

關於足式仿生機器人的 一些想法

林沛群



在水中游動的魚兒，藉由液體產生的浮力機制，使魚類和水中哺乳類本身重力的支撐並不太困難，因此身體和鰭本身的波動運動，目的在產生適當的推進力以及保持自身在水中的平衡。

序

移動 (locomotion)，是一個普及的概念。不論是自然界演化出的動物們，或是人造社會中各式的發明，在我們周遭時時都可以觀察到這一個現象。有趣的是，生物系統和人造系統運作的機制，雖然大架構上均是依循相近的物理原則，但實際應用上卻有些本質上的不同。

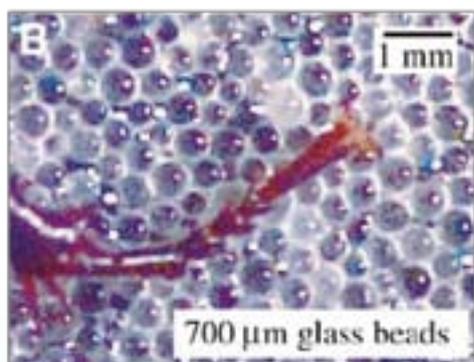
我們先從生物的方面概說一下運動的產生與應用，海陸空各式生物的運動存在著許多面向，而在地球這一個環境體中運動的最大限制條件，便是重力的存在，運動方向和重力方向之間的相對應關係便決定了生物體產生運動的難度。在空中飛行的鳥類與昆蟲，拍翼的進行便是在產生適當的升力與推進力，升力用來平衡重力，推進力則帶動生物本體前進。在水中游動的魚兒，藉由液體產生的浮力機制，使魚類和水中哺乳類本身重力的支撐並不太困難，因此身體和鰭本身的波動運動，目的在產生適當的推進力以及保持自身在水中的平衡。海空這兩類生物運動的產生，大致上可以說是生物本體和周遭均勻的液氣相介質產生適當的交互作用力，來推進生物本體達到運動的目的地^[1]。因此，這海空生物在進行水平或垂直方向的運動時，於物理的本質上並沒有太大的差別，僅是前進方向和上下方向的力分量不同。於本刊楊鏡堂教授等人所撰寫的「仿生科技原理與應用」和郭振華教授所撰寫的「機器魚的操縱與控制」中對於海空生物的運動有更完善的說明。

陸上生物產生運動的機制

對在陸地上運動的生物而言，水平方向的運動和垂直方向的運動則有顯著的差別。在水平地面上運動的產生，基本上是靠摩擦力：生物本身先藉由重力或是垂直方向運動產生的加速度來引發和地面間有效的正向力，再藉由一般地面有正向力和就有摩擦力的機制，以摩擦力來提供生物推進時所需的支撐力。在傾斜或更廣義的在崎嶇地面上進行運動時，正向力的方向雖垂直於局部的地表，但並不一定平行於重力方向，因此該局部地面的摩擦力也並非平行於水平面，在這一種狀況下，運動所需的驅動力 and 抵抗重力的力量則是由正向力和摩擦力混合來共同承擔。大部分在陸地上生物在水平方向的運動法則大多座落在這兩種基本架構下。

陸地上運動的生物在進行垂直面上產生運動的條件則較為困難，若表面有某些尺度的凹凸不平，生物可以利用「幾何上的互鎖 (interlocking)」的方式來進行攀爬。舉例來說，松鼠爬樹即是運用腳爪勾在樹幹表面的縫隙，縫隙和腳爪之間的正向力具有垂直方向上的分量，藉由此分量來作為生物向上運動時所需的支撐力。而且，一般來說生物會運作此正向力使其盡量平行於攀爬表面，以避免作用力產生時，除了向上的力量之外，也產生遠離表面的力量，如此一來運動便無法連續，導致在下一步的步態需進行調整，使本體接近表面以利繼續進行爬

行。基於這一個原因，我們可以發現爬樹幹的動物大多以「環抱」的方式抓住樹幹，如此一來，左右手腳間的遠離與接近樹幹可以較輕易的掌控，對生物本體也較不會產生不必要的分力使身體遠離樹幹表面。事實上，人類進行攀岩的活動也是基於相似的原理，將手指彎成如爪般的形態，以產生人體向上運動時適當的支撐力。昆蟲類如蟑螂等的腳部，除了末端的爪之外，整隻腳並長滿腳毛，利用腳毛容易卡進微小凹凸不平的表面的特性來輔助爪產生攀爬時所需的支撐力，如圖一中所示。蟑螂和螞蟻等昆蟲類均是利用這一種架構來進行垂直面的攀爬，並在後續的段落中針對腳毛對生物運動的影響有較詳盡的說明。總結來說，由這一段分析也可以清楚的看出，以幾何互鎖方式爬牆的生物強烈的倚賴牆面本身的不平整性，若一個垂直面本身凹凸不平的尺度小於生物腳毛或是爪的尺寸，則生物便無法於該垂直面上攀爬，這也是我們可以輕易看到蟑螂在家中的水泥牆面上到處爬，卻不見其在玻璃上攀爬的主要原因。



圖一 蟑螂 *Blaberus discoidalis* 爬牆時腳部的正面和側面特寫，說明如何利用腳毛和略微凹凸不平的牆面產生幾何互鎖以達到攀爬的所需的支撐力，圖片擷取自[23]

在光滑垂直平面上進行向上運動的條件最為嚴苛，在這一個狀況下，向上的支撐力僅有摩擦力可以提供，而正向力則是落在水平的方向。但

是，一般陸上動物運動時正向力的來源主要是重力，在目前的狀況下恰好正向力和重力互相垂直，因此垂直攀爬過程中不僅沒有適當的正向力機制，同時重力也必須倚賴摩擦力來平衡，使得攀爬的難度非常高。在這一種狀態下，目前生物有兩種方法來產生適當的正向力，或者在這個特定的狀況下可以稱為黏著力，一種方法為分泌微量黏著液體，利用介於腳和牆之間的微量液體所產生的毛細力（capillary force），來達到腳部與牆面之間的黏著，如蟑螂、蚜蠅（syrphid fly）、和樹蛙等生物均有利用這一個原理來協助攀爬時的黏著狀態，而這一種黏著力強烈取決於表面的親水性（hydrophilic），親水表面使黏液能快擴散至整個表面且不易移除，這也是通常定義的濕式黏著（wet adhesion）。但是，濕式黏著是對稱的，容易產生也代表不易移除，而攀爬是連續的運動，需要於時間軸上連續地在不同的位置產生正向力，因此濕式黏著在產生有效運動方面有先天上的限制，蝸牛緩慢的爬牆便是一個很好的案



例。另一種產生正向力的機制即是壁虎所使用的凡德瓦力（Van der Waal force），這個機制本身不需要液體的介面，純粹是倚賴兩接觸固體對固體間極近距離的接觸，因此也稱為乾式黏著（dry adhesion）[2-4]。以

這個物理機制進行接觸和分離時不留痕跡，除此之外，凡德瓦力機制的本身也可以在如水中、真空中等各種特殊場合中對近乎任何材質均產生作用，因此這一個機制在數年前確認之後產生極大的影響，使得材料科學家以及黏著劑廠商如3M等紛紛投入大量的資本、時間與精力來研發所謂的人工壁虎腳（artificial gecko foot）[5-8]，試圖以工程的方式產生類似於壁虎腳的微奈米結構。

生物系統 vs. 機械系統

自然環境是崎嶇的，建立在不改變自然環境的前提下，陸上生物經由長時間的演化之後，大多演化出高自由度的「腳」，藉由高自由度所具有的調整性，適當的產生腳和地面間的交互作用力，以產生生物運動時所需的支撐力，而這支撐力當然同時包含了重力的支撐和驅動力的支撐。而「蛇」是陸上生物演化出很特別的旁支，相關內容在本刊中由顏家鈺教授等人所撰寫的「仿生機器蛇之步態研究及控制」中有更詳細的敘述。很有趣的，在陸上運作的人造驅動系統走向完全不同的機制：「輪」，這一個在六千年前美索不達米亞（Mesopotamia）文明中即發展出來的機構迄今仍廣泛而近乎全面性的使用[9]。輪是物體在地面上運作中一個非常特別的設計，在平坦地面上滾動的輪，本體的重量是由結構所支撐，而運動過程中輪心的高度不變，因此能量的輸入則近乎完全用來驅動本體以進行運動，這一種非耦合的機制使能量運作效率非常高。

而生物和人造的系統運作機制為何有如此顯著的差異？則歸因於基本設計理念的不同：運動的產生是相對的，除了取決於運動者本身，也取決於周遭環境。生物面臨到新形態的環境，是以演化自身的方式，對自身進行重新設計，來適應環境的變遷，久而久之，生物在該環境下的運動能力就逐漸具備，環境是崎嶇的，因此需要有高自由度的腳來適應地表的變化。反之，人造載具的設計則涵蓋了自身以及環境的設計，將兩者配對一起去想，因此，運動的產生也需要倚賴對外在環境的變更，譬如說，建立平坦的地面讓輪子可以順利的滾動，鋪鐵軌可以讓火車行駛，建機場以利飛機起降等。這一件事情也可以另一個角度來看：生物的成形是藉由細胞的生長與分化，發展成的有機生命體以高複雜度相互連結，以利營養傳遞以維持生物體運作。反之，人造系統是組合而成的，無機體間可以完全的分離，這也是連

續旋轉的運動機構幾乎不存在於生命體中，但恰巧致動器如馬達和引擎等產生機械能的機制多遵循連續旋轉這一個特性之下，因此人造系統才會「演化」到目前的狀態。若單純就最終的特性來討論，兩者各有好壞，飛機的起降麻煩，對飛行時的環境要求也高，但飛行的速度和平穩度卻是拍翼法的鳥類或是昆蟲類所不及。對環境的改變需要時間與成本，尤其在對地球這一個共同體尚未清楚掌握之下，恣意的改變所造成的代價非常高，不論目前的綠化綠能，或是未來更有野心的外星球探索，建立對環境有強大適應性的運動系統具有某一個程度的吸引力與未來應用。建立在不改變外在環境的設計架構之下，相信生物所具有的運動能力是目前人造系統所無法比擬的，人造系統無法像鳥兒一般由樹枝起飛與降落，無法像山羊一樣在陡峭的山壁邊奔跑，無法像海豚一樣在水中恣意遨遊。因此，瞭解生物系統如何運作，一方面可以使人類更瞭解如何與自然共存，一方面也可以開始思考下一代的人造運動系統該是什麼樣，這也是進行仿生背後最基本的因子，也是仿生機器人發展的動機。

仿生足式機器人之研發

仿生機器人的建構是一段漫長的路程，相信在閱讀本刊其它專文如楊龍杰教授所撰寫的「研發金探子心路歷程」中，已可以嗅出許多跡象。筆者本身對於動態足式機器人的發展較有興趣，因此後續的內容也以仿生足式機器人為主軸。在前一個段落中事實上已大致說明了研發足式仿生機器人背後的動機：因人造系統無法在自然崎嶇地中快意的運作，因此除了創新工程的持續進行之外，以回過頭來先研究生物本身運動的特質，企圖從中獲得一些靈感成了一條可以進行的道路。動機具備了，皆下來要面對的便是：要如何進行？這是一個困難的問題，因為這必須先要清楚的瞭解，到底是哪一些特質使的陸地上的生物具有快速敏捷的運動能力及多樣化的運動行為？筆者個人初淺的認為分為以下四個原因：

- (1) 生物本身演化出具特定型態的高自由度 (degree of freedom) 系統，以適應本身在各種不同的外在環境下運動，以維持生命機能；
- (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，以產生適當的運動；
- (3) 生物本身具有極高能量密度之驅動系統，其效能仍遠高於人類目前所發明的各式致動器；
- (4) 生物本身由高複雜度高效能生物有機材料來建構，不同於人造系統中單純材料的組合。

其中第三項如人工肌肉等致動器的研發，以及第四項仿生材料的研發，均為獨立的研究領域，因此，在如筆者般進行機器人系統的研發方向之下，主要都是在探討第一項第二項的秘密，或者簡單來說，把足式仿生機器人的建構以「設計」和「控制」兩個角度切入，雖然已經限縮為兩項因子，這仍然是一個非常困難的問題，目前並沒有一個有系統的分析結果可以供參考。或許有些讀者會建議，直接仿製生物的系統架構即可，似乎可以直接解決了第一項的問題，但很遺憾的是，以目前的科技水平，因為第二三四項的問題，仿製並無法使人造系統有相近的表現，而目前人形機器人的發展便做了一個最好的說明。若不包含腳指的自由度，人每一隻腳有7個自由度，一般歸納為髖關節有3個，膝關節有1個，而踝關節有3個。若只考慮腳板對髖部的相對運動，由於踝關節對膝關節沿著小腿方向旋轉的自由度，和膝關節對髖關節沿著大腿方向旋轉的自由度的功能相近，因此在機器人的設計上大多以每足6個自由度的設

計來達成雙足的功能，這個數字也和空間中剛體運動的自由度相等，代表對於一個在空間中既定的髖部位置，在腳長的範圍之內，我們可以移動腳掌到空間中任一位置，並以一個特定的轉角呈現。比如說日本AIST的HRP-4C[10]雖然已是目前極致的工藝在仿真式人形機器人方面（如圖二所示），在尺寸和重量方面已逼近目前真人的尺度，但我們也可以清楚的瞭解目前因為第三項致動器能量密度的不足的因素，目前機器人並無法如人一般進行原地向上跳躍或立定跳遠的動作。另外，也因為多自由度系統在控制上本身即非常複雜，目前機器人運動起來仍然非常的警扭。除此之外，目前Honda的ASIMO[11]雖然已經調校到可以原地小跑步，也因第二項控制複雜度的問題，目前並沒有任何在崎嶇地面上面行走的影



圖二 左圖和中圖：AIST的HRP-4C仿真式人形機器人，圖片擷取自[10]；右圖：HONDA的ASIMO展現跑步步態，圖片擷取自[32]

片。而許多小型以RC伺服馬達建構的人形機器人[12-13]，也大多著重在精準的調校，使得機器人可以在特定的環境中進行各式各樣的動作，簡單來說，使機器人的動態特性以開路控制 (open-loop control) 的方式，將機器人盡量調整控制在一個穩定可以掌握的範圍。但是，要如何再進一步的讓目前高自由度的系統能有合適的回授控制 (feedback control)，使機器人能在更不規則的環境下運作，則是目前最艱鉅的課題之一。

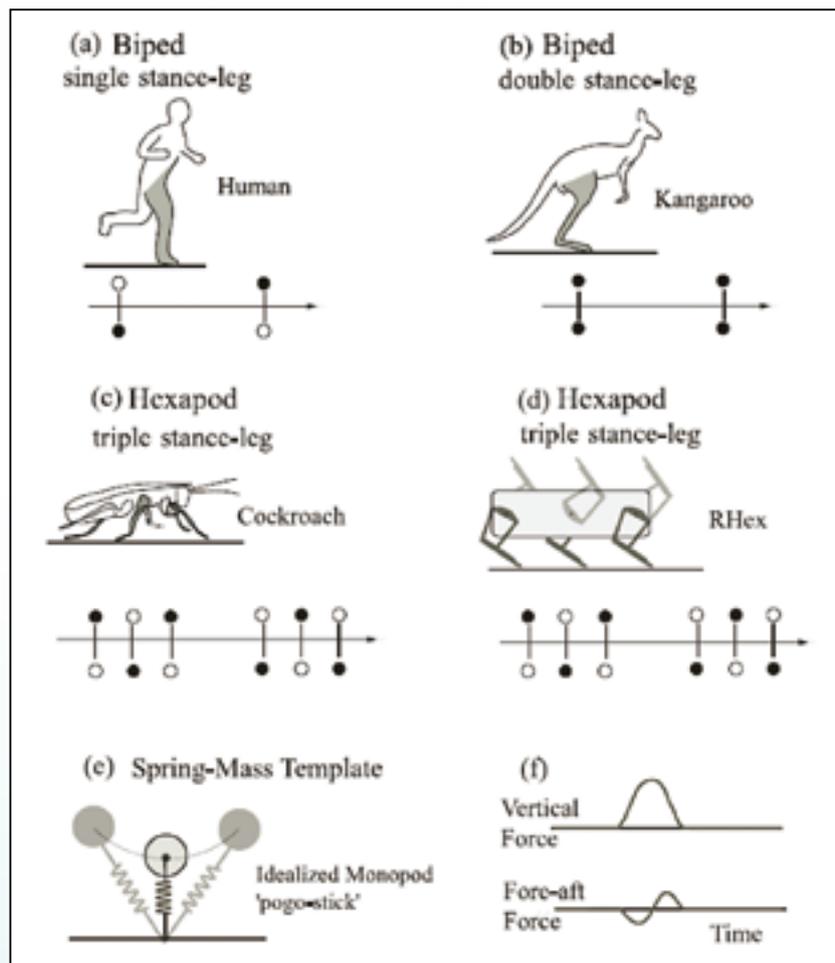
獨家報導

在足數機器人方面，要直接仿製生物系統的高自由度就更是天方夜譚，因此，研究學者均會以減低自由度的方式來建構仿生機器人，達到機器人可以動的門檻，或更進一步的提供探討動態運動的機會。舉例來說，許多仿造照昆蟲的六足機器人就會以每足3個自由的設計來完成，出發點很單純，假設腳是點接觸，對於一個既定姿態的機器人本體，要在空間中任意放置腳著地的位置需要3個自由度，六足合起來就有18個自由度[14-17]。但是，仍然由於能量密度的不足，這類型機器人也仍不易產生如生物般動態的運動。這時，第一項的問題就清楚浮現，現階段的研究到底多少個自由度才合適？選定之後，這些自由度要放在哪裡？這些放置法是否使第二項的控制可行？

這是一個設計和控制整合的問題，自由度的配置本身可以概括是設計問題，但要讓自由度產生合適的運作與協調則是控制的問題，兩者密不可分。這種相互依存的關係在一般產業用機械手臂中也可以清楚的看出，手臂的自由度需要同時在控制上協調才可以使末端點依循軌跡運行，而手臂的設計也需要如末三個關節軸共點等特性使即時控制的運作變為可行。

或許讀者會疑慮，在自由度減少的狀況，是否有可能重現高自由度系統的動態運動狀況？若要達成生物全面性的動態行為當然不可能，畢竟多面向的行為需要高自由度系統的支撐，但是，若針對某些特定的運動，一般是我們有興趣瞭解的，低自由度的系統或許仍有辦法以相似的行為呈現。

舉例來說，跑步步態或許是生物動態行為中最常見共有的步態之一，而目前在生物端的研究也發現，不論是二足、四足或是六足生物的跑步步態（running gait），均可以用雙自由度之彈性倒擺（SLIP, Spring Loaded Inverted Pendulum）[18-20]的模型（model）來詮釋動物整體的運動行為，如圖三所示，於此模型中，身體被簡化為單一的質點，具有高自由度系統的腳則被簡化為單純可儲存能量的被動自由度（彈簧）來表示。這一個方式，可以定性並廣義的描述運動行為，但在定量的分析卻稍嫌不足，實際在控制上也有困難度。舉例來說，SLIP為能量守恆系統，但真實生物或是機械系統則有能量的輸入與輸出，如何將產生的能量和消耗的能量產生穩態平衡以進行控制則

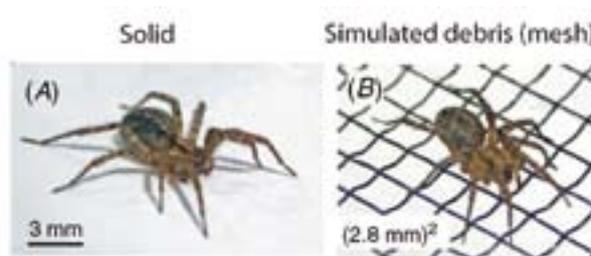


圖三 不同足數目的生物系統和機械系統在跑步時均可以相近的運動模型SLIP來表達，圖片擷取自[33]

已脫離SLIP可以掌控的範疇。而這一個模型和原本高自由度系統的關連到底為何？1999年加拿大柏克萊分校的Prof. R.J. Full提出了template和anchor的概念，來詮釋泛用足式運動之狀態：如圖三所示，template由簡易物理模型組成（如在地面奔跑於前進方向有SLIP模型，側向有LLS模型[21-22]，爬牆有雙足模型[23-24]等），提供運動控制之參考，anchor代表了原本系統複雜的肢體結構。這強調以template來控制生物進行肢體協調的重要性，也首次定義了和原本系統之間的相互關係。概念上以低自由度的系統來進行控制，從工程上的角度來看的確使控制的難度上簡單化，也容易進行系統特性的探討，可惜的是由於後端的實際應用還有許多困難需要克服，舉例來說，要如何有效的mapping高自由度系統和低自由度系統的對應性即是一個困難的問題，因此實際在機器人上的應用並不常見，還有許多學理需要更進一步的探索。

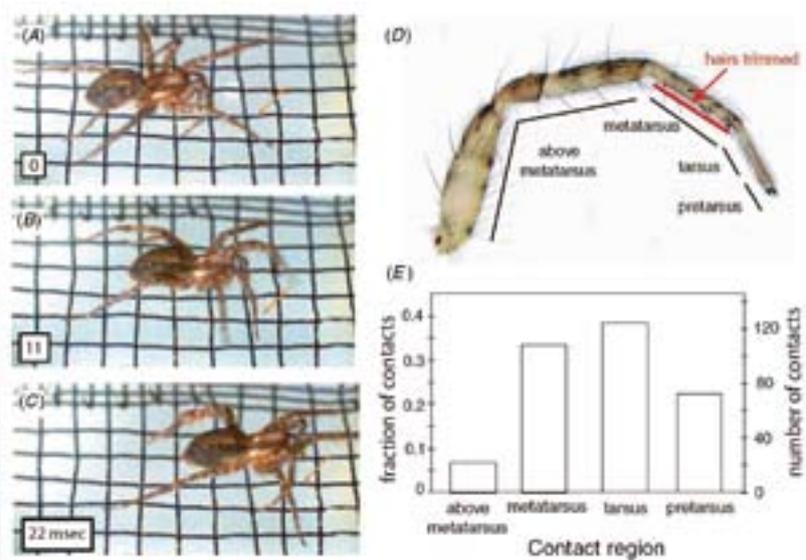
隱藏在生物中的奧妙設計

上一個段落主要是由主動自由度的配置來探討設計和控制的關連性，當然，生物本身的设计的奧秘或許不只如此，那麼，是否有也其它方面的探討可以進行？筆者之前曾經與UC-Berkeley生物實驗室之Dr. J.C. Spagna、Prof. D.I. Goldman、和Prof. R.J. Full合作，試圖同時由生物端和機器人端統合研究來探討生物能在困難崎嶇地形上快速敏捷運動之原因以及背後所支持之學理，並希望以此方針得出機器人設計之啓發[25]。當時在實驗設計的過程中，光為了要以什麼類型的困難地形就討論了很久，最後決定採用僅具有微小接觸面積之

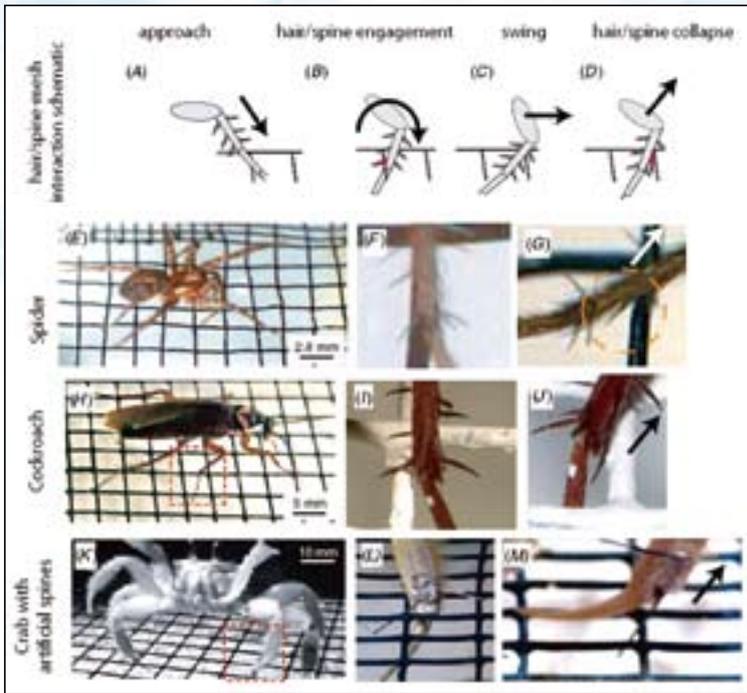


圖四 左圖：一般平面地表；右圖：測試用網格地表，圖片擷取自[25]

鐵網（mesh）作為困難地形之代表（只有約1%的接觸面積），如圖四所示，讓螳螂、蜘蛛、及螃蟹穿越該地形，並以高速相機進行監測，經由各項實驗交叉比對推論出昆蟲類運動具有以下特性：（1）動物藉由快速運動的慣性（inertia），使動物本身運動時行走單位長度下因重力所產生的下墜位移減至最小。（2）昆蟲類運動實質上是以整隻腳當作「腳板」來使用，或稱為分散足部（distributed leg）的運動方式，亦即昆蟲類在揮動腳的過程中，並不會去注意腳板落地的位置，只是週期性的擺動六足，只要腳的任一個部位碰到環境產生支撐力，即可推動本體前進，如圖五中所示。昆蟲類運動的方式需要最少的腦力支



圖五 昆蟲類運動實質上是以整隻腳當作「腳板」來使用，由高速相機擷取的畫面和統計分析均可以看出，腳的中段接觸地面的機率最高，圖片擷取自[25]



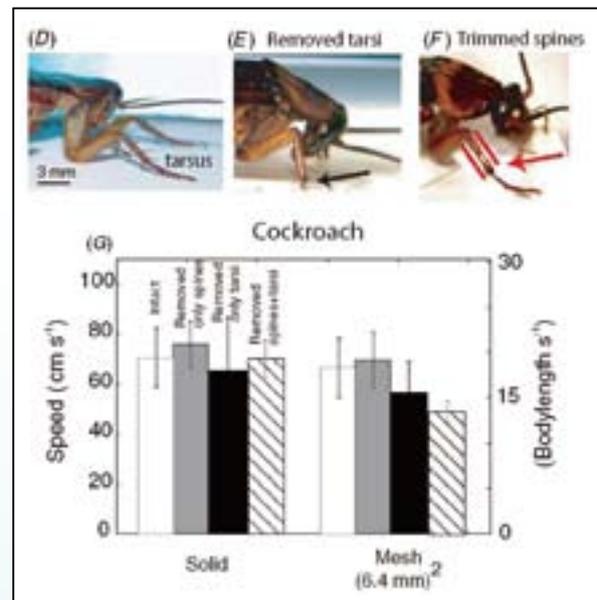
圖六 展示各類動物利用腳毛鉤住網格的機制，運作方式也相近於鉤住崎嶇地面上凹凸不平的縫隙，上方示意圖並展現出可潰式腳毛鉤住網格以及脫離的方法，圖片擷取自[25]

援，也同時符合進化的層級。不似哺乳類如四足動物和人類一樣，幾乎每一步都會大致決定腳的落點，因此腦部的需求較高，於演化上也是較後期出現的生物。當然，許多是蛋生雞或是雞生蛋的問題：是因為昆蟲類腦力不足，才演化出硬殼的腳，因此腳擺動時不怕痛？還是腳先演化出硬殼，昆蟲類發現不需動腦及可以有效的移動？或是以特定配合的方式演化出目前的狀態，則尚沒有一個定量的結論。(3) 昆蟲類的腳部均演化出可潰式硬腳毛 (collapsible spines)，這一些可潰式的腳毛，使昆蟲類在網格上運動時，能較輕易的鉤住格線，對昆蟲本體產生支撐使本體不會下落卡在網格中，順利通過。這樣的設計對於昆蟲類在一般崎嶇地的通行上，可以想像為腳毛的呈現使腳在運動時可以具有較高的機率來卡住凹凸不平的表面，提供支撐力，因此在穿越崎嶇地上較為容易。腳毛對向外向折具由極大的支撐力，但同時腳毛卻可以輕易的向內折，因此若該腳完

成推進需要將腳回位時，腳毛可以輕易的向腳本體靠近，減少回位的阻力，如圖六所示。

實驗設計的本身需要有實驗組和對照組，因此，為確保論點 (2) 和 (3) 有較強力的佐證，我們同時也進行對照實驗，亦即有將部分實驗昆蟲腳部減短，或是除去腳毛，或是同時處理，再分析比較昆蟲的運動特性，如圖七中所示。結果顯示，唯有兩者均處理過的昆蟲，在運動特性上才有統計上的差異，證明了生物本身的強韌性，有多項設計來支撐本身的狀態。當然，這一項實驗也會引發新的問題，昆蟲在除去腳毛或是腳被剪短之後，是否會採用不同的步態來產生行為？這一個狀況在哺乳類中很常見，如狗在某一足骨折的狀況下仍有辦法行走，但是步態不同。為確認這一個結果，一方面使用高速相機監測昆蟲類運動時的步態，確認沒有變化，一方面測試演化上較高等的螃蟹來進行試驗，一般沙地

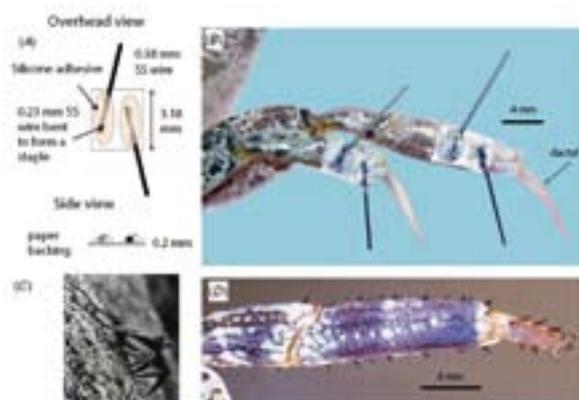
成推進需要將腳回位時，腳毛可以輕易的向腳本體靠近，減少回位的阻力，如圖六所示。



圖七 確認分散足部以及腳毛效應的實驗設計。左上圖：正常蟑螂的前腳；中上圖：截短的前腳；右上圖：除去腳毛的前腳；下圖：統計分析。圖片擷取自[25]

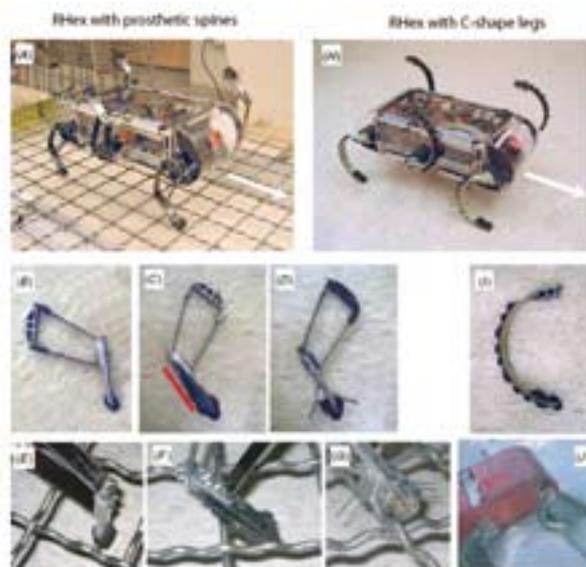
上運動的螃蟹沒有演化出腳毛，而螃蟹行走的方式非常容易卡在網格上，因此，藉由螃蟹在網格上時常卡住的運動，看螃蟹是否會產生新的步態來適應新地形，經過多次試驗之後，發現步態並未改變，因此僅能間接推斷螳螂大概也沒有聰明到會依環境改變步態，提供另一個佐證。

很有趣的，若在螃蟹上安裝人工腳毛，則運動表現上的確會產生統計上的差異，證明了腳毛的功效。後續發現在夏威夷岩石上生活的岩蟹的確有演化出腳毛，再一次證明這一項設計的功能，如圖八中所示。生物端得到初步的結論之後，我們也試圖在機器人端進行佐證，如圖九所示，方法為在六足機器人RHex[26-28]上以不同的腳來行走，測試分散足部的功能，再進一步在腳上安裝腳毛，也一樣的到統計上不同的結果。這一個段落說明了生物以被動式機構和結構的演化，來輔助其在崎嶇地面上運動的能力，我們相信生物



圖八 上圖：在原本無腳毛的螃蟹上裝上人工腳毛；下圖：岩石上生活的螃蟹具有腳毛。圖片擷取自[25]

運作背後的秘密一定不止於此，相信還有許多面向值得探索。許多生物的尺度遠小於肉眼所及，因此許多的發現是伴隨著電子顯微鏡以及微奈米研究的蓬勃發展，蓮花效應 (Lotus effect) 的發現就是一個經典的案例[29]。或許，這一切都要歸功於理查費曼 (Richard Feynman) 於1959年在加州理工 (Caltech) 演講主題「There's Plenty of Room at the Bottom」中點出未來發展的這一個軸線。



圖九 RHex機器人在網格上行走的測試：(A) 示意圖；(B) 單點足部；(C) 分散足部；(D) 具腳毛的分散足部；(E) (F) (G) 以前列三種足部接觸網格的狀況。(H) (I) (J) 另一形式的分散足部及其在越障時的應用。圖片擷取自[25]

結語

仿生足式機器人的發展若由MIT的Hannibal和Attila算起[15, 30]，迄今也才約二十年左右，若論及這些機器人在目前工業界上的應用為何？或許還有一段距離要走，但仿生機器人目前也的確在許多面向發生一些效應。在娛樂方面，許許多多的小型足式機器人玩具問世，帶來了不同於輪型機器人或是遙控玩具等所賦予的樂趣；在教育方面則有更多的發展，如LEGO NXT系列的使用，使各個年齡層的學子們接觸不同於閱讀課本方式的理論學習，而是動手實做演練，機器人本身是一個複雜的系統，在實做過程中企圖使機器人能產生動作的同時，也在教育學子們系統工程的概念，學習利用各個功能不同的元件，組成一個系統使其能產生所需求的動作，於本刊中利基科技所提供的「使用BASIC Commander®系統建構仿生機器人」專文中，也可以看出如何以各式元件組成一個機器人系統。而「系統」這一個方面

的概念，正是目前台灣教育體系下所極為欠缺的一個部分。因此，筆者個人相信，藉由這幾年來台灣內所開設各式各樣的機器人研習班，或是各式比賽的舉辦，會直接間接補強學子們在系統方面的觀念與認知，對於未來整合性人才的彌補會有正面的影響。而在學界方面，目前研究對於複雜系統的掌握仍很有限，對於如何去設計、去控制、去進行複雜系統的整合，未來仍有很大發展的空間，而足式機器人恰好是磨練這一段研究的一個很好的測試與驗證平台。在產業方面，若考慮未來能在各種地面運行的足式載人的載具，似乎還是一段遙遠的路程。汽車是一個兩個自由度的系統，自1885年Karl Benz先生開發四行程引擎汽車，到1914年Henry Ford先生以生產線方式量產，迄今約百年的時間，而大約四五十年前在造車工藝技術方面也或許才算是成熟。足式機器人所具有的自由度又遠高於汽車，因此可以直觀的想像將足式載具量產的困難度。如同之前內容中所述，由輪型載具變為足式載具的同時，代表了載具運作的環境由特定處理過的平面變為一般不需要經過處理的崎嶇地，將載具演化朝向自身改良的方向邁進，相信這一個概念上的革新會成為工程上的里程碑。

仿生，是一個過程，不必然是一個結果。面對一個從工程角度出發的問題，尤其在不知如何下手解決時，以觀察生物系統運作方式的角度切入，或許能有效提供一個初始的解決途徑，也或許能經由深入瞭解生物系統的運作來獲得工程上創新的靈感，由這裡出發來依工程上的需求逐步進行修正，拓展無限之可能。畢竟生物系統演化過程中所依據的法則於本質上和就和工程不同，工程本身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，在如此的前提之下，工程自然的在最佳化的方向就會有所不同。筆者所主持之實驗室近幾年來便進行各式可移動的平台之研發，涵蓋了二足、四足、和六足等多足的系統，同時也同步著手與輪型平台相關的研究，如實驗室內的機器人Quattroped [31]，如圖十所示，具有四足的運動模式，可以較輕易

的越障，也具有四輪的模式，提供平面上較省能的運動方式，也由於四輪四足在同一個平台上，因此學理上可以適應於人造和自然的外在環境，達到優化的運動能力。大自然經演化後是一個迷人卻謎樣 (attractive but mysterious) 的系統，人類的工程技能有突破卻也有未知，相信有效的整合是一條漫漫長路，但卻也是一個未來可行且值得努力之方向。



圖十 輪腳雙模式運重平台

參考文獻

1. Dickinson, M.H., et al., How animals move: An integrative view. *Science*, 2000. 288(5463): p. 100-106.
2. Autumn, K., et al., Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, 2000. 405(6787): p. 681-685.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Geim, A.K., et al., Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nature Materials*, 2003. 2(7): p. 461-463.
7. 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.
8. Hui, C.Y., et al., Design of biomimetic fibrillar interfaces: 2.

- Mechanics of enhanced adhesion. *Journal of the Royal Society Interface*, 2004. 1(1): p. 35-48.
9. Wikipedia. Wheel. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wheel>.
 10. AIST. Successful Development of a Robot with Appearance and Performance Similar to Humans. 2009; Available from: http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2009/20090513/20090513.html.
 11. 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.
 12. Kondo. KHR series humanoid robots. 2010; Available from: <http://www.kondo-robot.com>.
 13. WooWEE. Robosapien. 2010; Available from: <http://www.wowwee.com/robosapien/>.
 14. Rodney, B., A Robot That Walks; Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network, in MIT AI Lab Memo. 1989.
 15. Angle, A., Design of an artificial creature. 1991, MIT.
 16. Klaassen, B., et al. Biomimetic walking robot scorpion: Control and modelling. in *International Symposium on Intelligent Robotic Systems*,. 2001.
 17. Gassmann, B., et al., Localization of walking robots, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2005. p. 1483-1488.
 18. Alexander, R.M., *Elastic Mechanisms in Animal Movement* 1988: Cambridge University Press
 19. McMahon, T.A., ELASTIC MECHANISMS IN ANIMAL MOVEMENT - ALEXANDER, R.M. *Nature*, 1988. 336(6199): p. 530-530.
 20. Blickhan, R., The spring mass model for running and hopping. *Journal of Biomechanics*, 1989. 22(11-12): p. 1217-1227.
 21. Schmitt, J. and P. Holmes, Mechanical models for insect locomotion: dynamics and stability in the horizontal plane I. Theory. *Biological Cybernetics*, 2000. 83(6): p. 501-515.
 22. Schmitt, J. and P. Holmes, Mechanical models for insect locomotion: dynamics and stability in the horizontal plane - II. Application. *Biological Cybernetics*, 2000. 83(6): p. 517-527.
 23. 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.
 24. Clark, J.E., et al. Design of a Bio-inspired Dynamical Vertical Climbing Robot. in *Robotics: Science and Systems*. 2007. Atlanta.
 25. Spagna, J.C., et al., Distributed mechanical feedback in arthropods and robots simplifies control of rapid running on challenging terrain. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2007. 2: p. 9-18.
 26. 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.
 27. Lin, P.C., H. Komsuoglu, and D.E. Koditschek, A leg configuration measurement system for full-body pose estimates in a hexapod robot (vol 21, pg 411, 2005). *IEEE Transactions on Robotics*, 2005. 21(4): p. 778-778.
 28. 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.
 29. Barthlott, W. and C. Neinhuis, Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 1997. 202(1): p. 1-8.
 30. 林沛群, 仿生機器人之兩三事. *機械月刊*, 2009(404): p. 62-75.
 31. Shen, S.-Y., et al., Design of a Leg-Wheel Hybrid Mobile Platform, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2009. p. 4682-4687.
 32. HONDA. ASIMO running. 2005; Available from: <http://world.honda.com/news/2005/photo/c051213/pages/09.html>.
 33. Seipel, J. and P. Holmes, A simple model for clock-actuated legged locomotion. *Regular & Chaotic Dynamics*, 2007. 12: p. 502-520.

作者簡介：

林 沛 群

台灣大學機械工程系所 教授

Email: peichunlin@ntu.edu.tw