

疊紋光學量測法介紹

Introduction of Moiré Method and Application

高國書

Kuo-Shu Kao

隨著科技的持續發展，相關檢測尺度越來越微小，越來越精密。因此，相關量測技術逐漸從傳統的接觸式量測轉變為光學的非接觸式量測技術。光學量測技術具有非接觸、全場性、速度快與高精密等優勢，除了運用於傳統的領域外，同時運用在高科技領域，如半導體工業、微機電系統、微奈米科技、生醫技術等研發及製程上。此外，除了具有非接觸式與非破壞性檢測的特點外，更具有不易與量測環境發生作用產生危險以及應用範圍廣的優點，目前廣泛應用在工程上應力、應變與產品表面形貌的分析量測，是一項非常重要的技術。光學量測技術總類相當多，本文主要著重於疊紋 (Moiré) 量測技術介紹，依據目前主流技術發展其疊紋技術包含幾何疊紋法 (Geometric Moiré)、陰影疊紋 (Shadow Moiré)、疊紋干涉儀 (Moiré Interferometry)、投射疊紋 (Projection Moiré)、與 Sampling Moiré 等，其介紹內容包含量測原理、發展趨勢、應用領域及未來技術發展等，期望透過本文的說明介紹，能夠對疊紋技術有更深一層的了解。

The detection scales are getting smaller and more precise with the development of science and technology. Therefore, the measurement technology has gradually changed from traditional contact measurement to optical non-contact measurement technology. As representative non-contact optical techniques, Moire methods have been extensively used to visualize deformation distributions of materials, arrangements of structures, and shape features of objects in research and industrial fields. This paper focuses on the introduction of Moiré measurement technology including Geometric Moiré, Shadow Moiré, Moiré Interferometry, Projection Moiré, and Sampling Moiré. The Moiré techniques are promoted by the demands of high-accuracy, multi-scale, extremely small- or large-scale, high-temperature, dynamic, on-line measurements and three-dimensional.

一、前言

人類科技的日新月異，因此各類電子產品朝向微小化、精密化、複雜化的需求日以俱增。在半導體產業中，製程過程中樣品表面狀況及殘留應力影響產品品質甚鉅，需要一套表面量測裝置加以量測。由於光學量測具有非接觸 (non-contact)、非破壞性 (non-destructive) 的優點，所以不會對待測物體表面造成不必要的損壞，加上量測方法如果能夠達到全域性及

即時性功能，及配合電腦影像處理系統功能，將使光學量測發展成為自動化的線上檢測系統。一般而言，目前光學量測技術相當多樣化，其包含疊紋法 (moiré technology)、共焦差動顯微技術 (confocal microscopy)、干涉法 (interferometry)、雷射三角量測法 (laser triangulation measurement method)、錐狀全像 (conoscopic holography)、結構光 (structured light) 等。其應用領域也相當廣泛，包含工業應用領域如模具加工製造、電子封裝製造、逆向工程、品質檢測、汽機車製造、零件製造業等。土木應用領域如房屋建築、地形探勘、橋梁工程等。醫學工程領域如義肢設計、關節矯正、整形外科、齒模掃描、假牙設計等。多媒體應用領域如藝術文物數位展、古文物數位 3D 建檔、遊戲物件創作等。而本文主要鎖定疊紋法 (moiré technology) 進行介紹。

疊紋為稱為雲紋、莫爾，源自於法國文字「moiré」，指的是一種紡織品，傳統絲綢或合成纖維，將兩層絲綢重疊在一起後，相對地移動透過光線將會有類似飄動的雲狀條紋出現。直到西元 1874 年英國人 Lord Rayleigh 提出利用此種疊紋現象可以量測物體的形變量，其稱這種干涉條紋為疊紋 (moiré fringes)，後來這種方法就被稱為疊紋 (moiré) 技術。

疊紋技術需要兩個光柵，一個光柵與移動物件相連一起移動 (試體柵)，另一個光柵固定不動 (參考柵)，兩光柵因此產生相對位移條紋，將兩個相同的光柵重疊起來，可以看到明顯的黑白相間的條紋，這些條紋就被稱為疊紋條紋，如圖 1 所示。此疊紋法是一種非相干涉光學量測法，利用兩組重疊的光柵相互遮光所出現的疊紋條紋來測量物體表面輪廓，形變和振動幅度的新興量測技術。

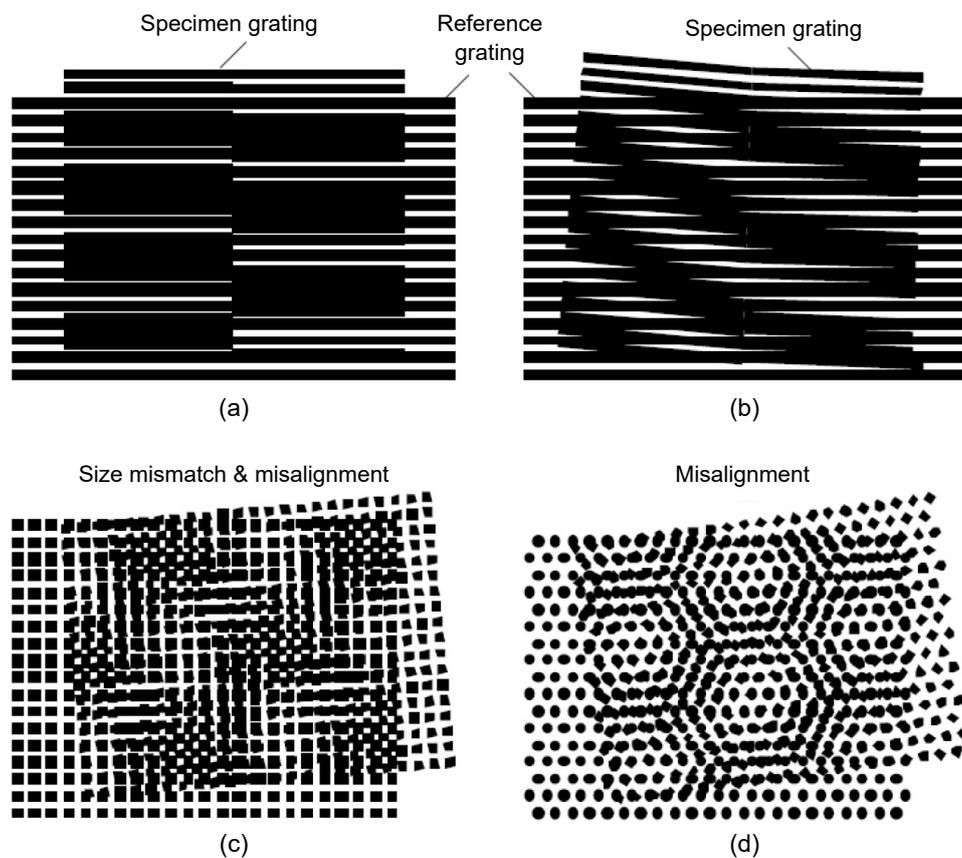


圖 1. 基本疊紋條紋型式。

使用疊紋法量測物體的變形時，需同時使用兩片柵片，一片黏貼在物體表面上，隨物體變形而變形，此柵片稱為試件柵。另一片柵附在試件柵上，當物體變形時，它保持不變，稱為參考柵。當試件柵隨著物體變形時，透過參考柵便可以看到不同的疊紋條紋，這些條紋反映了沿柵線方向的變形，在配合數位影像處理系統，可以迅速得到物體的變形行為。由疊紋技術發展出一系列相關的光學技術，包含可以測量同平面內位移場的疊紋干涉技術 (moiré interferometry)、顯微疊紋干涉技術 (microscopic moiré interferometry)，可以量測平面外位移的陰影疊紋術 (shadow moiré)、投影疊紋技術 (projection moiré) 等。本文主要介紹內容包含疊紋法技術發展趨勢、疊紋法種類、疊紋法的應用等，期望透過本文說明能夠對疊紋法有更深一層的了解。

二、疊紋光學量測法技術發展趨勢

視覺量測系統迅速的發展，是各種干涉術之未來趨勢。在這個趨勢之下，人工智慧和量測系統的結合也就應運而生了。電子條紋分析自動化，可以使干涉條紋訊息合併處理，不但量測快，而且處理速度高，量測設備可靠性大、操作十分安定。此外，隨著工業生產需求的進步，產品要求全檢，傳統的離線式抽檢已無法滿足需求。因此，相關檢測技術逐漸跨入自動化光學檢測 (automated optical inspection, AOI) 技術。廣義的 AOI 設備為結合光學感測系統、訊號處理系統、分析軟體及自動化系統等。例如，太空計畫的宇宙探測、生物醫學的 X 射線斷層掃描、機器人、無人駕駛汽車、指紋比對、字形辨認 (筆跡)、人像比對、文件識別、工業生產的品質檢測、數位博物館的典藏文物、虛擬實景等皆為此類設備的應用面，而狹義的 AOI 設備為目前急需於工業上使用的檢測設備。

在產品製造過程中，由於各種原因，零件不可避免的會產生多種缺陷，如印製電路板上出現孔錯位、劃傷、斷路、短路、污染等缺陷，液晶面板的基板玻璃和濾光片表面含有針孔、劃痕、顆粒、mura 等缺陷，帶鋼表面產生裂紋、輓印、孔洞、麻點等缺陷，這些缺陷不僅影響產品的性能，嚴重時甚至會危害到生命安全，對用戶造成巨大經濟損失。傳統缺陷檢測方法為人工目視檢測法，目前在手機、平板顯示、太陽能、鋰電池等諸多行業，仍然有大量的產業工人從事這項工作。這種人工視覺檢測方法需要在強光照明條件下進行，不僅對檢測人員的眼睛傷害很大，且存在主觀性強、人眼空間和時間解析度有限、檢測不確定性大、易產生歧義、效率低下等缺點，已很難滿足現代工業高速、高解析度的檢測要求。隨著電子技術、圖像傳感技術和計算機技術的快速發展，利用基於光學圖像傳感的表面缺陷自動光學（視覺）檢測技術取代人工目視檢測表面缺陷，已逐漸成為表面缺陷檢測的重要方法，因為這種方法具有自動化、非接觸、速度快、精度高、穩定性高等優點。

針對本文著重之疊紋量測技術發展趨勢如下：

1. 量測尺度朝向微小化與超大型尺度，微小化方面朝向微米 (micro)/奈米 (nano)/原子 (atomic) 等尺度，而超大型方面則朝向公尺 (meter)/公里 (kilometer) 等尺度。微小化尺度量測，需要使用聚焦離子束銑削 (ion beam milling)，電子束光刻 (electron beam lithography)，納米壓印光刻 (nanoimprint lithography)，全像照相光刻 (holographic photolithography) 製造等技術製作微米/納米尺度的光柵。
2. 大面積量測精度，光柵面積尺寸為光柵間距的 $10^3 - 10^6$ 甚至 10^9 倍。
3. 需要具備動態量測功能，且量測速度大於 10^3 frames per second，並且需要搭配高速相機。

4. 需要能夠在高溫環境下量測如 500 °C 或是更高溫度，所以光柵需要能夠耐高溫。
5. 需要可以量測極微小尺度、極大尺度、高溫環境、動態等之三維結構外型形變行為。
6. 需要多尺度量測，尺度範圍從原子尺度到公尺尺度。
7. 需要克服量測時之噪聲消除和抗振性。

三、疊紋光學量測法技術種類

目前疊紋光學量測技術主要細分為平面內 (in-plane) and 平面外 (out-of-plane) 如表 1 與圖 2 所示，其中平面內疊紋技術主要包含 (1) 幾何疊紋 (geometric moirè)、(2) 疊紋干涉儀 (moirè interferometry)、(3) sampling moirè 等技術，其量測原理為利用兩組黑白相間隔的光柵互相重疊干涉以產生的條紋圖形，一組是依附於試片上的試片光柵，另一組是位於光源與試片之間的參考光柵。當試片受外力變形時，試片上的光柵便隨之變形，與保持不變的參考光柵互相重疊干涉，雲紋干涉條紋圖便由此產生。平面外疊紋技術主要包含 (1) 陰影疊紋 (shadow moirè)、(2) 投射疊紋 (projection moirè)，其量測原理是利用一組光柵及其投影在物體表面的陰影，因互相重疊干涉所產生的條紋圖形，以量測待測區域內的平面外位移場。以下將針對各別疊紋技術進行細部介紹：

表 1. 疊紋技術分類。

In-plane 位移場 (U, V)	Out-of-plane 位移場 (W)
<ul style="list-style-type: none"> • 幾何疊紋 (Geometric Moirè) • 疊紋干涉儀 (Moirè Interferometry) • Sampling Moirè 	<ul style="list-style-type: none"> • 陰影疊紋 (Shadow Moirè) • 投影疊紋 (Projection Moirè)

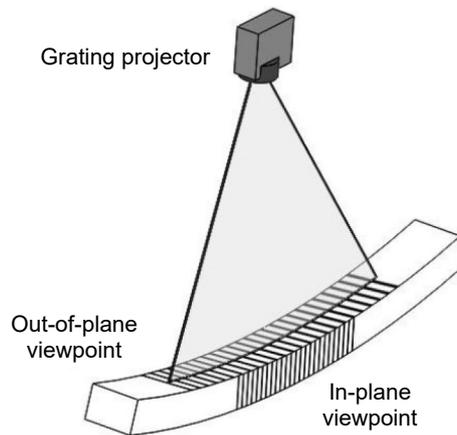


圖 2. In-plane and Out-of-plane 量測示意圖。

1. 幾何疊紋法 (Geometric Moirè)⁽¹⁾

幾何疊紋在 20 世紀初期已被提出，由於當時技術上的困難，無法製造出高頻率的光柵，所以只能對於一些幾何現象加以說明。使用疊紋法量測時，需要使用兩片柵片，一片黏貼在物體表面上，隨物體變形而變形稱為試件柵，另一片柵附在試件柵上，當物體變形時，

它保持不變稱為參考柵，如圖 3 所示。當試件柵隨著物體變形時，透過參考柵便可以看到不同的疊紋條紋，這些條紋反映了沿柵線方向的變形，配合數位影像處理系統之後，可以迅速得到物體的變形行為。

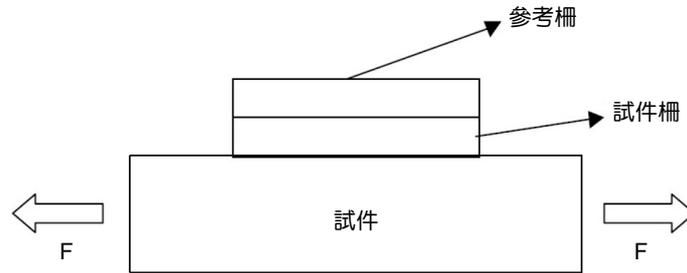


圖 3. 幾何疊紋法示意圖。

幾何疊紋量測理論架構如圖 4 所示，在試片為變形前，依據三角形正弦定理，在同樣以邊長 a 做為斜邊之兩個直角三角形中，可以得到方程式 (1)。同理，在相同以邊長 b 做為斜邊之兩個直角三角形中，可以得到方程式 (2)。

$$\frac{P}{\sin \theta} = \frac{a}{\sin 90^\circ} = \frac{\delta}{\sin(\phi - \theta)} \quad (1)$$

$$\frac{P}{\sin(180 - \theta)} = \frac{b}{\sin 90^\circ} = \frac{P}{\sin(\phi - \theta)} \quad (2)$$

方程式中 θ 為光柵間的夾角、 P 為光柵間距、 ψ 為條紋與參考光柵間夾角 a 、 b 為兩斜邊。由方程式 (2) 可得之 $\phi = 90^\circ + \theta/2$ ，在試片受力而變形後，試片柵的間距由 P 變成 P' ，試片柵和條紋與參考光柵間夾角也隨之由 θ 和 ψ 變成 θ' 和 ψ' ，所以方程式 (1) (2) 可以改寫成方程式 (3) (4)。

$$\frac{P}{\sin \theta'} = \frac{\delta'}{\sin(\phi' - \theta')} \quad (3)$$

$$\frac{P}{\sin(180 - \phi)} = \frac{P'}{\sin(\phi' - \theta')} \quad (4)$$

由方程式 (3) (4) 可得：

$$\delta' = \frac{\sin \phi'}{\sin \theta'} P' \quad (5)$$

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{P \sin \theta'}{P \cos \theta' - P'} \right) \quad (6)$$

在均勻變形與微小轉動下，因為 θ 非常小，因此 θ' 趨近於 θ ，所以方程式 (5) (6) 變成為

$$\delta' = \frac{\sin \phi'}{\sin \theta'} P' \quad (7)$$

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{P \sin \theta}{P \cos \theta - P'} \right) \quad (8)$$

由方程式 (7) (8) 可以得知，在幾何疊紋量測實驗中，根據所形成之干涉條紋所給予的資訊，則可以選定 δ' 與 ϕ' 做為量測中的參數。

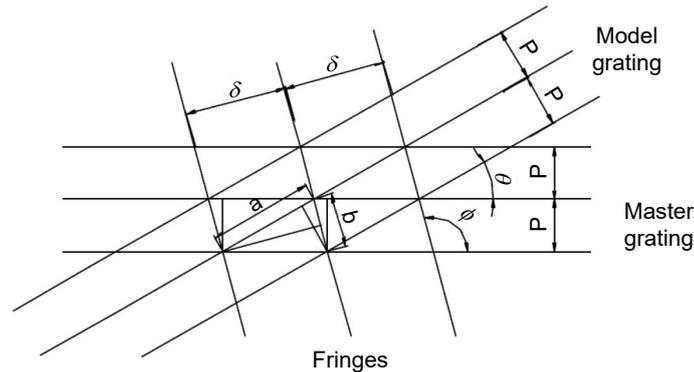


圖 4. 幾何疊紋量測法理論架構圖。

2. 陰影疊紋 (Shadow Moiré)⁽²⁾

陰影疊紋是一種全域性、非接觸性、非破壞性的光學量測方法，常用於平面外位移與表面形貌之量測，量測範圍與解析度主要與其參考光柵之間距相關。陰影疊紋法的原理是透過分析參考光柵與其投影至待測物表面之陰影光柵相互疊合而成的干涉條紋來做量測，故待測物之表面必須具有鏡面反射性質以反射參考光柵所投影之陰影光柵，因此通常需要於待測物表面噴灑反射漆，使其能夠反射足夠清晰的陰影光柵，方可形成干涉條紋。陰影疊紋法是將參考光柵置於待測物上方並保持一微小距離，兩者距離不宜過近或是過遠，過近會使待測物變形時接觸到參考光柵，過遠則不足以產生清晰的干涉條紋。當光源與光柵法線維持一個角度入射至參考光柵，而取像裝置則於法線另一側維持特定角度，如此將可以擷取到一組干涉條紋。

陰影疊紋法量測原理如圖 5 所示主要區分為平行光源與點光源，其中圖 5(a) 為平行光源，當一道平行光投射至參考光柵，穿過光柵並於待測物表面反射後再投射至參考光柵上，可由其幾何關係得知

$$\overline{BC} = W(x, y)(\tan \alpha + \tan \beta) = NP \quad (9)$$

將式 (9) 整理即可獲得平面外位移 $W(x, y)$

$$W(x, y) = N \left(\frac{P}{\tan \alpha + \tan \beta} \right) \quad (10)$$

其中定義 $W(x, y)$ ：平面外位移量； N ：條紋等級； P ：參考光柵之光柵間距 (Pitch)； α ：光源入射方向與參考光柵法線夾角； β ：取像裝置與參考光柵法線之夾角。其中 α 、 β 、 P 皆為實驗架設時所設定的已知數值，因此得知平面外位移量與條紋等級呈現正比關係，故可由適當之參考點作為零等級條紋位置，相當於此點將可依序推導出全場的對平面外位移量。

圖 5(b) 為點光源法，光源與取像裝置會置於同一水平面上，即兩者與參考光柵的垂直距離會相等。如同方程式 (10)，待測物上一點 S 的平面外位移可表示為

$$W(x, y) = N \left(\frac{P}{\tan \alpha' + \tan \beta'} \right) \quad (11)$$

其中 α' ：點光源入射至物體方向與參考光柵法線之夾角； β' ：取像裝置至物體方向與參考光柵法線之夾角。若點光源與取像裝置的水平距離為 D ，點光源以及取像裝置與參考光柵之垂直距離為 L ，由此幾何關係可知， $\tan \alpha' = \frac{X}{L+W}$ 以及 $\tan \beta' = \frac{D-X}{L+W}$ ，代入 (11) 可獲得

$$W(x, y) = N \left(\frac{P}{\frac{x}{L+W} + \frac{D-x}{L+W}} \right) = NP \left(\frac{L+W}{D} \right) \quad (12)$$

將方程式 (4) 整理後可得到

$$W(x, y) = \frac{NP}{\frac{D}{L} - \frac{NP}{L}} \quad (13)$$

由方程式 (13) 得知，於此架設下平面外位移與條紋等級不再呈現正比關係，但架設中之點光源與取像裝置間的水平距離遠大於參考光柵間距，亦即 $D > P$ ，則方程式 (13) 近似 (10)

$$W(x, y) = \frac{NP}{\frac{D}{L} - \frac{NP}{L}} \approx \frac{NP}{\frac{D}{L}} \approx \frac{NP}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (14)$$

因此；不論用何種架設方式，只要經過適當調整，皆可以得到方程式 (10) 之關係，即平面外位移量與條紋等級呈現正比關係，另外系統解析度與 α 、 β 、 P 有關，故藉由採用不同光柵間距的參考光柵並選定適當的光源入射角以及取像角度，可運用於不同解析度要求之待測物體。

3. 疊紋干涉儀 (Moiré Interferometry)⁽³⁾

疊紋干涉術在 1956 年由 Guild 所提出，其主要利用幾何疊紋原理再加上物理光學的繞射 (diffraction) 原理與干涉 (interference) 現象來量測物體的變形量。疊紋干涉術具有許多優點，包含全時間全場量測 (full field)，可直接取得大量動態資料，對於平面內位移具有極

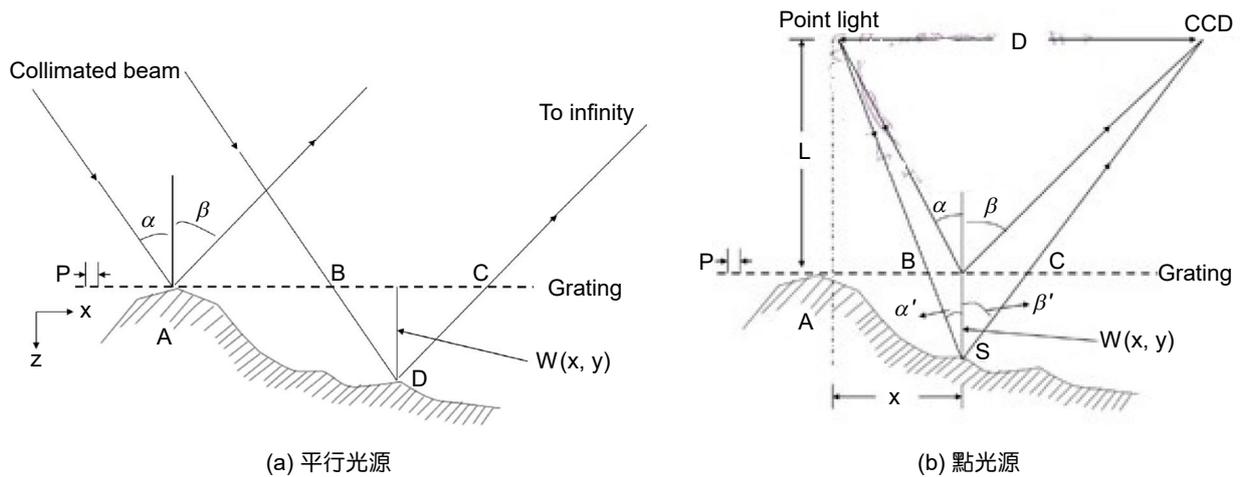


圖 5. 陰影疊紋法示意圖⁽¹⁾。

高靈敏性 (high sensitivity)，具有高度空間解析度，對於雜散對比相當低，適合定量定性分析。所形成的每一條干涉條紋都代表等量的位移。

假設兩具有相同週期的線性光柵之穿透函數 (transmission function) 分別為

$$W_1(x, y) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \phi_1 \right) \right] \quad (15)$$

與

$$W_2(x, y) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \phi_2 \right) \right] \quad (16)$$

其中 p 為光柵之節距， ϕ_1 和 ϕ_2 分別為兩光柵之初始相位，此初始相位源自於光柵條紋與假設的座標原點於 x 軸方向之偏移距離。若兩光柵平面間無距離，且當一擴束準直光通過第一光柵 G_1 後的光柵條紋產生形變，此形變的條紋 q_1 可表示為

$$q_1(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \varphi(x, y) + \phi_1 \right] \right\} \quad (17)$$

其中 $\varphi(x, y)$ 為條紋位移形變所引入的相位差。此光場在通過第二光柵 G_2 後所觀察到的二維光強度分佈可表示為

$$\begin{aligned} q(x, y) &= q_1(x, y) \times W_2(x, y) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \varphi(x, y) + \phi_1 \right] \right\} \times \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \phi_2 \right) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

上式經展開後可得

$$q(x, y) = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \varphi(x, y) + \phi_1 \right] + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \phi_2 \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{4\pi x}{p} + \varphi(x, y) + \phi_1 + \phi_2 \right] + \frac{1}{2} \cos [\varphi(x, y) + \phi_1 - \phi_2] \right\} \quad (19)$$

上式中，最後一項僅與條紋位移形變所產生的相位差有關，此即疊紋干涉術所欲擷取分析之 moiré 條紋，條紋的相位分佈為 $\varphi(x, y)$ 。第二、三與四項為與光柵柵線有關的高頻諧波雜訊，經濾除後即可獲得 moiré 條紋，可表示為

$$q(x, y) = q_0(x, y) \{ 1 + \gamma(x, y) \times \cos [\varphi(x, y) + \phi_1 - \phi_2] \} \quad (20)$$

其中 $q_0(x, y)$ 為平均光強度， $\gamma(x, y)$ 為對比度。且在不影響 moiré 條紋的二維相對相位分布下，可省略兩光柵間之初始相差 $\phi_1 - \phi_2$ 。由 (20) 式可知，相關待測的資訊，例如表面形貌、光束的收斂或發散度與應力等，將被紀錄在 moiré 條紋的相位分佈 $\varphi(x, y)$ 中，因此可藉由量測此相位分佈求得所待測之訊息。

4. 投射疊紋 (Projection Moiré)⁽⁴⁾

投影疊紋量測技術與陰影疊紋法相同，都是屬於量測平面外技術，其主要為克服陰影疊紋法中光柵需要大於樣本的需求。此外；陰影疊紋法為量測實際物理現象，單一影像。但是投影疊紋法為電腦運算結果，兩個影像。投影疊紋法為投影一組光柵於物體表面並保持不動，透過連續取像而得。

投影疊紋技術主要將兩張影像作疊合，第一張是實際獲取的影像而第二張是由電腦做出來的參考影像，經過運算後即獲得疊紋影像。投影疊紋法可以用來測量物體表面輪廓、形變和振動振幅的疊紋技術。當使用白光或雷射光穿越刻印著許多平行等距直線的振幅光柵元件，或應用干涉儀形成的直線干涉條紋，將此直線條紋投射於物體上，由於物體表面曲度及深度的變化使條紋變形，利用適當的方式 (如 CCD 相機) 擷取此變形條紋的影像，配合所推導出的條紋變形量與物體高度變化的關係式，即可算出物體的表面輪廓。當使用兩次曝光的技巧時，即在物體受力前後各曝光一次，使得物體受力前後各別的變形條紋影像記錄在同一張底片上，則所形成的疊紋條紋將是受力前後表面位移或形變的一種表示。

而投影疊紋技術原理如圖 6 所示，通常使用投影儀將 p 間距 (pitch) 的光柵條紋投影在樣本物體表面上，並且記錄其影像。當物體產生變形從表面 S (第一光柵圖像) 變化至表面 S' (第二光柵圖像)，並將兩張光柵圖像記錄在同一張影像上，則可以觀察兩個圖像重疊而產生的疊紋條紋。假設表面 S 上的點 A 水平移動到表面 S' 上的位置 A' ，水平移動距離為 w ，垂直於照明方向的距離為 d 。疊紋條紋階數 N 等於 d/p ，則平面外位移 w 可以表示成

$$W = \frac{Np}{\sin \alpha} \quad (21)$$

此公式就是投影疊紋法基本方程式。

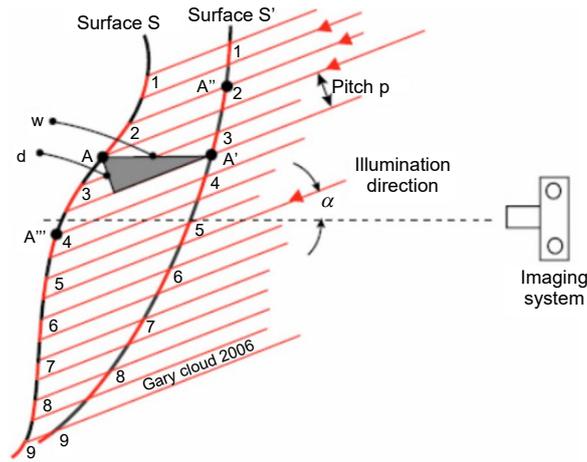


圖 6. 投影疊紋量測法理論架構圖。

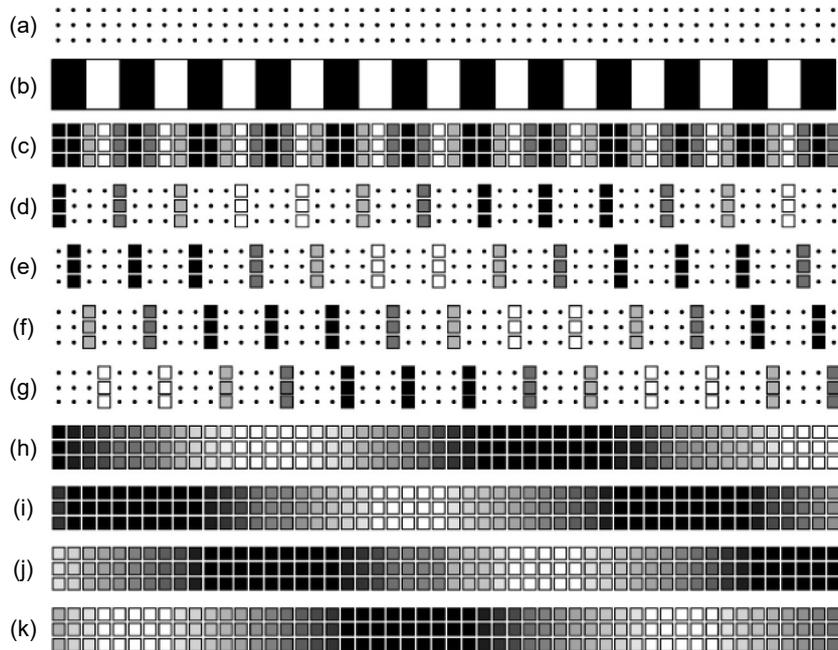


圖 7. Sampling Moiré 量測法理論架構圖。其中 (a) 為相機的取樣點。(b) 為標本光柵。(c) 為標本光柵的取樣影像。(d) 取樣影像的稀疏影像 ($N = 4, \alpha = 0$)。(e) 取樣影像的稀疏影像 ($N = 4, \alpha = \pi/2$)。(f) 取樣影像的稀疏影像 ($N = 4, \alpha = \pi$)。(g) 取樣影像的稀疏影像 ($N = 4, \alpha = 3\pi/2$)。(h) 為 (d) 的插值圖像。(i) 為 (e) 的插值圖像。(j) 為 (f) 的插值圖像。(k) 為 (g) 的插值圖像。⁽⁵⁾

5. Sampling Moiré 法⁽⁵⁾

Sampling Moiré 是一種新開發的疊紋條紋技術，使用圖像處理器處理光柵圖案，進而測量形狀或位移或應變分佈。Sampling Moiré 技術原理如圖 7 所示，其疊紋條紋是通過從連續像素向下取樣，然後進行數字強度插值而產生。其中 (d) 是通過選擇第一個像素並對每個第 N 個像素取樣 (其中稀疏指數 $N = 4$)。(e) 是通過選擇第二個像素取樣點具有 $\pi/2$ 相位移。同

理 (f) (g) 分別為選擇第三與第四個像素取樣點，其分別具有 π 與 $3\pi/2$ 相位移。如果所有取樣圖像都被稀疏至 (d-g)，並透過插值則圖像將變得清晰且易於觀察。(h)-(k) 主要顯示線性差值影像，然後，從 (c) 單一圖片獲得疊紋條紋圖案的多個相位移影像。

第 k 個相位移圖像的強度可以大致表示如下：

$$I_k(i, j) = I_a(i, j) \cos \left[\phi(i, j) + k \frac{2\pi}{N} \right] + I_b(i, j) \quad (k = 0, 1, \dots, N_T - 1) \quad (22)$$

其中 $I_b(i, j)$ 代表圖像中的背景強度， $I_a(i, j)$ 代表光柵強度的幅度， $\phi(i, j)$ 為初始相位值。疊紋條紋圖案的分布可以從方程式 (22) 頻率 1 的傅立葉轉換獲得。因此，頻率 1 的 wrapped 相位如方程式 (23) 所示

$$\theta = a \tan 2 \left[\frac{\text{Im}\{F(1)\}}{\text{Re}\{F(1)\}} \right] = a \tan 2 \frac{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \sin \left(k \frac{2\pi}{N_T} \right)}{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \cos \left(k \frac{2\pi}{N_T} \right)} \quad (23)$$

其中 $\text{Im}\{F(1)\}$ 與 $\text{Re}\{F(1)\}$ 分別為頻率 1 的實部與虛部，如果樣品光柵的亮度分布為正弦曲線，則可以獲得的相位精度很高，然而，即使分布為非正弦曲線，當折射率 NT 值大時，其精度也會很高。即使當折射率 NT 數值小時，通過在照相機的散焦下紀錄光柵與圖像將成為近似餘弦。疊紋條紋的相位是參考光柵相位 ϕ_r 與標本光柵相位 ϕ_s 之差

$$\phi_m = \phi_r - \phi_s \quad \text{and} \quad \phi_s = \phi_r - \phi_m \quad (24)$$

其中相位 ϕ_m 是分析數值，相位 ϕ_r 為已知，因此 ϕ_s 可以計算獲得。當取樣的相位偏移 2π ，即參考光柵的一個間距時，疊紋條紋的相位偏移 2π 。當疊紋條紋的相位也因為變形而變化時，此時變形前後的光柵線的相位差 $\Delta\phi_s$ 等於疊紋條紋的相位差 $\Delta\phi_m$ 。所以變形量為

$$u = p \frac{\Delta\phi_m}{2\pi} = p \frac{\Delta\phi_s}{2\pi} \quad (25)$$

其中 p 為標本光柵的間距，方程式 (23) 對應於波的傅立葉頻率 1 的相位，其提供了最自然餘弦波相位應用於原始強度波。

經由上述各種疊紋法技術與原理說明介紹後，依據其量測規範，彙整出如表 2 所示之技術比較表。

四、疊紋光學量測法技術應用

疊紋量測技術 (moiré measurement technology) 依其技術區分為幾何疊紋法 (geometric Moiré)、陰影疊紋 (shadow moiré)、疊紋干涉儀 (moiré interferometry)、投射疊紋 (projection moiré)、sampling moiré，其量測優點在於非接觸式、非破壞性、全域性、影像解析度高等特性，因此；廣泛應用於土木建築、機械加工、半導體電子元件、藝術創作、及醫學應用等領域。在建築領域方面，主要用於量測橋樑、大樓建築物受外力 (車輛、風力) 之變形量

表 2. 疊紋量測法技術比較表。

疊紋技術總類 (Moiré Techniques)		參考光柵 (Reference Grating)	光柵間距 (Common Specimen Grating Pitch (Ps) and Reference Grating Pitch (Pr))	寬度 (Common View Field Width)	位移敏感度 (Displacement Sensitivity)	動態量測 (Dynamic test)
平面內 (For in-plane)	幾何疊紋法 (Geometric Moiré Method)	Entity grating	$pr \approx ps = 10 \text{ um} - \text{m}$	Less than 400 pr	1pr/fringe	OK
	疊紋干涉法 (Moiré Interferometry Method)	Diffracted beams	$2pr \approx ps = 0.833 \text{ um}$ or 0.417 um , or 1.67 um	Dozens – hundreds of millimeters	1pr/fringe	OK
	(Sampling Moiré Method)	Virtual digital grating	As long as grating can be recorded. $ps = \text{nm} - \text{m}$.	Less than 400 pr	0.001 – 0.01 ps/pitch	OK
平面外 (For out-of-plane)	陰影疊紋法 (Shadow Moiré Method)	Entity grating	$pr = 10 \text{ um} - \text{m}$	Less than 400 pr	1pr/fringe when illumination angle is 45° and observation angle is 0°	OK
	投影疊紋法 (Projection Moiré Method)	Projected grating	$pr = 1 \text{ um} - \text{m}$	Millimeters ~meters	1pr/fringe when the angle between illumination and observation is 90°	OK

量測。半導體電子元件方面，可以量測電子元件封裝結構體外觀的變形量 (warpage)、應力 (stress) 與應變 (strain) 等。機械加工方面，主要用於量測加工面的平整性與粗糙度等。藝術創作方面，可以透過疊紋干涉的技術特性，進行藝術創作。以下將介紹相關疊紋量測技術的實際應用。

1. 陰影疊紋 (shadow moiré)

陰影疊紋法與投影疊紋法與都是應用於 Out-of-plane 量測，各有其優缺點，陰影疊紋技術系統容易安裝、校準與圖像計算，常運用於各樣式的半導體元件封裝形變量測。其應用包含機械相關零組件表面狀況觀察、薄膜結構應力量測、封裝結構體變形量量測^(9, 10)、材料玻璃轉換特性量測⁽¹¹⁾等。Chen⁽⁶⁾ 等人使用陰影疊紋法量測鑽石研磨盤的表面狀況，鑽石研磨盤主要運用於化學機械研磨製程，鑽石研磨盤的表面狀況嚴重影響 wafer 研磨品質，透過陰影疊紋法定時量測鑽石研磨盤表面狀況，改善研磨品質如圖 8 所示。Chen^(7, 8) 等人使用雙光束陰影疊紋法 (double beam shadow moiré interferometer) 量測軟性基板上 ITO 薄膜的殘留應力，其量測精準度相當高，誤差只有 1.26% 如圖 9 所示。Yinyan Wang⁽⁹⁾ 等人使

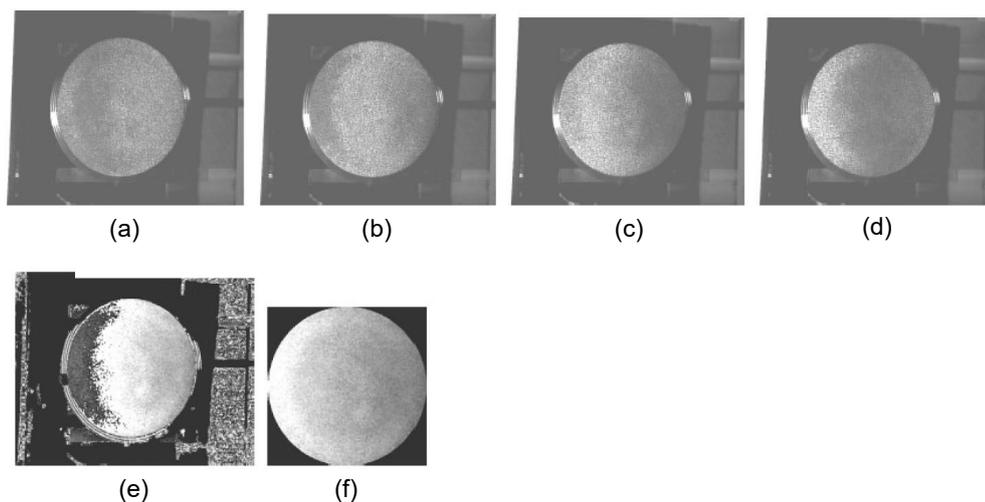


圖 8. 鑽石研磨盤表面形變量測⁽⁶⁾。

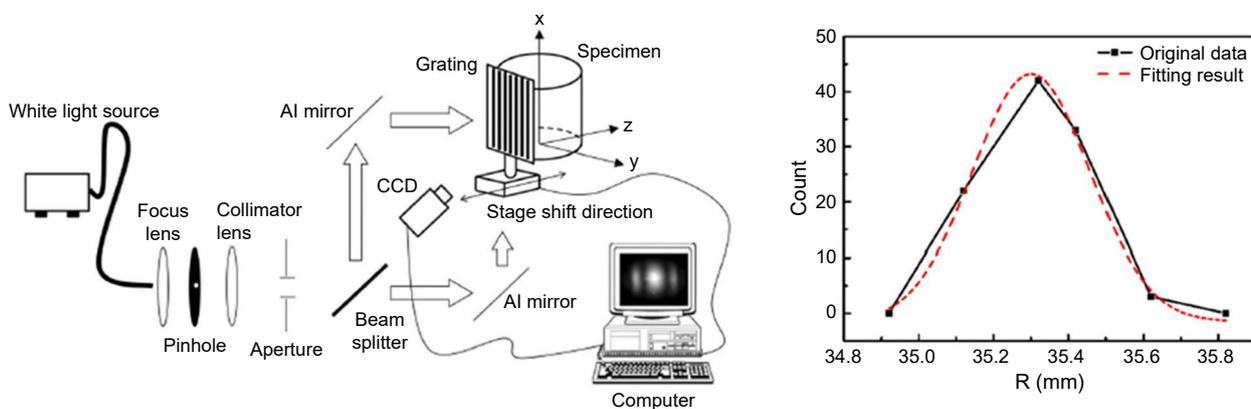


圖 9. 軟性基板 ITO 薄膜殘留應力量測^(7,8)。

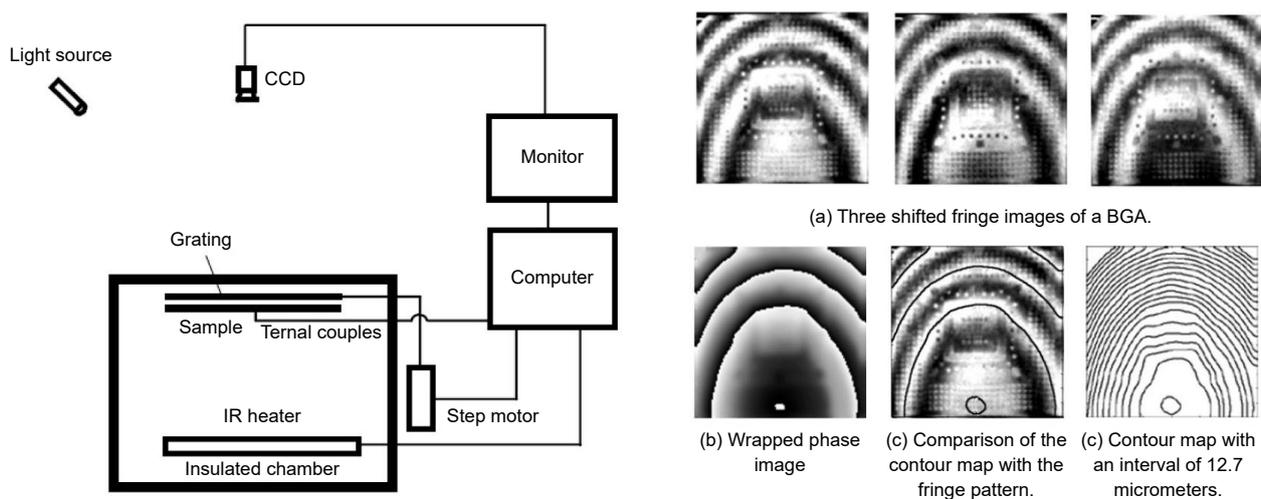


圖 10. BGA 封裝結構體變形量測⁽⁹⁾。

用 Phase Stepping Shadow Moiré 方式量測 BGA 封裝結構體的變形量 Phase Stepping Shadow Moiré 的優點為依據條紋偏移的特性，可以直接自動定義結構翹曲的方向如圖 10 所示。Dirk Zwemer⁽¹⁰⁾ 等人採用 Phase Stepping Shadow Moiré 法量測 PCB 基板在 TCT (-50 °C - 150 °C) 條件下的變形行為確認。Jiong-Shiun Hsu⁽¹¹⁾ 等人使用 Phase Stepping Shadow Moiré 方式量測 Polymer 材料的玻璃轉換溫度。透過使用 Phase Stepping Shadow Moiré 可以提高量測解析度 1.56 μm ，精準量測獲得 Polymer 材料的真實 Tg 溫度如圖 11 所示。

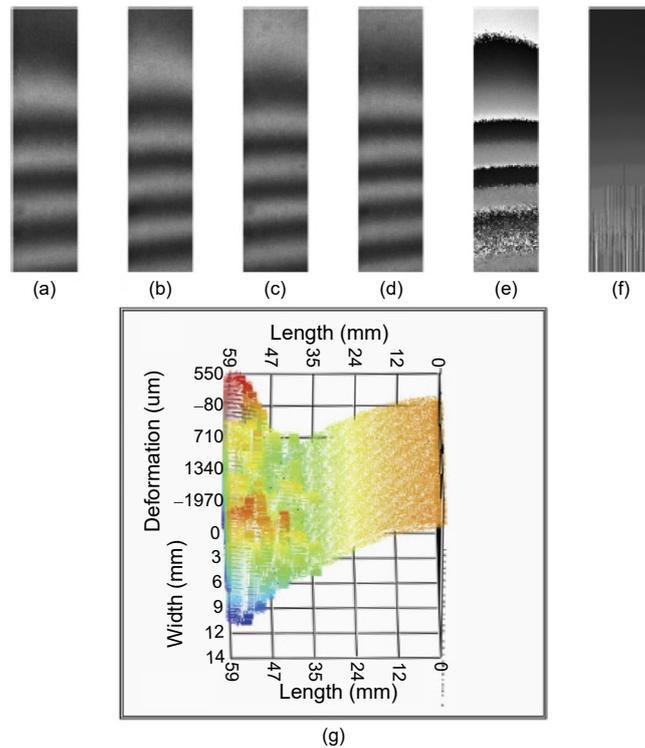


圖 11. Polymer 材料玻璃轉換溫度量測⁽¹¹⁾。

2. 疊紋干涉儀 (moiré interferometry)

疊紋干涉法是一種全場域光學量測技術，具有高靈敏性與高信噪比，屬於平面內量測，常運用於各樣式的半導體元件封裝形變量測。元件封裝結構包含 ACF 覆晶封裝結構、扇形封裝結構體、離散式封裝元件。Jin-Hyoung Park⁽¹¹⁾ 等人利用疊紋干涉法量測 ACF 覆晶封裝結構受濕熱可靠性測試的變形行為，其中採用 Twyman-Green interferometry 方法量測結構的翹曲行為，並且採用疊紋干涉儀量測晶片內的剪應變分布。因為 ACF 封裝結構體的破壞模式為 ACF 材料層發生脫層其發生原因為晶片邊緣剪應變所致，因此，需要確認結構體在可靠度過程中的結構剪應變行為如圖 12 所示。Bulong Wu^(12, 13) 等人使用疊紋干涉法量測 Fan-Out wafer level package 結構在 TCT 測試條件下的整體結構型變 (warpage) 與微接點 (micro bump) 形變量測。透過此方式確認其結構可能的破壞點，進而解決封裝結構的可靠度失效原因，如圖 13 所示。Dae-Suk Kim⁽¹⁴⁾ 等人使用疊紋干涉法量測離散式功率元件在溫度循環測試 (TCT) 環境下的結構變形行為探討，如圖 14 所示。

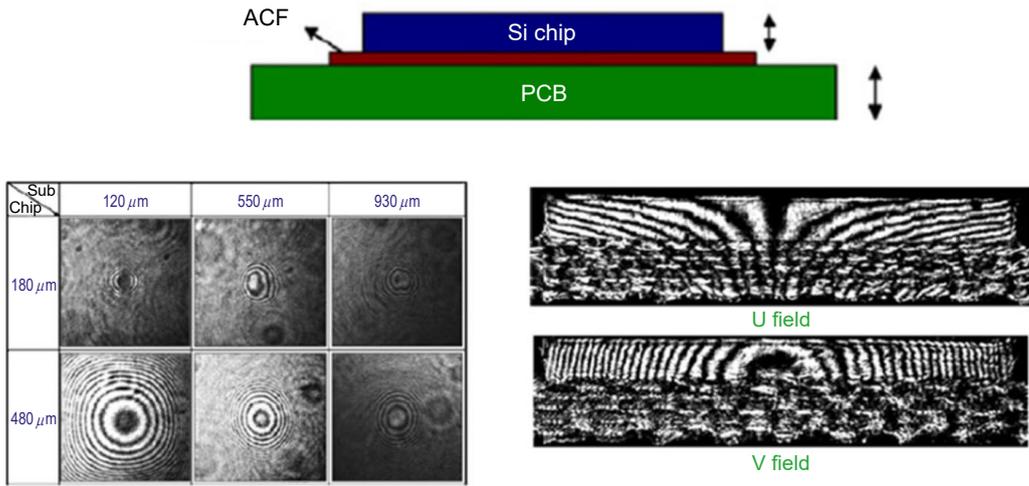


圖 12. ACF 封裝結構體⁽¹¹⁾。

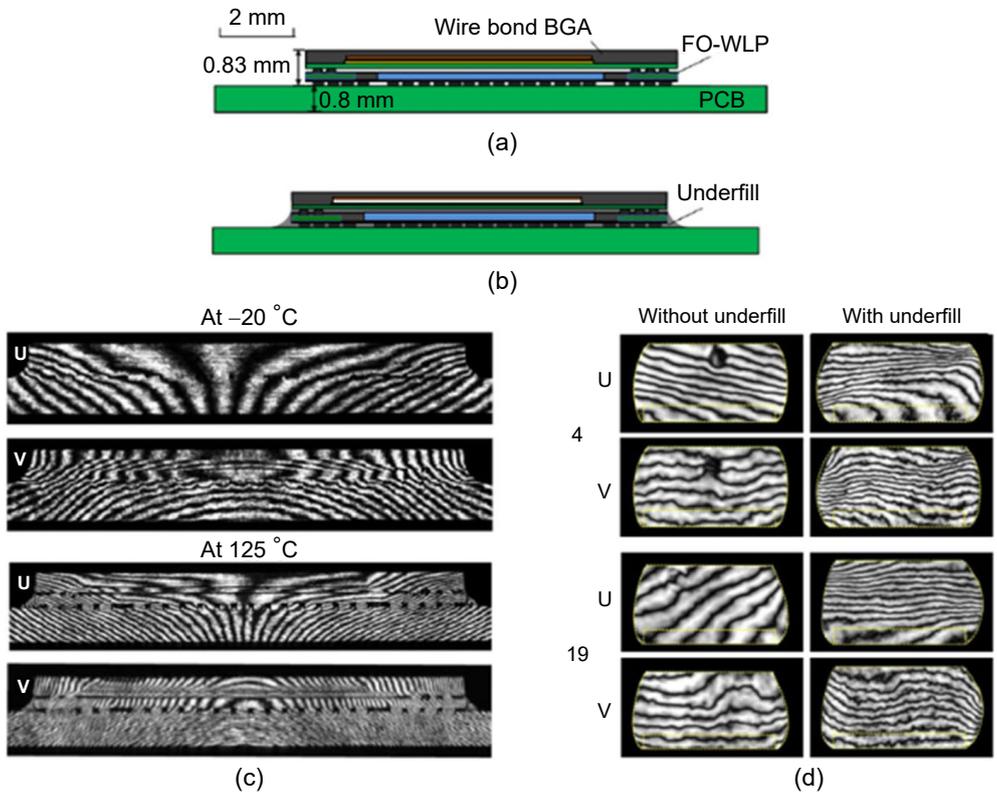


圖 13. 扇形封裝結構體^(12, 13)。

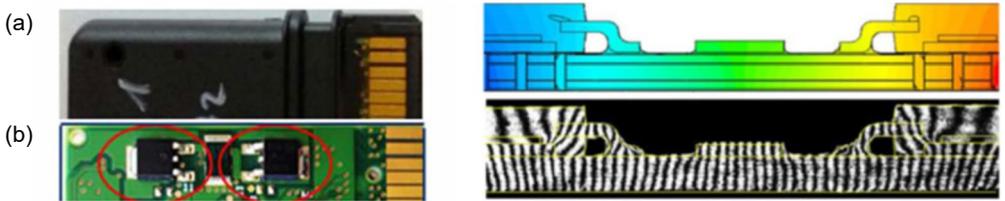


圖 14. 離散式元件封裝結構體⁽¹⁴⁾。

3. 投射疊紋 (projection moiré)

投影疊紋法與陰影疊紋法都是應用於 Out-of-plane 量測，各有其優缺點，陰影疊紋技術系統容易安裝、校準與圖像計算，相較之下，投影疊紋法系統安裝上就較為複雜。此外，投影疊紋法不需要準備玻璃光柵，其光柵採用投影方式，且具有良好的景深，適合用於量測如印刷電路板的翹曲行為。投影疊紋系統可以輕鬆調整以測量不同的表面尺寸和細節。當用於測量小樣本時，它具有更好的分辨率。其應用實例包含電子元件基板變形量測、軟性複合材料變形量測、3D 結構外型量測、及機械零組件表面形狀量測。針對電子元件基板變形部分，Joe Thomas and Hai Ding^(15, 16) 等人，利用投射疊紋法量測電子元件與 PCB 基板受熱影響其所產生的翹曲變形，透過此技術確認封裝體失效模式，進行修正封裝體結構設計，如圖 15 所示。

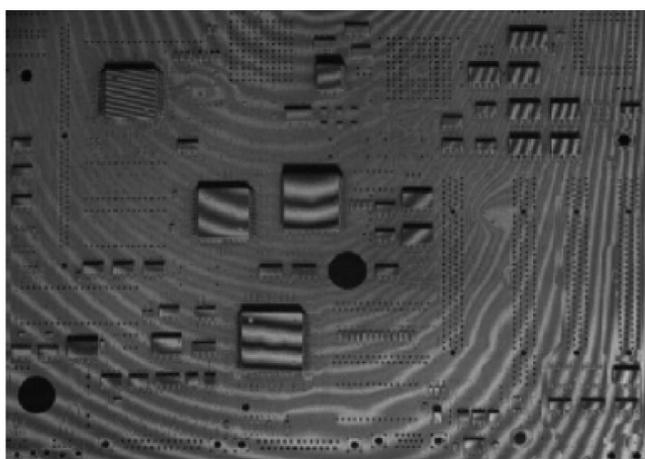


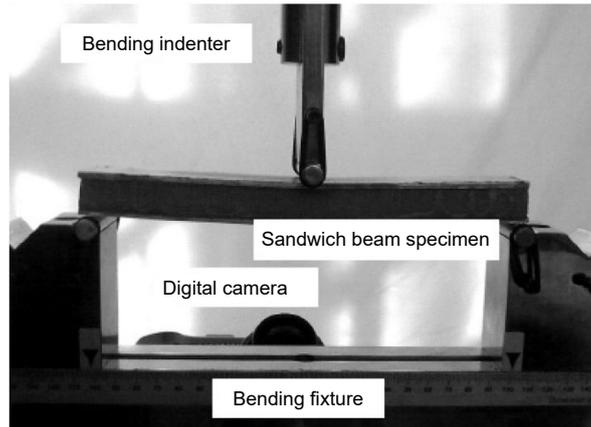
圖 15. PCB 基板翹曲量測^(15, 16)。

針對軟性複合基板材料變形量測部分，Y. Pourvais⁽¹⁸⁾ 等人使用 digital projection moiré (DPM) 方法量測多層軟性複合材料結構 (flexible-core sandwich structures) 的彎曲變形量測，其量測變形量與 CAE 數值相近如圖 16 所示。Kun Huang Chen⁽¹⁷⁾ 等人使用投射疊紋搭配 heterodyne interferometry 量測軟性基板上薄膜材料層的表面狀況與應力值，如圖 17 所示。

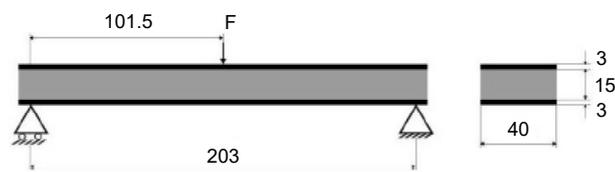
針對 3D 結構外型量測部分，Jun Yao^(19, 20) 等人利用投射疊紋方法量測靜態立體浮雕紙張的立體外型，如圖 18 所示。此外；Yi Cheng Chen⁽²¹⁾ 等人亦利用投射疊紋方法量測齒輪結構外型尺寸與表面狀況，如圖 19 所示。

4. Sampling Moiré

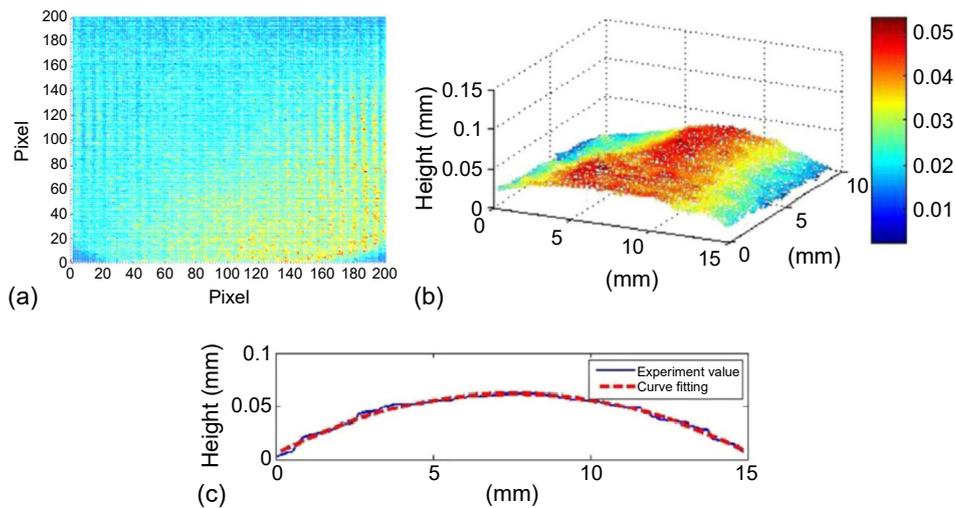
sampling moiré 是一種相當方便的相位分析方法，其分析精度約在光柵間距的 1/100 至 1/1000 範圍，因為可以從單張圖像完成相位分析，所以非常適合用於即時量測。其應用實例包含電子封裝元件變形量與應變量測、大型物體與建物的變形量測、旋轉物體外型與形變量測。針對電子封裝元件變形量與應變量測部分，Masaaki⁽²²⁾ 等人使用 X-Ray 觀察多層晶片堆疊 BGA 結構封裝前後的 Au bump 形變影像，再依據此影像並搭配 phase-shifted sampling moiré method 量測電子元件封裝結構體的殘留應力與應變量測，透過此技術確認封裝體失效模式，進行修正封裝體結構設計如圖 20 所示。



(a)



(b)

圖 16. 複合材料結構變形量測⁽¹⁸⁾。圖 17. 軟性基板薄膜表面狀況量測⁽¹⁷⁾。

針對大型物體與建物的變形量測部分，Shien Ri⁽²³⁻²⁶⁾ 等人主要利用 *sampling moirè* 量測大型結構體如橋樑、大樓結構體與火力發電廠結構等，其中橋樑結構體主要觀察火車通過橋樑時，其橋樑結構的受力變形行為，藉此確認橋樑的安全。大樓結構體主要觀察大樓結構受風力作用，其大樓結構的變形狀況，藉此確認大樓結構的安全。火力發電廠結構主要觀察大型輸送管路的受熱變形行為，藉此確認管路的安全性如圖 21、22、23 所示。

針對旋轉物體外型與形變量測部分，Motoharu^(27, 28) 等人主要利用 *sampling moirè* 動態量測高速旋轉輪胎的外型變形量與應變分佈，藉此確認輪胎在高速行駛下的安全性，作為輪胎開發依據如圖 24 所示。

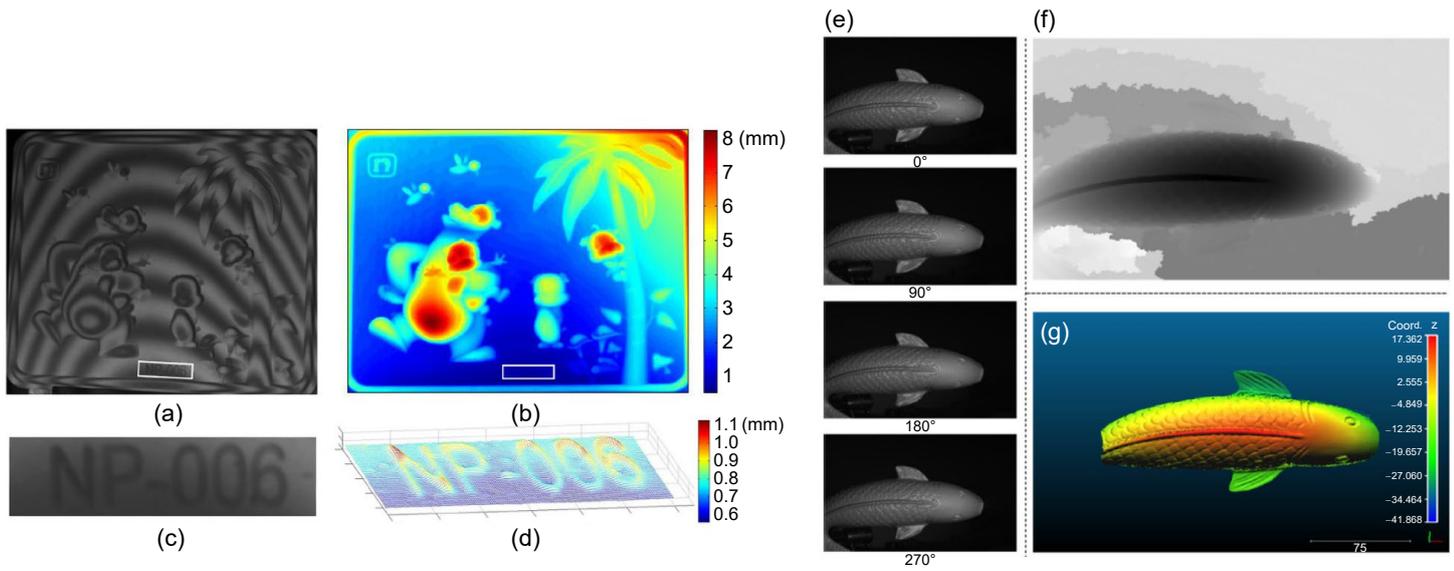


圖 18. 3D 物體外型量測^(19,20)。

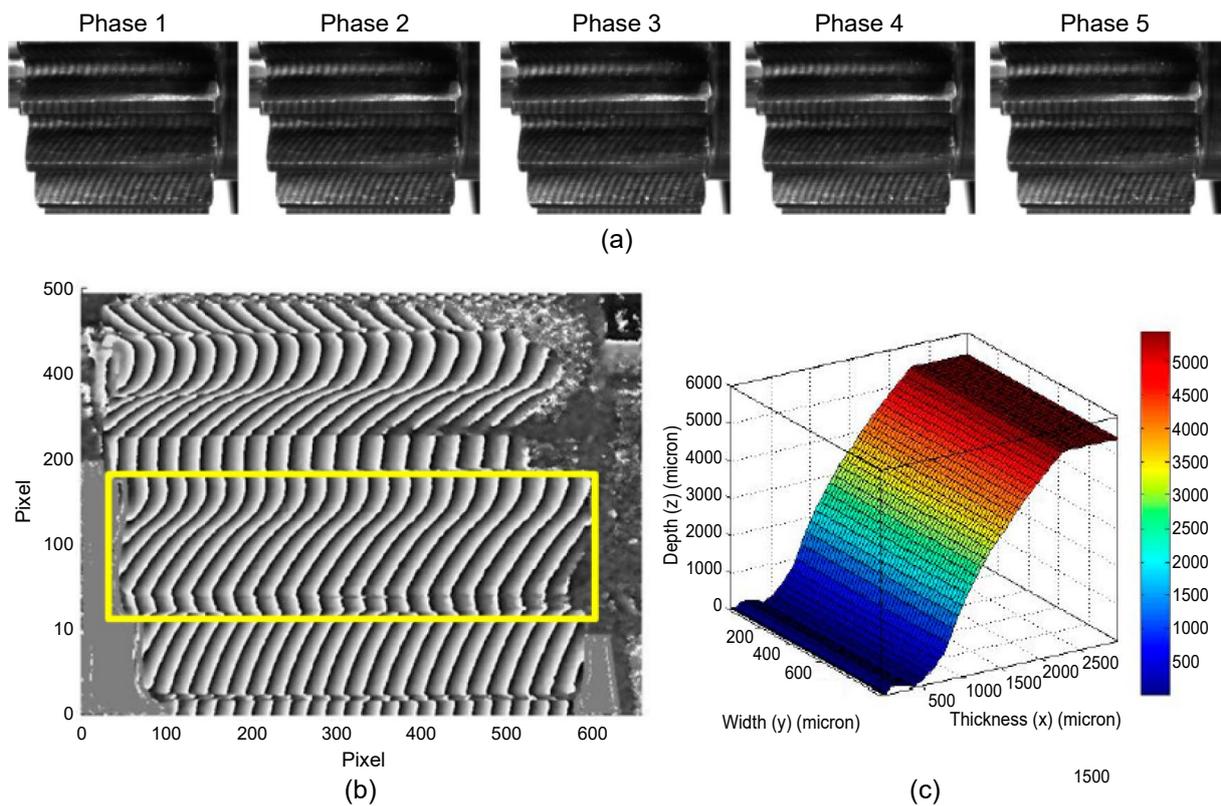


圖 19. 齒輪 3D 輪廓量測⁽²¹⁾。

五、結論

經由上述介紹清楚理解疊紋量測技術具備非接觸式、非破壞性、全域性、影像解析度高特性。依其技術區分為幾何疊紋法、陰影疊紋、疊紋干涉儀、投射疊紋以及 Sampling Moirè，廣泛應用於土木建築、機械加工、半導體電子元件、藝術創作、及醫學應用等領

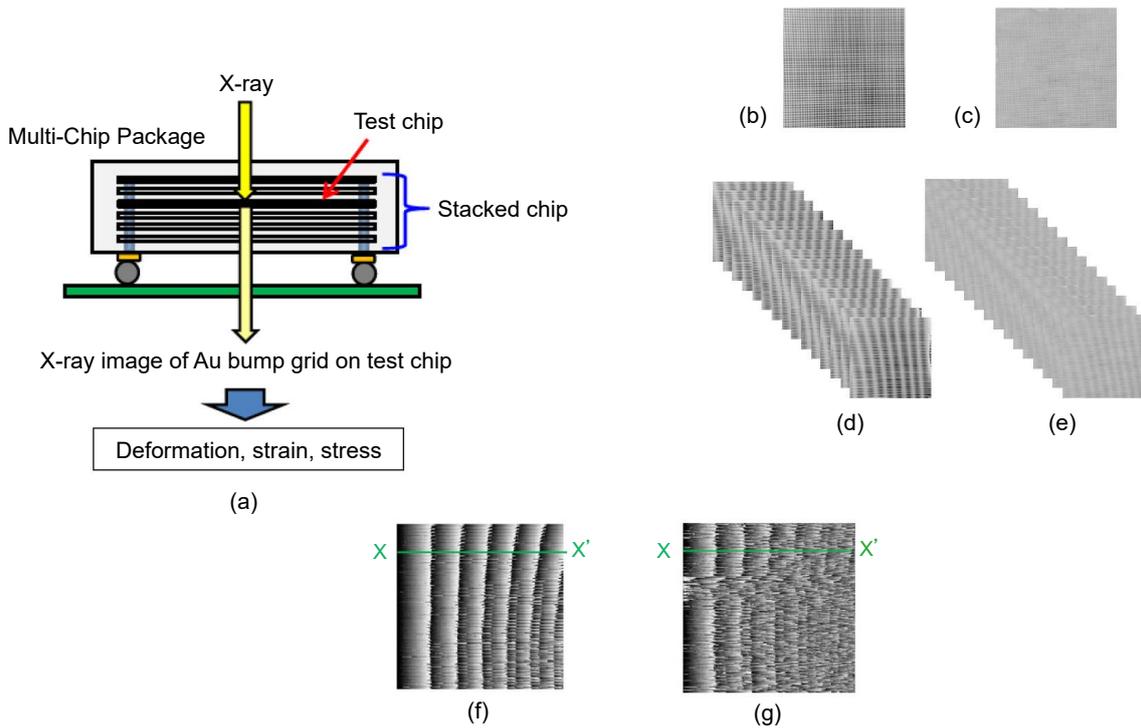
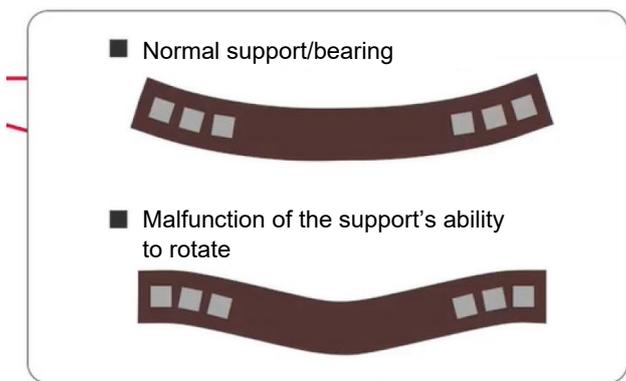


圖 20. 多層晶片堆疊 BGA 結構量測⁽²²⁾。



Girders and bases that cannot deflect under load will incur damage

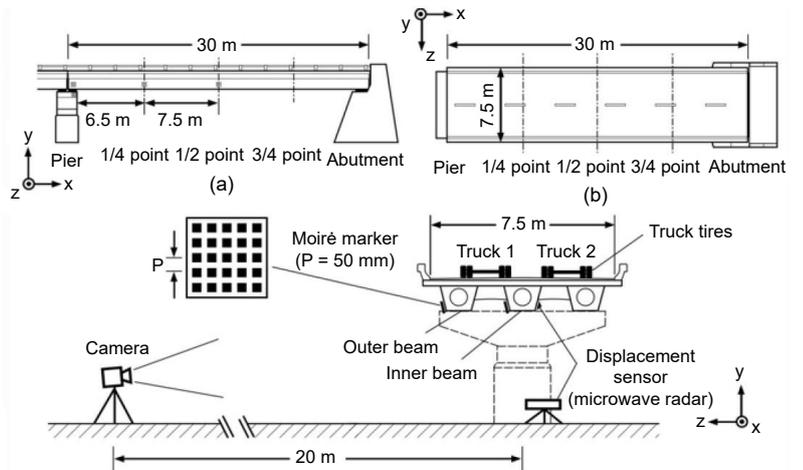


圖 21. 橋樑形變行為量測^(24, 25)。

域。在建築領域方面，主要用於量測橋樑、大樓建築物受外力 (車輛、風力) 之變形量量測。半導體電子元件方面，可以量測電子元件封裝結構體外觀的變形量、應力與應變等。機械加工方面，主要用於量測加工面的平整性與粗糙度等。藝術創作方面，可以透過疊紋干涉的技術特性，進行藝術創作。疊紋量測技術發展趨勢包含 (1) 量測尺度朝向微小化與超大型尺度、(2) 大面積量測精度、(3) 需要具備動態量測功能、(4) 需要能夠在高溫環境下量測、(5) 需要可以量測極微小尺度、極大尺度、高溫環境、動態等之三維結構外型形變行為、(6) 需要多尺度量測，尺度範圍從原子尺度到公尺尺度。

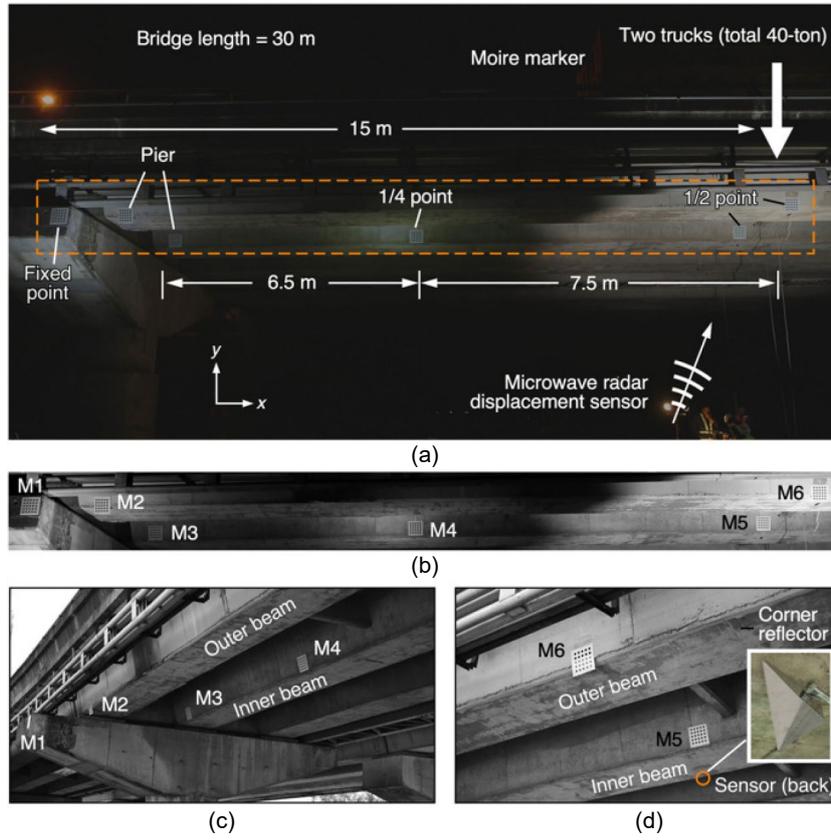


圖 22. 橋樑結構^(24, 25)。

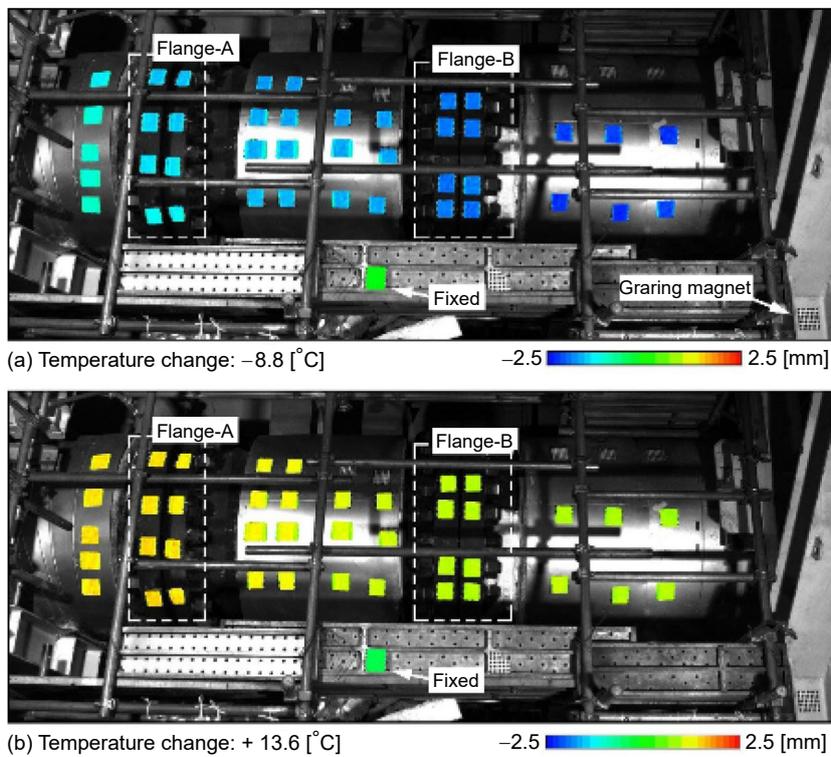


圖 23. 火力發電設施⁽²⁶⁾。

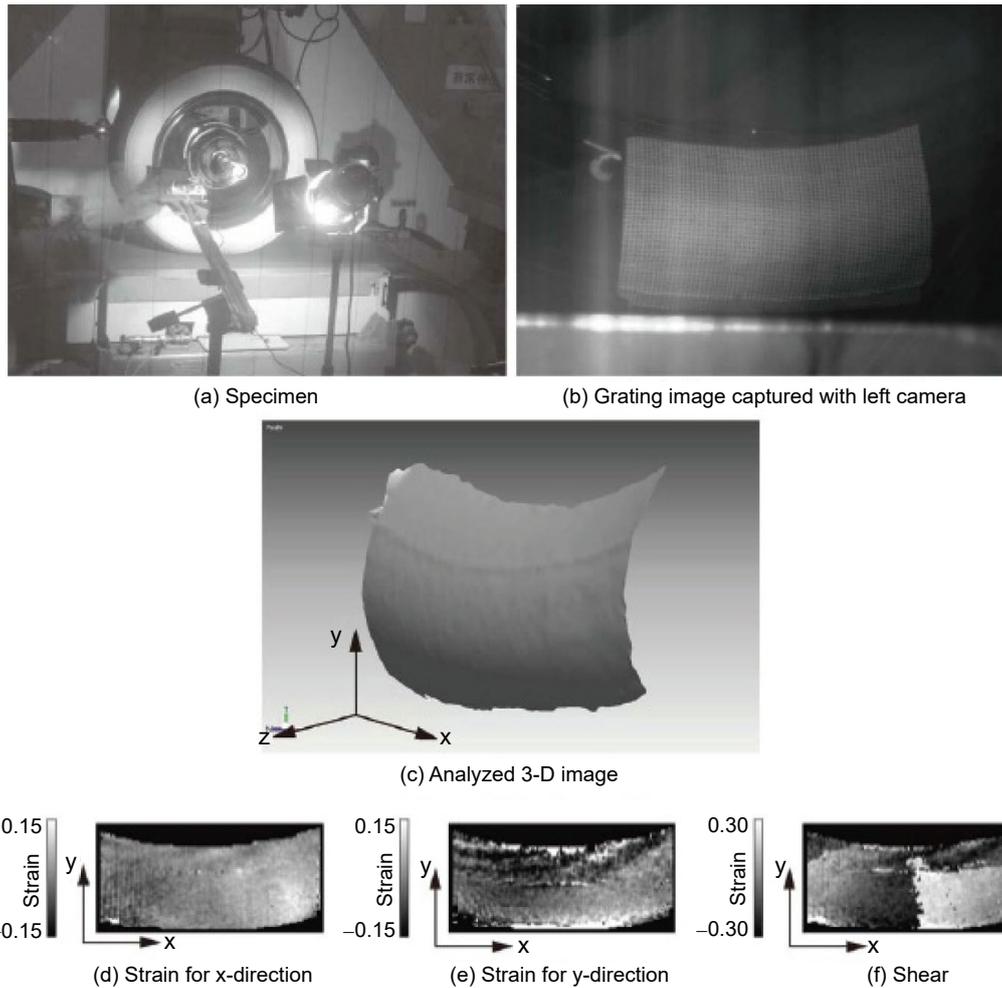


圖 24. 高速輪胎動態量測。

參考文獻

1. 謝昌中, 疊紋量測技術之建立及應用, 國立成功大學機械工程學系碩士論文, (2001).
2. 康文譯, 應用數位相位移式陰影雲紋法於透明材料之表面形貌量測, 國立清華大學動力機械研究所碩士論文, (2013).
3. 張巍耀, 外差疊紋干涉術原理與其應用之研究, 國立交通大學光電工程學系博士論文, (2015).
4. Qinghua Wang, Hiroshi Tsuda and Huimin Xie, *Recent Patents on Materials Science*, **8**, 188 (2015).
5. Yoshiharu Morimoto and Motoharu Fujigaki, "Accuracy of Sampling Moiré Method", ICEM 2008.
6. Chen, Terry Yuan-Fang, Lin, Jie, "Automated surface profile measurement of diamond grid disk by phase-shifted shadow Moiré", International Conference on Experimental Mechanics 2013 and Twelfth Asian Conference on Experimental Mechanics, edited by Somnuk Sirisoonthorn, Proc. of SPIE Vol. 9234.
7. Kuo-Ting Huang and Hsi-Chao Chen, *Journal of Display Technology*, **10** (7), 609 (2014).
8. Hsi-Chao Chen, Kuo-Ting Huang, Yen-Ming Lo, Hsuan-Yi Chiu and Guan-Jhen Chen, *Optical Manufacturing and Testing*, **8126**, (2011).
9. Yinyan Wang and Patrick Hassell, "Measurement of Thermal Induced Warpage of BGA Package/Substrate Using Phase-Stepping Shadow Moiré". Please refer to the website:
<http://akrometrix.com/wp-content/uploads/2016/02/BGA-Warpage-Using-Phase-Stepping.pdf>
10. Dirk Zwemer, et al., "PWB Warpage Analysis and Verification Using an AP210 Standards-based Engineering Framework and Shadow Moirés", 5th International Conference on Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in

- Microelectronics and Microsystems, May 10-12, (2004).
11. Jiong-Shiun Hsu, Bor-Jiunn Wen, Wei Li and Chen-Wei Yang, *Polymer Testing*, **57**, 58 (2017).
 12. Jin-Hyoung Park, Kyung-Woon Jang, Kyung-Wook Paik, and Soon-Bok Lee, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, **33** (1), 215 (2010).
 13. Bulong Wu, Bongtae Han, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, **8** (5), 764 (2018).
 14. Laura Spinella, Jang-Hi Im, and Paul S. Ho, "Reliability Assessment of Fan-Out Package Using High Resolution Moiré Interferometry and Synchrotron X-ray Microdiffraction", May 31-Jun 03, 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference.
 15. Dae-Suk Kim, Bongtae Han, Arjun Yadur and Przemyslaw Jakub Gromala, "Electronic control package model calibration using Moiré interferometry", April 4-7, 2014 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems.
 16. Joe Thomas, "Projection Moiré vs. Shadow Moiré for Warpage Measurement and Failure Analysis of Advanced Packages". Please refer to the website:
<https://smtnet.com/library/files/upload/moire-warpage-measurement-failure-analysis.pdf>
 17. Hai Ding, Reinhard E., Carl R. Hanna and I. Charles Ume, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, **25** (4), 714 (2002).
 18. Kun Huang Chen, Jing Heng Chen, Hua Ken Tseng, and Wei Yao Chang, *Optical Engineering*, **55** (6), 064102 (2016).
 19. Y. Pourvais, P. Asgari, A. R. Moradi, and O. Rahmani, *Proceedings of SPIE*, **9117**, (2014).
 20. Ying Tang et al., *Optics and Laser in Engineering*, **104**, 135 (2018).
 21. Jun Yao and Jubing Chen, *Optic and Laser in Engineering*, **110**, 1 (2018).
 22. Yi Cheng Chen and Jr Yi Chen, *Sensors*, **19** (6), 2 (2019).
 23. Masaaki Koganemaru, Masakazu Uchino, Akihiro Ikeda, and Tanemasa Asano, "Examination of Residual Stress Measurement in Electronic Package Using Phase-Shifted Sampling Moiré Method and X-Ray Images", Sep 16-18, ESTC 2014, Electronics System-Integration Technology Conference.
 24. Shien Ri and Hiroshi Tsuda, "Measuring small deformations of large structure using a digital camera", the international society for optics and photonics, 2013. Please refer to the website: <https://spie.org/news/4877-measuring-small-deformations-of-large-structures-using-a-digital-camera>
 25. S. Ri, H. Tsuda, K. Chang, S. Hsu, F. Lo and T. Lee, *Experiment Techniques*, **44**, 313 (2020).
 26. Takuya Hara, Makiko Nakabo, Motoharu Fujigaki, "Dynamic Deformation Measurement of Real Bridge using Sampling Moiré Camera", Jan1-8, IEEE Conference Anthology 2013.
 27. Shien Ri, Satoshi Hayashi, Shinji Ogihara and Hiroshi Tsuda, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, **8692**, (2013).
 28. Yoshiharu Morimoto, Motoharu Fujigaki and Akihiro Masaya, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, **54** (1), 32 (2011).
 29. Motoharu Fujigaki, Kosuke Shimo, Akihiro Masaya and Yoshiharu Morimoto, *Optical Engineering*, **50** (10), 101506 (2011).
 30. 陳國烈, 幻彩疊紋-微形圖像元素表現疊紋效果之數位藝術創作, 國立臺中教育大學碩士論文, (2013).

作者簡介

高國書先生現為國立清華大學動力機械工程系在職博士生，目前為工業技術研究院電子與光電研究系統研究所專案副理。

Kuo-Shu Kao is currently a part time PhD. student in Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University. He is an deputy project manager in Electronic and Optoelectronic System Research Laboratories at Industrial Technology Research Institute.