

# 第二十一屆旺宏科學獎

## 創意說明書

組別：電子電機組

參賽編號：SA21-045

作品名稱：FPP 乒乓球 3D 影像重建量測與分析

姓名：王柏偉

關鍵詞：FPP、結構光 3D 影像重建、乒乓球

## 摘要

本研究以 FFP 做為乒乓球 3D 影像重建的凹陷分析器，它利用條紋相位位移投影於乒乓球表面而觀察其相位與相位差分變化以對應乒乓球面前後距離。這對乒乓球製造者、比賽單位與運動者而言可方便分析乒乓球品質與好壞，因此具有極大的助益。

在此發展出乒乓球結構光量測平台，它可做為 3D 影像重建擷取，所以本系統只需各一台投影機與 CCD。本研究先建立了有參考平面結構光條紋量測乒乓球系統，並提出無參考平面量測與傅立葉轉換法；前者可以減少量測系統空間，後者則可以減少量測時間，二者對量測省空間與時間具有很大幫助。

本研究已有初步成果，但未來仍需努力，包括加強辨識、建立更多資料、結合人工智能與應用於其他球體曲面量測等等。

## 目錄

摘要	I
壹、研究動機	1
貳、研究目的	1
參、研究設備及器材	3
肆、研究方法	4
一、收集乒乓球	6
二、設計條紋	6
三、架設系統	6
四、量測校正	7
五、影像擷取與處理	9
六、計算強度	11
七、計算未展開相位	12
八、計算展開相位	12
九、分析	13
伍、研究結果	15
陸、討論	25
柒、結論	29
捌、參考資料	30

## 貳、研究動機

從小體育課至今常上球類運動，乒乓球是其中一種常上的運動課，老師於教學時為訓練我們而常會使用乒乓球發球機，由於太多人練習會發生損壞或踩到球現象如圖 1 所示，若將撿球器撿來變形乒乓球再放至發球機將會造成練球困擾。



圖 1 練習時損壞或不慎踩到乒乓球。

乒乓球是全世界運動，也是國內許多運動愛好者的運動球類，政府亦極力推廣多年 [1-4]。乒乓球從生產品質至比賽規則與平時運動練習時發球機都希望有良好品質，所以我們想起可利用光學影像分析方法帮助大家辨識的好壞，3D 結構光影像技術是可行方法[5]，其結構光條紋投影輪廓量測(Fringe Projection Profilometry, FPP) [6-13]是合適技術，它利用條紋相位位移量測條紋相位，因條紋相位形變與待測物表面深淺成正比，且 FPP 量測只要各 1 台投影機與相機即可，對我來說是較易入門方法，所以本研究以 FPP 為主要研究方法。

綜合以上，本研究內容已超過所學，於是與指導老師討論如何以目前所學的電學、物理與資訊課程為基礎來進一步學習光學與程式設計知識與技術，所以無論於量測的硬體與軟體皆需要學習。

## 貳、研究目的

本研究動想出乒乓球分析凹陷概念，圖 2 中顯示其辨識器概念，與辨識器將撿球器得來的乒乓球進行與辨識過濾，與辨識完成後可將無凹陷的球送至發球機，所以此與辨識器是可用應用於的發球機前置辨識。



圖 2 乒乓球凹陷分析與辨識器構想。

得知乒乓球面是否有凹陷現象，這對乒乓球製造者可提供良好品質，另對比賽單位與運動者而言可方便與辨識過濾乒乓球而讓運動順利進行具有極大的助益，其研究目的包含如下：

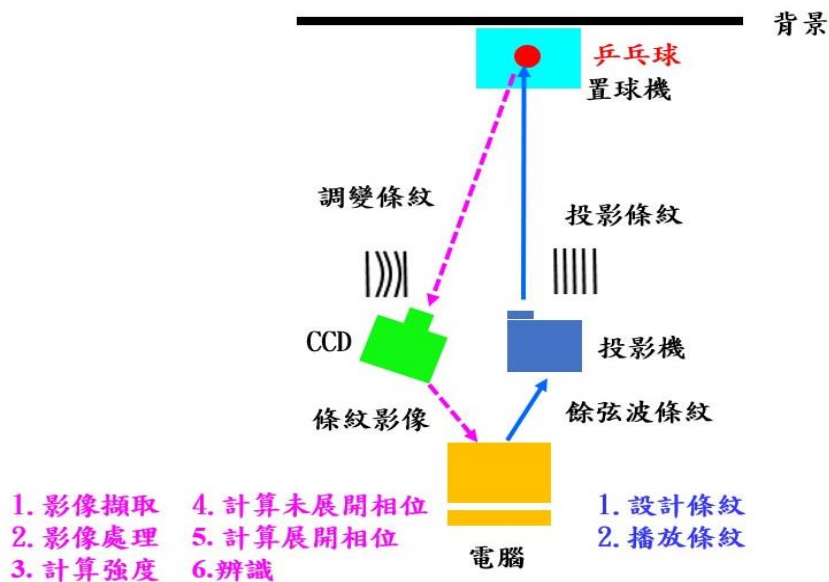
(一)、建置 3D 影像重建分析與辨識光學系統。

1. 如何利用成本較低與演算時間較少之 FPP 4-step 法了解 3D 球面相位變化。
2. 如何於無參考平面時可量測乒乓球面相位。
3. 如何可減少量測計算時間。
4. 如何分析與辨識球體的是否凹陷。

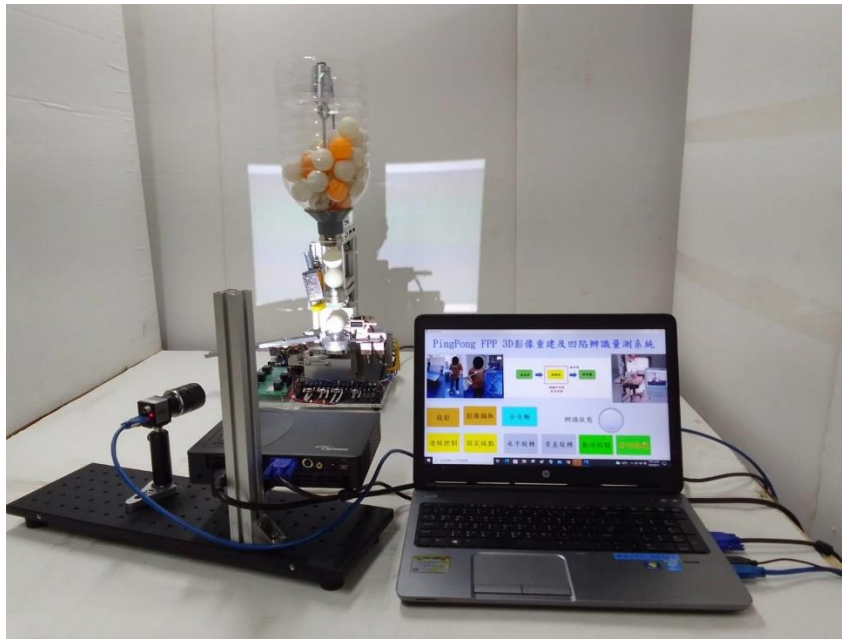
(二)、建置自動化量測置球機台與軟體操控整合辨識器系統

(三)、建立乒乓球曲面資料。

為實現目的本研究採用 FPP 方法如圖 3(a)所示，主要是由電腦設計與投影條紋於乒乓球上，並於 CCD 收到調變條紋，根據調變條紋相位變化來判斷乒乓球是否凹陷變形，實際完成 FPP 之 3D 乒乓球面相位量測系統如圖 3(b)所示。



(a)



(b)

圖 3 (a)FFP 實驗構想，(b)FFP 球面影像相位實驗量測系統架設。

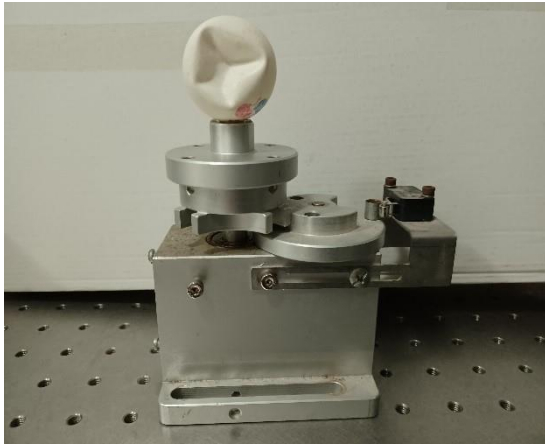
### 叁、研究設備及器材

本研究其研究設備與軟體如表 1 所示，而重要設備外觀圖如圖 4 所示，其條紋投影為 Optoma ML500 LED Projector 微型投影機[14]、擷取影像為 UI-3040CP Rev. 2 CCD 影像感測器[15]、背景參考板。具有水平旋轉 90 度第一代無控制置球機如圖 4(a)所示，而圖 4(b)則增加了 $\theta$ 旋轉方向可之第二代手動控制置球機。另外，除了若干乒乓球[16]外，需要計算與控制軟體包含 Matlab[17-18]與 Python[19]等。

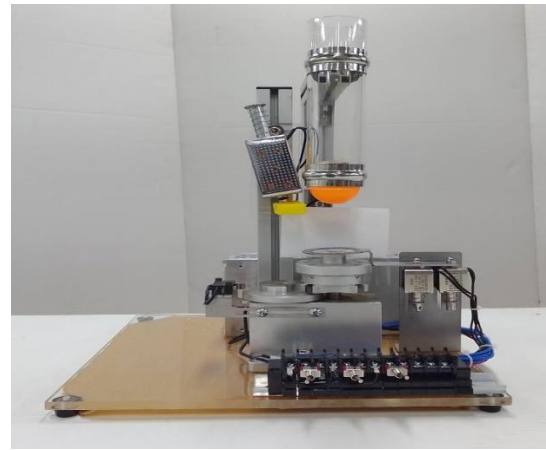
表 1 研究設備與軟體

編號	材料名稱	規格	數量	單位
1	微型投影機	Optoma : ML500 LED Projector	1	台
2	CCD 影像感測器	UI-3040CP Rev. 2	1	台
3	乒乓球	40 mm	1	箱
4	置球機	DC 24V、90 度旋轉機構	1	台
5	筆記型電腦	CPU:i5-4200, RAM:8 GB	1	台
6	微處理器	Arduino Uno	1	個
7	電磁閥	DC 5V	7	個
8	電源供器	DC 24 與 DC 5V	2	台
9	Matlab	R2021b 版	1	套
10	Python	3.7 版	1	套





(a)



(b)

圖 4 置球機。(a)第一代無控制置球機，(b)第二代手動控制置球機。

### 肆、研究過程或方法

研究規畫與實驗量測方法如圖 5 所示，其圖顯示分析與辨識光學系統與自動化量測機台及軟體操控整合系統二大部。FPP 分析與辨識光學系統重點為收集乒乓球形狀、設計條紋、架設系統、量測校正、影像擷取與處理、計算強度、計算未展開相位、計算展開相位及分析與辨識，而自動化量測機台與軟體操控整合系統包含置球機機構、控制電路製作與 GUI 操作界面。

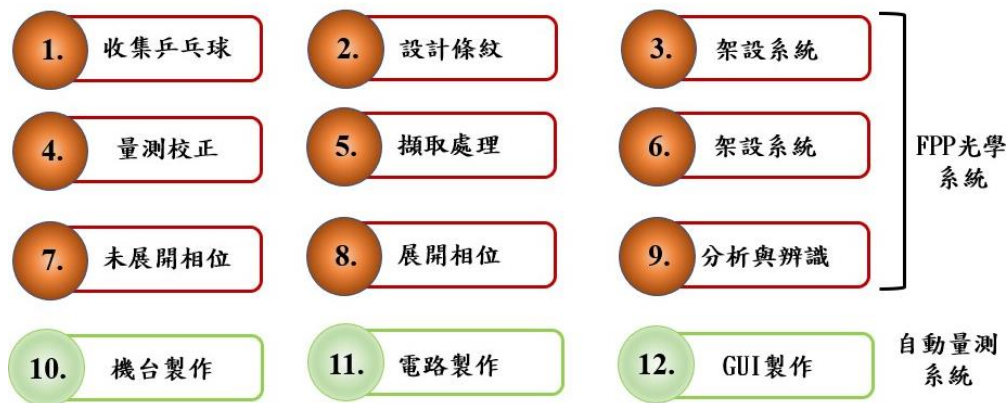


圖 5 研究規劃與實驗量測方法

#### 一、FPP 分析與辨識光學系統

FPP 量測方法是利用相位位移條紋投影至乒乓球表面上，原理上 3 步法(3-Step 法)即可達到影像重建效果，也就是每次相位位移為  $2\pi/3$ ，所以需投影 3 次投影於球上。4 步法(4-Step 法)每次相位位移為  $\pi/2$ ，因具有較佳相位量測效果，所以本研究採用 4 步法。當相機擷取乒乓球表面上條紋，藉由乒乓球表面上條紋相位形變來觀察乒乓球表面的凹凸起伏狀況，由於條紋相位形變與待乒乓球表面深淺成正比，所以此 3D 影像技術不但可量測乒乓球表面平面資訊，也具有乒乓球前後位置，因此這正好可適合乒乓球凹凸現象量測。

### (一).收集乒乓球

從乒乓球教室收集經過練習後之乒乓球做為實驗樣品，為使實驗更加完備些，我們收集了各式各樣球體，如有無凹面球、小凹面球、嚴重凹面球、直線凹面球與水平凹面球及顏色的球體如圖 6 所示。



圖 6 收集乒乓球乒乓球樣品。

### (二).設計條紋

條紋為週期性灰色色階信號，週期為 pixel 數需依投影機解析度來設計，且根據乒乓球所需相位解析度來設定 pixel 數，本實驗每以每週期為 6 pixels 為主，其黑色代表強度為 0，其白色代表強度為 255。依其 4-step 法設計 4 個相位相差 $\pi/2(90^\circ)$ 的條紋  $I_{b1}$ 、 $I_{b2}$ 、 $I_{b3}$  與  $I_{b4}$  如圖 7 所示。

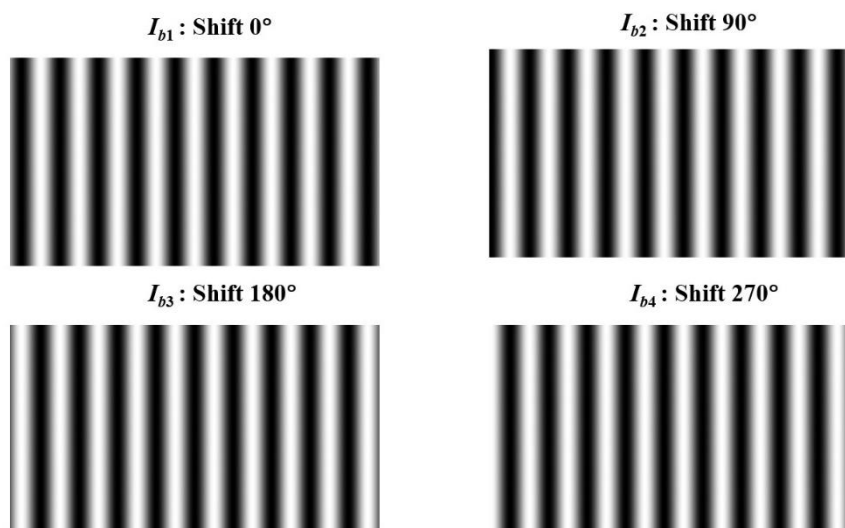


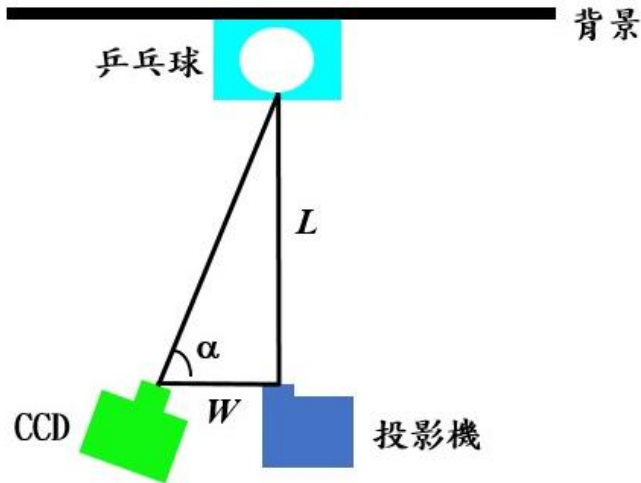
圖 7 設計條紋

### (三).架設系統

系統包含有投影機、CCD 影像感測器、置球機背景參考板之架構圖如圖 8 (a)所示，其 CCD 至投影機距離為  $W=6$  cm，而乒乓球至投影機距離為  $L=40$  cm，其 CCD 擷取影像角度



為 $\alpha=78.69^\circ$ 。以圖 8(a)架構圖之幾何參數實際架如圖 8(b)所示，設置球機上乒乓球應儘量置於靠近背景板才會獲得較準確相位量測如圖 8(b)所示。在此實驗幾何參數中，直徑 40 mm 乒乓球之擷取條紋影像之直徑約 580 pixels，所以 1 pixel = 0.069 mm，而相位 $\phi$ 皆為徑度單位 (rad)。



(a)

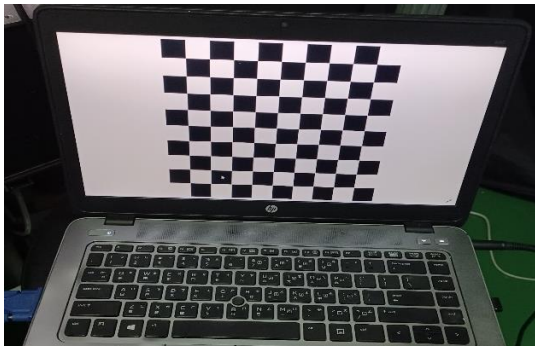


(b)

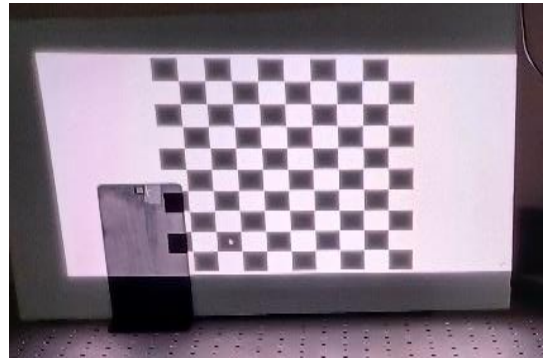
圖 8 FPP 3D 影像重建系統。(a)架構圖，(b)架設圖。

#### (四).量測校正

1. 首先將電腦棋盤圖影像投影至背景板上，觀察垂直與水平圖案是否有擺正如圖 9(a)與(b)所示。
2. 將電腦垂直條紋投影至背景板上如圖 9(c)與(d)所示，並進一步調整投影機焦距來觀察條紋是否清晰如圖 9(e)所示。
3. 進一步將乒乓球放置於置球機上，且 CCD 擷取背景條紋需調整 CCD 光圈與焦距如圖 9(f)讓條紋影像強度能夠清晰能，在此已先將影像由彩色轉為灰階，而圖 9(g)則為顯示條紋影像強度，為達到良好的擷取效果需再調整 CCD 掃描時間與曝光時間。



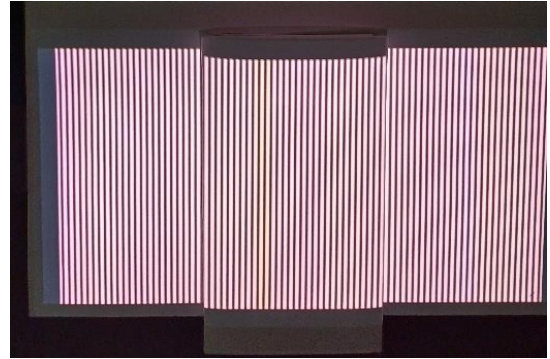
(a)



(b)



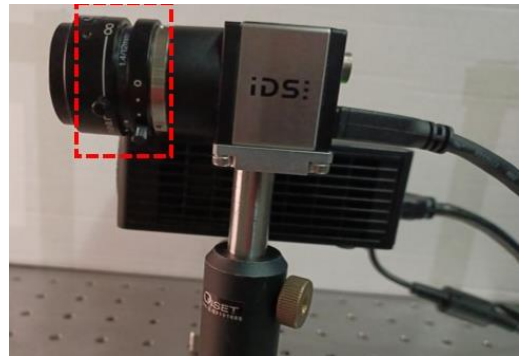
(c)



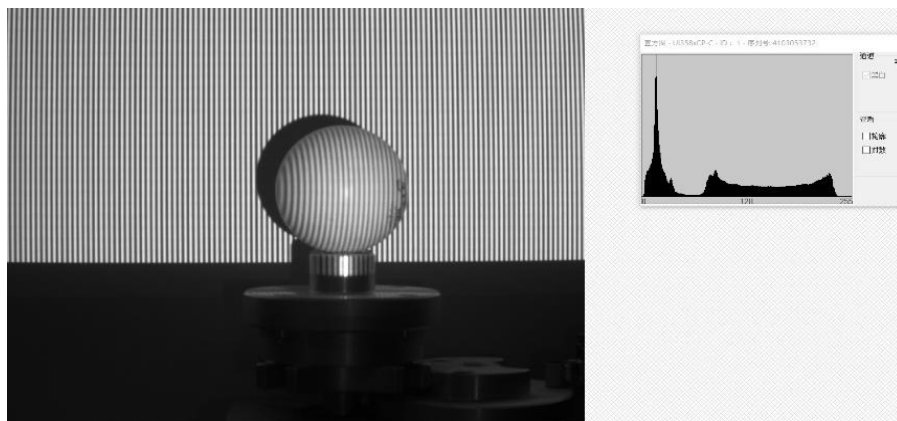
(d)



(e)



(f)



(g)

圖 9 條紋影像校正。(a)棋盤圖，(b)棋盤圖投影，(c)垂直條紋圖，(d)垂直條紋圖投影，(e) 投影機焦距校正，(f) CCD 光圈與焦距校正，(g) CCD 球體影像強度與灰階度。



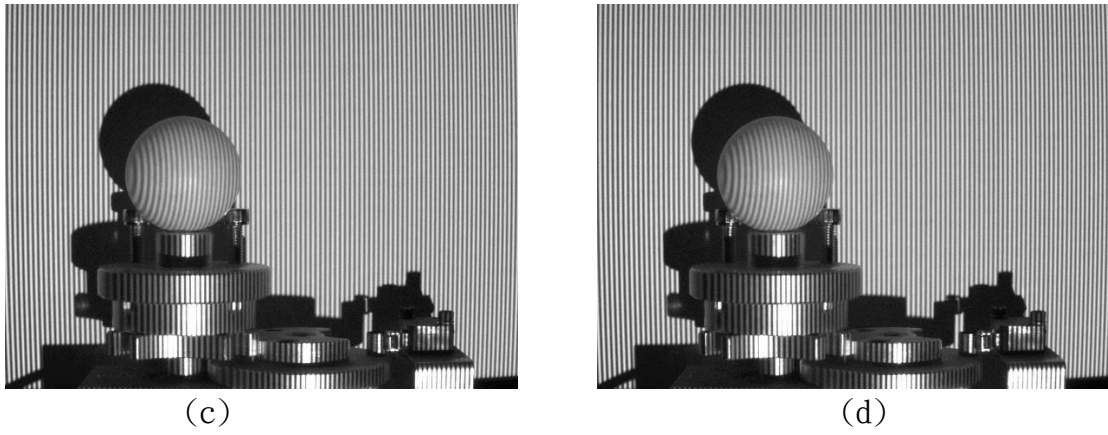


圖 11 影像擷取。(a)  $I_1(\phi=0)$ ，(b)  $I_2(\phi=\pi/2)$ ，(c)  $I_3(\phi=\pi)$ ，(d)  $I_4(\phi=3\pi/2)$ 。

4 個條紋強度  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  與  $I_4$ ，對應的式子分別為式(1.1)、(1.2)、(1.3)與(1.4)所示，相位移分別為為  $0$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi$  與  $3\pi/2$ ， $\phi(x, y)$  為空間相位分佈，代表球面相深度改變程度。此 4 個條紋強度將可計算平均強度與未展開相位。

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (1.1)$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) - \frac{\pi}{2}] \quad (1.2)$$

$$I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) - \pi] \quad (1.3)$$

$$I_4(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) - \frac{3\pi}{2}] \quad (1.4)$$

## 2. 影像處理:

乒乓球影像擷取後需影像處理包括角度轉換與切割等等，其切割後如影像圖 12(a)所示，製作遮罩可降低背景黑影對相位影響，而遮罩是的位置與大小則由影像圓形分析處理得來，遮罩為球之正面影像如圖 12(b)所示，經遮罩後影像為圖 12(c)。

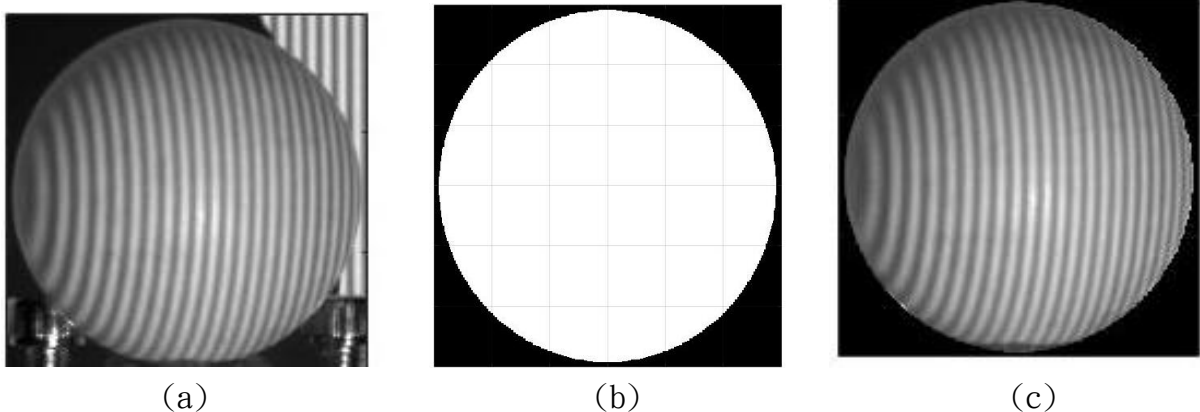


圖 12 影像擷取後處理。(a) 切割，(b) 遮罩，(c) 遮罩後影像。



(六). 計算強度

條紋光強度可分為二種，其強度演算法有二種，一者為條紋平均強度  $I_{av}$  如式(2.1)所示，另一者為調變強度  $I_m$  如式(2.2)，前者可為投影機光源與空氣光源照射至球面後反射強度與空氣光源強度之總和，而後者為球面反射調變強度。條紋平均強度可還原物體本身受照明後的影像，它可以找出球體圓截面積形狀而設計出遮罩。

$$I_{av}(x, y) = A(x, y) = \frac{I_1(x, y) + I_2(x, y) + I_3(x, y) + I_4(x, y)}{4} \quad (2.1)$$

$$I_m(x, y) = B(x, y) = \frac{\sqrt{[I_2(x, y) - I_4(x, y)]^2 + [I_1(x, y) - I_3(x, y)]^2}}{2} \quad (2.2)$$

(七). 計算未展開相位

未展開相位可利用條紋強度來得之，其相位度演算法求  $\phi(x, y)$  如式(3)所示，其相位  $\phi$  (強度單位, rad) 範圍為  $-\pi \leq \phi \leq \pi$ ，背景條紋相位與球體相位皆可以此公式求得，其未展開相位如圖 13 所示。圖 13 中背景條紋相位為線性色散形式，而球體相位則會因球體表面曲面改變，所以每週期的相位並非固定，二者相位差便是球體曲面對背景的未展開深度差，也就是可求乒乓球體表面的前後位置差。

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (3.1)$$

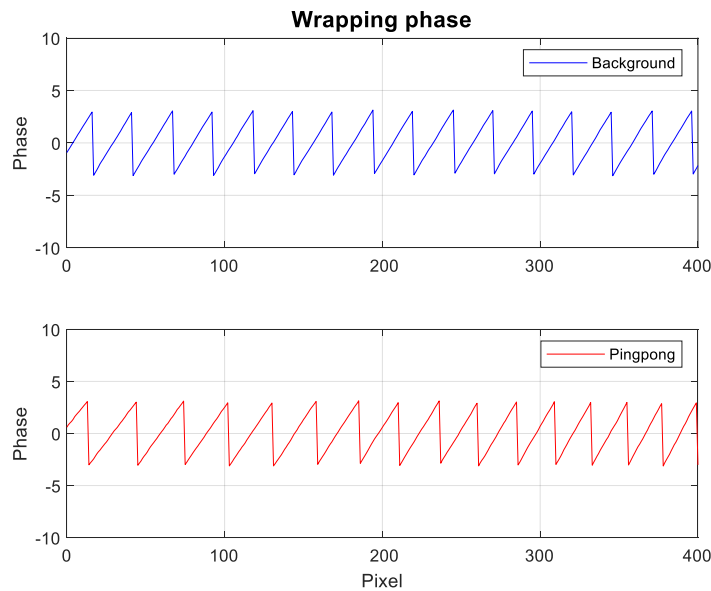


圖 13 未展開相位。

(八). 計算展開相位

利用式(3.1)所求相位差展開後便是球體曲面對背景的實際深度差，其展開後的相位  $\phi$  (強度單位, rad) 如圖 14 所示。很明顯的，相位於中間值最大，這代表此位置是最凸出；相反的若有凹陷處，則相位會呈現凹處，於兩側產生 2 個極大值，並於 2 個極大值位置間產生 1 個極小值。

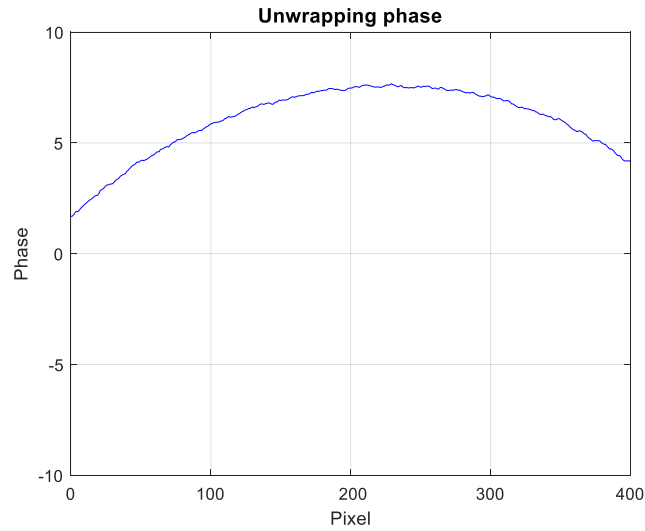


圖 14 展開後相位。

(九).分析與辨識

1D 相位展開後會於每一列只產生 1 個極大值( $max$ )如圖 15(a)所示，所以球體未凹陷時其相位變化率如式(4.1)與(4.2)所示，當區域於極大值左側時只會有正相位變化率，而極大值右側只會有負相位變化率。若球體有凹陷，則於會每一列產生至少 2 個極大值( $max_1, max_2$ )與 1 個極小值( $min$ )，而圖 15(b)顯示 2 個極大值間產生負相位變化率區域。

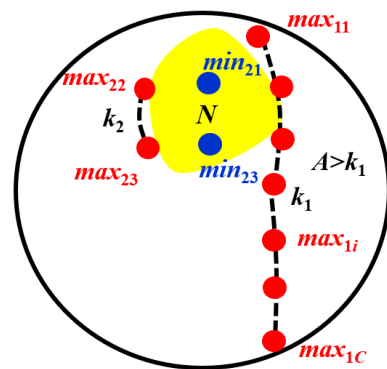
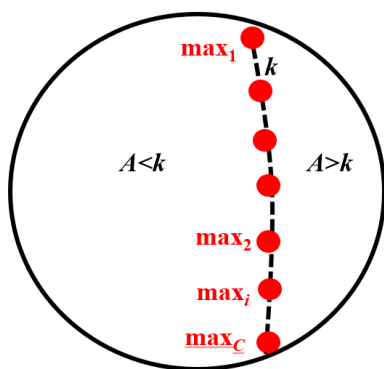
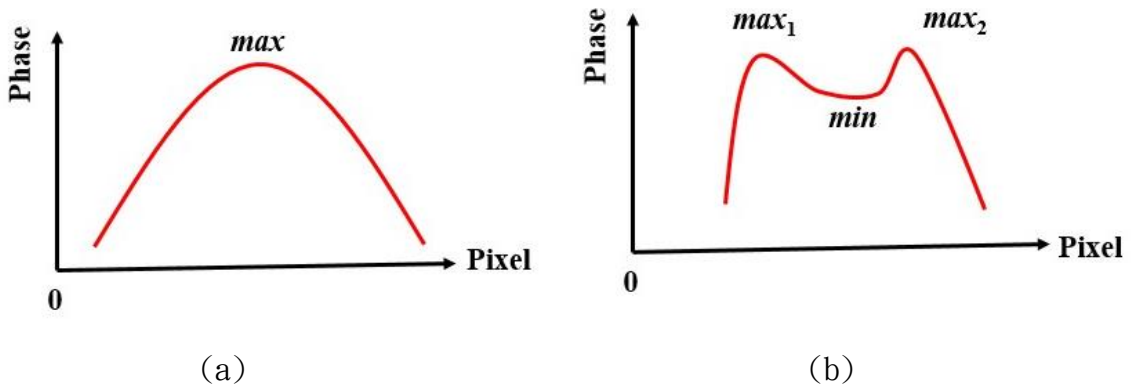


圖 15 1D 與 2D 分析與辨識球體表面相位與相位變化率。(a) 1D 未凹陷球體，(b) 1D 凹陷球體，(c) 2D 未凹陷球體，(d) 2D 凹陷球體。



$$\begin{cases} \Delta\varphi_{(i,j)} > 0, & \text{if } \varphi_{(i,j)} < \varphi_{\max(i)} \\ \Delta\varphi_{(i,j)} < 0, & \text{if } \varphi_{(i,j)} > \varphi_{\max(i)} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{(i,j)} > 0, & \text{if } \varphi_{(i,j)} < \varphi_{\max(i)} \\ \Delta\varphi_{(i,j)} < 0, & \text{if } \varphi_{(i,j)} > \varphi_{\max(i)} \end{cases} \quad (4.2)$$

未凹陷球體之 2D 相位展開後會於每一列產生 1 個極大值( $max_1, max_2, \dots, max_c$ )如圖 15(c)所示，當區域於極大值左側時( $A < k$ )只會有正相位變化率，而每一列極大值右側( $A > k$ )只會有負相位變化率。若球體有凹陷區域( $A \subseteq N$ )，則每一列至少會產生 2 個極大值[( $max_{21}, max_{31}$ ), ( $max_{22}, max_{32}$ )]與 1 個極小值( $min_{21}, min_{31}$ )如圖 15(d)所示，且相位變化率會因極大值與極小值存在做正負間變化。

## 二、軟硬體操控機台量測整合系統

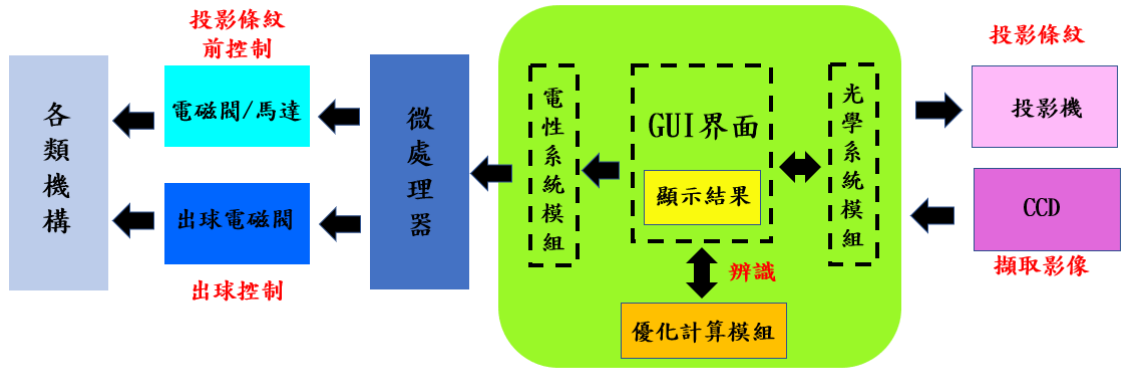
根據圖 3(b)FFP 球面影像相位實驗量測系統，其工作架構如圖 16(a)所示，以 GUI 界面做為使用者中心操作界面做為軟硬體操控機台量測整合。將二代置球機加以改良後之第三代置球機架構如圖 16(b)所示，其系統除原來手動水平 $\phi$ 方向與垂直 $\theta$ 方向控制外，增加入球容器與進球控制，並加入了出球電磁閥與出球軌道。且為達到自動化控制，我們加入 GUI 操作界面圖控控制如圖 16(c)所示，如此可以將第三代置球機、FFP 光學系統、軟體分析與辨識結合為一，其說明如下：

### (一)、系統工作架構

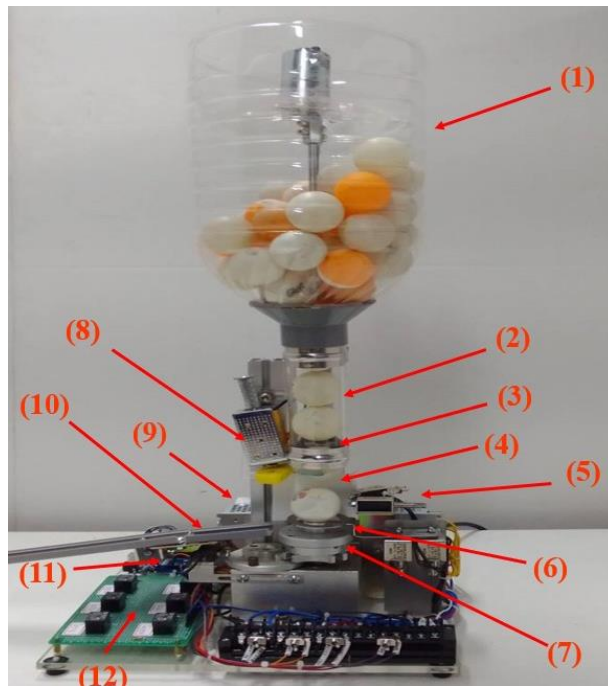
圖 16(a)顯示本系統包括電性系統模組程式控制、光學系統模組程式控制與辨識優化計算模組，使乒乓球從放入入球容器、球點與球面控制至光學投影條紋與擷取影像再經過優化計算辨識至出球控制。

### (二)、第三代置球機

1. 入球容器:其功能是将撿球器撿回的乒乓球放入容器如圖 16(b)中(1)部分，為順利讓乒乓球導入導球管，容器需加入擾動馬達旋轉方能使乒乓球不會互卡而無法導入。
2. 導球管:乒乓球導入置球機的前置空間如圖 16(b)中(2)部分。
3. 進球控制電磁閥:控制導球管乒乓球進球如圖 16(b)中(3)部分。
4. 背景板:投影條紋的相位參考板如圖 16(b)中(4)部分。
5. 出球電磁閥:當辨識後將依辨識結果做出乒乓球不同方向出球控制如圖 16(b)中(5)部分，本結構需依機台空間做適當設計，以免影響進球控制及光學投影。
6. 球點固定電磁閥:固定乒乓球於置球機上如圖 16(b)中(6)部分，以免乒乓球掉出置球機台。
7. 水平旋轉轉盤:為直流馬達帶動轉盤旋轉來控制乒乓球 $\phi$ 方向旋轉(每次可旋轉  $90^\circ$ ) 如圖 16(b)中(7)部分，並可利用極限開關來偵測轉盤旋轉位置。
8. 垂直控制電磁閥:控制乒乓球 $\theta$ 方向旋轉如圖 16(b)中(8)部分，但由於乒乓球過輕，控制時亦會產生水平旋轉分量，若改善電磁閥角度及彈力可減少此效應。
9. 電源: DC 24 與 DC 5V 提供各置球機、微處理器與電磁閥使用如圖 16(b)中(9)部分。
10. 出球軌道:將乒乓球導出如圖 16(b)中(10)部分，本結構需與項目 5 出球電磁閥互相配合，以達到分類效果。
11. Arduino 微處理器:將以上各項目置球機與電磁閥使用微處理器予以控制如圖 16(b)中(11)部分，在此 Arduino 與電腦連接並以 Matlab 程式做為控制平台。
12. 控制電路:Arduino 微處理器控制置球機與電磁閥的硬體電路如圖 16(b)中(12)部分，它主要是電晶體與繼電器組成的控制電路。



(a)



(b)



(c)

圖 16 第三代置球機量測分析與辨識操作系統。(a)系統工作架構，(b)第三代置球機，(c)GUI 操作界面。

### (三)、GUI 操作界面

除將硬體加強外，並整合硬體與軟體及量測系統之 GUI 操作界面如圖 16(c)所示，可依逐步工作與一次完成功能，其界面主要說明如下：

1. 進球控制:控制圖 16(b)之進球電磁閥。
2. 水平旋轉:控制圖 16(b)之水平旋轉轉盤。
3. 垂直旋轉:控制圖 16(b)之垂直旋轉電磁閥。
4. 投影條紋:控制微型投影機結構光條紋投影。
5. 擷取影像:控制 CCD 影像感測器擷取調變條紋影像。
6. 執行:順序依次完成以上的項目 1-5，並做計算分析與辨識。
7. 辨識狀態:顯示辨識結果
8. 出球控制:控制圖 16(b)之無凹陷電磁閥與有凹陷電磁閥。

### (四)、操作與工作流程

根據圖 16(a)系統工作架構與圖 16(c) GUI 操作界面，我們依操作可依逐步工作與一次完成功能如圖 17 所示，其主要操作與工作流程為 1. 進球控制、2. 水平旋轉、3. 垂直旋轉、4. 投影條紋、5. 擷取影像、6. 優化計算、7. 分析辨識、8. 顯示結果、9. 出球控制。



圖 17 操作與工作流程。

### 三、人工智慧預測條紋投影影像相位

除此將軟硬體操控機台量測整合系統結合，並與人工智慧進行結合以減少運算展開相位的時間，以 U-Net 這個人工智慧的架構做影像的訓練，期訓練好的模型做影像的預測，則這次訓練使用了一萬多筆資料，而預測的結果會與實驗所計算出來的展開相位的相位分布會有些落差如圖 18 所示。

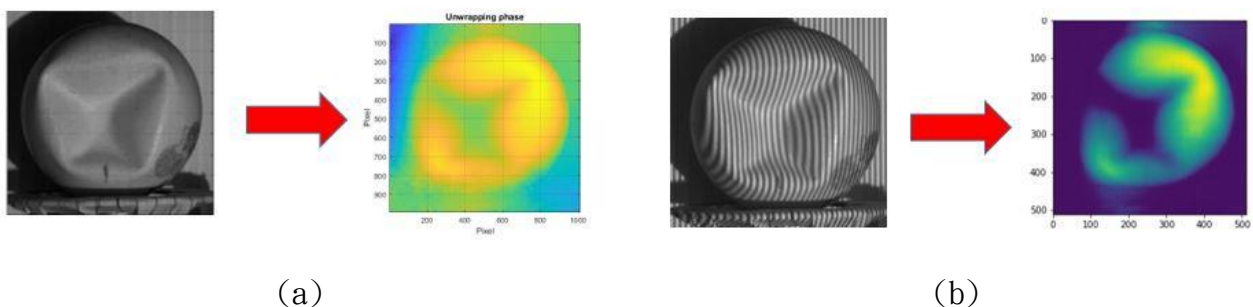
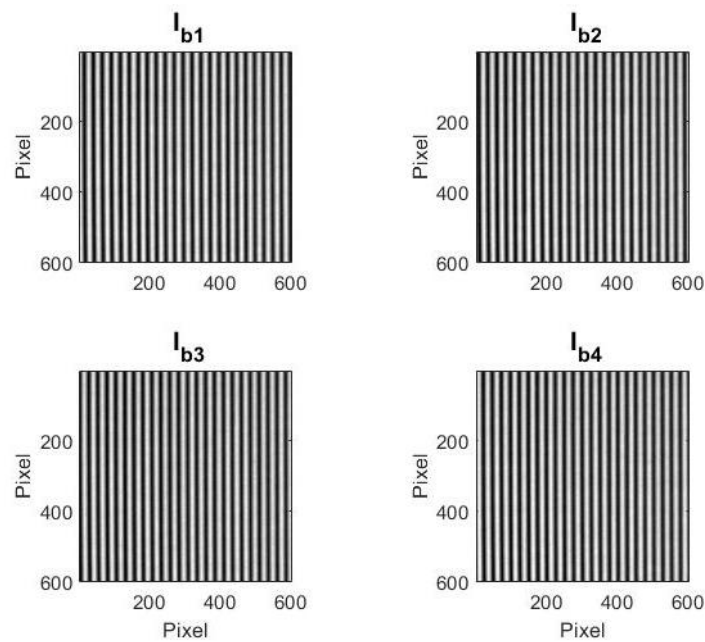


圖 18 預測結果與實驗計算。(a)實驗計算相位分布(b)UNetn 預測相位分布。

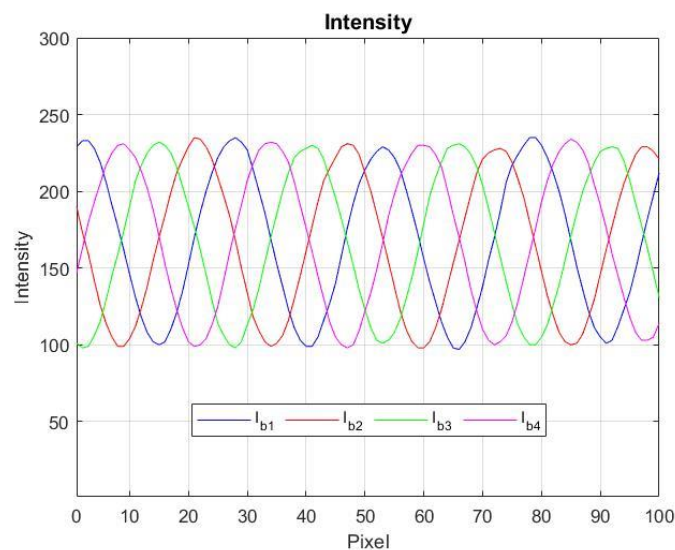
## 伍、研究結果

### 一. 背景相位量測

4-step 法背景圖像之 4 個相位條紋經截取後為 600 pixels x 600 pixels (41.379 mm \* 41.379 mm) 大小的影像，條紋影像分別為如圖 19(a) 所示，其  $I_{b1}$ 、 $I_{b2}$ 、 $I_{b3}$  與  $I_{b4}$  條紋強度分別為圖 19(b) 所示，由圖可看出 4 個相位條紋為一空間週期變化，每一週期約 28 pixels (1.931 mm)，條紋強度平均值為 176 與振幅值為 117。背景條紋相位經計算後可得出如圖 19(c) 所示，圖中可顯示出為 2D 未展開相位，其相位  $\phi$  (徑度單位)  $-\pi \leq \phi \leq \pi$ ，而其展開後的相位如圖 19(d) 所示。而圖 20 則表示經過遮罩處理後背景條紋，圖 20(a) 4-step 影像，圖 20 (b) 未展開相位，圖 20 (c) 展開相位。



(a)



(b)



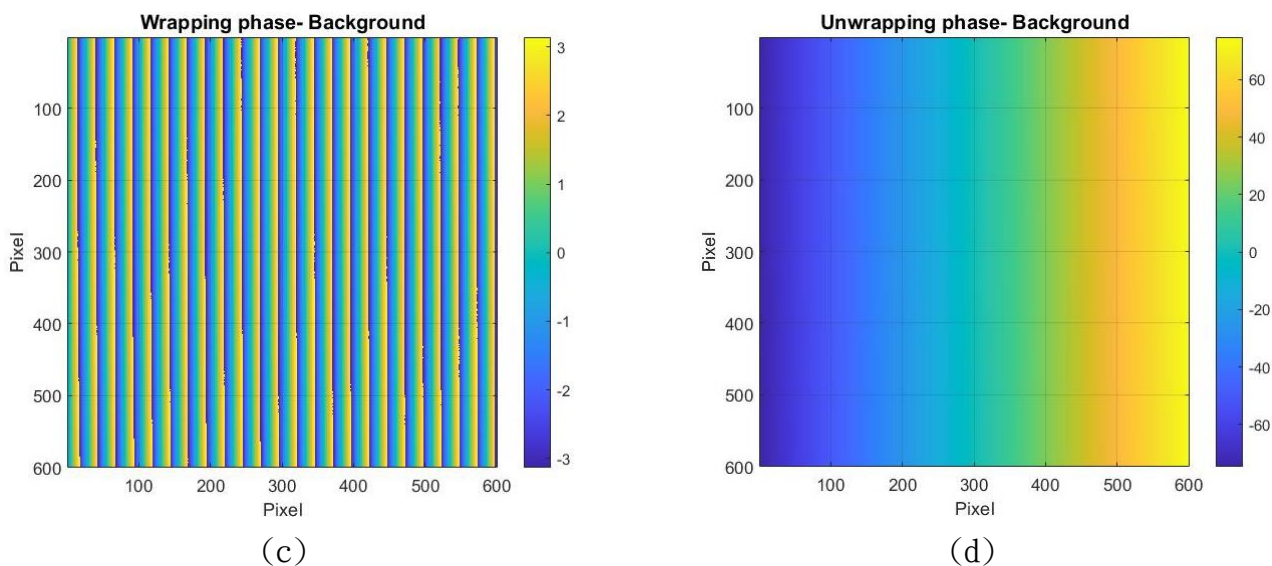


圖 19 背景條紋量測。(a)4-step 量測，(b)條紋強度，(c)未展開相位，(d)展開相位。

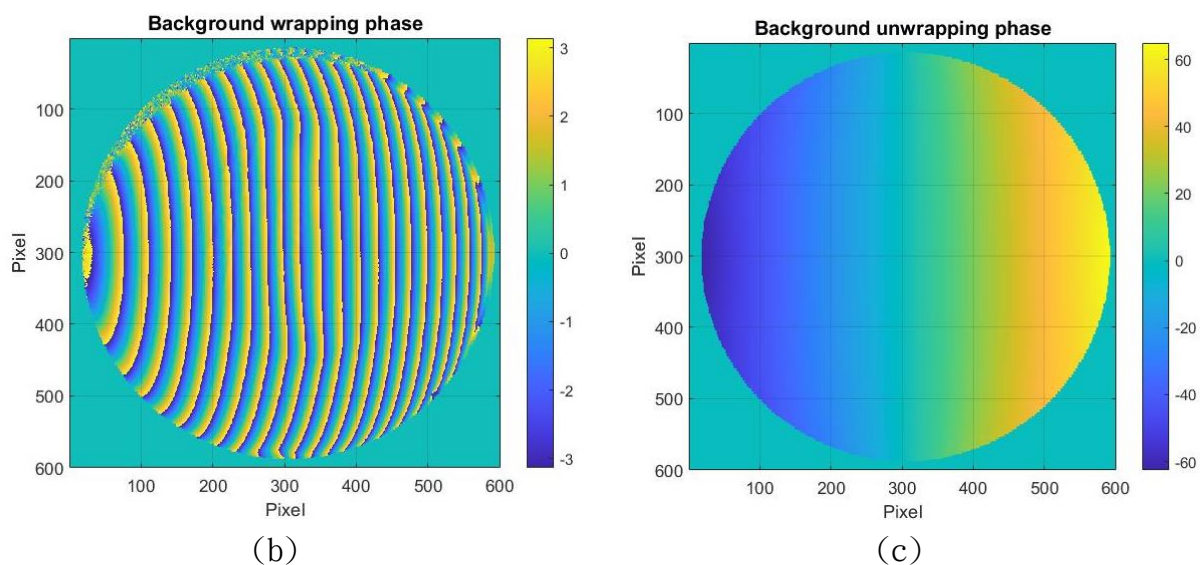
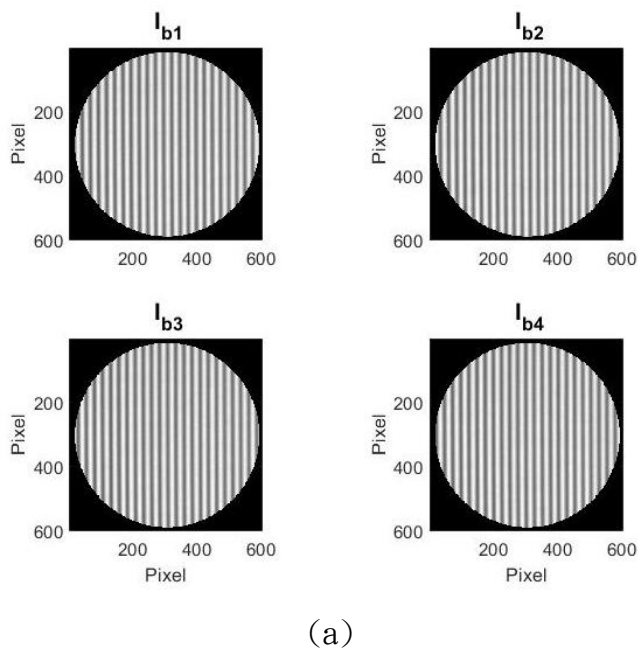


圖 20 具有遮罩背景條紋量測。(a)4-step 法影像，(b)未展開相位，(c)展開相位。

## 二. 乒乓球面相位量測

### 1. 無凹面球

一完整無凹面乒乓球面量測之 4 個相差 $\pi/2$  球面條紋如圖 21(a)所示，其條紋平均強度經由  $I_{s1}$ 、 $I_{s2}$ 、 $I_{s3}$  與  $I_{s4}$  條紋強度計算後如圖 21(b)所示，由圖中可看出一完整無凹面乒乓球，其影像經由計算得出球體平面圓圓心位置與半徑而求出遮罩大小，經遮罩後影像為圖 21(c) 所示。

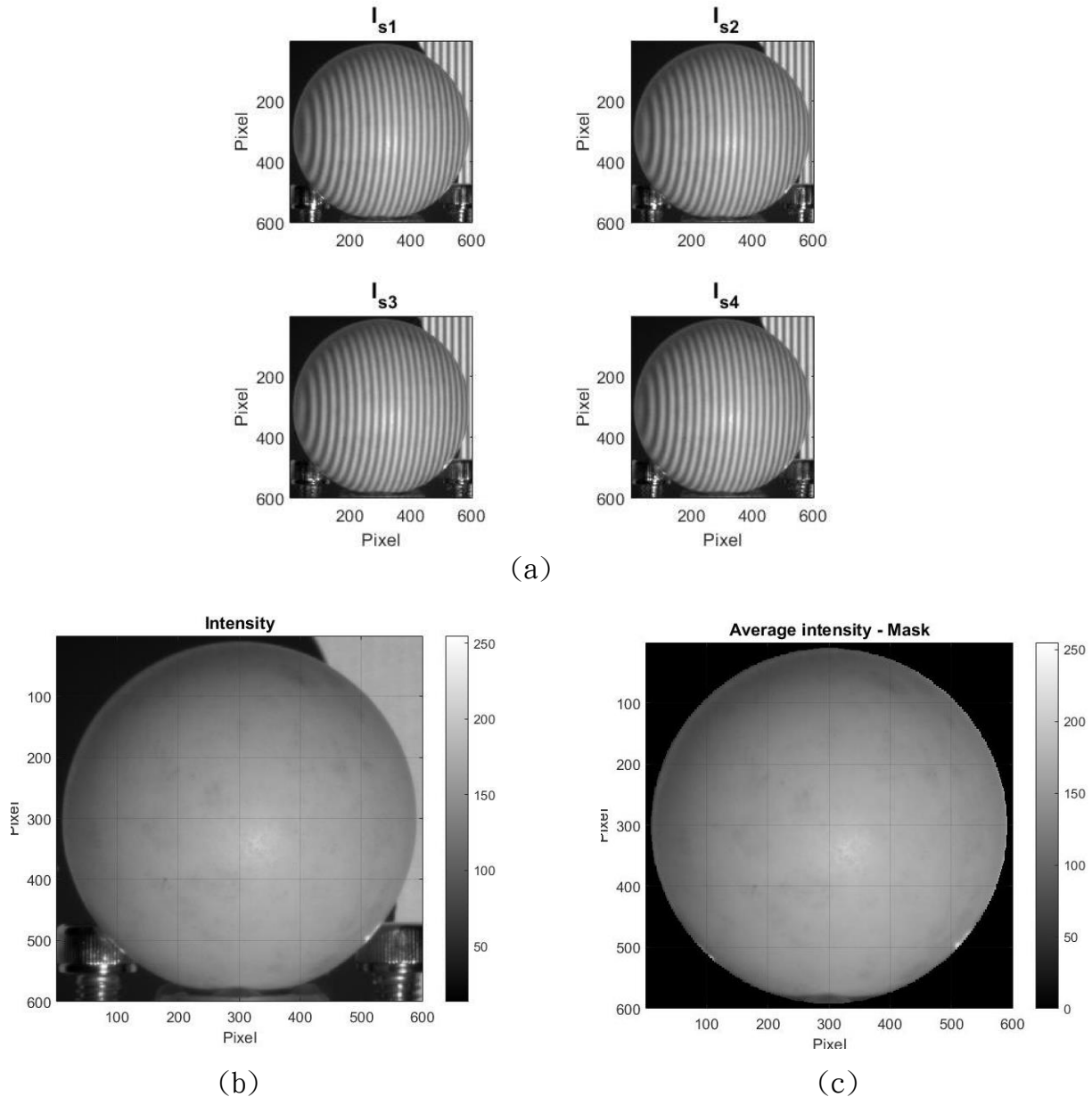
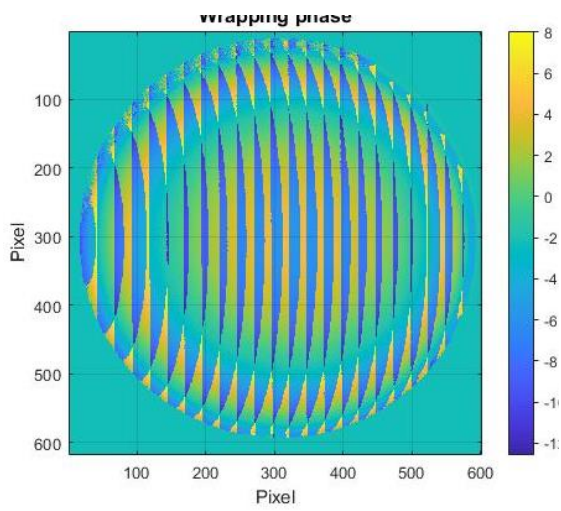


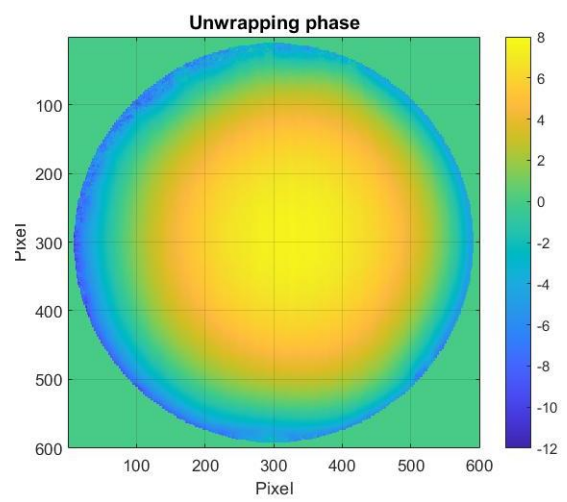
圖 21 無凹面球影像擷取與處理。(a)切割影像，(b)條紋平均強度，(c)加入遮罩後強度。

根據圖 21(b)之遮罩求出背景與球體條紋區域後，其相差條紋相位經計算後可得出週期性 2D 未展開相位如圖 22(a)所示，其相位 $\phi$ (經度單位) 範圍為 $-\pi \leq \phi \leq \pi$ ，而其展開後的 2D 與 3D 相位如圖 22(b)與 22(c)所示，其球體相位最大值  $max_m = 7.717$  於座標位置(328, 288)。圖 22(d)1D 展開相位可看出球體相位於座標位置(329,300)具有極大值 7.671。另外，球體左側外邊緣的相位初始值由於遮罩效應所以從 0 開始，相位一旦於球體內時則從落入負值，且因為球體邊緣之條紋強度不夠大而發生相位抖動現象；相位於球體右側外邊緣時又會回到 0。

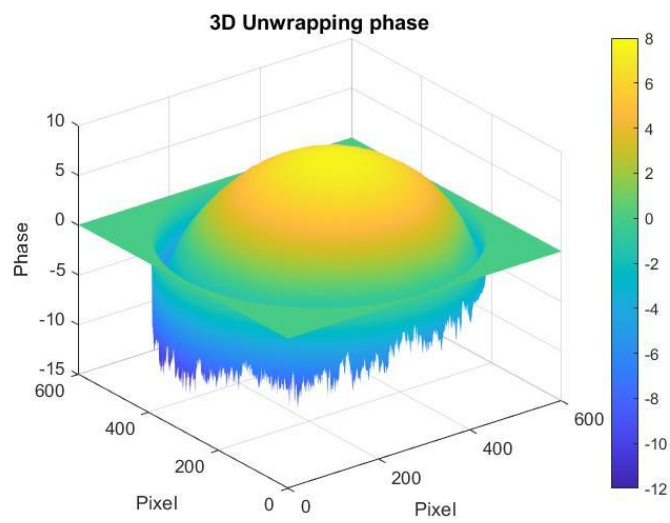




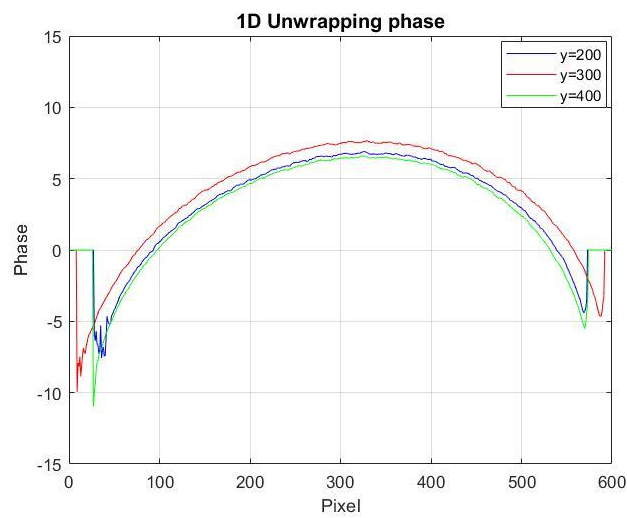
(a)



(b)



(c)

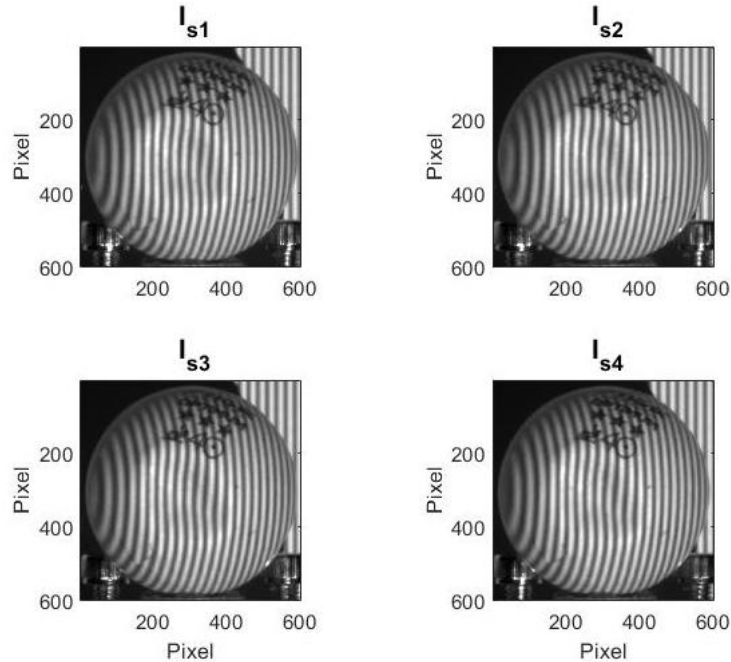


(d)

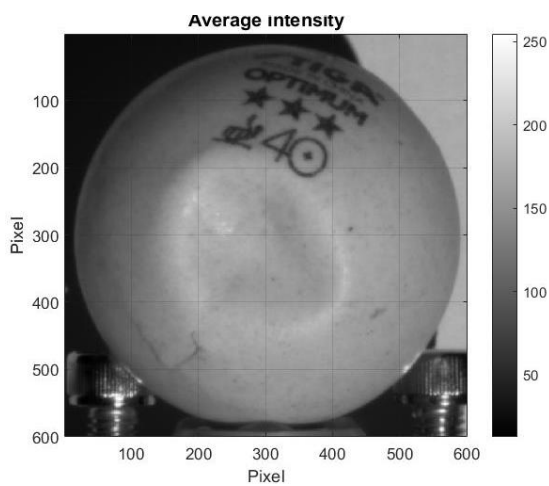
圖 22 無凹面球相位。(a) 未展開相位，(b) 展開相位，(c) 3D 展開相位，(d) 1D 展開相位。

## 2. 小凹面球

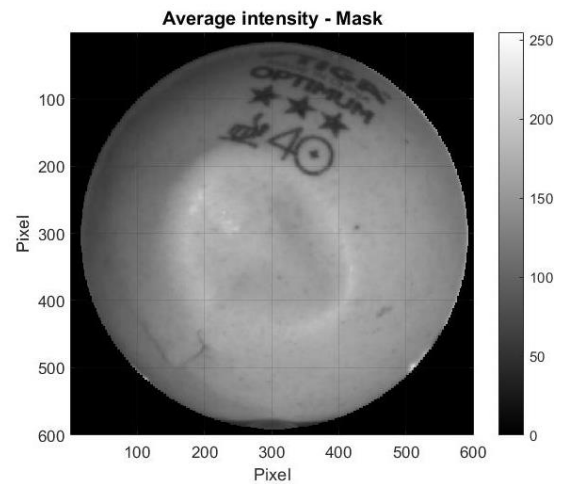
一小凹面乒乓球面量測之 4 個相差  $\pi/2$  球面條紋如圖 23(a)所示，其條紋於小凹面會發生小區域彎曲形變，利用  $90^\circ$  相位差可求出彎曲形變的相位；其條紋平均強度經由  $I_{s1}$ 、 $I_{s2}$ 、 $I_{s3}$  與  $I_{s4}$  條紋強度計算後如圖 23(b)所示，由圖中可看出一小凹面乒乓球形變，其影像經由計算得出球體平面圓圓心位置與半徑而求出遮罩大小，經遮罩後影像為圖 23(c)所示。



(a)



(b)

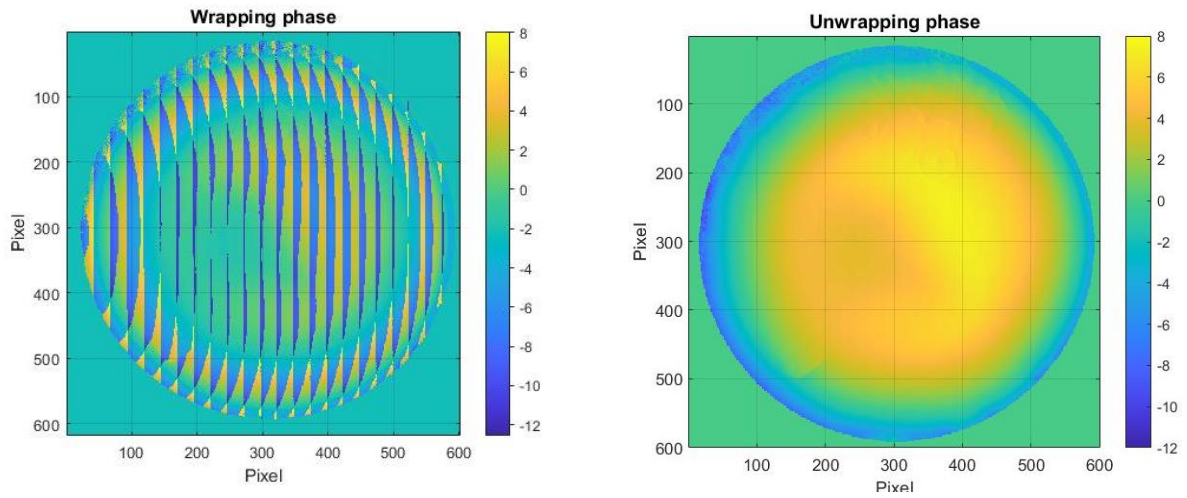


(c)

圖 23 小凹面球影像擷取與處理。(a)切割影像，(b)條紋平均強度，(c)加入遮罩後強度。

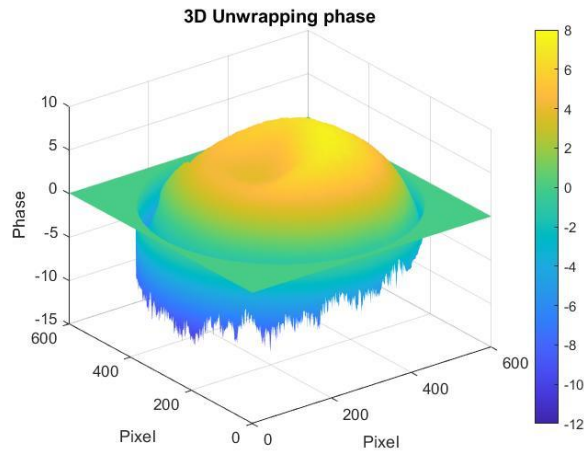
根據圖 23(b)之遮罩求出背景與球體條紋區域後，其相差條紋相位經計算後可得出週期性 2D 未展開相位如圖 24(a)所示，其相位  $\phi$ (經度單位)  $-\pi \leq \phi \leq \pi$ ，而其展開後的 2D 與 3D 相位如圖 24(b)與 24(c)所示，球體具有 2 個相位極大值，這是由於凹面所致。圖 24 (d)為 1D 展開相位，由圖可看出球體於座標位置(164,300)與(407,300)具有相位極大值 4.359 與 7.236，且於座標位置(234,300) 具有極小值 3.769，所以凹面時相位會呈現下降後再上升。同樣的，球

體左側外邊緣的相位初始值由於遮罩效應所以從 0 開始，相位一旦於球體內時則從落入負值，且因為球體邊緣之條紋強度不夠大而發生相位抖動現象；相位於球體右側邊緣時又會回到 0。

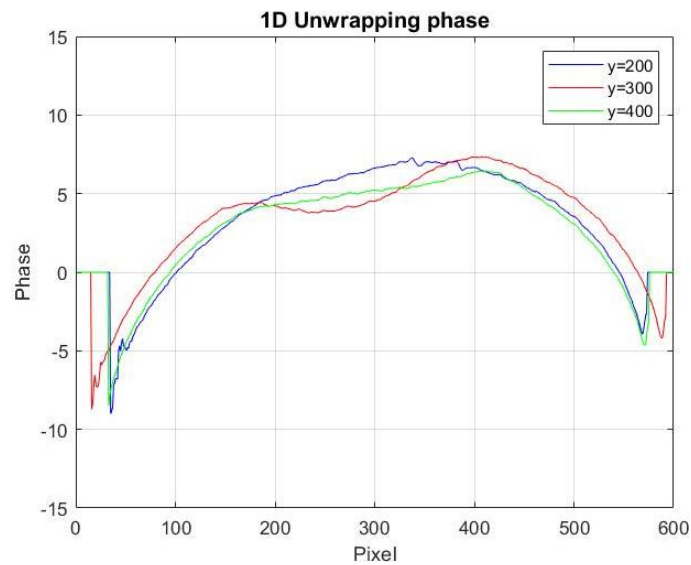


(a)

(b)



(c)



(d)

圖 24 小凹面球相位。(a)未展開相位，(c)展開相位，(c)3D 展開相位，(d)1D 展開相位。

### 3. 嚴重凹面球

一. 嚴重凹面乒乓球面量測之 4 個相差  $\pi/2$  球面條紋如圖 25(a) 所示，其條紋於小凹面會發生大幅度彎曲形變，利用  $\pi/2$  相位差可求出彎曲形變的相位；其條紋平均強度經由  $I_{s1}$ 、 $I_{s2}$ 、 $I_{s3}$  與  $I_{s4}$  條紋強度計算後如圖 25(b) 所示，由圖中可看出乒乓球嚴重形變，其影像經由計算得出球體平面圓圓心位置與半徑而求出遮罩大小，經遮罩後影像為圖 25(c) 所示。

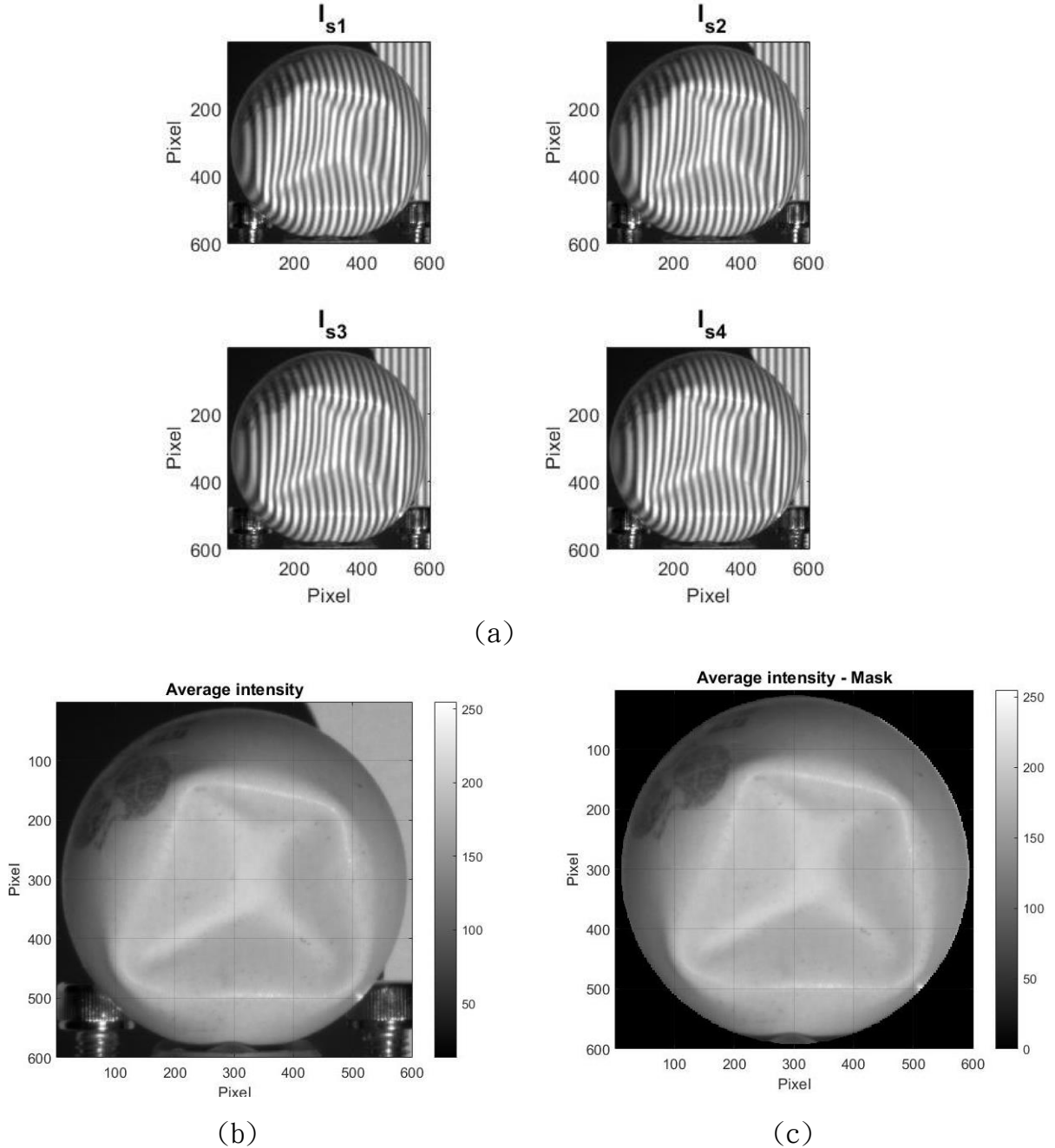
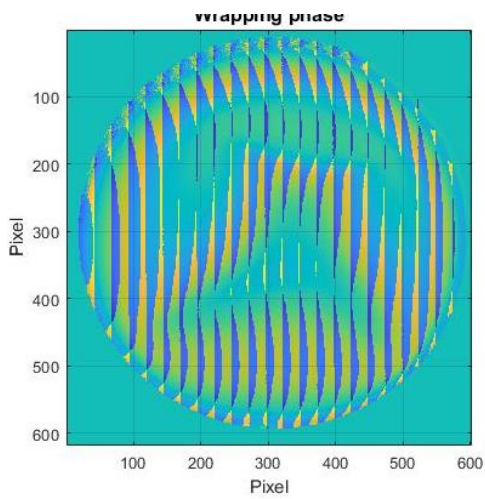
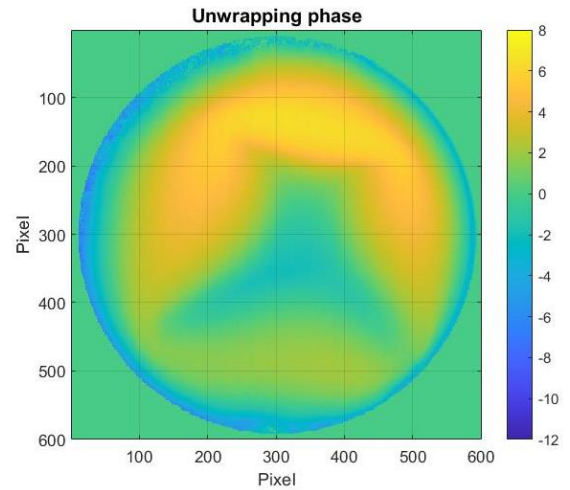


圖 25 嚴重凹面球影像處理。(a)切割影像，(b)條紋平均強度，(c)加入遮罩後強度。

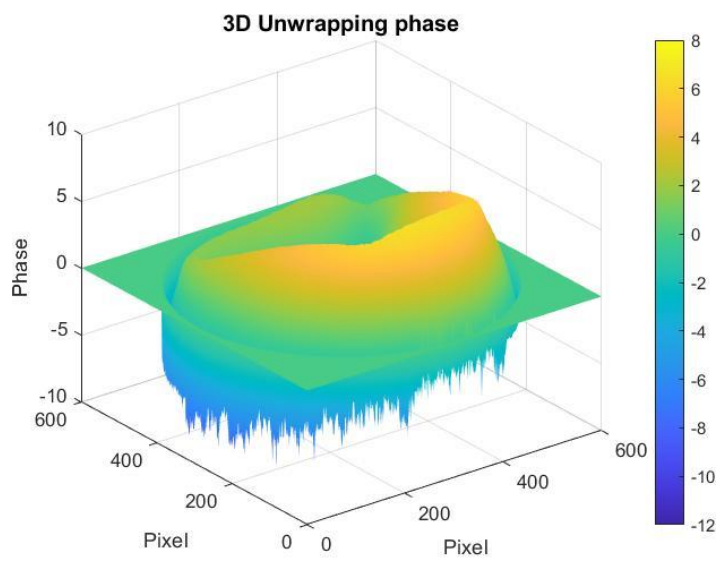
根據圖 25(b) 之遮罩求出背景與球體條紋區域後，其相差條紋相位經計算後可得出週期性 2D 未展開相位如圖 26(a) 所示。而其展開後的 2D 與 3D 相位如圖 26(b) 與 26(c) 所示，球體具有 2 個相位極大值，而其第 2 個極大值相較於圖 26(b) 更為右側。圖 26(d) 為 1D 展開相位，由圖可看出球體於座標位置 (167, 300) 與 (500, 300) 具有相位極大值 4.076 與 4.318，所以 2 個極大值位置相距較遠，而座標位置 (334, 300) 具有相位極小值 -1.32。



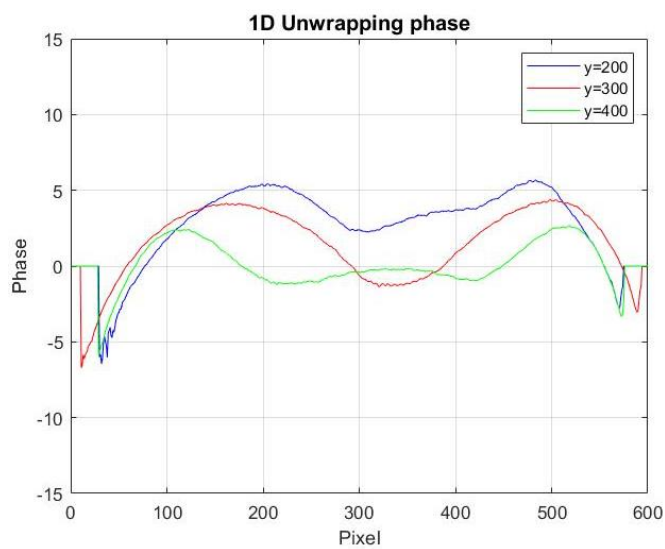
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 26 嚴重凹面球相位。(a)未展開相位，(c)展開相位，(c)3D 展開相位，  
(d)1D 展開相位。



### 三. 乒乓球凹面分析與辨識

無凹面球、小凹面球 與球嚴重凹面球之球體條紋相位差分分佈分別如圖 27(a)、(b)與 (c)，3 個球體表面相位差分皆從左側最大正值至右側最小負值。圖 27(a)無凹面球每一列只有 1 個相位最大值，所以於相位最大值時相位差分為 0 只有 1 個，且相位差分在相位最大值左側為正，相位最大值右側為負。圖 27 (b)與(c)則因有凹面處，所以會產生相位極大值與極小值，並於此相位差分為 0，而相位差分於正負值隨相位極大值與極小值引起正負值變動。因此利用相位差分正負值可有效與辨識球體是否凹陷，不過要由於量測相位極為靈敏，所以為防止擾動此現象可以內差法來得到較好效果。

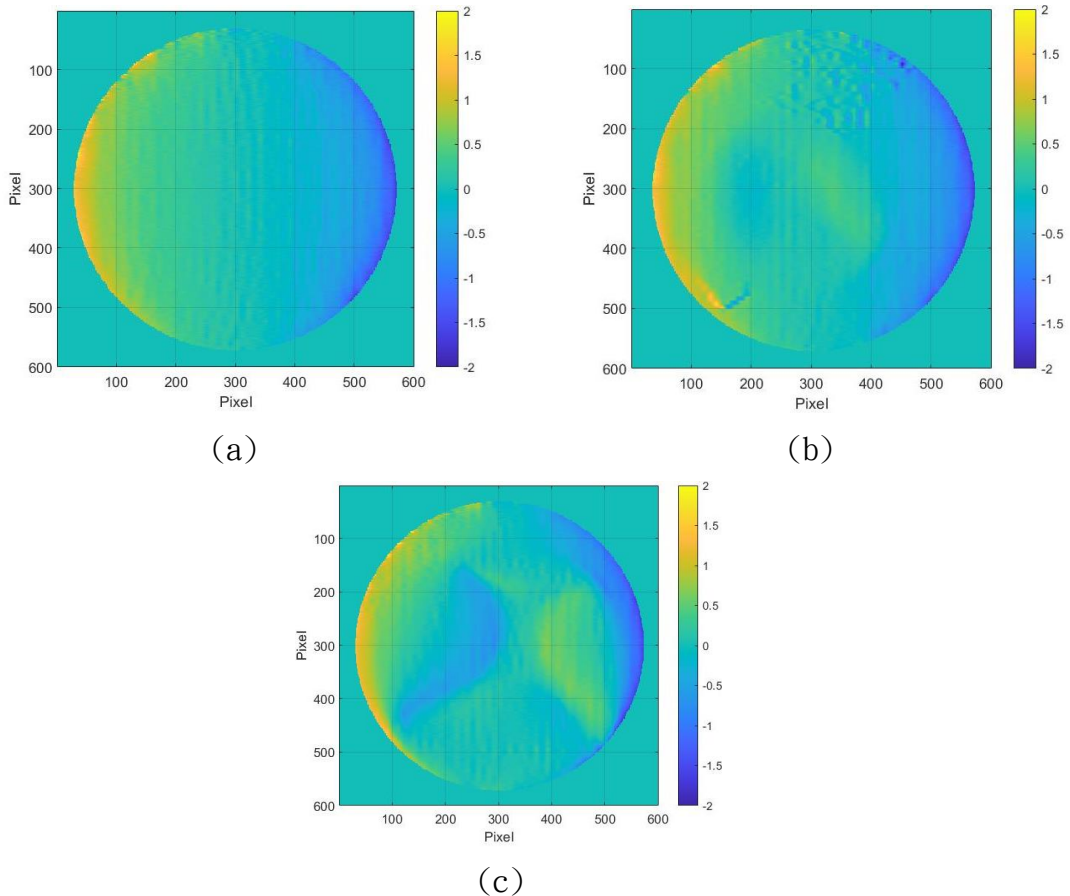
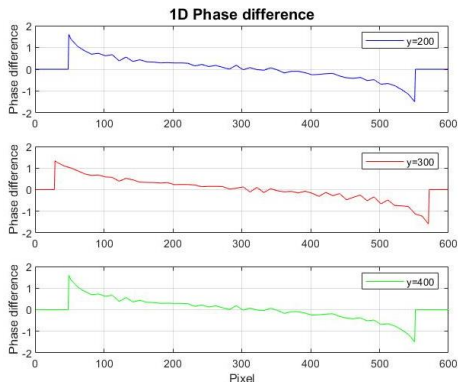


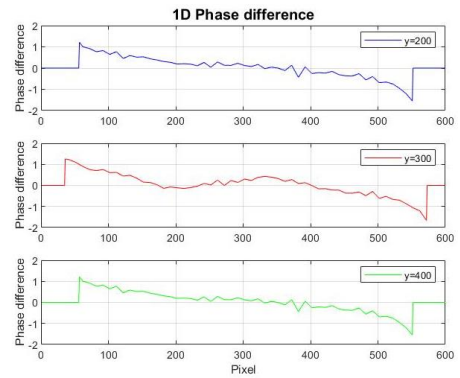
圖 27 2D 相位差分分佈。(a)無凹面球，(b)小凹面球，(c)球嚴重凹面球。

圖 28 為 1D 相位差分分佈，在此可觀察  $y=200$ 、 $y=300$  與  $y=400$  Pixel 時的相位差分分佈。圖 28(a)為無凹面球 1D 相位差分分佈，約於座標節點(304,200)與(324,200)會產生接近 0 的相位差，因相位受雜訊影響，所以在這 2 點座標間相位靈敏度極高，因此與圖 22(d)1D 展開相位極大值相較會略有些誤差；另外，當座標小於(304,200)時相位差分為正，且座標大於(324,200)時相位差分為負。同樣的，圖 27(a)中  $y=300$  與  $y=400$  Pixel 也有類似現象。圖 28(b)小凹面球於  $y=300$  Pixel 有 3 組接近 0 的相位差 這代表有 2 個極大值與 1 個極小值，與圖 28 (c)嚴重凹面球則更為明顯。

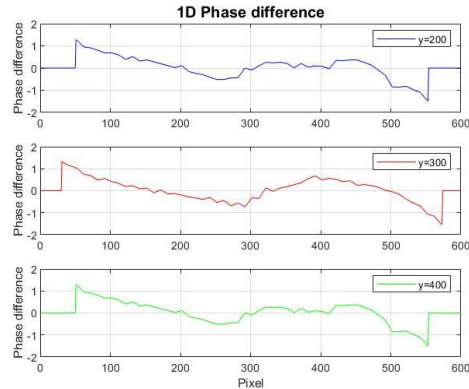




(a)



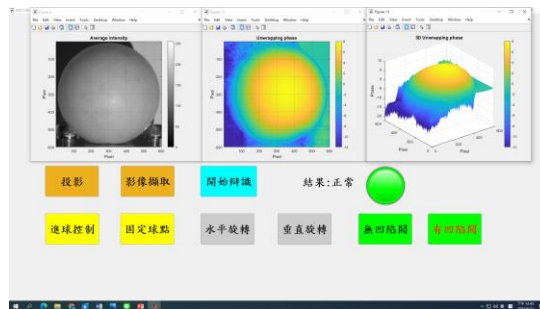
(b)



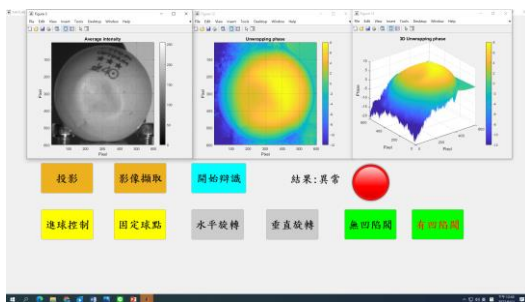
(c)

圖 28 1D 相位差分分佈。(a)無凹面球，(b)小凹面球，(c)球嚴重凹面球。

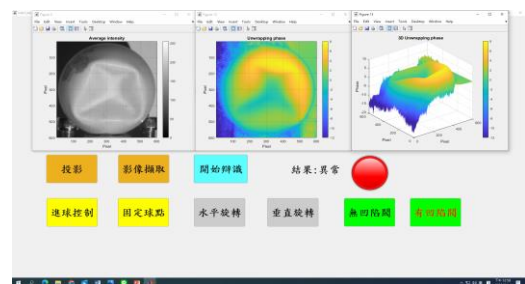
依相位及相位差分計算並加以優化計算後，我們可得到初步球體表面凹陷辨識功能如圖 29 所示，圖 29(a)顯示無凹面球辨識結果為正常，而圖 29(b)小凹面球與圖 29 (c)嚴重凹面球辨識結果皆為異常。



(a)



(a)



(b)

圖 29 球體表面凹陷辨識。(a)無凹面球，(b)小凹面球，(c)球嚴重凹面球。

## 陸、討論

問題一：球體凹面於左側、正面與右側之條紋相位分佈。

討論：球體三種不同凹面處呈現的相位分佈如圖 30 所示，左側凹面處由於會產生黑影而會有雜訊而產生相位抖動現象，所以左側面凹處即為相位抖動區；而正面凹處會有極大值與極小值產生，右側凹面處則會因相位維持不變，所以相位固定範圍即為右側面凹處區。

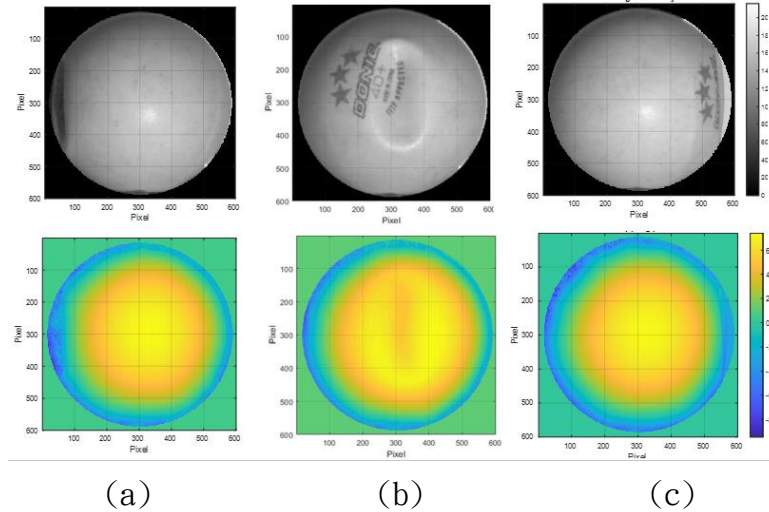


圖 30 球體凹面平均強度與相位分佈。(a) 左側，(b) 正面，(c) 右側。

問題二：若無背景條紋參考，如何計算出球體上條紋展開相位。

討論：若無背景條紋參考時，可以先計算出球體本身展開相位如圖 31(a) 所示，其展開相位為一累積增加的相位，無法得到球體曲面的條紋相位。如要得到完整的球體曲面條紋相位可以傾斜修正法得之，也就是從球體本身展開相位找合適(fitting)線性相位後再合成欲求球體曲面相位，其 fitting 後的展開相位如圖 31(b) 所示，因傾斜修正法可能會讓每個 pixel 相位都能 fitting 良好而導致誤差。

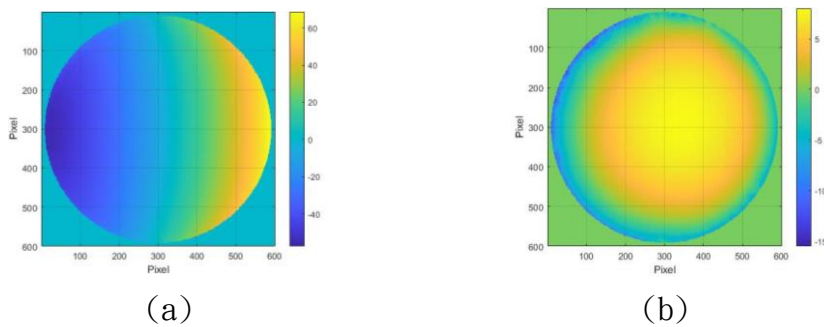


圖 31 無背景條紋參考。(a) 調節背景相位，(b) 展開後相位圖。

問題三：以傅立葉轉換法計算出球體展開相位與 4-step 法差異性。

討論：以傅立葉轉換法最大的優點是只要 1 張條紋圖即可如圖 32 所示，所以可省下擷取與處理條紋影像時間。它主要原理是將空間影像轉至空間頻率上處理影像，CCD 擷取  $(-1, 0, +1)$  3 個模的影像，在此主要以 +1 模頻率來獲得相位，由於條紋變形會造成相位微擾，相位微擾會在 +1 模產生其他頻率如式(5.1)與(2.2) 所示。

$$f_{1x} = f_{1x} + \Delta f_{1x} = f_{1x} + \frac{\Delta\phi(x,y)}{\Delta x} \quad (5.1)$$

$$f_{1y} = f_{1y} + \Delta f_{1y} = f_{1y} + \frac{\Delta\phi(x,y)}{\Delta y} \quad (5.2)$$

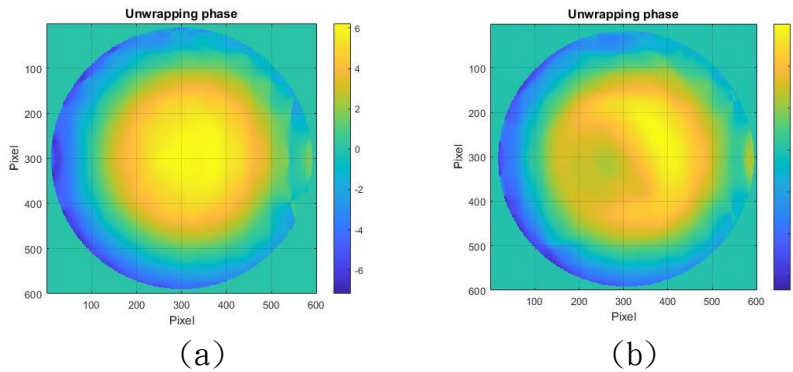


圖 33 傅立業轉換法之條紋相位分佈。(a)無凹面球，(b)小凹面球。

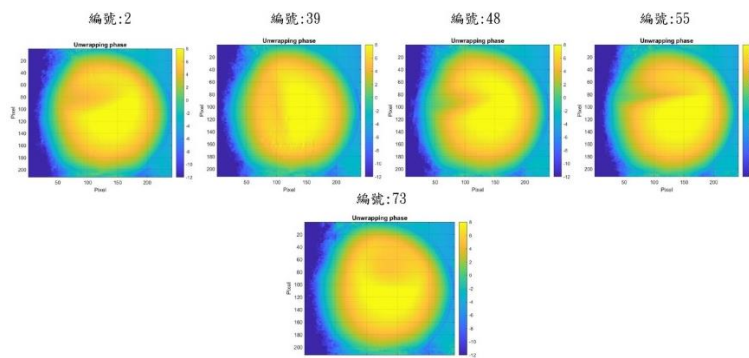
因此留住+1 模鄰近的頻率即可求出空間上相位變化，圖 32(a)與(b)是經過傅立業轉換法求出無凹面球與小凹面球條紋相位分佈，因濾波+1 模鄰近的頻率無法完全較高頻信號，所以仍會有些失真，尤其於球體邊緣處。

問題四：根據優化計算功能做多種乒乓球凹陷形狀測試來觀察辨識效果。

討論：乒乓球實驗樣本共 100 個，而完整與凹陷本各為 50 個如圖 33(a)所示，由圖中混淆矩陣(confusion matrix)可看出完整樣本之辨識結果為完整的為 50 個，而辨識結果為凹陷的為 0 個； 凹陷樣本之辨識結果為完整的為 5 個，而辨識結果為凹陷的為 45 個，所以總體正確率為 0.95。

	辨識結果 完整 (55)	辨識結果 凹陷 (45)
實驗樣本 完整 (50)	50	0
實驗樣本 凹陷 (50)	5	45

(a)



(b)

圖 33 測試辨識效果。(a)辨識混淆矩陣(confusion matrix)，(b) 辨識錯誤樣本。

## 柒、結論

### 一、結論

由本次研究結果可了解 FFP 之 3D 乒乓球面相位量測效果而得知乒乓球面是否有凹陷現象，如此凹陷辨識器可對乒乓球製造者可提供品質參考，另對比賽單位與運動者而言可方便分析與辨識乒乓球而讓比賽與運動順利進行，因此具有極大的助益，其研究功能包含如下：

- (一)、利用 FFP 之 4-step 法建立乒乓球面凹陷條紋相位量測模式，以了解 3D 球面凹陷變化。
- (二)、利用傾斜修正法來補償無參考相位，如此在參考面設立不方便時量測相位。
- (三)、以傅立葉轉換法計算出球體展開相位，如此可減少量測與計算時間。
- (四)、以相位差分法(正面)來分析與辨識球體的凹陷程度，並以辨識混淆矩陣來分析辨識效果。
- (五)、建置自動化量測置球機台與軟體操控整合之辨識器系統。

### 二、未來展望

目前研究乒乓球凹陷與辨識器已具有初步效果，因實驗尚有許多功能值得改進，日後將繼續努力研究，其未來研究說明如下：

- (一)、增加實驗樣本數與提高相位解析度來增加辨識功能。
- (二)、建立更多實驗與生成影像資料庫如圖 34 所示，如此能夠更加了解各種球體凹陷現象，並將人工智能 CNN model 之 U-net 神經網路[13]應用於此系統上示，使系統具有智能辨識能力。

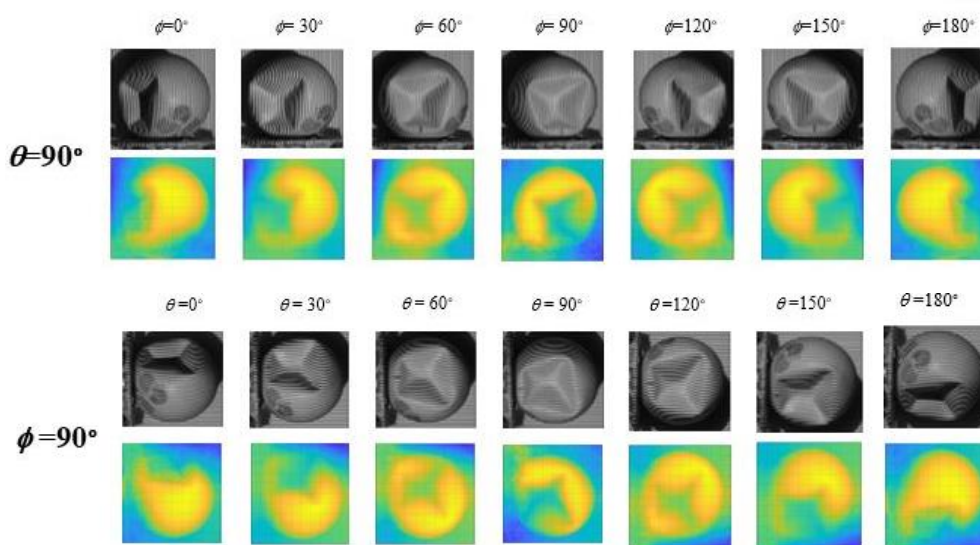


圖 34 實驗與生成影像資料庫。

- (三)、運用於其他種類球體曲面量測與加工物等。

## 捌、參考資料

- [1] 運動現況調查，教育部體育署，109年。
- [2] 運動統計，教育部體育署，109年。
- [3] 業餘桌球運動參賽者參與動機與休閒效益之研究，李達勝，靜宜大學。
- [4] 運動職業化發展計畫」期末報告，教育部體育署行政協助案，國立新竹教育大學。
- [5] ZEWEI CAI, XIAOLI LIU, XIANG PENG, YONGKAI YIN, AMENG LI, JIACHEN WU, AND BRUCE Z. GAO, Structured light field 3D imaging, OPTICS EXPRESS, Vol. 24, No. 18, | 2016 Sep.
- [6] 利用條紋投影技術進行物體表面之三維形變量量測，柯韋廷，國立中山大學材料與光電科學研究所，101年7月。
- [7] 以條紋投影從事光滑物體形貌量測技術之研究，黃柏欽，國立中山大學材料與光電科學研究所，104年7月。
- [8] C. Zuo, L. Huang, Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review, OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING 2018;19:23-59.
- [9] Jing Xu, Song Zhang, Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry, OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING 2020;135:1-14.
- [10] Hieu Nguyena, Jiali Liang, Accuracy assessment of fringe projection profilometry and digital image correlation techniques for three-dimensional shape measurements, *J. Phys. Photonics* 3, 2021.
- [11] 使用條紋投影與景深特徵之三維形貌測量，陳永琦，國立高雄應用科技大學光電與通訊工程研究所，103年7月。
- [12] 條紋投影三維取像與校正及其360度建模之研究，張友維，國立台灣師範大學光電科技研究所，105年8月。
- [13] Shijie Feng, a, b, c Qian Chen, Fringe pattern analysis using deep learning, ADVANCED PHOTONICS LETTER, vol.1(2), 2019.
- [14] Optoma ML500 LED Projector 微型投影機操作說明書。
- [15] UI-3040CP Rev. 2 CCD 影像感測器操作說明書。
- [16] 乒乓球知識知多少(一)，<https://kknews.cc/zh-hk/fit/34y9k4y.html>。
- [17] MATLAB 程式設計入門篇(第四版)，張智星，碁峰出版社，2016年4月。
- [18] Matlab 官方網站，[https://www.mathworks.com/support.html?s\\_tid=gn\\_supp](https://www.mathworks.com/support.html?s_tid=gn_supp)。
- [19] Python 程式設計入門指南，Y. Daniel Liang 著/蔡明志譯，碁峰出版社，2018年9月。