

以雷射直寫製造技術為基礎的 3D 微列印

Laser-Direct-Writing-Based 3D Micro-Printing Technology

林志郎

Chih-Lang Lin

「3D 列印」是當前熱門的話題，儼然已成為掀起全球第三波工業革命的關鍵技術，它是以數位模型檔案為基礎，以高分子或其它可粘合材料，透過逐層列印的方式直接構造任意三維結構，此製造方法具快速、便利和直觀等優點。「雷射直寫製造」技術也是 3D 列印的技術形式之一，本文將探討雷射直寫製造技術的關鍵—「雙光子光致聚合」原理與其應用發展，介紹國外相關文獻，並報告筆者研究室近年來之相關研究成果。

The “3D printing” nowadays is a hot topic, which has become the key technology of “The third industry revolution” in the world. The 3D printing is based on the process of making a three-dimensional solid object of virtually any shape with polymer or viscous materials by sliced working from a digital model. Such manufacture method has the advantages of convenience, rapid and intuition. “Laser direct writing” is one of the 3D printing techniques in the form. This report introduces the principle and applications of the “two-photon polymerization” which is the key technology of laser direct writing. Also the developments in the world and our recent works are presented in this report.

一、前言

美國總統歐巴馬先生於 2013 年二月在國情咨文演說中提到「3D 列印極有可能徹底改變我們所有生產東西的方式 (3D printing that has the potential to revolutionize the way we make almost everything)」，全球觀察家和分析師們將其更喻為帶動第三次工業革命的關鍵技術。3D 列印是將數位化的 3D 設計模型，以積層製造 (additive manufacturing) 方式直接製造成形，也就是所謂的

「加法製造」，而因其分層加工的過程與噴墨列印的技術原理十分相似，所以稱之為「列印機」。相較於減法製造方法，利用刀具以直線進出的方式切削加工 (machining)，往往會在結構複雜處有設計上的死角而無法完成，但 3D 列印則可不必受限於刀具的行程與機械驅動路徑，更具彈性地實現各式複雜設計的要求。

另一相當吸引人的特色，便是使用者可設計任意 3D 複雜結構，而令機器直觀式地 (visually) 製造出產品，因為這項特點，讓原本只能在工廠進行

的加工製造過程，可以在家裡實現，即「家就是工廠」(a factory in every home)，讓「客製化」更加容易，這種生產流程帶來全新的設計思維與衝擊，也是 3D 列印之所以被喻為帶動第三波工業革命的重要原因。

本文將介紹 3D 列印的其中一種技術形式，以「雷射直寫製造」技術為基礎的 3D 列印，探討其核心關鍵原理－「雙光子聚合」(two-photon polymerization, TPP) 與其應用發展。

二、雙光子聚合微製造系統

1. 雙光子光致聚合原理

所謂光致聚合 (photo-induced polymerization) 是指在光的曝照下，光起始劑 (photo-initiator) 藉由吸收一個光子的光電效應激發產生自由基 (起始階段)，一旦激發產生，單體 (monomer) 的電子轉換反應會造成聚合的鍊鎖反應 (成長階段)，最後由終結反應結束 (終結階段)，此過程稱為單光子聚合 (single-photon polymerization)。而雙光子吸收則是一種非線性光電轉換過程，是兩相同低能量的光子在虛態 (virtual state) 的 10^{-15} 秒時間 (life time) 內同時吸收後 (圖 1)，達到單光子吸收的能量時，即可激發自由基產生聚合作用，其餘步驟與單光子聚合相同。

在雙光子聚合反應中，光起始分子在一般情況下並不吸收光子，只在光子密度足夠的光束聚焦處產生反應 (如圖 3(a) 所示)，因此產品的空間解

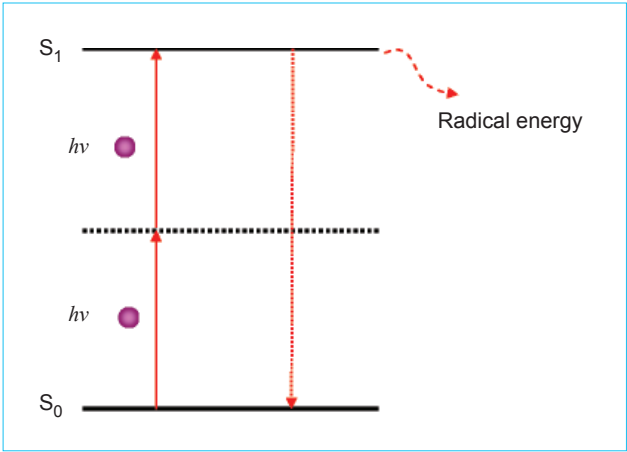


圖 1. 雙光子吸收圖示。

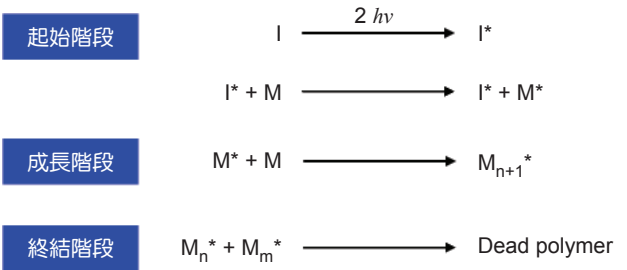
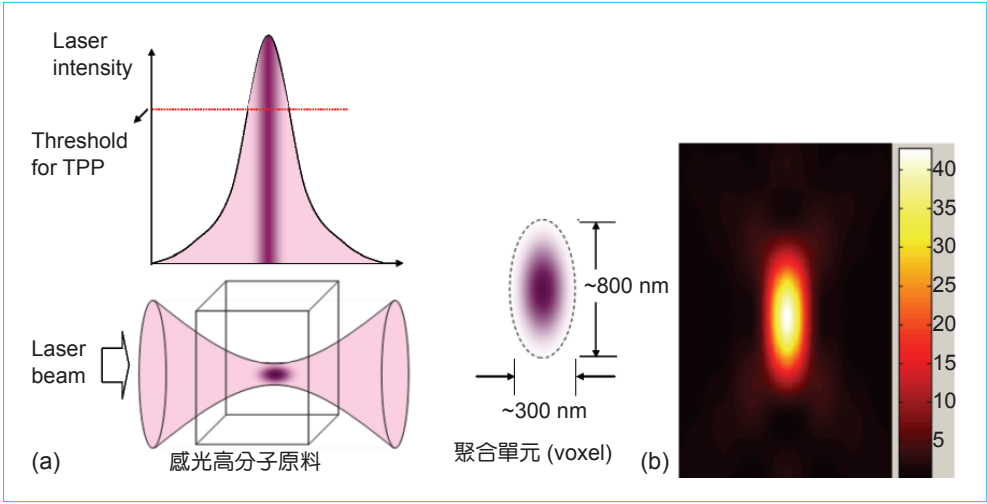


圖 2. 雙光子吸收聚合步驟。

析度 (spacial resolution) 可受光聚焦點的大小所控制。雙光子聚合通常使用高數值孔徑 (N.A.) 的物鏡進行，以便得到高解析度的聚合單元 (element) 或稱聚合點，此單元通常稱為 voxel，是雙光子聚合製造產品品質的關鍵，其大小 (size) 和形狀 (shape) 除了與光化學反應有關外，並可由雷射的光學特

圖 3.

(a) 雙光子聚合區域與雷射能量分佈的關係；(b) 雷射聚焦點模擬圖 (PSF Lab)。



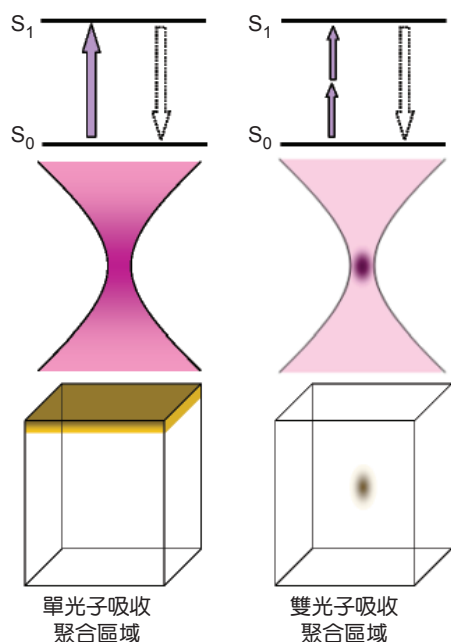


圖 4. 單光子與雙光子聚合效應比較示意圖。

徵，如功率、數值孔徑、極化方向，以及材料折射率所控制，圖 3(b) 是以軟體 (point spread function, PSF Lab) 模擬計算 (圓形極化、N.A. = 1.3) 的雷射聚焦點強度分佈圖。圖 4 為單光子聚合與雙光子聚合的比較示意圖，從圖中可以看出，單光子吸收的聚合區域會由感光高分子原料的表面開始發生，而雙光子吸收的聚合則可穿透原料表面，在其內部產生，此聚合點 (voxel) 為次微米級尺寸，因此可利用雷射聚焦點的掃描軌跡，直寫 (direct writing) 製造出任意幾何形狀的三維立體結構。

2. TPP 3D 微列印

本單元將介紹如何以 TPP 三維微製造方法進

行 3D 微列印，步驟如圖 5 所示，首先以電腦繪圖軟體繪製 3D 結構圖，接著需要進行分層 (slicing) 軌跡的規劃，雷射聚焦點將依此軌跡掃描。在開始 TPP 3D 微列印之前，尚需設定製造參數，包括雷射功率、曝光時間和掃描速度等，雷射功率和曝光時間主要影響前述光聚合單元－ voxel 的尺寸，而掃描速度則可調整兩個 voxel 的間距和上述分層的間距，將會影響產品之表面粗糙度和結構密實度，如圖 6 所示。而這些參數之間又互為影響，例如雷射功率高時，voxel 尺寸較大，因此其重疊率也相對較高，可使產品表面較為平坦，但過大的 voxel 卻又會造成產品的空間解析度變差，甚致使產品形狀與原設計圖不相符，因此通常需要事先經過理論的計算和一些簡單結構的實測，獲致最佳製造參數後，才進行 TPP 3D 列印。

圖 7 為 TPP 3D 列印的裝置基本架構示意圖，雷射經遮光器通過擴束組 (telescope)，目的是增加進入物鏡前的光束直徑，以提高數值孔徑，使雷射聚焦點尺寸盡可能小，以便獲致較佳的產品解析度。接著，雷射經過物鏡後將聚焦在蓋玻片上的材料內部，再由電腦軟體驅動 PZT 3D 位移平台，依事先規劃好的軌跡進行掃描，最後，再以溶劑洗去未聚合部份 (圖 5)，即可得到立體微結構。

三、TPP 3D 微列印產品與應用

1. 精緻化的 3D 結構產品

目前國外已有許多利用 TPP 3D 列印技術製造的產品，然而如前所述，TPP 3D 列印技術在製造 3D 微結構時，所選用的材料和製造參數的

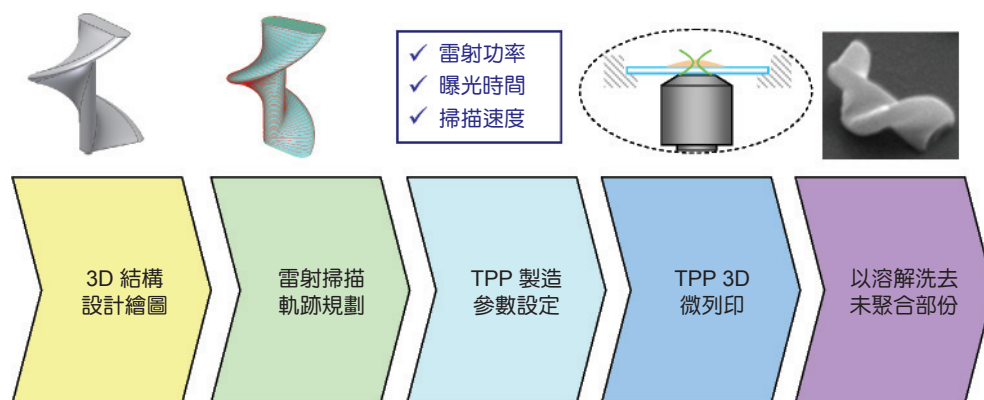


圖 5.
TPP 3D 微列印步驟。

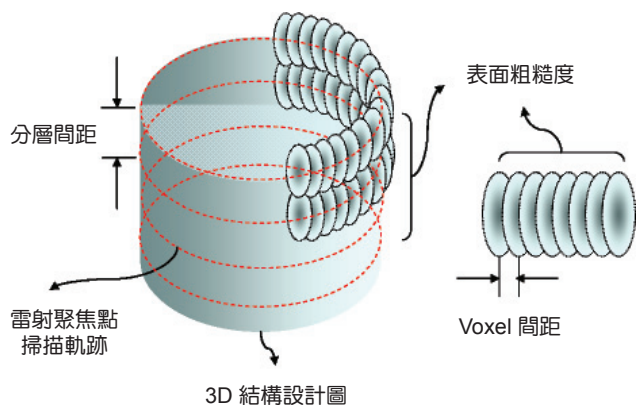


圖 6. 雷射掃描軌跡和 voxel 間距與 TPP 產品表面粗糙度關係示意圖。

最佳化是關鍵所在，近年來已有許多文獻提出具體的成果，圖 8 是 Mr. Sun⁽¹⁾ 近年來所發表的系列產品，圖 8(a)、(b) 與 (e) 分別是微米尺寸的齒輪 (gearwheel)、鍊條 (chain) 和牛之 SEM 圖，圖 8(c) 與 (d) 是兩種不同掃描模式，目的是加快製造時間。圖 9 是 Mr. Yang⁽²⁾ 於 2007 年探討不同掃描路

徑所得到的產品結果，主要原理是以較小的 voxel 經過多重路徑掃描 (multi-path scanning) 的方式得到較堅固的產品。圖 10 是 Mr. Fourkas 於 2004 年⁽³⁾，以丙烯酸樹脂為材料，在一根頭髮上製造的 3D 結構，本文主要探討的是光起始劑濃度與光聚

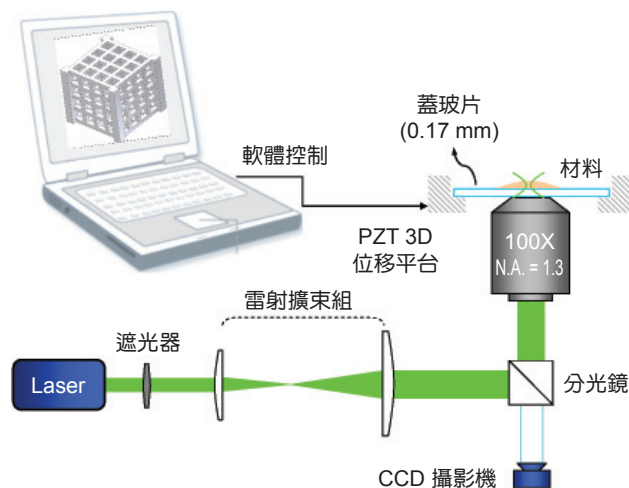


圖 7. TPP 3D 微列印裝置架構示意圖。

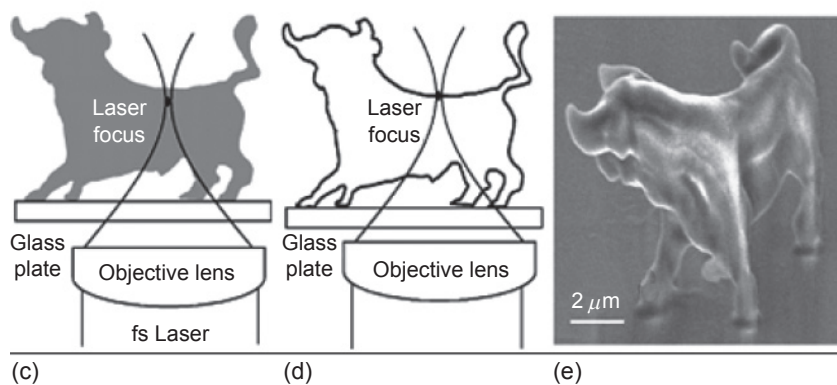
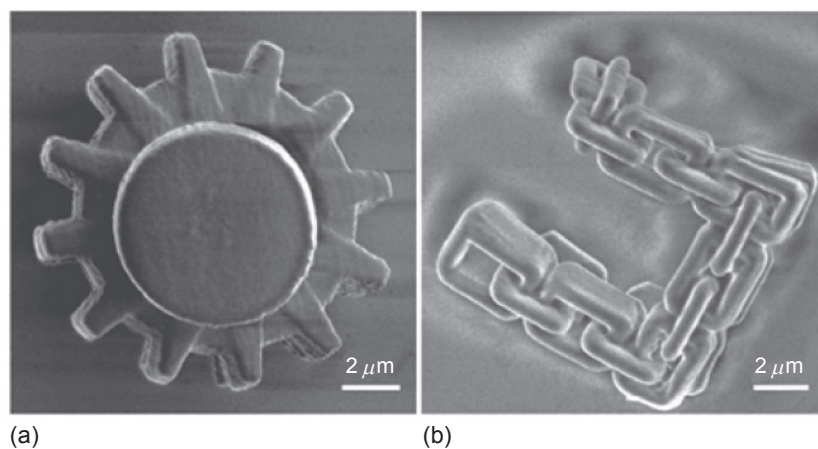


圖 8.
(a)、(b)、(e)：微米尺寸的齒輪 (gearwheel)、鍊條 (chain)、和牛之 SEM 圖；(c)、(d) 是兩種不同掃描模式⁽¹⁾。

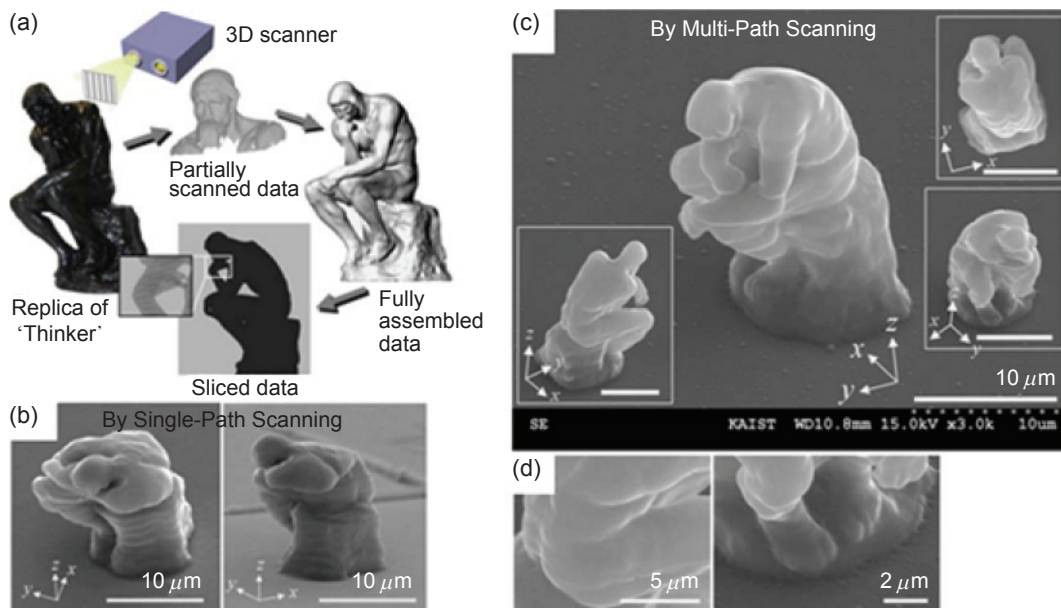


圖 9.
Mr. Yang 於 2007
年探討不同掃描路
徑所得到的產品結
果⁽²⁾。

合功率門檻的關係。

此外，TPP 3D 列印也用來製造各式微機械產品，這些微機械產品依其作動方式大致可分兩類：被動式和主動式。被動式機械通常應用在微流道晶片 (microfluidic chip) 或實驗型晶片 (lab-on-a-chip, LOC) 中，藉由流體直接驅動，無需額外的驅動裝置；反之，主動式機械需要由電磁或光來加以驅動，其中以光驅動的方式稱之為光驅動微機械。以下分別介紹此兩類產品在 LOC 和光驅動微機械的應用。

2. 在實驗室型晶片的應用

近年來國際上相當熱門的研究—「實驗室型晶片」是結合微機電和微機械，並配合微流道之佈

置，集合於一小玻片上，以便進行各式各樣的分子生物學和醫學實驗，具有簡便、快速，低耗材和準確的優點，可符合日趨多樣性的生醫檢測需求，是近年來相當前瞻性的研究，可廣泛應用在藥物合成、化學分析、生物細胞力學、細胞分離、單細胞檢測和生物反應檢測等。

傳統微機電 (MEMS) 製程雖具有可大量製造的優勢，但並不利於 3D 複雜結構的製造，因此，本文所提之以 TPP 為基礎的 3D 微列印技術，有別於微機電的繁複製程，具備便利、快速和直觀等優點，相當適合在 LOC 的微流道環境中製造各式功能性微結構和機械，近年來已有許多相關的研究和產品，圖 11^(4, 5) 是 Mr. Wei 和 Mr. Sun 等之一系列應用於微流道的微裝置和微機械，

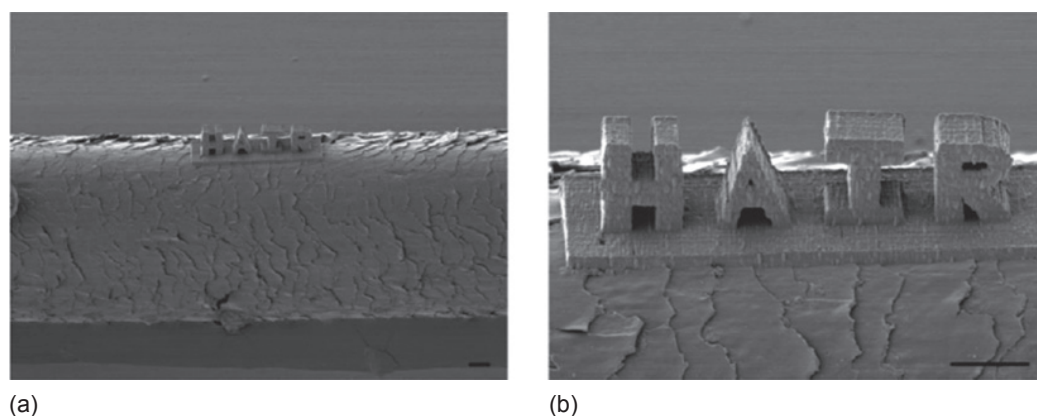


圖 10.
以丙烯酸樹脂為材
料，在一根頭髮上
製造的 3D 結構⁽³⁾。

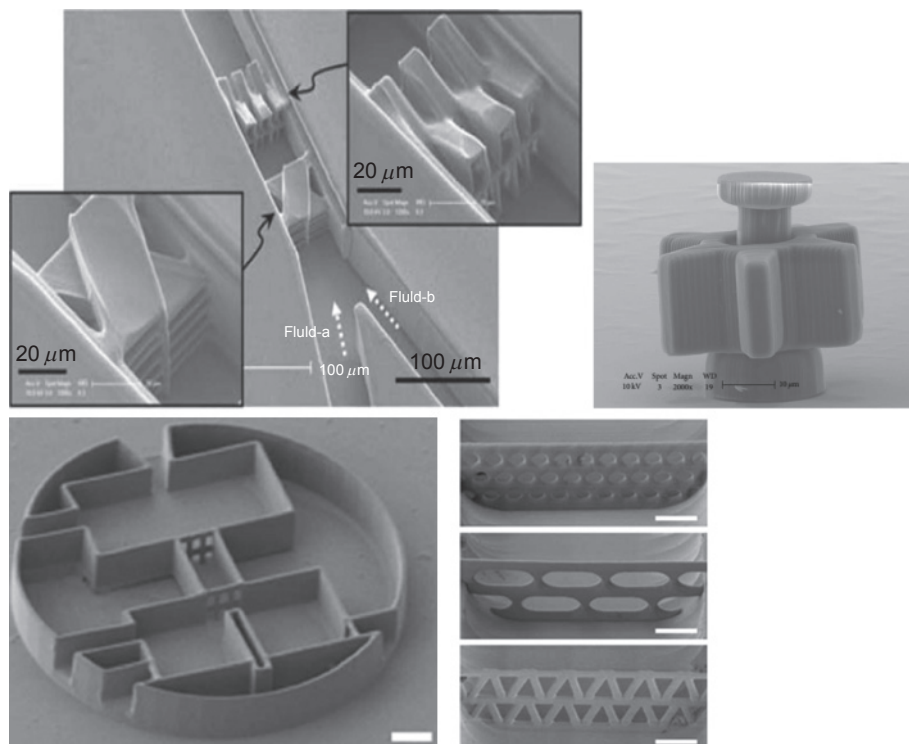


圖 11.
各式應用於微流道中之微型裝置產品 SEM圖^(4, 5)。

包括：微柵門 (micro-grating)、微流道、微腔室 (micro-chamber)、微混合器 (micro-mixer) 和微齒輪 (micro-gear) 等。從這些研究中可以看出，以 TPP 3D 微列印技術所製造的產品極具設計彈性，特別適合在微流道中製造各種精緻的微結構，也可以製造組合式的微機械。

3. 在光驅動微機械的應用

所謂「光驅動」意指以雷射對微結構產生光作用力，並驅使微物件產生移動或轉動，其工作原理是將雷射光束經過高數值孔徑透鏡聚焦後，形成可抓取具透光性的微型物件 (如微粒子、生物細胞或微結構等) 的光學阱 (optical trap)，又稱為雷射光鉗。本質上這種光學微操控 (optical manipulation) 是藉由光的動量變化產生動力，有別於熱梯度、振動、對流、超音波和磁力等，這項技術具有以下特色：(1) 非機械式接觸控制，即可遙控 (remotely) 驅動微結構；(2) 可穿透性，例如可穿透玻片對其內部微結構進行操控；(3) 可精確定位操控；(4) 作用力容易量化；(5) 直觀操控。可藉以達到微米級的精巧的機械式感測功能，而無需機械接觸和其它額外的電子裝置。

本文作者的研究團隊於 2011 年發表了以 TPP 3D 微列印技術所製造的阿基米得微螺旋 (Archimedes micro-screw)⁽⁶⁾，本實驗室使用的是商業用 3D 製造模組 (Teem Photonics Inc., 法國)，此模組嵌合於倒立式顯微鏡 (Olympus IX51)，並藉由 PZT 三軸平台進行雷射軌跡掃描 (圖 12)，雷射波長為 532 nm，物鏡為 100 倍油鏡 (N.A. = 1.3)。以此系統製造的阿基米得微螺旋再利

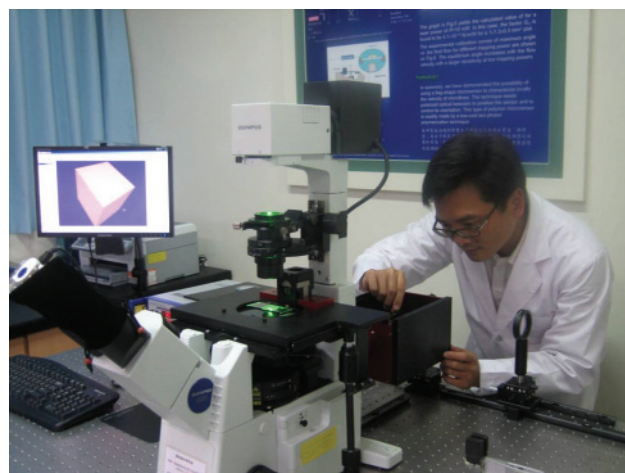


圖 12. TPP 3D 微製造模組與倒立式顯微鏡。

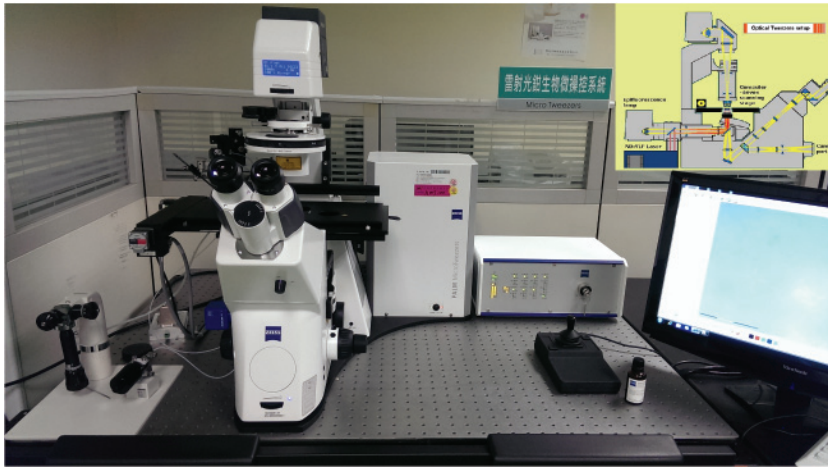


圖 13.
PALM MicroTweezers (德國 ZEISS)。

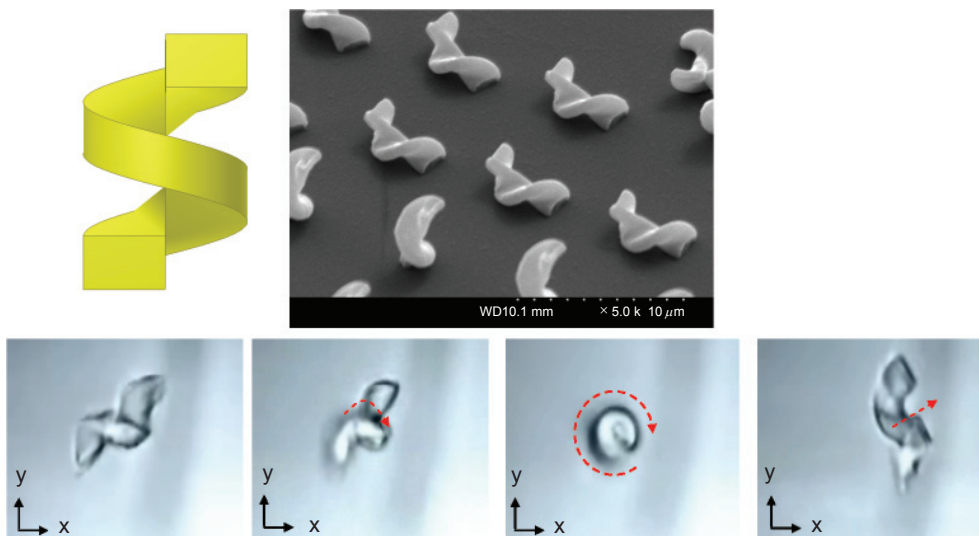


圖 14.
本文作者的研究團隊以 TPP 3D 微列印技術所製造的「阿基米得微螺旋」⁽⁶⁾。

用雷射光鉗 (圖 13, PALM MicroTweezers, 德國 ZEISS 公司) 攫取後 (如圖 14(a) 至 (b) 所示), 光在照射到螺旋葉片時, 因其特殊的螺旋形態, 其光動量的改變將驅使此螺旋轉動 (圖 14(c)), 轉動速度與螺旋的圈數 (screw-number) 和雷射功率有關, 此裝置可作為微流道的幫浦 (圖 15)。

圖 16 是本研究團隊製造的微型槓桿彈簧裝置⁽⁷⁾, 本裝置同樣是以雷射光鉗攫取槓桿上的圓球, 槓桿旋轉後會被彈簧拉回, 雷射光鉗在不同位置的攫取會產生不同的扭力矩, 此裝置可應用在微流道閥門的開關控制、或是用來調節流量。圖 17 是本研究團隊所製造的「光驅動式齒輪傳動桿」^(8, 9),

以雷射光鉗抓取桿子末端的圓球, 並拖曳轉動齒輪, 此裝置藉調整連桿長度與齒輪直徑的比例, 達到放大光鉗作用力的效果, 可應用在微機械的傳動。圖 18 是一微飛輪 (micro-flywheel) 裝置⁽¹⁰⁾, 我們在一个三葉片的阿基米得螺旋體下方設計一個圓球, 並在螺旋葉片外加刀具, 此裝置驅動的工作原理是利用雷射光鉗抓取上述三葉片型的阿基米得微螺旋, 此時螺旋會自動轉動而帶動刀具旋轉, 其中螺旋下方的圓球如同定錨 (anchor) 作用, 增加此裝置在移動時的穩定性, 可應用在微流道晶片中作為微型機器人。

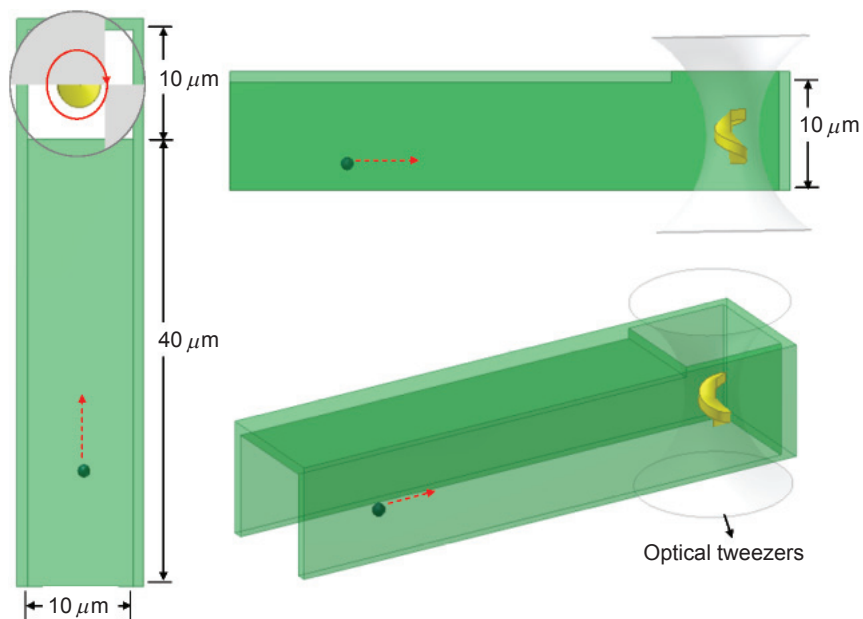


圖 15.
「阿基米得螺旋幫浦」應用於微流道⁽⁶⁾。

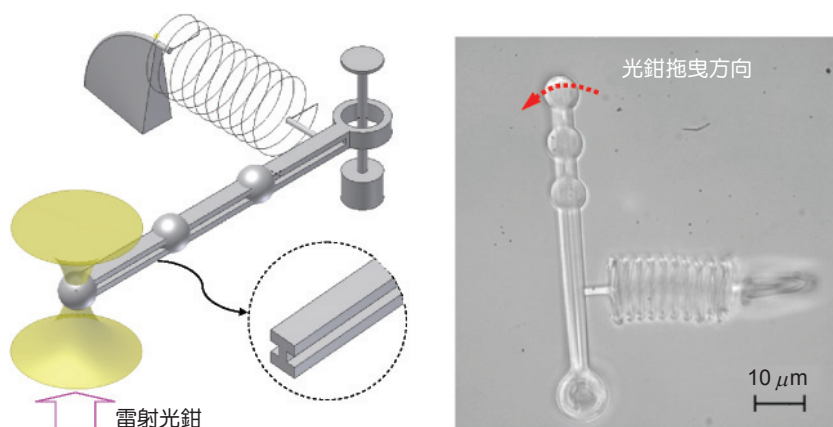


圖 16.
本研究團隊製造的「微型槓桿彈簧」裝置⁽⁷⁾。

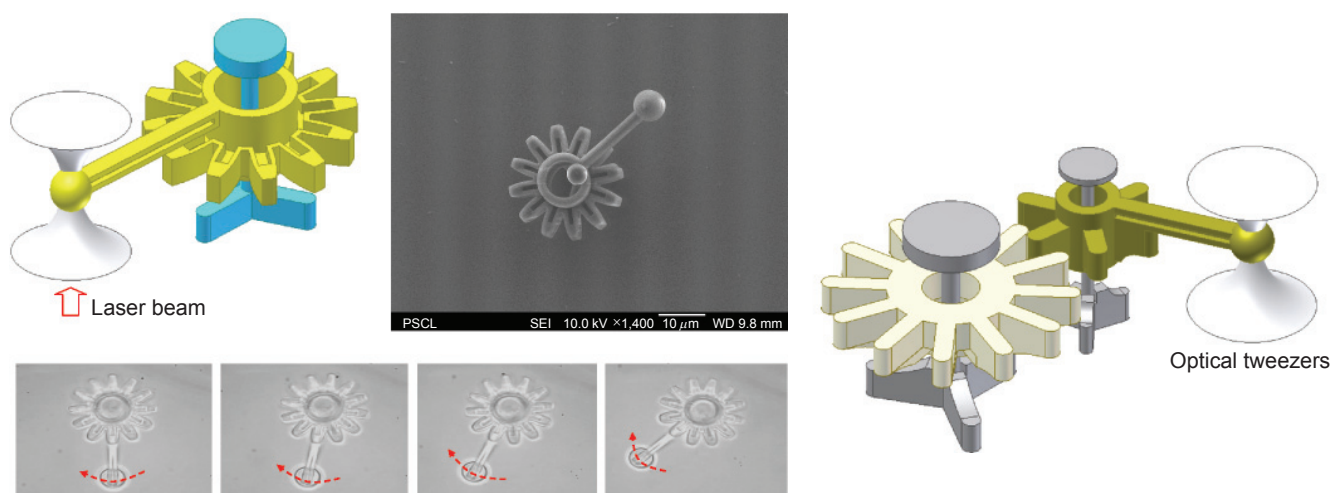


圖 17. 本文作者的研究團隊利用 TPP 3D 微列印技術所製造的「光驅動式齒輪傳動桿」和雷射光鉗驅動的情形^(8, 9)。

四、結論

「3D 列印」之所以成為熱門話題，主要是因為它突破了傳統設計製造過程的每一個步驟都需要工程專業人員才有可能達成的限制，只要利用一般的工程繪圖軟體，設計繪成 3D 圖後，選用適當材料，機器即可自動地加工製造完成，此過程將來可普及到一般使用者。本文介紹的 TPP 3D 雷射微列印技術可製造各式各樣的微型元件，除了文中所介紹的微流道與光驅動微機械的應用外，將來可擴大到生醫組織工程支架和生醫晶片微探針的製造。特別值得一提的是，傳統微機電製造方法對於微元件在製造完成後的組合，有其技術上的困難，但 TPP 3D 雷射微列印可突破此限制，直接一體成型，無需再進行組裝。

誌謝

本文承蒙國科會計畫（編號 NSC-101-2221-E-166-003、NSC102-2221-E-166-006）經費補助支持，使研究得以順利進行，特此致上感謝之意。並感謝法國傅立葉大學 Patrice Baldeck 博士的技術指導與中臺科大「生醫光電實驗室」已畢業及現任研究生的努力，以及逢甲大學「共同貴重儀器中心」的協助，始能獲致目前豐碩的成果。

參考文獻

1. T. Tanaka, H.-B. Sun, and S. Kawata, *Applied Physics Letters*, **80**, 312 (2002).
2. D.-Y. Yang, S. H. Park, and T. W. Lim, *Applied Physics Letters*, **90**, 013113 (2007).
3. T. Baldacchini, C. N. LaFratta, and R. A. Farrer, *Journal of Applied Physics*, **95**, 6072 (2007).
4. P. Wei, N. Li, and L. Feng, *ISRN Mechanical Engineering*, 2011 (2011).
5. B.-B. Xu, Y.-L. Zhang, H. Xia, W.-F. Dong, H. D. and H.-B. Sun, *Lab on a Chip*, **13**, 1677 (2013).
6. C.-L. Lin, G. Vitrant, M. Bouriau, R. Casalegno, and P. L. Baldeck, *Optics Express*, **19**, 8267 (2011).
7. C.-L. Lin, Y.-H. Lee, C.-T. Lin, Y.-J. Liu, J.-L. Hwang, T.-T. Chung, and P. L. Baldeck, *Optics Express*, **19**, 20604 (2011).

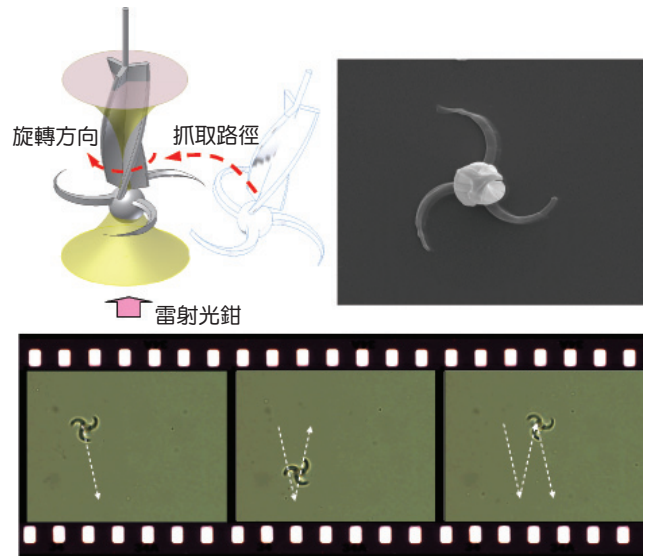


圖 18. 本文作者的研究團隊利用 TPP 3D 微列印技術所製造的「微飛輪」和雷射光鉗驅動的情形⁽¹⁰⁾。

8. C.-L. Lin, Y.-H. Li, C.-T. Lin, C.-C. Chiang, Y.-J. Liu, T.-T. Chung, and P. L. Baldeck, *Proc. of SPIE, Third International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*, **8409**, 840920-1 (2012).
9. Y.-J. Liu, Y.-H. Lee, Y.-S. Lin, C. Tsou, P. L. Baldeck, and C.-L. Lin, *Actuator*, **2**, 19 (2013).
10. Y.-H. Lee, Y.-J. Liu, C.-F. Tzou, M. Bouriau, P. L. Baldeck, and C.-L. Lin, *Journal of Neuroscience and Neuroengineering*, **2**, 58 (2013).



林志郎先生為法國傅立葉大學光學與凝態物理暨國立台灣大學機械工程雙博士，現任中臺科技大學醫學工程暨材料研究所副教授。

Chih-Lang Lin received his double-Ph.D. in physique de la matiere condensee et du rayonnement from Joseph Fourier University and mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an associate professor in the Institute of Biomedical Engineering and Materials Science at Central Taiwan University of Science and Technology.