

## 以 Kinect 為基礎的網球揮拍動作分析與應用

### Kinect-Based Tennis Swing Motion Analysis And Its Application

范姜逸敏  
淡江大學  
120780@mail.tku.edu.tw

張嘉雄  
淡江大學  
128857@mail.tku.edu.tw

謝景棠  
淡江大學  
hsieh@ee.tku.edu.tw

林駿維  
淡江大學  
xuprmpjo@hotmail.com

**【摘要】** 在本論文中利用微軟推出的 Kinect，提出一套以 Kinect 為基礎的網球揮拍動作分析與應用。我們透過 OpenNI 擷取的骨架座標，建立一套經由三維直角座標的座標系，並使用身體部分的關節點對身體軀幹做投影，視為揮拍動作辨識之特徵值。針對網球揮 TWELF 2014 拍動作之軌跡，並以此特徵值透過動態時間校正(Dynamic Time Warping)，可以算出時間序列的最佳化，以軌跡路徑做相似度的比較分辨各種揮拍動作，並透過角度判斷式來評估揮拍動作。

**【關鍵詞】** 網球揮拍動作分析與應用、動態時間校正

***Abstract:** Use Microsoft's Kinect in this paper, we release a set of detection and identification of Kinect with tennis racquet and swing movement of the evaluation study. via OpenNI retrieved skeleton coordinates, establishment of a three-dimensional Cartesian coordinate system, use the joints of the body and parts of the body torso to make projections, considered the swing motion identification eigenvalues. For tennis swing movement of the track, thus eigenvalues by the Dynamic Time Warping, it can calculate the optimal sequence of time, in order to trace the path similarity comparisons do distinguish between the various swing action, and through angles judgment to evaluate the swing-style action.*

**Keywords:** Motion Analysis, Dynamic Time Warping

#### 1. 前言

民國五十九年台灣加入國際網球運動總會 I.T.F (International Tennis Federation)後，以及傳播媒體的報導，硬式網球運動風氣漸盛，民眾也相繼轉為從事硬式網球運動，從事硬式網球運動人口逐漸增多，我國男子網球選手王宇佐、盧彥勳等人，以及我國職業網球女子雙打選手莊佳容、詹詠然、謝淑薇等人在國際賽事上大放異彩，再加上國人對休閒活動重視之下，網球運動人口有逐年興盛之勢。網球是一門入門門檻很高運動，如果你沒有請教練，網球是很難上手的，教練可以針對揮拍動作提供有效的姿勢糾正，然而這種學習方式需要昂貴的教練諮詢費用，相對認為入門門檻很高；教練建議一般初學者，一定要持之以恆練習揮拍動作，一天兩百下，分解動作讓你的身體記憶定型，讓正確的動作熟能生巧變成反射動作。初學者在自行練習時缺乏專業的教練在旁協助指導，自主練習時未必能達到動作的標準，本文提供網球揮拍使用的主動關節運動，建立一套網球揮拍輔助系統。

## 2. 相關研究

The Analysis and Retrieval of 3D Kinematical Motions[2]針對 3D 的人體運動分析為主軸，透過 VICON Motion Capture System (動態捕捉系統)所輸出的純 3D 的檔案"CSM"，作為實驗分析的資料依據。此篇作者是比對動作軌跡，利用補點運算，將三維檔案內的移動軌跡修正、再將其轉換成 VRML 格式之 3D 動畫運動，資料庫中大約分為四大類運動：排球、壘球、網球，與羽毛球，根據這些動作取出具特徵的關鍵動作，依據分類結果，再將關鍵動作加入權重值，接著比對關鍵動作之間的差異性並將其差異量化，透過數據資料可找出相似動作並以相似度做排序。

Motion Capture Data Analysis and Segmentation[9]，此篇研究是以中國武術太極拳為基礎，藉由一位太極拳教練，利用 motion capture 擷取出教練所打出來的標準動作，將這些資料作為資料庫裡面的內容。

Similarity Retrieval of Human Motion as Multi-stream Time Series Data[8]，此研究是針對兩組人體動作相似度的比較，在作者的研究過程中指出，DP 演算法可以很準確的算出時間序列的最佳化，也就是說可以針對單一軌跡路徑做相似度的比較，但是由於人體的關節甚多，需要考量的方面也需要更多，所以作者提出一套系統 Motion Rating System，透過此系統，教練所做出來的動作經過分析，可以用來比較學員們的動作是否有所不同。

Motion Retrieval and Its Application to Motion Analysis[7] 著重於人物的合成，需要給於系統一個起始點 frame 及一個結束點 frame 就能產出生一組很順暢的動作，此篇發展出一套找尋最佳路徑之演算方法。

## 3. 以 Kinect 為基礎的網球揮拍動作分析與應用

本系統是以偵測網球揮拍動作流程來設計，並在執行完動作後計錄各動作之資料，執行流程分為五個步驟：骨架追蹤系統、骨架座標系正規化、正反手拍辨識、揮拍軌跡辨識、提供揮拍動作計算與評估。

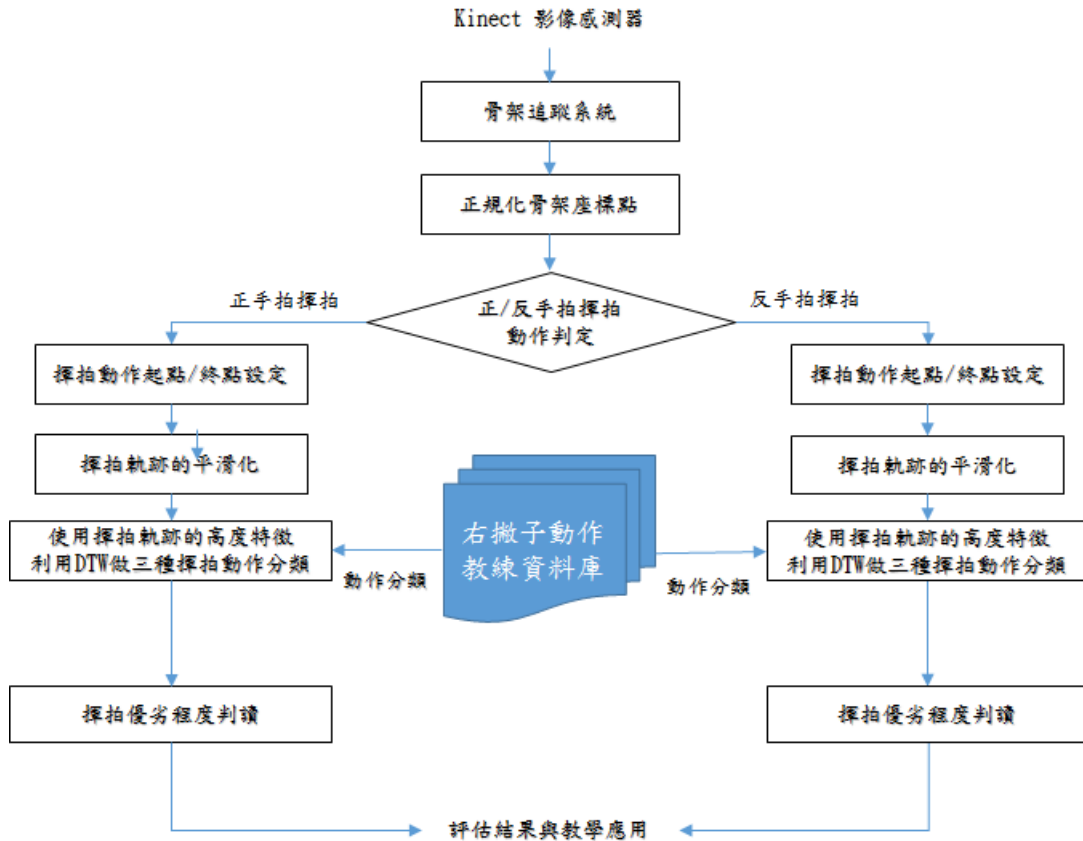


圖 1、系統流程圖

### 3.2. 座標系平移映射與正規化

本文使用三維直角座標幾何轉換部分的平移(Translation)來進行座標系的正規化。平移法是將圖形依固定的方向移動一段距離，其中 $v$  為平移前位置， $v'$ 為平移後位置， $dx$  是X軸的平移分量， $dy$  是Y軸的平移分量， $dz$  是Z軸的平移分量，並且以平移矩陣示之，將原三維直角坐標以齊次座標系矩陣表示，則平移後位置為「平移矩陣」與「原三維直角坐標之齊次座標矩陣」內積。如下圖所示。

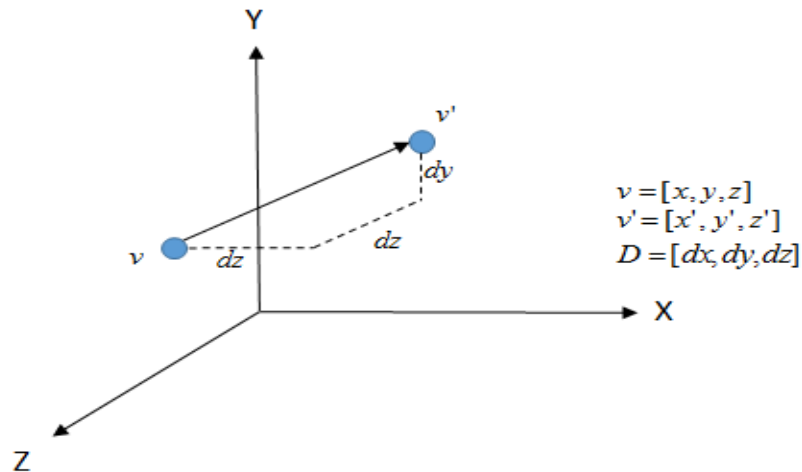


圖 2、系座標幾何轉換之平移法示意圖

本文採用三維直角座標幾何轉換中的平移部份，其計算方法如下：

$$\begin{aligned}
 v' &= v + D \\
 &= T(dx, dy, dz) \bullet [x, y, z, 1]^T \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)
 \end{aligned}$$

$$= [x + dx, y + dy, z + dz, 1]^T \quad (3-2)$$

### 3.3. 座標系平移映射與正規化

取得的關節點為(x,y,z)，x 表 x 軸、y 表 y 軸、z 表深度值之三維座標；由於每個使用者不會在同個位置做動作和身高不盡相同會去影響到動作辨識的準確，為了解決這些問題依所提到的每個人的骨骼關節點分佈比例是大致相同的，故本研究利用頭部關節點到軀體中心關節點之間的距離當作 1 單位長度 公式(3.3)，並以軀體中心關節點為原點把其餘 14 個關節點座標轉換以及正規化 公式(3.4)。

$$Dis_{HT} = \left\{ (x_{head} - x_{Torso})^2 + (y_{head} - y_{Torso})^2 + (z_{head} - z_{Torso})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

$$R_t(x, y, z) = (SK_t(x, y, z) - SK_{Torso}(x, y, z)) / Dis_{HT} \quad (3.4)$$

### 3.4. 正反手拍辨識

在進行網球揮拍動作識別前，本文設計出先辨識正反手拍的動作，透過使用者的右肩關節的特徵、左肩關節特徵與 Kinect 之間距離的特性判斷正反手拍，判斷出正反拍的好處能減少與資料庫之間的運算，透過轉向正手與反手的角度能夠減少骨架追蹤的遮蔽及抖動的問題，左肩關節與右肩關節深度差(D)，代表轉身移動量，判斷正手拍與反手拍，如(3.5)式。

$$\begin{aligned}
 D &= L\_shoulder[z] - R\_shoulder[z] \\
 &\begin{cases} D > TH, \text{Forehand} \\ D < -TH, \text{Backhand} \\ \text{Other} \text{Restart} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

### 3.4. 揮拍動作起點/終點設定

關於網球揮拍時期之偵測技術，本文為了達到每次取得的網球揮拍特徵為同一個起點位置開始擷取特徵，及同一個結束位置結束擷取特徵，作為一個起始點 frame，一個結束點 frame。然而正手揮拍以及反手揮拍起始點以及結束點會因為正手反手揮拍動作的差異，本文為正手揮拍、反手揮拍設計出各別適合的起始點及結束點。

#### 正手拍起始點

當我們要進行揮擊的動作，第一個動作我們會做拉拍的動作，我們利用這一點動作且使用手部關節與肩膀關節之間的特性，設計出揮拍的起始點，如(3.6)式

$$Forehand\_start = (R\_hand[y] - R\_shoulder[y]) > TH1 \tag{3.6}$$

#### 正手拍結束點

當我們揮擊的動作即將結束，我們會有一個收拍的動作，我們利用這個收拍的軌跡，去抓出收拍軌跡的折返點，我們利用的這折返點，設計出揮拍的結束點，揮拍的結束點公式如(3.7)式：

$$Forehand\_end = (R\_hand_x[t] - R\_hand_x[t-1]) > TH2 \tag{3.7}$$

$R\_hand_x[t] - R\_hand_x[t-1]$ : 前後frame右手關節點之水平距離

#### 反手拍起始點

此小節說明反拍起始點的位置，首先概敘反拍的揮拍動作，揮拍動作第一個動作拉拍，由於正手與反手拉拍的方式有些許不同，所以我們定義新的起始點。反手拍起始點公式如下：

$$Backhand\_start = (TorsoCenter[x] - R\_hand[x]) > TH3 \tag{3.8}$$

$TorsoCenter[x]$ : 軀幹關節位置

$R\_hand[x]$ : 右手關節位置

#### 反手拍結束點

此小節說明反拍結束點的位置，反拍結束點利用軀幹中心的特徵值與手肘關節特徵值之間的距離關係，反手拍結束點公式如下：

$$Backhand\_end = (Right\_elbow[x] - TorsoCenter[x]) > TH4 \quad (3.9)$$

*Right\\_elbow[x]*:右手肘關節位置

### 3.5. 揮拍軌跡曲線平滑化

使用 Dynamic Time Wrapping，此種作法的優點，是可以將動作軌跡間的延遲，當作考慮的範圍，因為人體在運動時有快有慢，在最早期的研究方式中，使用 Dynamic Time Wrapping 的時機，通常是用在語音辨識上，因為 DTW 概念簡單，以及精簡的演算法等，尤其是在於兩軌跡無法完全同步時，可以利用時間偏移性解決此問題。

### 3.6. 揮拍優劣程度判讀

我們經由揮拍軌跡的特徵，透過 DTW 方式找出資料庫裡最相似的動作後，我們針對找到動作進一步的分析解釋，提供使用者能更了解自己與教練的動作差異，在本節提出三個運動角度大小之判斷式：

**網球揮拍之右手肘角度**：定義右肩關節與右手肘關節與右手關節之間的夾角，使用這個角度來解釋揮拍角度大小之差異。判斷式如下：

$$\text{揮拍手肘角度大} = User\_ \theta_E(n) - Thecher\_ \theta_E(m) > TH5 \quad (3.10)$$

$$\text{揮拍手肘角度小} = User\_ \theta_E(n) - Thecher\_ \theta_E(m) < -TH5 \quad (3.11)$$

*User\\_ \theta\_E*:受測者從起點到終點，每個 frame 的右手肘角度

*Thecher\\_ \theta\_E*:老師從起點到終點，每個 frame 的右手肘角度

n:受測者從起點揮拍到終點 frame 數

m:老師從起點到揮拍終點 frame 數

**前腳之膝蓋角度**：當進行正拍揮擊，我們定義左臀關節與左膝關節與左腳關節之間的夾角，使用這個角度來解釋揮拍身體重心的高低。反之，當進行的是反拍揮擊，就會以右臀關節與右膝關節與右腳關節之間的夾角。判斷式如下：

$$\text{正手拍之左膝角度大} = User\_ L\_ \theta_K(n) - Thecher\_ L\_ \theta_K(m) > TH \quad (3.12)$$

$$\text{正手拍之左膝角度小} = User\_ L\_ \theta_K(n) - Thecher\_ L\_ \theta_K(m) < -TH \quad (3.13)$$

$$\text{反手拍之右膝角度大} = User\_ R\_ \theta_K(n) - Thecher\_ R\_ \theta_K(m) > TH \quad (3.14)$$

$$\text{反手拍之右膝角度小} = User\_ R\_ \theta_K(n) - Thecher\_ R\_ \theta_K(m) < -TH \quad (3.15)$$

$User\_R(L)\_θ_k(n)$ :受測者從起點到終點，每個 frame 的膝蓋角度

$Teacher\_R(L)\_θ_k(m)$ :老師從起點到終點，每個 frame 的膝蓋角度

n:受測者從起點揮拍到終點 frame 數

m:老師從起點到揮拍終點 frame 數

**後腳之膝蓋角度**：當進行正拍揮擊，我們定義右臀關節與右膝關節與右腳關節之間的夾角，使用這個角度來解釋揮拍時身體重心的轉移。反之，當進行的是反拍揮擊，就會以左臀關節與左膝關節與左腳關節之間的夾角。判斷式如下：

$$\text{正手拍之右膝角度大} = User\_R\_θ_k(n) - Teacher\_R\_θ_k(m) > TH5 \quad (3.16)$$

$$\text{正手拍之右膝角度小} = User\_R\_θ_k(n) - Teacher\_R\_θ_k(m) < -TH5 \quad (3.17)$$

$$\text{反手拍之左膝角度大} = User\_L\_θ_k(n) - Teacher\_L\_θ_k(m) > TH5 \quad (3.18)$$

$$\text{反手拍之左膝角度小} = User\_L\_θ_k(n) - Teacher\_L\_θ_k(m) < -TH5 \quad (3.19)$$

$User\_R(L)\_θ_k(n)$ :受測者從起點到終點，每個 frame 的膝蓋角度

$Teacher\_R(L)\_θ_k(m)$ :老師從起點到終點，每個 frame 的膝蓋角度

n:受測者從起點揮拍到終點 frame 數

m:老師從起點到揮拍終點 frame 數

#### 4. 實驗與教學應用

本章節將呈現我所提出之系統實際測試之成效，以及完整介紹實驗環境、正反手拍辨識、揮拍動作分析、實驗對象與實驗結果。

#### 4.1 實驗環境

本實驗使用筆記型電腦 CPU 為 Intel® Core i7-4600U 3.30GHz 記憶體為 8G，使用微軟所發售的 Kinect，如圖 4.1。彩色影像解析度為 640\*480，深度資訊圖解析度為 320\*240。取樣率皆為 30 frames/sec，而本系統為了確保擷取所有人體影像資訊，固定架設 Kinect 高度為 90 cm。

#### 4.2 實驗結果

我們針對不特定球員的網球揮拍動作辨識進行辨識率的統計，本文找尋了 10 位實驗對象，並非別在正手抽球、正手截擊、正手切球及反手抽球、反手截擊、反手切球這六種揮拍動作，各別進行 10 次揮拍進行統計辨識率；不列入計算的情況：骨架偵測錯誤，動作未揮擊完成。

表 4.1 本文系統針對正手揮拍動作之辨識率

		判斷結果			正確率
		正手抽球	正手截擊	正手切球	%
實際動作	正手抽球	80	5	15	80
	正手截擊	5	88	7	88
	正手切球	19	7	74	74
平均準確率					80.7

表 4.2 本文系統針對反手揮拍動作之辨識率

		判斷結果			正確率
		反手抽球	反手截擊	反手切球	%
實際動作	反手抽球	81	6	13	81
	反手截擊	2	90	8	90
	反手切球	17	4	79	79
平均準確率					83.3

#### 4.3 網球體育教學輔助系統



本文系統結合於教學輔助系統上，透過優劣程度判讀，能清楚的說明在起始點位置、擊球點位置、結束點位置的角度差異之關聯性。

### I. 起始點位置之角度說明

**手肘角度大:**代表拉拍位置較低，較不能應付各種高度的球路，但是對於球速較快的來球，時間容易掌握。對於初學者是容易學習，揮拍軌跡簡易較順暢。

**手肘角度小:**代表為拉拍位於高點，正常情況為此拉拍，較能掌握各種高度的球路。

**前腳之膝部角度大:**角度大的原因為重心過高雙腳於站立，出現此問題會造成擊球時身體不平衡，導致發力不足及不完整。

**前腳之膝部角度小:**一般情況不會發生的行為，較不符合人體力學，且造成身體的不協調，在球場上發生原因可能為來球在極低位置。

**後腳之膝部角度大:**此腳為發力的來源，以百分比來說明，在重心的擺放比例會為後腳 55%，前腳為 45%，當角度過大代表重心已轉移，身體運用的力量流失。

**後腳之膝部角度小:**如同前腳之膝部角度小，基本上是不會發生的行為。

### II. 擊球點位置之角度說明

**手肘角度大:**當此情況發生，會造成身體的不穩定，揮拍力量之分岔，無法正確的利用身體帶動旋轉。

**手肘角度小:**當此情況發生，意味著擊球點太靠近身體，力量無法施放，球拍拍面角度朝上，揮拍軌跡不正確。

**前腳之膝部角度大:**此情況會造成擊球時身體不平衡，造成擊球的不穩定性。

**前腳之膝部角度小:**一般情況不會發生的行為，較不符合人體力學，且造成身體的不協調，在球場上發生原因可能為來球在極低位置。

**後腳之膝部角度大:**此情況會造成身體起伏大，身體的不平衡。

**後腳之膝部角度小:**一般情況不會發生的行為。

### III. 結束點位置之角度

**手肘角度大:**進入到這個階段是不會發生。

**手肘角度小:**此情況是代表俗稱的 follow through 不完整，因此會少了方向性的控制。

**前腳之膝部角度大:**造成擊球時身體不平衡，導致發力不足及不完整。

**前腳之膝部角度小:**重心還保留在原本位置，會因來球的高低而改變。

**後腳之膝部角度大:**一般情況不會發生的行為。

**後腳之膝部角度小:**此情況也有可能因為來球的高低所發生。

## 5. 結論與未來展望

本系統使用 Kinect 所輸出的彩色及深度影像，透過 OpenNI 之骨架追蹤系統擷取人體骨架座標，將其正規化成以軀幹為中心之人體座標系，並將人體骨架點之(x, y, z)值視為對軀幹中心投影之特徵值，透過 DTW 的方法，辨識揮拍動作、解釋角度的關係。

經過本文實驗使用 Kinect 硬體設備搭配 OpenNI 之骨架追蹤，在網球揮拍軌進行動作辨識，然而正拍與切球容易辨識錯誤，原因是這兩種揮拍軌跡是雷同的，經實驗對象表示，經過一番熟悉以及研究教練的動作，了解教練的揮拍軌跡，模仿教練的揮拍方式，辨識的

成功率就會大大提升。這也是本系統主要的功能，透過對作比對呈現，能夠了解自己與教練揮拍動作之間的差異。

雖然本系統可對網球揮拍動作辨識，但對於在變形支肢體，還是會造成誤判之情形。未來要是能使用將骨架追蹤更精準之設備，在這網球揮拍動作議題上，能夠發展更多空間。本文只針對單手揮拍之動作研究，未來能使用將骨架追蹤更精準之設備，能夠多元化動作進行辨識，有效的發展更多空間。本文只針對右撇子揮拍動作進行分析，未來若能擷取左撇子之專業的揮拍動作作為資料庫，則能進行左撇子揮拍動作進行分析。

## 參考文獻

- 張量鈞，民國九十九年，基於立體視覺之手掌位移辨識系統，淡江大學電機工程學系碩士論文。
- 楊勝雄，民國九十五年，3D 人體動作之分析與檢索，淡江大學資訊工程學系碩士班碩士論文。
- Albitar, I.C., Doignon, C., Graebing, P.(2007), “*Robust Structured Light Coding for 3D Reconstruction*” IEEE 11th International Conference on Computer Vision, p.1-6.
- Elena Kostadinova, Liliana Boneva.Veselka Boeva “*An Integrative DTW-based Imputation Method for Gene Expression Time Series Data*”
- OpenNI, “*OpenNI, UserGuide*”, <http://openni.org/>
- Pasi Palojarvi. (2003) “*Integrated electronic and optoelectronic circuits and devices for pulsed time-of-flight laser range finding,*” Department of Electrical and Information Engineering and Info tech Oulu, University of Oulu.
- Shih-Pin Chao, Jui-Hsiang Chao, Chih-Yi Chiu, Tsang-Ken Lin and Shi-Nine Yang. (2004)“*Motion Retrieval and Its Application to Motion Synthesis*”, International Conference on Distributed Computing Systems Workshops
- Takeshi Yabe and Katsumi Tanaka. “*Similarity Retrieval of Human Motion as Multi Stream Time Series Data*” , Database Applications in Non-Traditional Environments, 1999
- Wen-Yen Chang. (2002)“*Motion Capture Data Analysis and Segmentation*”, 清華大學碩士論文。