

淺談微小世界對工程領域的啟發

蔡睿哲／臺大電機系教授

早些年時候，人們開始講「微米」；過幾年後則開始講「奈米」，產品名稱只要冠上「奈米」彷彿就比較厲害。一套句俗話，「奈米」就是潮！然而，在「毫米」、「微米」、「奈米」這些尺度下的所發生的一切，與我們在「巨大世界」（尺度大約是「米」）中所看到的，到底有甚麼不同呢？不知道大家是否看過迪士尼（Disney）及皮克斯（Pixar）在 1998 年所發行的卡通動畫電影「蟲蟲危機（A Bug's Life）」？如果說這些蟲蟲們真的會說話，他們的世界真的會像電影裡面演的那樣嗎？或是，換個角度想想，若能用哆啦 A 夢的縮小燈把我們縮到跟螞蟻一樣小，我們所感受的一切還會跟原本一樣嗎？

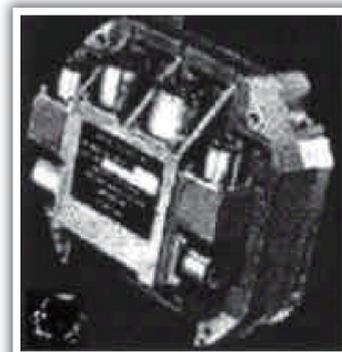
首先讓我們從日常生活中的觀察談起：

- 螞蟻不怕摔；螞蟻從餐桌掉到地上後會若無其事得繼續爬行。不要忘了餐桌的高度是螞蟻高度的 N 倍；反之，人若是從自己身高 N 倍的高度掉下來，早就粉身碎骨了。
- 螞蟻可以輕易搬運重量是自己體重十倍以上的重物；我記得小時候曾看過一群螞蟻在搬運一隻大蟑螂的屍體（畫面有點噁心）。人呢？目前的挺舉世界紀錄是 263 公斤，大約是該選手（Hossein Rezazadeh，當時體重約 163 kg）體重的 1.6 倍。
- 螞蟻超怕水的，沾到水就動彈不得。

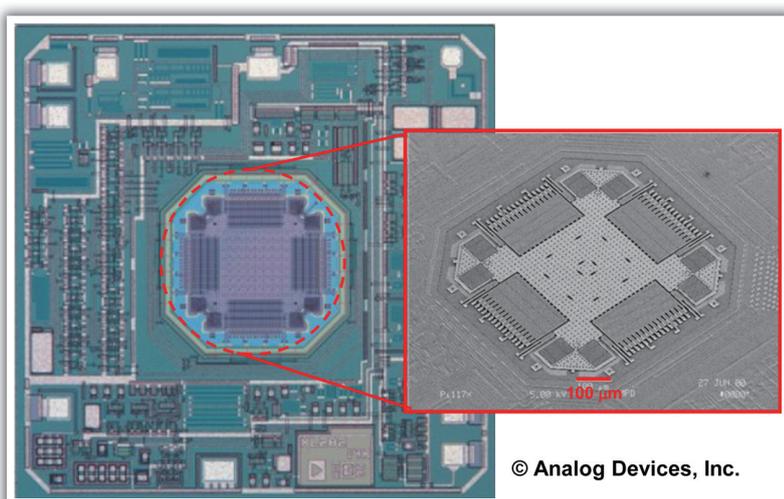
這些給我們甚麼啟發？把東西作小就會比較耐摔；這也符合我們「大的東西較容易摔壞」的生活經驗，如：液晶電腦螢幕 vs. 手機。另外，微小化的結構可以更有效率地支撐物體。但是，微小的元件或物體，則更容易因水分而沾黏以致於毀損。

在這樣的啟發之下，便發展出所謂的微機電領域（Micro-Electro-Mechanical Systems，俗稱 MEMS）甚至是 NEMS 領域（N 代表“nano”），而生活中最常見的 MEMS 元件大概就是微型加速度感測器了。現今的汽車幾乎都配有微型加速度感測器，用來偵測撞擊力以決定安全氣囊是否要張開。當今的智慧型手機及平板電腦也幾乎都配有微型加速度計，可用來偵測手機或平板的擺放角度並搭配自動旋轉螢幕的功能，同時也可作為體動感測器讓使用者可以玩 game。事實上，微型加速度計早在 1970 年代就已經被研發出來了，但真正竄紅起來則是幾年前 Wii 的崛起；Wii 的手把中便有微型加速度計，用來感測玩家的動作。

在微型加速度計開發出來之前，人們所使用的加速度感測裝置（或慣性感測裝置）是長得像圖一這個樣子的，既笨重（圖一裝置： $\sim 1.6\text{ kg}$ ， $\sim 15 \times 8 \times 5\text{ cm}^3$ ）又昂貴（圖一裝置：當時 $\sim \text{USD } 20,000$ ），而且以圖一這個裝置為例，它最大只能承受約 35 g 的加速度（微型加速度計可承受 $> 1000\text{ g}$ ）。



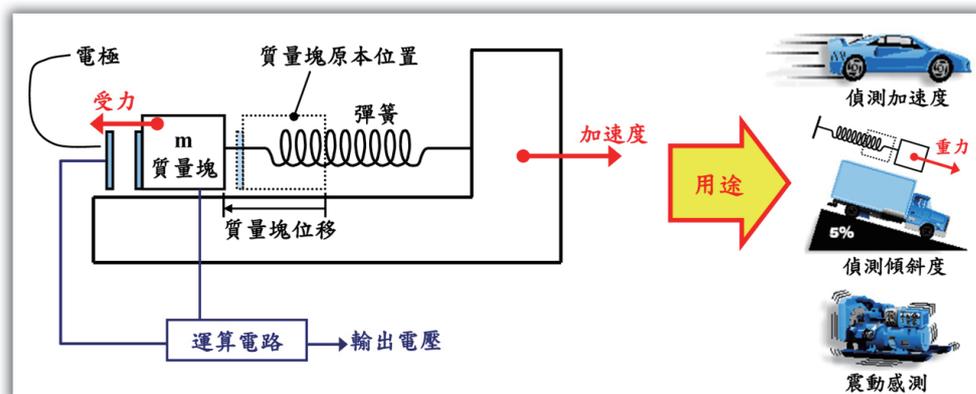
圖一 巨型慣性感測裝置（圖片來源：不可考）



圖二 Analog Devices 公司生產的微型加速度計（圖片來源：Analog Devices, Inc.）

而現今的微型加速度計，是使用半導體製程技術製作的，每個維度的尺寸可以作到 1 mm 以下（如圖二），且使用半導體製程技術可以大批製作，可大幅降低平均成本；目前一個單軸的微型加速度計成本可以壓低至一美元左右，也正因如此，它才能變成手機及平板這些消費性電子產品的一部分。

加速度計的基本物理模型，其實就是大家在課堂上所學到的「彈簧 + 質量」組。當有加速度或重力時，加速度感測器內的彈簧會伸長、質量塊會移動。質量塊的移動，會改變加速度感測器內的電極間距，進而改變運算電路的輸出電壓；故藉由讀取此電壓值，便可推算出加速度或重力的大小。（圖三）



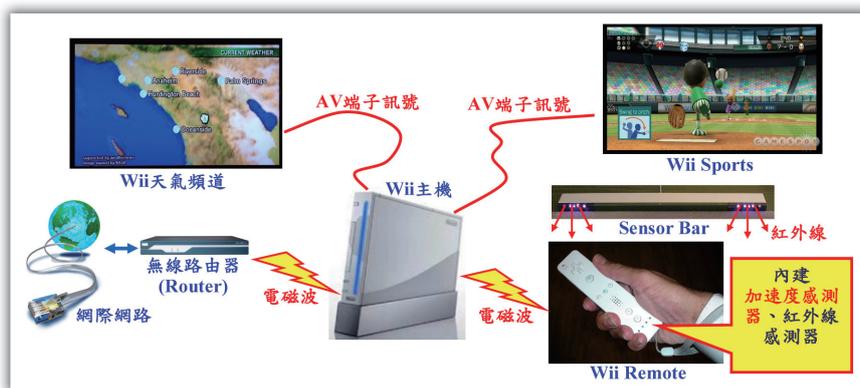
圖三 微型加速度計的物理模型及工作原理

所以，舉例來說，若是將一個加速度計以特定的方向安裝於手機內，當手機在直放與橫放時，重力對加速度計的影響就會不同（圖四），如此一來，加速度感測器會「告訴」手機它是直放還是橫放，手機就會自動調整螢幕的顯示方向了。當然，這樣的感測機制也是可以應用在手機電玩上！



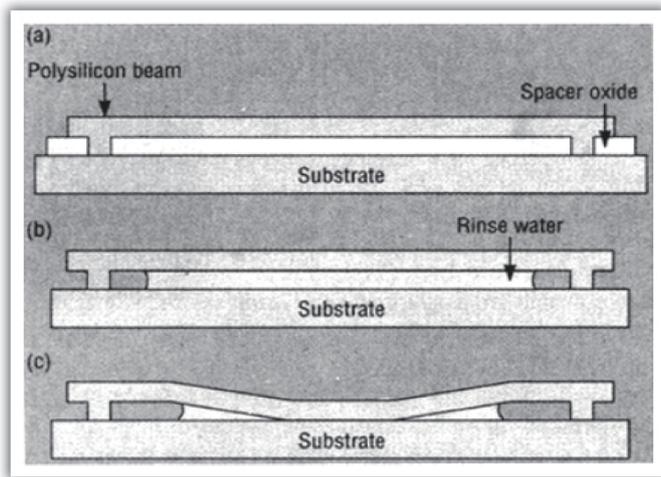
圖四 微型加速度計的應用範例—手機螢幕自動旋轉
(手機照片來源：Apple 公司網站)

題外話，前面既然談到了 Wii，就順便來談談 Wii 的整個架構。Wii 的控制手把（Wii Remote）是以藍芽（電磁波）與 Wii 主機溝通。手把裡當然有內建了加速度感測器，用來偵測玩家的動作；手把裡面同時還有紅外線感測器，搭配 Sensor Bar（通常放在電視螢幕前方或上方）所發出的紅外線光，手把便有指向定位功能，可像滑鼠一般控制螢幕上的游標。Wii 主機亦可透過無線網路連線至網際網路，進行軟體的更新或是查看 Wii 的天氣頻道！（圖五）

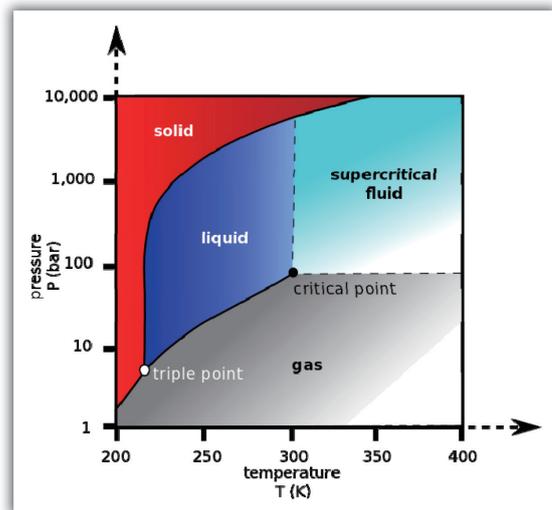


圖五 Wii 的架構（圖片來源：網路）

元件微小化的優點說過了，那麼缺點呢？我們前面提過，當東西微小化之後，更容易因水分而沾黏以致於毀損，就類似螞蟻怕水一樣，這造成了元件製作時的困難。為甚麼呢？因為這些微型元件多半是以半導體製程技術製作的，製程中的一些蝕刻或清洗等步驟常常需要使用溶液，當元件製作完成要乾燥的時候（不論是自然風乾或是加溫烤乾），就會面臨沾黏的問題。咦？乾了就乾了，不就沒事了？怎麼還會有沾黏的問題？這是在巨大世界中的看法。在微小世界裡，乾燥的過程中，附著在元件上面的液滴們會慢慢變小，但液滴是有表面張力的，隨著液滴變小的同時，元件也會被縮小中的液滴拉扯，導致最後當液滴消失時元件的各部位也已相互黏著或是與承載元件的基板黏著，一旦黏住就非常難分開了（圖六）。在大尺度的世界中，表面張力的效應相較之下則不明顯，物體就算因為水份而沾黏也很容易分開；但是在微小尺度之下就完全不一樣了—舉個有點相關的例子來看吧，大家在物理課學的毛細現象，就是表面張力造成的；但是，毛細現象通常要在管子很細的時候才容易觀察到，管子很粗的時候就相當不明顯了。所以，該如何處理元件的乾燥步驟呢？通常有兩種方式，一種是砸錢買貴重的機台，在製程中的最後幾個步驟，採用氣體而非液體作蝕刻；另一種方式，是採用超臨界乾燥法（Supercritical Drying）—這是利用物質的超臨界態的特性來作乾燥；所謂的超臨界態，就是物質在固態、液態、氣態之外，存在的一個特別態，必須超過某個壓力及溫度才能存在（圖七），細節就不在此多說明了。



圖六 液滴蒸發過程中同時也把微結構往下拉扯，最後使微結構黏在基板上。(圖片來源：M. Madou, Fundamentals of Microfabrication, CRC Press, 1997)



圖七 二氧化碳的三相圖；右上方為超臨界態。(圖片來源：Wikipedia 網站)

回頭看看微小世界的許多現象，很多是可以簡單用數學去解釋的，我們就先以上面提到的螞蟻負重能力為例吧。根據一些結構力學的計算發現，若不考慮材質的差異，物體（包括生命體）的負重能力是與線性尺寸的平方成正比。假設一個身高 1 公尺、體重 100 公斤的人能舉起 100 公斤的重物的話（以上算是還合理的數字），若是用縮小燈把他縮小到身高約 1 毫米（即原本的千分之一， $1/10^3$ ），他的負重能力就變成原本的百萬分之一（ $1/10^6$ ），從原本的 100 公斤變成 10^{-4} 公斤。但是別忘了，物體 / 生命體的重量是與體積成正比的，也就是與線性尺寸的三次方成正比，所以他的體重變成了原本的 $1/10^9$ ，也就是 10^{-7} 公斤。大家應該也發現了，原本他能舉起的重量是跟他本身的體重一樣，使用縮小燈之後變成了本身體重的 1000 倍！但這倍數顯然比前面提到的「螞蟻可以輕易搬運重量是自己體重十倍以上的重物」大上許多，為甚麼呢？除了上面提到的材質差異（人 vs. 螞蟻）之外，大家應該也可以輕易發現人與螞蟻的身材比例是完全不同的；簡單來說，就是螞蟻的腿在比例上比人來得纖細許多，這對他的負重能力會打折扣，所以一隻身長 1 毫米的螞蟻與一個被縮小燈縮到身高變 1 毫米的人相比，負重能力是比較差的。

另外，螞蟻為何無法是溫體動物？很簡單，生命體能儲存 / 產生的熱量是與體積（線性尺寸的三次方）成正比，而散熱的速率是與生命體的表面積（線性尺寸的平方）成正比。所以，若是用上面的那些尺寸來推估的話，螞蟻（或是被縮小燈縮小的人）體內能儲存 / 產生的熱量只有正常人的 $1/10^9$ ，但散熱的速率是正常人的 $1/10^6$ ；簡言之，螞蟻很難 hold 住自己體內的熱。換個角度來看，被縮小燈縮小的那個人，他恐怕會失溫而死。類似的計算也可用來說明為何小的水珠會蒸發得比較快。

總而言之，等比例地縮小或放大物體後，很多事情會變得跟我們所想像的不太一樣。再舉一個大自然界的例子來看——飛行體，巨大的鳥類如老鷹，只須要振翅幾下就可以滑行很遠的距離，但是昆蟲的翅膀卻需要不停地高速拍動才能讓自己飛行（這也就是討人厭的蚊子在我們耳邊時我們聽到的嗡嗡聲之原因，蚊子翅膀每秒可拍動將近六百下）。這當中的差異牽涉到複雜的氣體流體力學，在此我們就不詳加討論了；但是，這讓我們可以思考一個問題：我們可以把平常看到的飛機直接等比例縮小，作出那種很小很小的飛機嗎？的確有人這麼嘗試過，曾有人（Kubo 等人）用矽（Silicon，就是電晶體的材料）作出長約 1.56 mm 重量約 10.8 mg 的極小型飛機，但最後證實這樣的飛機是無法滑翔的！

經過以上的討論，大家可以想一想，許多童話或是漫畫中的情節，像是大人國與小人國，真的有可能發生嗎？多啦 A 夢的縮小燈（如果有的話）恐怕不是想像中的那麼神奇，弄不好的話說不定會出人命！

回頭談談文章第一段提到的那部電影「蟲蟲危機」，大家可以試著玩個「大家來找碴」，看看電影中有哪些橋段是不合理的一昆蟲會講話及站著走路除外 XD。舉例來說，電影中那個馬戲團的跳蚤團長（圖八）的跳躍高度—正常跳蚤可以跳得跟人一樣高，大約是他自己身高的上百倍，電影中的跳蚤團長顯然跳太低了（除非他沒盡全力跳）。



圖八「蟲蟲危機」中的跳蚤團長（電影截圖，© Disney/Pixar）

當然，電影在製作時所設定的昆蟲大小就與常見的真實昆蟲不大一樣了，不同蟲類之間的相對大小也與實際不合；即便如此，還是可以找到不少碴，像是圖九的這個橋段。

真實世界中的螞蟻種類很多，小的螞蟻身長可小至約 1 毫米，也有很大隻的螞蟻其身長可達 2 公分或更長，若我們能在真實生活中找到某種蟻類其大小可以符合圖九中的螞蟻大小，恐怕也不容易如圖九中這般輕鬆地撼動樹葉—大家可以回想一下生活中看到較大隻的昆蟲（如蜜蜂）停在樹葉上的景象；這可以用一些簡單的推導來說明。



圖九「蟲蟲危機」中螞蟻利用身體重量使樹葉彎曲（電影截圖，© Disney/Pixar）

截圖中的樹葉其實有點類似游泳池畔的跳水板，是帶有彈性的，作用就像是個彈簧一樣（雖然它不是螺旋形的）；而我們也知道，跳水板剛度（mechanical stiffness，正比於其彈簧常數）越大的話，跳水者就需要跳得更用力來讓跳板變形。當材質不變的情況下，如果跳水板是偏細長型的話，跳水板的剛度大約與它的長度三次方成反比，與厚度的三次方及寬度的一次方成正比；假設跳水者不使用跳躍而

純粹以自身的體重使跳板變形，那個變形量大約就正比於「體重除以剛度」。若把跳板與跳水者的長、寬、高都等比例縮小成原來的 $1/N$ 的話，那麼剛度將會變成原本的 $1/N$ ，但是跳水者的體重卻變成原本的 $1/N^3$ ，因此跳板變形量是原本的 $1/N^2$ ；所以縮小之後，跳水者要讓跳板產生與原本等比例的形變是變困難的。所以，再回來看看上面那些電影截圖，如果說類似這樣的連續動作在我們身處的巨大世界中是剛好作得到的話，那麼在縮小後的世界裡恐怕就是頗困難的了。ㄟ？這讓我們想到了甚麼？我們先前討論的加速度感測器不就是個「彈簧 + 質量塊」組嗎？跟這「跳板 + 跳水者」的組合豈不是有點雷同？也就是說，微小型的加速度計的彈簧形變量就比例上來會比傳統巨大的加速度感測裝置來得小，所以它偵測形變（或質量塊位移）的靈敏度必須較高，而這也是微型化後的挑戰（當然，這早已經被人們克服了）。

（文章的結尾總是需要個結論）細讀科學與科技的發展史就會發現，科學（Science）及科技（Technology）的發展幾乎是無法預測的。在此引用電影 MIB 裡面的一段話：Fifteen hundred years ago everybody knew the Earth was the center of the universe. Five hundred years ago, everybody knew the Earth was flat, and fifteen minutes ago, you knew that humans were alone on this planet. Imagine what you'll know tomorrow.（當然，第二句話後半段是配合電影情節的！）。1949 年 Popular Mechanics 這個雜誌還寫道：Where a calculator like the ENIAC today is equipped with 18,000 vacuum tubes and weighs 30 tons, computers in the future may have only 1,000 vacuum tubes and perhaps weigh only $1\frac{1}{2}$ tons.（他們預測未來的電腦／計算機重量「僅」為 1.5 tons）^[註一]；但是他們沒料之後積體電路的發展讓電腦／計算機變得非常不一樣。人類有不少的科技突破是從大自然界獲得啟發的，像是萊特兄弟在研發飛機的時候就有參考鳥類（屬巨大世界）的飛行，而現在也有很多研究者仿造蒼蠅（屬微小世界）複眼來達成廣視角的成像系統。未來人類是否能從微小世界中獲得更多的啟發？這其實是相當令人期待的！

[註一] 參考資料：

<http://www.howtogeek.com/trivia/in-1949-popular-mechanics-predicted-the-computers-of-today-would-weigh-what/>