

3D 光場成像技術於工業製程臨場檢測應用

3D Plenoptic Imaging Technology for *in-situ* Inspection of Industrial Manufacturing Processes

林志豪、陳銘福、林儀豪

Chih-Hao Lin, Ming-Fu Chen, Yi-Hao Lin

光場包含光線平面位置與行進方向的資訊，可用於紀錄與還原待測物的三維形貌。本文介紹了光場成像系統架構、光學系統設計原理及物體深度偵測與三維影像還原的方法。和其他三維光學檢測技術相比，光場成像系統架構相對簡單，成本較低且拍攝速度快，但在某些光照環境下效果可能較不理想。以國儀中心自行建置的光場成像實體系統對 PCIE 卡 PIN 腳拍攝測試結果顯示：照明光源均勻性對深度偵測準確性有明顯影響，故國儀中心建置使用 Blender 光場成像模擬附加元件的模擬環境，以模擬不同光源環境的深度偵測之效果。光源於待測物表面產生的反射眩光會大幅影響深度偵測的準確度，但若使用額外的光學系統將光源成像在待測物表面上，則可降低光源對深度偵測的干擾。本文提出一個外部環形光源加上特殊內同軸照明的架構，內同軸照明模組使用均勻平面光源，此光源經主鏡頭前群成像在待測物上，除了可避免同軸光源的鏡像干擾深度偵測之外，還能避免和主鏡頭機構產生干涉。環形光源可照亮待測物表面的傾斜結構，以增加可拍攝待測物的種類。但若要進行更精準的特徵尺寸或缺陷檢測，仍需針對目標待測物的特性來客製設計與製作光源模組，以優化系統偵測三維半導體封裝缺陷的效能。

Light field contains planar positions and directions of light, which can record and reconstruct 3D shape of targets. Architecture of plenoptic imaging systems, design principals of optical systems, and methods of depth estimation and 3D image reconstruction are introduced. Compared with popular 3D optical inspection technologies, plenoptic imaging technologies are relatively simple, economical, and fast. However, estimated depths are inaccurate in certain lighting environments. Experimental results of PCIE PINs show that estimated depths are noisy with nonuniform lighting. A simulation environment is built from a plenoptic imaging system add-on of Blender to simulate depth estimation with various lighting environments. Reflected images of general light sources from surfaces of targets significantly decrease accuracy of estimated depths of targets. When light sources are imaged on surfaces of targets, interference of light sources is reduced. A lighting system including a ring light module and a coaxial light is proposed. The coaxial light uses a uniform planar light source rather than a point light source, and is imaged on

surfaces of targets by the first group of the main lens, which avoids interference on depth detection and mechanical interference with the main lens. The ring light illuminates inclined structures on surfaces of targets, and objects with side wall structures can be measured clearly. Nevertheless, to measure characteristic scale or detect defects accurately, a customized light source according to feature of targets is necessary, especially for detecting defects in 3D semiconductor packaging.

一、光場技術簡介

光場技術和傳統成像技術主要的差別在於光場除了包含傳統成像技術的光線平面位置資訊外，還包含光線方向的資訊⁽¹⁾。光線方向資訊可用於回推待測物的三維位置，因此可使用光場技術紀錄或還原待測物的三維形貌。以全像技術為例，全像紀錄媒體本身可記錄或還原光波動的振幅與相位，可解算成波前形狀再換算出光線位置與方向資訊，並用於三維攝影或顯示，但全像技術基於波動光學，對照明光源的要求較嚴苛，致使系統建置與維護成本相對高昂。另一方面，傳統成像技術為一對一的物像關係，待測物上一個點往所有方向的光線都會集中到相機感測元件中同一個畫素，無法儲存光線方向的資訊。1908 年諾貝爾物理學獎得主加布里埃爾·李普曼 (Gabriel Lippmann) 基於昆蟲複眼結構提出了使用微透鏡陣列的積分成像技術⁽²⁾，所有方向光線聚在一個點之前或通過聚焦點發散後可使用微透鏡陣列再次聚焦，因每個微透鏡接收到待測物上同一個點往不同方向的光線，故可將不同微透鏡的影像視為對光線各個行進方向的取樣，讓使用一般相機感測元件的系統具備紀錄光場的能力，建立了成本相對低廉的光場相機技術之概念，但受限當年微透鏡陣列等精密光學元件的製造能力不足，無法建置堪用的實體系統。2004 年史丹佛大學電腦圖形實驗室建置了第一個光場相機實體，使用散焦型光場相機架構，正式啟動了光場相機技術的發展。2010 年 Raytrix 公司的光場相機首次上市販售⁽³⁾，之後也發展出針對工業檢測應用的光場相機系統的設計製造服務，由史丹佛大學電腦圖形實驗室畢業生創建的 Lytro 公司也發展出散焦型光場相機架構的消費型光場相機⁽⁴⁾。2019 年 Vomma 公司完成了散焦型光場相機系統軟硬體核心技術的建置與整合，包含光學設計、微透鏡陣列超精密加工、相機晶片整合封裝與測試、基於人工智慧的光場影像還原演算法、三維渲染與快速精密檢測演算法、3D 工業檢測整合軟體等。因工業檢測等級之高精度散焦型光場相機系統需要直接整合微透鏡陣列的影像感測晶片，需要半導體感測晶片的設計、製造、封裝、測試等技術，系統建置門檻較高，因此本文將以傳統積分成像技術所使用的聚焦型光場相機架構進行系統設計與分析。

光場成像系統的深度偵測基本原理和立體視覺技術⁽⁵⁾相似，基於三角測量原理藉由不同角度影像的視差推算深度，如圖 1 所示，物體深度 d 可由微透鏡與相機感測晶片間距 g 、微透鏡間距 p 、以及視差 x 表示：

$$d = g(p/x) \quad (1)$$

視差 x 量測的解析度受限相機感測晶片畫素大小，故物體深度 d 的解析度以相機畫素間距表示為：

$$\delta d = \frac{\partial [g(p/x)]}{\partial x \times \delta x} = -g(p/x^2) \delta x \quad (2)$$

一般而言待測物上同一個點通常可被三個以上的微透鏡成像，此時上述兩個公式中的微透鏡間距 p 將變成兩端微透鏡中心的距離，相當於三角測量的基線長度。此時可用立體視覺中的對極幾何(Epipolar geometry)⁽⁶⁾ 技術推估待測物的水平位置與深度。

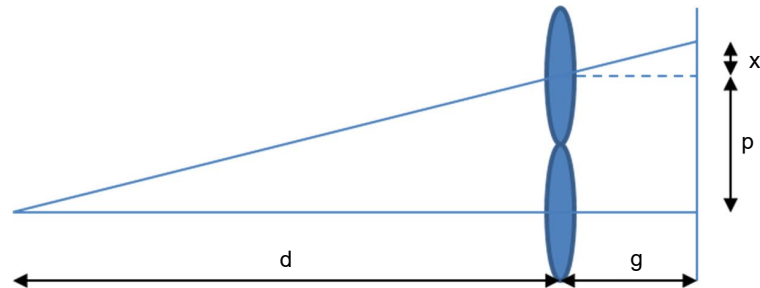


圖 1. 光場成像系統深度估算示意圖。

實務上進行深度估算前必須先進行立體匹配⁽⁷⁾，以找出不同微透鏡影像中待測物上同一個點的成像。然而整張影像中通常只能匹配出部分具明顯特徵圖樣的區域，大部分具重複等複雜圖樣或沒有明顯圖樣等區域無法正確匹配。如圖 2 所示，正確匹配出對應區域的物體可計算出視差並估算深度，但無圖樣空白區域則無法特定出對應區域，故無法計算視差並進行後續的深度估算。此外當待測物具有明顯的深度不連續區域時，待測物部分區域可能在特定角度的微透鏡影像中被前方物體遮蔽而消失，或在外部光源不均勻或待測物表面具鏡面反射等情境下無法正確匹配出對應區域。因此，深度偵測後的原始結果通常會包含許多無法偵測的區域，需要根據已偵測到的深度進行填補修復⁽⁸⁾，才能得到完整的深度圖。

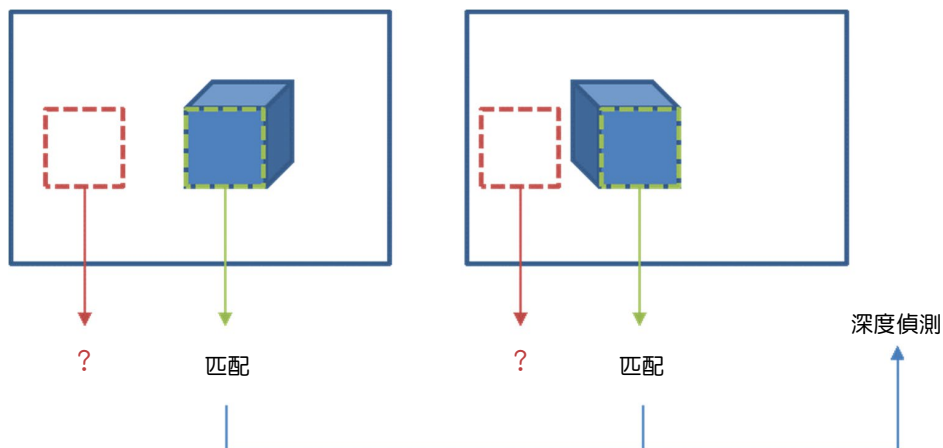


圖 2. 無圖樣區域立體匹配示意圖。

光場成像技術和其他三維光學檢測技術相比，建置與維護成本相對較低，拍攝速度快可檢測快速移動或變化中物體，適合在經費有限狀況進行中等解析度需求的檢測應用。同時系統架構相對簡單，較容易進行不同波長檢測等客製化系統設計與製作，服務產學研界之前端研究需求。

二、光場技術原理

國研院國家儀器科技研究中心 (國儀中心) 發展出光場成像系統建置的關鍵技術，包含光學系統原理與硬體設計方法、影像處理與三維形貌量測演算法、光源對深度偵測影響等技術與軟體，可建置對應不同客戶需求的完整軟硬體系統。本章將分節描述這幾個核心關鍵技術的原理。

2.1 光場系統硬體設計方法

光場系統硬體核心元件包含主鏡頭、微透鏡陣列及影像感測元件。光線依序經過主鏡頭與微透鏡陣列後抵達影像感測元件成像。如圖 3 所示，依據主鏡頭與微透鏡陣列的相對位置可將光場系統分為四種架構，包含散焦型、克普勒型、伽利略型及無限共軛型。為比較各種架構的差異，圖 3(a)-(d) 的所有主鏡頭焦長一樣，所有微透鏡的焦長固定為主鏡頭的 0.4 倍，而聚焦型系統 (b)-(d) 的系統放大率皆為 0.4 倍，主鏡頭為有限共軛組態系統 (a)、(b)、(d) 的主鏡頭放大率皆為 1.0 倍。此處為了比較各種架構的差異，待測物上只有一個點發出光線，同時所有微透鏡陣列的間距固定，實務上微透鏡陣列間距大小代表光線角度的取樣範圍，在該角度範圍內的光線將成像在同一個點，但為了說明方便下文假設微透鏡陣列間距無限小，每個微透鏡只有一個角度的光可通過。此外，為了避免待測物上不同點經不同微透鏡的不同角度光線到達相機感測元件上相同的畫素，需要適當調整微透鏡陣列間距等光學參數，讓感測元件上收到多角度光線與沒收到光線的畫素數量降到最低，故此處假設待測物上只有一個點發出光線，降低系統複雜度並將重點放在各個架構的差異。散焦型為主鏡頭成像在微透鏡陣列處，主鏡頭成像在每個微透鏡上的光線將依其方向到達相機感測元件上不同的畫素，藉此紀錄該微透鏡處往不同方向的光線。克普勒型為主鏡頭在微透鏡陣列前方成一實像，該實像作為微透鏡陣列的待測物並成像在感測元件上，不同的微透鏡接收到該實像往不同角度的光線，可藉此紀錄光場資訊。無限共軛型為主鏡頭如無限共軛顯微物鏡一樣待測物發出不同角度的光線平行前進不會聚焦，微透鏡再將主鏡頭後方的平行光線聚焦在感測元件上，不同的微透鏡接收到待測物往不同角度的光線，亦可藉此紀錄光場資訊。伽利略型為主鏡頭成像位置在微透鏡陣列後方，通過主鏡頭的光線在聚焦前抵達不同的微透鏡並成像在感測元件上，此時不同的微透鏡也接收到待測物往不同角度的光線，並可藉此紀錄光場資訊。

若使用類似市售相機模組和微透鏡陣列規格的元件，系統解析度最差的為散焦型架構，原始平面解析度為微透鏡間距，受限於微透鏡陣列夾持機構精密組裝能力最小只能設計到 $100\ \mu\text{m}$ 附近，難以進行解析度低於 $10\ \mu\text{m}$ 的精密工業檢測，雖然散焦型架構具有光線角度解析度的優勢，但和最終深度解析度的轉換和所使用的次畫素演算法與待測物上的圖樣等外部因素相關，難以進行比較，故此處只比較光學原始解析度，主要和光線角度分布範圍的大小相關。此架構下的原始深度解析度雖然較不受繞射效應影響，但受限於主鏡頭數值孔徑與微透鏡焦長規格，和其他架構相比沒有太大優勢。系統原始解析度第二差的架構為克普勒型，因聚焦型系統原始解析度主要受限於繞射效應，克普勒型系統的像側數值孔徑相對較小，故原始平面與深度解析度較差。系統原始解析度次佳的架構為無限共軛型，此架構下所有微透鏡物側的主光線平行光軸，可以減少部分像差，但系統原始解析度也受限於繞射效應，其像側數值孔徑中等，故原始平面與深度解析度次佳。系統原始解析度最佳的架構為伽利略型，其像側數值孔徑相對較大，故系統原始平面與深度解析度相對較佳。

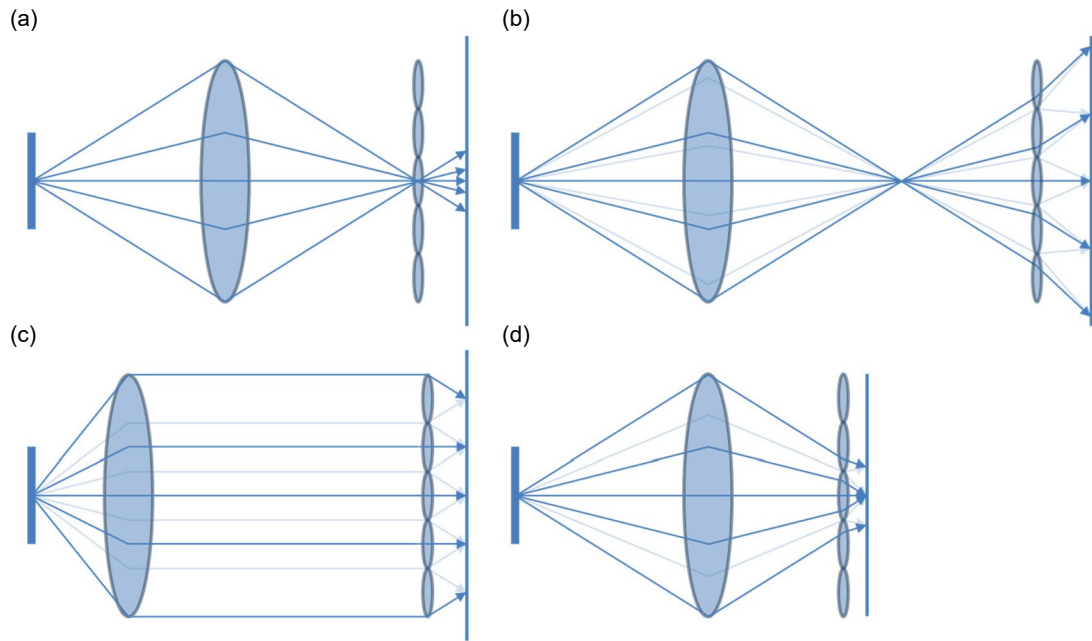


圖 3. (a) 散焦型、(b) 克普勒型、(c) 無限共軛型、(d) 伽利略型光場成像系統架構示意圖。

光場系統硬體設計為先使用理想透鏡模型，並依系統需求規格設計出各核心元件的初步規格參數，再以專業光學設計軟體優化並驗證，最後再進行各核心元件的設計製作或採購市售產品。圖 4 為光場系統硬體初步設計原理示意圖，系統的孔徑光欄為光路中可視孔徑最小處，即各別微透鏡的可視孔徑，故光場的原始影像將以各別微透鏡的主光線進行分析，主光線軌跡可能出現的區域為圖 4 淺綠色區域，可發現各別微透鏡影像的大小和主鏡頭可視孔徑尺寸成正比，但當主鏡頭可視孔徑尺寸過大，微透鏡影像和相鄰影像重疊，將導致影像無法辨識，只能使用未重疊區域進行後續處理。圖 4 最上方微透鏡的成像位置如紅線軌跡所示，超出微透鏡影像可使用區域，形同待測物上該點不會被此微透鏡成像，因此待測物上該點只可被中央三個微透鏡成像，深度解析度計算時的基線長度為兩倍微透鏡間距。若改變主鏡頭

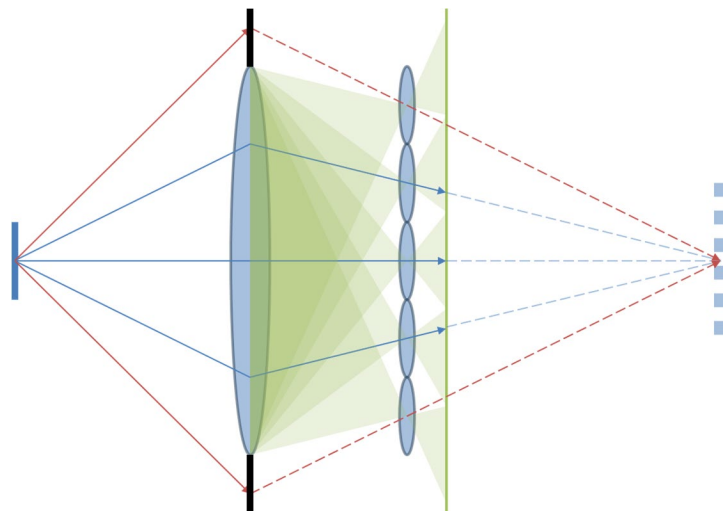


圖 4. 光場系統硬體初步設計原理示意圖。

光圈的大小，實務上即為調整主鏡頭焦比，會使微透鏡影像可用區域縮小，當圖 4 上方數來第二個微透鏡影像不在微透鏡影像可使用區域時，待測物上該點可被微透鏡成像的數目減少，進而使深度解析度下降，故在設計階段需要使用特定的主鏡頭焦比，不可在拍攝時再調整。

系統初步設計之原始解析度主要可由下列幾項參數決定：主鏡頭放大率、主鏡頭焦比、微透鏡放大率、微透鏡焦長、微透鏡間距及影像感測元件畫素間距。如前所述主鏡頭焦比無法自由調整，必須由主鏡頭放大率、微透鏡放大率、微透鏡焦長、微透鏡間距等參數決定。上述參數加上主鏡頭焦長、微透鏡陣列尺寸等參數即可決定系統總長度與直徑等次要規格，組成一組可供後續專業光學設計軟體進行最佳化的初始參數。然而除上述參數外，系統規格也和微透鏡陣列中微透鏡的二維排列方式，以及後續影像處理中實際擷取微透鏡影像區域的大小位置等因素相關，限於本文篇幅不在此贅述。此外真實系統和理想透鏡模型之間可能會有些許誤差，且理想透鏡模型不考慮的繞射效應在高解析度系統中也會有顯著的影響，故需使用專業序列式光學設計軟體抑制像差並優化原始影像解析度，再用非序列式光學設計軟體模擬成像確認深度解析度是否劣化，再進行後續的硬體製造與組裝調校⁽⁹⁾。

2.2 光場原始影像處理與三維影像還原演算法

如公式 (1) 所示，待測物深度的計算需要從光場原始影像找出的視差 x ，再帶入包含微透鏡與影像感測元件間距 g 與微透鏡間距 p 的方程式中，而包含主鏡頭的光場成像系統則需要更多的參數進行計算，然而這些硬體實際參數可能因製作與組裝公差而偏離設計值，故需先從光場原始影像直接估算主鏡頭與微透鏡個別的水平放大率以進行初步的硬體參數校正。系統放大率可由微透鏡影像中特定圖樣的大小計算，微透鏡個別的放大率等同於微透鏡像距除以微透鏡物距，從圖 1 可知微透鏡像距 g 除以物距 d 等於視差 x 除以微透鏡間距 p ，而主鏡頭放大率則為系統放大率除以微透鏡放大率。此方法可在水平像差小於一個畫素的系統中估算部分系統真實參數，然而深度估算的精度受所使用的演算法影響，而不同種類待測物可能有各自的最佳演算法，故難以精確量測深度解析度並回推校正硬體參數。實務上通常只能用已知深度待測物進行實際量測建立該演算法的對照表，再以該對照表校正後續量測結果⁽¹⁰⁾。

三維影像還原首先需如圖 2 所示進行立體匹配，先找出不同微透鏡影像中的同一物體，才能進行該物體深度的估算。立體匹配的演算法大致上可分為兩種：

- (1) 不同微透鏡影像間的像素比對，如圖 5 所示，此類方法和雙眼視覺系統所用的演算法類似，使用互相關或類似的計算方法比對不同區域影像像素的相似度，再將相似度最高的區域判定為同一物體，最後使用對極幾何 (epipolar geometry) 技術計算該物體的三維位置⁽¹¹⁾ 並拼接出三維立體影像。
- (2) 使用焦點疊加技術找出待測物不同區域各自的最清晰焦點深度，此類方法和一般消費型裝置使用多次拍攝估算深度的方法⁽¹²⁾ 類似，將光場原始影像中每個微透鏡影像分割出來後再依特定視差大小錯位堆疊，具有該特定視差的物體將被正確重疊，重疊影像中該物體保持清晰，而具不同視差的物體則會出現重影，經簡單影像處理可得到類似光學系統離焦時的模糊影像，此過程稱為重聚焦 (refocusing)，如圖 6 所示，上方焦點疊加圖在立方體側邊特定深度處正確疊加，故該處深度可由所使用的視差估算出，而下方焦點疊加圖在立方體正面處正確疊加，亦可藉由所使用的視差估算該處深度。因此掃描不同視差所得到的多張重聚焦影像可視為拍攝同一物體不同焦點的一組焦點疊加影像，並可用類似現有焦點疊加技術的演算法估算深度。

兩種演算法相比：第一種方法對待測物精細圖樣的處理效果較佳，而第二種方法所得到的深度圖有比較細緻的物體邊緣，但實務上可能因待測物上的遮蔽、光影等因素無法判斷某些區域的深度，導致這兩種方法所得到的原始深度圖品質都達不到工業精密檢測的要求，需要再進行雜訊濾除與內插解析度強化等後處理。故而也需要根據不同待測物類型使用不同的深度偵測與影像強化演算法，以得到符合客戶檢測需求的深度圖。

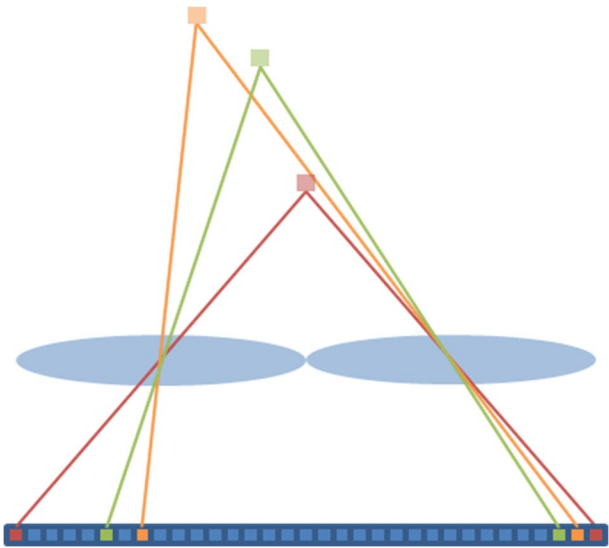


圖 5. 像素比對深度偵測演算法原理示意圖。

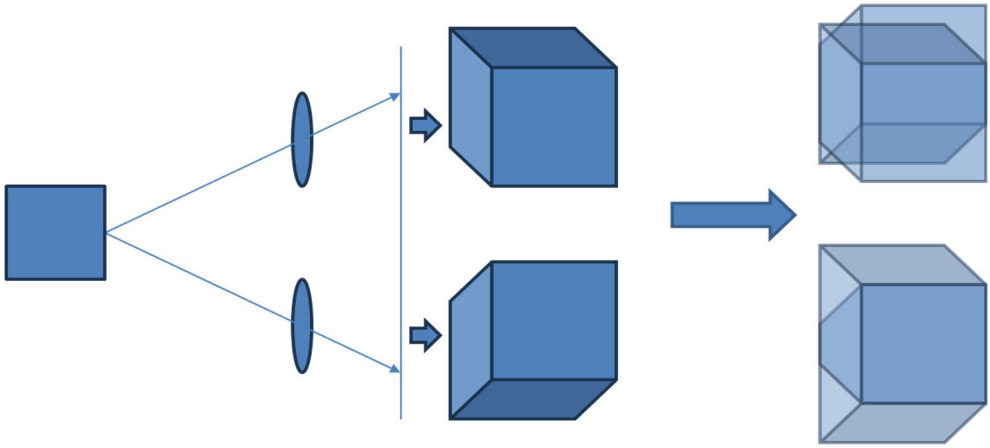


圖 6. 焦點疊加深度偵測演算法原理示意圖。

基於前述傳統演算法開發的深度偵測模組可針對某些目標待測物進行優化，但此模組對應不同種類待測物或不同種類缺陷的能力可能不足，實務上進行檢測時可能需要具影像處理等專業人員隨時調整或開發新演算法，可行性較差。若使用深度學習技術，則可建立一系統性軟體模組調校方法，讓不具光場系統專業知識的機台設備工程師進行日常調整校正。圖 7 為使用 U-net_a 與 U-net_b⁽¹³⁾ 兩種使用不同內部層數與卷積核尺寸等內部參數的 U-net 模型⁽¹⁴⁾

對國儀中心現有系統的一組焦點疊加影像進行三維影像分割預測結果圖，U-net_a 網路架構對大比例標記區域的預測能力較強，因此在檢測此類待測物類型時，能夠提供大比例區域標記應用更佳的準確性和效能。深度圖預測所需訓練用資料集的生成將於下一章進行說明。

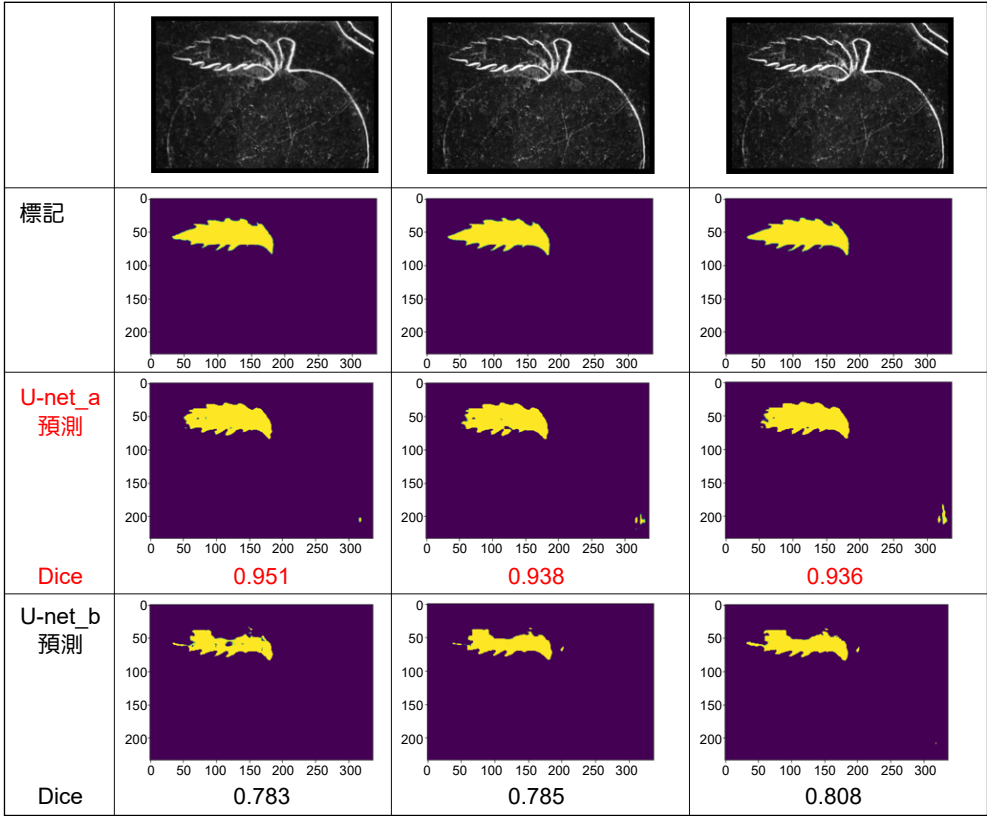


圖 7. 使用 U-net_a 與 U-net_b 模型進行三維影像分割預測結果圖。

2.3 光場系統檢測環境限制

實務上光場成像系統在某些照明光源下難以準確檢測具特定種類表面形貌的待測物。當待測物表面有劇烈的深度變化時，靠近相機的區域可能遮蔽遠離相機的區域，造成被遮蔽區域只有部分角度可被觀察，降低該區深度解析度或使該區深度無法偵測，此時可由修改光場成像系統光線方向取樣角度與密度的設計改善。如圖 6 下方微透鏡影像中立方體朝上的面被朝前的面遮蔽，導致朝上的面只能被上方微透鏡拍攝，可用的光線角度變少深度偵測效果變差。照明光源對相機拍攝影響的部分可依光照模型⁽¹⁵⁾ 分為三類，包含環境光照、漫射光照與鏡面光照。環境光照不受物體表面法線角度與光線入射角度影響，不干擾深度偵測。漫射光照受物體表面法線角度影響但不受照明光源入射角度影響，會影響待測物上不同區域的相對灰階強度，但不會嚴重干擾深度偵測。鏡面光照同時受物體表面法線角度與照明光源入射角度影響，實務上深度偵測模組可能會將光源鏡像誤判為待測標的，嚴重干擾深度偵測的結果。圖 8 為具鏡面反射待測物光場拍攝結果與重聚焦在待測物表面與光源鏡像深度的影像，光源產生的鏡像和待測物表面有不一樣的視差，導致影像還原模組在掃描各個視差的重聚焦影像時無法判斷最佳的視差，得不到正確的待測物深度。因此設計照明系統時需要抑制較明顯的光源鏡像，以避免深度偵測錯誤。

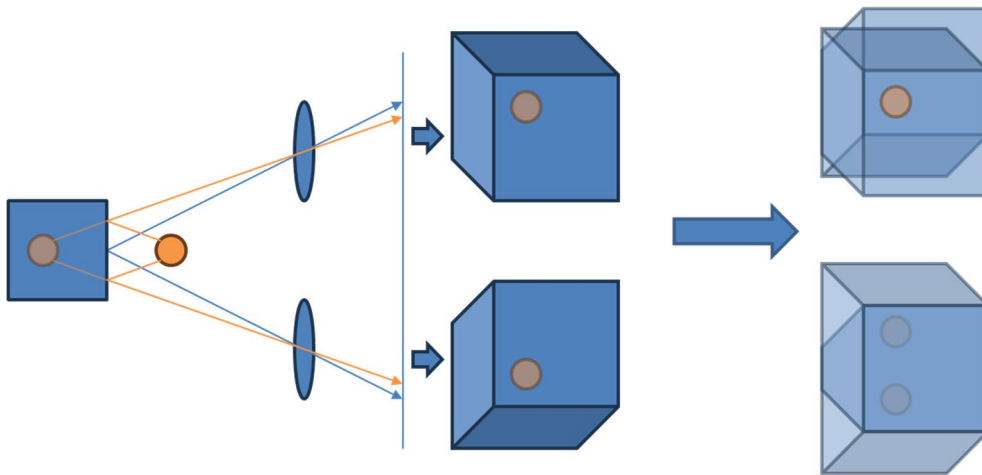


圖 8. 具鏡面反射待測物光場拍攝結果與重聚焦在待測物表面與光源鏡像深度的影像。

三、實驗與模擬系統環境建置與測試

國儀中心基於前述設計方法建置了一組光場成像實體系統，可進行樣品拍攝及傳統三維影像還原演算法測試等。然而深度學習技術所需訓練用資料集的建置需要大量設計製作各種型式的樣品，也需要精密量測這些樣品的三維形貌取得基準真相，故會耗費大量人力物力，因此國儀中心也參考過往發表文獻⁽¹⁶⁾ 建置模擬環境，除了可建立訓練用資料集外，也可研究不同型式光源對深度偵測的影響。

3.1 實驗與模擬系統環境

圖 9 為光場成像系統與照明光源實體圖，為了提升系統原始深度解析度使用像側數值孔徑較大的伽利略架構設計，系統景深規格也跟著變短。光場成像系統的平面與深度的原始解析度分別為 $3\ \mu\text{m}$ 與 $20\ \mu\text{m}$ ，視野與景深分別為 $6\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$ 與 $200\ \mu\text{m}$ 。此系統使用了內同軸光源與外接的環形光源，可分別對應低起伏漫射表面與大起伏或高反射表面。此外亦可進行將內同軸光源改成均勻平面光源模組等修改以對應不同的表面，也可使用近紅外光 (NIR) 或紫外光 (UV) 影像感測器與鏡片拍攝不同波長的三維影像，以使用於矽基半導體與特殊材料的樣品檢測。

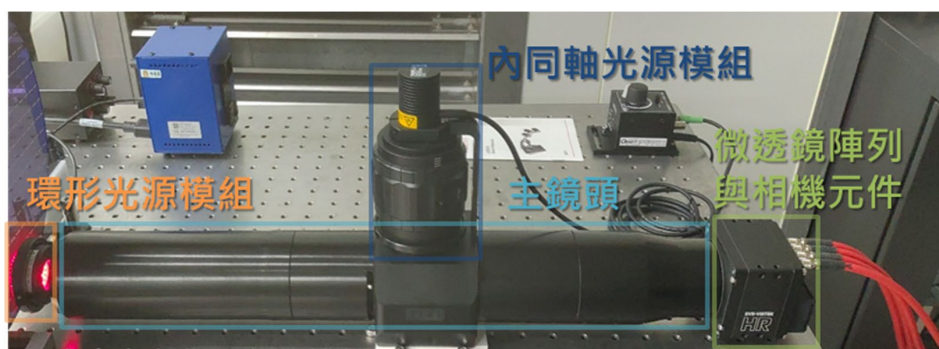


圖 9. 光場成像系統與照明光源實體圖。

相對實體系統，模擬系統的建置可節省大量的人力物力，並大幅加速深度學習模組的發展。國儀中心使用開源 **Blender** 軟體與光場成像系統模組進行模擬 (請參考圖 10)，該模組內建了大量主鏡頭資料，可選擇適當規格的主鏡頭進行模擬測試，亦可輸入自行設計主鏡頭的資料以模擬光場影像。但該模組使用類似菲涅耳 (Fresnel lens) 透鏡的架構模擬微透鏡陣列，無法模擬真實系統平凸微透鏡陣列的像差，故國儀中心也發展了可直接模擬平凸微透鏡陣列的附加元件。光源的部分則受限於 **Blender** 軟體內建 **Cycle** 渲染引擎的限制，無法模擬同軸光源所使用的分光鏡，但模擬環境中可忽略部分機構干涉，故可直接在實際光源經分光鏡等光學系統後成像的位置放置模擬光源，繞開 **Cycle** 渲染引擎的限制。

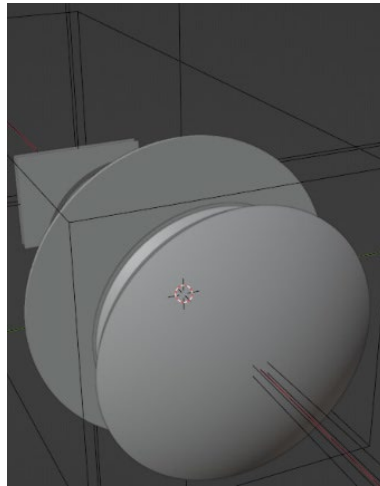


圖 10. Blender 軟體光場成像系統模擬圖。

3.2 實驗與模擬系統結果分析

基於半導體封裝檢測的需求，本文選擇 **PCIE** 卡上的 **PIN** 腳作為拍攝標的物。圖 11 為實體光場成像系統待測樣品拍攝區域示意圖，基於該區域表面形貌與反光特性照明光源只使用環形光源模組以強化 **PIN** 腳邊緣的特徵。因拍攝區域上方電容機構限制，環形光源模組無法貼近待測區域，較高角度光源產生的雜光干擾深度偵測結果，產生如圖 12 所示的網格狀雜訊。使用可保留整體形狀的影像濾波演算法、可保留物件邊緣的深度圖平滑化演算法及深度次畫素演算法的結果如圖 13 所示。優化後全深度聚焦圖與深度圖可使用於建置三維立體模型及後續的三維尺寸偵測，如圖 14 所示，圖中寬度和高度單位為圖 13 的畫素大小，實際尺寸為每畫素 $2\mu\text{m}$ 。

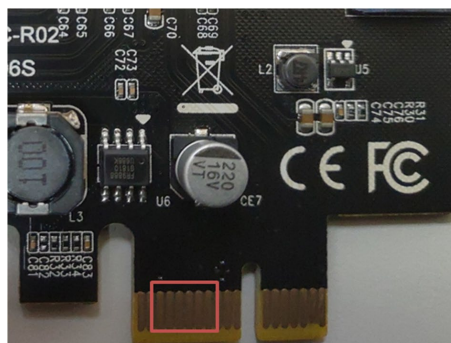


圖 11. 實體光場成像系統待測樣品拍攝區域示意圖。

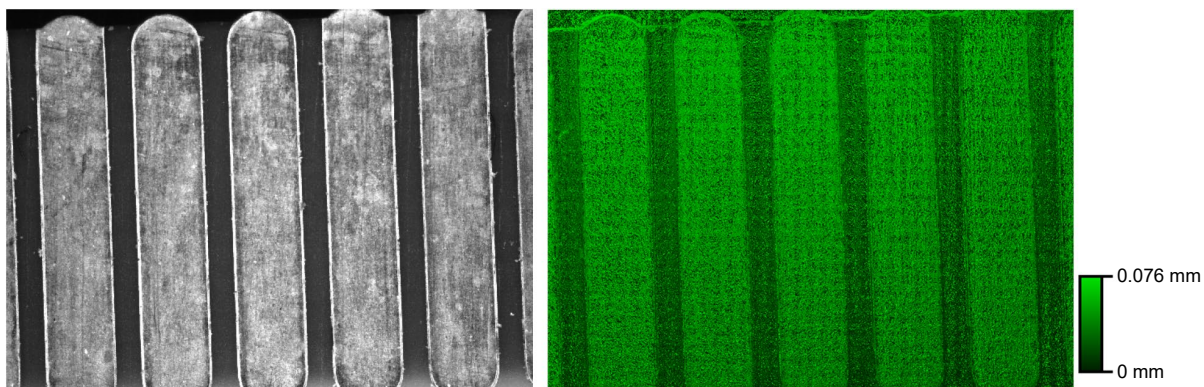


圖 12. 待測樣品拍攝影像之原始全深度聚焦圖與深度圖。

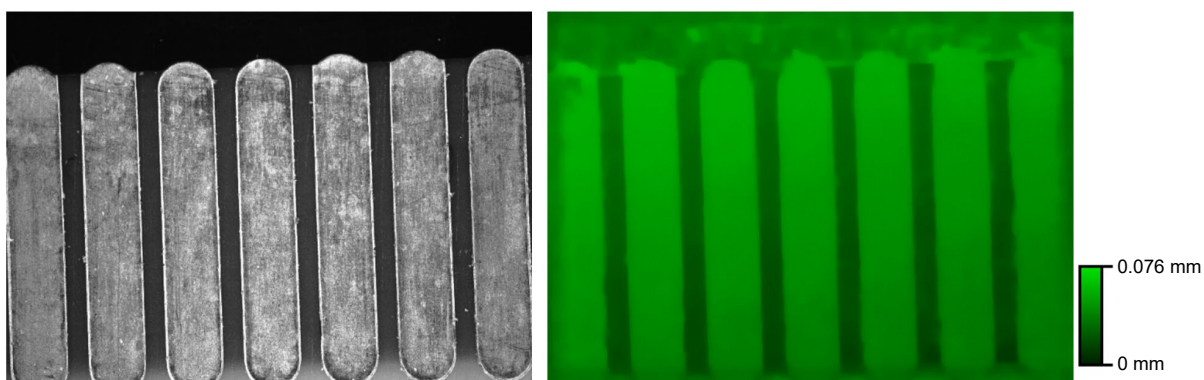


圖 13. 待測樣品拍攝影像優化後之全深度聚焦圖與深度圖。

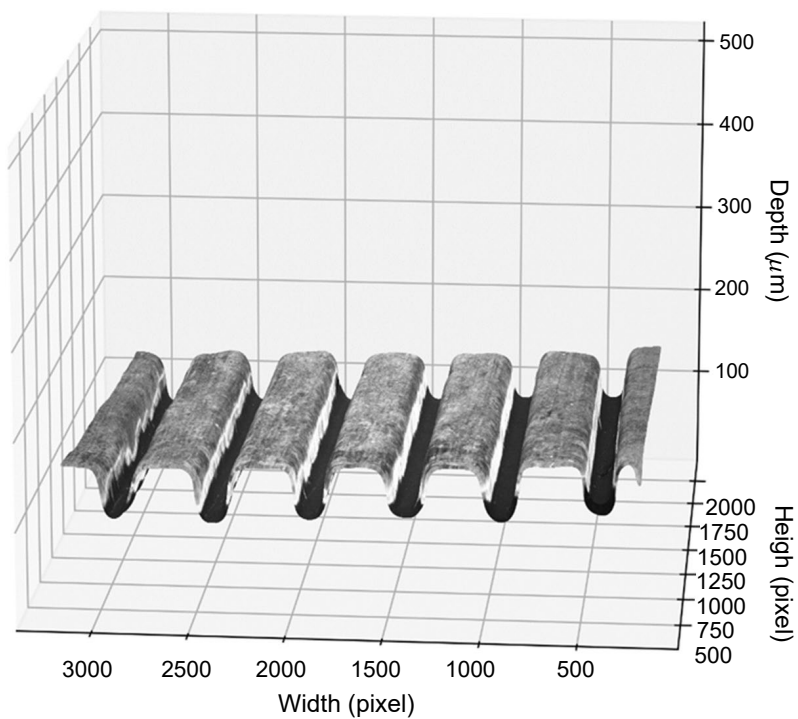


圖 14. 以待測樣品拍攝影像優化後之全深度聚焦圖與深度圖所建立的三維立體模型。

為研究光源對深度偵測的影響，本文建立了不同光照的 Blender 模擬環境。圖 15(a) 為遠處小型光源而圖 15(b) 為近處面光源之架構圖，橙色元件為 Blender 內建的面光源模組，設定的最大發散角度為 180 度，待測物表面反射粗糙度參數為 0.2。基於 Blender Cycle 渲染引擎限制，無法直接使用分光鏡，故在模擬架構中直接建置光源經反射鏡與聚焦透鏡後的成像以模擬同軸光源系統。因此圖 15(a) 可視為模擬一般使用點光源的外同軸光源系統，圖 15(b) 可視為模擬使用大面積平面光源的外同軸光源系統，圖 16 為遠處小型光源拍攝影像之全深度聚焦圖與深度圖，全深度聚焦圖中有明顯的光源鏡像，導致深度圖中光源鏡像附近區域出現明顯的失真。圖 17 為近處面光源拍攝影像之全深度聚焦圖與深度圖，全深度聚焦圖中沒有明顯的光源鏡像，深度圖中也沒有明顯的失真。因此，使用透鏡與分光鏡等光學系統與大面積光源可消除系統視野範圍內光源鏡像的圖樣，將光源對深度偵測的影響降至最低。

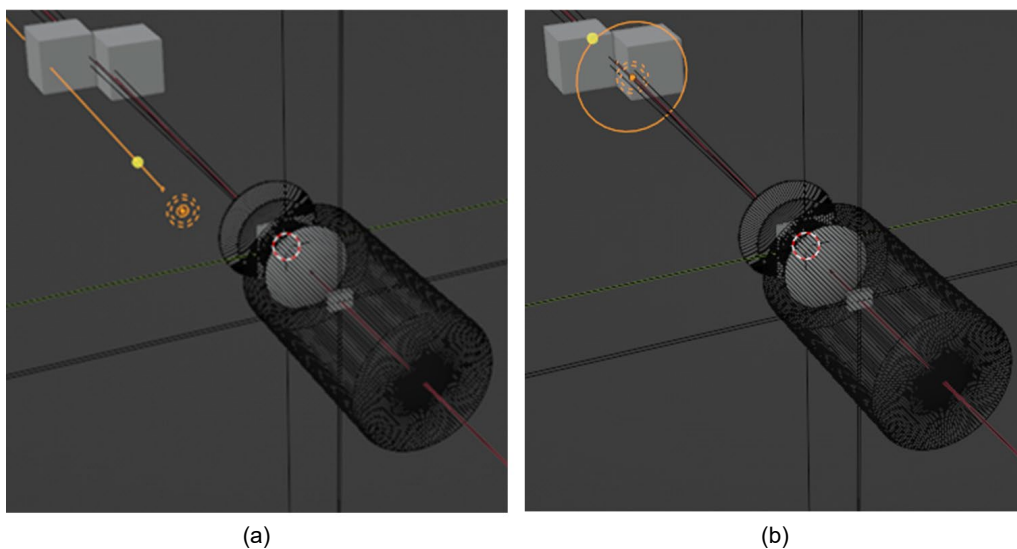


圖 15. Blender 軟體遠處小型光源與近處面光源架構圖。

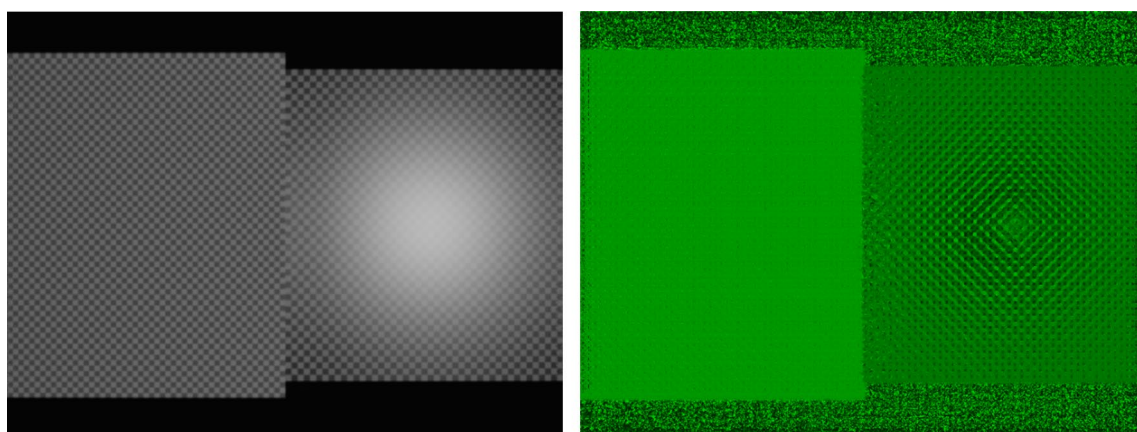


圖 16. 遠處小型光源拍攝影像之全深度聚焦圖與深度圖。

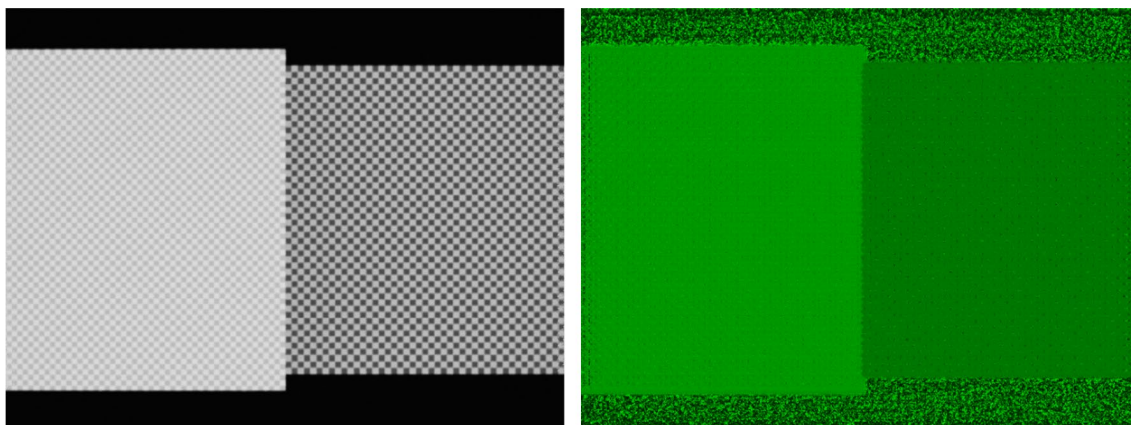


圖 17. 近處面光源拍攝影像之全深度聚焦圖與深度圖。

3.3 照明模組設計規劃

圖 18 為根據上述結果優化的光源系統初步設計圖，分光鏡和待測物間的光學鏡組稱為前群，分光鏡和微透鏡陣列間的光學鏡組稱為後群，面光源發出的光線經聚焦透鏡與鏡頭前群後聚焦在待測物表面上，待測物反光再經由鏡頭前群與後群到達影像感測元件而成像。因此架構下之光源本身會成像在待測物表面上，可降低填滿全視野所需的面光源與光學系統光圈之面積，以較低的成本消除光源對深度偵測的影響。此外，本架構使用內同軸設計，可避免在高解析度設計下的較短工作距離所造成的待測物與光源機構干涉。實務上光源系統設計應同時考量待測物表面形貌，若待測物上有較陡峭的結構，則需另外搭配低角度環形光源照亮該區域，而該光源的鏡像影響深度偵測的可能性較低。然而當待測物上有相對平緩的結構時，所需使用的較高角度側向光源可能會產生明顯鏡像並干擾深度偵測，故需再加裝另外的光學系統將光源聚焦在待測物表面上。此外同軸光源和環形光源分開控制的設計也可根據待測物反光特性來分別調整照明強度，以增加待測物表面起伏在影像中的灰階值差異，可使光源系統對應更多種類與表面特徵的待測物。但最終的量產檢測系統還是需要針對目標待測物特性來調整客製化光源，及其照明強度調校與測試，以優化 3D 影像品質及其深度偵測效能，強化樣品檢測之性能與彈性。

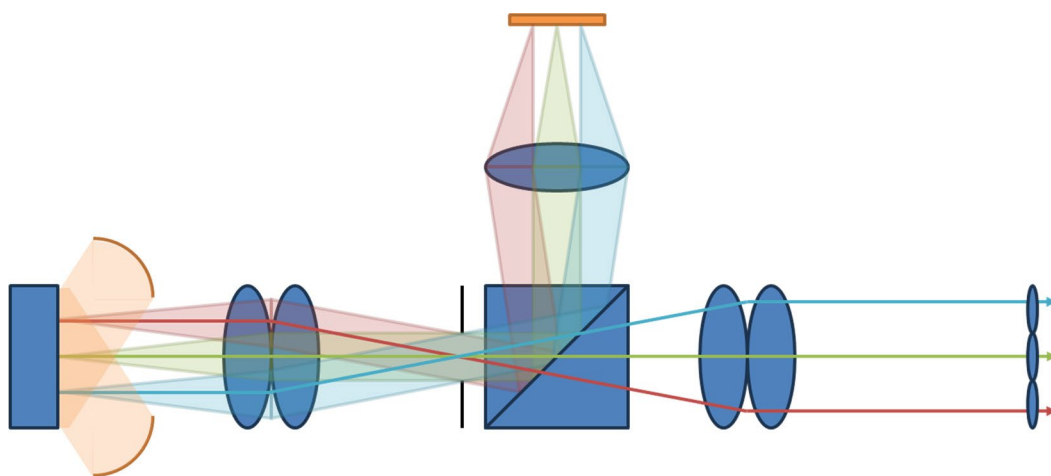


圖 18. 通用光源系統初步設計圖。

四、結論

本文介紹了光場基本原理與光場成像系統架構、光學系統設計原理及物體深度偵測與三維影像還原的方法，也說明了國儀中心建置的光場成像實體系統與模擬環境，實體系統的深度原始解析度為 $20\ \mu\text{m}$ ，景深為 $200\ \mu\text{m}$ ，模擬環境使用 Blender 光場成像模擬附加元件，以模擬不同光源下之深度偵測的效果。光源於待測物表面產生的反射眩光會大幅影響深度偵測的準確度，若將光源放大並貼近待測物則可降低光源對深度偵測的干擾。使用額外的光學系統將光源成像在待測物表面上即可完成此光源模組的建置，而此光源模組通常使用同軸光源的架構以避免和主鏡頭機構產生干涉。本文提出一個外部環形光源加上特殊內同軸光源的照明架構，可將均勻平面光源經主鏡頭前群成像在待測物上，除了避免同軸光源鏡像干擾深度偵測外，也搭配環形光源照亮待測物表面的傾斜結構，可對應更多種類與表面特徵的待測物。然而若要進行更精準的缺陷檢測與三維尺寸量測等應用，仍需針對目標待測物特性研製光源及調校其照明強度，以優化本系統檢測三維半導體封裝的效能。國儀中心現有系統已可檢測傳統 PCB 與晶圓凸塊的立體結構，亦可修改現有設計製作原始平面解析度 $2\ \mu\text{m}$ ，原始深度解析度 $5\ \mu\text{m}$ 的光場成像系統，預期可以用於檢測下世代的半導體封裝微凸塊結構，提供快速的產線全檢服務。

參考文獻

1. M. Faraday, *Philosophical Magazine*, **28** (188), 345 (1846).
2. C. B. Burckhardt, *Journal of the Optical Society of America*, **58** (1), 71 (1968).
3. C. Perwass, and L. Wietzke, *Proceedings of SPIE*, **8291**, 45 (2012).
4. T. Georgiev, Z. Yu, A. Lumsdaine, and S. Goma, *Proceedings of SPIE*, **8667**, 458 (2013).
5. J. Sun, Y. Zhang, and X. Cheng, *Optics Express*, **27** (3), 2292 (2019).
6. Z. Zhang, *International Journal of Computer Vision*, **27**, 161 (1998).
7. A. S. Ogale and Y. Aloimonos, *International Journal of Computer Vision*, **65** (3), 147 (2005).
8. L. Wang, H. Jin, R. Yang, and M. Gong, "Stereoscopic inpainting: Joint color and depth completion from stereo images", *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognit. (CVPR)*, June 23-28, 1-8 (2008).
9. C. H. Lin, P. M. Lin, C. W. Chen, and M. F. Chen, "Design, fabrication, and validation of an aberration-free integral imaging system for 3D reconstruction", *Appl. Opt.*, **61** (27), 7883-7888 (2022).
10. C. Heinze, S. Spyropoulos, S. Hussmann, and C. Perwass, "Automated robust metric calibration algorithm for multifocus plenoptic cameras", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **65** (5), 1197-1205 (2016).
11. T. Georgiev, and A. Lumsdaine, "Focused plenoptic camera and rendering", *J. Electron. Imaging*, **19** (2), 021106-021106 (2010).
12. M. W. Tao, P. P. Srinivasan, J. Malik, S. Rusinkiewicz, and R. Ramamoorthi, "Depth from shading, defocus, and correspondence using light-field angular coherence", *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognit. (CVPR)*, June 7-12, 1940-1948 (2015).
13. C. Wen, T. Miura, V. Voleti, K. Yamaguchi, M. Tsutsumi, K. Yamamoto, K. Otomo, Y. Fujie, T. Teramoto, T. Ishihara, K. Aoki, T. Nemoto, E. M. Hillman, & K. D. Kimura, "3DeeCellTracker, a deep learning-based pipeline for segmenting and tracking cells in 3D time lapse images", *Elife*, **10**, e59187 (2021).
14. O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation", *Proc. Int. Conf. Med. Image Comput. -Assisted Intervention (MICCAI)*, October 5-9, 234-241 (2015).
15. B. T. Phong, *Communications of the ACM*, **18** (6), 311 (1975).
16. T. Michels, D. Mackelmann, and R. Koch, *Sensors*, **24** (8), 2522 (2024).

誌謝

感謝神詠精密光學公司協助微透鏡陣列模仁超精密加工與射出成型製作，完成高品質的光學元件，使國儀中心能建置高解析度光場成像系統。也感謝北科大機械系何昭慶教授團隊協助人工智能相關應用開發與測試，並協同國儀中心將本技術推廣至產學研界，開發半導體相關製程之臨場檢測技術與設備，以及協助三維半導體封裝檢測技術的發展。

作者簡介

林志豪先生為國立清華大學光電工程研究所博士，現任國家實驗研究院國家儀器科技研究中心副研究員。

Chih-Hao Lin received his Ph.D. in the Institute of Photonics Technologies from National Tsing-Hua University. He is currently an Associate Researcher at National Center for Instrumentation Research, NIAR.

陳銘福先生為國立臺灣大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院國家儀器科技研究中心研究員兼任組長。

Ming-Fu Chen received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a Research Fellow and Division Director at National Center for Instrumentation Research, NIAR.

林儀豪先生為國立中興大學生物產業機電工程所碩士，現任國家實驗研究院國家儀器科技研究中心副研究員。

Yi-Hao Lin received his M.S. in the Department of Bio-industrial Mechatronics Engineering from National Chung-Hsing University. He is currently an Associate Researcher at National Center for Instrumentation Research, NIAR.