

以程序式動畫實現 3D 瑜珈運動教學系統

Realizing a 3D Yoga Tutoring System with Procedural Animation

蔡函娟

國立政治大學 資訊科學系
台北市文山區指南路二段 64 號
TEL: (02)29393091 ext 62266
E-mail: eg9917@cs.nccu.edu.tw

李蔡彥

國立政治大學 資訊科學系
台北市文山區指南路二段 64 號
TEL: (02)29393091 ext 62266
E-mail: li@nccu.edu.tw

摘要

瑜珈是近年來風行的運動，而數位學習則是近年來的學習趨勢。然目前以數位學習方式學習瑜珈，多只能以文字、圖片、及影像呈現教學內容。本研究希望能以電腦動畫技術，結合瑜珈運動知識，提出一個創新的瑜珈學習方式。我們使用程序式動畫做為人物運動的產生方法，並加入腳本和階層式的參數設計概念，讓使用者可以根據自我的學習需求和不同的體能條件輸入適合的模型和動作腳本，達到客製化教學呈現的目的。我們將動作程序模組化，不同的瑜珈動作之間可共用程序，使程序達到好的重用性，動作庫的擴充也會更容易。我們邀請使用者來操作本系統，體驗在不同參數變化和角色設定下所產生的動畫效果，同時也以評估系統各方面的使用觀感，並和教學影帶做比較。實驗結果顯示使用者對本系統比教學錄影帶有更好的接受度。

Categories and Subject Descriptors

I.3.7 [Three-Dimensional Graphics and Realism]: Animations, Virtual Reality

General Terms

Algorithms, Design

Keywords

Computer animation, Yoga, Procedural animation, Tutoring System.

1. 前言

運動是現代人生活中不可或缺的一部分，過去的運動學習大部分都是課堂上由專業的老師來指導學生練習，但是有些人可能沒有時間參予課堂的學習或無法配合老師的時間，所以有越來越多人希望能在家裡透過其他方式做自我學習，例如透過模擬教學影帶來模擬老師的專業動作。大多數結合電

腦動畫的運動學習軟體或教學影帶都是以專業的老師為模型，無法針對不同的學習者來量身設計，且教學播放內容呈現方式單一，對使用者而言較無互動效果和回饋機制，在學習的效果上也會受到一些限制。

我們希望能夠依學習者的體能狀態來呈現合適的教學，若結合電腦動畫技術，可依照學習者的各種體能條件做為輸入，產生出即時的動畫，再加入與學習者互動的元素到教學系統中，這將會是一個具有創新性的研究議題。隨著電腦軟體和硬體的發展快速，使用電腦來製作人物動畫的技術也越來越成熟，目前以電腦來製作角色動畫的技術主要分為兩類，第一類是動作擷取(motion capture)，大多使用攝影機和傳感器等硬體設備配合，以擷取角色運動時的數個樣本資料，再利用這些樣本資料做一些動作的調整或是混合，以製作出的動畫。運動擷取所得到的動畫大部分只能在同類型的動作上做變化且較難做修改，當動作類型不同的時候，就必須要重新擷取新的動作來產生新的動畫，較難應用於不同類型的動作，而此種技術的優點是所獲得的動作直接擷取自真實的角色，所產生出來的動畫較為逼真擬人。

第二類是程序式動畫(procedure animation)，又稱為以知識為基礎的動畫(Knowledge-based Animation)，我們可以將人物的動作和運動設計為程序，使用機構學(Kinematic)或動力學來設計動畫程序，然後將這些程序串連成完整的動畫。程序式動畫的優點就是有通用性的動作程序重用性高，經過設計後可透過一些參數的調整來表現出不同變化的動作，但在擬真度的表現上，需要良好的動作知識基礎和模擬方法來提升，這在程序式動畫的設計上是一大挑戰。本研究使用 3D 電腦動畫的呈現方式，加入腳本設計來達到客製化運動教學的目的，我們選擇以程序式動畫為主要的動畫製作技術，並利用機構學方法有系統的模擬人物運動，選擇以瑜珈運動模擬為例，實作出完整的教學系統平台。

2. 相關研究

2.1 程序式動畫

機構學模型就是屬於動力學中的一種方法，本研究使用的主要技術就是程序式動畫中的機構學，但並無考慮現實物理特性的動力學方法，而是利用正向機構學(FK)和反向機構學(IK)來定義出符合自然的人物動作，以線性內插來計算動作與動作間的連續變化。在 3D 的空間，因多了一維的自由度，IK 在計算時會有 360 度的自由度，而得到有限組解，可

指定一個軸向或角度來決定其唯一組解，此軸向稱為 swivel angle。在我們的研究中參考了 D. Tolani 等人[1]的 IK 求解器，並在我們的系統中實作，可用來求出手、腳和身體的關節旋轉角度。以程序式動畫技術為主要的研究有像是 Y.-H. Lin [7]，將情緒風格等參數加入到人物的走路運動程序中，模擬產生出不同的走路效果。也有像是 S.-k. Chung[6]的研究，用 IK 最佳化的方法和腳印計畫來模擬出人物在平坦和不平坦的路徑上行走運動，大多數使用程序式動畫來製作的優點就是可以加入適當的參數以方便做及時的動畫調整。

2.2 人物角色參數化應用

在教學的虛擬實境 (VR) 的研究裡，常常會使用虛擬的人形角色，用來與使用者溝通和傳達訊息，我們稱為人型化對話代理人 (Embodied Conversational Agent, ECA)，為了更準確地表達人體模型，VRML97 定義了一個標準規範，將人形動畫以 VRML 語言標準化[3]，藉由 H-ANIM 標準，我們可以將人物模型資訊內嵌到 VRML 中，並可相容於任何可支援 VRML 的 Web 瀏覽器。在 H-ANIM 定義中，人形角色由線段節點和關節節點所組成，構成一個人型的階層式結構[4]。在我們的研究中參考用 H-ANIM 的定義方式，以 Hip 做為 root 點，向下分支到各關節，以階層式模型做為人物骨架定義。

2.3 瑜珈運動

瑜珈 (Yoga) 是一種起源於印度的運動，各式各樣的瑜珈動作可達到訓練人體肌耐力並且增進身體協調性的目的，不同的瑜珈動作針對不同的核心肌群做訓練，循序漸進的瑜珈學習亦可讓人身心都更加健康。多數的瑜珈動作會使身體延展到每個人所能達到的極限，不同的學習者在做同樣的瑜珈動作時，可能會根據每個人的體能狀況而有不同的結果，這也是為何我們選擇瑜珈運動來實作的原因之一，藉由此種運動特性，我們可對不同角色進行客製化的動作，更增加了自我學習的效果。瑜珈運動伸展強調的是持續緩慢的伸展為原則，屬於靜態伸展，是一種低強度、持續性、緩慢的伸展方式，多數的研究顯示瑜珈運動對身體柔軟度、肌力和心肺耐力之提升均有不錯的效果。根據 N. Belling[5]一書中將體位法姿勢歸類為坐或躺、站立、站立平衡、手的平衡、倒立和放鬆姿勢共六類。除了姿勢的分類外，又可將不同的體位法分為中立、後仰、側彎和扭轉動作。

3. 系統總覽

3.1 系統架構

為了讓 3D 動畫和運動教學結合，並實作出可實際使用的系統，我們規劃了一套完整的系統架構，圖 1 是我們的瑜珈動畫教學系統架構示意圖。我們將系統分為使用者介面 (User Interface)、3D 動畫產生器 (3D Animation Generator) 和 3D 動畫顯示器 (3D Animation Display) 三個模組。使用者介面將呈現系統功能所需要的按鈕和選單，並且處理由使用者所觸發的事件和腳本的輸入；3D 動畫產生器是我們產生動畫的核心，裡面將包含關鍵影格、低階程序、內插器等元件，並負責將高階的腳本語言所轉換出的低階語言，對應到程序模組或內插器中，計算出相對應的人物動作；3D 動畫顯示器負責播放產出的動畫，依照所指定的播放速度並且在動畫播放的過程中搭配適當教學提示，還可以手動的調整攝影鏡頭，將產出的畫面呈現給使用者。這三個模組之間的關係流程，會先由使用者介面輸入所想要的人物和動作腳本，亦可直接由選單按鈕選擇系統內建的人物或動作，輸入的腳本資料經

過解析器將高階的參數輸入給相對應的動作，並且轉換為低階程序所使用的程序參數，另外一種是透過介面功能，選擇不同的人物骨架和想要展示的瑜珈動作，皆會進入到 3D 動畫產生器模組中做計算，以產生完整的動畫所需要的所有影格，讓 3D 動畫顯示器使用。動畫產生器是我們系統的核心，其中包含了機構學、內插器、修正器和速度控制等模組，將在下一節中做更詳盡的介紹。最後所計算好的動畫影格，會由動畫顯示器做即時的播放呈現，在顯示的部分中還包含了教學提示，以增加使用者的學習效果，並且可以手動調整攝影鏡頭，做 360 度視角的觀看。

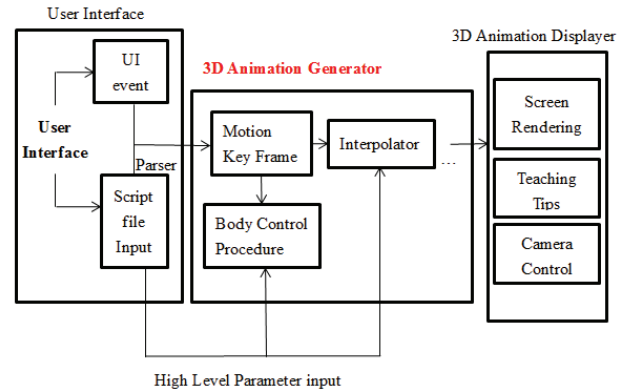


Figure 1. 瑜珈動畫教學系統架構示意圖。

我們設計了兩個腳本，以 XML 做為輸入的格式，一個是人物模型腳本，負責輸入有關人物的骨架和肉的模型，以及人物關節柔軟度的最大限制範圍，並加上了人物的平衡感和穩定度兩項參數來表現運動的特色，例如手腳的抖動或身體的搖晃。另外一個是動作腳本，動作腳本只負責輸入所想要做的瑜珈動作和動作的順序，再加上動作的教學提示。將上述兩種腳本分開，可讓使用者單獨切換人物模型和動作，更加符合教學系統的使用。我們將人物模型腳本的參數以階層關係表現如圖 2，高階的參數是讓使用者於腳本中做設定的，系統將決定參數所對應的動作，並且實際呈現於使用者所選擇要展示的動作中，最後將會依每個角色不同的參數設定來表現不一樣的動畫結果，這也是我們選擇程序式動畫來實作最主要的原因。

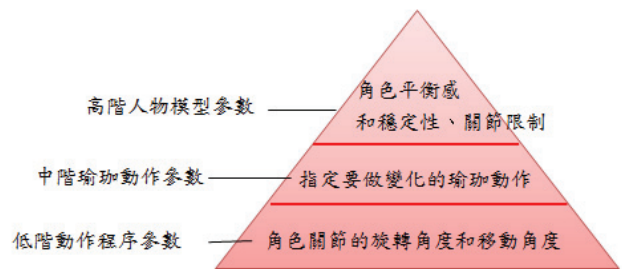


Figure 2. 輸入參數之階層關係。

3.2 動畫產生流程

設計動畫產生流程是我們系統的核心，此節將詳細介紹其中的模組與運作流程。3D 動畫產生器主要包含了三個模組，分別是動作關鍵影格 (Motion Key Frame)、內插器 (Interpolator) 和修正器 (Corrector)，如圖 3 是整個動畫產生流程架構圖。動作關鍵格是用來產生瑜珈動作的關鍵姿

勢，其中用了各種程序模組來實作，而內插器是為了將這些關鍵姿勢連接起來，成為完整的動畫，最後再透過修正器處理一些符合物理性質和不自然動作的修正。

關鍵影格為動作變化的分隔點，在設計動作時選取適當的關鍵影格會讓整個動畫的呈現更佳的流暢。我們參考了瑜珈動作的相關資料和文獻，定義出動作關鍵影格之後，再利用數學方法計算出每個關節的位置和旋轉角度，主要是使用 IK、FK 以及三角函數來求出符合關鍵格定義的動作，在 3D 場景中關節的自由度較多，所以也建立了以線性內插為基礎的 Lookup table 以解決 IK 中冗餘自由度的設定，使人物動作符合自然和常理性。每種瑜珈動作中包含好幾個關鍵格，而關鍵格是由數個不同的程序模組所組成的一個關鍵姿勢，每個程序都是獨立的模組，例如控制手轉動和控制腳轉動都是由獨立的模組來分別實作，模組中會使用到不同的計算方法和程序，當一個新的關鍵姿勢出現時，我們也只需要使用到相對應的程序模組來實現。從瑜珈知識中，我們決定了關鍵動作組成的一些規則，並實作所需要的低階程序模組。另外，我們又將不同的瑜珈體位法定義為不同的高階動作模組，每個體位法都是由數個關鍵格姿勢經過內插方法所得到的完整動畫，而關鍵格動作就是由獨立的低階程序模組所組成。這種模組的設計概念，當要加入新的瑜珈動作的時候，可用現有的程序模組來實作出不同的關鍵格動作，若有需要只要再加入一些新的程序模組即可達成，不需要全部重新再做一次，達到較高的程序重用性。

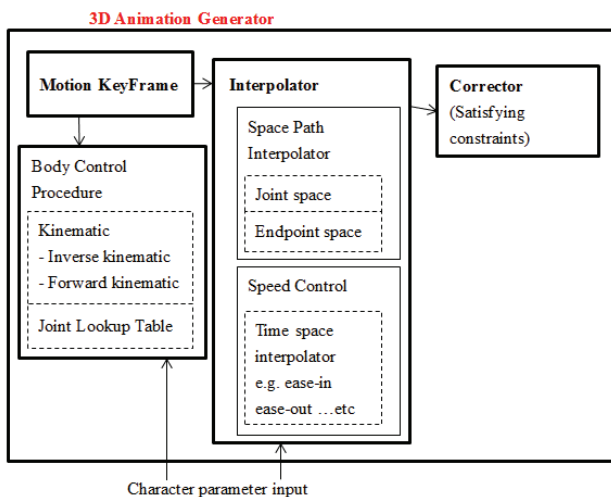


Figure 3. 3D 動畫產生流程示意圖。

瑜珈體位法的關鍵格姿勢產生出來後，接下來就要選擇適當的內插器來完成動畫的连接。內插的方法主要有兩種，第一種 Joint space 是屬於關節角度的內插法，指定前後兩個關鍵影格的關節角度做內插，可適用於全身的關節。第二種 Endpoint space 是屬於指定端點移動路徑的內插法，計算出要移動關節的移動路徑，路徑可能是直線或曲線，依照人自然的運動行為來做設計，然後照著這個移動路徑適當的使用 IK 計算出其他連動關節的旋轉角度，較常使用在手或腳的移動。在上述兩種內插法中都需要搭配時間這個變數，這個時間參數可分為直線和曲線的時間內插，在大部分的動作中，我們使用曲線的時間內插，使用緩進緩出的時間參數來實作出較為擬人的效果。由使用者所輸入的人物關節限制參數會在低階的 Body Control 程序中使用到，可用來決定關鍵格中

的動作細節，例如手舉起的高度或彎腰的角度等。而人物運動的特色參數，平衡感和穩定度會在內插器中所使用，用來計算手部晃動或站立不平衡的搖晃效果。接著我們還設計了一個修正器，是為了使人物運動符合物理性質，例如讓人的腳可以一直保持踩在地板上面，不會產生飄浮空中或是穿越到地面下的奇怪情形，也用於處理腳步滑動等不自然的動作姿勢。

3.3 關節限制和運動特色參數化

人物模型腳本中包含了數種人物關節的條件限制和運動的特色參數可做設定，以表現在瑜珈的動作中，如圖 4，以下為關節限制參數：

1. close_feet_pitch：雙腳併攏時，兩腳踝關節之間的間距。
2. bend_forward_max_angle：腰和背打直然後往前彎腰，所能達到的最大角度。
3. raise_head_angle：眼睛看向正上方時，抬頭的最大角度。
4. scoliosis_max_angle：腰背打直時，腰部側彎的最大角度。
5. raise_hands_max_angle：雙手伸直向上舉的最大角度。

另外我們還加入了人物平衡感和穩定度的運動特色參數，分別以 0~5 和 0~3 做為設定範圍，0 為最佳，設定值越大為越差。在設計動作時會決定這個動作是否需要較好的平衡感或穩定度來練習，或是這個動作是否會受到這兩項因素的影響而有變化，若這兩項因素會影響人物在做動作時的結果，我們將調整這兩個參數的設定值，並計算出相對應的動作效果，所以並非所有動作都會需要用到運動特色參數，而此兩項參數的設定將映射到特定的瑜珈動作程序和內插程序中。

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<Character>
  <skeleton>Medium_skeleton.bvh</skeleton>
  <mesh>Medium_skin.mesh</mesh>
  <Model_variable>
    <close_feet_pitch>8.5</close_feet_pitch>
    <bend_forward_max_angle>90</bend_forward_max_angle>
    <raise_head_angle>70</raise_head_angle>
    <scoliosis_max_angle>90</scoliosis_max_angle>
    <raise_hands_max_angle>180</raise_hands_max_angle>
    <balance>0</balance>
    <stability>0</stability>
  </Model_variable>
</Character>
```

Figure 4. 人物模型腳本範例。

4. 程式式動畫產生

4.1 動作關鍵格和動作程序

動畫製作的第一步是產生瑜珈動作關鍵格，我們設計了五種瑜珈動作做為教學的範例，分別為山式、英雄式一、英雄式二、英雄式三和三角伸展式，圖 5 為動作關鍵格的示意圖。

動作關鍵格由各種動作程序所組成，我們將動作程序分為手、腳、頭、腰和全身動作五類，每一類中又可再細分出多個低階程序如下：

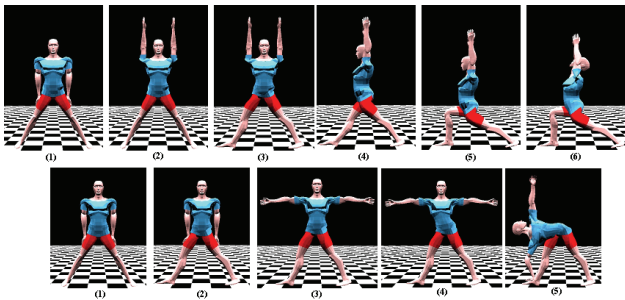


Figure 5. 英雄式一(上)和三角伸展式(下)的動作關鍵格。

1. 手：手的動作中總共有四種，第一種程序是 Rotate_Hands_by_X_axis (圖 6 左)，使雙手以 X 軸為中心旋轉，在瑜珈動作中英雄式一和英雄式三的舉手動作，就是套用這個程序。第二種程序是 Rotate_Hands_by_Z_axis (圖 6 右)，使雙手以 Z 軸為中心旋轉，在瑜珈動作中英雄式二和三角伸展式的手部動作，將雙手平行舉至左右兩側，上述兩種程序皆是以雙手同時控制，以單一軸心做旋轉，控制參數是雙手舉起的角度，以單一軸向為軸心而坐旋轉的方法應用在後面多數的程序中。第三種程序是 Droop_Hands，屬於手腕的動作程序，我們設計了一個程序模組來表現雙手自然垂下的狀態，可用來分別指定左右手腕的彎曲程度，此程序的參數為左手和右手腕彎曲的角度，例如在山式中的手腕動作就用到此程序。第四種程序是 Open_Arms，為固定的手部動作，以雙手向兩側張開平行於肩膀，手掌心向前，此程序無參數設計，為三角伸展式中所用到的動作程序。

2. 腳：腳的動作程序有 3 種，第一種程序是 Parallel_Open_Legs，使雙腳打開的站立動作，雙腳呈現平行張開的姿勢，參數是單腳張開的角度，此程序的參數會同時適用於左腳和右腳張開的角度。第二種程序是 Rotate_Legs_by_Y_axis，為雙腳旋轉動作，以和腳平行的 Y 軸為軸心，左旋或右旋，腳踝則是以和腳垂直的 X 軸為旋轉軸心，向上或向下移動，此程序的參數分別為左腳旋轉角度、右腳旋轉角度、左腳踝旋轉角度和右腳踝旋轉角度，透過這個程序可分別設定左腳和右腳不同的旋轉角度並調整腳踝的位置，腳踝的初始站立位置將和腳關節形成直角，雙腳旋轉之後需要經過參數調整腳踝位置來表現出踩在地面上的動作效果。第三種程序是 Close_Legs，使雙腳合併的動作，程序參數為雙腳合併的距離，指定雙腳合併時所需的距離後，此程序會計算出雙腳和骨盆的位置，來產生出此動作。

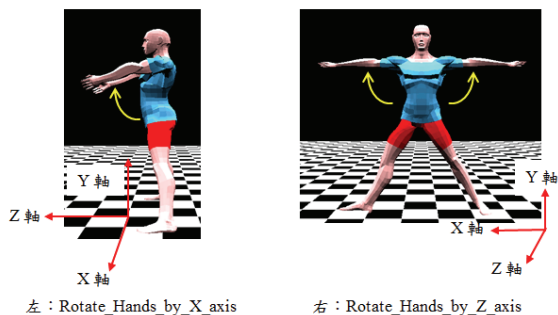


Figure 6. 手部動作程序示意圖。

3. 頭：頭的動作程序有 2 種，第一種程序是 Rotate_Head_by_X_axis，以 X 軸為中心旋轉，也就是低頭和

抬頭的動作，程序參數為抬頭或低頭的角度。第二種程序是 Rotate_Head_by_Y_axis，以 Y 軸為中心旋轉，也就是左右轉頭的動作，程序參數為轉頭角度。

4. 腰：腰部的動作程序有 2 種，第一種是 Rotate_Waist_by_X_axis，以 X 軸為中心旋轉，也就是腰往前和往後的動作，程序參數為彎腰的角度。第二種是 Rotate_Waist_by_Z_axis，以 Z 軸為中心旋轉，也就是身體面向前方做側身彎腰的動作，程序參數為側彎角度。

5. 全身動作：由數個條件組成或是為了要達到某個瑜珈特定動作所設計，歸類為全身動作。全身動作共有 4 種程序，第一種程序是 Rotate_Hip_by_Y_axis，為轉動髖關節並且決定左右腳的旋轉角度，在英雄式一的關鍵格 4 就是使用此動作程序，此程序的參數有三個，分別為髖關節的旋轉角度、左腳旋轉角度和右腳旋轉角度，先固定雙腳腳踝到腳趾的關節位置，以此做為已知條件，計算出髖關節的位置，再由 IK 計算出左右腳的關節旋轉角度。第二種程序是 Lunge 為弓箭步，在英雄式一的關鍵格 5 中使用到此動作程序，此程序會先從已知的左右腳踝的位置、腳的長度和前腳的膝蓋位置，利用三角函數和 IK 來計算出骨盆和左右腳關節分別的旋轉角度。第三種程序是 Sideways Lunge，動作為側身弓箭步，在英雄式二的關鍵格 5 會使用到此動作程序，此動作和弓箭步不同的是身體並無轉向，身體和腳在同一平面來完成側弓箭步，同樣的也是從已知的左右腳踝位置、腳的長度和右腳的膝蓋位置來計算出骨盆位置和雙腳關節的角度。第四種程序為 Stand_on_one_Leg，屬於單腳站立動作，在英雄式三的關鍵格 7 中會用到此程序，從決定站立的腳位置來算出骨盆的位置，並指定另外一隻腳伸直朝向身體正後方。上述的 4 種程序皆以下半身動作為主，上半身手和頭部的動作依然可以使用前面所提到的動作程序來完成。

Table 1. 關鍵格動作程序編號和名稱對應列表

動作分類	程序編號	程序名稱
手	(a)	Rotate_Hands_by_X_axis
	(b)	Rotate_Hands_by_Z_axis
	(c)	Droop_Hands
	(d)	Open_Arms
腳	(e)	Parallel_open_Legs
	(f)	Rotate_Legs_by_Y_axis
	(g)	Close_Legs
頭	(h)	Rotate_Head_by_X_axis
	(i)	Rotate_Head_by_Y_axis
腰	(j)	Rotate_Waist_by_X_axis
	(k)	Rotate_Waist_by_Z_axis
全身動作	(l)	Rotate_Hip_by_Y_axis
	(m)	Lunge
	(n)	Sideways Lunge
	(o)	Stand_on_one_Leg

我們將所有的動作程序分類整理後如表 1 所示，在每一個動作的關鍵格中分別使用到數種不同的動作程序，將每種瑜珈動作關鍵格和其搭配使用的動作程序列於表 2 中，從表中可明顯看到單一的關節旋轉動作在不同關鍵格中的重複利用性越高，關鍵格動作越是相近的，可利用的程序也較為一致，而少數特有的瑜珈全身性動作，在使用程序上的重複性

非常低，大部分都只有在特定的動作關鍵格中使用到。從表中也可看出大多數的動作程序都有很高的重用性，對新動作的擴充也較容易，不需要再重新設計所有的動作程序。

我們將所有的動作程序分類整理後如表 1 所示，在每一個動作的關鍵格中分別使用到數種不同的動作程序，將每種瑜珈動作關鍵格和其搭配使用的動作程序列於表 2 中，從表中可明顯看到單一的關節旋轉動作在不同關鍵格中的重複利用性越最高，關鍵格動作越是相近的，可利用的程序也較為一致，而少數特有的瑜珈全身性動作，在使用程序上的重複性非常低，大部分都只有在特定的動作關鍵格中使用到。從表中也可看出大多數的動作程序都有很高的重用性，對新動作的擴充也較容易，不需要再重新設計所有的動作程序。

Table 2. 瑜珈關鍵格所對應的動作程序

瑜珈動作	關鍵格	使用的程序編號
山式	1	(c), (g)
英雄式一	1	(c), (e)
	2	(a), (e)
	3	(a), (e), (f)
	4	(a), (l)
	5	(a), (m)
	6	(a), (h), (m)
英雄式二	1	(c), (e)
	2	(c), (e), (f)
	3	(b), (e), (f)
	4	(b), (e), (f), (i)
英雄式三	1	(c), (e)
	2	(c), (e), (f)
	3	(c), (l)
	4	(m)
	5	(a), (m)
	6	(a), (j), (m)
	7	(a), (o)
	8	(a), (h), (o)
三角伸展式	1	(c), (e)
	2	(c), (e), (f)
	3	(d), (e), (f)
	4	(d), (e), (f), (k)
	5	(d), (e), (f), (k), (i)

4.2 關鍵格之間的內插方法

兩個動作關鍵格之間，必須產生出連續不間斷的動作，以呈現動作的連續性。首先，我們會選擇兩個關鍵格之間有變化的關節來做內插，動作之間的內插又可分為節點空間中的內插 (Joint space interpolation)，主要是利用關節的旋轉角度 (Joint angle)，另外一種則是指定關節在空間中的位置來做內插，屬於目標位置的內插方法 (Endpoint interpolation)。每個關節在我們的動作資料檔中會分別記錄對 X 軸、Y 軸、Z 軸的旋轉向量，利用這三個旋轉向量，可計算成一個四元數 (Quaternion)，使用此四元數來處理空間中關節的旋轉內插。我們設計了四元數內插模組，節點空間中的內插只要指定內插的關節名稱、關節的起始角度、關節的目標角度、內插的起始關鍵格和結束關鍵格，即可透過 Quaternion 的內插

方法 $\text{slerp}[2]$ 逐步算出每個內插影格的關節角度，對於不同的內插影格皆可給定不同的內插權重。而目標位置的內插方法則是指定關節的目標位置，再利用 IK 算出關節的角度。目標位置就如同一個路徑，可以是直線或曲線路徑，我們也使用 \sin 函數來設計路徑曲線，透過這個路徑中的每一個目標點，再計算出關節對應的角度，此方法可用於抬腳這類的動作，使整個動畫呈現更加的自然流暢。

上述所介紹的內插方法，將內插出 N 個等份權重的關鍵格，動作在速度的呈現上將為等速，若想要動作更為擬真，還需加入時間的參數使動畫呈現上有不同的速度變化。我們設計了兩兩關鍵格區間的時間-距離關係圖 (圖 7)，實作五種速度控制模組，分別為等速運動、緩進緩出、緩進快出、快進緩出、快進快出。

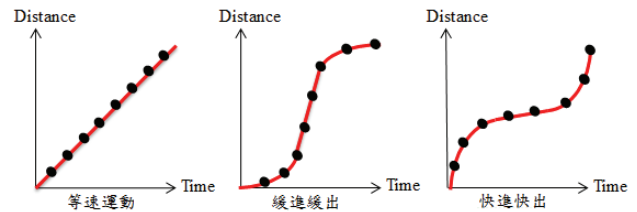


Figure 7. 速度控制示意圖。

在許多手和腳的內插動作中，我們會指定目標位置來計算出關節的位置和旋轉角度，其中主要是使用 IK 模組來求解。對人體關節 (手或腳)，IK 模組中除了必須指定目標的關節位置外，還需要指定一個冗餘的自由度向量，以決定手肘或膝蓋的方向，此向量我們稱為 Swivel angle，此向量將決定手或腳在 3D 空間中的唯一組解。我們設計了一個符合常理且自然的 Lookup table，用來指定手肘和膝蓋方向的 Swivel angle，以符合最自然的擺放位置。另外，在動畫產生的最後會進入碰撞修正的模組中，檢查是否有不合理的情形，像是人物超出到地板下或浮在空中，將會調整人物的位置，以修正至合法的目標位置。

5. 實驗結果和評估

5.1 系統介面與功能介紹

我們實作了一個實驗平台，名為 IMYogaMotion，並整合了 C++ 上開放的 3D 繪圖引擎 OGRE 來實現我們的系統，並使用 GUI 繪製函式庫 (QT) 來製作使用者介面，圖 8 是系統畫面，左邊是 3D 動畫顯示畫面，其中包含了置頂的運動教學提示，右邊是選單介面，分為上半部的事件功能選單和下半部的人物和動作選單。

事件功能選單由上至下依序是攝影機鏡頭切換按鈕、影格顯示面板、影格滑動條、影格移動按鈕、重播按鈕、人物重置按鈕和結束程式按鈕，按鈕的下方是選擇動畫的播放速度，有 2 倍快、正常和 0.5 倍慢三種速度可做即時的切換。攝影機鏡頭切換按鈕分為左、右、前和後共四個按鈕，可分別即時的切換到不同的人物視角，另外也可以按住滑鼠的右鍵，以左右拖曳的方式切換到左右視角，按住滑鼠的左鍵上下拖曳，可以切換到人物上下的視角，而按住滑鼠的中鍵拖曳，則是靠近和拉遠。影格顯示面板的地方會顯示當前播放的動畫影格，而下面的滑動條可手動的調整至想要播放的影格，在自動播放的情況下，手動調整影格會中斷自動播放。在影格移動按鈕的部分“<<”和“>>”按鈕可跳到前一個和

後一個的關鍵影格，而“<”和“>”按鈕會跳至前一個和後一個的影格。“PLAY/PAUSE”按鈕可播放和暫停動作，Re-play 重播按鈕則可重新再播放一次動畫。



Figure 8. 系統畫面。

人物和動作選單介面中，有兩個面板模式可供選擇，分別是 Advanced Mode 和 Simple Mode，在 Advanced Mode 中自行輸入角色模型腳本和動作腳本，可讓熟悉腳本的使用者來輸入符合自我角色的腳本，並客製化想要練習的動作腳本，以展示多種教學動作。而在 Simple Mode 中，將腳本輸入的功能隱藏，而是有三組系統內建的人物模型以供直接選擇，分別為 Thin and flexible、Heavy 和 Medium，點選後將即時載入角色。在這兩種模式下，都有瑜珈動作可讓使用者直接選擇並播放，內建的瑜珈動作有 Mountain、Heroic 1、Heroic 2、Heroic 3、UTTHITA Trikonasana 五種，選擇後按下“Loading and Play Motion”的按鈕後，就可看到動作的播放。

5.2 人物模型參數實驗

我們將以中等身材的人物骨架和肉做為此實驗的模型，依人物模型腳本中的各項參數，分別以單一維度來做調整，以動作圖或線圖來呈現參數對人物運動的不同變化。

5.2.1. 關節限制參數

1. bend_forward_max_angle：參數設定範圍從 45 度~90 度，動作變化如圖 9 所示。

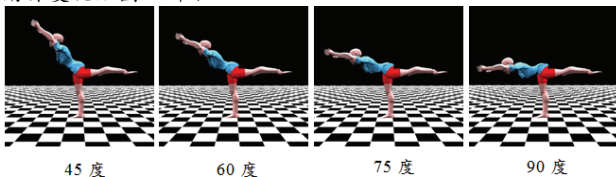


Figure 9. bend_forward_max_angle 的動作變化。

2. raise_head_angle：參數設定範圍從 30 度~90 度，動作變化如圖 10 所示。

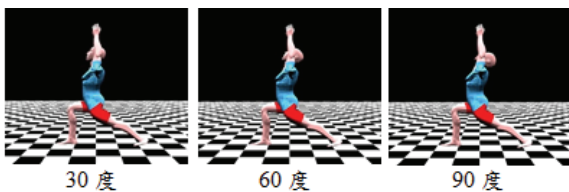


Figure 10. raise_head_angle 的動作變化。

3. scoliosis_max_angle：參數設定範圍從 60 度~90 度，動作變化如圖 11 所示。

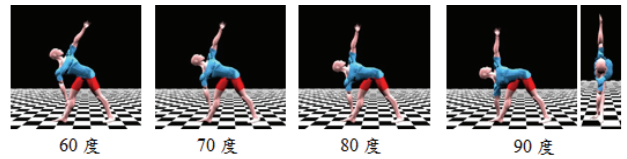


Figure 11. scoliosis_max_angle 的動作變化。

4. raise_hands_max_angle：參數設定範圍從 150 度~180 度，動作變化如圖 12 所示。

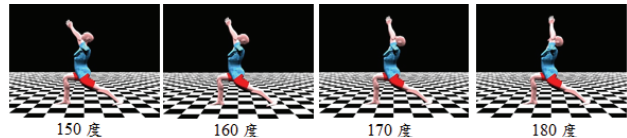


Figure 12. raise_hands_max_angle 的動作變化。

5.2.2. 人物平衡感和穩定度

人物平衡感的好壞通常會表現在一些需要平衡的姿勢上，例如單腳站立或單手支撐，我們也將平衡感當作人物的運動參數之一，實作於瑜珈運動教學中，主要表現在瑜珈動作”英雄式三”的單腳站立動作上。另外一個運動參數是人物動作的穩定度表現，可顯示出在運動的過程中，是否能夠準確的一次到達指定的動作位置，或是經過來回的嘗試後才能達到目標動作，我們將這個參數設計至人物的模型參數中，表現在雙手同時舉起和三角伸展式的腰部側彎動作上。

● 平衡感：參數設定範圍從 0~5，0 為平衡感最佳，5 為最差。我們將平衡感的變化實作於英雄式三的單腳站立動作，關鍵影格 6~7 之間，要準備以單腳支撐慢慢往上站起的動作，平衡感不好時會產生左右搖晃的情形。我們將平衡感最佳和最差的情況以線圖呈現來做比較，如圖 13。

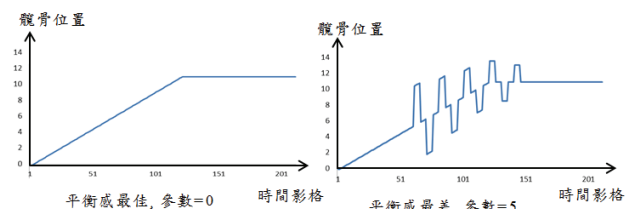


Figure 13. 比較動作平衡感最佳(左)和最差(右)，在 z 軸的放大曲線圖。

● 穩定度：參數設定範圍從 0~3，0 為穩定度最佳，3 為最差。人物穩定度的表現設計在往上舉手和三角伸展式中側彎的動作中。以舉手的動作為例，當人物穩定度越差時，在達到目前位置後，手晃動的次數和幅度就越大。我們將手腕在 x、y、z 軸上的位置以線圖連接，將穩定度最佳和最差的情況以線圖方式呈現，如圖 14 所示。當參數為 0，穩定度最佳時，手腕的位置在 y 軸和 z 軸座標上無晃動的情況，在人物向前舉手的動作中，手腕在 x 軸位置並無變化。在穩定度最差的表現上，可觀察到手部在 z 軸有前後三次的來回晃動情形，並且需要更長的時間才能使動作達到穩定狀態。從線圖中可看到主要的變化在 z 軸上，在最差的情形下，可觀察到手有來回 3 次的晃動情形，然後才穩定下來。

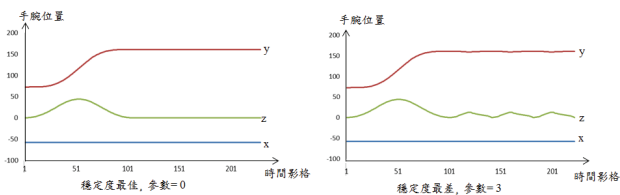


Figure 14. 比較動作穩定度最佳(左)和最差(右), 在 z 軸的放大曲線圖。

另外一個穩定度上的表現動作是三角伸展式，在腰部側彎的動作中，手在 y 軸上下的移動是最明顯的，所以我們將手腕在 y 軸位置的變化放大比較，如圖 15，同樣的時間軸上，當穩定度最差的時候，晃動的次數會越多並且需要花更多的時間才能達到穩定。透過此實驗，可明顯表現出平衡感和穩定度在瑜珈動作上的實際表現，由於瑜珈的動作大多數需要身體柔軟度和四肢盡量的伸展，所以我們將這兩項瑜珈運動的特色，參數化後實作於教學動作的表現上，這也是我們的系統特色之一。

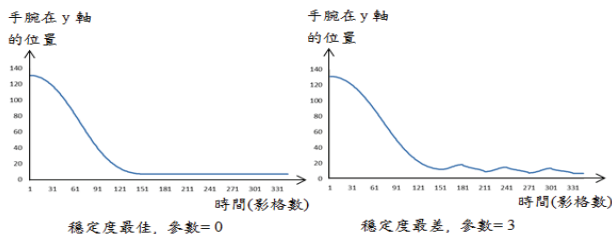


Figure 15. 動作穩定度最佳(左)和最差(右), 手腕在 y 軸的放大曲線圖。

5.2.3. 人物角色客製化實驗

由不同的使用者自行選擇適合自己的人物模型，來決定示範動作的人物關節限制和平衡感等特色參數是我們系統的貢獻之一，此節將以不同的人物模型為例，在我們的系統上展示各種瑜珈特色，並且擷取一些具有人物特色參數的瑜珈動作圖，表現不同的角色模型在同樣的動作中的變化。圖 16 為實驗的三種角色，分別為瘦且靈活、中等身材和較胖身材，並分別設定不同人物參數給這三個角色。角色一為身材較瘦並且動作靈活的女生，其柔軟度、平衡感和穩定度的設定都是最佳的，所做出來的瑜珈動作也是最標準的。而角色二則為一個中等體型的男生，除了前彎的動作柔軟度略差外，其他動作都可達到標準，而平衡感的參數設定是 3，穩定度參數則是 2，皆介於最佳和最差的中間，所以會有一些動作不平衡和搖晃的情形出現。而角色三則是一個體型較胖的男生，在柔軟度的設定上皆為最差的，從舉手的角度、前彎和側彎的角度都可以看出比前面兩個角色的表現還差，而平衡感的參數設定是 5，穩定度參數則是 3，皆為最差的表現，在動作展示時可看到平衡感不佳所產生較大的搖晃，且需要較長時間的晃動才能到達動作穩定狀態。

從圖 16 中左邊的第一列，動作是基本站立姿勢，可看到三個角色人物的身材由上到下是從瘦到胖，第二列是瑜珈動作山式，同樣的動作在不同的人物上依然可以完成。第三列是瑜珈動作英雄式一，此系列可看出前兩個角色在舉手的角度上是一樣的，但第三個角色的關節限制角度較小，手舉的高度也較低。第四列是瑜珈動作英雄式三，在腰部前彎的動作

中，只有第一個靈活的角色能做到最標準的前彎姿勢，角色二的彎腰幅度略小於角色一，而角色三則又更差。而最右邊一列是瑜珈動作三角伸展式，角色一和角色二在同樣彎腰角度限制的條件下，因為骨架比例的不同，角色一選擇右手碰觸腳踝的位置以支撐，而角色二則選擇碰觸地板以支撐，角色三是柔軟度最差的，手僅能碰觸到膝蓋的位置作為支撐。

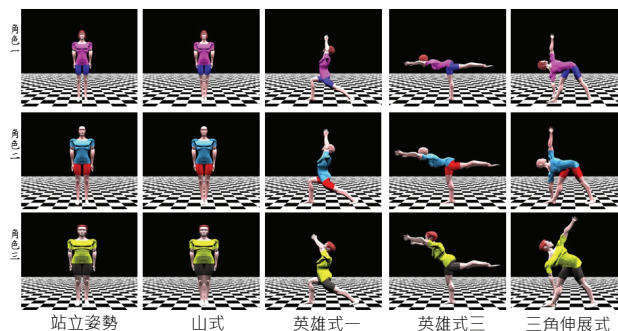


Figure 16. 客製化角色動作實驗結果。

從實驗，可看出人物相關的高階參數，如何呈現在瑜珈運動中，也可證明使用者即使輸入不同的骨架、人物模型、關節柔軟度、平衡感和穩定度等參數，依然可以呈現在同樣的瑜珈動作上，並且表現出符合客製化角色可達到的動作，只要輸入適當的人物模型腳本，就可以選擇不同體能狀態的人物角色，來展示符合客製化人物效果的瑜珈運動教學。

5.2.4. 使用者評估實驗

我們邀請了 25 位受試者來使用本系統，年齡介於 20~30 歲之間，其中 23 位是政大學生，2 位社會人士。我們以問卷方式來做使用者觀感評估和本系統功能的有效性調查，實驗目的在於讓使用者操作本系統，並且對系統的功能做評估，以及和教學錄影帶做比較。我們將使用者評估實驗分為三個階段，分別為瑜珈教學動畫系統操作體驗、客製化人物情境實驗、教學錄影帶與本系統教學展示比較實驗，針對三個階段的實驗，我們用五點量表的方式來設計問卷題目並請使用者填寫，分別從介面操作、系統功能和運動學習三個面向來做評估，並呈現每個階段的實驗方法和結果。

為了實驗的客觀性和操作一致性，我們將實驗的介面設計於 Simple Mode 下，皆以功能按鈕和選單來操作，不需修改腳本和載入腳本。在 Simple Mode 下，使用者可透過面板功能，操作攝影機鏡頭、播放速度、切換影格和關鍵格、選擇人物角色和動作等，實驗的系統介面如圖 8。以下介紹各階段的實驗方法：

1. 第一階段：瑜珈教學動畫系統操作體驗

本階段的實驗目的在於讓使用者熟悉和操作本系統，我們提供系統功能的操作指示請使用者操作，其中包括每一種介面功能的使用。針對系統介面和基本功能操作來進行評估，並了解使用者對本階段實驗的觀感。

2. 第二階段：客製化人物角色情境實驗

本系統預設有三種人物模型，分別為 Thin and Flexible、Medium 和 Heavy，角色在體型、骨架比例、關節柔軟度、平衡感和運動穩定度上有所不同，我們分別為每個角色描述一段符合的角色情境，本階段的實驗將請受試者在操作不同角色時，分別假設個別的角色情境來做瑜

瑜珈的運動學習，目的在於讓使用者配合角色情境，來觀察不同角色之間，所展示相同的瑜珈動作差異性，例如動作平衡感、柔軟度和運動穩定度。此階段請使用者分別選擇三種角色來觀看兩種瑜珈動作，觀看完畢後，將發放第二階段的實驗問卷作填寫，本階段問卷設計在於評估使用者對客製化人物和人物模型參數的辨別度，並且評估使用者對於客製化功能在瑜珈自我運動學習上的觀感。

3. 第三階段：教學錄影帶與本系統教學展示比較實驗

本階段的實驗目的在於比較教學錄影帶和本系統的瑜珈運動學習，將先播放一段瑜珈動作“英雄式二”的教學錄影帶，並在觀看完畢後請使用者先選擇一個較適合自己的角色，並且點選同樣的動作來做瑜珈學習，觀看後使用者可自由操作本系統，以體驗透過本系統學習瑜珈的樂趣。本階段操作完畢後，發放第三階段的問卷給使用者填寫，問卷中設計針對教學錄影帶和本系統的比較性問題，評估使用者對於瑜珈學習教材、教學內容和瑜珈運動學習效果上的觀感，最後針對本系統對瑜珈運動學習是否有幫助來做使用者評估，並設計了兩個開放題，請使用者填寫對於教學錄影帶和本系統的優缺點，以得到更多的使用者回饋。

Table 3. 瑜珈關鍵格所對應的動作程序

第一階段：瑜珈教學動畫系統操作體驗	平均標準差
系統的介面操作直覺	3.8
系統的介面和功能容易使用	4.2
系統介面的功能設計有助於瑜珈運動學習	4.02
第二階段：客製化人物角色情境實驗	平均標準差
在本階段的操作中，我可以分辨不同的人物情境	4.2
選擇不同的人物展示瑜珈動作時，我可以看出人物在關節柔軟度表現上的不同	4.08
選擇不同的人物展示瑜珈動作時，我可以看出人物在平衡感表現上的不同	4.04
選擇不同的人物展示瑜珈動作時，我可以看出人物在動作穩定度(是否可以一次到達目標位置)表現上的不同	4.2
使用者可選擇適合自己的人物角色，對瑜珈運動自我學習是有幫助的	3.68
第二階段：客製化人物角色情境實驗	平均標準差
相較於錄影帶教學，本系統可提供較靈活且彈性的瑜珈學習教材	4.08
相較於錄影帶教學，本系統可更有效地呈現符合使用者需求的教學內容	3.84
相較於錄影帶教學，使用本系統可得到較好的瑜珈運動學習效果	3.64
使用本系統對瑜珈運動學習是有幫助的	4.36

我們將三個階段的實驗結果以平均標準差計算出分數，整理於表 3 中。第一階段系統操作體驗的結果顯示，使用者對本系統操作面上的觀感皆大於平均值約一個級距，分數分別為 3.8、4.2 和 4.02，如表 3。使用者對本系統的操作和畫面視角的切換和操作的容易性上有正面的評價，並也建議地板

和背景略顯單調，未來可加入豐富的介面選擇，可更為貼近使用者學習運動的情境。

第二階段的實驗結果如表 3 所示，從評估項目 1~4 的結果中，可分析使用者對於本系統在客製化上的功能表現是否明顯，分析結果分別為 4.2、4.08、4.04 和 4.2 分，皆高於平均值 1 分以上，顯示使用者對於人物於角色上的區別，以及柔軟度、平衡感和動作穩定度的不同，可明顯分辨。而在實驗項目 5 中的分數為 3.68，高於平均值 0.68，從使用者的建議中我們分析可能的原因，由於客製化人物的表現，在於呈現不同角色的運動結果，但卻沒有提供客製化的教學教材，部分使用者也懷疑客製化人物是否可達到動作的標準。另外，也有少數使用者對於三種角色在動作的表現上覺得不夠明顯，由於實驗的觀看方式是單一角色分別觀看，而非三個角色同時觀看，對使用者而言較為不便。未來系統在瑜珈動作上可加入呼吸起伏，可增加人物的擬真性和學習成效。

第三階段的實驗結果如表 3 所示，評估項目 1~3 是比較性問題，對於瑜珈的學習教材、教學內容和瑜珈運動的學習效果上，本系統與教學錄影帶的比較分數為 4.08、3.84 和 3.64，結果皆高於平均值。而第 4 個評估項目的分數是 4.36，可看出使用者對使用本系統來學習瑜珈運動，接受度是較為明顯的，但在比較性問題上分數略低，根據使用者所提供的優缺點建議，我們分析其中可能的原因。大部分的使用者認為教學錄影帶的優點是真人示範教學，對於動作覺得較為自然、親切、逼真且流暢度較佳，在學習的時候較有臨場感。而缺點的部分，錄影帶在觀看上無法看到每個視角和拉遠近，在操作上沒辦法放慢速度且不容易切換到想要觀看的影格和關鍵格，在功能上無法選擇不同的人角色和設定柔軟度，在動作學習上，錄影帶的示範者動作精確，較無法適用於每個學習者，且無法知道自己和影片中的動作差異多少。教學錄影帶大部分的缺點同時也是我們系統的優點，大多數的使用者對本系統在視角的切換、操作播放的彈性和客製化人物功能上的表現有好的評價。使用者覺得本系統的缺點部分，在人物方面，大多數使用者覺得 3D 人物角色的動作較為僵硬且面無表情，在呈現上也較不逼真，臨場感較差，本系統於角色擬真度上的表現可再做加強。在本系統操作上，縮放功能可增加歸零遠近或快速調整比例尺功能，播放速度的選擇較少，需要時間學習系統的使用。在教學方面，可備註一些學習重點，像是大家常常會犯的錯等，對學習會更有幫助。在人物角色方面，人物的特性設計較為死板，可有更多元的選擇，對於角色的身高和體重沒有詳細註明等，皆是可以再做改進的地方。

在受試的實驗者中，有部分的使用者是對於瑜珈有學習經驗的，從他們的意見中也發現到，在瑜珈的學習教材部分，可以提供難易度的選擇，讓使用者可以根據不同的教學內容來做漸進式的學習。並且使用者也建議，瑜珈在呼吸上的表現對於教學學習是很有幫助的，未來我們可以加入人物呼吸的運動效果，搭配教學的指示將更有助於瑜珈運動學習。透過以上實驗結果的分析，整體來說，使用者對於本系統在各方面都有一定的接受度，各項的評估結果皆高於中間值。同時我們也得到了很多使用者的建議回饋，讓我們知道系統設計上還有哪些可改進和加強的地方。

6. 結論與未來發展

在本論文中，我們以 3D 動畫引擎為基礎發展平台，結合瑜珈運動知識，實作出瑜珈運動教學系統。結合程序式動畫技術 IK、FK 和 Lookup table，設計出各種動作子程序，利用子程序之間彈性的組合，完成各種需要的瑜珈動作教學。透過模組化的設計概念，使我們的系統有更好的擴充性。為了讓不同的使用者都可以量身訂做合適的運動學習，我們增加了客製化人物的功能，並且可透過腳本來調整運動相關的參數和不同的動作學習腳本，也加入了晃動和搖晃等具有瑜珈特色的運動效果。從實驗中，可看到人物的各項參數如何實作於瑜珈動作中，以及對於瑜珈運動的影響。從人物角色客製化實驗中，證明本系統可適用於不同體能狀態的角色。最後，從使用者評估實驗的結果中顯示各方面的分數皆高於中間值，表示使用者對本教學系統在介面、功能和瑜珈運動學習上的接受度是較佳的。

從使用者的評估實驗中，我們得到一些回饋意見，未來可改進本系統，在系統的操作介面的部分，可使用圖示按鈕讓操作更直覺，增加放大縮小比例尺功能和更多的速度選擇，顯示器背景和運動場景也可在更美觀。在人物角色方面，模型和動作的擬真度可再加強，也可再加入更多人物細節的參數。在系統功能方面，可以增加有助於學習的運動參數，例如呼吸和節奏等，有助於提升人物的擬真度和運動的逼真感。在瑜珈動作的實作部分，目前是以程序式動畫為產生方法，未來也可以搭配動作擷取資料，以取得真實人物的動作資料作為分析，來加強程序式動畫的動作擬真性和增加更多的動作變化。目前動作庫中的動作只有五種，未來可利用程序式動畫擴展性佳的特性，增加需要的程序來實作出更多的瑜珈動作，使本系統在動作學習上更加的豐富。在教學方面，可加入客製化的教學教材，以循序漸進的方式讓使用者學習，還可以將多種動作加以組合出有變化的動作，並搭配學習時間，使學習的內容更加多元，並且加強學習的成效。

本研究針對瑜珈運動來實作，透過我們的研究方法，也可以擴展到不同的運動學習，像是跳舞或游泳等，以簡單的肢體

程序模組為基礎，可組合出更多種複雜的動作和運動。未來也可以結合硬體設備，配合偵測人物動作的感測器，以壓力或燈光等方式，於使用者運動時給予適當回饋，對於運動學習會更佳有幫助。

7. Acknowledgements

本研究在國科會專題計畫 (NSC-101-2221-E-004-014) 資助下完成，特此致謝。

8. REFERENCES

- [1] D. Tolani, A. Goswami, and N. I. Badler. Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs. *Graphical models*, vol. 62, no. 5, pp. 353-388, 2000.
- [2] E. B. Dam, M. Koch, and M. Lillholm. *Quaternions, interpolation and animation*. Datalogisk Institut, Københavns Universitet, 1998.
- [3] H. A. W. G. W. D. Consortium. H-Anim: Specification for a Standard VRML Humanoid, version 1.1. On-line standard proposal <http://ece.uwaterloo.ca/h-anim/spec1>, vol. 1, 1999.
- [4] J. Gu, T. Chang, I. Mak, S. Gopalsamy, H. C. Shen, and M. M. F. Yuen. A 3D Reconstruction System for Human Body Modeling. *Proceeding of CAPTECH' 98: Modeling and Motion Capture Technique for Virtual Environment*, pp. 229-241, 1998.
- [5] N. Belling, and 王俐之. *瑜珈慢慢來*. 台北: 相映文化, 2005.
- [6] S.-k. Chung, and J. K. Hahn. Animation of human walking in virtual environments. In *Proceedings of IEEE Computer Animation*, pp. 4-15, 1999.
- [7] Y.-H. Lin 2009. *Designing Parameterized Procedures for Real-Time 3D Figure Animation with Affective Expression*. Master's Thesis, Computer Science Department, National Chengchi University, Taiwan.