

仿生機器人

文·圖／林沛群

生物研究與機器人研發已行之有年，隨著近年來對於跨領域研究的重視，這兩個分別隸屬於科學和工程的研究，逐漸產生了交集，而有了「仿生機器人」這一個新興領域的誕生。仿生機器人之研究，廣義的來說，泛指機器人應用了自然界生物系統中所擁有的一些機制與設計，使機器人能展現該生物系統所具有的特定功能。機器人本身是一個複雜的系統，涵蓋層面包括材料、元件、至整體系統的運作，而本質上包含了軟體與硬體。在這個定義之下，研究所涵蓋之範圍包羅萬象，由最前端的仿生概念、到元素層級的生物材料、到子系統如人工肌肉、類神經網路、人工智慧等、到系統層級如機器人建構、運動分析等等。也因此，1960年代即開始發展，目前已趨成熟的工業用機械手臂也隸屬於仿生機器人之範疇，畢竟研發機械手臂最初動的動機，在於取代人的雙臂，進行重複性、或高精確性、或高危險性的工作。而在目前機器人學界的氛圍中，對仿生機器人較具有共識但較狹義的認定，則傾向於限定在外型或功能和生物具相似度，且「可移動」的機器人，著重在系統整合層次，以外顯的仿生行為來認定。而仿生機器人這跨領域研究在這一、二十年才開始的原因，或許可歸納為：對生物系統的認知與其應用性隨著科技的進步而有較深入的認知（要仿什麼？），與建構機器人整體系統所需相關元件與技術逐漸發展成熟（是否有能力？）。

以產生運動（或移動、運輸等）的角度來看，生物具有快速敏捷的運動能力，而人造系統如車輛、飛機、船舶等的表現也具有特色，在某些方面甚至能大幅超越生物系統所具備的能力。值得注意的是，生物系統與人造系統在設計上的本質有顯著的差異，簡單來說，生物演化是以改變自身來適應環境的方式進行，而人造系統則是以系統製造和環境改變兩方面同步，如火車運動同時需要鐵軌鋪設、汽車需要公路、飛機需要機場及穩定氣流等等。也由於這設計本質上的差異，使工程開發與生物演化走向幾乎全然不同的架構，如陸上運動的腳vs.輪、空中的拍翼vs.定翼噴射+推進、水中的波動前進vs.螺旋槳推進。當然，建構人造系統的用意並不一定與生物求生存的目標相同，因此，仿生或許僅是工程系統設計中所可能解決方案中的其中一項，並非唯一。但仿生工程的進行，除了替工程方法所不能解決的問題來提供一個生物端的可行解之外，也藉由這一個過程，能更深入的比對與驗證生物機制演化的本質與緣由，而陸地上運行之足式機器人的研發，便是其中一個很鮮明的案例。雖然輪型載具或機器人在平地上有高速穩定的運動能力是足式機器人所不可及的，但也不可否認的，足式運動在崎嶇環境中越障與動態運行的能力則是任何其他人造發明所無法比擬的。仿生機器人涵蓋陸海空三個運作空間，由於筆者本身主要在進行陸地上的運動，因此接下來的內容以探討足式仿生機器人為主。

生物所產生之足式運動具有兩項特徵，一是強韌性，能適應各式複雜的自然地形，一是敏捷性，能產生快速的運動。而這兩項特徵的結合，也是生物體所必須具備的基本能力，使其能在食物鏈與天擇之演化機制下生存下來。從工程的角度來看，這兩者則站在兩個不同的

極端。要能適應各式複雜環境，間接代表機器人的自由度（i.e., 可動的關節）要很多，使身體能在不同的姿態下，都能伸展足部到適合的位置，以產生支撐力或是推進力。高自由度的足部也代表系統複雜度高，提高建構機器人所需機械設計、機電整合、控制技術、與系統整合的難度。另外，隨著複雜系統的建構，整體重量大幅增加，則阻礙了產生敏捷運動的可能性。目前在機器人上所使用致動器以馬達為大宗，但現今科技所製造出馬達所具有的能量密度仍遠低於生物的肌肉系統，因此在同樣重量的生物與機器人相比較，機器人所能產生的運動行為就遠低於生物所能達到的。若致動器問題解決了，下一個難題則落在控制法則上，目前我們仍沒有一個良好的控制架構與流程，來處理高自由度動態系統的問題，學理與實驗端仍有很大發展的空間。

因為現階段科技無法設計能同時滿足對環境的適應性與敏捷性的機器人，在學術界的研究也分為兩個走向，一為先探討環境適應性，設計高自由度的機器人，以較靜態緩慢的運動方式來探討如何控制高自由度的運動，另一為探討敏捷性，建構出低自由度輕重量的系統，切入動態運動的控制問題。長遠來看，筆者相信者兩個研究走向會逐漸彙整，創造出如生物般高自由度卻又能敏捷運動的仿生機器人，達到目前在變形金剛系列電影中人們想像機器人運動的模樣，但目前離這想像還有一大段距離。

筆者自在美留學期間開始進行仿生足式機器人之研究，以探討低自由度動態運動為主，使系統本身在模擬以及控制器設計等能從具理論性的方式切入，以進行較為深入之系統研究，確切瞭解物理模型、動態行為、與運動穩定性等相互之關連。此研究方法於學理上較為嚴謹，並可於基本理論完備後，以逐步增加自由度之方式，朝向高自由度機器人邁進，於長遠研發進程上或許較具系統性與連續性。雖然機器人本身為低自由度，但在運動產生上則仍傳承動物運動的本質特性，保有仿生的特質。動物運動特性的研究中顯示，不論是六足的昆蟲類、四足的哺乳類、或是二足的人類，在進行高速運動時，均可用簡易的彈性倒擺SLIP

（Spring Loaded Inverted Pendulum）來模擬，複雜的系統可簡化為被無重量無阻泥的彈簧所支撐的單一質點，如圖1（a）所示。在運動時，質點所具有之動能、彈簧所儲存之位能、和重力位能間不停的轉換，來產生往前的動態運動行為，使運動本身有地面接觸和騰空飛行兩種狀態的交替，如圖1（b）所示。這個模型也間接說明了動物在進行動態運動時，高自由度的足和彈簧本質上具有某一程度的相似性，也因此在此機器人的設計中，足部多設計有被動彈性自由度，藉以匹配SLIP模型，以輔助誘發動態運動。而實驗室所建構的小

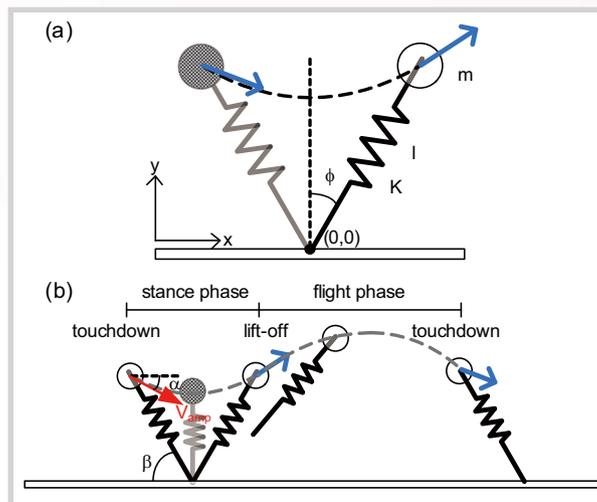


圖1



圖2

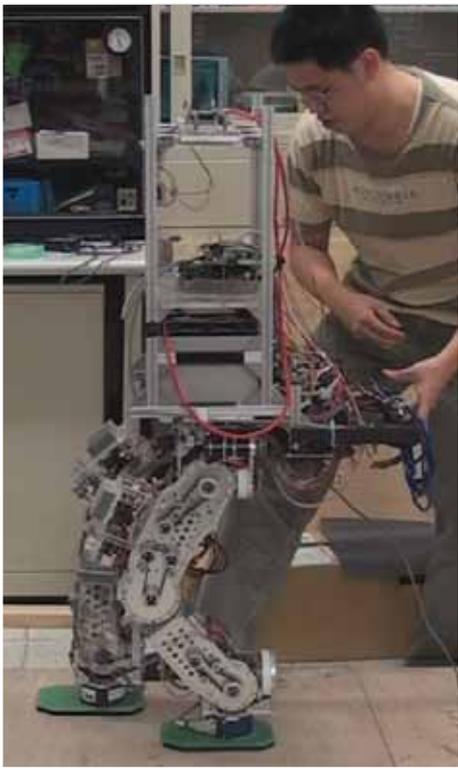


圖3

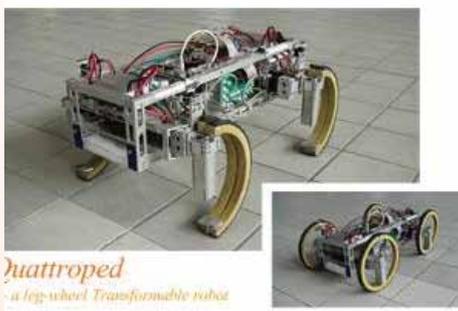


圖4

型六足機器人，承襲在美研究所設計的機器人架構，每一隻腳以一個撓性元件構成，產生彈簧的效果，來開發穩定的跑步步態。雖然簡化的SLIP模型具有本質性（intrinsic），能定性的描述系統特性，但卻不容易定量的在機器人上進行更進一步分析與應用。質量集中在一點，忽略轉動慣量的效應，其本身為平面模型，忽略了運動時左右搖擺狀態的描述。此外，SLIP本身也為能量守衡系統，並不涵蓋任何能量損耗，和真實系統之運作並不相同。因為這個因素，探討具能量輸出輸入的模型也在積極開發中。同時，雖然低自由度的系統對於崎嶇地形的適應性有極限，實驗室內也積極嘗試探討在有限的自由度下，如何產生針對特定地形適宜的腳操控步態，以完成運動的目的，圖2為這六足機器人以仿蟑螂遇到高障礙物的運動方式，來達到爬高障礙物的目的。除此之外，實驗室也建構雙足機器人，如圖3所示，探討高自由度系統的運作方式，雙足運動因平衡問題與系統複雜度而具有極高挑戰性，因此策略為由穩定慢速行走出發，逐步切入崎嶇地形與干擾環境下的控制機制。前述六足與雙足機器人之研究大多座落在仿生的架構之下，以探討足運動的特性與步態研發為主。不可否認的，現今人造環境中已大量存在著平坦的地形，因此，在仿生之外，也著手整合輪與腳的運動機制，開發出四輪四足複合式移動機器人，如圖4所示，藉由複合式的設計，使其在平面上運動具有輪型移動機器人穩定、高效能、以及快速移動的特色，同時也藉由其腳的模式，達到對於不同地形而有絕佳的適應性，提供良好的越障能力。

目前仿生機器人的研發，主軸還是建構在機械、電機、資訊、與系統四大領域的整合之上，當然，加上一些觀察生物系統所得到的靈感做為機器人設計的根源。隨著近10年來材料科學的蓬勃發展，將該領域的發現試圖整合在機器人上的案例也逐漸浮現，其中較顯著的例子，便是由壁虎（gecko）爬牆所使用乾式黏著（Dry adhesion）的機制，以應用在垂直運動的仿生機器人上。相較於大部分動物以足上微小的鉤子和細毛嵌入微觀上粗糙的牆面以保持和牆面間的正向力來進行攀爬，壁虎具有獨特的物理機制 以足部和牆面間相互的凡

得瓦力作為正向力來源。凡得瓦力僅在分子間距離極短時有作用，因此壁虎的足部具有微米級和奈米級的撓性細毛設計，確保毛末端能和粗糙的牆面緊貼，產生足夠的凡得瓦力來支撐自身重力。目前學界在製造出單純微米級或是奈米級之結構已無問題，但在開發複合結構上仍具有困難度，也因此人造結構所能產生之正向力仍遠小於壁虎所能產生，使在機器人上之應用仍有限制。除此之外，即使開發出極強大的乾式黏著介面，到能使機器人能動態的爬牆還有一大段研究歷程需探索，除了原本致動能量密度不足的問題之外，如何保持黏著系統自潔、如何進行機器人和牆面間的黏著和釋放、如何調配步態使機器人能順利克服重力進行攀升等，都仍未有明確的答案，等待研究者深入探索。當然材料科學的影響力不止於此，隨著對於材料的掌握度逐漸增加，尤其在軟性材料方面，仿生機器人界也逐漸開始思考使用軟性材料來建構機器人的可行性，在架構上更貼近生物系統。

對生物系統可進行瞭解的程度，也是建立在工程科技的水準之上：各式顯微鏡的發明，使以微觀角度探索自然生物狀態變為可能，輔助詮釋了原本在巨觀世界中所不能理解的現象；各式高性能運動分析儀器的問世，也使動物所展現的動態行為能更進一步的擷取以進行定量分析。各個前後段研究跨領域的整合，使生物系統經演化後所隱藏秘密逐步揭露，進而提升在工程界精準「仿生」的可能性。當然，回歸到基本問題，為什麼要仿生？生物系統是最佳化的嗎？事實上，生物系統在許多生物研究學者的眼中，是勉強存活的，藉由突變產生微小的差異，使其勉強存活在變化的環境中。如果這樣，仿生的意義為何？筆者個人傾向於，仿生是一個過程，不是一個必然的結果。面對一個工程問題，尤其在不知如何下手時，回過頭來觀察生物系統，或許能有效提供一個初始的解決途徑，也或許能經由生物系統的運作獲得靈感，再依工程之需要進行修正，拓展無限之可能。如前所述，畢竟生物系統演化所依據的法則於本質上和工程不同，因此工程在設計和最佳化的方向，自然就會有所差異。圖（本專題策畫／電機系林茂昭教授&化工系陳文章教授）

延伸閱讀：

- [1]林沛群, 仿生機器人之兩三事”, 機械月刊, Mar. 2009, 第404期, pp62-75
- [2]林沛群, 施文彬, 壁虎游牆功：仿生奈米黏著技術”, 中華民國力學學會會訊, Jul. 2010, 第131期, 專題報導
- [3]林沛群, 關於足式仿生機器人的一些想法”, 機器人產業情報報告, Jul. 2010, 第44期, pp2-11
- [4]鄒亞成, 林沛群, 仿生多足機器人研發現況”, 機器人產業情報報告, Oct. 2010, 第47期, pp13-21
- [5]林沛群, 機器人在土木工程上的應用”, 機器人產業情報報告, Nov. 2010, 第48期, pp2



林沛群小檔案

1996年與1998年先後自臺灣大學機械系與研究所畢業，之後赴美國密西根大學（University of Michigan - Ann Arbor）留學，進行動態足式機器人之研究，於2005年分別取得電機與資訊碩士和機械博士學位。之後移至位於美國費城的賓州大學（University of Pennsylvania）材料科學與工程學系進行博士後研究，開發可調控高分子軟性材料。2007年回臺大機械任教，仍以足式機器人為核心，探討運動問題，開發相關機電元件技術，以設計和控制並行的角度來探討系統特性，並著手整合材料相關技術至仿生機器人研發。