

行政院國家科學委員會專題研究計畫報告

五軸加工刀具路徑規劃(2/2)

Tool Path Planning for Five-Axis Machining

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-183

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：楊宏智 教授 國立台灣大學機械工程研究所

計畫參與人員：莊禮彰 國立台灣大學機械工程研究所

一、中文摘要

以渦輪葉片為例，其曲率變化大，曲面加工精度要求又高，而葉片與葉片間重疊部分相當複雜，無法以三軸加工完成。本計畫探討整合相關的五軸加工生產技術，並以渦輪葉片為載具規劃出完整的加工製程。另外探討泛用型五軸後處理器的設計方法，應用 D-H Representation，以系統化的法則定義五軸工具機的局部座標系，並透過 D-H Parameter 有效率的建構出桿件間的齊次座標轉換矩陣，進而得到該五軸工具機的運動參數方程式。在求解五軸運動參數方程式的方法上，採用了 Newton-Raphson Method 搭配 Least-Square Method 來求解工具機的運動軸參數。最後，以數個實際的五軸工具機構型為實例，搭配商用軟體 Vericut 以驗證本研究的泛用型後處理程式的可行性與正確性。

Abstract

The objective of present study is to design a general five-axis postprocessor. In this study, D-H Representation is applied to define the local coordinate of 5-axis machines systematically. The D-H Parameter is used to construct a homogeneous transform matrix efficiently between each machine element. Consequently, the kinematics parameter equation of the 5-axis machine can be obtained through this procedure. Kinematics parameters of the 5-axis machine are solved with Newton-Raphson Method and the Least-Square Method. Finally, VERICUT is used to verify the feasibility of general 5-axis postprocessor in the thesis with various different types of the machines. The results of

verification turn out successful.

Keywords: Impeller, Tool-path Planning, 5-axis Machining, postprocessor, 5-axis machine, and homogeneous transform matrix

二、緣由與目的

CAD/CAM 所產生出來的切削點資料 (CL Data)，必須透過後處理程式 (Post Processor)，才能轉換成該工具機的 NC 程式碼進行加工，而在後處理程式這一部份，由於國內相關科技產業目前尚無法單獨建立後處理程式，導致大部分五軸機器的關鍵技術上無法瞭解，必須仰賴國外進口昂貴的後處理器進行處理。傳統在設計五軸工具機的後處理程式的過程，皆需針對某一特定的五軸工具機構型進行該工具機運動方程式的單獨推導。在推導的過程中，需要大量的座標轉換技巧，最後在求解解析解的結果上亦透過複雜及瑣碎的人工求解手續，十分的沒有效率，再加上需對不同的工具機重新撰寫後處理器，造成後處理器的使用上變得很沒有彈性。本研究的重點在導入有效的法則，建立一個泛用型的五軸後處理器，經過一些簡單的參數設定，產生某特定機型的後處理器，期能大量降低人工求解的繁瑣與提升後處理器使用上的彈性。

三、結果與討論

本計畫中將延續去年離心式渦輪葉片之加工規劃，首先探討圓角加工的困難處，研究薄片銑削因振動造成破壞的改善方式，同時提出可行的加工方法。

在後處理程式的研究方面，以下簡介

齊次座標轉換矩陣的意義與內涵。以及說明機器人學中的 D-H Representation 如何應用在五軸工具機的座標定義上，並進而利用 D-H Parameter 來建立齊次座標轉換矩陣。

3.1 圓角加工演算法則

本研究所討論的渦輪葉片，其薄片圓角皆以直紋曲面的設計為主，因此在加工的型式上可以採取端銑(End Milling)或是側銑(Flank Milling)的方式。

利用端銑法加工，刀具是利用點接觸(Point Contact)的方式銑削，可以較為精準的切削加工曲面，過切或讓切的情況較少，同時刀具接觸工件銑削時，因為切削力造成的振動問題亦較為緩和，所以可以得到較佳的加工尺寸精度與較吻合的幾何形狀。雖然端銑的方式較為精準，但是因為材料去除率低，造成加工時間的增長，在效率上不易提昇。

利用側銑的方式，刀具與工件是利用線接觸(Line Contact)的方式銑削，相較於端銑的方式，側銑的材料去除率高，加工時間可以大幅縮短，同時加工表面的品質也較佳，但是加工尺寸精度與幾何外形較不易掌握，同時因為切削力的增大，使工件破壞而使加工失敗的機率亦相對提升。此外，葉片直紋曲面係採用的側銑方式加工，因此在控制加工品質的範圍以及考量加工效率的情況下，故本研究將利用側銑的方法進行圓角加工。

本研究以曲面一端的邊界法向量作為初始刀具軸向決定的方式[1]，根據扭曲直紋曲面的特性，最大誤差發生在曲面的另一端，因此需對刀具軸向作修正，修正的方式如圖 1 所示。刀具首先以曲面外緣邊界法向量決定初始刀具軸向，此初始刀具軸向與曲面內緣邊界產生最大的誤差，此時沿著曲面外緣邊界法向量將曲面內緣的刀具端向上提起 t 值的距離，使刀具與曲面的內緣與外緣均相切。假設刀具半徑值為 R ，兩端邊界曲線法向量的夾角為 ϕ ，則修正量 $t = R * (\sec \phi - 1)$ 。

3.2 D-H Representation

齊次座標轉換矩陣的特性就是可經由轉換矩陣間的連續相乘，以描述同時有數

個座標系統間的空間關係，例如當第 n 桿件上的座標系 $(XYZ)_n$ 相對於基底座標系 $(XYZ)_0$ 間的相對空間關係可表示。

$${}^0T_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}A_i = {}^0A_1 {}^1A_2 \cdots {}^{n-1}A_n$$

以 D-H Representation 來定義座標系，可與圖 2 對照之。在座標系設定完成後，可以透過 D-H Parameter 來描述相鄰座標系間的關係，而這些參數分別為 q 、 a 、 b 、 l 和 α 共五個。

1 計算 D-H Parameter

1. q_i 為從 X_{i-1} 軸到 X_i 軸繞著 Z_{i-1} 軸的角度。
2. a_i 為 Z_i 軸與 Z_{i-1} 軸間的最短距離。
3. b_i 為沿著 Z_{i-1} 軸從第 $i-1$ 座標系的原點到 a_i 與 Z_{i-1} 軸的交叉點間的距離。
4. l_i 為沿著 Z_i 軸從 a_i 與 Z_i 軸的交叉點到 i 標系原點的距離。
5. α_i 為從 Z_{i-1} 軸到 Z_i 軸繞著 X_i 軸的角度。

D-H Parameter 可用來建立座標系 $(XYZ)_i$ 相對於座標系 $(XYZ)_{i-1}$ 的齊次座標轉換矩陣 - 可視為座標系 $(XYZ)_i$ 依序經由平移 l_i 、旋轉 α_i 、平移 a_i 、旋轉 q_i 及平移 b_i 的齊次座標轉換矩陣連乘積來決定。

$${}^{i-1}A_i = Trans(0,0,b_i) Rot(Z,q_i) Trans(a_i,0,0) Rot(X,\alpha_i) Trans(0,0,l_i)$$

$$= \begin{bmatrix} Cq_i & -Sq_iCa_i & Sq_iSa_i & l_iSq_iSa_i + a_iCq_i \\ Sq_i & Cq_iCa_i & -Cq_iSa_i & -l_iCq_iSa_i + a_iSq_i \\ 0 & Sa_i & Ca_i & l_iCa_i + b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Sq_i = \sin q_i; Cq_i = \cos q_i; Sa_i = \sin \alpha_i; Ca_i = \cos \alpha_i$$

照此法所建立的齊次座標轉換矩陣就稱為修正型 D-H 矩陣 (Denavit-Harenberg Matrix)，簡稱 D-H 矩陣(D-H Matrix)。利用 D-H Representation 來建構工具機桿件的局部座標系，並且找出 D-H Parameter 建立相鄰工具機桿件間的齊次座標轉換矩陣(D-H Matrix)，並透過齊次座標轉換矩陣相乘的特性，建立第一桿件與最後一桿件的空間關係。

3.3 五軸工具機後處理器的數學模型推導

五軸工具機的構型種類繁多，針對每一構型的機器皆會有屬於該構型的後處理器，每一個工具機的後處理器，彼此間不能夠互換。而本節重點主要在於針對某一構型的五軸工具機，介紹如何應用 D-H Representation 的法則，建構出五軸工具機

的各軸座標系，並利用 D-H Parameter 來建立各桿件間的齊次座標轉換矩陣，再進一步配合前向轉換，找出工件桿與刀具桿的空間轉換關係，配合輸入的刀具路徑(CL Data)資料，推導出該五軸工具機的運動參數方程組。最後，將此法則一般化，應用在特殊構型工具機上，以期達到泛用型五軸後處理程式設計之目的。

推導流程依序為：(1)決定桿件的連結順序，以工件為 0 桿，刀具為最後一桿。(2)定義各運動桿件的局部座標系，根據 D-H Representation 對於座標系定義的法則，只需定義各運動軸的原點及運動軸方向(Z 軸)即可。(3)找出各座標系間的 D-H Parameter，並利用 D-H Parameter 建構出 D-H Matrix。(4)透過前向運動學，得到各桿件間的 D-H Matrix 連乘積後，便可得到工件座標系和刀具座標系間的齊次座標轉換矩陣，最後利用此齊次座標轉換矩陣即可得到該後處理器的五軸運動參數方程組。

四、後處理程式驗證

五軸後處理程式驗證上，利用商用模擬切削軟體 Vericut[2]，進行軟體的模擬切削，而模擬切削的驗證流程如下所示：

1. 決定一台五軸工具機構型，包括此構型的各桿件運動軸向及空間中相對位置。
2. 將此構型資料輸入本研究的泛用型後處理程式中，並輸入一組 CL Data，透過本研究的泛用型後處理程式轉出 NC 碼。
3. 在 Vericut 中利用該軟體所提供的多軸工具機建構模組，建構出與本研究相同構型的五軸工具機，並輸入本研究所產生的 NC 碼，進行模擬切削。
4. 透過 Vericut 軟體，反算 NC 碼在工件座標系的座標值與本研究的後處理程式所輸入的 CL Data 進行資料比對。本研究後處理程式的正確性，可由這兩組資料比對確認。在後處理程式中誤差設定控制小於 0.001。

Vericut 軟體可以分別模擬切削 CL Data 與 NC 碼，進行這兩組資料切削後的餘料比對。以下將採用同一組 CL Data，分別透過不同構型的後處理器進行 NC 碼的產生，以便進行觀察比較。為了驗證本研究的正確性，將抽取其中 10 點進行比對，此 10 點資料如下表 1 所示。

表 1 資料驗證用的 CL Data

No		X	Y	Z	I	J	K
1	GOTO	12.9176	1.32198	44.417	0.990757	0.102344	-0.08902
2	GOTO	13.051	1.86894	43.7727	0.990811	0.110399	-0.07814
3	GOTO	13.172	2.40427	43.1141	0.990642	0.119239	-0.06642
4	GOTO	13.279	2.92019	42.4468	0.99018	0.128037	-0.05612
5	GOTO	13.3228	3.15742	42.1349	0.989606	0.134078	-0.052
6	GOTO	13.3723	3.41414	41.7824	0.989424	0.138161	-0.04418
7	GOTO	13.4207	3.66229	41.4382	0.989213	0.141962	-0.03613
8	GOTO	13.4654	3.90134	41.1069	0.988789	0.146467	-0.02906
9	GOTO	13.5084	4.13853	40.7738	0.988304	0.150901	-0.022
10	GOTO	13.5503	4.37048	40.4353	0.988046	0.153201	-0.01716

圖 3 所切削出的模型為輸入 CL Data 至 Vericut 軟體中所模擬的結果。此處後處理器之驗證，將以後處理器所產生的 NC 碼輸入至 Vericut 軟體中模擬切削，並與圖 3 作比對，比較是否與 CL Data 所切削出的外型相同。

4.1 工作台傾斜型後處理程式驗證

圖 4 的機構運動示意圖為 CL Data 的前段資料。Vericut 軟體模擬 NC 碼切削的刀具運動情形，如圖 5 所示，利用 NC 碼所切削出的產品外型與 CL Data 所切削出的工件外型一致。

為了更進一步的驗證本研究的後處理器在 CL Data 轉換至 NC 碼的過程中正確無誤，以下利用 Vericut 中所提供反算 NC 碼為 CL Data 的功能，與輸入的 CL Data 進行資料比對。表 2 僅列出驗證用的 10 點 NC 碼，這 10 點 NC 碼，依序分別為表 1 的 CL Data 所轉換出來的，此工作台傾斜型的 10 點驗證用的 NC 碼經由 Vericut 反算之 CL Data 於表 3。

表 2 工作台傾斜型驗證 NC 碼

No.							
1	G01	C	84.10233	A 95.10741	Y 45.39663	X -0.01233	Z -8.97921
2	G01	C	83.64216	A 94.48148	Y 44.66854	X 0.41221	Z -9.71714
3	G01	C	83.13659	A 93.80819	Y 43.90655	X 0.81295	Z -10.4719
4	G01	C	82.63215	A 93.21711	Y 43.13991	X 1.19319	Z -11.1403
5	G01	C	82.28419	A 92.98045	Y 42.78631	X 1.34012	Z -11.4169
6	G01	C	82.05074	A 92.53191	Y 42.34752	X 1.53191	Z -11.8568
7	G01	C	81.83324	A 92.07031	Y 41.90986	X 1.71868	Z -12.2988
8	G01	C	81.57418	A 91.66522	Y 41.49323	X 1.88616	Z -12.6913
9	G01	C	81.31874	A 91.26083	Y 41.07151	X 2.05219	Z -13.0777
10	G01	C	81.18622	A 90.98303	Y 40.67056	X 2.24265	Z -13.3642

表 3 工作台傾斜型反算之 CL Data

No	X	Y	Z	I	J	K
1	12.91745	1.321962	44.41703	0.990758	0.102344	-0.08902
2	13.051	1.868941	43.77271	0.990811	0.110399	-0.07814
3	13.172	2.404271	43.11409	0.990642	0.119239	-0.06642
4	13.27893	2.920179	42.44673	0.99018	0.128037	-0.05612
5	13.3228	3.157421	42.13481	0.989606	0.134078	-0.052
6	13.37232	3.414055	41.7824	0.989424	0.138161	-0.04418
7	13.4207	3.662293	41.4382	0.989213	0.141962	-0.03613
8	13.4654	3.901339	41.1069	0.988789	0.146467	-0.02906
9	13.5084	4.138528	40.77381	0.988304	0.150901	-0.022
10	13.55031	4.370484	40.4353	0.988046	0.153201	-0.01716

將原始之 CL Data 減去由 Vericut 反算出之 CL Data 做比對，可得到圖 6。可以發現反算出來的數值(表 3)與本研究後處理程

式所輸入的 CL Data(表 1)的值在誤差控制範圍之內。故可知本研究在此構型上的後處理器確實可行。由以上兩種驗證方式得知，本研究針對該工具機的構型所產生出來的 NC 碼確實正確無誤。本研究的後處理器設計確實能夠對於此構型的工具機轉出正確的 NC 碼。

4.2 主軸傾斜型後處理程式驗證(如圖 7)

4.3 工作台-主軸傾斜型後處理程式驗證(如圖 8)

4.4 離心式渦輪葉片模擬加工驗證

本節以主軸傾斜型的五軸工具機加工離心式渦輪葉片為例，以 CL Data 所切削出的離心式渦輪葉片，如圖 9 所示。利用後處理程式所產生的 NC 碼進行模擬切削，其葉片外型與圖 9 完全相同，故可推論 NC 碼確實正確無誤。而此結果亦可從 Vericut 中反算 NC 碼與輸入之 CL Data 比較之，同時可以發現完全吻合。

4.5 後處理程式結論

針對每一個工具機的構型不同其產生奇異點的軸向就不相同，而通常解決奇異點的問題需要以實務加工經驗判斷之，以正確的數值帶入求解該奇異點。因此，建立完整的奇異點資料庫，及其相對應的解，當 CL Data 為奇異點軸向時，此時應該以資料庫中該工具機構型的奇異點的解代入，避免使用數值方法疊代求解五軸運動參數方程組的奇異點。若以數值方法求解奇異點，會產生加工時極大的錯誤，造成機器撞機或是加工零件破壞的危險。

五軸工具機因為其每一台的構型定義皆不相同，相對應於該構型的後處理程式的數學模型亦不相同，因此，針對不同的機器構型，就需要特別設計一套該構型的後處理程式。然而，一般在設計後處理程式的過程中，皆需要透過大量的人工運算而得到後處理程式的數學模型，及其相對應的參數解。由於這些原因，使得泛用型後處理程式的設計難度提高了不少。泛用型後處理程式的設計上，所得到的最主要優點有二：1.產生不同五軸工具機的後處理程式，2.補償五軸工具機的結構性誤差。

五、圖例

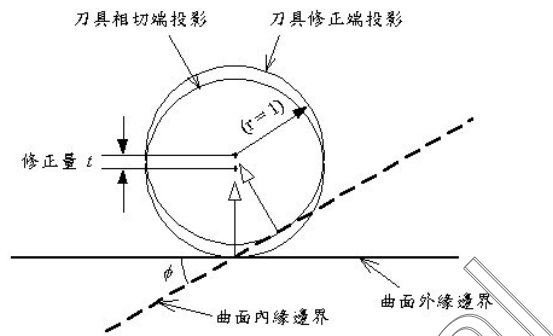


圖 1 直柄刀具修正後側視圖

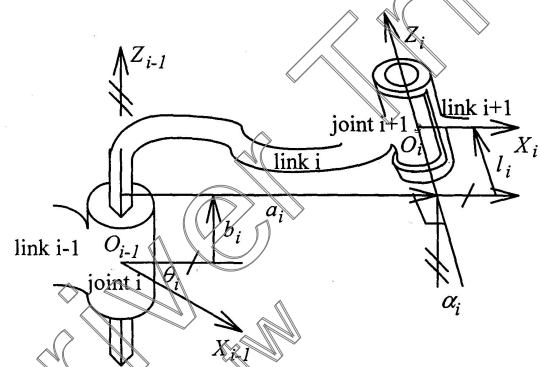


圖 2 D-H 桿件座標定義與參數示意圖

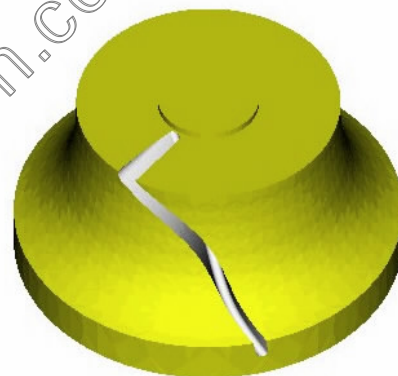


圖 3 CL Data 切削後餘料模型

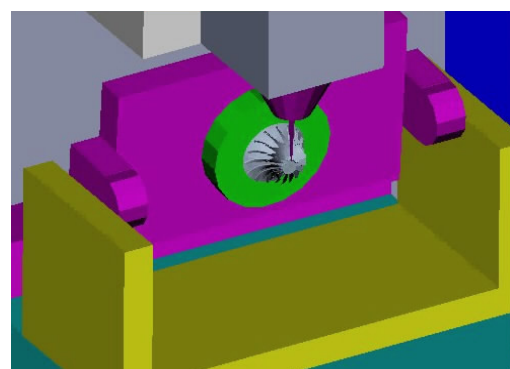


圖 4 工作台傾斜型機構運動圖

六、參考文獻



圖 5 工作台傾斜型 NC 碼模擬

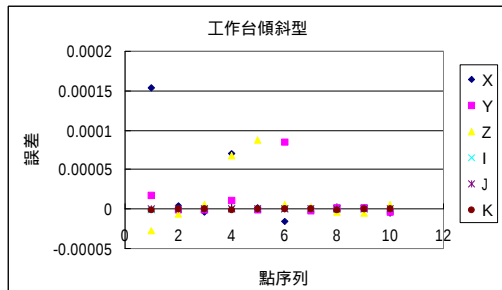


圖 6 工作台傾斜型之後處理誤差

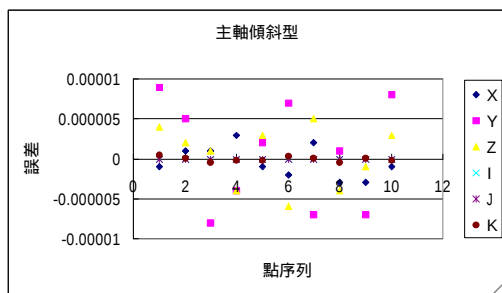


圖 7 主軸傾斜型之後處理誤差

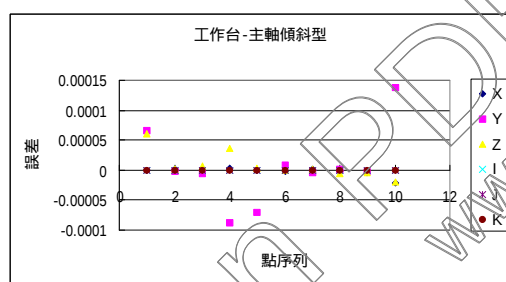


圖 8 工作台-主軸傾斜型後處理誤

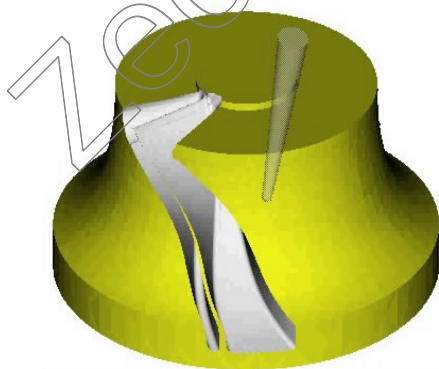


圖 9 CL Data 所切削之渦輪葉片

CGTech 公司發行., 1999

- [3] 汪昭宏, “離心式渦輪葉片加工規劃”, 碩士研究, 國立台灣大學機械工程學研究所, 1999
- [4] Erik L. J. Bohez, S. D. Ranjith Senadhera, Ketan Pole, Joost R. Duflou and Tsau Tar, "A Geometric Modeling and Five-Axis Machining Algorithm for Centrifugal Impellers," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 16 No. 6, pp.422-436, 1997
- [5] 莊啟輝, “多邊曲面圓角的建構,” 碩士論文, 中山大學機械所, 1994
- [6] 張敏宏, “直紋曲面側銑研究”, 碩士論文, 台灣大學機械工程學研究所, 1998
- [1] 黃世光, “多軸工具機之合成與分析”, 碩士研究, 國立成功大學機械工程研究所, 1992
- [2] 薛堯文, “多軸工具機刀具路徑規劃與碰撞問題之研究”, 博士研究, 國立台灣大學機械工程學研究所, 1997
- [3] 余振華, “空間凸輪五軸加工數值控制程式設計系統之研究”, 博士研究, 國立成功大學機械工程學研究所, 1997
- [4] Ibrahim Zeid, “CAD/CAM Theory and Practice”, McGraw-Hill, Inc., 1992
- [5] R. M.D. Mahbubur, J. Heikkala, K. Lappalainen and J. A. Karjalainen, “Positioning Accuracy Improvement In Five-Axis Milling By Post Processing”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 37, No. 2, pp.223-236, 1997
- [6] R. J. Schilling, “Fundamentals of Robotics Analysis and Control”, Prentice-Hall International, 1998
- [7] P. D.Lin, I. J. Tsai, “The machining and on-line measurement of spatial cams on four-axis machine tools,” International Journal of Machine-Tools Manufacture, Vol. 36, No. 1, pp. 89-101, 1996
- [8] R. L. Burden, J. D. Faires, “Numerical Analysis”, Brooks/Cole Publishing Company, 1997
- [9] Chao-Hwa Chang, Michel A.Melkanoff, “NC Machine Programming and Software Design”, Prentice-Hall International, 1989
- [10] Gerry B. Andeen, “Robot Design Handbook”, SRI International, 1988
- [11] Said M. Megahed, “Principles of Robot Modeling and Simulation”, John Wiley & Sons Ltd., 1993
- [12] Koren Yoram, “Robotics for Engineers”, McGraw-Hill Book Co., 1987

- [1] 陳啟元, “直紋曲面薄件圓角加工”, 碩士論文, 台灣大學機械工程學研究所, 1998
- [2] VERICUT 模擬軟體使用手冊 4.1 版, 美國

附件：封面格式

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

五軸加工刀具路徑規劃

計畫類別：☐ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC 90 - 2212 - E - 002 - 183 -

執行期間：90 年 8 月 01 日至 91 年 7 月 31 日

計畫主持人：楊宏智 教授

共同主持人：

計畫參與人員：莊禮彰

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學機械工程研究所

中 華 民 國 91 年 9 月 23 日