

您不知道的早知道—— 仿 生 學

材料系暨奈微所教授／李旺龍

引言

「如果海會說話，如果風愛上砂，……。」人們常常以擬人化的角度去賦予周遭環境以及生物具有類似人們的能力；人們又常常歌頌自然的偉大，讓許多生物具有我們所望塵莫及的卓越能力；人們也常常到處開墾、鑿山造路，訴說著「人定勝天」的期待；但是人們是否發現這一切真如其一廂情願的想像？世界怎麼運轉真的是依自然的控制嗎？生物的卓越能力真的是與生俱來嗎？當雪山隧道從開工鑿穿到通車，在展現工程實力的同時，卻也有大量的高品質淡水隨之流失；人定勝天造成的災害也給人們一些反省的機會。是要歌頌自然還是要人定勝天？自然的跟人造的誰好？文章中不見得能夠有明確的答案，但是需要的是大家對於環境的欣賞以及觀察入微，當你每天習慣看著的一幕突然間造成你的靈光一閃（當然我不認為那是突然間的創意浮現，而應視為你日有所思夜有所夢的成果），給了你很多的想像時，歌頌自然之聲再起。

"How many times it thundered before Franklin took the hint!

How many apples fell on Newton's head before he took the hint!

Nature is always hinting at us. It hints over and over again.

And suddenly we take the hint"

~ FROST, ROBERT LEE (1875-1963, Poet)

如果自然做好所有的設定，讓生物可以面對未來，那也一定留了一絲線索給人們，甚至是滿滿的全世界的線索，每天面對著我們，每天設法的去向我們提示它們的存在，縱使該線索答案所屬的問題我們都還不清不清楚的，甚或尚未定義出來！因為是早就存在的，所以可以說是「New but Old!」也可以說是「Things you didn't know you knew!」「早知道用功一點，就不會不及格。」「早知道小心一點，就不會出這種事。」人們每天開口閉口說著許多「早知道」，通常是希望時間能夠倒流，只可惜時間之箭並不會回頭。不過，另外還有一個「早知道」，就是天天在我們身邊、習以為常卻常常受到我們忽視的「自然」。人是習慣的奴隸，習慣每天日月星辰、山水風雲、蟲鳴鳥叫，習慣周遭事物的存在及演化，而我們每天又有很多事要煩要忙，往往無暇注意在周遭隨

時給我們很多暗示的「自然」。其實自然時時刻刻展現她豐富的演化成果，直到我們突然間驚鴻一瞥、靈光一閃，才終於注意到這大太陽底下存在許久的新鮮事。

從自然界合法「剽竊」設計及想法

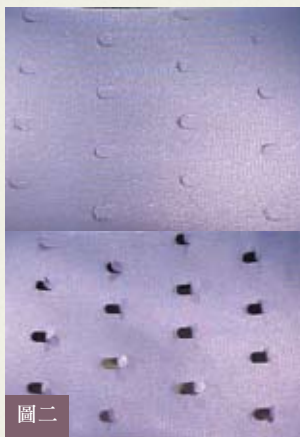
仿生學可以粗略的定義為：從自然界合法「剽竊」許多設計及想法，應用來改善人類技術；或說是受自然的啟發，藉由了解其運作機制，去開發新技術解決問題。其實自然並不完美，自然界的演化過程偶爾有一些小錯誤發生，偶爾發生了突變，就是這麼悠閒地隨著時間長河慢慢前進，演化到自然早知道一仿生學現在這步田地。不過，若將這一大段演化時間視為1年，那麼自有人類出現到現在，大概只過了不到1分鐘，因此人類的技術發展確實需要好好學習大自然的演化成果；而自然的演化設計若經過人類技術的改進，必將產生不少趣味，只是這種「虛擬改進」在創意之外，尚存在著太多的未知。雖然大自然不完美，而她有的是時間，所以我們可以看到這些多年演化之後的成果（只有冠軍的物種才能夠延續下來），但卻苦於無法系統化的跟大自然學習。

雖然我們天天看到，但常常會讓我們繞了一個大圈子，才發現解答就在身邊。

樹葉利用氣室中許多微小的氣孔使得水分得以蒸發，以如此精巧的方式擺脫水氣，如果人們穿的內衣有如此技術將可以在保暖之外也可以保持乾燥以及通風；松樹毬果的鱗片也藉由濕度的變化來打開（濕度低）以及關閉（濕度高），藉以釋放出種子（圖一），我們的衣服如果有相反的功能在濕度高時會有鱗片的打開濕度低時關閉鱗片，這是英國巴斯大學仿生學教授Julian Vincent在日本愛知博覽會上展出的聰明衣（smart cloth）（圖二）；滴水在有角蜥蜴外表皮上會完全被吸收，讓我們想到可以開發吸汗能力強的運動衫；看到蒲公英的種子落下，會讓人想到降落傘？植物的葉片以及種子的外型有助於隨風飛揚而達到傳播的目的，也讓人在飛行上有著遐思；蜂鳥以每秒15次到80次快速拍打翅膀而懸停在空中，靈活的操控及盤旋能力是直升機設計追求的目標，牠同時也是美國直升機協會的LOGO；蜜蜂以最少的材料建造出強度足夠的蜂窩、大嘴鳥質輕的大嘴以及小鳥的中空骨骼設計，



圖一



圖二

圖一：松樹毬果的鱗片因濕度的變化來打開（濕度低）以及關閉（濕度高），藉以釋放出種子

圖二：英國巴斯大學仿生學教授Julian Vincent在日本愛知博覽會上展出的聰明衣（smart cloth）。

（資料來源：Julian Vincent）

都成為飛機工業學習的對象；樹葉努力追尋葉縫中遺漏過來的陽光成長，而形成樹蔭，讓我們想到太陽能板加裝追日功能將會提高效率？陽光下Morpho蝶的光彩顏色是翅膀鱗粉的多層次週期性微結構所組成的，人造的織布有如此艷麗嗎？會編織的蜘蛛吐絲器在電子顯微鏡下看起來就像機械式抽拉銅線時的模具一樣，如何大量生產這種比蠶絲還強韌且高品質的人造絲？白蟻窩維持通風以及恆溫的功能也被辛巴威的建築物學習；啄木鳥緊抓著樹木在啄樹洞當樹醫生，不會腦震盪的能力，也可以引發電動鐵鎚的設計；攀岩需要摩擦係數大的鞋底，常在懸崖邊駐足的山羊足蹄就具有此功能；筷子（夾食物）是跟小鳥的喙（啄食物）學習的嗎？猩猩會找有維他命的植物食用。

蛙鳴蟲吟看似和諧其實是競爭，是雄蛙（蟲）為了證實自己的優秀以吸引優良品質的雌蛙（蟲）交配繁殖；電影海角七號中，大大的母親與鼓手水蛙在喜宴上有關水蛙暗戀機車行老闆娘的對話中提到了青蛙是一妻多夫制的；昆蟲也是如此，雌性昆蟲則具有可以選擇精子的能力，雄性昆蟲則不是省油的燈，也會藉由精子的傳遞去縮減雌性的生命。小小的沙漠甲蟲疣狀的背部，除了讓想吃牠的小鳥食慾大減之外，也因為凸起表面的高親水特性及凹下部分的疏水特性雙重特性組合，讓牠在沙漠中可以背部迎著晨曦蒐集水分並以怪異的姿勢將蒐集的水滴引導到口中解渴。當我們將除濕機開了一整天，耗了許多的電能才收集到少許的水分卻要耗掉大量的能源，是不是可以跟甲

蟲學習做出低耗能的除濕機？潛艇構想是受到鸚鵡螺的啟發，其螺旋狀殼的內腔由隔層分為30多個殼室，決定了鸚鵡螺的沉浮，這也是為什麼世界上第一艘蓄電池潛艇和第一艘核潛艇被命名為「鸚鵡螺號」。鸚鵡螺的頭足類親戚章魚、烏賊就具有鸚鵡螺所沒有的體表色素細胞藉由色素細胞的張縮來改變體色，藉此來隱蔽自己及攻擊（捕食）敵人。變色龍以及墨魚的變色系統是不是可以學習做出低耗能的紅綠燈，以及取代現有的汽車隔熱貼紙或是電致變色車窗？

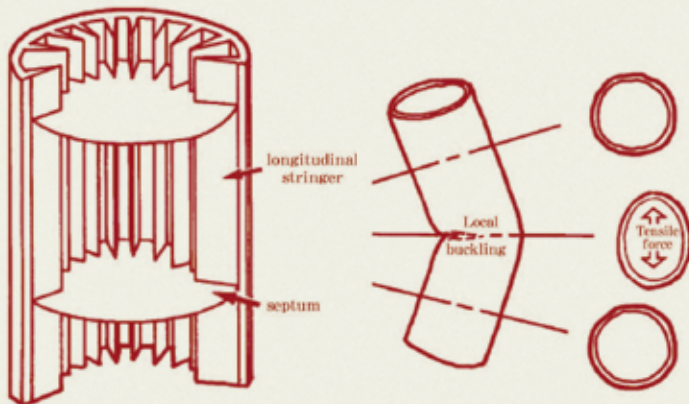
生物本能的自我保護

從樹上跳下的刺蝟常藉由蜷曲的身體以及鼓直的刺去吸收衝擊的能量，而不會受傷，比較有趣的是他身上的刺和豪豬不同，不會脫落，且受力時不會產生彎折；我們做個小實驗將吸管往桌上用力一刺，吸管將會在彎折處以橢圓的外型變形並受力彎折；刺蝟遇敵害時能將身體蜷曲成球狀，將刺朝外，保護自己；當您剖開刺蝟的刺將會發現裡面有橫向如竹節的肋以及縱向在圓周方向均勻分布的肋，這些肋的存在有助於在外力衝擊下，不會產生如吸管般的橢圓截面變形（圖三）。如果可以向刺蝟的刺學習，將可以製作出可以防震耐衝擊的結構。蝙蝠是唯一會飛的哺乳動物，藉由控制手指、手臂、腳部和腳距的動作，以各種不同方式靈活操控飛翼，使牠們成為卓越的飛行動物。可以在大量蝙蝠群聚的洞內找到自己的子女、在夜間利用回聲定位的能力捕獵蟲子來

吃、由低飛水面潤溼胸前舔水解渴、翅膀上有著許多的感覺細胞；如果蝙蝠能戴上太陽眼鏡，可能白天可以外出獵食，回聲定位能力也已被廣為應用；國王企鵝在南極的低溫環境（約零下50度）下如何維持其約40度的體溫？在短短20公分厚的毛皮下有90度的溫差，自然設計企鵝的羽毛及絨毛的結構讓空氣停滯其間，降低熱傳的進行（圖四），人造的保溫系統有如此卓越之絕熱能力嗎？此外，鴨子、企鵝的羽毛會保護牠們的身體不會潮溼的！

微細結構的祕密

許多我們從小就欲去之而後快的害蟲也具有許多卓越能力，拜電子顯微鏡之賜，我們可以清楚的看到昆蟲的放大圖像，也發現即使現在的奈米技術及微系統技術的發展，要來製作或是開發這樣精細的飛行載具也是非常困難的！蒼蠅身上就具有許多的細毛去協助感知、複眼使牠在黑暗中可以感知微弱的動靜、協助飛行控制的平衡棒、可以黏附在天花板或牆壁上的足墊以及可以來回拍翅數百萬次的而不斷裂的節肢彈性蛋白關節，這些都使蒼蠅變成製作設計微型飛行器所需要學習的對象；蚊子在叮咬時的切割皮膚及切木蜂（wood-wasp）利用其微型切割器靠彈性滑動接頭接合的兩片



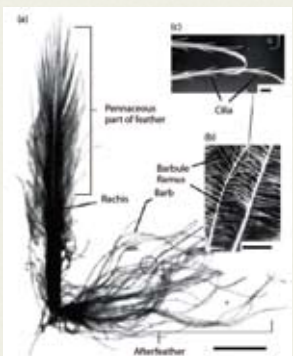
圖三：刺蟬的刺有不易折斷且吸震的效果，有橫向如竹節的肋以及縱向在圓周方向均勻分布的肋。

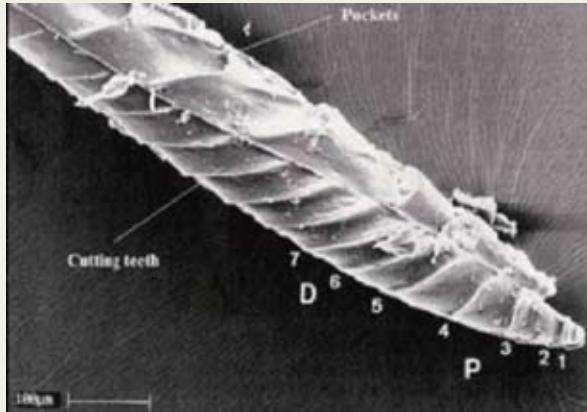
（資料來源：Julian F. V. Vincent, Applications - Influence of Biology on Engineering, Journal of Bionic Engineering3 (2006) 161-177）

圖四：國王企鵝在南極的低溫環境（約零下50度）下如何維持其約40度的體溫？在短短20公分厚的毛皮下有90度的溫差，自然設計企鵝的羽毛及絨毛的結構讓空氣停滯其間，降低熱傳的進行，人造的保溫系統有如此卓越之絕熱能力嗎？

（右圖資料來源：Journal of Theoretical Biology, Volume 199, Issue 3, 7 August 1999, Pages 291-295）

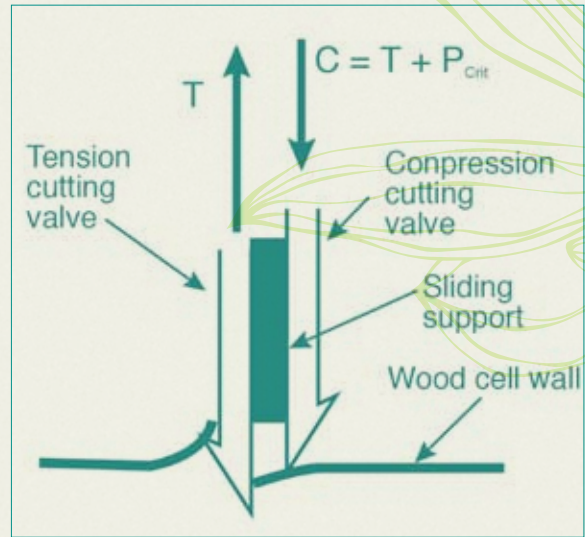
（左圖資料來源：臺北市立動物園）





圖五：切木蜂（wood-wasp）利用其微型切割器靠彈性滑動接頭接合的兩片鋸齒狀切割刀片去切割木頭。

（資料來源：October 2006 Inventique）



鋸齒狀切割刀片去切割木頭的方法，都有機會讓我們去開發微型注射器（圖五）。研究工具的進步使得揭露生物奧祕的技術更上層樓，也使這古老的學科有更清晰的應用前景；在電子顯微鏡下，看到蜘蛛的吐絲器如抽拉金屬線的模具、壁虎足墊多層次分叉的細微剛毛以及蝴蝶翅膀上多層次的週期性微細結構使其展露出鮮麗顏色，昆蟲的感覺細毛在不同環境中的反應，可以幫助我們在耳蝸內聽覺細骨的重建。在奈米技術或微系統技術中，常常僅能開發製作出微小面積上的具有特定功能的微細結構，至於大面積上布滿了微細尺度的結構則是無法達成，至少在成本及時間考量上是這樣的。如何製作巨大面積的微型結構或是多層次尺度下的週期性結構是現今技術的一大挑戰！生物本身就具有這樣的特徵，在足夠大的面積上，具有數不清的微細結構，並且展現出多層次微細結構的整體特徵，在電子顯微鏡下令人驚嘆不已！蓮花（葉）效應、壁虎剛毛及蝴蝶光子晶體效應都是代表性的生物結構。

不染淤泥的蓮花

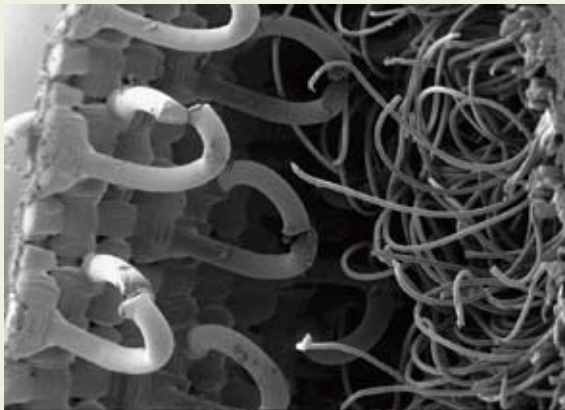
「蓮花出淤泥而不染，濯清漣而不妖」述說著蓮葉的聖潔，顯微鏡下看到蓮葉表面有許多微米級的凸起以及蠟質的外皮組織，再放大倍率看下去可以看到更多的奈米級微細結構出現在微米級凸起上面，這樣的多層次結構以及蠟質結晶組成的疏水特性，讓蓮葉表面有著極低的表面能，任何東西都不易沾黏在上面，就連水珠也是圓滾滾的「站」在上面；表面的疏水特性也讓水分不容易停留，髒東西容易被雨水沖走，細菌更不容易孳生！除了已經商品化的奈米塗料之外，抗沾黏技術的開發有利於燒傷病人的治療、抗菌產品的開發及奈米壓印脫模技術的應用更有其商機。此外，在生醫晶片應用上也可以在微流道設計上達到減低管內流動阻力的功能，在飛行器上表層的微小凸起物也可以減低飛行器的飛行阻力，並大大的節省能源；鯊魚、海豚表皮的微結構也具有異曲同工之妙。你可以想一下，如果在打水漂兒的石

頭上面加上許多微細結構，會展現出何種效果呢？這絕對是個很好的題目！

壁虎走過天花板不留痕跡

壁虎走過天花板不留下痕跡，人造的技術及生物都需要有黏附的功能，貼布及膠帶等都會用到膠質做介質去接合兩個表面；樹蛙的趾端有吸盤，吸盤腹面的肉墊會分泌黏液，協助攀附在枝條上；蝸牛及蛞蝓藉由腹足運動前進，分泌濃稠的黏液，除了可以提供攀爬所需的附著力外，也可以潤滑爬行時所遇到的粗糙表面及減緩體內水分的散失；蟑螂利用腳底兩塊柔軟小墊上溼潤的油性薄膜透過表面張力，藉由拉（黏附）推（脫離）動作的組合，讓牠可以在垂直或顛倒的表面隨意行走。蝗蟲足部有些部位有刺及倒鉤、有些部位又很光滑，牠利用不同部位在不同地貌行走，如粗糙表面用勾住，光滑表面則用足部光滑部位去接觸增加摩擦力；Velcro魔鬼氈是一位瑞士電機

工程師George de Mestral在每次溜狗完總要費勁的在狗毛上分開黏在上面的植物種子，在光學顯微鏡協助下，仔細觀察開發之後發明的扣件產品，也是仿生科技中的代表性產品。壁虎的神奇能力則不包括上面提到的吸盤、分泌黏液、表面張力及倒鉤，甚至跟接觸面的親疏水特性也無關聯；在電子顯微鏡下所觀看到的是多層次的分叉，從目視的皮瓣到最小的剛毛尺度相差達百萬倍，也因為這大量的奈米級柔軟剛毛（約600萬到1,000萬隻剛毛）跟表面間利用那微不足道的凡得瓦爾力，達到讓壁虎可以輕易到處趴趴走的能力，如果整隻壁虎的剛毛都完好的跟天花板接觸，理論上壁虎是可以支撐住約130公斤重，但是壁虎的身體畢竟受不了這樣的拉扯會先斷裂，而且壁虎的如此「過度設計」似乎有違生物「夠好就行」的原則，主要原因是壁虎平常不會全部剛毛都用上，其次是壁虎也會有機會從樹木跳躍降落在下方樹葉上，這會需要較大的黏附力（圖六）。未來



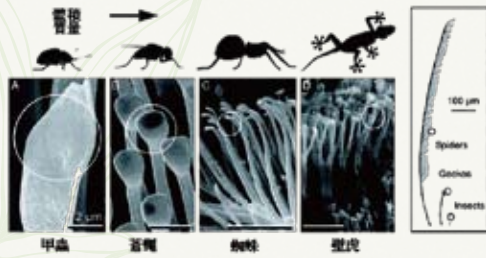
圖六：Velcro魔鬼氈是仿生的代表性產品

（資料來源：Velcro 1941 invented by Swiss engineer, George de Mestral, <http://science.exeter.edu/jekstrom/vt/velcro/velcro.html>）

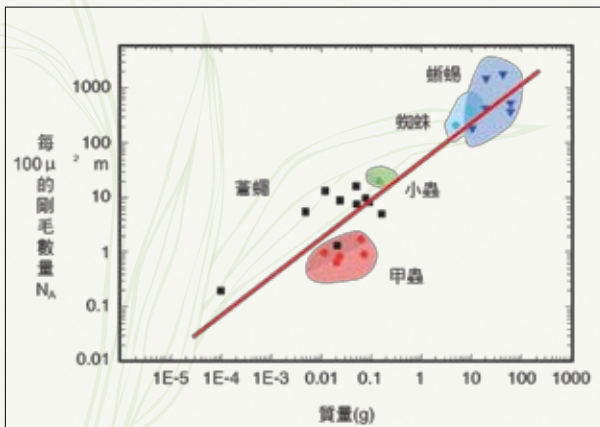


有機會製作出的壁虎剛毛貼布，一定會跟魔鬼氈一樣的受歡迎，除了有蜘蛛人的走壁功夫之外，在浴室止滑的貢獻上也是很有機會的。黏附特性的研究也讓人們對於生物的特異功能有更多的認識，小從甲蟲、蒼蠅、蜘蛛到壁虎都有黏附的能力，但是從他們的足部分叉細微度的對數與體重的對數成正比例關係（圖七），可以驗證出演化過程賦予他們的許多能力，壁虎由於體重最重，足部也演化出最為精細的分叉；因為有足夠的了解，所以在設計上就是夠用，但是又不浪費，從不過度設計是生物的精準之處，不似人們在設計上因為有太多的未知只好以「安全係數」來概括的過度設計。

圖七



（資料來源：科學發展，2008年3月，423期，獨步江湖的壁虎功）



（資料來源：科學發展，2008年3月，423期，獨步江湖的壁虎功）

Morpho蝶翅膀與光子晶體

Morpho蝶翅膀與光子晶體：蓮葉以及壁虎的多層次結構在Morpho蝶翅膀鱗粉上也有發現，電子顯微鏡下的鱗粉在不同尺度下各自有著特殊的週期性排列，產生的光子能帶結構可以對特定頻率的光作反射，Morpho蝶翅膀鱗粉的色澤不是因為顏料的關係而是因為結構色的緣故；光碟片上因為紀錄資料而有的微細結構讓大家可以清楚看到的色澤跟Morpho蝶翅膀的色澤是相似的；在孔雀的羽毛、澳洲的蛋白石、昆蟲的幾丁質外骨骼上也可以發現類似的結構色；藉由光子晶體理論，可以天馬行空的設計不同尺度的週期性微細結構，去開發人造的結構，積體光學迴路或許可以取代積體電路了。

在蓮葉、壁虎剛毛以及蝴蝶鱗粉上都是以大量的多層次微細結構展現其特殊的功能。除了多層次的特色之外，以量取勝的做法在生物界是常常可以發現的，魚卵以大量的方式產出，存活率是一重要考量，魚卵在受精前的黏稠狀態到受精後的獨特機械性質變化更是迷人！

最後，想像一下如何當一個好的情報員？你可能需要以下的工具：蟑螂背著微型照相機、昆蟲的複眼、鳥的翅膀、蜘蛛絲、壁虎腳、蟋蟀感覺毛及蝙蝠的回聲定位系統。再想像一下，如果有座玻璃帷幕建築在節能減碳的需求之下應該如何規劃設計？是不是要有如白蟻窩的通風及溫控系統？在玻璃的外牆上有蓮花效應的自潔效果、玻璃上也有如葉綠素光合作用的能力、玻璃內部也要有變色龍的變色系

統可以低耗能的隨意啟動窗簾。

從功能性而言，具黏附功能的有Velcro魔鬼氈、壁虎剛毛、樹蛙吸盤、蛞蝓腹足及其分泌物以及甲蟲、蜘蛛及蒼蠅的足墊等；蓮葉表面的微細結構及組成則在減阻、疏水性方面有其貢獻；人造的TiO₂在親水性上有其功能，親疏水性組合則非屬甲蟲不可。頭足性動物烏賊的低耗能變色功能，松樹毬果對濕度的感知，沙漠甲蟲對低溼度下的水氣吸收能力是低耗能除溼機的最佳學習對象。了解生物卓越功能的運作原理、思考可能的應用、開發有用的產品、技術甚至策略才是仿生學在歌頌自然之外的實質貢獻。

自然界中的「早知道」

有著這麼多「早知道」，將會令人精神一振的想到該是跟自然學習的時候了！「華陀五禽戲」、「雲南孔雀舞」與「天鵝湖」都屬表象式的學習，建築結構上單純的

外型模仿實不足以視為仿生，如：雪梨歌劇院屋頂的原始靈感來自棕櫚樹如扇子般的葉脈、清華大學人文社會學院是以龍的造型建構等；具有功能性的建築較適合稱為仿生建築，如：艾菲爾鐵塔仿人股骨的組織只強化需要兼顧的地方、辛巴威的Eastgate Centre購物中心及辦公大樓在通風及冷卻上完全功能性的學習自白蟻窩、一位園藝家在眾多競爭者中競圖獲勝建構的倫敦水晶宮是學習自王蓮內部的結構。自然的設計跟人造技術是存在很大的差異的，以都能承受負載的樹木跟鋼鐵來做比較：樹木

（自然的設計）是溼的是有撓性的，鋼鐵（人造技術）是乾的是堅硬的；人造的材料多是高溫製作並具有均質性（材料的特性在任何位置都相同）及等向性（材料的特性在任何方向都相同），樹木（自然的設計）則是常溫下成長，有其橫向層狀構造及縱向纖維組織（異向性）以及依其成長的過程做記錄（風吹雨打，受外力作用）的非均質特性；人造的技術都是有稜有角的，而且直角居多，樹枝的分叉就都是有某些程度的曲率，以降低應力集中對它的傷害；人造技術大多是被生產出來的產品，而自然設計則多是本身就具有生產製造的能力，所以煉鋼跟樹木成長就是鮮明的對比；人造的技術大多有單一功能的限制，而自然的設計則有多功能的目標，如鋼鐵就是做結構用，而樹木除了支撐本體所受的外力之外，還要負擔水分、養分的傳輸等成長功能；人造的設計出了問題（如鋼鐵鏽蝕），就需要修理及替換，自然設計則具有自我治療復原的功能（例如天然橡膠就是割破橡膠樹皮取膠）。

其實，仿生學並不是指人類技術全然抄襲大自然的設計，因為生物體內的環境不見得適合人造技術的應用；不過，若能對生物體的功能與作用機制進行深入的基礎研究，必定有助於找出人類某種技術問題的解決之道，因此生物學家在這個過程中不可或缺。生物依據天擇過程而發展至今，全身上下許多部位都發展出最佳的狀態；這裡所謂的「最佳」，其實也可以說是「夠好」而已，也就是說，大自然一直在解決各種不同的問題，讓生物不需依賴很多

資源，即可達到夠大的競爭力而存活下來，因此生物運用各種資源都能非常知足不浪費（或是說生物不懂得貪心？）且不過度設計，其中諸多奧祕非常值得人類技術好好學習。

生物無非是為了生存才能演化出那許多我們嘆為觀止的能力，生物的目標是很單純的（存活以及繁殖延續生命），而且勇往直前，不似人們有心的規劃許多的事件，且迂迴前進。這些功能在生物學家而言，生物學家藉由詳細的描繪生命的外觀形式，以及其生存世界的物質條件來了解其生存的生理機制，從演化的角度來訴說著一連串動人的故事；工程師則利用馬虎的科學（Engineering=Science of 馬虎）來思考及建構應用面的價值，馬虎指的是工程製作設計過程所需要的裕度或是容許誤差。仿生學的研究，除了要學習生物界延續至今的冠軍，惟有在生物學家、科學家及工程學者的跨領域結合，才能好好利用這存在許久的「早知道」，激發出更多的創新產品及思維，將有助於人類解決現在面對的許多問題，造福人類生活並且與自然和諧共存。

註：本篇文章轉載自中研院知識饗宴五。

仿生部落格 <http://science.nchc.org.tw/blog>

如要定期在FB收到新的仿生部落格，可加入週日

粉絲團 <https://www.facebook.com/MeetMaster>

2014國際仿生科技論壇在成大

仿生學師法自然，學習生命智慧，為永續世界而努力。2014年國際仿生科技論壇的第一場校園新思維講座6月29日在國立成功大學格致廳盛大舉行，首度來台的國際知名仿生權威珍妮·班亞斯（Ms. Janine Benyus）以仿生科技建構都市永續未來為題進行專題演講。

珍妮·班亞斯與她所創立的仿生三·八協會有一個新的夢想，如果一個都市能如鄰近的森林般優雅的運作，而這樣的運作能自行減少碳排放、儲存水資源、冷卻不斷上升的高溫、潔淨空氣、滋養土壤、促進生物多樣性、即便處於紛擾中仍能安定，整個城市與自然大地運行無異，那將是何種光景？珍妮·班亞斯與她的團隊相信這樣的夢想是可能的，只要我們把足夠的熱情放進完善的都市規劃中就有可能實現。

研討會探求如何從大自然擷取靈感。珍妮·班亞斯最喜愛扮演的角色是「設計桌旁的生物學家」，帶領創新研發人員認識38億年來自然界中各種鬼斧神工、千錘百鍊的解題良方。



仿生部落格的寫手與Janine的合照



光華女中校長帶領同學前來聽講