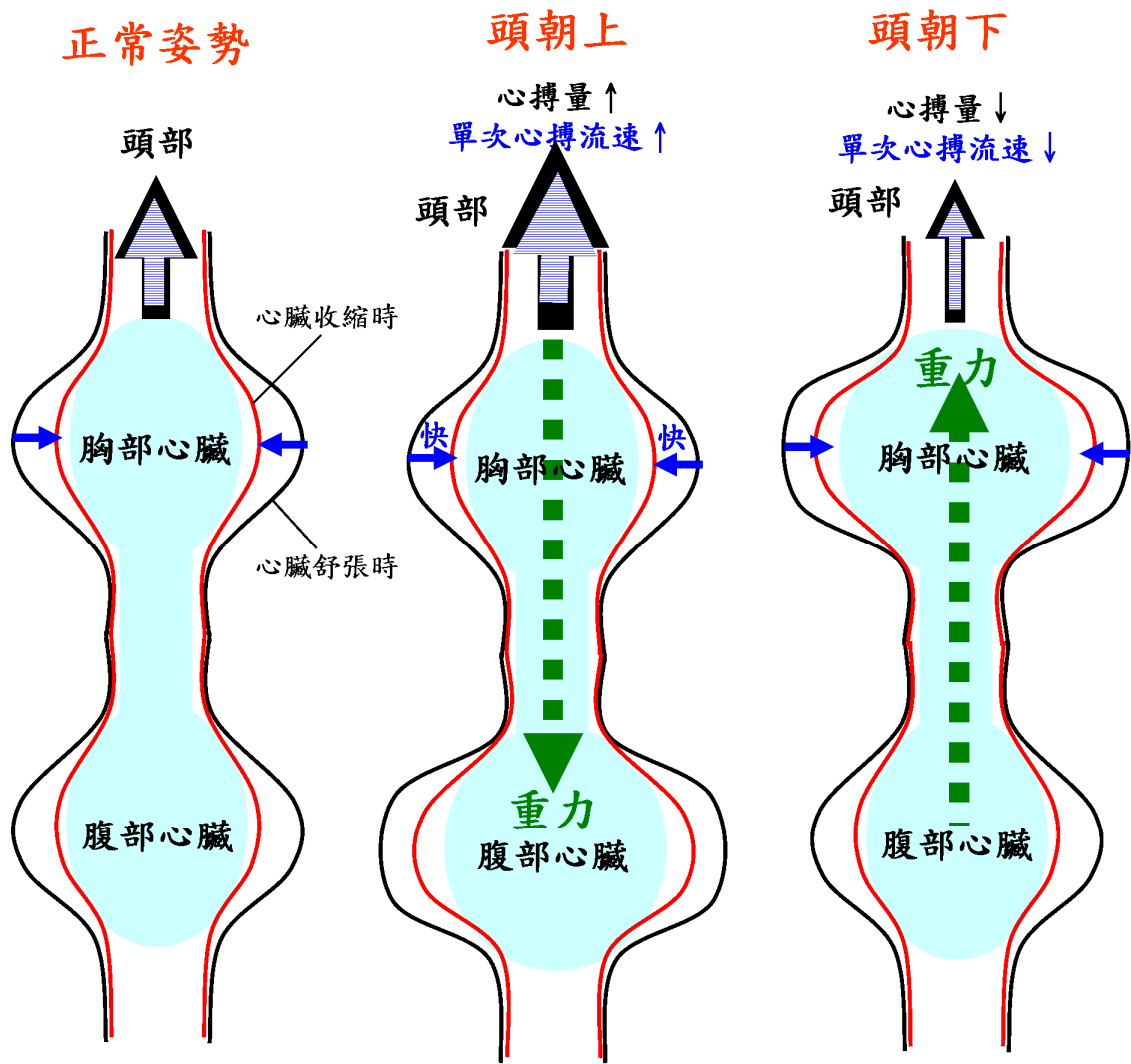
陸、討論

本研究證實體位(重力方向)的改變會影響蟑螂的心臟生理活動，為第一個探討體位因子影響昆蟲心臟生理表現的研究。人體由仰臥姿勢轉為站立時，由於重力的拉力，造成回心血減少，進而使得心搏量下降。為了維持血壓不致過度降低，透過周邊動脈的收縮，以維持血壓(Smith, *et al.*, 1970)。人體的循環系統屬於閉鎖式循環，血壓的恆定十分重要，對開放式循環的動物而言，血壓較低，牠們是否需要維持血壓的恆定呢？

由ECG的記錄得知，蟑螂在頭朝上立起時，其心跳率略為上升，而放電振幅無明顯變化。我們認為頭朝上立起時，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，為了使頭部能及時獲得足夠的血淋巴，因此心跳率增加。

將影像分析所得到的參數變化統整成圖二十三，從圖中可比較重力方向改變後，對蟑螂心臟活動的影響：頭朝上立起時，蟑螂增加心跳率，進而增加心輸出量；減少心臟收縮時間，同時心搏量不變，增加了血淋巴單次搏出流度，讓頭部獲得足夠的血淋巴。頭朝下立起時，蟑螂減少心搏量，進而減少心輸出量；增加心臟收縮時間，同時心搏量下降，減少了血淋巴單次搏出流度，我們認為此時血淋巴受重力影響，能順利流至頭部，頭部可能獲得過多的血淋巴，因此心搏量、心輸出量下降，以維持恆定。

姿勢改變會使血淋巴受重力影響，此時蟑螂的循環系統會做出主動性的調節。我們將人類與蟑螂的循環系統進行比較(表四)，當人類姿勢轉變成立姿時，血液受重力影響會集中在下肢，使回心血減少，心搏量也就減少了，導致心輸出量亦下降，同時心搏流速也會下降。而蟑螂頭朝上立起時，心搏流速增加，使心輸出量也增加，這是為了使頭部獲得足夠血淋巴。同樣的姿勢改變，人類與蟑螂循環系統的反應卻不一樣，我們認為這是因為閉鎖式循環系統動物(如人類)的血管系統中動脈所占的比例較大，在姿勢改變時主要透過動脈的收縮進而調節血壓，在心搏部分則較為被動，而屬開放式循環系統的蟑螂，除了背血管之外的動脈只有環節血管(黃與蔡，2007)，較無法透過動脈的收縮調節血壓，因此必須更主動地調節心搏活動。由此可知，開放式循環系統雖然較為簡單，但在面對環境變化時仍會做出適當的調節作用，以維持血淋巴循環的恆定。



圖二十二 當重力方向改變時(虛線粗箭頭)，胸部(T3)心臟收縮速度(水平方向的小箭頭)、心搏量(向上的大箭頭)、單次心搏流速(向上含細橫線的箭頭)的改變模式圖。

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	單次心搏流速	心輸出量	周邊血管阻力	血壓
人體 (閉鎖式循環)	立起後	↑	↑	↓ (回心血↓)	↓	↓	↑	↑
	平躺後	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓
Cybulski <i>et al.</i> , 2009 MacWilliam, 1933								
蟑螂 (開放式循環)	頭朝上 立起	↑	↓	—	↑	↑	?	?
	頭朝下 立起	—	↑	↓ ($p = 0.116$)	↓	↓	?	?

柒、結論

- 一、本研究已建立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。相對於心電圖記錄，影像分析法能收集較多數據，亦不傷害蟲體。
- 二、二氧化碳麻醉蟑螂後，可使蟑螂心臟搏動幾乎停止，同時 ECG 中的週期性放電現象亦消失。
- 三、我們發現蟑螂體位的改變對心臟生理活動的影響為主動性，透過改變心跳率、心搏流速、心搏量與心輸出量等，以維持血淋巴循環的恆定。
- 四、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一樣，前者主要透過動脈的收縮以調節血壓，後者則在心搏活動上有較主動性的改變。

捌、參考資料

- 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.
- 何孟霓、李忻，2011，蜚腸知味—探討不同味覺刺激對美洲蟑螂口器與前腸活性的影響。第51屆全國科展(生物科第一名作品)。
- 黃常宇、蔡任圃，2007。認識身旁的小傢伙(四)—開放式循環與心臟血球觀察方法。科學教育月刊，304，38-48。
- 蔡任圃，2003。蟑螂心臟活動的觀察方法。科學教育月刊，257，31-37。

【評語】 040712

研究蟑螂的心電圖，並討論開放式循環與閉鎖式循環的差別。

這是很難的技術，學生卻可以做出穩定的結果。相當難得可貴。未

來若可以讓蟑螂餵食不同物質，或進一步討論，前途應很好。