

仿生學：大自然的科學啟發高科技機能性成衣的設計

紡拓會 市場開發處

2015.09

| 目錄： | 頁次 |
|-------------------------|----|
| 摘要..... | 1 |
| 簡介..... | 1 |
| 仿生學的發展..... | 3 |
| 師法大自然解決問題..... | 4 |
| 加入機能性成衣的功能特性是從自然複製..... | 4 |
| 仿生學與環保永續..... | 20 |
| 展望..... | 21 |

摘要

仿生學常被稱為生物模擬學，其定義為研究大自然的設計、模式與系統，以從中模仿、調整或獲得啟發，為日常問題創造可行的解決之道。動植物、昆蟲及其他生物有機體已進化超過數十億年才能生存及適應動態的環境，許多自然界的調適作用經證實比人工解決方式更有效。仿生學已被應用在機能性布料的製造上，以產生多種不同的機能特性。甲殼素就被用於製造具有防臭特性的休閒運動服裝布料，可抗菌的薄膜則是以鯊魚皮做為模擬原型，應用在醫療設備與醫院家具上。科學家並檢視海藻、鰻魚、螢火蟲、真菌類、水母、千足蟲、蘑菇與蠕蟲的發光特性，用於加強休閒運動服裝與防護性服裝的可視度。

在研發以比傳統更為環保的方式來產生功能特性的材質、方法與技術的過程中，特別會用到仿生學。例如，科學家能以不使用染料的方式成功產生鮮豔色彩，就是受到大閃蝶翅膀的啟發；也有其他的研究人員研發出伸展時會變色的纖維。此外，超疏水性加工的靈感是來自荷葉及金蓮花葉，可達到撥水性、防汙性與自我清潔的功能，並有助於節約能源，被廣泛應用在包括狩獵服裝、軍服、雨衣及滑雪裝等機能性成衣品項；這類加工技術的例子有 Schoeller Technologies 公司的 NanaSphere 與 BigSky Technologies 公司的 GreenShield。其他的創新有以水鳥羽毛為模式，Thermolite 布料則以北極熊毛皮為模式；Inotek 纖維及 ecorepel 以松果反應為模式，Geckskin 則是一種「吸附然後放開」的布料，模擬壁虎腳趾墊的結構，可以從平滑的表面移開後不留殘跡；自我修復的撥水性布料是為漁人與水手的服裝而研發的；其他受到自然界啟發的功能特性包括軍服用的變色龍式偽裝作用，泳裝的降阻作用，高強力，濕度管理及保暖作用。

展望未來，考量大自然可以提供的益處與珍貴的教誨，機能性成衣產業必定會持續研發新的生物模擬解決方案，尤其因為有愈來愈多的公司已將追求永續做為企業的一項關鍵目標。

簡介

仿生學可定義為研究大自然的設計、模式與系統，以從中模仿、調整或獲得啟發，為日常問題創造可行的解決之道。

另外也可定義為將大自然發展出的系統轉化成人工科技。這些系統的特色為：

- 適應性強
- 靈活的
- 節能的
- 環保的
- 容錯的
- 多功能的
- 智慧的

科學家與工程師觀察動植物如何進化以執行某些功能，然後運用這些觀察發展出具有某些特色的產品。

仿生學背後的主要哲學是，研究動植物、昆蟲及其他生物有機體，可以為科學家與工程師遇到的類似難題提供解決之道。

這些生物型態已經進化超過數十億年才能生存及適應動態的環境。依照英國遺傳學家 Theo Sanderson 的說法：「進化在設計萬物做它想要他們做的事方面表現出色」。

估計有一至三千萬的生物種類經過自然調適以找到解決問題的方法，這些自然的調適往往比人工解決方式更有效。正因如此，仿生學的提倡者認為現有物種是很好的靈感來源。

特別要強調的是，仿生學是向自然界取經產生概念的過程，而不是單純的複製或模仿。這個過程具高度創造性，需要知識與想像力的結合，以找出技術解決的方式，這個方式要較大自然現存高度複雜的解決方式為佳。理想上這些技術解決方式應該是環境永續且不昂貴的。

長久以來已有無數的發現與新設計是從自然中汲取概念，建立在大自然實用的原則、機制與結構上。一些最機巧與有趣的設計例子包括：

- 巴黎的艾菲爾鐵塔，其設計受到人類大腿骨形狀的啟示；
- 日本子彈列車，前端是以翠鳥鳥嘴為模型，可以開得更快更安靜；
- 辛巴威首都哈拉雷的東門購物中心 (Eastgate Centre)，其設計是建立在與白蟻丘調節溫度相同的原則上。

不過，受到生物現象啟發的最知名設計之一，是一項紡織產品黏扣帶（即魔鬼氈），又

稱「無鍊拉鍊」。黏扣帶用途廣泛，尤其是在運動與休閒服飾上。

由於大自然提供的解決方法具有巨大的優點與珍貴的學習價值，仿生學的領域持續快速擴張。此外，因為偏好自然而非人造或合成產品的消費者愈來愈多，受到自然啟發的產品在銷售方面也快速成長。

仿生學的發展

仿生學絕不是新觀念。美國工程師兼生物物理學家 Otto Schmitt 於 1950 年代創造出生物模擬學這個名詞，用以形容他設計的一種作用類似大腦神經網路的電子回饋電路，自此仿生學就被視為是一門科學學科。

由於生物科技與奈米科技的進步，仿生學自 1980 年代起有快速的進展，因而發展出功能性大為改善的材質與裝置。紡織成衣工業是這個發展的最大受益者之一，從仿生布料及材質相關文獻的大量出版得以證之。

機能性成衣領域的生物模擬學從 1990 年代初期開始快速發展，反映出一個日益普及的體認，亦即這個產業的公司尋找多時的科技突破可能已存在於大自然。這也反映出，現行紡織業採用的許多高污染、浪費與缺乏效率的製程，急需找到替代方法；更進一步而言，反映出這個產業現行製造的被視為有害人體的產品，急需找到替代方法。

將仿生學提升成為高度有價值的科學，大部分得歸功於美國生物學家、保育專家及作家 Janine Benyus。她於 1997 年出版的一書《仿生學：大自然啟發的創新》，說明工程師與設計師如何運用這門科學產生益處。2006 年她成為仿生學研究中心（Biomimicry Institute）的共同創辦人。這個國際組織的任務是「和設計與形成我們的世界的人們分享大自然的設計教誨。」這個組織的目的是，協助學生與獨立專業人士以自然為師來解決永續議題，藉以激發一些領域的創新。

今日有愈來愈多的紡織成衣公司擁抱仿生學，確信它可以讓產業達到更高境界的創新。

表 1：仿生學的評價

| 陳述 | 來源 |
|--|------------------------------|
| 我們了解到，我們所有的發明早已以一種更優雅的形式與耗費更少地球資源的方式，存在於大自然中 | 「仿生學研究中心」共同創辦人 Janine Benyus |
| 你可以把大自然看做是一個產品目錄，所有產品都經過 38 億年的研究發展。經過這種程度的投資，採用它是很合理的 | 英國建築師 Michael Pawlyn |
| 我認為 21 世紀最大的創新將位於生物與科技的交集處。新紀元正在開展 | 已故蘋果公司執行長 Steve Jobs |

| | |
|--|--|
| 紡織服裝世界總是在尋找創新；應用生物過程製作更舒適實用的衣服已引起愈來愈多的興趣。通風透氣是我們可以從大自然成功調適之道習得許多的一個領域 | 英國 MMT Textiles 公司共同創辦人 Veronika Kapsali 博士 |
| 當你看到大自然可以達成以及可以做到的各種驚奇事物，例如發光、產生非常強大的物質，想想看如果人類能利用這種力量可以做到的事，這是一個置身其中工作令人興奮的領域 | 英國機構 Wellcome Trust Sanger Institute 遺傳學家 Theo Sanderson |

師法大自然解決問題

仿生學專家鼓勵公司以新的方式看待自然，以了解如何利用生物概念解決問題。他們特別提倡：

- 模擬大自然中發現的型態、過程及系統以利找到技術性的解決方法；
- 評估人類的設計與解決方法以評估它們是否像在自然中發現的一般有效率與永續；
- 接受人類是自然的一部分，應該遵循自然。

現代仿生學被描述為解決問題的系統化過程，需要跨多種學科的合作，從生物學、物理學，到材料科學、奈米科技。這個跨學科的過程涵蓋多種研究領域，包括：

- 建築與設計
- 生物力學（註：統合生物、機械及電子的科學。）與機器人學
- 溝通系統
- 結構與材料
- 流體動力學
- 表面與介面

仿生學的研究通常需要下列兩種方式之一：

- 由上而下的方式，欲發揮現有產品或過程最大效益的工程師徵召生物學家的協助，共同打造出合宜的產品或技術。
- 由下而上的方式，生物學家分析他們在自然中發現的新原則，然後與工程師合作依據這些原則打造產品或技術。

仿生學與機能性成衣

據說仿生學概念特別適用於機能性成衣，因為：

- 大多數機能性成衣是由纖維製成，而纖維是構成大自然基本結構的材料；
- 製成大部分機能性成衣的布料有相對大的表面積，有助於發揮更大的功能。

加入機能性成衣的功能特性是從自然複製

發展機能性成衣功能特性的靈感曾經汲取自範圍廣泛的動物、植物及其他生物有機體。表 2 提供一些這類靈感的例子。

表 2：啟發自生物有機體與自然材質的機能性成衣功能

| 有機體與自然材質 | 機能特性 |
|----------------|----------------------------|
| 水生動物 | 降阻作用、抗菌效用 |
| 細菌 | 生物動力 |
| 生物系統 | 自我修復 |
| 鳥類 | 結構性發色、偽裝、保暖 |
| 骨頭、魚鱗、獸角、貝殼、牙齒 | 高強力 |
| 蛙類、昆蟲、蜥蜴、蜘蛛 | 超疏水性、乾濕環境中的可逆轉附著力、結構性發色、偽裝 |
| 植物 | 超疏水性、自我清潔能力、降阻作用 |
| 北極熊毛皮 | 保暖 |
| 蜘蛛網 | 高強力 |

資料來源：Philosophical Transactions A, 2009

許多大自然啟發的機能特性被期待出現在機能性成衣上，有些甚至被認為是基本必備功能。這些機能包括：

- 抗菌效用
- 生物性發光
- 偽裝
- 降阻作用
- 乾附著力
- 高強力
- 濕度管理
- 自我修復
- 保暖
- 鮮豔發色
- 撥水性

抗菌效用

甲殼素

甲殼素是具抗菌效用的材質，廣泛使用於機能性成衣，來自於名為幾丁質（殼質）的自然物質。幾丁質是一種強韌的防水材質，是螃蟹、蝦等甲殼類動物用以形成保護外殼的產物。

甲殼素的結構類似纖維素與角蛋白質，已經證明對抗微生物高度有效，包括引起體味的微生物，因此被用於製造具有防臭特性的休閒運動服布料。

鯊魚皮

鯊魚皮的組織可以防止汙染生物體附著在表面，因此被用來當做醫療設備與醫院家具用抗菌薄膜的原型。

生物性發光

這個名詞指的是生物有機體產生光的作用。這類生物包括海藻、鰻魚、螢火蟲、真菌類及某些種類的水母、千足蟲、蘑菇與蠕蟲。

科學家已積極研究這些生物的發光特性達數年之久，希望將這些特性調適成不同的商業應用。生物性發光尤其可以用於加強下列服裝的可視度：

- 休閒服裝
- 企業服裝
- 流行服裝
- 形象服裝
- 工業防護服裝
- 運動及娛樂服裝

偽裝

許多動物及生物幾乎可以立即偽裝自己以躲避潛在捕食者。這種所謂生物偽裝的最佳範例，應該是變色龍回應光線、溫度及其他環境因素而改變皮膚顏色的方法，目的是讓自己與環境融為一體。

墨魚、章魚、魷魚等一些海底生物，能夠改變皮膚的顏色與組織，因此不易與周遭環境區別。這種在改變的環境中隱藏自己的能力，啟發了變色龍式偽裝（註：又稱動態式偽裝或適應性偽裝。）軍服的研發。當軍人穿戴這種偽裝迷彩，因應改變的景色及照明狀況，其外表也會改變，因此可以有效融入周遭環境。

降阻作用

泳裝方面，來自自然界最大的靈感來源是模仿鯊魚皮產生的降阻作用。這不令人意外，因為以相對體積而言，鯊魚是水中移動最快的生物。牠們藉助一種遍布皮膚名為皮質鱗突（註：皮膚上的鱗甲或凸脊。）的 V 形結構通行水中。這種鱗突長度僅 0.2-0.5 厘米，並呈連鎖狀，排列的方式可引導水流，當鯊魚在水中移動時並在其周遭產生小渦流，減少摩擦阻力。

圖 1



鯊魚皮

鯊魚皮形態學（註：形態學是生物學的一支，研究有機體的形態與結構及其特殊的構造特色。）最知名的商業應用之一是稱為 Fastskin 的流體力學泳衣，由泳裝公司 Speedo 於 2000 年推出，泳衣的設計靈感主要來自鯊魚皮。Fastskin 泳衣由兩種不同布料的裁片組合而成，分別為 Fastskin 與 Flexskin。

- Fastskin 布料用於水流快速的身體部位，譬如胸部與臀部，有助降低阻力。
- Flexskin 是比 Fastskin 更平滑的布料，用於水流較緩慢的部位，譬如大腿內側周圍。

Fastskin 布料表面有樹脂印的垂直條紋，這些條紋包含深度 0.1 厘米的 V 形凹槽，模仿鯊魚皮表面皮質鱗突的作用，吸取接近身體的水。相較於一般泳衣，凹槽的存在可減少多達 25% 的摩擦阻力，讓泳裝的摩擦係數近似玻璃。

乾附着力

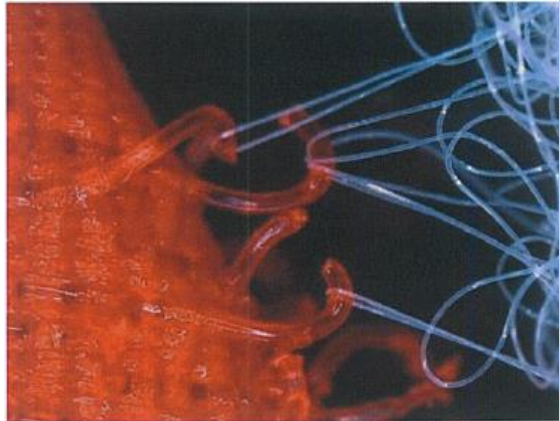
科學家運用在大自然發現的機制，特別是牛蒡與壁虎腳，調適成能讓紡織品具備乾附着力的特性。

牛蒡

牛蒡是薊科植物的一種，啟發了黏扣帶的產生。黏扣帶是一種固定用布料，廣泛用於機能性成衣與鞋類，其靈感來源是 1940 年代末瑞士電機工程師 George de Mestral 的觀察。他與狗在鄉間散步時注意到狗的毛皮及他自己的衣服黏到一些毛刺。他對附着性來源的好奇心讓他在顯微鏡下觀察這些毛刺，發現它們包含細微得像鈎子的矛刺，附着到他衣服布料上圈狀的紗線。

這項發現激發他發展出一種固定裝置，在法國織布專家協助下，經過多年實驗，設計出一種紡織固定用物，模仿毛刺的黏附機制。這種固定物是由兩塊尼龍布製成；一塊上面是堅硬的「鈎」，類似毛刺，另一塊上面是柔軟的「圈」，類似衣服布料上疏鬆織造的纖維。當兩塊布接在一起就形成堅固的聯結。

圖 2



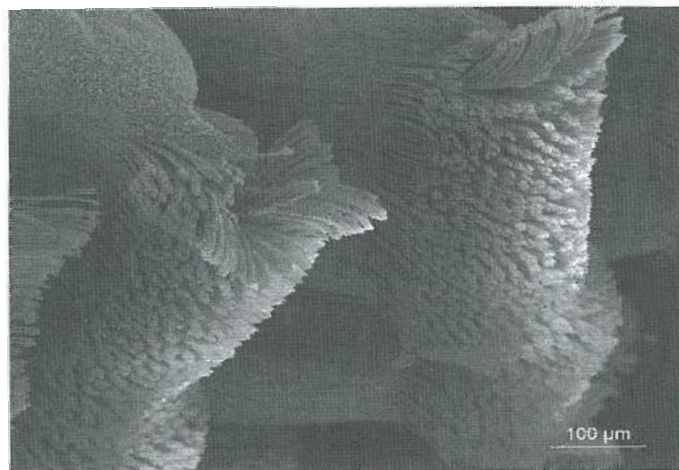
顯微鏡下的黏扣帶

De Mestral 的創新於 1955 年獲得專利，新世代的創新固定裝置自此開始發展，包括不銹鋼黏扣帶，是一種更堅固、無聲的軍用黏扣帶。

壁虎腳

壁虎是一種蜥蜴，具有一種獨特的結構，讓牠即使是在頭下腳上的情況下，都可以附著並移動在平滑的表面上，譬如牆面。這種能力的關鍵之一在於這種動物腳趾墊上的纖維狀結構。這種結構是由成排數以百萬計的匙突狀絨毛構成，在與平滑表面接觸時協助產生凡得瓦力(註：van der Waals forces，是指除了共價鍵結產生的吸引力之外，不帶電分子間的靜電吸引力。)

圖 3



顯微鏡下壁虎的腳趾墊

超過二十年來，有無數的努力企圖建構人造材質產生壁虎腳的乾附著力。最成功的材質之一是 Geckskin，是一種「吸附然後放開」的布料，於 2012 年 2 月推出。這種布料由美國麻薩諸塞州大學阿默斯特校區的科學家所研發，一家麻州小型創業公司 Felsuma 生產。

Geckskin 是將一種由柔軟彈性材質製成的墊料，織入由 Kevlar 或碳纖維製成的堅硬布料中，墊料得以在表面上延展以盡量擴大接觸。為了模仿壁虎腳的結構到更大程度，布料被織成一個合成的肌腱以打造出堅硬但可以自由轉動的結構。

Geckskin 號稱堅固到一塊約 125cm x 75cm 的布料，可以撐得住超過 300 公斤的重量。此外，當它附著在平滑的表面譬如玻璃時，可以很容易就移開，不會留下殘餘物。Felsuma 公司表示，Geckskin 在衣服、工業與醫療市場上的應用範圍廣泛，潛力無窮。

財經節目 CNN Monday 指名 Geckskin 為 2012 年頂尖科學突破之一；它也是 FabricLink Network 2014 年十大創新獎的十名獲勝者之一。

高強力

笠貝齒

英國普茲茅斯大學的研究顯示，在笠貝牙齒裡發現的一種礦物質與蛋白質的合成物，構成有始以來試驗過最強硬的生物材質。這種名為針鐵礦的礦物質，在笠貝牙齒成長時形成。研究學者發現，這種合成物比蜘蛛絲更強韌，並較絕大多數人造材質強韌。

笠貝牙齒遍布在笠貝的舌上或齒舌上，可以刮遍岩石，以附著在岩石表面的營養物為生。學者認為牙齒強力的祕密在於牙齒內緊緊塞滿的礦物纖維非常薄。研究團隊主持人 Asa Barber 博士表示，非常理想的纖維寬度用以防止洞孔或裂縫，洞孔或裂縫會弱化結構。

每一根纖維的張力約為 5 GPa（註：GPa 是一種壓力單位，1 GPa 相當於 10^9 帕斯卡。），大約是大多數蜘蛛絲張力的五倍；這個力道可以類比為，用一條義大利麵懸掛住 3,000 包每包重 500 公克的糖，義大利麵也不會斷。

圖 4



顯微鏡下的笠貝齒

蜘蛛絲

蜘蛛絲線是以蛋白質為基質的生物聚合體絲，具有獨特的特性組合。相同的重量下，蜘蛛絲的強力是鋼的五倍，彈性卻大得多，同時在高溫達 230°C 時仍很穩定。

蜘蛛網雖然很輕但很強韌，不溶於水，對風、雨及日光都有抵抗力。一些蜘蛛可以生成不同特性的蜘蛛絲，譬如高或低的彈性係數，視絲的用途而定。

曾有無數嘗試想要大規模養殖蜘蛛以便獲得蜘蛛絲來製造高強力材質，但是因為這類生物自相殘殺的天性，大部分的努力均無結果。相反地，製造合成蜘蛛絲方面卻有長足進步。這種類型的蜘蛛絲有許多不同的應用潛力，包括服裝、醫療紡織品、運動用品、手術用品、科技紡織品。不過，這類蜘蛛絲要量產到足以商業化是個重要挑戰。

美國猶他大學的研究團隊已研發出三種生產蜘蛛絲蛋白質的方法：

- 將蜘蛛絲基因轉移入細菌內，細菌就可製造蜘蛛絲蛋白質，再紡成纖維。
- 改造山羊基因讓牠們的奶水含有蜘蛛絲蛋白質。
- 在蠶身上注射蜘蛛絲基因，蠶就會製造蜘蛛絲蛋白質與自己原有的蛋白質再製成繭絲。

另一家位於密西根州的美國公司 Kraig Biocraft Laboratories 則研發出一種名為 Monster Silk（魔鬼絲）的合成絲質纖維。這種纖維是由基因轉換的蠶生產的，牠們可以製造出含有自己原有蛋白質和一些蜘蛛絲蛋白質的組合物。Monster Silk 僅含有一小部分蜘蛛絲蛋白質，不過據說已經相當強韌並比傳統的蠶絲更富彈性。

2014 年 6 月 Kraig Biocraft Laboratories 宣布 Warwick Mills 已經成功做出一副由 Monster Silk 製成的手套，Warwick Mills 是一家先進科技紡織品及防護材質的美國公司。這有助於消除一個疑慮，就是這種纖維的生產與現存紡織生產方式不相容的說法。

圖 5



Monster Silk 針織品

Kraig Biocraft Laboratories 與 Warwick Mills 將聯手持續探索這種纖維最有吸引力的應用方式。

同時有一家名為 AMSilk 的德國公司正在研發生產號稱是世界第一種完全由基因轉化工程蜘蛛絲蛋白質製成的合成絲質纖維。這種纖維名為 Biosteel，據說張力可比自然的蜘蛛絲；並稱像蠶絲一樣光亮，觸感平滑。

產製 Biosteel 的科技涉及大腸桿菌 (E. Coli) 的基因改造，讓它們可以模擬蜘蛛製造絲蛋白的系統。AMSilk 公司表示已準備就緒提升相關的原料生產及紡紗製程以製造 Biosteel。

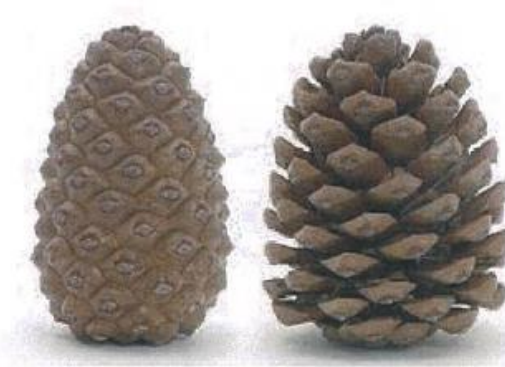
濕度管理

松果效應

松果會回應濕度的變化而開合；當空氣乾燥，松果會開啟，讓裡面的種子被風散布出去；當空氣潮濕，松果會緊密閉合。

這些動作是松果的鱗片引起的。這些鱗片被兩種不同層面包覆，一是在外層表面，另一則在內層表面。當大氣濕度增加時，外層擴展程度比內層大，鱗片會彎曲，造成松果緊閉；當大氣濕度降低時，內層擴展程度比外層大，使得松果開啟。

圖 6



松果對空氣濕度的反應

英國 MMT Textiles 公司的共同創辦人仿生學專家 Veronika Kapsali 運用松果效應發展出一種雙成分的濕度管理纖維 Inotek，可以用和松果相反的方式回應濕度。

如果布料加入 Inotek 纖維，當纖維接觸到濕氣，譬如汗水，纖維的寬度縮小，使得布料結構中的微氣囊開啟，布料的透氣性增加，空氣得以在布料中流通。當布料乾了，纖維脹回原有寬度，氣囊因而關閉。

這樣的運作與傳統纖維相反；傳統纖維吸收濕氣後寬度會增加，使得纖維或其製成的紗膨脹，因而降低布料的透氣性。

Inotek 纖維和其他纖維混紡也一樣產生作用。例如，Kapsali 博士觀察到，當羊毛紗接觸濕氣時，寬度增加幅度可多達 30%，相反地，Inotek / 羊毛混紡紗接觸到濕氣時，寬度縮小幅度則可達 10%。

使用 Inotek 纖維製成的布料已經過美國陸軍納提克研究、開發與工程中心（US Army Natick Soldier Research, Development and Engineering Center, NSRDEC）科學家的測試證明有效。該中心位於美國麻薩諸塞州，開發用於製造軍服的科技紡織品。

運動及戶外服裝是 Inotek 布料的明顯用途。以 Inotek 布料製成的成衣據稱較傳統纖維製成者的透氣性要好得多。Inotek 布料應用在非衣服產品上也極有潛力，包括寢具及創傷敷料。

2014 年 11 月 Kapsali 博士在 ITMA（國際紡織機械展）未來材質頒獎典禮上獲頒年度創新者獎。

專長於紡織產業科技研發的瑞士 Schoeller Technologies 公司也從松果上尋找靈感，研發出稱為 c_change 的產品。

c_change 是一種防風及防水的親水性薄膜，其彈性的聚合體結構對改變的溫度有獨立反應：

- 高溫時，當身體濕度上升，薄膜結構開啟讓過多的熱氣與濕氣散逸。
- 較冷時，結構收縮，有助身體保持熱氣，防止冷卻。

木質部導管

木質部導管是植物管控濕度機制的另一個例子。木質部是一種木頭組織，從植物根部沿著一條導管或路徑運送水分到葉子。植物的這種設計可以運送大量水分到無法穿透的表面。許多品種的植物還可透過分枝結構更利於水分的運送。

在一項 2009 年的研究，一群研究員打造出一種新的多層織物設計，布料每一層用的是不同種類的紗，以模仿這種分枝結構。研究結果顯示這種設計的織物較傳統布料有更好的濕度管理性。

自我修復

全球的科學家一直想從大自然得到點子，研發出具有損害時自我修復能力的布料或成衣。有一組科學家打造出一種可以自我修復的撥水布料，用於製作給漁人及水手穿著的成衣。

布料具有自我修復性的關鍵在於在布料表面嵌入微型膠囊，內含類似黏膠的物質。當布料破損時，譬如被撕裂，微型膠囊就會破裂，釋出黏膠物質並硬化，因此可以修補破損。

保暖

紡織業的研究人員一直對鳥類及北極熊在寒冷甚至冰凍的溫度下能保持溫暖覺得很神奇。這種能力是因為鳥類的羽毛及北極熊的毛皮具有特殊的保暖特性。

鳥羽

鳥類的羽絨例如鴨絨具有蓄納大量空氣的能力，數十年來已被用於衣服上提供隔絕的特性。但是，當它們潮濕時容易結塊，因此變重並失去保暖能力。相反地，像合纖刷毛布這樣的材質遇濕時仍保有隔絕特性，但無法提供與羽絨相同程度的隔絕性。然而，雖然合纖刷毛布的隔絕性較差，卻常用來取代羽絨，特別是用在極端氣候服裝上，因為在天氣潮濕時其效用不減。

有鑑於此，曾有許多嘗試想要結合羽絨與合纖刷毛布的優點，以開發用於戶外穿著的高科技機能性布料，但是成功者不多。

為了開發出較現行市場上隔絕效率更佳的合纖材質，科學家需要對某些羽毛的作用與幾何結構有更深入的了解。

北極熊毛皮

北極熊的毛皮就像羽絨一樣，是極佳的絕緣體，它使得動物在零下 50°C 的氣溫下得以存活。毛皮是一層厚的皮毛，由中空、半透明、結構類似吸管的毛組成。這些毛髮環繞動物身軀形成一個絕緣層，有助保存住熊皮膚散出的熱度。另外，一些研究發現毛髮反射了北極熊深色皮膚放射出的熱氣再將之導引回到皮膚。

圖 7



北極熊毛髮的橫斷面

大多數戶外用絕緣服裝由合纖刷毛布製成，其含有的中空長纖維就類似北極熊的毛髮。這些纖維夾在兩層布料中，形成緊密的氣囊集合體，將身體的熱氣蓄納，保持身體溫暖。一種最先以北極熊毛皮為模型的服裝材質稱為 Thermolite，這種布料是美國化學公司 DuPont 所研發，現在由美國聚合物製造商 Invista（註：Invista 是美國 Koch Industries 公司擁有的全資子公司，但經營獨立；Koch Industries 於 2004 年從 DuPont 手中買下 Invista。）生產。除了絕緣的作用，Thermolite 也結合了內建的吸濕、柔軟及彈性的特性。其乾燥速度較其他絕緣布料快了 20%，較棉花則快了 50%。

鮮豔發色

許多在大自然發現的材質具有特色是因為它們的成分排列方式的關係，而不是因為成分本身的性質。

例如蝴蝶的翅膀，其驚豔的色彩特色就被廣泛研究。一種曾被仿生學專家仔細檢視過的蝴蝶品種是大閃蝶，這是墨西哥與中南美洲國家的原生種，其翅膀曾被用來做為布料製造的範本，沒有使用染料或顏料。

大閃蝶的翅膀不含色彩顏料，卻有著鮮豔金屬藍色的外觀。這種視覺現象是翅膀薄膜上形成的鱗片，其重疊構成的蛋白層將入射光多重折射造成的。

圖 8



大閃蝶的翅膀表面

這種光線多重折射的結果，是翅膀的閃色會依觀看翅膀的角度不同而變化。另外，翅膀上的薄膜包含一種稱為黑色素的顏料，會襯托色彩更顯鮮豔。

Morphotex

Morphotex 是一種發色纖維，係日本帝人公司以奈米科技研發的纖維。這種纖維的靈感來自大閃蝶翅膀的微結構。Morphotex 是將聚酯與尼龍纖維交錯排列 61 層製成，每一層的厚度不同，介於 70-100 奈米（註：1 奈米相當於十億分之一公尺）之間。

結構性發色是下列因素組合的結果：

- 每一層的厚度以及這種厚度的精確度
- 層次的數目
- 聚酯與尼龍折射率的差異

透過這種組合，可以產生紅、綠、藍三原色。Morphotex 背後巧妙的科技吸引時尚世界諸多目光，尤其因為這樣的科技被認為是環保永續的。

2010 年倫敦的科學博物館曾展出一件由 Morphotex 纖維製成的洋裝。

圖 9



Morphotex 纖維製成的洋裝

帝人公司不再製造 Morphotex 纖維，不過這項技術在紡織以外的領域仍繼續提供產品開發的靈感。例如，此一技術有助於研究人員設計電子裝置的顯示器，譬如可以在任何照明情況下瀏覽的手機。

劣質熊莓

另一種可以「玩弄」光波的自然結構是南美原生植物「劣質熊莓」的種子表面。每一顆種子皮的表面有弧形圖案，和光波交錯會讓種子在陽光下產生鮮豔的藍色外表。

圖 10



劣質熊莓果實

美國哈佛大學與英國艾克斯特大學的研究人員研發出一種模仿這種機制的纖維。當纖維伸展時，顏色會改變，範圍橫跨整個可視的光譜。

因為纖維在張力下會變色，可以應用在運動服做為一種智慧型材質，在肌肉緊張的部位會變色。

撥水性

許多植物與昆蟲的表面具有撥水特性，啟發撥水材質研發靈感。這類的表面例如：

- 水鳥羽毛
- 昆蟲翅膀
- 植物葉子

1990年代德國植物學家與仿生學專家 Wilhelm Barthlott 是研發具有撥水及自我清潔特性表面的先驅。在進行研究時，Barthlott 對荷葉能保持表面乾燥與乾淨的保護機制發生興趣。自此以後，這種機制就被當做是設計機能性成衣撥水布料的藍圖。

亞洲植物荷花的葉子在生長的泥巴水中仍能保持潔淨，這是因為它獨特的表面讓接觸到的水分形成珠狀，稍有傾斜即滾落，並將污垢的分子及其他如細菌、孢子等污染物一起帶走，讓葉面保持乾燥與清潔。

圖 11



荷葉上形成珠狀的水分

荷葉表面看似平滑，實際上卻是粗糙的，因為它是由奈米大小蠟狀的突起物組成的。這種粗糙性降低水滴散布的能力，因為突起物之間的細小縫隙蓄納了空氣，防止水滴附著在葉面。

圖 12



顯微鏡下的荷葉表面

就技術面而言，荷葉有很高的接觸角。接觸角是用以衡量液體散布或弄濕表面的趨向。接觸角可定義為，在水滴表面與水滴停留的表面之間切畫下的假想線條形成的角度；接觸角愈高，液體就愈少散布在表面。

在防水的表面上，水滴是以完美的球形停留，此時的接觸角度是 180° ，當接觸角度是 0° 時，表面就會全濕。荷葉表面被認為是超疏水性（註：超疏水表面通常水的接觸角度至少是 150° 。）或高度撥水的，因為其接觸角度為 170° ；相較之下，人類肌膚的接觸角度大約是 90° 。

具有超疏水性的機能性成衣，有許多品項是以荷葉效應為原理，從雨衣、滑雪裝，到狩獵服裝、軍服等皆然。

基本上有兩種方法能讓紡織品表面重現荷葉效應。第一種是改變紡織品表面形態；第二種是透過化學改造來降低表面能量（註：表面能量即表面吸濕力）。

以荷葉效應為基礎的紡織科技與材質舉例

始自 1990 年代，荷葉自我清潔的特性就已被一些產業成功地複製，包括玻璃、紡織及木材，在紡織領域這方面的先驅之一是 Schoeller Technologies 公司。

Schoeller 發展出一種稱為 NanoSphere 的加工過程，據稱是「幾近完美地複製大自然」，也是市場上最具機能、最安全、最永續的撥水處理之一。NanoSphere 加工整理過程是以數以百萬計的奈米大小碳氟化合物分子附著在布料表面上，這些分子就像荷葉表面的立體結構一般，形成的表面構造可以有效將布料與水滴的接觸面減少到最小。當水分落到經 NanoSphere 處理的布料表面時，任何接觸到布面的污垢分子會懸附在水滴上，當水滴滾落布面時，就一起被掃落。

NanoSphere 可應用於人造纖維、自然纖維或混紡纖維製成的織物，不會影響織物的透氣性、舒適感、彈性、手感或外觀，並且會增強耐磨性。

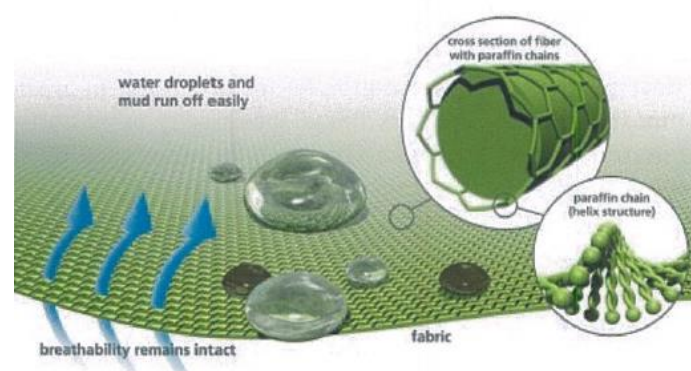
此外，NanoSphere 的撥水性在經常穿著與無數次洗滌後仍能保持，這是因為奈米分子黏合了特別研發的塗料基質，因此在使用或洗滌時不會從布料脫落。

Schoeller Technologies 表示，經過 NanoSphere 加工的成衣無需像普通成衣一般時需洗滌；同時也較採傳統加工方法的成衣洗滌時所需的溫度較低。

Schoeller Technologies 也研發出另一種撥水加工技術，名為 **ecorepel**。這種技術是以長鏈石蠟將個別纖維、長絲或紗包覆起來，形成非常薄的膜，如此可降低表面張力，讓水滴滾落所製成的織物表面。

加工所需的長鏈石蠟可生物分解，且不含任何碳氟化合物（註：碳氟化合物是有機氟化合物，僅含有碳及氟，以強力的碳-氟鍵連結在一起。許多包含碳、氟及其他原子的化合物如 PFCs、CFCs 及全氟化合物都被當做是碳氟化合物，但嚴格地說，這些分子是碳氟化合物的衍生物。許多碳氟化合物及其衍生物被認為是強力的溫室氣體，它們通常極度穩定，有些具有生物累積的特性，會儲存在人類及動物體內。尤有甚者，一些含氟聚合物製造過程中使用 PFOA，PFOA 已被美國環保署宣告為「可能對人體致癌」。含氟聚合物是以碳氟化合物為基礎的聚合物，具有強力的多重碳-氟鍵，其特點是對溶劑、酸及鹼有高度抵抗性。）；同時，經過 **ecorepel** 加工的織物是透氣的，具高度機能性，手感仍保持柔軟，且不會產生味道。

圖 13



ecorepel 布料加工示意圖

GreenShield 是美國公司 BigSky Technologies 研發出的防汙加工技術，該公司專長於紡織品化學加工處理。

GreenShield 使用不定形二氧化矽（註：不定形二氧化矽是一種惰性材料，應用在人體直接消耗上已有長足歷史。此類應用已獲美國食品藥物署（FDA）核准。）奈米分子，可以減少防汗用碳氟化合物的用量達八倍之多。相較於市場上傳統的防汗技術，GreenShield 可提供大多數布料類似或更好的防水及防油性。

GreenShield 應用的專利技術不產生廢棄物，節省能源並使用水性溶劑。此外，它是第一項獲得 SCS（「科學認證制度」，係獨立的美國驗證服務公司）「低碳氟化合物處理」驗證的紡織加工技術。

以金蓮花葉及大閃蝶翅膀為模式的超疏水性材質

美國麻省理工學院的科學家團隊研發出號稱是「史上最防水的材質」。研發靈感來自在金蓮花葉及大閃蝶翅膀上發現的一種凸脊模式，有助形成超疏水性的表面。

在 Kripa Varanasi 教授領軍下的科學家，在矽膠表面加上細小的凸脊形成這種材質，當水滴掉落到表面，凸脊將水滴打散成不規則的小碎片，讓它們更快被彈落。水滴愈快彈落表面，表面保持乾燥的時間愈久。

這群科學家在進行這個研究時，將重心從水滴的接觸角度轉移到接觸時間。他們發現金蓮花葉及大閃蝶翅膀在撥水作用上比荷葉更有效用，這是因為前兩者水滴彈落表面的速度更快。事實上據稱這兩者撥水的速度比荷葉快上 40%。

以水鳥羽毛微結構為模式的布料

水鳥撥水的能力歸因於牠們蓄納在羽毛內的空氣形成的氣墊。這些氣墊是在沿著每根羽毛分枝般的微結構形成的奈米大小凹槽裡發現的。

曾有一些研究嘗試在布料上複製這類微結構，以便改進布料撥水特性。

中國大陸的研究人員已經成功做到。他們在布料表面塗上一層甲殼素以增加粗糙性，並進一步運用矽膠加工改造布料表面，降低表面吸濕力。這些改造使得棉布及聚酯布的撥水性大幅改進。

仿生學與環保永續

生物系統先天就是永續的。正如美國生物學家、保育專家及作家 Janine Benyus 所主張的：「當我們檢視什麼才是真正的永續，唯有自然界才是長期可行的實在模式」。

以仿生學為基礎的製造系統，如同生物系統一樣，目標應該設定為使用最少量的資源來產生最大的成果。一般而言，用在生產產品的資源量愈少，產品愈容易回收，因而限制住產品對環境的衝擊。

在機能性成衣產業裡，有許多不同的聚合物纖維與其他材質被用來發展新產品或改進現有產品，這使得這些產品在使用壽命結束時很難回收。同時值得注意的是，雖然現代科技有可能設計與製造效法自然的產品，它們採用的方式未必是最環保的方式。

舉例來說，黏扣帶是紡織產品效法自然最經典的範例，傳統上是使用尼龍製造的；生產尼龍的關鍵成分來自石油，並被視為是潛在汙染物。此外，石油還是一項無法再生的資源。

還有，大多數機能性成衣公司並不以環保信譽著稱；不過有愈來愈多的公司已將追求永續做為企業關鍵目標。

在這方面居領導地位的公司包括 Schoeller Technologies、Patagonia、Vaude。這三家都遵循嚴格的環保標準，例如 bluesign、Oeko-Tex Standard 100 與 GOTS（全球有機紡織品標準）。

展望

仿生學自 1990 年代以後已有長足進步，並因此推出許多機能性成衣所用的各類布料及技術。

然而人類對生物學的知識仍是片段的，研究人員與科學家可能永遠也無法完整了解自然界所有的機制。譬如說，在檢視已經改造形成荷葉效應的布料表面時，很明顯地，努力複製這個機制的成果還談不上完美。

雖然如此，為機能性成衣產業尋找仿生學解決方案的專家持續挖掘出珍貴的新發現。這要大大感謝科技的進步，尤其是奈米科技，讓這些專家得以更深入探究生物機制。

毫無疑問，聰明又環保的新型布料及成衣將在這些發現的鋪路下逐步問世。