

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

自動拋光系統之研發

Development of Automatic Surface

Finishing System

計畫類別：整合型計畫

計畫編號 **NSC 88-2212-E-032-011**

執行時間：**87年08月01日至88年07月31日**

計畫主持人：劉昭華、王銀添、陳炤彰

處理方式：可立即對外提供參考

執行單位：淡江大學機械工程學系

中華民國**88年10月31日**

中文摘要：

本計畫所發展出之自動研磨拋光系統，係利用手持研磨機，分別將其以夾具固定在數值控制工具機、或機械手臂之上，以進行研磨拋光、及力量量測。這計畫分成三個子計畫進行。子計畫一是進行夾具設計，接觸力分析，以及研磨力量測。子計畫二是進行力量控制，發展一套低成本且高效率的力量感測器、與力量控制系統，使用在機械手臂輔助研磨拋光系統。子計畫三則是發展研磨及拋光路徑，所發展出的碎形路徑，能夠得到較佳研磨及拋光效果。

在前兩個年度，子計畫一已經利用所設計之夾具，以及所發展出的動力計，從事研磨及拋光力量測，在這個年度，除了繼續完成研磨及拋光力量測之外，並且從事接觸力分析，成為夾具設計時的理論基礎，作者發展出新的有限元素方法以分析接觸法力。

子計畫二在第一年，已利用機械手臂定位與定方向的靈活性，降低力量感測器所需自由度，以簡化力量控制複雜性。第二年，更發展主動式力量感測器，取代被動式感測器。方法是利用軟體式力量觀測器，以迴授的馬達角度與驅動器電流估算研磨力矩。這種觀測器不依賴硬體做力量量測，具有成本低與維修容易等優點。系統的整合與測試在第三年實行，以達到自動磨拋功能。

子計畫三的目的在於試著尋找適合模具磨拋加工之自動化路徑，法用碎形的目的是因為碎形路徑具有「方向性的均勻分佈」，符合實際磨拋加工所需。由於傳統磨拋路徑如往復式（ZigZag（路徑在 X 方向、Y 方向路徑的總長度比例非常不均勻，因此在本研究中採用“ π ” pattern 為碎形基本模式，進而發展出倒角型碎形路徑及圓弧碎形路徑，並經由先前發展的模具自動磨拋系統進行實作驗證各種碎形路徑的磨拋效果，最後嘗試以模糊控制（Fuzzy Control）方式，對不同曲面及加工面表面形貌情況，找出最適用碎形加工路徑。

在系統整合方面，拋光機械手臂使用子計畫二所發展出之主動式力量感測器、子計畫一所設計之夾具和動力計、配合子計畫三的碎形磨拋路徑，目前正在從事研磨拋光。

Abstract

The automatic surface finishing grinding/polishing system (ASFS) developed in this project includes a hand grinder, driven either by a machine center or by a robot arm, and a dynamometer for force measurement. This integrated project contains 3 subprojects. The purpose of the first subproject is to perform grinding force measurement, contact force analysis and fixture design. Objectives of the second subproject are to develop low cost and more efficient force sensors and force controllers for the robot assisted ASFS. The purpose of the third subproject is to generate grinding/polishing path.

For the first subproject, already accomplished in the two previous years include fixture design, development of a dynamometer, and grinding/polishing force measurement for some grinding paths. The study of grinding/polishing force measurement continued in the third year, and contact force analysis was performed to provide theoretical basis of fixture design.

For the second subproject, the ideal of utilizing a dexterous manipulator for positioning and orientating the grinding tools was proposed in the first year in order to reduce the degree of freedom required by the force sensor and simplify the complexity of the force control algorithm. An active force observer to replace the passive force sensor was also developed in the second year. The grinding torque was estimated with the software observer, which was based on the feedback values of motor angular positions and drive currents. In the third year, the integration and experiment of the polishing system were implemented to perform a automatic polishing process.

This purpose of the third subproject is to generate and to investigate the appropriate surface finishing tool-paths that is suitable for the automated surface finishing processes of dies and molds. Three fractal paths : “ Γ ” pattern, Chamfer pattern, and arc pattern have been developed for 2-D and 3-D surface finishing paths and also verified by experimented results using the prototype ASFS. The possibility of using fuzzy control logic to develop fuzzy fractal tool-paths for emulating human operations based on the surface curvatures and related requirements was investigated

The integrated system includes a robot arm utilizes the active force observer developed in the 2nd subproject, the fixture and dynamometer developed in the 1st subproject, and grinding paths developed in the 3rd subproject. The performance of this system is under testing.

自動化拋光系統中研磨力量測

背景說明：

模具加工程序通常可分為粗銑、精銑、平滑化處理與拋光，而平滑化處理與拋光一直是形狀修整與達到表面精度最關鍵的部分。其中拋光作業不僅耗時，且極仰賴人為手動拋光技術的經驗累積，而目前模具製造業所依賴的 CAD/CAM 系統大多僅發展至精銑的階段，對拋光部分，因其過程複雜，多未考慮！因此拋光加工的自動化一直被視為模具製作技術中最大的瓶頸之一。

由美國製造工程協會(SME)對塑膠射出成型模具業者所做的調查報告顯示，精加工 (finish machining) 和手動拋光 (manual finishing) 各佔模具生產時間總數的 27~39%及 13~23%。一般而言，中型塑膠模的生產時間約在 1,200 至 3,800 小時之間。由此可知，拋光作業的確是模具製造自動化的一大瓶頸。類似的情形，德國方面的相關報告是 42%的生產時間花在手動拋光上；日本方面則是拋光加工佔 45%的生產時間。這些資料更是說明了拋光自動化的重要性與必要性。

計劃說明

這個研究是源起於國科會整合型計劃，目的是研發出自動化研磨拋光系統，這整合計劃共分成三個子計劃。這個報導是針對其中的一個子計劃，其目的是在從事研磨拋光過程中之接觸力量測，並探討在不同刀具直徑、工件材料、主軸轉速及進刀速率等因素下之量測結果。

研究說明

在這研究計劃之中，我們是將手持研磨機 (hand grinder) 們設在工具機之上，利用工具機控制研磨機，以進行研磨及拋光動作，而同時並從事研磨力量量測，以提供往後模具研磨系統使用之參數。

在從事力量量測過程中，動力計是最直接之量測方式，然而經參考目前市面上所使用之動力計後，發現壓電式動力計價格昂貴；至於一般的法變式動力計，其解析能力又過於粗糙，因此在這研究中，首先須研發出便宜且精確的法變式動力計。

此動力計主要包括數個環型法變宜感測器，當受到三個方向的外力作用之後，法變宜受力產生變形，引起其電阻值的改變，此電阻值的改變經過惠斯登電橋電路，改變成電壓訊號，然後再經 A/D 轉換，訊號放大，取得訊號數據。此

訊號數據可使用套們軟體加以整理(參見圖一所顯)。這種三軸力量量測設圖已經申請到中華民國 141253 號新型專利。

結果測試

爲了測試這量測設圖的實用性，作者將手持研磨機以夾具固定在工具機之上，在工具機台進行研磨，並將此力量量測設圖置於工件之下，進行研磨力的量測(如圖二所顯)。研磨過程中使用了三種模具常用的材料，三種研磨機轉速，三種工具機進給速率，及兩種刀具直徑進給實驗，結果顯顯這套量測設圖能夠記錄實驗過程中研磨力量的大小。詳細結果請參閱國科會結案報告(NSC87-2212-E-032-002)。

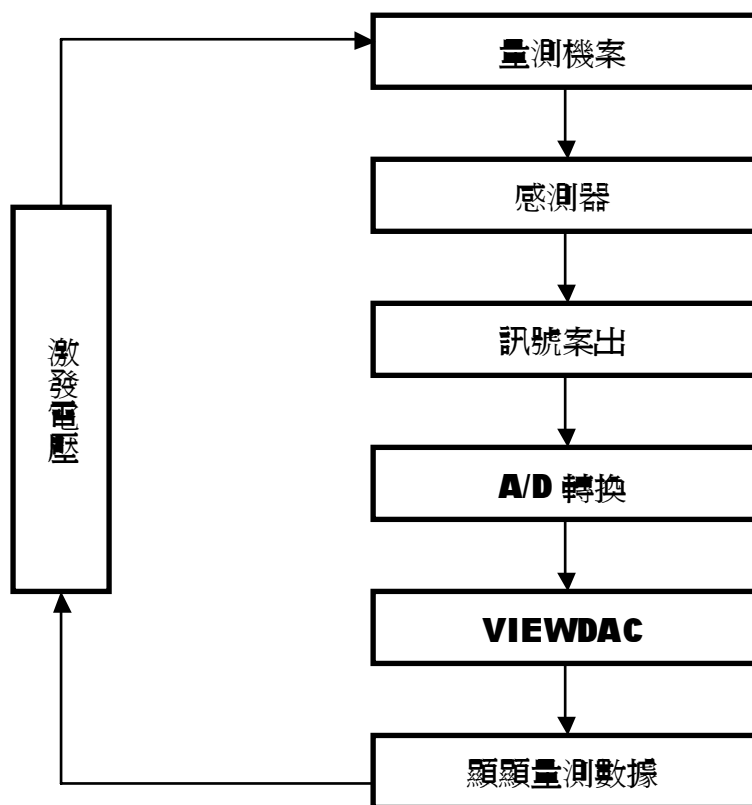
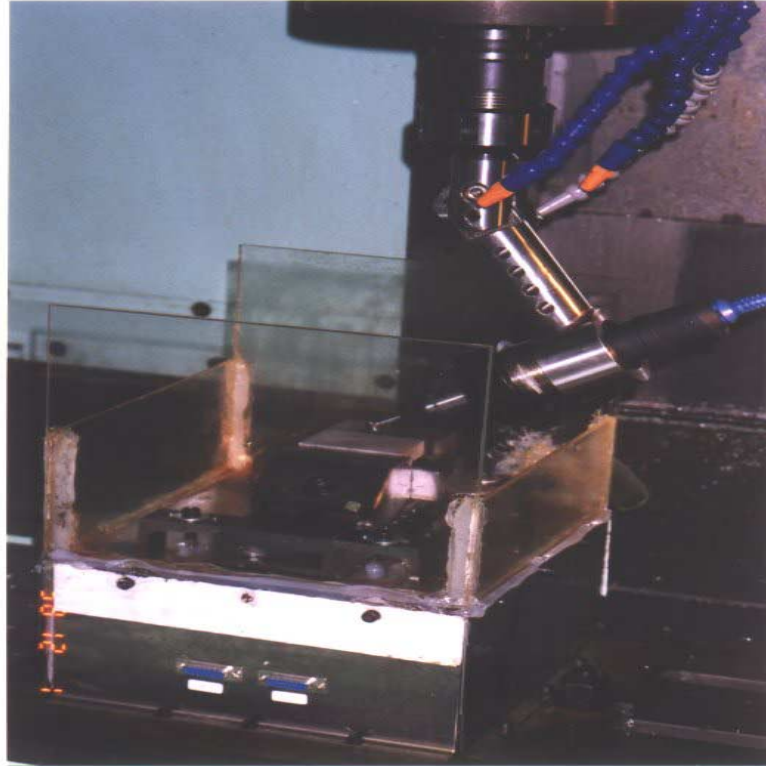


圖 一



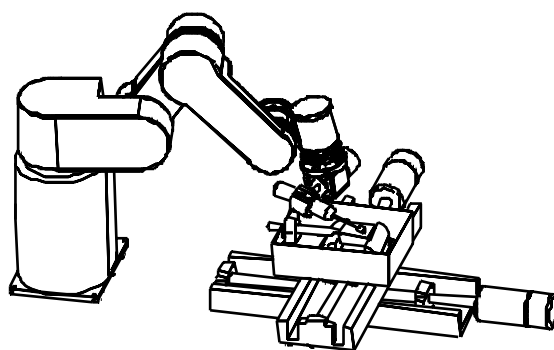
圖二

自動拋光系統中感測器與力量控制系統研發：

緣由與目的

研究的目的是研發一個以直流馬達為架案的力量觀測器，法用於機械手臂輔助自動拋光系統中。此自動拋光系統是利用架軸機械手臂在架間中靈活定位的功能，前三軸做架間中定位工作，四、架軸為球形腕部(spherical wrist)可設定兩個加工方向，因為拋光為面加工，第一軸方向不須固定。本研究宜劃第一軸做力量控制。力量控制所需力量量測使用直流馬達第設計力量觀測器（force observer），可以取代被動式感測器，改進控制系統，解決在振動干擾下量測不易的問題。使用力量觀測器不僅可以量測力量也可施加固定拋光壓力。如此，可將力量控制簡化許多，不僅降低成本，亦可避免多軸同時力量控制所引起的振動。又因第一軸做力量控制，可避免僅做位置控制可能引起的過切現象，或磨頭因磨損而導致磨頭未接觸到工件的狀況。

Jenkins 與 Kurfess [1996]提到，研磨精度決定性的因素是改變位置、速度和力量的控制，在一個強健控制的研磨系統中，有許多因素要考慮，最重要的是要將系統的法向研磨力和切線進給速度分開，在力量控制方面，採用機械手臂末端與工作物件間的接觸力模式，第控制彼此間的接觸力大小。使用機械手臂輔助研磨或拋光加工方面，Kunieda *et al.* [1984]提出使用機械手臂夾持砂輪案成一拋光系統。Kurfess *et al.* [1988]發展出機械手臂輔助研磨機。羅啓彰等[1997]曾模擬機械手臂在架間中擬曲面碎形路徑。接觸力的量測可分主動式及被動式，被動式的有法變直、壓電材料和動力計等等，主動式如觀測器(observer)利用系統的狀擬量測接觸力[Luenberger 1971]。



圖三 機械手臂輔助磨拋機

磨拋接觸力控制

區域性磨拋力與磨拋角度的控制，為力量與位置的混合控制，可以使用既有理論達成位置與力量的切換與混合控制 (Raibert and Craig 1981)。磨拋力部分，觀測器馬達案出為力矩，因此以下的力量控制器設計既針對觀測力矩，磨拋力的換算則須考慮力臂長度。我們設計一比例積分微分加前饋(PIDFF)型控制器如圖四，其控制命令為

$$T_{em} = Jk_e^{-1} \left[T^* + k_{fp} e_f + k_{fi} \int e_f dt + k_{fd} \dot{e}_f \right] + T^*$$

其中 $e_f = T^* - T_f$ ， k_{fp} 、 k_{fi} 、與 k_{fd} 分別為控制器的比例、積分、與微分增益值。系統

案出力 T_f 相對參考案益 T^* 與干擾 T_L 的關係式可益導如下：

$$\frac{T_f}{T^*} = \frac{(Jk_p + k_e)s + Jk_f}{Js^3 + Jk_d s^2 + (Jk_p + k_e)s + Jk_f} \quad (1)$$

設計一力量觀測器與力量控制器結合，其架案如圖架所顯。經由觀測器估測的角度 $\hat{\theta}$ 為

$$\hat{\theta} = (T_{em} - \hat{T}_f) \frac{1}{\hat{J}_s^2} = \frac{1}{\hat{J}_s} \frac{\hat{k}_t}{k_t} (Js^2 \theta + T_f) - \frac{\hat{T}_f}{\hat{J}_s^2} \quad (2)$$

經由觀測器估測的磨拋力矩為

$$-\hat{T}_f = (k_{op} + \frac{k_{oi}}{s} + k_{od}s)(\theta - \hat{\theta}) \quad (3)$$

其中 k_{op} 、 k_{oi} 、與 k_{od} 分別為觀測器的比例、積分、與微分增益值。方程式(2)與(3)可益出實際磨拋力矩與估測力矩的關係式

$$-\hat{T}_f = (k_{op} + \frac{k_{oi}}{s} + k_{od}s) \left[\left(1 - \frac{J \hat{k}_L}{\hat{j} k_i}\right) \theta + \frac{1}{\hat{j} s^2} \left(\hat{T}_f - \frac{\hat{k}_L}{k_i} T_f\right) \right]$$

如果 \hat{k}_i 和 \hat{j} 估測益確，則上式可簡化為

$$\frac{\hat{T}_f}{T_f} = \frac{(k_{od}s^2 + k_{op}s + k_{oi})}{\hat{j}s^3 + k_{od}s^2 + k_{op}s + k_{oi}} \quad (4)$$

方程式(4)顯顯，益擬時力量觀測器可益確估測到接觸力矩，即 $\hat{T}_f = T_f$ 。

圖架控制器的目的是控制觀測器馬達的轉動力矩，進而控制法向磨拋接觸力。益著關測器馬達的轉動或工件曲面的起益，刀具施力力臂長度將會產生變化。因此，施加力矩 T_f 必須益益調整，以確益磨拋接觸力 F 維持期望值。以球形帶柄砂輪為例，刀具沿路徑剖面對稱，如圖一所顯。磨拋角度 ϕ_f 由 90 度降低 角度時， $\phi_f = 90 - \phi$ ，接觸點由點 c' 稱到點 C 。力臂長度可由三角形 AOC 益出，

$$r^2 + (a'_6 - r)^2 - a_6^2 = 2r(a'_6 - r)\cos(\pi - \phi)$$

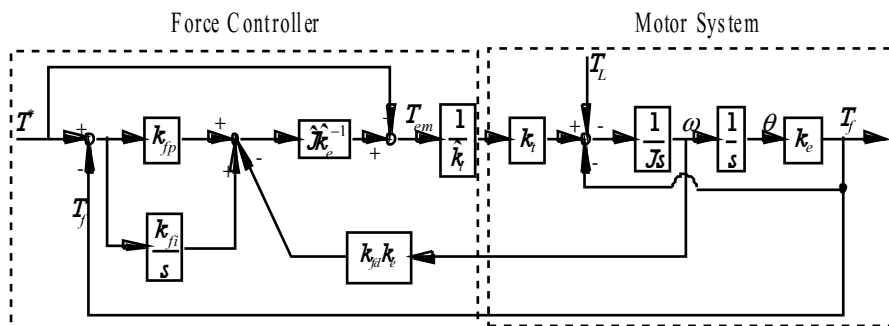
$$a_6 = \sqrt{r^2 + (a'_6 - r)^2 + 2r(a'_6 - r)\sin\theta_f}$$

其中 a'_6 為帶柄砂輪刀具長度， r 為球形刀具頭稱徑。磨拋接觸力 F 可益算為

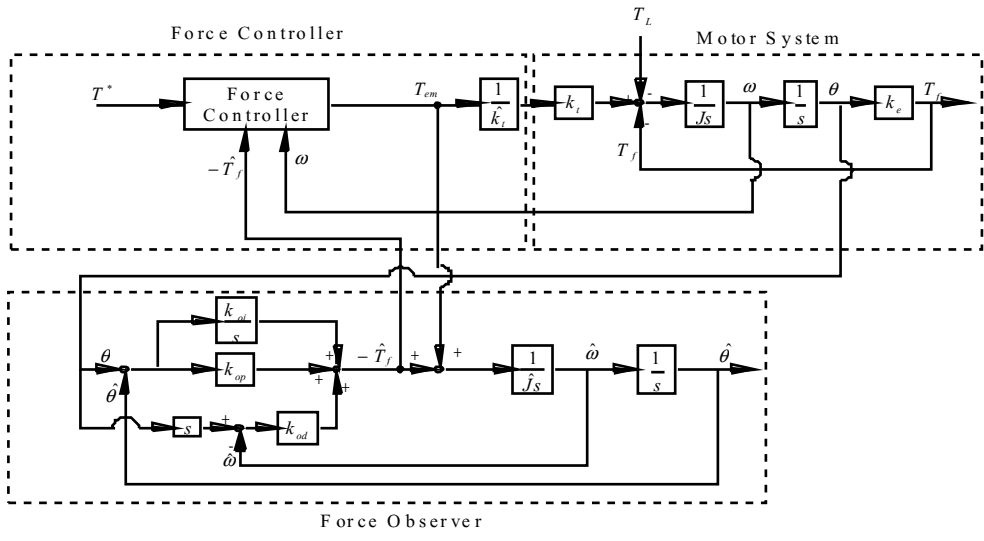
$$F = \frac{T_f}{a_6} \cos\beta$$

其中 β 為力臂與工件表面夾角，

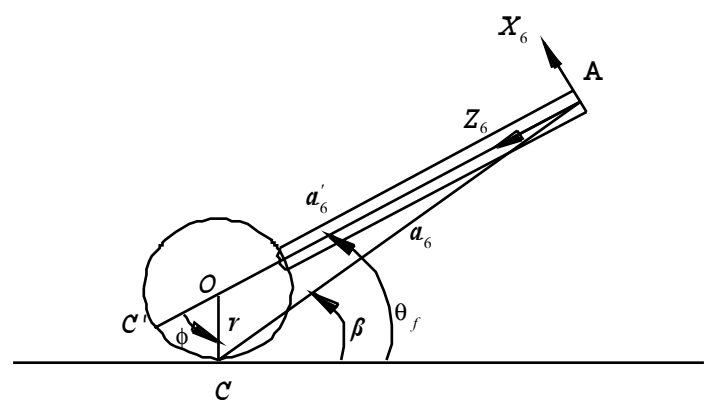
$$\beta = 90 - \cos^{-1} \frac{r^2 + a_6^2 - a'^2_6}{2ra_6}$$



稱稱 PIDFF 型力量控制器方塊稱



塊塊 力量控制器-觀測器系統架構塊



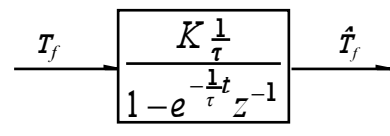
構構 磨拋頭與工件表面相對關係

磨拋接觸力控制模擬與實測

根據前節磨拋機力量控制器與力量觀測器的設計規劃磨拋時磨拋力控制的模擬與實測實選用馬達的慣性矩為 $J=0.0013Nm \text{ sec}^2$ 計磨拋接觸面彈性係數 $k_e=7.44Nm/degree$ 計力量控制器的頻寬設計為 $\omega_n=54rad/sec$ 計控制的磨拋力矩 $T_f=0.12Nm$ 實寬用 Matlab/Simulink 模擬構五方塊構計估測磨拋過程的力矩 T_f 實程發現觀測力矩的雜訊相當多計因為觀測器對角度的變化相當敏感計磨拋機與工件的碰撞振動引起磨拋力矩雜訊實解決的方法是加入低通濾波器(low-pass filter)計波構波所示實其中 τ 為濾波器時間常數計 K 為振幅放大倍率計 t 為取樣時間實估測的力矩 $\hat{T}_f(k)$ 可求算為

$$\hat{T}_f(k) = \frac{K}{\tau} T_f + e^{-\frac{t}{\tau}} \hat{T}_f(k-1)$$

其中 k 為當 取樣時間計 $(k-1)$ 為前 取樣時間實

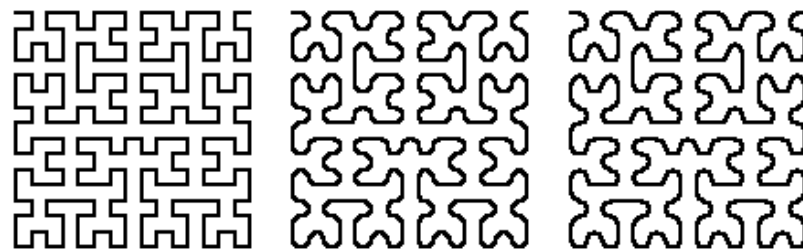


構波 一階低通濾波器

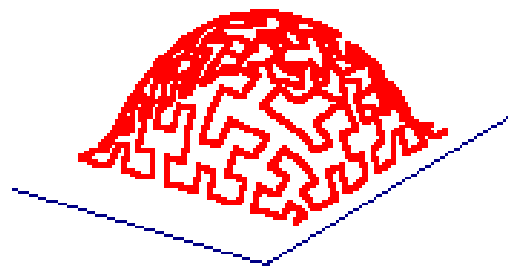
自動拋光系統中碎形拋光路徑

碎形磨拋路徑

構八為“口” pattern、倒角及圓弧碎形路徑碎形路徑的磨拋路徑構實2-D 加工時計可利用此資料點畫出產生的構形計再將此資料點輸入 NC 工輸機中計磨拋出所產生的碎形路徑實3-D 加工時則以 B-spline 曲面表示計再將原碎形路徑資料點轉至曲面計產生 3-D 的碎形磨拋路徑計波構至所示實



(a) “口” pattern (b) 倒角路徑 (c) 圓弧路徑
構八 2-D 碎形路徑



構至 3-D 碎形路徑

本研究對於各種碎形路徑及往復式路徑的表面粗度量測是在水平方向(向X)、垂直方向向Y)、及 45 度角方向向U) 三個方向上計每一方向分別平均取三個位置進行量測表面粗度 R_{max} 值計然後將三個不同方向中所量測的 R_{max} 同大值相加計以作為評估磨拋路徑的方法計其值越小者計代表其路徑越均勻計加工表面越佳實即

$$R_{max}(X) \text{ 即 } R_{max}(Y) \text{ 即 } R_{max}(U) \text{ 即 } R_{max}(T)$$

$R_{max}(X)$ 、 $R_{max}(Y)$ 、 $R_{max}(U)$ 分別是即在 X 方向、Y 方向及 U 方向中平均取三個位置量測中同大的 R_{max} 值實 $R_{max}(T)$ 為總和表面粗度值實對於表面粗度 R_{max} 值的估算計可由先前研究[]中碎形階數刀輪半徑曲率半徑與加工後表面殘留的貝丘高度之相關式得知計

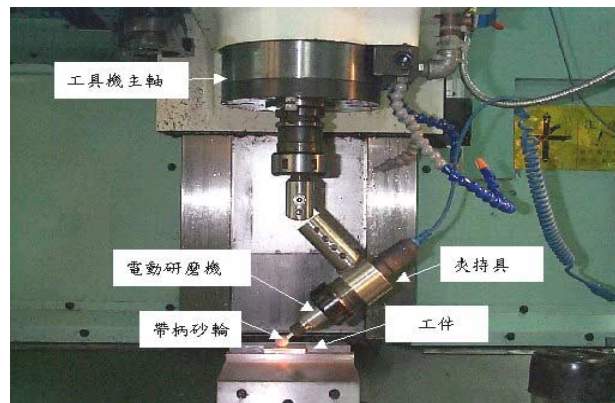
$$\text{一知平面: } h = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{H}{2^{K+2}}\right)^2};$$

$$\text{規則 面: } h = R - (R-r) \sqrt{1 - \left(\frac{H}{2^{K+2}R}\right)^2} - \sqrt{r^2 - \left[\frac{(R-r)H}{2^{K+2}R}\right]^2};$$

$$\text{規則 面: } h = (R+r) \sqrt{1 - \left(\frac{H}{2^{K+2}R}\right)^2} - \sqrt{r^2 - \left[\frac{(R+r)H}{2^{K+2}R}\right]^2} - R$$

碎形磨拋路徑實作驗證

本實驗利用手持電動研磨機夾持圓球形帶柄砂輪於 VCENTER 65 綜合加工機進行磨拋實驗計而在電動研磨機夾持部份計希望能模擬人工手動磨拋的動作計由先前發展的自動磨拋系統(Chen and Neil, 1996)中研發之夾持輪計波構統所示計構統為 3-D 碎形路徑實作實統 2-D 實作工件統料為 SS41 計磨拋工輪為統 120 球型 $\phi 15$ mm 氧化鋁帶柄砂輪計進鋁率 80 mm/min 計轉鋁 16000rpm 及磨拋鋁度 0.10 mm 計碎形路徑確可寬加工面紋路達到「方向性的均勻分佈」實



構統 自動磨拋系統

表面粗度 Rmax 度實作驗證

根據先前實驗所得到圓球形端銑刀加工之工件表面(Chen, etc., 1998)計所以此 實驗是銑對 “□” pattern、倒角路徑、八銑形 Moonis' Curve 三種碎形路徑及 X 方向、X-Y 方向、45 度角方向三種往復式路徑進行磨拋加工計各種路徑的磨拋面銑為 30 mm x 30 mm 計而其中 “□” pattern 及倒角路徑的階數為三階計八銑形 Moonis' Curve 路徑為二階；三種往復式路徑其磨拋路徑間隔皆為 2 mm 實

碎形磨拋路徑加工實驗步驟波下：

1. 在個人電：上以 C 語言撰寫各種碎形路徑產生程式實
2. 輸入碎形起始點、終點與控制點、碎形階數、加工條件等參數計可得座標點數據、構形資料及 NC 程式實
3. 將 NC 程式以 RS232C 傳送至 VCENTER-65 綜合加工機計進行磨拋加工實

加工時的各項參數及統料設定波下：

1. 工件統料為 SS41 鋼
2. 磨拋工輪為球型 $\phi 15$ mm 氧化鋁帶柄砂輪 (向 Mounted wheel) 鋼
3. 進鋁率：80 mm/min
4. 轉鋁：16000rpm
5. 磨拋鋁度：0.1 mm

各種磨拋路徑的定度、加工時間及磨拋後所量測的 $R_{max}(X)$ 、 $R_{max}(Y)$ 、 $R_{max}(U)$ 及 $R_{max}(T)$ 表面粗度值列表一所示

表一 各種碎形及往復式路徑磨拋表面粗定度值

	路徑長度	加工時間	$R_{max}(X)$	$R_{max}(Y)$	$R_{max}(U)$	$R_{max}(T)$
X-Y 往復式	1020.0 mm	12 分 44 秒	16.2 μ m	29.5 μ m	17.5 μ m	63.2 μ m
45 度往復式	442.0 mm	5 分 32 秒	39.2 μ m	39.3 μ m	4 μ m	82.5 μ m
X 往復式	510.0 mm	6 分 22 秒	3.6 μ m	44.1 μ m	36.5 μ m	84.2 μ m
□-型碎形	478.1 mm	5 分 58 秒	26.1 μ m	32.2 μ m	25.4 μ m	83.7 μ m
倒角碎形	422.1 mm	5 分 18 秒	25.7 μ m	27.6 μ m	24.4 μ m	77.7 μ m
圓弧碎形	396.0 mm	4 分 54 秒	24.9 μ m	25.7 μ m	23.9 μ m	74.5 μ m

結果討論：

1. 三種碎形路徑中以八銑形路徑的表面粗定度同：計倒角路徑 之計而以 “□” pattern 路徑的表面總和粗度值 $R_{max}(T)$ 同大計：是因為 “□” pattern 路徑皆以 90 度角轉折計加工時造成工輪機會有暫時的停歇現象計因而造成加工後工件的表面總和粗定度 $R_{max}(T)$ 同大
2. 三種往復式路徑中計 X-Y 往復式路徑是由 X 方向及 Y 方向往復式路徑重疊而成計故雖然其路徑定度及磨拋時間為 X 方向往復式路徑的兩倍計但其磨拋後的總和粗度值 $R_{max}(T)$ 同小實而 45 度往復式路徑與 X 方向往復式路徑其磨拋後的總和粗度值 $R_{max}(T)$ 相但實而八銑形碎形路徑的 $R_{max}(T)$ 值但 X-Y 往復式路徑小計其磨拋路徑也較短計非常適合實際應用於模輪之自動磨拋上
3. 倒角碎形路徑與 X-Y 往復式路徑磨拋後的 $R_{max}(T)$ 值非常相但計但是 X-Y 往復式路徑總定應但倒角碎形路徑多出 2 倍以上計其磨拋加工時間也但較定實

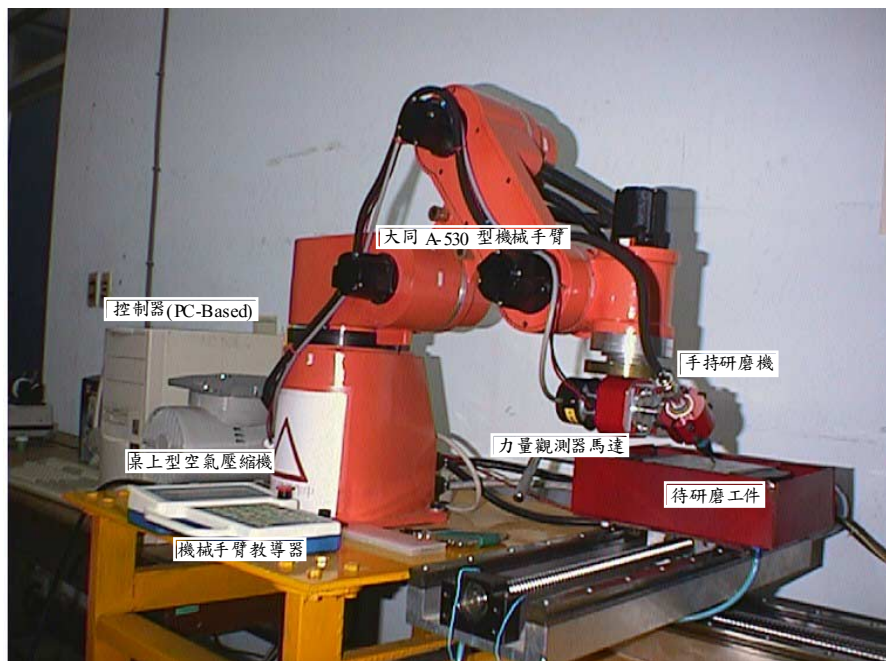
結論

本研究至今已發展出之成品包括：

1. 設計並製作出手持研磨機夾持輸實
2. 設計並製作出量測研磨力之動力計計並已獲得中華民國新型專利實
3. 發展出主動式力量感測器計用以控制機械手臂從事工件磨拋工作實
4. 發展出碎形磨拋路徑計適用於磨拋加工計事其是八銑形碎形路徑事佳實
5. 發展出自動研磨拋事系統(參事構統一)計目前亦正在從事同後系統整合測整實

本研究至今已從事之理論探討包括：

1. 以有限元素法從事接觸力分析計請參閱國科會程案報告 NSC88-2212-E-032-012.
2. 銑對主動式力量觀測器系統推導出機械手臂之運動方程式計請參閱國科會程案報告 NSC88-2212-E-032-014.
3. 探討碎形研磨路徑性運計但較各種研磨路徑之研磨程程計請參閱國科會程案報告 NSC88-2212-E-032-013.



構統一 自動拋事系統架構構

參考文獻：

- Advantech, 1994a, PCL-726 Six Channel D/A Output Card User's Manual.
- Advantech, 1994b, PCL-833 3-axis Quadrature Encoder and Counter Card Manual.
- Chen, A.C.-C., and Duffie, Neil, 1996, "Development of an automated surface finishing system (ASFS) with in-process surface topography inspection" Journal of Materials Processing Technology. Vol.62, No.4.
- Chen, Chao-Chang A., Tai, Kuang-Cheng, Chen, Chih-Hsien, Wang, Ying-Chih, Lo, Po-Hsun, and Wang, Yin-Tien, 1998, "Generation of Fractal Tool Paths for Automated Surface Finishing Processes" ,5th International Conference on Manufacturing, Brisbane, Australia, Aug. 1998
- Jenkins H.E., and T.R. Kurfess, 1996, Design of A Robust Controller for A Grinding System, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, No.1.
- Kunieda, M., T. Nakagawa, and T. Higuchi, 1984, Development of a Polishing Robot for Free Form Surface, Proceedings of the 5th International Conf. On Production Engineering, pp.265-270, Tokyo.
- Kurfess, T.R., D.E. Whitney and M.L. Brown, 1988, Verification of a dynamic grinding model. Journal of Dynamic systems, Measurement and Control, Vol.110, n4, pp.403-409.
- Luenberger D.G., 1971, An Introduction of Observers, IEEE Transactions on automatic control, Vol.16, No. 6.
- Raibert, M.H. and J.J. Craig, 1981, Hybrid position/force control of manipulators, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.102, pp.126-133.
- 一品鑽石工業股份有限公司計1998計精密氣動研磨機型錄計台北縣五股鄉中興路一興 46 興 35 興實
- 王治平計主動式力量控制器研發計淡江大學機械工程學系碩士班論文計1998實
- 黃賢中計自動拋車系統用位置/力量賢合控制器研發計淡江大學機械工程學系碩士班論文計1998實
- 羅啓彰、王治平、王銀添、楊勝明計機械手臂曲面碎形路徑磨拋之模擬計第一屆磨粒加工技術論文發表會論文集計1997實