

淺談機械製造科技新知—精密細微製造技術

張勝茂¹、黃惟泰²、劉俊呈³、吳峙儔⁴

1 國立高雄師範大學工業科技教育學系 副教授

2、3、4 國立高雄師範大學工業科技教育學系 研究生

壹、前言

精密細微製造當前是指被加工零件的尺寸精度高於 $0.1\mu\text{m}$ ，表面粗糙度 R_a 小於 $0.025\mu\text{m}$ ，以及所用機床定位精度的重現性高於 $0.01\mu\text{m}$ 的加工技術，亦稱之為亞微米級製造技術，且正在向奈米級加工技術發展。精密細微製造技術的研究主要包括：精密製造的機理研究、精密加工的設備製造技術研究、精密加工工具及刃磨技術研究、精密測量技術和誤差補償技術研究、精密加工工作環境條件研究等。

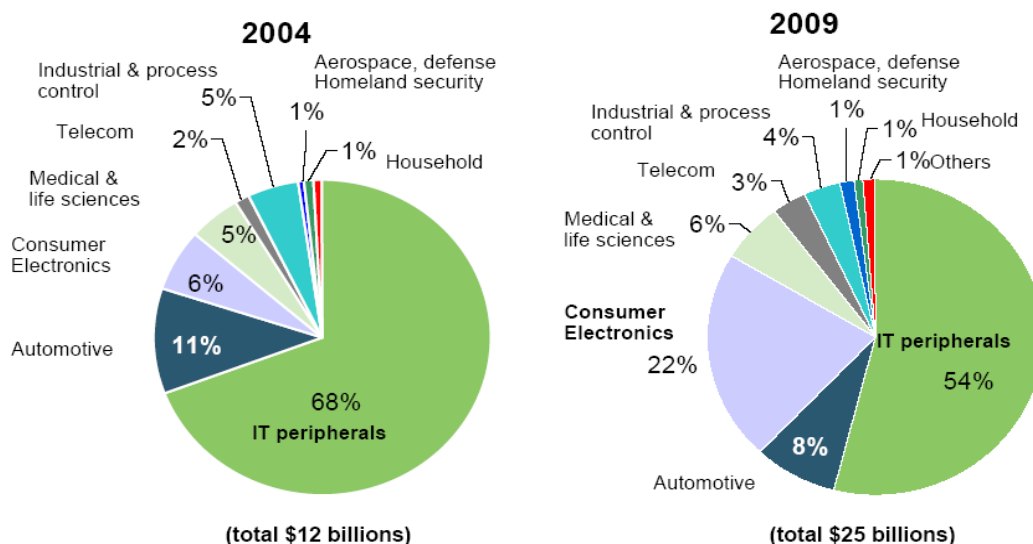
自 1959 年，費曼博士(Dr. Feynman)在加州理工學院物理學會年會的演講中，提到製作極小尺寸物體的可行性概念後，微型化技術研究風潮即開始蔓延起來。從那時後起，微型化技術發展已到令人驚訝的地步，顯著的應用在新興的消費性產品上，特別是在醫療、通信、光電、光學、電子、生物科技等產業領域裡。

一般以 MEMS 為主的微製程(Micro fabrication)技術可分類為：體型微加工(Bulk Micromachining)製程、面型微加工(Surface Micromachining)製程、及 LIGA 製程等三種主要製程群組(LIGA 是德文 Lithographie Galvanoformung Abformung 之縮寫，譯成英文為 Lithography Electroforming Micro Molding)，然這些製程以製作 2D 及 2.5D 為主，基材受限於矽基、輕金屬、及塑膠等；對於複雜的 3D 微細零件，且基材為鋼、合金、及陶瓷等則難以製作。對於上述的瓶頸，精密微細製造(Micro-Machining)正好可以克服這些困難。它能夠在次微米尺度下加工出高精度的微小 3D 複雜元件，然而在微細製造能夠達到量產的目標之前，仍然有很多的挑戰需要克服。因此，以精密微細製造法製作微

細零件，已變成近來學術及產業界研究的焦點。

貳、精密細微製造市場概況

精密微細製造的應用，包括製造微葉片、鐘錶底座元件、微射出元件、微透鏡陣列、脊骨植入元件、移除導尿管內凝塊裝置等，目前主要應用在電腦周邊設備及消費性電子產品居多，根據歐洲 NEXUS 月刊預測 2004 年至 2009 年全球 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 微機電系統市場成長狀況所示，在 2004 年時，MEMS 微機電系統市場規模約 120 億美元，而到 2009 年將達到 250 億美元。此外，由圖一中可知消費性電子產品從 2004 年 6% 成長到 2009 年 22%，成長幅度將近四倍，為各項之冠，這結果顯示 MEMS 應用於手機、數位相機、DVD 記錄器等消費性電子產品未來仍存在很大的市場空間。



圖一 2004 至 2009 年 MEMS 微機電系統市場預測分佈

資料來源： NEXUS MNT Market Report,2009 (3) ,1-3.

除此之外，日本三菱綜合研究所、工研院 IEK-ITIS 計畫與其他相關機構，也預測 2000 年至 2020 年全球主要科技產業之市場，其分佈情形如表一所示，發現在 2020 年時醫療、資訊家電、及生物科技產業成長幅度分別達到 7.8%、7.5%、及 7.4%，顯示微細加工在未來仍潛藏著很大商機。

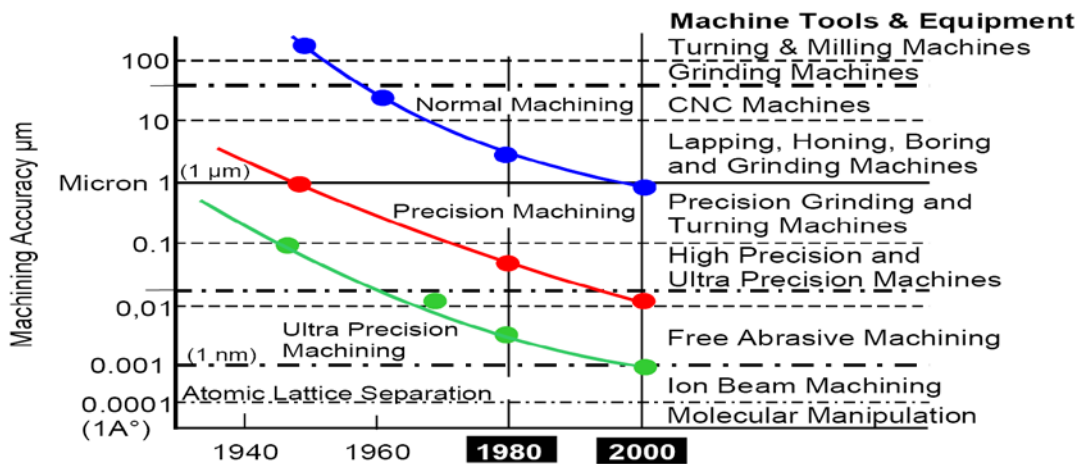
表一 主要科技產業全球市場預測

產業別	2000	2005	2010	2020	2000 至 2020 年 平均年成長率(%)
半導體	170	220	280	410	4.5
電腦	410	560	700	1,010	4.6
通訊機器	240	380	520	800	6.2
家電、資訊機器	180	330	630	760	7.5
宇宙航空技術	233	275	325	430	3.1
生物科技	270	360	750	1,120	7.4
醫療	86	130	200	390	7.8
先進材料	66	95	130	200	5.7
環境	429	555	720	1,235	5.4
精密機械	88	100	125	200	4.2
合計	2,172	3,005	4,380	6,555	5.7

資料來源：研究者參閱相關資料自行整理。

單位:十億美元

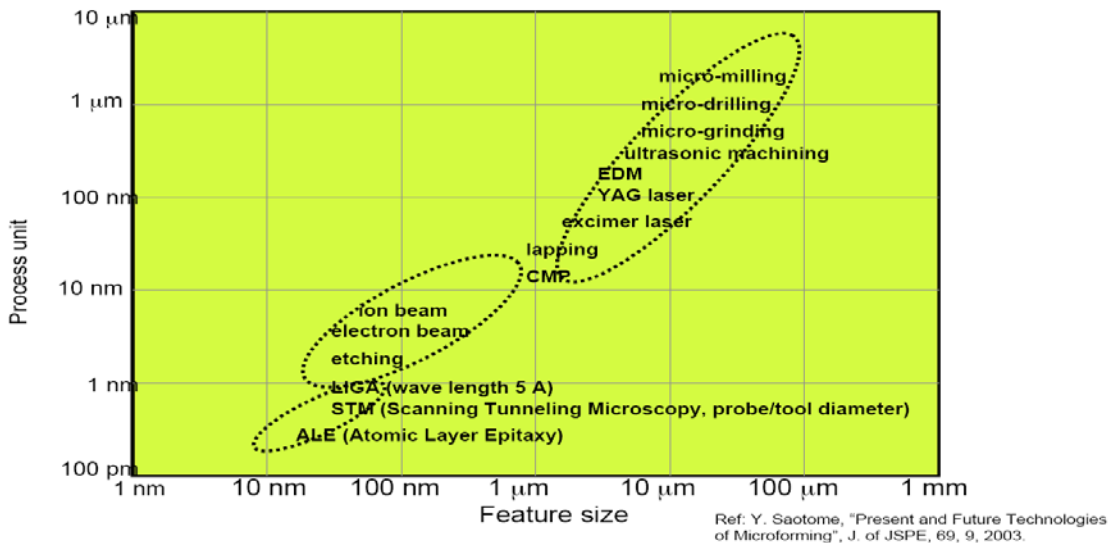
此外，由於近年來微型工具機的精度不斷提升，加工精度已可達次微米境界。以目前加工技術狀況而言，其精度可達約 $0.1\mu\text{m}$ ，如圖二所示。另外，微細加工的製程方式除了傳統加工的車、銑、鉋、磨、鑽外，還有非傳統的微放電加工(Micro EDM)、聚焦離子束加工(Focused Ion Beam Machining)、雷射加工(Laser Beam Machining)等，對於不同微加工製程所產生特徵尺寸(Feature Size)與精度關係可由圖三所示。



source: McKeown after Taniguchi

圖二 1940 年後細微加工能力說明

資料來源：From “Advancing Cutting Technology,” by G. Byrne, D. Dornfeld, and B. Denkena, 2003, *Annals of the CIRP*, 52 (2), 484 .



圖三 不同細微加工製程其尺寸大小與精度關係

資料來源： From “Present and Future Technologies of Microforming,” by Y. Saotome, 2003, *Japan Society for Precision Engineering*, 69 (9), 1223 .

參、精密細微製造發展概況

精密細微製造技術在國際上處於領先地位的國家有美國、英國和日本。美、英、日為發展精密製造技術，都成立了相關研究機構或制定有關計畫，如美國最早成立了 Nano 研究中心，英國制訂了 NION(National Initiative on

Nanotechnology) 計畫，日本制訂了 ERAT (Exploratory Research for Advanced Technology) 規畫等。這三個國家的超精密加工技術不僅總體成套水準高，而且商品化的程度也非常高。在超精密加工機床的研製和生產方面，除美、英、日等國家外，德國、荷蘭和台灣也比較先進。

美國是開展精密細微加工技術研究最早的國家，也是迄今處於世界領先地位的國家。早在 20 世紀 50 年代末，由於航太等尖端技術發展的需要，美國首先發展了金剛石刀具的超精密切削技術，稱為“SPDT 技術” (Single Point Diamond Turning) 或“微英寸技術” (1 微英寸 $\approx 0.025\mu\text{m}$)，並發展了相應的空氣軸承主軸精密機台，用於加工鐳射核聚變反射鏡、戰術導彈及載人飛船用球面與非球面大型零件等等。20 世紀 80 年代後期，美國通過能源部“鐳射核聚變項目”和陸、海、空三軍“先進製造技術開發計畫”，對超精密金剛石切削機床的開發研究，投入了鉅額資金和大量人力，實現了大型零件的微尺寸超精密加工。如美國勞倫斯利弗莫爾國家實驗室已經研製出一台大型光學金剛石車床 (Large Optics Diamond Turning Machine, LODTM)，是一台最大加工直徑為 1.63m 的立式車床，定位精度可達 28nm，借助線上同步誤差補償能力，它已實現了距離超過 1m 而直線度誤差只有 $\pm 25\text{nm}$ 的加工。

在精密細微製造技術領域，英國克蘭菲爾德技術學院所屬的克蘭菲爾德精密工程研究所(簡稱 CUPE)享有較高地位，它是當今世界上精密工程的研究中心之一，是英國超精密製造技術水準的獨特代表。如 CUPE 生產的 Nanocentre(奈米加工中心)既可進行超精密車削，又帶有研磨頭也可進行超精密磨削，加工工件的形狀精度可達 $0.1\mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $R_a < 10\text{nm}$ 。

日本對精密細微製造技術的研究相對於美、英來說起步較晚，卻是當今世界上精密細微製造技術發展最快的國家。日本的研究重點不同於美國，美國是以發展國防尖端技術為主要目標，而日本是以民品應用為主要對象，主要包括辦公自動化設備、視像設備、精密測量儀器、醫療器械和人造器官等。所以日本在用於聲、光、圖像、辦公設備中的小型、超小型電子和光學零件的超精密製造技術方面，是更加先進和具有優勢的，甚至超過了美國。

目前，世界上超精密加工最高水準的三台大型超精密機床分別是美國 LLNL 國家實驗室的 DTM-3 型臥式大型光學金剛石車床、LODTM 型立式大型光學金剛石車床和英國 Cranfield 公司研製成功的 OAGM-2500 型超精密機

床；如圖四，其中 LODTM 型立式大型光學金剛石車床(The Large Optics Diamond Turning Machine)是精度最高的超精密機床，它主要用於製造 Keck 望遠鏡 F/25 紅外線裝置零件。該機台分別可以加工長度 2100mm、重量 4500kg 和長度 1625mm、重量 1360kg 的工件，該機床的特點是採用空氣軸承主軸和高壓液體靜壓主軸，剛性高、動態性能好，為實現超精密位置的確定，採用了精密數位伺服方式，控制部分為內裝式 CNC 裝置和鐳射干涉測長儀，實現隨機測長定位，為了實現刀具的微量進給，在 DC 伺服機構內裝有壓電式微位移機構，可實現奈米級微位移，採用了恆溫油淋浴系統，使油溫控制在 (20 ± 0.005) °C，消除了加工中的熱變性，採用了壓電晶體誤差補償技術，使加工精度達到 $0.025\mu\text{m}$ ，可用於加工平面、球面及非球面鐳射核聚變工程的零件、紅外線裝置用零件以及大型天體望遠鏡。



圖四 LODTM 型立式大型光學金剛石車床

資料來源：From “The Word Most Accurate Lathe“, Science & Technology Review. Retrieved from <https://www.llnl.gov/str/April01/Klingmann.html>

肆、精密細微製造發展趨勢

精密細微製造技術未來發展趨勢，將朝向更高精度更高效率、大型化微型化、及加工檢測一體化方向發展，也將不斷探討適合於精密細微加工的新原理、新方法、及新材料。對於未來精密細微製造發展趨勢，國內精密細微製造技術專家學者金屬工業研究發展中心周俊宏(2002)與工研院劉信宏(2006)所提出之精密細微製造發展趨勢，詳細描述整理如下：

一、向更高精度、更高效率方向發展。

隨著科技的不斷進步及社會發展的需求，對產品的加工精度、加工效率及加工品質的要求越來越高，精密細微加工技術要向加工精度的極限衝刺，且這種極限是無限的，當前的目標是向奈米級加工精度發展。

二、向大型化、微型化方向發展。

由於航太航空工業的發展，需要大型精密加工設備來加工大型光電子器件(如超大型望遠鏡上的反射鏡)等。而開發微型化超精密加工設備則主要是為了滿足發展微型電子機械、積體電路的需要(如製造微型感測器、微型驅動元件等)，因此，超精密加工技術將向大型化、微型化方向發展。

三、向加工檢測一體化方向發展。

由於精密細微加工的精度很高，為此急需研究開發加工精度同步測量技術，因為同步測量是加工測量一體化技術的重要組成部分，是保證產品品質和提高生產率的重要關鍵技術。

四、不斷探討適合於精密細微加工的新原理、新方法、新材料。

精密細微加工機理涉及微觀世界和物質內部結構，可利用的能源有機械能、光能、電能、聲能、磁能、化學能、核能等，十分廣泛。不僅可以採用分離加工、結合加工、變形加工，而且可以採用生長堆積加工；既可採取單獨加工方法，更可以採取複合加工法(如精密電解磨削、精密超聲車削、精密超聲研磨、機械化學拋光等)。此外，精密細微加工的被加工材料對其加工品質的影響很大，其化學成分、力學性能均有嚴格要求，因此也應研究新的工具材料(如切削刀具、磨削磨料)及被加工材料。

伍、結語

在未來機械製造的發展裡精密微細加工技術將是提升產業競爭力的關鍵技術之一。台灣是工具機生產王國，2006 年在全球的工具機出口排名第四，進口排名第五，如此良好的先天條件是極具適合發展微細加工技術，除了上述幾點研究方向之外，尚有許多重要且有趣的問題值得深入探討及釐清，希望能藉由在日後更多研究過程中，啟發更多不同的思維，以期建立完整的微切削製程分析，進而提供建立專家化系統所需的製程參數資料，以協助提升臺灣機械產業在國際市場的競爭力。

參考文獻

1. Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B. (2003). Advancing Cutting Technology. *Annals of the CIRP*, 52 (2), 483-507.
2. The Word Most Accurate Lathe, *Science & Technology Review*.
Retrieved from <https://www.llnl.gov/str/April01/Klingmann.html>
3. Saotome, Y. (2003). Present and Future Technologies of Microforming. *Japan Society for Precision Engineering*, 69 (9), 1221-1225.
4. NEXUS MNT Market Report, 2009 (3), 1-3.
5. 周俊宏 (2002)。微細加工技術在金屬相關產業之應用。高雄：金屬工業研究發展中心。
6. 周俊宏 (2002)。微細加工應用市場分析。高雄：金屬工業研究發展中心。
7. 劉信宏 (2006)。2006 年全球工具機市場與進出口分析。新竹：工研院 IEK-ITIS 計畫。