

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

輕量慣性量測系統之研發

The Development of a Light Weight Inertial Measurement System

計畫編號：NSC 88-2745-E-002-001

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：盧中仁 執行機構及單位名稱：國立台灣大學機械工程學系

一、中文摘要

本計畫研製以六個微加速度計組合成慣性量測系統。計畫內容包括微加速度計製做、系統設計與製做、具溫度補償功能的電源電路設計、類比信號處理、數據處理求取位置與姿態。除製做微加速度計的進度落後之外，其餘皆依進度完成，且經實物檢測或計算機模擬，證實行為符合需求。

關鍵詞

微加速度計、位置、姿態、慣性量測系統

Abstract

The object of this project is to develop an inertial measurement system consisting of six micro accelerometers. Tasks of the project include fabrication of micro accelerometers, system design and fabrication, temperature compensated power supply circuit design, analog signal conditioning, and data processing for obtaining trajectory and attitude. All tasks are carried out to schedule except micro accelerometer fabrication. Testing and computer simulation show that the performance satisfy the requirements.

Keywords

Micro accelerometers, Position, Attitude, Inertia measurement systems

二、緣由與目的

慣性量測系統是利用慣性感測元件量測物體的六個運動分量進而判定物體的位置與姿態之裝置。慣性感測元件通常為量測絕對線性加速度的加速度計以及量測角

速度或轉角的陀螺儀。

一般慣性量測系統採用三個速率積分陀螺儀和三個加速度計來量測運動體的六個運動分量。精確度高的陀螺儀，其價格非常昂貴，若能以一對加速度計組合取代一個單軸陀螺儀與一個加速度計來量測角加速度及線性加速度，則成本將可大幅降低。

使用傳統加速度計來量測待測物之線性加速度和角加速度，兩加速度計之間距不易準確得知且系統體積龐大[1]，若採用微型加速度計則可改進上述缺點。利用微型加速度計製作六分量慣性量測系統具有以下優點：

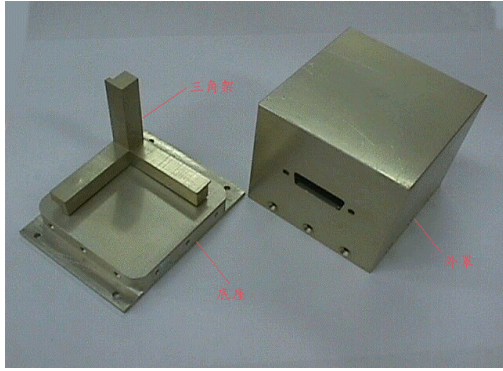
- (1) 微加速度計之定位清楚，兩微加速度計之間距可準確得知。
 - (2) 微加速度計體積極小，製作之慣性量測系統體積相對較小。
 - (3) 可由晶圓上大量生產，微加速度計成本低。
 - (4) 尺寸小、質量輕，對待測物影響小。
- 由於具有上述明顯的優點，所以研製此種慣性量測系統是值得嘗試的。

三、研究方法

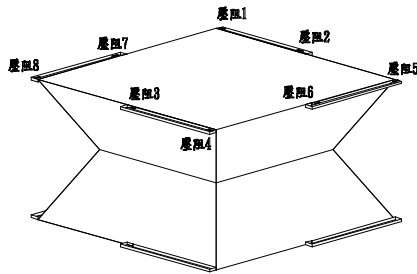
系統裝置之組成包括量測單元和信號處理單元兩部份。

(一)量測單元

量測單元是由三腳架、底座、外罩和微加速度計所構成，微加速度計固定於三腳架上，三腳架固定於底座上，外罩蓋住三腳架並固定於底座，如圖(1)所示。壓阻式微型加速度計之工作頻寬為 200Hz ，三腳架之工作頻寬須遠大於壓阻式微型加速度計之工作頻寬，使三腳架在



圖(1) 三腳架、底座和外罩



圖(2) 微加速度計結構

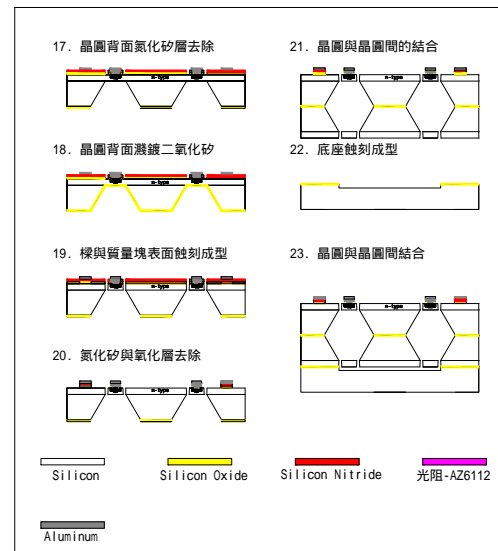
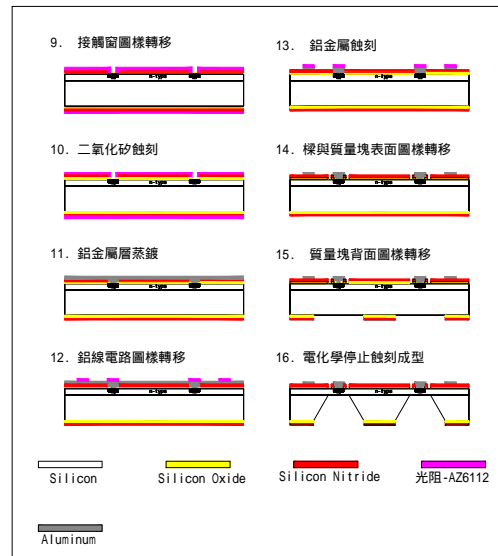
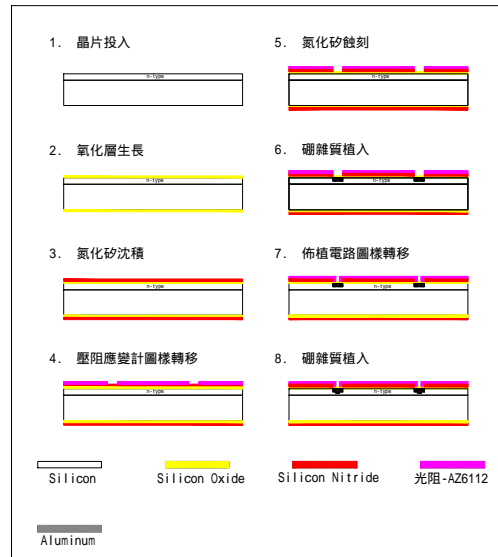
微加速度計的工作頻寬工作時，其行為類似一剛體，如此在微加速度計工作頻寬內所量測之信號，幾乎是待測物之加速度值。

三腳架之動態特性，經有限元素法分析，第一模態固有頻率為 3915.6Hz ，若操作頻寬在 $\dot{S}_n/3$ 的條件下為 1305.2Hz ；若操作頻寬在 $\dot{S}_n/4$ 的條件下為 978.9Hz ，很明顯得知三腳架之工作頻寬約為微加速度計五倍，可滿足設計上的要求。

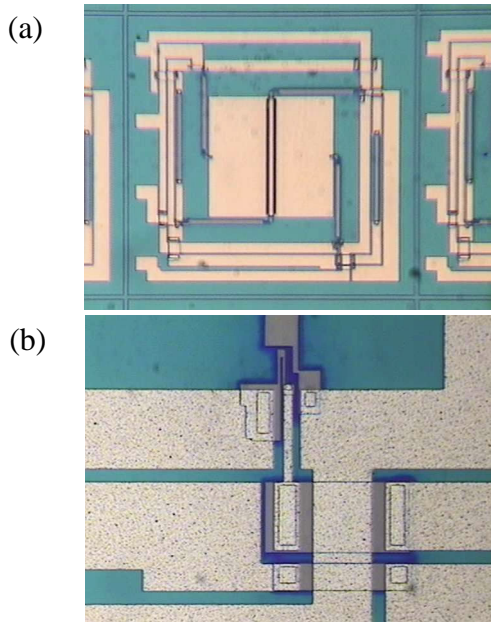
三腳架、電路板和外罩係固定在底座上，而底座將固定在待測物上。外罩的功能在保護三腳架和電路板，並在其上裝有 TAI-ACC 接頭(共有十五個接腳，接頭型號為 J103S)，供輸入電源與輸出信號。

微加速度計之結構[2]，如圖(2)所示，以八根樑支撐質量塊，其規格為工作頻寬 200Hz 、工作範圍 $0 \sim 50g$ 。質量塊邊長 $1700 \sim m$ 、質量塊厚度 $830 \sim m$ 、支撐樑長 $1200 \sim m$ 、樑寬 $60 \sim m$ 、樑厚 $15 \sim m$ 。

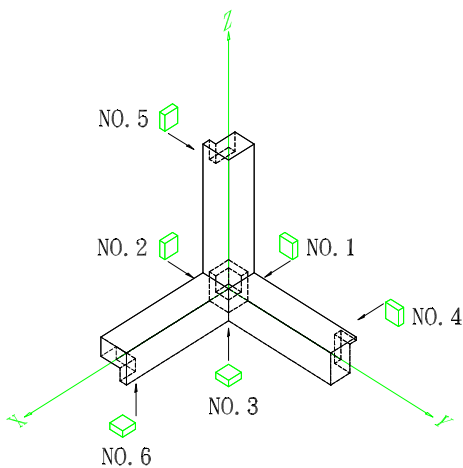
微加速度計結構之上下兩層將分開製作，由兩片晶圓各別完成，最小線寬為 $5 \sim m$ 。微加速度計的製作，總共需要八片光罩，二十三個步驟如圖(3)所示。製成的線路示如圖(4)。圖(5)顯示微加速度計固



圖(3) 微加速度計之製程



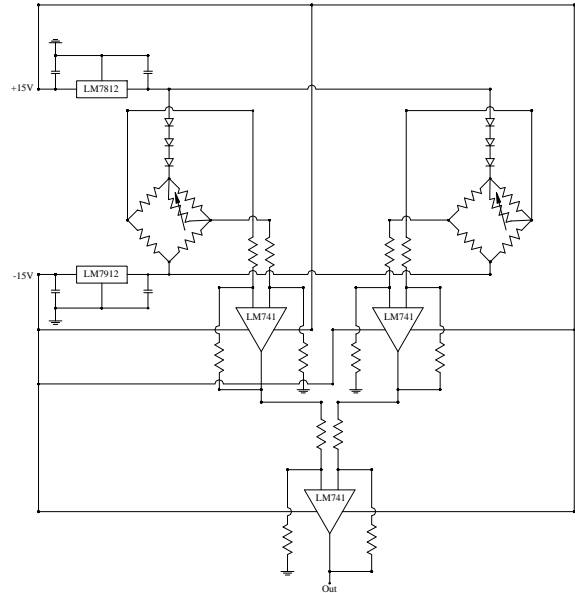
圖(4) (a)微加速度計之線路
(b)左下角之局部線路



圖(5) 微加速度計固定於三腳架上之位置
定在三腳架上的位置。

(二)信號處理單元

信號處理單元是由溫度補償電源電路、速度計之壓阻電橋、信號放大與差量放大以及資料處理所構成。藉由加速度引致加速度計電橋的不平衡，電橋係由溫度補償之穩壓電源所驅動，電橋信號經由校正電路處理後放大輸出。同方向的兩個信號再經差量放大輸出，其電路示如圖(6)。所有類比信號由 A/D 擷取後再以數位方式由計算機處理。同方向的兩個信號除以兩微加速度計間的距離，即可得垂直軸向的角加速度。如此將待測物的六個運動分量資料經



圖(6) 輸出角加速度信號之電路圖

由計算即可求得運動軌跡與姿態。

待測物之位置與姿態通常以慣性座標系統描述，而量測則在局部座標進行，所以量測的數據應經座標轉換處理。令 Tfk 為慣性座標系統 $oxyz$ 為三腳架局部座標系統，令 C_{oo} 為由 $oxyz$ 相對於 Tfk 的方向餘弦 c_{ij} 所組成的矩陣，則[3]

$$\mathcal{E}_{oo} + \dot{\mathbf{u}}_{oo}^x C_{oo} = 0 \quad (5)$$

其中

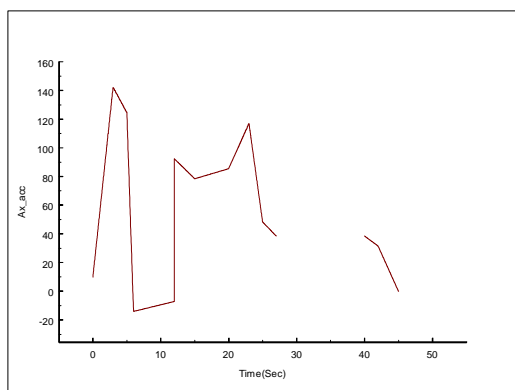
$$\dot{\mathbf{u}}_{oo}^x = \begin{bmatrix} 0 & -\check{S}_z & \check{S}_y \\ \check{S}_z & 0 & -\check{S}_x \\ -\check{S}_y & \check{S}_x & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

為由 $oxyz$ 相對於 Tfk 的角速度 $\dot{\mathbf{u}}_o$ 的分量所組成的反對稱矩陣。

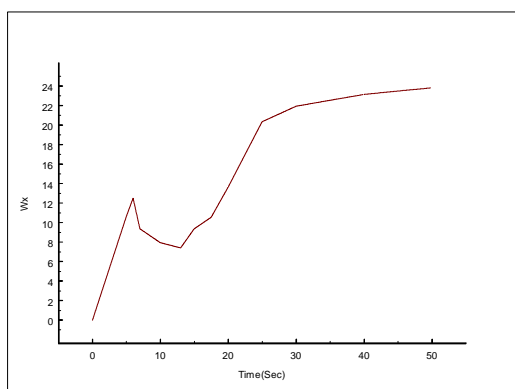
計算待測物運動軌跡時的初始條件設定 C_{oo} 為單位矩陣，隨後計算流程如下：

1. 量測局部座標加速度 \mathbf{a}_o 與角加速度 $\dot{\mathbf{a}}_o$ ，利用 C_{oo} 轉換至慣性座標成 \mathbf{a}_o 與 $\dot{\mathbf{a}}_o$ 。
2. 在慣性座標中積分出速度 \mathbf{v}_o 、位移 \mathbf{D}_o 、以及角速度 $\dot{\mathbf{u}}_o$ 。
3. 利用 C_{oo} 將 $\dot{\mathbf{u}}_o$ 轉換回局部座標成 $\dot{\mathbf{u}}_o$ 。
4. 由式(5)計算出更新的 C_{oo} 。
5. 讀取新數據，重複步驟 1. 至 4.。

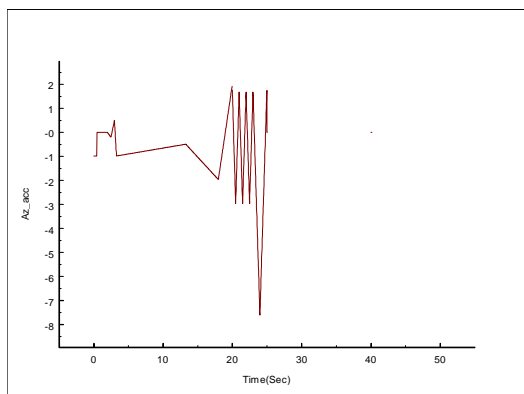
如此即可求得待測物的運動軌跡 $\mathbf{D}_o(t)$ ，



上升階段火箭軸向加速度



上升階段火箭軸向轉速

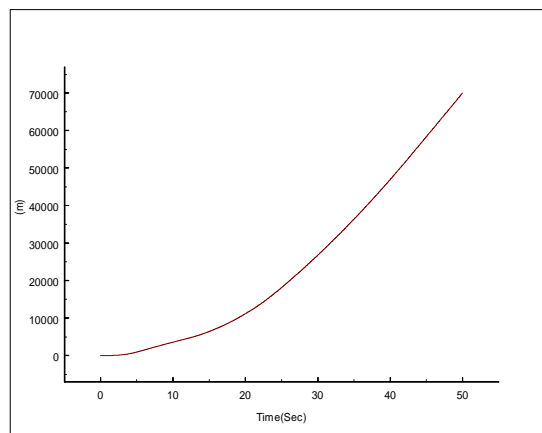


上升階段火箭側向加速度

圖(7) 火箭飛行資料

如欲探知任一時間 t 的姿態,則可由方向餘弦矩陣 $C_{oO}(t)$ 解出。

考慮發射一枚火箭,火箭的飛行資料示如圖(7),可得知火箭在飛行時,其運動六分量(以量測座標系統所表示),使用辛普生積分法來計算出火箭飛行50秒的飛行軌跡如圖(8)所示,此計算出的飛行軌跡和雷達量測的飛行軌跡相似。



圖(8) 計算求得火箭飛行50Sec的飛行高度與滞空時間關係

四、結論與評估

本研究利用六個微加速度計組成的慣性量測系統具有質量輕、體積小的特色。一對微加速度計能提供角加速度,不能直接量測角速度,因此利用在慣性座標積分求得角速度,在轉換回局部座標求取方向餘弦矩陣,如此求出待測物的運動軌跡。在硬體方面則設計與製作出固定微加速度計的三腳架、底座、外蓋以及溫度補償的電源與信號處理電路。在本計畫中扮演主要角色之一的壓阻式微型加速度計則因製程複雜以及設備的配合問題,雖然花費了絕大部份的時間與經費,仍然未能竟其功,使本研究無法立即獲得實驗印證,誠為憾事。

五、參考文獻

- [1] A. R. Schuler, "Measuring Rotational Motion with Linear Accelerometer", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-3, pp. 465-471, 1967.
- [2] 童若峻, *壓阻式微型加速度計之設計與製造*, 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文, 民國 84 年
- [3] P. C. Hughes, *Spacecraft Attitude Dynamics*, John Wiley & Sons, New York, 1986.