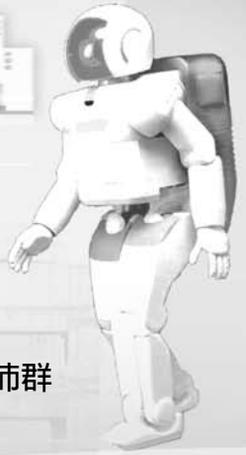


# 仿生機器人之兩三事



文/林沛群

關鍵字：仿生機器人、足式機器人、生物運動模型、系統整合、仿生工程、材料科學。

## 緣起

仿生機器人，廣義的來說，泛指機器人這項人造產品在設計的過程中，應用了自然界生物系統中所擁有的一些機制與設計，如外形、材料、感測種類與分佈、驅動器配置、系統控制及人工智慧等，使機器人能展現該生物系統所具有的部分功能。在這個定義之下，1960年代即開始發展，目前已趨成熟的工業用機械手臂也在仿生機器人的範疇之下，畢竟機械手臂研發背後的動機，在取代人的雙臂，進行重複性、或高精度性、或高危險性的工作。而目前學界中，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和生物具相似度，且「可移動」的機器人。而仿生機器人為何在這一二十年才開始引起學界業界注意？其主要原因可歸納為機器人整體系統所需使用的相關元件與技術逐漸趨於成熟(是否有能力「仿生」?)，對生物系統的認知也隨著科儀的進步而

有較長足的認知(如何去「仿生」?)，而部分原因可歸於以其他方式進行移動的設計面臨到了瓶頸(為何要「仿生」?)。

## 演進

動物與植物的分野，在於「自主移動能力」的擁有與否，而自有人類文明以來，如何進行適宜的「移動」(motion)或「運輸」(transportation)，便一直是一個重要的議題。遠古時期之人類，由運用自身架構進行移動開始(步行、跑步、爬行等)，到衍伸出利用其它動物所具有之獸力進行移動(騎馬、乘象、駕牛等)，到距今約六千年前由美索不達米亞(Mesopotamia)文明所發展出車輪(wheel)之概念<sup>[1]</sup>，而開始有所謂運輸車(wagon)之發明，將運輸(移動)能力提升到另一個層次。然而，在接續的數千年，人類在移動能力方面之演進，卻未有顯著的提升，其根本的原因在於：一個移動的產生，除了適宜的機構(如車輪)外，需

要有良好的機械動力源，或是能量轉換的機制，將其它形式的能量，轉換為有效的機械能。由此初始型態的機械能，再經由精巧的機構設計，轉換成可和周遭環境產生相對運動的機械動力，進而產生移動。而這數千年來所採用路上移動或運輸的方式，基本動力源仍為生物本身(化學能)，因此整體運動能力就直接取決於生物本身所具有之能力(馬車可達之運動狀態至極致，頂多相仿於馬自身奔行之運動狀態)。在水上運輸方面，由於存有另一可用動力源「風力」之輔助，因此在發展上相對於路上運輸有較明顯的進步(如哥倫布航海、建造運河進行水上運輸等)。人類所能進行移動或運輸的狀態，在十八世紀末工業革命開始能有效利用蒸氣機<sup>[2]</sup>，能將存於物質中的化學能有效的轉換為機械能之後，才開始有了巨大的改變。

英國工程師Richard Trevithick<sup>[3]</sup>發明了人類第一個蒸汽火車頭，而他在西元1808年大力推銷這個新式機械移動概念所製作的行銷廣告<sup>[4]</sup>“Catch me who can: Mechanical power subduing animal speed”，也仍在倫敦科學博物館(science museum)的能源廳(energy hall)中珍藏著。當然，推廣一項創新的觀念並使其為人群所接受並不容易，需要時間的累積。西元1830年，人類第一條商用火車路線正式的開始營運<sup>[5]</sup>，以獸力輔佐人類進行移動或運輸的時代漸漸開始式微。自此之後至今將近兩百年的文明演進中，人類藉由對自然科學認知的

累積，陸陸續續發明了許多能產生運行(locomotion)的交通工具，如汽車、船、飛機、直昇機、甚至火箭等，將人類之移動能力大大的提升，將運行提升至另一個境界。這些發明本身均具有強大的運行能力，和生物系統所具有的運行機制及方式並沒有很直接的關連(並非「仿生」)。但是，很容易便可察覺到，大多數的運行工具都必須運作在特殊的外在環境設定中，如火車需要鋪設鐵軌、汽車需要公路架設、飛機需要起降用機場及穩定的大氣氣流來進行飛行等。對於在未經特殊處理過的高複雜度自然環境中，很遺憾並不存在任何一項人類發明的機具可在其中自由運行。對於崎嶇的地面，越野用的吉普車及履帶車只可進行某些程度的運行，對於垂直的峭壁，目前則是完全沒有良好的運行工具。反觀自然界，不論是在何種棲息地生存的動物，其快速敏捷的運動能力(mobility)及多樣化的運動行為，仍是人類目前發明所無法望其項背的。這顯著的差異也間接說明了人類發明和自然界生物演化機制背後基本法則的不同：對於環境中複雜度高的地貌，人類設計簡單的運行工具，藉由「改變」環境的方式使設計的工具能使用；反之，自然界的生物，並沒有能力改變環境，便只能「山不轉路轉、路不轉人轉」，以自身突變演化的方式來適應外在環境，使自身可運行以求得生存。當然，地球歷經數億年來生物的演化，至人類的出現才使腦部演化到可產生文明的程度，進而劇烈的改

變世界以及撼動整個生態系統的平衡，是好是壞？是必然或偶然？仍是一個具爭議性、哲學性與理念性的問題，不在本文探討的範圍中，也不是才疏學淺的筆者所能回答的問題。

那麼，這些經演化後存活下來的生物所隱藏的秘密是什麼？是什麼原因賦予這些動物快速敏捷的運動能力及多樣化的運動行爲？簡單來說，分爲以下四點：

1. 生物本身演化出具特定型態的高自由度(degree of freedom)系統，以適應各種不同的外在環境，以及維持生命機能；
2. 生物本身有強健的控制系統，來協調自身所具有運動自由度的關節；
3. 高能量密度之生物關節驅動系統，其效能仍遠高於人類目前所發明的各式致動器；
4. 建構生物本身之高複雜度高效能生物有機材料。

基於這些原因，瞭解生物系統的運動模式及從研究生物系統中得到機器人設計及控制的啓發，是研究能在自然環境中運行的機器人(或未來之交通工具)的一個可行的研究走向，也爲人類苦惱無法開發出能在自然環境中強韌運動的載具提供一個解套的方式。當然，開發此類型載具，除了娛樂及寵物的功能之外，在民生應用上的動機目前並不強烈，畢竟我們周遭的環境已經經過適度的改變，不需要面對崎嶇不平的外在環境，但此類型載具對於國防、外太空探

索(或殖民)、救災等情境中，仍具有一定程度的重要性。而筆者個人偏好的理念，在於相信進行仿生機器人相關議題的研發，對未來科學與工程會具有極大的重要性---仿生機器人爲一個整合性的系統，其中所需應用的學理和工程元件都走在目前學界和業界所具備知識的前端，像前述四項生物所具有的能力中每一項對人類現有科技文明都是極大的挑戰，要整合所有相關子系統來開發機器人更加困難，因此研發的過程，也適時引導與配合相關學理與工程上的發展。

在仿生機器人這個研究領域中，仿生足式機器人(legged robots)大概是讀者所最熟悉的。若不考慮在電影或是科幻小說中所出現的想像，這類型多足機器人實體開發的初始(80年代末期)以MIT Mobot Lab所研發的Genghis<sup>[6]</sup>、Hannibal<sup>[7]</sup>和Attila系列最爲出名，而這些六足機器人也刊登在當時科普雜誌如Popular Science、Discover Magazine等的封面。以六足類的昆蟲作爲模仿對象的動機，在於六足可輕易分成兩個三足進行交替運動(tripod gait)，不僅在運動過程中較易具有穩定性，也容易以簡單控制開發出運動步態。而時間點落在80年代末期，則取決於當時無線遙控伺服馬達(RC servo motor)相關技術的成熟以及微處理器開始於學業界廣泛的應用。RC伺服馬達因本身即具有馬達功率放大以及位置控制之功能，與外部的控制訊號聯繫較簡易，較容易以微處理器進行控制，也因遙控玩具市場的支撐進行輕

量化與提升扭力之方向研發，使得早期MIT進行機器人之實體化便以RC伺服建構驅動系統。RC系列經過這十數年來的發展，以及隨著仿生機器人的概念逐漸被推廣出來，目前多足機器人在高階玩具市場上已逐漸具有能見度，這類型機器人在致動器上均以RC伺服馬達為主，也因最近幾年對高扭力RC伺服的開發，成就SONY的四足機器人AIBO<sup>[8, 9]</sup>以及其它小型人型機器人玩具的問世，如Kondo KHR系列<sup>[10]</sup>、WooWEE的RoboSapien系列<sup>[11]</sup>等。SONY的AIBO，在業界開創了「寵物」機器人這一類型的商品的能見度，在學界也為數類型研發的共同平台，如足球機器人(RoboCup<sup>[12]</sup>)相關應用以及機器人學習演算方面<sup>[13]</sup>。

而在學界上對仿生足式機器人的研發，因控制上的需求，以及不同重量級距的因素，大多以DC伺服馬達為致動器，如德國FZI(research and information center)所研發的六足機器人Lauron<sup>[14]</sup>、AIS(institute of autonomous intelligent systems)所研發的八足機器人Scorpion<sup>[15]</sup>、以及近幾年當紅的人型機器人(humanoid robot)等，如Honda的Asimo<sup>[16, 17]</sup>、Sony的Qrio<sup>[18, 19]</sup>、Waseda University的Wabian系列<sup>[20-22]</sup>、AIST(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)的HRP系列<sup>[23, 24]</sup>、韓國KAIST的HUBO系列<sup>[25-27]</sup>等。這類型機器人的設計理念，以「仿真式」機器人為主，設計概念在於「複製」生物所具有之幾何形體及運動關節配置，

試圖經由與自然界相仿之關節運動方式來達到機器人之作動。然而，由於下列數項原因，使實際之成果展現不易達成預期的要求：

1. 目前較易達成控制功能的驅動器如馬達等所能達到之(重量)能量密度(power density)與生物所具有驅動系統(如肌肉)之能量密度相比仍有一大段距離，因此在驅動上有極大瓶頸。足式機器人對於致動系統的規格要求遠大於輪型(wheel-based)機器人或載具，輪機構將運動系統本身的重力由結構來承載，因此致動器的動力大部分用在驅動上，而足式機器人的致動器需同時肩負載重和驅動的需求，因此可以想像致動器本身需具備足夠的能量密度(W/kg，每單位重量的致動器所能產生的致動功率)，才有辦法帶動整個系統進行運動。致動器能量密度的不足迄今仍為開發仿生機器人上一個極大的瓶頸，即使設計出與生物系統重量相仿驅動關節相近的系統，因致動能量的不足(目前人造致動器約為生物系統所具備的十分之一)，使機器人無法展現出與生物相仿的運動行為。目前中小型DC brushed motor的能量密度，若只考慮馬達本體約可達300W/kg<sup>[28, 29]</sup>，但若加上減速齒輪組、編碼器、驅動電路、效率因素等，一般而言則降為30-50W/kg。近期間世的DC無刷馬達於馬達本體之能量密度可達~800W/kg，但如同有刷馬達加上相關配件以

及無刷馬達所需控制電路後，效能也大打折扣。

2. 機器人所具有的質量及慣量(moment of inertia)之大小及相對配重並未能與動物完全相仿，因此即使機器人各個關節的設定能精確展現與生物系統相仿的位置、速度與加速度對時間之曲線(等同於假設具有特性能與肌肉相匹配的驅動器)，機器人系統仍無法展現與生物系統相仿之運動行為。
3. 動物因需在不規則的地形上運動，以及進食謀生的需求，大多發展為高自由度系統，而目前學界對高自由度系統控制理論發展尚未完備，使控制器設計困難度極高，尤其生物系統特性多為非線性，且各關節間需具備良好協調機制(coordination control)。
4. 以預設軌跡以及些微步態修正之方式來進行控制器設計與步態開發之系統，對於外來擾動之抵抗有限，因此於外在環境不穩定時控制失效的機率很大。

基於以上的原因，目前在這一個設計架構下所發展出來的機器人所展現的多為慢速、半靜態的運動方式。

若純就「運動行為」來考量，仿生足式機器人發展的原意，在建構能在不規則地形上進行如生物系統般快速且動態運動(dynamical locomotion)的機器人。因不規則環境的限制條件，系統多具有高自由度。能否設計出低自由度但能在不規則環境下強韌運動的機器人，則考驗人類的智慧，是否有超越演化的

可能。假定終極目標是「高自由度」「動態移動」的機器人開發，前面數個段落中描述的機器人所採用的便是「取」高自由度，「捨」動態移動，保留外型之仿生，由半靜態的緩慢移動開始，逐步邁向動態。Honda的Asimo，經過了十數年的研發，機器人已能從1.6km/h的慢速行走進展到6km/h的小跑步，便是這一個研究走向具代表性的例子。當然，要達到終極目標，還有另一個途徑：「取」動態運動，「捨」高自由度，保留生物所具有之動態運動行為，由瞭解低自由度系統<sup>[30, 31]</sup>的動態特性以及控制開始，逐漸增加自由度以應付外在環境的變異度。

## 由簡而繁

低自由度系統之設計使機器人輕量化(「簡約式」<sup>[32]</sup>)，也使系統本身在模擬以及控制器設計等能從純理論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「仿真式」機器人邁進，於長遠研發進程上較具系統性。由於馬達低能量密度之問題依然存在，所以此類型機器人一般會採用彈簧或空壓裝置等其它被動可儲機械能之元件加以輔助，經由適時驅動馬達來誘發和這一些機構間的能量轉換，藉以產生機器人的動

態行爲。此研究導向於80年代初期由MIT Leg Lab的Dr. Marc Raibert進行單足跳動機器人(monopod)研究即開始<sup>[33-38]</sup>，由平面上的跳動延伸到3D立體空間中的跳動，由單足延伸至四足與二足的機器人。因早期馬達特性不佳，因此這一系列機器人均採用氣動的方式，需要額外的空壓機產生高壓氣體，無法延伸至全自主驅動(power autonomous)，然而，這一系列的機器人均展現出良好的動態特性，爲這一個研究領域定下基石。直到90年代中期之後，相關的設計才被改良爲以馬達作爲致動器，以電池驅動，直到此時此類型動態足式機器人才真正具備全自主的能力(autonomous)。四足的Scout系列<sup>[39, 40]</sup>、四足的Tekken系列<sup>[41-43]</sup>、六足的RHex<sup>[31, 44-48]</sup>(RHex亦是筆者進行博士論文研究時主要使用的機器人平台<sup>[45, 46, 49]</sup>，如圖1)及六足的Sprawl家族<sup>[50, 51]</sup>等，均屬於這一類型的機器人。動物運動特性

的研究中顯示，不論是六足的昆蟲類、或是四足的哺乳類、或是二足的人類，在進行高速運動時，均可以簡易的彈性倒擺SLIP(Spring Loaded Inverted Pendulum，如圖2(a))來模擬<sup>[52, 53]</sup>，系統可簡化爲單一質點，由無重量無阻泥的彈簧支撐著，因此在運動時，質點所具有之動能和彈簧所儲存之位能不停轉換，產生動態運動行爲。這也間接說明了動物在進行高速運動時，高自由度的腳和可儲能的彈簧具某一程度的等效，也因此在這一系列的機器人設計中，腳部分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RHex<sup>[54]</sup>和Sprawl家族<sup>[55]</sup>均明顯地展現出此一項特性。當然，越簡化的模型越具有本質性(intrinsic)，能定性的(qualitative)描述系統特性，卻不易量化的(quantitative)進行更進一步分析。以SLIP來說，質量集中在一點，忽略轉動慣量的效應，其本身爲平面模型，忽略了運動時左

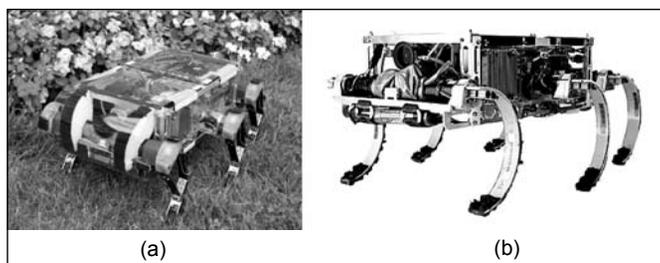


圖1 六足機器人RHex：(a)配備1D被動自由度之四連桿撓性腳；(b)配備2D被動自由度之半圓撓性腳。

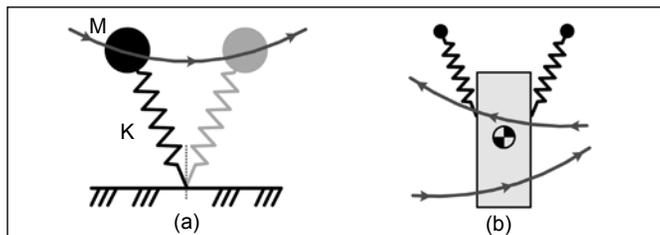


圖2 運動模型：(a)生物水平運動時使用之簡化模型：彈性倒擺模型<sup>[52]</sup>；(b)生物動態爬牆時可使用之簡化模型<sup>[60]</sup>。

右搖擺狀態的描述，其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。也因此許多較複雜模型陸陸續續被進行研發<sup>[56-59]</sup>，但目前仍未有另一個新的模型被廣泛接受。水平方向的運動有SLIP作為通用模型，具垂直爬牆能力的生物是否也同樣展現相似的運動行為？在經過對六足蟑螂和四足壁虎爬牆特性的研究之後，初步歸納出此兩種動物於爬牆時的運動行為均可以簡易二足的模型來代表<sup>[60]</sup>(圖2(b))，而筆者於博士後研究期間之研究，便以此模型為藍本，於團隊中進行動態爬牆機器人DynaClimber<sup>[30, 61]</sup>之研發(如圖3)，於此系統中我們開發出由彈簧直接輔助

馬達驅動關節的機制來提升關節之驅動力，克服馬達能量密度不足之限制，並製作出學界業界第一個動態爬牆機器人。而Boston Dynamics<sup>[62]</sup>所開發出的四足機器人BigDog，則是筆者個人認為是目前學界業界中極令人驚異的作品，其每足三個自由度的設計，座落在「仿真式」和「簡約式」機器人之間，能同時展現出克服崎嶇地形的能力，也能產生動態跑步以及跳躍的行為。

## 延伸

由以上的簡要說明可看出，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作為機器人設計的根源。隨著近十年來材料科學的蓬勃發展，將該領域的發現實際整合在機器人上的案例也逐漸浮現，其中較顯著的兩個例子，便是蓮花效應(lotus effect)和乾式黏著(dry adhesion)的應用。蓮花效應於1997由Dr. Barthlott提出<sup>[63, 64]</sup>，說明蓮花葉表面因同時具有微米級和奈米級雙粗糙度(dual roughness)的存在，使表面具有超疏水性(super hydrophobic)而使水滴不易附著在表面、易滾動而同時能帶走表

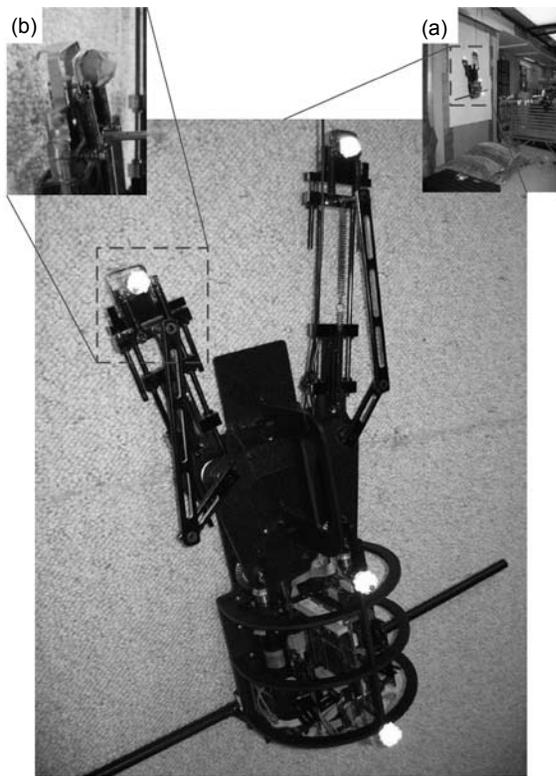


圖3 二足動態爬牆機器人DynaClimber：(a)實驗環境設定；(b)爪部放大圖。

面的灰塵，達到自潔的(self cleaning)作用。這一個研究在材料科學界引起很大的震撼，並開始廣泛探討不同尺寸級距之表面粗糙度對固體液體間界面之影響，以及建立自潔表面的可能性<sup>[65-67]</sup>。因表面粗糙度產生的超疏水性接觸在水蜘蛛(water strider)的足部被觀察到，以超疏水界面產生的表面張力支撐水蜘蛛使其「站」在水面上，觀察生物系統得到結論後則由機器人界接續，以機器水蜘蛛的設計製造來驗證仿生工程之可能性<sup>[68]</sup>。乾式黏著方面的研究則在觀察可垂直攀爬生物的攀爬行為引伸出，相較於大部分動物以足上微小的鉤子(hook)和細毛(spine)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(gecko)具有獨特的物理機制—以足部和牆面間相互的凡得瓦力(Van der Waals force)作為正向力來源<sup>[69-72]</sup>。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(seta)和奈米級(spatula)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。事實上，壁虎足部的細毛只要1%起作用，便足以支撐自身重力，如此便能想向壁虎為何能輕易的快速動態的在垂直牆面上攀爬無礙。這種乾式、不需要液體界面、以凡得瓦力作為正向黏著力的機制同樣的在材料科學界引起極大震撼，開始了人造壁虎腳毛(artificial gecko hair)的研究，試圖仿造出和壁虎腳毛上相似的微結構。目前學界在製造出微米級結構已無問題，

但在添加奈米級結構則仍具有困難度，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<sup>[73-76]</sup>。雖因如此，機器人界也以初始的成果開發出壁虎機器人，嘗試以此物理機制達到爬牆的功能<sup>[77-79]</sup>。換另一個角度來看，即使開發出極強大的乾式黏著界面，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。

## 結論

對生物系統可進行瞭解的程度，交互的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，也使動物所展性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(barely survive)，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。畢竟生物系統演化所依據的法則於本質上和工程不同，工程不需要考慮自身維生與存活，在複雜的食物網以及外在環境中求得一席之地，如此一來，工程自然地在最佳化的方向就會有所變異。盲目的仿生並未能保證適宜的結果，否則，飛機為何不以拍翅法來進行飛行，不是嗎？

## 參考資料

1. Wikipedia, Wheel. [cited; Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wheel>.
2. Wikipedia, Steam Engine. [cited; Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Steam\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_engine).
3. Wikipedia, Richard Trevithick. [cited; Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Trevithick](http://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Trevithick).
4. Trevithick, R., Catch Me Who Can: Mechanical Power Subduing Animal Speed. [cited; Available from: <http://www.sciencemuseum.org.uk/on-line/energyhall/page101.asp>.
5. Wikipedia, History of Rail Transport in Great Britain to 1830. [cited; Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_rail\\_transport\\_in\\_Great\\_Britain\\_to\\_1830](http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_rail_transport_in_Great_Britain_to_1830).
6. Rodney, B., A Robot That Walks; Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network, in MIT AI Lab Memo, 1989.
7. Angle, A., Design of an Artificial Creature, 1991, MIT.
8. Hohl, L., et al., Aibo and Webots: Simulation, Wireless Remote Control and Controller Transfer, Robotics and Autonomous Systems, 2006. 54(6): p. 472-485.
9. Loughlin, C., AIBO in the Dog House, Industrial Robot-an International Journal, 2006. 33(4): p. 248-248.
10. Kondo. [cited; Available from: <http://www.kondo-robot.com>.
11. WooWEE. [cited; Available from: <http://www.wowwee.com/robosapien/>.
12. RoboCup. [cited; Available from: <http://www.robocup.org/>.
13. Chalup, S.K., C.L. Murch, and M.J. Quinlan, Machine Learning with AIBO Robots in the Four-legged League of RoboCup. Ieee Transactions on

- Systems Man and Cybernetics Part C-Applications and Reviews, 2007. 37(3): p. 297-310.
14. Gassmann, B., et al., Localization of Walking Robots, in IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005. p. 1483-1488.
  15. Klaassen, B., et al. Biomimetic Walking Robot Scorpion: Control and Modelling. in International Symposium on Intelligent Robotic Systems, 2001.
  16. Hirai, K., The Honda Humanoid Robot: Development and Future Perspective, Industrial Robot, 1999. 26(4): p. 260-266.
  17. Hirose, M. and K. Ogawa, Honda Humanoid Robots Development. Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2007. 365(1850): p. 11-19.
  18. Ishida, T. and Y. Kuroki, Sensor System of a Small Biped Entertainment Robot. Advanced Robotics, 2004. 18(10): p. 1039-1052.
  19. Geppert, L., QRIO the Robot that Could. Ieee Spectrum, 2004. 41(5): p. 34-36.
  20. Hashimoto, S., et al., Humanoid Robots in Waseda University - Hadaly-2 and WABIAN, Autonomous Robots, 2002. 12(1): p. 25-38.
  21. Ogura, Y., et al., Sensory-based Walking Motion Instruction for Biped Humanoid Robot, Robotics and Autonomous Systems, 2004. 48(4): p. 223-230.
  22. Lim, H.O. and A. Takanishi, Biped Walking Robots Created at Waseda University: WL and WABIAN family, Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2007. 365(1850): p. 49-64.
  23. Hirukawa, H., et al., Humanoid Robotics Platforms Developed in HRP, Robotics and Autonomous Systems, 2004. 48(4): p. 165-175.
  24. Nakaoka, S., et al., Learning from Observation Paradigm: Leg Task Models for Enabling a Biped Humanoid Robot to Imitate Human Dances, International Journal of Robotics Research, 2007. 26(8): p. 829-844.
  25. Park, I.W., et al., Mechanical Design of the Humanoid Robot Platform, HUBO. Advanced Robotics, 2007. 21(11): p. 1305-1322.
  26. Kim, J.Y., I.W. Park, and J.H. Oh, Experimental Realization of Dynamic Walking of the Biped Humanoid Robot KHR-2 using Zero Moment Point Feedback and Inertial Measurement, Advanced Robotics, 2006. 20(6): p. 707-736.

27. Kim, J.Y., I.W. Park, and J.H. Oh, Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2007. 48(4): p. 457-484.
28. MaxonMotor. [cited; Available from: <http://www.maxonmotor.com>.
29. MicroMo. [cited; Available from: <http://www.micromo.com/>.
30. Clark, J.E., et al., A Bio-inspired Dynamical Vertical Climbing Robot, *Ieee Transactions on Robotics*, 2008.
31. Saranli, U., M. Buehler, and D.E. Koditschek, RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot, *International Journal of Robotics Research*, 2001. 20(7): p. 616-631.
32. Full, R.J. and D.E. Koditschek, Templates and Anchors: Neuromechanical Hypotheses of Legged Locomotion on Land, *Journal of Experimental Biology*, 1999. 202(23): p. 3325-3332.
33. Raibert, M., *Legged Robots that Balance*. 2000, MIT Press.
34. Raibert, M.H., Symmetry in Running, *Science*, 1986. 231(4743): p. 1292-1294.
35. Raibert, M.H. and I.E. Sutherland, *Machines that Walk*, *Scientific American*, 1983. 248(1): p. 44-&.
36. Raibert, M.H. and H.B. Brown, Experiments in Balance with a 2D One-Legged Hopping Machine, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*, 1984. 106(1): p. 75-81.
37. Raibert, M.H., H.B. Brown, and M. Chepponis, Experiments in Balance with a 3D One-legged Hopping Machine, *International Journal of Robotics Research*, 1984. 3(2): p. 75-92.
38. Raibert, M.H., M. Chepponis, and H.B. Brown, Running on 4 Legs as Though They Were One, *Ieee Journal of Robotics and Automation*, 1986. 2(2): p. 70-82.
39. Poulakakis, I., J.A. Smith, and M. Buehler, Modeling and Experiments of Untethered Quadrupedal Running with a Bounding Gait: The Scout II robot, *International Journal of Robotics Research*, 2005. 24(4): p. 239-256.
40. Poulakakis, I., E. Papadopoulos, and M. Buehler, On the Stability of the Passive Dynamics of Quadrupedal Running with a Bounding Gait, *International Journal of Robotics Research*, 2006. 25(7): p. 669-685.
41. Fukuoka, Y., H. Kimura, and A.H. Cohen, Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Based on Biological Concepts, *International Journal of Robotics Research*, 2003. 22(3-4): p. 187-202.

42. Kimura, H., Y. Fukuoka, and A.H. Cohen, Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts, *International Journal of Robotics Research*, 2007. 26(5): p. 475-490.
43. Kimura, H., Y. Fukuoka, and K. Konaga, Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot using a Neural System Model, *Advanced Robotics*, 2001. 15(8): p. 859-878.
44. Altendorfer, R., et al., RHex: A Biologically Inspired Hexapod Runner, *Autonomous Robots*, 2001. 11(3): p. 207-213.
45. Lin, P.C., H. Komsuoglu, and D.E. Koditschek, A Leg Configuration Measurement System for Full-body Pose Estimates in a Hexapod Robot, *Ieee Transactions on Robotics*, 2005. 21(4): p. 778-778.
46. Lin, P.C., H. Komsuoglu, and D.E. Koditschek, Sensor Data Fusion for Body State Estimation in a Hexapod Robot with Dynamical Gaits, *Ieee Transactions on Robotics*, 2006. 22(5): p. 932-943.
47. Lin, P.C., H. Komsuoglu, and D.E. Koditschek, Legged Odometry from Body Pose in a Hexapod Robot, *Experimental Robotics IX*, p. 439-448, Springer, 2006.
48. Saranli, U., A.A. Rizzi, and D.E. Koditschek, Model-based Dynamic Self-righting Maneuvers for a Hexapedal Robot, *International Journal of Robotics Research*, 2004. 23(9): p. 903-918.
49. Lin, P.C., Proprioceptive Sensing for a Legged Robot, in *University of Michigan*, 2005.
50. Cham, J.G., J.K. Karpick, and M.R. Cutkosky, Stride Period Adaptation of a Biomimetic Running Hexapod. *International Journal of Robotics Research*, 2004. 23(2): p. 141-153.
51. Kim, S., J.E. Clark, and M.R. Cutkosky, iSprawl: Design and Tuning for High-speed Autonomous Open-loop Running, *International Journal of Robotics Research*, 2006. 25(9): p. 903-912.
52. Alexander, R.M., *Elastic Mechanisms in Animal Movement 1988*, Cambridge University Press .
53. McMahon, T.A., *Elastic Mechanisms in Animal Movement - Alexander, RM.* *Nature*, 1988. 336(6199): p. 530-530.
54. Altendorfer, R., et al., Evidence for Spring Loaded Inverted Pendulum Running in a Hexapod Robot, in *Experimental Robotics Vii*. 2001. p. 291-302.
55. Cham, J.G., et al., Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing, *International Journal of Robotics Research*, 2002. 21(10-11): p.

- 869-882.
56. Altendorfer, R., D.E. Koditschek, and P. Holmes, Stability Analysis of Legged Locomotion Models by Symmetry-factored Return Maps, *International Journal of Robotics Research*, 2004. 23(10-11): p. 979-999.
  57. Altendorfer, R., D.E. Koditschek, and P. Holmes, Stability Analysis of a Clock-driven Rigid-body SLIP Model for RHex, *International Journal of Robotics Research*, 2004. 23(10-11): p. 1001-1012.
  58. Ghigliazza, R.M., et al., A Simply Stabilized Running Model, *Siam Review*, 2005. 47: p. 519-549.
  59. Seipel, J. and P. Holmes, A Simple Model for Clock-actuated Legged Locomotion, *Regular & Chaotic Dynamics*, 2007. 12(5): p. 502-520.
  60. Goldman, D.I., et al., Dynamics of Rapid Vertical Climbing in Cockroaches Reveals a Template, *Journal of Experimental Biology*, 2006. 209(15): p. 2990-3000.
  61. Clark, J.E., et al. Design of a Bio-inspired Dynamical Vertical Climbing Robot. in *Robotics: Science and Systems*. 2007. Atlanta.
  62. BostonDynamics. BigDog. [cited; Available from: <http://www.bostondynamics.com/>
  63. Barthlott, W. and C. Neinhuis, Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces, *Planta*, 1997. 202(1): p. 1-8.
  64. Neinhuis, C. and W. Barthlott, Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces, *Annals of Botany*, 1997. 79(6): p. 667-677.
  65. Bico, J., C. Marzolin, and D. Quere, Pearl drops, *Europhysics Letters*, 1999. 47(2): p. 220-226.
  66. Feng, L., et al., Super-hydrophobic Surfaces: From Natural to Artificial, *Advanced Materials*, 2002. 14(24): p. 1857-1860.
  67. Blossey, R., Self-cleaning Surfaces - Virtual Realities, *Nature Materials*, 2003. 2(5): p. 301-306.
  68. Floyd, S. and M. Sitti, Design and Development of the Lifting and Propulsion Mechanism for a Biologically Inspired Water Runner Robot, *Ieee Transactions on Robotics*, 2008. 24(3): p. 698-709.
  69. Autumn, K., et al., Evidence for Van der Waals Adhesion in Gecko Setae, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002. 99(19): p. 12252-12256.
  70. Autumn, K., How Gecko Toes Stick - The powerful, Fantastic Adhesive used by Geckos is Made of Nanoscale Hairs

- that Engage Tiny Forces, Inspiring Envy among Human Imitators, American Scientist, 2006. 94(2): p. 124-132.
71. Hansen, W.R. and K. Autumn, Evidence for Self-cleaning in Gecko Setae, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005. 102(2): p. 385-389.
72. Autumn, K., et al., Adhesive Force of a Single Gecko Foot-hair, Nature, 2000. 405(6787): p. 681-685.
73. Geim, A.K., et al., Microfabricated Adhesive Mimicking Gecko Foot-hair, Nature Materials, 2003. 2(7): p. 461-463.
74. Sitti, M. and R.S. Fearing, Synthetic Gecko Foot-hair Micro/nano-structures as Dry Adhesives, Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. 17(8): p. 1055-1073.
75. Glassmaker, N.J., et al., Design of Biomimetic Fibrillar Interfaces: 1. Making Contact, Journal of the Royal Society Interface, 2004. 1(1): p. 23-33.
76. Northen, M.T. and K.L. Turner, A Batch Fabricated Biomimetic Dry Adhesive, Nanotechnology, 2005. 16(8): p. 1159-1166.
77. Kim, S., et al., Smooth Vertical Surface Climbing with Directional Adhesion, Ieee Transactions on Robotics, 2008. 24(1): p. 65-74.
78. Murphy, M.P. and M. Sitti, Waalbot: An Agile Small-scale Wall-climbing Robot Utilizing Dry Elastomer Adhesives, Ieee-Asme Transactions on Mechatronics, 2007. 12(3): p. 330-338.
79. Spenko, M.J., et al., Biologically Inspired Climbing with a Hexapedal Robot, Journal of Field Robotics, 2008. 25(4-5): p. 223-242.

林沛群現任職國立台灣大學機械  
工程學系暨研究所助理教授

專長：

- 仿生機器人學
- 動物運動行為分析