

「電腦產生全像術」及「數位光學」原理概述與應用

陳建宇¹、莊智皓²

¹ 國立台灣科技大學色彩與照明科技研究所、² 國立臺灣大學光電工程學研究所

¹chencyue@mail.ntust.edu.tw

全像術在 1948 年時由英國籍匈牙利裔猶太人物理學家 D. Gabor 提出，於 1967 年時獲得英國物理學會楊氏獎，並於 1971 年時獲得諾貝爾物理學獎。全像術的概念為以同調光源(Coherence light)分為兩道光，一道為參考光(Reference light)，另一道照射物體反射出物體光(Object light)兩者經過干涉紀錄物體當下之相位與振幅資訊，再以相同的參考光重建物體資訊，其中包括相位與振幅，因此能完整重建紀錄時的空間與物體深度，與一般僅能記錄三維景物振幅的攝影技術不同^[1]。為解決光學全像術紀錄與實作上的複雜度，1966 年時，由 B. R. Brown 與 A. W. Lohmann 提出電腦產生全像(Computer generated holography)^[2]，其概念為利用電腦模擬參考光與物體光之干涉情形，表示可以產生一虛擬物件，不需實體即可紀錄，大幅提升全像重建的穩定性以及應用範圍。電腦產生全像(Computer generated holography, CGH)是利用光波傳遞方程式描述目標影像之相位分布，並透過傅立葉轉換(Fourier transform, FT)與反傅立葉轉換(Inverse Fourier transform, IFT)計算影像之傅氏訊號，但傅氏訊號雖能以數位方式存取，卻無法顯示於感光元件上，因此需對其做相位與振幅的轉換，如圖 1(a)所示。重建時，使用相應波長之參考光照射相位分布圖即可重建出目標影像，如圖 1(b)所示^[3]。電腦產生全像之優勢在於，以模擬真實物體之反射光與參考光相互干涉時所產生的干涉條紋，取代了傳統的紀錄過程，減少全像的複雜度以及提高重建影像的品質。為了得到細緻度高的三維影像，我們主要研究為基於點對點式的電腦全像片之產生，且追求高解析影像與高速計算，為此我們在 2017 年提出了三維優化型 Gerchberg-Saxton 演算法(3D MGSA)，其概念是利用隨機相位(Random phase)作為初始相位進行運算，有效改善影像間相位訊號所產生的誤差。並以菲涅耳轉換取代傅立葉轉換，將透鏡的特性寫入演算法中，以減少在進行光學重建時透鏡的使用，且降低架構之複雜性與成本^[4]。利用參考光之光波長或是欲重建影像之成像位置作為相位函數(Phase only function, POF)或 POM(Phase only mask, POM)的加密參數，其中，POM 是由多個 POF 組成，將 FrT 平面上不同加密條件之 POF 合成為單張 POM，可達到多重影像之波長多工(Wavelength-multiplex)以及位置多工、角度多工^[5]，以此成功實現全彩的影像內容，如圖 2。

「電腦產生全像術」特色在於讓使用者能夠在觀看逼真的影像內容，也能有舒適的觀看體驗，對於產業利用性上，因為其顯示原理可產生連續視差，可有效解決眼調節與視覺衝突(vergence-accommodation conflict)的問題，並可作為立體顯示、AR&VR 的絕佳影像內容。在應用方面，在展場使用的展示櫥窗、汽車使

用的抬頭顯示器(head up display, HUD)、育樂或教育使用的擴增實境(augmented reality, AR)眼鏡或顯示面板，或者搭配智慧感測及觸控技術，能夠使用在智慧生活家電，可以實現比一般顯示器更強的互動與使用感，未來極有可能被廣泛應用於智慧零售、移動、育樂，甚至醫療等各種智慧生活場域中。因此，在現在的顯示器市場上，「電腦產生全像術」獲得了越來越高的關注，相關的研究與開發更是日益增加。

電腦產生全像術主要是利用空間光調制器(Spatial light modulator, SLM)進行光學繞射重建，除了影像上的重建外，如同光學全像術亦可透過相位來實現光學元件的製作與重現，我們亦利用此特性實現了多焦點透鏡，這是單一光學元件無法實現的，如圖 3。此種結合了傳統成像光學設計與數位影像處理技術，我們可以稱為計算機成像光學(computational imaging)，或又稱數位光學(Digital optics)。「數位光學」可根據需要之不同功能而進行設計，如景深擴展(Extended Depth of Field)、減少鏡片數、鏡頭公差放鬆、甚至如立體取像等，而此技術在光學系統部份採用所謂波前或振幅編碼技術並結合影像處理中的反摺積(Deconvolution)運算，將過去需利用光學元件實施的功能用全數位化方式進行。對於工業加工而言，可將 LCoS 作為數位光罩來進行半導體加工，或用於雷射加工切割，並可在不破壞材料的前提下進行材料切割。對於光學實驗上，過去實驗需要針對每個實驗進行多元件的採買，而現階段，則可利用演算法與空間光調制器針對不同實驗來執行。空間光調制器是一種對光波的空間分布上做特性調制的設備，其主要是利用電子訊號對光訊號（光波的振幅、相位、或是偏振態）來做調制。LCoS(Liquid Crystal on Silicon)為反射式的 SLM，有著高反射率、高光利用效率、小尺寸像素（大繞射角度）的優勢，並已逐漸廣泛地應用在各相關領域中。目前有各大公司已針對數位光學提出相關 SLM 教育套件，係利用 LCoS 模組做為 SLM 並設實驗讓學生們熟習 SLM 的操作及應用。相關內容可包括:SLM 特性的量測、振幅調制器(Amplitude Modulator)、相位調制器(Phase Modulator)、光的干涉、繞射、色散...等實驗。可讓學生能循序漸進，了解物理光學原理之後再架設實驗觀察現象，並記錄下來做分析與探討^[6]。綜觀上述，「電腦產生全像術」與「數位光學」的重要性，不論在於產業、研究與教學，有了這數位光學的工具，可作為傳統光學的翅膀，並可成為學校與產業間良好平台，讓教學與研究更加快速與創新。

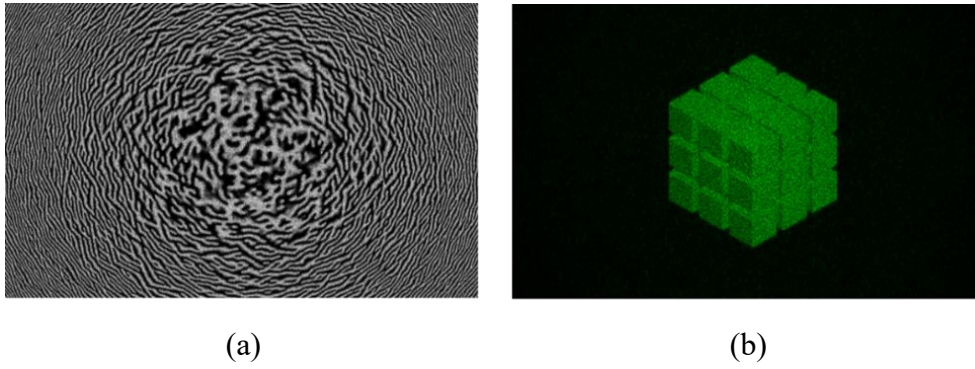


圖 1 電腦產生全像之編碼影像與解碼影像 (a)編碼影像 (b)解密影像

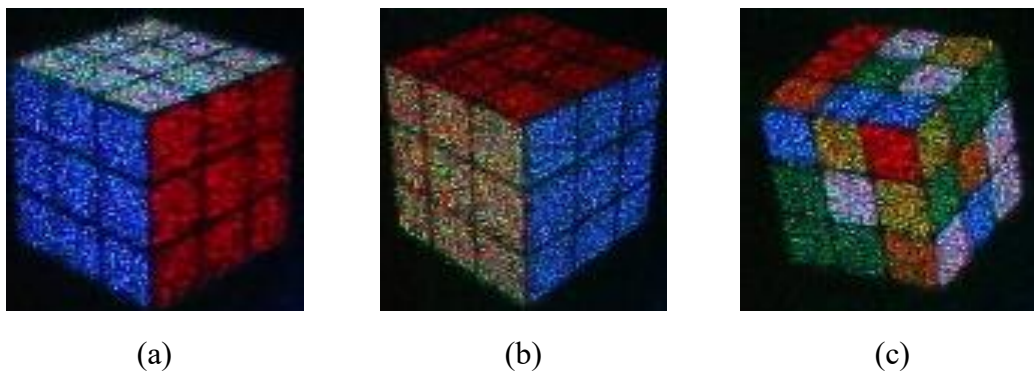


圖 2 全彩電腦產生全像繞射重建影像

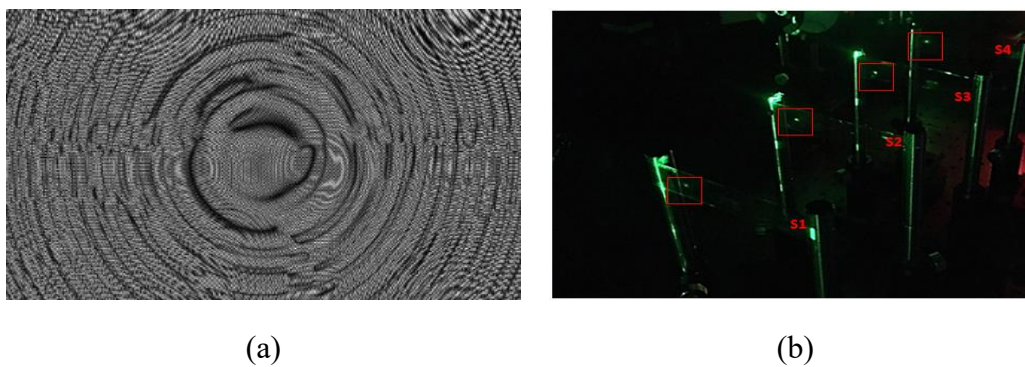


圖 3 電腦產生全像之編碼多焦點元件(a)編碼資訊 (b)多焦點光學重建結果

延伸閱讀

1. 於數位光學平台的 LCoS-SLM 技術及其在動態光學中的應用開發
<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ETOP-2017-104523Q>
2. 3D 電腦全像術展示 <https://www.youtube.com/watch?v=DdOveIue3sc>
3. 全像術如何實現 <https://www.youtube.com/watch?v=0ics3RVSn9w>

參考文獻

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle", *Nature*, Vol. 161, pp. 777-779. (1948).
- [2] B. R. Brown, and A. W. Lohmann, "Computer-generated binary holograms", *IBM J. Res. Dev.*, Vol. 13, No. pp. 160-168, 1969.
- [3] Q. L. Deng, B. S. Lin, H. T. Chang, Senior Member, IEEE, G. S. Huang, and C. Y. Chen, "MGSA-type Computer-Generated Holography for Vision Training with Head-Mounted Display", *J. Disp. Technol.*, Vol. 10, No. 6, pp. 433-437, 2014.
- [4] Chien-Yu Chen, Wu-Chun Li, Hsuan-Ting Chang, Chih-Hao Chuang, and Tsung-Jan Chang, "3-D modified Gerchberg–Saxton algorithm developed for panoramic computer-generated phase-only holographic display", *JOSA B* 34.5 (2017): B42-B48
- [5] Hsuan T. Chang, Yao-Ting Wang and Chien-Yu Chen, "Angle Multiplexing Optical Image Encryption in the Fresnel Transform Domain Using Phase-Only Computer-Generated Hologram", *Photonics* 2020, 7(1), 1
- [6] Tsai, C. W., Wang, C., Lyu, B. H., & Chu, C. H. (2017, May). LCoS-SLM technology based on Digital Electro-optics Platform and using in dynamic optics for application development. In *Education and Training in Optics and Photonics* (p. 104523Q). Optical Society of America.