

3D 列印發展趨勢

林偉 / 2017-05-16

一、前言

積層製造(additive manufacturing)是一種將材料以一層層薄層的形式堆疊形成產品的製造技術，它有一個更通俗的名稱：3D 列印(3D printing)。這種自下而上(bottom-up)的製造方式，相較於傳統加工方法，顯得非常特別，傳統加工方法指的是成型式(鑄造、鍛造)、減去式(銑削、鑽孔)、組合式(焊接、鎖固)等加工方法。

產業對積層製造的看法兩極，例如奇異(General Electric, GE)的執行長 Jeff Immelt 認為積層製造的興起會顛覆整個製造業，同時奇異預計對 Arcam 和 SLM 兩間積層製造公司投資 14 億美金("GE Plans to Invest \$1.4B to Acquire Additive Manufacturing Companies Arcam and SLM; Accelerates Efforts in Important Digital Industrial Space," 2016)，到 2020 年，GE 將以積層製造技術產出超過 10 萬個航太用引擎零件。但另一方面，鴻海董事長郭台銘卻說「3D 列印如果成為工業革命，我名字倒過來寫。」這種兩極化的評價主因於一層層疊加的積層製造相較於傳統製造方法顯得格外緩慢，具利基之應用為積層製造發展重點。

積層製造約在上個世紀 80 年代被發明，初期是為了快速打樣(rapid prototyping)而被開發出來，產品用於將設計成果或行銷概念加以視覺化。最早的新聞報導是日本名古屋市工業研究所在 1982 年發表的實體模型印製技術，而真正興起 3D 列印風潮是在 1984 年，3D Systems 公司發表光固化立體光刻設備(stereolithography apparatus, SLA)後，全球致力於製造或研發 3D 印表機的新創公司開始如雨後春筍般出現。1989 年麻省理工學院發明噴射黏砂(sand binder jetting)為主的技術，並以 3DP™ 為商標名推出 3D 印表機。1988 年美國 Austin 大學發展出選擇性雷射燒結技術(selective laser sintering, SLS)，利用雷射一層層地燒結粉末薄層，直到產品成型，此項技術又稱為固態自由成型生產(solid freeform fabrication, SFF)。1989~1999 年間，Stratasys 公司則發展出類似擠牙膏堆疊成形的融合沈積塑模(fused deposition modeling, FDM)技術，利用這種技術的 3D 印表機從 2005 年推出至今，為目前一般平價 3D 印表機的主流機種。隨著積層製造技術種類的多樣化、解析度的提升、材料強度的增強、產品壽命的提升，積層製造的產品從只能用來展示外觀的模型，開始成為具有實質功能的實品。

有鑑於 3D 列印相關技術的迅速發展，2009 年美國材料試驗協會(American Society for Testing Materials, ASTM)的 F42 委員會，將其劃為獨立技術領域，對

相關術語進行標準化，並正式將學名定為積層製造(additive manufacturing, AM)。ASTM F2792-10 第一標準將此技術定義為：一種利用材料接合以形成一形狀的過程，該形狀來自一三維模型數據；該過程通常涉及一層層接合材料，而對比於減去式製造技術(The process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies.)。ASTM 標準中所載的相關術語包括：積層生產(additive fabrication)、積層製程(additive processes)、積層技術(additive technique)、積層層狀製造(additive layer manufacturing)、直接數位製造(direct digital manufacturing)、層製造(layer manufacturing)和自由成形生產(freeform fabrication)等(Herderick, 2011)。

而3D列印再度成為熱門議題，甚至讓我國在「行政院生產力 4.0發展方案」中列為三大關鍵核心技術，起因於美國在「讓美國製造業重返榮耀」政策中對3D列印的重視。製造業過去透過量產(mass production)技術追求經濟規模而獲利，而今榮景不再，隨著數位化掀起的新一波工業革命，社群網絡的利用與產品的差異化成為製造業成敗關鍵，3D 列印技術正能滿足相關需求。

積層製造最大的優點在於，再複雜的產品形狀都能輕易完成。由於積層製造的產品是一層層疊加而成，製程時間主要與每層形成的方式有關，而與產品整體結構的複雜或簡單則沒有多大關係。難以用傳統工序加工，而用積層製造能輕易達成的複雜結構有：任意厚度的牆面、任意形狀的盲孔、扭曲的造形、高強度/重量比的力學結構、高表面積-體積比的特殊形狀、重複連續的微小結構、模擬自然界的有機體形狀；強度上不會有傳統以焊接或鎖固方式組裝的組裝面上的力學缺陷；像鎖鏈這樣的分離結構也能一體成形(Atzeni & Salmi, 2012)。積層製造成品的高強度/重量比，同時意味著廠商只需購入較少的材料而降低成本，就能生產相同強度的產品。

積層製造技術依形式區分包括材料擠出式、粉末床融合式、黏膠噴射式、材料噴射式、高分子光固化式、直接能量鍍層式、薄層疊加式等，產品尺寸從常見家庭飾品的大小，一直到數公尺立方，各有其製程特性及優缺點。考量因素包括解析度、材料、機械性質、外觀、可生產產品體積、製造速度、品質，對後加工的需求程度，後加工對解析度、材料性質、外觀的影響。產品種類則涵蓋模型、藝術品、珠寶、汽車零件、假牙、人造器官...等，隨著越來越多的應用被開發出來，幾乎無所不包。3D 列印與傳統工藝優劣比較如表一所示。3D 列印主要的缺點及待突破技術在於加工速度及解析度，高速加工下的解析度提升則仰賴新材料、感測、自動控制等技術的整合。

表一：3D 列印與傳統工藝優劣比較

製程要求	3D列印	傳統工藝	實例
複雜結構	輕易完成	無法完成、焊接點脆弱、成本高、費時	波音以3D列印製造機翼加工工件，製造時程從3週縮為30小時
高強度-重量比	輕易完成	無法完成	全球波音客機已搭載5萬件以上的3D列印零件，油耗省15%以上
滿足製造或組裝的設計 (design for manufacturing and assembly)	完全解放	設計受限	過去無法加工的引擎形狀
材料使用效率	高	低	CNC銑削下的大量材料造成浪費
流程設計	一體成形不需流程設計	複雜的零件組裝流程設計	-
物流庫存	需求低	零件物流、庫存複雜	-
打樣	快速	慢	F1賽車Caterham車隊每月3D列印~900賽車零件樣品
既有量產性產品	無優勢	技術成熟	免洗杯
無法燒結、光固化或焊接材質	無法製造	具有絕對優勢	鑄件

資料來源：各主題相關文獻，STPI 整理。

二、技術架構

積層製造包括下列步驟：(1)以電腦輔助設計(computer aided design, CAD)軟體進行產品的 3D 模型設計，並儲存成大部分 3D 印表機通用的 STL 設計圖檔；(2)3D 列印時，STL 檔會經過類似電腦斷層掃描切片的成像方法，把立體圖檔切片；(3)最後把這些切片轉換成為 G-code，藉以控制 3D 印表機列印成形。G-code 就是傳統數值控制(Computer Numeric Control, CNC)工具機所使用的指令，可以利用人工輸入、編輯，或電腦軟體自動產生 CNC 控制碼，等同於操作者與工具機間的溝通語言。在工具機的場合，工具機的加工刀具可以依照所設定的方式移動，在 3D 列印的場合，則是控制列印流程依設定進行。常見的 3D 列印技術分類如下：

1. 光固化立體光刻

使用液態的光活化樹脂，藉由雷射或紫外線光束一層一層地進行光固化。由於成型的精確度很高(可達到 0.05~0.15 毫米的精密度)，成品表面的光滑度及細緻度已經相當接近射出成型加工的塑膠製品，光活化樹脂的價格決定大部分成本。

2. 融合沈積塑模

融合沈積塑模與其他 3D 列印技術相比，由於成本相對低廉，一般平價 3D 印表機種大多採用此種技術。融合沈積塑模以類似擠牙膏的方式，將塑膠原料加熱融化後，藉由擠出器(extruder)將膏狀的塑膠擠出，堆疊成形，冷卻後固化。融合沈積塑模材料主要以塑膠為主，如聚乳酸(poly-lactic acid, PLA)與丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)最常見，也可使用矽膠等材料。聚乳酸是生物可分解材料，安全、不具毒性，但強度低、價格略高。ABS 材料強度高、耐熱、價格低，但列印時高溫下的軟化狀態會釋放有毒氣體。

3. 粉末床

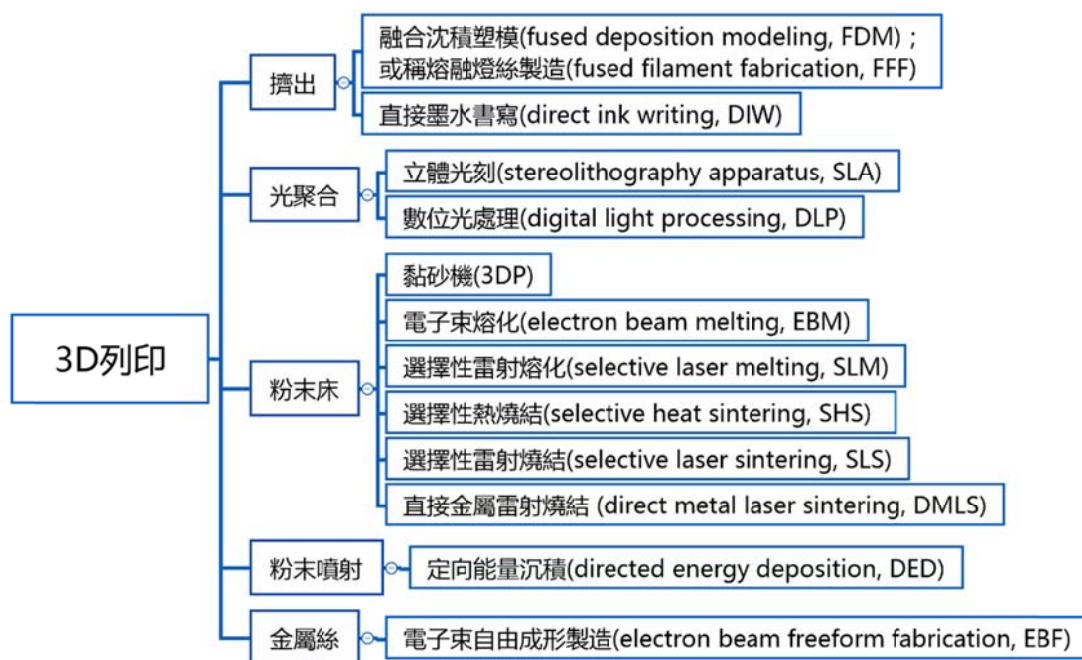
粉末床技術又可細分為選擇性雷射燒結(selective laser sintering, SLS)、選擇性雷射熔融(selective laser melting, SLM)，電子束熔融(electron beam melting, EBM)，或直接金屬雷射燒結(direct metal laser sintering, DMLS)、直接金屬雷射熔融(direct metal laser melting, DMLM)等。在材料科學上，燒結指的是被燒結的粉末間形成融合的頸部而未完全失去粉末形狀，熔融則使粉末融合成大體上沒有孔隙的團塊。選擇性雷射燒結一般用於非金屬材料粉末；選擇性雷射熔融與直接金屬雷射熔融屬於相同概念而為不同製造商所個別使用的術語。

在粉末床的積層製造中，首先在粉末床上均勻平鋪一層粉末薄層，再以雷射或電子束等光源掃描該粉末層，將掃描過的粉末加熱熔融或燒結。當使用金屬粉末時，一般形成厚度 20~200 微米的薄層形狀，由於被加熱的粉末占整層的比例極低，週圍部分未被加熱的粉末會迅速將熔融成形的粉末冷卻，接著將光源掃描過的粉末層降低一個薄層的高度，重新鋪上一層粉末薄層，重複上述步驟，直到產品完全成形。通常成品的表面依然具有粉末的顆粒狀，需要拋光。由於金屬粉末被雷射或電子束掃描加熱過程中容易氧化，所以選擇性雷射熔融、電子束熔融等必須在惰性氣體或真空中執行。

4. 自由成形生產

亦類似擠牙膏，自由成形生產(freeform fabrication)以電子束、電弧等光源將焊料等金屬絲軟化，由機器手臂將軟化的金屬絲繪製形狀，成形後冷卻固化。這類技術比粉末床更易用於製造大型部件，但尺寸精度較低。以電子束直接熔融(electron beam direct melting, EBDM)為例，其在真空中操作，適用於 Ti-6Al-4V 鈦合金等高活性或難熔金屬，由於機器手臂不像粉末床等技術只能在單一水平面製造，加工自由度較高。

3D 列印技術架構如圖一所示：



資料來源：各主題相關文獻，STPI 整理。

圖一：3D 列印技術架構

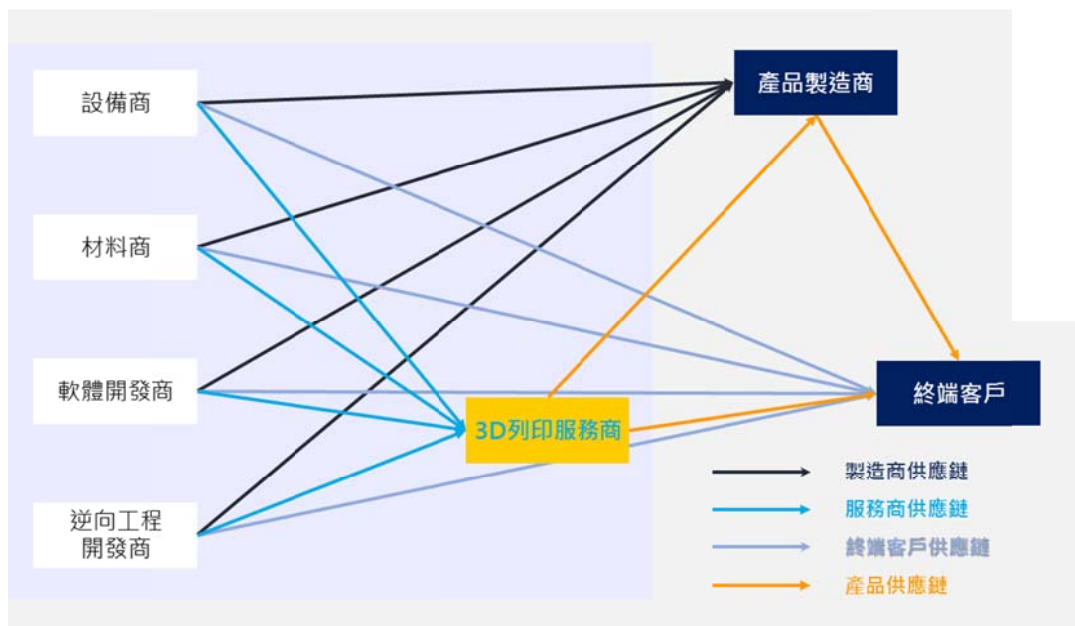
三、價值鏈

如圖二所示，3D 列印價值鏈可以從最上位劃分為供應端與客戶端，其中供應端包括系統設備商、材料商、軟體開發商及 3D 掃描/逆向工程開發商；客戶端包括產品製造業者及個人消費者，以產品製造業者對 3D 列印系統的需求量最大(Muller, A. & Karevska, S., 2016)。系統設備商主要從事 3D 列印系統、新技術及新材料的開發，提供相關軟體、材料、工程、顧問等服務，如 Stratasys、3D Systems、EOS、Concept Laser、SLM Solutions、ExOne 及 Ultimaker 等主要企業，占 3D 列印供應端最大比例。

材料商、軟體開發商及 3D 掃描/逆向工程開發商則提供與系統設備商規格相符的產品、技術支援。材料商具備材料科學、熱處理與燒結製程等背景知識，主攻適用於 3D 列印的光固化高分子、金屬粉末等新材料開發，其中製造業對金屬粉末等尖端科技材料的需求強烈，研發投入相對較多。軟體開發商包括一般或專門支援 3D 列印服務的軟體公司，主攻更高效率的列印軟體開發，服務對象以供應端為主，亦有少量為產品製造業者提供客製化方案。以西門子為例，其持續精進 PLM NX 軟體對 3D 列印整合技術的支援，同時也為 HP 等客戶開發專用的 3D 列印軟體，另 Adobe、Autodesk、Dassault、Materialise 等同樣提供 3D 列印軟體。不論是外形或細部結構的建置，3D 列印軌跡皆可能影響結構強度、

原料消耗量等製造參數，故 3D 掃描/逆向工程開發商對既存物件結構分析後提供最佳的 3D 列印軌跡。

3D 列印服務商則從事 3D 列印產品的打樣、製造，或提供產品製造業者 3D 列印形成的製造模具，以及工程設計與諮詢等服務。3D 列印服務商既是供應商也是消費者，在 3D 列印價值鏈中扮演中介的角色，供應端的所有成員亦常合作開發客製化的服務方案。



資料來源：Muller, A. & Karevska, S., 2016，STPI 整理。

圖二：3D 列印價值鏈

四、發展趨勢

2011 至 2015 年之間，3D 列印市場總額從 15 億成長到 42 億美金。但近期主要設備商的營收年成長率呈現衰退，如'14 年到'15 年 Stratasys 的營收衰退了 7.2%，3D Systems 只成長了 2.5%。相反的，小型設備商，如 Voxeljet 和 Arcam 同期分別成長了 48% 和 70%。純粹提供 3D 列印服務的公司同期間更是大幅成長，如 Proto Labs 成長了 168%，Materialise 成長了 25% (Muller, A. & Karevska, S., 2016)。德國顧問公司 Ernst & Young 的分析師認為影響 3D 列印產業營收的主因還是在於產品本身。相對於實際應用較少的 3D 列印塑膠製品，3D 列印金屬的需求強烈，EOS、SLM、Concept Laser 等金屬 3D 列印設備商同期的營收分別成長了 53%、97%、54%。製造業對 3D 列印金屬製品的強烈需求也帶動相關週邊產業的發展，像是 3D 列印工程或是顧問公司。分析師預期 3D 列印產業的市值年成長率會維持在 25% 以上，並在 2020 年達到 121 億美金。

由上述市場需求可知，近期 3D 列印技術發展會著重在 3D 列印金屬材料與設備的開發；相關研發方向有三：(1)低價、(2)高速、(3)大型化。2014 年後選擇性雷射燒結的專利過期，使得許多企業開始投入實用性較高的金屬 3D 列印開發，如美國 Tecnica 公司的小型選擇性雷射燒結設備低於 2 萬美金，價格不到一般機台的十分之一，瑞士 Sintratec 公司的產品更不到 5,000 歐元。為了解決 3D 列印最為人詬病的過慢問題，廠商的解決方案則是增加雷射頭等的固化源的數量。與機器手臂整合則能大幅增加產品尺寸，機器手臂能在軌道上無限延伸地執行 3D 列印，生產大型高強度、高精度的複合材料航太零件。

另一個 3D 列印技術性發展的驅動力則是材料的開發(Burke, B., Cearley, D. W., & Walker M. J., 2016)。MarkForged 公司開發的複合材料 3D 列印技術，可以列印具有高強度/重量比的碳纖維複合材料。Airbus A350XWB 客機上使用了超過 1,000 個 3D 列印零件，減輕飛機重量達 30~55%，製造過程產生的廢料減低了 90%。SpaceX 所生產的 3D 列印鉻鎳鐵合金引擎將搭載於 Dragon V2 太空梭上。丹麥的 Xilloc 公司開發了名為 CT-Bone®的磷酸鈣 3D 列印材料，形成的結構體在人體內能轉化為骨骼。Organovo 公司已成功 3D 列印出能用在藥物試驗的人體組織。普林斯頓的科學家利用電子與生物複合材料 3D 列印出具有聽力的人造耳。Spritam 是美國食品藥物管理局第一個許可的 3D 列印藥物，它具有口內高速溶解的特性，對吞嚥困難的病患有非常大的幫助。3D 列印近期重點技術議題整理如表二所示：

表二：3D 列印近期發展重點

重點議題	技術	應用
低成本高解析度系統	低成本雷射系統	• 降低3D列印金屬製品成本
	速度	• 產率提升
大型產品製造	多光源	• 機翼製造
	機器手臂整合系統	• 大面積曲面影像感測器陣列
材料	自組裝墨水	• 高強度-重量比結構
	碳纖維複合材料	• 高強度-重量比結構
	鉻鎳鐵合金	• 航太引擎
	磷酸鈣	• 骨骼前驅物
	生物墨水	• 人體組織
	電子與生物複合材料	• 人造耳
	藥物	• 高速溶解性口服藥
	多彩複合材料	• 全彩工藝品
	黏合後燒結金屬粉末	• 低成本非雷射金屬燒結

資料來源：各主題相關文獻，STPI 整理。

若從長期預測來觀察 3D 列印發展趨勢(表三)，首先如上所述，近兩年內，美國食品藥物管理局已核准 3D 列印藥物 Spritam 的上市，Normal 等公司開始提供 3D 列印客製化耳機的服務，3D 列印打樣也已行之有年。2~5 年內，Airbus 在飛機上大量使用 3D 列印零件的情況會在業界發酵，日本 2015 開始將 3D 列印教育經費編入預算的政策會在更多國家看到。五年後，Airbus 所帶動的 3D 列印零件市場，預計會使 3D 列印成為製造業、物流業的必備工具。在此同時，3D 列印生物組織也會進入實用階段；取得設計檔案就能輕易仿製產品則會成為智慧財產的重要議題。10 年後，3D 列印生物組織的成果，預計會被運用在實際的器官移植上，3D 列印也會成為製造業的主流設備，奈米級 3D 列印亦會到達實用階段。

表三：技術效益與主流產業採用時間點

效益	預計採用時點			
	2年內	2-5年	5-10年	10年以上
顛覆性	<ul style="list-style-type: none"> 3D列印藥物 	<ul style="list-style-type: none"> 航太應用 	<ul style="list-style-type: none"> 客製化人工關節 石化產業應用 牙醫用裝置 零售3D列印產品 	<ul style="list-style-type: none"> 3D列印器官移植 4D列印 大型3D列印製造
高度	<ul style="list-style-type: none"> 客製化耳機 	<ul style="list-style-type: none"> 醫療用裝置 3D列印電子元件 專營3D列印服務單位 	<ul style="list-style-type: none"> 生物材料研發 人體組織 3D列印在製造業之必要性 3D列印在物流業之必要性 汽車業應用 透過擴增實境之製造 消費性3D列印 客製化穿戴裝置 智財議題 	<ul style="list-style-type: none"> 奈米級3D列印
中度	<ul style="list-style-type: none"> 打樣 	<ul style="list-style-type: none"> 義務教育課程 	<ul style="list-style-type: none"> 家用3D印表機的普及 	

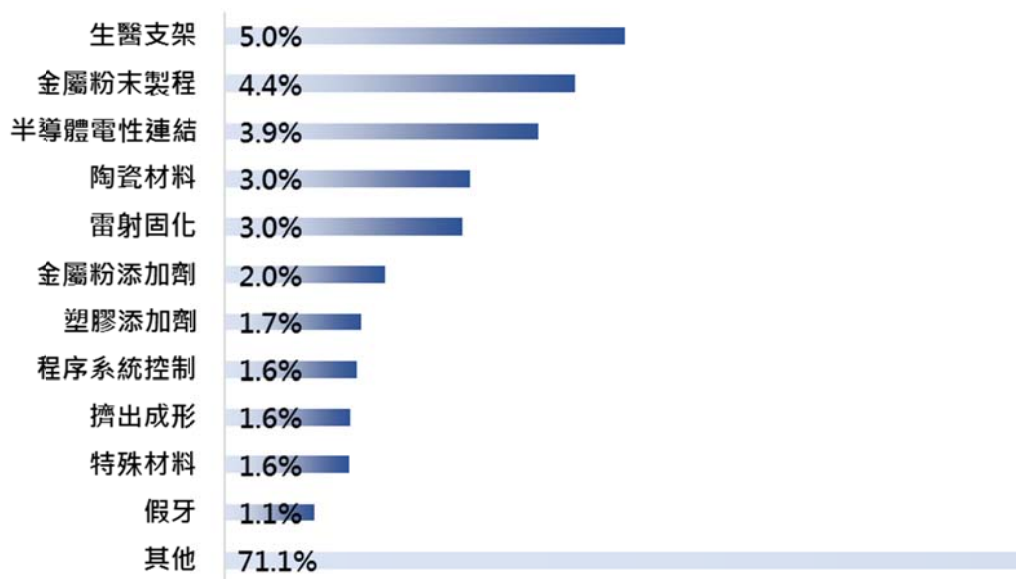
資料來源：Gartner，STPI 整理。

從專利的申請來觀察 3D 列印發展趨勢可發現，美國專利與專利申請案超過五千件，如資料來源：美國專利商標局，STPI 整理。

圖三所示。其中的應用性專利以生醫相關數量最多，技術細節分別有生醫支架、假牙等。總體數量最多則為材料的開發，包括金屬粉末、陶瓷材料、添加劑等。從中也可看出 3D 列印金屬相關技術(粉末、雷射固化方法等)的重要性占所有材料相關技術的最高比例。

在專利的技術與功效對應方面，運用 3D 列印提升手術成功率的專利最多。每個人的人體構造不盡相同，右心症是最明顯的例子。過去即使有斷層掃描等技術讓醫生能把病患體內的狀況看得更清楚，但始終無法「練習」開刀。而 3D 列印可以將斷層掃描等技術取得之立體影像轉換為實物模型，甚至用複合材料

讓模型更逼近真實的人體器官，使得醫生可以在實際開刀前，用 3D 列印模型進行手術的演練，如此重要的應用即在專利的申請上顯現出來。其次是對 3D 列印設備進行模組化，以便於損壞時快速拔插替換，進行維修的專利。數量排名第三的是強調 3D 列印在客製化、製造複雜結構的優勢，以及有關如何在最節省原料的情況下測試設備，以進行異常監控的專利。其次尚有快速正確轉換 3D 數據以加速製造，列印複合材料以提升機械強度、增加彩度、調整材料性質等，以及利用特殊機構以加強出料控制、提升解析度的專利，以及利用光感測器監控光源異常，以複合材料列印生物體，增加同機台內的光源或噴頭以加速製造，以校正統、旋轉微調系統提升解析度，改良噴頭結構以提升解析度等專利。



資料來源：美國專利商標局，STPI 整理。

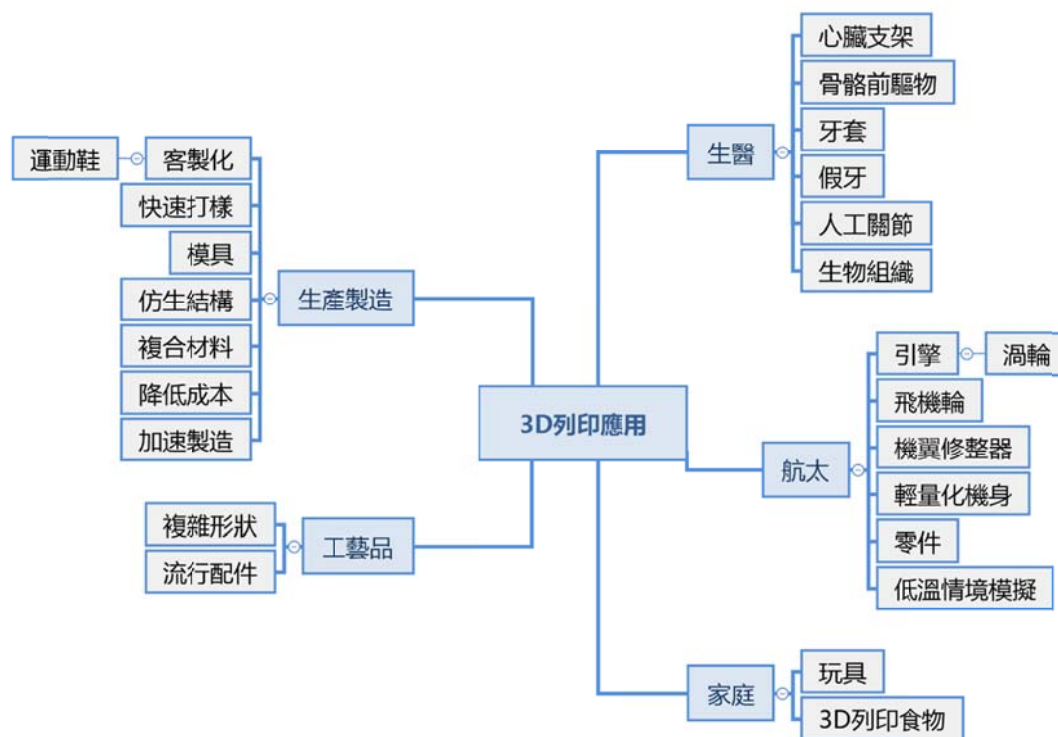
圖三、3D 列印次領域的研發狀況

五、創新應用案例

積層製造應用範疇如圖四所示。在生產高強度/重量比的力學結構方面，3D 列印是傳統加工技術無法匹敵的，以直接金屬雷射燒結一體成形的鋁製飛機機輪，就是一個非常好的例子。傳統上由 42 個以上的零件壓鑄模組(die-cast assembly)而成的飛機機輪可以經由積層製造一體成形，工時也從數周縮短為三天(Atzeni & Salmi, 2012)。另一個例子是奇異的 LEAP 引擎噴嘴，傳統上由 20 個鈦製零件焊接而成，而鈦屬於貴又難加工的金屬，鈷鉻合金較鈦金屬便宜，具有密度低、韌性強、抗腐力強、高溫(可達攝 982 度)下強度穩定的特性，以直接金屬雷射熔融法製造的一體成形鈷鉻合金引擎噴嘴，不但壽命較長，重量也減少了 25%。此外，人體對鈷鉻合金的低排斥性，使得鈷鉻合金的積層製造還能用來生產生醫產品(Kellner, 2013)。

生醫材料方面，Arcam AB 已經開始以電子束熔融法量產鈦髖白("EBM for Orthopedic Implants," n.d.)。美國一年的髖關節置換手術高達 44 萬件。為了與人體之間進行癒合，傳統半球殼形鈦髖白除了經歷昂貴的鍛造成形，表面需進一步塗覆一層多孔性材料，以電子束融熔法生產鈦髖白時則能直接做出一體成形的多孔性鈦髖白。Align Technologies 公司開始以光固化立體光刻法生產商品名為 Invisalign®的透明矯正用塑膠牙套，在取得病患牙齒的 X 光照片、齒模後，即可快速積層製造出這種牙套的模具，再灌入塑膠前驅物、熱固化後形成牙套。2012 一年內 Invisalign®的產量為 1,720 萬件。上述兩種每年生產超過 1 萬件產品的產業型態，已讓積層製造技術走入量產的範疇。

以塑膠材料為主的小型積層製造機台則漸漸會像一般印表機般普及。F1 賽事是帶動汽車工業發展的重要推手，其中以 Caterham 車隊為例，從 2014 年開始，Caterham 每個月會用 3D 列印出 800~900 個賽車零件的打樣，以加快賽車設計速度並降低成本(Celada, 2015)。隨著 New Balance®開始銷售 3D 列印的運動鞋(Dengate, 2016)，可預見將來一般人就能在家用塑膠材料 3D 列印機訂做自己的鞋子。如 Autodesk 123D™、Tinkercad 等軟體都支援積層製造的家庭式應用。



資料來源：各主題相關文獻，STPI 整理。

圖四：3D 列印應用範疇

表四列舉了包括 Airbus、Align Technologies、Arcam、Boeing、Caterham、GE、MTU、Siemens、Stratasys、UTC、Xerox 等企業的 3D 列印應用案例：

表四：3D 列印的創新應用

企業名稱	產業別	國家	應用案例
Airbus	航太	法國	空中巴士已研發出重量減低45%(30公斤)而強度更強的艙體隔牆，使用的是APWorks開發的鋁鎂鈦合金Scalmalloy®；若將艙體整個都用這種選擇性雷射熔融製成的仿生高孔隙率合金，預計省下的油料相當於每年減少465,000公噸的二氧化碳排放量。
Align Technologies	生醫	美國	Align開始以光固化立體光刻法生產商品名為Invisalign®的透明矯正塑膠牙套；在取得病患牙齒的X光照片、齒模後，即可快速積層製造出這種牙套的模具，再灌入塑膠前驅物、熱固化後形成牙套。2012一年內Invisalign®的產量為1720萬件。
Arcam	生醫	美國	美國一年的髖關節置換手術高達44萬件。為了與人體之間進行癒合，傳統半球殼形鈦髖臼除了經歷昂貴的鍛造成形，表面需進一步塗覆一層多孔性材料；以電子束熔融法生產鈦髖臼時則能直接做出一體成形的多孔性鈦髖臼。
Boeing	航太	美國	波音在2016年8月發表了和橡樹嶺國家實驗室合作開發，用於機翼製造的3D列印修整鑽孔器。這個修整鑽孔器由大型融合沈積塑模機製成，長度5.3公尺，寬度1.7公尺，重達0.74公噸，被金氏世界紀錄承認為目前世上最大的3D列印產品，將用於777X客機的開發。
Caterham	汽車	英國	F1賽事是帶動汽車工業發展的重要推手。Caterham車隊從2014年開始，每個月會3D列印出800~900個賽車零件的打樣，以加快賽車設計速度並降低成本。
GE	航太	美國	奇異的LEAP引擎噴嘴直接以鈷鉻合金雷射熔融法製造後，不但壽命較長，重量也減少了25%。
MTU	航太	德國	MTU的3D列印飛機引擎內窺鏡利用了EOS公司機台所生產的鎳合金，主要用於引擎的進一步修正改良或客製化，已成功降低Airbus A320neo的油耗達15%。
Siemens	製造	德國	西門子與HP合作改良多彩複合材料積層製造技術，目標包括將解析度提升到體積像素(voxel)的層次，提升10倍的列印速度，以及將3D印表機的成本降低一倍。一旦解析度達到體積像素的層次，產品從質感、密度、強度、摩擦力，到電性、導熱性等都能被精細地微調。
Stratasys	航太	美國	空中巴士2016年認證Stratasys的融合沈積塑模樹脂材料9085 3D對飛機零件的適用性；該認證標準有關強度重量比、耐火性、低燃燒煙塵度、低毒性等。以9085 3D進行飛機零件製造同時具有低成本、低工時等優點。
UTC	航太	美國	UTC在2016年3月投資8百萬美金，成立材料與製程工程實驗室，其中以開發積層製造為重點項目，主要應用於飛機剎車等重要航太零件的新材料包括耐高溫複合材、碳材與碳化矽材料等。
Xerox	消費性電子	美國	全錄正利用3D列印技術開發新型態印刷電子技術，包括應用於車用或穿戴式裝置、甚至進一步具有自組裝功能的特殊墨水，應用於醫療、保全領域的大面積曲面影像感測器陣列，以及客製化的物聯網物件等。

資料來源：各企業發佈資訊，STPI 整理。

六、國際政策動向

3D 列印成為熱門話題的起點，是 2013 年美國總統歐巴馬的國情咨文演講，當時美國預計投資 10 億美元，建立包括專攻 3D 列印的 15 間創新製造研究所。根據國際數據公司(International Data Corporation, IDC)的調查(Lonjon, C., 2016)，2016 年美國政府對代頓研究院大學(University of Dayton Research Institute, UDRI)投資 800 萬美金研發 3D 列印相關技術，以提供美國空軍更安全的高效率設備。同年德國對積層製造基金投資 340 萬歐元；英國政府在 7 年內投資 3,000 萬歐元在開發 3D 列印相關的航太技術上；中歐及東歐國家 2016 年總共在 3D 列印相關硬體、軟體、服務與材料的開發上投資 9 億 1,700 萬歐元。亞洲國家政府的 3D 列印相關投資年增率約在 23%，預計在 2019 年達到 15~43 億美金；其中南韓政府成立 3D 列印工業發展委員會(3D Printing Industry Development Council)的專責機構，2016 年投資 230 萬美金在協助企業相關人員的訓練上，並預計在 2020 年時全國具有一千萬的從業人員。

2013 年開始，新加坡財政預算編列 5 年 5 億美元的 3D 列印技術開發計畫，目標在提高人力技術水準，開發相關新商業模式，並建立 3D 列印生態體系。南非自 2014 年起合計已在 3D 列印相關基礎設施與技術的研發上投入超過 2,400 萬美金；2016 年投入的 200 萬美金將著重於鈦金屬醫療植入物、航太零件及設計領域的研發。杜拜 2016 年 5 月建造了世界第一棟一層樓高的 3D 列印建築，其政府將進一步投資 2.7 億美金在主要與 3D 列印相關的研發項目上；預計 2019 年起，杜拜建築業使用 3D 列印建築材料的比例會以 2% 逐年提升。此外，荷蘭政府在 2016 年與企業、研究單位共同投資了 1 億 5,000 萬美金的 3D 列印研發計畫，其中大部分的錢會挹注在應用科學研究荷蘭組織(The Netherlands Organization for Applied Scientific Research, TNO)、埃因霍溫科技大學(Technical University of Eindhoven)，以及 3D 列印中心 PrintValley 2020 等十多個單位。未來亦會提供 4,000 萬到 1 億 3,000 萬歐元的 15 年無息貸款給相關研究單位與企業。

日本經濟產業省 2013 年發佈 3D 列印推動方向與建議相關報告後，日本政府開始大動作協調產學界開發新型 3D 列印技術，並投資「技術研究組合次世代 3D 積層造形技術總合開發機構」研究計畫，其 2013~2018 年間總預算超過 64 億日圓。該計畫總目標以 2013 年 3D 列印各最佳參數為基準點，2020 年造形速度要達 10 倍、精度 5 倍、最大容許體積為 3 倍、價格 50%，並具傾斜積層能力。

中國早在二十世紀就開始 3D 列印技術的推動，2012 年成立「3D 打印技術產業聯盟」，以 2 億人民幣投資 10 座創新發展中心。2015 年中國工業與信息化部發布「國家增材製造產業發展推進計劃(2015-2016 年)」，內容是有關 3D 列印設備、材料、標準等的相關推展，以及促進 3D 列印技術和傳統製造技術領域的結合，政府並將主動協助開發新應用與新市場。目標包括(1)建立產業標準體系；(2)建立航太、生醫等示範中心；(3)市場總額年均增長速度 30% 以上。執行計畫內容包括(1)突破性材料開發；(2)提升製造水準；(3)提升設備自製能力。政策措施包括(1)加強統籌協調；(2)加大財稅支持力度；(3)拓寬投融資渠道；(4)加強人才培養和引進；(5)擴大國際交流合作。2016 年 8 月，中國國家住房和城鄉建設部在其公布的「2016-2020 年建築業信息化發展綱要」中特別提到，將積極發展建築資訊模型(Building Information Modeling, BIM)在 3D 列印建築材料的應用，第一步會建立統一監管和服務平台，並開始建設示範性建物。將 3D 列印寫入發展綱要，意味著中國從國家戰略高度上，認可了 3D 列印技術在建築業應用的優勢。

上述各國 3D 列印相關政策整理如表五。

表五：各國 3D 列印相關政策

國家或地區	方案	要點
德國	積層製造基金(2016；340萬歐元)	• 推動3D列印技術發展
新加坡	3D列印技術開發計畫(2013~2017；5億美金)	• 提高人力技術水準 • 開發相關新商業模式 • 建立3D列印生態體系
荷蘭	無息貸款方案(2016~；1億3000萬歐元)	• 建立3D列印生態體系
	3D列印研發計畫(2016；1億5000萬美金)	• 推動3D列印技術發展
英國	航太計畫(2016；3000萬歐元)	• 推動航太3D列印實用技術
	創新製造研究所(2013)	• 推動3D列印技術發展
美國	代頓研究院大學研究計畫(2016；800萬美金)	• 提供美國空軍更安全的高效率設備
南韓	人才培訓(2016；230萬美金)	• 2020年全國相關從業人員達一千萬
	3D列印工業發展委員會	• 推動3D列印技術發展
南非	3D列印研究計畫(2014~；2400萬美金)	• 基礎設施建立與技術開發
	特定領域計畫(2016；200萬美金)	• 鈦金屬醫療植入物、航太零件及設計領域相關研發
社拜	3D列印技術開發計畫(2016；2.7億美金)	• 3D列印建築材料使用年成長率2%
日本	技術研究組合次世代3D積層造形技術總合開發機構(2013~2018；64億日圓)	以2013年3D列印各最佳參數為基準點，2020年 • 造形速度10倍 • 精度5倍 • 最大容許體積3倍 • 價格50% • 傾斜積層能力
中國	國家增材製造產業發展推進計劃(2015-2016)	• 建立產業標準體系 • 建立航太、生醫等示範中心 • 市場價值年均增長速度30%以上
	3D打印技術產業聯盟(2012；2億人民幣)	• 10座創新發展中心
	2016-2020年建築業信息化發展綱要	• 建築資訊模型在3D列印建築材料的應用
中、東歐多國	3D列印研究計畫(2016；9億1700萬歐元)	• 推動3D列印技術發展

資料來源：各國政府，STPI 整理。

七、簡析與建議

3D 列印是 2015 年行政院生產力 4.0 發展方案所列三大關鍵核心技術之一。傳統加工方法(鑄造、銑削、焊接等)無法完成的複雜結構，對 3D 列印而言輕而易舉。「高強度/重量比材料」是複雜結構最實際且重要的應用。而目前 3D 列印金屬材料已能滿足這種需求，業界下一階段的目標是開發超大型 3D 印表機，讓 3D 列印金屬材料能以更低成本應用在飛機機體等大型結構上。3D 列印複雜結構的另一種應用是客製化產品，這在生醫產業非常受到重視，每年用 3D 列印模具製造的牙套早已超過千萬件，3D 列印關節亦會在幾年內普及。

上述實用性議題確實反映在市場總額與專利申請的變化上。3D 列印產業的市場總額持續增長，但增長的份額主要落在生產 3D 列印金屬設備、材料、產品的企業上，市占率最高但不專注在金屬材料的企業營收出現衰退。從專利的申請變化亦能看到，3D 列印金屬設備、材料的改良專利占最多數，其次是 3D 列印在生醫方面的應用專利。

3D 列印產業在歐美已從政府補貼為主的時期，過渡到企業主動投資的階段，不論從奇異的引擎噴嘴、波音的機翼修整鑽孔器，或是空中巴士的機艙隔牆，我們都能看到 3D 列印金屬技術所帶來的高價值市場正在形成。

從奢華的阿聯酋航空，世界最高的哈里發塔，到被譽為世界第八大遺跡的棕櫚群島，阿拉伯世界極盡所能在後石油時代吸引全球商機，「每年 3D 列印建材使用成長率 2%」這樣的口號想必在相同的動機下被提出來，3D 列印建材的龐大商機是台商可以探索的投資方向。

亞洲國家政府則保持著國家層級的推動力道。近期中國一方面在「2016-2020 年建築業信息化發展綱要」中呼應了杜拜對 3D 列印建材的需求，「國家增材製造產業發展推進計劃」更從設備、材料、新商業模式等，對 3D 列印技術進行著全面性的推動。日本 2013~2018 的「三次元造形技術核心製造革命計劃」則維持紮實的一貫作風，針對 3D 列印速度、精度、體積、成本，訂定 50 項以上考核目標，刀刀切中要害，2016 年 7 月期中目標達成率超過九成，這種實事求是的政策發人省思。

台灣的契機則在於國機國造與生技醫療。正當波音、空中巴士把金屬 3D 列印技術導入標準飛機製造流程之際，總統宣示了國機國造的政策，國造飛機技術應跟上航空業主流的步伐，有了實際的產品，也會直接帶動相關產業的發展。另一方面，台灣醫療產業擁有很多頂尖人才，在這種背景的支持之下，發展 3D 列印生醫技術一定大有可為。

參考文獻

- GE Plans to Invest \$1.4B to Acquire Additive Manufacturing Companies Arcam and SLM; Accelerates Efforts in Important Digital Industrial Space. (2016, September 6). Retrieved from http://www.geaviation.com/press/other/other_20160906.html
- E. Herderick (2011, October). *Additive Manufacturing of Metals: A Review*. Paper session presented at the Materials Science and Technology 2011, Columbus, Ohio.
- Atzeni, E., & Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 1147-1155. doi:10.1007/s00170-011-3878-1

- Basilier, P., Burton, J., Kutnick, D., Shaffer, V., & Shanler, M. (2016). *Predicts 2017: 3D printing accelerates* (G00316164).
- Tomas Kellner (2013, July 1). Joined at the Hip: Where the 3-d printed jet engine meets the human body - GE Reports. Retrieved from <http://www.gereports.com/post/74545196348/joined-at-the-hip-where-the-3-d-printed-jet/>
- EBM for Orthopedic Implants. (n.d.). Retrieved from <http://www.arcam.com/solutions/orthopedic-implants/>
- Jeff Denge (2016, April 11). New Balance Wins Race for 3D Printed Running Shoe. Retrieved from <http://www.runnersworld.com/running-shoes/new-balance-wins-race-for-3d-printed-running-shoe>
- Celada, L. (2015). *How 3D printing is changing the shape of Formula 1*. Retrieved from <https://www.fespa.com/news/features/how-3d-printing-is-changing-the-shape-of-formula-1.html>
- Burke, B., Cearley, D. W., & Walker M. J. (2016). Top 10 strategic technology trends for 2016: *3d-printing materials* (G00296574).
- Muller, A. & Karevska, S. (2016). *How will 3d printing make your company the strongest link in the value chain? EY's global 3d printing report 2016*. Retrieved from [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report/\\$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report/$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf)
- Lonjon, C. (2016). *Where in the world is 3d printing? 3d printing investment by countries and companies*. Retrieved from <https://www.sculpteo.com/blog/2016/08/24/where-in-the-world-is-3d-printing-3d-printing-investment-by-countries-and-companies>