

# 三維二足角色之動作反應與平衡控制

蔡八澍

國立嘉義大學資訊工程學系  
[s1000423@mail.ncyu.edu.tw](mailto:s1000423@mail.ncyu.edu.tw)

盧天麒\*

國立嘉義大學資訊工程學系  
[tclu@mail.ncyu.edu.tw](mailto:tclu@mail.ncyu.edu.tw)

## 摘要

隨著互動多媒體及電腦動畫應用的普及，擬真的三維虛擬角色動作的需求已日益漸增，使用較複雜模擬與控制的技術來產生角色動作更是目前國內外產學各界的研究開發主流。首先本研究利用開放動態物理引擎(Open Dynamics Engine)建置二足骨架中包含物理屬性的虛擬角色，其目的為藉由物理引擎來調整及計算動作資料庫的來源參考動作，使動作能夠順暢且合理的在各種互動式環境中執行，接下來本研究使用 PD 控制器(Proportional-Derivative controller)追蹤特定的來源參考動作，此時並加入平衡性的控制，藉由考慮環境中各種外力與地面接觸力的關係，並施以關節力矩來修正受到外力後的角色動作。此外，本研究對角色動作追蹤的關節數量與範圍進行合理的活動限制，避免一些導致動作不同步的因素與開發環境上的編輯差異，實驗結果顯示本研究所提出來的動作平衡協調機制，能在適當的時間進行動作追蹤和平衡反應，使二足角色不論在遭受外力時其受力與否，都能在更少的時間成本上模擬出較真實的角色動作，並適用在各類型的互動多媒體及電腦遊戲動畫的應用上。

**關鍵詞：**角色動畫、動作追蹤、PD 控制器、反應動作、動作平衡。

## 1. 前言

三維虛擬角色動作與反應，在現今的研究與應用中佔據重要的地位，而其中平衡的考量也是重要的一環，更是與環境互動所會面臨的挑戰之一。

### 1.1 研究動機與目的

在目前的數位內容產業中，無論是事先編輯製作的動畫或是即時互動的遊戲環境，都需要用到三維虛擬角色動作的模擬與控制的技術，隨著需要的動畫環境不同，適合的模擬與控制技術能讓動作更為擬真且自然，更能提供

動畫師便利的編輯環境，讓使用者融入其中，因此虛擬角色動作方面的研究其重要性不言而喻。角色動畫以兩種來源為主，一種是動畫師手調的關鍵影格資料，另一種為動作擷取器所捕捉的動作資料。然而在虛擬環境中，這些原始資料未必能符合於新的需求，近十年來，以動作擷取器的資料和手調動作資料結合動作模擬的研究皆有許多學者投身其中，其目的在於調整與修改這些資料庫的動作，使動作能夠順暢且具合理地在新的環境中執行，這些技術適合作為動畫師的動作編輯工具，也可用於虛擬環境模擬系統；隨著時間的演進，即時性的控制模擬、甚至與環境、物件的反應與互動也越來越受重視，目前的熱門的動作研究大多著重於互動操控和反應動作發展，因其實用性與便利性更勝過去單純對角色進行動作模擬；但也因此，模擬與控制的技術涉略需廣泛，如物理學、運動學、生物學、機器人學，皆可在其包含的範疇之中，也造就動作模擬技術的高門檻和諸多挑戰。近年來的動作領域相關研究，以物理參數或物理屬性為基底的方式越來越盛行，原因在於物理方法的運算能夠掌握虛擬角色的運動性能，並可以在動態的環境中運算對於當下狀況所產生的結果。而本研究也建構在一個以物理為基底的動態環境中，並藉由來源動作的資料對於模擬動作時其平衡性作進一步的考量，並與環境做不同的互動。

### 1.2 研究方法與步驟

在本研究中，我們使用了數個步驟完成系統的架設。首先從來源檔案讀取角色資訊，為角色設定物理參數，例如質量、旋轉角度等。接著計算虛擬角色動作，使用來源檔案的動作資訊建立動作格式，然後利用物理引擎(Open Dynamics Engine)建立虛擬環境，虛擬角色追蹤來源檔案中動作的流程中，利用 PD 控制器(Proportional-Derivative controller)追蹤方法，以目前模擬的關節角度與關節速度、與來源檔案中角色關節角度及關節速度作為參數，計算出追蹤所需的力矩，以追蹤來源動作。之後使用本研究提出之平衡方法維持角色動作追蹤之

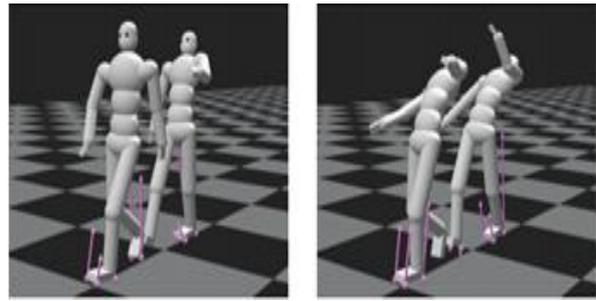
速度，並將外力的干擾盡力導回正確的動作。最後則是將虛擬角色受到追蹤力矩之後的狀態，利用物理引擎中的正向運動學方法模擬，計算出下一時步後的虛擬角色狀態。

## 2. 相關工作

在目前的數位內容產業中，無論是事先編輯製作的動畫或是即時互動的遊戲環境，都需要用到三維虛擬角色動作的模擬與控制的技術，隨著需要的動畫環境不同，適合的技術能讓動作更為擬真且自然，更能提供動畫師便利的編輯環境，讓使用者融入其中，因此虛擬角色動作方面的研究其重要性不言而喻。

### 2.1 平衡控制(balance control)

二足生物的平衡在模擬角色運用上是非常重要的部分，起初機器人學的平衡開始於[32]零力矩點(zero-moment point)的運算，之後也有提出控制質心加速度可以達到控制人體平衡的效果，之後有許多研究以質心(center of mass)、壓力中心(center of pressure)、零力矩點為基礎，研究許多維持平衡的方法。比如[5]整合了這些基礎並加入了角動量的概念使平衡更加完善，[12]提出使用一個簡單的模型來對外力的干擾做出反應，因為簡單的模型可以對於運動重要的組成部分做觀察並且能在失去平衡前保持暫時平穩的姿勢，[11] [1] [6]則是在參考來源動作與平衡之間的模擬以方程式來控制兩者的關係得出最佳化的處理方法，並對於地面的接觸力也結合摩擦力區域(friction cone)與零力矩點而得出限制範圍並做處理等等，皆是平衡的諸多運用。而[20]採用動量控制的方法將線性動量以及角動量做調整來控制質心和壓力中心，這種動量的控制將全身的平衡狀態較明顯的反應出來。控制器基於物理性質與模擬的角色，透過關節力矩計算出所需的線性變化與角動量，此方法能保持平衡並且糾正可能導致不平衡因素的干擾以及外部環境中的變化。除此之外，這種技術也能適用於非人形的模型。[37]則是著重於參照來源動作的軌跡，配合時間上的切割，並以角動量去做平衡的調整，優點是由於取得大量的來源動作，因此可以令許多不同的動作姿勢保持平衡以適應不同的環境，如圖一所示。



圖一、動作姿勢依角動量調整來保持平衡[Ye and Liu 2010]

### 2.2 二足控制器(biped controller)

對於二足模型的模擬，開發控制器來推動模擬成果是相當有必要的。一開始，[26][27][17]對於二足生物的動作進行分析並最佳化，合成出自然的新動作，但這些研究是屬於內部設定的部分，無法直接對於動態的環境做出模擬。這個問題在最近的研究已取得顯著的進步，主要是控制器以動態調整的方法來模擬動作的運動，其具有的優點是可以配合環境互動時調整之參數合成出新的動作，並藉由回饋(feedback)的方法，不斷的適應模擬的真實世界，如[39] [15]，只是[15]在路徑上額外加入一些因素的考量，例如創建運動控制器捕獲路徑上的數據並加強學習，確保迴避障礙物等等。[21]以非線性的控制系統從動作軌跡資料庫捕捉數據，應用到三維的動作模擬上，確保與來源動作的一致性。另一方面，[36]提出自動從頭開始創建控制器，無須設定人工參數或是使用運動數據，此方法著重於控制方法在模擬過程中不會受人為因素影響，這種控制器適用於二足動物互動的環境以及設計遊戲上的使用。近年來[34] [35][38]，對於參數上的設置，皆採用最佳化的計算，配合地形與限制條件，自動產生相對應的參數，優化了整個控制器的系統。[31]則是採用兩足生物空間狀態的控制器來控制平衡回饋機制，此方法除了能將從動作庫擷取的動作模擬出來之外，也能將模擬的動作放在一個新的環境，進行一些參數的調整，就能適應地形上的變化而進行動作模擬，如圖二所示。



圖二、最上層是 Motion capture 擷取的動作；中間層是控制器模擬出來的結果；底層是配合環境再次模擬的結果[Vondrak et al. 2012]

### 2.3 資料驅動 (Data-driven)

大多數在二足控制器領域的動作都會以資料庫的動作作為來源，並透過一些預測或分析的機制訓練出適合的動作[2][40][28]，近年來許多研究使用了豐富的動作資料來完成一連串的連環動作[19][14][33][18][7][16]。[19]用隨機取樣的方法來處理複雜的地面翻滾動作，使正在模擬的動作能夠接近來源動作，[14]將大量的動作透過記錄步伐資訊的前置處理與編輯，使其能夠在即時模擬中進行動作串接與下達不同動作指令，[33][18]皆使用了隨機程序先行將動作處理後，爾後分別透過力場建置、降維等不同的階段，使得大量的原始動作能夠有自然的動作展現。[16]提出了類似跑酷運動的高複雜度地連續動作模擬，其將來源動作經由訓練的方式，將來源動作大幅的豐富化，使得後續的動作可以做出大量的動作變化與動作串接。[7]則是特別將資料驅動的方法使用在手部姿勢上，透過自動分析與合成相似動作來產生所需的手勢動作。使用資料驅動的研究有個先決性的前提：必須要擁有大量及豐富的來源動作，[14]是一個很好的例子，Lee 的方法不需要最佳化程序，只需在前置作業進行簡單的動作切割便能即時的進行動作模擬，而[18]雖然沒有太多的來源動作，但透過訓練的過程後，使其能以資料驅動的方式進行變化性的動作模擬。

### 2.4 機器人學的延伸(Robotics)

在機器人領域的相關研究中，無論是四足生物或是二足的類人控制器，一直都是許多 3D 動作研究的先驅[25][24]。動作規劃在機器人領域中是一個成熟的技術，從路徑規劃方面 [30]，到擁有時間限制的軌跡的規劃，也從運動學發展到動力學，並可接收外力干擾[22]。在圖

學領域中，[3]將二足步伐路徑規劃至系統裡，[4]則模擬四足角色的多種運動技能，[18]以路徑規劃的概念來最佳化角色與障礙物距離所需的前進速度。倒立擺模型(inverted pendulum model, IPM)為另一個由機器人領域先行運用於二足控制的概念[23][10][8]，早期的 IPM 主要應用於步伐與地面接觸時，兩條腿的姿勢以及角色重心速度的調整，進而模擬出人類行走的動作，[9][29][13]則將倒立擺模型用於平衡的角色的維持，使得虛擬角色能夠與環境產生更多的互動卻不失平衡，也能夠處理較大的外力干擾，圖五展示了倒立擺與角色對應的關係。以 IPM 為主的控制器靠著速度調整來接近來源動作，省略了一些需要微調參數的麻煩，降低了控制器的複雜度，但相對地，受限於有限的屬性參數，使用 IPM 不能夠產生與來源動作相異過大的動作，反而成為其拘束性。

## 3. 虛擬角色的建置與動作追蹤

本研究中，虛擬角色將來源檔案的格式讀取，擷取出虛擬角色的骨架及動作資訊，並儲存成自訂義之動作格式。藉由物理引擎建立角色模擬之環境並設定其基本的環境參數，利用擷取的資訊在虛擬環境中建置虛擬角色。建置完虛擬角色之後，本研究將目前模擬的動作與來源檔案中的角色動作比較，計算動作追蹤應施加的力矩

### 3.1 虛擬角色設定步驟

本研究中將從來源檔案取得動作資訊步驟上大致分成五個部分進行分析。

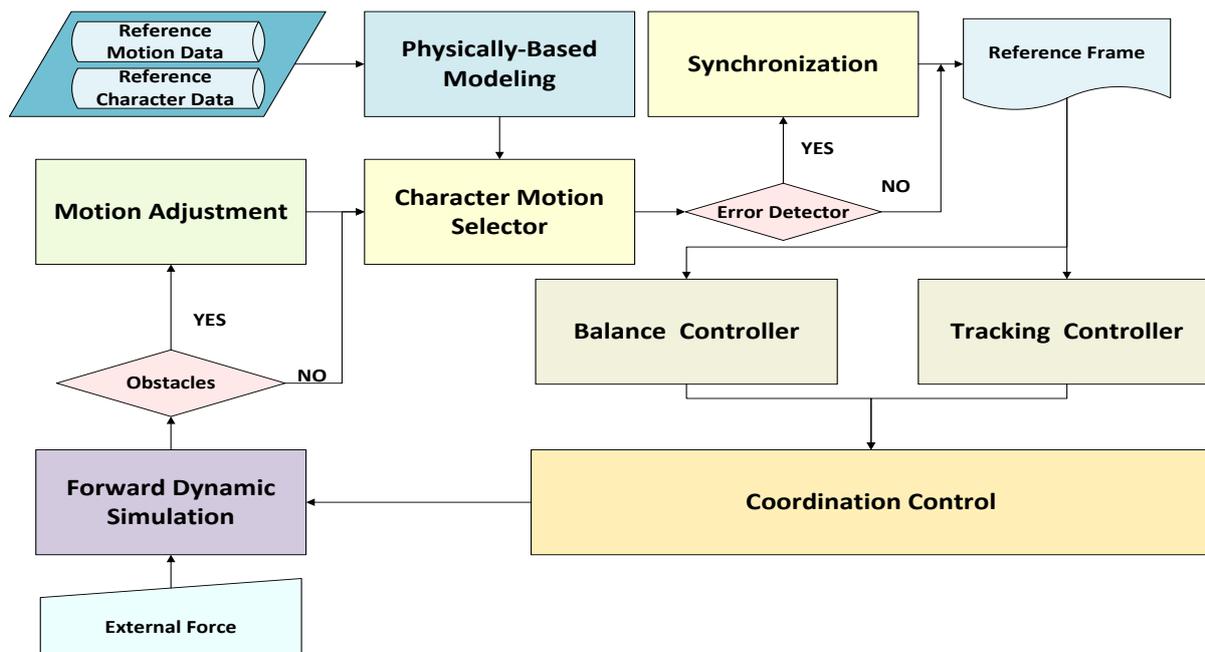
**步驟一：**從骨架基礎設定值開始讀取並設定，包括骨架的總數量、質量、名稱、長度、變數以及位置。參考數據如表 1 所示：

**步驟二：**設定其骨架的繼承關係，類似於鉸鏈式關節，設定了骨架的連結關係後，則可用來追蹤受力後所連接的關節該傳遞多少力，方便於計算與追蹤。

**步驟三：**設定並限制每個關節的自由度(DOFs: Degree of Freedoms)，達到限制關節可旋轉的方向及角度之目的，最後產生變數並設定於骨架上，進行下一步驟的計算。

**步驟四：**計算並設定各個關節的旋轉角度及速度，開始的動作則是參照以載入的現有動作來設定初始的動作，像是設定初始位置、速度與角加速度。參考數據如表二所示：

**步驟五：**最後對於物理引擎的環境參數進行設



圖三、系統架構圖

定，如重力、摩擦力等因素，以及將來源動作中取得的資訊與虛擬骨架結合，在設定好的環境中模擬出來。參考數據如表三所示：透過以上五個步驟，我們可以取得虛擬角色的來源動作資訊。

### 3.2 系統架構

本論文的目的為使用物理屬性模擬虛擬角色動畫，並且用平衡來控制動作，使其不因外力而破壞原有動作的追蹤。而本系統的流程圖如圖三所示：

首先系統將讀取虛擬角色的資訊，包含骨架的長度、方向、位置、旋轉等，以及虛擬角色關節的型別分類及關節角度限制，將虛擬角色在虛擬環境當中建立骨架，其骨架包含物理屬性的特徵，接著則是經由輸入物理參數在動態物理引擎的幫助下生成虛擬環境，然後經由來源角色檔案計算出虛擬角色的動作，包含關節速度及關節加速度，並且檢查在控制器追蹤模擬動作時是否符合來源動作的姿勢，再以平衡架構來導正其模擬動作，最後進行動作的重新追蹤，並取得兩者間的均衡。而在使用者對虛擬角色施予外力時，系統將計算虛擬角色的反應動作，並加入角色平衡機制使角色維持平衡，角色將從反應動作追蹤來源動作使角色能夠回復到原來的動作軌跡。而使用者對虛擬角色未施加外力時，系統將使用原始的來源動作進行動作模擬。最後將此次模擬的結果記錄並以回饋的方式傳給下一次動作的追蹤，以便於整

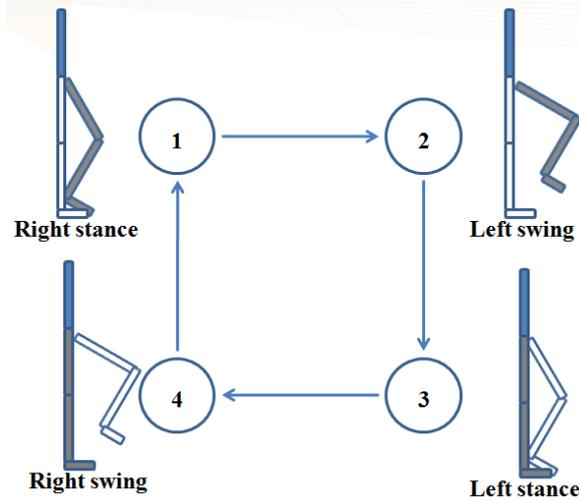
個系統的運行，形成一個循環。

### 3.3 動作追蹤

動作追蹤能夠讓虛擬角色模擬來源動作，利用PD控制器計算從目前模擬動作逼近來源動作之所需力矩。所需力矩的計算方式是取得目前模擬的角色動作與預定的角色動作資訊作為參數依據，再加以增益係數調整誤差，取得所需的力矩，進行動作的追蹤，其關係式表示如式(1)。

$$\tau = k_p(\theta_d - \theta) - k_d\dot{\theta}. \quad (1)$$

其中 $\tau$ 為所需力矩， $K_p$ 與 $K_d$ 為調整係數， $\theta_d - \theta$ 為關節在每個影格間的角度差距， $\dot{\theta}$ 為速度。系統將所需之力矩加到角色，使角色在下一個時步模擬時追蹤來源動作。研究中的控制器是基於我們設定的有限狀態機，如圖四所示。有限狀態機的功能為協助判斷角色在運動時所處於的狀態，並且能在狀態中做一些細緻的處理，比如說當角色動作有所延遲時，就由狀態機依據當時的情況來做一些及時修正的動作，如影格的臨時增加，軌跡角度的轉換，亦或是對當前的狀態做一些變化，使其能夠配合動作自然的效果，也對動作切換的一些地方有所幫助。



圖四、步伐狀態圖

在每個狀態中，關節角度都會受到限制，其中狀態 1 和狀態 2 皆為右腳站立左腳擺動的狀態，狀態 3 和狀態 4 皆為左腳站立右腳擺動的狀態，狀態的轉換取決於擺動中的腳步接觸到地面的瞬間，若是在轉換的時間點時，腳部的狀態無法及時轉換，則會進入到平衡與動作追蹤同步化的部分。

## 4. 平衡控制的協調

動作追蹤之時若是受到外在的干擾或是隨著時間而產生的動作偏差皆會導致動作產生誤差，此時本研究將導入平衡架構的設計，來維持與環境以及外在的干擾之間的協調，使動作能夠運行。

### 4.1 平衡架構設計

平衡主要目的為將程序式產生的關節力矩計算出來後，擷取影響平衡的部分，並加入接觸力的影響，重新做計算，得出保持平衡的力矩，再將新取得的關節力矩取代原本追蹤動作的力矩，來維持虛擬角色在運動時的平衡。

### 4.2 平衡控制方法

本系統所使用的平衡技術是參考[39]文件內所述方法。我們使用軀幹關節以及處於抬腳狀態的髖關節來做為平衡機制的控制基礎，在保持平衡時，我們把平衡的部分以上半身跟與下半身來做區別，下半身的兩個髖關節必須要支撐起上半身的力量，所以上、下半身的關節力矩必須處於抵銷的狀態，平衡的關係式如式(2)所示：

$$\tau_A = -\tau_{torso} - \tau_B \quad (2)$$

其中軀幹關節的力矩設為  $\tau_{torso}$ ，抬腳狀態的髖關節力矩設為  $\tau_B$ ，站立狀態的髖關節力矩設為  $\tau_A$ 。由於主要是站立狀態的髖關節在支撐全身的重量，因此這時的關節力矩  $\tau_A$  等同於軀幹跟抬腳狀態髖關節的總合，並以負號來表示支撐兩者的力量。接下來會加入地面接觸力的討論，其關係式如式(3)、式(4)、式(5)所示：

$$\tau_r = -(\tau_{torso} + \tau_B) \quad (3)$$

$$\tau_{gA} = \tau_r \gamma_f \quad (4)$$

$$\tau_{gB} = \tau_r (1 - \gamma_f) \quad (5)$$

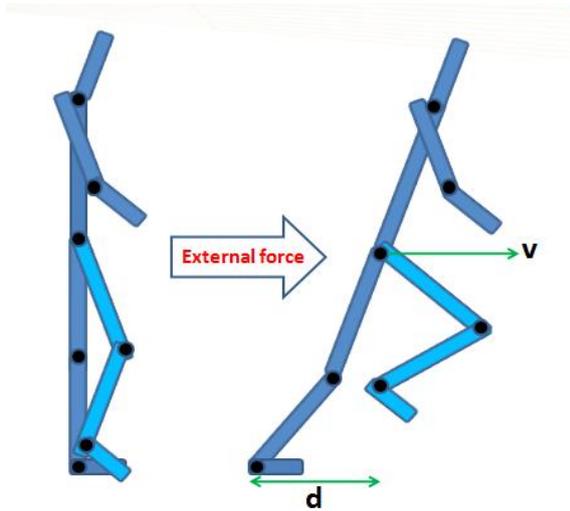
$\tau_r$  是根關節的力矩， $\gamma_f$  則是接觸力取得的全身比重值，此部分則是對於計算出來的平衡力矩做最後調整，將身體比重的部分考慮進去，對兩個狀態的髖關節加強力矩的精確率，最後  $\tau_{gA}$  與  $\tau_{gB}$  取代原先關節力矩  $\tau_A$  與  $\tau_B$  進行平衡。接著，利用新的力矩重新進行動作追蹤，並在動作追蹤時保持動作的穩定，將運動的一些數值記錄，進入到回饋的部分。

### 4.3 平衡動作回饋

在每個動作片段的時間點上皆必須保持平衡機制的運行，並且每個動作片段則為一完整的動作資訊而非其中一小部分，而平衡機制會將一些來源動作的資訊做出修改來適應環境的改變，因此如何將改變的資訊應用到下一個時間點的動作環節就是本區塊主要的目的。對於平衡機制所改變的地方，主要是由外力所造成的改變，示意圖為圖五。這個部份的計算主要體現在關節角度上的修正，其質心會被外力所影響，藉由式(6)帶來角度的改變。

$$\theta_d = \theta_{d0} + c_d d + c_v v \quad (6)$$

$\theta_d$  是預計修改後的目標角度， $\theta_{d0}$  是當前模擬的角度， $c_d$ 、 $c_v$  則是調整係數， $d$  為質心到接觸地面的垂直距離， $v$  則是質心速度。這個部分會將外力對質心所造成的影響以角度的方式做修改，隨著受力大小的不同，我們可以得到不同的角度，作為反應動作的自然體現。



圖五、外力施加圖

#### 4.4 平衡與動作追蹤協調之同步化

當動作追蹤時受到外力時，若是持續對來源動作做追蹤，將會使模擬出來的動作不準確，此時應減弱或停止對動作的追蹤，使平衡機制能掌握這段時間內的外在影響，並重新計算追蹤力矩，將計算出來的力矩重新進行動作追蹤，最後進行步伐狀態的調整，而步伐狀態主要取決於地面接觸力與腳步上的關係，並做控制，以確立來源動作步伐更換的狀態轉換時間點，當模擬動作到達狀態轉換時間點與來源動作不相符，此為不同步的現象，本研究會將模擬動作與來源動作的狀態轉換時間點作對比，以提前或延後模擬角色動作姿態的方式來調節不同步的現象，在此以式(7)來說明：

$$M(t) = \frac{P_c(t)}{P_r(t)} \text{ for } \forall t \quad (7)$$

$M(t)$ 是在  $t$  的狀態轉換時間點上，模擬角色姿勢與參考來源姿勢差異的比值， $P_c(t)$ 為模擬角色姿勢， $P_r(t)$ 為參考來源姿勢， $P_r(t)$ 會隨著動作路徑規畫的改變而修正。接下來會由差異值來計算該調節的影格數，由式(8)所示：

$$F' = \begin{cases} F - \Delta f, & M(t) > 1 \\ F, & M(t) = 1 \\ F + \Delta f, & M(t) < 1 \end{cases} \quad (8)$$

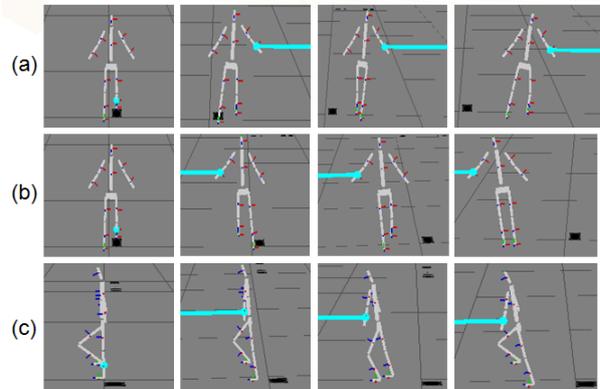
$F$ 為目前的影格數，當差異值為 1 時表示目前動作同步化，影格無需增加或減少； $\Delta f$ 為不足或過多的影格數差值，當差異值 $M(t)$ 不為 1 時，我們會對影格數做調整使其符合狀態轉換時間點的影格數 $F'$ 。

## 5. 實驗結果

本論文利用來源檔案中的資訊建立虛擬角色，並附加虛擬角色的物理屬性，使虛擬角色在模擬動作時可以符合現實的物理反應。模擬來源動作的方法則是使用 PD 控制器，利用目前模擬與預計的關節角度與關節速度，並加入平衡機制來針對各個關節計算出修正的力矩，施加在骨架關節上進行動作的更新，最後於物理引擎模擬虛擬環境模擬動作。

### 5.1 角色模擬來源動作與施力

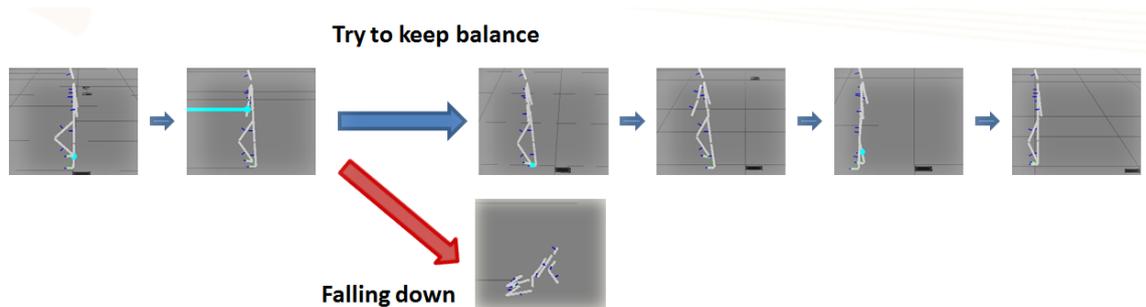
在模擬角色動作部分，本論文的來源動作使用一段虛擬角色走路的動作，動畫長度為 50 個影格，動作模擬結果如圖六，圖六呈現虛擬角色利用 PD 控制器追蹤角色來源動作，並可在模擬環境中模擬走路動作，並進行外力的施加，而虛擬環境之作用力包含環境重力與地面的接觸力作用。本系統模擬角色動作時可呈現自然的角色動作，並且在模擬角色動作時可以受重力及地面接觸力作用。地面接觸力是利用物理引擎的碰撞偵測功能，計算虛擬角色與地面的接觸，進而計算接觸力使角色可站立在地面上。



圖六、角色受力動作示意圖(a)向右施力(b)向左施力(c)向前施力

### 5.2 動作追蹤修正

當進行動作追蹤時，若是受到外力干擾，造成動作與參考來源不相符，此時則需依靠平衡機制來對其進行動作修正，模擬將會暫時暫停或減少對來源動作的追蹤，轉而依據平衡控制來判別動作是否達到失衡的標準，若是尚未達到重心失衡的程度則加入外力與當時地面接觸力來重新計算關節力矩以保持平衡，並將結果加入到髖關節與腳踝的部分進行動作的重新模擬，修正回原本的動作再重新進行來源



圖七、角色平衡判斷圖

動作追蹤；若是重心已嚴重失衡，則虛擬角色則會直接進行倒地的動作，其動作模擬結果如圖七所示。

## 6. 結論與未來工作

本研究使用虛擬角色進行動作追蹤並附加物理屬性作用，使虛擬角色模擬時符合物理屬性之虛擬角色動作，並在模擬環境中施予外力進行干擾，並藉由平衡機制回復至來源動作的追蹤，並加入動作同步化的機制，能確實的掌握步伐的狀態，最終模擬的結果可藉由標準檔案格式讀取至系統中，系統會附加該虛擬角色的物理屬性與限制，模擬角色動畫受到重力、接觸力以及使用者控制下未預期的作用力的結果。並且可以將角色動作輸出，將角色動作導入到遊戲或是其他電腦動畫應用中使用。

本研究在追蹤虛擬角色來源動作時，模擬動作與來源動作間存在誤差會隨著時間而增長，導致動作的不一致，此問題可藉由一段時間對於模擬動作做修正將其導回原本追尋的軌跡。本研究未來的研究方向可以朝向對環境做不同的設定，例如使虛擬角色可以對於不同的路徑進行設定，此外，系統根據步伐分析以及地形的資訊，決定讓角色做出適當的動作調整，主要可分為三個部分：步伐控制、緩衝處理與動作轉置。在步伐控制中調整步伐的縮小與擴大，緩衝處理控制腳部落下動作與上跨動作，動作轉置則是處理動作接合流暢度的問題。或是對角色動作進行串接，使虛擬角色在模擬反應動作時可以切換不同動作，使角色的動作更為豐富。

### 誌謝

本論文由國科會計畫編號 NSC101-2221-E-415-021 補助辦理執行。

## 參考文獻

- [1]. Abe, Y., da Silva, M., and Popović, J. Multiobjective control with frictional contacts. *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp.249-258, 2007.
- [2]. Arikan, O., and Forsyth, D. A. Interactive motion generation from examples. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 21, pp.483-490, 2002.
- [3]. Coros, S., Beaudoin, P., and van de Panne, M. Robust task-based control policies for physics-based characters. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 28, No. 170, 2009.
- [4]. Coros, S., Karpathy, A., Jones, B., Reveret, L., and van de Panne, M. Locomotion skills for simulated quadrupeds. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 59, 2011.
- [5]. Goswami, A., and Kallem, V. Rate of change of angular momentum and balance maintenance of biped robots. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2004.
- [6]. Jain, S., Ye, Y., and Liu, C. K. Optimization-based interactive motion synthesis. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.28, No.1, 2009.
- [7]. Jörg, S., Hodgins, J., and Safonova, A. Data-driven finger motion synthesis for gesturing characters. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.31, No. 189, 2012.
- [8]. Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K., and Hirukawa, H. The 3d linear inverted pendulum mode: A simple modeling for a bipedwalking pattern generation. *Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp.239-246, 2001.
- [9]. Kim, J.-Y., Park, I.-W., and OH, J.-H. Walking control algorithm of biped humanoid robot on uneven and inclined

- floor. *J. Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 48, NO. 4, pp. 457–484, 2007.
- [10]. Kitamura, S., Kurematsu, Y., and Iwata, M. Motion generation of a biped locomotive robot using an inverted pendulum model and neural networks. *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, Vol.6, pp.3308-3312, 1990.
- [11]. Komura, T., Leung, H., and Kuffner, J. Animating reactive motions for biped locomotion. In *ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2004.
- [12]. Kudoh, S., Komura, T., and Ikeuchi, K. Stepping motion for a humanlike character to maintain balance against large perturbations. In *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2006.
- [13]. Kwon, T., and Hodgins, J. Control systems for human running using an inverted pendulum model and a reference motion capture sequence. In *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 2010.
- [14]. Lee, Y., Wampler, K., Bernstein, G., Popović, J., and Popović, Z. Motion fields for interactive character locomotion. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.29, NO. 138, 2010.
- [15]. Levine, S., Lee, Y., Koltun, V., and Popović, Z. 2011. Space-time planning with parameterized locomotion controllers. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.30, No. 23.
- [16]. Levine, S., Wang, J.-M., Haraux, A., and Popović, Z., and Koltun, V. Continuous character control with low-dimensional embeddings. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 28, 2012.
- [17]. Liu, C. K., Hertzmann, A., and Popović, Z. Learning physics-based motion style with nonlinear inverse optimization. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.24, No. 3, 1071–1081, 2005.
- [18]. Liu L., Yin, K., van de Panne, M., and Guo, B. Terrain Runner: Control, parameterization, composition, and planning for highly dynamic motions. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.31, No. 154, 2012.
- [19]. Liu, L., Yin, K., van de Panne, M., Shao, T., and Xu, W. Sampling – based Contact -rich Motion Control. *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 29, No.128, 2010.
- [20]. Macchietto, A., Zordan, V., and Shelton, C. R. Momentum control for balance. *ACM Trans. Graph*, Vol.28, No. 80, 2009.
- [21]. Muico, U., Lee, Y., Popović, J., and Popović, Z. Contact-aware nonlinear control of dynamic characters. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 28, No.81, 2009.
- [22]. Murai, A., and Yamane, K. A neuromuscular locomotion controller that realizes human-like responses to unexpected disturbances. In *Proc. International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, pp.1997–2002, 2011.
- [23]. Miura, H., and Shimoyama, I. Dynamic walk of a biped. *Int'l J. Robotics Research* Vol.3, No. 2, pp. 60-74, 1984.
- [24]. Morimoto, J., Zeglin, G., and Atkeson, C. Minimax differential dynamic programming: Application to a biped walking robot. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003.
- [25]. Nakaoka, S., Nakazawa, A., and Yokoi, K. Generating whole body motions for a biped humanoid robot from captured human dances. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3905–3910, 2003.
- [26]. Rose, C., Guenter, B., Bodenheimer, B., and Cohen, M. F. Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints. In *Proceedings of SIGGRAPH 96, ACM, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp.147–154, 1996.
- [27]. Safonova, A., Hodgins, J. K., and Pollard, N. S. Synthesizing physically realistic human motion in low-dimensional, behavior-specific spaces. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 23, pp. 514–521, 2004.
- [28]. Sok, K. W., Kim, M., and Lee, J. Simulating biped behaviors from human motion data. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.26, No. 107, 2007.
- [29]. Tsai, Y.-Y., Cheng, K. B., Lin, W.-C., Lee, J., and Lee, T.-Y. Real-time physics-based 3d biped character animation using an inverted pendulum model. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* Vol.16, No.2, pp.325–337, 2010.
- [30]. Tsianos, K. I., Sucas, I. A., and Kavraki, L. E. Sampling-based robot motion planning: Towards realistic applications. *Computer Science Review*, Vol. 1, pp.2–11, 2007.
- [31]. Vondark, M., Sigal, L., Hodgins, J., and Jenkins, O. Brown University. Video-based 3D motion capture through biped control.

*ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 27, 2012

- [32]. Vukobratovic, M., and Juricic, D. Contribution to the synthesis of biped gait. In *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.16, pp.1–6, 1969.
- [33]. Wei, X., Min J., and, Chai, J. X. Physically-valid statistical motion models for human motion generation. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.30, No. 19, 2011.
- [34]. Wang, J., Fleet, D. J., and Hertzmann, A. Optimizing walking controllers. *ACM Transactions on Graphics* Vol.28, 2009.
- [35]. Wang, J., Fleet, D. J., and Hertzmann, A. Optimizing walking controllers for uncertain inputs and environments. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 29, No.73, 2010.
- [36]. Wu , J., and Popović, Z. Terrain-adaptive bipedal locomotion control, *ACM Trans. Graph*, Vol. 29, No.72, 2010.
- [37]. Ye, Y., Liu, C. K. Optimal feedback control for character animation using an abstract model. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 29, 2010.
- [38]. Yin, K., Coros, S., Beaudoin, P., and Vandepanne, M. Continuation methods for adapting simulated skills. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.27, 2008.
- [39]. Yin, K., Loken, K., and Vandepanne, M. SIMBICON: simple biped locomotion control. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.26 , No.105, 2007.
- [40]. Yin, K., Pai, D. K., and van de Panne, M. Data-driven interactive balancing behaviors. *In Pacific Graphics*, 2005.

表一 人形虛擬角色骨架資訊

Bone	Mass(kg)	Length(m)
L_upper leg	6.6	0.457913
R_upper leg	6.6	0.457913
L_lower leg	3.2	0.475157
R_lower leg	3.2	0.475157
L_toe	1.0	0.150000
R_toe	1.0	0.150000
Pelvis	22.5	0.250631
Torso	5.2	0.458223
L_upper arm	2.2	0.260867
R_upper arm	2.2	0.260867
L_lower arm	1.7	0.309095
R_lower arm	1.7	0.309095

表二 人形虛擬角色關節型別與角度限制設定

Joint	DOFs	Joint angle limit		
		x	y	z
hip	3	-1.3~ 1.9	-1~1	-1~ 0.25
knee	1	0~2.5		
ankle	1	-0.75~0.75		
spine	3	-0.6~0.6	-0.6~ 0.6	-0.6~0.6
shoulder	3	-1.7~1.7	-1.5~1.5	-1.5~1.5
elbow	1	-2.7~ 0		

表三 虛擬環境設定

Parameter	Value
Gravity	-9.8 m/s <sup>2</sup>
Step size	0.0033 s
ERP	0.8
Friction	dInfinity