

# 微機電系統技術於生醫的應用

## Microelectromechanical System Technology for Bio-medical Applications

潘吉祥  
Pan Chi Shiang

國立勤益技術學院機械系  
Department of Mechanical Engineering, National Chin -Yi Institute of Technology

### 摘要

微機電系統技術(Microelectromechanical System Technology)的研發成功，是近十幾年的事，其微小化(Miniaturization)、高度積體化(large integration)、多功能化(multi-functions)及單晶體化(monolithic integration on-chip)的特點，帶給生醫科技期待的願景。因此，本文將就微機電系統技術於生醫的應用作一介紹，並且呈現作者所自行研製的微夾子(micro-grippers)。

### 一、前言

科幻小說電影-聯合縮小軍 (Fantastic Voyage)，將一台太空船縮小到可吞入人體的食道內，使之漫遊在人體器官組織內，把人類帶入微小世界的實境。你曾否想到有一天一台微機器人能進入你的血管內、胃腸內或其他器官組織內做醫療診斷的工作？試想這樣的微小機器必然需要有比頭髮直徑更細小的機械元件，如微夾子、微手術刀、微幫浦、微閥、微針管、微馬達、微連桿及微齒輪，以及微感測器，如微內視鏡、微壓力計、微探針及微化學分析儀等來組成。事實上這不再是幻想或遙不可及的事了。近十幾年來，當積體電路技術蓬勃發展趨近成熟之際，藉由以積體電路製造技術為基礎的矽微加工技術(Silicon Micromachining Technology)，使得微小機械電子系統的研發展開了歷史的新頁，而引用同步輻射光源的光刻鑄模技術(LIGA technology)及超精密微機械加工技術(Super precision Micromachining technology)也相繼投入微製造的行列，而此研製的微小機械電子系統，今日通稱就叫“微機電系統(Micro Electro Mechanical Systems，簡稱 MEMS，或稱微系統(Microsystems)”。藉由微機電技術的研發成功，也促成尖端生醫科技的新興向榮[1-3]。雖然微機電系統的研發成功，帶給生醫科技期待的願景，但在實際技術層面上卻有著相當的挑戰性。因此，本文將就微機電系統於生醫技術的應用作一介紹，並且呈現作者所自行研製的微夾子(micro-grippers)[4-5]。

### 二、微機電系統之特色

雖然微機電系統按照不同定義，有時分成兩大類：第一類定義微機電系統本身的大小在釐米(mm)到毫微米( $\mu\text{m}$ )之間，甚至是到奈米(nm)程度的機電模組系統；第二類則認為微機電系統是能達到微米以下之運動精確度，而機械本身的大小沒有限制。雖然有這樣的分類，然本文所謂之微機電系統則以第一類為是。微機電系統是一種整合電子、電機、機械、光學、控制、材料、化學及生醫等功能元件的模組系統。東西雖

微小不起眼，但功能目的卻是神通廣大。微小化(Miniaturization)、高度積體化(large integration)、多功能化(multi-function)及單晶體化(monolithic integration on-chip)，將是微機電系統的特徵。此產品不但具備輕、薄、短、小之時代趨勢，而且因產品微小化，進而提升高品質、高性能、高可靠度、高附加價值、低重量及低單位製造成本等特性。這些特性正是迎合目前多項生醫手術、治療、診斷及分析之儀器產品所迫切需要的，例如：可植入(implantable)、可攜帶(portable)、可丟棄(disposable)、高靈敏性(high sensitivity)、高反應性(quick response)、降低對周圍組織的傷害之非侵入性(non-invasive)、同時性(in situ)、即時性(in line)及無線式(wireless)。而唯一要做的是擇選與生物相容(bio-compatible)的材料，從事與生醫相容的設計。

雖然元件微小化、積體化已可由半導體製造技術來達到，但是微機電生醫元件(MEMS-based bio-medical devices)與傳統固態生醫元件(conventional solid-state-based bio-medical devices)之比較，仍有下列幾點的差異：

### 1. 二維與三維元件的差異

傳統由半導體製造技術研製之固態生醫元件，基本上是二維之結構體，因此無法展現 3D 之效應功能。然而由微機電之製造技術所研製的元件，本體可為 3D 結構，或是組合(assembly)、接合(bonding)為 3D 構造，因此可達到 3D 之效應功能，舉例而言，如電場及磁場可做水平及垂直之交叉排列。

### 2. 微電子元件與微機械電子元件之差異

傳統由半導體製造技術研製之固態生醫元件，基本上是以微電子技術為主之感測器元件，例如：以 ISFET(ion sensitive field effect transistors) 或以微電極(micro-electrode)的 micro-PH 感測器元件、glucose 感測器、inosine 感測器，及血液傳導性(blood conductivity)感測器[6]。然而由微機電之製造技術所研製的生醫元件，可結合以微電子技術及微機械技術為整合之機械電子模組，內容包含有微感測器、微致動器、微訊號處理電路及微機械結構、機構等。此外，以往固態(solid state)感測器不用微懸浮結構(micro-suspended structure)作為感測的主要元件，然而 MEMS 的感測器則廣泛使用微結構作為感測的主要元件，把各種非電的物理量(例如：速度、加速度及振動)變換成結構的應變量，再轉換成電氣訊號的變化量，以進行量測。例如：微壓力計使用薄膜(diaphragm)結構，原子力顯微探針(AFM)則使用懸臂樑之結構。

### 3. 半導體製程製作與微機電微加工技術製作之差異

傳統由半導體製造技術研製之固態生醫元件，在材料的選擇上受限於半導體製程，有較少之變化。此外，幾何形狀上，受限於薄膜及傳統微影技術，也只能有固定之樣式。然而微機電之製造技術十分多樣，涵蓋有矽微加工技術、光刻鑄模技術、微精密機械加工技術等，使得所研製之元件的材料選擇及幾何形狀，變得多樣化。另外，在包裝上，因為 MEMS 的產品裝置，常需要超過除了與電源以外有關的外部接觸。MEMS 裝置在包裝方面，需要發展允許感測器對外界環境接觸感性增廣的能力，並且同時又要留意各式各樣惡劣之環境。傳統由半導體製造技術研製之固態生醫元件，則是用以積體電路為基礎的完全封密包裝。

## 三、微機電系統技術於生醫之應用

生醫工程對於現代化生醫技術之貢獻，所涵蓋的領域十分廣泛，舉凡應用基礎工程學理研究生物醫學之現象、研發生物替代用材料、人工臟器之研製，以及新醫療、生化分析儀器之發展等。而對於微機電系統納入生醫工程之應用層面，可大致分成兩方面：

- 取代型(replacement)

藉由微機電系統之特色，取代原有的生醫產品及技術。不僅維持原有生醫產品及技

術的功能，甚至加強其功能性。此外，也提昇生醫技術之品質、醫療產品更具人性化之需求，成本價格亦相對降低等。

- 創新型(new creation)

藉由微機電系統之特色，開創新的生醫技術及醫療產品，拓展原生醫工程所未能達到的極限及夢想。

在實際應用方面，本文則從下列三項領域來作介紹：

1. 非侵入性顯微手術與治療(non-invasive micro surgery and therapy)之應用 [7-12]

[取代型例子]

以內視鏡為例，以往內視鏡已經是醫療手術中的必備儀器，然而如何讓內視鏡體積更小，可以進入更微小的組織器官內，並且不需要留下明顯的切口疤痕，或者一主動性之顯微內視鏡(active microendoscope)亦是目前研發的重點[13,14]，如示意圖 1 所示，內含以形狀記憶合金為致動元件的致動器，可主動彎曲作動內視鏡導管本體，以移動鏡頭，如同一條眼鏡蛇。另外若尺寸更縮小，功能性更大下，可配合微機器人進入人體內，亦是長遠的目標，如圖 2 所示。

其次，以可吞進去監控偵測胃部生理狀況，如胃液 PH 值、胃壓及溫度，為例的無線電藥丸(radio pills or endoradiosondes)[15]，早在二十世紀 60 年代就研發，但普遍使用之工具仍以內視鏡或導管為主，主要受限於微製造技術未能發達，無法準確控制偵測藥丸的位置。然而藉由整合微感測器、微遙控器及積體電路的微機電製造技術，使其功能性更突破更實用，對於消化系統之監控診斷扮演重要的角色。同樣地，此裝置亦可結合微機器人及注射投藥系統一同作業。

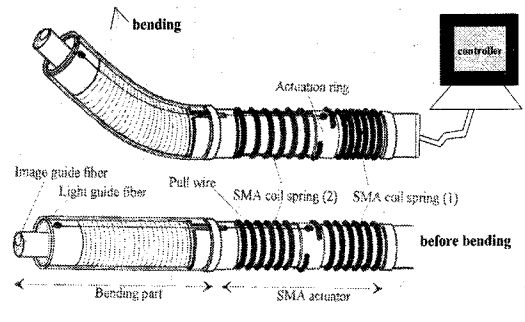
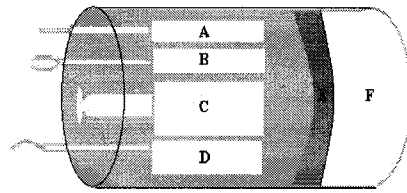


圖 1 主動性之顯微內視鏡

[創新型例子]

圖 2 呈現一台結合診斷、手術、治療於一體的微生醫機器人的示意圖，本體可藉由微導管方式引導進入人體內，或直接吞入或注射入人體內，之後再藉由遠控方式監控及操作。本體共分六區功能，F 區是提供動力源及帶動本體移動；E 區則是感測外界環境狀況，並將收集之組織液、血液、細胞分子等作分析診斷；D 區則包含顯微手術所需之工具[16]，可依控制器的命令執行手術；C 區為顯微內視鏡，是本體的眼睛，並收集紀錄外界狀況，供本體或體外操控者監視判斷用；B 區是微操縱器[17,18]，其末端可裝夾子或刺激探測針；A 區是微流體系統，可涵蓋微注射器及投藥器[19,20]。植入微注射投藥器，可汲取液體並進行生化分析，進而按照一定或即時所需要的藥量，在需要的位置注射出所需的藥劑。這對於長期慢性病患或偶發的中風高血壓等病症是一大福音。對於長途或長時間出國之病患而言，亦是一項突破性的醫療措施。當然這樣的生醫微機器人是與人體直接接觸的，所以安全及生物相容性是第一優先考慮。如今要完成這樣一台類似科幻的機器，因著微機電系統技術的開發，終將成為事實。



- A -> micro-fluidic system with flow meters, pumps, valves, channels, needles, etc. for programmable drug delivery or injection  
 B -> micro-manipulator devices with grippers, stimulating probes, etc.  
 C -> micro-active endoscopes  
 D -> micro-surgical tools with histoury, forceps, hooks, expanders, catheters, etc.  
 E -> micro-detector and analysis systems with pressure sensors, bio-chemical sensors, sensing probes, etc.  
 F -> micro-actuators with motors, turbines, etc. for movement

A wireless tele-controlled mobile micro-robot for minimal invasive surgery and therapy

圖 2 結合診斷、手術、治療於一體的微生醫機器人的示意圖

## 2. 人工臟器與組織(artificial organs and tissues)之應用

人工臟器與組織乃暫時或永久取代病變機能不全之自然臟器與組織。舉凡人工臟器方面，如人工心臟、人工肺臟、人工肝臟、人工腎臟及人工胰臟，以目前的產品而言已有相當的效能[21]。然而如何能將原有自然臟器之功能發揮到完全，並且可植入人體之內，將是人類長期研究的心願及挑戰，而微機電系統小型化及多功能化的特性，則是這方面技術發展之不二人選。舉例而言，人工胰臟乃需具備下列功能之元件：胰島素儲存、分泌及控制、血糖值分析。因此，若將下列微機電技術研發之元件整合成一系統，並且找到與生物相容之材料製作，則有一天將能植入體內。

其次，藉由結合活細胞與生物相容之鷹架(scaffolds)所製造的人工組織，來取代危險病變之器官組織，將被實現[22]。因為其中關鍵性的元件，如高解析的鷹架，可藉由微機電製造技術達成。此外，如微助聽器、人造鼻、植入神經刺激器(neural-stimulator)對視網膜復建及協助手指恢復觸覺之微壓力感測器[23-26]，都是微機電基數未來或現正開發應用之產品。

## 3. 微生物化分析及臨床診斷儀器(bio-physical-chemical analysis and clinical diagnostic microinstrument) 之應用

利用微機電技術開發之微生物化分析及臨診斷儀器，有下列特點：

減少分析所需之試劑(reagent)量及分析時間

- 可做局部(localized)，細胞階級的或次細胞(sub-cellular)階層之生化分析，並提高解析度。
- 可控制微小尺度下之實驗環境。

以下舉幾例作說明：

### ● DNA 直接檢測分析

細胞或生物體高分子或 DNA 等之直徑或長度大小，皆屬於次微米級以下。利用 MEMS 製造技術可製造出尺寸達到同樣等級之微機構，如掃描穿透式顯微鏡(scan tunneling microscopy, STM)、原子力顯微探針(atomic force microscopy, AFM) (如圖 9 所示)微偵測件之輸出，進行細胞類微小物體之檢測是非常可行的[27-29]，如核酸(nucleic acids)，蛋白質(proteins)，抗體(antibody)，基因(genes)等。應用其特性可完成二個細胞之融合或 DNA 之驗證(identification)及整列等工作。

### ● 微血壓計[30]

目前應用於生醫量血壓的方式可分為侵入式及非侵入式。非侵入式乃藉由皮膚外來進行，而侵入式又可分體外及體內接觸。體外乃適用針管插入血管，直接與血液接觸

量測。體內微血壓計可長期植入血管或組織器官中，直接檢測血壓或組織液壓之狀況，獲得第一手的資料，例如監控分娩過程中子宮內之壓力，此外亦可配合注射系統，監控血壓。這樣的檢測除可即時檢測外，並且也可以長期追蹤紀錄。

● 神經元或細胞組織微刺激針[31,32]

腦部或感覺器官之訊息，是經由神經細胞及神經纖維以電氣脈衝傳達之。此種脈衝可藉由刺入神經系統中或其附近之微探針陣列電極來檢出。在示意圖 3 中，在矽晶體之薄膜上製作之神經信號檢出微探針，結合了數位-類比轉換及控制電路。探針末端有數個檢出電極，由此檢測出的微細信號，經由其末端所裝設增幅器 (amplifier)，將信號資料倍增傳達至外界。亦可藉由探測針刺入細胞組織中做生化的檢測分析，並且藉由連接整合在同一晶片的分析電路，或連接遠端的分析儀器，立即做各式各樣的分析。此外，可在一陣列化(array)之針狀電極直接電氣信號刺激大腦皮質以調整腦細胞的活動。

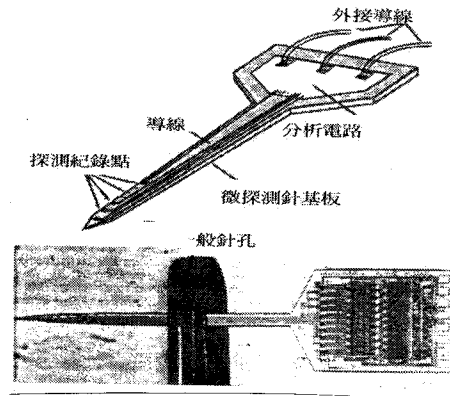


圖 3：神經或細胞組織元微探測針

此外，微神經電子介面或稱神經義肢(neuron-electronic interface, neuron prostheses)可植入監控生理能量(bio-potentials)及離子活動狀況(ionic activities)。結合微導管及微壓力感測器可監控心臟各部位之壓力。另外藉由微過濾器(microfilters)之製造可成為生物分子細胞之分離器[33]。

#### 四、作者研製之微夾子[4,5]

在本節中，我們提出一種新的操作原理和簡單的製造方法，以產生由電熱驅動側向位移運動的微夾子[3-5]。操作的原理乃根基於微構造中不同長度的兩支懸臂樑，經由加熱產生不對稱熱膨脹所致。此微夾子亦能藉由外界之升或降溫產生作動。微夾子的材質為多晶矽(polysilicon)，藉著簡單的面-體微細加工(surface-bulk micromachining)製作而成。本文所提出的微夾子，將能夠在挾持細胞分子或微組織的顯微手術或生化分析等的裝置上使用。

圖 4 展示本文所提出之電熱微夾子的基本概念設計。微夾子是由不同長度，但相同材料(熱膨脹係數)的兩支懸臂樑毗鄰連接而成，形成一致動臂(actuating arm)。微夾子之尺寸可依照不同的設計需求而定。本文以大約 1~3 微米寬，2~3 微米厚和長度約幾百微米作為範例。結構上層是為滲雜有磷的多晶矽材料，作為導電層。當通過電流的時候，在導電層將產生加熱作用，進而引起致動臂的升溫變化。藉由懸臂樑熱膨脹的結果，長懸臂樑比短懸臂樑產生較大的伸長量。這效應不只是由於兩懸臂樑之間的升溫不同( $\Delta T_1 > \Delta T_2$ )，而且也包括兩懸臂樑有不同的長度( $L_1 > L_2$ )所致。因此兩懸臂樑不相等的熱膨脹量，導致致動臂向比較短的懸臂樑彎曲作動。

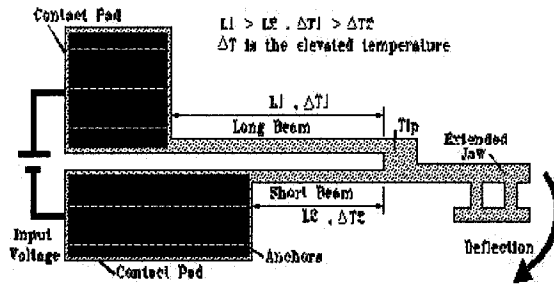


圖 4 電-熱微夾子結構及操作原理的示意圖。

圖 5(a)-(b) 顯示微夾子之熱反應(thermal response)分析。它預測在 10 V 的輸入電壓下，只需 30 ms 到達穩定的狀態。在輸入電壓移走之後，也大約在 30ms 內恢復起初狀態。圖 6 展示輸入電壓與抓力之間的關係。抓力是藉由以下的方法計算而得。假定將已指定重量的硬樣品夾在二個夾爪間，而夾爪仍保持在起始的狀態下。抓緊的力量剛好使得樣品不下滑。在夾爪和樣品之間的摩擦係數假定為 0.5。總之，輸入直流電壓小於 10V 可產生 20 微米的工作位移量，2.8 uN 的抓力，而熱消耗大約 0.6 mJ，最高溫度小於 600°C。微夾子基本固有的頻率是 43830 赫茲，這顯示我們能藉著在這頻率以下的連續電脈衝驅動微夾子，而不產生共振現象。

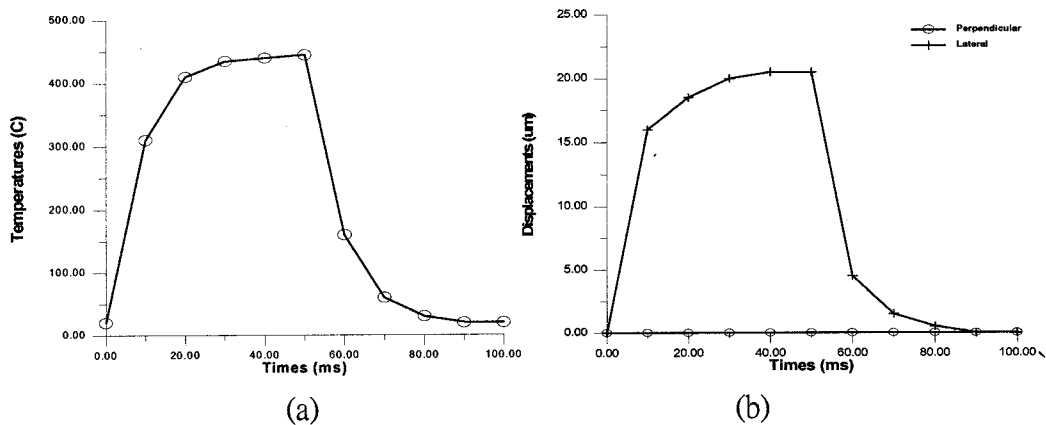


圖 5 以 10V 輸入電壓加熱 50 ms 之後，再關閉電源冷卻 50 ms 的(a)溫度變化，和(b)夾爪的位移變化。

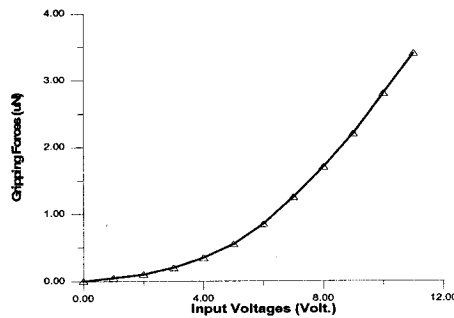


圖 6 抓力相對輸入電壓的關係。

爲了要使微夾子產生升溫變形，直流電乃透過探針(probe)壓觸在接觸墊板上。夾爪的位移可經由被裝在顯微鏡目鏡上的分離卡尺量測，或者藉由影像截取(image capture)軟體抓取影像後再做量測。圖 7 顯示實驗結果和 FEM 分析結果之間的比較。我們發現平均錯誤大約 8%(高溫誤差較大之緣故)。這理由是目前多晶矽在高溫下的材料性質尚未確知，所以 FEM 模擬中使用的材料

性質的數值與實際高溫下材料的特性不是完全一致。微夾子的尺寸可在切片之後，經由 SEM 測量。圖 8 及圖 9 顯示一個由 SEM 及光學顯微鏡拍照的微夾子。

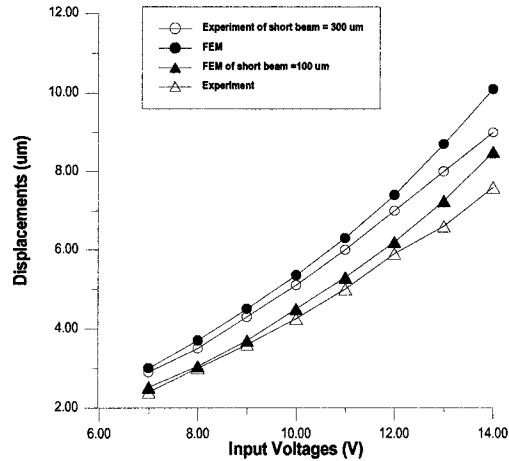


圖 7 在不同的輸入電壓下，夾爪的位移量。(樑的寬度和厚度分別是 2.8 微米及 2 微米，而長短樑的長度是 750 微米和 300 微米，而夾爪的長度是 40 微米。)

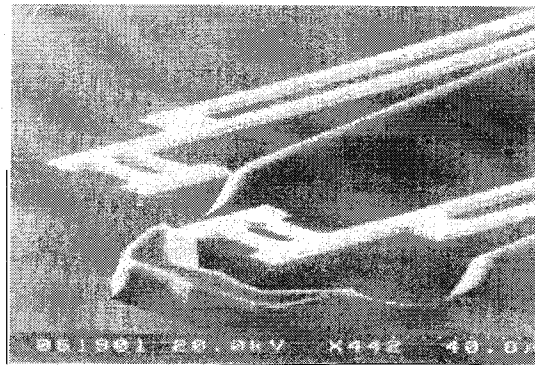
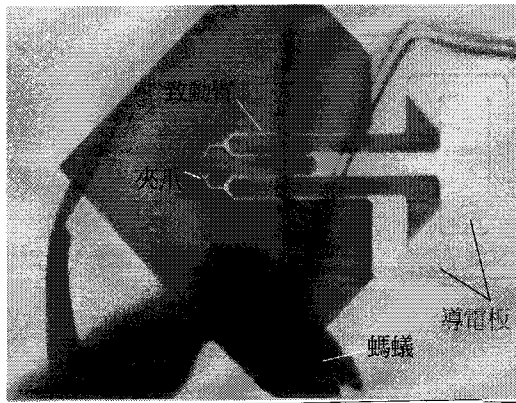


圖 8 SEM 拍攝的多晶矽微夾子。



(a)



(b)

圖 9 (a) 光學顯微鏡拍照的單晶矽微夾子與螞蟻的對比；(b) SEM 拍攝的單晶矽微夾子

### 五、未來的展望及結論

在可預期的未來，微機電技術對於生醫科技的影響是無遠弗屆。本文所介紹之微機電系統技術在生醫之應用，只是所有生醫微系統技術的一小部份。藉由本文之拋磚引玉之作用，期待在國內有更多這方面之研究成果發表。

## 參考資料

1. [Petersen, Kurt](#) Biomedical applications of MEMS IEEE Technical Digest - International Electron Devices Meeting Dec 8-11 1996, p. 239-242
2. [Tritto, Joseph](#); [Brett, Peter](#) Biotronics, medtronics, micromedtronics: A new terminology in MIMETS. The non-linear generation of mechatronic systems in medicine and surgery Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings 2 Oct 13-Oct 16 1999, p. 899
3. Editorial, Guest; [Dittmar, A](#); [Najafi, K](#) Special topic section on microtechniques, microsensors, microactuators, and microsystems - IEEE Transactions on Biomedical Engineering 2000 - volume 47 - issue 1, p.1-2
4. [潘吉祥](#), [徐文祥](#), “水平式微熱致動器”, 電子月刊第四卷第十二期, 十二月號, 1998.
5. [C. S. Pan](#) and [WenSyang Hsu](#), “An Electro-thermally Driven Polysilicon Microgripper”, ICARCV'96 Fourth, International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Nanyang Technological University, Singapore, Dec. 3-6.
6. [Karube, Isao](#) Micro biosensors IEEE Proceedings of the Annual Conference on Engineering in Medicine and Biology pt 1 Nov 1-4 1990, p. 5-6
7. [Fujimasa, Iwao](#) Future medical applications of microsystem technologies International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components Oct 21-23 1992, p. 43
8. [Schaldach, M.](#); [Toepper, M.](#); [Mueller, J.](#); [Starke, M.](#); [Tessier, T.](#); [Ehrmann, O.](#); [Reichl, H.](#) Deployment of state-of-the-art technology for implantable medical systems Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering v 3582 Nov 1-4 1998, p. 755-758
9. [Edell, David J.](#); [Kuzma, Januz](#); [Petraitis, Del](#); [Edell, David J.](#) Implantable electronic systems of tomorrow Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings v 5 Oct 31-Nov 3 1996, p. 2174-2176
10. [Flick, B B](#); [Orglmeister, R A](#) Portable Microsystem-Based Telemetric Pressure and Temperature Measurement Unit IEEE Transactions on Biomedical Engineering 2000 - volume 47 - issue 1, p.12- 16
11. [Tendick, Frank](#); [Sastry, S. Shankar](#); [Fearing, Ronald S.](#); [Cohn, Michael](#) Applications of micromechatronics in minimally invasive surgery IEEE/ASME Transactions on Mechatronics v 3 n 1 Mar 1998, p. 34-42
12. [Hunter, Ian W.](#); [Lafontaine, Serge R.](#); [Brenan, Colin J.H.](#); [Jones, Lynette A.](#) Medical robots and micro machines IEEE Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science Oct 4-6 1995, p. 25-30
13. [Maeda, Shigeo](#); [Abe, Kazuhiro](#); [Yamamoto, Keisuke](#); [Tohyama, Osamu](#); [Ito, Hirotaka](#) Active endoscope with SMA (shape memory alloy) coil springs Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Feb 11-15 1996, p. 290-295
14. [Ikuta, Koji](#); [Nokata, Makoto](#) Two-lead-wire drive for multi-micro actuators Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation v 3 May 10-May 15 1999, p. 2378-2384
15. [Uchiyama, Akihiko](#) Endoradiosonde needs micro machine technology IEEE Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science Oct 4-6 1995, p. 31-37
16. [Pisano, Albert P.](#) Biomedical applications of MEMS: A look at grippers, cochlear implants, micro needles and microchemical assay devices American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC v 57-2 Nov 12-17 1995, p. 949
17. [Li, Luming](#); [Wang, Liding](#) Micromanipulator system in MEMS Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology Dec 5-9 1994, p. 665-668



18. [Ikuta, Koji](#); [Nokata, Makoto](#); [Aritomi, Satoshi](#) Biomedical micro robots driven by miniature cybernetic actuator Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems Jan 25-28 1994, p. 263-268
19. Brazzle, John; Papautsky, Ian; Frazier, A Bruno Theme Section - Micromachined Needle Arrays for Drug Delivery or Fluid Extraction IEEE Engineering in Medicine and Biology 1999 - volume 18 - issue 6, p.53-58
20. [Henry, S.](#); [McAllister, D.V.](#); [Allen, M.G.](#); [Praisnitz, M.R.](#) Micromachined needles for the transdermal delivery of drugs Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Jan 25-29 1998, p 494-498
21. 李昭仁 化學工程與人工臟器之發展 化工技術第二卷第十期 80-83 頁
22. Sangeeta N. and Christopher S. Chen Tissue Engineering at the Micro-Scale Biomedical Microdevices 2:2 1999, p.131-144
23. Tanghe, S.J., and K.D. Wise. 1992. "A 16-Channel CMOS Neural Stimulating Array." IEEE Journal of Solid-State Circuits, 27, December, p.1819-1825.
24. [Rutten, Wim L.C.](#); [Smit, Jos P.A.](#); [Frieswijk, Theo A.](#); [Bielen, Jeroen A.](#); [Brouwer, Anne L.H.](#); [Buitenweg, Jan R.](#); [Heida, Ciska](#) Neuro-electronic interfacing with multielectrode arrays IEEE Engineering in Medicine and Biology v 18 n 3 1999, p 47-55
25. [Clements, Mark](#); [Vichienchom, Kasin](#); [Liu, Wentai](#); [Hughes, Chris](#); [McGucken, Elliot](#); [DeMarco, Chris](#); [Mueller, Jeff](#); [Humayun, Mark](#); [De Juan, Eugene](#); [Weiland, Jim](#); [Greenberg, Rob](#) Implantable neuro-stimulator device for a retinal prosthesis Digest of Technical Papers - IEEE International Solid-State Circuits Conference Feb 15-Feb 17 1999 p 216-217
26. [Beebe, David J.](#); [Denton, Denice D.](#); [Radwin, Robert G.](#); [Webster, John G](#) Silicon-based tactile sensor for finger-mounted applications. IEEE Transactions on Biomedical Engineering v 45 n 2 Feb 1998, p 151-159
27. Tortonese, Marco Cantilevers and Tips for Atomic Force Microscopy IEEE Engineering in Medicine and Biology 1997 – vol. 16 - issue 2 P.28 – 33
28. Radmacher, Manfred Measuring the Elastic Properties of Biological Samples with the AFM IEEE Engineering in Medicine and Biology 1997 – vol. 16 - issue 2 P.47 – 57
29. Fauver, M E; Dunaway, D L; Lilienfeld, D H; Craighead, H G; Pollack, G H Microfabricated Cantilevers for Measurement of Subcellular and Molecular Forces IEEE Transactions on Biomedical Engineering 1998 – vol. 45 - issue 7 P. 891 – 898
30. Leo O'Connor, "Tiny Devices Take on Tough Task in Biomedicine", Mechanical Engineering, May, 1993, p.62-67
31. Carsten W. Mundt, H. Troy Nagle Application of SPICE for Modeling Miniaturized Biomedical Sensor System IEEE Trans. on Biomedical Engineering vol. 47 no. 2 2000 p.149-154
32. Lin, L; Pisano, A P Silicon-Processed Microneedles IEEE Journal of Microelectromechanical Systems 1999 - volume 8 - issue 1
33. [Maher, Michael](#); [Wright, John](#); [Pine, Jerome](#); [Tai, Yu-Chong](#) Microstructure for interfacing with neurons: The neurochip Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings v 4 Oct 29-Nov 1 1998 p 1698-1702