

國立臺灣體育學院體育研究所

碩士學位論文

以等位函式法改善動作捕捉系統之效能

USE LEVEL SET METHOD TO
IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE
MOTION CAPTURE SYSTEM



研究生：郭智翔 撰

指導教授：謝有義 教授

中華民國九十四年六月

摘要

桌球教練工作者時常遇到的問題，則是選手動作調節適應的問題，有時選手因為動作上極小的角度差異造成練習狀況不佳，而往往這些極小差異用肉眼並無法判斷出來，也因此造成訓練上之盲點。

一般動作捕捉系統其成效往往取決於系統中所用之影像分割方法之好壞。本研究目的，嘗試以數學中的等位函式法，應用在動作捕捉系統中的影像分割技術上，並且和一般動作捕捉系統中常用的影像分割方法進行比較。本研究之資料收集，採用台南桌球館錄製之蔣澎龍選手練習之影片，經輸入影像後，應用一般影像分割方法(canny法)與等位函式法進行手臂擊球之瞬間角度的影像分析並加以比較。並以(分割結果之角度/實際角度)作為單位，結果發現等位函式法所分割之結果在10行中有5行誤差較肯尼法小。如加上比值為1的3行，則等位函式法所分割之結果在10行中有8行誤差較肯尼法相對為小。此研究結果證實運用此法所處理之運動影像分割之結果較一般常見的影像分割方法來的精確。本研究之成果可作為未來在改良動作捕捉系統中有關於三維影像重建，影像追蹤及影像比對之基礎研究。

關鍵字：等位函式法、動作捕捉系統、影像分割

Abstract

The problem which table tennis coach worker often meets, is it player's movements that regulate the problem met. Sometimes, a small angle difference on movements causes that player exercise state is not very good. The small difference that cause blind spot of training usually can not be found by eyes. Generally the Motion Capture System its result usually depends on the system in the good and bad of the images segmentation used. In this paper, try with the Level Set Method that apply in the images segmentation in mathematics in the Motion Capture System. And compare with images segmentation that the traditional Motion Capture System is convenient. Our research use the Chiang Peng-Lung's exercise image which is recorded by table tennis hall of Tainan. After inputting images, we use traditional images segmentation method (canny method) and Level Set Method to analyze the images that arm hits producing moment angle. After analyzing, we compare this result of images segmentation. We use (angle of segmentation result / real angle) as the unit. The result of the Level Set Method segmentation at 10 items has 5 items that error are smaller than the result of the canny method. If we add 3 items that ratio is 1, then the result of the Level Set Method segmentation at 10 items has 8 items that error are smaller than the result of the canny method. The segmentation results certificate makes use of the more traditional precision

of the result of the images segmentation that this method handles. The achievement of this research can rebuild the three-dimensional image in improving the Motion Capture System as the future, the image is followed the trail of and the image, than to its basic research.

Keywords: level set method, Motion Capture System, image segmentation

目 錄

中文摘要	.....	I
英文摘要	.....	II
目 錄	.....	III
表目錄	.....	V
圖目錄	.....	V
第一章 緒論	.....	1
第一節 研究背景	.....	1
第二節 研究目的	.....	3
第三節 研究限制	.....	4
第四節 名詞釋義	.....	4
第二章 文獻探討	.....	6
第一節 動作捕捉系統之發展	.....	6
第二節 系統中常用到之影像處理方法	.....	9
第三節 影像分割	.....	15
第四節 等位函式法理論及其圈選過程	.....	18
第三章 研究步驟與方法	.....	27
第一節 研究對象及範圍	.....	27
第二節 研究器材及設備	.....	28
第三節 研究步驟	.....	29
第四章 結果與討論	.....	33
第一節 以 canny 法分割	.....	36
第二節 以等位函式法分割	.....	47
第三節 比較分析	.....	60

第五章	結論及建議	64
第一節	結論	64
第二節	建議	64
參考文獻		65

表 目 錄

表 5-1 以各種分割法所分割之右手手肘角度比較 60

圖 目 錄

圖 2-1	原始影像	10
圖 2-2	低通濾波影像	11
圖 2-3	中通濾波影像	12
圖 2-4	高通濾波影像	13
圖 2-5	原始影像	14
圖 2-6	以肯尼法分割所得之影像	15
圖 2-7	起始條件示意圖	20
圖 2-8	level set 示意圖	21
圖 2-9	phi 移動圖	22
圖 2-10	phi 移動圖	22
圖 2-11	原始影像	24
圖 2-12	分割過程 phi 之變化圖	25
圖 2-13	分割過程 phi 之變化圖	25
圖 2-14	分割過程 phi 之變化圖	25
圖 2-15	分割過程 phi 之變化圖	25
圖 2-16	分割過程 phi=0 之變化圖	26
圖 2-17	分割過程 phi=0 之變化圖	26
圖 2-18	分割過程 phi=0 之變化圖	26
圖 4-1	研究步驟流程圖	30
圖 4-2	使用者介面圖	31
圖 5-1	蔣澎龍選手反手攻球連續圖	34
圖 5-2	蔣澎龍選手正手拉球連續圖	35
圖 5-3	以 canny 法分割反手攻球影像之結果圖	36
圖 5-4	以 canny 法分割反手攻球影像之結果圖	37
圖 5-5	以 canny 法分割反手攻球影像之結果圖	38
圖 5-6	以 canny 法分割反手攻球影像之結果圖	39
圖 5-7	以 canny 法分割正手拉球影像之結果圖	41
圖 5-8	以 canny 法分割正手拉球影像之結果圖	42
圖 5-9	以 canny 法分割正手拉球影像之結果圖	43
圖 5-10	以 canny 法分割正手拉球影像之結果圖	44
圖 5-11	以 canny 法分割正手拉球影像之結果圖	45

圖 5-12	以 canny 法分割正手拉球影像之結果圖	.....	46
圖 5-13	以等位函式法分割反手攻球影像之結果圖	...	48
圖 5-14	以等位函式法分割反手攻球影像之結果圖	...	49
圖 5-15	以等位函式法分割反手攻球影像之結果圖	...	50
圖 5-16	以等位函式法分割反手攻球影像之結果圖	...	51
圖 5-17	以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖	...	53
圖 5-18	以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖	...	54
圖 5-19	以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖	...	55
圖 5-20	以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖	...	56
圖 5-21	以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖	...	57
圖 5-22	以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖	...	58

第一章 緒論

第一節 研究背景與動機

在進行桌球運動時身體的任何細微的動作、周圍環境與運動情境，對於球技的表現有很大的影響。依據 Lippa(1984)的理論，運動技能的學習如果能提供適當的範型模擬(Model Simulation)，則對學習者是最好的學習情境。學習者從中觀察與模仿，讓學習者自己體會從視覺、記憶與動作的結構中能交互的作用，並因此而能自我回饋及修正。而在進行桌球教學時，由於各項桌球戰技類型有其專業性及特殊性，每位老師不可能熟練各項桌球打法，對動作的講解示範亦有其限制。而如何解決此一問題，將各種不同技術較完整的呈現於學生面前，供學習者反覆的觀賞、模仿，是一項非常重要的工作，它關係著學習的效果(李榮哲，民 88)。

所以桌球技術要能夠精熟，就需要有正確且完善的訊息以供呈現及示範之用，並且透過不斷的練習才能使運動技術得以提昇。

桌球技術表現的優劣程度，應先以觀察法決定技術變數，後藉儀器或器械加以測量(許樹淵，民 75)。桌球教練工作者時常遇到的問題，則是選手動作調節適應的問題，有時選手因為動作上極小的角度差異造成練習狀況不佳，而往往這些極小差異用肉眼並無法判斷出來，也因此造成訓練上之盲點。另外，一般人或未曾受過訓練的觀察者亦或是對訓練有素的觀察者而言，要詳實的觀察動作的內容，都是一件相當困難的事。例如桌球發球時，球拍面角度與上肢、下肢間

的關連性，亦或推擋時的腳步動作與軀幹及上肢間的力的傳導所發生的問題等。此外優秀之運動選手，身心狀況都已達到了一定之程度，為了使動作技術能再有突破，就得透過適當工具之輔助，以分析動作技術上可供改進之所在(柯鴻銘，民 91)。

鑒於提昇技術水準之重要性，本研究希望發展出一套影像系統能及時分析並計算選手打球角度之差異，以提供教練和選手之重要參考數據，則將會是桌球訓練上之一大突破，因此本文嘗試首度使用電腦動作捕捉系統來測試並應用在選手身上。

所謂數位資料型態工具，亦即“電腦化的動作捕捉系統(Computerized Motion Capture System)”。它是一個測量物件在實際空間中的位置及方向，而以電腦可使用的格式作記錄。而所謂的物件包含人類身體、非人類身體、臉部表情、攝影機或光線位置及其它在場景中的任何東西(Scott, 1995)。其功用最主要是在於記錄人體的活動動作，以作為即時的或有時間差的分析及回顧之用(David, 1994)，更可提供運動教學、運動學習及運動技術改進時，一個可正確且完善的工具。動作捕捉系統，除了運用在桌球上，更可運用於其他之運動上。

此系統在國外已被大量應用在電影製作及遊戲上，例如著名電影星際大戰(Star wars)，即是透過動作捕捉系統所取得的動作資料，來作為該電影中龐大的虛擬機械兵團的動作骨架(VICON, 2001)。

而在近幾年運用電腦來輔助學習的方法就不只是動態概念性的學習，而是在動態技能、互動學習及學習社群等方面

的應用(何金龍, 民 89; 羅徵祥, 民 89; 陳慶瑄, 民 89)。

而在國內近年相關的研究也逐漸多了起來,如侯君昱(民 85),從影像序列建構虛擬實境中的人體動作,其主要的目的在重建立體的人體結構和分析人體的動作序列,其研究是在現有的影像序列去出其中的人體外型,並在虛擬環境中建構對應的三維人體影像。

第二節 研究目的

由以上可知,如何讓學習者在最有效、最短的時間內得到該項運動技能的認知概念,是運動技能學習的主要目的(李榮哲, 民 88)。動作捕捉系統之好壞優劣,實取決於開發者所使用之影像分割及影像追蹤等各種影像處理技術之好壞,尤其以影像分割為最重要。因一良好影像分割方法,將分割之結果組合起來便是一良好之影像追蹤。然而,傳統的影像分割方法,不是不夠準確區分出邊界及背景,便是對於分裂的物體較為不敏感,在本文中,嘗試將等位函式法引進動作捕捉系統中,並和傳統之動作捕捉系統中之影像分割方法作比較,並進而取代傳統之動作捕捉系統中所用之影像分割方法,藉此改善桌球影像分割之效能,並進而提昇系統中影像比對之成效。簡而言之,本研究之目的在:

- 1、 探討一般動作影像捕捉系統中影像分割之方法及引進等位函式法之後其分割結果之比較是否具有較佳之分析效果。
- 2、 將分割結果之各項相關資料儲存,以成為資料庫,以便日後各不同層級之選手之桌球動作影像可與

世界級選手之影像比對並進而分析各不同層級之選手與世界級選手動作之差異性。且此資料庫亦可方便日後的三維動作重建之用。

第三節 研究限制

本論文之動作範例影像為世界級選手蔣澎龍，影像是由台南桌球館以一般攝影機私下錄製。由於一般攝影機之解析度大約為一秒鐘 30 張之解析度，而無法達到一般運動攝影機之一秒鐘 60 張之解析度之要求，故於連續動作時，會造成殘影現象產生，而影響本研究之精確度，此為本研究之研究限制。

第四節 名詞釋義

等位函式法：

Sethian(1995)等人提出另外一種名為『幾何式主動輪廓線』的模型，其主要精神是將求解問題的維度，提高一維，而其最後結果是所有高度為零的輪廓線之集合。因此，此法 Sethian 也稱之 Level Set Method。在國內，有人亦稱為等位函式法。

影像分割：

影像分割技術 (Image segmentation) 在許多影像處理的工作上扮演著基礎且關鍵的角色，例如物件的識別與辨識 (Object recognizing)、影像內容搜尋 (Content-based image retrieval) 等等之應用，都必須將影像分割為具有某

種意義的基本單位，再藉由這些基本單位做更進一步的處理。在近期影像分割技術的發展中，分水嶺分割法(Watershed transform)是一個相當先進的技術，可得到良好的影像分割效果，所以本計畫著重於此一技術的改進及加強。相較於其他的影像分割方法，分水嶺分割法提供了快速且有效的影像分割，在完成區域分割之後，可保證區域之封閉性；但是，在這個方法中，過度切割(Over-segmentation)的問題常伴隨著發生，造成區域切割的結果過於瑣碎，使得影像分割的成效不彰。因此，本計畫提出一個新方法，利用人類視覺評量系統(Human vision system)針對邊界進行評估，對於間隔差異不顯著的區域進行合併，此法更可容許使用者藉由調整控制參數，動態地修改切割的結果。上述方式可以切割出影像中符合人類視覺的區域，並可使其他影像處理應用能有更進一步的發展。

資料來源

<http://web.thu.edu.tw/yihuang/www/nsc/NSC91.htm>

動作捕捉系統：

動作捕捉系統是一個測量物件在實際空間中的位置及方向，而以電腦可使用的格式作記錄。而所謂的物件包含人類身體、非人類身體、臉部表情、攝影機或光線位置及其它在場景中的任何東西(Scott, 1995)。其功用最主要是在於記錄人體的活動動作，以作為即時的或有時間差的分析及回顧之用(David, 1994)，更可提供運動教學、運動學習及運動技術改進時，一個可正確且完善的工具。動作捕捉系統，除了運用在桌球上，更可運用於其他之運動上。

第二章 文獻探討

本研究之研究重點在於改良二維影像動作捕捉系統中所使用之影像分割方法。本章之內容將依據研究系統所需之相關理論及文獻進行研究與探討。希望相關的文獻內容對本研究有所助益。

第一節 動作捕捉系統之發展

動作捕捉系統的發展，最早的起源是在美國。當年著名的兒童卡通迪斯尼工作室 (Disney studio) 在繪製動畫白雪公主時，為了使其中角色的動作更加的生動，採用了一種技術 “Rotoscoping”，亦即利用真實的演員來演出並先加以攝影後，利用拍攝到的底片作為底稿，經描繪後製作成動畫中人物的動作與姿勢，此可說是較為早期的動作捕捉系統。而在七零年代，電腦科技的發展逐漸的成熟到可以運用電腦來輔助動畫的繪製。

數位資料型態的動作捕捉系統簡稱 MOCAP 是英文 Motion Capture System 的縮寫，在簡稱上亦可稱為 “動作捕捉系統”。學者 David(1994) 對它的定義是 “一種可以記錄身體動作的裝置，可以利用它來作為，即時的或非即時性的分析與回饋的工具”。另動作捕捉系統研究人 Scott(1995) 講到 “動作捕捉系統即是一個測量物件在實際空間中的位置及方向的工具，以電腦可使用的格式作記錄。而所謂的物件包含人類身體、非人類身體、臉部表情、攝影機或光線位置及其它在場景中的任何東西”。由此可知動作捕捉系統，藉由電腦之輔

助，發揮了與其它動作捕捉工具不同之所在，即以數位資料型態的動作捕捉。

而美國紐約科技學院電腦圖形實驗室(New York Institute of Technology Computer Graphics Lab)中，使用了一面半銀鏡來將錄影帶中舞者的姿態的影像映射重疊到電腦的螢幕上，利用取得的動作的姿勢，而繪製出一個電腦中的舞者。隨後相關的技術逐步發展成熟。而有些生物力學實驗室的研究人員，在七零年代末期也開始使用電腦來分析人體的運動動作。從此，運用相關的技術及設備來研究相關的事物在電腦的世界中展開了新的紀元。隨後 Thomas W. Calvert, Chapman 及 Patla 等三人(1982)，運用貼黏在身上的電位表來量測身體運動時肢體變動時的電位差，來驅動電腦中的動畫影像作為舞蹈及不正常動作的臨床處置上的研究。而在同一時期中，麻省理工學院的建築機械群組(MIT Architecture Machine Group)及美國紐約科技電腦圖形實驗室開始實驗光學式動作捕捉系統，即使用一些小的標示點(Marker)，將其貼在身體需要觀察的地方。一般而言，標示點的材質不是使用反光材質的球，不然就是使用會閃動的二極體。而後運用二部以上的攝影機來拍攝運動中的物件或人體。隨後運用軟體來將影像中的標示點萃取出來，而後並將所萃取出的標示點平面座標与其它攝影機所拍攝而萃取出的標示點平面座標作比對後，運用三角定位法而來求得標示點的立體空間座標。

透過此套系統中特殊的控制器，可以用來操作動畫中人偶的各種面部表情，如口、眼睛、表情及頭的位置。這個系統的出現展現了動作捕捉系統技術已臻至成熟階段。

(張朝舜，民 88)以單台攝影機配合圓錐曲線理論發展

網路 3D 場景中人物動作擷取技術，其研究的方法是使用單台攝影機來擷取表演者的移動影像，並且使用界限框來快速計算出在影像中的標示點，而後再利用平滑假設的特性，來分析估算某部份被覆蓋到的標示點，接著計算標示點的 3D 位置，以決定虛擬人物的姿勢。

另外麻省理工學院中的 Ginsberg 及 Maxwell(1983) 發展出一套以設定之方法來描述操作圖形人偶的方法。此系統運用了一套早期的光學式動作捕捉系統，其工作方式是首先需穿著縫製有序列式閃爍的發光二極體 (LED) 在關節及重要解剖位置的衣服，而後透過二個有特殊影像偵測器的攝影機來取得每個發光二極體的位置。隨後該系統運用二部攝影機所取得的 2D 位置透過計算，來取得每個發光二極體其 3D 的空間座標。而該系統使用這些所取得的數值來繪製出棒狀圖，以作為即時的動作回饋，並將所得的 3D 的空間座標加以儲存以作為更細膩的動畫處理之用。

Barbara Robertson(1988) 發展出一套即時的面部表情呈現系統 “Mike, the Talking Head”。操作玩偶”的方式控制在虛擬環境中虛擬人物的動作。

有需求才有創造，動作捕捉系統也是在此原則底下，逐步的發展開來，其發展及運用的方向，依據各個領域而有不同的解決方案。也就是這樣，動作捕捉系統所需的相關技術才得以成熟且其利用的範圍也因此而加大。而動作捕捉系統依其得到資料方法之不同主要可分為電磁式，光學式，機械式，和影帶式。

第二節 系統中常用到之影像處理方法

系統中最常見和常用之影像處理方法通常有影像濾波器和微分強化邊界器。影像濾波器可分為三類，均化濾波 (smoothing filter)、中間值濾波 (median filter) 及高通濾波 (high pass filter)。這些濾波的功能在使影像信號依據各類濾波設計，加強或降低信號強度、過濾雜訊、重新取樣等功能。藉由這些濾波器，可以得到如平滑化，或者加強對比和種種的效果。

均化濾波 (low pass filter) 的功能，在使信號變化變得平滑，強化低頻部份 (變化平緩)，對於變化較快部分則加以抑制，又稱為低通濾波器。此濾波主用之功能在去除雜訊，去除高頻訊號和重新取樣，如圖 2-2 (圖 2-1 為原影像)。

中間值濾波 (median filter)，此一濾波的功能在去除孤立的雜質且保持影像本身的銳利度。如此可以保持其較為完整的邊緣，而其孤立點也可以完全被濾除，但大範圍的雜訊則無法依此方法來作濾除，如圖 2-3。高通濾波 (high pass filter)，其功能在強化影像高頻之部分。均化濾波在濾除高頻部分，因此只要將原影像扣除低通濾波部份即可得到。高通濾波將信號直流的成份濾除，因此高濾波的結果信號為交流信號，而一般影像之顯示都是正值，故須將輸出影像取絕對值或加以作平移，如圖 2-4。



圖 2-1(原始影像)

影像出處 <http://www.pingpang.info/>



圖 2-2(低通濾波影像)

影像出處 <http://www.pingpang.info/>



圖 2-3 (中通濾波影像)

影像出處 <http://www.pingpang.info/>



圖 2-4(高通濾波影像)

影像出處 <http://www.pingpang.info/>

由於均化濾波，相當於對信號取積，相反的如果對信號取微分則可以強化信號的高頻部分(直流信號的微分為零)，微分強化的功能在於作影像邊緣的強化或邊緣特徵的萃取，而利用影像的邊緣來表示該影像，其作用在減少資料的處理，通常所謂的微分強化邊界器便是應用此概念來處理影像，此一方法常被運用於影像的辨識及邊界的分割，亦是一般動作捕捉系統中常用的影像分割方法。一般所運用的微分方法有一次微分或二次微分。隨著信號的頻率愈高則強化的效果更為明顯。但這樣的強化，除了會強化所需的信號之外，雜訊部分也會隨之強化，尤以二次微分更使得雜訊強化更多。最常見的微分強化法為「肯尼」(Canny)法。這些方法之應用最主要在邊緣強化、及邊緣特徵之抽取，其原理為在在灰階值固定區域

之一次微分為零，而在灰階值開始變化或停止時之二次微分亦為零。將原始影像圖 2-5 運用肯尼法後所得之影像如圖 2-6 所示：



圖 2-5(原始影像)

影像出處 <http://www.pingpang.info/>

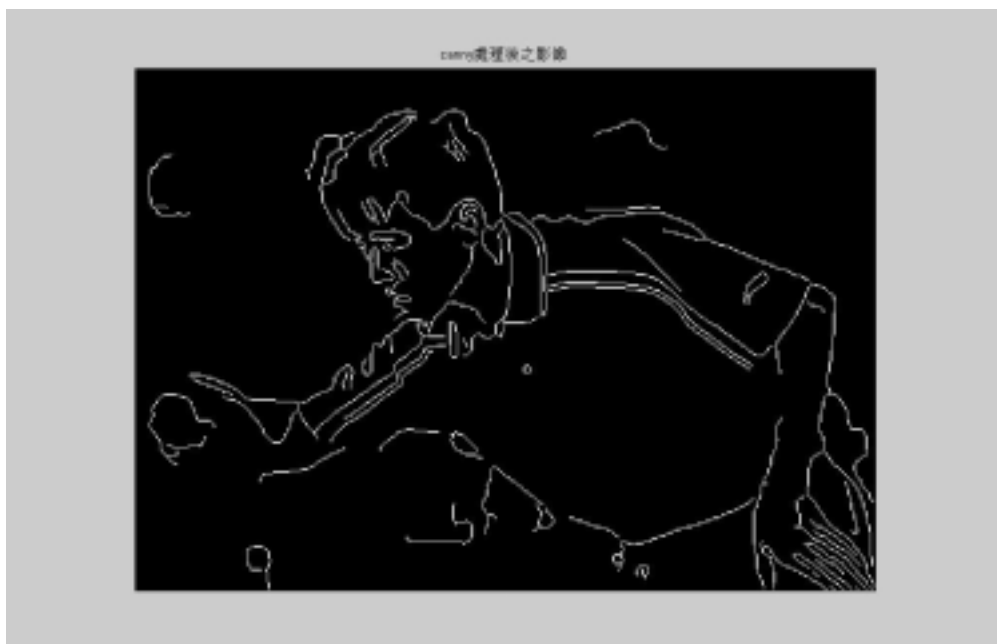


圖 2-6(以肯尼法分割所得之影像)

第三節 影像分割

由於電腦硬體計算速度進步神速，因此，越來越多的人利用計算機，採取半主動圈選或是主動圈選的方式。所謂半主動圈選的方式，亦即在所需要的影像上，大範圍的以人工點取幾個點，並由計算機，來內插出輪廓的曲線，例如：三次方週期雲行線演算法 (Periodic Cubic Spline)。這個方法，乃是先選出幾個點，再利用內插出三次方函數的方式，圈選所要的輪廓。然而，半主動圈選的方式，卻有著一些比較美中不足的地方，例如，同樣的動作，必須重複做許多次，同時，由於其為半主動的圈選，所以人工的介入，將使得不準確性大大的提高。因此，主動圈選的方式，就益發顯得重要並且有效率的。通常，主動圈選的方式，通稱它們為『主動輪廓線模型 (Active Contour Model)』，是一種可變形的曲線模型，依照其輪廓線計算方式的不同，也分成許多的種類，而主要的功能在於可以主動的獲取影像中的邊緣輪廓。由於其便利性和準確性相對較高，所以被廣泛的應用在各項領域，而目前也有許多的研究注重在各種提高其準確性或是執行的迅速性的方法上。

依照輪廓線計算方式的不同，主動輪廓線模型可以分為兩種，第一種乃是『參數式主動輪廓線模型 (Parameteric Active Contour Model)』，第二種則是『幾何式主動輪廓線模型 (Geometric Active Contour Model)』，以下將先敘述參數式主動輪廓線模型。參數式主動輪廓線模型是以參數表示式描述輪廓曲線，繼而將其輪廓曲線之能量泛函 (Energy Functional) 經由變分學的運算，得到一組偏微分方程式，所得方程式之解，就是使總能量的泛函，得到最小值的輪廓曲線。通常我們指的主動式輪廓模型就是此類，由於形狀類似一條蛇，也有人稱呼為 Snake Method，最早是由 Kass, Witkin, Terzopoulos (1988) 等人所提出來的一種可變形曲線模型，稱之為主動輪廓線模型，以別於其他形式之主動輪廓線模型。

snake 基本概念是藉由影像假設一個泛涵能量式，並藉由變分法來最小化此一能量式，求得改變輪廓的位置與形狀參數。然而，此法在剛提出時，有下列美中不足之處：

- 一．非常仰賴起始輪廓，起始輪廓必須非常靠近真實的邊界。
- 二．缺乏進入凹處（Concavity）的能力，特別是腦部影像，對於腦迴（Sulcus），完全不具備進入的能力。
- 三．容易被區域能量最小值（local Energy Minimum）停滯。
- 四．無法處理分裂或是內部有破洞的影像。

第一個問題的解決方向就是增加初始輪廓對於真實邊界的捕捉範圍，過去的解決方法都是以修正外部力場（External Force Field）為主，例如Cohen等人，提出了一種外部力叫距離潛位力（Distance Potential Force），是利用歐基理德距離圖（Euclidan Distance Map）所計算出潛位函數（Potential Function）的負值梯度，當作外部力。這個方法可以順利解決捕捉範圍過小的問題。為了解決第二個問題，Cohen(1993)年提出了一個方法叫做Balloon法，可以靠著增加壓力將初始輪廓推入凹處，其結果並不是非常完美且必須指定力的方向，也就是說必須指定初始輪廓要收縮或是擴張，後來經過不斷的改良，也獲得了一些比較好的結果。第三個問題導因於傳統主動輪廓模型當最小化能量時，必須滿足Euler-Lagrange方程式。因此，輪廓經常會停於區域輪廓最小處。但是也有可能是因為影像的雜訊而產生此種現象，例如電腦斷層攝影及磁共振造影，在無訊號區，經常會有許多的雜訊，假如是因為雜訊的關係，做適當的前處理，濾除雜訊就可以解決。而Xu(1997)，則在後來發表了梯度向量流（Gradient Vector Flow, GVF）主動輪廓模型，這個方法一次解決了上述的前三個問題。由於此法的提出，使得影像分割的效率及結果都大為提升，連帶使

得動作捕捉系統在動作分析上的效能也跟著大為改善。但是第四個問題卻始終沒有辦法解決，因此在動作捕捉系統上的即時影像分析或是影像追蹤上，如果所要追蹤的物體或是分割的物體超過一個以上，在處理上容易出現困難，而難以達到“即時”之目的。於是後來又有Sethian(1995)等人提出另外一種名為『幾何式主動輪廓線』的模型，其主要精神是將求解問題的維度，提高一維，而其最後結果是所有高度為零的輪廓線之集合。因此，此法Sethian也稱之Level Set Method。在國內，有人亦稱為等位函式法。由於不使用直接描述邊界位置的參數，因此可以針對分裂或是內部有破洞的影像圈選，且因此法並沒有侷限於對多個或一個影像進行圈選，因此在應用上比之傳統的snake更加廣泛。舉凡，影像強化（Image Enhancement），去除雜訊（Noise Removal），密度不同之流體交會（Two-Fluid Flow），甚至在桌球比賽中之球體運行分析都可以運用此法。此法之概念及圈選過程法都將在下節中詳細說明。

第四節 等位函式法理論及其圈選過程

由於等位函式法在本論文研究中有著重要地位，是故本節主要是介紹等位函式法之理論發展歷史及其理論架構，並以範例來說明等位函式法其圈選之過程。等位函數法（Level Set Method）最早是拿來研究並追蹤曲面的變化，其最主要的精神乃是在於幾何式主動輪廓線模型是將求解問題的維度，提高一維，而最後結果是所有高度為零的輪廓線之集合。由於與參數無關，因此在追蹤曲面變化之過程時，便不只單單

侷限於一個曲面而是可以進行多個曲面的追蹤。而一般我們所看到的影像，雖然有各種色階或是灰階亦或黑白，然而以數學結構而言，皆是同構於二維平面，由此特性可知，以等位函式法來進行影像的分割，在數學上亦是可行，且不會受到物體個數的影響。因此等位函式法可以針對多個物體的輪廓進行影像分割。茲引用Sethian(1995)之著作將Level Set Method的概念說明如下。首先，假設在N維空間中，給定一個N-1維的封閉超表面 (CLOSED HYPERSURFACE) $\Gamma(t=0)$ (亦即，如果是在二維空間中，則此超表面即為一維。)，考慮一個維度為N的函數 $\Phi(X, t)$ ，並試著以這個函數來表示LEVEL SET的值，而這個方法，最主要的精神則是把 $\Phi(X, t)$ ，看作以 $\Phi(X, t) = 0$ 值為零的區域而構成的表面。令 $\Gamma(t=0)$ ，其中 $X=(x, y, z)$ (在這裡，我們考慮三維空間)。則我們將 $\Phi(X, t)$ 定義為： $\Phi(X, t=0) = d$ ，在這裡d所表示的是到 $\Gamma(t=0)$ 的距離，所以如果d大於零，則表示X在 $\Gamma(t=0)$ 的外面。如果d小於零，則表示X在 $\Gamma(t=0)$ 的裡面，而如果d剛好為零，那麼就表示X是 $\Gamma(t=0)$ 上的一點。由以上的敘述可將 $\Phi(X, t)$ 與 $\Gamma(t)$ 的初始情況表示如下：

$$\Phi(X, t=0): R^3 \rightarrow R$$

$$\Gamma(t=0) = [X : \Phi(X, t=0) = 0]$$

由於隨著時間的改變， $\Gamma(t)$ 中的X當然也會跟著變化，而最後主要的目標，就是找出 $\Phi(X, t=0) = 0$ 的點所構成的集合，而找出這些集合，也就相當於找出所想要的 $\Gamma(t)$ 。以圖2-7來表示其初始條件，圖2-8來表達Level Set Method的概念。在圖2-8中，代表圓形擴張的三個階段 (由 $t=0$ 到 $t=2$)。隨著時間的變化，圓形不斷的向外擴張，且其所在位置的 $\Phi(X, t)$ 值，始終為零。

圓形之外的區域的 Φ 值，則必須根據至圓形的距離作調整，因此座標上的每一點的 Φ 值，會隨著時間的改變，不停的變化。而在圖 2-9 和圖 2-10 中，可以看到初始的 Φ 值所形成的圖形和 $\Phi = 0$ 的位置所形成的圓形平面圖。及 10 秒後的 Φ 值所形成的圖形和 $\Phi = 0$ 的位置所形成的圓形平面圖，明顯地，在 $\Phi = 0$ 位置的圓形已有所變動。

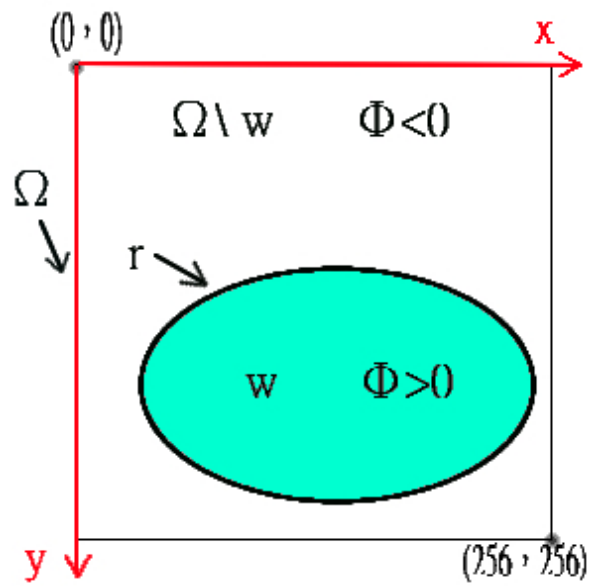


圖 2-7 (起始條件示意圖)

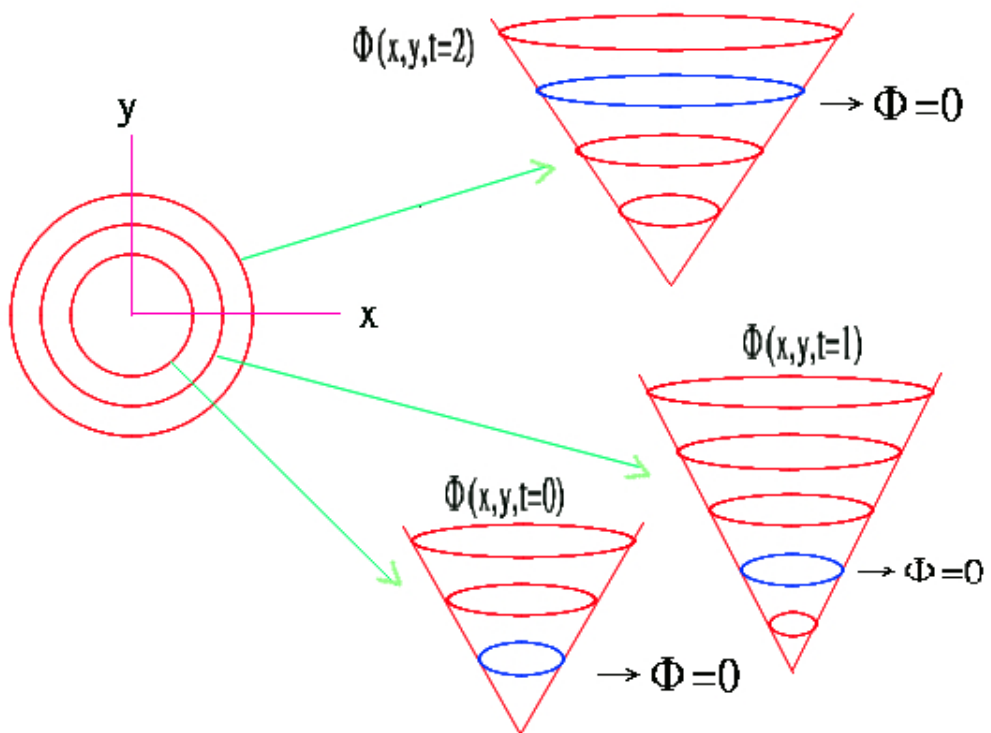


圖 2-8 (level set 示意圖)

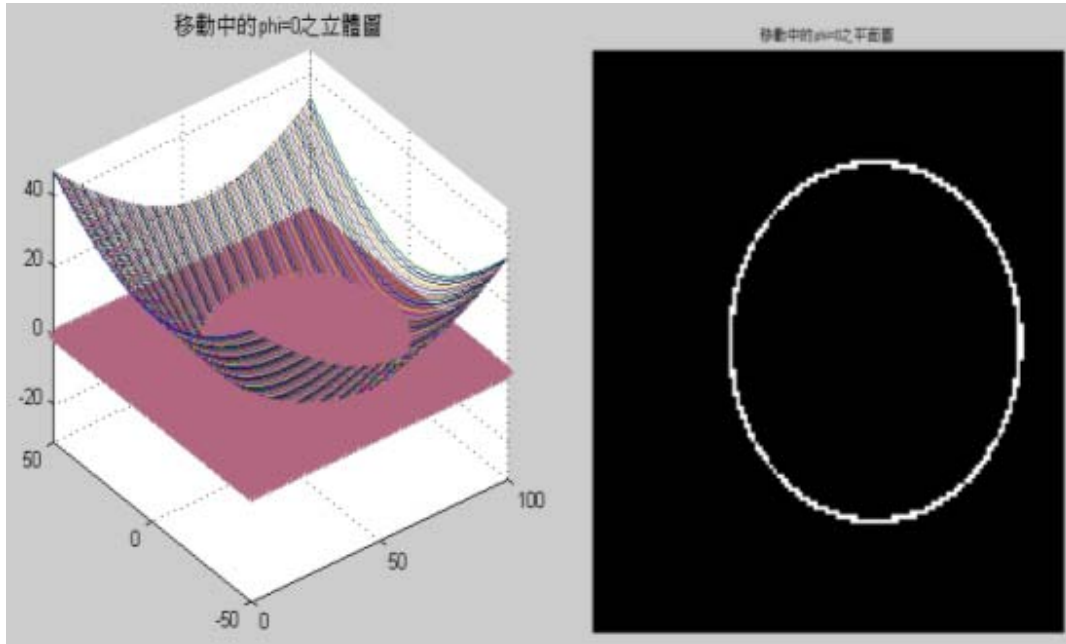


圖 2-9 (phi 移動圖)

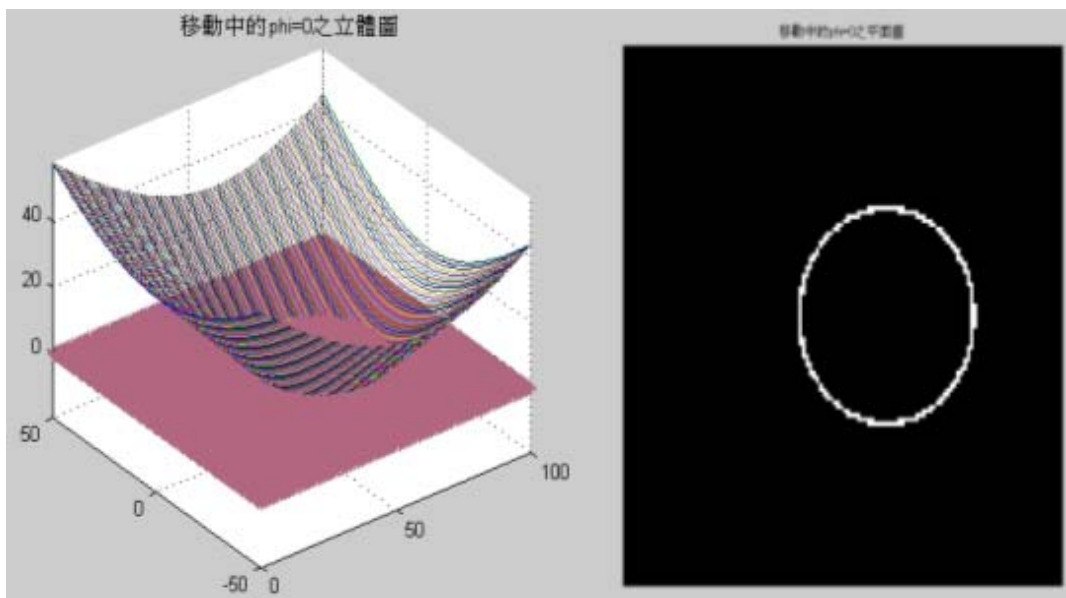


圖 2-10 (phi 移動圖)

如果應用在實際的影像分割中，可以視實際的需要將 Level Set Method 改寫成其他的形式，其最主要的概念乃是以影像的灰階值取代一般傳統的等位含式法中的邊緣偵測器的部分。如果以實際的例子來作說明，下圖 2-11 中的上方為所欲圈選的圖形，而圖 2-12 則是圖 2-11 的 ϕ 值所形成的圖形，圖 2-13 到圖 2-14 則是在圈選過程中， ϕ 逐漸的變化，由圖 2-13 到圖 2-14 可以看出， ϕ 逐漸形成所要圈選的輪廓，而圖 2-15 則是最後圈選完成後， ϕ 形成的圖形。而圖 2-16，圖 2-17，圖 2-18 的紅色部分則是圖 2-13，圖 2-14，圖 2-15 中， $\phi = 0$ 的圖形。由剛剛的例子也可看出 Level Set Method 在處理上，並不侷限於只能一次處理單一物體。由於一次可以圈選多個物體，所以就多個物體的影像分割而言，Level Set Method 較傳統的 Snake 要來得更為迅速一些。而 Level Set Method 主要有下列的四個好處：

1. 在計算的過程中，可以允許幾何圖形的改變，合併或著破裂，而這也是最主要的優點，因為不需要將幾何圖形的改變，考慮在計算之中，在程式化的過程中，降低了複雜度。
2. 在計算上，可以利用空間與時域網格點的概念，使用有限差分法的方法來計算；利用有限差分法可以容易的將方程式中的各部分以數值解求出。
3. 本身的幾何形狀的法線向量和曲率可以用 ϕ 表現出來，此點在往後改寫各種 Level Set Method 的模型上，是非常有用的。
4. 由於並不是由參數決定最佳解的形式來圈選輪廓，所以對於區率變化較大的地方，較傳統的參數式主動式輪廓模型有著更良好的圈選能力。

5. Level Set Method 並沒有限制維數，也就是說，這個方法在任意的可數維數都是可以使用的。

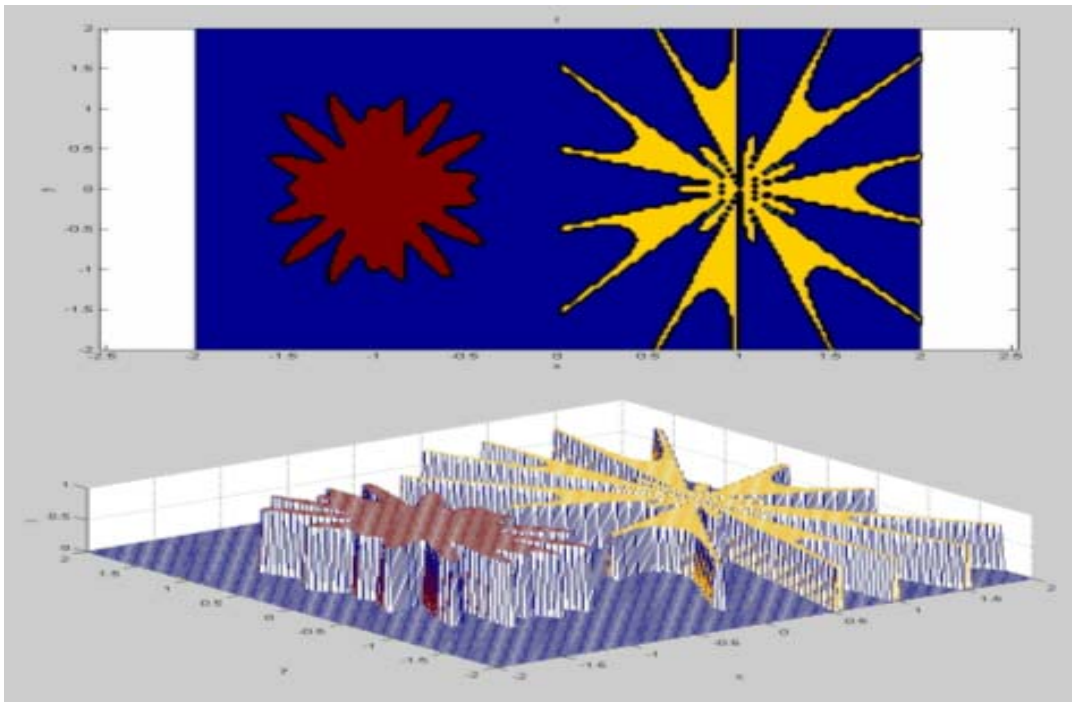


圖 2-11 (原始影像)

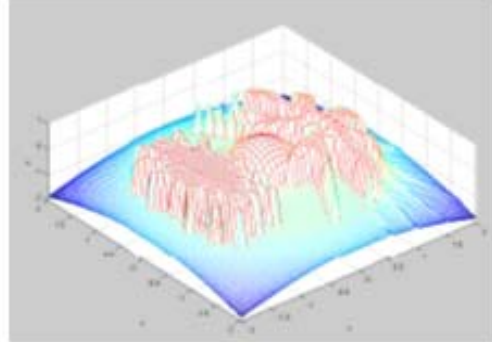
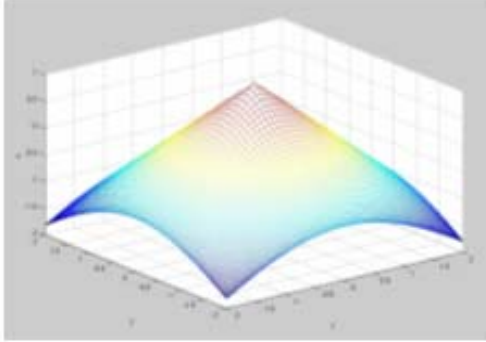
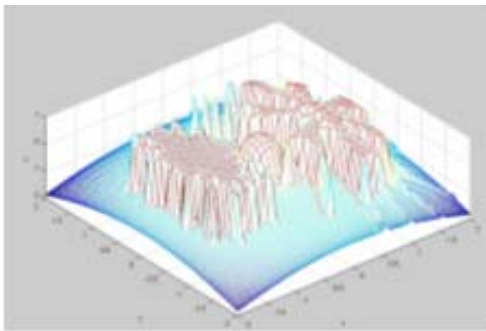
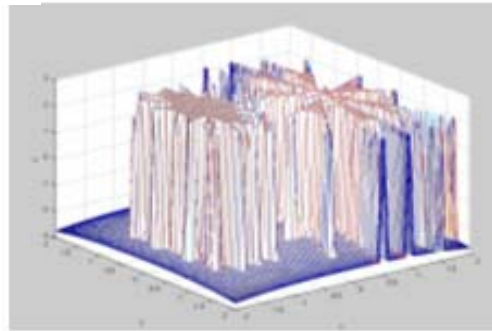


圖 2-12(分割過程 phi 之變化圖) 圖 2-13(分割過程 phi 之變化圖)



(圖8)

圖 2-14(分割過程 phi 之變化圖)



(圖9)

圖 2-15(分割過程 phi 之變化圖)

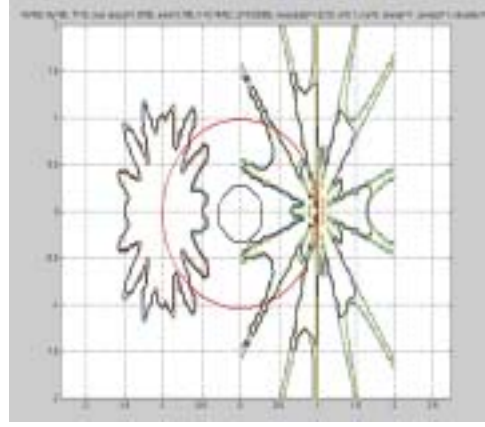
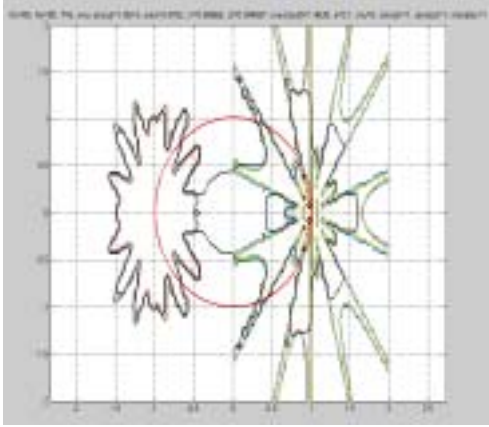


圖 2-16(分割過程 $\phi=0$ 之變化圖)圖 2-17(分割過程 $\phi=0$ 之
變化圖)

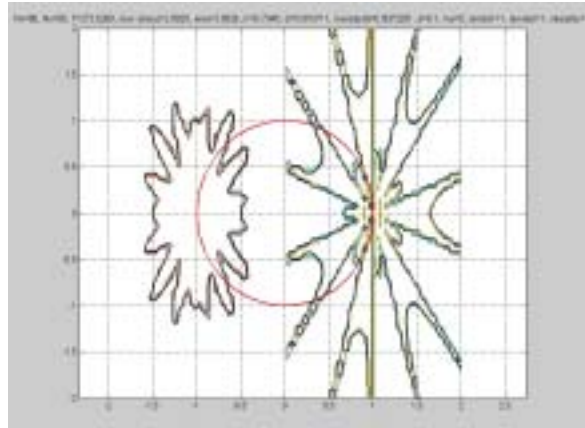


圖 2-18(分割過程 $\phi=0$ 之變化圖)

第三章 研究步驟與方法

第一節 研究對象及範圍

本實驗的研究對象世界級桌球選手蔣澎龍並運用單一攝影機所得到之影像輸入電腦中，其後探討及研究影像擷取原理、影像處理技巧、及影像分割的技術及方法。

本研究範圍的設定，是以單一攝影機所拍攝到的二維影像為基礎，並以 MATLAB 6.5 建構一套二維運動影像動作捕捉系統，以用來捕捉在二維平面上的桌球運動影像，並以輪廓線圈選出影像，藉以了解影像在二維平面上之動作變化。

蔣澎龍選手之動作範例影像是由台南桌球館以一般數位攝影機私下錄製，研究者亦為台南桌球館之選手，進行本研究後，由球館提供本研究所需之影像作為研究之用。

第二節 研究器材及設備

有關本研究之研究器材與設備，包含硬體部份及軟體部份：

一、硬體部份

- 1、數位攝影機。
- 2、影像擷取系統。
- 3、電腦網路主機。

二、軟體部份

- 1、個人電腦作業系統 Microsoft Windows XP (以便和程式語言 MATLAB 6.5 相容且執行)。
- 2、程式語言 MATLAB 6.5 (撰寫動作捕捉系統之程式語言)。

第三節 研究步驟

本研究之研究步驟流程如下圖 4-1 所示，首先利用程式語言 MATLAB 6.5 將動作捕捉系統撰寫成使用者介面，系統內之功能有影像輸入功能，一般動作捕捉系統常用影像分割方法，影像前處理方法，及等位函式法。之後將攝影機所拍攝到的桌球運動影像利用使用者介面輸入，並完成前處理之後，以一般系統中常用之影像分割方法作分割，其後在利用等位函式法將作完前處理後之桌球動作影像作影像分割，並比較一般系統中常用之方法及等位函式法所作之分割結果之異同後並進行分析與評估。

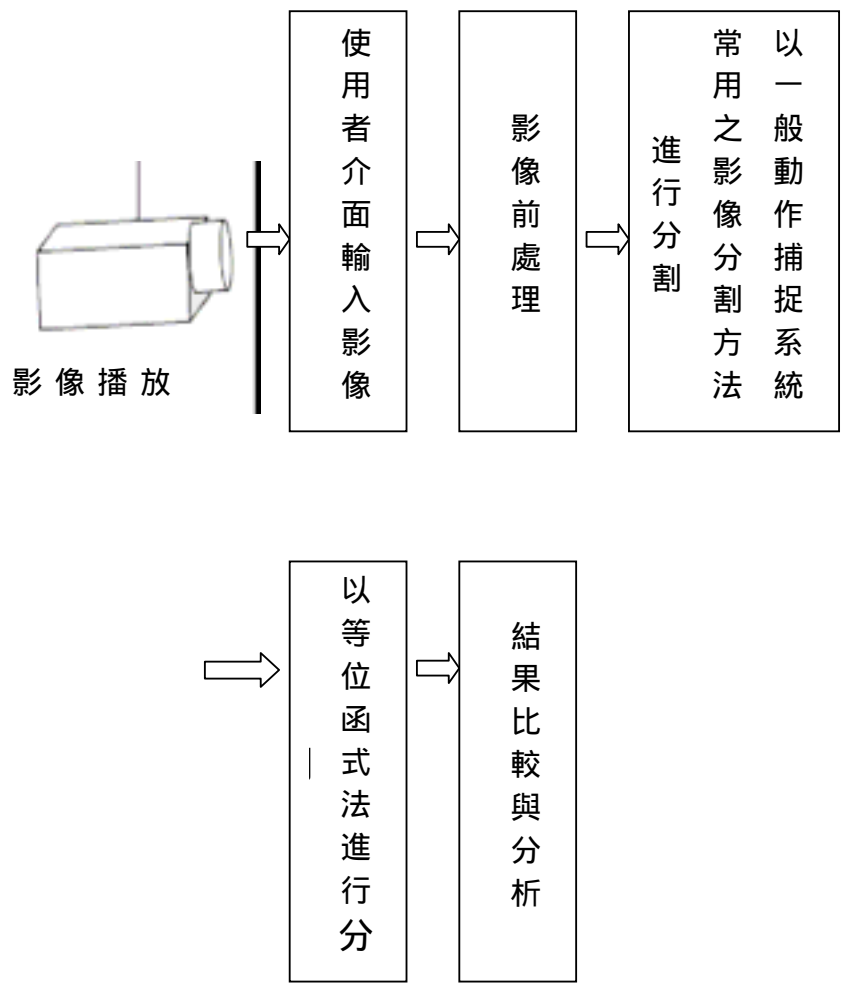


圖 4-1 (研究步驟流程圖)

使用者介面如下圖 4-2 所

示：

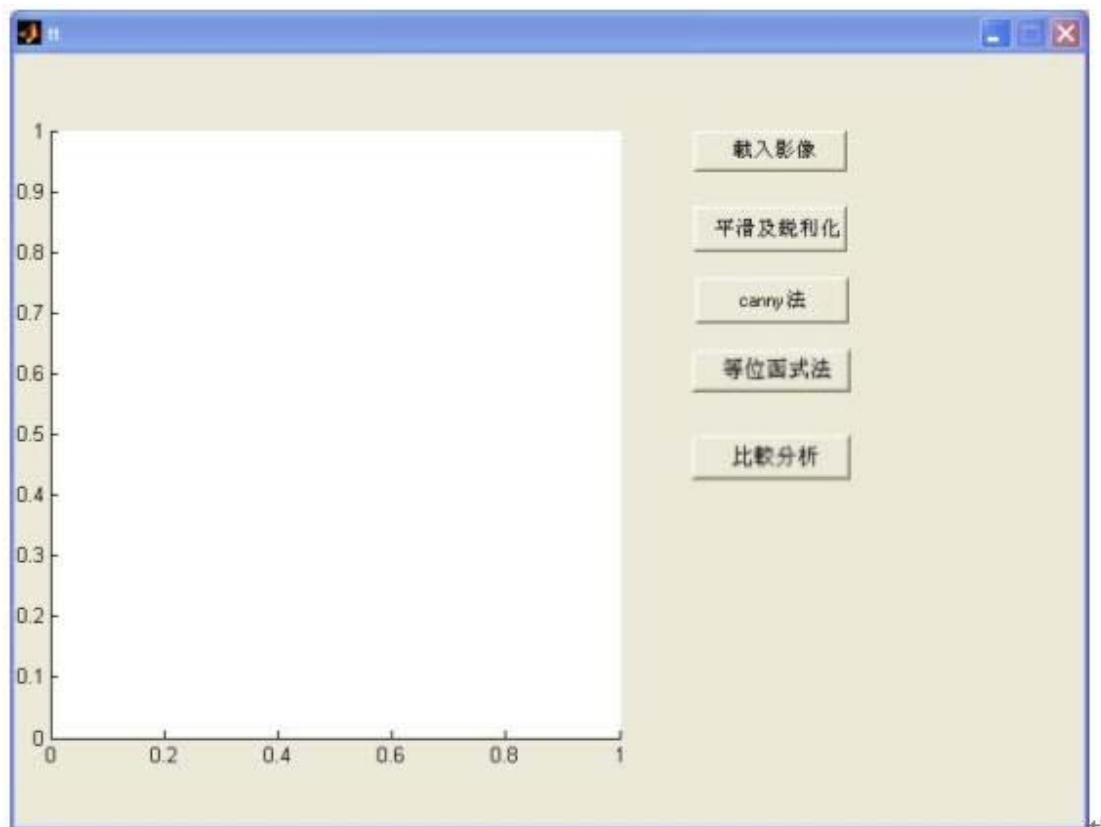


圖 4-2(使用者介面圖)

介面上之各種按鈕功能分別說明如下：

(1)輸入影像：

為將所欲分割之影像輸入，並顯現在介面上之左方白色區域中。

(2)平滑及銳利化：

平滑之主要目的乃是將影像作一平滑之動作，使得影像看起來較為柔順平滑，並且使得影像中雜訊的影響減至最低。而銳利化乃是將影像中各物體的邊緣使之在影像各物體的邊緣上看起來較為突出，以加強影像分割之效果。

(3)CANNY 法：

是一種邊界加強器，在影像分割中主要是用在運動影像之邊界輪廓偵測，亦是一般運動捕捉系統常用之方法之一。

(4)等位函式法：

可以”等位函式法”執行運動物體之影像分割。

(5)比較分析：

用 canny 法與等位函式法進行統計分析。

第四章 結果與討論

本章主要之內容乃是以上章中所提及之使用者介面來進行影像分割，並就結果分析與討論。為了使比較有所依據，分割之樣本為世界級選手蔣澎龍之反手攻球及正手拉球之連續動作影像，而選定之比較處為蔣澎龍選手在各張連續影像中之右手手肘其角度變化。亦即，在下面各節中，將分別以肯尼法與等位函式法分割影像，並觀察所分割之影像其手肘處之角度與原始影像之角度其差異性。而圖 5-1 為蔣澎龍選手之反手攻球原始運動影像。圖 5-2 為蔣澎龍選手之正手拉球原始運動影像。



圖 5-1 (蔣 澎 龍 選 手 反 手
攻 球 連 續 圖)



圖 5-2 (蔣 澎 龍 選 手 正 手 拉 球
連 續 圖)

第一節 以 canny 法分割

其反手攻球連續動作結果如圖 5-3 至圖 5-6 所示。



圖 5-3(以 canny 法分割反手攻球影像之結果圖)



圖 5-4 以 (canny 法分割反手攻球影像之結果圖)



圖 5-5 以 (canny 法分割反手攻球影像之結果圖)



圖 5-6 以 (canny 法分割反手
攻球影像之結果圖)

由以上圖 5-3 到圖 5-6 可看出 canny 法在分割選手反拍攻球時，出現了斷斷續續雜亂的情形，且選手上半身多了許多雜亂線條，影響視覺效果。而右手手肘的交界處的分割也較為雜亂。經過計算後，圖 5-3 到圖 5-6 以 canny 法分割之右手手肘角度為 127 度，143 度，102 度，85 度。而實際的角度則大約為 120 度，140 度，93 度，87 度。雖然在手肘處之角度和實際角度比對之下並無明顯差異，然而分割結果較不連續，所以在反手攻球方面之分割結果並不理想。在正手拉球部份其結果如圖 5-7 至圖 5-12 所示。

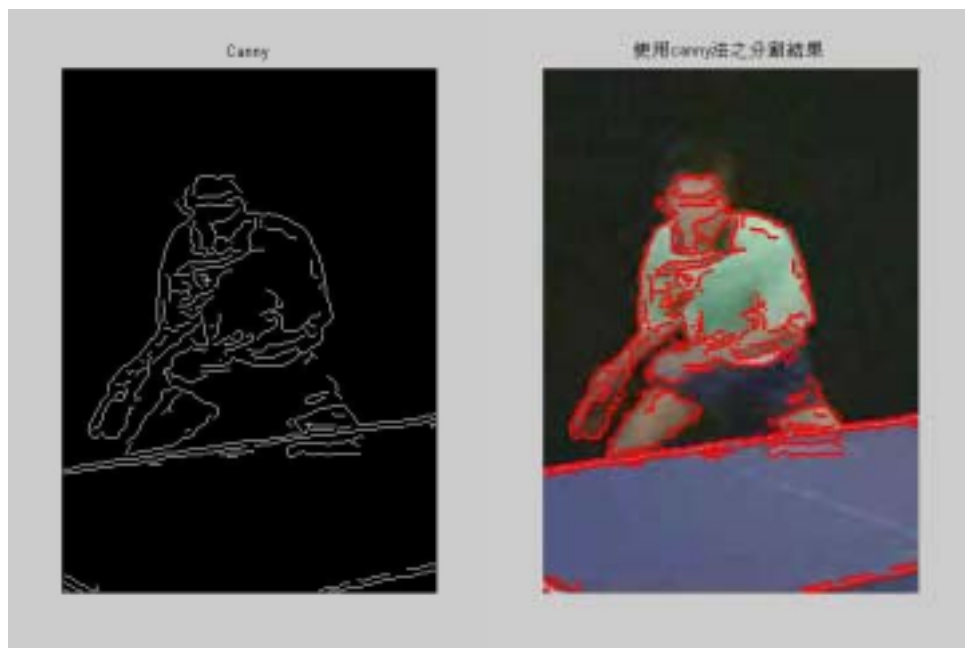


圖 5-7(圖 5-7 以 canny 法分割正手拉球影像之結果圖)



圖 5-8(圖 5-7 以 canny 法分割
正手拉球影像之結果圖)

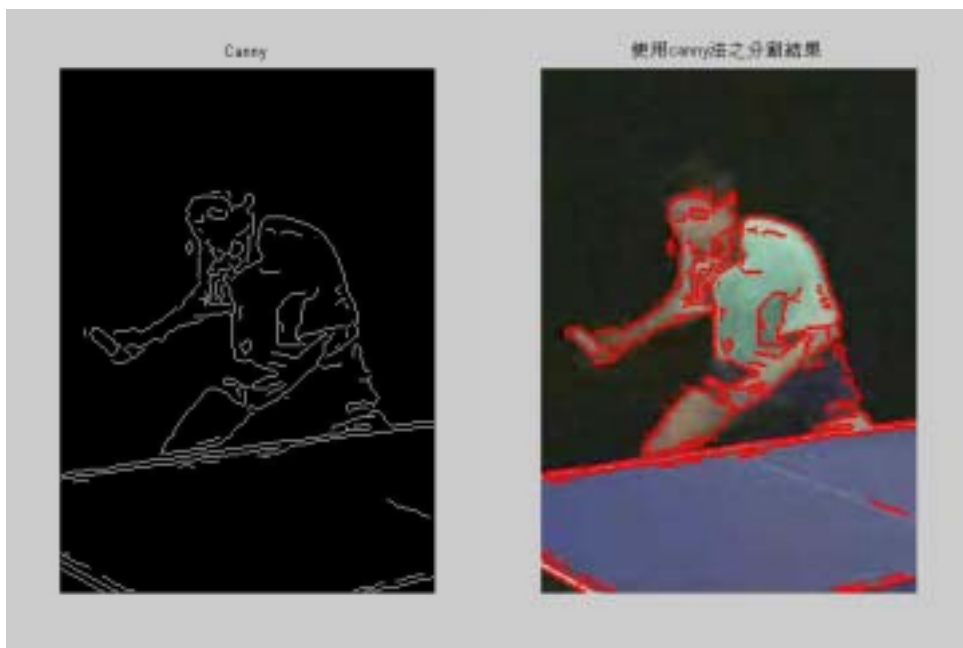


圖 5-9(圖 5-7 以 canny 法分割正手拉球影像之結果圖)

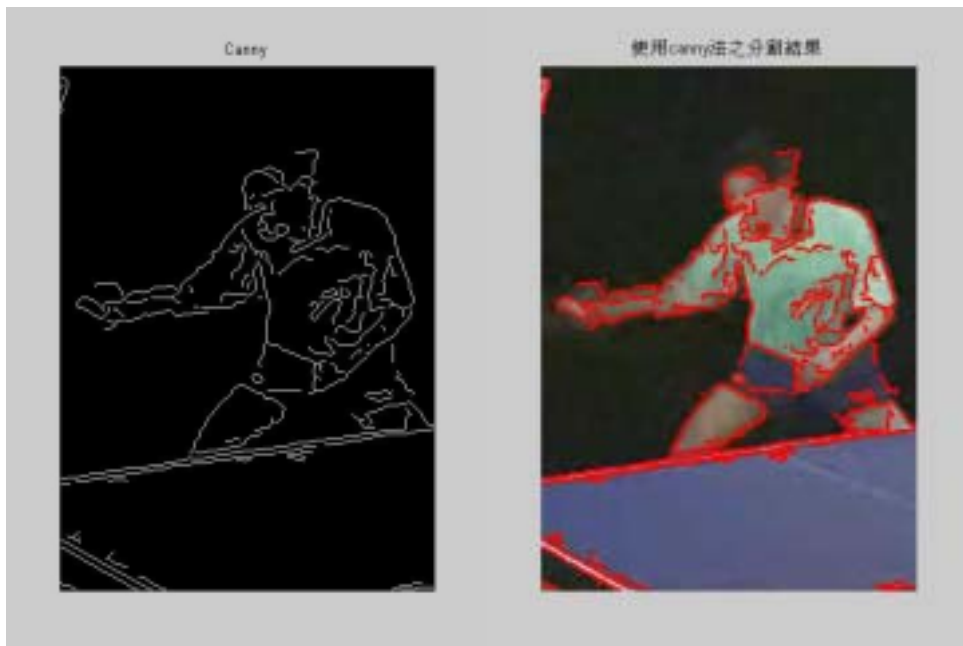


圖 5-10(圖 5-7 以 canny 法分割
正手拉球影像之結果圖)



圖 5-11(圖 5-7 以 canny 法分割
正手拉球影像之結果圖)



圖 5-12(圖 5-7 以 canny 法分割正
手拉球影像之結果圖)

由以上圖 5-7 到圖 5-12 可看出 canny 法在分割選手正手拉球時，出現了分割線條雜亂的情形，雖然較為連續，然而卻太過雜亂以至於影響了視覺上的效果。而右手手肘的交界處的分割也因分割結果雜亂以致看不清楚分割之結果。經過計算後，圖 5-7 到圖 5-2 以 canny 法分割之右手手肘角度為 138 度，130 度，137 度，130 度，42 度，0 度。而實際的角度則大約為 140 度，124 度，143 度，131 度，35 度，90 度。在手肘處之角度和實際角度比對之下只有圖 5-12 有明顯的差異，其他的圖並無明顯差異，然而分割結果雖較連續但是線條雜亂，所以在正手拉球方面之分割結果並不十分理想。

第二節 以等位函式法分割

肯尼法乃是一般運動捕捉系統中常用的影像分割方法，由前面圖 5-3 到圖 5-12 之分割結果可以明顯的看出，不是有線條雜亂，視覺效果不好之缺點，便是視覺效果雖然較好，但在連續性跟連接度方面卻較為不理想之缺點。本節乃是以等位函式法取代肯尼法所得之實驗結果，其中反手攻球連續影像分割結果如圖 5-13 至圖 5-16 所示。

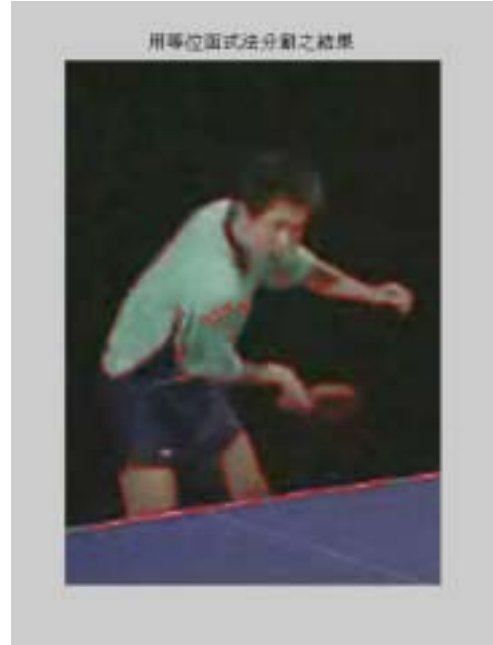


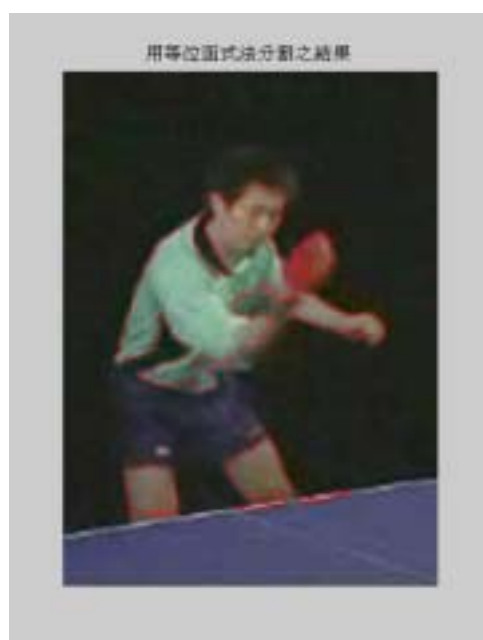
圖 5-13(以等位函式法分割反手攻球
影像之結果圖)



圖 5-14(以等位函式法分割反手攻球影像之結果圖)



圖 5-15 (以等位函式法分割
反手攻球影像之結果圖)



由以上圖 5-13 到圖 5-16 可看出等位函式法在分割選手反拍攻球時，分割結果與前節相比之下，分割結果明顯的較為不雜亂，且線條也清楚許多，且線條也皆為連續。而右手手肘的交界處的分割也較前節之分割方法所得之結果來的清楚且連續且經過計算後，圖 5-3 到圖 5-6 以等位函式法分割之右手手肘角度為為 120 度，141 度，97 度，89 度。而實際的角度則大約為 120 度，140 度，93 度，87 度。雖然在手肘處之角度和實際角度比對之下並無明顯差異，而反拍攻球分割結果在視覺上較前節之結果在視覺上效果較好，在角度計算上則無太大差異。在正手拉球部份其結果如圖 5-17 至 5-22 所示。

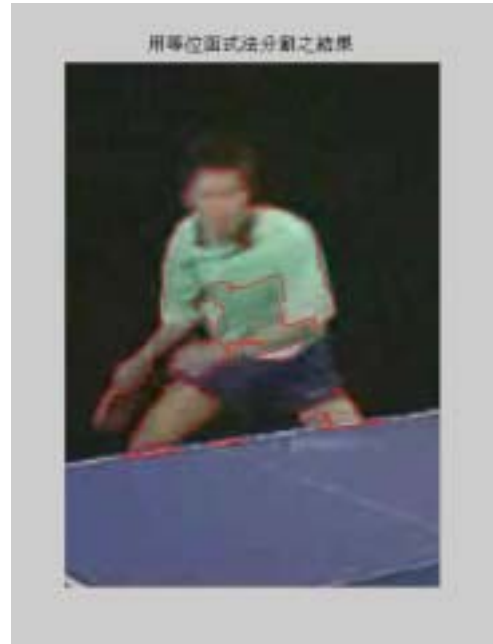


圖 5-17(以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖)

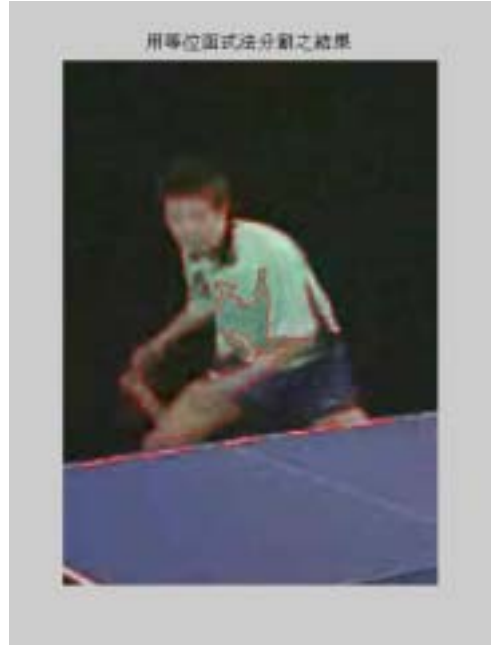


圖 5-18 (以等位函式法分割正手
拉球影像之結果圖)

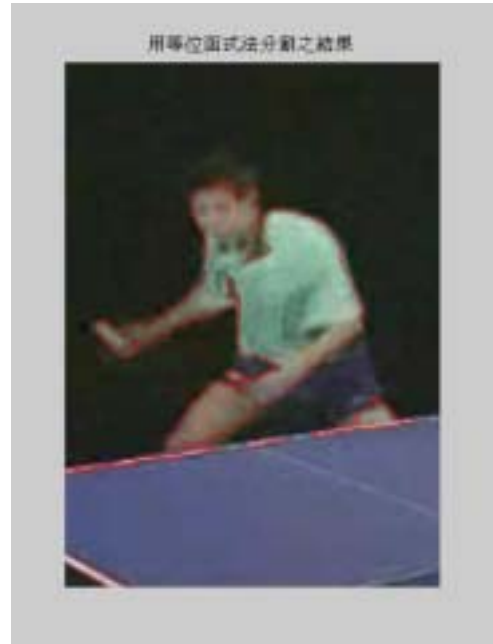


圖 5-19 (以等位函式法分割正
手拉球影像之結果圖)

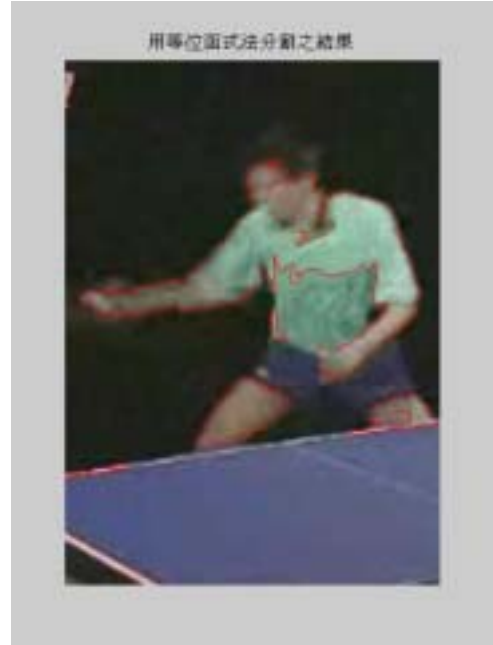


圖 5-20(以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖)

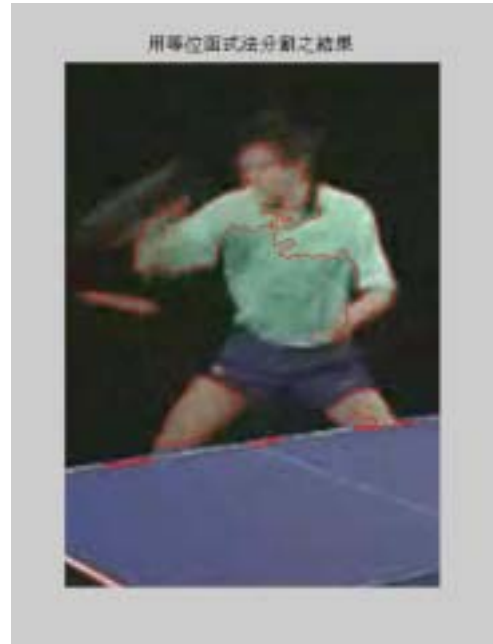


圖 5-21(以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖)

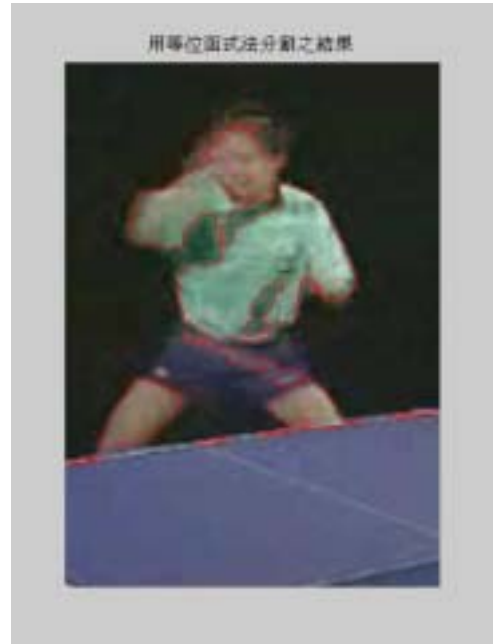


圖 5-22(以等位函式法分割正手拉球影像之結果圖)

由以上圖 5-17 到圖 5-22 可看出等位函式法在分割選手正手拉球連續影像時，在分割的結果上並不像前節之分割結果有太過雜亂的線條出現，且不會有不連續的線條出現。圖 5-17 到圖 5-22 以等位函式法分割之右手手肘角度為 140 度，122 度，141 度，137 度，41 度，0 度。

而實際的角度則大約為 140 度，124 度，143 度，131 度，35 度，90 度。

在手肘處之角度和實際角度比對之下除圖 5-22 外其餘並無明顯差異，且分割結果在視覺效果上也比前節來的理想。且由圖 5-13 到圖 5-22 可以看出，利用等位函式法所得到之影像分割結果，不論在正手拉球或是反手攻球上其視覺效果皆不會

隨著連續動作的不同而有太大的差異性存在。

第三節 比較分析

現以肯尼法及等位函式法為例，反手攻球及正手拉球之連續動作影像為行，並以(分割結果之角度/實際角度)作為單位，可得如下。

表 5-1:canny 法和等位函式法分割右手手肘角度比較表

	反手攻球 ↵	反手攻球	反手攻球 ω	反手攻球 ↳	正手拉球 ↵	正手拉球 ↯	正手拉球 ω	正手拉球 ↳	正手拉球 ↵	正手拉球 ↯
canny	1.0 6	1.0 2	1.1	.98	.99	1.0 5	.96	.99	1.2	0
等位函式	1	1	1.0 4	1.0 2	1	.98	.99	1.0 4	1.17	0

由表 5-1 可看出，等位函式法分割之結果在 10 行中有 3 行為 1。如加上比值為 1 的 3 行，則等位函式法所分割之結果在 10 行中有 7 行誤差較肯尼法相對為小。而第 10 行中每一項比值皆為 0，推測可能是由於影像在手肘附近的雜訊過強，使得影像手肘附近部份之邊界資訊較雜訊資訊為弱，因此無法

由現有之各種方法分割。由上表亦可知，等位函式法所分割之結果，相較肯尼法有更加良好之分割功能，而在視覺效果上等位函式法所分割之影像亦肯尼法為佳。由上表 5-1 及圖 5-3 到圖 5-22 可知，利用等位函式法所分割之運動影像，無論在分割之連續性，線條之清晰度，及分割所得之角度相對誤差上，都優於肯尼法，亦即在動作捕捉系統中若以連續動作影像為基礎，發展影像比對，影像追蹤，及影像重建等後續功能，以等位函式法取代在現有系統常見之影像分割法來做連續動作影像分割，將會有更加良好的成效。

第五章 結論及建議

第一節 結論

在本論文中，我們首先引進了等位函式法的觀點加入了動作捕捉系統中，並以世界級桌球選手其連續動作影像為樣本將等位函式法所圈選出的輪廓和一般動作捕捉系統中常用之影像分割方法所圈選的輪廓作比較。發現經過等位函式法所圈選過的運動影像輪廓相較於一般系統中常用之影像分割方法所圈選之運動影像輪廓較為清楚且連接度較高，同時較不容易受背景的影響。由於等位函式法其效果較為清楚且連接度較高，在用來追蹤連續運動影像之輪廓時，亦會有較好之效果。本研究之結果對於提供教練與選手作為訓練參考亦具有實質上之效益。

第二節 建議

在本文中，雖然等位函式法在進行運動影像輪廓分割及圈選的時候較一般系統之影像分割法有較為良好的效果。然而，仍有其需要改進及延伸的地方。

1. 速度方面：在本文中，由於所圈選的運動影像上的每一點都必須要計算，因此速度的快慢便取決於影像的大小，當影像非常大的時候，整體的計算速度會變得緩慢。建議可加強硬體設備以補強速度以達到即時運動影像追蹤之效果。
2. 期待能拓展二維平面動作捕捉到三維空間動作捕捉系統。
3. 加強最後的輸出結果，不只是運動影像分割圖及資料的呈現而更能提供即時的動畫重繪模組，以達到更加的學習效果。

參考文獻

中文部分

文樺 (民 92)。以 FPGA 實現之即時影像邊緣偵測 IP 設計。長庚大學電子工程研究所碩士論文。

李榮哲 (民 88)。電腦多媒體輔助學習對運動學習的影響 - 以羽球發短球為例。國立體育學院運動科學研究所碩士論文。

何金龍 (民 89)。排球肩上發球電腦多媒體輔助教學系統之研究。國立體育學院運動科學研究所碩士論文。

何易展 (民 90)。細胞顯微影像之分割、追蹤與運動分析。國立成功大學資訊工程研究所碩士論文。

林榮岳 (民 88)。應用關聯式運算法於移動目標之視覺追蹤系統研究。國立彰化師範大學工業教育學系碩士論文。

林建發 (民 87)。跆拳道之屈膝下壓踢與直膝下壓踢之運動學分析與打擊力量比。中國文化大學運動教練研究所碩士論文。

柯鴻銘 (民 91)。光學式二維影像動作捕捉系統之開發研究 -

以臉部動作為例。國立體育學院運動科學研究所碩士論文。

侯君昱(民 85)。從影像序列建構虛擬實境中的人體動作。國立台灣工業技術學院電機工程技術研究所碩士論文。

施俊名(民 92)。影像自動分類與特徵擷取。長庚大學資訊工程研究所碩士論文。

梁健彬(民 92)。基因演算法應用在主動式輪廓曲線的參數調整。國立中興大學應用數學研究所碩士論文。

陳信亨(民 91)。蒲松梯度向量流之主動輪廓線模型。國立中興大學應用數學研究所碩士論文。

陳慶瑄(民 89)。學習社群對電子圖書館個人化服務之影響。國立中正大學資訊管理研究所碩士論文。

莊訓達(民 89)。加高式『類運動鞋』的生物力學分析。國立體育學院運動科學研究所碩士論文。

許樹淵(民 75)。運動技術指導原理。台北：協進圖書有限公司。

張朝舜(民 89)。以單台攝影機配合圓錐曲線理論發展網路

3D 場景中人物動作擷取技術。元智大學工業工程研究所碩士論文。

葉冠宏(民 92)。以卡爾曼濾波器實現人體動作訊號之雜訊消除。長庚大學電機工程研究所碩士論文。

羅徵祥(民 89)。電腦輔助網球發球技能學習系統開發之研究。國立體育學院運動科學研究所碩士論文。

羅仁宏(民 92)。以邊界分佈函數為基礎之分段主動性輪廓模型。義守大學資訊工程研究所碩士論文。

英文部分

Barbara, R. (1988). ' Mike, the talking head', *Computer Graphics World*, 15-17.

Canny, J .(1988). "A Computational Approach to Edge Detection," IEEE..

Carol , M. G., & Delle, M. (1983). “ Graphical marionette ” ,
Proc. ACM SIGGRAPH/SIGART Workshop on Motion,
ACM Press,
New York, 172-179.

Chenyang, X. & Jerry, L. P. (1997). “ Gradient Vector Flow: A New External Force for Snakes ” ,IEEE.

David, J. S. (1994). A Brief History of Motion Capture for Computer Character Animation,
http://www.css.tayloru.edu/instrmat/graphics/hypgraph/animation/motion_capture/history1.htm.

Digital , Analogue, F. & Filtering , S. (1990). IEE Colloquium on 25 May 1990

Laurent D. C.(1996). " Deformable Surfaces and Parametric Models to Fit and track 3D Data " , IEEE.

Laurent, D. C., & Isaac, C.(1993). " Finite-Element Methods for 2-D and 3-D Images " , IEEE.

Luppa, N. V. (1984). A practical guide to interactive video design.
White plains, New York: Knowledge Industry Publication, Inc.

Malladi, R., Sethian, J. A., & Vemuri, B.C. (1995). " Shape modeling with front propagation: a level set approach " , IEEE.

Miller, C. A., & Verstraete, M. C. (1996). Determination of the step duration of gait initiation using a mechanical energy analysis. Journal of Biomechanics, 29 (9), 1195-1199.

Otsu, N. (1979). "A Threshold Selection Method from Gray-Level histograms," IEEE.

Parker, J. R. (1997). Algorithms for Image Processing and

Computer Vision. New York: John Wiley & Sons, Inc., pp. 23-29.

Richard , H. (2001). Motion Capture in the Lara Croft 'Last Revelation' Commercial,
<http://www.vicon.com/animation/productions/laracroft.html>.

Scott , D.(1995). Motion Capture White Paper:
http://reality.sgi.com/jam_sb/mocap/MoCapWP_v2.0.html.

Tony, F. C. (2001). Member, IEEE, and Luminita A. Vese
“ Active Contours Without Edges ” , IEEE.

Thomas, W. C., Chapman, & Patla (1982). Aspects of kinematic simulation of human movement, IEEE Computer Graphics and Applications, 2(9), 42-50.

Vicon, M. C. S. (2001). Star Wars – Episode 1 The Phantom Menace,
<http://www.vicon.com/animation/productions/starwars.html>.

Xu , C & Jerry , L , P (1997). Gradient Vector Flow: A New External Force for Snakes,IEEE