

環形刀具液動壓拋光法於鏡面拋光之研究

A Study on the Mirror Surface Hydrodynamic Polishing by Using the Ring Shaped Tool

王述宜、謝孟修

Shuh-Yi Wang, Meng-Siou Sie

本文對新式環形刀具液動壓拋光法進行鏡面拋光可行性之研究，以期能發展刀具磨耗不影響加工率的新式拋光法，此法將可應用於精密模具與光學元件的拋光。環形刀具液動壓拋光加工因為具有刀具磨耗不影響加工加工率的特點，所以加工重現性佳。由實驗結果得知，此法可有效降低試片的表面粗度，例如可成功拋光出 $R_a \approx 4.4 \text{ nm}$ 的光滑鏡面。

The feasibility of mirror surface hydrodynamic polishing by using the ring shaped tool is studied. This novel polishing process is expected to apply to the precise fabrication of molds and optics. In order to reduce the tool wear effect, the semi-spherical tool is replaced by the ring shaped one. The experimental results show that the machining rate is not affected by the tool wear, that is, this new process provides excellent machining repeatability. On the other hand, the mirror surface with $R_a 4.4 \text{ nm}$ was yielded in the larger area polishing.

一、拋光簡介

拋光 (polishing) 是使工件表面成為平滑鏡面的超精密加工技術，其目的在於使工件 (光學元件或模具等) 的表面粗糙度及平坦度到達一定的可容許範圍，常被廣泛地使用在硬脆金屬、陶瓷、玻璃及晶圓等材料表面的精密加工上。拋光不僅增加工件的美觀，而且能夠改善材料表面的耐腐蝕性及耐磨耗性，增加模具的使用壽命，並可使塑膠製品易於脫模，減少生產注塑週期等。隨著塑膠製品廣泛的應用，如日常塑膠用品和飲料包裝容器等，外觀的

需要往往要求塑膠模具的表面達到鏡面拋光的程度。

此外，生產精密光學鏡片與組件等模具對表面粗糙度要求極高，因而對拋光性的要求也相對的提高⁽¹⁾。例如國內台南科學園區的金萬盈科技公司，開發表面粗度小於 $R_a 50 \text{ nm}$ 之奈米級研磨精密模具，利用其磨擦係數低及表層超光面之特性，減少沖壓成型加工磨擦阻力，以增加模具約 2 倍使用壽命、提升產品精密度及減少換模時間。此技術可應用產品為汽機車零組件、航太扣件、3C 電器電子零組件及高級工業扣件等研磨微成型模具。因此，

拋光加工在塑膠模具製作過程中是一道關鍵的加工過程。

目前製程常用的拋光方法分為以下幾種：(1) 機械拋光法、(2) 電化學加工法 (electrochemical machining, ECM)、(3) 流體拋光法及 (4) 磁流變拋光法 (magnetorheological finishing, MRF)。

1. 機械拋光法

機械拋光是靠切削材料表面塑性變形去掉工件表面凸出部分，而得到平滑面的拋光方法，一般使用油石條、羊毛輪及砂紙等作為手工操作的拋光刀具。特殊零件如同轉體表面，可使用轉台等輔助工具，表面粗度規格要求高的精密工件可採用超精研拋的方法。超精密拋光是採用特製的磨具，在含有磨料的拋光液中，緊壓在工件被加工表面上，作高速旋轉運動。利用該技術拋光可以達到 R_a 0.008 μm 的表面粗糙度，是各種拋光方法中表現最優良的，光學鏡片模具常採用這種方法。

2. 電化學加工法

電化學加工法又稱為電解加工法 (electrolytic machining)，是一種以電解溶出的原理來去除金屬的加工法，無機械力作用也不會產生熱影響區，為一種非接觸性的加工方法。其原理是連接直流電源的刀具 (陰極)，並以酸或鹼性的電解液，在工件 (陽極) 表面間形成電解液間隔，以進行電解拋光加工。在電解液中，工件材料的表面微觀凸出的部分 (易導電) 較凹陷部分優先溶解 (避雷針效應)，而獲得平滑面⁽²⁾。

電解加工法具有的優點為：(1) 應用於傳統加工所無法加工的高強度與高硬度材料。(2) 電解的工具電極沒有損耗。(3) 生產效率高、工件表面粗度佳，可一次就加工成形。(4) 不會有熱應力及變質層的存在。然而，電解加工法之缺點為：(1) 加工精度比放電加工差。(2) 電解液具有腐蝕作用。(3) 加工裝置與操作成本貴。

3. 流體拋光法

流體拋光法是依靠高速流動的液體及其攜帶的磨粒沖刷工件表面達到拋光的目的。常用方法有：

磨料噴射加工、液體噴射加工、流體動力研磨等。流體動力研磨是由液壓驅動，使攜帶磨粒的液體介質高速往復流過工件表面。介質主要採用在較低壓力下流動性佳的特殊化合物 (聚合物狀物質) 並混合磨粒製成。

4. 磁流變拋光法

磁流變拋光技術是一套數控拋光系統，能夠製造出平面、球面及非球面的表面⁽⁴⁾。不像傳統使用鑽石做成鏡片研磨工具，磁流變拋光所使用的研磨材料是所謂的磁流變拋光液，此種液體在外加磁場的作用下可以在拋光區範圍內具有一定硬度，再配合一個來回轉動的輪軸引導與電腦程式控制，就可以按照程式準確地進行光學鏡片的精密加工。磁流變拋光可以研磨的材料包括玻璃、石英 (quartz)、氟化鈣 (calcium fluorid) 或藍寶石 (sapphire)。此外，光學玻璃製造公司 Schott Guinhard 的瑞士分公司利用 MRF，大大提升了光學材料精密加工的速度與品質。目前磁流變拋光可在直徑 10–200 mm 鏡片加工，而且非球面的形狀精度可達 0.1–0.6 $\mu\text{m P-V}$ ⁽⁴⁾。

在精密模具加工中，所謂的拋光與其他行業中所要求的表面拋光有很大的不同，一般表面拋光只要求獲得光亮的表面即可，即降低表面粗度，但是精密模具對拋光要求包括兼顧表面粗度與形狀精度。嚴格來說，模具的拋光應該稱為鏡面加工。鏡面加工的標準分為四級： $A0 = R_a$ 0.008 μm 、 $A1 = R_a$ 0.016 μm 、 $A3 = R_a$ 0.032 μm 及 $A4 = R_a$ 0.063 μm ，由於電解拋光、流體拋光等方法很難精確控制零件的形狀精度⁽¹⁾，所以仍有各種新式的拋光法在發展，以期能兼顧工件的表面粗度與形狀精度。

近年來，其他方式的拋光加工法⁽⁵⁻²¹⁾ 也陸續被發展出來，其中有些拋光法在某些材料製造出的表面粗度可平整到原子大小等級。如 Soares 等人以浮式拋光法 (floating polishing)，在石英表面加工出的平面 0.2 nm RMS 的平面⁽⁵⁾。而 Leistner 等人以鐵氟龍 (Teflon) 製成的拋光刀具在光學玻璃 BK-7 上拋光，製造出 0.08 nm 的平面⁽⁶⁾。在另一方面、化學機械式拋光法 (chemical-mechanical polishing)⁽⁷⁻¹¹⁾、漸進式機械化學 (progress mechanical and

chemical, P-MAC) 拋光法⁽¹²⁻¹⁵⁾ 和由 Ikeda 所發展的唇形 (lip type) 拋光頭加工法^(16, 17) 均能製造出無應力殘留 (stress-free) 的工件表面。上述拋光法的共同特點是避免刀具直接壓著磨粒在工件表面上進行加工，而是刀具浮在工件表面運動，進行非接觸式 (non-contact) 的拋光。

二、環形刀具液動壓拋光

日本 Y. Mori 教授於 1987 年提出彈射加工 (elastic emission machining, EEM)⁽¹⁸⁻²⁰⁾ 與國立中山大學蘇耀藤教授所提液動壓拋光 (hydrodynamic polishing, HDP)⁽²¹⁻²³⁾ 均是創新的超精密研磨加工法；加工後工件表面的形狀精度可提升到 $0.1 \mu\text{m}$ ，表面粗度達到奈米等級，其加工的方式為以高速旋轉的圓球狀加工頭，帶動由水加入磨粒 (abrasive powder)，如三氧化二鋁 (Al_2O_3) 混合成的磨漿 (slurry)，在工件表面加工。液動壓潤滑 (hydrodynamic lubrication) 的原理為在旋轉的加工頭和工件表面間形成磨漿薄膜 (slurry film)，當磨粒隨著磨漿薄膜在工件表面流動時，因為磨粒和工件表面間有相對運動的存在，使磨粒在工件表面上產生類似研磨的加工⁽²⁴⁾。但是磨漿薄膜中的磨粒同時加工 (刮過) 刀具與工件表面，產生加工行為與刀具磨耗，因刀具磨耗使刀具軸向半徑幾何形狀改變，導致磨漿薄膜厚度的變化，而使加工率逐漸改變，所以產生加工不確定性。所以液動壓拋光加工條件 (如工件形狀等) 不同時，刀具磨耗率也不同，影響加工重現性。因此，液動壓拋光在實際應用時，刀具磨耗與重現性的問題仍待解決。本文的目的即嘗試新的方式 (環形刀具)，以刀具不磨耗的優點而改進長久以來拋光存在的缺點：確定性與重現性。

而滾筒式拋光法是利用一圓柱狀的刀具，對平面狀的工件表面進行拋光加工，其刀具磨耗對於刀具表面曲率的影響可以被忽略⁽²³⁾。如圖 1 所示，由於刀具的旋轉，刀具磨耗會沿著刀具的整個圓周發生，而磨耗只會造成刀具表面數個 μm 深的材料磨損。此磨損值相較於刀具原本的半徑值 (15 mm) 是

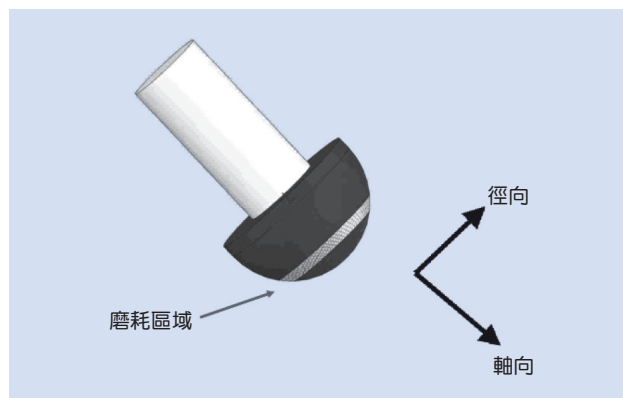


圖 1. 半球形刀具磨耗造成刀具軸向半徑逐漸改變的示意圖。

可以忽略的，因此刀具的磨耗不會造成滾筒式拋光法刀具曲率的重大改變。由此可知，滾筒式拋光法具有加工重現性不敏感於刀具磨耗效應的優點。由已發表成果得知若將原先液動壓拋光 (圓球狀刀具) 改進刀具形狀為環形刀具，將減少刀具磨耗的影響。意即縮小滾筒式拋光刀具的軸向寬度 (改為環形刀具)，即能將此改良後的滾筒式拋光法改進為局部小區域的精密形狀誤差修正加工法。

新型環形刀具與原先液動壓拋光法特性比較如表 1 所示。由此表得知，新型環形刀具液動壓拋光的加工穩定性比原先液動壓拋光法為佳。其中，球形刀具拋光軸向刀具磨耗隨著工件形狀、磨漿條件、與轉速及負荷的不同，刀具「軸向曲率半徑」磨耗率也不同，增加加工不確定性。

三、環形刀具液動壓拋光實驗機

環形刀具液動壓拋光實驗機是由下列三個主要系統所組成，包括：(1) 三軸定位系統、(2) 主軸夾持與施力控制機構系統、(3) 拋光加工槽系統，如圖 2 所示。其中三軸定位系統是飛統公司所組裝的「三軸運動系統」(XYZ 三軸定位精度 $\pm 3 \mu\text{m}$ ，行程 200 mm)，改裝為環形刀具液動壓拋光加工試驗機。即是在此三軸運動系統加裝拋光主軸與刀具負荷調整機構，以進行拋光實驗。

刀具內圈材質為 6061 的鋁合金以車削製成，外圈材質為半氟化橡膠 (Viton)，為市面上現成

表 1.
不同形狀刀具的拋光特性比較。

	球形刀具拋光	滾筒刀具拋光	環形刀具拋光
刀具形狀	半球	圓柱	環形
刀具製作過程	困難	容易	容易
與工件接觸形式	點狀	長線狀	短線狀
軸向刀具磨耗	有	無	無
徑向刀具磨耗	有	有	有
與工件接觸區域	點狀	長線狀	短線狀
加工(磨耗)後與工件接觸區域	橢圓狀	橢圓狀	橢圓狀
拋光面積	小	大	小
加工限制	理論上任意形狀	無法拋光凹狀	無法拋光凹狀
磨耗影響	大	小	小

的 O 形環，刀具的外徑為 32.3 mm、厚度為 2.4 mm，如圖 3 所示。

主軸夾持系統是以精密高速主軸 (廠牌 SFJ、型號 HEN-32) 達成主軸夾持功能。而施力控制機構則以括滑台 (slide)、氣壓用減振器、彈簧組成，主要是以移動 Z 軸位置而調整刀具的施力。設計的主軸夾持與施力控制機構系統圖 (實際尺寸以 Solidwork 軟體繪製)，如圖 4 所示。此加工主軸機構必須考慮實際拋光時主軸系統動態特性，避免高速旋轉時產生的振動，使刀具撞擊工件表面。

拋光加工槽系統配合實驗所需，加裝拋光加工槽和磨漿液循環過濾系統等設備。加工槽的設計要求為必須耐腐蝕及防洩漏，才可進行拋光加工。並附加拋光加工液循環與攪拌槽系統，使加工液的特性於實驗過程中維持恆定。

四、實驗分析與結果

本節將以設計的環形刀具液動壓拋光加工機驗證其拋光的能力，配合設計的參數 (加工時間、加工負載及刀具轉速等)，觀察刀具表面磨耗的狀態，在工件表面的加工深度、加工面積以及表面粗

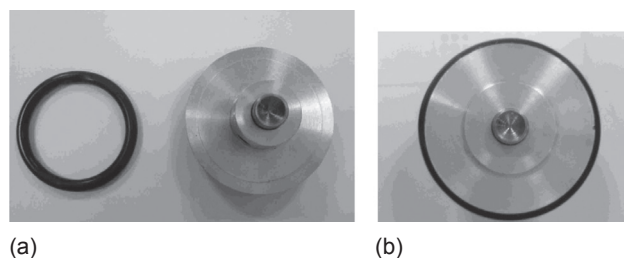


圖 3. 環形刀具實體圖，(a) O 形環及鋁內圈，(b) O 形環套住鋁內圈即環形刀具。

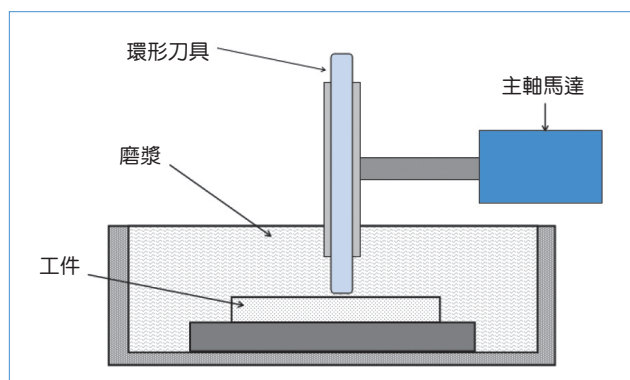


圖 2. 環形刀具液動壓拋光系統示意圖。

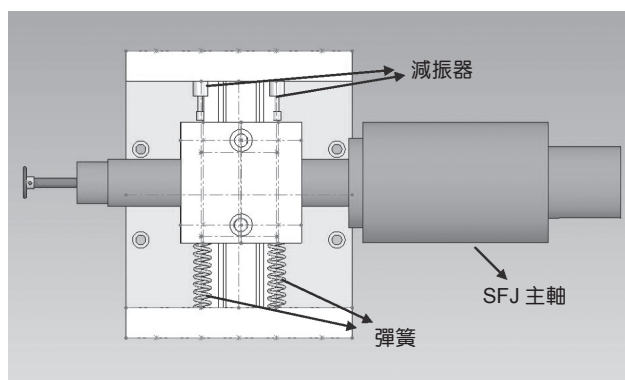


圖 4. 主軸夾持與施力控制機構系統圖。

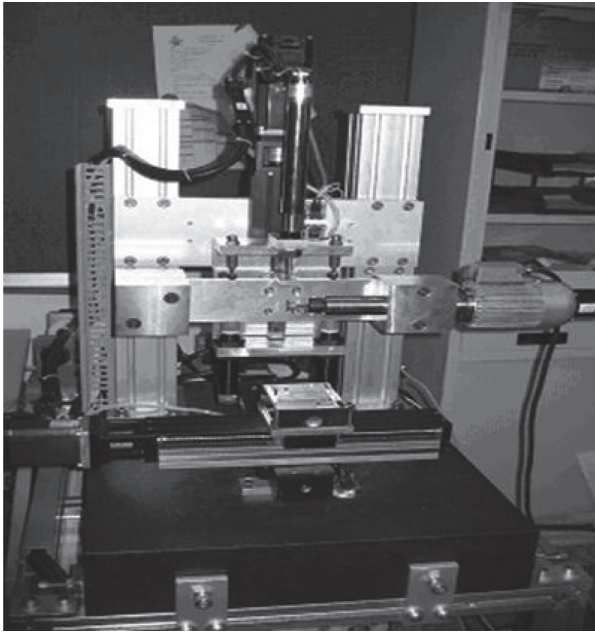


圖 5. 環形刀具液動壓拋光加工機照像圖。

度的影響。進行的實驗項目包括重現性實驗與大面積平面拋光實驗，以判別環形刀具液動壓拋光法的重現性與實際鏡面拋光的能力。主要是在相同加工條件下，進行多次實驗，由實驗後的加工深度判別重現性刀具磨耗對加工能力的影響。

實驗中磨漿是選用粒度為 $0.05\ \mu\text{m}$ 的三氧化二鋁 (Al_2O_3) 拋光用磨粒，混合溶劑為高速錠子油，以重量百分比 4% 的濃度混和均勻後使用。工件材質是 SKD11 的模具鋼，經過熱處理後硬度約為 HRC 45，外形尺寸為直徑 60 mm、厚度 20 mm。表面先經由輪磨加工修平後，再研磨拋光至表面粗度 $R_a\ 0.2\ \mu\text{m}$ 。

在拋光時刀具皆朝平行於刀具軸向來回移動 3 mm，意即沿 Y 軸 (如圖 6 的垂直方向) 移動 3 mm 的長條形加工。每組實驗結束後，觀察刀具上的 O



圖 6. 10 個長條形拋光加工區域圖。

形環表面磨耗的程度，以確保環形刀具所執行的拋光實驗對刀具的磨耗不敏感，主要調整的加工參數有三項：(1) 刀具轉速、(2) 刀具負載、(3) 加工時間。

1. 重現性實驗

本節實驗旨在確定環形刀具執行在相同的加工參數 10 次後，可否獲得一致的重現性。加工重現性由可否獲得一致的長條形拋光的加工深度判別。

實驗的參數條件為刀具轉速 6000 rpm、刀具負載 3 N、加工時間 30 分。圖 7 為 10 次相同加工條件所得的 10 個長條形拋光的加工深度約為 $1.95\ \mu\text{m}$ (圖 6 的水平方向截面深度)，是以日本小坂 Kosaka 公司的表面輪廓儀 (型號 SE-3300) 量測而得。由此得知，10 個長條形拋光的加工深度變異量很小，所以證明環形刀具拋光具有優良的加工重現性。

2. 大面積平面拋光實驗

在已得知長條形拋光的加工截面形狀後，接著進行大面積平面拋光實驗，以測試此系統降低工件表面粗度的能力。本實驗的目的在於探討環形刀具拋光系統在模具鋼 SKD11 拋光能否獲得更光滑的表面。實驗的參數條件為刀具轉速 6000 rpm、刀具負載 3 N、加工時間 9 小時 (分為 3 次完成)，拋光面積 $30 \times 30\ \text{mm}^2$ 的加工路徑如圖 8 所示，其

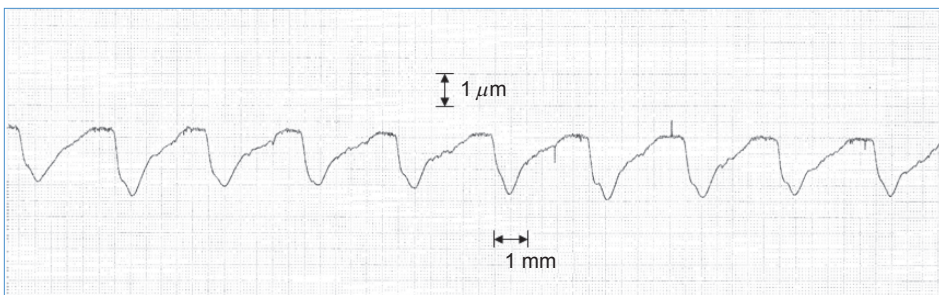


圖 7. 長條形拋光加工後加工深度量測結果圖。

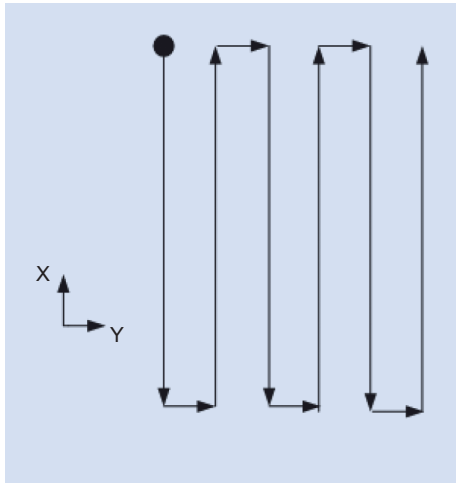


圖 8. 大面積平面拋光加工路徑圖。



圖 9. 大面積平面拋光結果照像圖。

中為避免產生過多刀痕 (tool mark) 而影響表面粗度，所以將加工路徑中的 Y 方向間距 (pitch) 設定為 0.02 mm。而由大面積平面拋光結果圖得知，環形刀具拋光可成功地拋光產生表面粗度 R_a 4.4 nm (cut-off length 0.8 mm) 的鏡面，如圖 9 與圖 10 所示，其中圖 10 的表面粗度是沿 Y 方向量測而得。

五、結論

本研究針對新式環形刀具液動壓拋光加工參數進行基本研究，以期能發展刀具磨耗不影響加工率的新式拋光法，已可應用於精密模具與光學元件的

Surfcomer SE-3300 Kozuka Lab.

Speed	0.1 nm/s
Cutoff λ_c	0.8 mm
Length	1.00 mm
Polarity	normal
Ra	0.0044 μm
Rmax	0.0625 μm
V. mag	10000
H. mag	50
P profile	

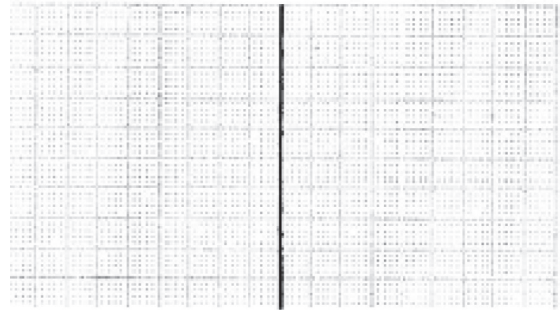


圖 10. 大面積平面拋光的表面粗度量測結果圖。

拋光。由實驗結果得知，環形刀具液動壓拋光加工因為具有刀具磨耗不影響加工加工率的特點，所以加工重現性佳；更可有效降低試片的表面粗度，成功地拋光出 R_a 4.4 nm 的鏡面。

後續將進行在光學玻璃進行大面積平面拋光，其中探討重點是拋光參數與加工路徑規劃的搭配，以消除刀痕對表面粗度的影響，而獲得更光滑的奈米級工件表面。在建立基礎的拋光技術後，未來研究將朝向軸對稱元件拋光，以期能發展可產出高附加價值的關鍵加工製程。

參考文獻

1. <http://plas.chem99.com/news/68622.html>
2. <http://www.li-fung.biz/PEM-2.htm>
3. http://www.li-fung.biz/OTEC_machines_DF.htm
4. http://www.schott.com/taiwan/chinese/optics_devices/products/lenses/aspherical.html
5. F. S. Soares, et al., *Applied Optics*, **33** (1), 89 (1994).
6. A. J. Leistner, et al., *Applied Optics*, **31** (10), 1472 (1992).
7. S. L. Riedinger, et al., *Material Science and Engineering*, **B15**, 9 (1992).
8. L. M. Cook, *J. Non-Cryst. Solids*, No.120, 152 (1990).
9. S. Sivaram, et al., *Solid State Technology*, May, 87 (1992).
10. M. Hoshino, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, Part 2, No. 3B, 392 (1993).

11. H. Landis, *et al.*, *Thin Solid Films*, **220**, 1 (1992).
12. T. Karaki, S. Miyake, and J. Watanabe, *Bull. Japan Soc. of Prec. Eng.*, **15** (1), 14 (1981).
13. T. Kasai and T. Karaki-Doy, *Japanese Journal of Tribology*, **37** (5), 539 (1981).
14. T. Kasai, K. Hori, and T. Karaki-Doy, *Annals of CIRP*, **39** (1), 321 (1981).
15. T. Kasai, F. Matumoto, and A. Kobayashi, *Annals of CIRP*, **37** (1), 537 (1988).
16. M. Ikeda, *Int. J. Japan Soc. Soc. Prec. Eng.*, **27** (1), 41 (1993).
17. M. Ikeda, *Int. J. Japan Soc. Soc. Prec. Eng.*, **27** (2), 107 (1993).
18. Y. Mori, K. Yamauchi, and K. Endo, *J. of Precision Engineering*, **9**, 3 (1987).
19. Y. Higashi, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**, 7 (1989).
20. Y. Mori and K. Endo, *Japanese Journal of Tribology*, **37**, 5 (1992).
21. Y. T. Su, S. Y. Wang, P. Y. Chao, P. Y. Hwang, and J. S. Hsiau, *Precision Engineering*, **92**, 5 (1995).
22. Y. T. Su, S. Y. Wang, and S. H. Jang, *International Journal of Machining tools & Manufacture*, **36**, 2 (1995).
23. 蘇耀藤, 國科會專題研究計畫結案報告, 滾筒式加工系統研究 (1/3), 計畫編號: NSC88-2212-E-110-023.
24. B. J. Hamrock, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, NASA Reference Publication, 1255.



王述宜先生為國立中山大學機械工程博士，現任正修科技大學機械工程學系副教授。

Shuh-Yi Wang received his Ph.D. in mechanical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently an associate professor in the Department of Mechanical Engineering at Cheng-Shiu University.



謝孟修先生為正修科技大學機電工程研究所碩士。

Meng-Siou Sie received his M.S. in mechatronic engineering from Cheng-Shiu University.