

# 10-28 講座：3D打印技術與建築應用

日期和時間：2025-10-28 19:13:59

地點：PolyU W402 IC

Use of Eco-concrete 3D printing for the HK Construction Industry

3D打印 環保混凝土 建築技術

## 主題

## 要點

1. 跨領域研究團隊及產學合作
2. 香港首宗政府3D打印項目
3. 3D打印設備介紹 (DIY、機械臂、CNC)
4. 特殊打印技術 (Biojet/Stone Printing)
5. 研究方向 (材料、設備、高級打印、海洋應用)
6. 古蹟修復應用案例
7. 業界推廣與教育 (論壇、培訓、學生合作)
8. 未來國際會議 (2026年)
9. 3D環保混凝土技術介紹
10. 3D打印基本組成

## 章節和主題

### 3D打印技術與產學合作

介紹一個由Archid、McTain、施保等成員組成的跨領域研究團隊，強調將研究落地的重要性。團隊在過去三年中已與業界夥伴展開合作。

- **關鍵點**

- 團隊為跨領域研究團隊，重視產學研合作。
- 已成功執行香港首宗政府3D打印項目，雖然規模小，但為一項突破。該項目與CEDD、康文署、ASD三個政府部門合作，歷時18個月討論。
- 與私人機構也有合作，如上年與Housesociety簽署MOU，以及與信和、私人DHK等合作。

- **Examples**

這是香港政府首宗3D打印項目，雖然規模很小，但被視為一項突破。

- 項目涉及三個政府部門：CEDD、康文處和ASD。整個討論過程耗時18個月，最終由Darren F. Gray批准執行。

## 3D打印設備與技術

介紹研究中心擁有的各類3D打印設備，從DIY設備到高階機械臂，以及其特殊技術。

- **關鍵點**

- DIY 3D打印機: 2019年自製的香港第一部DIY混凝土打印機，成本不足15萬港幣，而當時市價約需百多萬港幣。打印尺寸為1米x1米x1米。
- 機械臂 (Robot Arm): 價值460萬港幣，為全國第一部、亞洲第三部。特點是帶有輪胎，可移動和升高。
- 小型機械人: 希望能將技術帶到地盤現場進行打印，預計今年會實現。
- XYZ CNC機: 傳統、最普遍的類型。
- 材料研究用小機: 已改裝，加裝了CO2供應器以進行材料研究。
- Biojet (Stone Printing): 一種直接打印石材產品或雕塑的限定技術。
- 高級打印 (High Grade Printing): 未來的發展方向，**結合混凝土打印與金屬打印**。

## 3D打印的應用與推廣

闡述3D打印技術在不同領域的實際應用案例，以及團隊如何向業界和學界推廣此技術。

- **關鍵點**

- 海洋應用: 應用於建造人工珊瑚礁，Bishak公司已委託製作多個3D打印人工珊瑚礁，因其精準度要求相對建築業更高。
- 古蹟修復: 以打印龍形雕塑為例，使用3D打印18小時可完成3條，而傳統師傅需要1個月才能完成1條。
- 業界訓練: 為ASD的設計師提供半天的內部訓練。
- 教育合作: School of Design的學生與Sino合作，設計戶外傢俱。同時也向中學生推廣此技術。
- 業界合作: 團隊希望增加與業界的合作機會，並**提到香港科技大學最近首次在標書中寫明使用3D打印**，此為香港首例。

## 3D環保混凝土概念

[Julni Liu]介紹了3D環保混凝土（3D ECO Pocket Fintech Concource）的概念，並解釋了3D打印的基本組成。

- **關鍵點**

- PolyU在3D混凝土打印方面很強，而"Eco"部分指的是環保。
- 3D打印混凝土（Picking Pocket）是使用機械臂進行的製程，而非人手。

- 3D打印最基本由三樣東西組成：打印機、材料和設計。
- 打印機可以是門架式或機械臂式。

## 3D打印技術的基本組成與流程

介紹了3D打印混凝土所需的基本設備及其協作流程。

- **關鍵點**

- Printer: 執行打印動作的機器，它本身不懂配置，需要透過外部指令(稱為'booker')來引導其移動路徑。
- Mixer: 負責現場即時混合大量的混凝土材料。對於大量打印的場景，需要一個混合器來確保材料能即時供應。
- Pump (泵): 負責將由Mixer混合好的材料泵送到Printer的打印頭。

- **講解**

整個工作流程是：首先由Mixer在現場即時、大量地混合混凝土原料，然後透過pump(泵)將混合好的材料輸送出去，最後Printer會根據預先設定好的路徑(Path)指令，將材料一層層地擠出並塑形。這個過程可以實現快速建造，例如在半小時內完成一個頗為誇張的結構。

## Slicing技術

Slicing是3D打印中的核心技術之一，它負責將3D數位模型轉換為打印機可執行的物理路徑。

- **關鍵點**

- Slicing是將一個3D模型進行切片，並規劃出打印頭的移動路徑(Tooth Path)。
- 打印路徑並非唯一，同一個模型可以有多種不同的打印路徑，例如順時針繞圈、反過來走，或以不同的角度和方向進行打印。
- 整個3D打印技術的核心就在於3D建模(3D Modeling)和Slicing。

- **講解**

當我們有一個3D模型時，例如一個球體，Slicing技術會決定打印機要如何「畫」出這個球體。它可以讓打印機水平繞圈，也可以垂直繞圈，或者以更複雜的斜向路徑來建構。這種對打印路徑的精確控制是整個技術的關鍵，它直接影響最終成品的結構和外觀。

## 3D打印混凝土應用案例

透過全球多個實際案例，展示3D打印混凝土技術在不同場景下的應用方式、優點與技術特點。

- **Examples**

這是一個現場打印(On-site Printing)的案例。在建築工地現場，機器直接打印出建築物的牆體。

- 執行方式類似於現場灌漿。首先在現場搭建成一個框架，然後打印機械臂在框架內移動，擠出混凝土來建造牆體。
- 在擠出混凝土的過程中，會同時帶入一些磅羹(鋼筋)和蕨膏花(灌漿料)來增強結構。

這是一個採用預製組裝(Pre-fabrication)模式的案例。建築的各個組件在工廠內打印完成，然後運輸到現場進行組裝。

- 將一件件在工廠打印好的混凝土構件運送到工地現場。
- 接著像堆積木一樣將這些構件組合起來，構件之間會用rebar (鋼筋)和no接口(肩膀)連接，中間的縫隙會再補上混凝土。

同樣採用工廠打印、現場組裝的模式。這個案例的特點是大量重複印刷標準化組件，然後在現場快速砌築。

- 案例中的擋土牆高達4.2米，由每件約1米多高的標準化組件砌成。
- 這個案例的好處是設計自由度(屏幕方向)很大。
- 其結構設計利用了形狀學，無需傳統的rebar(鋼筋)或6s(鋼絲)，完全依靠構件本身的形狀來實現承重和穩定。

這個案例展示了打印複雜幾何形狀的能力，成功打印了一條具有斜向、非平面設計的樓梯。當時宣稱是英國最大的3D打印項目。

- 樓梯的打印路徑是斜向的，展示了Slicing技術在處理複雜曲面上的能力。
- 此樓梯最特別之處在於它是一個純坦柏(純壓縮)結構，像砌築拱頂一樣，沒有使用任何石矢(模板)或rebar(鋼筋)，完全依靠其幾何形狀來傳遞和承受壓力。
- 這個案例也凸顯了3D打印在製造模板(如底板和旁板)方面的優勢，可以大量、快速地生產。

## 3D環保混凝土打印 (Eco-Concrete Printing) 研究

介紹香港大學研究團隊在3D環保混凝土打印領域的研究，旨在透過AI技術提升打印質量和效率，並開發低碳環保的混凝土材料，以減少對傳統水泥的依賴。

### • 關鍵點

- 研究目標一：提升打印系統的智能化，實現即時監控和修復。
- 研究目標二：開發高紋理(High-buildability)的低碳材料，使其在打印後能快速成形並保持形狀。
- 研究成果：已成功打印一個2.5米高的結構，其中只用了30%的傳統水泥(OPC)，其餘70%為不同的替代材料，證明了減少碳排放的潛力。

### • 講解

此研究主要包含兩大部分：

#### 1. AI智能打印系統 (AI的手與眼):

- AI的眼 (監控): 透過高解析度相機，在打印過程中以毫秒級的速度拍攝大量圖像，收集打印過程的實時數據。

- AI的手(修正): 利用神經網絡等AI模型分析收集到的圖像，識別出打印缺陷(如塌陷、裂紋)的模式。一旦發現問題，系統能夠即時調整配方(例如，透過二級混合系統瞬間注入化學品改變砂漿屬性)或修改打印路徑，從而在打印過程中主動解決問題。

## 2. 低碳材料研發:

- GDBS: 作為一種成分，能有效幫助打印出的材料保持其形狀，從而減少對傳統波特蘭水泥(OPC)的依賴。
- 二氧化碳固化(CO<sub>2</sub> Curing): 研究將CO<sub>2</sub>注入到新拌的混凝土中。CO<sub>2</sub>能在短時間內與水泥發生反應，加速材料的硬化和形狀穩定，這項技術有潛力替代部分水泥的功能，達到固碳和減少水泥用量的雙重目的。

## 3D打印混凝土的未來發展方向

| 探討3D打印混凝土技術的前沿研究和未來應用目標。

### • 關鍵點

- 水下打印(Underwater Printing): 這是下一個要主打的目標，旨在解決傳統水下混凝土工程昂貴且困難的問題。目前全世界還沒有人成功實現。
- 合成結構(Composite Structure): 未來的研究不僅僅是打印作為模具的混凝土外殼，而是要將增強材料(如纖維)與混凝土一併打印出來，形成一個整體的、具有複合結構性能的構件。
- 永久模具(Permanent Formwork)的結構化應用: 研究如何將3D打印的永久模具的強度也納入結構計算中，或透過添加纖維(如碳纖維、鋼纖維)使其本身具備承重能力，而不僅僅是作為一個外殼。

### • 講解

水下打印的設想是開發出能在水下快速固化的特殊材料，並配合懂得在水下操作的機械臂(robot arm)進行打印。有趣的是，水的浮力反而有助於減輕上層結構對下層未乾固混凝土的壓力。

對於永久模具的應用，目前常見做法是打印一個外殼，然後在內部插入鋼筋(rebar)再澆灌混凝土。但這種做法會被質疑其結構貢獻。未來的研究方向是，讓打印的外殼本身就成為結構的一部分，或者在打印材料中直接加入短纖維，使其成為無需鋼筋的承重結構，適用於四、五米高甚至八、九米高的建築層。

### • 特殊情況

- 如果遇到下雨天氣，現場打印會受到影響，因為混凝土的固化受環境因素影響很大。
- 如果將3D打印結構作為永久模具使用，開發商(Developer)可能會抱怨牆體變厚，減少了實用面積。

## 3D混凝土打印技術的應用與優勢

3D打印技術，特別是在混凝土領域，已發展近二十多年。其核心優勢在於“複雜即免費”(Complexity is free)，即無論設計多麼複雜，如曲線或波浪形，由機器執行的成本是相同的。這徹底改變了傳統建築依賴模板（“釘板”、“帽子”）的模式，因為機器直接根據設計進行打印，無需製作模具。

- **關鍵點**

- 複雜即免費：打印曲線、紐紋或直線的成本相同，因為這是由機器自動完成，而非人手製作。
- 無需模板：省去了傳統建築中釘板、拆板的工序，節省了時間、人工和模板材料。
- 環保效益：由於無需模板且材料使用更精準，減少了建築廢料，淨化了整個工序。
- 高效率：打印速度極快，例如一台機器最快速度可達每兩秒一米，打印一條2.5米高的柱子僅需17分鐘，一個圓形Plantar僅需2分鐘。
- 設計自由度高：可以輕鬆實現各種有機形態 (Organic Form)、波浪 (Wave) 等特殊形狀，甚至可以打印出整隻小船。

- **Examples**

講者一位在歐洲開設工廠的朋友，其最好的生意是3D打印樓梯。傳統上，每條樓梯的層次和形狀都不同，需要獨立製作模板。而使用3D打印，一條長兩米、寬一米的傳統走火梯，只需約三十多分鐘即可打印完成，且不受形狀限制。

- 該案例展示了3D打印在生產具有獨特和複雜幾何形狀的建築構件方面的巨大效率優勢。

在一個CEDD (土木工程拓展署) 的地盤項目中，為建造地域停車場的柱蓋，採用了3D打印的模具。該柱子高2.5米，中間為Castor。這是一個結構組件的應用，如果中間放置鋼筋 (Rebar)，就能成為一個完整的結構件。

- 此案例說明3D打印不僅可用於直接成品，也可用於製作大型、複雜的模具，以輔助傳統的混凝土澆灌工藝。

一個正在進行中 (On-going) 的項目位於耀明村，計劃在中間製造一個結晶形的模型。此項目已籌備一年，預計在演講日期 (2025年10月28日) 之後的三個月後開始。

- 這個項目展示了3D打印在創造複雜、具藝術性的公共藝術裝置或建築特色方面的能力。

## 高速混凝土3D打印

一種創新的3D打印技術，能夠以高達每秒500mm的速度打印模組。團隊的材料科學被認為是頂尖的 (首10%)，其技術和落地經驗在亞洲處於領先地位。

- **關鍵點**

- 打印速度可達500mm/秒。
- 材料科學技術被認為是全球首10%。

- 結合落地經驗，該技術在亞洲處於頂級水平。

- **講解**

在香港的氣候環境下，打印時可能需要在周邊進行一些特殊處理（例如「按摩」）來確保打印普通藏品的品質。打印完成後，需要進行灑水養護（Water Curing）。團隊使用自己研發的配方，而非業界標準配方。

- **Examples**

講者展示了2-3年前打印的一條柱子，當時花費了數小時。提及內部可包含V-bar和踏板撞擊等技術。另外也提到東京大學教授打印了一條4米多高的柱子。

- 這個例子展示了該技術在建築領域的應用，能夠打印大型結構件。討論中涵蓋了內部鋼筋（Rebar/V-bar）的整合、打印時間以及打印後的養護（噴水）等實際操作問題。

## 曲線印刷技術

一種超越傳統X、Y、Z三軸打印的先進3D打印技術，能夠在非平面或曲面上進行打印。全球只有極少數團隊（少於5%）掌握此技術。

- **關鍵點**

- 全球掌握此技術的團隊不足5%。
- 團隊在一年內同時完成了曲線印刷技術和新材料的研發。
- 團隊認為他們在亞洲擁有最高的技術水平和最豐富的落地經驗。

- **講解**

傳統的3D打印是沿著X、Y、Z軸進行層層堆疊，而曲線印刷技術能夠實現更複雜的打印路徑，但具體技術原理未在談話中詳細說明。

## Binder Jetting（粉末黏合噴射成型）技術

一種使用粉末材料（如石膏粉、沙、大理石粉）和液體黏合劑來逐層構建物件的3D打印技術。此技術特別適用於製造精細、複雜且傳統模具無法實現的造型。

- **關鍵點**

- 能夠打印出非常精細、複雜的物件，例如內部有複雜結構的燈籠。
- 由於打印過程中周圍的粉末會提供支撐，因此無需額外的支撐結構。
- 打印完成後需要進行後處理，例如將成品浸在水中兩天進行水固化（Water Curing）。
- 可以用來製作模具，以澆鑄熔點約200度的金屬。

- **講解**

其原理是先鋪上一層粉末，然後打印頭會根據設計圖案噴射液態黏合劑，使特定區域的粉末黏合在一起。此過程逐層重複，直到物件成型。最後，將成型的物件從鬆散的粉末中取出，並進行固化處理。

- **Examples**

展示了用此技術製作的珊瑚、一個大燈籠內部包著一個小燈籠的複雜結構、以及外形扭曲的「沙壺」。此外，設計學院的學生也用此技術創作了一個結合了竹筏、印章和多種字體（胡蟹、古文、算書）的複雜作品。

- 這些例子突顯了該技術在高精度和複雜幾何造型上的優勢，能夠實現傳統工藝難以達成的藝術設計。

利用此技術製作了一個模具，然後將攝氏200度的熔融金屬倒入模具中，成功鑄造出金屬零件。

- 這展示了Binder Jetting技術的間接應用，即作為一種快速成型工具，用於輔助傳統的金屬鑄造工藝。

## 3D打印材料研究（玻璃粉應用）

團隊致力於研發比市售材料更優越的3D打印材料，其中一個主要研究方向是利用香港本地的廢棄玻璃，將其製成玻璃粉末並應用於打印材料中。

- **關鍵點**

- 團隊的主要研究方向之一是將廢棄玻璃製成玻璃粉，用於3D打印。
- 在傳統打印材料（如水泥）中加入玻璃粉，可以顯著改變成品的物理性質，例如使其變得更輕。
- 團隊正在使用相關設備進行玻璃磚的設計與開發。

- **講解**

透過將玻璃粉等回收材料與水泥基混合物結合，可以調控打印物件的密度、重量等性能，同時也實現了廢物利用，符合可持續發展的目標。

- **Examples**

講者現場展示了兩個物件作對比：一個是傳統配方製作的，非常重；另一個則加入了玻璃粉，重量明顯輕很多。

- 這個實例直接證明了添加玻璃粉作為填充劑或骨料，可以有效降低打印成品的密度和重量。

## 3D掃描於古蹟修復的應用

利用3D掃描技術對歷史文物或古蹟進行數位化記錄，以便進行分析、修復或複製。

- **關鍵點**

- 可以對文物進行非接觸式的精確數據採集。
- 掃描後得到的數位模型可用於3D打印複製或輔助修復工作。

- **講解**

透過3D掃描儀器捕捉物件的精確三維幾何數據，生成數位模型。此模型不僅可以作為永久的數位檔案，還能用於分析損壞情況、規劃修復方案，或直接透過3D打印技術製作出實體複製品。

- **Examples**

一位教授利用3D掃描技術進入一條隧道進行內部檢查，並根據掃描數據對其內部面貌進行了數位復原。

- 此案例說明了3D掃描在大型或難以進入的結構性古蹟的記錄與分析中的應用。  
提及一個大型雕像（原文為「雕箱」）曾被進行3D掃描，作為其修復項目的一部分。
- 這是在文化遺產保護領域中3D掃描的典型應用，透過精確捕捉藝術品的形態來為後續的修復或複製提供依據。

## 作業或建議

---

- 日後工作上若有需要3D printing，可聯絡講者的研究中心。
- 研究中心將於2026年在香港PolyU 舉辦一個國際性大型會議，具體日期待定後會再發訊息。
- 下一個要主打的目標是實現水下打印(underwater printing)。
- 正在進行一個關於MIC(組裝合成建築法)的研究項目，旨在評估是否可以將3D打印的永久模具(permanent formwork)的強度也納入結構計算中。
- 未來的研究方向是發展合成結構，不僅打印模具，還要將增強物料(如纖維)也一併打印進去，形成一個複合結構體。
- 稍後設有問答 (Q&A) 環節，並可到樓下參觀實物展品並繼續提問。
- 如果未來在日常工作中有任何特別形狀的設計需求，包括有機形態 (Organic Form)、波浪形等，可以尋求3D打印技術的協助。
- 講者希望與會者能將今天看到的內容分享到Facebook、LinkedIn、Instagram等社交媒体上，讓更多人知道理工大學在3D打印領域的研究和設備。
- Lukas的任務是在12月，讓PolyU 學生在城門河路進行拍攝，影片將送至新加坡的Base Center。