

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

微型諧振陀螺儀軸對稱薄殼之設計與測試(II)

The Design and Testing of Axisymmetric Thin Shell for Micro Resonator Gyroscope (II)

計畫編號：NSC 87-2218-E-002-019

執行期限：86 年 8 月 1 日至 87 年 7 月 31 日

主持人：周元昉 國立台灣大學機械工程研究所

一、摘要

本計畫針對第一期計畫初步設計之直徑 1000mm 殼厚 2mm 之半球殼多晶矽陀螺儀，探討此陀螺儀驅動與感測方法，並針對非理想軸對稱情況，研究其行為差異與平衡補償方法。

在功能上，軸對稱殼式陀螺儀不僅能用於直接轉速量測，亦能用於直接轉角量測；本文發現，在直接轉速感測方法中，強制平衡式在反應時間與感測線性度上的表現均優於開放迴路式；而在直接轉角感測方法中，週期驅動式的可行性則較脈衝驅動式高；此外，直接轉角感測可避免因高感測門檻所帶來的量測限制，以及減少因積分轉速結果所引發的漂移問題。

在驅動、感測與平衡補償上，本計畫採用具有高靈敏度、低能量消耗與熱漂移現象較不顯著的電容式，再結合諧振本體高品質因子的特性，使得此陀螺儀系統有相當優異的表現。

關鍵詞：軸對稱、陀螺儀、諧振、微加工、多晶矽

Abstract

A 2mm thick, 1000mm in diameter polysilicon HRG is the result of preliminary design phase. As to the functions, axis-

symmetric resonant gyroscopes can be used to directly measure not only the rotation rate but also the rotation angle. In the rate sensing modes, force-to-rebalance method performs better than the open-loop method in the aspects of response time and sensing linearity. Moreover, in the whole angle modes, the periodic excitation method is much more practicable than the impulse excitation method. Besides, whole angle modes are better than the rate sensing modes because they can reduce the drift due to integration and avoid encountering the restriction from sensing threshold.

Keywords: Axisymmetry, Gyroscope, Resonant, Micromachining, Polysilicon

二、緣由與目的

狹義的陀螺儀係指運用角動量守恆的原理，將軸對稱轉子置於框架上來量測物體轉角或角速度的裝置。因可量測轉角或角速度的原理不少，以這些原理發展出的各種量測轉角或角速度的裝置亦泛稱為陀螺儀。在各種形式的陀螺儀中，振動式陀螺儀[1,2,3,4,5]是一個很成功的設計，其形式可分為振動樑式、音叉式、單一或雙加速度計組合式，振動殼式和旋轉壓電單晶

式。其中以振動殼式的表現最佳。此型中有一種名為半球子諧振陀螺儀的性能優異，可以使用在慣性導引系統中。振動殼式陀螺儀的構造較簡單，無轉動機構，不須使用軸承，所以很適合引用目前蓬勃發展的微加工技術以批次方式大量製造，如此可得尺寸小，價格低且具中高級性能的產品。除可取代現有許多其他型式陀螺儀的地位之外，並可開拓更廣闊的應用空間，故成為許多研究機構積極開發的目標。

科氏力為振動式陀螺儀運作的基礎，其大小正比於轉速，若能量取科氏力則可反推轉速。因科氏力無法直接讀取，故利用特定的彈性體裝置使科氏力作用於彈性體，經由彈性體的變形即可測得物體的轉角或角速度。在使用時，此等彈性體以一個模態振動，當物體轉動時，會產生垂直於振動速度方向的科氏力，使彈性體發生另一方向的振動，為使此由科氏力引發的振動易於觀測，所有的振動式陀螺儀均利用兩個固有頻率相同的模態，分別稱為參考模態與感測模態，其振形均垂直於轉軸，參考模態以外力激發振動，而科氏力則引起感測模態的振幅，由感測振幅與參考振幅之比或彈性體振動的幾何形狀即可得知待測物體的角速度。

因振動式陀螺儀的輸出為振幅，所以除了科氏力之外所有會改變感測模態振幅的因素都將影響陀螺儀的性能，這些因素可概分為改變參考模態或感測模態的特性和其他作用力兩類，前者如加工精度，溫度變化和固定方式，後者如基座振動，如何減少這些因素是設計振動式陀螺儀機械結構的重要考量。因較大的感測振動振幅有利於觀測，所以通常藉由(a)使參考與感測模態有相同的固有頻率，與(b)使阻尼比儘量小等方法達成之。

對許多型式的振動陀螺儀而言，因為加工精度，機件老化，溫度變化，基座缺陷和機械耦合等因素要有兩個固有頻率相同的模態是相當困難的。

在各種型式的振動陀螺儀之中，軸對稱振動殼式陀螺儀理論上可存在兩個固有頻率完全相同的模態，只要保持軸對稱的幾何形狀就可使感測與參考模態的固有頻率相同，在製造上較易達成，其精確度亦較其他型式者為高。

本計畫所研究的對象是微型諧振陀螺儀的機械結構、靜電驅動、補償、以及感測模型，期望能設計出一個能夠以微加工技術製造且性能優良的陀螺儀；其餘電路與製造部份則分別由另外的子計畫執行。

三、研究方法

本計畫經第一期計畫的研究知道軸對稱薄殼陀螺儀之交互靈敏度極低；對適當支撐之半球子諧振陀螺儀而言，其參考振型之節線的進動速度與剛體轉速的比值為0.281，此比值雖會隨對稱殼之幾何條件不同而有所改變，但其變動量不大。經過初步設計階段，得到一直徑1000mm殼厚2mm之多晶矽半球薄殼，在由適當大小的基座固定時的低頻振動模態示如圖1

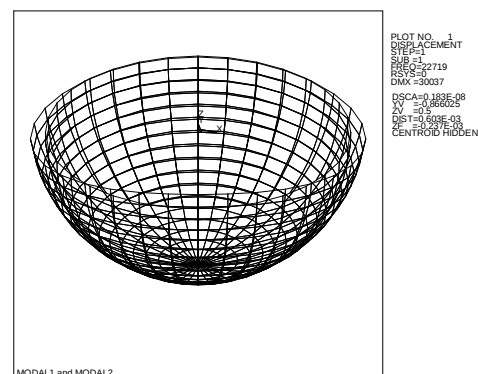


圖1 多晶矽半球殼之第1,2模態

在靜電力的驅動與電容感測方面，在細部設計利用有限元素法作靜電場模擬如圖 2，因薄殼與基板之間距與薄殼半徑的比例懸殊，在分析時運用遠場與近場的技巧將電極板與薄殼間之作用力與電容變化計算出，其電場分析的結果發現靜電力很小，必須利用共振之特性始能維持顯著的振幅，若 $Q=10000$ 時(Q 值大小可由包裝時之真空度決定，10000 很容易達成)，在 5V 的驅動電壓之下振幅可達 $0.5\mu m$ 以上，因靜電力之驅動方式與概念設計建議之兩種感測方式皆有所出入，因此必須加以修改成一種混合感測方式來達到量取轉動數據的目的。

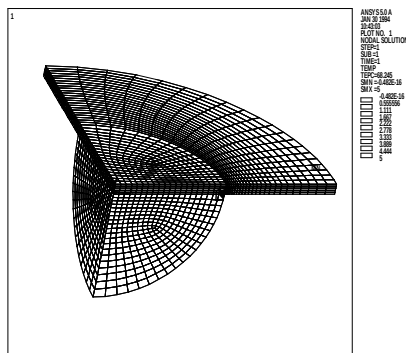


圖 2 電場全域分析模式

微型半球殼陀螺儀

以前述的分析討論作為基礎，設計一微型半球殼陀螺儀，薄殼部分將選用多晶矽為材料，其機械性質如下：

密度 $\rho_0 = 2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，

楊式係數 $E = 1.61 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ，

帕松比 $\nu = 0.226$ ，

熱膨脹係數 $\alpha = 2.6 \times 10^{-6}$ 。根據薄殼固有頻率及固有振形的考量，決定出薄殼尺寸為：

薄殼平均直徑： $R_s = 500 \text{ mm}$

薄殼厚度： $t_s = 2 \text{ mm}$

此陀螺儀採用 32 個如圖 3 與 4 位於半徑 $R_e = 503 \text{ mm}$ 處的電極來擔任驅動、感測

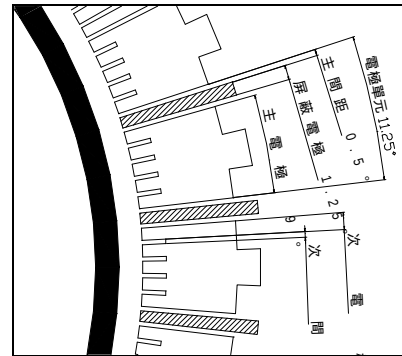


圖 3 電極結構俯視圖

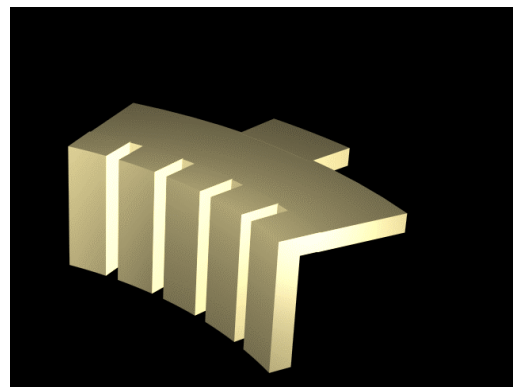


圖 4 主電極形狀

與平衡的角色，因此每電極單元所佔之角度為 11.25° ；至於其他細部尺寸如下所列：

{1} 電極單元角度： $q_{\text{electrode_unit}} = 11.25^\circ$

電極單元個數： $n_{\text{electrode_unit}} = 32$

a. 主電極： $q_{\text{main_electrode}} = 9^\circ$

(i) 次電極角度： $q_{\text{sub_electrode}} = 1.4^\circ$

次電極個數： $n_{\text{sub_electrode}} = 5$

(ii) 次間距角度： $q_{\text{sub_gap}} = 0.5^\circ$

次間距個數： $n_{\text{sub_gap}} = 4$

b. 屏蔽電極角度： $q_{\text{shield}} = 1.25^\circ$

c. 主間距角度： $q_{\text{main_gap}} = 0.5^\circ$

主間距個數： $n_{\text{main_gap}} = 2$

{2} 電極高度： $h_e = 35 \text{ mm}$

{3} 電極厚度： $t_{\text{electrode}} = 2 \text{ mm}$

{4} 電極與薄殼起始間距： $d_{\text{gap}} = 2 \text{ mm}$

殼式陀螺儀通常是利用環狀波數為 2 的固有頻率來操作，因此在驅動過程中，

首要條件就是只激振出此固有模態，而操作頻率與下一模態之固有頻率應避免成倍頻關係。

至於固有頻率對感測的影響主要是出現在轉速感測模式中，影響因素包括：

1. **靈敏度**：當環狀波數為二的固有頻率愈低，轉速感測模式的靈敏度愈高。
2. **轉速上限**：轉速感測模式裡原節點之振幅要與轉速成正比關係必須在滿足小轉速的要求下才能成立，因此當固有頻率愈高，轉速的上限愈高，愈有利於高轉速的量測。

品質因子對於諧振體的影響有下列幾點：

1. **頻寬**：當物體在轉動時，固有頻率會隨轉速而分離，因此當品質因子小時，系統的頻寬將會增大，此時，縱使在頻率追蹤鎖定的控制上沒有發揮明顯功效下，仍能維持激振點的振幅，不至於有驟減的情況發生。然而過大的頻寬也會將不必要的雜訊放大。
2. **靈敏度**：如同固有頻率一般，品質因子主要是影響轉速感測模式，由於在此模式下，感測點的振幅會正比於品質因子，所以當品質因子愈大，轉速感測模式的靈敏度也就愈高。此外，對於一定的位移感測解析度下，品質因子愈大轉速感測的解析度愈佳。
3. **轉速上限**：當品質因子愈小時，轉速感測的上限愈高。
4. **時間常數**：雖然品質因子對於轉角感測模式的靈敏度無直接的影響，但在諧振區間中，薄殼乃處於自然諧振狀態，因此當品質因子愈大，諧振體的時間常數值愈大，諧振區間也就能加長，進而減少驅動期間誤差累積的問題。

而在本陀螺儀中，品質因子的大小主要取決於諧振體所採用的材質，以及空間中氣

體的壓力。由於矽材本身的品質因子相當高，約在 10^4 至 10^5 間，所以陀螺儀封裝後內部的氣體壓力就成為整個系統品質因子的影響關鍵。若要有較高的品質因子，諧振體就須處在較高真空度的環境中。

不論是轉速感測或轉角感測模式，角度增益值愈大，諧振體的靈敏度就愈高，且在一定量的位移感測誤差下，角度增益值愈大，轉速或轉角的判讀誤差愈小。不過欲提昇角度增益值，則須減少諧振體基底固定角度，但如此卻會伴隨著對線加速度敏感之搖晃模態的固有頻率降低，進而造成誤差的產生，同時也會增加製程的困難度。

對於感測來說，電極與薄殼間電容等效面積愈大，愈有利於感測，不僅感測的靈敏度可提昇，且在一定量的電容變化感測誤差下，位移量的感測誤差值會較小，進而減低轉速或轉角的判讀誤差。

當以靜電能的觀點來看驅動時，若在一定電壓情形下，電極所能提供的能量約略正比於電容變化值，以及正比於電位差的平方，所以，電極與薄殼間電容等效面積愈大，所需提供的驅動電位差就愈小，愈符合感測器低耗能的需求。

由於系統的品質因子主要是由封裝過程的真空度所決定，目前較難以掌握此值的大小。以下將以品質因子=2500 為例，來對系統表現作評估。

1. **固有頻率 ω_n ：**

環狀波數為二之模態的固有頻率(第

一、第二模態)：22720 Hz

環狀波數為三之模態的固有頻率(第

三、第四模態)：39605 Hz

對線加速度敏感之搖晃模態固有頻率(第七模態)：119580 Hz

2. **品質因子 Q ：2500 (阻尼比 z_n ：**

2×10^{-4})

3. **時間常數 t ：0.22 sec**

4. **頻寬 $B.W.$ ：22715 Hz ~ 22724 Hz**

5. 旋轉時固有頻率變化：如圖(7-7)所示
6. 角度增益值 A_g ：0.278
7. 等效電容值 C_0 ：
以有限元素法所求得之單一電極等效電容值：12.3 femtofarad
8. 感測電極(等效電容變化值 ΔC 與位移量 $u_r(q)$ 關係)：
等效電容變化值 ΔC 與位移量 $u_r(q)$ 關係，如圖(7-8)所示。
9. 採樣頻率：(22720×8) Hz
10. 驅動電極(靜電能與消耗能)：
對於驅動電極來說，在啟動陀螺儀時，每週期內所提供之靜電能要足夠彌補因阻尼而消耗掉的能量。而在達穩態時，每週期內所提供之靜電能則要恰好與因阻尼而消耗掉的能量相等。以單一驅動電極為例，每週期所提供之靜電能與由阻尼而消耗掉的能量之關係，可知若平衡時薄殼最大位移量為 $2\mu\text{m}$ ，則電壓振幅值約為 1.7volt。
11. 解析度：
若在線性近似情形下，依據前一章節所介紹的解析度分析，當振形最大振幅 U_r 為

$$U_r = \frac{1}{10} d_0 = 0.2\text{mm}$$
 且電容感測解析度與起始電容比值為 b 時，此時系統轉速感測解析度為

$$\alpha\Omega_z \approx 514b \text{ (rad/sec)} \approx 29450b^\circ/\text{sec}$$
 在接近節點處之角度判讀解析度為：

$$\alpha\Theta(t) \approx \frac{17.986}{e^{-0.4544t}} b \text{ (rad)} \approx \frac{1030}{e^{-0.4544t}} b \text{ (deg)}$$

$$\alpha\Theta(t) \approx 48.89b \text{ (rad)} \approx 2801b \text{ (deg)}$$
 由於一般陀螺儀對於轉速感測解析度的要求為 $0.1^\circ/\text{sec}$ 至 $1^\circ/\text{sec}$ ，所以，上述結果似乎不近理想；因此，若能提高封裝時的真空度，使品質因子提高至 25000，則時間常數 t 可增加至 2.2 sec，且系統轉速感

測解析度改善為：

$$\alpha\Omega_z \approx 51b \text{ (rad/sec)} \approx 2945b^\circ/\text{sec}$$

而在極接近節點處之角度判讀解析度為：

$$\alpha\Theta(t) \approx \frac{17.986}{e^{-0.4544t}} b \text{ (rad)} \approx \frac{1030}{e^{-0.4544t}} b \text{ (deg)}$$

$$\alpha\Theta(t) \approx 48.89b \text{ (rad)} \approx 2801b \text{ (deg)}$$

此時，只要電容辨識解析度可達 1attofarad，則系統轉速感測解析度將為 $0.24^\circ/\text{sec}$ ；至於在轉角感測模式下，當諧振時間長達時間常數 2.2 sec 時，在極接近節點處之轉角判讀解析度為 $0.228(\text{deg})$ 。

轉速感測模式與轉角感測模式

由於轉速感測模式與轉角感測模式的操作方法不同，因此各有其優缺點，也因為這些優缺點的存在，使得其適用的環境狀況不同。

轉速感測法。轉速感測模式包括了開放迴路式與強制平衡式，這兩種感測模式的共同優缺點如下：

優點：

只要未旋轉前兩模態所對應的固有頻率與固有振形相同，此模式的運作就能發揮極大功效；換言之，在轉速感測模式下，對於軸對稱的要求較不嚴格。

就諧振體而言，並無感測下限存在。

驅動時僅需在固定點施予固定振幅之諧和力激振，因此在振幅控制上較為簡單。

易於以平衡電極調整兩固有頻率之值，進而使其相等。

缺點：

1. 諧振體的靈敏度受到多個參數影響，包括角度增益值、品質因子(或阻尼比)及固有頻率，所以設計時須多方面的考量。

2. 在極小轉速時，原節點振幅與激振

點振幅的比值 $4A_g \frac{Q}{W_n} \Omega_z$ 很小，若

再加上電容感測的門檻限制，轉速感測將會有其下限。

3. 由於是利用激振點振動達穩態時，量測感測點振幅或強制平衡力量值來求得轉速，所以激振點的振幅控制也就格外重要。

開放迴路式與強制平衡式的比較：

關於此二種感測模式間的差異主要有兩點，一為反應時間的不同，二為判讀資料來源不同。關於反應時間方面，由於強制平衡式相當於是在開放迴路式上加一回授控制，以促使原節點處振幅為零，所以藉由控制器的參數調整，將可使其反應時間縮短。至於判讀資料來源方面，強制平衡式是利用強制平衡力與驅動力的比值作為轉速判讀依據，和開放迴路式相較，其免除了面對位移量感測時電容變化量值的非線性問題。

轉角感測模式。轉角感測模式包括了脈衝驅動式與週期驅動式，兩者的共同優缺點如下：

優點：

1. 可直接作轉角感測，免除了積分所導致的誤差累積問題。
2. 諧振體的靈敏度僅受到角度增益值影響，而角度增益值主要是由薄殼基底固定角度決定，所以與品質因子及固有頻率無直接而明顯的關係。
3. 就諧振體而言，並無感測下限存在。
4. 由於僅須作振形相角的量測，因此只要適當選取感測點，即能有效避免電容感測門檻的限制；且在一定的電容感測誤差下，當選擇的量測點位移量愈大，相角判讀誤差就愈小。

5. 振形的振幅大小並不會直接影響相角的判讀，所以除了在驅動區間外，均以自由諧振狀態運作。

缺點：

1. 軸對稱性需十分良好，才能產生等進動角速度的現象；且在判斷振形相角時，才不至於因不理想的振形而導致相角判讀誤差產生。
2. 若有非軸對稱性存在時，難以用有限個平衡電極來完成振形的補償，此時陀螺儀行為的掌控較困難，且須透過校正程序來作判讀上的修正。
3. 品質因子雖對諧振體的靈敏度無明顯影響，但愈小的品質因子代表在諧振區間內振幅衰減的愈快，因此兩次驅動時間的間距就必須縮短。

脈衝驅動式與週期驅動式之比較：

1. 當以脈衝驅動時，此時輸入之脈衝的頻寬須略大於環狀波數為二之固有頻率且遠小於下一模態之固有頻率，所以在脈衝訊號輸入驅動電極前，可能需先經一濾波器，以達到前述要求。此外，脈衝驅動式對諧振體提供的能量較難以掌控，所以在實際使用時穩定度可能較週期驅動式差。
2. 在週期驅動式中，需結合 Kalman filter 來作振形相角的預估，再利用兩個電極組的配合激振，以線性組合的方式得到所要的振形，因此，驅動程序遠複雜於脈衝驅動式。
3. 對於週期驅動式來說，在一特定的量測期間內，若品質因子較小，則相鄰兩次驅動時間的間距需縮短，進而造成驅動區間所佔的比例增加，如此一來，在驅動期間所產生的誤差總累積量也就會跟著增加。

電極

電極在整個系統中所扮演的角色在於驅動、感測與平衡；就驅動來說，由於靜電力本身非線性的影響，所以驅動電壓應盡量趨於單純化，例如：方波的選用；且為避免 Pull-in 的現象產生，激振點振幅應控制在原間距的百分之十以內。再就感測來說，因為電容具有非線性的特質，所以只有在諧振體振幅小時，電容變化值不大的情況下，才較接近於線性，當然此時電容感測也就較為困難。至於平衡補償，乃是利用電容等效於負值彈簧的特性來運作，不過在實際補償調整時，需配合補償控制迴路，才能有效的將兩模態固有頻率調至相等；然而由於平衡電極的個數有限，所以對於振形的補償較難達成。

控制迴路

隨著感測模式的不同，控制迴路所需的功能也有所差異；不過頻率追蹤、振幅控制、補償控制以及轉速或轉角的判讀等均為陀螺儀控制迴路中必備的功能，而在這些控制迴路中，往往是採用 PI 控制，其中 P 控制參數主要用於調整迴路的頻寬，至於 I 控制參數則是一方面維持迴路的穩定性，另一方面減少穩態誤差。透過這些迴路與諧振體的結合，將構成整個陀螺儀系統，以達到感測的目的。

陀螺儀的特性常數

在了解陀螺儀各部分的運作原理後，最重要的就是透過特性常數來獲知此陀螺儀的表現等級。就其整體的特性來考量，不論是在轉角或轉速感測模式運作下，較大的角度增益值、電極高度以及品質因子均是增進微型殼式陀螺儀表現必備的條件。但由於其他條件的考量，諸如對線加速度的敏感程度、製程上的可行性等，使

得諧振體或電極的尺寸設計上需多方考量。由先前的分析可知，當品質因子提高到 25000 時，系統的時間常數將可到達 2.2sec，此時只要電容感測解析度為 attofarad，則轉速感測模式的解析度為 $0.24^\circ/\text{sec}$ ；至於轉角感測模式，當諧振時間到達時間常數 2.2 sec 時，於極接近節點處之轉角判讀解析度為 $0.228(\text{deg})$ ，此外，若與環狀殼式陀螺儀之 sub-attofarad 以下的電容感測解析度相比，此時 attofarad 的感測電路設計應較為容易。在電路中最困難的地方就在於微小電容變化值的感測，根據目前的模擬資料可知，平均電容值約為 10 femtofarad，因此若要使感測解析度提高，最好能辨識 1attofarad 以下的電容變化值，且為減低寄生電容所導致的誤差影響，將需與諧振體製程結合，在此結合的過程中，彼此間的搭配也就成為另一重要課題。此外，關於控制迴路部分的設計也是有待努力的地方，由於操作模式有切換的可能，所以除了如前述應儘量採用單一電極運作外，控制迴路的安排也要具有彈性，以因應此一情況的需求。

動態特性測試

針對半球薄殼之動態特性測試，設計出一使用電擊的底座激振裝置，此裝置分為載台與基座兩部份，載台主要目的在承載待測物並容許在一特定之自由度運動，

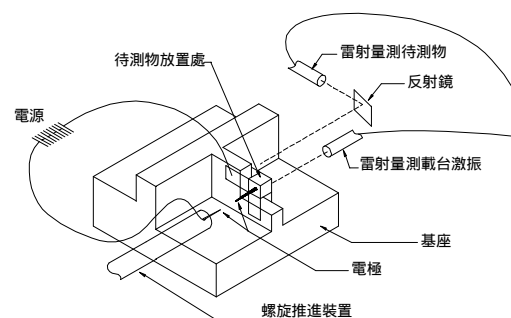


圖 5 動態特性測試裝置
基座則為載台附著之處。圖 5 為動態特性

量測裝置組立之情形，經測試證實激振頻寬超過 100 kHz，可滿足此陀螺儀以及同一頻寬範圍之各種微加工結構物動態測試之需。

Gyroscope,” *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, South Carolina, pp. 213-220, June 1994.

四、結論

軸對稱殼式陀螺儀不僅能用於直接轉速量測，亦能用於直接轉角量測；本研究發現，在直接轉速感測方法中，強制平衡式在反應時間與感測線性度上的表現均優於開放迴路式；而在直接轉角感測方法中，週期驅動式的可行性則較脈衝驅動式高；此外，直接轉角感測可避免因高感測門檻所帶來的量測限制，以及減少因積分轉速結果所引發的漂移問題。

在驅動、感測與平衡補償上，本計畫採用具有高靈敏度、低能量消耗與熱漂移現象較不顯著的電容式，再結合諧振本體高品質因子的特性，使得此陀螺儀系統有相當優異的表現。

五、參考文獻

- [1] Soderkvist, Jan, “Micromachined Gyroscopes,” *Sensors and Actuators A*, Vol. 43, pp. 65-71, 1994.
- [2] Orlosky, Scott D. and Morris, Harold D., “A Quartz Rotational Rate Sensor,” *Sensors*, pp. 27-31, Feb. 1995.
- [3] Maenaka, K. and Shiozawa, T., “Silicon Rate Sensor Using Anisotropic Etching Technology,” *Digest of Technical Papers, Transducers '93*, pp. 642-645, June 1993.
- [4] Maenaka, K. and Shiozawa, T., “A Study of Silicon Angular Rate Sensors Using Anisotropic Etching Technology,” *Sensors and Actuators A*, Vol. 43, pp. 72-77, 1994.
- [5] Putty, Michael W. and Najafi, Khalil, “A Micromachined Vibrating Ring