

第一章

緒論

今日 CNC 數值控制機械，已廣範應用在各種工業產品的生產及製造中，由於數值控制機械有許多的優點，例如多功能彈性製造、工件準確精良、加工效率高、節省人力資源等等，均使數控機械扮演現代工業界相當重要的角色，而評估數控機械工件品質的主要特點，是工件表面光度(Surface finish)、及工件輪廓準確度(Contour accuracy)，而這些是由刀具切削(Cutting)、工件進給(Feeding)、及機械結構(Machine structure dynamics)所共同產生的結果。

在改進工件輪廓準確度減少輪廓誤差，有許多待研究探討的影響因素，如同服系統中各級傳動機構的動靜摩擦力、各軸軌跡進給控制方法與技術、機械及刀具本身的剛度撓度震動、溫度變形效應、電路控制系統增益值與穩定性、工件及夾具的負載效應等，這些大部份是非線性的物理因素，所產生的耦合動態特性也不同，其中軌跡進給控制法是相當重要的影響因素，而軌跡進給控制方法經單軸控制補償控制系統到多軸交叉耦合補償控制系統，產生高精度與高加工速度數控機械工具機，本論文探討交叉耦合補償控制系統中控制參數的最佳化，以期達到更精良與更高效率的加工作業。

1.1 問題背景與文獻回顧

數值控制機械運動軌跡精確度研究探討技術中，輪廓誤差補償是相當重要的一環。其中交叉耦合系統(Cross-coupled system)經 Sarachik 和 Ragazzini[01]提出後，控制方法歷經不斷修正及改進，Koren[02]提出對稱性交叉耦合控制器的方法，應用於雙軸控制系統中可以減少輪廓誤差，Kulkarni[03]和 Srinivasan 提出雙軸交叉耦合預補償控制器，而在 1991 年 Koren 則提出可變增益交叉耦合控制器[04]，輪廓誤差的處理與控制器增益值可由刀具加工路徑加以調整，Chin 與 Lin 同時運用交叉耦合控制方法[05]與路徑預補償方法[06]，對較快速進給的切削可維持不錯精確度，Lue[07]利用類似方法在多軸複合型加工機上也可有不錯的軌跡精確度。

在 1859 年達爾文出版「物種原始」一書，提出「物競天擇」的生物「進化論」，

即自然界的生物，在有限的物質生存環境限制條件下，必須透過彼此競爭及淘汰，依「適者生存，不適者淘汰」的規則來生存進化。在 1975 年 John Holland 提出遺傳演算法（或稱為基因演算法 Genetic algorithms；簡稱 GA）[08]，主要利用遺傳學的生存法則，運用電腦模擬發展一種「人工智慧遺傳系統」的搜尋法，依物種自然演化的過程，透過彼此互相競爭、淘汰，留下對環境適應性較佳的物種，得以生存及繁殖下去，如此循環進行，最後產生最優秀最能適應環境的物種。

GA 的運作是以不斷調整染色體來進行演化，在演化的過程中，會針對需求有系統的搜尋最佳之可行解；搜尋範圍多維不是局部，以隨機搜尋技術為架構，搜尋求解能力由於目前電腦軟硬體技術的進步而效能大為提高。利用基因演算法在尋找控制系統最佳增益參數設定變成系統化的設計，可改進嘗試錯誤法的設計方式[09]。

1.2 論文內容概要

本論文的目的是在尋求交叉耦合預補償控制法中的增益值，嘗試利用基因演算法，尋找出最佳化的增益值，以往採用試誤法尋求交叉耦合預補償控制法中的增益值，本研究改以基因演算法尋求其最佳增益值。

因此首先在第二章對輪廓軌跡控制法加以討論，包含未耦合單軸輪廓軌跡控制法(Uncoupled contour control, US)、交叉耦合雙軸向控制法(Cross-coupled biaxial control, CCS)，及交叉耦合雙軸預補償控制法(Cross-coupled pre-compensation control, CCPM)。第三章對基因演算法加以簡介，並將基因演算法應用在交叉耦合預補償控制法的最佳增益值的搜尋。第四章對系統模型進行數值模擬，以模擬方式尋求不同控制方法的最佳增益值，比較分配前後其輪廓誤差的差異。第五章結論且討論其成效。

針對上述的研究，希望能將基因演算法在數控領域加以擴大應用，模擬分析交叉耦合預補償控制法的優缺點，對交叉耦合預補償控制法能有進一步之貢獻。

第二章

CNC 工具機軌跡控制法特性分析

本章對工具機軌跡控制方法，由未耦合單軸輪廓軌跡控制法(Uncoupled contour control, US)，至交叉耦合雙軸預補償控制法(Cross-coupled pre-compensation control, CCPM)加以說明及比較：

(表 2-1) 各種控制法參數比較表

控制法	K_{Vx} and k_{Vy}	$k_{\varepsilon x}$ and $k_{\varepsilon y}$	k_{ex} and k_{ey}
US	0	0	不為 0
PM	不為 0	0	不為 0
CCS	0	不為 0	不為 0
CCPM	不為 0	不為 0	不為 0

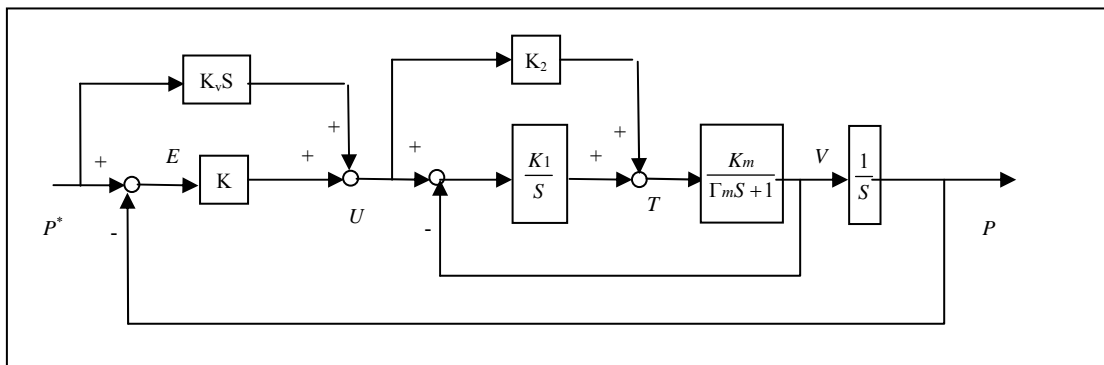
US：未耦合單軸輪廓軌跡控制法

CCS：交叉耦合雙軸向控制法

PM：預補償控制法

CCPM：交叉耦合雙軸預補償控制法

2.1 未耦合單軸輪廓軌跡控制法(Uncoupled contour control) [10][11]



圖(2-1) 未耦合單軸輪廓軌跡控制法

圖(2-1) 是未耦合單軸輪廓軌跡控制法的系統分析結構，在控制方塊圖中速度閉迴路轉移函數 $H(s)$ 可表示為：

$$H(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{(K_2 K_m / \Gamma_m)s + (K_1 K_m / \Gamma_m)}{s^2 + (1/\Gamma_m)s + (K_1 K_m / \Gamma_m)} \quad (2.1)$$

$H(s)$ 轉移函數也可表示為：

$$H(s) = \frac{\omega_n^2(1+T_Z s)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.2)$$

由上式可以得到 $(1+T_Z s)$ 項加入標準二階系統中 $\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$ ，加入一個零點在 $s = -1/T_Z$ 可以增加轉移函數 $H(s)$ 的頻寬響應，速度閉迴路獲得改進。

當速度閉迴路增益獲得調整改進，轉移函數 $H(s)$ 值近似 1 時，位置閉迴路轉移函數 $G(s)$ 在控制方塊圖中可表示為：

$$G(s) = \frac{P(s)}{P^*(s)} = \frac{K_V s + K}{s + K} \quad (2.3)$$

位置偏差可表示為：

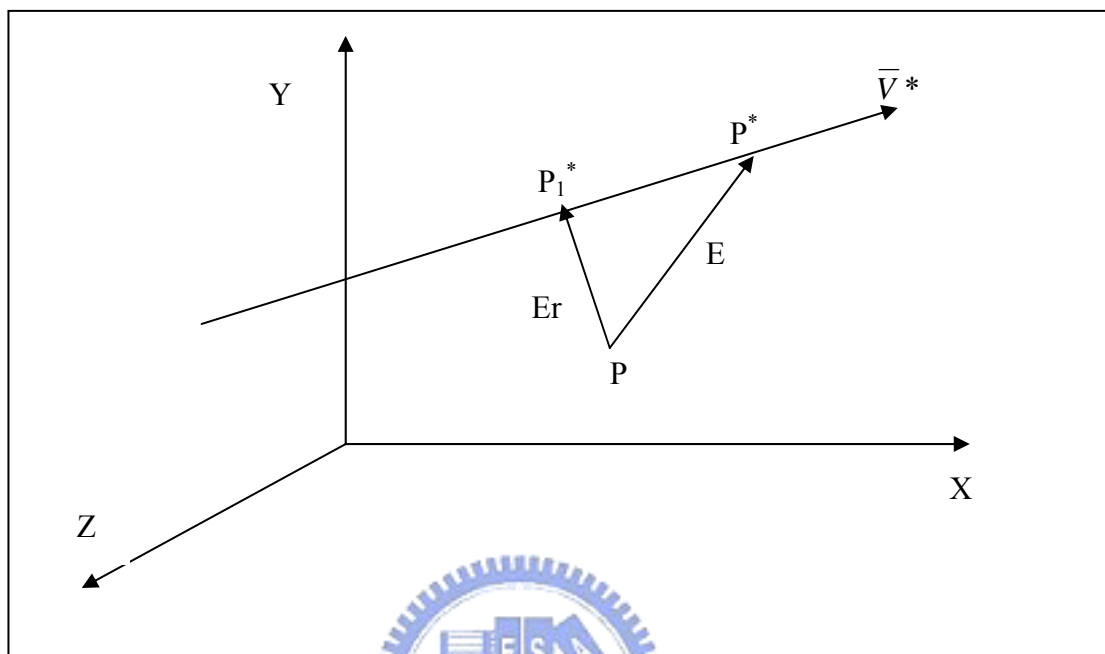
$$E(s) = P^*(s) - P(s) = P^*(s) \frac{(1-K_V)s}{s+K} \quad (2.4)$$

速度前向增益 K_V 可以降低位置偏差，這也是速度前向迴路包含在控制方塊圖中之理由。



2.2 交叉耦合雙軸向控制法 Cross-coupled biaxial control (CCS)

[10][11]



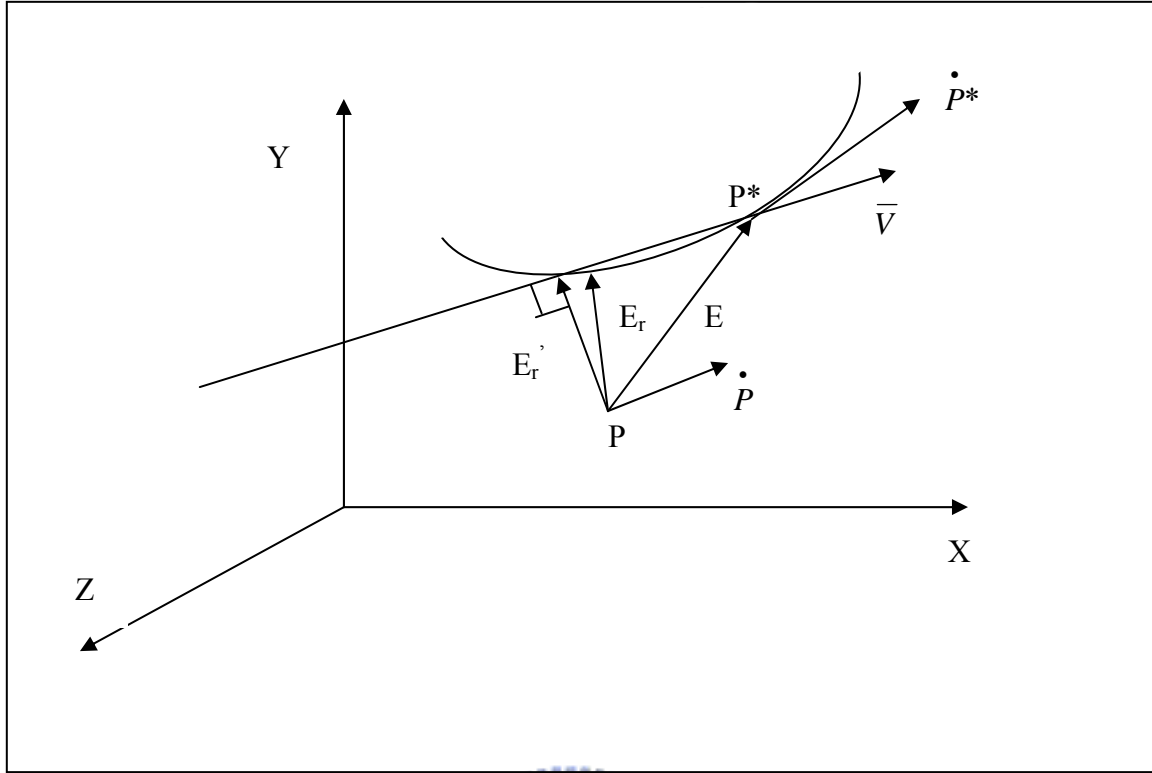
圖(2-2-1) 交叉耦合雙軸向控制法

輪廓誤差之定義為目標輪廓和實際輪廓之最短距離，分析圖(2-2-1)可得到：

$$E = P^* - P \quad (2.5)$$

$$E_r = P_1^* - P = -(E \times V^*) \times V^* = E - (E \cdot V^*) V^* \quad (2.6)$$

$$V^* = \dot{P}^* / || \dot{P}^* || \quad (2.7)$$



圖(2-2-2) 交叉耦合雙軸向控制法

當分析一任意曲線之輪廓時，如同圖(2-2-2)，由於曲線實際位置向量 P^* 未知，曲線之輪廓誤差 E 是非常不易計算，因此使用目標位置向量 P^* 及速度向量 V 的近似方法，由圖(2-2-2)幾何學的分析，曲線之輪廓誤差向量 E_r 是近似另一輪廓誤差向量 E_r' ，可表示為：

$$E_r \approx E_r' = -(E \times \bar{V}) \times \bar{V} = E - (E \cdot \bar{V}) \bar{V} \quad (2.8)$$

\bar{V} ：為速度向量 V 及 V^* 的平均單位速度向量

$$\bar{V} = (\dot{P}^* + \dot{P}) / ||(\dot{P}^* + \dot{P})|| \quad (2.9)$$

考慮在 X 、 Y 雙軸向分量之輪廓誤差，分析計算的輪廓誤差向量 E_r' 可表示為：

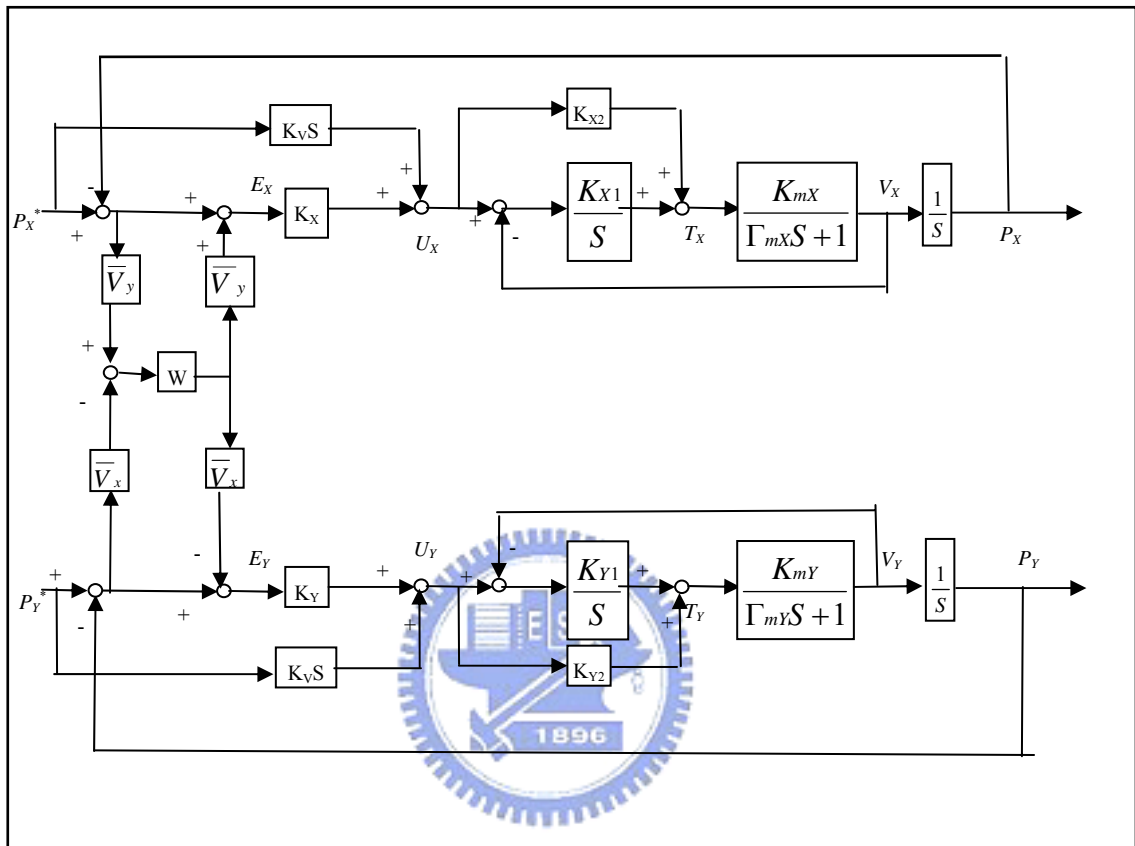
$$E_r' = \begin{bmatrix} e_x' \\ e_y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x - (E_x \bar{V}_x + E_y \bar{V}_y) \bar{V}_x \\ E_y - (E_x \bar{V}_x + E_y \bar{V}_y) \bar{V}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_y (E_x \bar{V}_y - E_y \bar{V}_x) \\ -\bar{V}_x (E_x \bar{V}_y - E_y \bar{V}_x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

e_x 及 e_y 為輪廓誤差在 X 、 Y 雙軸向之分量， E_x 及 E_y 是位置向量在 X 、 Y 雙軸向之分量， \bar{V}_x

及 \bar{V}_y 為平均單位速度向量在 X 、 Y 雙軸向之分量，輪廓誤差向量 E_r' 的大小為：

$$e_r' = || E_r' || = \sqrt{X^2 + Y^2} = E_x \bar{V}_y - E_y \bar{V}_x \quad (2.11)$$

在上式中可看出輪廓誤差值，由位置向量 E_x 及 E_y 交叉組合計算產生，為了減少輪廓誤差達到精確的定位控制，推導出交叉耦合雙軸向控制法如圖(2-2-3)

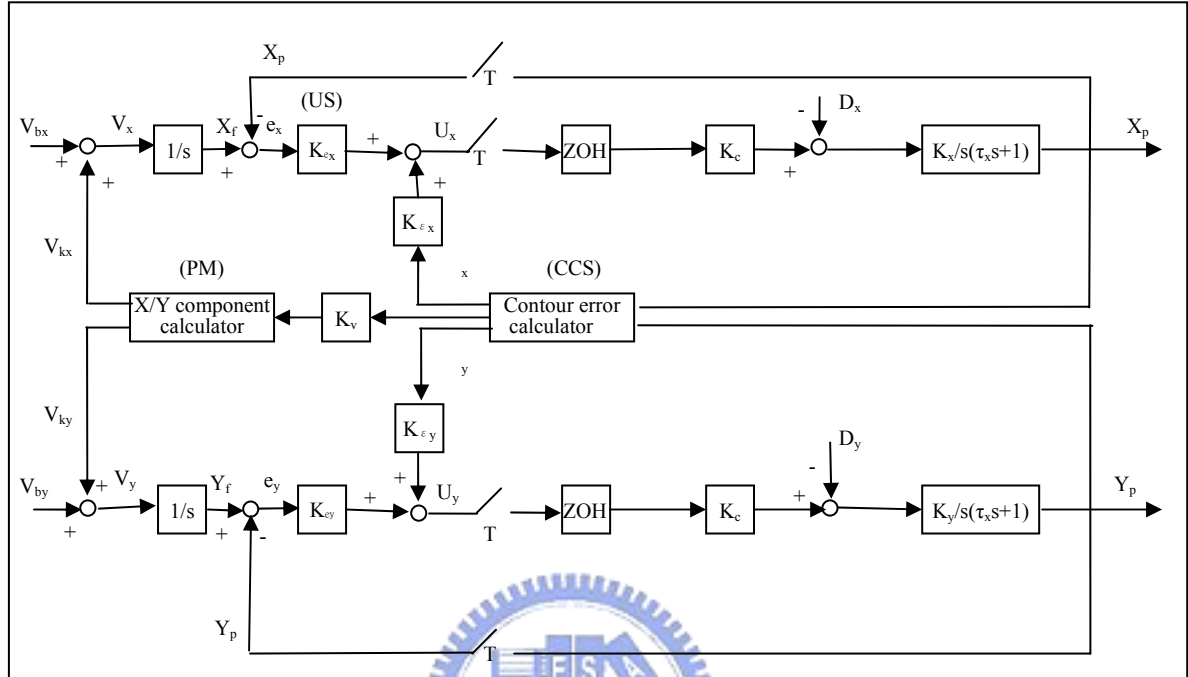


圖(2-2-3) 交叉耦合雙軸向控制法

W 為一個適當選擇的權重係數，用來加速的控制響應。

交叉耦合雙軸向控制法，為多點輸入及輸出、多個控制參數、非線性時變系統，整個系統的穩態分析及參數最佳化是不易執行及處理的。

2.3 雙軸向交叉耦合預補償控制法 Cross-coupled pre-compensation control (CCPM) [12]



圖(2-3-1) CCPM 交叉耦合預補償法

在提升製造工件精度的控制方法上，有許多論文已被提出討論及研究，圖(2-3-1)是交叉耦合預補償法(CCPM)的系統分析結構[05]，一個速度預補償增益 k_v 用來產生預補償回授迴路，交叉耦合補償增益 $k_{\epsilon x}$ 及 $k_{\epsilon y}$ 用來產生交叉耦合補償回授迴路，如果 k_v 、 $k_{\epsilon x}$ 及 $k_{\epsilon y}$ 設為零，則系統降為一個未耦合軌跡控制系統(Uncoupled tracking control system, US)；如果 $k_{\epsilon x}$ 及 $k_{\epsilon y}$ 設為零，但 k_v 回授迴路保持不為零，則系統變為一個路徑預補償控制系統(The path pre-compensation control system, PM)；如果 k_v 回授迴路為零，但 $k_{\epsilon x}$ 及 $k_{\epsilon y}$ 回授迴路保持不為零，則系統變為一個交叉耦合控制系統(Cross-coupled tracking control system, CCS)；如果 k_v 、 $k_{\epsilon x}$ 及 $k_{\epsilon y}$ 回授迴路皆保持不為零，則系統變為一個交叉耦合預補償控制系統(Cross-coupled pre-compensation tracking control system, CCPM)。

交叉耦合預補償控制方法，對每個目標軌跡採用一種特別的軌跡策略，舉例來說：

對一個沿著線段 \overline{OB} 的直線軌跡進給在圖(2-3-2)中，輪廓誤差 ϵ 是實際刀具位置及目

標刀具路徑位置的最短距離，由圖可以看出為了補償路徑偏差，速度補償向量

\vec{V}_k ($\vec{V}_k = K_v \varepsilon$) 設法去推刀具回到原先目標刀具路徑，當輪廓誤差加入補償作為後，

刀具速度向量由所需要的切線速度向量 \vec{V}_t 及速度補償向量 \vec{V}_k 所構成，預補償速度向量的x、y軸分量為：

$$V_k = K_v \varepsilon \quad (2.12)$$

$$V_x = V_{tx} + V_{kx} = V_t \cos \Phi - K_v \varepsilon \sin \Phi \quad (2.13)$$

$$V_y = V_{ty} + V_{ky} = V_t \sin \Phi + K_v \varepsilon \cos \Phi \quad (2.14)$$

$$\vec{V}_t = V_b \vec{t} \quad (2.15)$$

Φ 是目標路徑及 x 軸的夾角。

以上是交叉耦合預補償控制方法中的部份系統，即所謂路徑預補償控制系統(The path pre-compensation control system, PM)

在數位控制上，修正後的速度分量 $V_x(n)$ 、 $V_y(n)$ 計算式：

$$V_x(n) = V_{tx} + V_{kx} = V_b \cos \Phi - K_v \varepsilon(n) \sin \Phi \quad (2.16)$$

$$V_y(n) = V_{ty} + V_{ky} = V_b \sin \Phi + K_v \varepsilon(n) \cos \Phi \quad (2.17)$$

新的參考位置分量 $X_f(n)$ 、 $Y_f(n)$ 由上一次位置 $X_f(n-1)$ 、 $Y_f(n-1)$ 分量及速度時間計算式產生：

$$X_f(n) = X_f(n-1) + T V_x \quad (2.18)$$

$$Y_f(n) = Y_f(n-1) + T V_y \quad (2.19)$$

T 為數位取樣時間間隔。

新的位置誤差分量 $e_x(n)$ 、 $e_y(n)$ 由上一次位置誤差分量 $e_x(n-1)$ 、 $e_y(n-1)$ 及新的參考位置和實際位置的差計算式所產生：

$$e_x(n) = e_x(n-1) + [X_f(n) - X_p(n)] \quad (2.20)$$

$$e_y(n) = e_y(n-1) + [Y_f(n) - Y_p(n)] \quad (2.21)$$

交叉耦合預補償控制方法需用不同的演算法去計算不同路徑的輪廓誤差 ε ，對直線軌跡的計算為：

$$\varepsilon(n) = X_p(n)\sin\Phi - Y_p(n)\cos\Phi \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_x(n) = -\varepsilon(n)\sin\Phi \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_y(n) = -\varepsilon(n)\cos\Phi \quad (2.24)$$

在圖(2-3-1)中，控制訊號分量由位置誤差及輪廓誤差計算得到：

$$U_x(n+1) = k_{ex} e_x(n) + k_{\varepsilon x} \varepsilon_x(n) \quad (2.25)$$

$$U_y(n+1) = k_{ey} e_y(n) + k_{\varepsilon y} \varepsilon_y(n) \quad (2.26)$$

對於圓弧軌跡交叉耦合預補償控制方法，在圖(2-3-3)中弧 $\overset{\cap}{ABC}$ 是目標輪廓，P是實際刀具位置， R_p 是P和原點座標的距離，輪廓誤差 ε 是實際刀具位置及目標刀具路徑位置的最短距離，由下列計算式產生：

$$\varepsilon(n) = R - R_p = R - (X_p(n)^2 + Y_p(n)^2)^{1/2} \quad (2.27)$$

$$\varepsilon_x(n) = \varepsilon(n) * (X_p(n)/R_p(n)) \quad (2.28)$$

$$\varepsilon_y(n) = \varepsilon(n) * (Y_p(n)/R_p(n)) \quad (2.29)$$

經過速度預補償向量，刀具速度向量由所需要的切線速度向量 \vec{V}_t 及去推刀具回到原先目標刀具路徑的速度補償向量 \vec{V}_k 所構成，速度向量的x、y軸分量為：

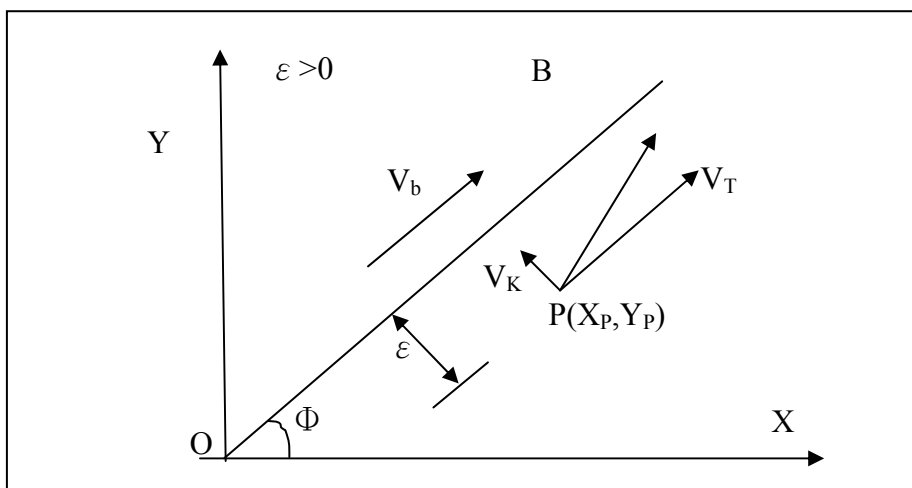
$$V_x(n) = V_{bx} + V_{kx} = -V_b(Y_p(n)/R) + K_v \varepsilon(n) (X_p(n)/R_p(n)) \quad (2.30)$$

$$V_y(n) = V_{by} + V_{ky} = V_b(X_p(n)/R) + K_v \varepsilon(n) (Y_p(n)/R_p(n)) \quad (2.31)$$

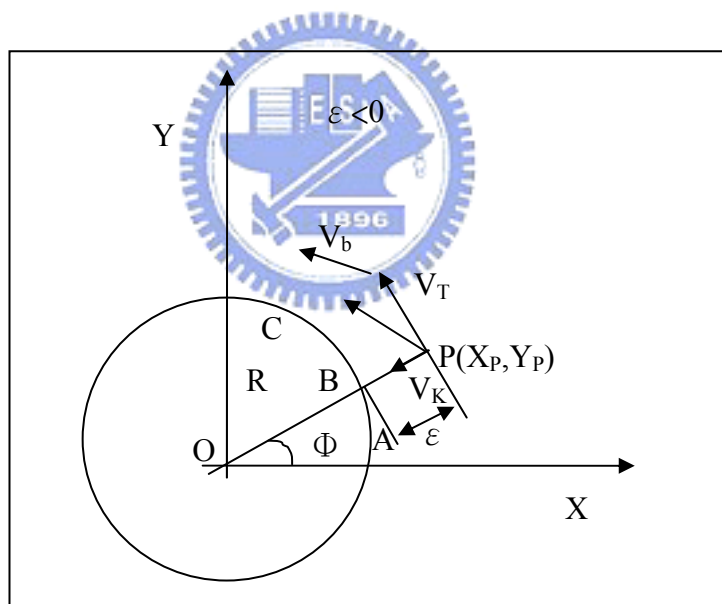
控制訊號分量如同直線軌跡進給也是由位置誤差及輪廓誤差計算得到：

$$U_x(n+1) = k_{ex} e_x(n) + k_{\varepsilon x} \varepsilon_x(n) \quad (2.32)$$

$$U_y(n+1) = k_{ey} e_y(n) + k_{\varepsilon y} \varepsilon_y(n) \quad (2.33)$$



圖(2-3-2) 直線進給使用 CCPM 方法



圖(2-3-3) 圓弧進給使用 CCPM 方法

第三章

基因演算法

3.1 基因演算法則(GA, Genetic algorithm)

基因演算法則的基本理論由John Holland 於1975 年首先提出[08]，是基於自然選擇淘汰的一種最佳化物種進化法則。選擇物種中適應能力高有較佳基因特性的母代群，隨機性的操作交換基因特性，產生較前一母代更佳的子代，經多次循環演化，產生最能適應環境，生存能力最佳的物種。

基因演算法則主要的操作處理，是以基因的複製(Reproduction)、交配(Crossover)、及突變(Mutation)等運算，來模擬生物界物競天擇，自然演化的最佳化問題處理法則。具有僅使用目標函數(Object function)、及最適函數(Fitness function)，但不受到函數本身線性、連續性、非時變、可微分及梯度函數存在與否的困擾，可搜尋多個設計點，做廣域性的搜尋探索，並利用機率線性轉換法則，調整參數以避免局部收斂的缺點，可應用在許多最佳化問題的探討上。

3.2 基因演算法原理[08]

基因演算法有不同於傳統的搜尋法則，基本方法為將所要搜尋的目標參數編碼(Encoding)成基因染色體(Chromosome)，即二進位組成的離散性字串(Discrete binary string)，首先隨機地產生初始基因字串，然後依據求解之目標來設計目標函數(Object function)，再將目標函數以線性或非線性的數學排序轉換法產生相對的適應函數(Fitness function)，再依適應函數值挑選、複製(Re-production) 較高適應函數值的物種之染色體基因至交配池(Mating pool)中，彼此互相交配(Crossover)、歷經突變(Mutation)、及再挑選(Re-select)過程的處理，產生第一代的子代，再將子代當成新的母代，以前面相同的程序重覆演化，一直到產生適應函數值最佳的子代，即所要搜尋的目標。詳細的原理及演化過程如下：

1、編碼(Encoding)：將所有受控系統中欲求解之參數，表為設計變數分別編碼，依參

數值的範圍，轉為固定字串長度的二進位字串，將所有子字串合併成一個母字串，字串長度依據目標所要求之精確度而定，定太低可能搜尋不到系統的最佳解，定太高可能太耗費運算資源及時間。舉一例子說明，假使受控系統有三參數須求解，參數值大小範圍在 $[0, 1]$ 之間，且每個參數的字串長分別用六個位元加以編碼，則編碼流程如下：

隨機設定三參數即三變數，假設為 $X=1/(2^6-1)$ 、 $Y=2/(2^6-1)$ 、 $Z=8/(2^6-1)$ ，則編碼為 $X=000001$ 、 $Y=000010$ 、 $Z=001000$ ，則最後合併成母字串如下所示：

000001 000010 001000

2、族群大小(Population size)：為原始母族群的大小，族群的大小會影響到基因演算法收斂速度的快慢，族群愈大參數最佳值搜尋解愈佳，族群太小易陷入局部收斂不佳解的結果，但較大的族群會耗費較多的電腦資源，須匹配較佳的軟硬體以改善演算時間。

3、解碼(Decoding)：將演算過程中染色體基因二進位轉換為十進位數值，再換算成所求的變數值。對一需求變數 V ，字串長度 S ，其字串之十進位值為 d ，整數值範圍為 $[0, 2^S - 1]$ ，其對應搜尋範圍 $[V_{\min}, V_{\max}]$ ，字串經線性轉換可表為下式：

$$V = V_{\min} + (V_{\max} - V_{\min}) / (2^S - 1) * d \quad (3.1)$$

4、目標函數(Objective function)：依據求解之最佳化的條件設計目標函數，計算每一參數個體之目標值。

5、適存度函數(Fitness function)：將目標函數值依線性或非線性轉換成適存度值，此數值代表適存度函數值，能產生高適存度值的基因變數，即表示為優秀的基因個體，其生存與繁殖後代的機率愈高。

6、適存度函數的合理化調整：將目標函數轉換成適存度函數時，若有個體適存度值表現特別優秀，依複製特性會大量的複製於交配池中，而影響染色體機率偏向某些較高適存度值的個體，造成染色體多樣性(Diversity)減少，演化過程因收斂而提前結束(Premature convergence)，使得搜尋染色體種類不足，得到的解不一定是最佳；

或是在接近目標值時，染色體雖還有許多種，但基因個體的平均適存值和少數最佳值相近，依複製特性最佳染色體不會大量的複製於交配池中，因此要演化到最佳值可能會有問題。

為改進這些不佳情況，使用適存度函數合理化的手段，調整各基因個體的適存度值到適當範圍內，目前較多使用的有三種調整法：[08]

6.1、直線調整法(Linear scaling)

$$f' = a * f + b \quad (3.2)$$

f ：合理化前的適存度函數值； f' ：合理化後的適存度函數值

a 、 b ：為選擇的參數使下列式子成立

$$f_{avg} = f'_{avg} \quad (3.3)$$

$$f'_{max} = c * f_{avg} \quad (3.4)$$

f_{avg} ：合理化前的適存度函數平均值

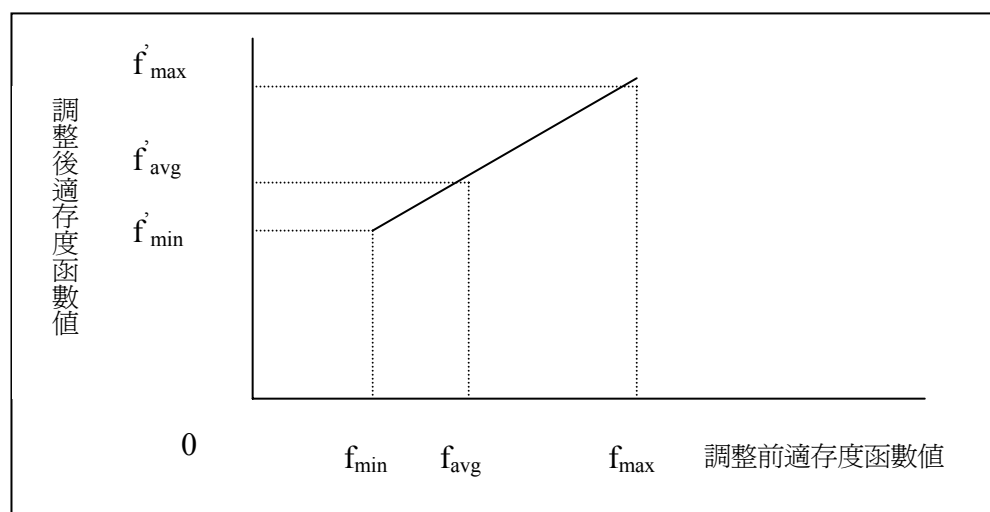
f_{min} ：合理化前的適存度函數最小值

f_{max} ：合理化前的適存度函數最大值

f'_{avg} ：合理化後的適存度函數平均值

f'_{min} ：合理化後的適存度函數最小值

f'_{max} ：合理化後的適存度函數最大值



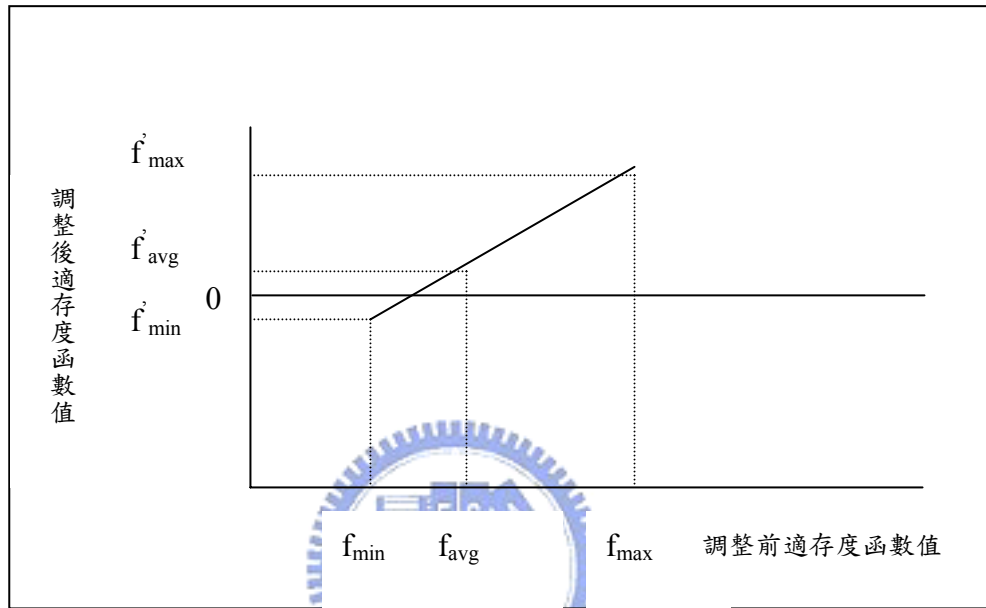
圖(3-1) 適存度函數直線調整法前後值對照圖

6.2、Sigma割取(Sigma truncation)

在做直線調整法時，為避免少數低適存度函數值產生負值，可先做Sigma割取，將適存度函數值依下列方法調整：

$$f' = f - (f_{avg} - c * d) \quad (3.6)$$

$c * d$ ：染色體族群適存度函數值變異數的倍數



圖(3-2) 適存度函數直線調整法負值情況對照圖

6.3乘幂次方調整(Power law scaling)

調整後的適存度函數值 f' 為調整前適存度函數值 f^k 的乘幂次方。

$$f' = f^k \quad (3.7)$$

7、複製(Reproduction)：將母代基因挑選至交配池中進行交配，挑選法有數種：

7.1. 輪盤式挑選法(Roulette wheel selection)：[08]

輪盤挑選法是依每個染色體物種適存度函數值的大小，來分割可轉動之輪盤的扇形對應位置，物種適存度函數值越大則佔有的面積也越大，面積大小也表示被選入交配池被再生的機率，當隨機挑選輪盤一點時，該點對應的物種即被送入交配池中。

$$\text{物種被選入交配池再生的機率} : N * f_i / (f_1 + f_2 + \dots + f_i) = f_i / f_{avg} \quad (3.8)$$

$$f_{avg} = (f_1 + f_2 + \dots + f_i) / N : \text{代表所有物種的適存度函數平均值} \quad (3.9)$$

7.2. 抽樣式選擇(Tournament selection, Stochastic universal sampling)：

在每一代的演化過程中，先隨機地選取兩個或以上字串，其中有最大適存度函數值的字串被選中送入交配池進行交配。

8、交配(Crossover)：將交配池中的基因兩兩重組交配，交配法有數種：

8.1. 單點交配：(Single-point crossover)

在所選出的兩個字串中，隨機地選取一交配點，並交換兩字串中此交配點後的所有字元。如下所示

交配前	交配後
交配點	
A=0100 <u>1</u> 011	A=0101 <u>0</u> 100
B=1101 <u>0</u> 100	B=1100 <u>1</u> 011

8.2. 雙點交配：(Double-point crossover)

在所選出的兩個字串中，隨機地選取兩個交配點，並交換兩字串中此交配點間的所有字元。如下所示

交配前	交配後
交配點	
A=01 <u>0</u> 01011	A=01010101
B=110101 <u>0</u>	B=11001010

8.3. 均勻或字罩交配(Uniform crossover)：

隨機產生一個與待交配字串長度相同且由0與1組成的樣本字串(Template string)，若樣本字串的某一位元為1時，則待交配字串在該位置的字元互相交換，但若樣本字串為0時，則不進行交配，如下所示。

交配前	交配後
樣本字串	<u>01111110</u>
A=01001011	A=01010101
B=11010100	B=11001010

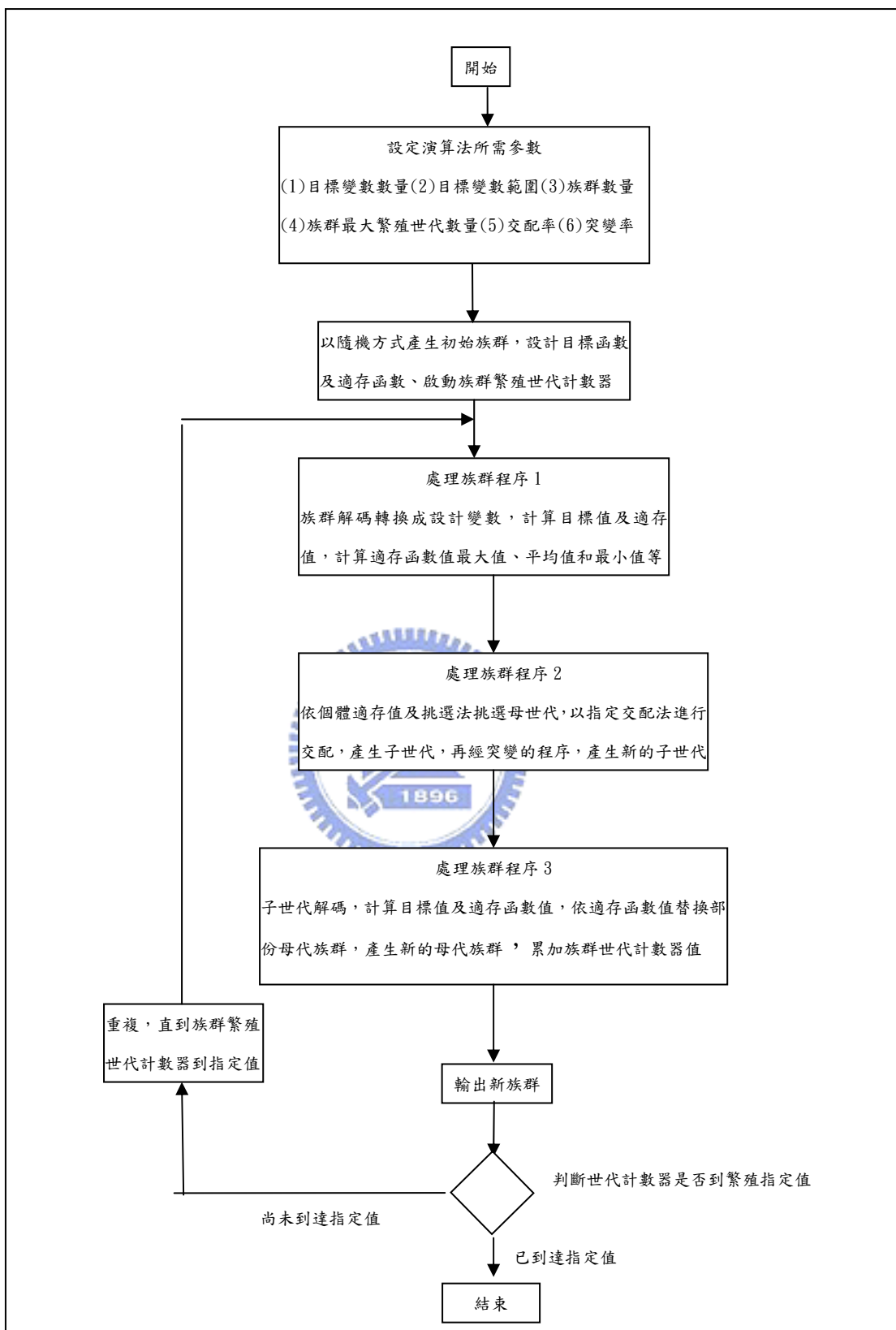
經過挑選後的母字串每兩個為一組，進行字串互相交換的過程以產生新的子世代，新的子世代其適存度不一定比母世代適存度來的高，因此，不是每個字串都需要交換，而是由交配率 P_c 決定是否進行交換，交配率通常設定在0.5~1.0之間。

9、突變(Mutation)：突變是將基因字串染色體的某些位元，配合突變率隨機地由0變1或由1變0，例如突變率設為0.1，族群數10，基因字串20位元，則族群中被突變的基因數為 $10 \times 20 \times 0.1 = 20$ ，即有20個基因被突變，突變主要目的是避免在搜尋最佳解時，陷入局部最佳解而不是全體最佳解。

10、演化繁殖循環控制最大值(Maximum generation)：基因演算法以基因挑選複製、交配、突變等反覆操作循環，循環世代由循環控制值監控，直到控制值到達預設最大值才停止。

由上述演算過程的原理，將基因演算法執行步驟表示於圖(3.3)並綜合分析如下：

- 1、開始。
- 2、設定演算法所需之參數：目標變數數量、目標變數大小範圍(精度)、族群數量、族群最大繁殖世代值、交配率與突變率等共六個。
- 3、以隨機方式產生初始族群(即產生母代染色體族群)，依最佳化的條件設計目標函數(Object function)及適存函數(Fitness function)，及啟動族群繁殖世代計數器。
- 4、將初始族群解碼並轉換成設計變數值，依目標值函數計算個體目標值，接著將目標值依適存函數轉成適存值，再計算適存函數值最大值、平均值和最小值等。
- 5、依個體適存值以輪盤式或競爭式挑選法挑選母世代，以單點或雙點或字罩法進行交配，產生新的子世代，子世代再經預設的突變率進行突變的程序，進而產生新的子世代。
- 6、將子世代解碼並轉換成設計變數值，接著計算目標值及適存函數值，再依適存函數值比較替換部份母代染色體族群，產生新的母代染色體族群(新族群)，及累加族群繁殖世代計數器。
- 7、輸出新族群。
- 8、重複4 至7 的步驟，直到族群繁殖達成最大生成世代為止。
- 9、結束。



圖(3-3) GA流程圖

3.3 利用基因演算法求得控制系統最佳增益值

在 Chin 與 Lin[05] 提出的交叉耦合路徑預補償法 (Cross-coupled precompensation method, CCPM) 為刀具軌跡誤差補償修正的方法，接著 Lue[07] 以多軸工具機為基礎推導出多軸交叉耦合路徑預補償法 (Multi-axis cross-coupled precompensation method, MCCPM)，在這些控制方法中，若改變各迴路補償增益之有或無，將使多軸交叉耦合系統簡化，在早期研究各種軌跡補償控制方法中的增益值 K_e 、 K_ε 、 K_v 時，大多是用試誤法，以大量實驗嘗試判斷出增益值是否適當，增益值的選擇依據是輪廓誤差絕對值總和的平均值 IAE 最小值為參考標準：

$$IAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\varepsilon(i)| \quad (3.10)$$

以試誤法在探尋最佳補償增益值時，由於增益值參數範圍太大，不易試到最佳值，極可能落入局部解之結果，當軌跡改變時，又需重新尋找最佳值，效率低且不可靠，在本論文中運用基因演算法的搜尋判斷理論，有系統且有效率的尋找最佳增益值，可改善試誤法的缺失，對軌跡補償控制方法有極佳的助益。

3.4 定義設計變數、目標函數(Objective function)、適存度函數

(Fitness function)[13]

由於平面軌跡具有二個方向自由度(x, y)，故雙軸 CCPM 中的補償增益值對平面軌跡的控制，具有二項參數：

K_e : K_{ex} 、 K_{ey}

K_ε : $K_{\varepsilon x}$ 、 $K_{\varepsilon y}$

K_v : K_{vx} 、 K_{vy}

在多軸交叉耦合預補償法若以試誤法求得其最佳增益值，由於參數數量多，變化太大不易處理，現改用基因演算法以定量分析方式，搜尋最佳的增益解。

定義設計變數為： K_e 、 K_ε 、 K_v

定義目標函數為：輪廓誤差絕對值總和平均值 IAE

$$IAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\varepsilon(i)|$$

定義適存度函數為：輪廓誤差絕對值總和平均值的最小值

基因演算法推導流程：

- 1、設定基因演算法基本參數，如族群個數、生成世代、變數個數精度、突變、交配機率等。
- 2、以隨機方式產生初始染色體群組變數資料，即欲尋求的增益值 K_e 、 K_ε 、 K_v
- 3、將得到的增益值，代入交叉耦合預補償控制法中，計算輪廓誤差及目標函數 IAE，轉化得到對應的適存度函數之值。
- 4、再經由基因演算法中的選擇、複製、交配、突變過程，產生新的染色體群組世代。
- 5、依步驟 3 的模式，計算新的群組世代的輪廓誤差、IAE 及適存度函數之值，重複循環步驟 3 及步驟 4，直到完成最大生成世代為止。
- 6、若有收斂即可得到最佳增益值 K_e 、 K_ε 、 K_v ，若無最佳解則調整步驟 1 基本參數，再重新演算求解。



3.5 增益值的搜尋

參數最佳增益值搜尋步驟分兩種，單一參數逐一搜尋及多個參數同時搜尋，單一參數逐一搜尋使用在未耦合控制法(US)、交叉耦合控制法(CCS)、預補償控制法(PM)、交叉耦合路徑預補償控制法(CCPM)，多個參數同時搜尋使用在交叉耦合路徑預補償控制法(CCPM)。

3.5.1、單一參數逐一搜尋

依循控制系統的推導演進的方式，由未耦合系統至交叉耦合系統，增益值由 US- K_e 、CCS- K_ε 、CCPM- K_v 順序求得。[13]

增益值搜尋步驟：

- 1、依未耦合補償控制法(Uncoupled tracking control system, US)，令 K_ε 、 K_v 為 0， K_e 為欲搜尋之設計變數，經由基因演算法獲得初始值，代入未耦合補償控制法中，計算輪廓誤差及目標函數 IAE 值，以 IAE 值的最小值為適存度函數，經由基因法

循環演算流程，求得最佳增益值 K_e 。

- 2、依交叉耦合補償控制法(Cross-coupled tracking control system, CCS)，令 K_v 為 0， K_ϵ 為欲搜尋之設計變數，經由基因演算法獲得初始值，及將步驟 1 中的最佳增益值 K_e ，代入交叉耦合補償控制法中，計算輪廓誤差及目標函數 IAE 值，以 IAE 值的最小值為適存度函數，經由基因法循環演算流程，求得最佳增益值 K_ϵ 。
- 3、依交叉耦合預補償控制法(Cross-coupled pre-compensation tracking control system, CCPM)，令 K_v 為欲搜尋之設計變數，經由基因演算法獲得初始值，及將步驟 1、步驟 2 中的 K_e 、 K_ϵ 最佳增益值，代入交叉耦合預補償控制法中，計算輪廓誤差及目標函數 IAE 值，以 IAE 值的最小值為適存度函數，經由基因法循環演算流程，求得最佳增益值 K_v 。
- 4、若有收斂，即可獲得最佳增益值 K_e 、 K_ϵ 、 K_v ，若無則調整基因演算法基本設定資料(調整搜尋範圍)，重新處理至求出最佳增益值。

3.5.2、多個參數同時搜尋

直接以基因演算法搜尋最佳增益值 CCPM- K_e 、CCPM- K_ϵ 、CCPM- K_v ：

- 1、依交叉耦合預補償法(Cross-coupled pre-compensation tracking control system, CCPM)，令 K_e 、 K_ϵ 、 K_v 為欲搜尋之設計變數，經由基因演算法獲得初始值，代入交叉耦合預補償控制法中，計算輪廓誤差及目標函數 IAE 值，以 IAE 值的最小值為適存度函數，經由基因法循環演算流程，求得最佳增益值 K_e 、 K_ϵ 、 K_v 。
- 2、若有收斂，即可獲得最佳增益值 K_e 、 K_ϵ 、 K_v ，若無則調整基因演算法基本設定資料(調整搜尋範圍)，重新處理至求出最佳增益值。

第四章

軌跡規畫與模擬

4.1 雙軸交叉耦合預補償法(CCPM)加工規劃模擬推導

依據 Chin與Lin[05] [06]結合交叉耦合控制器與預補償控制系統模型，速度分量 $V_x(n)$ 、 $V_y(n)$ 由切線速度向量及速度補償向量組成：

$$V_x(n)=V_{tx}+V_{kx}=V_b\cos\Phi-K_v \varepsilon(n)\sin\Phi \quad (4.1)$$

$$V_y(n)=V_{ty}+V_{ky}=V_b\sin\Phi+K_v \varepsilon(n)\cos\Phi \quad (4.2)$$

新的參考位置分量 $X_f(n)$ 、 $Y_f(n)$ 由上一次位置 $X_f(n-1)$ 、 $Y_f(n-1)$ 分量及速度時間計算式產生：

$$X_f(n)= X_f(n-1)+T V_x \quad (4.3)$$

$$Y_f(n)= Y_f(n-1)+T V_y \quad (4.4)$$

T 為數位取樣時間間隔。

新的位置誤差分量 $e_x(n)$ 、 $e_y(n)$ 由上一次位置誤差分量 $e_x(n-1)$ 、 $e_y(n-1)$ 及新的參考位置和實際位置的差計算式所產生：

$$e_x(n)= e_x(n-1)+[X_f(n)- X_p(n)] \quad (4.5)$$

$$e_y(n)= e_y(n-1)+[Y_f(n)- Y_p(n)] \quad (4.6)$$

對直線軌跡的的輪廓誤差 ε 計算為：

$$\varepsilon(n)= X_p(n)\sin\Phi- Y_p(n)\cos\Phi \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_x(n)=-\varepsilon(n)\sin\Phi \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_y(n)=-\varepsilon(n)\cos\Phi \quad (4.9)$$

對圓弧軌跡的的輪廓誤差 ε 計算為：

$$\varepsilon_x(n)=\varepsilon(n)* (X_p(n)/R_p(n)) \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_y(n)=\varepsilon(n)* (Y_p(n)/R_p(n)) \quad (4.11)$$

控制訊號分量由位置誤差及輪廓誤差計算得到：

$$U_x(n+1)=k_{ex} e_x(n) + k_{\varepsilon x} \varepsilon_x(n) \quad (4.12)$$

$$U_y(n+1)=k_{ey} e_y(n) + k_{\varepsilon y} \varepsilon_y(n) \quad (4.13)$$

4.2 模擬架構

研究中所需的模擬設備及方法，為個人電腦及模擬軟體 Matlab，依據 Chin 與 Lin[05] [06]結合交叉耦合控制器與預補償控制系統模型，逐一模擬直線及圓弧：未耦合系統(uncoupled system, US)；交叉耦合預系統(cross-coupled system, CCS)；路徑預補償控制系統(The path pre-compensation control system, PM)；交叉耦合預補償系統(Cross-coupled precompensation system, CCPM)，尋找各系統最佳增益值。

4.3 尋求最佳增益值

先前提到基因演算法需大量運算，不適用於真實機台實作，求得最佳增益值，故利用 4.1 節中的系統模型，將其置入多軸交叉耦合預補償法中，以進行平面軌跡的模擬，依此方式，以進行基因演算法搜尋最佳增益值，以下針對此路徑軌跡參數進行不同進給速度之直線及圓弧數值模擬。

4.4 軌跡模擬一

依循控制系統的推導演進的方式：US→CCS→PM→CCPM，進行基因演算法搜尋最佳增益值 K_e 、 K_ε (K_z)、 K_v 。

4.4.1 直線-US 控制法：

(1) 模擬路徑軌跡固定參數設定如下：

T ：取樣時間； $T=0.005\text{sec}$ ；

$[x(t), y(t),]$ 刀具模擬初始位置： $X(0)=1$ ； $Y(0)=0$ ；

τ ：時間常數； $\tau_x=0.04$ ； $\tau_y=0.045$ ；

伺服馬達增益： $K_x=0.04$ ； $K_y=0.045$ ；

K_c ：編碼器增益； $K_c * K_x=10.3$ ； $K_c * K_y=10$ ；

Φ ：進給路徑對X軸的角度； $\Phi=45^\circ$ ；

D ：干擾； $D_x=D_y=0.75$ ；

$IAE=1/N(\sum_{i=1}^N |e(i)|)$ ，整体误差绝对值的平均值

(2)模拟路径轨迹变化比较参数： V_b ：进给率；设定如下：

$V_b=11.8; 20; 50; 100; 150; 200; 300; 350; 400; 450; 500 \text{ mm/sec}$;($V_b=V1\sim V12$);

(3)定义基因演算法参数如表(4-4-1)所示：

表(4-4-1)直线-US 控制基因演算法参数

设定项目	设定值
位元数(Bits) 变数精确度	Ke 设定为 20 位元
族群个数(Population)	40
生成世代(Generations)	300
複製方式(Reproduction strategy)	抽样法(Stochastic universal sampling)
交配法(Crossover strategy)	单点交配法(Single-point crossover)
交配率 P_c	0.85
突变率 P_m	0.006
繁殖率 G_{gap}	0.9
系统参数 Ke 搜索范围	0.0001~100

(4)未耦合系统(US)利用基因演算法寻求最佳增益值步骤：

1. 设定模拟固定参数及初始比较参数 V_b 。
2. 令 $K \in (K_z)$ 为 0 (包括 $K \in x(K_{zx})$, $K \in y(K_{zy})$,)，及 K_v 为 0 (包括 K_{vx} , K_{vy} ,)
3. 令 $K_e(K_{ex}=K_{ey})$ 为设计变数(搜寻目标)。
4. 令 IAE 为目标函数，IAE 最小值为适存度函数。
5. 经由基因演算法选择、复制、交配、突变演算流程，直到最大生成世代。
6. 得到最佳增益值 K_e 。
7. 变化比较参数 V_b ，重复步骤 2 至步骤 7，最后得到搜寻目标(最佳增益值 K_e)。

(5)直线-US 控制法模拟结果：

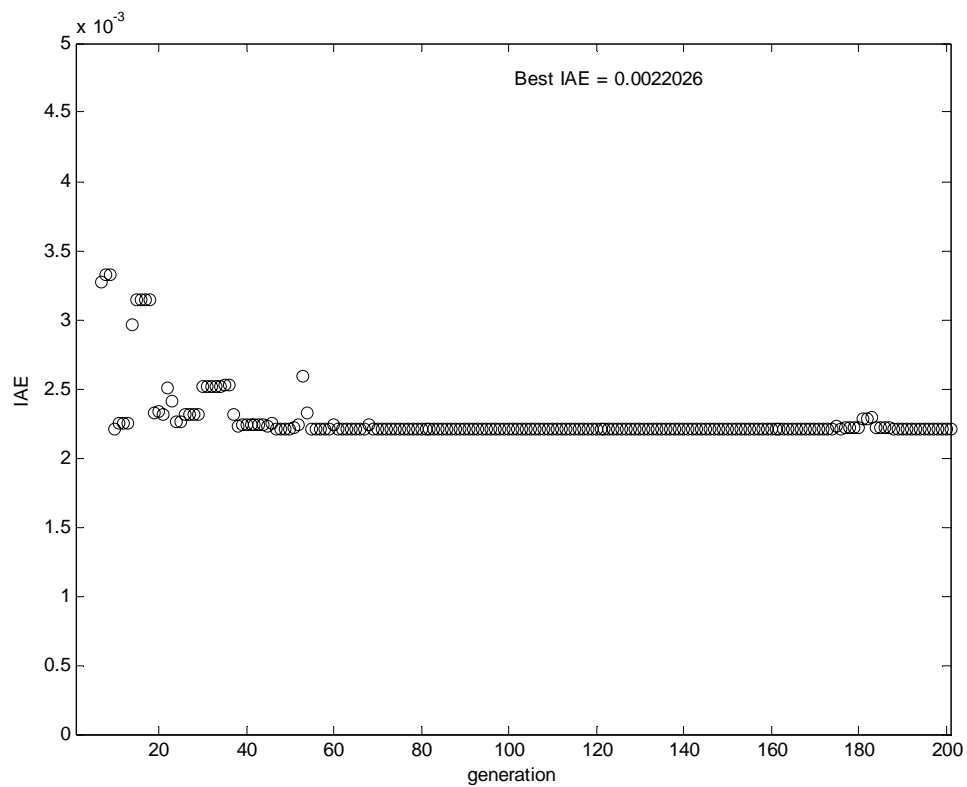
表(4-4-2) 直線-US 控制法模擬結果一

LINE -----US 搜尋 ke kz=0 kv=0						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Vb	11.8	20	50	100	150	200
IAE	0.0016	0.0022	0.0042	0.0070	0.0095	0.0120
ke	0.8391	0.8552	1.0224	1.1572	1.2269	1.2773

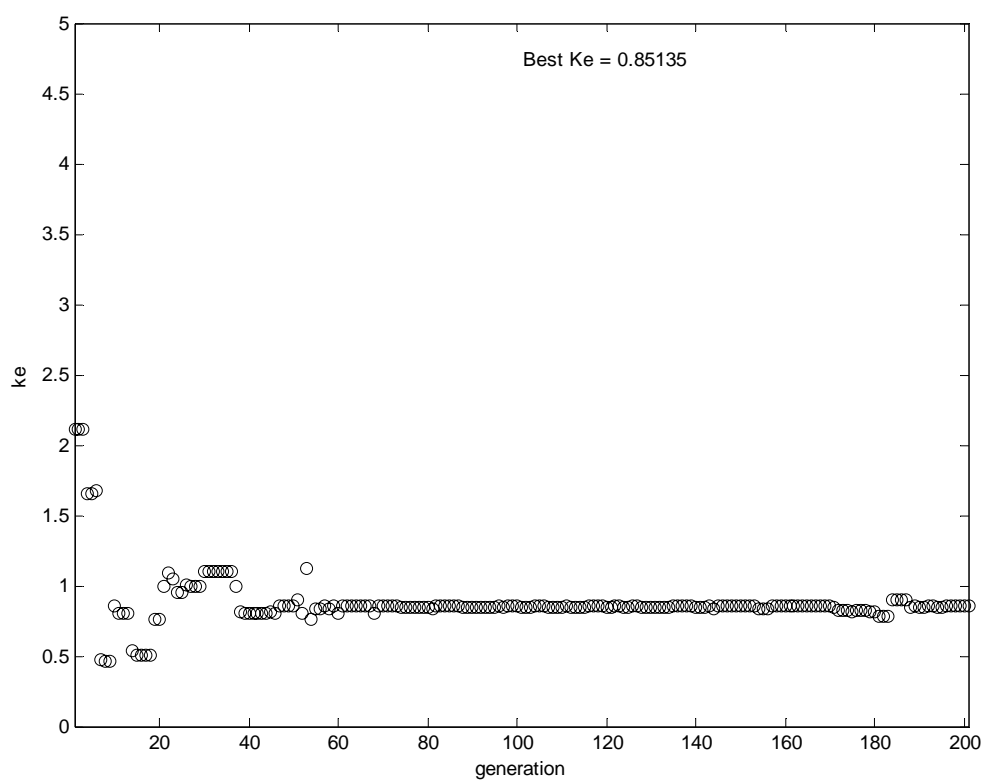
表(4-4-3) 直線-US 控制法模擬結果二

LINE -----US 搜尋 ke kz=0 kv=0						
	V7	V8	V9	V10	V11	V12
Vb	250	300	350	400	450	500
IAE	0.0143	0.0166	0.0188	0.0211	0.0233	0.0254
ke	1.3062	1.3365	1.3597	1.3758	1.3926	1.4120





圖(4-4-1) 直線-US控制法：IAE 最小值



圖(4-4-2) 直線-US控制法：Ke 最佳值

4.4.2 直線-CCS 控制法

(1) 模擬路徑軌跡固定參數設定如下：

T ：取樣時間； $T=0.005\text{sec}$ ；

$[x(t), y(t),]$ 刀具模擬初始位置： $X(0)=1$ ； $Y(0)=0$ ；

τ ：時間常數； $\tau_x=0.04$ ； $\tau_y=0.045$ ；

伺服馬達增益： $K_x=0.04$ ； $K_y=0.045$ ；

K_c ：編碼器增益； $K_c * K_x = 10.3$ ； $K_c * K_y = 10$ ；

Φ ：進給路徑對 X 軸的角度； $\Phi=45^\circ$ ；

D ：干擾； $D_x=D_y=0.75$ ；

$IAE=1/N(\sum_{i=1}^N |e(i)|)$ ，整體誤差絕對值的平均值

(2) 模擬路徑軌跡變化比較參數： V_b ：進給率；設定如下：

$V_b=11.8$ ； 20 ； 50 ； 100 ； 150 ； 200 ； 300 ； 350 ； 400 ； 450 ； 500 mm/sec ；($V_b=V1\sim V12$)；

(3) 定義基因演算法參數如表(4-4-4)所示：

表(4-4-4) 直線-CCS控制基因演算法參數

設定項目	設定值
位元數(Bits) 變數精確度	$K_e (K_z)$ 設定為 20 位元
族群個數(Population)	40
生成世代(Generations)	300
複製方式(Reproduction strategy)	抽樣法(Stochastic universal sampling)
交配法(Crossover strategy)	單點交配法(Single-point crossover)
交配率 P_c	0.85
突變率 P_m	0.006
繁殖率 G_{gap}	0.9
系統參數 K_z 搜索範圍	0.0001~3000

(4) 交叉耦合系統(CCS)利用基因演算法尋求最佳增益值步驟：

1. 設定模擬固定參數及初始比較參數 V_b 。
2. 讀取先前(A)直線-US 控制法模擬獲得的最佳增益值 K_e 。

3. 令 K_v 為 0 (包括 K_{vx} , K_{vy} ,)。
4. 令 $K \varepsilon (K_z)$ 為設計變數(搜尋目標) ($K_{zx}=K_{zy}$)。
5. 令 IAE 為目標函數, IAE 最小值為適存度函數。
6. 經由基因演算法選擇、複製、交配、突變演算流程, 直到最大生成世代。
7. 得到最佳增益值 $K \varepsilon (K_z)$ 。
8. 變化比較參數 V_b , 重複步驟 2 至步驟 7, 最後得到搜尋目標(最佳增益值 $K \varepsilon (K_z)$)。

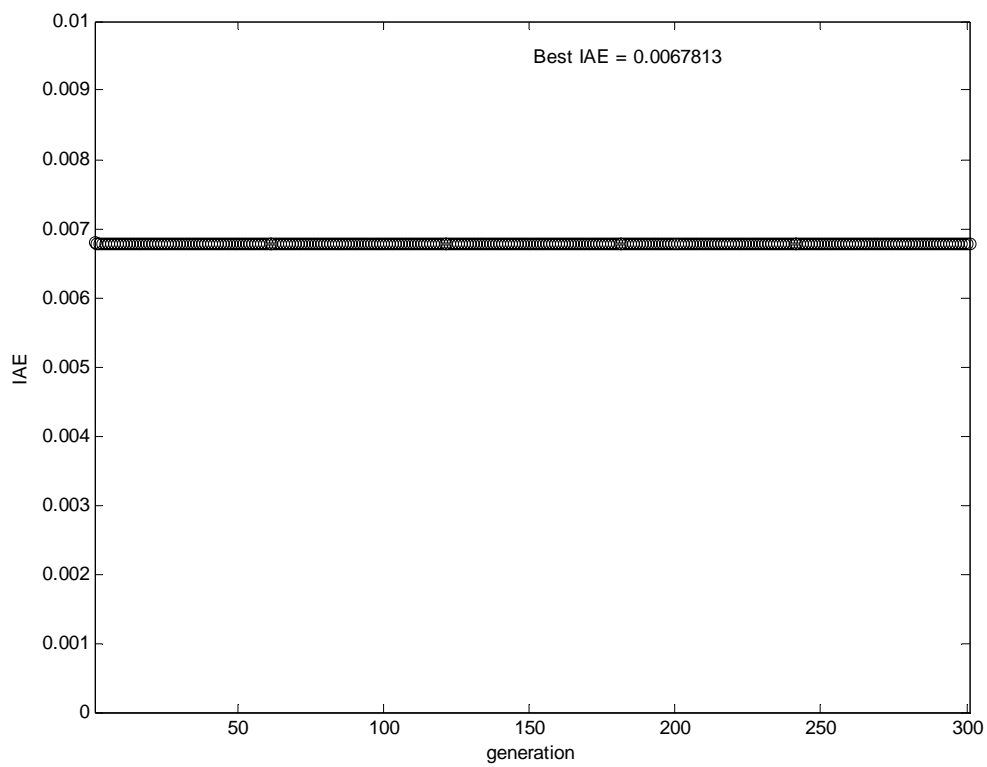
(5)直線-CCS 控制法模擬結果：

表(4-4-5) 直線-CCS 控制法模擬結果一

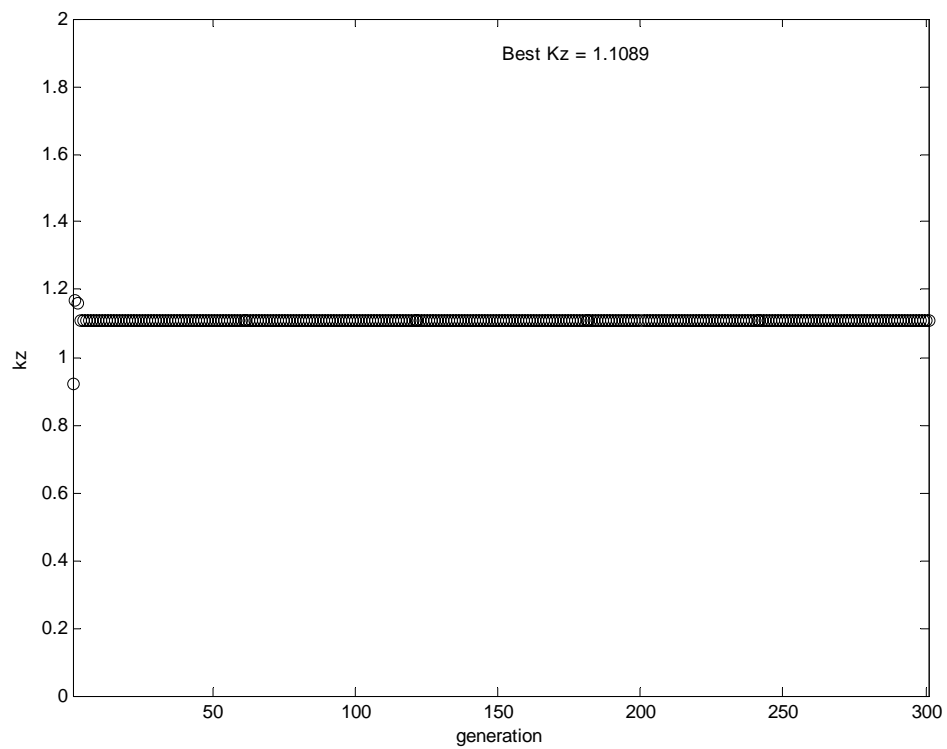
LINE-----CCS 已知 k_e 及 $k_v=0$ 搜尋 k_z						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
V_b	11.8	20	50	100	150	200
IAE	0.0016	0.0021	0.0040	0.0067	0.0092	0.0116
k_z	0.2442	0.0482	0.55680	1.1088	0.6291	0.8139

表(4-4-6) 直線-CCS 控制法模擬結果二

	V7	V8	V9	V10	V11	V12
V_b	250	300	350	400	450	500
IAE	0.0139	0.0161	0.0183	0.0183	0.0183	0.0247
k_z	0.9124	1.0271	0.8589	0.8917	0.9279	0.9876



圖(4-4-3) 直線-CCS 控制法：IAE 最小值



圖(4-4-4) 直線-CCS 控制法：Kz 最佳值

4.4.3 直線-PM 控制法

(1) 模擬路徑軌跡固定參數設定如下：

T ：取樣時間； $T=0.005\text{sec}$ ；

$[x(t), y(t),]$ 刀具模擬初始位置： $X(0)=1$ ； $Y(0)=0$ ；

τ ：時間常數； $\tau_x=0.04$ ； $\tau_y=0.045$ ；

伺服馬達增益： $K_x=0.04$ ； $K_y=0.045$ ；

K_c ：編碼器增益； $K_c * K_x=10.3$ ； $K_c * K_y=10$ ；

Φ ：進給路徑對 X 軸的角度； $\Phi=45^\circ$ ；

D ：干擾； $D_x=D_y=0.75$ ；

$IAE=1/N(\sum_{i=1}^N |e(i)|)$ ，整體誤差絕對值的平均值

(2) 模擬路徑軌跡變化比較參數： V_b ：進給率；設定如下：

$V_b=11.8; 20; 50; 100; 150; 200; 300; 350; 400; 450; 500 \text{ mm/sec}$ ；($V_b=V1 \sim V12$)；

(3) 定義基因演算法參數如表(4-4-7)所示：

表(4-4-7) 直線-PM 控制基因演算法參數

設定項目	設定值
位元數(Bits) 變數精確度	K_v 設定為 20 位元
族群個數(Population)	40
生成世代(Generations)	300
複製方式(Reproduction strategy)	抽樣法(Stochastic universal sampling)
交配法(Crossover strategy)	單點交配法(Single-point crossover)
交配率 P_c	0.85
突變率 P_m	0.006
繁殖率 G_{gap}	0.9
系統參數 K_z 搜索範圍	0.0001~3000

(4) 路徑預補償系統(PM)利用基因演算法尋求最佳增益值步驟：

1. 設定模擬模擬固定參數及初始比較參數 V_b 。
2. 讀取先前(A)直線-US 控制法模擬獲得的最佳增益值 K_e 。

3. 令 $K \varepsilon (Kz)$ 為 0 (包括 $Kzx, Kzy,)$ 。
4. 令 Kv 為設計變數(搜尋目標) ($Kvx=Kvy$)。
5. 令 IAE 為目標函數， IAE 最小值為適存度函數。
6. 經由基因演算法選擇、複製、交配、突變演算流程，直到最大生成世代。
7. 得到最佳增益值 Kv 。
8. 變化比較參數 V_b ，重複步驟 2 至步驟 7，最後得到搜尋目標(最佳增益值 Kv 。

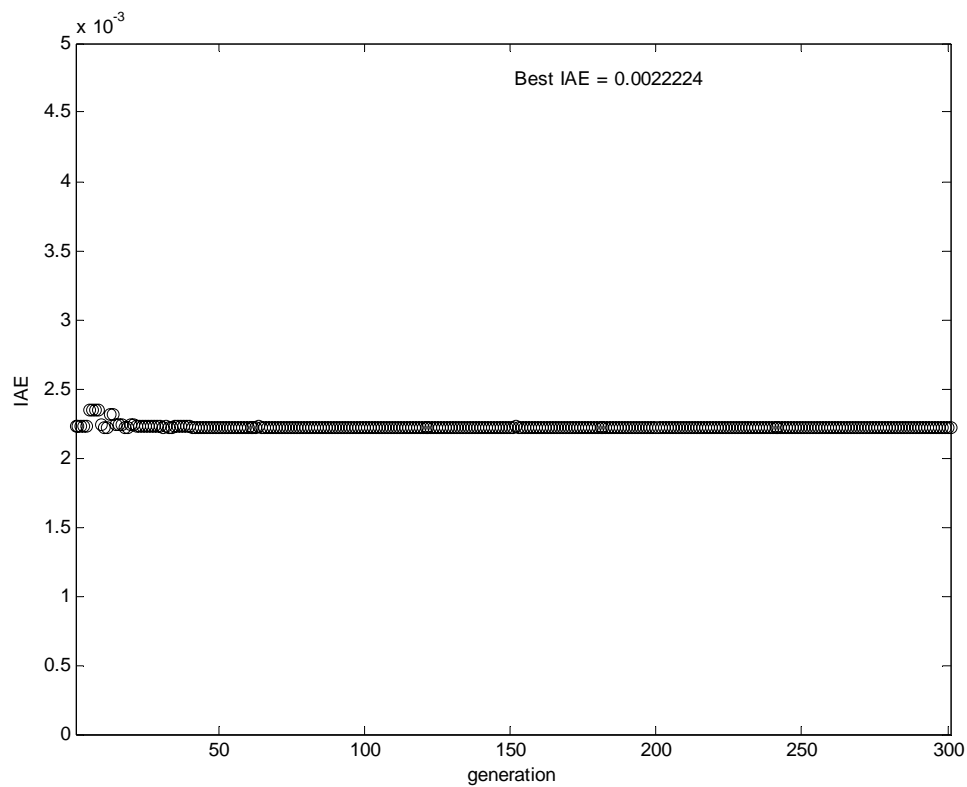
(5)路徑補償-PM 控制法模擬結果：

表(4-4-8) 直線 PM 控制法模擬結果一

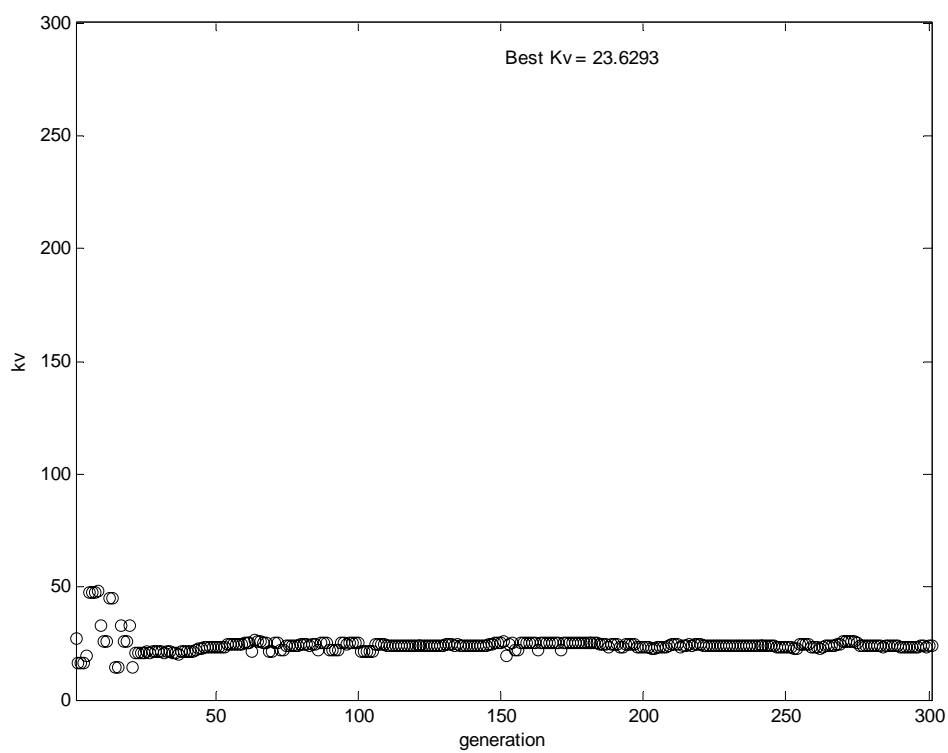
LINE-----PM 已知 k_e 及 $k_z=0$ 搜尋 k_v						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Vb	11.8	20	50	100	150	200
IAE	0.0011228	0.0013454	0.0016358	0.0022224	0.0026377	0.0030538
kv	98.14758	177.0489	48.76056	23.0383	17.90726	14.80305

表(4-4-9) 直線 PM 控制法模擬結果二

LINE-----PM 已知 k_e 及 $k_z=0$ 搜尋 k_v						
	V7	V8	V9	V10	V11	V12
Vb	250	300	350	400	450	500
IAE	0.0033422	0.0036989	0.0040364	0.0042934	0.0045953	0.0049806
kv	12.7090	11.78466	11.64447	10.50006	11.39843	10.13099



圖(4-4-5) 直線-PM控制法：IAE 最小值



圖(4-4-6) 直線-PM控制法：Kv 最佳值

4.4.4 直線-CCPM(1)控制法

(1) 模擬路徑軌跡固定參數設定如下：

T ：取樣時間； $T=0.005\text{sec}$ ；

$[x(t), y(t),]$ 刀具模擬初始位置： $X(0)=1$ ； $Y(0)=0$ ；

τ ：時間常數； $\tau_x=0.04$ ； $\tau_y=0.045$ ；

伺服馬達增益： $K_x=0.04$ ； $K_y=0.045$ ；

K_c ：編碼器增益； $K_c * K_x = 10.3$ ； $K_c * K_y = 10$ ；

Φ ：進給路徑對 X 軸的角度； $\Phi=45^\circ$ ；

D ：干擾； $D_x=D_y=0.75$ ；

$IAE=1/N(\sum_{i=1}^N |e(i)|)$ ，整體誤差絕對值的平均值

(2) 模擬路徑軌跡變化比較參數： V_b ：進給率；設定如下：

$V_b=11.8; 20; 50; 100; 150; 200; 300; 350; 400; 450; 500 \text{ mm/sec}$ ；($V_b=V1 \sim V12$)；

(3) 定義基因演算法參數如表(4-4-10)所示：

表(4-4-10) 直線-CCPM(1)控制基因演算法參數

設定項目	設定值
位元數(Bits) 變數精確度	K_v 設定為 20 位元
族群個數(Population)	40
生成世代(Generations)	300
複製方式(Reproduction strategy)	抽樣法(Stochastic universal sampling)
交配法(Crossover strategy)	單點交配法(Single-point crossover)
交配率 P_c	0.85
突變率 P_m	0.006
繁殖率 G_{gap}	0.9
系統參數 K_v 搜索範圍	0.0001~20

(4) 交叉耦合路徑預補償系統(CCPM(1))利用基因演算法尋求最佳增益值步驟：

1. 設定模擬模擬固定參數及初始比較參數 V_b 。

2. 讀取先前(A)直線-US 控制法模擬獲得的最佳增益值 K_e 。

3. 讀取先前(B)直線-CCS 控制法模擬獲得的最佳增益值 K_z 。
4. 令 K_v 為設計變數(搜尋目標) ($K_{vx}=K_{vy}$)。
5. 令 IAE 為目標函數，IAE 最小值為適存度函數。
6. 經由基因演算法選擇、複製、交配、突變演算流程，直到最大生成世代。
7. 得到最佳增益值 K_v 。
8. 變化比較參數 V_b ，重複步驟 2 至步驟 7，最後得到搜尋目標(最佳增益值 K_v)。

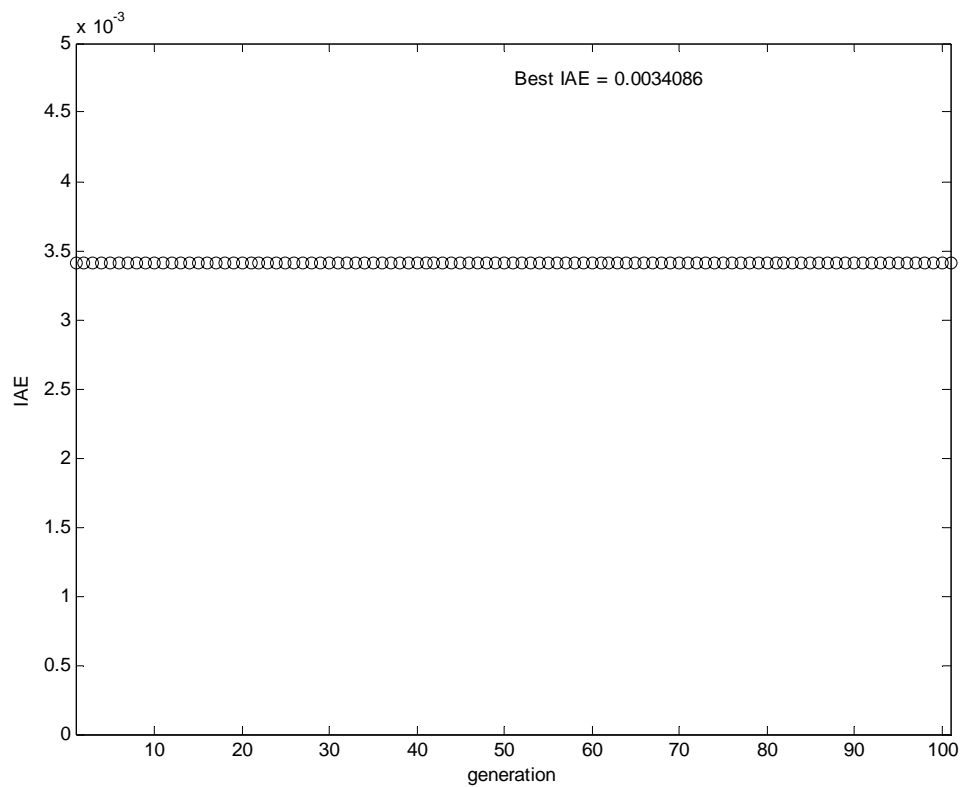
(5)交叉耦合路徑預補償系統(CCPM(1))控制法模擬結果：

表(4-4-11) 直線-CCPM(1)控制法模擬結果一

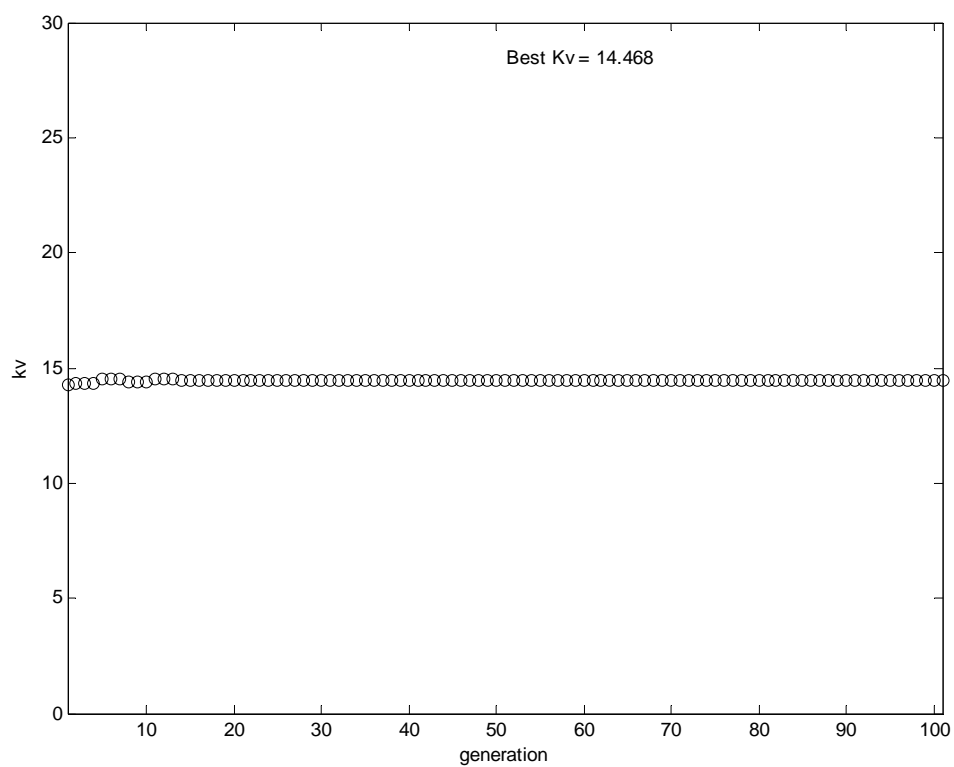
LINE-----CCPM(1) 已知 k_e 及 k_z 搜尋 k_v						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
V_b	11.8	20	50	100	150	200
IAE	0.0012	0.0013	0.0016	0.0020	0.0024	0.0027
k_v	10	169.87	74.50	21.98	20.34	18.67

表(4-4-12) 直線-CCPM(1)控制法模擬結果二

LINE-----CCPM(1) 已知 k_e 及 k_z 搜尋 k_v						
	V7	V8	V9	V10	V11	V12
V_b	250	300	350	400	450	500
IAE	0.0028	0.0031	0.0034	0.0035	0.0037	0.0040
k_v	17.98	15.02	14.46	14.21	13.20	12.60



圖(4-4-7) 直線-CCPM(1)控制法：IAE 最小值



圖(4-4-8) 直線-CCPM(1)控制法：Kv 最佳值

4.5、軌跡模擬二

直接以基因演算法同時搜尋交叉耦合路徑預補償系統最佳增益值 K_e 、 K_ε 、 K_v

4.5.1 直線—CCPM(2)控制法

(1) 模擬路徑軌跡固定參數設定如下：

T ：取樣時間； $T=0.005\text{sec}$ ；

$[x(t), y(t),]$ 刀具模擬初始位置： $X(0)=1$ ； $Y(0)=0$ ；

τ ：時間常數； $\tau_x=0.04$ ； $\tau_y=0.045$ ；

伺服馬達增益： $K_x=0.04$ ； $K_y=0.045$ ；

K_c ：編碼器增益； $K_c * K_x=10.3$ ； $K_c * K_y=10$ ；

Φ ：進給路徑對X軸的角度； $\Phi=45^\circ$ ；

D ：干擾； $D_x=D_y=0.75$ ；

$IAE=1/N(\sum_{i=1}^N |e(i)|)$ ，整體誤差絕對值的平均值

(2) 模擬路徑軌跡變化比較參數： V_b ：進給率；設定如下：

$V_b=11.8; 20; 50; 100; 150; 200; 300; 350; 400; 450; 500 \text{ mm/sec}$ ；($V_b=V1 \sim V12$)；

(3) 定義基因演算法參數如表(4-5-1)所示：

表(4-5-1) 直線 CCPM(2)控制基因演算法參數

設定項目	設定值
位元數(Bits) 變數精確度	K_e 、 K_ε (K_z)、 K_v 皆設定為 20 位元
族群個數(Population)	40
生成世代(Generations)	300
複製方式(Reproduction strategy)	抽樣法(Stochastic universal sampling)
交配法(Crossover strategy)	單點交配法(Single-point crossover)
交配率 P_c	0.85
突變率 P_m	0.006
繁殖率 G_{gap}	0.9
系統參數 K_e 搜索範圍	0.0001~10
系統參數 K_z 搜索範圍	0.0001~10

系統參數 Kv 搜索範圍	0.0001~10
--------------	-----------

(4)交叉耦合路徑預補償系統(CCPM(2))利用基因演算法尋求最佳增益值步驟：

1. 設定模擬固定參數及初始比較參數 V_b 。
2. 令 K_e 、 K_ε (K_z)、 K_v 為設計變數(搜尋目標) ($K_{ex}=K_{ey}$ 、 $K_{zx}=K_{zy}$ 、 $K_{vx}=K_{vy}$)。
3. 令 IAE 為目標函數，IAE 最小值為適存度函數。
4. 經由基因演算法選擇、複製、交配、突變演算流程，直到最大生成世代。
5. 得到最佳增益值 K_e 、 K_ε (K_z)、 K_v 。
6. 變化比較參數 V_b ，重複步驟 2 至步驟 7，最後得到搜尋目標(最佳增益值 K_e 、 K_ε (K_z)、 K_v)。

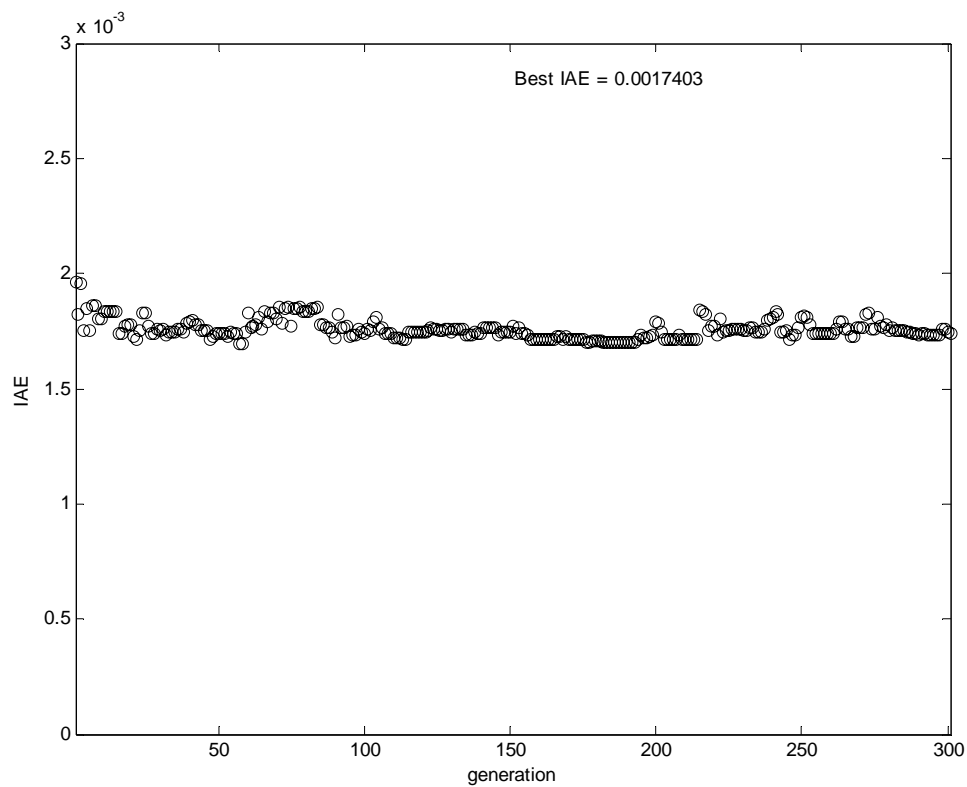
(5)交叉耦合路徑預補償系統(CCPM(2))控制法模擬結果：

表(4-5-2) 直線 CCPM(2)控制法模擬結果一

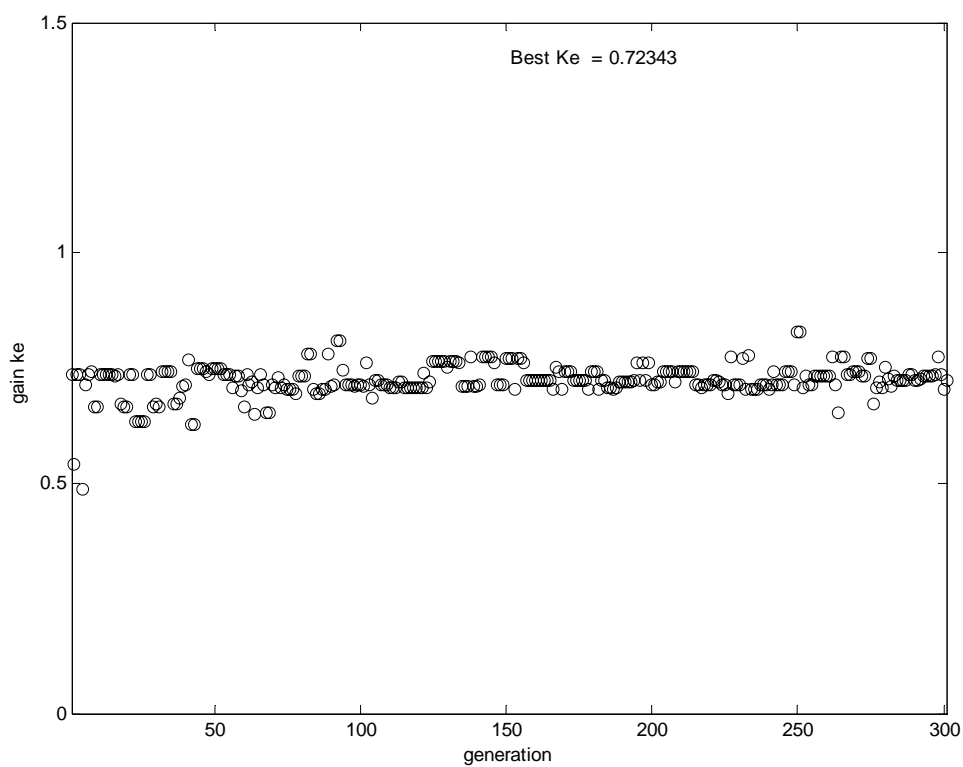
LINE-----CCPM(2)-同時搜尋 ke-kz-kv						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
V_b	11.8	20	150	100	150	200
IAE	0.000260	0.000397	0.000883	0.001216	0.001355	0.001517
ke	0.075163	0.079235	0.1209771	0.2049188	0.3461567	0.4766563
kz	6.425731	5.142627	3.4751070	6.9495370	2.4245770	1.9093920
kv	9.722436	9.957781	8.9902110	9.2516390	9.9825000	9.3664990

表(4-5-3) 直線 CCPM(2)控制法模擬結果二

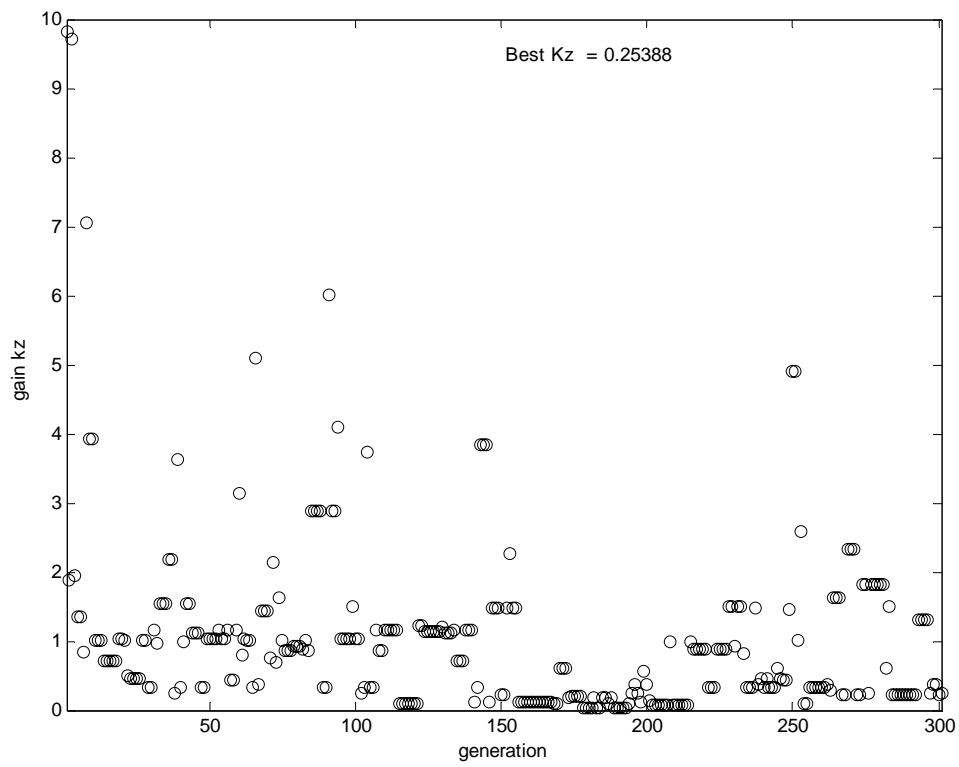
LINE-----CCPM(2)-同時搜尋 ke-kz-kv						
	V7	V8	V9	V10	V11	V12
V_b	250	300	350	400	450	500
IAE	0.001603	0.001653	0.001723	0.001787	0.001850	0.002024
ke	0.6081572	0.5823510	0.6793389	0.7041532	0.7387522	0.7818961
kz	2.6514660	0.1375305	0.8472460	0.2502358	0.2342522	0.3374017
kv	9.8620520	9.9185000	9.887811	9.762585	9.911586	9.115523



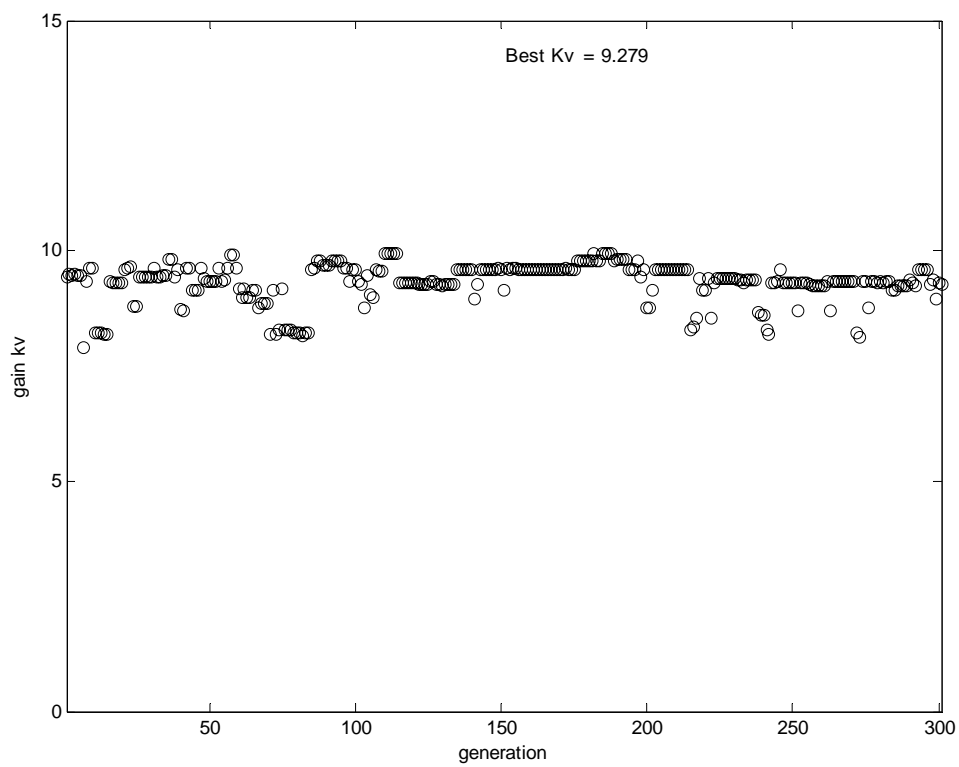
圖(4-5-1) 直線-CCPM(2)控制法：IAE 最小值



圖(4-5-2) 直線-CCPM 控制法(2)： k_e 最佳值



圖(4-5-3) 直線-CCPM(2)控制法： K_z 最佳值



圖(4-5-4) 直線-CCPM(2)控制法： K_v 最佳值

4.5.2 圓弧(固定 1 個半徑、變化進給速率模擬)----CCPM 控制法

(1) 模擬路徑軌跡固定參數半徑 R_i 設定如下：

T ：取樣時間； $T=0.001\text{sec}$ ；

R_i ：半徑； $R_i=30\text{mm}$ ；

$[x(t), y(t),]$ 刀具模擬初始位置： $X(0)=30$ ； $Y(0)=0$ ；

τ ：時間常數； $\tau_x=0.04$ ； $\tau_y=0.045$ ；

伺服馬達增益： $K_x=0.09$ ； $K_y=0.01$ ；

K_c ：編碼器增益； $K_c * K_x = 10.3$ ； $K_c * K_y = 10$ ；

D ：干擾； $D_x=D_y=0.75$ ；

$IAE=1/N(\sum_{i=1}^N |e(i)|)$ ，整體誤差絕對值的平均值

(2) 模擬路徑軌跡變化比較參數： V_b ：進給率；設定如下：

$V_b=11.8; 20; 50; 100; 150; 200; 300; 350; 400; 450; 500 \text{ mm/sec}$ ；($V_b=V1\sim V12$)；

(3) 定義基因演算法參數如表(4-5-4)所示：

表(4-5-4) 圓弧 CCPM 控制基因演算法參數

設定項目	設定值
位元數(Bits) 變數精確度	K_e 、 K_ε (K_z)、 K_v 皆設定為 20 位元
族群個數(Population)	40
生成世代(Generations)	200
複製方式(Reproduction strategy)	抽樣法(Stochastic universal sampling)
交配法(Crossover strategy)	單點交配法(Single-point crossover)
交配率 P_c	0.85
突變率 P_m	0.006
繁殖率 G_{gap}	0.9
系統參數 K_e 搜索範圍	0.0001~10
系統參數 K_z 搜索範圍	0.0001~10
系統參數 K_v 搜索範圍	0.0001~10

(4)圓弧交叉耦合路徑預補償系統(CCPM)利用基因演算法尋求最佳增益值步驟：

1. 設定模擬模擬固定參數及初始比較參數 V_b 。
2. 令 K_e 、 $K_\varepsilon(K_z)$ 、 K_v 為設計變數(搜尋目標) ($K_{ex}=K_{ey}$ 、 $K_{zx}=K_{zy}$ 、 $K_{vx}=K_{vy}$)。
3. 令 IAE 為目標函數，IAE 最小值為適存度函數。
4. 經由基因演算法選擇、複製、交配、突變演算流程，直到最大生成世代。
5. 得到最佳增益值 K_e 、 $K_\varepsilon(K_z)$ 、 K_v 。
6. 變化比較參數 V_b ，重複步驟 2 至步驟 7，最後得到搜尋目標(最佳增益值 K_e 、 $K_\varepsilon(K_z)$ 、 K_v)。

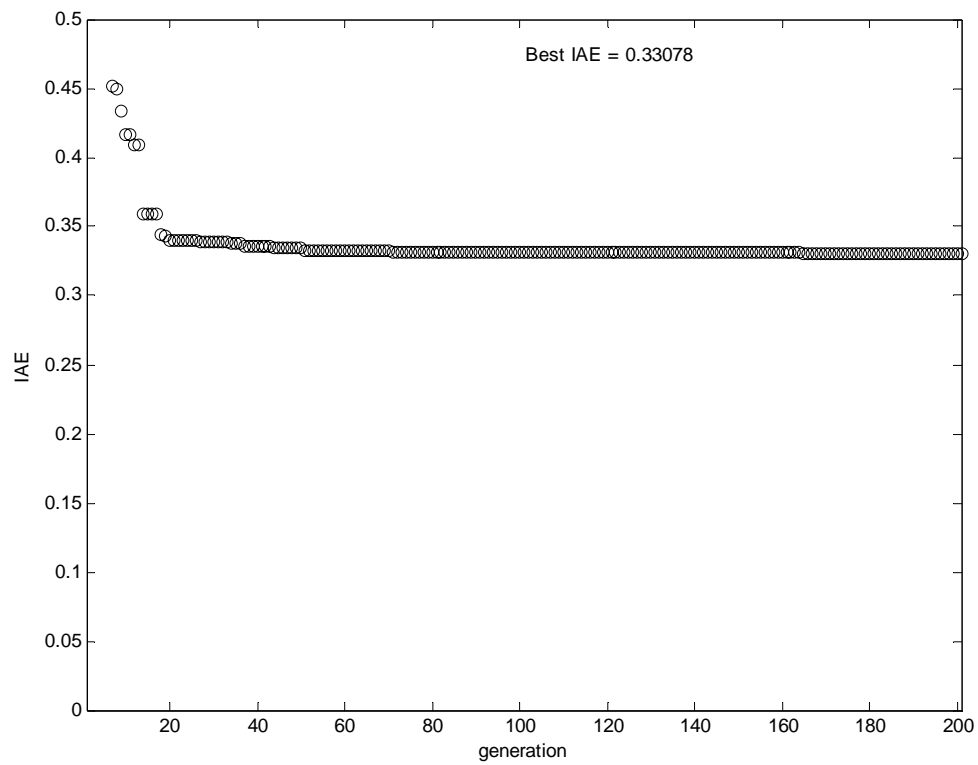
(5)圓弧交叉耦合路徑預補償系統(CCPM)控制法模擬結果：

表(4-5-5) 圓弧 CCPM 控制法模擬結果一

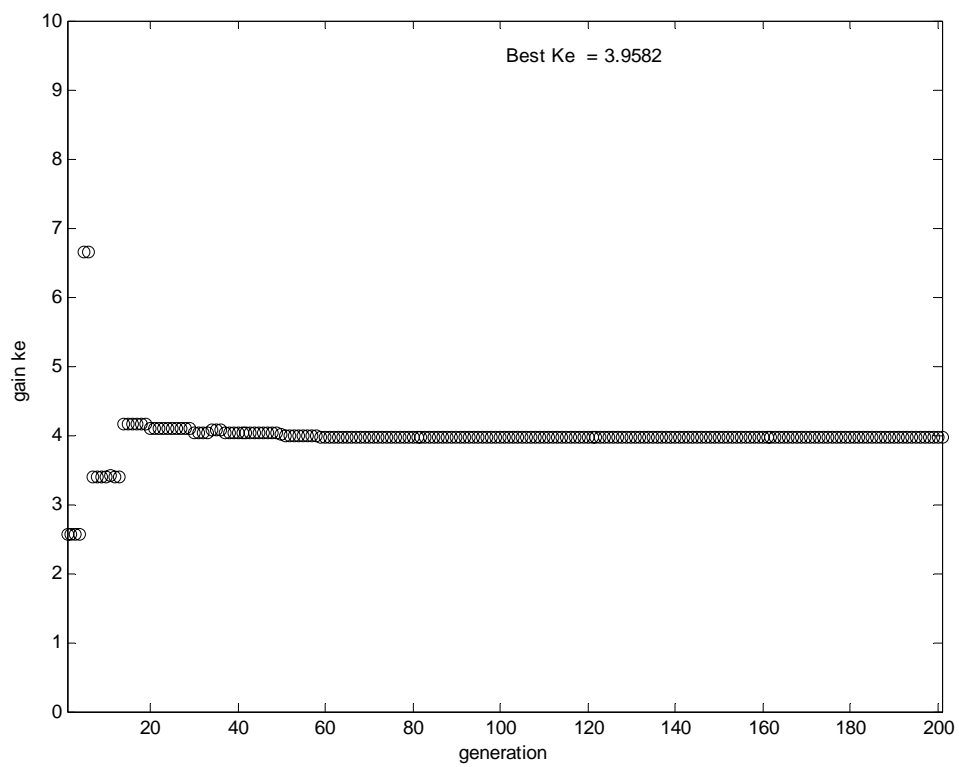
CIRCLE -----CCPM 同時搜尋 ke-kz-kv						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
V_b	11.8	20	50	100	150	200
IAE	0.2835071	0.2836149	0.2844475	0.2878090	0.2921934	0.2989474
ke	3.932273	3.932331	3.932741	3.939970	3.936832	3.940456
kz	0.0000105	0.0000486	0.0002775	0.0018320	0.0025377	0.00454049
kv	0.0475353	0.0820675	0.2163437	0.4757598	0.7765746	1.12416700

表(4-5-6) 圓弧 CCPM 控制法模擬結果二

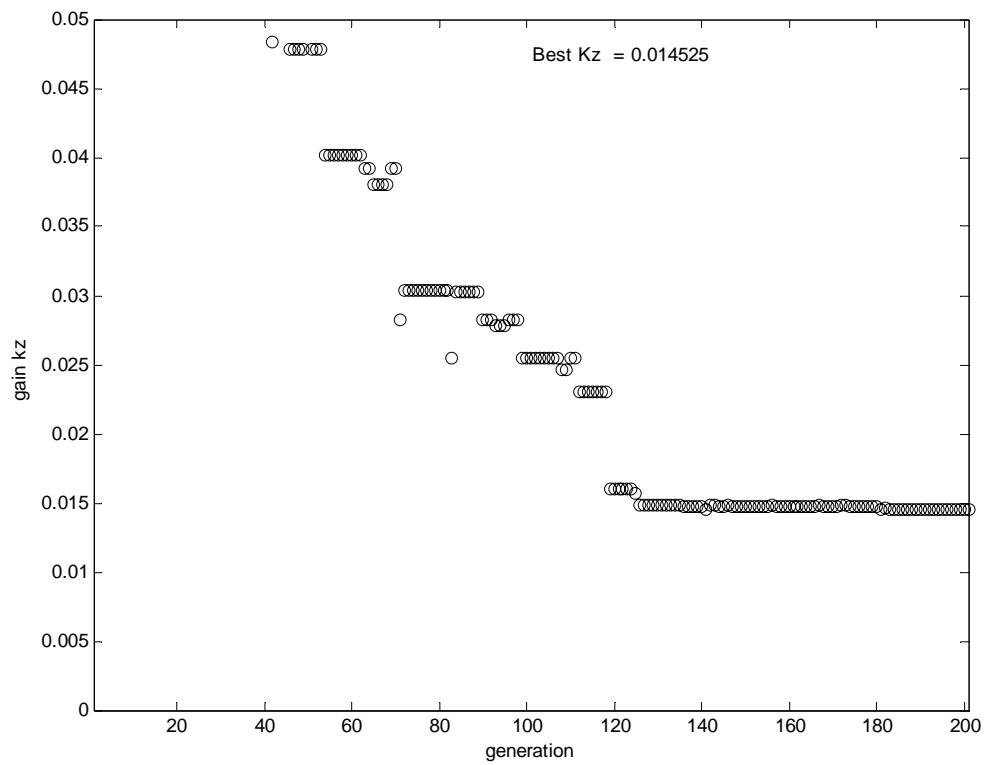
CIRCLE -----CCPM 同時搜尋 ke-kz-kv						
	V7	V8	V9	V10	V11	V12
V_b	250	300	350	400	450	500
IAE	0.3076245	0.3182282	0.3307497	0.3451343	0.3613681	0.3793173
ke	3.944986	3.950794	3.957708	3.965118	3.974750	3.984153
kz	0.00704865	0.0102816	0.0141630	0.0183497	0.0239096	0.0293741
kv	1.49221500	1.9414300	2.4425520	2.8974220	3.5728180	4.127689



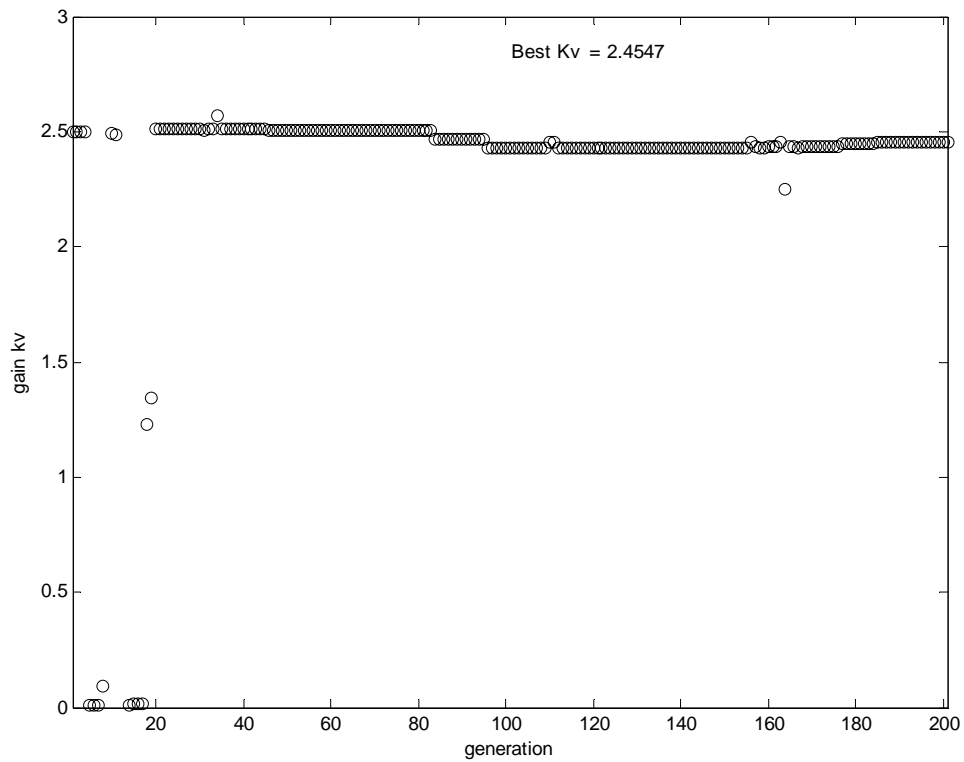
圖(4-5-7) 圓弧-CCPM 控制法：IAE 最小值



圖(4-5-8) 圓弧-CCPM 控制法：Ke 最佳值



圖(4-5-9) 圓弧-CCPM 控制法： K_z 最佳值



圖(4-5-10) 圓弧-CCPM 控制法： K_v 最佳值

4.6、軌跡模擬三

4.6.1 圓弧(變化 6 種半徑、固定進給速率分次模擬)-----CCPM 控制法

$R=10\ 20\ 30\ 40\ 50\ 60$

$v_b=11.8\ 20\ 50\ 100\ 150\ 200\ 300\ 350\ 400\ 450\ 500$

$MAXGEN = 200$

(1) 模擬路徑軌跡固定參數進給速率 V_b 設定如下： $(V_b$ 進給速率，以 $V_b=V1\sim V12$ 共進行 12 次模擬)

$V_b=11.8; 20; 50; 100; 150; 200; 300; 350; 400; 450; 500\text{ mm/sec}; (V_b=V1\sim V12);$

T ：取樣時間； $T=0.001\text{sec}$ ；

R_i ：半徑； $R_i=30\text{mm}$ ；

$[x(t), y(t),]$ 刀具模擬初始位置： $X(0)=30; Y(0)=0$ ；

τ ：時間常數； $\tau_x=0.04$ ； $\tau_y=0.045$ ；

伺服馬達增益： $K_x=0.09; K_y=0.01$ ；

K_c ：編碼器增益； $K_c * K_x=10.3$ ； $K_c * K_y=10$ ；

D ：干擾； $D_x=D_y=0.75$ ；

$IAE=1/N(\sum_{i=1}^N |e(i)|)$ ，整體誤差絕對值的平均值

(2) 模擬路徑軌跡變化比較參數：半徑 R_i ：radius；設定如下：

$R_i=10、20、30、40、50、60\text{mm}$ ；

(3) 定義基因演算法參數如表(4-6-1)所示：

表(4-6-1) 圓弧 CCPM 控制基因演算法參數

設定項目	設定值
位元數(Bits) 變數精確度	$K_e、K_\epsilon(K_z)、K_v$ 皆設定為 20 位元
族群個數(Population)	40
生成世代(Generations)	200
複製方式(Reproduction strategy)	抽樣法(Stochastic universal sampling)
交配法(Crossover strategy)	單點交配法(Single-point crossover)
交配率 P_c	0.85
突變率 P_m	0.006

繁殖率 Ggap	0.9
系統參數 Ke 搜索範圍	0.0001~10
系統參數 Kz 搜索範圍	0.0001~10
系統參數 Kv 搜索範圍	0.0001~10

(4)圓弧交叉耦合路徑預補償系統(CCPM)利用基因演算法尋求最佳增益值步驟：

1. 設定模擬模擬固定參數進給速率 $V_b=V_1$ 及初始比較參數半徑 $R_i=R_1$ 。
2. 令 K_e 、 K_ε (K_z)、 K_v 為設計變數(搜尋目標) ($K_{ex}=K_{ey}$ 、 $K_{zx}=K_{zy}$ 、 $K_{vx}=K_{vy}$)。
3. 令 IAE 為目標函數，IAE 最小值為適存度函數。
4. 經由基因演算法選擇、複製、交配、突變演算流程，直到最大生成世代。
5. 得到最佳增益值 K_e 、 K_ε (K_z)、 K_v 。
6. 變化比較參數 R_i 至下一值，重複步驟 2 至步驟 7，最後得到搜尋目標(最佳增益值 K_e 、 K_ε (K_z)、 K_v)。
7. 調整模擬模擬固定參數 V_b 至下一值，再重複步驟 1 至 6，直至 12 個固定參數 V_b 皆已完成。

(5)圓弧交叉耦合路徑預補償系統(CCPM)控制法 12 次模擬結果：

表(4-6-2) 圓弧 CCPM 控制模擬結果一

CIRCLE -----CCPM VB=V1，不同 R(R1-R6)，同時搜尋 ke-kz-kv						
V1	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.316780	0.018335	0.283534	0.416830	0.516666	0.616588
ke	3.927600	3.925302	3.932617	3.931606	3.931997	3.932264
kz	0.000411	0.115681	0.000363	0.000029	0.000668	0.000020
kv	0.051311	0.019545	0.047563	0.000100	0.000100	0.000100

表(4-6-3) 圓弧 CCPM 控制模擬結果二

CIRCLE -----CCPM VB=V2，不同 R(R1-R6)，同時搜尋 ke-kz-kv						
V2	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.316969	0.183469	0.283634	0.417085	0.516839	0.616742
ke	3.932321	3.924167	3.932569	3.932130	3.932359	3.932226
kz	0.000010	0.132399	0.000315	0.000096	0.000020	0.000029

kv	0.134175	0.043730	0.081876	0.000010	0.000100	0.000100
----	----------	----------	----------	----------	----------	----------

表(4-6-4) 圓弧 CCPM 控制模擬結果三

CIRCLE -----CCPM VB=V3，不同 R(R1-R6)，同時搜尋 ke-kz-kv						
V3	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.319928	0.1845628	0.2844493	0.4188468	0.5181012	0.6177605
ke	3.922641	3.922832	3.9327690	3.9319680	3.9321300	3.9322070
kz	0.009137	0.1553070	0.0003061	0.0001631	0.0001440	0.0000486
kv	0.746810	0.2075128	0.2181557	0.0001000	0.0001000	0.0001000

表(4-6-5) 圓弧 CCPM 控制模擬結果四

CIRCLE -----CCPM VB=V4，不同 R(R1-R6)，同時搜尋 ke-kz-kv						
V4	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.329084	0.183732	0.287365	0.423870	0.522048	0.6210331
ke	3.935154	3.862999	3.934219	3.931911	3.932092	3.9321780
kz	0.000001	1.738751	0.001088	0.000210	0.000124	0.0000963
kv	2.885597	0.849310	0.469341	0.000100	0.000100	0.0001000

表(4-6-6) 圓弧 CCPM 控制模擬結果五

CIRCLE -----CCPM VB=V5，不同 R(R1-R6)，同時搜尋 ke-kz-kv						
V5	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.3448244	0.1907620	0.2922362	0.4315581	0.5283245	0.6262475
ke	3.938053	3.8835130	3.9374140	3.9318540	3.9325500	4.0510240
kz	0.00047783	1.6574500	0.0031290	0.0002489	0.0001821	0.0000010
kv	6.305165	1.8505170	0.7867502	0.0001000	0.0001000	0.0001000

表(4-6-7) 圓弧 CCPM 控制模擬結果六

CIRCLE -----CCPM VB=V6，不同 R(R1-R6)，同時搜尋 ke-kz-kv						
V6	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.3660877	0.2048812	0.2989488	0.4419080	0.5368930	0.6321089
ke	3.9419530	3.9120650	3.9405040	3.9318540	3.9319870	4.6181400
kz	0.0003061	0.3419984	0.0045691	0.0002775	0.0002298	0.0000010

kv	10	2.8661510	1.1293550	0.0001095	0.0001000	0.0001000
----	----	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

表(4-6-8) 圓弧 CCPM 控制模擬結果七

CIRCLE -----CCPM VB=V7, 不同 R(R1-R6), 同時搜尋 ke-kz-kv						
V7	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.3985504	0.2085980	0.3077769	0.4549328	0.5478002	0.6379814
ke	3.9422010	3.854645	3.9472840	3.9319210	3.9319490	5.0234480
kz	0.0001249	1.750338	0.0095091	0.0002584	0.0002871	0.0000010
kv	10	5.105473	1.5211010	0.0001000	0.0001000	0.0001000

表(4-6-9) 圓弧 CCPM 控制模擬結果八

CIRCLE -----CCPM VB=V8, 不同 R(R1-R6), 同時搜尋 ke-kz-kv						
V8	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.4424842	0.2217427	0.3182665	0.470648	0.5610426	0.6438469
ke	3.9424590	3.830613	3.9513660	3.932054	3.9320250	5.3379960
kz	0.0000010	1.844542	0.0104056	0.000201	0.0003347	0.0000010
kv	10	7.018679	1.9361080	0.000100	0.0001000	0.0001000

表(4-6-10) 圓弧 CCPM 控制模擬結果九

CIRCLE -----CCPM VB=V9 不同 R(R1-R6), 同時搜尋 ke-kz-kv						
V9	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.4961608	0.2372539	0.3307475	0.4890706	0.5766285	0.6497297
ke	3.9425920	3.7993040	3.9568970	3.9322540	3.9319400	5.6240100
kz	0.0000010	1.9542240	0.0137053,	0.0001154	0.0003729	0.0000010
kv	10	9.9973870	2.3321370	0.0001000	0.0001000	0.0001000

表(4-6-11) 圓弧 CCPM 控制模擬結果十

CIRCLE -----CCPM VB=V10, 不同 R(R1-R6), 同時搜尋 ke-kz-kv						
V10	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.5582333	0.2622656	0.3451392	0.5102155	0.5934386	0.6556068
ke	4.0253420	3.9405320	3.9644880	3.9326360	4.1939880	5.8162300
kz	0.0000010	1.4818310	0.0180063	0.0000105	0.0000010	0.0000001

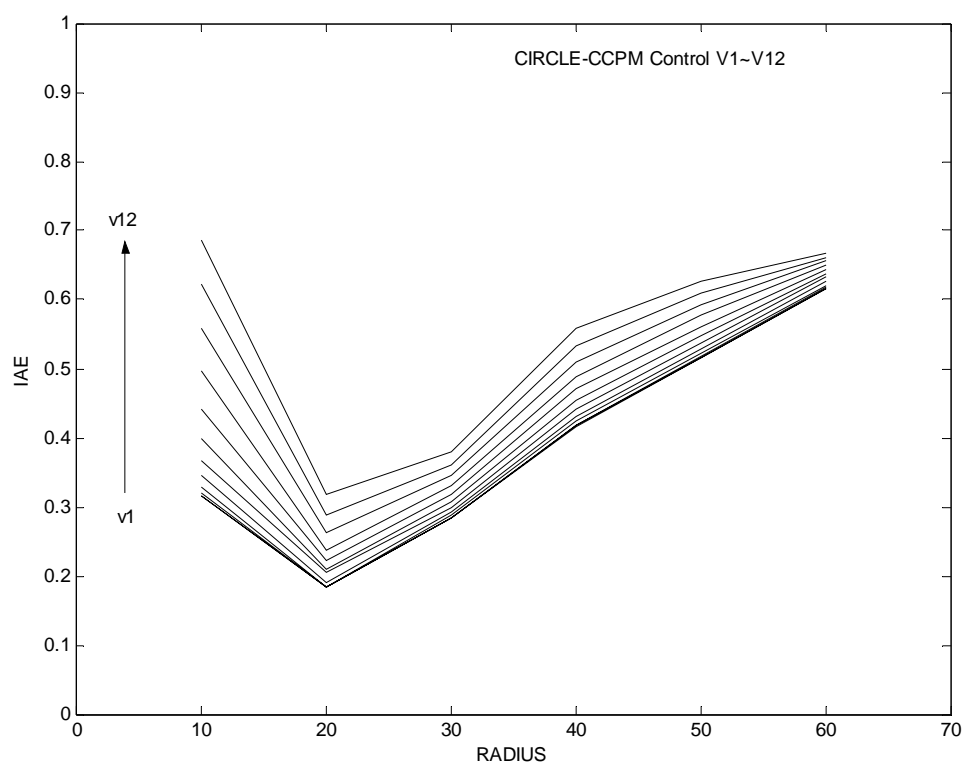
kv	10	10	2.8245620	0.0001000	0.0001286	0.0001000
----	----	----	-----------	-----------	-----------	-----------

表(4-6-12) 圓弧 CCPM 控制模擬結果十一

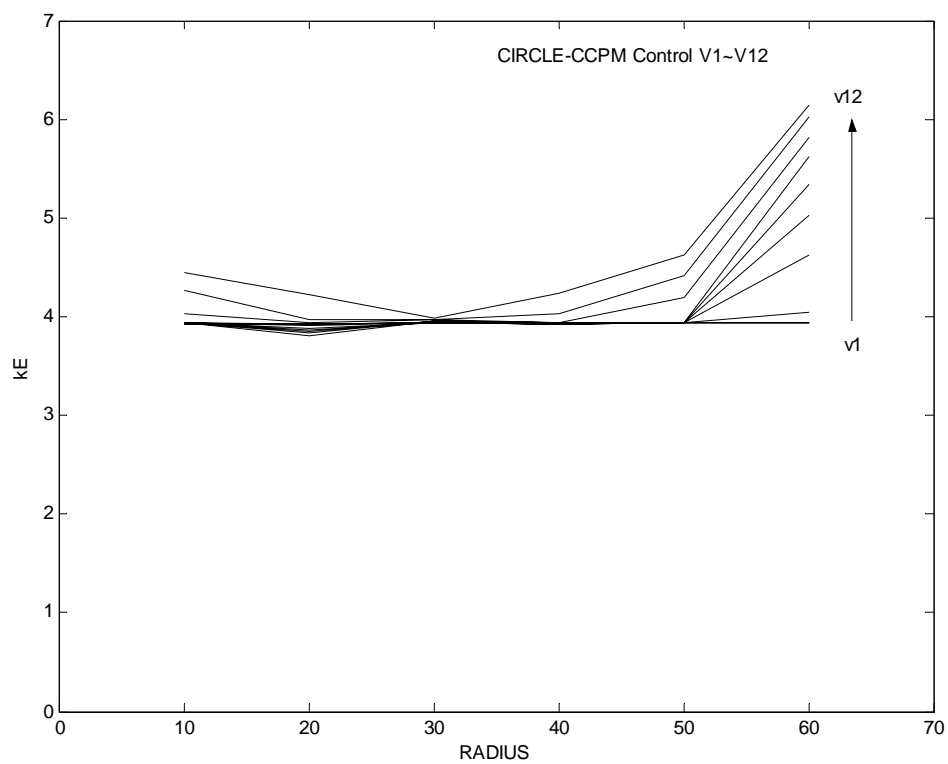
CIRCLE -----CCPM VB=V11，不同 R(R1-R6)，同時搜尋 ke-kz-kv						
V11	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.6223411	0.2892147	0.3613633	0.5338636	0.6101848	0.6614869
ke	4.2628140	3.9645550	3.9746450	4.0253700	4.4197110	6.0205340
kz	0.0000010	1.3729310	0.0238047	0.0000010	0.0000010	0.0007734
kv	10	10	3.5754120	0.0001000	0.0001000	0.0001095

表(4-6-13) 圓弧 CCPM 控制模擬結果十二

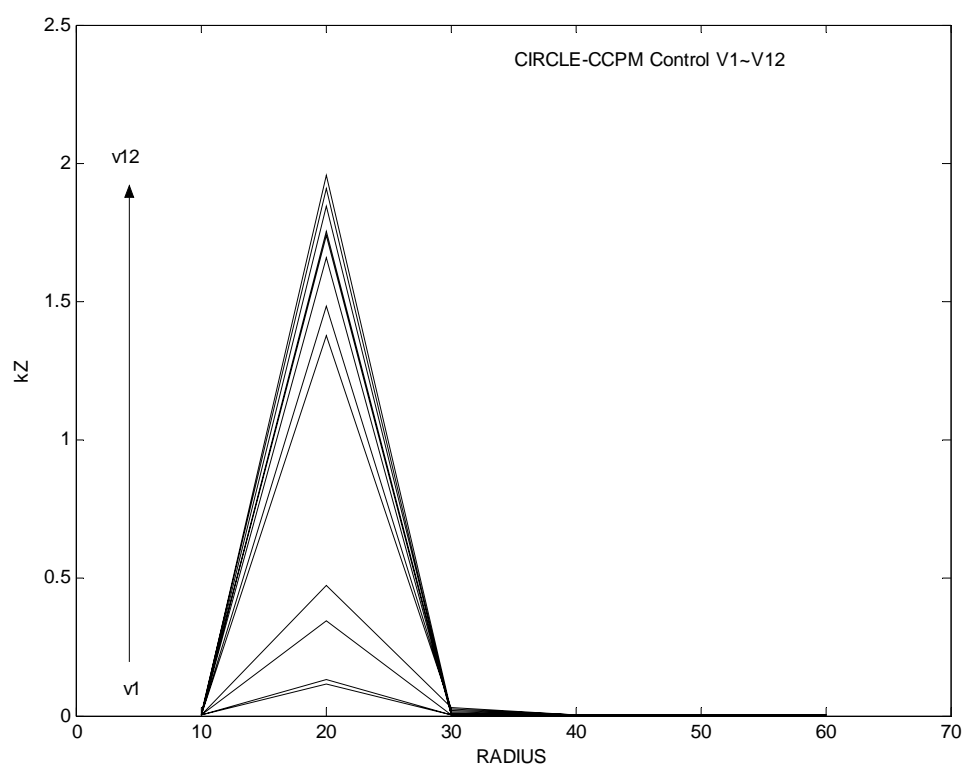
CIRCLE -----CCPM VB=V12，不同 R(R1-R6)，同時搜尋 ke-kz-kv						
V12	R1	R2	R3	R4	R5	R6
R	10	20	30	40	50	60
iae	0.6861429	0.3173581	0.3793164	0.5578757	0.6270630	0.6673388
ke	4.4472720	4.2272330	3.9841430	4.2375040	4.6274770	6.1479250
kz	0.0000010	0.4731765	0.0293360	0.0000010	0.0000010	0.0000010
kv	10	10	4.1298350	0.0001000	0.0001000	0.0001000



圖(4-6-1) 圓弧-CCPM 控制法：IAE 最小值

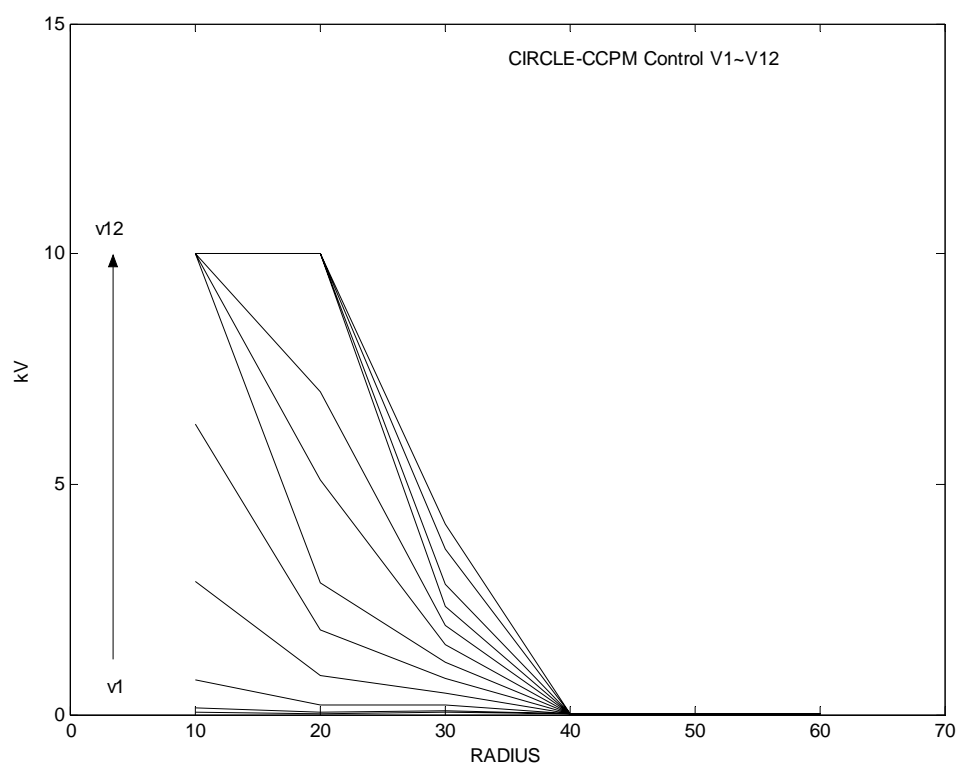


圖(4-6-2) 圓弧-CCPM 控制法：Ke 最佳值



圖

(4-6-3) 圓弧-CCPM 控制法： K_z 最佳值



圖(4-6-4) 圓弧-CCPM 控制法： K_v 最佳值

4.7、直線及圓弧模擬綜合比較討論

4.7.1、直線 US-CCS-PM-CCPM(1)-CCPM(2)模擬綜合比較

(一)由(圖 4-7-1)可以發現以未耦合補償控制法(US)、交叉耦合補償系統(CCS)、路徑預補償系統(PM)、交叉耦合預補償系統(CCPM(1))等方法，對輪廓誤差 IAE 值，以交叉耦合預補償系統(CCPM(1))方法有較佳的控制性。同時若依基因演算法，用交叉耦合預補償系統 CCPM(2)方法，同時搜尋 K_e 、 K_z 、 K_v 三增益參數，更可獲得最佳之輪廓誤差控制性，因此交叉耦合預補償系統，對未來數控機械控制系統的直線控制部份是值得研究發展的領域。

(二)由(圖4-7-2)未耦合補償控制法(US)：IAE數值隨切銷進給命令 V_b 增加而加大，此點符合在工具母機實際作業中，因進給命令增加太多，工件精度較不易掌控；由(圖4-7-3)最佳增益參數數值 K_e 數值，可隨切銷進給命令 V_b 增加而加大，因在未耦合補償控制法中，速度前向增益可降低位置偏差，此點也類似數控機械模糊控制法可調增益的研究。

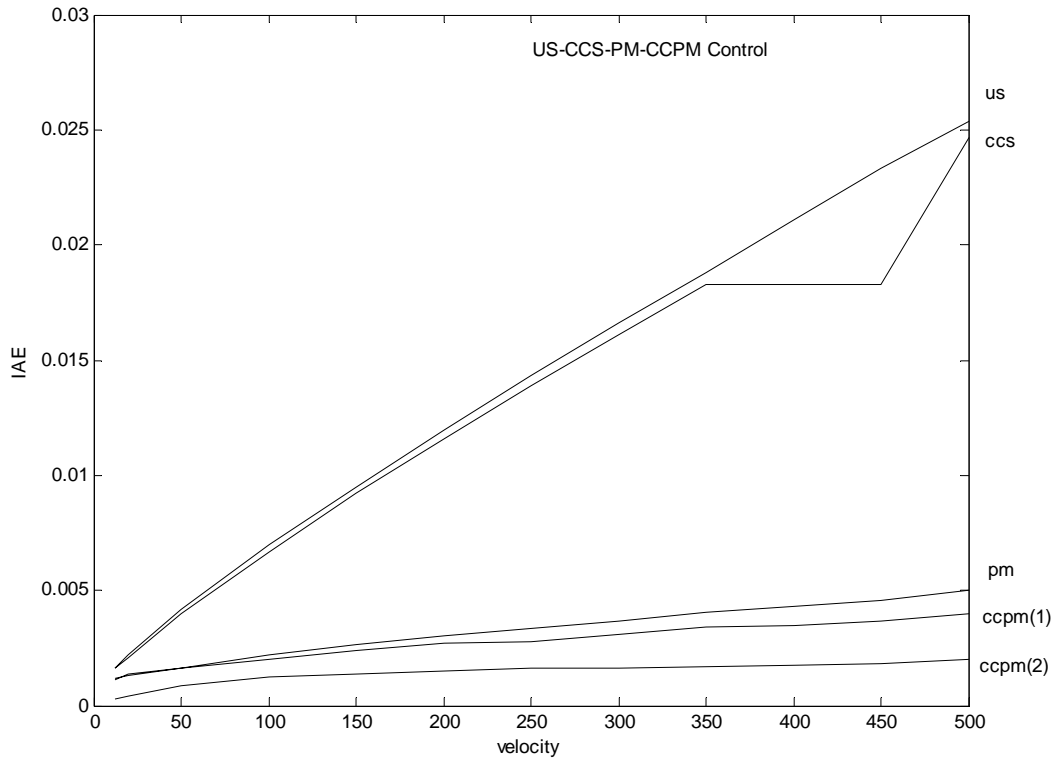
(三)由(圖 4-7-4)交叉耦合補償系統(CCS)：IAE 數值隨切銷進給命令 V_b 增加而加大；此點亦類似未耦合補償控制法，因進給命令增加太多，工件精度較易失去；由(圖 4-7-5)最佳增益參數數值 K_z 數值，亦隨切銷進給命令 V_b 增加而加大，也可提供數控機械模糊控制增益調整的研究。

(四)由(圖 4-7-6)路徑預補償系統(PM)：IAE 數值隨切銷進給命令 V_b 增加而加大，類似前二項情狀況；由(圖 4-7-7)最佳增益參數數值 K_v 數值，隨切銷進給命令 V_b 增加而減小，因 V_b 增加位置偏差增加，要維持穩定速度補償則 K_v 數值必須降低。

(五)由(圖 4-7-8)交叉耦合預補償系統(CCPM(1))：IAE 數值隨切銷進給命令 V_b 增加而加大，亦類似前三項情況；由(圖 4-7-9)最佳增益參數數值 K_v ，亦隨切銷進給命令 V_b 增加而減小，亦同前項情況。

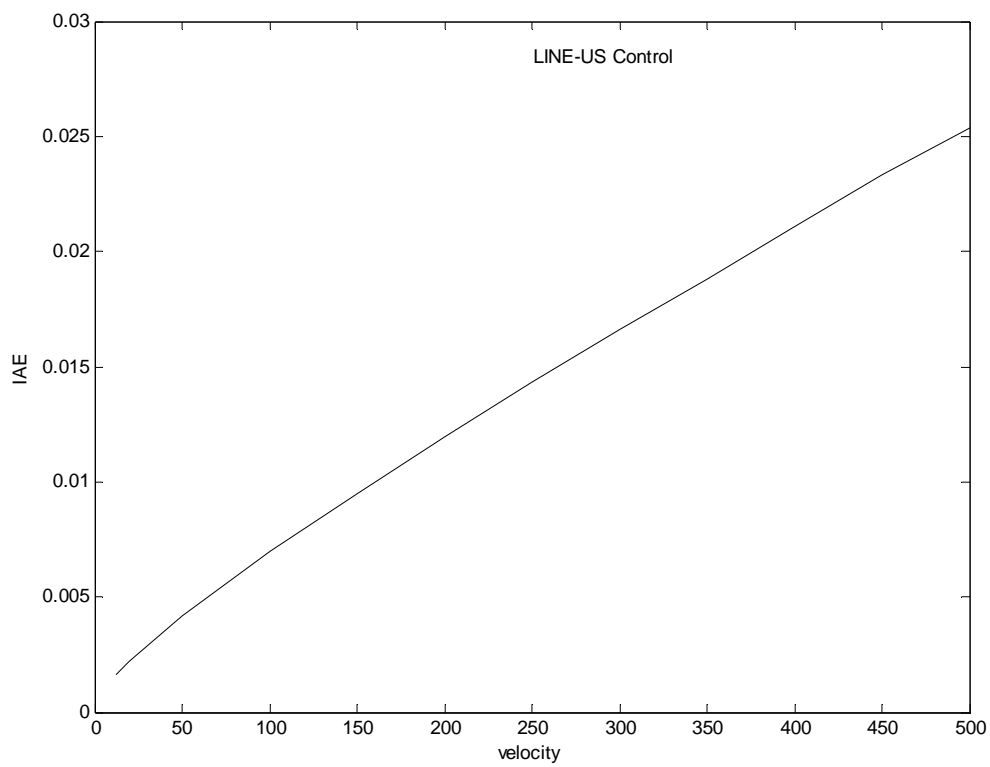
(六)由(圖 4-7-10)交叉耦合預補償系統(CCPM(2))：IAE 數值亦隨切銷進給命令 V_b 增加而加大，符合實際作業情況；由(圖 4-7-11)最佳增益參數數值 K_e ，隨切銷進給命令 V_b 增加而加大；最佳增益參數數值 K_z ，隨切銷進給命令 V_b 增加而減小；最

佳增益參數數值 K_v ，隨切銷進給命令 V_b 增加而近似不變，主要在交叉耦合預補償系統中，另兩項參數 K_e 及 K_z 調整結果使 IAE 降低， K_v 相對調整可減少。

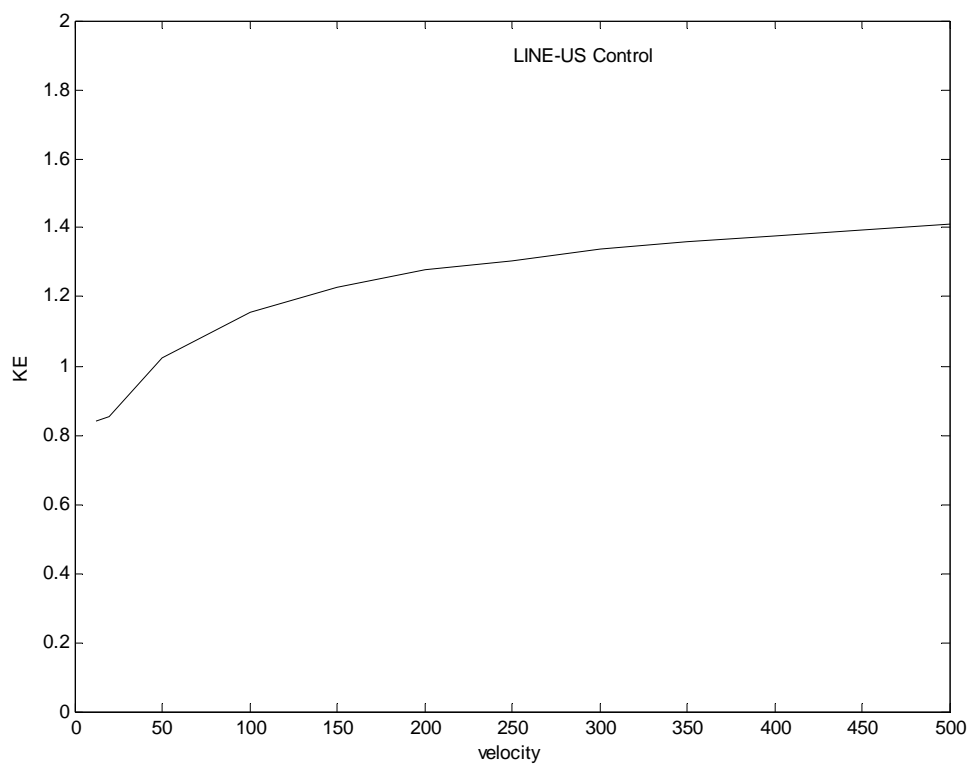


圖

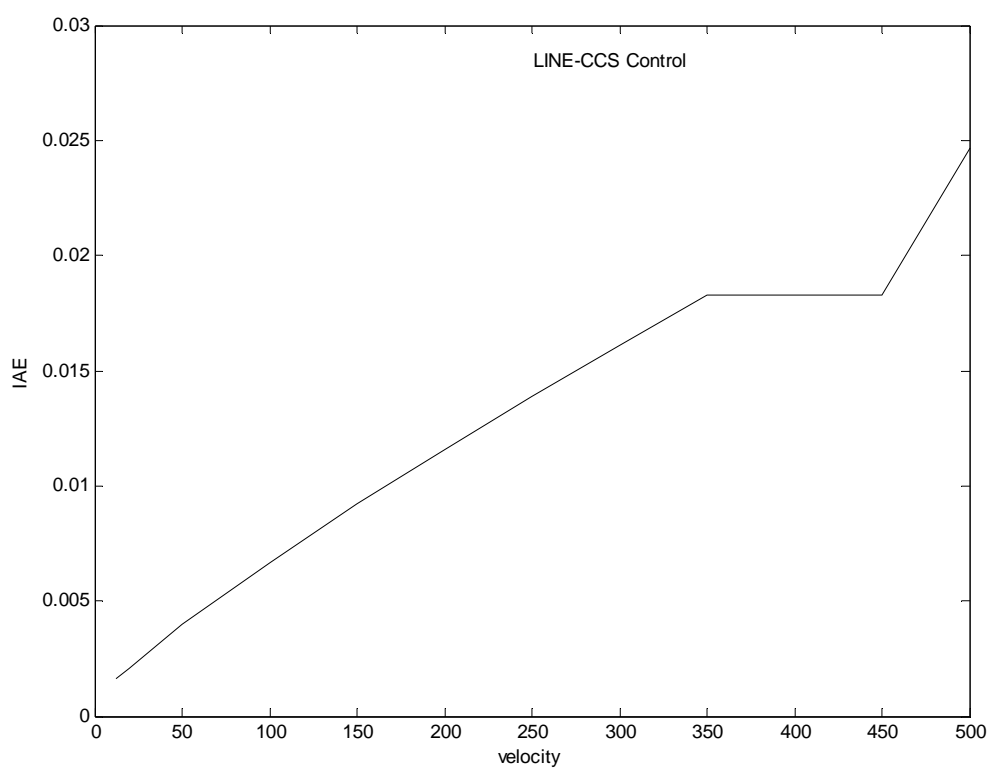
(4-7-1) 直線 US-CCS-PM-CCPM(1)-CCPM(2)控制法：IAE- V_b 綜合比較圖



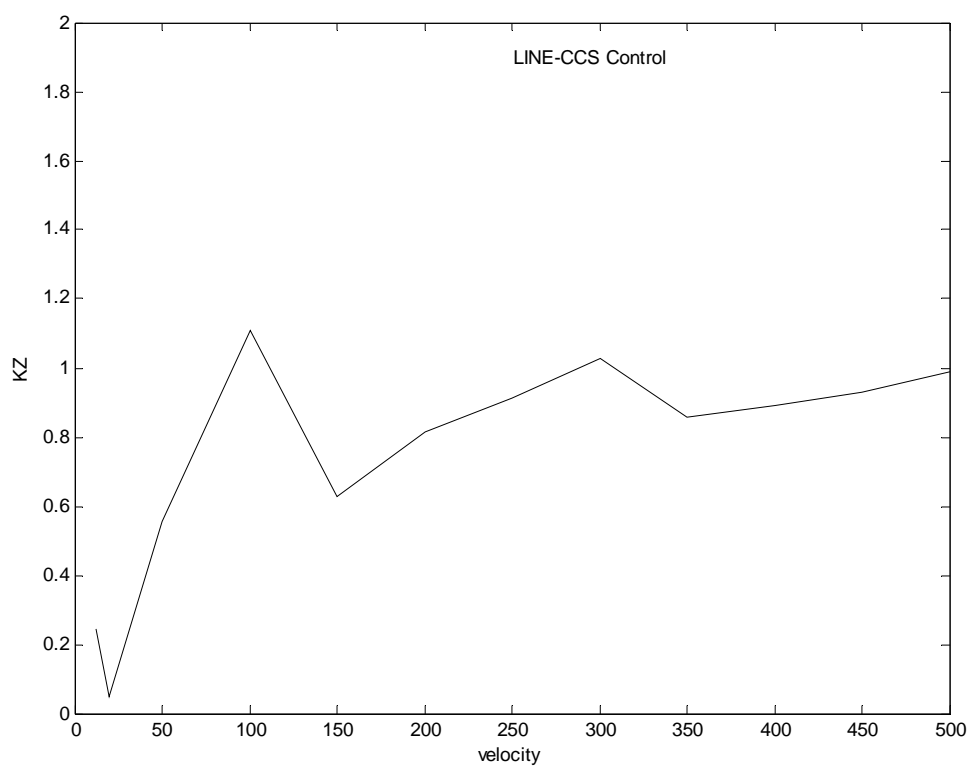
圖(4-7-2) 直線-US 控制法：IAE-Vb 相對比較圖



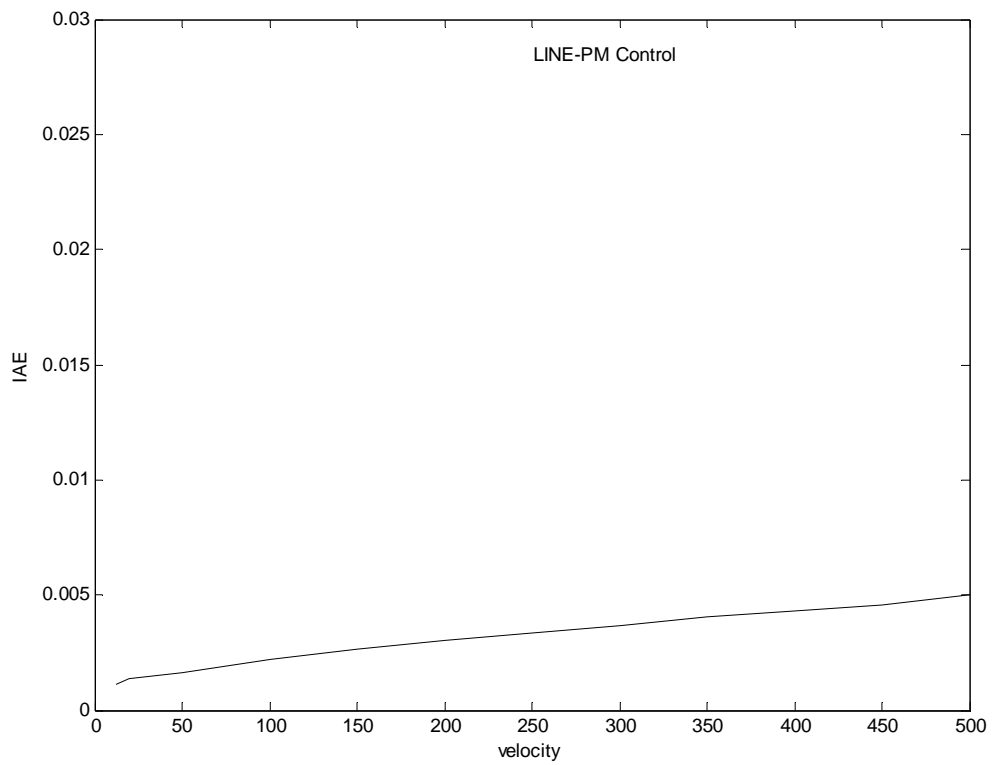
圖(4-7-3) 直線-US 控制法：KE-Vb 相對比較圖



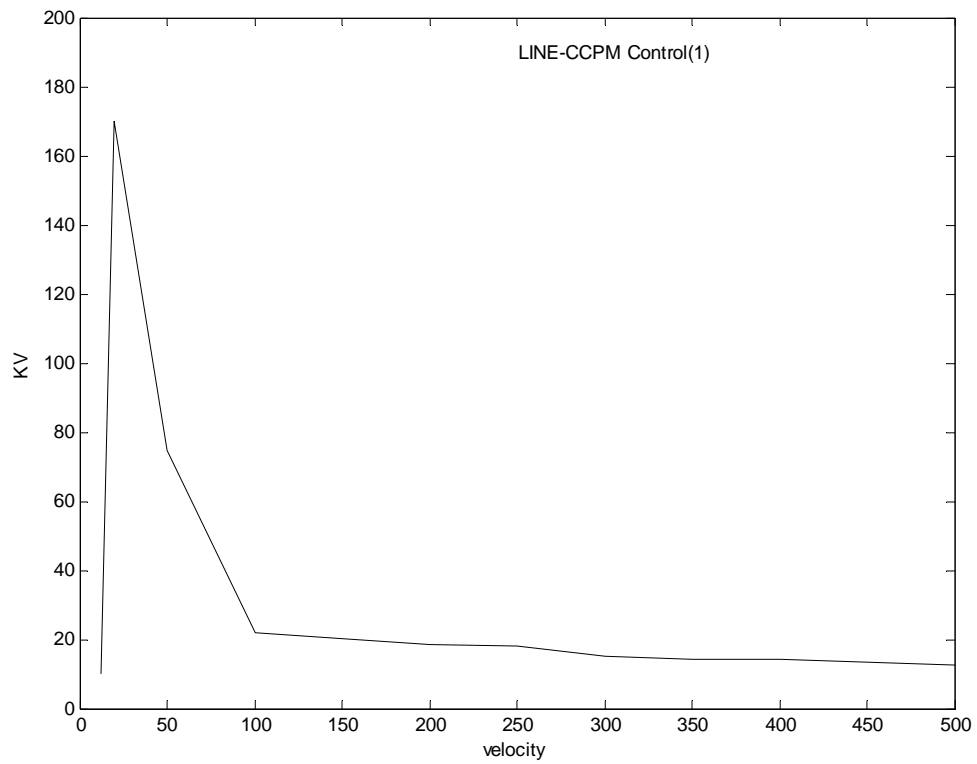
圖(4-7-4) 直線-CCS 控制法：IAE-Vb 相對比較圖



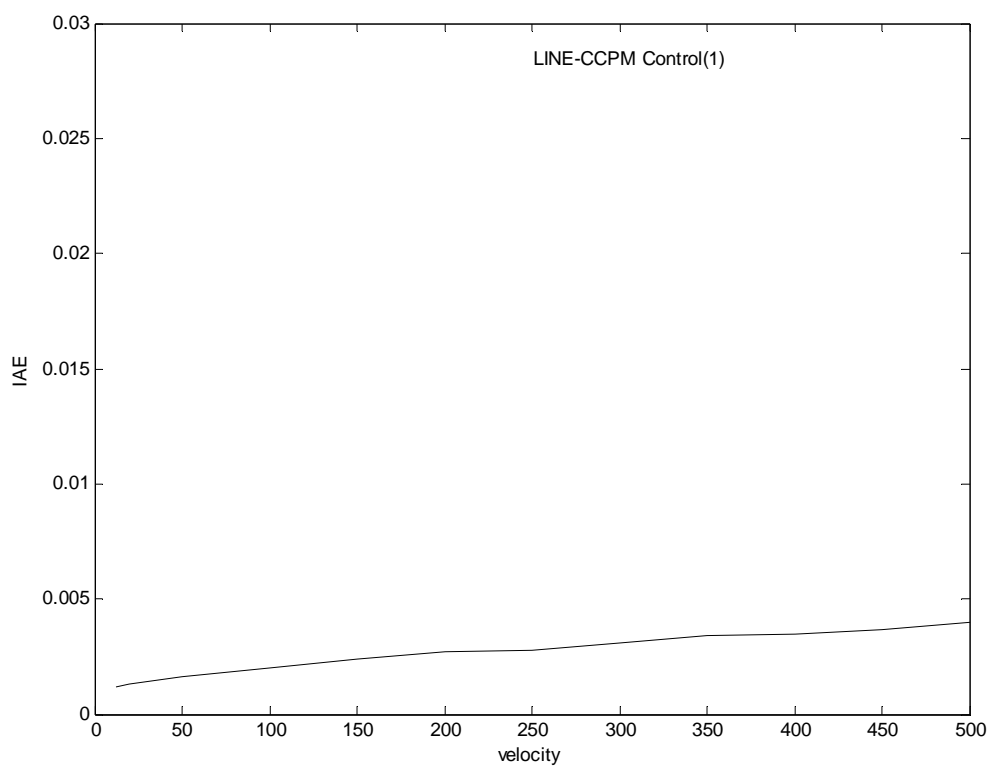
圖(4-7-5) 直線-CCS 控制法：Kz-Vb 相對比較圖



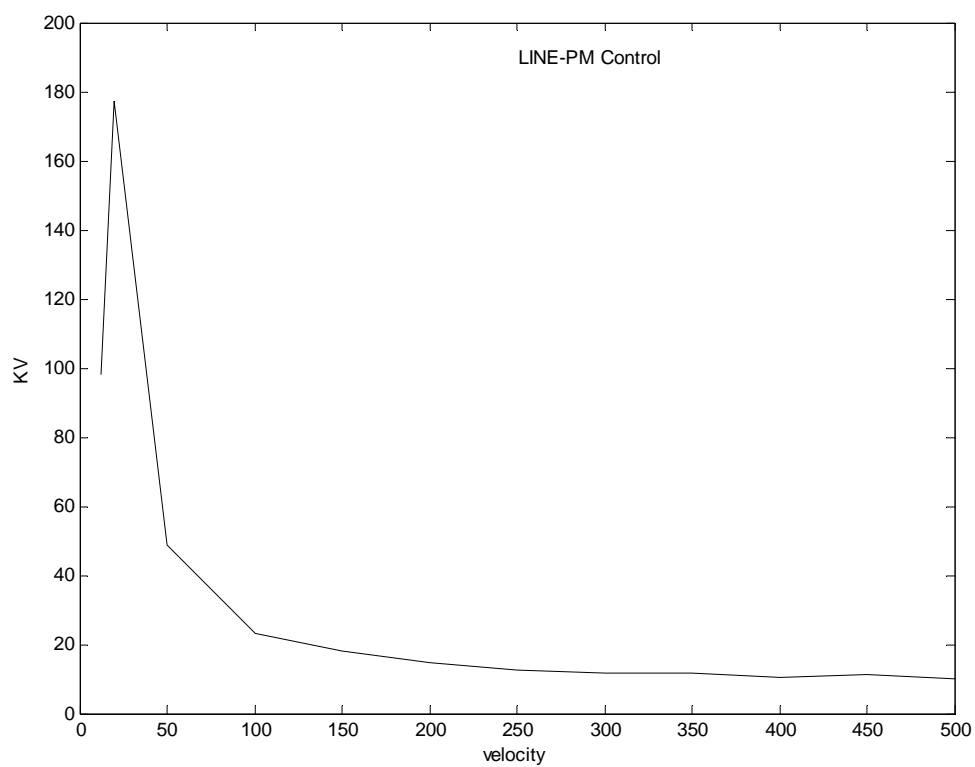
圖(4-7-6) 直線-PM 控制法：IAE-Vb 相對比較圖



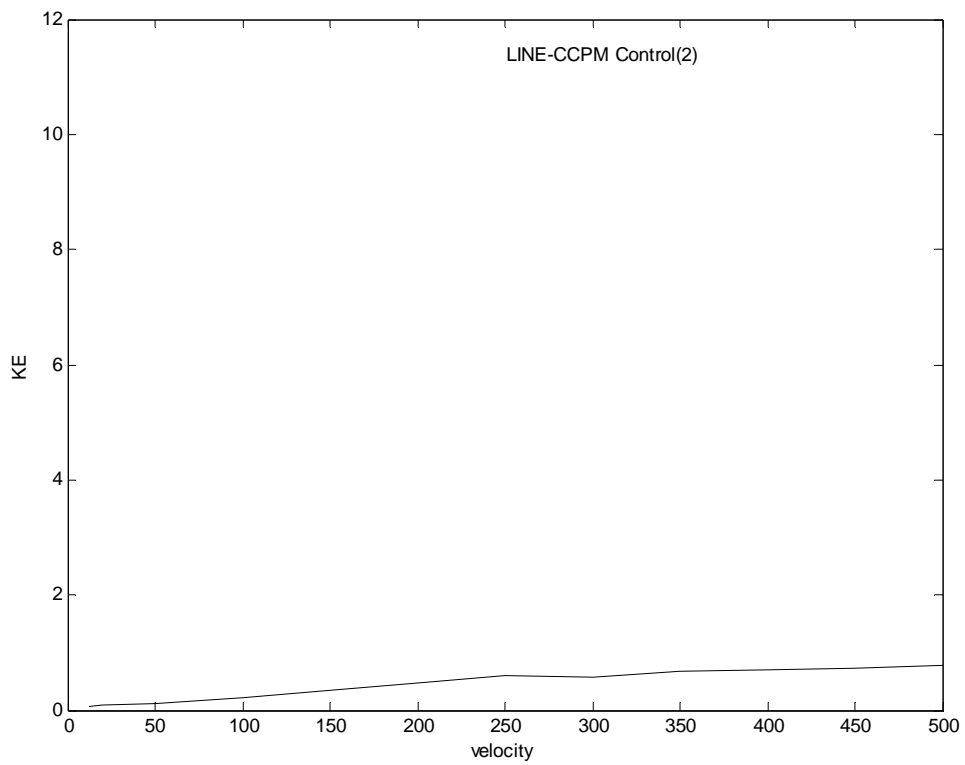
圖(4-7-7) 直線-PM 控制法：Kv-Vb 相對比較圖



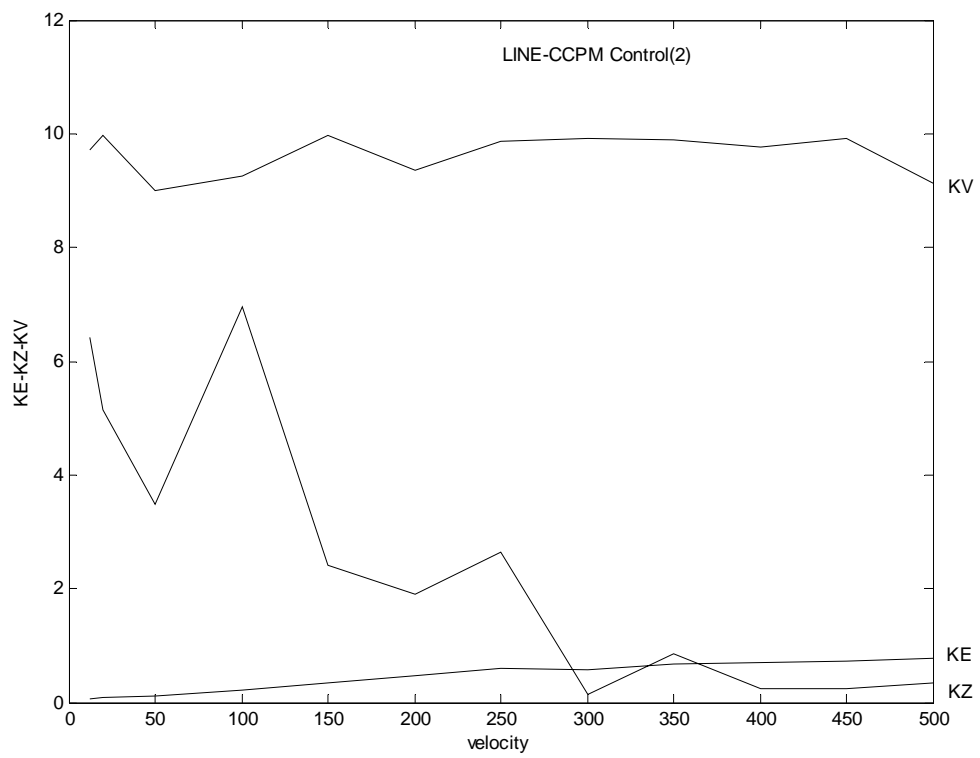
圖(4-7-8) 直線-CCPM(1)控制法：IAE-Vb 相對比較圖



圖(4-7-9) 直線-CCPM(1)控制法：Kv-Vb 相對比較圖



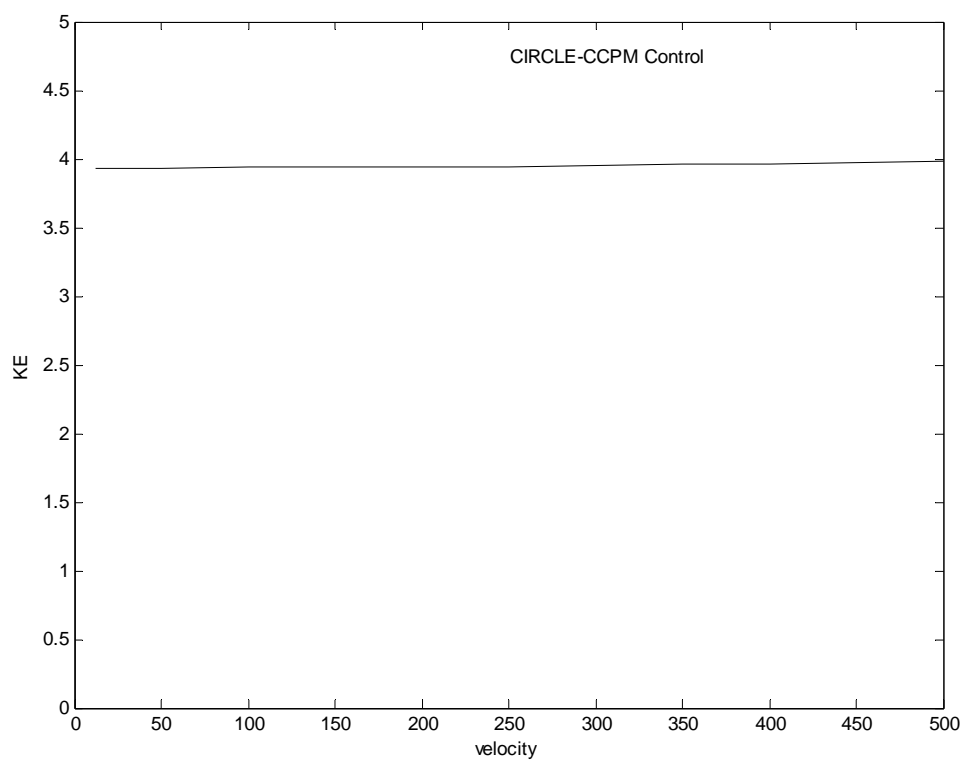
圖(4-7-10) 直線-CCPM(2)控制法：IAE-Vb 相對比較圖



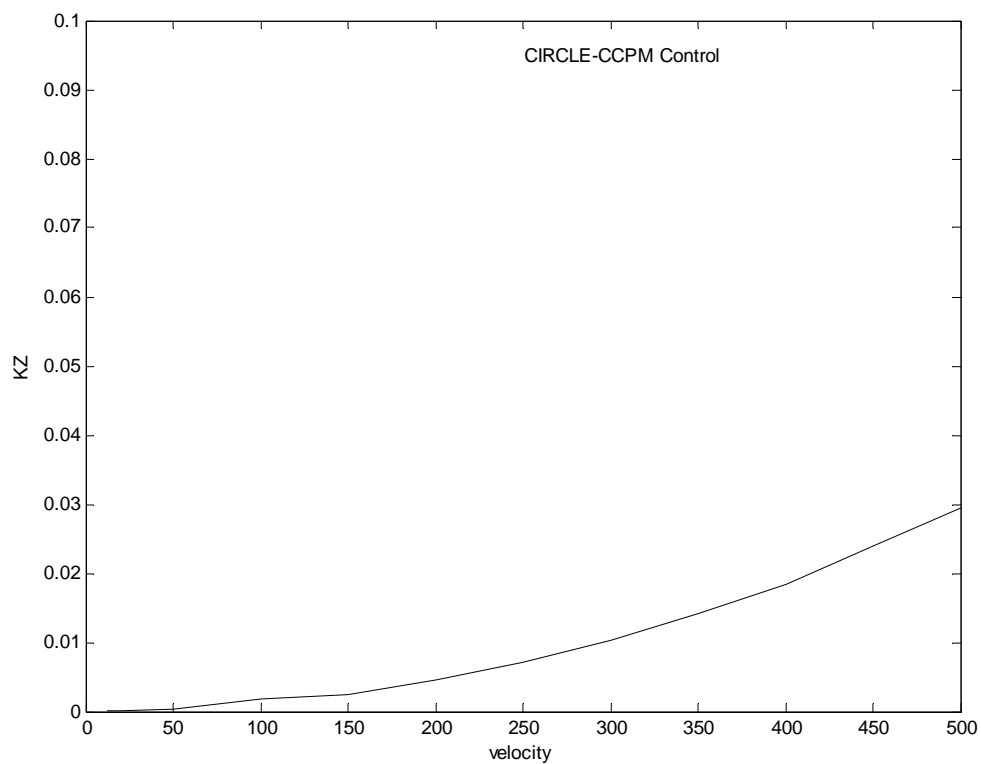
圖(4-7-11) 直線-CCPM(2)控制法：(Ke、Kz、Kv)-Vb 相對比較圖

4.7.2、圓弧 CCPM 模擬綜合比較

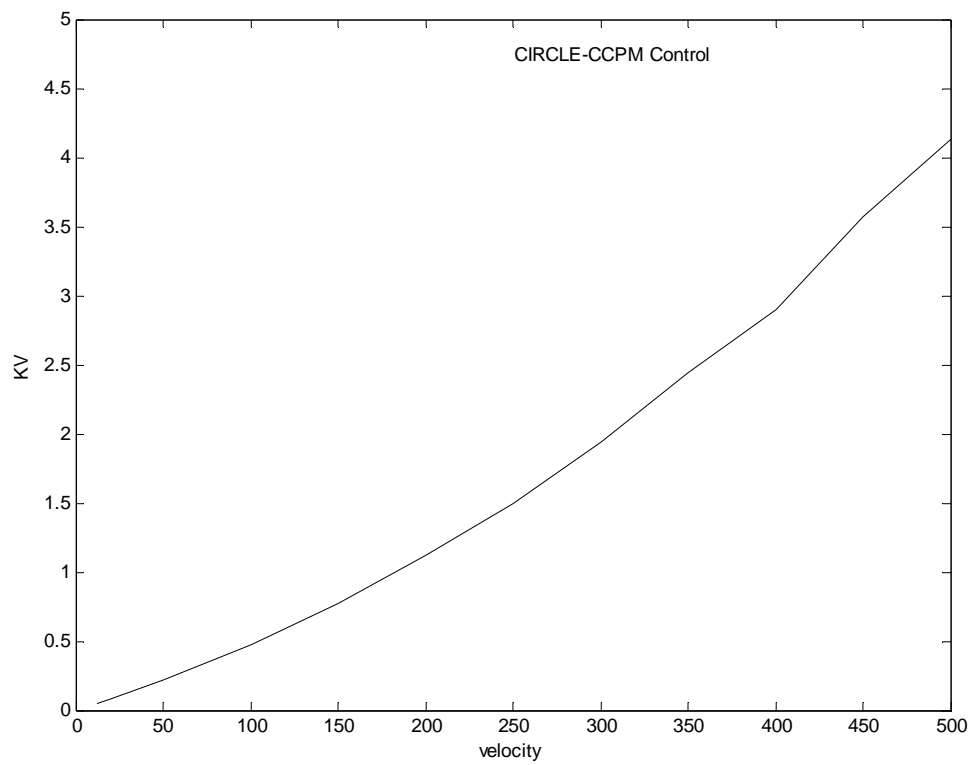
- (一)由圖(4-7-12)交叉耦合預補償系統(CCPM)最佳增益參數數值 K_e 值，隨切銷進給命令 V_b 值增加而近似不變，此點因另兩參數 K_z 及 K_v 調整降低位置偏差，使 K_e 值相對調整可減少。
- (二)由圖(4-7-13)最佳增益參數數值 K_z 值，隨切銷進給命令 V_b 值增加而加大，因 V_b 值增加位置偏差也增加，要維持穩定控制命令 K_z 值就要增加。
- (三)由圖(4-7-14)最佳增益參數數值 K_v 值，隨切銷進給命令 V_b 值增加而加大，因 V_b 值增加位置偏差也增加，為降低位置偏差 K_v 值也要增加。
- (四)由圖(4-7-15)IAE 值亦隨切銷進給命令 V_b 值增加而加大，亦符合工具母機實際作業情況。
- (五)當固定切銷進給命令 V_b 、變化圓弧半徑 R 時，12 種 V_b 經 12 次模擬結果： IAE 、 K_e 、 K_z 、 K_v 值，由圖(4-6-1)可看出 IAE 數值與圓弧曲率有相關，當圓弧半徑 R 等於 20 有極小值，由 $R10$ 至 $R30$ ， IAE 值有大小轉折現象，此點與 [12]-Page1010 FIG. 20. 之實驗結果相類似；由圖(4-6-2)可看出 K_e 數值亦與圓弧曲率有相關，當 V_b 教較小時，於圓弧半徑 R 等於 20 處有極小值，由 $R10$ 至 $R30$ ， K_e 值也有大小轉折現象；由圖(4-6-3)可看出 K_z 值亦與圓弧曲率有相關，於圓弧半徑 R 等於 20 處有極大值，由 $R10$ 至 $R30$ ， K_z 也有大小轉折現象；另外由圖(4-6-1)至圖(4-6-4)可看出 IAE 、 K_e 、 K_z 、 K_v 數值圖形變化表現近似乎移重複性，因此 CCPM 方法對圓弧進給控制的穩定性也是非常良好，值得研究的。



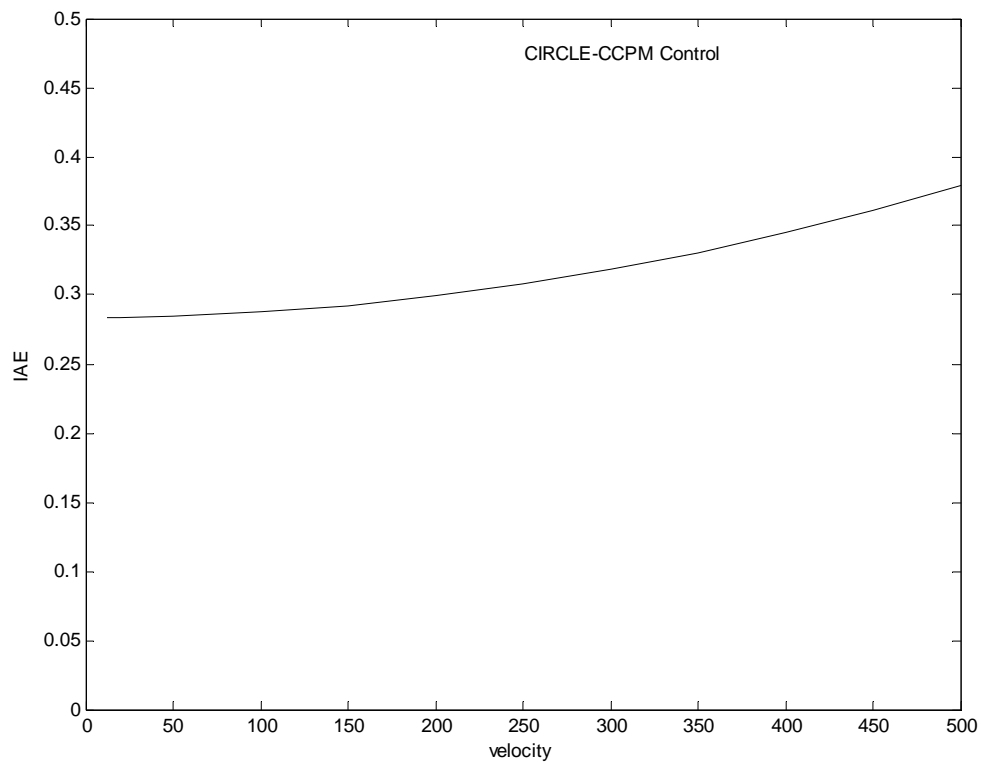
圖(4-7-12) 圓弧 CCPM 控制法：KE-Vb 綜合比較圖



圖(4-7-13) 圓弧 CCPM 控制法：KZ-Vb 綜合比較圖



圖(4-7-14) 圓弧 CCPM 控制法：KV-Vb 綜合比較圖



圖(4-7-15) 圓弧 CCPM 控制法：IAE-Vb 綜合比較圖

4.7.3、模擬綜合結論：

- (一)基因演算法以個人電腦搜尋目標，當參數範圍或繁殖世代較大時，相當耗費電腦運算資源及時間，本研究部份程式搜尋演算時間約 180 秒，此點須軟體程式設計改進及配合硬體改善，方可達到較佳之執行效率。
- (二)基因演算法初始目標值以隨機方式產生，若參數範圍過大，有時產生不合理數值解或落入不易收斂之區域，須賴多次嘗試或適當調整參數範圍因應。



第五章

結論與未來研究方向

5.1 結論：

本論文透過基因演算法最佳化流程，尋找雙軸交叉耦合預補償系統(CCPM) 最佳增益值，在工具機的驅動中消除驅動軸的誤差，以往在尋求最佳增益值時，大多採用試誤法，以人為猜測不斷地嘗試，直到猜測出令人滿意的值為止，但 CCPM 控制法中的增益值數目過多，不易以試誤法方式去尋求最佳的增益值，故本研究利用基因演算法，依序以未耦合系統、交叉耦合系統、路徑預補償系統、交叉耦合預補償系統等步驟，以較有效率且有系統的方式，以尋求最佳增益值，且依對於不同的平面軌跡，僅需利用相同的程序步驟，即可快速搜尋各個不同軌跡所適用的最佳增益值，大幅提高工作效率，減少人為猜測的時間浪費。

5.2 未來研究方向

1. 配合加工切削力量及機械結構分析探討，形成較完整的數控路徑研究。
2. 研究基因法與模糊控制及類神經網路結合，即所謂的 Soft computing，使數控機械（包括機器人，工具機及其他數值控制之機器系統）的軟體性能獲得提升。

參考文獻

01. Sarachik, P., and Ragazzini, J. R., "A two dimensional feedback control system" , Trans. AIEE, vol. 76, 1957 pp.55-61.
02. Koren, Y., "Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems" , ASME Trans Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol.102, No.4, 1980, pp.265-272.
03. Kulkarni, V.K., and Srinivasan, K., " Cross-coupled control of biaxial feed drive servomechanisms" , Trans. ASME, J.Dyn. Syst. Measur. Contr.vol. 112, 1980 pp.265-272.
04. Koren, Y., and Lo, C. C., "Variable gain cross coupling control for contouring" , Annals of the CIRP, Vol.40, 1991, pp.371-374.
05. Chin, J.H., and Lin, T.C., "Cross-coupled Precompensation method for the contouring accuracy of computer numerically controlled machine tools" , International Journal of Machine Tools & Manufacture vol. 37, No.7,1997, pp.947-967.
06. Chin, J.H., and Lin, S.T., "The Path Precompensation method for flexible arm robot" , Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol.13, No.3, 1997, pp.203-215.
07. Lue, C.W., "A Study on the Coordinated motion of CNC machine and motion simulation platform" , National Chiao-Tung.University, Taiwan , ROC. Master' s Thesis 2002.
08. 蘇木春、張孝德編著、" 機器學習：類神經網路、模糊系統以及基因演算法則" , 全華科技圖書股份有限公司出版, 中華民國, 九十二年二月.
09. Al-Duwaish, H. N., and Al-Hamouz, Z. M., "A genetic approach to the selection of the variable structure controller feedback gains" , IEEE International Conference on Control Applications Trieste, Italy 1-4 September 1998, pp. 227-231.

10. Tarng, Y. S., Chuang, H. Y., and Hsu, W. T., “Intelligent Cross-coupled fuzzy feedrate controller design for CNC machine tools based on genetic algorithms”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, 1999, pp.1673-1692.
11. Tarng, Y. S., and LIN, Y. S., “Cross-coupled fuzzy logic control for multiaxis machine tools”, Mechatronics Vol. 7. No 8, 1997, pp. 663-681, Elsevier Science Ltd.
12. Chin, J. H., and Cheng, Y. M., “Machining contour errors ensembles of cutting, feeding and machine structure effects”, International Journal of Machine Tools & Manufacture vol. 43. 2003, pp.1001-1014.
13. 陳昱丞，碩士論文”基因演算法對複合式運動平台協同運動之最佳化”，“Optimization of Motion Coordination for Hybrid Motion Platform Using Genetic Algorithm”，國立交通大學機械工程研究所指導教授 秦繼華，中華民國，九十三年六月。



自 傳

陳蔚強、1956 年出生於台灣省高雄市，1978 年師大工業教育系畢業，曾任教高職機械科、控制科、現職於國立高職資訊科教師，擔任計算機概論及軟體應用實習基本資訊課程，2001 年報考國立交通大學工學院精密與自動化工程學程在職進修碩士班，2005 年 6 月完成論文畢業。

