

# 慣性量測單元應用於工具機姿態量測

## Inertial Measurement Unit for the Pose Measurement of the Machine Tools

林彥勳、吳仲偉、林奕成、蕭文澤、曾立維

Yan-Xun Lin, Chung-Wei Wu, Yi-Cheng Lin, Wen-Tse Hsiao, Li-Wei Tseng

本研究主要目的是將慣性量測單元安裝於工具機上進行工具機傾角的姿態量測，透過慣性量測單元中的加速規及陀螺儀所量測到的加速度及角速度訊號進行換算為傾斜角度訊號。為了提升量測角度的準確度，本研究使用卡爾曼濾波器及互補濾波器對兩者訊號進行資料融合，兩種濾波方法可以有效的抑制雜訊及提升精度。

In this study, the inertial measurement unit (IMU) is installed on the machine tool for the Pose Measurement of the Machine Tools. The acceleration and angular velocity signals measured by the accelerometer and gyroscope of the inertial measurement unit are converted into inclination angle signals. In order to improve the accuracy of measured angle, this study uses the Kallman filter and complementary filter to convert the data of the two signals. Both filtering methods can suppress the noise signals and improve the accuracy.

### 一、前言

精密機械產業為我國重點發展的產業之一，也是扮演國內產業升級的幕後推手，國內有90%的精密機械和工具機廠商，集中在中部地區形成完整的產業群聚。精密機械最具代表為工具機 (machine tools)，工具機應用在非常多的領域如生醫、航太、汽車和綠色能源科技等，因為這些產業的零組件生產或製造都需要使用到工具機。幾乎所有產業像是生醫產業、航太產業、電子產業、汽車產業、生物科技和綠色能源等都需要使用到工具機或者是工具機加工或製造出的零組件。

工具機用來加工及製造零組件的重要設備，機械加工方法如銑削、鑽孔、衝壓、擠壓和拋光等。工具機加工出的零組件其精度是非常重要的指標，精密度定義為測量結果的重複性和重現性，精度保持性或稱精度壽命定義為工具機機台在正常的使用條件下，工具機各項精度能夠長時間保持在精度要求範圍內的能力。

工具機在切削和加工一段時間後，都需要經過檢測設備來取得工具機在行進過程中所產生的誤差，透過誤差來修正工具機精度。目前量測工具機的誤差變化主要是使用光學雷射非接觸式量測系統和搭配控制器量測出工具機的幾何誤差，由於光學雷射量測上成本高，無法長時間監控和量測，因此本研究目的在設計一個價格便宜的慣性測量單元 (inertial measurement unit, IMU)，慣性測量單元可即時量測出工具機運作期間的誤差位置變化，進一步對誤差進行補償，完成工具機精度補償，提升工具機加工之精度。

慣性測量單元主要由三軸加速規 (accelerometers) 和三軸陀螺儀 (gyroscopes) 所組成，可直接測量物體在三維空間中的角速度及加速度，並使用公式換算出物體的姿態角和行進速度。三軸加速規是測量加速度的裝置，可測量 X、Y、Z 軸的加速度，也可以與重力場與軸之間的夾角利用三角函數計算姿態角，加速規的優點：精準度高、尺寸小、價格低廉和高頻訊號上有良好的量測特性，適合進行振動量測。三軸陀螺儀是量測角速度的裝置，物體在旋轉時，可以量測 X、Y、Z 三軸的科氏力，經由公式計算求出該物體旋轉的角速度。

Vogl 等人<sup>(1)</sup> 將包含加速規、傾角儀、陀螺儀的感測器安裝於工具機上，量測工具機在往復運動期間的加速度、傾角和角速度。將在不同運轉速度下所測量得到的訊號進行整合，建立工具機在不同運轉速度下的直線誤差和角度誤差。

Aparna 等人<sup>(2)</sup> 研究成果顯示，加速規容易受外在環境影響產生噪聲，陀螺儀在短時間內量測出的訊號精準度高，但是由於角度是積分求出的關係，長時間下來會有累積誤差導致偏移狀況產生等，使用互補濾波方式來改善受外部噪音影響下，慣性測量單元量測出的數值。

Pasaye 等人<sup>(3)</sup> 研究成果顯示，在動態的環境下，陀螺儀的量測出數值相對於加速規量測出數值，更能夠不受動態影響，得到較為精確的姿態角度，但是長時間下陀螺儀會受到累積誤差的影響，增加誤差值。因此將利用數據融合方法，將加速規的數據與陀螺儀的數據進行融合，並使用離散型卡爾曼濾波器 (Kalman filter) 進行角度校正。

## 二、實驗與方法

本研究感測器的訊號撈取，使用 Arduino sensor MPU6050，MPU6050 感測器包含了三軸加速規和三軸陀螺儀，可回傳 X、Y、Z 軸的加速度以及角速度，並透過資料融合將其換算為俯仰 (pitch)、翻滾 (roll)、偏擺 (yaw) 三軸姿態角度的資訊。兩種濾波方式分別為互補濾波器和卡爾曼濾波器。結果部分主要分成慣性測量單元量測出角度數值 (使用加速規和陀螺儀) 和將慣性測量單元量測訊號經過兩種濾波方式所得到的數值結果比較，研究流程圖，如圖 1 所表示。

MPU6050 實驗用的感測器，其規格如表 1 所表示。MPU6050 的總線地址是 0x68 (AD0 引腳為高電平時地址為 0x69) 能夠表示的角速度範圍，即倍率可統一設定，有 4 個可選倍率：250 度/秒、500 度/秒、1000 度/秒、2000 度/秒，表 2 為 MPU6050 的數據格式。

表 1. MPU6050 規格。

陀螺儀靈敏度	131/65.5/32.8/16.4 LSB/(°/s)
陀螺儀範圍	±250 / 500 / 1000 / 2000 °/s
加速規靈敏度	16384/8192/4096/2048 LSB/g
加速度範圍	±2 / ±4 / ±8 / ±16g
陀螺儀噪聲	0.05°/s-rms
陀螺儀噪聲密度	0.005°/s/√Hz

表 2. MPU6050 的數據格式。

0x3B	加速度計的 X 軸分量 ACC_X
0x3D	加速度計的 Y 軸分量 ACC_Y
0x3F	加速度計的 Z 軸分量 ACC_Z
0x43	繞 X 軸旋轉的角速度 GYR_X
0x45	繞 Y 軸旋轉的角速度 GYR_Y
0x47	繞 Z 軸旋轉的角速度 GYR_Z

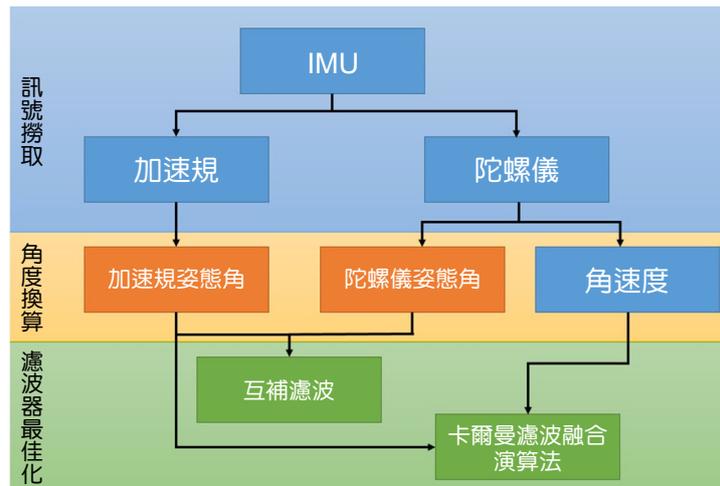


圖 1. 姿態感測器環境建置流程。

加速規所量測之加速度訊號以及陀螺儀訊號可分別透過轉換公式及積分轉換成傾角，加速規量測之加速度訊號轉換至傾角的公式如下：

$$\text{Pitch} = \tan^{-1} \left( \frac{g_x}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}} \right) \quad (1)$$

$$\text{Roll} = \tan^{-1} \left( \frac{g_y}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}} \right) \quad (2)$$

$$\text{Yaw} = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}}{g_z} \right) \quad (3)$$

$g_x$ 、 $g_y$ 、 $g_z$  分別代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸所量測到的加速度。

陀螺儀所量測的為三軸的角速度，可以對角速度進行積分來得到 IMU 的傾斜角度變化，換算公式如下：

$$\theta = \theta_{t-1} + \int_{t-1}^t \omega dt \quad (4)$$

其中  $\theta$  為當前的角度， $\theta_{t-1}$  為前一刻的角度， $\omega$  為陀螺儀量測到的角速度。

卡爾曼濾波為遞歸濾波器，可以將雜訊進行濾波，收集數據數越多精確率就會越高，卡爾曼濾波為疊代式的演算法，卡爾曼濾波會產生有關目前狀態的估計值，利用上個時段的估計值與當下時段的觀測值，透過卡爾曼常數來控制加權比重，與下一個量測值做加權平均來更新估計值。在確定性越高的值加權比重也越高。本研究將加速規測量訊號經過轉換得到的傾角數據，再將傾角數據作為濾波器的輸入，通過卡爾曼濾波器進行濾波，輸出系統的估計值。

本研究中使用互補濾波方法，互補濾波可以透過資料融合的方式結合兩個感測器所量測得之數據的優點，並且消弭兩者的缺點。互補濾波算式如下：

$$\theta = a \times (\theta_{t-1} + Gy \times dt) + b \times \theta_{acc} \quad (5)$$

其中  $\theta$  代表當下的角度， $\theta_{t-1}$  則代表上一次計算得到的角度， $\theta_{acc}$  是加速度所轉換而成的角度， $Gy$  是陀螺儀量測到的角速度， $dt$  為上一次感測器回傳資料至此次回傳資料所花的時間， $a$ 、 $b$  分別代表在互補濾波中陀螺儀訊號及加速規訊號轉換成的角度值的權重， $a$  及  $b$  的值分別為 0.97 及 0.03，各代表陀螺儀換算而成的角度佔了 97% 的權重，加速規則是 3% 的權重。 $a$  和  $b$  數值選擇原因為互補濾波器使濾波後的數據雜訊可以得到抑制的同時，量測數據也不會因為運作時間變長而有偏移的狀況產生，因為角速度所換算的訊號雜訊的狀況較小，互補濾波器大部分的權重分配給角速度所換算的訊號，可使互補濾波器的訊號擁有陀螺儀訊號雜訊較小的優點。而加速規訊號的部分只要有小部分的權重，可以將互補濾波器的訊號收斂至不會偏移的加速規角度。

實際機台驗證部分，本實驗將 MPU6050 運動量測單元與 Arduino Uno 開發板進行連接，並將量測裝置安裝於百德機械 UX600 五軸加工機的工作平台中央，並調整工具機的 A 軸調整工作平台的傾斜角度，將量測到的數據經過 Arduino Uno 版進行角度換算以及濾波之後，將處理完成的角度值回傳至電腦進行可視化處理，如圖 2 所表示。

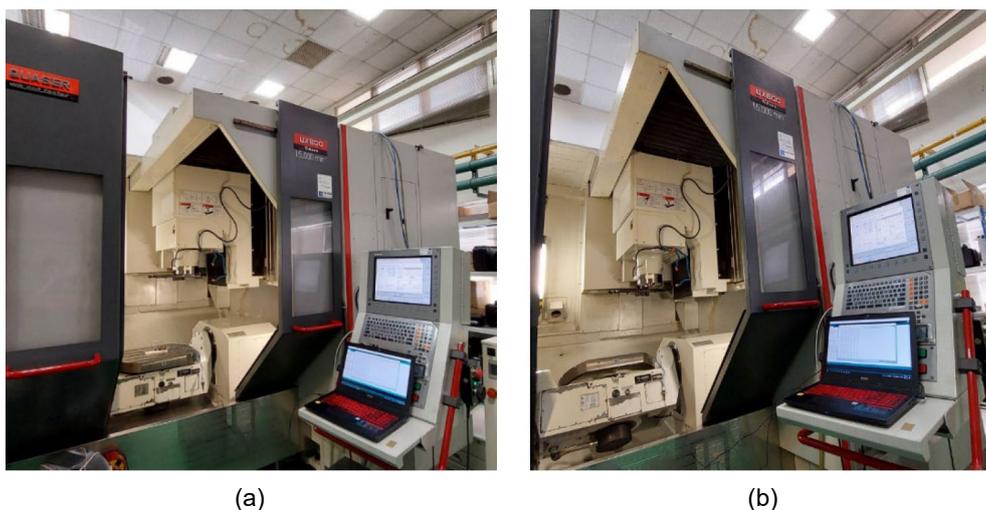


圖 2. 百德機械 UX600 五軸加工機：(a) 角度驗證實驗和 (b) 機台傾斜量測實驗。

### 三、實驗結果

本研究有四種量測角度的方法：(1) 使用加速規量測的角度、(2) 使用陀螺儀量測的角度、(3) 使用互補濾波後的角度和 (4) 使用卡爾曼濾波後的角度，圖 3 為使用不同角度量測方法及卡爾曼濾波的比較圖，量測物件靜止角度參數分別為 1、1.5 和 5 度，由結果可以觀察出使用加速規量測出的訊號，即使在靜止情況下，仍有較明顯的雜訊，使用陀螺儀所求出來的角度，雖然雜訊較低，但隨著時間物件運動時間的增長，會有累積誤差的現象產生。使用互補濾波器後，可以看到有效的抑制大部分的雜訊且偏移量較小，但仍有少部分雜訊無法抑制。使用卡爾曼濾波方法，偏移量小，且抑制雜訊的效果比互補濾波方法好。

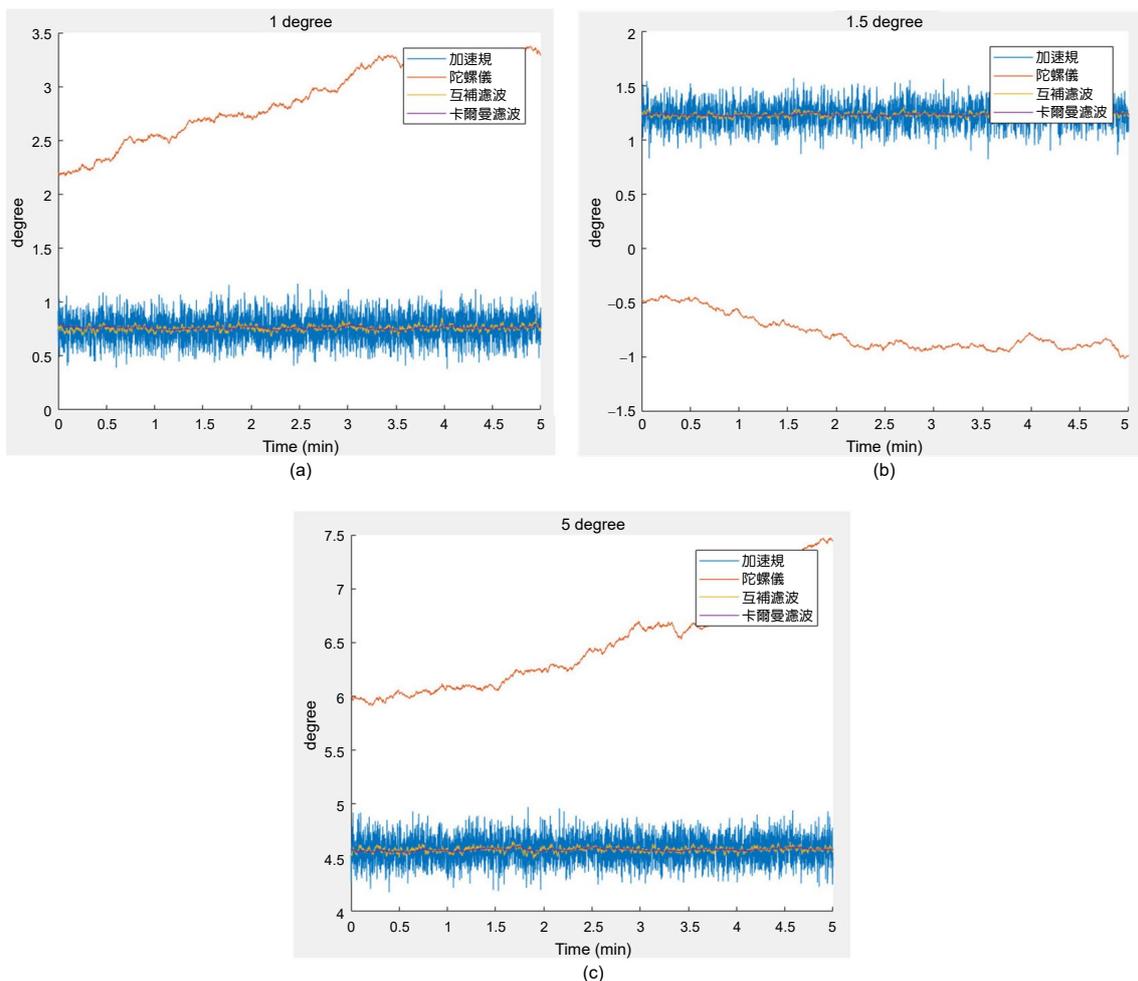


圖 3. 使用不同角度量測方法及卡爾曼濾波的比較：(a) 物件靜止於1度時；(b) 物件靜止於 1.5 度時；(c) 物件靜止於 5 度時。

表 3 及表 4 為各種角度量測方法在各角度狀態下所量測到之數據與實際角度之間的均方根誤差 (root mean square error, RMSE) 和標準差 (standard deviation, SD)。由表格中結果顯示加速規和陀螺儀所量測的數據，在經過兩種濾波後，均方根誤差及標準差都減少，由此結果可知數據經過濾波後，有效的提升了整體精準度和抑制雜訊的效果。

表 3. 均方根誤差比較。

	加速規	陀螺儀	互補濾波	卡爾曼濾波
1	0.27	1.907	0.243	0.240
1.5	0.284	2.327	0.260	0.258
5	0.438	3.018	0.422	0.423

表 4. 標準差比較。

	加速規	陀螺儀	互補濾波	卡爾曼濾波
1	0.1182	0.3538	0.0238	0.0116
1.5	0.1173	0.1550	0.0243	0.0130
5	0.1172	0.6917	0.0242	0.0130

圖 4 為將工具機機台角度從 0 度調整至 -5 度時，IMU 量測數據與時間的關係圖，結果顯示使用加速規量測出訊號的雜訊較大，增加精準判讀實際角度的困難度。使用陀螺儀量測出的角度訊號雖然較為平穩，但是隨著機台運作時間變長，誤差逐漸變大，由圖中觀察到陀螺儀的訊號在機台轉向結束後大約偏移了 1-2 度。使用互補濾波或卡爾曼濾波方式皆可有效減少雜訊，但是卡爾曼濾波需要時間調整卡爾曼增益，所以需要較長的時間收斂至正確的角度值。

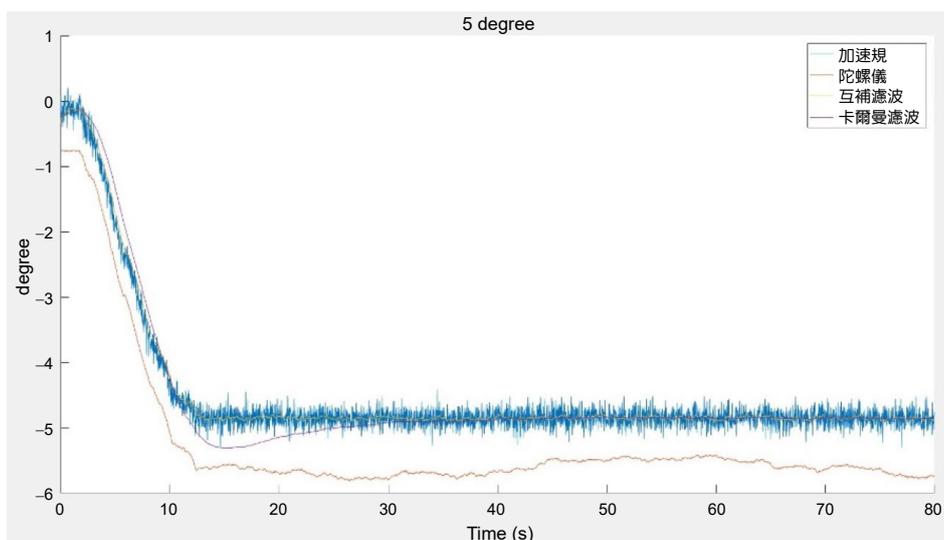


圖 4. 機台角度調整後 IMU 量測數據與時間的關係。

圖 5 為在機台在靜止狀態下，使用動態敲擊槌敲擊機台，IMU 量測出的角度結果，結果顯示加速規的訊號受到振動時角度值有較大的振盪，陀螺儀的角度訊號雖然較為平穩，但是其量測時間增加其誤差會增加。使用互補濾波仍會隨著振動而有一定的振盪。使用卡爾曼濾波方式，量測的角度訊號幾乎不受振動所影響。

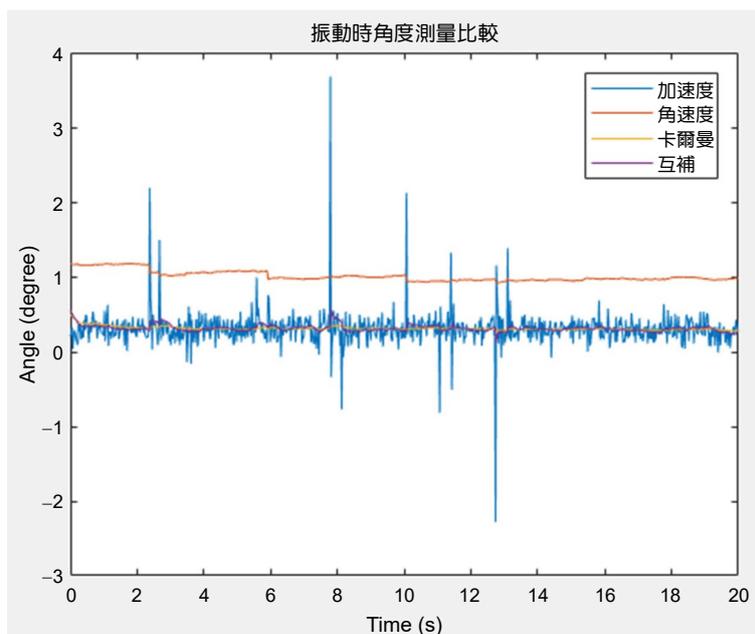


圖 5. 機台受到振動時 IMU 量測出的角度與兩種濾波方式的結果。

表 5. 為將四種量測角度的方法與所得到的雜訊、偏移量、振動影響和收斂時間關係表格。

表 5. 四種量測角度的方法不同數值比較。

	加速規	陀螺儀	互補濾波	卡爾曼濾波
雜訊	高	低	次高	低
偏移量	低	高	低	低
振動影響	最高	次高	次高	低
收斂時間	短	短	次長	長

## 四、結論

本研究目的在設計一個價格便宜的慣性測量單元，可即時量測出工具機運作期間的誤差位置變化，進一步對誤差進行補償，提升工具機加工之精度。研究中使用四種量測角度的方法，結論歸納如下：

1. 使用加速規量測方式，雜訊和受到震動影響最高，收斂時間是最短的。
2. 使用陀螺儀量測方式，雜訊低和收斂時間短，但是隨著時間增加其誤差訊號會有累加效應，放大誤差值。
3. 使用互補濾波及卡爾曼濾波可有效改善其雜訊抑制、偏移量和降低受到振動影響，卡爾曼濾波方式各方面都比卡爾曼濾波方式好，唯一的缺點是收斂時間長。

## 誌謝

感謝財團法人精密機械研究發展中心以及財團法人國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 參考文獻

1. Gregory W. Vogl, Brian A. Weiss and M. Alkan Donmez, *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, PHM, **6** (36), 2015.
2. G J Aparna, C Kamal, Rajesh N Motta, "IMU Based Attitude Estimation Using Adaptive Complimentary Filter", 2021 International Conference on Communication information and Computing Technology (ICCICT), August 12, (2021)
3. J. Juan Rincon Pasaye, J. Alberto Bonaes Valencia, Felix Jimenez Perez, "Tilt measurement based on an accelerometer, a gyro and a Kalman filter to control a self-balancing vehicle", 2013 IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing, Nov 13-15, (2013).

## 作者簡介

林彥勳先生現為國立彰化師範大學機電工程所碩士生。

Yan-Xun Lin is currently a M.S. student in the Department of Mechatronics Engineering at National Changhua University of Education.

吳仲偉先生為逢甲大學機械所碩士，現為財團法人精密機械研究發展中心經理。

Chung-Wei Wu received his M.S. in the Department of Automatic Control Engineering from Feng Chia University. He is currently a Manger in Precision machinery research & development center.

林奕成先生為國立虎尾科技大學飛機工程學系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理研究員。

Yi-Cheng Lin received his M.S. in the Department of Aeronautical Engineering from National Formosa University. He is currently an Assistant Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蕭文澤先生為國立彰化師範大學機電工程所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Wen-Tse Hsiao received his Ph.D. in Mechatronics Engineering from National Changhua University of Education. He is currently a Research Fellow at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

曾立維先生為美國德州農工大學機械所博士，現為國立彰化師範大學機電工程所助理教授。

Li-Wei Tseng received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Texas A&M University, USA. He is currently an Assistant Professor in the Department of Mechatronics Engineering at National Changhua University of Education.