

微機構的元件型式與運動特性

吳名清、楊學安、方維倫

國立清華大學動力機械工程學系

理查-費曼 (Richard P. Feynman) 博士於 1959 年在美國物理學會年會的演講，為科技開啟了一個全新的領域，也將工程科學的發展延伸至微小的世界。自七零年代開始發展的矽微加工技術，使機械元件微小化，且得以和電子元件整合，進而衍生出微機電系統。然而，利用平面加工技術(planar technology)製造的微機電系統，主要是透過製程來整合各機械元件，因此其機構設計和元件特性，將有別於傳統的思維模式：亦即透過組裝來整合機械元件的方式。因此，本文將從機械系統的角度出發，來探討以微機電技術將機械系統微小化之後，其主動件及被動件之型式及其運動模式。

關鍵字：微機電系統、微致動元件、微傳動機構、接點、撓性機構

一、前言

機構設計 (Mechanism design) 是一門存在已久的學科，在人類發展的文明史上，有各式各樣簡單或者複雜的機構參與其中。例如，遠古時期埃及金字塔的建造和中國的指北針的發明，至工業革命內燃機及各種相關機器的開發，及目前半導體廠的高精密度製造檢測設備、與電腦週邊產品如硬碟機和光碟機。因此機構對人類生活的影響真是無遠弗屆，小至指甲刀、拉鍊等生活用品，大至汽車、飛機等交通工具，都是利用機構設計的原理，來達到特定的功能與目的。隨著科技的發展，目前半導體製程技術也被廣泛地利用來製造微機械元件，並衍生出許多的產品與應用。有別於傳統的機構設計的概念，微機電系統 (MEMS) 因為受到製程和尺寸的限

制，不易利用傳統元件個別組裝的技術，而必須透過製程整合的方式，來完成各種不同的微機構。因此，這項變革為機構設計帶來新的衝擊，也衍生出許多新的研究課題。

一般傳統的機械系統，主要是利用組裝的方式，將各種元件(如齒輪、連桿、滑塊)和接頭(joint)連結，以建立傳遞或變換運動方向與運動方式(例如直線運動與轉動)、或是用來傳遞能量的機構。簡言之，上述機械系統主要由三個部份組合而成，分別為驅動源 (driver)，傳動機構 (transmission) 以及從動機構 (follower)。圖 1 所示之曲柄滑塊機構為一個典型的例子。其中由驅動源產生一旋轉運動，透過傳動機構來帶動從動機構，並使其輸出一截然不同地直線往復運動。

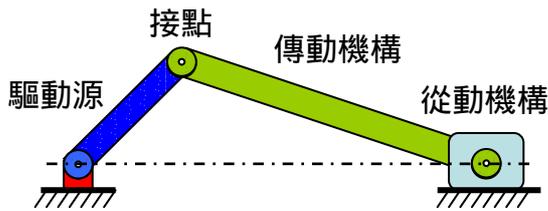


圖 1、曲柄滑塊機構

系統微小化之後，由於尺度效應 (scaling effect) [1]，使得在設計機械元件時，需要考慮許多原來在巨觀世界被忽略的物理現象，例如空氣阻尼、或是液體的表面張力等，致使許多傳統的機械元件，必須被更換以達到較佳的工作性能。其中最明顯的例子就是微致動器，在微機電領域裡，靜電致動器或式熱致動器取代了傳統的致動元件如馬達或內燃機。

此外，微機電系統多以平面加工技術，亦即利用逐層加工及逐層堆疊的方式來完成。而且由於元件的尺寸，及批量製造(batch fabrication)的訴求，微機電系統不易也儘量避免利用組裝的方式，而是透過元件設計和製程相互配合，以便於加工完畢後即自動完成來各機械元件的整合，所以微機電系統之元件設計和製程規劃的關係是密不可分的。這點和傳統的機械設計，也有很大的出入。因製造與組裝技術的限制，使微機電系統的製造方式較無法完成可靠或性能卓越的部分傳統機械元件如馬達、引擎、曲柄、及滑塊等。

雖然如此，但是上述機械系統操作的概念，亦即致動、傳動、和從動的架構，仍然適用於微機電系統，惟各元件的設計，及彼此間的整合，和傳統的機構設計有很大的差別。舉一典型的例子，圖 2 所示為一利用梳狀

致動器 (comb drive) 驅動的微光學掃描面鏡系統[2]。以面型微加工技術 (surface micromachining) 製作的梳狀致動器，廣泛應用於微機電系統，其致動特性為線性 (linear)、同平面 (in-plane) 的小位移運動。由於梳狀致動器其致動行程較小，為能使掃描鏡面產生大角度的光束掃描(亦即大角度的轉動)，此系統利用滑塊來累積行程以產生一個較大的同平面直線運動。然後再利用另一根連桿連結滑塊與面鏡，配合將面鏡固定於晶片表面的鉸鏈 (hinge)，可將滑塊從同平面的直線運動轉換成出平面 (out-of-plane) 的轉動。使傳動機構可作大角度旋轉。

簡言之，藉由適當的機構設計，可將原來小行程的同平面直線運動，轉換成大行程的出平面的轉動運動，達到微面鏡掃描作動的預期目的，綜觀以上所敘述，在微機電系統中，各微機構的位移、方向及支點的設計與製程的整合，將是微加工技術重要的考量。本文將根據圖 1 所示之架構，針對微機電系統的致動元件、接點、傳動元件等作進一步的探討。

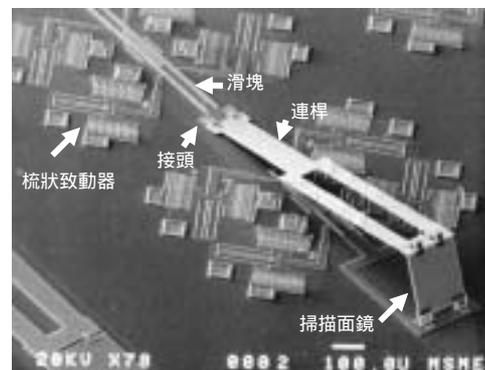


圖 2、微光學掃描面鏡系統 (UC Berkeley) [2]

二、致動部份

誠如前節所言，微機電系統受到平面加工技術和元件尺寸的限制，因此主要是利用製程整合而非元件組裝的方式，來完成各種不同的微機構。據此，在致動器的開發上，出現兩項較特殊的問題，也進一步影響致動器本身以及其傳輸機構的設計。第一，除了微馬達[3]、滑塊[4]、和面鏡等少數元件外，大部分的微元件都必須以固定結構(anchor)附著於基材(substrate)表面，以確保這些懸浮於基材表面的可動件，於製程完畢後能存活下來；如此一來，除了微馬達可進行剛體運動，可以輸出大的角位移 (angular motion) 外，大部分的微致動器都只能提供小位移的運動，如圖 2 之梳狀式致動器。第二，傳統的致動器，透過組裝的方式即可輕易地改變力或位移的傳輸方向，然而微致動器卻因為不易組裝，必須針對力或位移的傳輸方向，提出各種不同的解決方案。例如設計不同致動方向的微致動器，或者加上改變運動方向的傳輸機構，如圖 2 之連桿。

因此在檢視現有的一些致動器的設計時不難發現，除了倚賴外加傳動機構的協助外，很多致動器本身即具備放大輸出位移的力學與機構設計，以克服上述第一項問題。另外，由於矽微加工平面製程的特性，很多致動器尤其是面型微加工製造的元件，都傾向進行同平面運動，如梳狀式致動器或冷熱臂熱致動器[5]。因此，許多致動器也透過本身的結構設計，來產生同平面或是出平面兩種運動方式，以克服上述第二項問題。

本節將透過在微機電系統中常用

的兩種致動方式之致動器，介紹如何利用特殊的機構設計，使致動器可達到位移放大或者方向改變的目的。其中一種是熱致動式致動器：包括同平面運動的冷熱臂熱致動器[5]及出平面運動的雙層結構熱致動器[6]、和冷熱臂熱致動器[7]；另一種是靜電式致動器：包括同平面運動的分布型靜電致動器(DEMA)[8]、仿肌肉型靜電致動器[9]，以及出平面運動的曲面電極式致動器[10]。

2.1 同平面運動熱致動器—冷熱臂熱致動器

電熱式微致動器的原理很簡單，由於薄膜結構本身即可扮演電阻元件，當通過電流時，該結構會因為電熱效應升溫，對於旋浮的微機械結構而言，如果該結構有一自由端(例如微懸臂樑)，將會產生一線性熱膨脹。一般而言，利用結構的線性膨脹量產生的位移(形變)量非常小，因為材料的線性熱膨脹係數通常在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ，對於一根結構長度為 100 微米的懸臂樑而言，即使在 1000°C 的升溫下，其自由端之線性膨脹量也只有 0.1~1 微米。如果據此原理來製造電熱式微致動器，然後以線性膨脹量作為致動器的輸出位移，可預知其效果非常不理想，因此必須利用機構設計或力學原理，來放大變形量。

在九零年代初期，微機電領域的先驅 Guckel 提出以 LIGA 方式製造的同平面式熱致動器 [11]，該熱致動器是由單一材料所製造，其幾何外型如圖 3 所示包含兩根寬度不同的旋

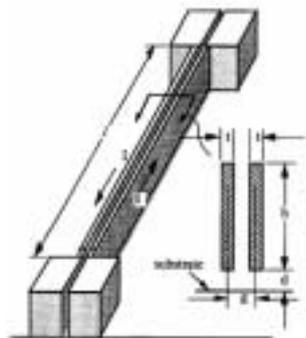


圖 3、同平面式熱致動器 [11]

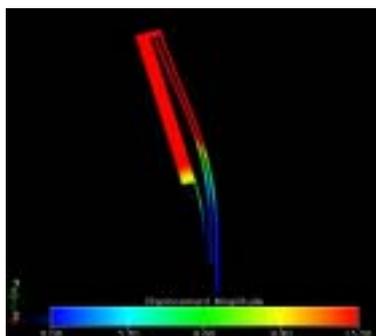


圖 4、熱致動器受熱形變狀

臂結構，此兩根懸浮結構藉由一端固定在基材表面，而另一端則由連結臂將二者連結在一起。如果將電流由一懸臂之固定端輸入，流經此二懸臂後，再由另一懸臂之固定端輸出，則結構將由於本身的電阻特性而升溫，其中寬度較細之懸臂截面積較小，故其電阻較高致使溫升也較高，一般稱之為「熱臂(hot arm)」；反之，寬度較粗之懸臂截面積較大，故其電阻較小致使溫升也較低，一般稱之為「冷臂(cold arm)」。因此在通電流的過程中，雖然此二臂之熱膨脹係數相同，但因溫升的不同造成二者具有不同的線性熱膨脹量。由於此二臂的熱膨脹會受到連接臂的約束，因此當其膨脹量不同時，會造成一等效彎曲力矩(bending moment)，將結構原始的線性熱膨脹，轉換為致動器的同平面彎曲形變

(bending deformation)，如圖 4 所示，達到輸出位移放大的致動特性。[5]

2.2 出平面運動熱致動器—雙層結構熱致動器[6]、和階梯式熱致動器[7]

利用熱膨脹係數不同之薄膜所構成的雙層結構(bimorph structure)，來造成受熱彎曲的特性 [6]，是最為人熟知的出平面型熱致動器之設計，如圖 5 照片所示為典型的雙層結構熱致動器 [6]。該結構可以同時將結構原始的同平面線性熱膨脹，轉換為致動器的出平面彎曲形變，以達到輸出位移放大及方向改變之雙重功能。由於雙金屬效應簡單的原理，以及平面加工製程技術易於整合的特性，出平面式熱致動器很早即已被開發。然而由於其容易產生脫層(delamination)的問題，因此可靠度不佳，且僅能作單向致動。

為了克服現有之雙層薄膜熱致動器的問題，因此 [7] 提出一種嶄新的單層薄膜階梯式出平面熱致動，如圖 6 所示，階梯式熱致動器的基本結構包含四根互相平行、左右對稱且長、寬、厚度大小相同的桿件，並以二根連接臂加以連接所構成，而內部兩根桿件和外部兩根桿件具有一高度差，即形

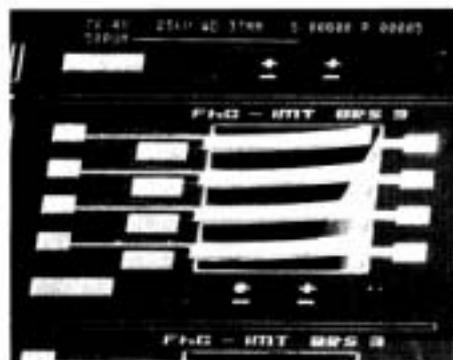


圖 5、出平面運動熱致動器[6]

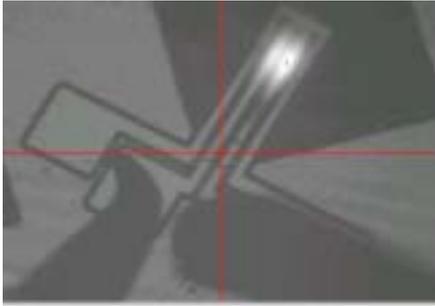


圖 6、階梯式熱致動器的冷熱臂[7]
(清大微機電實驗室)

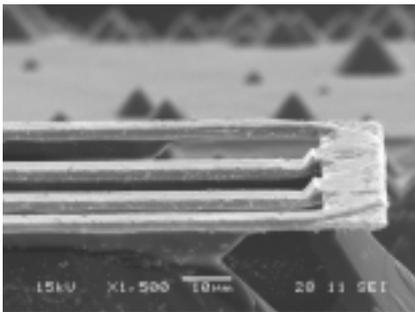


圖 7、階梯式熱致動器的冷熱臂
(清大微機電實驗室)

成階梯狀結構，如圖 7 所示。當施加電壓在內臂時，內側兩根桿件因而產生熱量，使之較外臂具有更高的溫度，因而產生較大的熱形變量，由於外臂高於內臂的設計，結果將會導致結構產生出平面向上的運動。反之，若施加電壓於外臂，由於外側兩根桿件受熱伸長，結構則產生出平面向下的運動。透過上述控制電壓的施加方式，可達到雙向致動的效果。由於該微電熱式致動器是利用同一層材料所製作，因此可有效避免脫層效應，使壽命及可靠度大幅提昇。

2.3 同平面靜電致動器—分布型靜電致動器 (DEMA) [8]、仿肌肉型靜電致動器 [9]

前述之熱致動器，巧妙地利用本身之結構設計，將線性熱膨脹轉換為

同平面或出平面的彎曲形變，以放大輸出位移。同樣地，靜電致動器也可以利用本身之結構設計，來放大輸出位移。

一般的靜電致動器主要是利用靜電力的吸引，使動件產生輸出位移，根據靜電力產生的原理，可將靜電致動器的致動方式區分為兩種，分別是間距近接式 (gap closing)，和梳狀電極式 (lateral comb)。利用電極間距近接的方式致動，無論是製程或操作都非常方便，但是有驅動電壓和活動空間二者相互牽制的問題；為了減低起始的驅動電壓，必須將電極板起始的間距拉近，然而由於電極板的間距拉近，會減小致動器活動的空間，致使在設計間距近接式靜電致動器時，必須在驅動電壓和活動空間二者間進行取捨。

如圖 8a 所示為一個具有代表性的大行程同平面靜電致動器之例子，稱之為分布型靜電致動器 (DEMA) [8]，也有人稱這類型的致動器為仿肌肉型靜電致動器 [9]。圖示之致動器主要是利用靜電力吸引兩相互靠近之拱形電極板，使之產生一同平面位移，如圖 8b 所示，藉由微加工技術整合許多的拱形電極板，然後同時加以致動，即可將這些電極板的同平面位移行程累積，使得在不增加驅動電壓的情況下，仍可提供大的輸出位移。當電壓移除時，撓性結構將因其彈性回復力使整體結構回復至初始狀態。

2.4 出平面運動靜電致動器—曲面結構離散電極致動器 [10]

利用電極間距近接的方式所設計的出平面靜電致動器，同樣必須面對

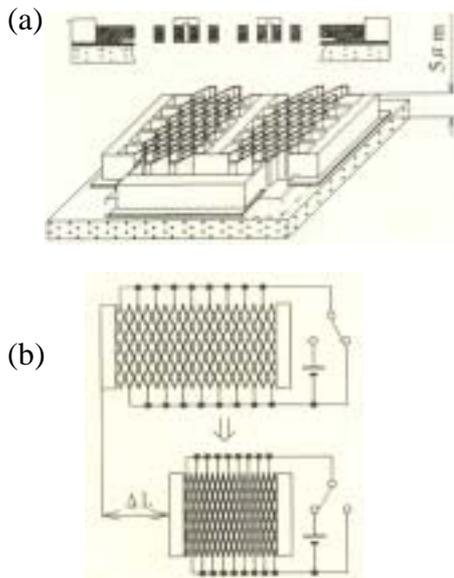


圖 8、分布型靜電致動器[8]

驅動電壓和活動空間二者相互牽制的問題。另外，對於面形微加工技術製造的出平面靜電致動器而言，更需要解決活動空間受限於矽基材的問題。

如圖 9a 所示, Yasuda 曾提出一種曲面結構離散電極致動器[10], 該致動器利用薄膜殘餘應力使雙層薄膜彎曲, 使結構產生二次的形變曲線, 以增加其出平面之初始形變, 換言之, 其允許之致動行程(此指致動器頂端之最大位移處)也隨之增加。另外在每個曲面結構終端都有一附屬的離散電極, 由於該電極為單層薄膜懸臂樑狀之結構, 殘餘應力會由自由端釋放不會產生彎曲形變, 因此這些電極為沿著曲面結構切線方向之一次曲線。

如果從圖 9b 之上視圖觀察, 上述曲面結構及其附屬的離散電極可分為數段, 當致動器驅動時, 圖中最接近基材之第一對電極, 將受到靜電的吸引, 使第一段曲面結構和電極吸附於基材; 此時, 第二段曲面結構和電極的狀態, 和先前第一段的狀態相同, 因此在相同的驅動電壓下, 可使這幾

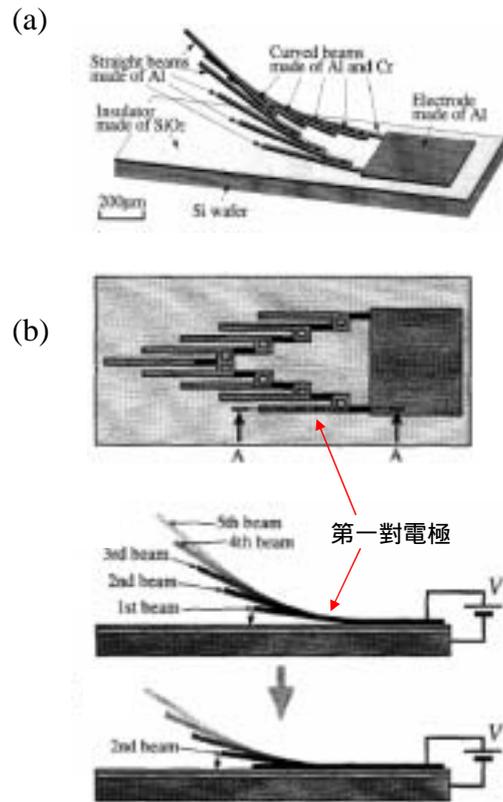


圖 9、曲面結構離散電極致動器[10]

段曲面結構和電極逐一地吸附於基材, 以產生可觀的出平面位移。由此得知, 藉由結構彎曲形變的設計, 可以克服基材的出平面空間限制; 藉由結構和電極的離散化, 可以產生大輸出位移和低驅動電壓之靜電致動器。

三、接點的設計

前一節分別以位移及方向, 介紹同平面及出平面運動的兩種特殊致動器, 這些致動器利用特殊微機構設計, 達到大行程的效果; 當致動器完成之後, 為了形成微機械系統, 各部分必須以接點做為連接。如圖 1 所示, 機械系統主要是由剛體機構和可動的接點所組成, 藉由接點的移動, 得以改變剛體結構的相對位置。筆者將現有的接點區分為以下兩類: (1) 剛性接

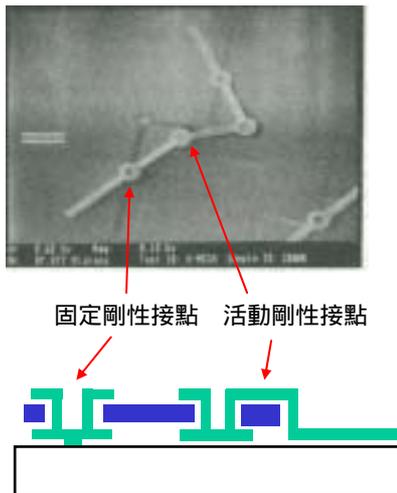


圖 10、剛性接點 [4]



圖 11、固定剛性接點-轉軸 [3]

點，及 (2) 撓性接點，以下將針對此二類型的接點，做進一步的說明。

3.1 剛性接點

Fan et. al. 於 1988 年成功地利用面型微加工技術，開發出數種不同的剛性接點 [4]，包括無法位移的固定接點，及可位移的活動接點，如圖 10 所示。這些剛性接點的特色是，當連結的物體位移或運動時，不會造成接點的形變。在所謂的犧牲層薄膜 (sacrificial layer) 的協助下，製程完畢後，兩層結構層薄膜 (structural layer) 如圖 10 所示之藍色和綠色兩層，將彼此分離。透過適當的製程設計，其中一層結構層 (綠色層) 將固定在晶片形成固定剛性接點，然而另一層結構層

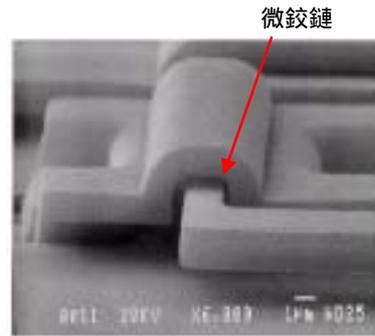


圖 12、微鉸鏈[11]

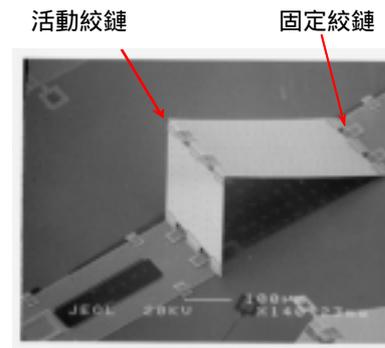


圖 13、活動與固定式微絞練[13]

(藍色層)則完全懸浮於矽基材，若非固定剛性接點的保護，該結構將會在製程中被沖洗掉。也由於此二層結構層彼此並未附著，因此懸浮的結構層可沿著剛性接點進行同平面轉動。同樣利用製程和元件設計，也可以懸浮綠色的結構層，透過活動剛性接點的協助，可使懸浮的綠色結構層，沿著活動剛性接點進行同平面轉動。

除了上述例子外，還有許多種不同類型的剛性接點，其中包括如圖 2 所示，協助滑塊產生剛體線性位移的滑軌 (rail)，是一種固定在晶片表面的固定接點；如圖 11 所示，協助轉子 (rotor) 產生同平面剛體角位移的轉軸 (spindle)，也是一種固定在晶片表面的固定接點。另外，如圖 12 所示的微鉸鏈，是一種協助微結構產生出平面剛體角位移的固定接點，由於微鉸鏈的發明，使得許多微光機元件得以直立

於矽晶片表面 [12]，而產生廣泛及深遠的影響。至於活動剛性接點如圖 10 所示，可隨著剛體連桿產生同平面位移 [4]，另一種活動接點如圖 13 所示，可隨著剛體結構產生出平面位移 [13]。

然而，由於犧牲層移除後造成結構層之間的間隙，微機電系統的接點，無論是如圖 10 及 11 所示之同平面運動的轉軸，或是如圖 12 及 13 所示之出平面運動的微鉸鏈，都必須克服因為間隙的存在，所造成的定位精度問題，及元件的磨耗問題。

3.2 撓性接點

目前，在微機電系統中逐漸發展出各式的撓性接點機構 (compliant mechanism)，並有非常廣泛的應用。該機構可藉由撓性結構的形變，來改變剛體結構的相對位置，因此可以避免上述剛性接點的間隙所造成的定位精度及元件磨耗等問題。此外，微機電系統各分離的結構與撓性接點機構可以在製造時一體成形，此特點也和微加工製程的特色相吻合，因此撓性接點的製程較剛性接點簡單許多。例如圖 14 之掃描面鏡是由一對撓性接點機構所支撐 [14]，該撓性接點和掃描面鏡藉由蝕刻的方式一體成形，反之，如欲利用剛性接點如鉸鏈取代該撓性接點，則製程的設計將是極大的挑戰。

彈簧是最常見的撓性接點元件，如圖 15 所示，藉由彈簧的彎曲形變，可使其兩端點連結的桿件產生相對位移 [15]，而藉由彈簧的扭轉形變，可使桿件和矽晶片之間產生相對位移。該圖也說明了，撓性接點也包括無法

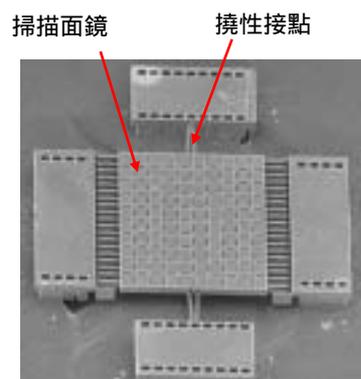


圖 14、撓性接點機構[14]
(清大微機電實驗室)

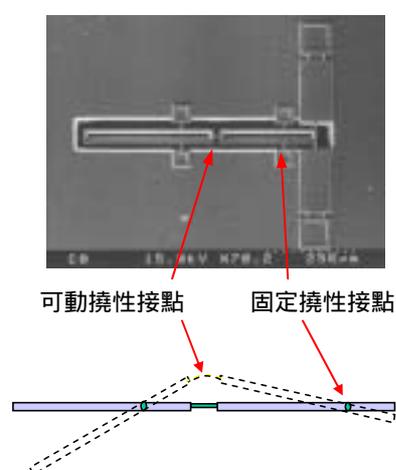


圖 15、含固定及可動撓性接點之槓桿機構[15] (清大微機電實驗室)

位移的固定接點，及可位移的活動接點。其中，扭轉軸為一固定式撓性接點，用來支撐槓桿並使其繞著該軸轉動；另外，連結二槓桿臂之撓性接點是一種可隨著槓桿臂移動的活動接點。由於微彈簧其外形是由矽微加工的微影技術所定義，因此其形狀多半是簡單的樑，或如圖 16 所示具有一定厚度的板簧(平面彈簧, flat spring)。

由於彈簧具備儲存位能的特性，因此可提供彈性回復力，使元件和外力維持在一平衡位置，以便操作在所謂的類比式 (analog) 運動，其中一項具有代表性的例子為 Lucent 的三維

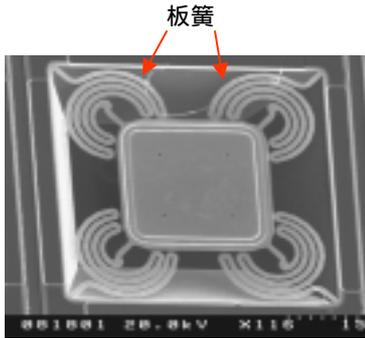


圖16、板簧(平面彈簧)
(清大微機電實驗室)

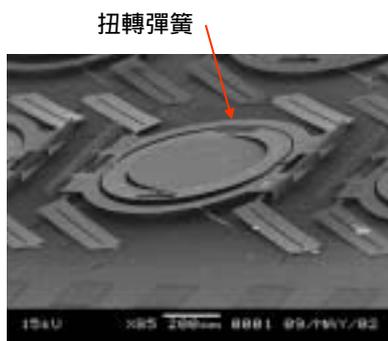


圖17、扭轉彈簧之撓性接點
(清大微機電實驗室)

光開關 [16], 如圖 17 所示為筆者實驗室臨摹該元件, 並加以改良後之結果, 由該圖可明顯觀察到四個扭轉彈簧形成的撓性接點。此外, 彈簧也可以和質量塊構成一動態系統, 應用於共振式 (resonant) 運動的元件, 如振盪

器 (resonator) 與掃描器 如圖 18 所示為筆者實驗室設計製造之光掃描器 [17], 當靜電驅動力的頻率, 達到由面鏡質量塊和扭轉彈簧構成之動態系統的扭轉振動的自然頻率時, 該面鏡可產生一個極大的扭轉角掃描入射光束。

四、傳動機構

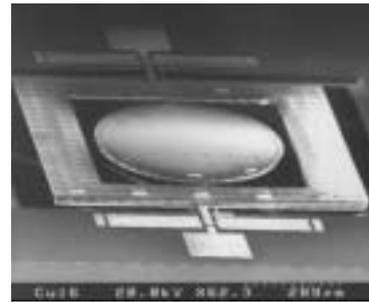


圖 18、靜電驅動之光掃描器[17]
(清大微機電實驗室)

微致動器可透過本身結構上的設計, 來改變輸出位移的大小或方向, 如第二節列舉的一些例子, 但是在很多的應用上, 這些微致動器的性能還是無法滿足要求。此時, 必須利用額外的傳動機構, 來協助微致動器滿足操作的規格, 以下將介紹在微機電系統中常用的傳動元件。

4.1 剛體連桿

在設計機械元件時, 結構的剛性 (stiffness) 是一項極重要的參數, 有些元件需要較大的剛性, 例如連桿、面鏡等, 反之, 有些元件需要較小的剛性, 如彈簧、轉軸等。由於微機械結構的厚度以及幾何外型受限於製程, 因此在設計其剛性時, 必須和製程一起考量。

連桿是最基本的剛性傳動件, 對於薄膜元件而言, 欲製造一剛體元件相當不易, 因此只能讓這些傳動件有較大的相對剛性。一般而言, 傳動件的剛性, 主要受限於薄膜厚度; 對於同平面的傳動件, 其剛性大致上和厚度的一次方及寬度的三次方成正比, 因此較不受膜厚的影響, 且可輕易地藉由元件的寬度來增加其剛性; 另外藉由元件的軸向剛性來傳動者, 如圖 2

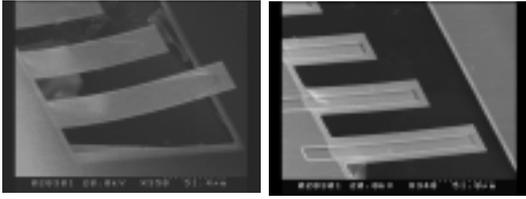


圖19、肋強化結構[18]
(清大微機電實驗室)

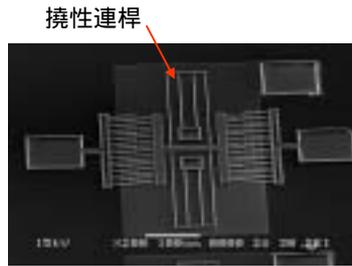


圖 20、以撓性連桿支撐之梳狀致動器
(清大微機電實驗室)

之連桿，其剛性和厚度的一次方成正比，因此也較不受膜厚的影響；反之，對於出平面的傳動件，其剛性和厚度的三次方成正比，因此無法滿足剛體元件的要求。因此利用薄膜製造出平面連桿相當不易。

針對此需求，筆者實驗室於 1999 年成功地結合力學概念和製程技術，開發出一種可以結構出平面彎曲剛性 (bending stiffness) 增加 1~2 個數量級的肋強化結構，如圖 19 所示 [18]。該設計主要是改變結構截面的幾何形狀，藉以增加結構的慣性矩 (moment of inertia)，使得在不調整結構的厚度下，仍能增加結構的剛性。因此，藉由肋強化結構的輔助，薄膜結構可具有較大的相對出平面彎曲剛性，以符合作為出平面連桿的要求。

上述出平面連桿的一項具體的應用為圖 15 所示之槓桿。如果將該桿件視為剛體，則該槓桿機構可根據槓桿

比，放大位移或出力，並且改變運動

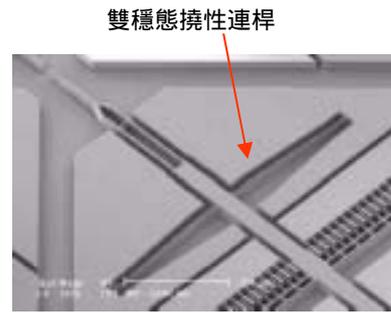


圖 21 微光開關之雙穩態撓性連桿[19]

方向之器件。然而，如果桿件的剛性太小，則容易造成桿件本身形變，使得位移無法有效輸出；另外，為了使槓桿容易旋轉，其支撐之扭轉彈簧剛性不宜過大。利用上述肋強化的概念，僅局部增加槓桿結構之剛性，卻不會影響扭轉彈簧的剛性，因此可以顯著地改善其操作性能。

4.2 撓性連桿

撓性結構除了可以作為前述之接點外，也常應用於微機械傳動件如撓性連桿，使機構在傳遞能量時，能夠產生特殊的運動狀態。例如圖 20 所示之梳狀致動器，該元件由數根可形變的撓性連桿，支撐一可視為剛體的運動件；為限制剛體動件的運動方向，該撓性連桿的剛性在欲驅動之方向為最低，而其他方向的剛性較高。另外，如圖 21 所示之撓性連桿的挫曲 (buckling) 行為，則被應用來使該光開關產生雙穩態 [19]，利用此二結構穩態即可在無外力驅動的情況下，使光開關穩定地停留在開啟或關閉狀態，藉此可達到減小驅動能量的優點。

4.3 齒輪組

齒輪組也是一種典型的傳統傳

動機構，主要是被用來調變輸出之力



圖 22、微齒輪組[20]
(Sandia National Lab.)



圖 23、殘餘應力抬昇臂

量與速度的方向或大小。近年來由於製程技術的進步，面形微加工所堆疊的薄膜層數也愈來愈多，因此有人提出利用齒輪組作為傳動機構的設計 [20]，如圖 22 所示為美國 Sandia National Lab 以面形微加工技術，堆疊四層多晶矽製作的齒輪組。然而，齒輪組傳動機構仍無法避免 3.1 節所提及，由於其轉軸剛性接點間隙的存在，所造成的定位精度問題，及元件的磨耗問題。這些問題也是此類型傳動機構在實用上的最大挑戰。

五、其他機構

受限於平面加工的特性，在製程完畢後，微機電元件由微影 (photo lithography) 所定義的幾何外形，將平行於基材表面，且部分微機電元件和基材僅有數微米的間距，這些結果，嚴重地限制了微機電系統的應用。例

如，MUMPs 共用製程的元件，受限於犧牲層膜厚，和基材間距僅有 1-3 微米，致使光學掃描面鏡的掃描角度過小。因此，除了上述驅動、傳動、及接點等元件外，尚需要一些支撐與定位結構，使得微機電元件得以直立於基材表面，或增加元件與基材的距離，以增加微機電系統的應用範圍。以下將簡單地介紹典型的微支撐與定位結構。

5.1 應力抬昇臂

殘餘應力是薄膜在沉積或成長的過程中，很難避免的一項特性，如果妥善地應用這項特性，可製造簡易的抬升結構。如圖 23 所示為典型的彎曲懸臂樑抬升結構，該懸臂樑是由兩種不同的薄膜所組成 (以 MUMPs 製程而言，這兩層薄膜通常為多晶矽結構層和金屬層)，由於在上層的薄膜為殘餘張應力，而下層的薄膜為殘餘壓應力，因此懸臂樑懸浮後，將受到向上的彎曲力矩，產生如圖 24 所示之結果。由於微元件抬升高度和懸臂樑彎曲形變量成正比，因此藉由調整殘餘應力的大小和懸臂的長度，可以調整元件抬升的高度。

圖 24 所示為利用應力抬昇臂，將一薄膜平台抬昇至離基材表面約 50 微米的高度 [21]。這類型抬昇機構面臨兩項問題：第一是由於應力和結構強度分布的均勻性，造成不同位置的應力臂具有不同的抬昇高度；第二是由於薄膜材料性質隨時間的改變(如潛變效應)，造成抬昇高度隨時間改變。關於後者，可以選擇穩定性較佳的薄膜如高溫沉積的二氧化矽或氮化矽 [22]。至於前者則可利用機械結構如卡

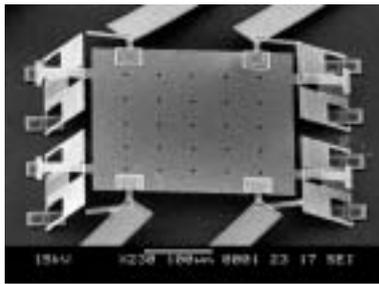


圖24、卡樁的設計
(清大微機電實驗室)

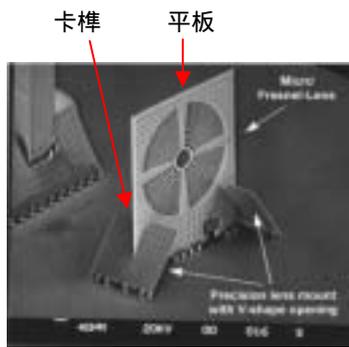


圖25、以卡樁定位之微平板[23]

樁，來輔助達到高度定位，以下將進一步說明卡樁的設計。

5.2 卡樁設計

卡樁是一種用來限制微結構活動空間的元件，因此可協助微元件達到高度或是角度上的定位。例如，圖25之平板 [23] 可繞著微鉸鏈進行出平面轉動，其位能最低點分別是在平板為 0° 或 180° 的狀態，如果忽略鉸鏈與平板間的摩擦力，若沒有卡樁的協助，該平板將往兩側(亦即 0° 或 180° 的位置)傾倒，無法穩定地直立於晶片表面，因此圖中之卡樁協助微平板達到角度上的定位。另外，圖 24 除了觀察到應力抬昇臂外，也可以清楚地看到薄膜平台兩側各有兩個定位卡樁。由於這些卡樁固定在晶片表面，且可以視為剛體，因此根據幾何的關

係得知，薄膜平台的抬昇高度將受到

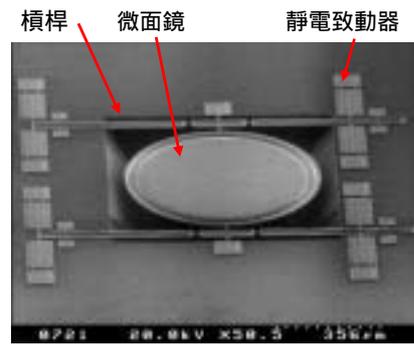


圖 21、微型光掃描器[24]
(清大微機電實驗室)

限制，換言之，應力抬昇臂只要超過此抬昇高度，即被定位於此，所以圖中之卡樁協助微平板達到高度上的定位。相同的概念也應用於圖17 所示之三維光開關的高度定位 [21]。

六、應用

微機電系統應在不同的領域中，如光電、RF、生醫等各方面，勢必針對每個領域的需求而有所調整，譬如元件的運動方向、位移量、共振頻率、與響應速度等，適當的微機構與機械設計，將能充分發揮出元件的性能，以符合該領域之應用。本文從第二節到第五節介紹了包括致動器及各部分微機構之設計，本節將列舉數項筆者實驗室開發的元件，以說明前述微機構於微光機電系統之應用。

6.1 微型光掃描器(Micro-scanner)

在光學微機電領域中，微型光掃描器堪稱是應用最為廣泛，發展最為完備的元件之一，在應用微型光掃描器時，元件的光學平整度、扭轉角度、以及共振頻率，是最為關鍵的指標性能，如何才能得到高平整度、大扭轉

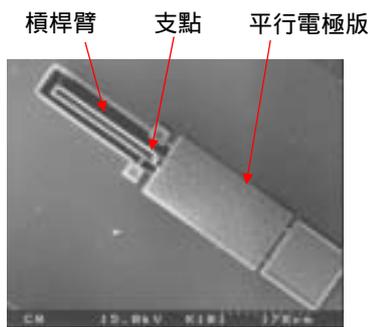


圖22、微靜電致動器之設計簡圖[25]
(清大微機電實驗室)

角、以及高共振頻率的微型光掃描器? 微機構設計將是最好的答案。

如圖 21 所示之微型光掃描器 [24], 細部機構包含四組靜電式槓桿致動器, 整合微傳動機構, 以及一高平整度的光學面鏡, 其中, 整體結構的製造, 是利用薄膜製程來完成。首先, 靜電式槓桿致動器是透過兩片上下電極之平行板, 提供靜電力之來源, 由於電極板之運動空間受限於薄膜犧牲層厚度 (~2 微米), 這樣的位移量, 當然不能滿足微型光掃描器大角度的需求, 如果將上下平行電極板與槓桿機構整合, 如圖 22 所示, 便可以克服犧牲層厚度的限制, 而大大的增加了出平面之位移量。

然而, 當具有大出平面位移之靜電槓桿致動器, 要與微傳動機構及微面鏡整合時, 將面臨到薄膜製程製造之微結構, 其結構厚度受限於薄膜製程 (~微米), 造成結構剛性不足, 因此, 當之靜電槓桿致動器要驅動微面鏡時, 槓桿之力臂便因為沒有足夠的剛性以承受抗力, 造成力臂本身

發生形變, 大部分的能量都消耗在力

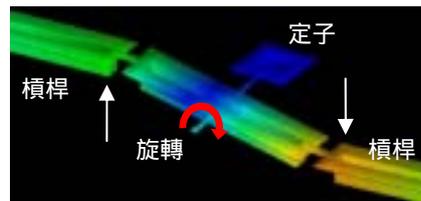


圖 23、微扭轉傳動機構[15]

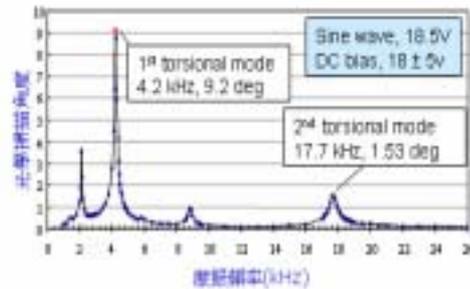


圖 24、微型掃描器之動態響應[24]

臂之形變, 將無法帶動微面鏡, 因此, 具備足夠剛性的力臂是絕對必要的。在此, 我們利用機構設計, 搭配製程之溝槽回填技術 (trench refill), 在薄膜沈積前, 先於晶片表面蝕刻出一深溝槽, 隨後再沈積薄膜, 因此便可以在不增加結構厚度的前提下, 改變了力臂之形狀, 大幅提高力臂慣性矩, 而力臂之結構剛性便因此獲得增加, 稱為肋強化結構, 根據模擬結果所示, 相同厚度相同尺寸的兩槓桿力臂, 有設計肋強化結構之槓桿臂, 其剛性將大幅提高 100 倍以上。

除了大位移的致動器與強化的力臂之外, 適當的微傳動機構與微面鏡連結, 將可以使微型掃描器的性能大幅提高; 如圖 23 所示 [15], 微傳動機構左端為往上運動之槓桿致動器, 右端為往下運動之槓桿致動器, 各部分機構以撓性接點機構作為連接, 當致動器一上一下同時出力, 以帶動中間的連桿時, 由於往上與往下兩致動器

之出力大小相互平衡，因此，整個傳動機構將只純粹輸出扭轉力矩，避免了微型掃描器中，常發生之上下偏擺的運動(wobble motion)，此純粹輸出扭轉力矩之微傳動結構，對於微型掃描器的光學品質有極大的幫助。

最後微傳動機構連接到微面鏡時，由於微面鏡結構本身依舊受限於薄膜製程，微面鏡結構剛性不足，因此將遭遇殘餘應力之影響與高頻扭轉時慣性力之作用，造成微面鏡本身發生形變，影響到光學品質。在此我們可以利用前述之肋強化結構，於微面鏡周圍設計一圈肋強化結構，藉以增加微結構剛性，以抵抗靜態與動態之變形。微型掃描器之驅動頻率響應圖如圖 24 所示，可以發現此元件有共兩個共振頻率，乃是由於此微型掃描器，由微傳動機構與微面鏡組成，可以視為一雙質量塊的系統，當元件處於第一模態時，微傳動機構與微面鏡處於同相位，其共振頻率為 4.2kHz，此時之轉角度為 9.2 度，當元件處於第二模態時，傳動機構與微面鏡則處於相反相位，共振頻率更高達 17.7kHz，此時之機械扭轉角度為 1.53 度。因此當大角度之應用時，可以將元件驅動於第一模態，當高頻率之應用時，可以將元件驅動於第二模態。

透過靜電式槓桿致動器、微傳動機構、以及肋強化之微面鏡的實例，我們將可以發現，微機構設計確實是微機電元件中，性能提升的一個關鍵部分。

6.2 自組裝微光開關

面型微加工製程是目前最普遍之微加工技術，誠如第五節所言，使用

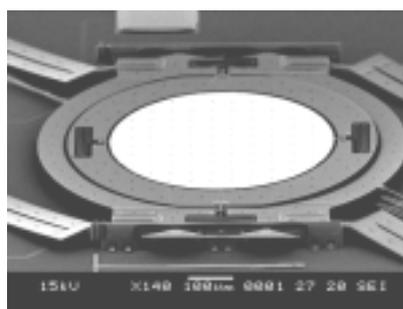


圖 25、自組裝微光開關[22]
(清大微機電實驗室)

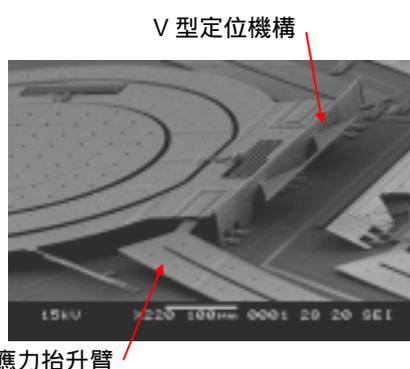


圖 26、微卡榫定位機構[21]
(清大微機電實驗室)

面型微加工技術在設計微元件時，微元件往往受到底材之限制，不容易進行大角度的運動，因此必須透過適當的微機構設計，使微結構脫離晶片表面，創造出元件自由運動空間。以下之元件如圖 25 所示，為透過應力引出自組裝技術 (Stress-induced self-assembly mechanism)，應用在雙軸微光開關上之實例 [22]，以說明微機構設計的重要性。

採用表面型微加工技術製造之三維微光開關，要能夠有效運作，必須將元件撐起於晶片上方 50 微米以上的高度，才能夠有足夠的扭轉空間，進行光路的切換，因此，勢必要有一個組裝與抬昇機構來達成這個目標，而

結合前述之應力抬昇臂與微結構幾何

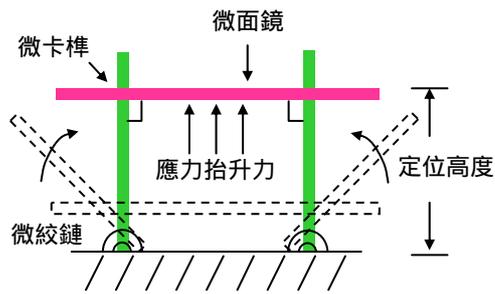


圖 27、定位高度與機構示意圖

結合前述之應力抬昇臂與微結構幾何卡樺將是十分有效的方式，利用雙層薄膜間的應力差，透過理論上的預估，將殘餘應力轉換成組裝微結構的能量來源。

除了殘餘應力的設計之外，微結構組裝出來的高度或是角度等，就必須透過精密的幾何與微機構設計來達成，如圖 26 所示 [21]，利用殘餘應力臂，可以將微結構挑起，但是其最後的高度與位置，卻是由其他的微結構卡樺與接點所定義的，如圖中 V-型卡樺的相互搭配，將可以使微面鏡垂直立起於晶片表面上方 50 微米處，而且微結構與殘餘應力臂之間的相互關係，可以視為連桿機構，如圖 27 所示 [22]，透過微連桿的搭配，不緊緊只是將微結構立起，更紮實的提供穩定牢固的機構，以避免微扭轉面鏡運動時，發生不必要的跳動。此外，若是將組裝的支點、應力臂等相關位置做一些調整，更可以獲得各式各樣三維的微結構，如圖 28 所示，微面鏡將可以被垂直立起於晶片表面 90 度 [22]。

透過殘餘應力之微結構力學理論，我們可以預估到殘餘應力臂提升的高度，與所提供的力量大小，並進一步搭配幾何與微機構設計，將能使

微機電元件的樣式更為多元化，使得

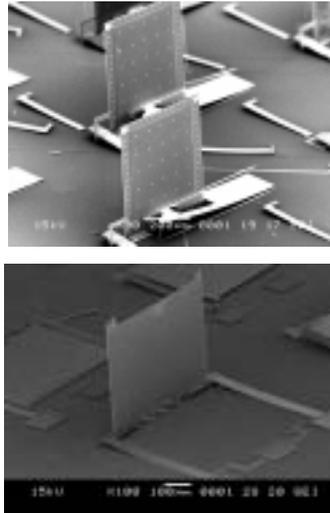


圖 28 設計垂直組裝機構之微面鏡[22]

設計更有彈性，因此再一次印證了微機構設計的重要性。

七、結論

在追求輕薄短小的科技時代，半導體技術為電機電子領域，帶來數十年的榮景。隨著微加工技術的興起與成熟，也為機械系統的微小化，帶來契機，精微機械的組合也將從為人熟知的鐘錶業延伸至半導體產業。是的！機械已經撕下“大型”與“陳舊”的刻板標籤了。

微機電系統多以平面加工技術，亦即利用層加工及逐層堆疊的方式來完成，因此元件設計和製程必須相互配合，以便於加工完畢後即自動完成來各機械元件的整合，這點和傳統的機械設計有很大的出入。雖然如此，傳統的機械系統操作的概念，亦即致動、傳動、和從動的架構，仍然適用於微機電系統。簡言之，平面加工技術，賦予已有數百年發展歷史的機構設計和力學新生命，而機構設計的巧妙思緒，也為單調的電路晶片，創造

了更寬廣的應用。

當古老的人類智慧與經驗和現代的加工技術與產品相結合後，傳統不再成為包袱。當然，也讓我們深深體會到，當我們在爭論微米、奈米機電系統的實用與重要性時，或許，多一點包容與寬闊的心胸，許多新科技的重大成就，便在這片刻之間，因為彼此無私的合作，而有了重大的突破。

八、參考文獻

- [1]. M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*. New York, CRC Press, 1997.
- [2]. M. J. Daneman, N. C. Tien, O. Solgaard, A. P. Pisano, K. Y. Lau and R. S. Muller, *J. MEMS*, pp.159-165, 1996.
- [3]. L.S. Fan, Y.C. Tai, and R.S. Muller, *Int. Electron Devices meeting*, San Francisco, CA, Dec, 1988. pp. 666-669
- [4]. L.S. Fan, Y.C. Tai, and R.S. Muller, *IEEE Transaction on Electron Device*, June, 1988, pp. 724-730.
- [5]. J.H. Comtois and V.M. Bright, *Sensors and Actuators A*, **58**, pp. 19-25, 1997.
- [6]. W. Benecke, and W. Riethmuller, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 35, pp. 758-763, 1988.
- [7]. W.-J. Chen, J. Hsieh, and W. Fang, *MEMS'02*, Las Vegas, NV, 2002, pp. 693-697.
- [8]. K. Minami, S. Kawamura, M. Esashi, *J. MEMS*, Vol. 2, pp. 121-127, 1993.
- [9]. S.M. Bobbio, M.D. Kellam, B.W. Dudley, S.G. Johansson, S.K. Jones, J.D. Jacobson, and T.D. Dubois, *IEEE*, **7-10**, pp. 149-154, 1993.
- [10]. T. Yasuda, I. Shimoyama and H. Miura, *MEMS'97*, Nagoya, pp. 90-95, 1997.
- [11]. H. Guckel, J. Klein, T. Christenson, K. Skrobis, M. Laudon, and E. G. Lovell, *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, 1992, pp. 73-75.
- [12]. K.S.J. Pister, M.W. Judy, S.R. Burgett, and R.S. Fearing, *Sensors and Actuators A*, vol. 33, pp 249-256, 1992.
- [13]. N. C. Tien, O. Solgaard, M.-H. Kiang, M. Daneman, K. Y. Lau, R. S. Muller, *Transducers'95*, pp. 352-355.
- [14]. C.-C. Chu, J.-M. Tsai, J. Hsieh, and W. Fang, *MEMS'03*, Kyoto, Japan.
- [15]. H.-Y. Lin, M. Wu, W. Fang, and R. S. Huang, *Transducer'01*, Munich, Germany, pp.1302-1305
- [16]. V. A. Aksyuk, M. E. Simon, F. Pardo, S. Arney, *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, 2002, pp. 1-6.
- [17]. H.-Y. Lin, H.-H. Hu, W. Fang, and R.-S. Huang, *Transducer'01*, Munich, Germany, pp. 1310-1313.
- [18]. H.-Y. Lin and W. Fang, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, pp. 93-99, 2000
- [19]. L. Dellmann, W. Noell, C. Marxer, K. Weible, M. Hoffmann, and N. F. de Rooij, *Transducers'01*, pp.1332-1335.
- [20]. <http://mems.sandia.gov/scripts/index.asp>
- [21]. 何亦平, “微結構自組裝技術之研究,” 國立清華大學動機系碩士論文, 2002

- [22]. Y.-P. Ho, M. Wu, H.-Y. Lin, and W. Fang, *Optical MEMS 2002*, Lugano, Switzerland.
- [23]. Ming C. Wu, *Proceedings of IEEE*, 1997, pp.1833-1856.
- [24]. H.-Y. Lin and W. Fang, *IEEE Optical MEMS*, Kauai, Hawaii, 2000
- [25]. H.-Y. Lin, H.-H. Hu, W. Fang, and R.-S. Huang, *Transducer'01*, Munich, Germany, pp. 740-743.