

## 雙軸向超音波振動輔助車削之切削力研究

蔡志成<sup>1</sup>、柯博修<sup>1</sup>、王信誌<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 國立中興大學機械工程學系

<sup>2</sup> 國立霧峰農工機械科

國科會計畫編號：NSC100-2221-E-005-024-MY2

### 摘要

超音波振動輔助車削(UAT)可降低切削力及提升加工表面品質,本研究針對UAT,分析其切削力,並以實驗驗證其效果。研究先推導工件之切削軌跡,建立雙軸向振動輔助車削之切削深度與切削力模型,藉以分析不同軸向UAT造成之切削力效果。研究更進一步進行實驗以驗證推導結果,實驗結果顯示,相對於無振動的切削,徑向或軸向之單軸向UAT之切削力會降低;切線方向振動之UAT雖然其理論切削力沒有差別,但實驗結果有較好的表現;至於雙軸向之UAT,因同時擁有切線方向及軸向振動的特色,能在工件表面上執行二維的往復式切削,故無論是徑向與切線方向之雙軸向UAT,或是切線方向與軸向之雙軸向UAT,皆具有降低切削力之效果。

**關鍵字：**超音波振動輔助車削(UAT)、加工軌跡、切削力

### 1. 前言

超音波振動輔助切削為近代發展之重要加工技術,其具有降低切削力與提昇加工品質之效果,已廣泛地應用於需要高精度與高品質表面加工的精密加工業,例如通訊、光電、生物科技精密機械或半導體等相關的產業都有此需求。

超音波振動輔助切削技術是把超音波振動所產生的力,有規律地施加於刀具上,使刀具具有週期性地切削和離開工件的加工技術,為結合超音波技術與傳統切削加工,透過其加工方式,可有效地減少切削力與切削熱,降低刀具磨耗提高刀具壽命,間接地減少次表層的破壞與二次熱效應,並提昇加工精度以及材料移除率等加工效益,可應用於硬脆材料、難切削材與微細元件之加工。其應用於車削加工時稱為超音波振動輔助車削(UAT)。

Weber 等人[1]認為因為超音波振動能防止堆積刃的形成,其以玻璃陶瓷為實驗對象,結果刀具壽命得以延長 20 倍且對

於切削力及表面粗糙度都有相當大的改善。Kim 與 Lee[4]針對 Al-Si 等特殊材料進行 UAT 實驗,證實相較於傳統車削方式將可以有有效的降低切削作用力,並對於表面粗糙度亦能提升,其分析切削後的表面輪廓及組成成分,發現藉由超音波輔助振動將有助於表面精度的改善。Moriwaki 與 Shamoto[2]將超音波振動切削應用於鑽石車削,發現可以降低切削鋼鐵時,鑽石刀具因高溫、高壓而被鐵催化熱蝕所造成的磨耗的問題,如此一來將可延長刀具壽命。切削過程中甚至可以達到光學鏡面需求之表面加工品質。此外 Moriwaki 與 Shamoto[3]建置超音波雙軸向振動切削,實驗結果發現應用雙軸向振動切削將比傳統切削或傳統振動切削方法之切屑厚度、切削力以及毛邊的減少,此外採用雙軸向振動切削其表面粗糙度可達  $0.02\mu\text{m}$   $R_{\text{max}}$ 。Shamoto 等人[5]進一步利用雙軸向振動切削對玻璃進行延性切削的研究,以頻率 19kHz 的雙軸向振動進行溝紋實驗,以不同的切削方式來觀察溝紋切邊,結果顯示雙軸向振動切削比起其他兩種切削法,其溝紋深度比較深,且形狀也較為平滑。Gao 等人[6]觀察超音波輔助車削時其切削參數對於表面粗糙度之關係,實驗結果顯示有超音波輔助振動時之表面粗糙度較佳,但是隨切削速度增加、進速度增加以及切削深度增加,其表面品質會漸漸變差。

雖然有眾多的文獻探討超音波振動輔助切削所造成的效益,但其切削材料移除機制以及所造成的效果仍待進一步的探討;因此,本研究將針對 UAT 之加工進行理論之探討,並設計製作一雙軸向超音波振動刀把,透過規劃之實驗來驗證超音波加工的效果,並驗證所推導之理論。文中將藉由推導工件與切削刀具之相對切削路徑為基礎,建立振動輔助車削之切削力模型,以釐清其材料移除等效果,再經由設計實驗來驗證,以確認建立的切削力模型。

### 2. 振動輔助車削之車削軌跡分析

本文以轉換矩陣(HTM)推導 UAT 之軌

跡來分析其產生加工效益之原因，其模型主要以刀具尖點來觀看，整個切削過程中涵蓋了主軸旋轉運動、車刀進給運動及刀具尖點的強制性簡諧振動；為了易於觀察車削之動態切削過程，故以相對運動之概念推導出刀具尖點之車削軌跡方程式；該車削加工之系統如圖 1 所示，其中的符號與座標系統定義如表 1 所示 [7]。

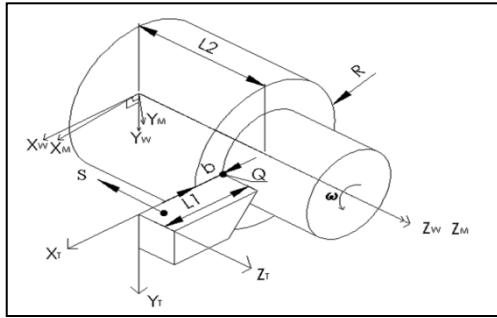


圖 1：振動輔助車削之加工示意圖 [7]

表 1：本文之符號表

$\beta$	具振動之切深( $\mu\text{m}$ )	$\zeta A$	A/R 振幅與半徑比
$\zeta b$	b/R 切深與半徑比	$\zeta V$	振速比 $V_c/V$
A	振動振幅( $\mu\text{m}$ )	b	切削深度( $\mu\text{m}$ )
f	振動頻率(kHZ)	$F_M$	工件座標系
$F_T$	刀座座標系	$F_W$	世界座標系
N	主軸轉速(rev/min)	$L_1$	$F_T$ 至 Q 之 $X_T$ 軸向距離(mm)
$L_2$	$F_W$ 至 $F_T$ 之 $Z_W$ 軸向距離(mm)	P	Q 與工件初接觸點
Q	刀具尖點	R	工件半徑(mm)
S	進給率(mm/min)	t	時間(s)
T	振動週期(S-1)	V	切削速度(m/min)
$V_c$	刀尖點之最大振動速度	$X_M$	$F_M$ 之 X 軸
$X_T$	$F_T$ 之 X 軸	$X_W$	$F_W$ 之 X 軸
$Y_M$	$F_M$ 之 Y 軸	$Y_T$	$F_T$ 之 Y 軸
$Y_W$	$F_W$ 之 Y 軸	$Z_M$	$F_M$ 之 Z 軸
$Z_T$	$F_T$ 之 Z 軸	$Z_W$	$F_W$ 之 Z 軸

### 2.1 無振動輔助車削之路徑軌跡

此模型為一種相當理想會的切削過程，此一模型藉假設完全均質的材料行為，克服了非均勻應變的概念，並且假設刀具是完全尖銳，沿著工件表面切削，切削後將會完全移除其通過的材料；並且假設切屑不向側邊移動、切深以及切削速度為一常數，並且無刀口積屑緣(Built-up edge)的連續切削。

刀具尖點 Q 在刀具座標系統( $F_T$ )上，往負 Z 軸進行切削的動作，由於 Q 點在  $X_T$  軸之負方向上且距離為  $L_1$ ，故，若以卡式座標

系來表示刀尖 Q 點相對於  $F_T$  將以  ${}^T Q$  表示，其參數式矩陣將如下式所示：

$${}^T Q = \begin{bmatrix} -L_1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

由於刀具在加工過程中，會以固定之世界座標 ( $F_W$ ) 的負  $Z_W$  方向進給運動，此時距  $Z_W$  軸線之固定距離為  $R+L_1-b$ ，故，若以卡式座標系來表示刀具座標系相對於世界座標系將以  ${}^W T_T$  來表示其座標轉換矩陣，其參數式矩陣將如下式所示：

$${}^W T_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R+L_1-b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2-St \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

又因為工件座標系( $F_M$ )在加工過程中，會以固定之世界座標( $F_W$ )的  $Z_W$  方向作順時針方向旋轉，故，若以卡式座標系來表示工件座標系相對於世界座標系將以  ${}^W T_M$  來表示其座標轉換矩陣，其參數式矩陣將如下式：

$${}^W T_M = \begin{bmatrix} \cos(2\pi Nt) & -\sin(2\pi Nt) & 0 & 0 \\ \sin(2\pi Nt) & \cos(2\pi Nt) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因為主要是為了探討加工過程刀具與工件間的相對運動關係，故在此利用相對運動的概念將刀具振動與工件旋轉之過程結合起來，意即將原始座標系統，轉換為工件座標系上觀察刀尖 Q 點之軌跡路徑，其相對運動關係式將可以  ${}^M Q_S$  來表示 Q 點相對於工件座標系之相對車削軌跡方程式，其參數式矩陣如下式：

$$\begin{aligned} {}^M Q_S &= \begin{bmatrix} {}^M X_{QS} \\ {}^M Y_{QS} \\ {}^M Z_{QS} \end{bmatrix} \\ &= {}^M T_W \cdot {}^W T_T \cdot {}^T Q \\ &= \begin{bmatrix} \cos(2\pi Nt) & \sin(2\pi Nt) & 0 & 0 \\ -\sin(2\pi Nt) & \cos(2\pi Nt) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R+L_1-b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2-St \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -L_1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(2\pi Nt) & \sin(2\pi Nt) & 0 & 0 \\ -\sin(2\pi Nt) & \cos(2\pi Nt) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R-b \\ 0 \\ L_2 - St \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (R-b)\cos(2\pi Nt) \\ (b-R)\sin(2\pi Nt) \\ L_2 - St \\ 1 \end{bmatrix}$$

由上述之相對軌跡運動推導過程，除了可以得到以時間為函數之軌跡參數式的切削路徑圖，若在其刀具之 X 軸、Y 軸或者 Z 軸方向進行不同形式的振動，便可產生出各種不同的振動切削路徑軌跡模型。

根據上式，給定加工參數模擬出如圖 2 所示之三維加工路徑圖；其中，工件半徑 R=8 mm、主軸轉速 N=35rpm、進給速度 S=0.050mm/rev、切削深度 b=20μm，而切削時間 t=0~T。

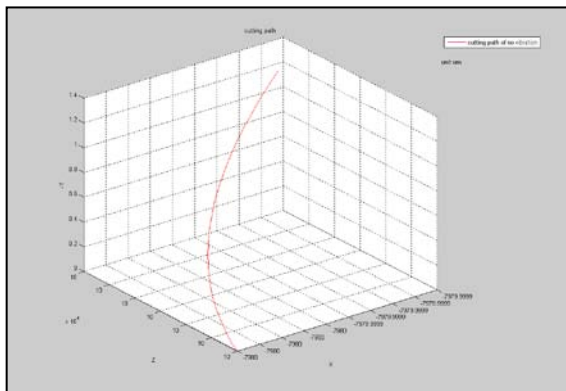


圖 2：無振動之切削路徑軌跡

### 2.2 超音振動輔助車削之路徑軌跡

考慮刀具尖點 Q 在刀具座標系(F<sub>T</sub>)，以振幅為 A 且振動頻率為 f，作簡諧振動，則其 Q 點相對於工件座標系之相對車削軌跡方程式，將會改寫其參數式矩陣如下所示，

$${}^M Q_S = \begin{bmatrix} {}^M X_{QS} \\ {}^M Y_{QS} \\ {}^M Z_{QS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi Nt) & \sin(2\pi Nt) & 0 & 0 \\ -\sin(2\pi Nt) & \cos(2\pi Nt) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R+L_1-b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2-St \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -L_1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

-A sin(2πft)  
 有振動時

根據上式，給定加工參數模擬出如圖 3

至圖 7 所示之三維加工路徑圖；其中，振動頻率 f=34.2kHz、單邊振動振幅 A=1.5μm。

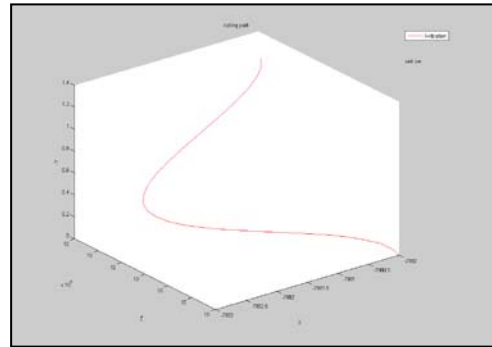


圖 3：徑向振動(XT)之切削路徑軌跡

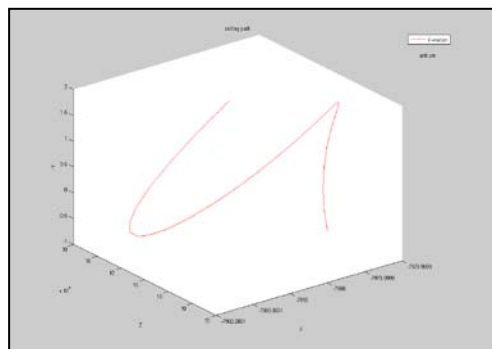


圖 4：切線向振動(YT)之切削路徑軌跡

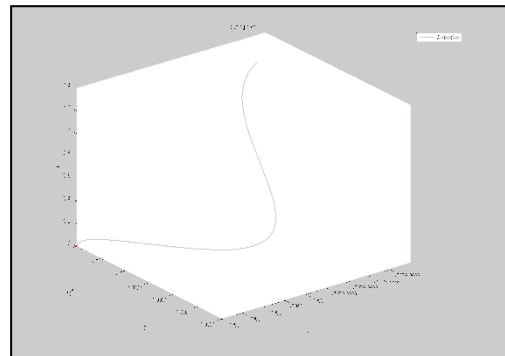


圖 5：軸向振動(ZT)之切削路徑軌跡

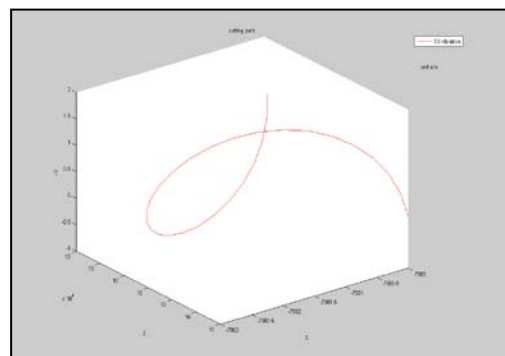


圖 6：雙軸向振動(XTYT)之切削路徑軌跡

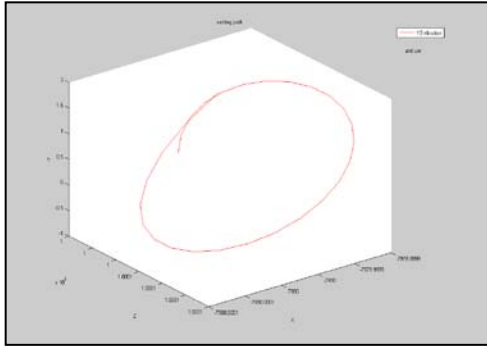


圖 7：雙軸向振動(ZTYT)之切削路徑軌跡

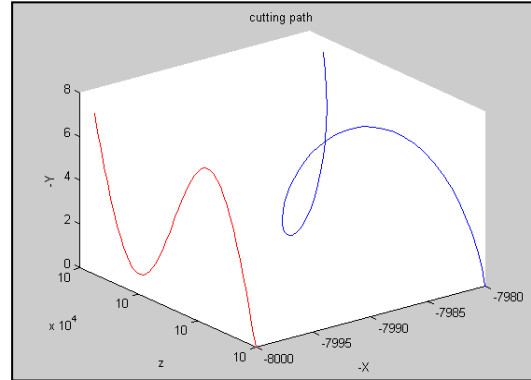


圖 9：單位時間內的車削軌跡圖

### 3. 切削力分析

切削力預測模式的建立，不論是一維超音波振動車削或者雙軸向振動車削，都必須先由刀尖點的切削路徑的理論分析開始著手，在上節中已分析 UAT 過程中的相對位置變化的情形，也分析不同形式的 UAT 與無振動輔助車削的不同，故本節將藉由前節推導的車削軌跡，搭配正交切削之材料移除的概念，進一步計算與推導其切削力模型。

吾人只要先將單位時間內的材料移除率先求得，接著再搭配比切削能求出切削功率，最後再除以切削速度，即可求得其切削力。以圖 8 為例，其為單位時間內所移除的體積，詳細計算流程如下所示：

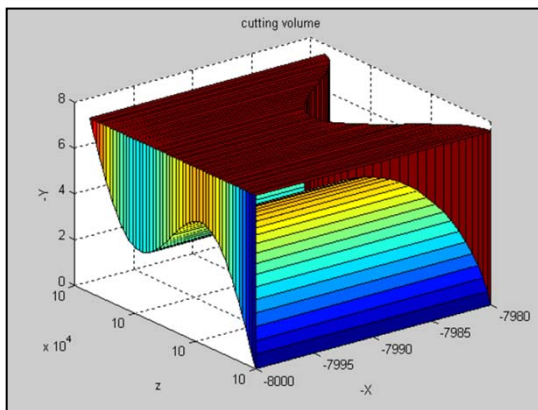


圖 8：單位時間內所移除的體積

假設單位時間為 1 個週期切削所花的時間，根據圖 9 藍色軌跡之車削軌跡，將之投影到工件表面上，便可得到另一條車削軌跡，如圖 9 紅色軌跡所示。

利用此兩車削軌跡，對其路徑做積分，進而求得其體積。

$$V = \int A \, dz = \int \Delta X \Delta Y \, dz$$

$$= \int_{t=0}^T \left\{ \frac{(x_2(t) - x_1(t))(y_2(T) - y_2(t)) + (y_1(T) - y_1(t))}{2} \right\} dz$$

又

$$t = \frac{-z + L_2}{s}$$

所以

$$V = \int A \, dz$$

$$= \int_{z=L_2}^{L_2 - sT} \left\{ \frac{(x_2(z) - x_1(z))(y_2(T) - y_2(z)) + (y_1(T) - y_1(z))}{2} \right\} dz$$

最後根據第二步所求得的單位時間內所移除的體積(即為材料移除率 MRR)，再乘上比切削能，除以切削速度，便可求得其切削力。

$$P = u \cdot Q = F_c \cdot V_c$$

$$F_c = \frac{uQ}{V_c} = \frac{u}{V_c} \int_{z=L_2}^{L_2 - sT} \left\{ \frac{(x_2(z) - x_1(z))(y_2(T) - y_2(z)) + (y_1(T) - y_1(z))}{2} \right\} dz$$

另外，當工件旋轉第二圈以後，則須減掉上一圈重覆移除之體積，如圖 10 所示。即假如第一圈切削共 n 個週期的時間，第二圈開始切削 m 週期的體積也就為

$$\int_{t=0}^{n+m} A \, dz - \int_{t=0}^m A \, dz$$

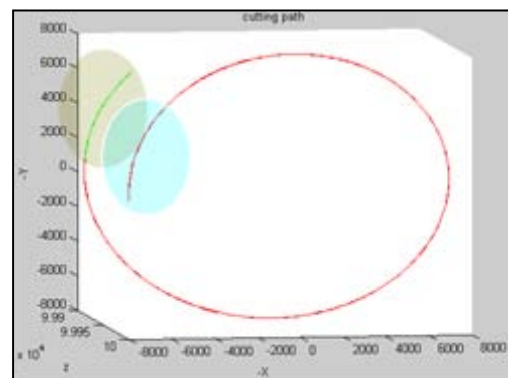


圖 10：重覆移除體積之示意圖



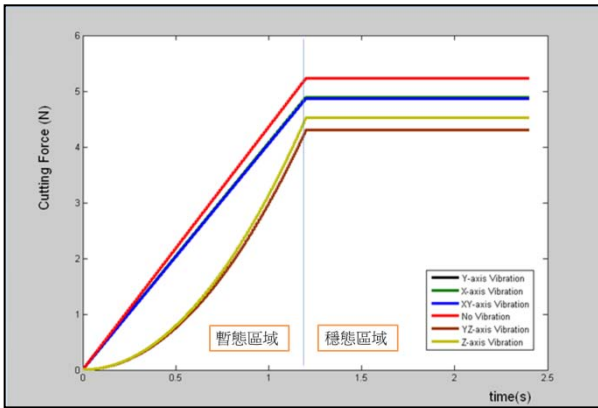


圖 11：切削力比較圖

經由上述公式推導，以及 Matlab 軟體計算後，可以得到各種不同振動方式所造成的切削力，如圖 11 所示，其代表在相同材料與相同切削速度的條件下，影響切削力最大的因素為單位時間內所移除的體積，單位時間內移除體積愈多，所造成的切削力愈大，反之亦然，其切削力的排序如下及圖 12 所示， $F_{無振動} = F_{切線方向 UAT} > F_{徑向 UAT} = F_{XYUAT} > F_{軸向 UAT} > F_{YZUAT}$ 。

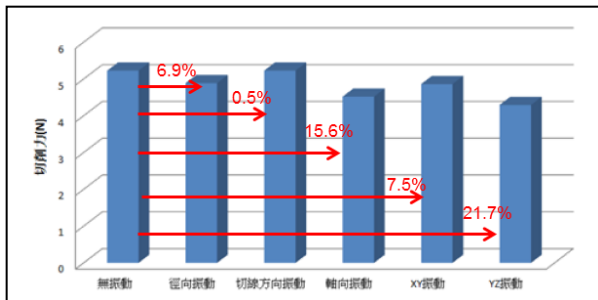


圖 12：切削力比較圖

切削力的減少主要因振幅及頻率有關，當施予徑向振動時，由於其對於工件表面具有徑向的往復運動，其車削軌跡會造成某些材料無法移除，以至於產生切削力減少 6.9% (相對於無振動切削) 的現象，但其表面粗度相對於其他振動將會有較差的現象；而當施予切線方向振動時，由於其是切線方向振動，即切削方向振動，從車削軌跡來看，其切削體積會與無振動時的切削力相同；而當施予軸向振動，其切削方式會與徑向振動切削相同，不同點其會隨著進給率而有變化，單位時間內所移除的體積相較於其他軸向振動形式會減少許多，故其最後切削力會最小，切削力減少 15.6% (相對於無振動切削)；而雙軸向振動時，會因其振動之複合，最後造成切削力能夠再次減少的現象。可知超音波振動輔助或者振動輔助車削可同時具有

切削力減少及表粗變好的特性是有條件的，因為能量守衡的概念，不可能在相同的材料移除率下，造成較好的表面形貌。

#### 4. 實驗探討

本文所探討不同軸向振動切削對於表面粗糙度及切削力的影響，理論分析顯示，軸向振動對於加工品質與切削力將有較好的效果，故本研究研製一可產生雙軸向超音波振動之車刀刀把，並經測試確認其功能與性能 [8]，其切線方向振動性能為 34.3kHz 1.5μmp-p，軸向振動性能為 33.3kHz 1.5μmp-p，進一步進行切削實驗來探討表面粗糙度與切削力之理論模式的合理性。

為了驗證本研究之雙軸向雙軸向超音波振動車削刀把之效能，即施加振動後具有切削力減少及表面品質改善的效果，故本研究將針對常用的鋼材 S45C 為目標，使用本研究設計之刀把架設在傳統的加工機台上進行實際的車削加工，如圖 13 所示。



圖 13：車削測試之架設

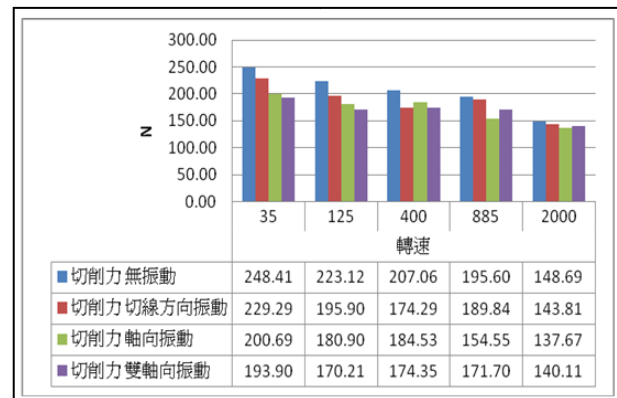


圖 14：UAT 實驗之切削力量測數據

實驗之操作與一般車床加工相同，不同在於其有加入一簡諧振幅，在加工的同時，利用擷取卡讀取動力計的數值，並量測無振動與雙軸向振動所造成的切削力，接著再以表粗儀量測其表面粗糙度，由實驗可以發現當有振動輔助時，其表切削力以及表面粗糙

度  $R_{max}$  減少約 20% 或以上，故由此實際切削測試來看，本研究所製造之雙軸向雙軸向超音波振動車削刀把能有助於切削力及表面粗糙度的改善，如圖 14 所示。

### 5. 結論

超音波振動輔助切削能有效降低切削力及提升加工表面品質，本研究以座標轉換法推導工件之理論切削軌跡，以此為基礎，進一步建立一般正交切削、一維振動輔助切削及二維的雙軸向雙軸向振動輔助車削之切削力與表面粗糙度的模型。本研究並研發一雙軸向雙軸向超音震動輔助車刀刀把，進行切削實驗結論歸納如下：

1. 相對於無振動的切削，徑向與軸向之單軸向 UAT 的切削力會降低。
2. 切線方向振動之 UAT 相對於無振動切削的結果，雖然其理論切削力沒有差別，但實驗結果有較好的表現。
3. 徑向與切線方向之雙軸向 UAT，能同時具有兩軸向的特性，相對於無振動的切削，其切削力可降低。
4. 切線方向與軸向之雙軸向 UAT，相對於無振動切削的結果，具有切削力降低的效果。

### 誌謝

本研究承中興大學光機電系統整合實驗室、中興大學精密所精密微加工實驗室、中興大學微壓電實驗室及國立霧峰高級農工職業學校協助實驗，特此致謝。

### 參考文獻

1. H. Weber, J. Herberger and R. Pilz, "Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool," *Annals of the CIRP*, 33(1), pp.85-87, 1984.
2. T. Moriwaki and E. Shamoto, "Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration," *Annals of the CIRP*, 41(1), pp.141-144, 1992.
3. T. Moriwaki and E. Shamoto, "Ultrasonic elliptical vibration cutting," *Annals of the CIRP*, 44(1), pp.31-34, 1995.
4. J. D. Kim and E. S. Lee, "Ultrasonic vibration cutting of a hypereutectic Al-Si alloy," *Aluminium*, v73, n9, pp.624, 1997.
5. E. Shamoto, M. Chunxiang and T. Moriwaki, "Ultraprecision ductile cutting of glass by ultrasonic elliptical vibration cutting," *Proc. of 1st Int'l Conf. of European Society Precision Engineering*

*and Nanotechnology*, pp.408-411, 1999.

6. G. F. Gao, B. Zhao, F. Jiao and C. S. Liu, "Research on the influence of the cutting conditions on the surface microstructure of ultra-thin wall parts in ultrasonic vibration cutting," *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1-3), pp.66-70, 2002.
7. 蔡志成、周思成、柯博修，"振動輔助車削之加工效果探討"，*中國機械工程學會第 28 屆全國學術研討會論文集*，論文 D01-050，2011。
8. 柯博修、蔡志成，"雙軸向超音波振動車削刀把之研製"，*第 15 屆全國機構與機器設計學術研討會論文集*，2012。

## An Investigation on the Cutting Forces for Dual-Axis Ultrasonic Assisted Turning

Jhy-Cherng Tsai<sup>1</sup>, Po-Hsio Kou<sup>1</sup>, Shen-Jhy Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan

<sup>2</sup>National Wufen Agricultural and Industrial Vocational High School, Wufen, Taichung, Taiwan  
NSC Project : NSC100-2221-E-005-024-MY2

### Abstract

Ultrasonic-assisted turning (UAT) can improve surface quality of work piece as well as to reduce cutting forces. This paper is to investigate the cutting forces of dual-axis UAT via theoretical analysis and experimental verification. The trace of cutting is first analyzed so that the depth of cut, chip formation and cutting forces are derived. Experiments are further conducted to measure cutting forces of dual-axis UAT as a comparison to the theoretical analysis. The results show that UAT in either radial, axial or tangential direction can reduce the cutting forces. Dual-axis UAT either combining radial and tangential vibrations or combining axial and tangential vibrations also achieve the reduction of cutting forces.

**Keywords:** Ultrasonic-assisted turning (UAT), Trace of cutting, Cutting force