量測機台幾何誤差之六軸雷射干涉儀

Six-Degree-of-Freedom Interferometer for Detecting Geometric Errors of Precision Stages

林世聰 [1*]、馬兆廷 [2]、陳世剛 [3]、陳昭元 [2]、黃泓諭 [2]、廖述政 [4]

[1] 國立台北科技大學光電系 教授

[2] 國立台北科技大學光電工程系研究生

[3] 台北科技大學自動化科技研究所 博士生

[4] 旭東機械工業股份有限公司 副理

摘要：隨著工業 4.0 的快速發展，智能工廠已成為現在工業趨勢，其中干涉儀將擔任超精密離線或線上量測的最重要角色。本研究提出一套干涉儀，它是由一雙頻雷射和六個干涉模組所組成，且它能夠同步地檢測精密平台的六個位移 (兩個沿 x 軸，三個沿 y 軸，一個沿 z 軸)，並依此計算該平台的六自由度幾何誤差。本文詳細地介紹了該干涉儀、實驗架設、與實驗結果。結果證實了所提出干涉儀的正確與可應用性。

Abstract：With the rapid development of Industry 4.0, smart factories have become the current industrial trend where interferometers would be in charge of offline or online super-precision inspections. An interferometer, composed of a dual-frequency laser and six interference modules, capable of inspecting precision stages was proposed in this research. The interference modules retrieve six displacements, two along x-axis, three along y-axis, and one along z-axis of the examined stage, which are then used to figure out the stage's six-degree-of-freedom geometric errors. This paper introduces the interferometer in detail, it then presents the experimental results from the use of the interferometer. The results confirm the validity and applicability of the proposed interferometer.

關鍵詞：差頻干涉儀、精密位移平台、六自由度、幾何誤差

Keywords：Heterodyne interferometer, Precision stage, Six-degree-of-freedom, Geometric error

前言

精密線性位移平台已是現今工具機、數控加工中心、LCD 檢測機、座標測量機等的關鍵元件；理想情況下，精密線性位移平台會沿直線行進而沒有定位誤差；然而，機台製造誤差、安裝誤差和環境之擾動使得其位移在六個自由度有一個定位誤差 (εx)、兩個直線度誤差 (εy,εz) 和三個旋轉誤差 (α,β,γ)，這在很大的程度上影響了機台的性能。為了瞭解這六自由度誤差的大小，雷射校準系統乃被開發出來 [1-3]; 然，它們存在著測量耗時且不能檢測 α - 誤差缺失，其中測量耗時是由於必需逐一地測量各個誤差所致。

為了克服上述雷射校準系統的缺點，學者們提出了許多光學儀器 ; 其中一些是基於干涉儀和位置感測器的理論 [4-8]、一些是基於干涉儀和光柵繞射的理論 [9]、一些是基於干涉儀、位置感測器和自動準直儀的理論 [10]。然而，它們中的一些使用特定的組件，使得它們的被複製困難；一些使用低解析力的測頭，使得它們對誤差的檢測，精細度不足。

六軸干涉儀量測原理

本研究乃提出一套創新型六軸干涉儀，它包含六個干涉模組；而這六個模組又可成兩類：縱

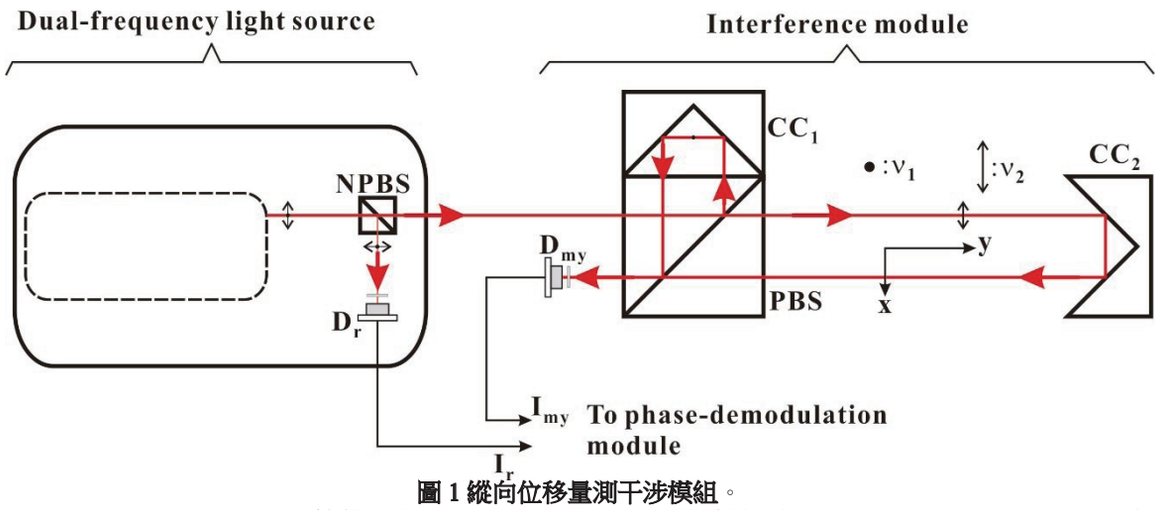

圖 1 縱向位移量測干涉模組。

Dual-frequency light source：雙頻光源、interference module： 干涉儀模組、phase-demodulation module: 相位解調模組、NPBS：非偏極分光鏡、PBS：偏極分光鏡、CC_1 及 CC_2：反向反射鏡、D_r 及 D_{my}：光接收器

向與橫向位移量測干涉模組。底下先說明這兩模組的量測原理，在闡述本六軸干涉儀的架構。

● **縱向位移量測干涉模組**

圖 1 所示即縱向位移量測干涉模組的架構；它包含一雙頻光源、一干涉儀模組、及一相位解調模組。雙頻光源包含一雷射源、一非偏極分光鏡、及一光接收器，且它輸出一雙頻雷射與一參考信號 I_r；其中雙頻雷射的頻率分別為 v_1 及 v_2、且極化態又分別為垂直線偏極 (振盪方向垂直入射面，以 ● 表示) 及水平線偏極 (振盪方向平行入射面，以 表示)。干涉儀模組包含一偏極分光鏡、兩反向反射鏡、及一光接收器；其中反向反射鏡 CC_2 被固定在受測平移台上，隨該平移台沿 y 軸移動。來自光源的光束在偏極分光鏡處，被分為垂直及水平線偏極光兩束，它們緊接著又分別被反向反射鏡 CC_1 及 CC_2 反射回偏極分光鏡，並重新合併；最後重新合併光，在光接收器產生量測信號 I_{my}。

我們由參考資料 [1] 及 [2] 知，I_r 及 I_{mx} 有關係式分別為

$$I_r = I_r0[1+\gamma_r cos(2\pi\Delta vt)] \quad (1)$$

及

$$I_{my}=Im0[1+\gamma_m\ cos(2n\Delta vt-\Phi)]。 \quad (2)$$

其中，I_{r0} 及 I_{m0} 為信號背景光強、γ_r 及 γ_m 為信號對比度、ΔV=V1—V2、及

$$\Phi=\frac{4\delta}{\ddot{e}}V。 \quad (3)$$

注意 (3) 式中的 V 是指，反向反射鏡 CC_2 隨平移台沿 y 軸移動的距離；而 (1) -(3) 告訴我們，只要能粹取出 I_r 及 I_{my} 的相位差 Φ，我們便能解出受測平移台的位移。

相位解調模組的功能是，粹取出 I_r 及 I_{my} 的相位差 Φ，並依 (3) 式輸出位移 V。

● **橫向位移量測干涉模組**

如**圖 2(a)** 所示，縱向位移量測干涉模組和橫向位移量測干涉模組的差異僅在干涉儀模組，它包含一非偏極分光鏡、一 Wollaston 稜鏡、一 V 型反射鏡、及一光接收器；其中 Wollaston 稜鏡被固定在受測平移台上，隨該平移台沿 y 軸移動。來自雙頻光源的雙頻雷射穿過非偏極分光鏡後，Wollaston 稜鏡處被分為垂直及水平線偏極光兩束，且它們個別和 y- 軸夾 角；垂直及水平線偏極光來到 V 型反射鏡後，被反向反射回 Wollaston 稜鏡處，重新合併；最後，合併光束被引往光接收器，以偵測出它們的量測信號 I_{mx}，它俱以下關係 [13]：

$$I_{mx}=I_{m0}[1+\gamma_m cos(2\pi\Delta vt-\Gamma)] \quad (4)$$

其中

更完整的內容

詳見 ▌機械工業雜誌 ▌ ・428 期・107 年 **11** 月號

機械工業雜誌・每期 **220** 元・一年 12 期 **2200** 元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

匯款帳號：兆豐國際商業銀行新竹分行(代號 017)，帳號/ 203-07-02288-0

訂書專線：03-591-9339

傳　　真：03-582-2011

機械工業雜誌・官方網站：www.automan.tw

機械工業雜誌・信箱：jmi@itri.org.tw