

3D 金屬列印

身障重建中心研究員 王世仁

Rayna 等人(1)在 2016 年的文章就曾指出，隨著技術的不斷地進步，3D 列印正在改變商業模式，從原本只是為了快速成型(rapid prototyping)的創新，逐漸發展成快速工具(rapid tooling)和數位製造(digital manufacturing)，甚至是將來家家戶戶都有 3D 列印機的居家製造(home fabrication)四個階段。如果將 3D 列印在工業界發展的四個階段套用在我們醫院端，大抵就是 3D 影像重組和列印輸出、手術導引和術前規劃、3D 列印醫療器材，以及將來可能發展出的 3D 生醫列印出組織和器官。

隨著技術的不斷精進，3D 列印技術中的選擇性雷射燒結(selective laser sintering，簡稱 SLS)更是實際融入到汽車和其他工業界的製造，其優勢就是可縮短研發的時間、製程有彈性、產品品質等效於開模射出成型的方式，以及可製作出符合強度、精度和機械性質的具有功能性之原型(prototype)等(2)。而 SLS 技術也被運用在本文所要介紹的 3D 金屬列印。

尤其，金屬列印實現了 3D 列印醫療器材的可能性，而精準醫療所需的病人特定性植入物(patient-specific implant)，應該將是技術發展的時代趨勢，事實上，也已經有 3D 列印病人特定性植入物的案例報告(3)了。只不過目前 3D 金屬列印機所費不貲，從國外進口的要三千萬，本土製作的金屬列印機也要六百萬到一千萬的價位；還好，工業技術研究院在台南的雷射與積層製造科技中心，可接受委託 3D 金屬列印，經由本院陳威明副院長的介紹認識了工研院負責金屬列印的黃偉欽博士，本院長官和同仁若有金屬列印的需求，可透過 3D 資源中心這邊來聯繫。

➤ 材料形式

目前 3D 金屬列印的材料形式大致有粉末(powdered metal)和線材(spoiled metal)兩種(4)，其中金屬粉末是目前比較常用的形式，係將融熔金屬以惰性氣體透過噴嘴來噴出液態金屬，來產生霧化(atomization)粒，而霧化粒在冷卻和固化之後，就會形成細緻而均勻的金屬粉末，金屬粉末的球形微粒尺寸大約是 50 到 150 微米，3D 金屬列印需要有特定尺寸的粉末，而會透過篩子來過濾，並可確保粉末尺寸的均勻化。

金屬線材的製造則是以模具的擠出成形，先前在工業界的焊接如氬焊(Tungsten inert gas welding，簡稱 TIG)就有使用金屬線材，目前用在金屬列印的線材大約是 0.7 到 2.4mm，線徑較粗會使得列印速度較快，而線徑較小的金屬列印則可有較高的精度，金屬線材是使用在金屬沉積(metal deposition)的製造程序。

➤ 3D 金屬列印方式

金屬列印方式大致可區分成結合金屬(bound metal)、金屬沉積和粉末融合(power bed fusion)三種方式，以下如一介紹。

1. 結合金屬

此技術也稱為 ink-jet、xjet、HPMJ、數位金屬和結合噴射等，結合金屬的列印方式係以結合劑(binding agent)將金屬粉末產生出所要的幾何形狀，典型的粉末結合是透過噴射或細絲擠出來產生原型件(green part)，接著的步驟就是要移除結合劑、高溫燒結(sinter)和/或滲滲(infiltration)。此種金屬列印所製造的元件會呈現多孔性的特徵，而高溫燒結和滲滲後則會大大地減低多孔性。

典型的去除結合劑和高溫燒結的程序會在溫控爐內進行，加熱 24~36 小時，透過高溫燒結可將金屬粒子融合成為金屬零件，但是冷卻後的收縮，會使得最後的幾何尺寸難以預測，因此所列印的元件若有精度和均勻度的需求，就必須在設計階段加以考量，甚至是重複嘗試。

滲滲是結合金屬 3D 列印中的第三道的選擇性製程，可以使用像是青銅等材料來填充結合劑所被移除後所留下的孔洞，從而來強化其機械性質，以青銅滲滲可達成約 95%完全稠密的程度。

結合金屬式 3D 列印的優點包括成本較低、無須使用工具、可列印複雜的元件、列印的表面還不錯；缺點則是會有冷卻收縮和導致嘗試多次的設計、元件的壁厚很難均勻、機械性質較低、尺度精度有所限制以及能夠使用的材料種類有限。

2. 金屬沉積

此種方式也被認定是雷射成形(laser engineered net shaping)、直接光製造(directed light fabrication)、3D 雷射層積(3D laser cladding)或直接金屬沉積(direct metal deposition)，其產生幾何形狀係在電子束、雷射或電漿弧的熱源中，進給線材或噴出金屬粉末到基板上，再將其結合成所要的元件。此種 3D 金屬列印進料的方式限制了其精密度，因此往往都還需要再加工，才能夠達到一般可接受的公差。

目前常見的應用是拿來在現有物件上添增材料，而不是用來產生新的元件，例如在航太產業，金屬沉積就用來維修現有價格高的金屬元件，像是引擎渦輪葉片；或是將昂貴的材料沉積在基材上，以減少此昂貴材料因為加工而產生的廢料。沉積的控制可用多軸的數值控制或是使用先進的機器手臂系統。

金屬沉積式 3D 列印的優點包括可維修或製造大型元件、密度高(超過 99%)、快速材料沉積；缺點則是所列印的表面可能會是痛點、懸空的面會需要支撐、高殘留應力和扭曲變形、公差有所限制以及使用線材進給的方式也會有較低的精度。

3. 粉末融合

此金屬列印的方式也稱為直接金屬雷射燒結(direct metal laser

sintering，簡稱 DMSL)、選擇性雷射融合(selective laser melting，簡稱 SLM)、直接金屬雷射融合(direct metal laser melting，簡稱 DMLM)、lasercusing 和電子束融合(electron-beam melting，簡稱 EBM)，主要就是雷射或電子束來融合(melt and fuse)一層層的金屬粉末來成型。

粉床融合是目前最常見的 3D 金屬列印，尤其隨著高精密度的雷射和電子束的發展，使得此種方式的金屬列印可產出精密度高的元件，而且此方式也可讓元件的密度達到 99%以上，以及接近於傳統鍛鋼用切削成型的機械強度。粉床融合式的金屬列印是目前技術的主流，像是用來製作航太工業的火箭噴嘴以及火力發電廠的轉子等，根據 2018 年的統計報告(5)，粉床融合是裝機最多的 3D 金屬列印機。

粉床融合式的金屬列印的優點包括高精度和細緻的解析度、公差小、超過 99%的密度、金屬種類多、良好的材料性質、合適於小型或大型複雜的元件、設計的自由度高；缺點則是量產價格高、若忽視製程的管控就會使得所列印產品的均質性低、經常會需要支撐材，以及目前最大可列印尺寸約為 381mm×381mm×381mm。

比較上述三種的金屬列印方式，其中結合金屬的方式因為有冷卻收縮的特性，也就侷限了其發展性，然而其成本較低，可考慮用來製作原型等。而金屬沉積的金屬列印則是可用來金屬元件的修護工作，或者是用來製作大型的元件。而擁有較高設計自由度和精密度的粉床融合的金屬列印，就可提供較為廣泛的使用，並且可選用的材料種類也最為多樣，像是不鏽鋼、純鈦、鈦合金、鋁合金、鎳基合金、鈷鉻合金和銅基合金等，列印製品的材料性質也最佳，只是若要確保每件列印產品的均質性，就必須花費較多的心力來做製程管控。

➤ 結語

2011 年《經濟學人》的報導(6)指出，數位製造將會改變許多產品的製作方式，而號稱是第三次工業革命，而隨著技術的不斷進展，更是將 3D 列印推展到醫療端的應用，本文所介紹的金屬列印，也大幅提升了 3D 列印醫療器材的可能性，在精準化醫療的時代中，3D 列印出病人特定性植入物應該將是技術發展的時代趨勢。

一般而言，之所以採用 3D 列印技術的原因，不外乎(1) 客製化或病人特定性的需求，如手術規劃和手術導板以及植入物；(2) 製作模型，也就是把設計概念實體化，如教具和模型；以及(3) 傳統製造方法不易或無法製造的元件。工研院雷射中心的黃博士，就曾展示一支長度 230 mm 內徑 1.1 mm 外徑 1.41mm 的金屬列印的尖銳端中空工具，這幾乎是無法傳統機械加工的！美國 Stratasys 公司的技術報告(7)，也提到其與 DanaMed, Inc. 和 Laser Design 公司合作，以 3D 列印技術發展前十字韌帶手術的器具，其中加長工具一端有解剖的形狀，還有一小內孔來放置導線到膝關節，如果是採用傳統的數值控制機和鑄造方式，幾乎是

很難達成設計的需求的。

我們也與工研院雷射中心黃博士合作，嘗試用 3D 金屬列印手術器具，在很有限的經驗中，體會到如果是傳統機械加工可完成的工作，以製作費用來看，在目前就不值得採用 3D 列印的方式製作；而 3D 列印的鈦合金製品，在後續拋光、鑽孔和攻牙等等，大致都可採用現有的加工方式來進行，不會有問題；比較需要注意的是，元件間如果有要配合的面或是孔，就必須多加小心，最好是透過再加工的方式，才比較能夠達成配合的需求。

參考資料

1. Rayna T, Striukova L. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting & Social Change*. 2016;102:214-24.
2. 3dsystems.com. FROM PROTOTYPING TO PRODUCTION: SLS 3D PRINTING. 2019 [cited; Available from:
https://www.3dsystems.com/asset/thank-you-you-are-registered-0?thankYou=1&label=3D%20Printers%20-%20Gated%20-%20WEBINAR%20-%20From%20prototyping%20to%20production%3A%20SLS%203D%20printing%20with%20Alfa%20Romeo%20Racing&url=/webinar-from-prototyping-to-production-sls-3d-printing-with-the-alfa-romeo-sauber-f1-team&ppp=0&pst=1&software=0&odm=0&healthcare=0&3d_printer=SLS&software_product=&odm_area_of_interest=&healthcare_area_of_interest=
3. Luenam S, Kosiyatrakul A, Hansudewechakul C, Phakdeewisetkul K, Lohwongwatana B, Puncreobutr C. The Patient-Specific Implant Created with 3D Printing Technology in Treatment of the Irreparable Radial Head in Chronic Persistent Elbow Instability: Case Rep Orthop. 2018 Oct 23;2018:9272075. doi: 10.1155/2018/9272075. eCollection 2018.
4. Stratasy.com. Are All 3D Printed Metals the Same? 2019 [cited; Available from:
<https://www.machinedesign.com/learning-resources/white-papers/whitepaper/21838169/are-all-3d-printed-metals-the-same>
5. Intrado. SmarTech Publishing Issues 2019 Additive Manufacturing Market Outlook and Summary Report, Estimates AM Industry Grew 24% Percent in 2018, Total Market of \$9.3 Billion. 2019 [cited; Available from:
<https://www.globenewswire.com/news-release/2018/12/13/1667021/0/en/SmarTech-Publishing-Issues-2019-Additive-Manufacturing-Market-Outlook-and-Summary-Report-Estimates-AM-Industry-Grew-24-Percent-in-2018-Total-Market-of-9-3-Billion.html>
6. The third industrial revolution. *The Economist* 2012 [cited; Available from:
<http://www.economist.com/node/21553017>
7. Stratasy.com.
<https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/whitepaper/21834929/getting-the-most-out-of-metal-3d-printing-understanding-design-and-process-controls-for-dmls>
2016 [cited; Available from:
<https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/whitepaper/21834929/getting-the-most-out-of-metal-3d-printing-understanding-design-and-process-controls-for-dmls>