

基於車載應用之微機電慣性測量儀發展一階段率定法

Developed One Step Procedure of Calibration for MEMS IMU with Vehicle Applications

廖振凱、江凱偉

Jhen-Kai Liao, Kai-Wei Chiang

微機電慣性測量儀的成本低廉、體積小且重量極輕，但因精度不高限制了應用的領域。率定及阿倫變方分析是常見用來提升或驗證慣性測量儀性能及精度的方法，兩者可分別檢驗系統及隨機誤差。台灣的學術領域對這方面的相關文獻並不多，業界又普遍使用進口的慣性元件，而使用者並沒有能力自行檢驗或調校。本研究的目的就是針對一款低階且未經任何誤差補償的 MEMS IMU，發展一套一階段率定程序輔以阿倫變方分析，提升其精度，並應用在車載平台。

The Inertial Measuring Unit (IMU) has been used in many applications in our life. However, the accuracy of IMU limited where they can be used. The Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) IMU is low cost but also low accuracy. The common ways to improve the accuracy of IMU are calibration and Allan Variance. The calibration can determine the systematic errors like bias, scale factor and non-orthogonality from accelerometers and gyros. The Allan variance can analyze the random errors include Angle Random walk (ARW), Velocity Random walk (VRW) and so on. The results of Allan variance can determine the parameters of those random errors with Power Spectral Density (PSD). There are only few researches about calibration and error analysis in Taiwan. The Taiwanese civil users have no ability to test and correct the IMU used in Mobile Mapping System (MMS) and other applications when some problems happened. The MEMS IMU we used didn't do any error compensations and usually used in smartphone. The purpose is to develop one step calibration scheme and also the analysis of Allan variance for MEMS IMU. The field tests are used to verify the performance of IMU after calibration.

一、簡介

慣性測量儀 (inertial measuring unit, IMU) 已經被使用在許多應用上，像是移動測繪系統 (mobile mapping system, MMS)、載具導航、體感遊戲、

智慧手機、精密機械以及軍事用途等。尤其在導航相關應用領域中，慣性測量儀的精度往往直接影響系統的效能與價格，而系統的效能及價格則決定系統在市場的銷售前景。基於這些原因，改善或提升低成本慣性測量儀的精度就變得非常重

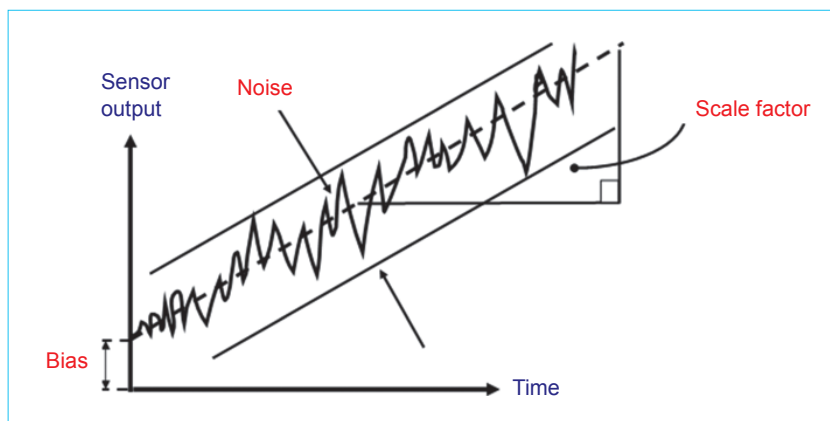


圖 1. 偏差、尺度因子及雜訊對慣性測量元件的影響及誤差行為。

要。影響慣性測量儀的誤差可以分為兩大類，一類為系統誤差，另一類則是隨機誤差，前者包含偏差 (bias)、尺度因子 (scale factor) 及非正交因子 (non-orthogonality)，後者則包含角度隨機遊走 (angle random walk, ARW)、速率隨機遊走 (velocity random walk, VRW) 及白雜訊 (white noise) 等等。偏差、尺度因子及雜訊對慣性測量儀的影響及誤差行為，請參見圖 1 所示。

本研究所使用的慣性測量儀請參見圖 4 所示，其組成三軸加速度計 Kionix KXR94，以及 X、Y 軸的陀螺儀 InvenSense IDG-500，Z 軸陀螺儀則為 InvenSense ISZ-500。這款慣性測量儀並未經過任何誤差補償，資料輸出的單位也未經轉換。

偏差及尺度因子會受電壓及溫度效應的影響而改變。測試目標的原始資料請見圖 2，可發現開機偏差 (turn on bias or run to run bias) 以及溫度效應造成的影響，使得原始資料有起始的偏差，且偏差會隨著時間 (溫度) 變化，這也使得資料轉換至常用單位時變得不精確。因此如何求定系統及隨機誤差，對於實際應用這類原始的微機電 (micro electro mechanical systems, MEMS) 慣性測量儀而言非常重要。圖 3 則是商業產品的微機電陀螺 STIM210 的兩小時資料，資料單位為度/秒，且此款慣性測量儀已經過相關的誤差補償，兩相比較之下，可得知誤差的補償及率定對慣性測量儀的效能有巨大的影響。

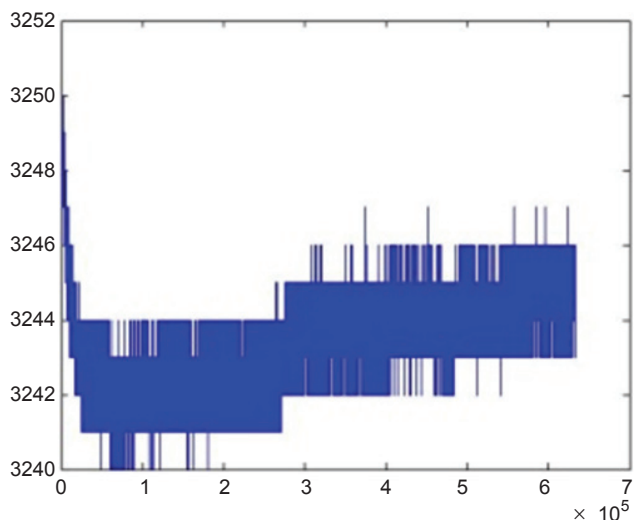


圖 2. 從本研究測試的慣性測量儀所獲取的原始資料。

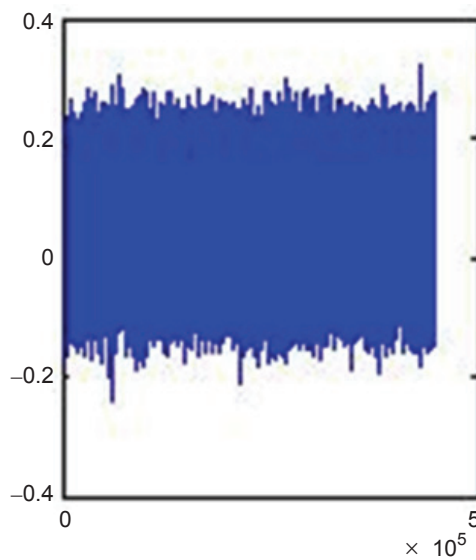


圖 3. 從商業產品的微機電陀螺 STIM210 獲取的資料。

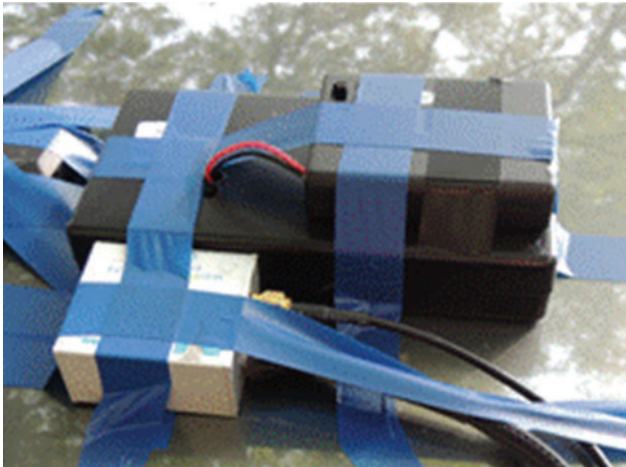


圖 4. 本研究所使用的慣性測量儀 (黑色)。

儘管在台灣已經普遍使用慣性測量儀，但仍舊只有少數研究報告是關於率定及誤差分析。加上台灣民間使用的慣性測量儀多半來自國外進口，這些業者只能仰賴原廠在其實驗室測試所提供的規格書。而規格書所提供的參數可能不適用於實際環境或使用者的需求，一旦發生問題，一般民間業者並不具備相關能力及認知觀念，只能送回原廠檢測及調校，不但耗時，也增加成本。

慣性測量儀的率定 (calibration) 可以求定系統誤差，並據此改正觀測量，以提升系統精度。國際上已有許多率定方法，像是六位置靜態率定法⁽⁴⁾、多位置率定法⁽⁵⁾及動態率定等等。本研究基於圖 5 中瑞士生產之高精度雙軸轉台 MOTION DYNAMIC TES-3T，針對前述規格之慣性測量儀發展一套一階段率定程序，透過十二位置的對稱性以及靜態與動態測試的搭配，對微機電慣性測量儀進行率定。此方法避免了多次安裝造成的率定誤差，且適用於無法偵測地球自轉的低精度陀螺。

阿倫變方 (Allan variance) 最初是用來分析原子鐘，這個方法特別適合用來分析具時間序列的資料，近來有人將其用來分析衛星及慣性測量儀的資料^(3, 6, 11)。阿倫變方能夠辨認在觀測量中存在的主要隨機誤差類型，而頻率譜密度函數 (power spectral density, PSD) 能夠描述訊號或觀測量在不同頻率的能量分布，基於前述兩者的關係，隨機誤差參數就可以被求定。因此，除了率定程序以外，

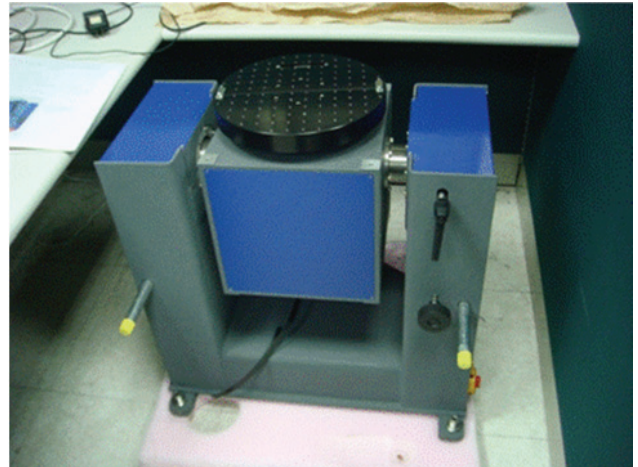


圖 5. 瑞士生產之高精度雙軸轉台 MOTION DYNAMIC TES-3T。

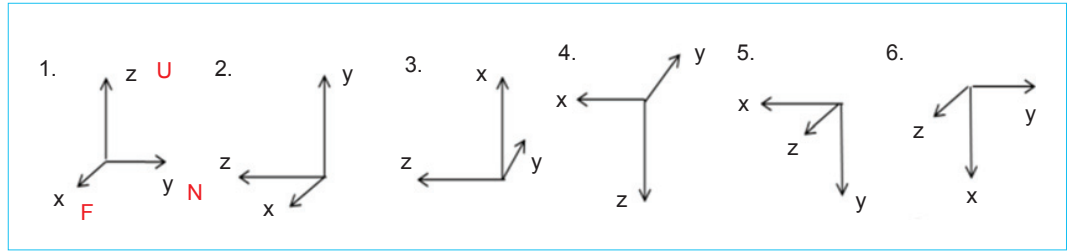
本研究也使用這種方法對微機電慣性測量儀的隨機誤差進行分析。

率定和誤差分析能夠改善低成本微機電慣性測量儀的精度，本研究的目的係希望能夠在台灣初步建立慣性測量儀的率定程序，供民間業者尤其是近來發展蓬勃的移動測繪產業作為參考及檢測的依據。該程序包含完整的率定流程以及誤差分析。本研究測試的慣性測量儀如前所述，並未經過任何誤差改正與補償，經過一階段率定程序得到的偏差及尺度因子也包含了單位轉換的參數，因此率定結果所得到參數能夠將資料轉為慣性導航系統 (inertial navigation system, INS) 常用的單位。將率定後的低成本微機電慣性測量儀裝置在圖 6 由國立成功大學



圖 6. 成功大學發展之車載移動測繪系統。

圖 7.
慣性測量儀模擬資
料的六個位置。



發展的車載移動測繪系統上，以取得整合導航的軌跡資料，並以本研究團隊發展的 INS/GNSS 整合導航軟體解算路測的軌跡與參考軌跡相比做精度分析。經過驗證，本研究測試的慣性測量儀經過率定與誤差分析後，能夠達到一般應用的水準，未來將增加溫度率定的補償，並改良與修正一階段率定程序，使整套程序更加有效且完整。

二、方法與文獻回顧

1. 率定方法

本研究發展的一階段率定程序是根據標準六位置率定法進行改良，整個過程包含十二個位置的靜態測試與一組動態測試，後者是根據陀螺等級的高低視需求增加。一階段率定程序能夠避免重複安裝所造成的率定誤差以及不一致性，像是安裝不水平等等，並同樣適用於無法偵測地球自轉作為靜態測試參考值的微機電陀螺。率定資料以平均法及最小二乘法解算⁽⁵⁾，前者普遍使用在標準六位置率定法中，將同一軸朝上及朝下的觀測量相加消去真值，除以二後得到該軸的偏差。尺度因子則是實際觀測量與真值的比值，將上下的觀測量相加後減去兩倍真值，再除以兩倍真值即得到該軸之尺度因子 (或稱尺度因子誤差 Scale factor error)。其公式如下：

$$b = \frac{l^{up} + l^{down}}{2} \quad (1)$$

$$S = \frac{l^{up} + l^{down} - 2 \times k}{2 \times k} \quad (2)$$

b 為偏差； l^{up} 為軸朝上之觀測量； l^{down} 為軸朝下之觀測量； S 為尺度因子； k 為理論的真值或參考值。

最小二乘法將不同位置的三軸觀測量組成方程

式，依據最小二乘法原理，求解其中的未知參數，即偏差、尺度因子及非正交因子。其公式如下：

$$\begin{bmatrix} l'_x \\ l'_y \\ l'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+s_x & 0 & 0 \\ -\theta_{yx} & 1+s_y & 0 \\ \theta_{zx} & -\theta_{zy} & 1+s_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

l' 為實際觀測量； S 為尺度因子； θ 為非正交因子； b 為偏差； l 為真值。

為了驗證方法的有效性，本研究先使用如圖 7 的六位置模擬資料進行演算，依據下列公式⁽⁵⁾由真值加上系統誤差與雜訊，得到慣性測量儀六位置的靜態模擬觀測量，再以平均法和最小二乘法解算系統誤差參數，如果結果與原本模擬的參數相近，則驗證了本研究發展之演算法的正確性。

$$l_\omega = \omega + b_\omega + S_\omega + N_\omega + \varepsilon(\omega) \quad (4)$$

$$l_f = f + b_f + S_{1f} + S_{2f} + N_f + \varepsilon(f) + \delta_g \quad (5)$$

l 為觀測量； ω 及 f 分別為陀螺及加速度計的真值； b 為偏差； S_1 及 S_2 分別為線性及非線性尺度因子； N 為非正交因子； ε 為雜訊； δ_g 為重力加速度的理論值。

另外，本研究也蒐集微機電慣性測量儀 MIDG II 的實際動態資料，驗證演算法解算陀螺系統誤差的正確性。動態測試的過程如圖 8 所示，解算結果與 MIDG II 的規格相去不遠，因此本研究發展的率定演算法應能正確地解算系統誤差。

為了更精確的求定系統誤差參數，本研究基於標準六位置率定法與雙軸精密轉台發展一階段率定程序，動態率定可以依據率定陀螺的等級作為附加選項，程序如圖 9。位置 1.1 及位置 1.2 的觀測量取平均以消除某些像是不水平的安裝誤差，並與位

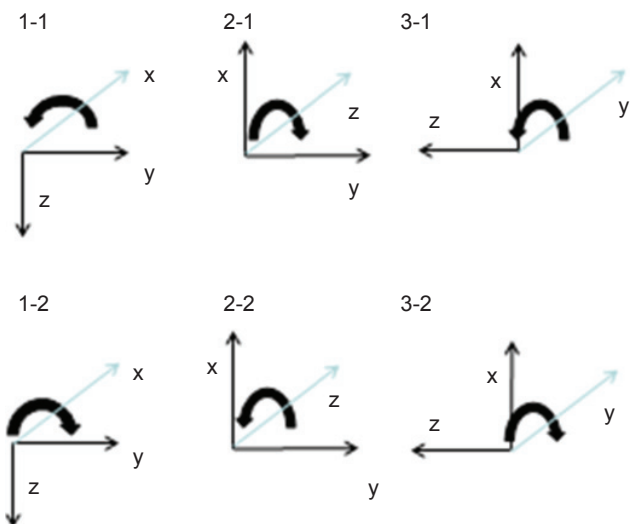


圖 8. 微機電慣性測量儀 MIDG II 動態測試過程。

置 3.1 及 3.2 的平均值，以平均法解算慣性測量儀的偏差及尺度因子。而所有觀測量可依據前述公式組成觀測方程式以最小二乘法原理解算偏差、尺度因子及非正交因子。圖 10 為整個率定過程中測試對象之 IMU 其加速度計的原始輸出資料。

2. 阿倫變方分析

阿倫變方最初是用來分析原子鐘，也能夠用於分析具備時間序列的資料。其基本原理可以大致分解成以下幾個步驟^(6, 11)：

- (1) 將資料以固定時間間隔分群。
- (2) 計算各群的平均值。
- (3) 由相鄰兩群的差值組成差值序列。
- (4) 計算此序列的均方和，並除以二，得到阿倫變方值。
- (5) 改變時間間隔，重複前述步驟，得到阿倫變方值的序列。
- (6) 將阿倫變方值與對應的時間間隔以對數形式繪圖。

標準阿倫變方之公式如下：

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} [\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i]^2 \quad (6)$$

阿倫變方圖中隨機誤差的理論行為見圖 11⁽¹⁾。除了標準阿倫變方外，還有 modified Allan

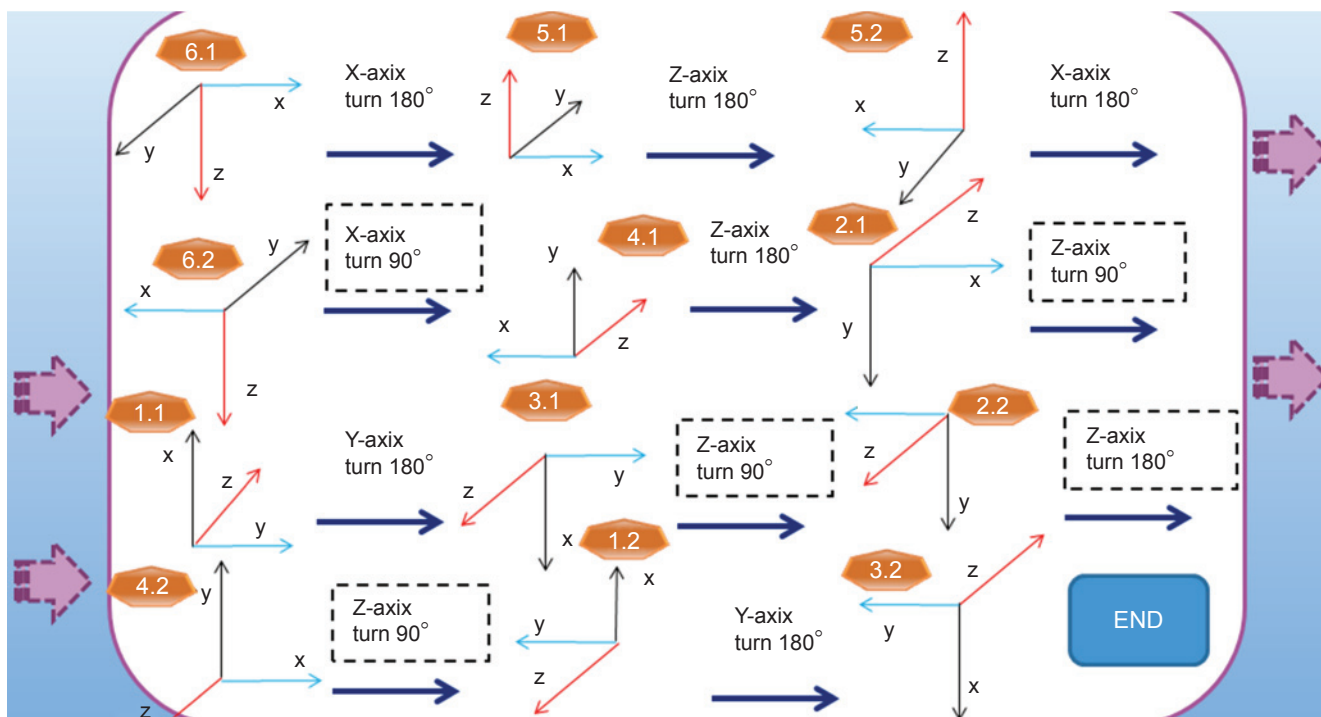


圖 9. 一階段率定程序流程圖。

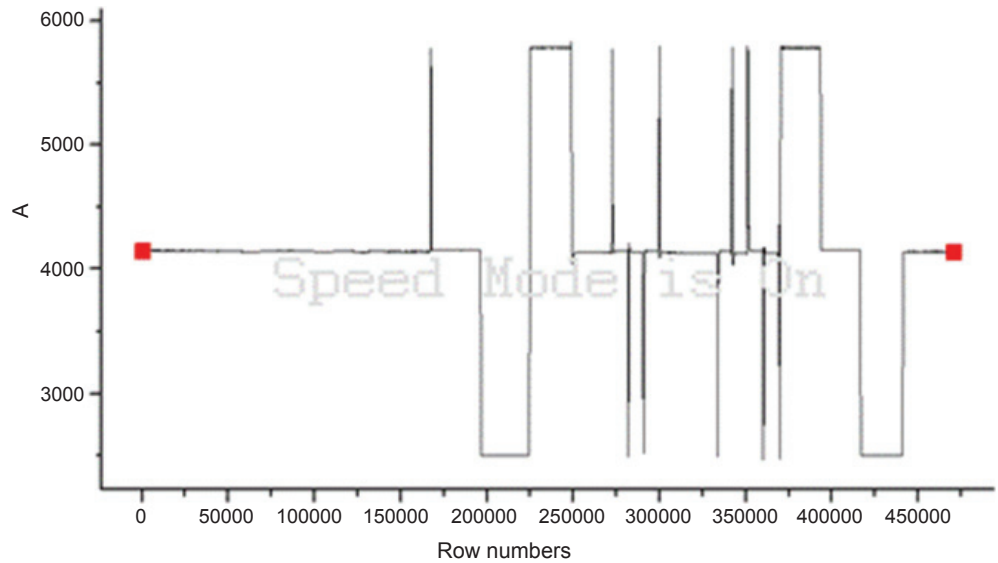


圖 10.
一階段率定程序加速度計的實際輸出資料。

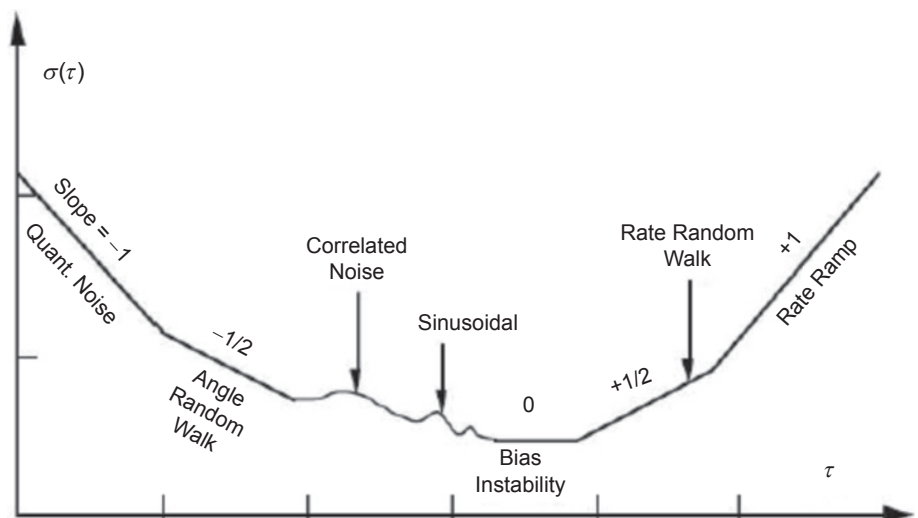


圖 11.
阿倫變方圖中隨機誤差的理論行為。

variance、Hadamard Allan variance 等等，本團隊也一併計算了這些變形的阿倫變方值，一般狀況下它們的結果非常相近。本研究使用兩小時的資料進行阿倫變方分析。頻率譜密度函數是用來描述訊號及觀測量在不同頻率的能量分布。依據阿倫變方與頻率譜密度函數間的關係，可以求定隨機誤差的參數。頻率譜密度函數與阿倫變方的關係式如下：

$$\sigma^2(T) = 4 \int_0^\infty S_\Omega(f) \frac{\sin^4(\pi fT)}{(\pi fT)^2} df \quad (7)$$

表 1 為頻率譜密度函數與阿倫變方分析中各隨機誤差關係式的整理⁽⁸⁾：

三、結果與討論

靜態模擬資料的例子見圖 12，加速度計資料的單位為 (m/s²)，陀螺資料的單位為 (rad/s)。模擬的雜訊類型為白雜訊，模擬加速度計及陀螺的偏差分別為 0.006 (m/s²) 及 0.0837 (rad/s)，而加速度計及陀螺的尺度因子則分別為 19700 (ppm) 及 5000 (ppm)。靜態模擬資料的解算結果見表 2。從結果可知，加速度計的解算結果與模擬的設定非常接近，但陀螺的尺度因子卻大於設定的參數，原因是受到模擬微機電等級的陀螺時，其雜訊大於率定解算時使用的地球自轉參考值，雜訊的影響會反映在尺度因子中，這也是為何低精度陀螺的率定需要動

| Error Type | PSD (S_{Ω}) | AV ($\sigma^2(\tau)$) | Comments |
|--------------------|---|---|--|
| Quantisation Noise | $(2\pi f)^2 Q^2 T_s$ | $\frac{3Q^2}{\tau^2}$ | Q: Quant. noise coefficient |
| Random Walk | N^2 | $\frac{N^2}{\tau}$ | N: Random walk coefficient |
| Bias Instability | $\left(\frac{B^2}{2\pi}\right) \cdot \frac{1}{f}$ $f \leq f_0$ | $\frac{2B^2}{\pi} \left[\frac{\ln 2 - \frac{\sin^3 x}{2x^2} (\sin x + 4x \cos x)}{+Ci(2x) - Ci(4x)} \right]$ | B: Bias instability coefficient $x: \pi f_0 \tau$ Ci: Cosine integration function[9] |
| Rate random Walk | $\left(\frac{K}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{f^2}$ | $\frac{K^2 \tau}{3}$ | K: Rate random walk coefficient |
| Rate ramp | $\frac{R^2}{(2\pi f)^3}$ | $\frac{R^2 \tau}{2}$ | R: Rate ramp coefficient |
| Correlated Noise | $\frac{(q_c T_c)^2}{1 + (2\pi f T_c)^2}$ | $\frac{(q_c T_c)^2}{\tau}, \tau \gg T_c$ $\frac{q_c^2}{3} \tau, \tau \ll T_c$ | q_c : Noise amplitude T_c : Correlation time |
| Sinusoidal Noise | $\frac{\Omega_0^2}{2} \left[\delta(f - f_0) + \delta(f + f_0) \right]$ | $\Omega_0^2 \left(\frac{\sin^2 \pi f_0 \tau}{\pi f_0 \tau} \right)^2$ | Ω_0 : poing Amplitude f_0 : point frequency $\delta(x)$: Delta function |

表 1. 頻率譜密度函數與阿倫變方分析中各隨機誤差關係式。

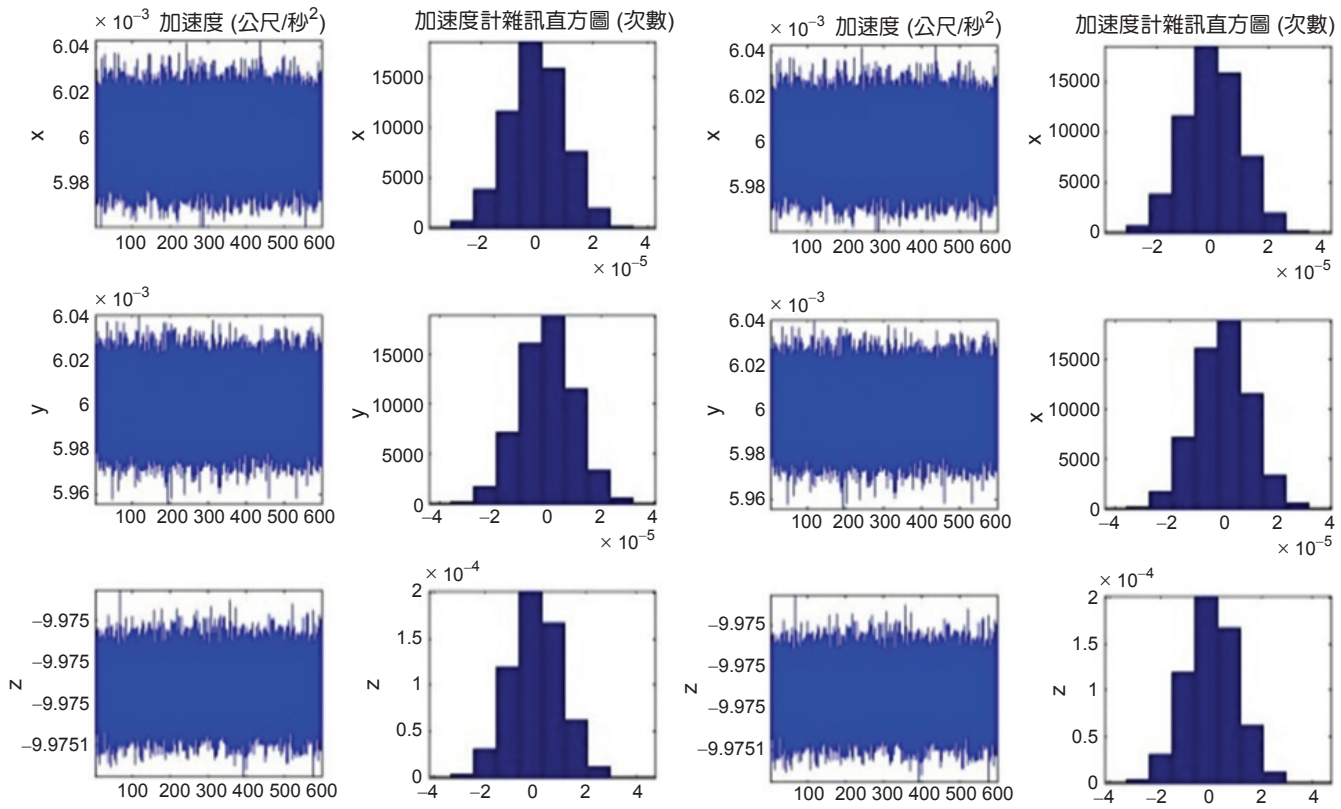


圖 12. 其中一軸的靜態模擬資料。

表 2. 靜態模擬資料的解算結果。

| | | X | Y | Z |
|---------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Accelerometer | Bias (m/s ²) | 0.006 | 0.006 | 0.006 |
| | Standard deviation | 7.0438×10^{-6} | 7.0867×10^{-6} | 7.0851×10^{-6} |
| | Scale Factor (ppm) | 19700 | 19700 | 19700 |
| | Standard deviation | 0.72021 | 0.72186 | 0.71974 |
| Gyro | Bias (rad/s) | 0.0837 | 0.0837 | 0.0837 |
| | Standard deviation | 7.0578×10^{-6} | 7.0899×10^{-6} | 7.0528×10^{-6} |
| | Scale Factor (ppm) | 1476300 | 1477200 | 1476600 |
| | Standard deviation | 1.481×10^6 | 1.4819×10^6 | 1.4812×10^6 |

表 3. MIDG II 陀螺動態實測資料的率定解算結果。

| | | X | Y | Z |
|------|--------------------|---------|---------|----------|
| Gyro | Bias (deg/s) | 0.00378 | 0.00019 | -0.00114 |
| | Standard Deviation | 0.00358 | 0.00315 | 0.00373 |
| | RMS | 0.00521 | 0.00315 | 0.00390 |
| | Scale factor (ppm) | 6242.3 | 4683.3 | -2746.3 |
| | Standard deviation | 20354 | 17925 | 21623 |
| | RMS | 21288 | 18528 | 21795 |

表 4. 本研究測試之低成本微機電慣性測量儀經一階段率定之成果。

| | | X | Y | Z |
|---------------|----------------------|---------|---------|---------|
| Accelerometer | Average method | | | |
| | Bias | 4151.81 | 4081.88 | 4094.57 |
| | Scale factor | 167.62 | 168.55 | 166.95 |
| | Least squares method | | | |
| | Bias | 4142.84 | 4085.85 | 4065.09 |
| | Scale factor | 167.62 | 168.55 | 166.95 |
| Gyro | Average method | | | |
| | Bias | 3279.91 | 3115.73 | 4973.67 |
| | Scale factor | 4.9635 | 4.6924 | 2.1895 |
| | Least squares method | | | |
| | Bias | 3279.99 | 3116.06 | 4972.60 |
| | Scale factor | 4.9635 | 4.6924 | 2.1895 |

態測試，由外部設備提供更顯著的參考值。

MIDG II 的動態實測資料，經過率定解算的結果見表 3，率定得到的系統誤差參數與規格相去不遠。而靜態模擬以及動態實測的資料，經最小二乘法解得之系統誤差均與平均法之解差異不大。因此初步的結果表明本研究發展的率定演算法能夠正確且有效地得到系統誤差參數。

本研究測試之低成本微機電慣性測量儀，經一階段率定程序後得到的結果見表 4，偏差及尺度因

子包含單位轉換的參數，故經過誤差補償的同時，資料也可轉為常用的單位 (deg/s) 及 (m/s²)。率定程序需要重複多次以取得誤差參數的平均值及標準差，而在實際應用中，開機偏差可以透過系統的初始化消除，最大程度地避免每次開機時偏差的差異造成的精度損失。通常資料的單位轉換需透過規格提供的電壓及敏感度參數，而規格並不一定適用在實際應用的環境，這也是率定之所以重要的另一個原因。

本研究測試之慣性測量儀，其阿倫變方結果如圖 13 及圖 14，從圖中斜率的特性可以辨識出，主要影響的隨機誤差類型為隨機遊走及偏差穩定性，兩者的參數值見表 5。此一結果符合本研究測試之慣性測量儀的等級。

最後本研究將測試的慣性測量儀及 MIDG II 裝在國立成功大學發展的車載移動測繪系統上，測試範圍為台南市，以率定結果的參數補償及轉換測試的慣性測量儀觀測量，並作為 INS/GNSS 整合導航系統的輸入資料，阿倫變方分析之隨機誤差參數亦作為該系統卡曼濾波器的初始輸入參數，以得到

路測的導航軌跡。測試的軌跡見圖 15(a)。淺藍色線段為測試之慣性測量儀以鬆耦合架構得到的軌跡，紅色線段則為測試之慣性測量儀以緊耦合架構得到的軌跡；藍色線段則是商用慣性測量儀 MIDG II 經後處理平滑之軌跡，此軌跡作為參考解。軌跡的誤差分析見表 6。圖 15(b) 則為比較率定與規格的參數對軌跡之影響，紅色是以規格書提供之參數進行轉換及補償之軌跡結果；黃色則是以率定結果補償及轉換後得到的軌跡結果。結果表明，本研究發展的一階段率定輔以阿倫變方分析能夠有效補償及轉換慣性測量儀原始資料，並提供卡曼濾波器有

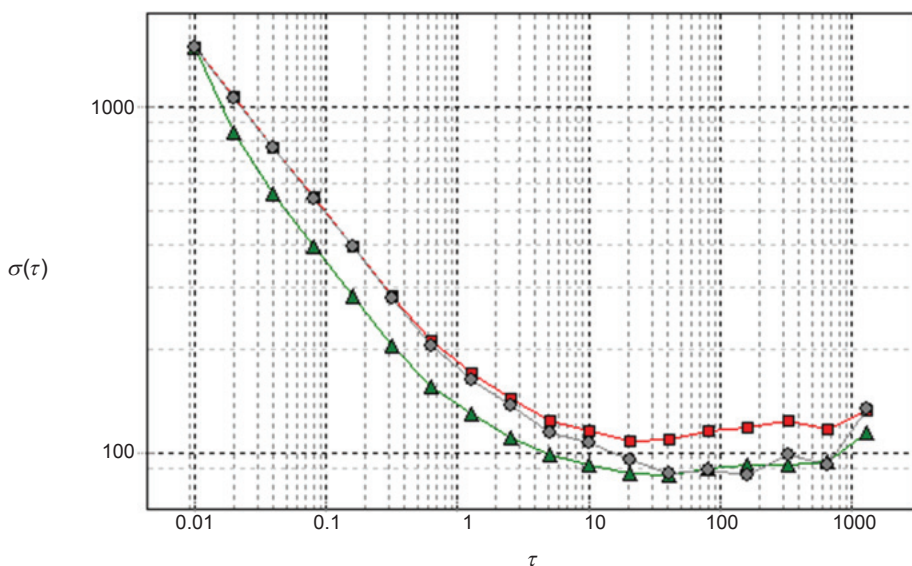


圖 13. 本研究測試之陀螺的阿倫變方圖。

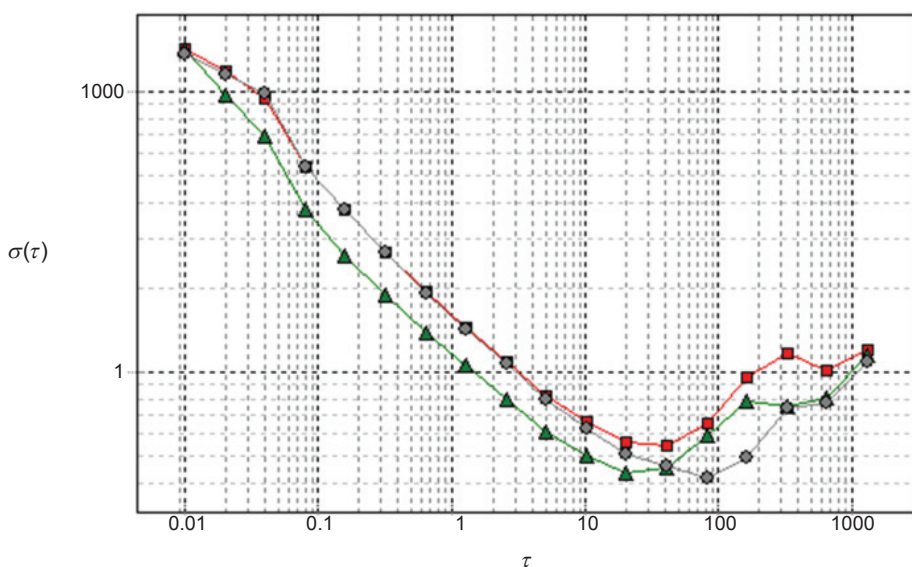
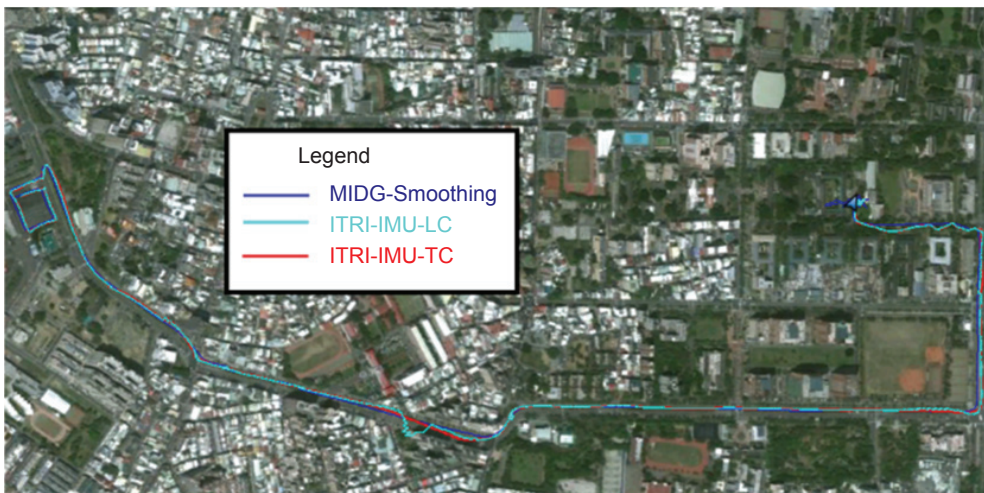


圖 14. 本研究測試之加速度計的阿倫變方圖。

| Accelerometer | | | |
|---|-------|-------|-------|
| | X | Y | Z |
| Velocity random walk (m/s / \sqrt{h}) | 0.033 | 0.023 | 0.026 |
| Bias instability (m/s/h) | 2.711 | 1.310 | 0.828 |
| Gyro | | | |
| Angle random walk (deg/ \sqrt{h}) | 1.109 | 2.689 | 4.561 |
| Bias instability (deg/h) | 125 | 165 | 125 |

表 5.
以阿倫變方分析本研究測試之慣性測量儀的隨機誤差參數。



(a)



(b)

圖 15.
車載移動測繪系統搭載本研究測試的慣性測量儀實測之軌跡。

效且完整的參數初始值，使軌跡更平滑，且該慣性測量儀原本並未經過任何誤差改正，本方法最終能使其符合一般應用環境，且較規格提供的參數更充足且具適應能力。

表 6. 以 MMS 實測軌跡的誤差分析。

| Method | RMS (m) | | | |
|--------|---------|-------|------|------|
| | East | North | Up | 3D |
| LC | 3.01 | 2.82 | 3.54 | 5.44 |
| TC | 2.81 | 2.23 | 3.04 | 4.7 |

四、結論

本研究發展的一階段率定程序輔以阿倫變方分析能夠有效求解低成本微機電慣性測量儀的系統誤差及隨機誤差，透過靜態模擬、動態實測驗證演算法的正確性後，將本研究測試之原始未經任何誤差補償的微機電慣性測量儀，以一階段率定法和阿倫變方進行誤差分析，將結果用於修正慣性測量儀原始觀測量，並作為 INS/GNSS 整合導航的初始參數，經實際道路軌跡測試，驗證率定程序及誤差分析結果的有效性。

根據實際路測的結果，微機電慣性測量儀經過一階段率定後之精度，足以使用在移動測繪系統或 INS/GNSS 整合導航系統等相關應用上。透過整合導航解的軌跡誤差分析，本研究測試的微機電慣性測量儀之精度顯著提升，換言之，率定及阿倫變方分析能夠有效改善慣性測量儀的效能及精度。與規格書提供的參數或範圍相比，確切的率定結果也較能適應實際的環境以及應用在相關系統中，當系統有突發的狀況或是異常時，本團隊也能夠協助進行初步檢測與改正，節省送交國外原廠的成本與時間。

然而，經過實際的數據處理以及文獻回顧，慣性測量儀受溫度效應的影響非常嚴重，尤其當系統長時間運作或處於溫度變化劇烈的環境時，溫度的改變會使得前述各項誤差的數值發生巨幅改變，因此本團隊未來將加入溫度效應的率定及補償，期許能發展快速有效且低成本的溫度率定模式，使一階段率定法更加完善。另外，一階段率定程序仍有許多可以改善的地方，像是率定耗費的時間以及各項細節的調整，故本團隊未來仍將持續精進此一程序，期許未來一階段率定法能夠提供更有效且便利的服務。

誌謝

本研究測試之慣性測量儀由工業技術研究院南分院微奈米科技研究中心協助提供，並透過合作模式協助處理儀器相關的問題。

參考文獻

1. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros, *IEEE Std.*, 952 (1997).
2. K.-W. Chiang, *INS/GPS Integration Using Neural Networks for Land Vehicular Navigation Applications*, CALGARY, ALBERTA, CANADA: Department of Geomatics Engineering, UNIVERSITY OF CALGARY (2004).
3. T. Friederichs, Stuttgart: Geodätisches Institut, Universität Stuttgart. (2010).
4. G. Artese and A. Trecroci, 877, **XXXVII** (B5)(2008).
5. A. G. Hayal, *Static Calibration of the Tactical Grade Inertial Measurement Units*, The Ohio State University (2010).
6. H. Hou, *Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance*, CALGARY, ALBERTA: Department of Geomatics Engineering, UNIVERSITY OF CALGARY (2004).
7. S. Han and J. Wang, *IEEE Sensors Journal*, 1493, **11** (6) (2011).
8. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros, *IEEE Std.*, 647, (2006).
9. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros. *IEEE Std.*, 952 (2008).
10. M.-L. Tsai and C.-H. Chu, The Performance Analysis of a UAV Borne Direct Georeferenced Photogrammetric Platform in GCP Free Applications. Nashville, *ION GNSS* (2012).
11. X. Zhang, Y. Li, P. Mumford, and C. Rizos, *Australia: School of Surveying and Spatial Information Systems*.
12. 劉百奇, 房建成, 中國光學期刊網, **35** (1), 60 (2008).
13. You Li, X. N. H. Z., 2011. An IMU Calibration Method Using Simple Machinery and the Comprehensive Error Analysis. CSNC 2012.
14. 肖龍旭, 魏詩卉, 孫文勝, 宇航學報 (2008).



廖振凱先生現為成功大學測量及空間資訊學系博士生。

Jhen-Kai Liao is currently a Ph.D. student in the Department of Geomatics at National Cheng Kung University.



江凱偉為加拿大卡加利大學空間資訊工程系博士，現任成功大學測量及空間資訊學系副教授

Kai-Wei Chiang received his Ph.D. in the department of geomatics engineering from University of Calgary, Canada. He is currently an associate professor in the Department of Geomatics at National Cheng Kung University.