

複合結構光式動態三維形貌精密量測技術

Dynamic Three Dimensional Surface Profile Measurement Using Composite Structure Light Projection

陳亮嘉、翁明軒

Liang-Chia Chen, Ming-Xuan Weng

本研究提出一個複合結構光式動態三維形貌精密量測方法，乃結合傅立葉輪廓術 (Fourier transform profilometry, FTP) 與相移輪廓術 (phase shifting profilometry, PSP) 兩種演算法，所發展出一種具即時量測能力之創新性複合式條紋輪廓術 (composite fringe profilometry, CFP)，其量測精密度可媲美 PSP，且可同時達到動態三維形貌量測之創新動態形貌量測技術。將不同相位的正弦條紋進行色彩編碼，以組合形成一種具獨特性的結構圖案並且投影至物體表面上，利用高速影像單元取像並且由所發展的帶通濾波器 (band-pass filter) 進行處理。本技術能夠以最高取像速度進行三維影像之重建能力 (目前可達數百 Hz 以上)，主要原理乃利用 FTP 萃取出之彩色結構光 (紅藍綠, RGB) 結構條紋，並同步進行三步之相位重建。在初步的驗證階段，本方法將可以達到接近於傳統相移術的量測精度與重複度，並且可即時獲得三維影像資訊的能力。針對標準階高量測所產生之最大誤差，可控制在全高量測範圍的 1.231% 以內。

In the article, a novel composite fringe profilometry (CFP) method based on both of Fourier Transform Profilometry (FTP) and phase shifting principle (PSP) is newly proposed to achieve the measuring accuracy closely reaching to the approximately same level by PSP, as well as one-shot imaging capability for achieving high-speed 3-D profile measurement. Multi sinusoidal colour fringe patterns are encoded to form a unique composite colour pattern for projecting onto the object's surface, and its reflected deformed fringe image is taken by use of a triple-colour CCD camera and rapidly processed by the developed CFP method employing an innovative band-pass filter. To reconstruct a 3-D profile of an object, a new strategy is developed to wrap three FTP-derived phases by using the PSP method, in which surface reconstruction can be performed robustly for production of high-quality profile information. By measuring standard step heights in a repeatability test, it is confirmed that a maximum measured error can be controlled less than 1.231% of the overall measuring depth range.

一、前言

隨著不斷精進的工業技術發展與機械自動化產業的開發，對於機械視覺的依賴程度也愈來愈加重要，早期對於加工物件的檢測大多以人力檢測為主，由於自動化生產的需求，人力檢測漸漸無法滿足日漸蓬勃的產量需求。因此，對自動化機具的加工物件進行即時性的三維形貌量測，將是未來的一大挑戰與技術突破的重點。

目前三維形貌的量測相當廣泛，大多是運用於分析現實空間中的物體形狀與外觀特徵(如顏色、表面反射率等)。舉凡工業設計、醫學資訊、逆向工程、生物資訊、瑕疵檢測等，皆仰賴許多三維形貌技術的發展與利用。三維形貌技術並非單一技術之發展，利用的方法也有相當多樣的選擇，如雷射掃描儀、結構光、相移術、傅立葉輪廓術等，每一種方法都有其優點與量測上的極限存在，無法定義何種方法為最佳的量測技術，只能根據不同情況選用適合的優勢技術。

三維形貌量測為逆向工程技術中分析物件構造的方法，其中可分為接觸式 (contact) 與非接觸式 (non-contact) 量測兩大類別，如圖 1 所示。傳統的接觸式量測系統已經廣為產業界所使用，如探針式 (stylus)、掃描式探針顯微鏡 (SPM)，以上舉例皆為

破壞性量測方式，皆有測量時間長、需進行測量半徑之補償、無法量測脆弱物體表面之缺點。在工業發展與科學技術的日漸茁壯，對於粗糙度、幾何尺寸、表面輪廓、各種模具與自由曲面的量測需求也越來越繁複，精度要求也跟著提高。因此為了克服傳統量測技術的不足，便發展出光學式三維形貌量測法，亦稱之為非接觸式量測。

非接觸式光學三維形貌量測技術包含以下幾種方法：時間飛行法 (time of flight)⁽¹⁾，此法系直接利用電磁波發射與接收的時間差達到量測目的，其解析度約可達到厘米等級；疊紋法 (Moire)^(2, 3) 利用兩組不同週期的光柵或條紋相互疊合產生另一組週期條紋進行量測；其他還有許多不同的方法，如干涉法 (interferometry)、編碼法⁽⁴⁻⁶⁾、相位量測法⁽⁷⁾ 等。

傳統的物體三維形貌量測大多採用相移術進行輪廓重建，但是傳統的相移術需要多張的影像資訊才能進行完整的輪廓重建，這對於高速量測的需求將是一大挑戰。Huang 於 1999 年所研究之彩色數位條紋投影技術應用於高速三維曲面輪廓⁽⁸⁾，此研究乃採用三步相位移法，主要是將三張不同顏色 (R、G、B) 的影像，利用每一張影像具有 120 度的相位差，組合到同一張影像上，最後形成一張具有三種不同顏色 (紅、綠、藍) 之色澤正弦條紋結構

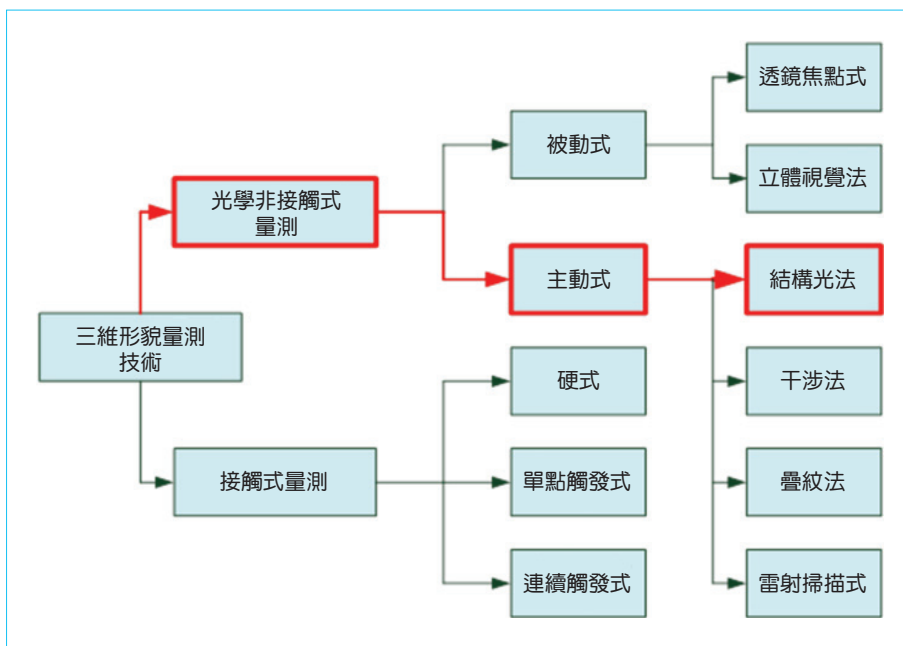


圖 1. 三維形貌量測技術分類圖。

光。Chen 等人於 2008 與 2009 年提出利用 HIS 色彩分離後進行相移術的即時三維量測^(9, 10)，此研究利用投影梯形彩色結構光，所發展之高速動態全域式三維形貌重建技術。使用均勻分布與色彩鮮豔彩色頻譜的梯形結構光取代彩色正弦結構光。並且採取 HIS 色度座標之 Hue domain 轉換影像資訊演算為相位資訊求取物體形貌，大大避免 RGB 分色與正弦結構光可能產生之誤差，此法也必須建立 LUT 對色彩進行校正。

有別於上面所陳述的方法，Takeda 提出的傅立葉轉換三維形貌量測術 (Fourier transform profilometry, FTP)^(11, 12)，提供了另一種不需多張影像資訊便可取得物體相位資訊的演算法。此法確實改變了相移術需要多張投影的缺點，但是要如何將空間域資訊轉換至頻率域資訊，將我們所感興趣的有用的頻率域資訊利用帶通濾波器擷取並得到相位資訊，如何設計出較為理想的帶通濾波器，也成為了後面研究中很重要的一個環節。Breluzeau 等人於 2005 年探討不同類型濾波器對量測結果之影響⁽¹³⁾，本研究主要是探討在使用傅立葉輪廓術，將所擷取到的影像由空間域轉至頻率域後，需進行帶通濾波器取得所需的資訊，而獲得資訊的多寡皆會影響到最後物體三維形貌重建後的結果，因此設計各種不同形狀的濾波器，以探討濾波器形狀對於物體三維形貌重建後帶來多大的差異。

Hassebrook 等人在 2003 年提出了一個全新的概念，利用四張不同週期的萃取條紋與四張相移條紋產生複合式條紋，這個方法稱為複合式條紋結構光投影法 (composite structured light pattern)⁽¹⁴⁾，以下簡稱複合條紋投影法。複合條紋投影法只需進行一次的取像便可以進行四步相移，在演算法中使用傅立葉轉換進行萃取，和最後使用相移術進行重建三維輪廓。複合條紋投影法看似相當的精簡和聰明，得到了相移術及傅立葉轉換三維形貌量測術的眾多優點，但更多問題也跟著浮現出來，例如如何在頻率域中，將我們所要萃取出的資訊分別萃取出來，這變成為了一大難題，在 Hassebrook 等人的研究中，僅僅提供此前衛的想法，但對於缺點的改善卻並沒有更好的研究。

針對複合條紋投影法，我們歸類出一些實際

上會遇到的問題與定義。首先在設計複合式結構光時，必須考量投影機所能投影與光耦合元件 (charge couple device, CCD) 所能擷取的最小週期條紋影像，即使電腦能產生細微的條紋資訊，但是不論是 CCD 或是投影機都有所謂的光學極限，一但超過了極限，這對於之後的演算法都將無效。第二在於當我們擷取到影像後，將資訊由空間域轉換至頻率域，必須對我們所需要的資訊進行萃取，但是此步驟卻衍生許多實際執行上的困難，在有物體情況下的條紋資訊，根據物體的輪廓之複雜變化，條紋資訊將有很大的不同，而且條紋本身交互疊合的情況下，使得頻率域的萃取工作產生一些難題，此問題也是本研究中需要克服的重要部分。

二、複合結構光式動態三維形貌量測技術

本研究之方法係設計複合結構光配合硬體架構進行三維表面重建技術，接下來將針對本研究細分幾個部分，介紹如何透過精密的演算過程，獲得物體之三維表面輪廓。

1. 設計複合結構光

利用 RGB 三色產生同週期之萃取條紋，取代原先所使用不同週期之灰階條紋，如圖 2 所示。

先定義 RGB 三色萃取條紋之方程式如下：

$$I_{\text{carrier}}^{r,g,b} = \frac{255}{2} + \frac{255}{2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{P_{\text{carrier}}}x\right) \quad (1)$$

其中， P_{carrier} 為萃取條紋的週期， x 為影像 x 方向的座標變化。接下來，定義相移條紋之方程式：

$$I_i^{r,g,b} = \frac{255}{2} + \frac{255}{2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{P_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi i}{n}\right) \quad (2)$$

其中， P_{shift} 是相位移條紋的週期、 n 為相移術之步進數， i 為 1-3 之間的移相次數和 y 為影像中 y 方向之座標變化。

接著以兩相對應的色彩影像進行疊合：

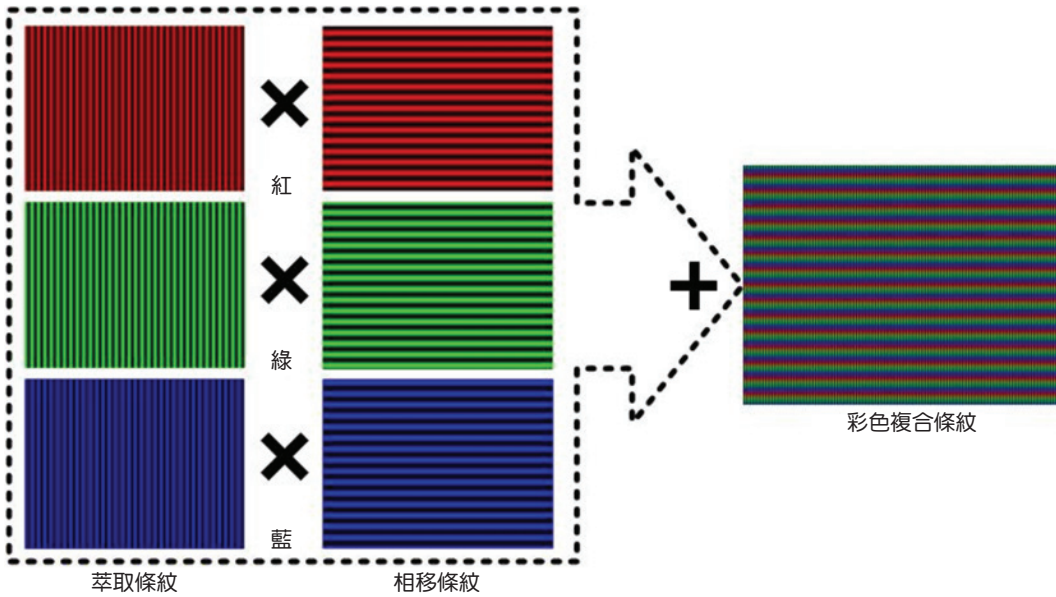


圖 2.
彩色複合式結構光
設計方法。

$$\begin{aligned}
 I^{R,G,B} &= I_{\text{carrier}}^{r,g,b} \cdot I_i^{r,g,b} = \\
 &\left(\frac{255}{2}\right)^2 \cdot \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi i}{n}\right) \right. \\
 &+ \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi n}{N}\right) \\
 &\left. + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - \frac{2\pi n}{N}\right) \right\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

最後相加所有結果便可獲得下式：

$$\begin{aligned}
 I_{\text{CFP}} &= \sum_{i=1}^3 I_{\text{carrier}}^{r,g,b} \cdot I_i^{r,g,b} = \\
 &\sum_{i=1}^n \left\{ \left(\frac{255}{2}\right)^2 \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi i}{n}\right) \right. \right. \\
 &+ \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi i}{n}\right) \\
 &\left. \left. + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - \frac{2\pi i}{n}\right) \right] \right\} \quad (4)
 \end{aligned}$$

2. 複合結構光量測原理

將原先的結構光改成 RGB 所組合而成的彩色複合式條紋結構光後，所採用的條紋擷取方式，和原先所提出的方法將有一些改變，以下分四個步驟

說明，首先我們將投影至物體上的結構光利用 CCD 擷取後，將所得到的彩色資訊將 RGB 的資訊分別取出，得到萃取條紋和相移條紋所結合的影像資訊；接著將 RGB 所萃取出的影像，利用傅立葉轉換至頻率域，使用帶通濾波器可以得感興趣的相移條紋資訊，最後利用相移法求得物體相位資訊並轉換高度，如圖 3 所示。

當設計的彩色複合式條紋投影到待測物體或平面時，利用 CCD 所擷取之影像方程式，可將公式 (4) 改寫為：

$$I_{\text{CFP}}^P = A(x,y) + B(x,y) \cdot \sum_{i=1}^n I_{\text{carrier}}^{r',g',b'} \cdot I_i^{r',g',b'} + N(x,y) \quad (5)$$

其中，

$$\begin{aligned}
 I^{R',G',B'} &= I_{\text{carrier}}^{r',g',b'} \cdot I_i^{r',g',b'} = \\
 &1 + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x,y)\right) \\
 &+ \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi i}{n} + \phi(x,y)\right) \\
 &+ \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x,y) + \frac{2\pi i}{n}\right) \\
 &+ \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - \frac{2\pi i}{n}\right) \quad (6)
 \end{aligned}$$

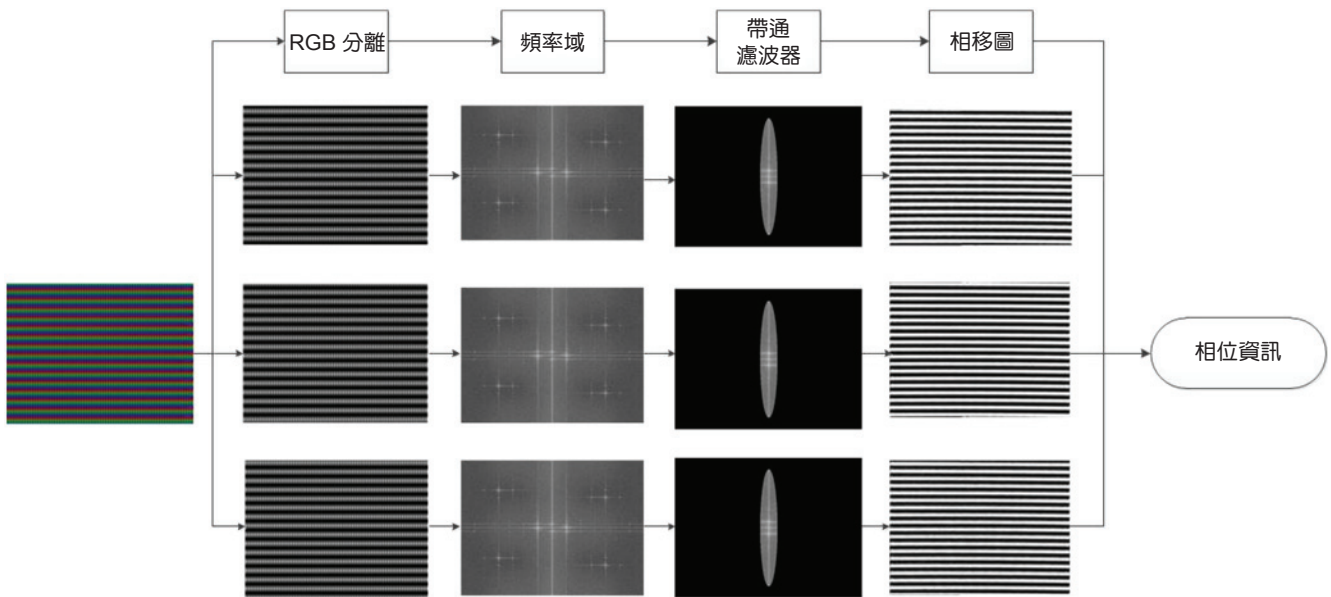


圖 3. 研究之演算法步驟示意圖。

其中， $A(x, y)$ 為背景光強值、 $B(x, y)$ 為條紋之振幅強度、 $\phi(x, y)$ 物體所改變的相位和 $N(x, y)$ 為影像中之不可估計之雜訊。

所使用之光偶元件可以進行 RGB 三色擷取影

像資訊，所以便可以利用 RGB 將所得到的資訊進行分離，分離後的影像將只會單一存在於八位元之灰階數值。因此，RGB 三色可分別獲得到三個萃取條紋與相移條紋所結合之資訊：

$$I^{R'} = I_{\text{carrier}}^{r'} \cdot I_1^{r'} = a^{r'}(x, y) + b^{r'}(x, y) \cdot \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x, y)\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi}{3} + \phi(x, y)\right) + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} + N^{r'}(x, y) \quad (7)$$

$$I^{G'} = I_{\text{carrier}}^{g'} \cdot I_1^{g'} = a^{g'}(x, y) + b^{g'}(x, y) \cdot \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x, y)\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{4\pi}{3} + \phi(x, y)\right) + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x, y) + \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - \frac{4\pi}{3}\right) \right\} + N^{g'}(x, y) \quad (8)$$

$$I^{B'} = I_{\text{carrier}}^{b'} \cdot I_1^{b'} = a^{b'}(x, y) + b^{b'}(x, y) \cdot \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x, y)\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + 2\pi + \phi(x, y)\right) + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x, y) + 2\pi\right) + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - 2\pi\right) \right\} + N^{b'}(x, y) \quad (9)$$

其中， $a^{r's'b'}(x, y)$ 為分離之疊合條紋影像背景光強度值、 $b^{r's'b'}(x, y)$ 為分離之疊合條紋振幅強度值； $N^{r's'b'}(x, y)$ 為分離後之色彩之間的互相干擾與雜訊。

根據尤拉數的定義：

$$e^{i\theta} = \cos\theta + isin\theta \quad (10)$$

因此，根據公式 (10) 可以重新編寫公式 (7)、公式 (8)、公式 (9) 方便之後利用傅立葉轉換至頻率域：

$$\begin{aligned} I^{R'} &= I_{\text{carrier}}^{r'} \cdot I_1^{r'} = a^{r'}(x, y) \\ &+ b^{r'}(x, y) \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x, y)\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x, y)\right)} \right] \right. \\ &+ \frac{1}{2} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi}{3} + \phi(x, y)\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi}{3} + \phi(x, y)\right)} \right] \\ &+ \frac{1}{4} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right)} \right] \\ &\left. + \frac{1}{4} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - \frac{2\pi}{3}\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - \frac{2\pi}{3}\right)} \right] \right\} + N^{r'}(x, y) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I^{G'} &= I_{\text{carrier}}^{g'} \cdot I_1^{g'} = a^{g'}(x, y) \\ &+ b^{g'}(x, y) \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x, y)\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x, y)\right)} \right] \right. \\ &+ \frac{1}{2} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{4\pi}{3} + \phi(x, y)\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{4\pi}{3} + \phi(x, y)\right)} \right] \\ &+ \frac{1}{4} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x, y) + \frac{4\pi}{3}\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x, y) + \frac{4\pi}{3}\right)} \right] \\ &\left. + \frac{1}{4} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - \frac{4\pi}{3}\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - \frac{4\pi}{3}\right)} \right] \right\} + N^{g'}(x, y) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} I^{B'} &= I_{\text{carrier}}^{b'} \cdot I_1^{b'} = a^{b'}(x, y) \\ &+ b^{b'}(x, y) \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x, y)\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \phi(x, y)\right)} \right] \right. \\ &+ \frac{1}{2} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi}{3} + \phi(x, y)\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi}{3} + \phi(x, y)\right)} \right] \\ &+ \frac{1}{4} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x, y) + 2\pi\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x + \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \phi(x, y) + 2\pi\right)} \right] \\ &\left. + \frac{1}{4} \left[e^{i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - 2\pi\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi}{p_{\text{carrier}}}x - \frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y - 2\pi\right)} \right] \right\} + N^{b'}(x, y) \end{aligned} \quad (13)$$

分別對公式 (11)、公式 (12) 與公式 (13) 式分別進行離散傅立葉轉換，可獲得公式 (14) 與公式 (15)：

$$\mathfrak{F}[I^{R'}] = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{W-1} (I_{\text{carrier}}^{r'} \cdot I_1^{r'}) e^{-i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{W}\right)} \quad (14)$$

$$\mathfrak{F}[I^{G'}] = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{W-1} (I_{\text{carrier}}^{g'} \cdot I_2^{g'}) e^{-i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{W}\right)} \quad (15)$$

$$\mathfrak{F}[I^{B'}] = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{W-1} (I_{\text{carrier}}^{b'} \cdot I_3^{b'}) e^{-i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{W}\right)} \quad (16)$$

其中， M 與 W 為影像長邊與短邊之像數大小。

將所有多餘的條紋資訊與雜訊，利用帶通濾波器進行去除，由此步驟將會發現，空間域的資訊轉換至頻率域後可以容易地做出區分以及分析之間的關係，在空間域需要進行較為複雜的摺積概念，轉換至頻率域後只需要使用濾波器與頻率資訊進行相互乘積即可獲得所感興趣的資訊：

$$\mathfrak{F}[I_1^{r'}] = \mathfrak{F}[I_{\text{carrier}}^{r'} \cdot I_1^{r'}] \cdot \mathfrak{F}[h(x, y)] \quad (17)$$

$$\mathfrak{F}[I_2^{g'}] = \mathfrak{F}[I_{\text{carrier}}^{g'} \cdot I_2^{g'}] \cdot \mathfrak{F}[h(x, y)] \quad (18)$$

$$\mathfrak{F}[I_3^{b'}] = \mathfrak{F}[I_{\text{carrier}}^{b'} \cdot I_3^{b'}] \cdot \mathfrak{F}[h(x, y)] \quad (19)$$

其中， $h(x, y)$ 為帶通濾波器。在經過反離散傅立葉轉換，便可以取得相移條紋投影至物體上的影像資訊：

$$I_1' = b'(x, y) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{2\pi}{3} + \phi(x, y)\right) \quad (20)$$

$$I_2' = b^s(x, y) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + \frac{4\pi}{3} + \phi(x, y)\right) \quad (21)$$

$$I_3' = b^b(x, y) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{p_{\text{shift}}}y + 2\pi + \phi(x, y)\right) \quad (22)$$

最後，根據三步相移法，即可求解出物體相位資訊，並且結合物體三維形貌重建所使用的三角量測法，同時搭配利用相位差轉換高度，便可以得到待測物體精確之形貌高度資訊。

3. 帶通濾波器

瞭解帶通濾波器如何萃取所需要之相移資訊後，必須設計出一個較為理想之帶通濾波器並且達成本研究之目的。為了可以滿足萃取相移條紋資訊且同時可以剔除多餘雜訊等問題，定義出以下帶通

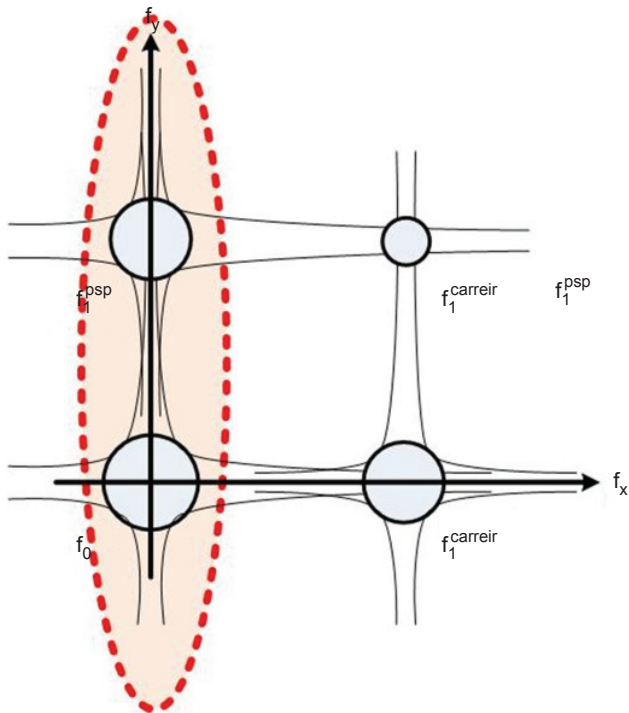


圖 4. 橢圓形濾波器萃取頻譜資訊示意圖。

濾波器：

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } D(u, v) \leq a \cdot b \\ 0 & \text{if } D(u, v) > a \cdot b \end{cases} \quad (23)$$

其中， $a \cdot b$ 為濾波器水平與垂直方向之截止範圍， $D(u, v)$ 為頻率域中點 (u, v) 到圈選中心 (h, k) 的距離，其可定義為：

$$D(u, v) = \left[\frac{(u-h)}{a}\right]^2 + \left[\frac{(v-k)}{b}\right]^2 \quad (24)$$

根據公式 (24) 可以明顯發現，此濾波器形狀呈現橢圓形適合本研究萃取訊息，利用快速傅立葉所取得之條紋頻率 (頻譜) 資訊 (如圖 4 所示)，再利用本研究開發之濾波器進行濾波萃取所需要之資訊。在此定義為 f_1^{psp} 相移條紋之中心頻率資訊與 f_1^{carreir} 為萃取條紋之中心頻率資訊，此二資訊在空間頻率為相乘機之條紋資訊轉換至頻率域為 $f_1^{\text{carreir}} \otimes f_1^{\text{psp}}$ 。

4. 相位轉換高度原理

本研究所使用的是結合三角量測與相位量測法之技術，當系統取得相位資訊 $\phi(x, y)$ 後，由三角量測法所建立之相位差與深度之間的關係進行轉換，其基礎架構可參考圖 5 所示。

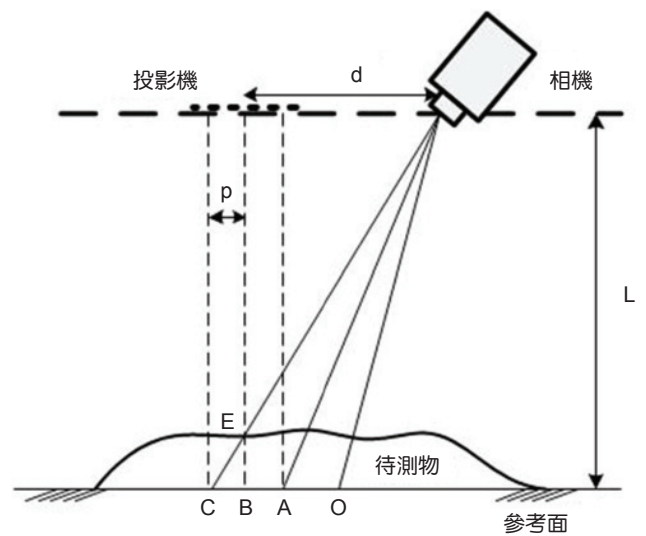


圖 5. 結構光投射量測系統示意圖。

首先相機與參考面之間的距離為 L ，相機與投影機之間的距離為 d ， E 點為待測物體上之一點，再參考面上有點 O 、 A 、 B 、 C 。當結構光投影至待測物表面時，假設 O 點的相位值為零，根據三角形的相似關係可得到：

$$\frac{\overline{AC}}{d} = \frac{\overline{BE}}{L - \overline{BE}} \quad (25)$$

當 \overline{BE} 遠小於 L 時，

$$\frac{\overline{AC}}{d} = \frac{\overline{BE}}{L - \overline{BE}} \approx \frac{\overline{BE}}{L} \quad (26)$$

$$\overline{BE} = \frac{\overline{AC} \cdot L}{d} \quad (27)$$

接下來，假設 A 點的相位值為 ϕ_A ， C 點相位值為 ϕ_C ，投影機投影之條紋週期為 p ，則 A 點與原點 O 的距離可表示為：

$$\overline{OA} = \left(\frac{\phi_A}{2\pi} \right) \cdot p \quad (28)$$

C 點與原點 O 的距離可表示為：

$$\overline{OC} = \left(\frac{\phi_C}{2\pi} \right) \cdot p \quad (29)$$

$$\overline{AC} = \overline{OC} - \overline{OA} = \frac{(\phi_C - \phi_A) \cdot p}{2\pi} \quad (30)$$

由於 A 點與 E 點為相同入射之光源，所以 ϕ_A 與 ϕ_E 相等，式 (30) 改寫為：

$$\overline{AC} = \frac{(\phi_C - \phi_A) \cdot p}{2\pi} = \frac{(\phi_C - \phi_E) \cdot p}{2\pi} = \frac{\phi_{CE} \cdot p}{2\pi} \quad (31)$$

其中， ϕ_{CE} 為 ϕ_C 與 ϕ_E 與之相位差。最後，將式 (31) 代入式 (27) 中可得：

$$\overline{BE} = \frac{\overline{AC} \cdot L}{d} = \phi_{CE} \cdot \left(\frac{pL}{2\pi d} \right) = K \cdot \phi_{CE} \quad (32)$$

由於實際進行量測是整個影像進行重建，故可將式 (32) 改寫：

$$h(x, y) = K \cdot \Delta\phi(x, y) \quad (33)$$

其中， K 代表 $\frac{pL}{2\pi d}$ ， $h(x, y)$ 代表 \overline{BE} ， $\Delta\phi(x, y)$ 代表 ϕ_{CE} 。

三、實驗量測結果分析

1. 系統改善條紋分布之分析

本研究中所採用的方式在進行條紋萃取的步驟時，已經將大多數可能對條紋影響之因素利用濾波器將之去除，因此研究中經上述處理所獲得之相移結構光，相較於其他相移術可以取得更為接近完美正弦結構光之條紋，這也代表可以減少非正弦結構光所帶來之量測誤差的影響。根據本研究之方法與未經過處理之正弦條紋比較其中的差異性，如圖 6 所示。可以明顯發現透過本演算法取得之條紋，

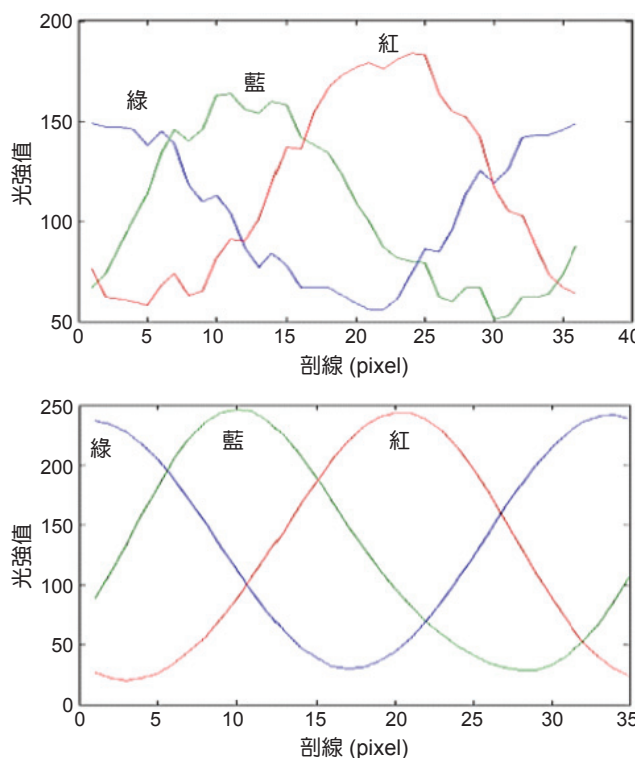


圖 6. 條紋光強分布：(a) 使用本方法前；(b) 使用本方法後。

其條紋光強分布最為接近理想條紋之特性，但是也同時隱藏了一些在進行演算法過程中，由於影像本身受到相機與投影機所造成的畸變通常無法完全剔除。根據比較使用一般正弦條紋和本研究所產生之正弦條紋進行相位還原，並且所取得之週期相位分布 ($0-2\pi$)，將之計算出相位差 $\Delta\phi$ 後進行分析其誤差之差異，其結果如圖 7 所示。可以發現在尚未使用任何方法補正時，所取得之相位差的誤差相當約 0.4，利用本研究之演算法誤差值大約為 0.2，由結果顯示本演算法可將條紋分布情形進行改善與修正。

2. 重複度量測與精度評估

針對不同的演算法則利用 9 mm 的標準階高塊進行三十次的重複量測，比較傳統三步相移、傅立葉輪廓術與本研究之演算法之間的差異性，並且分析其量測精密度與標準差等性能。本研究投影一張獨特的複合式條紋在 9 mm 的標準階高塊上並且擷取影像資訊後，如圖 8 所示。

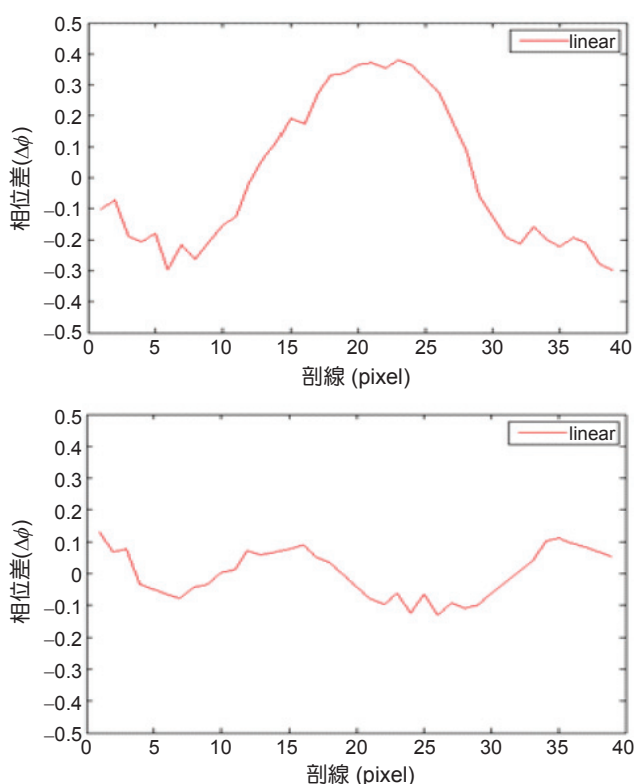


圖 7. 條紋還原週期相位差分布值：(a) 使用本方法前；(b) 使用本方法後。

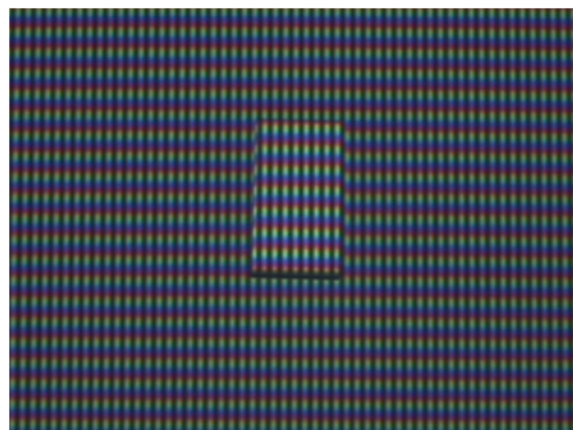


圖 8. 階高塊量測影像資訊。

透過演算法則將條紋萃取出後利用相移演算法取得相位資訊得到相位封裝與相位還原，利用相位轉高度之概念取得物體高度資訊建立三維形貌圖，如圖 9 所示。

將三十次重複量測的相移術、傅立葉輪廓術的結果分布與本研究方法進行比較，其中可以明顯發現相移術的重複性最佳，本演算法次之，但遠優於傅立葉輪廓術對於量測重複度之結果分布情形，參考圖 10 所示。

由量測結果明顯看出，相移術的量測分布情形大約是在 0.1 mm 的範圍之內，代表相移術的重複性在三者之間是最佳的，而傅立葉輪廓術再進行三十次量測，其高度分布的情形大約分布的範圍是 0.4 mm 的範圍，顯示出傅立葉輪廓術的重複性相當不理想，也間接影響其量測的可靠性；最後可以看到本演算法對於重複性的量測分布情形介於兩者之間，雖然尚未達到與相移術的高度重複性，但是整體表現優於傅立葉輪廓術。對於三種量測方法進行輪廓比較，將所取的之物體形貌水平和垂直剖面資訊，如圖 11 所示。

對於形貌重建上的差異性，針對相移術可以當作其依據的參考，在對本演算法進行分析與比較與傅立葉輪廓術之間的差異性與優勢。在整體的差異上來說，在於邊角的資訊重建為最大幅度的差異處，以相移術來說在其重建的完整性是最高，其次是本演算法，最後則是傅立葉輪廓術。

透過三十次的重複量測後，可以將一些數據進行整理、歸納與透過統計驗算出表 1 中，所列舉的

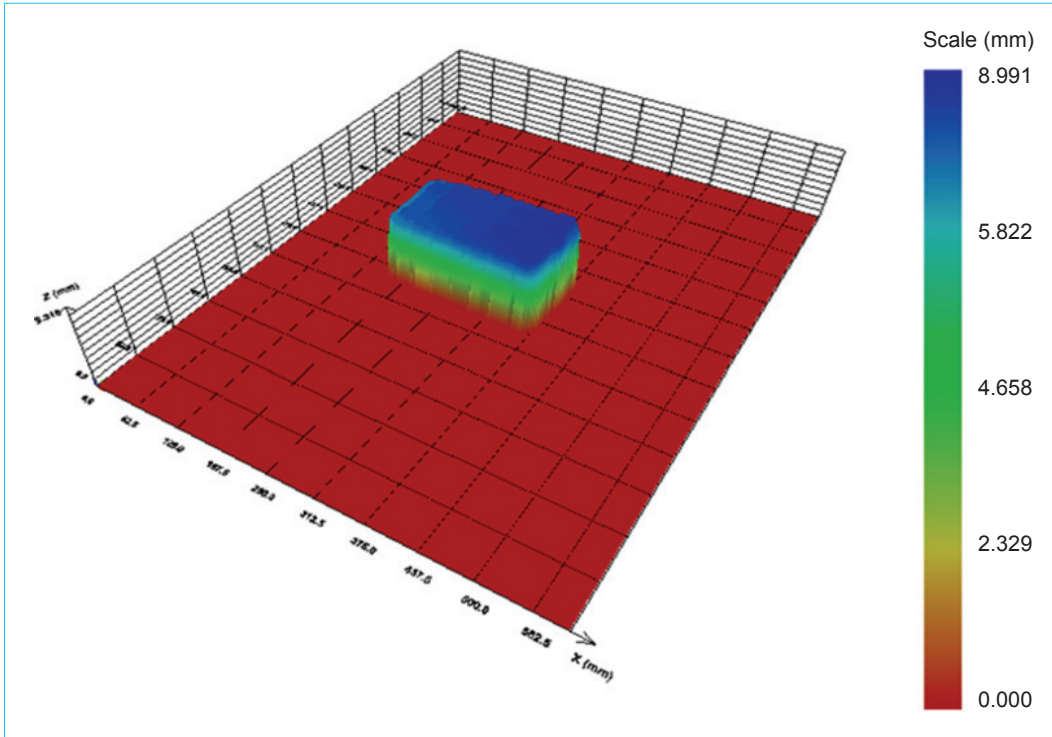


圖 9. 階高塊三維形貌表面輪廓圖。

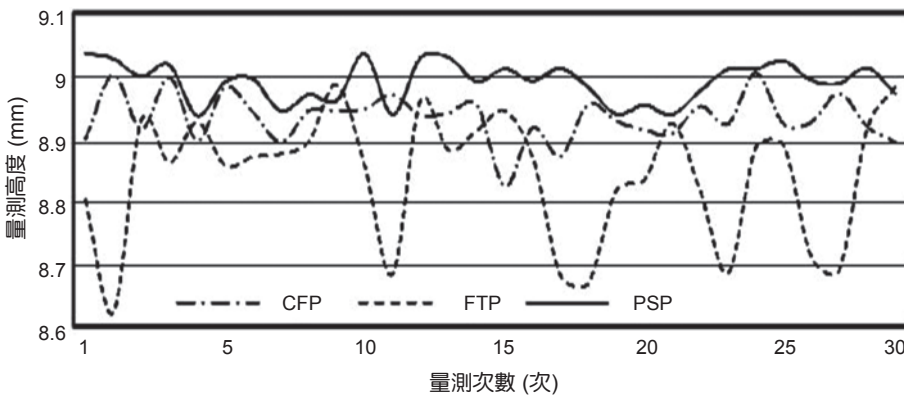


圖 10. 量測各方法量測重複度之比較。

	三步相移術	傅立葉輪廓術	本研究之演算法
ISO 平均高度值 (mm)	8.999	8.998	8.999
最大誤差 (μm)	54	224	111
平均準確度 (%)	0.295	1.763	0.744
平均精密度 (%)	0.289	0.937	0.334
標準差 (μm)	31.3	101.1	38.7

表 1. 各量測方法數據比較。

幾個量測評估項目，諸如平均高度 (ISO 5436-1)、最大誤差、最大誤差百分比、準確度、精密度、標準差等。在此所歸納出的一系列數據，皆是根據標準階高塊 9 mm 進行統計驗算與比較其中之差異。

3. 真圓球面量測結果

透過真圓球面之量測，可以測試本研究方法是否對於自由曲面物體量測之適用性。將結構光投影至真圓球表面，如圖 12 所示，透過本演算法可以

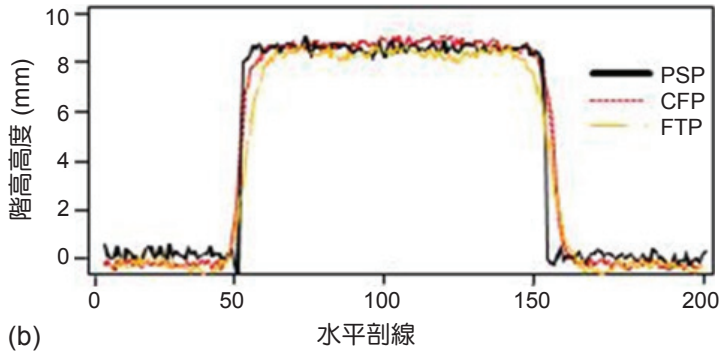
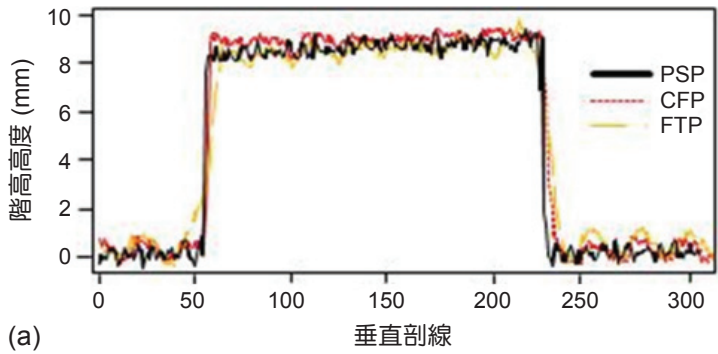


圖 11. 標準階高剖線分布各方法之比較：(a) 垂直剖線；(b) 水平剖線。

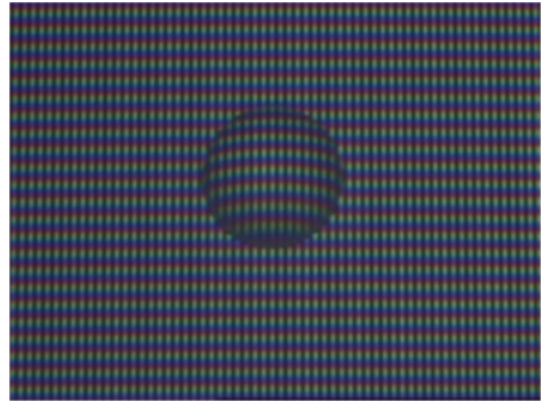


圖 12. 真圓球體量測影像資訊。

分離出相移資訊進行三維表面形貌重建與剖線資訊，如圖 13 與圖 14 所示。由結果可知，本研究方法對於自由曲面物體具有適當的量測能力。

4. 複雜物體量測結果

另一量測物體是魚骨模型，將結構光投影至表面，如圖 15 所示，此量測物件特別之處，在於可

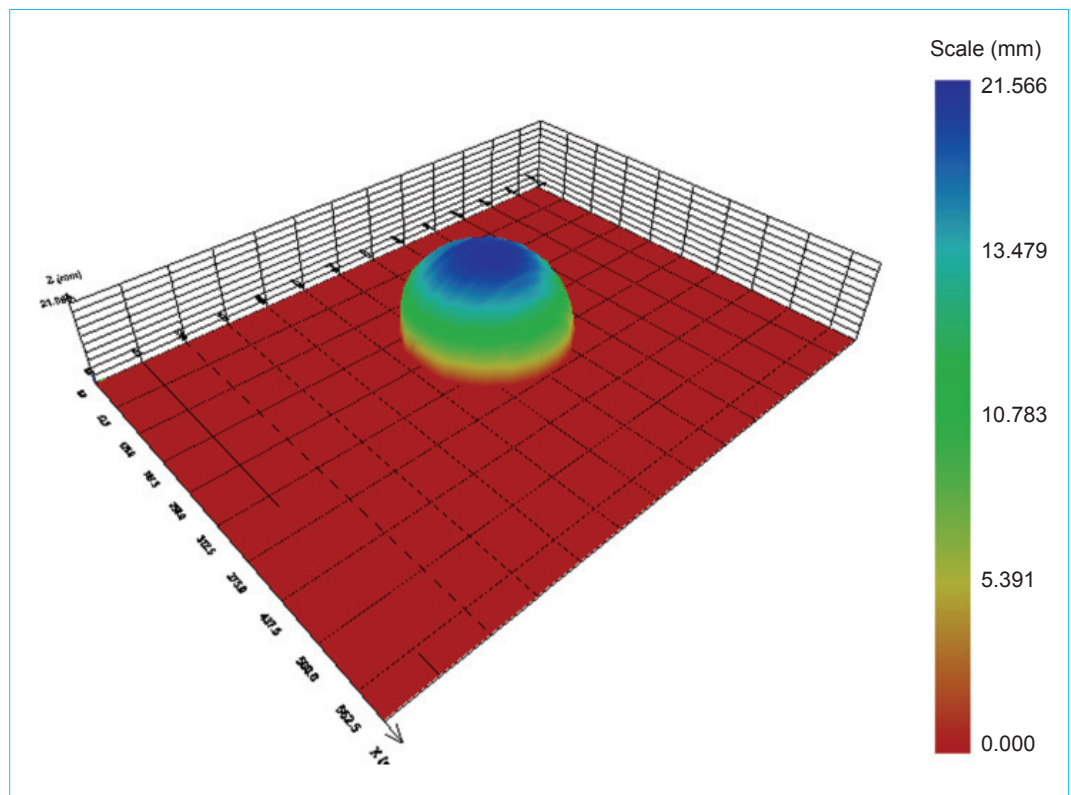


圖 13. 真圓球體三維形貌表面輪廓圖。

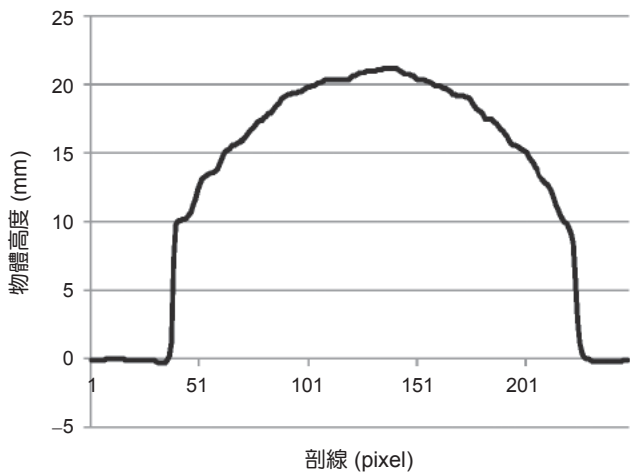


圖 14. 真圓球體剖線圖。

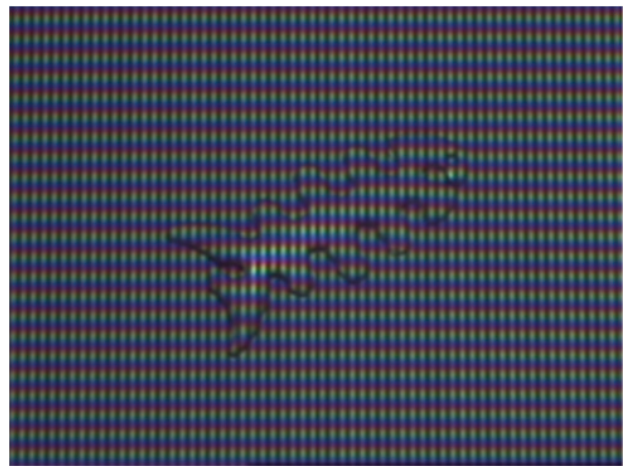


圖 15. 魚骨模型量測影像資訊。

測試本演算法可否可量測有較多不連續處的形貌，如圖 16 與圖 17 所示，由其三維形貌輪廓量測結果，可以了解其適用性。

四、結論

利用結構光投影與三角量測原理進行相位求解轉換高度之方法相當多元，尤其以相移術 (PSP) 與

傅立葉輪廓術 (FTP) 過去有很多發展，在傳統相移術中，利用多張相移結構光投影以及分析物體高度資訊步驟較耗時，無法達到即時量測，而利用單張投影之傅立葉輪廓術，雖具高速量測能力，卻因頻譜濾波不佳無法獲取完整物體相位資訊，量測精確性較差。

因此，本研究方法利用具單張取像能力且可同時獲得三步相移之複合式結構光投射法，巧妙結合

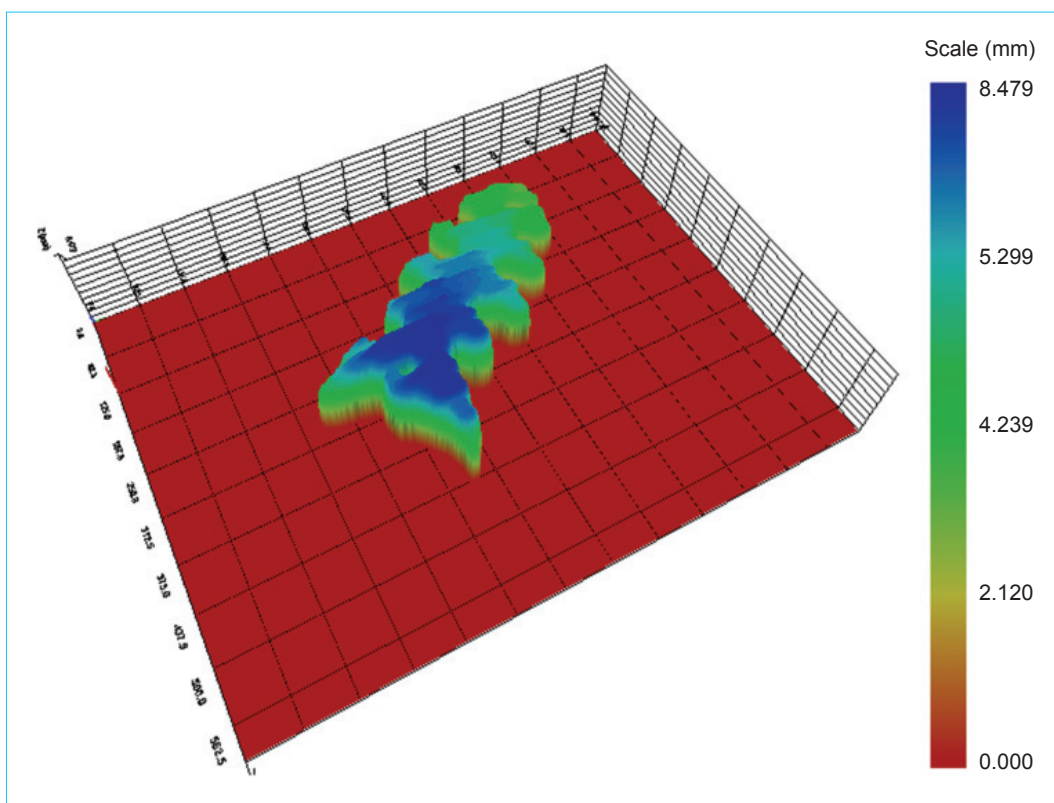


圖 16. 魚骨模型三維形貌表面輪廓圖。

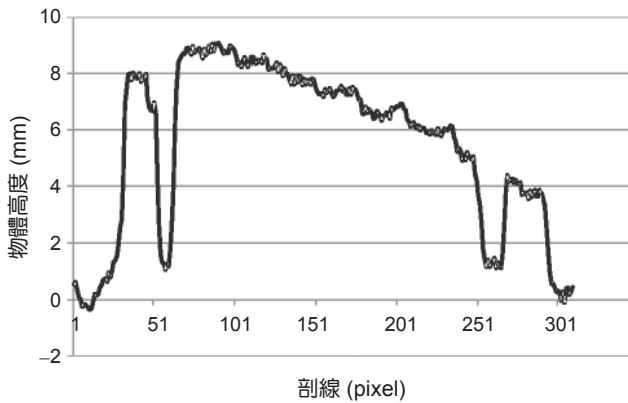


圖 17. 魚骨模型剖線圖。

傅立葉輪廓術與相移輪廓術兩種演算法之優點，完整避免原方法之缺點，順利發展出一種具即時量測能力之創新性複合式條紋輪廓術 (CFP)，其量測精密度可以媲美相移輪廓術，且可同時達到動態高速三維形貌量測能力。儘管目前的量測精度尚無法達到與相移術相同的水準，但是本法藉由未來不斷上頻譜濾波技術之精進，未來有潛力可發展成為一項高速三維形貌動態量測技術，提供線上自動化光學檢測或有需要高速形貌量測之科學性研究分析上使用。

參考文獻

1. R. A. Jarvis, *IEEE Transon PAMI*, **5**, 505 (1983).
2. M. Halioua, R. S. Krishnamurthy, H. Liu, and F. P. Chiang, *Applied Optics*, **22** (6), 850 (1983).
3. Y. B. Choi and S. W. Kim, *Optical Engineering*, **37** (3), 1005 (1998).
4. W. Z. Liu, G. Mu, and Z. Fang, *Applied Optics*, **39** (20), 3504 (2000).
5. L. Zhang, B. Curless, and M. Seitz, "Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming", *International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, 24 (2002).
6. H. J. Chen, J. Zheng, and J. Fang, *Optical Letters*, **33** (16), 1801 (2008).
7. 徐煥東, 相位測量輪廓術的理論研究及應用, 博士論文, 浙江大學 (2001).
8. P. S. Huang, Q. Hu, F. Jin, and F.-P. Chiang, *Optical Engineering*, 1065 (1999).
9. 許耀升, 利用 HIS 色彩梯形相移模型發展一種創新式高速三維形貌量測技術, 碩士論文, 台北科技大學 (2008).
10. L.-C. Chen, X. L. Nguyen, and Y. S. Shu, "High Speed 3-D Surface Profilometry using HSI Color Model and Trapezoidal Phase-shifting Method", *International Conference on Precision Measurement*, Technische Universitat Ilmenau, 08-12 September (2008).
11. M. Takeda and S. Kobayashi, *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 156 (1982).
12. M. Takeda and K. Motoh, *Appl. Opt.*, 3977 (1983).
13. C. Breuzeau, A. Bosseboeuf, S. Petitgr, and X. Leroux, *Proc. of SPIE*, **5858**, 58580B-1-58580B-12 (2005).
14. C. Guan, L. G. Hassebrook, and D. L. Lau, *Opt. Express*, **11**, 406 (2003).



陳亮嘉先生為澳洲南澳大利亞大學先進製造與機械工程博士，現任國立臺灣大學機械工程學系製造組教授。

Liang-Chia Chen received his Ph.D. in advanced manufacturing and mechanical engineering from the University of South Australia. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.



翁明軒先生為國立台北科技大學自動化科技研究所碩士，現任國立臺灣大學機械工程學系研究助理。

Ming-Xuan Weng received his M.S. in automation technology from National Taipei University of Technology. He is currently a research assistant in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.