

以運動學技術生成四足角色動作進行 互動控制之研究

蘇鼎傑

國立嘉義大學

s1010421@mail.ncyu.edu.tw

盧天麒

國立嘉義大學 教授

tclu@mail.ncyu.edu.tw

摘要

在目前的數位內容產業中，不論是事先編輯製作的動畫、或是即時應用的遊戲環境，都需要使用三維虛擬角色動作的模擬技術，因此三維虛擬角色動作技術的重要性不言而喻。由於傳統的角色動畫來源資料未必能應用於新的需求，新的場景、新的任務等，為使動作能夠順暢且具合理地在新的環境中執行，本論文以程序式動畫及機器人學為基礎，提出一個新的四足角色動作生成的方法，無須來源動作資料，即可即時生成四足的角色動作。本論文設計了四足角色的六種步態，使用動態的步態生成模擬四足的運動，此外，定義一個狀態機模擬脊椎的運動，使模擬角色運動具有前後左右的運動方向性，進而產生多樣化的角色動作。**關鍵詞**：動作生成，動作模擬，運動學動畫，反向運動學

Abstract

Both 3D computer games and animations always require diverse characters to enhance the content of the play, Regardless of how a character is used in games or animations, locomotion is required for each moving character. In this paper, we exert animation technologies to make the character locomotion look more plausible and to be able to change moving speed with little user effort instead of purely handcrafting. In comparison with physically based animation, a kinematic approach is an intuitive method that has less computational cost to achieving the above goal. In this paper, a kinematics-based locomotion simulator is proposed to simulate locomotion with six types of gait for quadrupedal characters without the support of reference motion data.

We first define walk, trot, pace, canter, transverse gallop, and rotary gallop. Second, we devise both leg and spine motion generators that satisfy user-specified parameters to make a character move forward with corresponding gait. From the experimental results, we show the locomotion of a mature leopard, a cub leopard, and a cub dog with proposed gait in an interactive manner.

Keywords: Locomotion generation, Motion simulation, Kinematics-based animation, Inverse kinematics

1. 緒論

近年來娛樂產業快速的發展，動畫的相關技術也開始受到重視，傳統動畫角色的動作往往是藉由專業美術人員建立關鍵影格後，以內插方法產生角色動作，此方法產生的角色動作往往仰賴美術人員本身的能力，而當模擬的環境因需求改變而有些微的變動時，美術人員就必須重新建置關鍵影格，相當的耗工與耗時。因此也有不少動作設計人員使用動作擷取器來擷取角色動作。動作演員藉由穿戴感應設備捕捉角色動作或是使用攝影機捕捉動作等方法，達到動作的擷取，此方法相對於美術人員建置的動作更為自然生動，並且可以有效降低動作生成的時間。然而動作擷取器常受限於角色限制，當角色動作太過於困難或是危險時，或是欲生成的角色動作為非人型動物時（如四足動物或是特殊骨架的怪物角色等），皆不適合使用動作擷取器做擷取，因此從動作擷取器進行動作擷取的困難度相對提高。

目前熱門的動作研究大多往能夠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三維虛擬角色動作的技術涉略需廣泛，如物理學、運動學、生物學、機器人學，皆在包含的範疇之中，換句話說，利用上述的各種技術，可以生成不同的模擬角色面對不同狀況

下之模擬動作，有別於美術人員建置之動作以及動作擷取器擷取之動作，利用上述技術生成之角色動作於調整上較有彈性，可以針對不同的模擬角色建立不同的參數以及不同的狀況進行處理，模擬出使用者需求的動作，有效達到動作生成以及降低動作開發的成本。

在研究角色選擇方面，我們選擇了四足動物作為研究的目標，因為四足角色的動作相較二足角色的動作取得相對困難，動作相較於二足角色也更為複雜，為了有效模擬四足角色的運動狀態並且達到降低動作開發成本，將使用程序式動畫的方式來生成角色動作，利用程序式動畫的特性，結合動態的步態圖與脊椎之狀態機的考量，使模擬的動作更為多樣性與自然。

本論文將動作模擬區分為四足運動模擬以及脊椎運動模擬，四足運動模擬方面，一開始將分析並建立四足的步態圖，針對不同的狀態（慢走、快走、小跑步、慢跑、快跑與奔跑）定義不同的步態圖，藉由步態圖可以清楚地了解到四足運動時的相互關係，接著加入了機器人學的相關知識，有效地建立起四足運動時的擺動關係，使用震盪器的概念，使四隻腳可以自然的運行。脊椎運動模擬方面，依據不同之步態定義的有限狀態機進行模擬，並且定義脊椎的兩種狀態（凹狀以及凸狀），除此之外，角色位移的部分也交由脊椎的運動處理，藉由脊椎的伸展及收縮，達到部分位移的吸收，最後結合腳部及脊椎運動，產生自然且方向性的四足角色動作。

2. 相關研究

四足角色與二足角色相較下動作較難取得，[Muybridge 1957]將角色運動過程全程錄製，再由錄製的影片中挑選重要的關鍵影格，進而從中擷取動物的特徵拍攝四足動物步行時的照片並進行分析，證明了動物在穩定的狀態行走時，腳的提起與放下有一定的順序，構成了許多不同的步行狀態，[Skrba et al. 2008]的研究中也有許多介紹四足角色動作生成的方法；生物學和動物學分析了許多動物的動作資訊，分析了骨架、關節點及物理性質之間的關係。[Fukuoka and Kimura 2003]基於生物學的概念之上建構出可以在不規則的地形上行走四足步行機器人。近年來也實作了四足型態的機器人，機器人使用視覺學習及步態訓練[Gehring et al. 2013]，使四足機器人可以保持平衡行走於崎嶇不平的地面，而透過機器人的模擬運動，

也可以獲得許多的模擬參數。

步態的生成方法，除了以直接觀察方法取得之外，也有不少研究以中樞模式發生器（central pattern generator, CPG）[Wang et al. 2007][Sun et al. 2007]的方式做步態的規劃及生成。CPG為一種生物神經的網路，可以產生動物的規律性運動，如行走、呼吸、心跳等等的規律運動。[Li et al. 2010]於研究中以CPG方法模擬出了二足機器人的步態，[Li et al. 2011]的研究中則產生了四足機器人的步態規劃。此一研究為往後的四足步行機器人研究發起了開端。根據動作的不同產生的步態可以區分為靜態的步態[Hardarson 2002][Ma 2005]及動態的步態[Gordon et al. 2004][Poulakakis et al. 2005]，靜態的步態如走路和爬行等，其偏移變化量較小，同一個時間點最少會有三隻腳與地面接觸，動態步態的部分如跑步和奔跑等動作，其重心偏移量較大，同一個時間點最多會有兩隻腳與地面接觸，相較於二足動物，四足之間的移動順序不再是只有左腳與右腳之間的輪替，四足角色主要可以分為對稱式與非對稱式；腳步狀態的部分可以區分為腳步為著地的狀況(stance)及離開地面向前擺動(swing)的部分，藉由角色步態的關係並結合腳步的移動軌跡[Samuel et al. 2004]，配合使用反向運動學的方式便可以重建腳步的運動方程。

機器人學於脊椎運動模擬上有相當多的研究，將脊椎運動配合適當之腳步步態，便可使虛擬角色自動克服不同的地形[Byl et al. 2008][Shkolnik et al. 2011]。除此之外，透過關鍵點的設立可使虛擬角色之重心旋轉以進行轉彎模擬[Wang et al. 2011][Kato et al. 2009]，或是將脊椎的運動視為有規律的擺動，將CPG設於虛擬角色之脊椎也可完成脊椎之模擬[Tomoyuki et al. 2009]。在仿生學中，脊椎運動除了震盪之外也會有特殊的形變規則，例如脊椎於奔跑運動時會有凹與凸兩種形變。另一方面，運動學的方法可透過這兩種形變制定出脊椎之運動規則[Zhao et al. 2012][Khoramshahi et al. 2013]。

3. 四足角色模擬

在本論文中首先建立四足角色的步態圖並定義四足運動的狀況。接著依據步態圖定義出脊椎之有限狀態機，結合震盪器以及反向運動學重建四足以及脊椎運動動作，並且透過關鍵點的設定，使得四足角色可以依照現有的步態以及脊椎運動狀態進行旋轉，進而生成新的

四足角色動作，有效降低動作開發的成本及時間。

3.1 系統架構

本論文的流程架構如圖 1 所示，首先，使用者依照需求設定一些簡單的參數，如模擬角色在平地運動時的移動速度、運動狀態等參數；接著進行角色動作的模擬，系統將會讀入模擬角色的相關資訊，根據使用者設定的參數動態生成四足角色之步態圖，動態步態的生成可以增加角色動作的多樣性，本論文參考機器人學的方法生成動態步態，根據不同的速度及運動狀態，如慢走、快走及奔跑等，角色可以建立相對應的步態圖，爾後依據步態圖進行四足角色動作的生成；此外，角色步態圖可產生一組對應的脊椎狀態機，此狀態機包含脊椎運動規則，配合設立關鍵點調整角色之行進方向以及脊椎旋轉方向，最後依據反向運動學的原理模擬一個完整的四足角色動作。

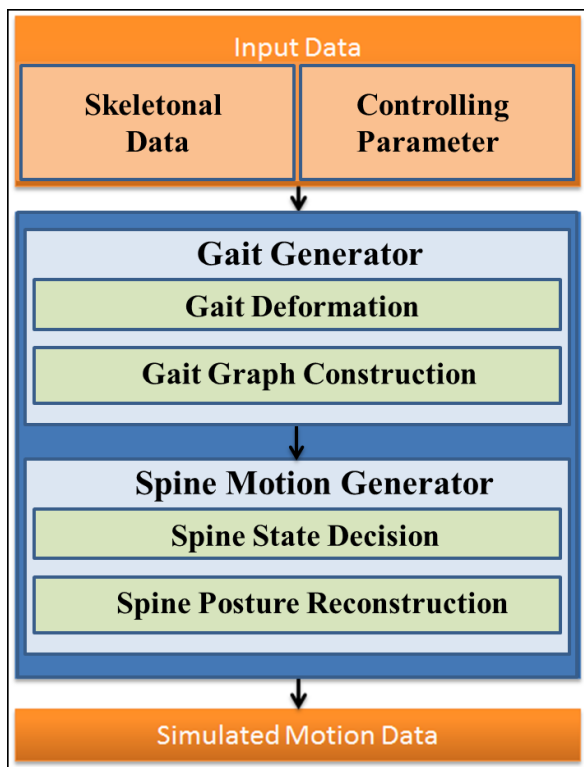


圖 1 系統流程圖

3.2 動態步態

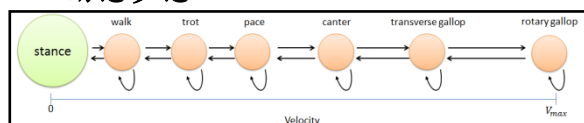


圖 2 步態間的轉換狀態圖

在四足動物動作模擬中，動態步態扮演著很重要的角色，藉由步態圖的定義，可以清楚地了解四足之間的運動規則及模擬角色當下的運動狀態，本論文參考了[Cristina and Vitor 2011]中的關鍵影格圖並將四足角色分為六種運動狀態，分別為慢步 (walk)、快步 (trot)、小跑步 (pace)、慢跑 (canter)、快跑 (transverse gallop) 及奔跑 (rotary gallop)，依據不同運動狀態的動作循環所需的時間以及角色的位移量計算出角色的移動速度，當角色速度改變時，將對應到相對應的運動狀態，其狀態之間的轉換關係如圖 2，為了達到不同的步態模擬，一開始進行動態步態圖的建置，步態圖的建置會依據角色的運動狀態、速度及模擬環境的參數做建置；完成動態步態圖的建置後，將依據步態圖產生腳部動作，腳部運動時主要可以區分為站立及擺動(離開地面)兩個狀態，單一腳步的狀態可以分為站立 St，即腳與地面接觸到離開地面前狀態；與離開地面向前擺動 Sw，即腳離開地面到下次接觸地面前狀態。表一中，LR 為左後腳，LF 為左前腳，RR 為右後腳，RF 為右前腳，表 1 說明了四足角色於六個步態下四足的運動規則，例如，四足角色於快步的步態下四足運動規則，左後腳以及右前腳轉換為站立狀態、左後腳與右前腳轉換為擺動狀態、左後腳以及右前腳轉換為站立狀態，最後左後腳與右前腳轉換為站立狀態。

本論文參考[Chew et al. 1999]的公式定義參數 β ，如式 1 以及式 2，藉由 β 來產生不同的角色狀態， $\beta(t)$ 為兩步態轉換過程中的 β 值， β_{s1} 為當下狀態的 β 值， β_{s2} 為轉換後的 β 值， α 為控制 β 值的加速曲線，依據不同的狀態給予不同的參數設置，也可以藉由參數 α 的調整達到步態圖之間快速的轉換，使模擬的角色在運動過程中達到動作平順的目的。

$$\beta(t) = \beta_{s1} + \alpha t^2 \quad \text{式 1}$$

$$\alpha = \frac{(\beta_{s2} - \beta_{s1})}{t^2} \quad \text{式 2}$$

3.3 脊椎狀態機

四足角色的脊椎於運動過程中之運動狀況分為二階段，分別對應之六個步態，第一階段對應到的步態為慢步、快步、小跑步此三個步態，於此階段下之脊椎會進行擠壓以及縮放的運動規則，並且主導四足角色位移的控制，我們將四足角色的位移量平均分配之脊椎每一根關節，進而重建脊椎的運動，前腳運動時脊椎進行縮放，後腳運動時脊椎進行擠壓。第

二階段對應至後三個步態，此階段下由於四足

表 1 六個步態之四足運動規則

模擬步態	四足之運動規則
Walk	$\{SW_{LR}, St_{LR}, SW_{LF}, St_{LF}, SW_{RR}, St_{RR}, SW_{RF}, St_{RF}\}$
Trot	$\{St_{LR}St_{RF}, SW_{LR}SW_{RF}, St_{LF}St_{RR}, SW_{LF}SW_{RR}\}$
Pace	$\{St_{LF}St_{LR}, SW_{RF}SW_{RR}, St_{RF}St_{RR}, SW_{LF}SW_{FR}\}$
Canter	$\{St_{LF}SW_{RR}SW_{RF}SW_{LR}, SW_{LF}St_{RR}SW_{RF}SW_{LR}, SW_{LF}SW_{RR}St_{RF}St_{LR}\}$
Transverse gallop	$\{SW_{LF}St_{RR}SW_{RF}SW_{LR}, St_{LF}SW_{RR}SW_{RF}SW_{LR}, SW_{LF}SW_{RR}St_{RF}SW_{LR}, SW_{LF}SW_{RR}SW_{RF}SW_{LR}, SW_{LF}SW_{RR}SW_{RF}St_{LR}\}$
Rotary gallop	$\{SW_{LF}St_{RR}SW_{RF}SW_{LR}, SW_{LF}SW_{RR}SW_{RF}St_{LR}, SW_{LF}SW_{RR}SW_{RF}SW_{LR}, St_{LF}SW_{RR}SW_{RF}SW_{LR}, SW_{LF}SW_{RR}St_{RF}SW_{LR}, SW_{LF}SW_{RR}SW_{RF}SW_{LR}\}$

$$\beta_s^*(t) = \begin{cases} \phi_s(t_{cv}) + \phi'_s(t - t_{cv}), & \text{if } t - t_{cv} < \frac{\phi_{ica} - \phi_{icv}}{\phi'_i} \\ \phi_{sca}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{式 3}$$

$$\beta_s(t) = \begin{cases} \phi_s(t_{ca}) - \phi'_s(t - t_{ca}), & \text{if } t - t_{lo} < \frac{\phi_{icv} - \phi_{ca}}{\phi'_i} \\ \phi_{scv}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{式 4}$$

角色運動速度較快，運動規則接近跳躍，脊椎動無法用擠壓以及縮放進行模擬，因此我們依照[Culha and Saranli 2011]將脊椎分為前後二大部分定義出一個脊椎運動狀態機，脊椎透過凹(convex)以及凸(concave)兩種狀態的改變使動作更為自然，圖 3 為脊椎狀態機示意圖，於此狀態機中， θ_c 以及 θ_v 為脊椎於飛躍時，對應二種形變的目標角度。在本系統所建立的有限狀態機中，第一個狀態為前後腳都於擺動的狀態(Double Flight)，此時脊椎當下的狀態為凹，目標角度為 θ_c ；前腳著地後，則切換為第二個狀態—前腳站立後腳擺動(Front Leg Stance)的狀態。此時脊椎的狀態依舊為凹狀，目標角度不變；第三個狀態為前後腳站立(Double Stance)，此時脊椎狀態為凸狀，目標角度則為 θ_v 。前腳離地擺動後，切換為最後一個狀態—後腳站立前腳擺動(Back Leg Stance)，此時脊椎狀態以及目標角度都不變，後腳離地後接續第一個狀態。本系統的脊椎狀態可以透過式 3 至式 5 進行計算與判斷：

$$e_b(t) := \beta_s^*(t) - \beta_s(t) \quad \text{式 5}$$

$e_b(t)$ 為脊椎的中間節點所需要旋轉的角度， $\beta_s^*(t)$ 為下一個時間點的脊椎的中間節點的角度， $\beta_s(t)$ 為當下的脊椎中間節點的角度， ϕ'_s 為角加速度。當下一個時間的角度為未知時，透過式 3 以及式 4 這二個方程式可以求出一

個時間的角度：若 t 為當下時間， t_{cv} 為脊椎狀態變為凹狀的時間點， t_{ca} 表示脊椎狀態變為凸狀的時間點的時間點。舉例來說，當脊椎運動從凹狀變為凸狀時，套用式 3 可求出一個時間點的脊椎所需角度， $\phi_s(t_{cv})$ 可代表脊椎於凹狀時的角度， $\phi'_s(t - t_{cv})$ 代表角加速度乘上從脊椎從凹狀變為凸狀的過程所經過的時間，也就是角度。

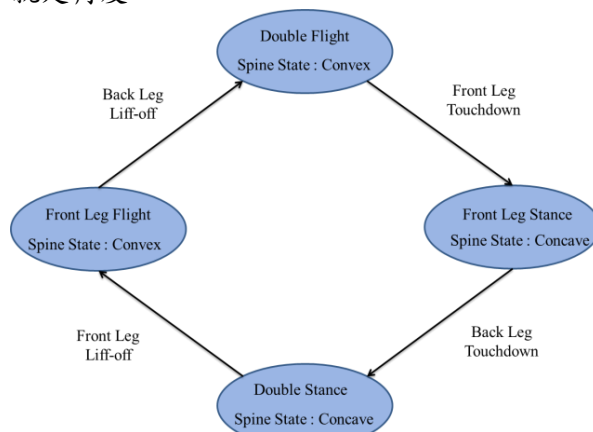


圖 3 脊椎狀態轉換

3.4 四足角色模擬

本論文參考了機器人學之震盪器的觀念，於前腳之肩關節(shoulder)、後腳的髖(hip)關節以及脊椎中間節點設置震盪器單元，藉由訊號波的控制模擬角色關節的擺動，四足的運動規律主要由站立狀態與離開地面兩個狀態互相

轉換，依據角色運動狀態的不同，四足運動規律的擺動幅度與頻率也會有所改變；脊椎的運動規律主要由凹狀與凸狀互相轉換，不同步態擺動幅度也有所不同，震盪器之數學式表示如下：

$$\dot{x} = -\omega x, \quad \dot{z} = \omega z \quad \text{式 6}$$

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & \mu < 0 \\ \begin{bmatrix} \sqrt{\mu} \sin(\omega t) \\ \sqrt{\mu} \cos(\omega t) \end{bmatrix}, & \mu \geq 0 \end{cases} \quad \text{式 7}$$

如圖 4 所示， \dot{x} 為當下關節擺動的角度變化（綠色實線）， \dot{z} 為當下狀態的變化（藍色虛線），當 $z \geq 0$ 且 $\omega > 0$ 時表示為腳掌站立狀態，當 $z < 0$ 時則表示為腳掌離地狀態， μ 為擺動的振幅， ω 擺動的頻率控制，當步態有所改變時，可以藉由調整參數 μ 及 ω 達到腳步動作的改變。

四足的運動會影響肩關節以及腕關節，我們除了用震盪器模擬關節上下的擺動之外，肩關節與腕關節也會產生左右的擺動，圖 5 說明肩部關節的橫向平面之運動情況，顏色相同代表同一時間點下左前腳與右前腳的運動狀態，舉例來說，目前運動狀態為左前腳踏地和右前腳擺動。右前腳向前擺動時左前腳為向後延伸，將相同顏色的點相連可形成三條直線，此三條直線可說明腳步移動與肩關節左右擺動之間的關係，肩關節橫向擺動角度為兩兩直線之夾角，同理可求出腕關節與後腳末端節點之關係，除此之外，我們利用反向運動學模擬四足之運動，利用卡特姆曲線計算出末端節點之位置，中間節點的運動使用反向運動學的方式 [Buehler et al. 2005] 重建。

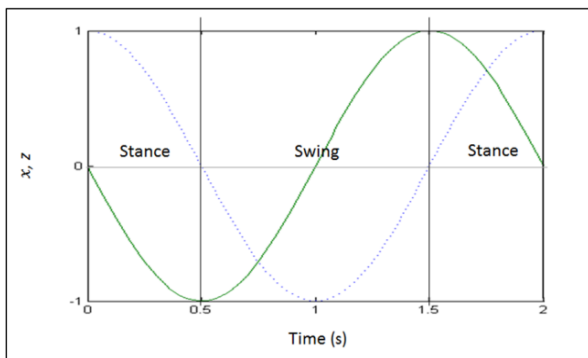


圖 4 藉由震盪器產生四足的擺動運動

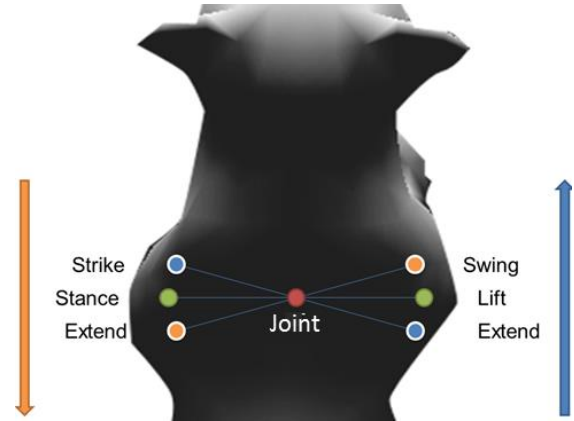


圖 5 肩關節與腕關節之左右擺動

我們使用有限狀態機模擬脊椎上下的運動，定義了凹與凸兩個狀態，除此之外，脊椎與肩關節與腕關節同樣具有橫向平面的運動，例如四足角色行進方向不為單一方向時，脊椎與末端點皆會進行橫向之運動，我們參考了 [Peng et al. 2010] 提出之關鍵點概念並且將其模擬於四足角色，模擬四足角色轉彎時之運動。圖 6 中紅色為左右腳之末端節點，藍色為關鍵點，關鍵點的使用分為六個步驟，第一個步驟求出末端節點的中心點設為站立時關鍵點，隨後將關鍵點設置於站立腳之腳掌之中心位置，第三步將關鍵點與擺動腳旋轉一樣角度，第四步將關鍵點設立至另一隻腳，將其設立為站立腳，第五步關鍵點與擺動腳旋轉一樣角度，最後將關鍵點設置回兩腳之中點，於本論文中，關鍵點等同於脊椎之初始節點與末端節點，藉由此方法可以有效的使四足角色進行多方向之運動。

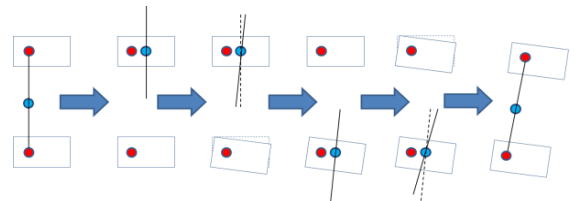


圖 6 關鍵點與腳步關係示意圖

4. 實驗結果

本論文使用三維的四足角色模型在本系統中建立虛擬的角色，並使用程式方法模擬四足角色運動動作。結合動態步態圖以及脊椎狀態機，產生符合不同運動型態的角色動作，使用者可以依據需要調整模擬角色的移動速度或是運動方向，依據速度系統產生相對應的狀態及動作，並且可自動生成往不同方向移動之動作，例如於 Walk 步態下使角色進行轉彎。本論文使用了 Autodesk 公司的 Fbx 格式作為虛

擬角色的來源檔案。Fbx 格式中包含了模擬角色的骨架及網格資訊，常被使用於電腦動畫及遊戲中，且可以於許多的三維美術建模軟體中開啟並編輯，模擬環境為 Unity 遊戲引擎。

實驗的模擬角色為大花豹以及小花豹，圖 7 以及圖 8 所示為大花豹之資訊，我們一樣將角色資訊分為脊椎、髖關節與肩關節、四足、腳踝、頭部與尾部做紀錄。小花豹與大花豹的模型相較之下整體的骨架比例有著明顯的不同，小花豹的身形較小。圖 9 為步態由慢步至小跑步的運動模擬，由於起始之步距不大，完成一次慢步動作循環的時間較長。當步態轉變為快步時，運動狀態為斜對稱，同一時間點有一到兩隻腳為離地向前擺動的狀態，腳步的位移及髖關節與肩關節的擺幅也隨速度增加，角色位移因此也比慢步狀態大，最後步態轉變為小跑步時，運動狀態為左右對稱式。



圖 7 模擬環境下之大花豹

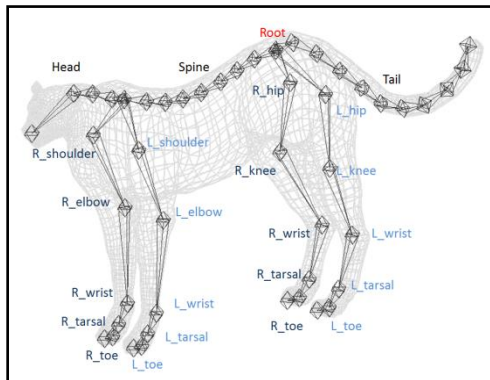


圖 8 大花豹關節點資訊

圖 10 為步態由慢跑至奔跑的運動模擬，由於四足間運動狀態獨立，腳步踏地的時間變短，角色位移相較於步行時又增加了許多。中間為快跑步態，為奔跑狀態的過渡期，運動狀態逐漸變為前後對稱。最後為奔跑步態，整體運動狀態可以分為前半部與後半部的腳部運動，後腳著地時主要為向前推進，而前腳著地的則是維持身體平衡。

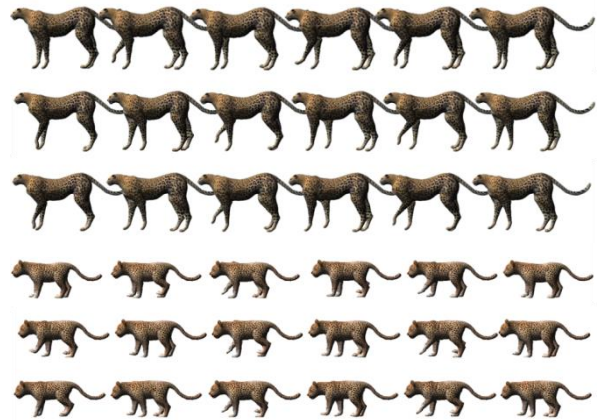


圖 9 大小花豹前三個步態，由上而下依序為慢步、快步、小跑步。

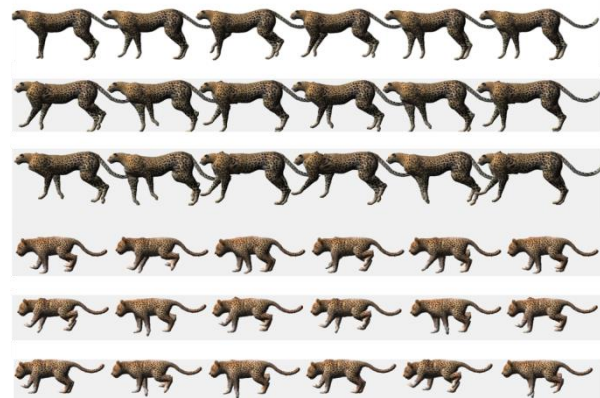


圖 10 大小花豹後三個步態，由上而下依序為慢跑、快跑、奔跑。

5. 結論與未來工作

本論文結合機器人學方法，使用 CPG 震盪器的方法模擬髖關節、肩關節以及脊椎的擺動，結合動態步態圖，使用程式方法模擬四足角色運動動作。並藉由關鍵點的調整，使角色可以往不同方向進行運動，產生更多樣性的角色運動動作。藉由兩組不同的角色骨架模型實驗，成功模擬出了不同的模擬角色在不同的速度下，生成出各種狀態下的運動動作。本論文使用簡單的參數控制達到模擬動作的多樣性，但當控制參數設置不理想時，可能會出現模擬的動作僵硬不自然，如果可以加入角色特徵的訓練，將可以使模擬的動作更為生動自然。除此之外，脊椎的考量未來將結合動力學的概念，減少控制參數造成之不自然，因此，未來研究方向將朝向模擬角色動作的自然性與豐富性做努力，藉由角色部分動作特徵的訓練，訓練出模擬參數的經驗值，考慮更多的運動狀態，使角色動作可以有更豐富的變化，更希望

可以透過 Unity 跨平台的優勢將研究應用於現實生活中。

參考文獻

- [1] Buehler, M., Playter R., and Raibert, M., "Robots step outside," In *Symposium of Adaptive Motion of Animals and Machines*, pp. 1-4, 2005.
- [2] Byl, K. and Tedrake, R., "Approximate Optimal Control of the Compass Gait on Rough Terrain," In *Proceedings of IEEE international Conference on Robotics and Automation*, pp. 1258-1263, 2008.
- [3] Chew, C. M., Pratt, J., and Pratt, G., "Blind Walking of a Planar Bipedal Robot on Sloped Terrain," In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation Detroit Michigan*, Vol. 1 pp. 381-386, 1999.
- [4] Cristina P. S. and Vitor M., "Gait transition and modulation in a quadruped robot: A brainstem-like modulation approach," In *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 59, No. 9, pp. 620-634, 2011.
- [5] Culha, U. and Saranlı, U., "Quadrupedal Bounding with an Actuated Spinal Joint," In *Proceedings of IEEE international Conference on Robotics and Automation*, pp. 1392-1397, 2011.
- [6] Freyr, H., *Stability analysis and synthesis of statically balanced walking for quadruped robots*, Royal Institute of Technology, 2002.
- [7] Fukuoka, Y. and Kimura, H., "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 22, No. 3-4, pp. 187-202, 2003.
- [8] Gehring, C., Coros, S., Hutter, M., Hoepflinger, M. A., and Siegwart, R., "Control of dynamic gaits for a quadrupedal robot," In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3287-3292, 2013.
- [9] Gordon Nichol, J., Surya, P. N. S., Kenneth J. W., Luther, R. P. III., and David E. O., "System Design of a Quadrupedal Galloping Machine," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 10-11, pp. 1013-1027, 2004.
- [10] Kato, H. and Ohtsuka, T., "Walking Control of a Compass-like Biped Robot with Constraint Mechanism," In *Proceedings of CROS-SICE International Joint Conference*, pp. 51-55, 2009.
- [11] Khoramshahi, M., Sprowitz, A., Tuleu, A., Ahmadabadi, M.N., and Ijspeert, A. J., "Benefits of an active spine supported bounding locomotion with a small compliant quadruped robot," In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3329-3334, 2013.
- [12] Li, B., Li, Y. B., Ruan, J., and Song, H., "Study of quadruped robot gait planning base on Wilson-Cowan neural oscillators," In *Journal of Shandong University.(Engineering Science)*, 2010.
- [13] Li, F., Li, J. L., Yu, Yi. and Fan, B., "A New Method for Gait Synthesis of Biped Robot Based on CPG," In *Journal of Shandong University of Science and Technology*, 2011.
- [14] Ljiljana, S., Lionel, R., Franck, H. Marie-Paule, C. and Carol O. S., "Quadruped Animation," In *EUROGRAPHICS 2008 State of The Art Report*, 2008.
- [15] Ma, S. T., Tomiyama and Wada, H., "Omnidirectional static walking of a quadruped robot," In *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 2, pp. 151-161, 2005.
- [16] Muybridge, E., "Animals in Motion," *Dover Publications*, 1957.
- [17] Peng, S., Shui, H. and Ma, H., "A simulation and experiment research on turning gait planning of blackmann-II humanoid robot," In *Proceedings of International IEEE international Conference on Control and Automation*, pp. 719-724, 2010.
- [18] Poulakakis, I., Smith, A. J. and Buehler, M., "Modeling and experiments of untethered quadrupedal running with a bounding gait: The scout II robot," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 239-256, 2005.
- [19] Samuel, R. B. and Kim, J. S., "Selectively Damped Least Squares for Inverse Kinematics," In *Journal of Graphics Tools*, Vol. 10, No. 3, pp. 37-49, 2004.
- [20] Shkolnik, A., Levashov, M., Manchester, I. R., and Tedrake, R., "Bounding on Rough Terrain with the LittleDog Robot," *International Journal of Robotics*

- Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 192-215, 2011.
- [21] Sun, L., Meng, M. Q., Chen, W., Liang, H., and Mei, T., "Design of Quadruped Robot Based CPG and Fuzzy Neural Network," *Lecture Notes in Computer Science* Vol 4491, pp. 843-851, 2007.
- [22] Tomoyuki, T., Azuma, Y. and Shibata, T., "Acquisition of Energy-Efficient Bipedal Walking Using CPG-Based Reinforcement Learning," In *Proceedings of IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 827-835, 2009.
- [23] Wang, F., Zhang, Q., and Zhou, Y., "Introduction of non-linear oscillator model of CPGs," In *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2007.
- [24] Wang, X., Li, M., Wang, P., and Sun, L., "Running and Turning Control of a Quadruped Robot with Compliant Legs in Bounding Gait," In *Proceedings of IEEE international Conference on Robotics and Automation*, pp. 511-518, 2011.
- [25] Zhao, Q., Sumioka, H., Yu, X. X., Nakajima, K., Wang, Z., and Pfeifer, R., "The Function of the Spine and its Morphological Effect in Quadruped Robot Locomotion," In *Proceedings of IEEE international conference on robotics and biomimetic*, 66-71, 2012.