

國立交通大學  
National Chiao Tung University

出國報告（出國類別：學研訪問）

美國喬治亞理工學院之 3D 列印參訪

服務機關：機械工程

姓名職稱：鄭中緯 助理教授

派赴國家：美國 亞特蘭大 喬治亞理工學院

出國期間：103/8/16~8/24

報告日期：103/8/26

## 摘要

因執行「國際百大合作計畫-GaN 功率電晶體之元件可靠度測試系統研究—第 2 年」，於 103 年 8 月 16 日至 8 月 24 日赴美國亞特蘭大喬治亞理工學院(GT) 進行參訪，拜訪 Gwaltney Chair in Manufacturing Systems / Executive Director of the Georgia Tech Manufacturing Institute (喬治亞理工製造研究所) Prof. Ben Wang，進行 3D Printing 的合作或討論；以及在王教授實驗室進行 Aerosol-Jet Printing 實驗，並將印製電路(printed electronics)試片帶回臺灣進行後續飛秒雷射燒結 (femtosecond laser sintering)實驗與特性分析。

在雙方都有研發能量互補下，很快促成這次拜訪與具體洽談合作方向，規劃將第一階段研發內容，如 Aerosol-Jet Printing 與雷射燒結技術，在第二階段，具體應用於醫材等載具開發，並連結臺灣醫學單位進行測試驗證。這些研發成果，除將具國際領先之指標意義外，中長期目標為與臺灣醫材等相關產業連結，協助相關特色 3D 列印之產品發展。

# 目次

一、目的 .....	4
二、 過程 .....	4
2.1 與王教授進行 3D Printing 的合作討論： .....	4
2.2 參與王教授 Manufacturing by 3D Printing 演講： .....	7
2.3 進行 Aerosol-Jet Printing 實驗： .....	9
2.4 GTMI 與 Invention Studio 實驗室參觀： .....	10
三、 心得及建議 .....	14

# 本文

## 一、目的

因執行「國際百大合作計畫-GaN 功率電晶體之元件可靠度測試系統研究—第 2 年」，於 103 年 8 月 16 日至 8 月 24 日赴美國亞特蘭大喬治亞理工學院(GT)進行參訪，拜訪 Gwaltney Chair in Manufacturing Systems / Executive Director of the Georgia Tech Manufacturing Institute (喬治亞理工製造研究所) Prof. Ben Wang，進行 3D Printing 的合作或討論；以及在王教授實驗室進行 Aerosol-Jet Printing 實驗，並將印製電路(printed electronics)試片帶回臺灣進行後續飛秒雷射燒結 (femtosecond laser sintering)實驗與特性分析。

## 二、過程

以下將分別針對與王教授進行 3D Printing 的合作討論、參與王教授 Manufacturing by 3D Printing 演講、進行 Aerosol-Jet Printing 實驗、GTMI 與 Invention Studio 實驗室參觀等主題做說明：

### 2.1 與王教授進行 3D Printing 的合作討論：

配合王教授時間，主要碰面討論時間在 8/18 下午、8/19 下午、8/21 上午、8/22 上午，進行其實驗室參觀、3D Printing 意見交換、合作方向討論等，說明如下：

在 8/18 下午，王教授先請其博士後研究 Kevin Wang 與博士班學生 Scott，Chang-Sheng Wu 等人做實驗室介紹，以利於了解可能合作方向及進行 Aerosol-Jet

Printing 實驗。Kevin 介紹實驗室利用 3D Systems 的 Connex 350 與 Aerosol-Jet 兩臺設備所列印之產品，如圖 1，並以與這邊醫院合作之仿主動脈(aortic)內部局部阻塞元件為例作說明，在 2.2 節 Ben Wang 演講資料中，可更進一步了解其目的。

之後參觀這次在這邊要進行之 Aerosol-Jet 設備，這臺除 printing circuits 功能外，有加裝一組波長 830 nm 的雷射(Diode Laser)加熱模組，用於 printing 後之 sintering 處理。但目前針對玻璃轉換溫度小於上層材料所需之燒結溫度，則會產生基材破壞問題，因有這些問題，促成中緯這邊與 GT 在雷射燒結之合作契機。之後由中緯介紹交大以及目前研究方向，如圖 2。



圖 1 Ben Wang 實驗室之展示品

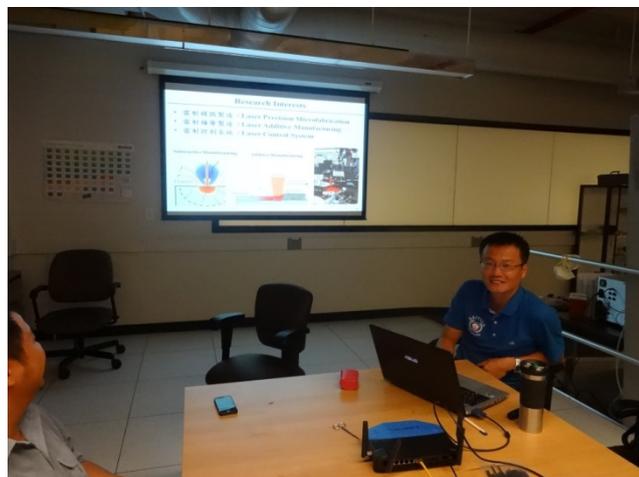


圖 2 互動交流

8/19 下午與 Ben Wang 進行第一次交流討論，王老師說明其 3D Printing 在醫材之發展想法，將以醫材輔具、植入醫材、人工細胞列印等短中長期目標做研發。並以影像處理、材料、設備、設計、醫材應用、市場行銷等方向做規劃，這些跨領域需連結不同研發伙伴，故他也正積極尋找合適團隊成員。由於他將在今年 9 月初協助中國醫藥大學成立 3D 列印醫療研發中心，也希望交大這邊可以有合作空間，以 GT、中國醫藥大學、交大等成立合作團隊。

雙方另外針對目前商品化金屬 AM (additive manufacturing)設備狀況進行交流，他提供美國這邊資訊，中緯則針對在臺灣所知資訊做交流，共識為目前 EOS、Renishaw 等 SLM (selective laser melting)皆需至少半年培育專門操作人員，才有可能較穩定操作設備，這對於產品設計開發者，有進入門檻。另外他 8/20 要拜訪 North Carolina State University 的 Ola Harryson 教授，因為另一種金屬 AM 設備，E-beam melting 的設備開發公司，瑞典 Arcam，每次開發的第一臺雛型機都會送至他這邊進行測試，想跟他請教使用經驗。

8/21 上午與 Ben Wang 進行第二次交流，並已建立合作共識。王老師先分享他 8/20 拜訪 Ola Harryson 教授的心得，E-beam melting 的設備因 E-beam 與真空部分，比 SLM 需更長學習時間，但 Arcam 都在目前設備中放入 on-line monitoring 裝置，如溫度量測，因此大幅提高設備穩定性。

接下來由中緯提出合作想法，針對 8/19 他所提的 AM 合作架構，在交大這邊可在材料、ICT 感測、雷射精微加工等部分做著墨，並建議在他 9 月初回國時可以進一步與交大做合作洽談，這部分也獲得他的認同，將會做行程安排。另外，針對中緯擬持續合作之議題：Aerosol-Jet printing 與 femtosecond laser sintering，他表示持續保持合作關係沒問題，並希望建立這些基礎技術後，日後可連結至 3D printing 之感測電路製作，實現具感測之 3D 列印元件。

在 8/22 上午，王教授團隊另一位資深教授 Chuck Zhang 也參與 3D Printing 技術交流。針對 3D 列印結合電路製作部分，討論美國 3D system 與 Optomec 等兩家公司在 2012 年曾宣布要共同開發整合設備，亦即透過 3D systems 開發之

3D printer 噴印 3D 材料後，可在此整合設備上，透過 Optomec 開發之 Aerosol-Jet 噴印電路，可實現具電路之 3D 列印產品。此方向預期為日後 3D Printing 可能方向，但張教授表示前陣子跟 3D system 討論，仍還沒整合開發出來，其中原因並未進一步說明。另外則是針對 3D Systems 與英國 Renishaw 的 SLM 在美國之合作做討論，3D Systems 在美國可販售 Renishaw 的 SLM 設備，補足該公司在金屬列印之不足。張教授表示目前設備軟體使用仍使用 3D Systems，硬體使用 Renishaw，有些整合問題，故在美國目前使用者評價稍差。中緯請教該校 David W. Rosen 教授目前動態，為何這幾年沒看到相關研究發表，張教授表示該教授目前以教學為主，近年已經無顯著 3D Printing 研究。(備註：David W. Rosen 教授為一本 3D Printing 書籍 Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, 2009 之共同作者)。

小結：透過這幾次合作交流討論，雙方已經建立合作默契，並將持續針對討論之合作議題具體執行，預期幾年後將可看到良好研究成果。除進一步建立國際知名度外，研發之技術也可落實應用至 3D printing 等應用。

## 2.2 參與王教授 Manufacturing by 3D Printing 演講：

8/21 晚上參與王教授的演講，主題為 Manufacturing by 3D Printing，如圖 3~圖 4 所示。內容主要從研發與商業層面討論 3D 列印對於未來的影響。以 AM 用於客製化製造，在 Aerospace 部分，因所需物件少，符合少量客製化，故將最快被應用上。在 Automotive 部分，因所需物件多，將先應用於製造所需的模具或工件上。在技術部分，報告他實驗室主要以 3D 列印結合電路製作為主，主要透過 3D 列印設備(如 3D systems 的 Connex 350)印製一些客製醫材，如與這邊醫院合作之仿主動脈(aortic)內部局部阻塞元件，包括印製動脈外圍之軟組織與模擬動脈內部產生鈣化之局部硬組織，這部分的確是此臺軟硬都可印之 3D 列印設備特點，有了此元件，可做 In-vitro 實驗，模擬實際血液流動情況，以利於醫生判斷

是否需做手術。目前雖有西門子等公司開發出模擬軟體，可讓醫生做判斷，但醫生還是希望有實際測試可驗證，加強可信度。3D 列印仿主動脈元件後，再透過 Aerosol-Jet 印製電路，可做為實際測試之感測用。另外，引用 N Engl J Med 去年一篇文章 Bioresorbable Airway Splint Created with a Three-Dimensional Printer<sup>1</sup>，如圖 5，介紹透過 3D 列印可降解材料之植入醫材。

3D 列印結合電路或其他裝置，讓它更智慧化，用於體外與體內研究，預期為下一波研究主流，如他在簡報中提及 Integrated use of different ground breaking 3D printing technologies，並提及目前 AM 設備主要問題為 The quality is un-predictable，易有 Part to part variations。以及 Design for AM 為最重要工作。這些資訊與中緯先前已知資訊相同。



圖 3 Ben Wang 演講通知



圖 4 Ben Wang 演講

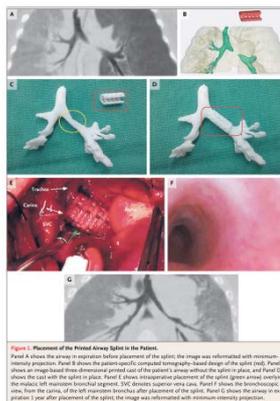


圖 5 透過 3D 列印可降解材料之植入醫材

<sup>1</sup> D.A. Zopf, S.J. Hollister, M.E. Nelson, R.G. Ohye, G.E. Green, Bioresorbable Airway Splint Created with a Three-Dimensional Printer, New England Journal of Medicine, 368 (2013) 2043-2045.

### 2.3 進行 Aerosol-Jet Printing 實驗：

8/20 主要與王教授之博士後研究 Kevin Wang 與博士班學生 Scott 進行 Aerosol-Jet Printing 實驗，如圖 6 為一起在 Aerosol-Jet Printing 設備前合影。在實驗設計細節部分，因與日後研究發表有關，本報告這邊僅做簡述，針對此設備與實驗照片做說明。

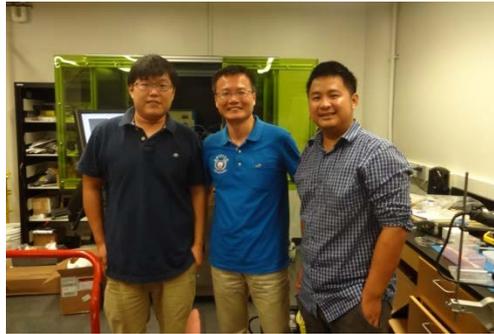


圖 6 與王教授之團隊合影，由左至右分別為 Scott、鄭中緯、Kevin Wang

Aerosol-Jet Printing 設備操作流程如圖 7 所示，其特點為透過 Aerosol，可以製作更細線寬之材料圖案以及更長景深之印製區間。圖 8 則為 GT 實驗室內之 Aerosol-Jet Printing 設備內之噴印模組，並透過實驗，我們印製出不同形式圖案，包含線狀與面積型式，如圖 9 所示，這些試片將作為雷射燒結用。

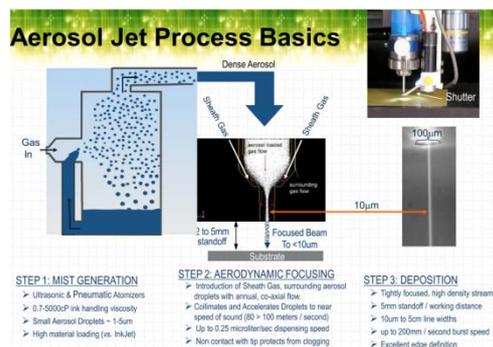


圖 7 Aerosol-Jet Printing 設備操作流程(原廠提供)

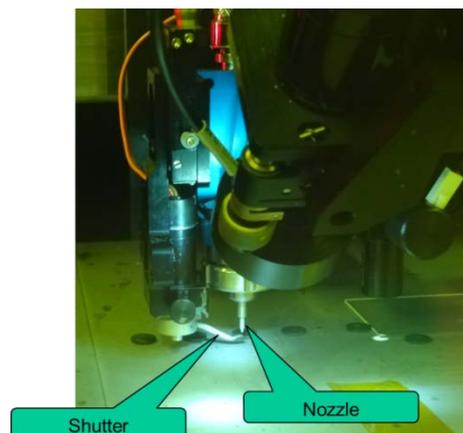


圖 8 Aerosol-Jet Printing 列印模組

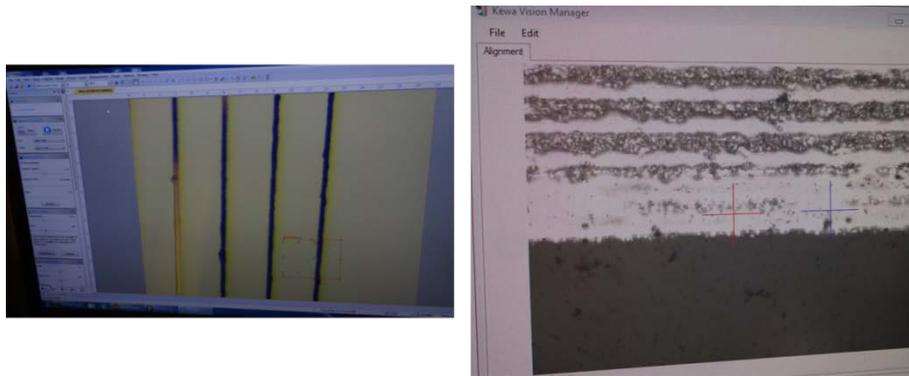


圖 9 Aerosol-Jet Printing 列印成果

#### 2.4 GTMI 與 Invention Studio 實驗室參觀：

8/18 下午參觀 GTMI，如圖 10 所示，先前名稱為 Manufacturing Research Center，此中心座落於校園之西北方，主要進行研究、教學與技術育成。各位可觀察到石柱上方有螺桿傳動示意，不愧是製造中心，連建築小細節都有特色。並參觀在中心內之主要製造環境，如圖 11 所示，裡面可看到大型 CNC 工具機、自動化機器手臂等，在 2011 年美國 Boeing 為主要經費支援者，實驗室中有該公司專屬合作空間，共同研發航太所需製造技術。



圖 10 Manufacturing Research Center

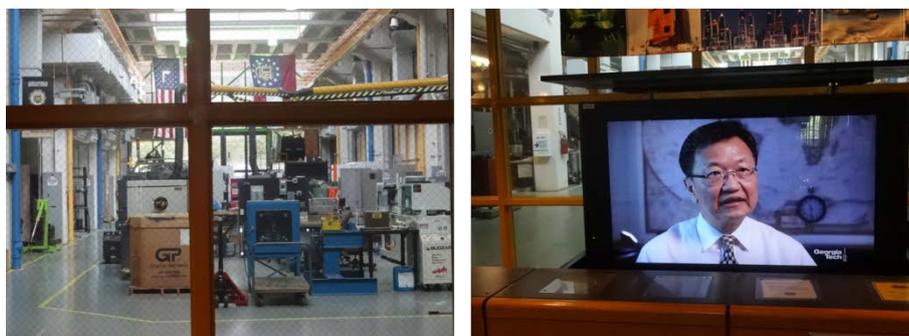


圖 11 大型加工廠與展示影片

在參觀過程，中緯表達對於實務教學濃厚興趣後，Kevin 主動帶我到此中心後方的另一棟建築物，參觀一個 Invention Studio，如圖 12、圖 13 所示。在圖 13 中，內部包括電性測試裝置、簡易後處理設備、可以讓學生完成設計、製造、組裝測試等流程。此單位具有不同的加工設備，如圖 14 之介紹海報，除常見之 CNC、Laser Cutter、Water Jet，並還有 3D Printers。圖 15 為 Laser Cutter 與 CNC 加工環境，從這邊可了解在之前已經開放讓學生可透過這些設備，動手製造實驗設計，而 3D Printers 更可讓他們做更多創新設計。



圖 12 Invention Studio 與外面擺放之 3D Printer



圖 13 Invention Studio 內部



圖 14 Invention Studio 之設備環境介紹



圖 15 Laser Cutter 與 CNC 加工環境

在 3D Printers 部分，包括專業級(professional)與一般級(consumer)，其中專業級主要放置於圖 12 所示之外面區域，包括 Stratasys uPrint, Stratasys Dimension 1200es 以及 Objet Eden 250，這部分需透過研究需求申請才可使用。至於一般級 3D Printing 實驗室，如圖 16 所示，具備各種小型 FDM (Fused Deposition Modeling) 設備，包括商業機臺以及他們自行開發機臺，都可免費提供設備與材料讓學校學生進行印製。這間實驗室為去年開始建置，不到一年時間即有此效果，不愧是好學校。圖 17 為參觀過程看到實際印製中之設備，以及一位學生之後進來了解印製進度。圖 18 為實驗室內組裝中的 3D Printer，可以看到局部夾治具也是使用印製方式。

在參訪期間，中緯有空會至此區域旁的桌子整理資料，以及想觀察這些設備之使用動態，可以觀察到即使現在剛開學，還是有學生使用，而且偶而有外界訪客來訪，足以證明這部分 GT 做的很好。該單位也建置 CAD/CAM/FEA 設計分析環境，再連結上述之設計、製造、組裝、測試，以及真正讓學生落實使用，如網頁中一段話“The invention studio has grown to become one of the largest design/build university spaces in the US”，不愧是一間理論與實務並重之美國名校。

從這邊各位或許可思考一件事情，以製造角度，3D Printing 只是其中一種方式，如 GT 的建置思維。唯有讓開發者了解各種製造方式優劣點，才能真正落實創新設計。若過多偏重 3D Printing，屆時只會培育出很多創新設計，但無法有效與實際製造連結，無法發揮真正效益。當寫這段報告時，想起前陣子收到一份報告，內有韓國針對 3D 列印普及的培育計畫與目標，如圖 19 所示，在營造使用環境時，若偏重於單純列印，則學習者學習後之運用將是挑戰，若能以 GT 之營造環境為例，結合已有之技職體系製造環境，相信效果更大。



Name	Type	Slicing Program	Slicing Conf	Status	Filament Type	Filament Color	Filament Diameter (mm)	Build Area	Notes
LulzBot Printers									
Gandalf	AO-101	<a href="#">Slic3r</a>	<a href="#">Official Slic3r Configs</a>	UP	ABS	N/A	3.0	7.9in x 7.5in x 3.9in	
Frodo	AO-101	<a href="#">Slic3r</a>	<a href="#">Official Slic3r Configs</a>	UP	ABS	N/A	3.0	7.9in x 7.5in x 3.9in	
Centurion	TAZ	<a href="#">Slic3r</a>	<a href="#">Official Slic3r Configs</a>	Down (5/29/2014)	ABS	Gray	3.0	11.7in x 10.8in x 9.8in	Have not been able to get a good print out of any of the TAZs. A 3D printing master needs to see to these printers
Raider	TAZ	<a href="#">Slic3r</a>	<a href="#">Official Slic3r Configs</a>	UP	ABS	Orange	3.0	11.7in x 10.8in x 9.8in	Have not been able to get a good print out of any of the TAZs. A 3D printing master needs to see to these printers
Toaster	TAZ	<a href="#">Slic3r</a>	<a href="#">Official Slic3r Configs</a>	Down (5/29/2014)	ABS	Lime Green	3.0	11.7in x 10.8in x 9.8in	Have not been able to get a good print out of any of the TAZs. A 3D printing master needs to see to these printers
Type A Machines Printers									
Cyberman	Series 1	<a href="#">Series 1 Setup Package</a>	<a href="#">Series 1 Setup Package</a>	UP	PLA	N/A	1.75	10in x 9in x 9in	Will likely require bed leveling
Dalek	Series 1	<a href="#">Series 1 Setup Package</a>	<a href="#">Series 1 Setup Package</a>	UP	PLA	N/A	1.75	10in x 9in x 9in	Will likely require bed leveling

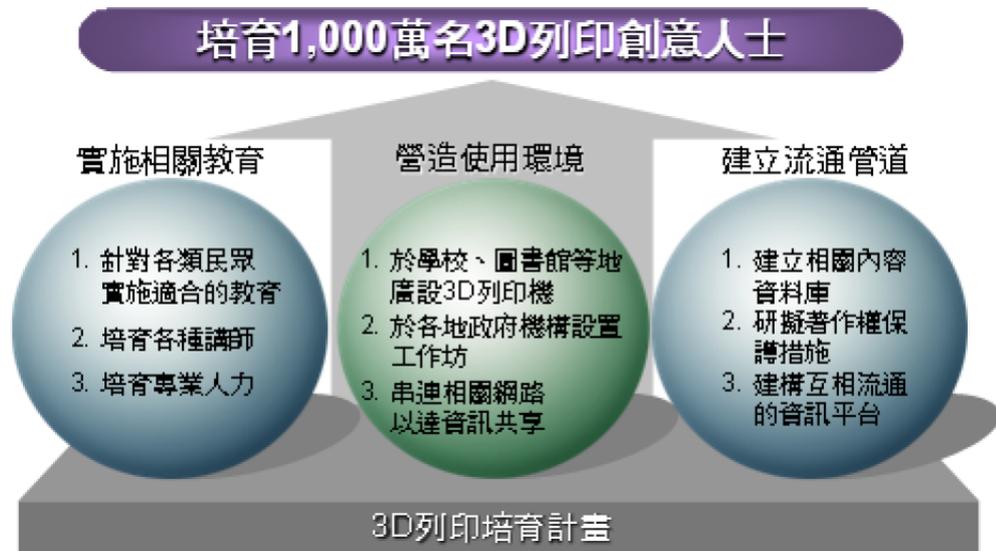
圖 16 3D Printing 實驗室與 FDM 設備型式



圖 17 印製中之設備與學生



圖 18 組裝中的 3D Printer



資料來源：南韓未來創造科學部，2014/7

圖 19 韓國針對 3D 列印普及的培育計畫與目標

### 三、心得及建議

在雙方都有研發能量互補下，很快促成這次拜訪與具體洽談合作方向，主要在於 GT 具備 Aerosol-Jet Printing 等 3D Printing 技術，而中緯這邊具備雷射加工與金屬 AM 經驗，故雙方可有效進行國際尚未發表之印製電路(printed electronics)技術研發。預期 GT 之 Aerosol-Jet Printing 與 3 D Printing 技術，與臺灣之雷射燒結與表面處理等技術，可以延續更多具體合作內容。

雙方並規劃將第一階段研發內容，如 Aerosol-Jet Printing 與雷射燒結技術，在第二階段，具體應用於醫材等載具開發，並連結臺灣醫學單位進行測試驗證。這些研發成果，除將具國際領先之指標意義外，中長期目標為與臺灣醫材等相關產業連結，協助相關特色 3D 列印之產品發展。並規劃安排王教授在 9 月初回國時，進一步與交大做合作洽談。

藉由這次機會，進一步了解 GT 在 3D 列印之教育推廣方式，該單位原先即以製造創新為主，故成立 Invention Studio，而 3D Printing 為其中一種製造方式。並非單以 3D Printing 為主，忽略其他可搭配之製造技術。從這邊各位或許可思考一件事情，以製造角度，3D Printing 只是其中一種方式，如 GT 的建置思維。唯有讓開發者了解各種製造方式優劣點，才能真正落實創新設計。若過多偏重 3D Printing，屆時只會培育出很多創新設計，但無法有效與實際製造連結，無法發揮真正效益。建議若能以 GT 之營造環境為例，結合已有之技職體系製造環境，相信效果更大。