

光學掃描全像之三維顯影技術

Optical Scanning Holography for 3D Imaging

劉榮平、溫宣瑄

Jung-Ping Liu, Hsuan-Hsuan Wen

光學掃描全像術為一種基於外差干涉、二維掃描與單畫素擷取的數位全像攝影技術。光學掃描全像術具有一些傳統數位全像術所沒有的特點，包括可拍攝非同調全像、光瞳調控全像、融合全像、以及傾斜式全像等。在本文中我們將介紹光學掃描全像術的原理以及幾個重要的特點，並且將介紹光學掃描全像術在三維顯影方面的相關技術。

Optical scanning holography (OSH) is a kind of digital holography. OSH applies the techniques of heterodyne interference, two-dimensional scanning, and single-pixel detection. In addition, OSH has some unique features, including the recordings of the incoherent hologram, the pupil-modulation hologram, the fusion hologram, and the tilted hologram. In this article, we will introduce the principle and features of OSH. Techniques of OSH for three-dimensional imaging will also be discussed.

一、前言

全像術 (holography)⁽¹⁾ 為藉由干涉將光場完整資訊 (即振幅與相位) 記錄下來，並利用繞射原理將光場重建的技術。最早的全像術是 1948 年由 D. Gabor 所發明的同軸全像術⁽²⁾。然而由於零階光的干擾，其重建影像的品質並不理想。到了 1960 年代初期，美國的 E. Leith⁽³⁾ 和蘇聯的 Y. Denisyuk 分別發明了離軸全像術以及反射式全像術。此兩方法都能有效地消除零階光的干擾而獲得十分優秀的重建影像，故而開啟了全像立體顯示以及光信號處理的領域。同時由於電子元件以及電腦的發明，現稱為數位全像術的電子式全像術 (以電子裝置紀錄干涉條紋)，也被發明出來⁽⁴⁾。根據傅氏光學理論⁽⁵⁾，使用雷射的同調光學系統可以進行低通濾波、帶通濾波或高通濾波。相較之下非同調光學系統只能進行低通濾波，而沒辦法進行帶通或高通濾波。為了解決此一問題，T.-C. Poon 和 A. Kopel 於 1979 年提出了基於外差干涉 (heterodyne interference) 技術的光學信號處理系統⁽⁶⁾。此系統可以進行非同調光學的低通濾波、帶通濾波以及高通濾波。其後此系統被進一步改進成可以進行全像紀錄⁽⁷⁾，因此被稱為光學掃描全像術 (optical scanning holography, OSH)⁽⁸⁾。

隨著光學掃描全像術的發明，研究人員慢慢地揭露了其基本性質，包括利用外差技術來移除共軛像⁽⁹⁾、同調以及非同調全像的拍攝⁽¹⁰⁾、螢光全像拍攝⁽¹¹⁾ 以及光瞳調變⁽¹²⁾ 等。進入

二十一世紀後，光學掃描全像術的研究逐漸進入到了應用領域。光學掃描全像顯微術⁽¹³⁻¹⁵⁾、超解析掃描全像^(16, 17)、垂直頻寬侷限全像⁽¹⁸⁾、立體打光全像⁽¹⁹⁾、壓縮掃描全像^(20, 21)等技術陸續被提出。除此之外，掃描全像的後處理⁽²²⁻²⁴⁾以及光學顯示^(25, 26)等議題也有很多相關的討論。可以預見的未來數年內光學掃描全像技術的討論將逐步進入到應用的層面。本文之目的為介紹光學掃描全像術之基本原理與特點，並針對幾個重要研究議題進行回顧。本文餘下內容說明如下。在第二節中我們將介紹光學掃描全像的原理。在第三節中我們將介紹光學掃描全像術的幾個特點，包括空間同調度的控制、光瞳調變以及單像素成像特性。在第四節中我們將討論光學掃描全像術在三維顯影上的兩個議題，包括加速掃描全像的擷取速度以及傾斜式掃描全像。第五節則是本文結論。

二、光學掃描全像術原理

圖 1 為光學掃描全像系統示意圖。首先雷射光束經過一電光調制器 (electro-optic modulator, EOM) 以產生兩個不同模態的受調制光。經過 EOM 後，這兩個不同模態的光被一極化分光鏡 (polarizing beamsplitter, PBS) 分離，其中穿透光為 p 極化光，而反射光為 s 極化光。反射的 s 極化光經過一半波片 (half-wave plate, HWP) 轉成 p 極化後，由擴束器 BE1 擴束並以透鏡 L1 聚焦到透鏡 L2 的前焦面。因此透鏡 L2 後形成平行光。另一方面，PBS 的穿透光 (p 極化光) 經擴束器 BE2 擴束後，經過在透鏡 L2 前焦面上的光瞳 (pupil)。最後此道光通過分光鏡 (beamsplitter, BS) 後和經過透鏡 L1 的光束合併，並藉由透鏡 L2 投射到物體上。不考慮引入外差調制時，物空間的平面波與另一道球面波 (若光瞳面沒有任何光遮罩) 會在物空間產生一同心圓條紋，即為菲涅爾迴光板 (Fresnel zone plate, FZP)。FZP 函數可以表示成

$$FZP(x, y; z) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{k}{2z} (x^2 + y^2) \right] \quad (1)$$

其中 k 為波數 (wave number)， (x, y, z) 為以 L2 後焦點為原點的座標。需要注意的是，由於平面波以及球面波干涉的範圍是立體的，因此在不同的距離 z 都會產生 FZP 條紋。唯一的差別在於 z 越小，則 FZP 條紋範圍越小且條紋越密；反之則條紋範圍越大但越稀疏。因此我們可以藉由橫向 ($x-y$) 掃描的方式把不同深度的物體用對應此深度的 FZP 條紋去「編碼」，而產生一全像：

$$H_r(x, y) = \int_z |O(x, y; z)|^2 \odot FZP(x, y; z) dz \quad (2)$$

其中 $O(x, y, z)$ 為物體的三維振幅穿透率函數， \odot 為二維相關 (correlation) 算符。我們藉由物體後的透鏡 L3 收集穿透光，並以光偵測器 PD1 擷取即可獲得一個全像點的信號。公式 (2) 中的相關算符對應於光學系統中的橫向掃描。因此藉由進行二維掃描，我們可以就可以獲得完整的二維全像資訊。

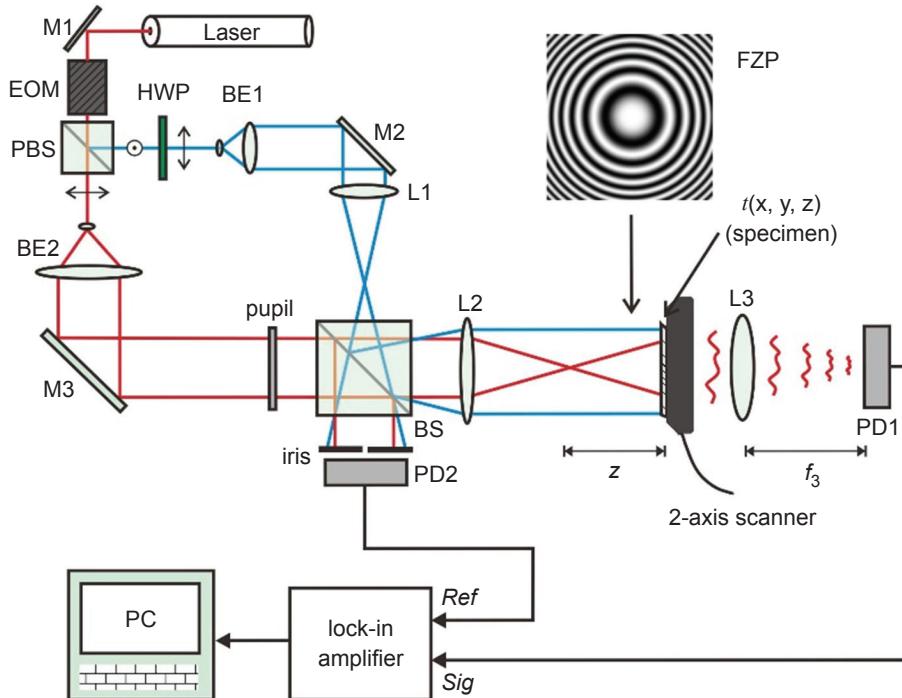


圖 1. 光學掃描全像系統示意圖。

全像 $H_r(x, y)$ 的函數形式類似同軸全像。因此其重建時亦會受到零階光以及共軛像干擾而品質不佳。為此在系統中我們利用 EOM 產生外差調制。因此在物空間的菲涅爾迴光板是時變的，其簡稱為 TDFZP，並可表示為

$$TDFZP(x, y, t; z) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{k}{2z} (x^2 + y^2) - \Omega t \right] \quad (3)$$

其中 Ω 為 EOM 的調制角頻率。因此當我們以 TDFZP 去掃描物體時，偵測器 PD1 量測到的信號也會以角頻率 Ω 震盪。因此我們可以利用鎖相放大器 (lock-in amplifier)⁽⁴⁾ 去解調此掃描信號；鎖相放大器的參考源則由 PD2 接收到的穩定外差干涉信號提供。鎖相放大器解調後我們可以獲得掃描信號的強度與相位，因此可以將其數位後組合成一複數數位全像，表示為

$$H_c(x, y) = \int_z |O(x, y; z)|^2 \otimes PSF(x, y; z) dz \quad (4)$$

其中 \otimes 為二維捲積 (convolution) 算符，而

$$PSF(x, y; z) = \exp \left[\frac{jk}{2z} (x^2 + y^2) \right] \quad (5)$$

為此時系統的點擴散函數。複數全像的數位重建如同傳統數位全像一般，只要進行光場反向傳播運算即可^(4, 27)。因此重建光場 $E(x, y, z_r)$ 可以表示成

$$E(x, y, z_r) = H_c(x, y) \otimes PSF^*(x, y; z_r) \quad (6)$$

三、光學掃描全像之特殊性質

1. 空間同調度 (spatial coherence)

上一節中的光學掃描全像函數，即公式 (4) 中被紀錄的是物體的光強穿透函數 $|O(x, y; z)|^2$ ，這和一般的數位全像有所不同。需要注意的是公式 (4) 的結果是基於光偵測器 PD1 的感光面積夠大的情況下所擷取的全像。如果 PD1 的感光面積比較小，則擷取到的全像函數會變成^(10, 28)

$$H_{ic}(x, y) = \int_z O(x, y; z) \otimes PSF(x, y; z) dz \quad (7)$$

此時光學掃描全像如同傳統數位全像一樣，記錄了物體的振幅穿透函數 $O(x, y, z)$ 。換句話說，光學掃描全像可以藉由改變光偵測器的感光面積而操作在同調模式，如公式 (7) 所示或是非同調模式，如公式 (4)。在圖 2 中我們比較了同調與非同調光學掃描全像之重建影像。圖 2 中的 D 字母和 H 字母是在不同平面，而我們重建在 D 字母的平面。由圖中可以看出同調全像重建時可以獲得物體的相位資訊，但其會有同調雜訊 (光斑)。另一方面，非同調全像不會有光斑，但無法重建物體的相位資訊。非同調模式的掃描全像有許多的優點，包括可以拍攝螢光全像、重建影像中沒有光斑雜訊…等。另一方面雖然同調模式可以用來進行物體相位或輪廓量測，但傳統數位全像也可以做到且系統簡單，因此通常拍攝掃描全像都是以非同調模式進行。圖 3 為實驗拍攝的骰子的非同調光學掃描全像，實驗條件為雷射波長 $0.532\text{ }\mu\text{m}$ ，取樣間距 $22\text{ }\mu\text{m}$ ，全像尺寸為 1040×566 像素，重建距離 150 mm 。

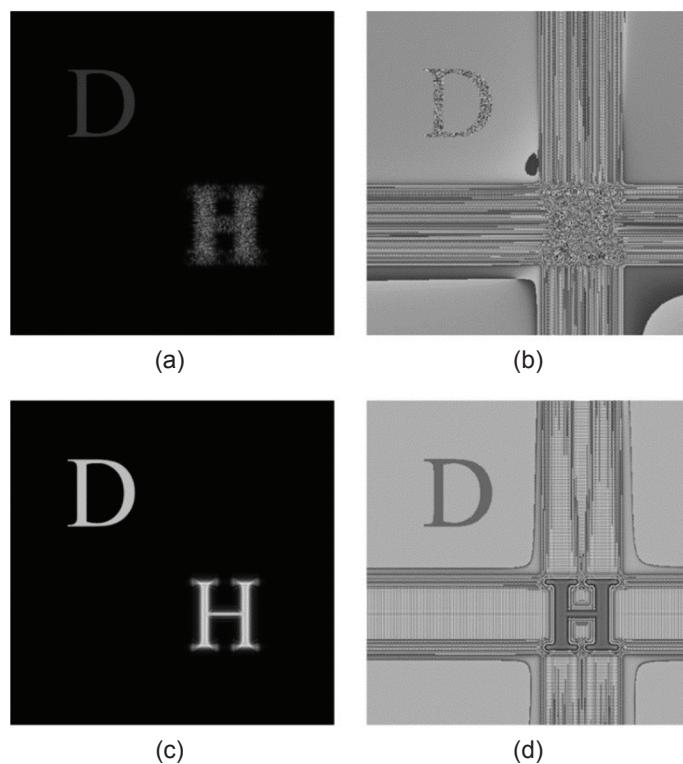


圖 2. 模擬同調與非同調掃描全像之重建影像。(a)、(b) 分別為同調全像之重建影像振幅與相位；(c)、(d) 分別為非同調全像之重建影像振幅與相位。

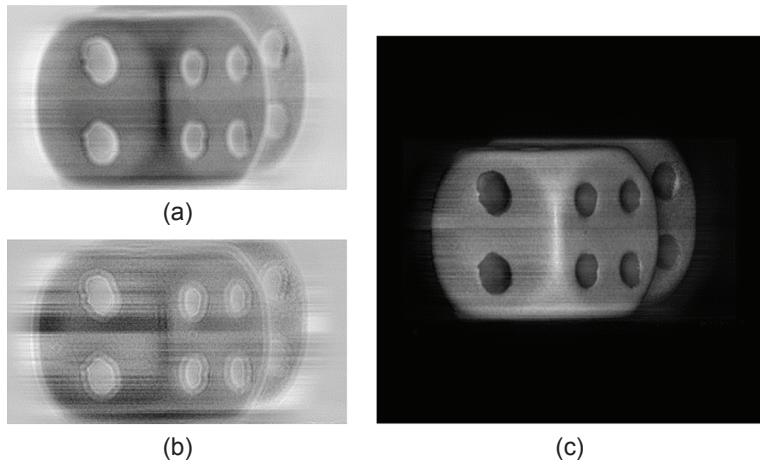


圖 3. 骰子之非同調光學掃描全像實驗結果。(a)、(b)分別為複數全像之實部以及虛部；(c)為重建影像。

2. 光瞳調變

掃描全像的另一個特點是系統的成像特性可以藉由調控光瞳而改變。圖 1 中光瞳 (pupil) 位於透鏡 L2 的前焦面，然而在前面我們都假設光瞳面沒有任何元件，因此系統的點擴散函數〔式子 (5)〕就是球面波的複數振幅函數。若我們將一振幅穿透函數為 $p(x, y)$ 的光瞳放置於光瞳面，則系統的點擴散函數要改寫成

$$PSF'(x, y; z) = \mathcal{F}\{p(x, y)\}_{\substack{k_x=kx/f \\ k_y=ky/f}} \otimes PSF(x, y; z) \quad (8)$$

其中 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 代表二維傅氏轉換運算。由 (8) 式可以看出光瞳函數其實就是一個空間頻譜濾波器，因此光學掃描全像系統可以直接拍攝具有空間濾波效果的全像。舉例來說，若光瞳是一個圓形孔洞，中間透光而外圍不透光，則此光瞳為低通濾波光瞳。以此光瞳拍攝的掃描全像將不具有高頻資訊。另一方面，如果我們使用一個左右寬而上下窄的矩形光瞳，則此光瞳限制了掃描光束垂直方向的頻寬而保留了水平方向的頻寬。此種全像稱為「垂直頻寬侷限數位全像」(vertical-bandwidth-limited digital holography)。其優點在於我們可以減少垂直方向的取樣率進而減少拍攝時間，但又不會有混疊 (aliasing) 的問題⁽¹⁸⁾。另一個需要注意的是， $p(x, y)$ 也可以是複數 (調制相位) 的。例如若光瞳是一個圓形 Dammann 光柵，則其會產生一雙環的掃描光束，進而在拍攝全像的同時將全像編碼⁽²⁹⁾。由於此時光瞳是純相位的，因此只要知道拍攝的參數 (波長，光柵的週期和重建距離)，就可以將全像解碼還原出影像，如圖 4 所示。

3. 單像素成像

光學掃描全像系統 (圖 1) 使用單一光偵測器而非 CCD 去擷取影像。因此光學掃描全像系統也是一種單像素成像系統。單像素成像系統有一個特點，就是偵測器擺放的位置不會影響擷取到的影像位置，而會影響擷取影像的照光以及陰影狀態⁽³⁰⁾。光學掃描全像也有類似的特性。圖 5 為光學掃描全像架構與數位全像架構的比較圖。在圖 5(a) 中，掃描光束聚焦後照射到物體上。以 a、b 兩點為例，其和聚焦點的光程分別為 r_{ia} 以及 r_{ib} ，而後所有通過物

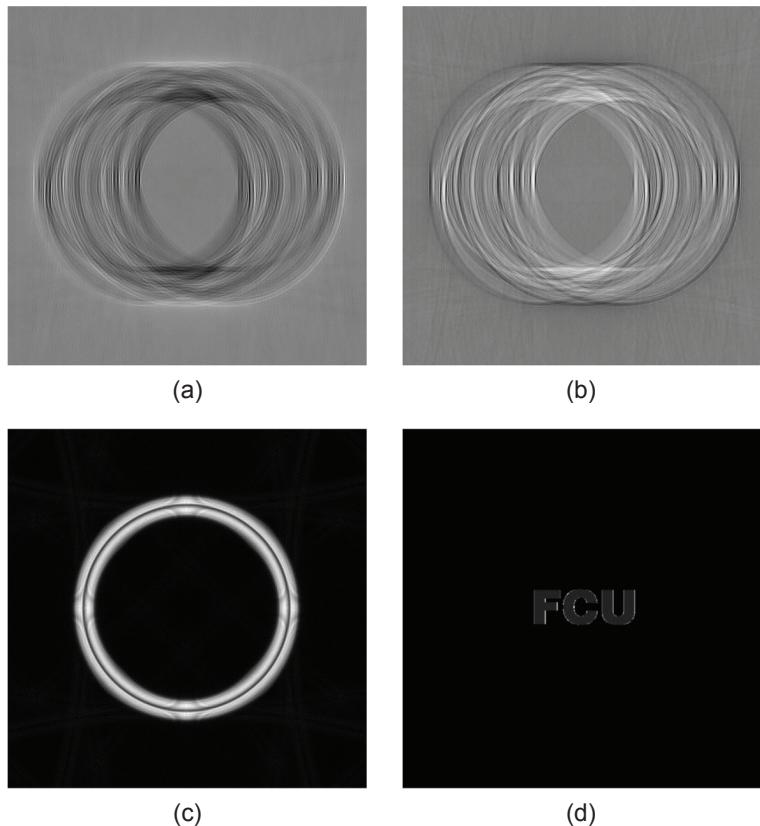


圖 4. 以圓形 Dammann 光柵作為光瞳進行編碼掃描全像。(a)、(b) 分別為掃描全像之實部與虛部；(c) 物平面處 Dammann 光柵繞射光的光強分佈；(d) 以正確參數進行全像重建所獲得的影像。

體的光會被光偵測器接收，解調後成為全像點 H_i 。圖 5(b) 為數位全像拍攝架構。此時光是從右方的點光源經透鏡擴束後照射物體。同樣考慮 a 、 b 兩點，其物光分別經過 r_{ai} 以及 r_{bi} 傳播到全像點 H_i 上。由於圖 5 中的兩個架構都可以紀錄物體同樣的相位延遲，因此拍攝出的全像會是一模一樣的。是故，我們可以得到兩個結論。第一個是光學掃描全像的掃描光束聚焦面就是全像面。第二個就是在光學掃描全像術中，光偵測器扮演的腳色並不是 CCD，而是光源。因此在光學掃描全像術中若我們改變光偵測器的位置，我們就可以紀錄同樣物體位置但不同照光效果的掃描全像。此外，由於不同的光偵測器並不會互相影響，因此在拍攝光學掃描全像時，我們可以利用多具光偵測器同步擷取多張同一物體的全像。這些全像的重建距離等參數都一樣，唯一的差異在於其具有不同的照光條件。這些全像除了可以單獨重建之外，還可以以一定的比例疊加在一起成為新的「融合全像」(fusion hologram)。藉由調整不同全像間的比例，此融合全像的打光效果就可以被改變。換句話說，利用掃描全像單像素成像的特性，我們可以在不用拍攝新全像的情況下產生一個具有新打光效果的全像⁽¹⁹⁾。

四、全像三維顯影

在本節中我們將介紹以掃描全像進行三維顯影的相關技術。如前一節所述，光學掃描全像可以操作在同調模式或是非同調模式。由於在同調模式下所拍攝的全像和傳統數位全像相

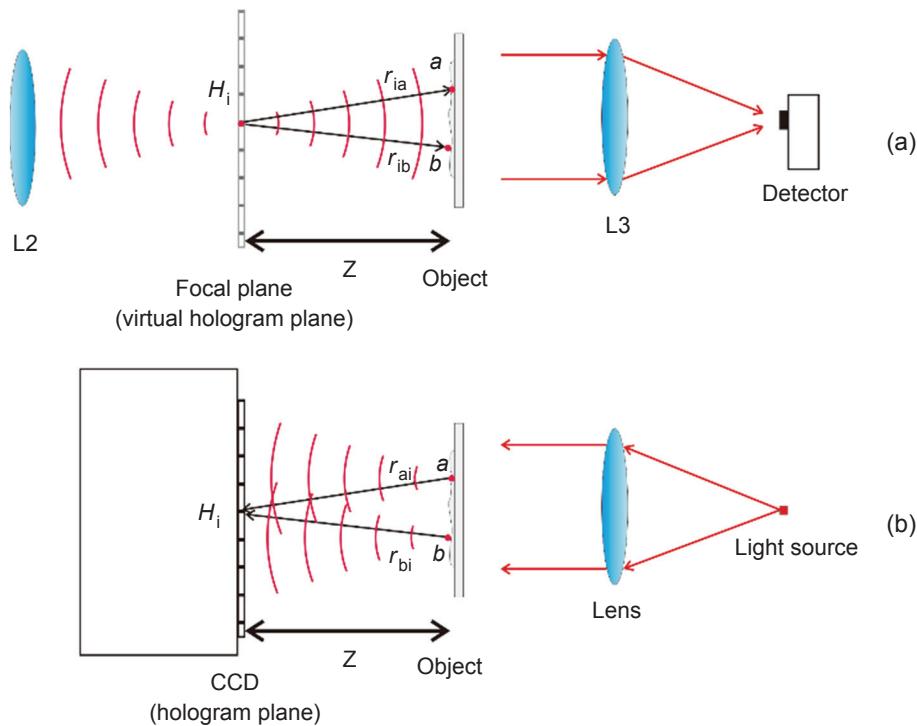


圖 5. 掃描全像架構與數位全像架構比較圖。(a) 掃描全像，(b) 數位全像。

似，因此三維顯影的應用通常是以非同調模式的光學掃描全像系統拍攝。一般來說，三維顯影的目的或為了進行量測或監控，或為了全像顯示。本節我們將介紹為達上述目的的非同調掃描全像技術。

1. 掃描全像擷取速度之加速

光學掃描全像由於需要進行二維的空間掃描，因此全像拍攝時間較長就是一個顯著的缺點。由於全像擷取的時間正比於掃描的點數，因此要加速掃描勢必要減少掃描的資料點數。為達到此目的，最簡單的方式就是直接減少垂直取樣點數目並拍攝垂直頻寬侷限全像。此種方式約可以讓全像拍攝時間減少 8 倍，但缺點為重建影像的垂直解析度會較差⁽¹⁸⁾。另外一個能達到掃描全像擷取加速的技術為壓縮光學掃描全像 (compressive optical scanning holography, COSH)⁽²¹⁾。COSH 的原理為進行每一列信號掃描時，同步比較每一掃描點信號和上一個掃描點信號的差異。若其差異不大，則該掃描點就不會被紀錄。利用此方法全像資料量可以被大幅度壓縮，並在重建時再予還原。然而因每一點都要掃描並和前一點比較，因此 COSH 的掃描時間並不會縮短。另一方面，適性光學掃描全像 (adaptive optical scanning holography, AOSH)⁽²⁰⁾ 則除了可以減少掃描全像的資料量，還可以減少掃描的時間。圖 6 為適性光學掃描全像工作原理示意圖。若將掃描列從 1 開始編號，則每列的掃描資料可以標示為 $s(1)、s(2)\dots$ 。AOSH 在起始時會以標準的方式以及取樣間隔 Δ_1 擷取資料。然而其每次擷取完一列掃描資料後，除了存檔外還會暫存至暫存器 (line buffer) 中，並作為和下一列掃描資料進行比對用。舉例來說，當掃描到第 j 列時獲得資料，此時 $s(j)$ 和暫存器中前一列的資料 $s(j - 1)$ 同時被送進預測器 (predictor) 中比對。若兩列的資料相似度高，則代表其垂直信

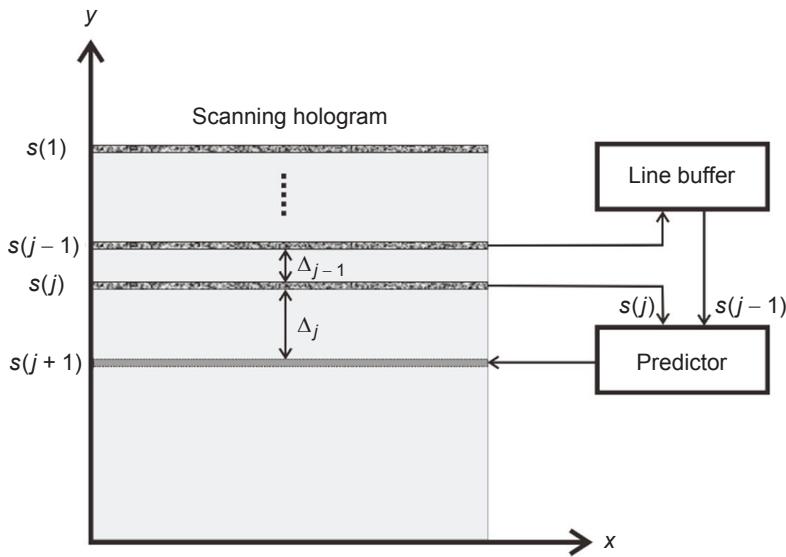


圖 6. 適性光學掃描全像 (AOSH) 原理示意圖。

號變化不大，因此系統就可以調大此列 (第 j 列) 和下一掃描列 (第 $j + 1$ 列) 的間距 Δ_j 去進行掃描，同時再把 $s(j)$ 送至暫存器中暫存。利用此種按照信號變化即時調整掃描間距的方式，AOSH 可以在不太影響重建影像品質的情況下大幅減少掃描線的數量，而掃描時間也可以大幅縮短。最後，結合減少取樣的特殊掃描路徑以及壓縮感測 (compressive-sensing) 重建技術，亦可加速掃描全像的拍攝⁽³¹⁾。

2. 傾斜式光學掃描全像

一般光學掃描全像在拍攝時，掃描光束和掃描方向是垂直的，而全像面則和掃描面相互平行，如圖 7(a) 所示。另一方面，如果掃描光束和掃描方向互相不垂直，則仍然可以進行全像掃描的拍攝⁽³²⁾。需要注意的是此時全像面仍然和掃描面相互平行，如圖 7(b) 所示。在傾斜掃描的情況下拍攝的全像在重建時會有一個特別的地方，就是其相對於正向全像來說，視角是斜的；但是重建平面卻和正向全像一致，如圖 7(c) 所示。此特點在全像三維量測以及全像三維顯示等應用上都有獨特的價值。圖 8 為傾斜式掃描全像之重建影像。其拍攝物體和圖 3 一樣都是兩個骰子。然而此時我們利用傾斜掃描的方式拍攝，因此重建影像的視角和圖 3 之重建影像視角有 8 度的角度差。此時後方的骰子具有較大的可視範圍。

五、結論

在本文中我們介紹了光學掃描全像術的基本概念以及特性。光學掃描全像術的最大特點在於可以拍攝非同調全像，因此相比傳統數位全像技術其重建影像具有絕佳的影像品質。此外，也因此光學掃描全像術可應用於螢光三維顯影^(14, 33)，這在生醫顯微領域中是非常重要的一個課題。雖然目前利用自干涉的非同調全像術也可以拍攝螢光全像⁽³⁴⁾，但光學掃描全像術仍有其光瞳調變以及單像素成像等獨特的優點⁽³⁵⁾。此外，光學掃描全像系統為具空間不變性 (space-invariant) 的線性系統，因此在像差校正以及超解析成像上都有更佳的優勢。

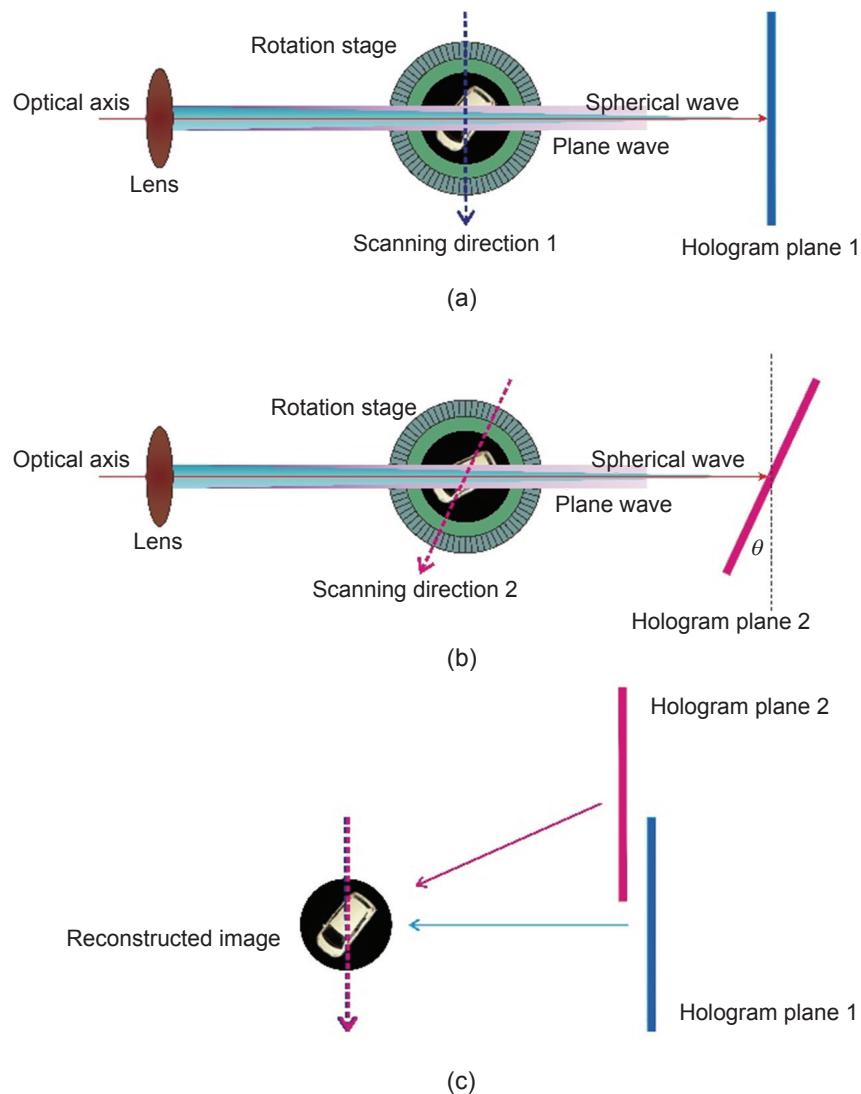


圖 7. 光學掃描全像術中掃描光束和全像面關係圖。(a) 一般正向掃描，(b) 斜向掃描，(c) 重建時全像和重建影像幾何關係圖。注意此圖我們旋轉了傾斜全像以讓其和正向全像之重建面重合。此時傾斜全像面 (hologram plane 2) 會移至圖中之位置。

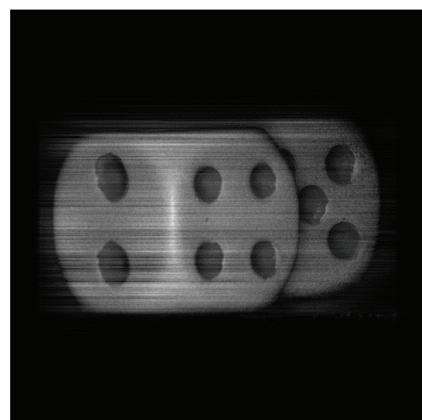


圖 8. 骰子之傾斜掃描全像重建結果。此全像和圖 3 之全像有 8 度之傾斜角差，因此其重建視角亦不一樣。

參考文獻

1. G. Saxby, *Practical Holography 3rd Ed.*, Institute of Physics Pub, (2004).
2. D. Gabor, *Nature*, **161**, 777 (1948).
3. E. N. Leith and J. Upatnieks, *Journal of the Optical Society of America*, **52** (10), 1123 (1962).
4. T.-C. Poon and J.-P. Liu, Introduction to Modern Digital Holography with MATLAB®, Cambridge University Press, (2014).
5. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 3 ed. (Roberts & Company Publishers, 2005).
6. T.-C. Poon and A. Korpel, *Optics Letters*, **4**, 317 (1979).
7. T.-C. Poon, *Journal of the Optical Society of America A*, **2**, 521 (1985).
8. T.-C. Poon, *Optical Scanning Holography with MATLAB*, New York: Springer, (2007).
9. T.-C. Poon, et al., *Optics Letters*, **25**, 215 (2000).
10. J.-P. Liu, et al., *Optics Letters*, **40**, 2366 (2015).
11. B. W. Schilling, et al., *Optics Letters*, **22**, 1506 (1997).
12. T.-C. Poon and G. Indebetouw, *Applied Optics*, **42**, 1485 (2003).
13. T.-C. Poon, et al., *Optical Engineering*, **34**, 1338 (1995).
14. G. Indebetouw and W. Zhong, *Optical Society of America A*, **23**, 1699 (2006).
15. J.-P. Liu, D.-Z. Luo, and S.-H. Lu, *Optics and Lasers in Engineering*, **68**, 42 (2015).
16. G. Indebetouw, A. El Maghnouji, and R. Foster, *Optical Society of America A*, **22**, 892 (2005).
17. G. Indebetouw, Y. Tada, J. Rosen, and G. Brooker, *Applied Optics*, **46**, 993 (2007).
18. J.-P. Liu, C.-C. Lee, Y.-H. Lo, and D.-Z. Luo, *Optics Letters*, **37**, 2574 (2012).
19. J.-P. Liu and S.-Y. Wang, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **12**, 1664 (2016).
20. P. W. M. Tsang, T.-C. Poon, and J. P. Liu, *Scientific Reports*, **6**, 21636 (2016).
21. P. W. M. Tsang, J.-P. Liu, and T.-C. Poon, *Optica*, **2**, 476 (2015).
22. A. S. M. Jiao, et al., *Journal of Optics*, **16**, 075401 (2014).
23. T. Kim, Y. S. Kim, W. S. Kim, and T.-C. Poon, *Optics Letters*, **34**, 1231 (2009).
24. T. Kim and T.-C. Poon, *Applied Optics*, **48**, H153 (2009).
25. T. Leportier, M. C. Park, Y. S. Kim, and T. Kim, *Optics Express*, **23**, 3411 (2015).
26. J.-P. Liu, S.-Y. Wang, P. W. M. Tsang, and T.-C. Poon, *Optics Express*, **24**, 14582 (2016).
27. J.-P. Liu, *Journal of the Optical Society of America A*, **29**, 1964 (2012).
28. J.-P. Liu, *Applied Optics*, **54**, A59 (2015).
29. Y. Shinoda, et al., *Applied Optics*, **50**, B38 (2011).
30. B. Sun, et al., *Science*, **340**, 844 (2013).
31. A. C. S. Chan, K. K. Tsia, and E. Y. Lam, *Optica*, **3**, 911 (2016).
32. J.-P. Liu and Hsuan-Hsuan Wen, “Optical scanning tilt holography”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, accepted (2019).
33. G. Indebetouw, T. Kim, T.-C. Poon, and B. W. Schilling, *Optics Letters*, **23**, 135 (1998).
34. J. Rosen and G. Brooker, *Nature Photonics*, **2**, 190 (2008).
35. J.-P. Liu, T. Tahara, Y. Hayasaki, and T.-C. Poon, *Applied Sciences*, **8**, 143 (2018).

作者簡介

劉榮平先生為國立中央大學光電科學研究所博士，現為逢甲大學光電科學與工程學系教授。

Jung-Ping Liu received his Ph.D. in Optical Science from National Central University. He is currently a professor in the Department of Photonics at Feng Chia University.

溫宣瑄先生為逢甲大學光電科學與工程學系碩士。

Hsuan-Hsuan Wen received his M.S. in Photonics from Feng Chia University.