

# 壁虎游牆功：仿生奈米黏著技術

林沛群助理教授、施文彬副教授  
國立臺灣大學機械工程學系

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。在空中飛行的鳥兒與昆蟲，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往心之所向前進。在水中游動的魚兒，周遭液體對應產生的浮力即大致與魚兒本身的重力達到平衡，因此，魚兒藉由身體和鰭的波動運動則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，這兩類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。但是，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產生和地面間有效的正向力，再轉換為有效的摩擦力，來提供生物推進時的支撐力。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，運動所需的驅動力和抵抗重力的力量則是由正向力和摩擦力來共同承擔。大部分在陸地上生物的運動法則大多座落在這兩種基本架構下。

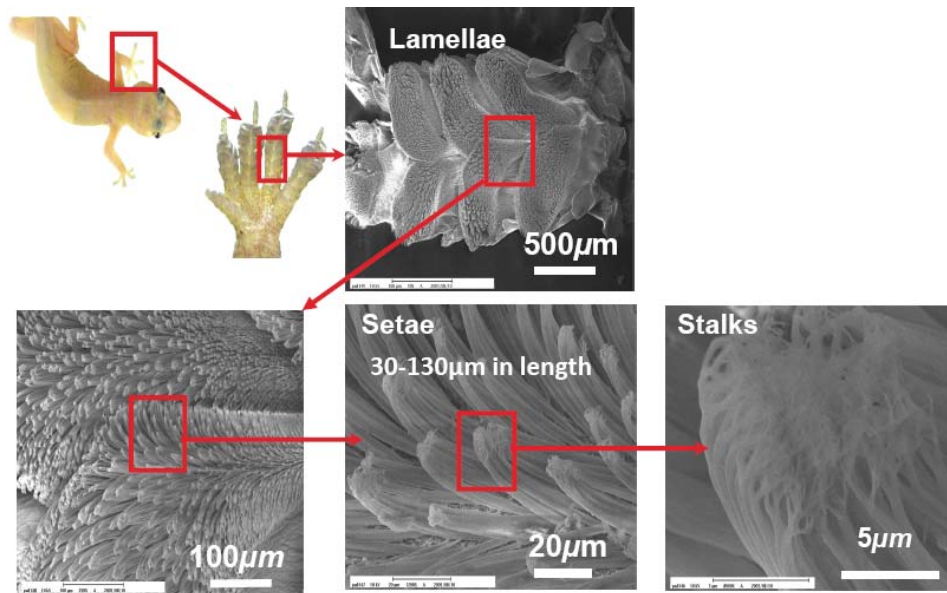
在垂直面上產生運動的條件則較為困難，目前大部分可以爬牆的生物所利用的物理機制是「幾何上的互鎖 (interlocking)」，若以生物本身的結構來看，就是「爪 (claw)」和「腳毛 (spine)」的運用。舉例來說，松鼠爬樹即是運用腳爪勾在樹幹表面的縫隙，縫隙和腳爪之間的正向力具有垂直方向上的分量，藉由此分量來作為生物向上運動時所需的支撐力。而且，一般來說生物會運作此正向力使其盡量平行於攀爬表面，以避免作用力產生時，除了向上的力量之外，也產生遠離表面的力量，如此一來運動便無法連續，導致在下一步的步態需進行調整，使本體接近表面以利繼續進行爬行。基於這一個原因，我們可以發現爬樹幹的動物大多以「環抱」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，腳毛本身是硬式可潰的 (collapsible)，蟑螂在運動時，腳毛很容易卡進微小凹凸不平的表面，如同細針卡進小縫一般，因腳毛本身是硬的，因此當腳推進時，腳毛有辦法承受住外力使身體能有效前進。而當該腳推進

完畢要回位準備下一步推進時，腳毛有被動式內縮的機制，往腳本身靠近，使腳在回位時阻力減少[2]。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。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。

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，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，總和起來攀爬的難度非常高。在這一種狀態下，目前生物有兩種方法來產生正向力，一種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這幾年當紅的凡德瓦力 (Van der Waal force)，也是壁虎所使用的機制，這個機制本身不需要液體的介面，純粹是固體對固體的接觸，因此也稱為乾式黏著 (dry adhesion)。

壁虎 (gecko) 神奇的爬牆功自遠古以來便吸引人們的注意，而研究各式黏著劑也有約 150 年的歷史，雖然如此，發現壁虎爬牆背後的物理機制卻是近十年來的事，跟隨著這一二十年來微奈米科技的發展，將許多我們肉眼看不到的物理和化學現象逐步呈現在我們面前。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」中所提及未來發展的一個軸線。壁虎是一種在熱帶生活、夜行性的蜥蜴 (lizard)，目前全世界約有 1200 種，大部分均沒有眼瞼，是以舌頭來進行眼部的清潔，大部分均有特別演化過的腳掌，使壁虎能輕易的在垂直牆面或是天花板上面攀爬。在研究壁虎腳掌黏著力相關文獻中最重要的一篇，是一篇 2000 年發表在自然 (Nature) 上的文章「Adhesive force of a single gecko foot-hair」[3]，這是由在 UC Berkeley 的 Prof. R. J. Full 的團隊所發表的，已被引用近 500 次。該文章以 Tokay gecko 為實驗對象[4]，清楚秀出壁虎腳指頭所具有的微奈米結構，並詳細探討該微結構所產生的黏著力的大小和方向性。壁虎腳指頭表面是由細小的棘毛 (seta) 構成薄片結構 (lamella)，每一支棘毛約 130  $\mu\text{m}$  長，直徑約 20-200  $\mu\text{m}$ ，每  $\text{mm}^2$  約有 5000 支棘毛。而每一支棘毛的末端均再分岔出約 1000 支奈米等級更細小的細柄 (stalk)，直徑約 0.2-0.5  $\mu\text{m}$ ，而每一個細柄的末端有狀似原盤

的結構，以便貼近接觸的牆面。



圖一、壁虎腳掌上的微奈米結構。(照片由台灣大學微型機械與力學實驗室提供)

棘毛本身具有極高的撓性，因此，在壁虎將腳指頭貼近牆面之後，撓性的特質使得細柄的末端圓盤可以非常的貼近牆面，到凡德瓦力可以產生有效吸力的範圍[5-6]，統合起來，便形成對壁虎腳掌整體而言有效的黏著力，進而提供壁虎爬升時的支撐力。因黏著力的產生是為了適當的支撐力以進行攀爬，因此棘毛力量的分析於文章中是以正向力和摩擦力等較巨觀的角度分析，對於施以約既定的正向力，可產生摩擦力的大小均在數倍以上，展現良好的黏著性。棘毛本身相對於腳指頭的幾何排列具有非對稱性，於需要黏著時壁虎僅需將腳指頭「捲開來」貼住牆面即可產生強大黏著力，但同時，壁虎可以輕易的將腳指頭「捲進來」使腳掌能輕易離開牆面。概念上來說就如同一段膠帶貼在牆面上，若要直接將膠帶以平行於牆面上的力量拉動非常不容易，但若拉起其中一端，沿分離面撕下膠帶則非常簡單。如此指向性黏著 (directional adhesive) 的設計與運用使得壁虎能輕易的在牆面上運動。也由於非對稱的設計，當壁虎在牆面上攀爬時腳指頭會盡量朝向一個方向，以產生對身體適當的支撐力，而當壁虎往下爬時，四隻腳掌也會自動翻轉來進行運動，以保持支撐力的方向。Prof. R. J. Full 的文章中最驚人的發現[4]，便在於量測單支棘毛所能產生的黏著力，相較於以往以巨觀整隻腳掌的方式估算出為 10 倍左右，在這一個推算之下，一隻 150g Tokay gecko 所能產生的黏著力高達約 40kg，為體重的兩百多倍！因此，這也說明了壁虎為何能輕鬆的將腳掌觸碰牆面就能提供快速敏捷運動所需的支撐力，因為壁虎只要需要有 1% 的細柄觸碰牆面即足以支撐本體產生適當的運動。事實上，前述文章驗證的結果的確排除了壁虎爬牆機制的一些其他假說，但本質上仍未能清楚釐清凡德瓦力以及毛細力的作用，因此，該篇文章第一作者 Dr. Kellar Autumn 於移至 Lewis &

Clark College 任教後持續進行對壁虎的研究，而多年的成果也使 Prof. Keller 成為學界頭號「geckoman」。2002 年發表於 PNAS 的文章中[7]，便利用親水疏水表面兩種實驗牆面的設計，和整個腳掌和單支棘毛兩個層級的量測，以及後續以定量的固體對固體黏著力 JKR 模型的分析，正式排除壁虎以毛細力攀爬的可能性，確認壁虎乾式黏著的本質。該本質使壁虎爬牆時不留痕跡，而凡德瓦力的機制更使壁虎腳掌可以在如水中、真空中等各種特殊場合中對近乎任何材質均產生作用，因此這一系列的研究造成了深遠的影響，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)，試圖以工程的方式產生相似的微奈米結構。



圖二、壁虎腳掌的超疏水現象。(照片由台灣大學微型機械與力學實驗室提供)

研發人工壁虎腳的仿生工程，是一條漫漫長路，因前端還有需多瓶頸需要克服。壁虎腳巧妙的微米奈米共構的結構使得細柄的末端能輕易的和微觀上凹凸不平的牆面近接。目前研發的第一個難關，便是如何以彈性相似的材料[8]來產生相似幾何尺寸與外型的結構。以目前微影蝕刻方式的技術，已能輕易的仿製出棘毛等級的微米結構，而微米結構本身所能產生的黏著力也如預期因未能具有對牆面高度的配合性而成果不佳。而以化學合成的高分子長鍊尺度上為奈米等級，但尺寸上仍不及細柄相近的尺度，因此，一方面由於後端未有微米結構來產生較大幅度的對牆適應以貼近牆面，一方面由於末端尺寸不足並未能產生有效的凡德瓦力，因此黏著的成效仍有極大努力的空間。而將兩者適當的結合在所該相連接的位置也是另一種挑戰，單純以化學方式接合不易有方向性以及位置性，一般為全面性的反應，若以物理方式少量地進行則有尺寸上過小的困擾，因此截至目前為止尚未有良好的共構結構產生，並不如另一個材料科學界風行的蓮花效應(Lotus effect)般有較顯著的成果[9]。生物是奇妙的，藉由細胞複製和分化的過程，便能產生各式材料，輕易長出各式幾何外型，共同接合，以達到生物所需的功能。微奈米共構結構產生之後，下一個挑戰便在於探索黏著和分離的力學機制，能有

效的黏著與分離才具有使用上的重複性，否則就落於一種無法分離的萬能膠。事實上，壁虎在牆上卓越的運動能力除了歸因於腳掌的黏著力外，如何於時序上有效的運用四足和牆面的接觸力以及轉換來產生運動則是另一個關鍵，而瞭解這個關鍵才可以回過頭來更深入的探討壁虎腳掌演化的緣由，很遺憾這一個部分尚未具有系統性的研究與發展。瞭解黏著與分離的機制之後，要達成重複性還需具備另一個關鍵：自潔（self-cleaning）。Prof. Keller 於 2005 年在 PNAS 發表的文章中測試壁虎自潔的特性[10]，發現初始時骯髒的壁虎腳在攀爬數步之後便回復清潔具有強大黏著力的狀態，而這自潔機制的部分成因，歸納為細柄和灰塵相對的幾何尺寸，以及兩者間表面能量（surface energy）的相對關係，但仍有許多假說尚未釐清。目前人造系統則尚未有任何自潔的機制，使黏著性就如日常生活中所使用的膠帶一般，重複使用數次之後便消失無蹤。

- [1] M. H. Dickinson, *et al.*, "How animals move: An integrative view," *Science*, vol. 288, pp. 100-106, 2000.
- [2] J. C. Spagna, *et al.*, "Distributed mechanical feedback in arthropods and robots simplifies control of rapid running on challenging terrain," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 2, pp. 9-18, 2007.
- [3] K. Autumn, *et al.*, "Adhesive force of a single gecko foot-hair," *Nature*, vol. 405, pp. 681-685, 2000.
- [4] A. P. Russell, "CONTRIBUTION TO FUNCTIONAL-ANALYSIS OF FOOT OF TOKAY, GEKKO-GECKO (REPTILIA-GEKKONIDAE)," *Journal of Zoology*, vol. 176, pp. 437-476, 1975.
- [5] K. Autumn and A. M. Peattie, "Mechanisms of adhesion in geckos," *Integrative and Comparative Biology*, vol. 42, pp. 1081-1090, 2002.
- [6] H. J. Gao, *et al.*, "Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos," *Mechanics of Materials*, vol. 37, pp. 275-285, 2005.
- [7] K. Autumn, *et al.*, "Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 99, pp. 12252-12256, 2002.
- [8] K. Autumn, *et al.*, "Effective elastic modulus of isolated gecko setal arrays," *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, pp. 3558-3568, 2006.
- [9] W. Barthlott and C. Neinhuis, "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces," *Planta*, vol. 202, pp. 1-8, 1997.
- [10] W. R. Hansen and K. Autumn, "Evidence for self-cleaning in gecko setae," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 102, pp. 385-389, 2005.