

# 任意固定相位差的三步相位移三維量測技術

何庠達  
中央大學資訊工程學系  
a0921916@gmail.com

曾定章  
中央大學資訊工程學系  
tsengdc@ip.csie.ncu.edu.tw

## 摘要

我們利用結構光投影法 (structured light projection)，執行物件的三維量測。為了達到快速量測的目的，我們使用取像張數最少的三步相位移技術，並且加入 *CUDA* (Compute Unified Device Architecture) 平行處理演算法，提高量測的速度。另外，為了將來能將本技術應用在連續移動的生產線上，我們推導任意固定相位差的三步相位移演算法；經由投影一張固定的正弦條紋結構光，利用生產線本身的移動速度換算成相對相移量，以量測物體的高度。由實驗結果顯示目前精準度可到達 *mm*。將可變動相位的三步相位移演算法導入 *CUDA* 平行計算，平均處理時間約為 *4.9ms*，將其相較於 *CPU* 計算，可以獲得 38.7 倍效能的提升，若加入記憶體搬移的時間，整體效能提升了約 3.3 倍。

關鍵字：結構光投影法、三步相位移、*CUDA* 平行處理

## 壹、前言

### 一、研究背景與動機

隨著科技的進步，三維量測技術被廣泛的應用，例如醫學上人體輪廓的外型檢測、微機電系統中的元件完整檢測、晶圓表面輪廓量測等...，不同產業對於物體三維量測的需求越來越多，而在三維量測中最重要的就是如何精準且快速的獲得待測物的三維資訊，這也成為我們研究的主要動機。

現今三維量測方式大致上可以分為接觸式與非接觸式量測兩類。接觸式是利用探針 (probe) 搭配移動裝置於待測物表面逐點量測；一般而言，接觸式的量測精準度較高，但探針接觸待測物表面時可能造成破壞，且逐點量測可能造成量測時間過長。因此當量測範圍過大，或物體表面材質較脆弱時，就無法使用接觸式方式來量測。非接觸式量測顧名思義即為不需接觸待測物即可量測的技術。Bidanda *et al.* [2] 將非接觸式量測技術分為被動式與主動式兩類。被動式技術係指在自然光下，使用光學量測技術獲取所需要的量測資訊，如雙眼立體視覺法。主動式技術則以超音波或特殊產生的圖像投射至待測物上，以反推物體的三維資訊，如雷射測距法、疊紋法、結構光投射法。各種非接觸量測技術的量測模式、取像時間、量測時間、解析度與適用物件，如表 1 所示。

表 1：非接觸量測技術與性質。

	量測模式	取像時間	量測時間	解析度	適用物件
雙眼立體視覺法	面量測	1 秒內	普通	最低	<i>cm</i> 以上
雷射測距法	點或線掃描	無	最耗時	最高	<i>mm</i> 以下
疊紋法	面量測	1 秒內	普通	中	<i>cm</i> 以上
結構光投射法	面量測	數秒	普通	中	皆可

傳統結構光投射法是利用光柵或干涉技術產生有意義的圖案或條紋，搭配光源投影至物體上。但是由於光柵與干涉的製作不易，在實作上帶來諸多不便。而數位投影法利用事先於電腦程式產生灰階分佈的結構光圖案，用固定好的投影機與相機進行實驗，藉由投影機投射圖案至物體上並由相機取像，再根據相機所取的多張影像，同一像素但不同灰階關係來計算相位值，最後與基準平面的相位相減所得相位差，從幾何關係和相位變化來反推待測物的三維高度資訊。

數位投影法不僅解決了傳統結構光投射光柵或干涉之製作不易的缺點，還具有全場快速量測 (fast full field) 與易於實現 (implementation) 的優點，因此廣為使用。數位結構光圖案可以是點結構光、線結構光、及面結構光等，理論上結構光圖案越簡單計算速度越快，但量測解析度也變差；其中，基於餘弦波函數具有方便運算的特性，因此結構光最常使用的為投射餘弦灰階分佈的條紋至待測物上，稱正弦條紋投影法 (sinusoidal fringe projection method)；搭配數位投影法又稱數位餘弦條紋投影法。數位餘弦條紋投影法可搭配相位移法提升精準度，缺點為使用餘弦條紋計算相位時，需經過反正切 ( $\tan^{-1}$ ) 的運算，反正切函數的非線性特性在某些區間會有相位急遽變化的情況，進而影響到實驗精準度；為了改善此缺點有學者提出使用三角灰階分佈的三角條紋結構光方法，優點是不需經過反正切 ( $\tan^{-1}$ ) 運算，且藉由三角條紋的均勻灰階變化，可利用較少的影像計算出相位。在陳昭元 [1] 的碩士論文研究結果說明，事實上使用餘弦條紋量測較使用三角條紋量測穩定且精確。

我們希望可以快速的對待測物進行三維量測，並期望將來可以運用在生產線上的瑕疵檢測，所以我們選用取像較少的三步相位移當作我們量測物體的演算法。為了因應生產線移動的狀況，我們把原先的三步相位移重新推導成可變相位差的三步相位移，但由於取像較少，對於誤差敏感度大大提高，所以我們分析了環境造成的誤差，利用電腦模擬各項誤差，再把模擬出來的誤差製表給後續實驗做補償，藉此提升精準度，最後再加入平行化處理試圖達到快速且精準的三維量測。

## 二、系統流程

數位條紋投影法解決了傳統光柵製作不易的缺點，卻也產生了其他問題，例如連續函數轉離散灰階造成的誤差、投影機非線性輸出造成的誤差與相機量化灰階造成的誤差。在離線時，我們利用棋盤格校正法對相機進行扭曲校正；利用上昇平台的方式記錄各像素  $K$  值以便後面使用；在誤差部分，我們利用電腦模擬各項誤差來源，以每次只改變一項影響因素的方式將數據建表，以方便對之後的實驗數據做相位補償。把三張不同餘弦波影像校正後，利用校正後的像素，進行相位展開和相位與高度的轉換等技術求得物體的真實相位並且與參考平面之相位相減以取得真正的相位變化，最後藉由離線所校正的  $K$  值，將相位變化轉換為實際的高度資訊。系統流程如圖 1 所示。

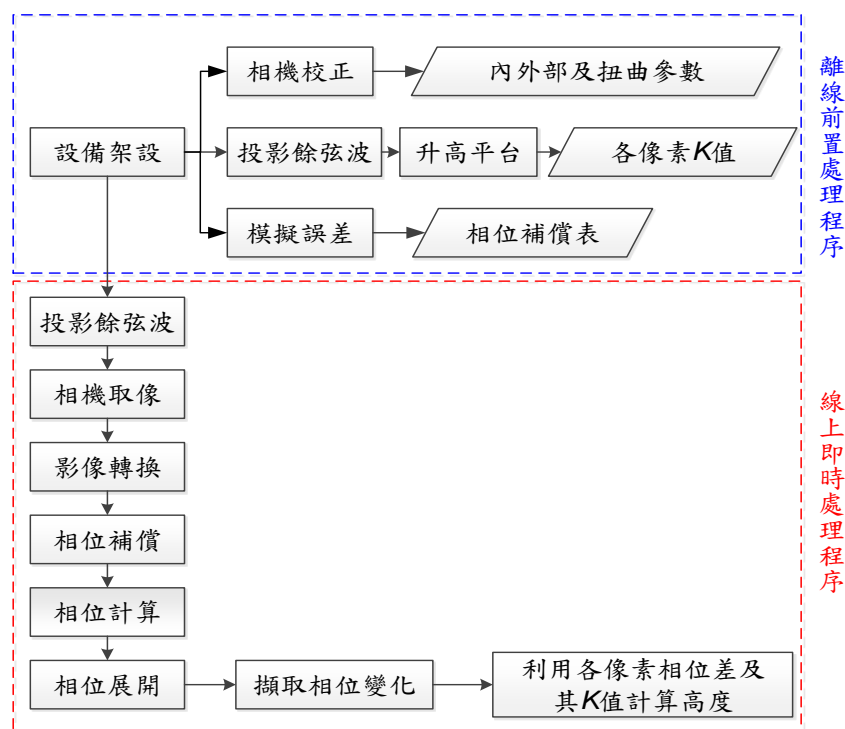


圖 1：系統流程

## 貳、研究方法

數位條紋投影法是利用投影機投影用電腦程式產生的相位移條紋在待測物上，藉由相機拍攝影像因待測物高度而變形的條紋，再透過相位移法與相位展開技術計算影像中每一像素的相位，最後經由相位與高度的轉換，計算出物體的高度資訊。

### 一、結構光投影法原理

#### (一) 數位條紋投影法原理

數位條紋投影法是利用程式撰寫灰階為餘弦函數分佈的灰階條紋，其條紋表示式為

$$I(x, y) = \ln[2^{d-1}(1 + \cos(\phi(x, y)))] \quad (1)$$

其中  $d$  為位元個數， $\phi(x, y)$  為相位， $\phi(x, y)$  與條紋週期  $p_0$  和條紋像素位置  $(x, y)$  有關。

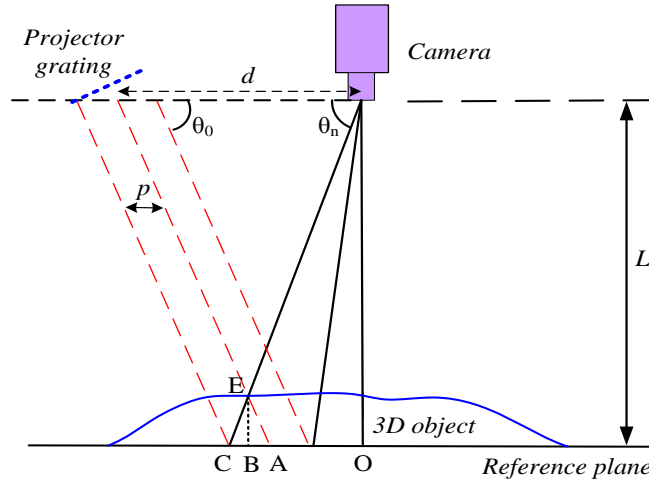


圖 2：數位條紋投影法示意圖

數位條紋投影法設置如圖 2 所示，相機與參考平面的距離為  $L$ ，相機與投影機間的距離為  $d$ ， $E$  為物體上之一點， $O$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  為參考平面上的點。投影機投射條紋投射至物體上。令參考平面上的點  $O$  相位為零，則藉由圖中三角形的相似關係可以得到

$$\frac{\overline{AC}}{d} = \frac{\overline{BE}}{L - \overline{BE}} \quad (2)$$

當  $\overline{BE}$  遠小於  $L$  時，

$$\frac{\overline{AC}}{d} = \frac{\overline{BE}}{L - \overline{BE}} \approx \frac{\overline{BE}}{L} \quad (3)$$

則公式可以整理成

$$\overline{BE} = \frac{\overline{ACL}}{d} \quad (4)$$

其中  $L$  和  $d$  與硬體架設有關係。假設  $A$  點的相位為  $\phi_A$ ， $C$  點的相位為  $\phi_C$ ，且投影條紋的有效波長 (effective wavelength) 為  $p$ 。有效波長為實際投射至物體上的條紋寬度，則  $A$  點與原點  $O$  的距離可表示為

$$\overline{OA} = (\phi_A / 2\pi)p \quad (5)$$

$C$  點與原點  $O$  的距離亦可表示為

$$\overline{OC} = (\phi_C / 2\pi)p \quad (6)$$

所以

$$\overline{AC} = \overline{OC} - \overline{OA} = (\phi_C - \phi_A)p / 2\pi \quad (7)$$

因為  $A$  點與  $E$  點為同一入射光源，因此  $\phi_A = \phi_E$ ，式 (7) 可改寫成

$$\overline{AC} = (\phi_C - \phi_A)p/2\pi = (\phi_C - \phi_E)p/2\pi = \phi_{CE}p/2\pi \quad (8)$$

其中  $\phi_{CE}$  代表  $\phi_C$  與  $\phi_E$  的相位差。將式 (8) 代入式 (4) 可得

$$\overline{BE} = \frac{\overline{ACL}}{d} = \phi_{CE}(pL/2d\pi) = \phi_{CE}K \quad (9)$$

其中  $K = pL/2d\pi$ 。

## (二) 相位移演算法

相位移法藉由引入已知相移量，擷取多張不同相位的條紋影像，以求得相位的值。假設影像中每個像素的灰階值表示式為

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos(\phi(i, j) + \delta) \quad (10)$$

其中  $\phi(i, j)$  為  $(i, j)$  像素點的相位角 (phase angle)， $A(x, y)$  為背景亮度， $B(x, y)$  為條紋強度的振幅， $\delta$  為已知相移量。上式中有三個未知數，欲解方程式至少需要三個不同相移量的像素灰階。因此有三步相位移法、四步相位移法、五步相位移法等。三步相移法因所需的影像張數最少，所以在影像擷取及影像處理計算所花的時間較短；缺點為相位計算的誤差較大。四步相移法由於其對稱的特性；因此計算式較簡潔，且對誤差擁有一定的抵抗能力。五步相移法中則藉由第一張相位圖與第五張相位相同的特性，修正相位移的誤差，且對誤差抵抗能力較大，但須較長的取像時間。在本研究中，我們採三步相位移法來量測相位角。

三步相移法首先利用投影機將三張相位影像的餘弦條紋投射到待測物表面。相移量為每步相位移  $2\pi/3$ ，許多實驗使用  $0, 2\pi/3, 4\pi/3$  做為三步相位移的相移量，但公式會變得相對複雜，我們採用相位分別為  $-2\pi/3, 0, 2\pi/3$  作為我們的相移量，利用相位移的對稱使得公式變得簡潔，如圖 3 所示。此三張影像可用下列方程式表示

$$\begin{cases} I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y) - 2\pi/3] \\ I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y)] \\ I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y) + 2\pi/3] \end{cases} \quad (11)$$

整理上述方程式，可以將公式整理成

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\sqrt{3} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3}\right) \quad (12)$$

計算出相位角  $\phi(i, j)$ 。

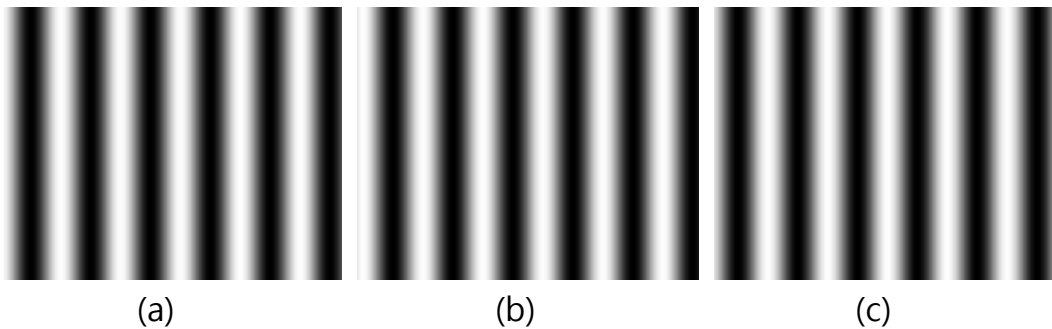


圖 3：三張間距為  $2\pi/3$  相位角影像。(a)  $-2\pi/3$  相位影像。(b)  $0^\circ$  相位影像。(c)  $2\pi/3$  相位影像

## (三) 相位展開技術

由於經過相位移法所得相位為一反正切函數，其相位值被包裹 (wrapped) 在  $[-\pi/2, \pi/2]$  間，稱為  $\pi$  模數 ( $\pi$  modulus)。可以利用反正切函數的分子與分母來將判斷相位所在象限，如表 2 所示；使相位擴展至  $[-\pi, \pi]$  或  $[0, 2\pi]$  之間，又稱  $2\pi$  模數 ( $2\pi$  modulus)。若想將此截斷的相位展開至連續之相位，則需透過相位展開技術。

表 2：相位判別表

分子	分母	$\phi$	相位範圍
+	+	$\phi$	$0 \sim \pi/2$
+	-	$\pi + \phi$	$\pi/2 \sim \pi$
-	+	$2\pi + \phi$	$3\pi/2 \sim 2\pi$
-	-	$\pi + \phi$	$\pi \sim 3\pi/2$
0	+	$\phi$	0
0	-	$\pi$	$\pi$
+	0	$\pi/2$	$\pi/2$
-	0	$3\pi/2$	$3\pi/2$

相位展開的基本想法為當基準點與其相鄰點的相位差大於  $\pi$  的時候，此點就需要相位展開，其方法為補上  $\pm 2\pi$  的落差值，如圖 4 所示。如此一來可得到一個連續的相位分布。一般可將一個二維的相位展開法表示成

$$\phi'(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi \text{Round} \left[ \frac{\phi(x, y) - \phi_0}{2\pi} \right], \quad (13)$$

其中  $\phi'(x, y)$  代表展開後的相位值， $\phi_0(x, y)$  代表鄰近點的相位。此法只適用於小雜訊且無任一不連續點 (discontinuity) 的相位圖；一旦雜訊過大或存在相位存在不連續點，則需利用其他相位展開演算法。本研究使用相鄰點比較是否相位差大於  $\pi$  的方式來實行相位展開。

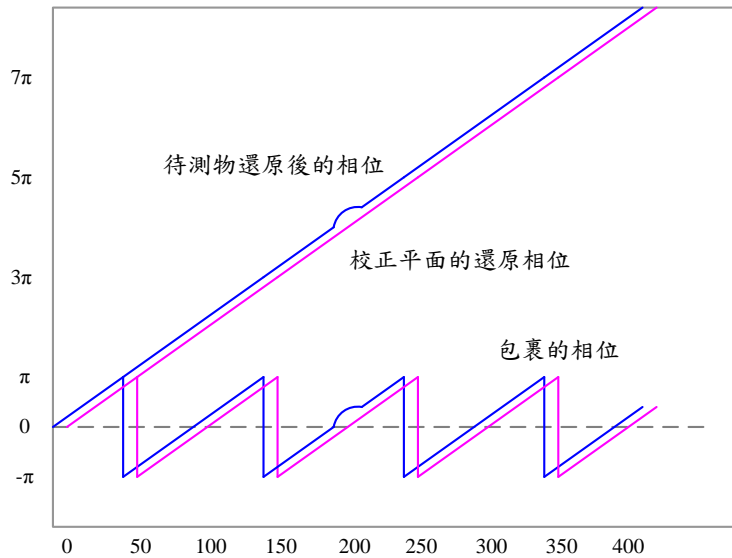


圖 4：相位包裹與展開示意圖

#### (四) 相位展開技術

利用相位展開技術展開相位後，其相位包含一傾斜量。為了從傾斜的相位中獲得相位的改變，可以利用與參考平面的相位相減獲得相位因高度產生的變化，如圖 4 所示。獲得相位的變化後，為了求得物體高度資訊，必須求出式 (9) 中的  $K$  值。方法為利用上升平台上升一已知高度，再由此高度和此高度引起的相位變化代入

$$K = \Delta h / \phi_{EC} \quad (14)$$

利用此方法的前提為物體高度需遠小於  $L$ ，優點為不必計算投射及取像的角度，缺點為一旦架設改變需重新求出  $K$  值。求得  $K$  值之後，代入式 (9) 可求出高度之變化。

### (五) 任意固定相位差的三步相位移演算法

前述的三步相位移理論是應用在待測物與相機皆不移動的情況下，投影機投影三張不同相位移的餘弦波，再利用相機拍攝的三張影像計算出每一個像素的相位，最後利用相位展開和相位與高度轉換等技術求得物體高度。考慮到未來可能應用在生產線上，為了配合生產線在不停止運作的情況下量測，我們推導了新的三步相位移公式，讓相移量不必侷限在  $2\pi/3$ ，將來可以利用固定投影餘弦條紋，再依照生產線速度換算成相移量進行三維檢測。

原先三步相位移公式為：

$$\begin{cases} I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y) - \alpha] \\ I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y)] \\ I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y) + \alpha] \end{cases} \quad (15)$$

簡略為

$$\begin{cases} I_1 = A + B\cos(\phi - \alpha) \\ I_2 = A + B\cos(\phi) \\ I_3 = A + B\cos(\phi + \alpha) \end{cases} \quad (16)$$

將  $\cos(\phi - \alpha)$  及  $\cos(\phi + \alpha)$  展開後，得到

$$\begin{cases} I_1 = A + B(\cos\phi\cos\alpha + \sin\phi\sin\alpha) \\ I_2 = A + B\cos(\phi) \\ I_3 = A + B(\cos\phi\cos\alpha - \sin\phi\sin\alpha) \end{cases} \quad (17)$$

為了將未知數  $A$  消去，把第一式減去第三式；兩倍的第二式減去第一、三式，得到

$$\begin{cases} I_1 - I_3 = B(2\sin\phi\sin\alpha) \\ 2I_2 - I_1 - I_3 = B(2\cos\phi - 2\cos\phi\cos\alpha) \end{cases} \quad (18)$$

將兩式相除消去  $B$ ，得到

$$\begin{aligned} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} &= \frac{\sin\phi\sin\alpha}{\cos\phi - \cos\phi\cos\alpha} \\ &= \frac{\sin\phi\sin\alpha}{\cos\phi(1 - \cos\alpha)} \\ &= \left(\frac{\sin\phi}{\cos\phi}\right)\left(\frac{\sin\alpha}{1 - \cos\alpha}\right) \\ &= \tan\phi\left(\tan\frac{\alpha}{2}\right)^{-1} \end{aligned} \quad (19)$$

最後將  $\tan\frac{\alpha}{2}$  移項並將  $\tan\phi$  取反函數求得  $\phi$  如下

$$\phi = \tan^{-1}\left(\tan\frac{\alpha}{2}\left(\frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3}\right)\right) \quad (20)$$

其中  $\alpha$  可利用輸送帶速度推算出相對投影波長造成的相移量。

## 二、部份影像平行處理演算法

在平行處理中主要負責平行處理加速的是  $GPU$ ， $GPU$  的功能是為了在運算時減少了對中央處理器 (control processing unit,  $CPU$ ) 的依賴， $GPU$  具有強大的浮點數計算能力與足夠的記憶體頻寬，而且  $GPU$  有很多計算單元，可將程式平行處理，因此在演算法執行時， $GPU$  的能力遠遠超過  $CPU$ ，因此有效地利用  $GPU$  可以大幅降低程式處理時間。 $CUDA$  採取異質程式設計 (heterogeneous programming)，如圖 5(a) 所示。程式的執行過程，會在  $CPU$  (Host) 與  $GPU$  (Device) 間合作。使用  $GPU$  處理影像的步驟，是由硬碟將影

像資料移到主記憶體，之後再由主記憶體傳送到 *GPU* 的記憶體 (host to device)，在 *GPU* 內計算完畢之後，最後再由顯示卡的記憶體移回主記憶體。

*CUDA* 將 *GPU* 的架構抽象化，一個可執行程式稱為 Kernel，交給抽象單位 Grid 來處理，而 Grid 則由許多個 Blocks 構成，每個 Block 又可以指定由多少個 Threads 構成。如圖 5(b) 所示。如此，可以讓程式設計者可以針對資料的大小與硬體資源，規劃出最佳執行資料的硬體資源分配方式，給予程式設計師最大的彈性。因此本次研究主要就是要規劃 *GPU* 內的資源配置，有效地利用 *GPU*。

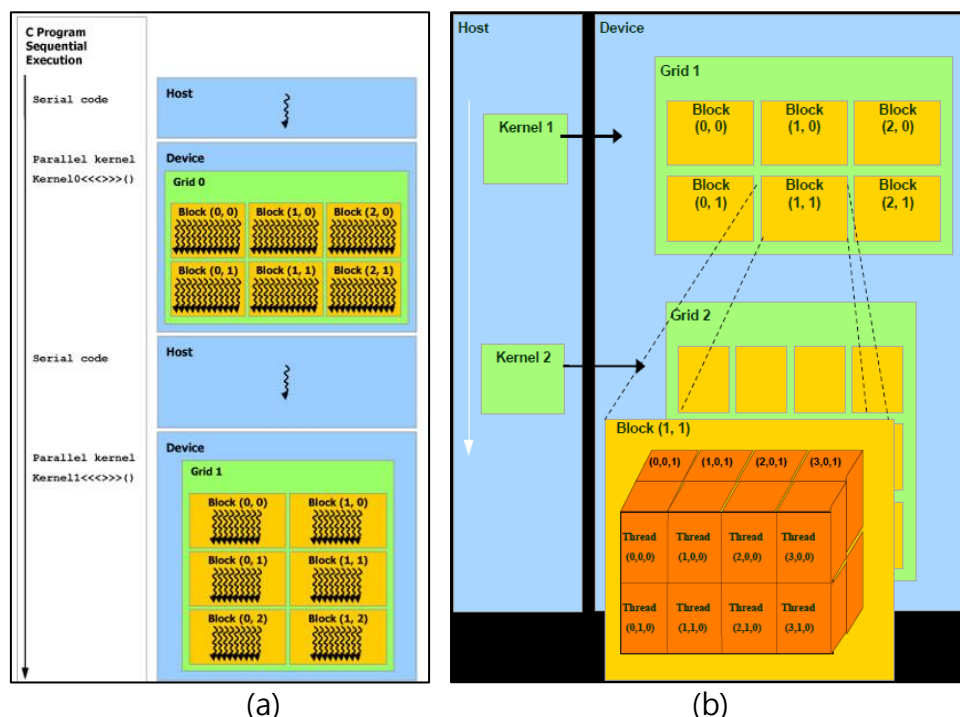


圖 5：CUDA 統一計算架構。(a) *CUDA* 的異質程式設計架構。(b) *CUDA* 的平行處理。

在不考慮校正的條件下，我們計算影像中所有點的相位並將其相位展開，因此我們需要輸入三張影像，與輸出一張影像。影像是  $1280 \times 960$  的灰階影像，我們將每個像素個別計算，而我們所使用的 *GPU* 中每個 Block 由 1024 個 Threads 構成，因此我們在 Grid 內規劃 1200 個 Blocks 來平行處理，由每個個別的 Threads 處理每個像素。最後使用 Visual Studio Profiler 來測量演算法執行時間，評估 *GPU* 內演算法的執行時間要用 *CUDA* Performance Analysis。

### 三、結構光誤差校正與非線性投射校正

傳統條紋投影法存在不同的誤差來源，使得取像的灰階產生偏移，影響計算相位的準確性。若對這些誤差來源的種類加以區分，可分為三大項 [5]：

- i. 於資料取得過程中所引起。
- ii. 環境中的振動或空氣擾動等因素所造成。
- iii. 原本存在於光學或機構上的設計誤差或製造瑕疵。

由於來自環境因素與光學的設計誤差或製造瑕疵，難以利用數學式子定義和量化，所以我們把研究目標訂定在解決於資料取得過程中所引起的誤差。資料取得過程中可能的誤差來源包含相位移量是否正確、光源的穩定性、影像量化灰階等問題。

數位條紋投影法雖然利用數位投影設備解決了相位移量控制不易的缺點，卻也產生了其他誤差來源。從利用灰階表達餘弦函數，投影機投射灰階至物體表面上到相機取像，其流程如圖 6 所示。為了分析方便，我們先假設物體反射係數為常數  $r(I_k^o = rI_k^p)$ ，誤差來源簡化為以下五種：



- i. 函數連續轉離散灰階造成的誤差 ( $I_k$  與  $I_k^d$  的誤差)。
- ii. 投影機非線性輸出造成的誤差 ( $I_k^d$  與  $I_k^p$  的誤差)。
- iii. 量化灰階造成的誤差 ( $I_k^p$  與  $I_k^c$  的誤差)。
- iv. 相機鏡頭的扭曲問題。
- v. 其他誤差來源產生的灰階跳動 (相同取像環境下,  $I_k^c$  的灰階變異)。

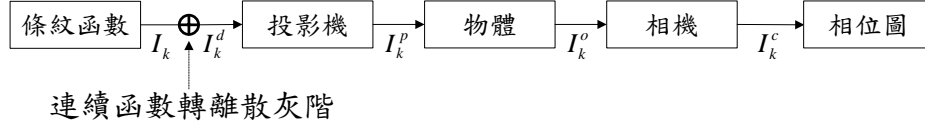


圖 6：數位條紋投影法資料取得過程。

以下將對這些誤差來源作介紹，並介紹我們如何利用電腦程式模擬誤差來源並對後續實驗做相位補償。

### (一) 函數連續轉離散灰階造成的誤差

在相位移公式中，條紋的強度為連續函數，其值應當為連續變化。但數位條紋投影法投射的條紋是以灰階為單位，屬於離散分佈，如圖 7 所示。連續函數與離散灰階的轉換，使得相位計算產生誤差，尤其當餘弦函數在接近波峰波谷時的急遽變化，往往造成相位計算上的極大誤差。

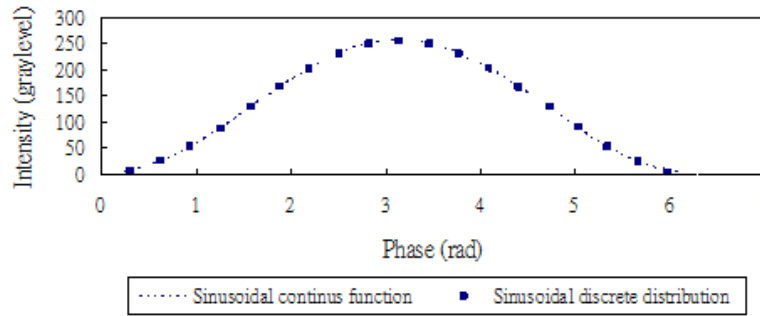


圖 7：連續函數值和離散灰階示意圖。

針對函數波形連續轉離散灰階造成的誤差。電腦程式模擬的步驟如下：

步驟 1：固定條紋週期，利用程式產生雙精倍度 (double) 數值分佈於 0 至 255 的三步相位移條紋。利用三步相位移公式求出影像的相位值  $\phi_k$ 。

步驟 2：固定條紋週期，利用程式產生整數 (int) 數值分佈於 0 至 255 的三步相位移條紋。利用三步相位移公式求出相位值  $\phi_k'$ 。

步驟 3：將步驟 1 與步驟 2 所求得的相位相減  $\Delta\phi = \phi_k - \phi_k'$ ，可得波形的相位誤差 (phase error)。

將相位誤差建表後，在往後的實驗做相位補償。

### (二) 投影機非線性輸出造成的誤差

投影機為了適應人眼對於亮度變化的敏感度曲線，定義了伽瑪 (gamma) 曲線，受到投影機的非線性輸出影響，影像的灰階強度已嚴重失真；而投影機造成的非線性現象稱為伽瑪失真 (gamma distortion) [4]，若以數學式描述，可表示為

$$I_{out} = 255 * \left(\frac{I_{in}}{255}\right)^{\gamma} \quad (21)$$

其中  $\gamma$  為投影機的伽瑪值， $I_{in}$  與  $I_{out}$  分別代表投影機的輸入與輸出強度，括號中的內容代表經正規化 (normalize) 後的強度，其分佈範圍為 0~1。當  $\gamma = 1$ ，表示投影機呈現線性輸出，否則存在伽瑪失真，如圖 8 所示。若利用此失真的灰階計算相位，則產生相位誤差。



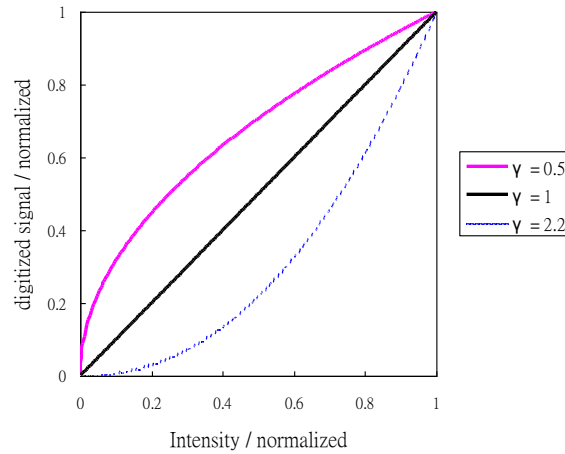


圖 8：投影機亮度輸出示意圖

### (三) 相機量化灰階造成的誤差

相機擷取待測物的條紋，並以灰階值來描述弦波的強度變化，這樣的動作稱為類比與數位訊號之間的轉換 (analog-to-digital converter)；而以多少的灰階值範圍來描述條紋強度，便是所謂的量化 (quantization) 問題。因量化造成的相位誤差之標準差可表示成 [3]

$$\sigma_{\phi_N} \approx \frac{1}{\sqrt{3NQ}} \quad (22)$$

其中  $Q$  為量化範圍， $N$  為相位移之步數。從式子中可以發現增加量化範圍或是相位移步數，皆可降低相位誤差。在數位條紋投影法中，量化範圍與投影設備和取像設備有關。實際應用上，可以控制投影的灰階強度和取像的光圈或快門來控制影像的灰階值範圍。

### (四) 相機鏡頭的扭曲問題

相機模型 (camera model) 由內部參數與外部參數組成，真實世界三維空間座標可透過相機模型轉換成影像平面座標。外部參數是將世界座標系統 (world coordinate system,  $WCS$ ) 轉換為以相機光學中心為原點的相機座標系統 (camera coordinate system,  $CCS$ )，與相機的擺設方式有關，若相機移動或轉動，外部參數也會跟著改變；內部參數則是根據針孔成像模型 (pin hole model) 的原理將相機座標系統投影至影像平面座標系統 (image coordinate system,  $ICS$ )，內部參數不會因為相機移動轉動而改變，只存在鏡頭與相機之間的座標轉換關係，但如果改變鏡頭焦距就會改變內部參數。

未來在生產線上使用，將採用投影一張餘弦圖，利用生產線的移動產生三步相位移演算法所需的相移量變化，並用高速相機取像，所以必須對相機與鏡頭做扭曲校正，去除待測物在相機畫面中因為區域不同扭曲程度不同所造成的相位錯誤。

本文所使用的方法是利用 *OpenCV* (open source computer vision) 中的 *calibrateCamera* 函式，它主要的概念是利用棋盤格校正法求出相機的內外部參數以及扭曲參數。

### (五) 其他誤差來源產生的灰階跳動現象

實際觀察影像，卻發現影像灰階在高亮度時，灰階容易有跳動的現象，如圖 9 所示。灰階的跳動與光源穩定性以及空氣擾動等有關。灰階的跳動使得相位產生誤差。實際應用上，我們使用平均多張影像的方式來減少灰階跳動的現象。

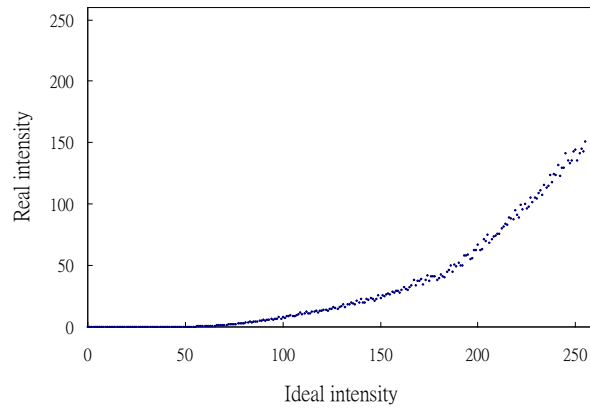


圖 9：實際取像感光分佈。

### (六) 條紋光迭代校正法

我們發現投影機非線性輸出和相機量化灰階造成的誤差並不能用電腦模擬的方式達到良好的校正，所以我們將一般校正的方法加以改良，讓相位補償能夠達到更好的效果。

一般校正方式皆需藉由單灰階投射來建立感光分佈的函數和反函數。由於單灰階投射建立的感光分佈與實際感光分佈不符，使得校正產生誤差。因此我們提出分析條紋灰階來建立感光分佈的函數。分析條紋灰階建立感光分佈函數的步驟如下：

步驟 1：利用投影機投射週期為  $P$  像素的條紋並擷取影像。

步驟 2：將每張影像中同一區塊  $5 \times 5$  的像素灰階值存入一陣列，對陣列元素作排序並分割成  $P$  等分，理論上，則每一等分會對應到一個投影灰階。以週期為 16 的正弦條紋為例，當條紋為理想分佈時，排序後的陣列由小到大分佈。實際取像時，受到相機取樣量化及其他誤差來源的影響，分佈將呈現平緩之灰階變化，如圖 10 所示。根據此陣列我們可以得到  $5 \times 5 \times p$  組分佈資料。實作上，我們只取區塊切割內的前 68% 的元素平均代表。因此從陣列中我們可以得到  $(G_n, R_n)$ ， $n = 0, 1, 2, \dots, 15$  共 16 組資料，其中  $G_n$  為理想灰階， $R_n$  為區塊切割內的前 68% 的元素平均值。最後利用這 16 組資料，以多項式逼近可求出目前條紋的感光分佈曲線函數。

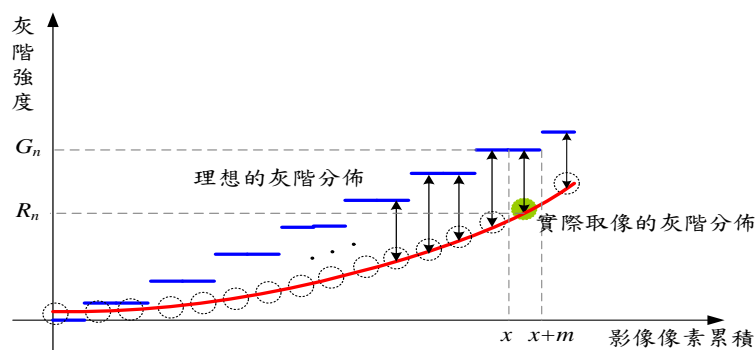


圖 10：從條紋灰階分析感光分佈的陣列元素分佈

## 參、研究成果

### 一、扭曲校正

平均多張拍攝影像後再利用影像處理軟體裁切出投影區域，最後將裁切好的影像做扭曲校正，將影像轉換成未扭曲影像，如圖 11 所示。

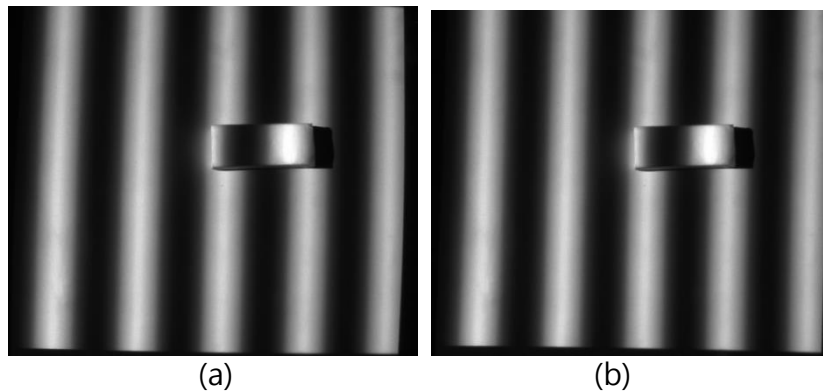


圖 1 1：扭曲校正。(a) 原始影像。(b) 校正後的影像

## 二、條紋光迭代校正法

我們提出條紋光迭代校正法對取像前後的條紋灰階來建立感光分佈的函數。再利用感光分佈函數對往後實驗所拍攝的影像再運算前進校正，以得到較準確的相位，校正結果如圖 12，藍色為投影前的條紋光；水藍色為經過投影取像後的條紋光；紅色為校正後的條紋光；實際對條紋光校正後的結果如圖 13。

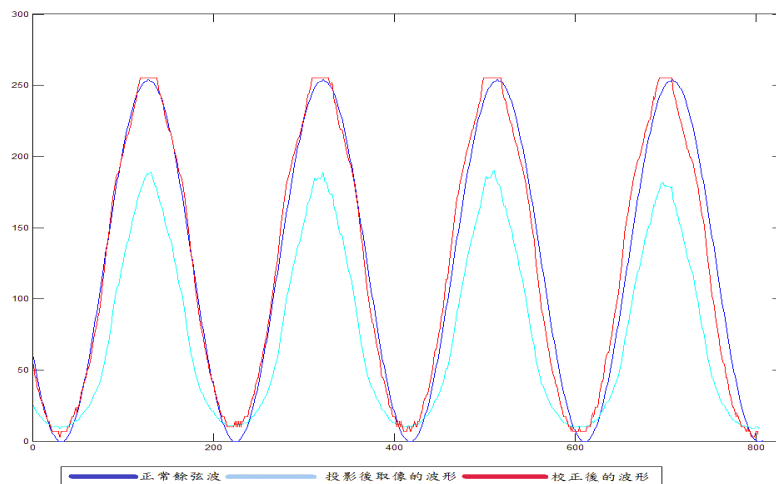


圖 1 2：投射校正結果



圖 1 3：非線性投影的校正。(a) 原始影像。(b) 校正後的影像

## 三、待測物實際量測

本實驗所採用的樣本為一個高度為  $1.1\text{ cm}$  的待測物。將取像後的影像進行扭曲還原、投射校正、相位誤差補償、任意固定相位差的三步相位移，最後經由相位展開和相位與高度的轉換後得到相對高度。量測結果如圖 14，量測數據如表 3。

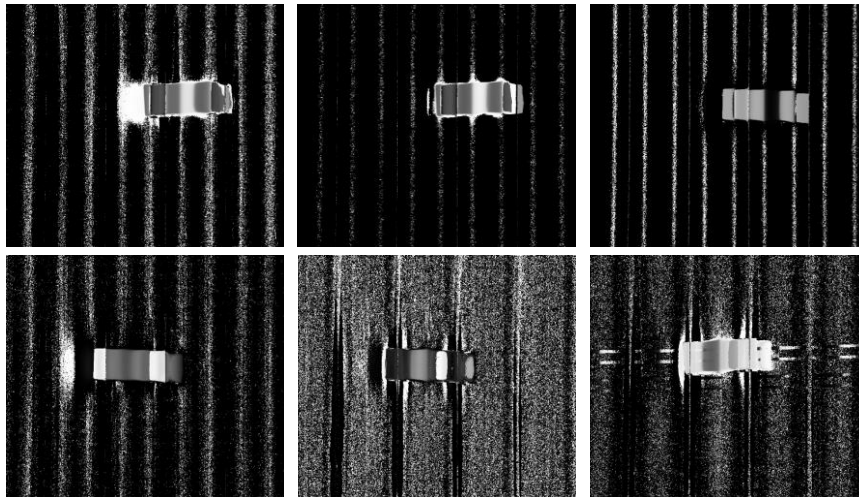


圖 1 4：待測物量測結果

表 3：實驗結果數據表

相位差	20	40	60	80	100	120
量測高度 (cm)	1.2527	1.1055	0.8908	1.3288	1.2262	1.1041
高度標準差	0.1448	0.2004	0.1651	0.0657	0.0208	0.1123
誤差百分比 (%)	13.88	0.5	19.018	20.8	11.5	0.37

#### 肆、結論與建議

我們使用取像張數最少的三步相位移技術，並且加入 *CUDA* 平行處理演算法，為了將來能將本技術應用在連續移動的生產線上，我們推導任意固定相位差的三步相位移演算法。由實驗結果可知，目前精準度可到達 mm。將可變動相位的三步相位移演算法導入 *CUDA* 平行計算後，平均處理時間約為  $4.9ms$ ，將其相較於 *CPU* 計算，可以獲得 38.7 倍效能的提升，若加入記憶體搬移的時間，整體效能提升了約 3.3 倍。

#### 伍、參考文獻

- [1] 陳昭元, 正弦及三角條紋結構光投影法的三維量測分析, 碩士論文, 資訊工程學系, 國立中央大學, 中壢, 2009 年 6 月.
- [2] Bidanda, B., S. Motavalli, and K. Harding, "Reverse engineering: an evaluation of prospective non-contact technologies and application in manufacturing systems," *Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol.4, no.3, pp.145-156, 1991.
- [3] Brophy, C. P., "Effect of intensity error correlation on the computed phase of phase-shifting interferometry," *Journal of the Optical Society of America A*, vol.7, no.4, pp.537-541, 1990.
- [4] Guo, H., H. He, and M. Chen, "Gamma correction for digital fringe projection profilometry," *Applied Optics*, vol.43, no.14, pp.2906-2914, 2004.
- [5] Malacara, D., *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, 2007, Ch.14.