

基于神经网络的数控插补容错技术*

王义强¹ 袁修华¹ 马明阳¹ 胡艳娟²

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 北华大学机械工程学院, 吉林 132100)

【摘要】 提出将神经网络和模糊数学应用到数控系统软件设计领域,以实现数控插补容错技术,提高软件可靠性。为了验证该方法的可行性,对基于神经网络的 NURBS 插补模块进行了实验研究,并对速度、加速度、插补精度、神经网络预测精度、容错和实时性等方面进行了分析。实验结果表明,基于神经网络的插补模块在保证加工要求的前提下实现了数控插补软件容错技术,为提高数控系统软件的可靠性提供了新的途径。

关键词: 数控插补 神经网络 模糊判断 容错

中图分类号: TG659 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0215-05

ANN-based Fault Tolerance of CNC Interpolation

Wang Yiqiang¹ Yuan Xiuhua¹ Ma Mingyang¹ Hu Yanjuan²

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. College of Mechanical Engineering, Beihua University, Jilin 132100, China)

Abstract

Artificial neural network (ANN) and fuzzy math were introduced to the design filed of CNC software for realizing the fault tolerance of CNC interpolation and improving the reliability of software. In addition, function aspects (velocity, acceleration, chord error, prediction accuracy, fault tolerance, real time) from the experiment on non-uniform rational B-spline (NURBS) interpolator based on ANN were evaluated in detail. The experimental results show that the NURBS interpolation based on ANN can not only meet the requirements of the function aspects, but also realize the fault tolerance of CNC interpolation, which may provide a new strategy in the improvement of the reliability of CNC software.

Key words CNC interpolation, Artificial neural network, Fuzzy judgment, Fault tolerance

引言

数控系统是数控机床的核心部件,其可靠性直接影响数控机床整机的可靠性水平。大多数数控系统是嵌入式控制系统,整个数控系统可靠性由硬件环境和软件共同决定。在当前技术条件下,软件的可靠性要比硬件可靠性更难保证。近年来,数控系统硬件可靠性得到了很大的提高;然而,其软件可靠性却没有很大的提高,软件可靠性问题日渐突出。

传统的软件容错技术是采用设计多样性的方法来降低软件在同一点出现错误的可能性,主要包括恢复块、N 版本程序设计、N 自检查程序设计等方法^[1-2]。这些方法不仅加大了软件的开发成本,而

且增加了系统运行开销。本文提出基于神经网络的插补软件容错技术,将神经网络和模糊数学应用到 NURBS 曲线插补模块中,并对插补精度、速度/加速度、预测精度、容错和实时性等方面进行分析。

1 基于神经网络的插补模块结构

人工神经网络是模拟人类神经网络行为,通过学习训练样本来掌握潜在的规律,最终推算新的预测结果^[3-4]。基于神经网络的插补软件结构如图 1 所示,第 i 次插补流程是:①运行插补程序,得到插补点 $P'(x_i, y_i, z_i)$;同时,运行神经网络,得到预测点 $P''(x_i, y_i, z_i)$ 。②采用模糊数学,根据预测点 $P''(x_i, y_i, z_i)$ 判断能否接受插补点 $P'(x_i, y_i, z_i)$ 。

收稿日期: 2010-09-13 修回日期: 2010-11-12

* 国家科技重大专项资助项目(2009ZX04014-013-01)

作者简介: 王义强,教授,博士生导师,主要从事数控装备与数字制造技术、质量控制与可信性工程研究, E-mail: jluwang@gmail.com

如果接受 $P'(x_i, y_i, z_i)$, 则第 i 次插补点 $P(x_i, y_i, z_i)$ 是 $P'(x_i, y_i, z_i)$; 否则, 第 i 次插补点 $P(x_i, y_i, z_i)$ 是 $P''(x_i, y_i, z_i)$, 同时记录软件故障。③插补点确定后, 将插补点 $P(x_i, y_i, z_i)$ 增加到神经网络训练样本, 再次训练神经网络。

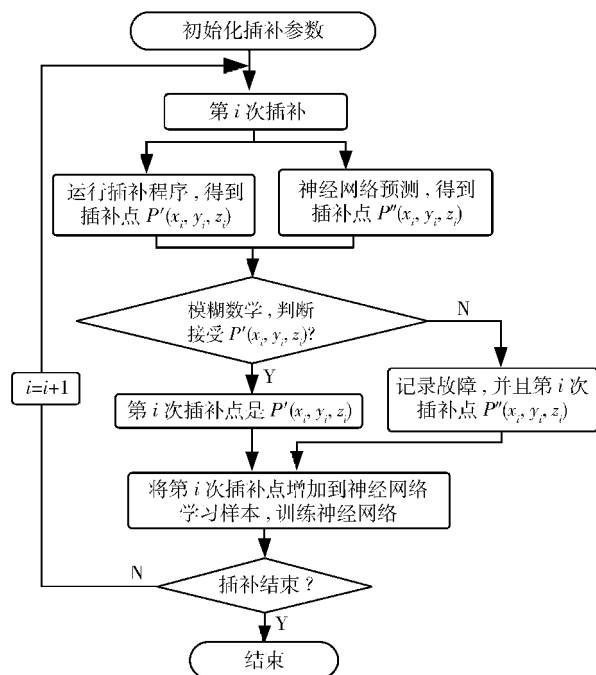


图1 基于神经网络插补流程

Fig.1 Schematic representation of interpolator based on ANN

通过以上分析, 基于神经网络的插补模块可以实现软件故障检测和恢复技术, 即容错技术。

2 基于神经网络的 NURBS 插补

2.1 NURBS 曲线及插补算法

一条 k 次 NURBS 曲线可以表示为一段有理多项式矢函数^[5~6]

$$p(u) = \sum_{j=0}^n w_j d_j N_{j,k}(u) / \sum_{j=0}^n w_j N_{j,k}(u) \quad (1)$$

式中 d_j ——控制顶点 w_j ——权因子

$N_{j,k}(u)$ 是由节点矢量 $U = (u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1})$ 按照递推公式确定的 k 次 B 样条基函数, 表示为

$$N_{j,0}(u) = \begin{cases} 1 & (u \in [u_j, u_{j+1}]) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

$$N_{j,k}(u) = \frac{u - u_j}{u_{j+k+1} - u} N_{j,k-1}(u) + \frac{u_{j+k} - u}{u_{j+k+1} - u_{j+1}} N_{j+1,k-1}(u) \quad (2)$$

用参数方程表示 NURBS 曲线 $p(u) = \{x(u), y(u), z(u)\}$, 参数 u 是时间 t 的函数, 记 $u(t_i)$ 。根据文献^[5~8], 将参数 u 对时间 t 进行二阶泰勒展开, 即

$$u(t_{i+1}) = u(t_i) + \frac{V(u_i)T_s}{|p'(u_i)|} + \frac{p'(u_i)p''(u_i)}{|p'(u_i)|^4} V^2(u_i) \frac{T_s^2}{2} \quad (3)$$

式中 $V(u_i)$ ——速度 T_s ——插补时间

$p'(u_i), p''(u_i)$ ——一阶、二阶导数

2.2 轮廓误差和进给加速度约束

NURBS 实时插补不存在弦长误差, 但是存在轮廓误差。轮廓误差来自直线逼近曲线产生的弓高误差。由轮廓误差约束的插补速度为

$$V_{CE}(u_i) = \sqrt{\rho^2(u_i) - (\rho(u_i) - \varepsilon_{\max})^2} / T_s \quad (4)$$

式中 $\varepsilon_{\max}$ ——设定的最大弓高误差

曲率 $\rho(u_i)$ 是参数 $u = u(t_i)$ 时 NURBS 曲线的曲率, 即

$$\rho(u_i) = \frac{|p'(u_i)|^3}{|p'(u_i) \times p''(u_i)|} \quad (5)$$

在高速切削加工曲线时, 由于曲线存在曲率, 数控机床必然产生进给加速度。如果进给加速度过大, 会对机床产生很大的冲击力。因此, 必须将进给加速度限制在允许的范围内。由进给向心加速度约束的插补速度为

$$V_a(u_i) = \sqrt{\rho(u_i) a_{\max}} \quad (6)$$

式中 $a_{\max}$ ——设定的最大向心加速度

综上所述, 实时插补速度应同时满足轮廓误差和进给加速度的约束。因此, 实时插补速度在轮廓误差约束的插补速度、进给加速度约束的插补速度和事先设定的插补速度中取最小值, 即 $V(u_i) = \min\{V_{CE}(u_i), V_a(u_i), V\}$ 。

2.3 神经网络结构设计

RBF 神经网络是基于人脑对外界反应的局部性而提出的神经网络, 具有结构简单、训练过程快和推广能力好等优点^[9~10]。为了节省神经网络计算时间, 本文设计结构相对简单的 RBF 神经网络, 结构如图 2 所示。输入层有 6 个节点, 分别是 u_{i-5} 、 u_{i-4} 、 u_{i-3} 、 u_{i-2} 、 u_{i-1} 和 u_i , 即前 6 次插补的 u 值; 隐含层有 5 个节点 (如果预测精度不能达到要求时, 自动增加隐含层节点), 传递函数是高斯函数; 输出层有 1 个节点, 为下一周期的 u_{i+1} 的预测值。在每一次的学习过程中, 神经网络的训练样本总共 10 个, 由 $\{(u_{i-15}, u_{i-14}, u_{i-13}, u_{i-12}, u_{i-11}, u_{i-10}), (u_{i-9}, \dots, (u_{i-6}, u_{i-5}, u_{i-4}, u_{i-3}, u_{i-2}, u_{i-1}), u_i\}$ 组成; 神经网络采用正交最小二乘法进行训练; 训练后, 神经网络的预测精度应小于 $(u_i - u_{i-15})/1500$; 神经网络的预测值 u_{i+1} 是在输入 $(u_{i-5}, u_{i-4}, u_{i-3},$

u_{i-2}, u_{i-1}, u_i)后得到。

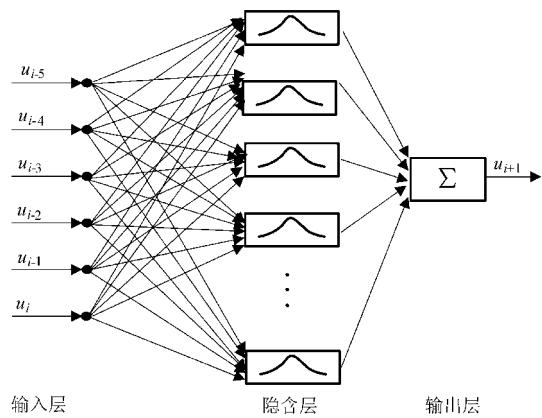


图 2 RBF 神经网络结构图
Fig. 2 RBF neural network architecture

2.4 模糊判断

应用模糊数学,判断能否接受插补点 $P'(x_i, y_i, z_i)$ 。选用 Euclid 距离,设定阈值 λ 为最大弓高误差,根据距离最近的原则判断是否接受插补点 $P'(x_i, y_i, z_i)$ 。如果 $P'(x_i, y_i, z_i)$ 与 $P''(x_i, y_i, z_i)$ 的距离小于阈值 λ ,则接受插补点 $P'(x_i, y_i, z_i)$ 。如果 $P'(x_i, y_i, z_i)$ 与 $P''(x_i, y_i, z_i)$ 间的距离大于阈值 λ ,则不能接受插补点 $P'(x_i, y_i, z_i)$ 。同时,记录故障,输出的插补点是 $P''(x_i, y_i, z_i)$,从而实现数控插补容错技术。

2.5 功能实现

为了检测基于神经网络的插补模块的性能,本文以吉林大学研发的虚拟轴研抛机床^[11~12]为对象,在其嵌入式数控系统中应用该插补模块。该数控系统采用主从式控制结构体系:上位机为 PC 机,下位机是 TMS320F2812 型数字信号处理器,上、下位机的数据通信采用双口 RAM 来实现^[13~14]。下位机主要有实时插补、伺服驱动和实时监控等功能模块,这些功能模块是在 CSS 环境下用 C 语言编写。因此,本文在 CSS 环境下采用 C 语言编写基于神经网络的插补程序,程序的流程图见图 1,将编写好的程序写入 TMS320F2812 型处理器中。RBF 神经网络涉及到指数函数,指数计算消耗的时间很长。因此,本文采用泰勒展开计算代替指数计算。同时,采用 TI 公司的 IQmath Library 将浮点数计算转换为定点数计算,以此提高计算精度和速度。

3 性能分析

将一条 NURBS 曲线在该嵌入式数控系统上进行插补实验,三次 NURBS 曲线如图 3 所示。NURBS 曲线的控制顶点 d_j 、权因子 w_j 、节点矢量 u_j 和实时插补参数分别是:

- (1)控制顶点 d_j : $\{ (0, 0, 0); (-100, -100, 0); (-100, 100, 0); (0, 0, 0); (100, -100, 0); (100, 100, 0); (0, 0, 0) \}$ 。
- (2)权因子 w_j : $\{ 1, 30, 10, 1, 10, 30, 1 \}$ 。
- (3)节点矢量 u_j : $\{ 0, 0, 0, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1, 1, 1 \}$ 。
- (4)插补周期 $T_s = 2 \text{ ms}$ 。
- (5)进给速度 $v = 66.7 \text{ mm/s}$ 。
- (6)允许的最大进给加速度 $a_{\max} = 5\,000 \text{ mm/s}^2$ 。
- (7)最大弓高误差 $\varepsilon_{\max} = 2 \text{ }\mu\text{m}$ 。
- (8)采用 S 型加减速,加速度 $a = 500 \text{ mm/s}^2$,加加速度 $J = 10\,000 \text{ mm/s}^3$ 。

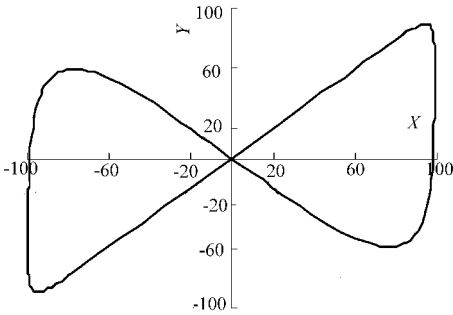


图 3 NURBS 曲线
Fig. 3 NURBS curves

3.1 速度和加速度分析

在插补过程中,速度/加速度曲线如图 4、5 所示。在图 4、5 中可以看出,在插补过程中,速度/加速度保持平稳状态,保证了零件加工效率。在图 5 中可以看出,加速度虽然有小的波动,但是没有超出机床的承载力的限制 ($a_{\max} = 5\,000 \text{ mm/s}^2$)。加速度的微小波动是由 NURBS 曲线曲率过大导致的,这也是无法避免的。尽管如此,加工过程中的速度/加速度仍能满足虚拟轴研抛机床加工要求。

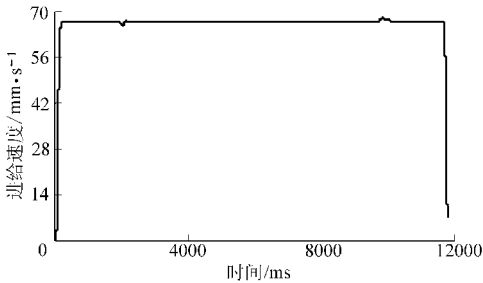


图 4 速度曲线
Fig. 4 Feedrate profile

3.2 加工质量分析

在每个插补周期内,插补点都在 NURBS 曲线上,没有产生径向误差,只有以直线代替曲线所产生的弓高误差。从实际测得的弓高误差曲线(图 6)中可看出,弓高误差曲线有 4 个波峰,它们对应插补曲

- 3 Rafiq M Y, Bugmann G, Easterbrook D J. Neural network design for engineering applications [J]. Computers and Structures, 2001, 79(17): 1 541 ~ 1 552.
- 4 Duer S. Diagnostic system with an artificial neural network in diagnostics of an analogue technical object [J]. Neural Comput. & Applic., 2010, 19(1): 55 ~ 60.
- 5 Feng Jingchun, Li Yuhao, Wang Yuhan, et al. Design of a real-time adaptive NURBS interpolator with axis acceleration limit [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(1 ~ 4): 227 ~ 241.
- 6 Tsai Miching, Cheng Chungwei. A real-time predictor-corrector interpolator for CNC Machining [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125(3): 449 ~ 460.
- 7 Liu Xianbing, Ahmad F, Yamazaki K, et al. Adaptive interpolation scheme for NURBS curves with the integration of machining dynamics [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(4 ~ 5): 433 ~ 444.
- 8 Du Daoshan, Liu Yadong, Yan Cuiliang, et al. An accurate adaptive parametric curve interpolator for NURBS curve interpolation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(9 ~ 10): 999 ~ 1 008.
- 9 Kalra R, Deo M C, Kumar R, et al. RBF network for spatial mapping of wave heights [J]. Marine Structures, 2005, 18(3): 289 ~ 300.
- 10 Montazer G A, Sabzevari R, Khatir H G. Improvement of learning algorithms for RBF neural networks in a helicopter sound identification system [J]. Neurocomputing, 2007, 71(1 ~ 3): 167 ~ 173.
- 11 Yu Miao, Zhao Ji, Zhang Lei, et al. Study on the dynamic characteristics of a virtual-axis hybrid polishing machine tool by flexible multibody dynamics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, 2004, 218(9): 1 067 ~ 1 076.
- 12 徐立国, 赵继, 孙瑞东, 等. 五坐标虚拟轴弹性研抛机床的环形轨迹规划[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 167 ~ 171.
Xu Liguang, Zhao Ji, Sun Ruidong, et al. Iso-circuit algorithms for tool-path planning based on virtual-axis elastic polishing machine tool with five degrees of freedom [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 167 ~ 171. (in Chinese)
- 13 张培晓. 串-并混联研抛机床运动控制器的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Zhang Peixiao. Study on motion controller of hybrid polishing machine tool [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- 14 刘晓刚. 五坐标虚拟轴研抛机床开放式数控系统的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Liu Xiaogang. Research on the open CNC system of five-coordinate virtual axis polishing machine [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

(上接第 214 页)

- 2 Ge Leyi. Novel method of evaluating dynamic repeated measurement uncertainty[J]. Journal Testing and Evaluation, 2008, 36(5): 453 ~ 459.
- 3 Wang Zhongyu. Research development of the grey error theory and the applications in the dynamic measurement [C] // 2003 IEEE ISICT, Beijing, 2003: 447 ~ 451.
- 4 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 25 ~ 31.
- 5 Befron. Bootstrap methods [J]. Annual Statistics, 1979, 7(1): 1 ~ 36.
- 6 夏新涛, 陈晓阳, 张永振, 等. 制造误差的灰自助动态预报[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(3): 160 ~ 165.
Xia Xintao, Chen Xiaoyang, Zhang Yongzhen, et al. Dynamic prediction for manufacturing errors using grey bootstrap [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science, 2007, 39(3): 160 ~ 165. (in Chinese)
- 7 Xia Xintao. Estimation of non-statistical uncertainty using fuzzy-set theory [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(4): 430 ~ 435.
- 8 Wang Zhongyu. Novel uncertainty-evaluation method of virtual instrument small sample size [J]. Journal Testing and Evaluation, 2008, 36(3): 101 454 ~ 101 461.
- 9 王中宇, 夏新涛, 朱坚民. 测量不确定度的非统计理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 65 ~ 74.
- 10 Deng Julong. Introduction to grey system theory [J]. The Journal of Grey System, 1989, 1(1): 1 ~ 24.
- 11 王中宇. 非统计原理及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 31 ~ 64.