



壁虎足墊階層式表面結構之機敏黏附性及其工程應用

方治國^{1*}

1. 國立宜蘭大學機械與機電工程學系教授

摘要

本文探討壁虎特有的結構及功能：壁虎擁有非凡的黏著能力使其能夠在牆壁上攀爬、在天花板甚至光滑如玻璃、瓷磚上倒立飛奔(以超過 1 m/s 的速度)、以及摔落時迅速抓住牆壁而不致摔傷。其足墊複雜之多毛狀黏附結構賦予其機敏黏附性—能黏附於各種光滑或粗糙表面，並能迅速地將腳抽離。足部黏墊具有緻密的微米級棘毛(setae)，這種類似頭髮的棘毛由硬挺之疏水性角質構成，成一角度排列成陣列。每根棘毛末梢又分叉成數百根奈米級之匙突(spatulae)，匙突末端的扁平結構使其與物體表面能緊密接觸。此種由棘毛及匙突所構成之階層式(hierarchical)表面結構能適應各種物體表面而產生很大的實接觸面積，因而使黏附效果大為提高。本文根據壁虎足墊階層式結構，針對其黏附機制、毛狀黏附系統、棘毛分裂效果、粗糙面之黏附、材料性質、行動模式、及自潔作用幾個層面考量分析。最後探討壁虎足墊機敏黏附性之仿生工程應用。

關鍵詞：壁虎、黏附性、棘毛、匙突、仿生學。

*通訊作者 E-mail：ckfang@niu.edu.tw



Smart Adhesion from Hierarchical Surface Construction in Gecko's Foot Pads and Its Engineering Applications

Chih-Kuo Fang^{1*}

1. Professor, Department of Mechanical and Electromechanical Engineering, National Ilan University.

ABSTRACT

This article investigates the special structures and functionalities in geckos' feet. Geckos possess marvelous abilities of adhesion that enable them to climb on walls, to run upside down rapidly (at speeds of over 1 m/s) on ceilings, even on smooth glass and tiles, and to arrest their falls. The complex hairy attachment structures in the foot pads enable the smart adhesion – the ability to stick to different smooth and rough surfaces and unstick its feet quickly. The attachment pads have dense micro-scale setae. The hair-like setae formed from stiff, hydrophobic keratin are arranged in angled arrays. Each seta branches at its distal end into hundreds of nano-scale spatulae. Each spatula terminates in a flattened structure, making intimate contact with the substrate. This hierarchical surface construction, composed of setae and speculae, gives geckos the adaptability to create a large real area of contact with surfaces, and thus significantly enhance the adhesion strength. biomimetics. Based on this hierarchical structure, this article studies the adhesion mechanism, hairy attachment system, effects of seta-branching, adhesion to rough surface, material properties, moving mode, and self-cleaning of gecko's foot pads. Finally, the applications of smart adhesion to biomimetic engineering are investigated.

Keywords: gecko, adhesion, seta, spatula, biomimetics

*Corresponding author E-mail: ckfang@niu.edu.tw

一、前言

近年來許多仿生學者注意到壁虎足部特殊的黏附功能，並逐步開發出一些應用仿生工程之產品。其實早在西元前四世紀，亞里斯多德(Aristotle)在《動物自然科學史》(Historia Animalium, Book IX, Part 9)中就已提到：「壁虎能以任何方式繞著樹跑上跑下，甚至頭下腳上。」壁虎足部具有超強之黏附性(adhesion)為眾所周知，卻又展現出神奇之抗黏性(anti-adhesion)。一般膠帶對折後會自黏而難以撕開，但若將壁虎足部互相貼合，卻不會產生太強之黏著現象。壁虎足部如何產生巨大之黏附力？又如何在此強黏性下，足部仍能抽放自如？這種黏著現象數千年來一直是個謎，肉眼只能看到壁虎腳趾尾端柔軟的黏著足墊上有一條條弧形波紋的脊狀皮瓣皺摺(lamellae)，長度約1-2 mm。直至十九世紀末期才發現壁虎腳趾上具有微毛；1950年代電子顯微鏡的發展，使科學家得以看到覆蓋在壁虎腳趾上複雜的階層式形貌(hierarchical morphology)，此以加州大學的Ruibal與Ernst(1965)之掃描式電子顯微鏡(scanning electron microscope, SEM)觀察為代表。目前已知壁虎腳指表皮係由薄片(lamellae)、棘毛(setae)、分岔(branches)、及突匙(spatula)構成錯綜複雜的階層式結構(Ruibal and Ernst, 1965)，其尺度可下達奈米等級，如圖1所示。

本文探討已過一個半世紀以來，關於使壁虎黏附及脫離之因子、黏附機制、及黏著強度之相關研究。最後展望根據來自壁虎的靈感發展之仿生學，以製作人造黏性結構應用於黏著劑及乾式膠帶等之前景。

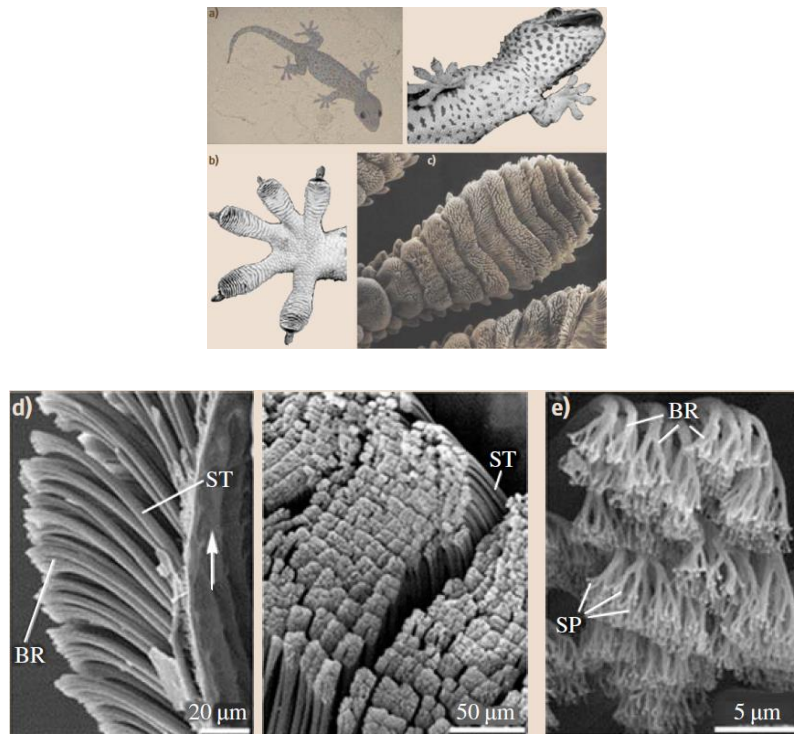


圖 1. (a)大守宮(Tokay gecko) (Autumn et al., 2000)、(b)壁虎足部(Autumn et al., 2000)、(c)壁虎腳趾 (Autumn, 2006a)。SEM 照片：(d)棘毛(Gao, 2005)、(e)突匙(Gao, 2005)。代號：ST: seta, SP: spatula, BR: branch.

二、壁虎黏附機制論證之演變

當兩固體互相接近時，其表面之突點(asperities)間將發生物理或化學性之吸引力使二表面產生黏著(adhesion)。歷年來學者認為壁虎足部之黏著作用可能來自黏液分泌(secretion of sticky fluids)、真空吸力(Suction)、靜電吸力(electrostatic attraction)、摩擦力(friction force)、微扣鎖作用(microinterlocking)、及分子間作用力-包括凡得瓦爾力(Van der Waals force)與毛細力(capillary force)等。以下作一簡要探討：

2.1 黏液分泌

早期一般以為壁虎像蛙類與昆蟲藉由腺體分泌黏液達到黏附效果。但根據生物學家的壁虎解剖實驗(Simmermacher, 1884; Wagler, 1830)，在壁虎足部並未發現此種腺體，並且壁虎爬過的物體表面並未發現任何黏液殘留，於是推翻了黏液分泌的假說。

2.2 真空吸力

真空吸力的想法曾在十九世紀中葉被討論過，該世紀末學者(Simmermacher, 1884)提出壁虎黏著係藉助真空吸力之假設。由於真空吸力係基於壓力差，故其大小與環境氣壓有關，因此在低壓環境真空吸力將降低。然而實驗發現，在低壓環境壁虎足部之黏附力相較於大氣下並無不同(Dellit, 1934; Autumn et al., 2000)，並且壁虎足部之黏附力甚可達大氣壓力的十倍(Autumn et al., 2000)，真空吸力之假設因而被推翻。

2.3 靜電吸力

有學者(Schmidt HR, 1904)認為壁虎在非導體表面行走時，因摩擦造成價電子的轉移而產生足部與物體表面間的靜電效應造就其吸引力。但此說法後來被推翻，在 Dellit 的實驗(Dellit, 1934)中，他以 X-ray 轟擊法使空氣離子化，在這種充滿相異電荷的空氣中，壁虎足部及物體表面間的靜電荷被消除，但壁虎卻仍能行走自如。

2.4 摩擦力

由於摩擦係數與視接觸面積(apparent contact area)無關，但與實接觸面積(real contact area)成正比，而壁虎足部的大量毛狀組織可大幅增加其與物體表面間之實接觸面積，因而增加攀爬牆壁之摩擦力。因此在 1923 年 Hora 提出壁虎足部之黏附力來自於摩擦力之假設(Hora, 1923)。由於摩擦力方向係平行於物體表面，因此摩擦力之假設雖可解釋壁虎攀爬牆壁之能力，卻無法解釋於天花板上倒立黏附之能力。Autum 等人的實驗(Autum et al., 2002)甚至發現，壁虎能牢靠地黏附在非常光滑(達分子級)、摩擦係數甚低的 SiO₂ 表面，可見摩擦力並非壁虎足部黏附力之主要來源。

2.5 微扣鎖作用

Dellit 在 1934 年發表的文章中(Dellit, 1934)認為壁虎具有類似甲蟲等昆蟲足部之勾爪，能在粗糙樹皮上攀爬，其勾爪如同釘鞋下的釘子一般與物體表面產生扣鎖作用，

只是其尺度非肉眼能見。但顯微鏡下呈現之壁虎匙突並不具勾爪外形，加上前述 Autumn 教授(Autum et al., 2002)在「光滑」SiO₂ 上之實驗結果足以推翻微扣鎖之說法。

2.6 凡得瓦爾力

凡得瓦力屬電性引力及分子間作用力。由於凡得瓦鍵是微弱的次級鍵，鍵能小於 5 kJ/mol，低於其他物理鍵(如共價鍵、氫鍵、離子鍵、及金屬鍵)，並遠低於化學鍵，因此在巨觀下常被忽略。與其他物理鍵不同的是：即便是在原子分離的狀態，凡得瓦力依然存在。其有效作用距離從原子等級(約 0.3 nm)到 50 nm。兩相距 d (< 30 nm)之平行表面間之凡得瓦力 F_{vdW} 可表為(Hamaker, 1937; Israelachvili and Tabor, 1972; Israelachvili, 1992)，式 1:

$$F_{vdW} = H/(6\pi d^3) \quad (1)$$

其中 H 為 Hamaker 常數，其值為 4×10^{-20} 至 4×10^{-19} J (Israelachvili, 1992)。

德國的 Haase (1990)早在 1990 年即已提出壁虎的黏附力是由凡得瓦爾力所造成。Ruibal 及 Ernst (1965)則在 1965 經由掃瞄式電子顯微鏡發現壁虎之匙突係平躺於接觸面，因而推論分子間作用力強於微扣鎖作用。若凡得瓦力是壁虎之主控黏附機制，則壁虎之黏附力可計算如下：假設 Hamaker 常數為 10^{-19} J，匙突面積為 2×10^{-14} m² (Autumn and Peattie, 2002b; Ruibal and Ernst, 1965; Williams and Peterson, 1982)，匙突與接觸面間之距離若以 0.6 nm 估算，由上式可求得單一匙突之黏附力約為 0.5 μ N。若以每支棘毛平均有 550 支匙突計算，單一棘毛之黏附力約為 270 μ N。一般求得之理論值約在 40 – 400 μ N 的範圍，此與 Autumn 等人(2000)之實驗值相符，他們使用微機電系統(Micro-electro-mechanical system, MEMS)之力感測器，測得單一棘毛之最大黏附力約為 200 μ N。Autumn 等人(2000)並量測壁虎棘毛在疏水性及親水性表面之黏附力，發覺其值近乎相等。其他一些實驗結果亦傾向於凡得瓦力是壁虎黏附力的主控機制，例如 Bergmann 與 Irschick 的溫度試驗(Bergmann and Irschick, 2005)，目前一般文獻咸認為壁虎之主要黏著機制是凡得瓦力。

2.7 毛細力

一般習知在高濕或是低溫環境下，大氣中之水分子因偶極作用造成彼此間的淨吸引力會逐漸凝聚成形。若大氣中有固態物體存在提供凝結核之成核位置，即使在普通環境中(不限高濕或低溫)，大氣中的水氣亦可凝結，並且是從物體表面開始。此現象不限於水氣，任何對物體表面具有較佳濕潤性(即較低之接觸角)之液體(與物體表面有較大之親和力)均可能發生此現象。當兩物體表面接觸時，在接觸點周圍會形成非常微量之環狀毛細凝結液(annular-shaped capillary condensate)，若其彎液面(meniscus)呈(或接近)軸對稱則稱為單擺環(pendular ring) (Orr et al., 1975)。若將這兩物體稍微拉離，在原接觸點間之凝結液將被拉成一軸對稱之黏著液橋(adhesive liquid bridge) (Fan and O'Brien, 1975; Phipps and Rice, 1979; Zimon, 1969)，因而產生毛細力造成接觸點間之黏附現象。毛細力為液體黏滯力與表面張力的共同作用，其大小因表面性質而異 (Bhushan, 2002; Bhushan 2005)。

由於空氣中自然存在的濕氣，壁虎匙突與接觸面間會形成凝結液，其所產生之毛細力可增加壁虎匙突之黏附力而成為壁虎黏附機制的一部份，甚至可能成為主控機制 (Hiller, 1968; Stork, 1980)。毛細力數值模擬(Kim and Bhushan, 2008)以及在不同濕度環境中針對不同疏水程度之表面量測黏附力的實驗結果(Huber et al., 2005)均支持毛細作用力對黏附力的貢獻。

三、毛狀黏附系統 (Hairy Attachment Systems)

壁虎之毛狀黏附系統主要由具撓性之端末元(terminal elements)所構成，毛狀黏附系統亦常見於許多甲蟲(beetles)、蒼蠅等昆蟲及蜘蛛、蜥蜴等，其微結構皆類似，如圖 2 所示。顯微觀察顯示這些黏附裝置具有很強的尺度反比例效應(inverse scaling effect)，即愈重之生物其黏附結構愈細，使單位面積可容納更多的端末元，以增加實接觸面積，進而增加黏著強度以支撐較大之體重。例如對於蒼蠅及甲蟲而言，微米級尺度之即已足夠；而壁虎則須靠次微米(sub- μm)端末元方能確保黏著效果。運用接觸力學(contact

mechanics)原理可量化解釋此種效應，其結果顯示將觸點分裂(split)為更細之次觸點(subcontacts)可增大黏著效果。由 Arzt 等人(2003)及 Kesel 等人(2003)之實驗數據可得末端元密度 ρ (單位：個/m²)與體重 m (單位：kg)之關係如下(式 2)：

$$\log \rho = 13.8 + 0.669 \log m. \quad (2)$$

圖 2 的幾種生物中，壁虎體重最重、末端元密度最高。蜘蛛及壁虎可產生很強的乾性黏著(dry adhesion)；而甲蟲及蒼蠅則須同時藉助黏液的分泌。

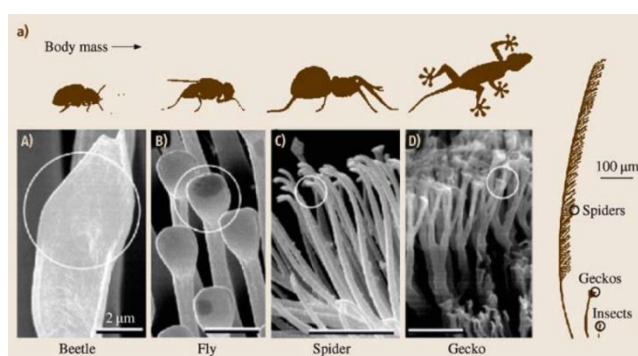


圖 2. (A)甲蟲、(B)蒼蠅、(C)蜘蛛、及(D)壁虎足部末端元(Arzt et al., 2003)

壁虎足部之黏附特性可由其腳趾表皮之表面形貌加以解釋。腳趾表皮之階層式結構開始於皮瓣皺摺薄片(lamellae)，長度 1-2 mm (以大守宮為例)，這種軟脊組織易於受壓變形，因此即使在堅硬的粗糙面亦能與之緊密貼合。壁虎皮瓣皺摺上均勻披覆蓋著千百支綿密的棘毛陣列，每平方毫米可達 14,000 根(Schleich and Kästle, 1986)，棘毛長度 30-130 μm (Hiller, 1968; Ruibal and Ernst, 1965; Russell, 1975; Williams and Peterson, 1982)，直徑 5-10 μm ，主要成份為天然 β 角質素(β -keratin) (Maderson, 1964; Russell, 1986) 及部分 α 角質素(α -keratin) (Rizzo et al., 2006)。每根棘毛末端分叉出 100 至 1000 根更細的微毛(Hiller, 1968; Ruibal and Ernst, 1965) 直徑 0.1-0.2 μm (Hiller, 1968; Ruibal and Ernst, 1965)，微毛肉柄(stalk)末端具扁平三角形之末端元，長度約 500 nm，厚度約 10 nm (Persson and Gorb, 2003)，寬度約 200-300 nm (Ruibal and Ernst, 1965)，狀似湯匙，故名匙突。匙突末端的匙突墊(spatula pad) 呈扁平結構使其與物體表面能緊密接觸。此種由突匙、棘毛、脊狀皮瓣、及足墊所構成之階層式表面結構既柔軟又堅韌，並且

饒富彈性，能適應各種物體表面而產生很大的實接觸面積，使貼合效果達到近乎完美的地步。

以大守宮(Tokay gecko)為例，其足部黏墊總面積約 220 mm²，腳趾上共有 300 萬根左右的棘毛，其中上億的突匙累加成的巨大接觸面積，因而大大地提升其凡得瓦作用力，可產生約 20 N 之黏附力(Irschick et al., 1996)使其能倒立吸附，以及承受在垂直牆面上攀爬之剪切力。此外，施於棘毛之預緊力(preload)亦有增加黏附力之效果。以單根棘毛而言，施予 2.5 μN 之預緊力可產生 20-40 μN 之黏著力，相當於 8-16 之黏著係數 (adhesion coefficient = adhesion strength / preload) (Autumn, 2002a)。

四、棘毛分裂為匙突之效果

4.1 增加黏附力

Autumn 等人(2002)認為將大接觸面分割成許多小接觸面可增加黏著效果，因此壁虎足部分叉成大量匙突可增加黏附力，茲證明如下：若將壁虎匙突末端視為半徑 R 之半球，由 JKR (Johnson–Kendall–Roberts)理論(Johnson et al., 1971)，單一接觸點之黏附力為 $F_a = 3\pi\gamma\sqrt{2R}$ ，其中 γ 為兩接觸面間之相對表面能(Relative surface energy, unit: J/m²)。根據 JKR 理論黏附力於正比於 \sqrt{R} ，若將該接觸點分叉成 n 支小匙突，則根據自相似比例原則(self-similar scaling) (Arzt et al., 2003)，每一匙突半徑 $r = R/n^{1/2}$ ，n 支小匙突之總黏附力 $F_a' = n(3\pi\gamma\sqrt{2r}) = n^{1/2}F_a$ ，因此分叉成較細之 n 支小匙突可使黏附力增為 $n^{1/2}$ 倍。

4.2 增加毛細力(潮濕環境)

在潮濕環境中，毛細力(capillary force)或彎液面力(meniscus force)可進一步增加黏附力(Bhushan, 1999; Bhushan, 2002; Bhushan, 2005)。毛細吸引力(F_c)由拉普拉斯壓力(Laplace pressure, F_L)及表面張力(surface tension, F_s)所提供(Bhushan, 2002; Orr et al., 1975)，亦即 $F_c = F_L + F_s$ 。其中 F_L 與彎液面面積成正比；而 F_s 來自於周邊

(circumference)上之表面張力的垂直分量，其大小與彎液面周長成正比，當彎液面半徑 (meniscus radius) 很小且接觸角(contact angle)較大時，其效果甚明顯。同先前之推導，若將單點接觸分裂成 n 個匙突，根據自相似比例原則每個匙突半徑或周長為原接觸單點的 $n^{-1/2}$ 倍，而總周長較未分裂前增為 $n^{1/2}$ 倍，故 F_s 亦增為 $n^{1/2}$ 倍(Cai and Bhushan, 2007; Bhushan, 2007)，即分裂後總表面張力提供之毛細力增為 $F_s' = n^{1/2}F_s$ 。

4.3 降低黏滯力(潮濕環境)

壁虎足部抽離物體表面時，須克服黏滯力 F_v 所造成之阻力。若將接觸面分裂成 n 個小接觸面，兩物體表面分離時之總黏滯阻力可降至 F_v/n (Cai and Bhushan, 2007)。

五、黏附於粗糙面

前述模型僅考慮平滑面(flat surface)間之接觸。對於粗糙面，特別是粗糙的剛性物體表面，其緊密接觸的面積(實接觸面積)遠小於視接觸面積(apparent contact area)。實際上，實接觸面積僅佔視接觸面積的 10^{-2} 至 10^{-6} (Bhushan, 1999; Bhushan, 2002; Bhushan, 2005)。因此對於天然粗糙面，壁虎棘毛的柔度(compliance)及適配度(adaptability)對其黏附能力非常重要，而其末梢分裂所構成之階層式結構直覺上能提供較大的實接觸面積(相較於未分裂結構) (Sitti and Fearing, 2003a)。

六、材料性質之考量

一般而言，柔性(compliant)材質比剛性(rigid)材質可獲致較大的實接觸面積而得到較強之黏附效果，例如一般膠帶材質使用柔性的(compliant)非交聯橡膠(uncross-linked rubber)，其楊氏模數(Young's modulus) E 僅 1 kPa 左右。然而壁虎棘毛若使用高柔性材料，將造成鄰近棘毛間互相黏附之現象。因此構成其棘毛的主要材質β角質素是一種勁度不低之硬質材料(stiff material)，其楊氏模數一般在 1 至 20 GPa 之間(Bertram JEA and Gosline, 1987; Russell, 1986)，雖比鋼材($E \approx 210$ GPa)低，卻遠高於交聯橡膠(cross-linked rubber, $E \approx 1$ MPa)及膠帶使用的非交聯橡膠。然而造物者賦予其階層化結

構，使壁虎足部棘毛陣列之等效模數(effective modulus)減至 100 kPa 左右，降低 4 個數量級以上，因而得到驚人的超黏附效果，這是最佳化結構設計及材料特性組合之傑作。

七、行動模式

靜止時，壁虎靠黏附力抓住天花板、靠摩擦力抓住垂直牆壁；但行動中，均需要借助摩擦力。然而其強大之吸附力有時會成為行動之障礙而影響運動之敏捷性，但壁虎卻不受影響，仍能以 20 ms/步快速運動，甚至能在垂直的牆壁上以 1 m/s 速度迅速攀爬。此乃由於壁虎能經由巨觀之腳趾控制微米級的棘毛及次微米級的匙突，使其黏附結構能瞬間失去黏性，故能在數毫秒內完成腳趾附著(attachment)與脫離(detachment)之快速切換。此種動態黏附能力稱為「可逆黏附性」(reversible adhesion)或「機敏黏附性」(smart adhesion) (Bhushan et al., 2006)。其原因乃是壁虎棘毛之黏性具有方向性，在某一角度時黏力最強(Shah and Sitti, 2004)，因此行走時藉由改變棘毛與接觸面夾角即可將足部由物體表面脫離。

壁虎能將足部迅速抽離所黏附之表面係經由匙突之剝離作用(peeling action)，而其關鍵在於匙突之排列方向。Autumn 等人(2000)最早以實驗證實壁虎棘毛之黏附力與其三維排列方向及施加之預緊力有關。Shah 及 Sitti (2004)曾求取達到黏附效果所需之預緊力的理論值，以及棘毛在不同角度下之黏附力，發現棘毛與接觸面成 30° 角黏力最強。Gao 等人(2005)針對單一棘毛與物體表面接觸之有限元素分析中，以各種不同的角度對棘毛施予拉力，結果顯示當施力方向與接觸面夾角小於 30° 時，其失效模式(failure mode)主要為「滑動」(sliding)；反之大於 30° 時，其失效模式主要為「分離」(detachment) – 此與 Autumn 等人(2000)之結果相符。

Tia 等人(2006)提出在棘毛分離過程中，角度因素對於黏附及摩擦具有相當之重要性。因此壁虎足趾運動模式特殊，以達到迅速黏附/脫離之效果。圖 3 為單一棘毛之黏附及脫離的過程示意圖。如圖 3(a)所示，在自然狀態下，匙突墊幾乎垂直於匙突柄，

並與棘毛柄成乎近 30° 之夾角，因此當匙突墊剛開始黏附於物體表面時，匙突柄及棘毛柄與接觸面之夾角分別約為 $\theta = 90^\circ$ 及 $\theta_s = 30^\circ$ ，此時僅有少數匙突墊接觸到物體表面(部分匙突墊懸空)。為使更多匙突墊與物體表面接觸以增加黏附力，壁虎足趾開始內握(gripping or rolling-in)使棘毛向圖 3(b)之右下角運動，此時 θ 與 θ_s 分別小於 90° 及 30° 。當足趾內握得更緊，則 θ 及 θ_s 更小，接觸到表面的匙突更多，因此使得黏附力得以增加。此外，由圖 3(b)可知 $F_{n\text{-seta}} / F_{L\text{-seta}} = \tan\theta_s$ ，其中 $F_{n\text{-seta}}$ 及 $F_{L\text{-seta}}$ 分別為作用於棘毛之法向力及側向力，其值分別等於黏附力與摩擦力。當壁虎足趾內握時， θ_s 減小且黏附力 $F_{n\text{-seta}}$ 增加，因此由上式可知 $F_{L\text{-seta}}$ 會隨之增加，亦即可獲較大摩擦力。這可作為相關實驗(Autumn et al., 2000; Autumn, 2006b; Chen et al., 2006)所發現關於壁虎透過內握之動作以增加附著力及摩擦力之微觀解釋。此外，由於 $\theta_s < 45^\circ$ ，因此 $F_{n\text{-seta}} / F_{L\text{-seta}} < 1$ ，亦即摩擦力大於黏附力，這可解釋為何壁虎大多停留在牆壁上(靠摩擦力支撐體重)而不是天花板上(靠黏附力支撐體重)。此外，壁虎可透過調整 θ_s 之大小來改變黏附力與摩擦力之比值，以適應不同斜度之牆壁。例如增加 θ_s 可增加黏附力及減少摩擦力，當 θ_s 增加至 30° 時黏附效果最佳，但超過 30° 後因棘毛/匙突結構會造成匙突脫離表面，因此壁虎在天花板上倒立時，會使棘毛與接觸面成 30° 角以達到最大黏附效果。

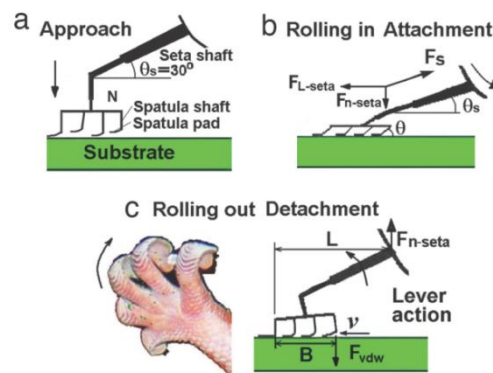


圖 3. 壁虎棘毛黏附/脫離接觸面示意圖：(a)接近表面時，(b)黏附過程，(c)脫離過程
(Tian et al., 2006)

當壁虎足部欲脫離接觸面時，腳趾會開始上翻 (rolling-out)，使棘毛放鬆回到自然狀態($\theta = 90^\circ$ 及 $\theta_s = 30^\circ$)。若足趾繼續上翻，當 θ_s 超過臨界角，匙突會由右至左依序脫離黏附之表面，如圖 3(c)所示。此臨界角與使棘毛脫離表面之上提力無關，並且大約等於其在自然狀態之角度 $\sim 30^\circ$ ，因此使棘毛脫離接觸面並不困難。圖 3(c)並顯示在足趾上翻過程中，施加棘毛桿一上提力可使匙突以 v 之速度由右至左依序脫離黏附之表面。由於棘毛桿之槓桿作用 (lever action) 使得所需之上提力遠低於黏附強度，根據 Tian 等人(2006)之計算，所需之上提力僅為黏附力的千分之一左右。故藉由增加棘毛與接觸面之夾角，當超過 30° 後即可將棘毛一排一排依序抽離。這是一種以時間換取上提力的作法，因為雖然所需之上提力甚低，但將該棘毛及匙突依序拉離表面需要花費一段時間。若以單一棘毛下之所有匙突束總寬度為 B 計算，則須花 $T = B/v$ 的時間方能將一根棘毛拉離表面，而棘毛為數眾多，故將足部提起所需花費的時間甚長，那麼壁虎怎能以 1 m/s 之速度於牆壁上奔馳？吾人以為其關鍵在於其足趾上繁多之皺摺，由於各皺摺上之肌肉可獨立運作，因此同一足趾上之皺摺可同時作動，因而節省大量時間，此為造物者之傑作。

因此，壁虎足部是以複雜的模式運動行走：首先須將蜷曲之足趾小心展開伸直，使棘毛與接觸面成 30° 角以達到最大黏附效果；欲將足部剝離時，藉由增加棘毛與接觸面之夾角，當超過 30° 後黏附強度降低，即可將每一皺折之棘毛一排一排依序抽離而使足部脫離表面。

八、自潔作用 (Self-cleaning)

一般黏劑或膠帶很容易沾黏灰塵等雜質而失去黏性，但壁虎之腳趾卻不然，因為其棘毛具有自潔之功能，是目前所知最早的自潔性黏劑(Hansen and Autumn, 2005)，因此腳趾一旦沾上灰塵粒子，只須走幾步即可將其甩掉。存在於壁面與壁虎匙突間之灰塵粒子分別受到壁面與匙突之吸引力，此二黏著力間之能量不平衡 (energetic disequilibrium) 是使粒子得以脫離之原因。如果使粒子脫離壁面所需之能量大於使粒子

脫離匙突所需之能量時，自潔現象即可發生，這是使用接觸力學模型解釋壁虎腳趾自潔現象的一種說法(Hansen and Autumn, 2005)。此外，灰塵粒子之滾動現象亦有助於自潔效果(Hui et al., 2006)。圖 4 顯示匙突陣列及灰塵粒子，每一簇匙突隸屬於一支棘毛，同一簇匙突末端幾乎構成一個平面，因此對於較大之灰塵由於球面曲率與平面曲率之不契合，因此能黏附於其上之匙突不多，以致未能有效吸附大顆灰塵。至於小顆灰塵，由於表面積太小，僅能容許極少數之匙突接近，計算結果(Hansen and Autumn, 2005)顯示吸附力不夠，故小灰塵亦不至於被匙突吸附。因此僅有少數曲率與匙突末端較為契合之中型灰塵會被匙突吸住。此外，沒有被吸住之灰塵也有可能陷在匙突、棘毛陣列間之空隙，必須透過動態自潔機制(dynamic self-cleaning mechanism)經由慣性力將其甩掉。Hu 等人(2012)提出壁虎在運動過程中，腳趾藉著一種特有的「指過伸」(digital hyperextension)動作(圖 5)使其甩掉粒子的速度加倍，能在四步內將灰塵粒子逐出 80%。吾人以為 Hu 等人所提「指過伸」與 Tian 等人(2006)所提「腳趾上翻」(rolling-out, 圖 3c)應屬同一動作，兼具抽離黏著之棘毛及甩掉灰塵粒子之雙重功效。

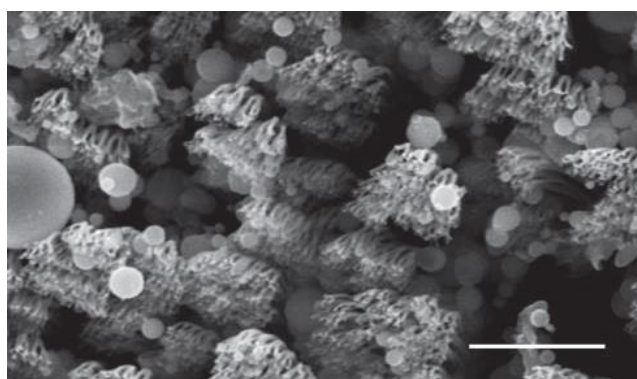


圖 4. 匙突陣列及灰塵粒子(Scale bars: 10 μm)
(Hansen and Autumn, 2005)



圖 5. 壁虎足趾的「指過伸」動作
(Hu et al., 2012)

九、工程應用

工程界對於前述壁虎足部特殊的階層式表面結構及功能相當有興趣，希望進一步探討其中之奧秘並將所獲相關資訊應用於製作微奈米表面，以複製壁虎所擁有之超強黏附力。

一般人造黏膠或膠帶是使用濕式黏著劑將兩接著面永久黏著。模仿壁虎階層式結

構，經由微奈米製程 (micro/nanofabrication) 或自組裝技術 (self-assembly techniques) 可製作人造纖維結構 (fibrillar structure)，開發乾性超黏高分子膠帶(Gorb et al., 2007; Northen et al., 2005; Zhao et al., 2006)。此種乾式黏劑除了可用於日常膠帶、扣件 (fasteners)、玩具外，尚可應用於微電子等高科技產業以及航太工業。壁虎足墊靜態自潔之設計加上「指過伸」的動態自潔機制，使壁虎足部黏性強卻不沾污，這在可一再重複使用並高可靠度之乾性黏劑及元件之仿生設計上，提供一個新的可行機制。

此外，配合壁虎腳趾之「可逆黏附性」或「機敏黏附性」衍生之特殊行動方式，可應用於製作易黏易撕之乾式黏性面(非一般單純柱狀結構(pillar-like structure)之仿生膠帶)，以及需要高摩擦力之場合，例如運動鞋及輪胎等(Majidi et al., 2016)。

在工程應用層面上，仿生攀爬機器人之開發已有一段歷史(Autumn et al., 2005; Menon et al., 2004; Sitti and Fearing, 2003b)。早期使用吸盤，但其移動速度緩慢。其後模仿壁虎足部結構出現乾式粘合技術，開發出人造粘性材料。美國 Stanford 大學機械系教授 Mark Cutkosky (Kim et al., 2008; Hawkes et al., 2013)得到美國國防部支助，帶領的團隊歷經五年的研究，開發出能在光滑玻璃壁面垂直攀爬行走之機器人—Stickybot。他們使用微模具製作高分子微絲，做成黏著劑後塗佈於 Stickybot 的類橡膠材質之足部，使其上被覆數千根聚合纖維以模擬壁虎腳底微毛。該黏著劑具單向性，亦即某方向受力時可使其黏緊，而反向受力時則鬆脫，如同將軀體鉤在牆面，脫鉤後即可進一步移動軀體。此黏著劑進一步改良以仿製壁虎腳趾上的皮瓣和棘毛之階層結構，並將微絲直徑減至 20 μm ，因此所能承受之負荷大為提高，具高強度及重複使用之特性，不會在材料表面形成殘留或損傷。除了玻璃外，機器人並能在木板及塗漆之金屬表面攀爬。此外亦有科學家使用奈米碳管陣列製作仿生壁虎腳(Ge, 2011)，在光滑玻璃及粗糙砂紙上均有強吸附力，並能從不同角度輕易脫離（強吸附及易脫附）。

若以壁虎仿生技術製作粘性手套及粘性鞋，並使其強度足以承受人類體重，將使穿戴者能如同壁虎般在牆上任意攀爬，適合高空作業者。美國國防部負責研發軍用高科技之國防高等研究計劃署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)在

麻州的追迫實驗室(Draper Laboratory)「Z-Man」計畫(Coldewey, 2014)中研製仿壁虎腳掌之手套供士兵攀爬牆壁，並已成功使 218 磅重人員在背負 50 磅重物之狀況下攀爬 25 呎高之玻璃牆。

壁虎仿生技術之應用領域除了前述可重複使用之乾性超黏膠帶、扣件、粘性手套、粘性鞋、及垂直攀爬行走之機器人外，未來在巨觀接合技術上可望部分取代螺絲、鉚釘、及傳統用膠，藉此大為簡化組裝及拆裝程序；而在微奈米科技上，壁虎仿生黏劑可用來拾取、移動、及排列奈米微粒、奈米纖維、微感測器、微馬達、及超微電路 (ultra-miniature circuits)等。此外，壁虎仿生技術在太空科技及生醫領域之應用亦有很大發展空間。在太空科技方面：壁虎仿生乾式黏劑在太空或真空環境下特別顯出其長處，因為傳統黏劑之液態成份在此種環境下會快速蒸發而使黏性失效。在生醫領域方面，將壁虎仿生技術應用於防水絆創帶(bandage, OK 繃)之黏著材料、送藥貼片，甚至取代傳統之傷口縫合技術。因此未來壁虎仿生技術可望為科技帶來一些革命性之變革。

十、結論

本文根據壁虎足墊階層式結構，針對其黏附機制、毛狀黏附系統、棘毛分裂效果、粗糙面之黏附、材料性質、行動模式、及自潔作用幾個層面考量分析。運用仿生科技，將壁虎足墊之機敏黏附性應用在工程上具有很大潛力。特別是針對台灣發生頻繁的地震，加上土壤液化，經常造成大樓倒塌沈陷，數層樓被埋入地下，造成搜救困難。若能善加發展壁虎仿生科技，開發攀爬機器人，深入災區協助搜救，對於救災工作將有很大助益。

參考文獻

Arzt, E., Gorb S., and Spolenak, R., 2003, "From micro to nano contacts in biological attachment devices," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 100, 10603–10606.

- Autumn, K., Liang, Y.A., Hsieh, S.T., Zesch, W., Chan, W.P., Kenny, T.W., Fearing, R., and Full, R.J., 2000, "Adhesive force of a single gecko foot-hair," *Nature*, 405, 681–685.
- Autumn, K., Sitti, M., Liang, Y.A., Peattie, A.M., Hansen, W.R., Sponberg, S., Kenny, T.W., Fearing, R., Israelachvili, J.N., and Full, R.J., 2002, "Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 99, 12252–12256.
- Autumn, K. and Peattie, A.M., 2002, "Mechanisms of adhesion in geckos," *Integr. Comp. Biol.*, 42, 1081–1090.
- Autumn, K., Buehler, M., Cutkosky, M., Fearing, R., Full, R.J., Goldman, D., Groff, R., Provancher, W., Rizzi, A.A., Sranli, U., Saunders, A., and Koditschek, D. E., 2005, "Robotics in scansorial environments," *Proc. SPIE*, 5804, 291–302.
- Autumn, K., 2006a, "How gecko toes stick," *Am. Scientist*, 94, 124–132.
- Autumn, K., 2006b, "Properties, Principles, and Parameters of the Gecko Adhesive System," in: Smith, A. and Callow, J. (Eds), *Biological Adhesives*, Springer, Berlin, 225–255.
- Autumn, K., Hsieh, S.T., Dudek, D.M., Chen, J., Chitaphan, C., and Full, R.J., 2006, "Dynamics of geckos running vertically," *Journal of Experimental Biology*, 209, 260–272.
- Bergmann, P.J. and Irschick, D.J., 2005, "Effects of temperature on maximum clinging ability in a diurnal gecko: evidence for a passive clinging mechanism?" *J. Exp. Zool.*, 303A, 785–791.
- Bertram, J.E.A. and Gosline, J.M., 1987, "Functional design of horse hoof keratin: the modulation of mechanical properties through hydration effects," *Journal of Experimental Biology*, 130, 121–136.
- Bhushan, B., 1999, *Principles and Applications of Tribology*, Wiley, New York.
- Bhushan, B., 2002, *Introduction to Tribology*, Wiley, New York.
- Bhushan, B. (ed.), 2005, *Nanotribology and Nanomechanics – an Introduction*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany.
- Bhushan, B., Peressadko, A.G., and Kim, T.W. 2006, "Adhesion analysis of two-level hierarchical morphology in natural attachment systems for smart adhesion," *J. Adhesion Sci. Technol.* 20, 1475–1491.
- Bhushan, B., 2007, "Adhesion of multi-level hierarchical attachment systems in gecko feet," *J. Adhesion Sci. Technol.*, 21, 1213–1258.

- Cai, S. and Bhushan, B., 2007, "Effects of symmetric and asymmetric contact angles and division of menisci on meniscus and viscous forces during separation," *Philos. Mag.*, 87, 5505–5522.
- Chen, J.J., Peattie, A.M., Autumn, K., and Full, R.J., 2006, "Differential leg function in a sprawled-posture quadrupedal trotter," *Journal of Experimental Biology*, 209, 249–259.
- Dellit, W.D., 1934, "Zur Anatomie und Physiologie der Geckozehe," *Jena. Z. Naturwissen*, 68, 613–658.
- Fan, P.L. and O'Brien, M.J., 1975, "Adhesion in deformable isolated capillaries," in: Lee, L.H. (Ed), *Adhesion Science and Technology*, Plenum, New York, 9A, 635.
- Gao, H., Wang, X., Yao, H., Gorb, S., and Arzt, E., 2005, "Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos," *Mech. Mater.*, 37, 275–285.
- Gorb, S., Varenberg, M., Peressadko, A., and Tuma, J., 2007, "Biomimetic mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructures," *J. Royal Soc. Interf.*, 4, 271–275.
- Haase, A., 1900, "Untersuchungen über den Bau und die Entwicklung der Haftlappen bei den Geckotiden," *Archiv. f. Naturgesch.*, 66, 321.
- Hamaker, H.C., 1937, "London van der Waals attraction between spherical bodies," *Physica*, 4, 1058.
- Hansen, W.R. and Autumn, K., 2005, "Evidence for self-cleaning in gecko setae," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 102, 385–389.
- Hiller, U., 1968, "Untersuchungen zum Feinbau und zur Funktion der Haftborsten von Reptilien," *Z. Morphol. Tiere*, 62, 307–362.
- Hora, S.L., 1923, "The adhesive apparatus on the toes of certain geckos and tree frogs," *J. Asiat. Soc. Beng.*, 9, 137–145.
- Hu, S., Lopez, S., Niewiarowski, P.H., and Xia, Z., 2012, "Dynamic self-cleaning in gecko setae via digital hyperextension," *J. R. Soc. Interface*, 9, 2791–2790.
- Huber, G., Gorb, S.N., Spolenak, R., and Arzt, E., 2005, "Resolving the nanoscale adhesion of individual gecko spatulae by atomic force microscopy," *Biol. Lett.*, 1, 2–4.
- Hui, C.Y., Shen, L., Jagota, A., and Autumn, K. 2006, "Mechanics of anti-fouling or self-cleaning in gecko setae," *Proc. 29th Annual Meeting of the Adhesion Society, Inc.*
- Irschick, D.J., Austin, C.C., Petren, K., Fisher, R.N., Losos, J.B., and Ellers. O., 1996, "A comparative analysis of clinging ability among pad-bearing lizards," *Biol. J. Linn. Soc.* 59, 21–35.

- Israelachvili, J.N. and Tabor, D., 1972, "The measurement of Van der Waals dispersion forces in the range of 1.5 to 130 nm," *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 331, 19–38.
- Israelachvili, J.N., 1992, *Intermolecular and Surface Forces*, 2nd edition, Academic, San Diego.
- Johnson, K.L., Kendall, K., and Roberts, A.D., 1971, "Surface energy and the contact of elastic solids," *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 324, 301–313.
- Kesel, A.B., Martin, A., and Seidl, T., 2003, "Adhesion measurements on the attachment devices of the jumping spider *Evarcha arcuata*," *J. Exp. Biol.*, 206, 2733–2738.
- Kim, T.W. and Bhushan, B., 2008, "The adhesion model considering capillarity for gecko attachment system," *J. Royal Soc. Interf.*, 5, 319–327.
- Maderson, P.F.A., 1964, "Keratinized epidermal derivatives as an aid to climbing in gekkonid lizards," *Nature*, 2003, 780–781.
- Menon, C., Murphy, M., and Sitti, M., 2004, "Gecko inspired surface climbing robots," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, August 22-26, 431–436.
- Northen, M.T. and Turner, K.L., 2005, "A batch fabricated biomimetic dry adhesive," *Nano-technology*, 16, 1159–1166.
- Orr, F.M., Scriven, L.E., and Rivas, A.P., 1975, "Pendular rings between solids: meniscus properties and capillary forces," *J. Fluid. Mech.*, 67, 723–742.
- Persson, B.N.J. and Gorb, S., 2003, "The effect of surface roughness on the adhesion of elastic plates with application to biological systems," *J. Chem. Phys.* 119, 11437–11444.
- Phipps, P.B. and Rice, D.W., 1979, "Role of water in atmospheric corrosion," *ACS Symposium Series*, 89.
- Rizzo, N., Gardner, K., Walls, D., Keiper-Hrynko, N., and Hallahan, D., 2006, "Characterization of the structure and composition of gecko adhesive setae," *J. Royal Soc. Interf.* 3, 441–451 (2006).
- Ruibal, R. and Ernst, V., 1965, "The structure of the digital setae of lizards," *J. Morphol.*, 117, 271–294.
- Russell, A.P., 1975, "A contribution to the functional morphology of the foot of the tokay, *Gekko gekko*," *J. Zool. Lond.*, 176, 437–476.
- Russell, A.P., 1986, "The morphological basis of weight-bearing in the scansors of the tokay gecko," *Can. J. Zool.*, 64, 948–955.

- Schleich, H.H. and Kästle, W., 1986. "Ultrastrukturen an Gecko-Zehen," *Amphibia Reptilia*, 7, 141–166.
- Schmidt, H.R., 1904, "Zur Anatomie und Physiologie der Geckopfote," *Jena, Z. Naturwissen*, 39, 551.
- Shah, G.J. and Sitti, M., 2004, "Modeling and design of biomimetic adhesives inspired by gecko foot-hairs," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, 873–878.
- Simmermacher, G., 1884, "Untersuchungen über Haftapparate an Tarsalgliedern von Insekten," *Zeitschr. Wissen Zool.*, 40, 481–556.
- Sitti, M. and Fearing, R.S., 2003a, "Synthetic gecko foot-hair for micro/nano structures as dry adhesives," *J. Adhesion Sci. Technol.*, 17, 1055–1073.
- Sitti, M. and Fearing, R.S. 2003b, "Synthetic gecko foot-hair for micro/nano structures for future wall-climbing robots," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1, 1164–1170.
- Stork, N.E., 1980, "Experimental analysis of adhesion of *Chrysolina polita* on a variety of surfaces," *J. Exp. Biol.*, 88, 91–107.
- Tian, Y., Pesika, N., Zeng, H., Rosenberg, K., Zhao, B., McGuiggan, P., Autumn, K., and Israelachvili, J., 2006, "Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment," *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 103, 19320–19325.
- Wagler, J., 1830, *Natürliches System der Amphibien*, Cotta'schen, Munich.
- Williams, E.E. and Peterson, J.A., 1982, "Convergent and alternative designs in the digital adhesive pads of scincid lizards," *Science*, 215, 1509–1511.
- Zhao, Y., Tong, T., Delzeit, L., Kashani, A., Meyyappan, M., and Majumdar, A., 2006, "Interfacial energy and strength of multiwalled-carbon-nanotube-based dry adhesive," *J. Vac. Sci. Technol. B*, 24, 331–335.
- Zimon, A.D., 1969, *Adhesion of Dust and Powder*, translated from Russian by M. Corn, Plenum, New York.
- Majidi, C., Groff, R.E., Maeno, Y., Schubert, B., Baek, B., Bush, B., Maboudian, R., Gravish, N., Wilkinson, M., Autumn, K., and Fearing, R.S., 2016, "High Friction from a Stiff Polymer using Micro-Fiber Arrays," *Physical Review Letters*, 97, No. 076103.
- Kim, S., Spenko, M., Trujillo, S., Heyneman, B., Santos, D., and Cutkosky, M.R., 2008, "Smooth vertical surface climbing with directional adhesion," *IEEE Trans. Robot*, 24, 65–74.

Ge, L., 2011, *Synthetic gecko adhesives and adhesion in geckos*, Doctoral Dissertation, The University of Akron, U.S.A..

Elliot W. Hawkes, Student Member, IEEE, Eric V. Eason, Student Member, IEEE, Alan T. Asbeck, and Mark R. Cutkosky, 2013, “The Gecko’s Toe: Scaling Directional Adhesives for Climbing Applications,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18, 518–526.

Coldewey, D., 2014, “Z-Man: Gecko-Inspired Material Lets You Climb Sheer Glass Walls,” *NBC NEWS*, Retrieved Feb. 10, 2016, from

<http://www.nbcnews.com/tech/innovation/z-man-gecko-inspired-material-lets-you-climb-sheer-glass-n124051>.

