

DSP-Based 五軸 CNC 控制器設計與開發

作者：雷衛台(清大動機系副教授)、宋孟沛(清大動機系博士班)、
唐偉德(清大動機碩士班)、洪明諒(清大動機碩士班)

摘要：

本文介紹本實驗室利用工研院機械所發展之 DSP 運動控制卡建構一套雙 CPU 之 CNC 控制器系統，同時藉著 DSP 晶片本身優異的計算能力進行 NC 路徑轉為 NURBS 曲線之即時(On-Line)壓縮。另一方面對於高速曲面切削時所造成的運動軌跡動態誤差採用前饋(FeedForward)控制與象限誤差補償技術，這部份所需要的複雜運算也希望利用 DSP 晶片提高效率。

壹、前言：

爲了增加工具機的工作效率，近年來 CNC 工具機的發展趨向於高速化，其中包括主軸高速化之高速切削(High-Speed-Cutting)及床台高速化之高速進給(High-Feed)。然而在要求工具機高速化的同時，繼續維持高軌跡精準是一個重要關鍵，在高速進給時得到高精度的方法有三：(1) 提高 NC 程式處理的速度、(2) 使用高響應高精度的驅動系統、(3) 對系統做軌跡控制，如圖 1 所示。而提高 NC 處理速度方面可使用 NURBS 壓縮；在提高驅動系統的響應方面可使用有高加速度的馬達，如直接驅動的線性馬達；在改善靜態誤差方面可由工具機靜態誤差量測做校正及補償，例如節距誤差量測補償 (pitch error compensation)、熱誤差補償；而改善線性動態軌跡誤差方面可調整系統動態參數、或使用前饋控制(FeedForward Control)、加減速控制(Slope Control)、耦合控制(Cross-Coupling Control)等等...。而對於摩擦力所造成的非線性軌跡誤差可使用象限誤差補償。

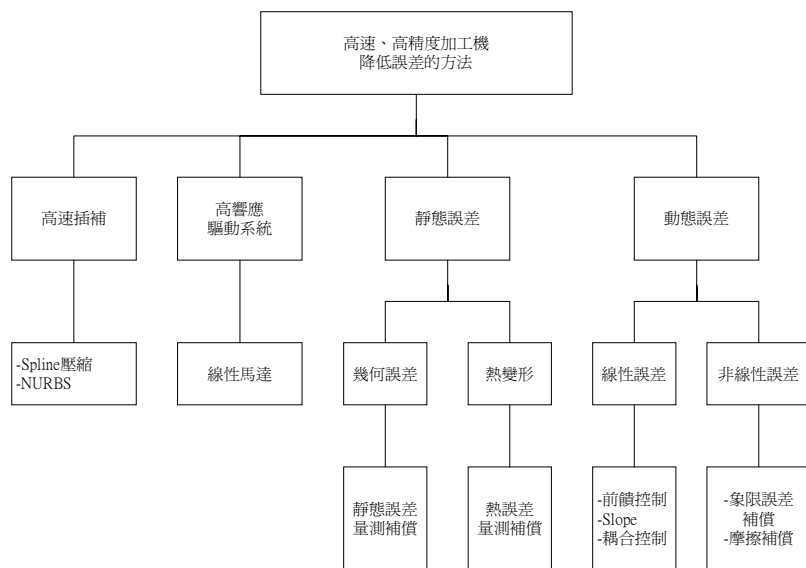


圖 1. 高速運動下降低誤差的方法

貳、本文：

爲了實現工具機的高速化，控制器也必須跟著改進。以往以 PC 爲基礎之 PC-Based CNC[1]在高速化的需求下顯得有些力不從心，DOS 的作業系統無法提供真正的即時、多工環境，加上記憶體的限制及相關資源的缺乏，使得新功能的實現更加困難。Windows 環境的普及及相關開發環境的豐富資源非常適合作爲 CNC 控制系統的人機環境，在即時插補以及運動控制上藉由 DSP 晶片提供之即時環境與優異的計算能力來實現，如此的搭配成爲一套雙 CPU 運作的控制系統。本文針對新研發之 DSP-Based 五軸工具機的控制系統進行概要說明。

一、CNC 硬體架構：

本研究所開發之五軸 DSP-Based CNC 控制器硬體架構如圖 2 所示。計算核心採用 Pentium II 300 CPU 卡，透過 ISA 界面與 DSP 卡、VGA 卡、網路卡、數位 I/O 卡溝通。DSP 卡與兩張 DAC 卡是經由內部界面溝通，ISA 插槽僅提供 DAC 卡電源供應。

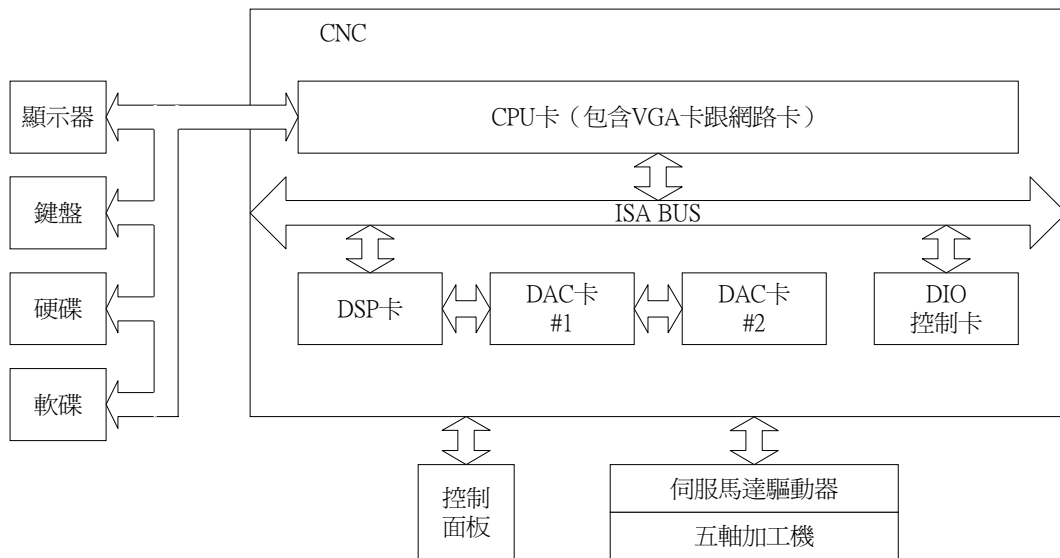


圖 2. DSP-Based CNC 硬體架構

本研究採用的 DSP 卡爲工研院機械所所開發之 PMC32 運動控制模組[2]，其系統架構包含了兩大部分，一爲 DSP 核心處理器及其周邊電路（PMC32-CPU），另一部份爲馬達控制周邊電路（PMC32-DAC）。PMC32-CPU 是以(TI TMS320C32)DSP 晶片爲核心，搭配可程式邏輯線路，使單片控制板能達到四軸同動，並可串接成 8 軸、16 軸以上的運動控制器，每片 PMC32-DAC 卡具有四個 16 BITS 的類比輸出通道、兩個類比輸入通道、六個編碼器讀入界面以及相關機器的 I/O 輸入界面。

二、CNC 軟體架構：

高速五軸 CNC 系統之功能模組架構如圖 3 所示[1]。CNC 核心由人機界面 (MMI)、NC 解碼器 (CDP)、系統資料管理、3D 刀具幾何尺寸修正、幾何數據處理 (GEO)、運動控制 (PCL)、可程式邏輯控制 (PLC) 等功能模組構成。人機界面處理面板輸入，同時也是系統主控者，進行系統軟硬體之啟動 (INIT)、重置 (RESET) 及協調 (SYNCHRON) 工作。NC 解碼器將以 ASCII 為主之 NC 程式檔 (包括巨集指令、G 碼以及擴充的特殊功能) 解譯成 CNC 內部數據。幾何數據處理包括 NURBS 插補、前加減速功能 (slope)、機構轉換、線上量測、幾何誤差補償以及熱誤差補償。運動控制則接受 GEO 傳下來的各軸位置應值，進行實際機器軸位置控制 (PCL)，為了減少軌跡誤差，目前運動控制模組有參考模型軌跡控制 (MRCC) 與前饋控制 (FeedForward)。可程式邏輯控制 (PLC) 則執行順序控制，透過某些 I/O 接點讀入特定訊號或推動繼電器，執行包括油氣壓開關、刀具交換 (ATC) 等功能。

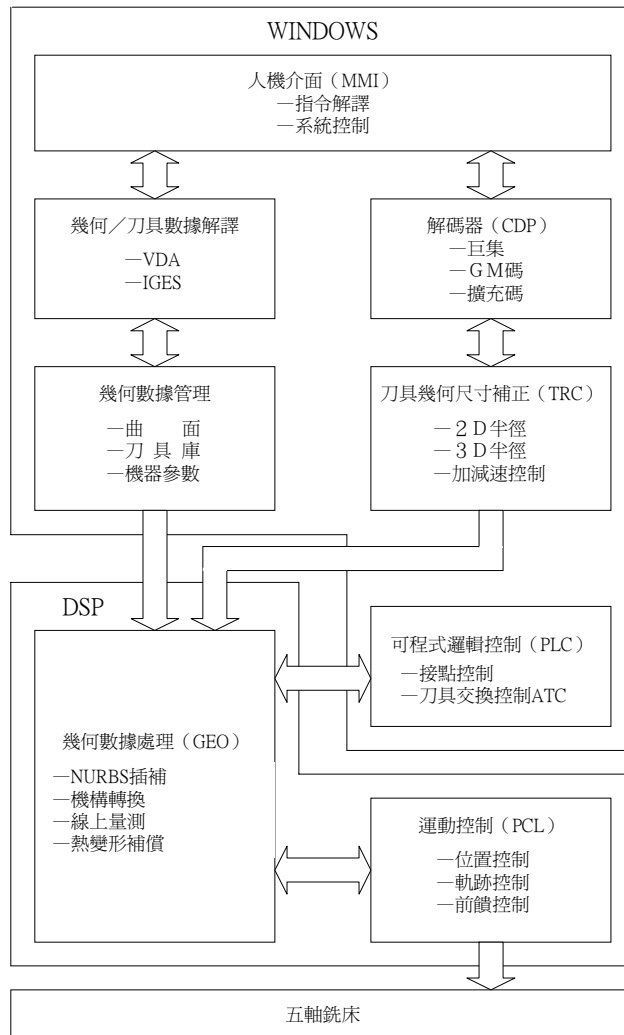


圖 3. DSP-Based CNC 軟體結構圖

在雙 CPU 架構的設計下，在 PC 端運作的模組為人機界面、NC 解碼器以及可程式邏輯控制。人機界面的設計在 Windows 環境下充分利用視窗畫面設計的優點，並且能夠整合作業系統強大的網路功能，達到多台控制器彼此溝通以及資訊交換的目的。由於即時運算與位置控制由 DSP 來處理，解碼時間不再受到插補計算的影響。NC 解碼器除了負責解碼外同時得計算刀具半徑補正與刀具長度補正，並且幾何數據檔壓縮的工作也在此完成，希望能充分利用 CPU 的計算時間。可程式邏輯控制模組則直接對 I/O 卡訊號做順序控制。

各模組程式由 C 語言完成，在設計之初就可考慮到未來會在不同的作業環境系統下工作，因此各模組之間資訊交換有獨立的設計之控制機制，不會受到作業系統的限制。軟體上的改寫變動較大的部分在於 DSP 端運作的程式，對於數據的交換與命令的溝通必須靠 DSP 卡上的 Dual Port Ram 來完成，之前所定義很多的資料型態必須拆開成一筆一筆數據，並且要規劃記憶體的位置配置，因為這時候 Dual Port Ram 不是由作業系統來管理，必須很清楚的定義資料在記憶體上的位置，並且在 DSP 程式啟動之前完成初始化的動作。而幾何數據處理跟運動控制在 DSP 環境下是以一個 Process 方式來運作，也就是一個執行檔在執行，也必須重新更改一下架構。

另一方面在 Windows 下運作的這部分，跟前一代所開發的系統不同之處在於人機畫面的處理，DOS 下所使用 printf()以及 scanf 的指令都必須移除，採用新的視窗畫面軟體來設計。目前市面上可供開發的軟體很多，鑒於以往整個程式以 C 語言為開發基礎，決定使用 NI 的 CVI 開發環境來發展 DSP-Based CNC 的人機畫面程式如圖 4 所示。

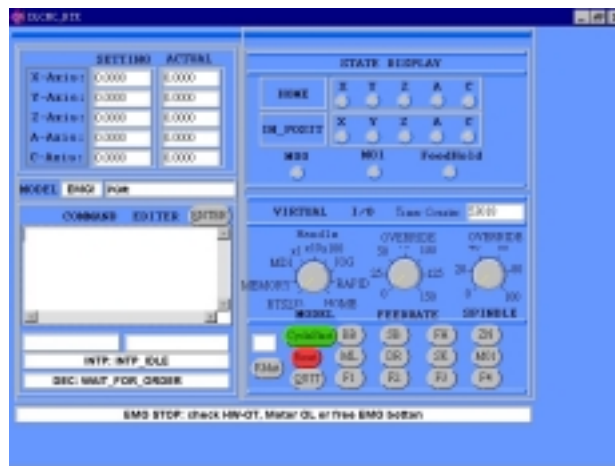


圖 4. CNC 人機畫面

三、NURBS 壓縮技術

對於具自由曲面之工件，傳統的加工方式是將 CAD 所設計出的曲面透過 CAM 系統依不同的精度要求做線性化，產生 CNC 加工所需要的 NC 程式，而在 NC 程式中則以 G01 的單節來表示。而這些單節的長度則視所要求的精度而定，若所要求的精度愈高，則每段線段的長度一般而言愈短，相對的 NC 程式中 G01 單節數目則愈多，造成 CNC 控制器花在解碼的時間比例過大，加上傳統插補器工作結構以行指令為單元，限定每個行指令處理時間至少為兩個插補週期，所以在五軸曲面加工經常出現進給率不連續的現象。同時因為是用線段逼近的方式，容易造成工件表面出現稜角的現象，使得加工品質低落，對刀具壽命有不良的影響。同時因為 G01 直線單節的長度太短，且在每個單節(block)中均會做加/減速，使得工具機床台的運動尚未達到最高速，就得立刻進入減速階段，而無法滿足高速進給的要求。

針對此問題，徹底解決之道是重新定義 CAD/CAM 與 CNC 間之資訊交換介面，最好能將曲面構造與刀具路徑同時輸入 CNC 內。此解決方法並不能解決當今 CAD/CAM 與 CNC 之資訊傳輸瓶頸，較快而容易之方式是 CNC 繼續接受傳統 CAD/CAM 路徑規劃後之線性路徑，但針對此線性路徑進行 NURBS 壓縮[3][4][5]，以減少 NC 程式之單節數量，增加單節之平均長度，此 NURBS 壓縮功能可線外或線上進行，無論如何，CNC 內必須有支持 NURBS 路徑輸入之插補能力。

線上 NURBS 曲線壓縮模組，以位於解碼器與插補器之間較為適宜如圖 5 所示。NURBS 合併模組先將最初的連續而短的直線單節合併成一段較長的曲線單節，再將曲線單節送進刀具半徑補正模組(TRC)，因為在刀具半徑補正的過程中，需要多預視(Look ahead)數個單節數，而且這個過程相當費時，因此若能先將 NC 單節有效地壓縮到較少的數目再進入刀具半徑補正，將可使計算效率有效提升。此外，以曲線路徑做刀具半徑補正也較直線的刀具半徑補正來得正確。

透過 NURBS 曲線壓縮模組，可將原本短而連續的 G01 直線單節，合併還原成較長的曲線。此處所謂的“還原曲線”，與原本在 CAD 中所設計的工作輪廓曲線仍有些出入，這是因為線性化的過程中已經喪失了一部份的曲線幾何資訊如切線向量等，只能將曲線還原到某種程度的誤差範圍內。

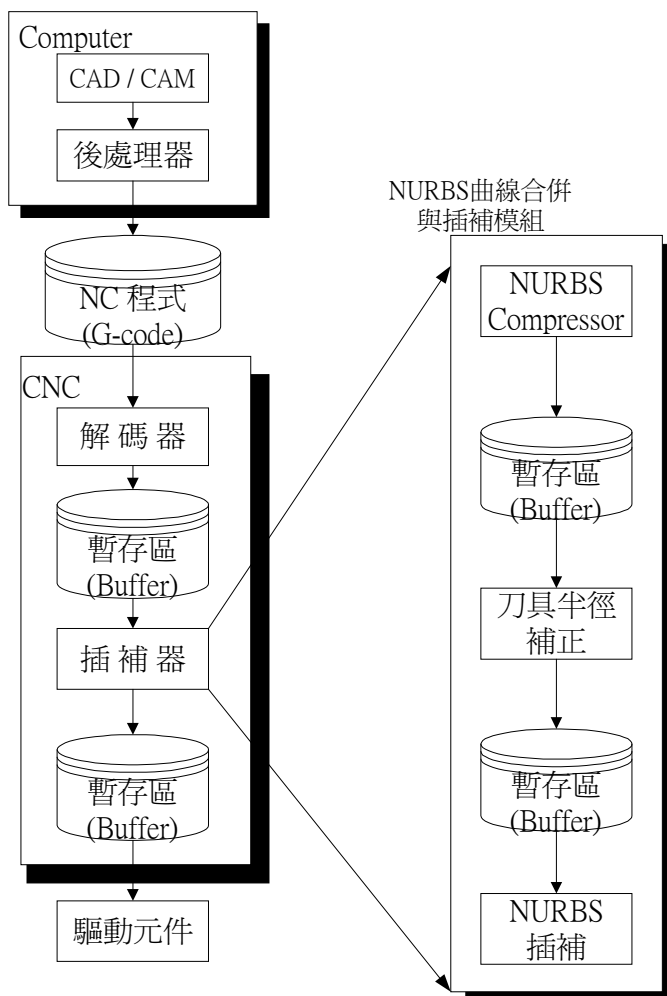


圖 5. CNC 控制器中 NURBS 曲線合併與插補模組

四、NURBS 插補

新發展的五軸 CNC 系統之插補控制器如圖 6 所示。由 NC 程式檔讀入的 NC Block 包括了線、圓、橢圓、spline 或是 PTP，經過曲面控制數據參數化處理(parameterization)後，都以多項式形式描述其路徑；另一方面，插補器中具備加減速(slope)功能，根據進給速度與面板上 override 旋扭設定，及時決定路徑長度增量 Δs ，動態的規劃速度，然後求出曲線的參數 u ，送入 NURBS 函數中求出對應的各軸應值，之後送入下一級 PCL 做位置控制。

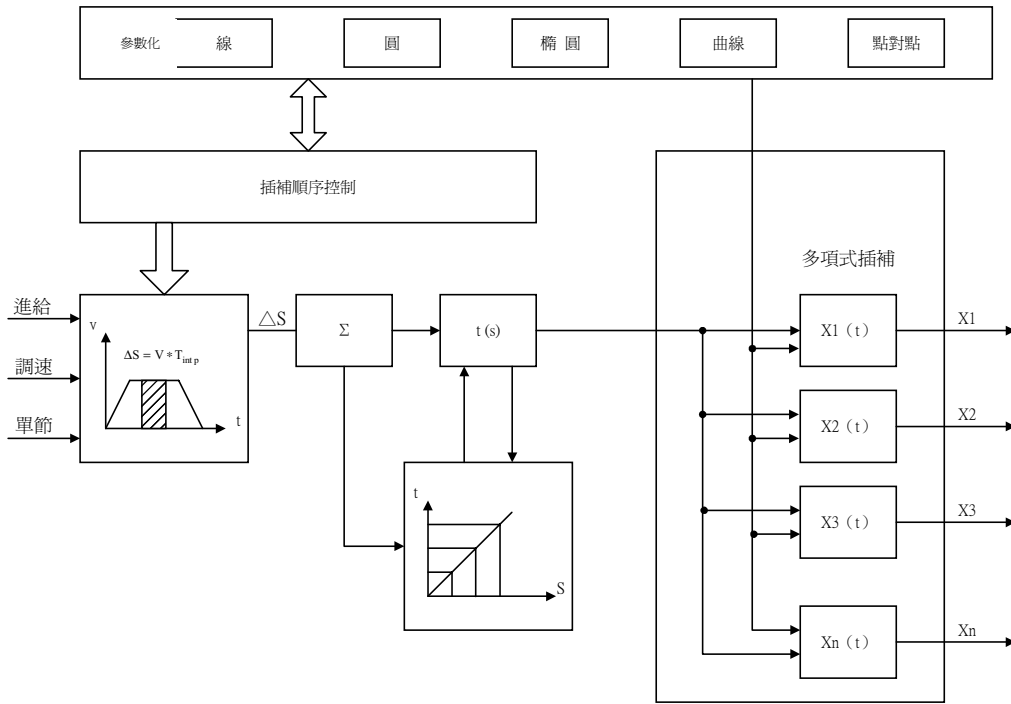


圖 6. NURBS 插補器

NURBS 插補的架構如圖 7 所示。其中，OVERRIDE 與 FEEDRATE 是即時取得操作面板的值，速度 v_a 定義為

$$V_{a,i} = \text{OVERRIDE} \times \text{FEEDRATE} \tag{1}$$

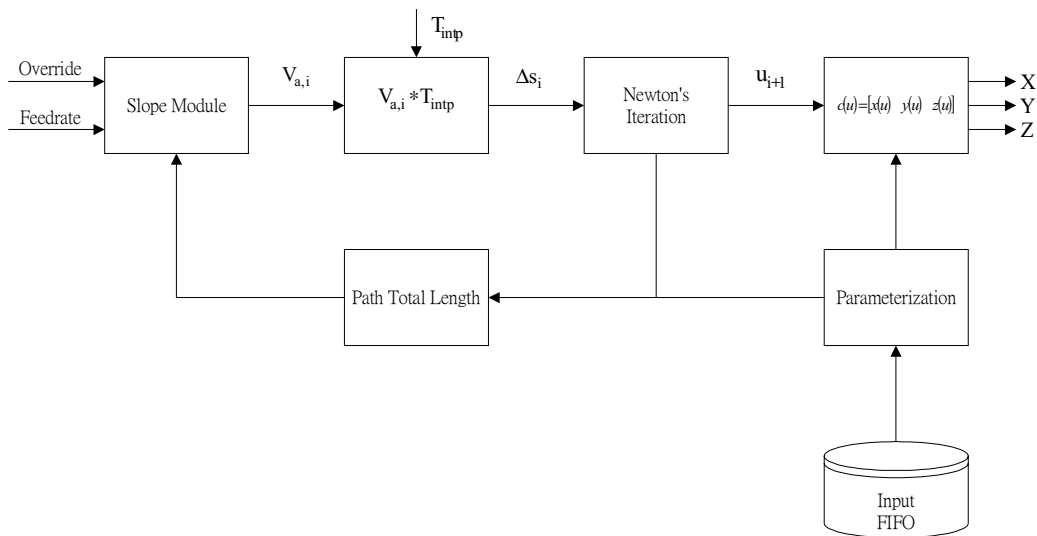


圖 7. CNC 控制器 NURBS 壓縮與插補模組

其中 i 是指第 i 個曲線參數 u_i ，而 u_i 的位置應值 Δs_i 如圖 8 所示

$$\Delta s_i = V_{a,i} \times T_{intp} \tag{2}$$

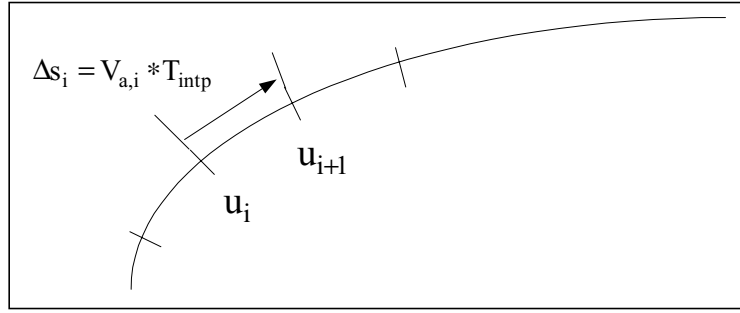


圖 8. 曲線插補之位置增量計算

其中 T_{intp} 是指處理器的週期時間(Cycling time)。而爲了使進給速度穩定，必須以數值方法如牛頓法計算出下一個週期時間的插補值。所謂牛頓法的計算方式可參見圖 9，是先由曲線長度公式 (3)兩邊微分，則可得式(4)，由式(4)可求得 $L'(u_i)$

$$L(u) = \int_{u_0}^{u_i} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\tau}\right)^2} d\tau \quad (3)$$

$$T(u) = L'(u) = \sqrt{\left(\frac{dx}{du}\right)^2 + \left(\frac{dy}{du}\right)^2 + \left(\frac{dz}{du}\right)^2} \quad (4)$$

將式(2)的 Δs_i 與式(4) $L'(u_i)$ 代入式(5)可得曲線參數的增量 Δu ，結果如下：

$$\Delta u = \frac{\Delta L}{L'(u)} \quad (5)$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u$$

而路徑長度實值 Δs_i^* 則以下式計算：

$$\Delta s_i^* = \int_{u_i}^{u_{i+1}} \sqrt{L'(u)} du \quad (6)$$

將路徑長度實值 Δs_i^* 與位置應值 Δs_i 代入式(7)

$$|\Delta s_i^* - \Delta s_i| \leq \text{Error} \quad (7)$$

若式(7)成立，則 u_{i+1} 與 Δs_i^* 正確，將 u_{i+1} 代入 de Boor 演算法式[6]即可計算出 NURBS 曲線正確的位置插補值；反之，則再重新計算，直到滿足式(7)爲止。

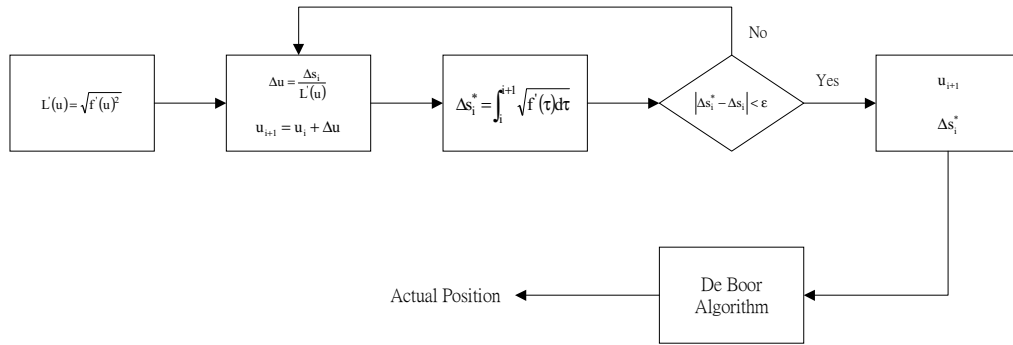


圖 9. 牛頓法計算流程

新發展的數值控制器對於各種不同的路徑輸入，經過參數化後都可得到 NURBS 的形式，而以單一的插補器作路徑插補，如此好處是：

1. 簡化插補器軟體結構
2. 增加數值控制器的路徑插補功能
3. 減少數量控制器的插補時間
4. 開放新的路徑定義

爲了讓 NURBS 壓縮與插補器能順利整合進 CNC 控制器中，將會增加大量與複雜的計算，本研究希望從 DSP-Based CNC 控制系統架構來解決這個問題，在雙 CPU 的架構下，DSP 負責在壓縮與插補上面的計算，一般的工業用 PC 則用來進行人機畫面的處理以及解碼器和邏輯訊號控制的工作，可以使工作的效率提高。

參、結語

本文介紹了清大動機系研發之高性能五軸同動 DSP-Based CNC 系統，藉由引進雙 CPU 架構來將原有的控制器性能加以擴充，並且升級到 Windows 的作業系統環境。此系統正在實驗室之五軸同動銑床上進行測試。由於本 CNC 系統採用 WINDOW 作業環境，因此不僅擁有豐富的系統模組開發資源，亦提供了新世紀資訊網路世界中，網際網路應用在 CNC 製造工程之另一新領域，值得更多的研發投入。

肆、參考文獻

- [1]雷衛台，“五軸同動銑床 CNC 系統設計，” 機械月刊第 24 卷第 3 期，1998 年 3 月號, pp.287-296.
- [2]何昌祐，“DSP 用於 PC-Based 運動控制器之設計，” 機械工業雜誌, 87 年 4 月號, pp.130-144.
- [3] L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS Book*, Springer-Verlag, New York, 1995.
- [4] W. Boehm and G. Farin and J. Kahmann, “A Survey of Curve and Surface Methods in CAGD,” *Computer-Aided Geometric Design*, Vol. 1, No.1. 1984

88/02/17

pp..1-60.

[5] L. Piegl, "On NURBS: A Survey," *IEEE CG&A*, Vol. 19, No. 1, Jan. 1991, pp.55-26.

[6] Ibrahim Zeid, "CAD/CAM Theory and Practice," McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS.