第 37 卷第 5 期　　机 械 工 程 学 报　　Vol. 37　No. 5
2001 年 5 月　　CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING　　May　2001

面向激光加工的自适应测量和神经网络方法*

张 省　　虞 钢
(中国科学院力学研究所　北京　100080)

摘要　基于测控与激光加工一体化装备,在自适应测量的过程中不仅得到测点的位置,还得到测点的姿态。利用测量所得到的位姿数据训练神经网络,并由神经网络直接生成加工轨迹数据。这种方法,不涉及 CAX 过程,使测量和加工紧密结合,并且具有智能特性。

叙词:自适应测量　神经网络　激光加工
中图分类号:TG665

0　前言

激光加工通常要求光束沿加工面外法线(或成一定夹角)进行,这就要求知道加工点的位置和法矢量,以便驱动加工设备。根据这种要求,业已研制了一套柔性化测控激光加工一体化装备[1~4]。该装备由 5 轴框架式机器人系统,工业激光器系统,柔性光束传输及变换系统和双向电动运载系统等构成。测量头和激光加工头作为互换工具夹持在机器人 4 轴和 5 轴形成的腕部结构,通过调用相应的指令,实现三维测量和激光加工功能(系统结构框图见参考文献[1～3])。

借助于 5 轴机器人测量系统,结果得到测点的位置点集,从而形成了三维数据库。驱动机器人进行激光加工的数据是加工点的位置和法矢,形成六维加工数据库。测量到激光加工的数据转化过程为:

三维数据库 →中间转换 →六维数据库

按照目前制造业中通行的 CAX 过程[5],中间转换的核心就是根据测量结果对曲面进行重建。有两种解决方案,一是解析方法,即整个曲面用若干已知数学表达式的曲面片近似代替,是目前较成熟的曲面造型方法。二是非解析方法,即利用神经网络对进行曲面拟合[6~7]。在得到工件曲面面型后,激光加工还需要得到加工点小平面的位姿参数。考虑到 5 轴测控激光加工装置的特点[1~4],三维的测量数据和六维的加工数据都非常适于神经网络的输入输出,因此可以把曲面拟合、拟合后加工参数的求解两个步骤合并,将神经网络直接应用于面向测量到激光加工的整个过程,即用神经网络来反映测点到加工点之间的复杂关系。

这种测控加工一体化的方法要求在测量过程中不仅给出测点的位置(x, y, z),还要生成测点的姿态,即法矢(a_x, a_y, a_z),以便为后续加工程序做准备。根据微分几何原理,曲面上不在直线上的三点距离足够近时,其形成的平面可以近似作为该点切平面。因此,机器人在测量某点时,可以在其附近密测三点,该三点形成平面的法矢近似作为测点的法矢。每次测量的点(x, y, z)组成了一个测量点集,它可以用于后续 CAX 方法的曲面拟合。根据计算的结果,测点位置和它的姿态相结合,还组成了另外一个点集(x, y, z, a_x, a_y, a_z)。当后续加工点的生成用神经网络方法进行时,这个点集将作为网络的训练集。

1　自适应测量算法与加工数据准备

测控激光加工一体化装备[1~3]采用触发式测头,其测量过程是单点测量的累积,对它进行一维自适应测量的数学描述为:

对于函数 $f(x)$, $x \in [a, b]$,已知点集$\{x_i, z_i\}$, $i = 0, 1, \cdots, k$, $a \le x_0 \le x_1 \le \cdots \le x_k < b$,它以一定精度 η 位于 $f(x)$ 上。给定误差 ε,求点集$\{x_j, z_j\}$, $j = k+1, k+2, \cdots, n$, $x_k \le x_{k+1} \le \cdots \le x_n \le b$。在 n 尽量小的情况下,该点集的拟合函数 $F(x)$ 满足:$|F(x) - f(x)|_P < \varepsilon$。

式中,$f(x)$ 对应于待测量的曲线,(x_j, z_j) 是实测值,$f(x_i)$ 为真实值,x_i 为测量位置,$|x_{k+1} - x_k|$ 为 x 方向测量步长,p 代表范数。它要求在满足逼近精度 ε 的情况下,测量点数 n 尽量少。

自适应测量可以利用插值预测的方法实现。以线性插值为例。假设已经得到了测点 $(F(x_{k-1}), x_{k-1})$, $(F(x_k), x_k)$。现在进行第 $k+1$ 步测量,其

* 国家自然科学基金资助项目(69678007)。20000403 收到初稿,20001020 收到修改稿

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

测量步长记为 $s_k = x_{k+1} - x_k$,测头跳起高度为 h。参见图 1。

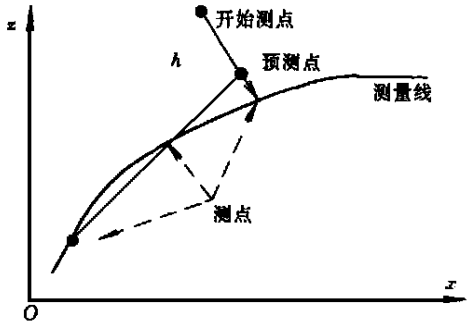

图 1　插值方法自适应测量示意图

测点$(F(x_{k-1}), x_{k-1})$,$(F(x_k), x_k)$的插值函数为

$$F(x) = \frac{F(x_{k-1})x_k - F(x_k)x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} + \frac{F(x_k) - F(x_{k-1})}{x_k - x_{k-1}}x$$

由此式和设定的误差 Δ,决定下列参数:

测量方位　$x_{k+1} = x_k + s_k$

测量步长　s_k 根据设定误差 Δ 而变化

预测点　$(x_{k+1}, F(x_{k+1}))$

法线方向　$-1/F'(x)$,其中 $F'(x) = \tan\alpha_k$,α_k 为斜率角

测量开始点:$(x_{k+1} - h\sin\alpha_k, F(x_{k+1}) + h\cos\alpha_k)$

根据斜率角变化量 $\delta = (\alpha_k - \alpha_{k-1})$ 来决定第 $(k+1)$ 点的移动步长 s_k,其中测点$(F(x_{k-1}), x_{k-1})$和$(F(x_k), x_k)$、$(F(x_{k-2}), x_{k-2})$和$(F(x_{k-1}), x_{k-1})$线性插值函数的斜率角分别为 α_k 和 α_{k-1}。如果 $\delta < \Delta$,则 $x_{k+1} = x_k + 2s_k$,继续向前测量,如果 $\delta > \Delta$,则 $x_{k+1} = x_k - 0.5s_k$,回测一点。即采用试凑和加速步长法,如此循环。实际测量时,Δ 可以划分为几个区间,δ 在不同区间,步长变化不同。

这个测量步长依据误差动态调整的过程,相当于如下的无约束动态优化问题[7]:优化目标为保持斜率角变化量恒定,最优值记为 C,设计(调整)变量为移动步长 s。

$$\delta = \min\{f(s) - C\} \qquad s \in \mathbf{R}$$

在实现中,测点得到后,只须在其周围密测两点,这两点和测点组成等腰直角三角形,测点作为顶点。由此三点组成的平面,可以计算出测点的法矢。密测两点的测量方向和该测点相同。

2　神经网络加工数据生成

神经网络是一种函数逼近算法,它具有学习和泛化能力,其中应用最广泛的是 BP 算法。关于它的原理,许多文献都有介绍[9~10]。这里不再赘述。

神经网络用于加工数据生成之前必须经过训练,训练合格后方可使用。测量过程形成的测点位姿数据库形成了加工神经网络的训练集。应用于激光加工的神经网络,需要解决如下问题。

(1) 网络结构的确定

对激光加工而言,给定工件方位,需要知道该方位的位置和姿态数据。对应于网络,其输入为方位,对应有两个节点 x、y,输出有四个节点,分别为该方位的 z 向位置和它的三个法矢量 a_x, a_y, a_z。具体加工时,网络输出再扩展为(x, y, z, a_x, a_y, a_z)。这样,网络的输入输出节点数确定下来。若选用单隐层,隐层单元数为 3。则面向测控激光加工一体化的神经网络的结构为 2 ×3 ×4。如图 2 所示。

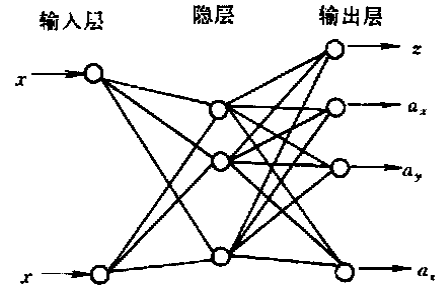

图 2　测控加工一体化神经网络结构图

(2) 网络前置处理

根据网络输入到输出映射的物理意义,测量数据库经过简单处理,形成两维输入(x, y)到四维输出(z, a_x, a_y, a_z)的列表,即网络训练集。一般的,训练集越大,网络学习的效果越好。也可以从训练集中留下一部分作为测试集测试网络。对加工神经网络,用于训练网络的训练集应散布在整个测量空间,而不应聚集在空间某一点处,这样有利于网络学习到面型的整体特性。

一般 BP 网络采用 S 函数作为作用函数,其输出在(0,1)之间,为增强 S 函数输出的敏感性,输入也应限定在(0,1)之间。这样,训练集必须归一化,才能被 BP 网络接受。这与工件测量和加工范围密切相关。实际工件定义在$[-x, x] \times [-y, y] \times [-z, z]$的三维空间上,三个方向的最大、最小值应在一开始测得,它们被归一化到$[0,1] \times [0,1] \times [0,1]$的单位空间上。测量位置数据据此做相应的归一化处理。而姿态数据在$[-1,1]$之间,也需要归一化(如果采用双曲正切函数作为作用函数,因该函数输出正好在$[-1,1]$之间,姿态则不需要归一化)。

(3) 网络后置处理

和网络需要前置处理一样,S 函数的输出决定

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

了网络的输出节点值都在(0,1)之间。其中第一个节点表示 z 值,需要根据前置的归一化处理关系,逆变换为工件相应的实际坐标。其他三个节点表示法矢,也要经过逆变换。这样,网络的输入(逆变换前的)和输出复合在一起,构成位姿数据。

工件表面加工点的位置和姿态,并不能直接驱动柔性系统的 5 轴机器人系统进行加工,还需要根据激光聚焦进行长度变换。这一计算也可以直接利用机器人的工具补偿功能而自动实现。

3 实例

对一个抛物形曲面进行自适应测量,取测头跳起高度 $h = 5$ mm,初始测量步长 $s_0 = 15$ mm,斜率角变化量分为四个区间:$\Delta_{max} = 3$,$\Delta_h = [2,3]$,$\Delta_m = [1,2]$,$\Delta_l = [0,1]$。测点及其密测点组成的等腰直角三角形腰长为 5 mm。作为初始条件,手动测量 3 个点。

图 3 给出了测量过程的两维显示。图 4 是带有密测点的三维显示。图 3 中圆圈表示测头开始测量点,加号表示预测点,星号表示实测点。为了清楚地显示出各点位置,z 轴和 x 轴没有采用等比关系,因此图 3 显示不出开始测点到实测点连线与实测点切线的垂直关系。图 3 中还标出了各点的测量顺序,可以看出,7 点测量之后,由于斜率角变化较大,重新回测一点,形成点 8。回测后程序要进行重置。

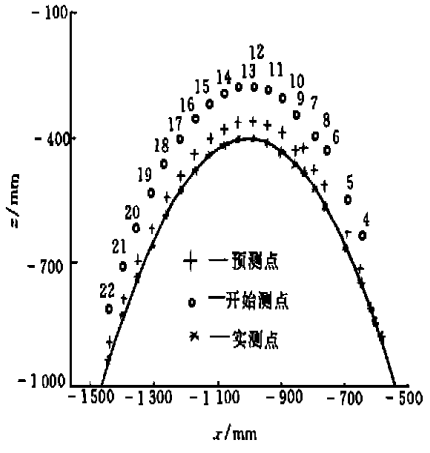

图 3 测量过程两维显示

表 1 是图 3 测量线上的部分实测点位置及其法矢。根据测量边界条件:[-1 800,-200]×[0,0]×[-900,-300],对表 1 进行归一化处理后形成训练样本。用它训练结构为 2×3×4 的 BP 网络。设定误差 $\varepsilon = 0.0001$。经过 120 次迭代,网络收敛,网络学习曲线如图 5。其权值和阈值可以被输出时应用。

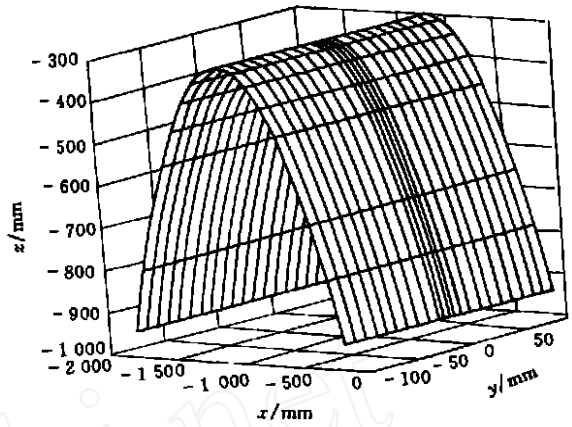

图 4 带有密测点的测量过程三维显示

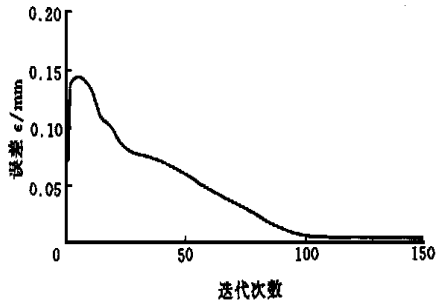

图 5 网络学习曲线

如果网络训练误差大于给定误差,则改变网络结构,增大或减小隐层节点数,重新训练网络,直到满足要求为止。

现在,在表 1 测量点集的各点之间,分别插入一个方位点,形成一个集合,归一化处理后,再用训练好的网络进行计算输出,经过逆归一化处理后,得到插入方位点的位姿,如表 2 所示。

表 1 部分测量结果及相应法矢 mm

序号	实 测 点	法 矢
4	(-691.511,0.000,-801.957)	(0.816,0.000,0.577)
5	(-754.577,0.000,-716.571)	(0.790,0.000,0.613)
6	(-818.451,0.000,-638.199)	(0.757,0.000,0.653)
7	(-882.460,0.000,-600.848)	(0.718,0.000,0.696)
8	(-851.926,0.000,-567.385)	(0.740,0.000,0.672)
9	(-890.106,0.000,-559.992)	(0.713,0.000,0.701)
10	(-905.518,0.000,-544.512)	(0.702,0.000,0.712)
11	(-928.458,0.000,-522.352)	(0.685,0.000,0.729)

从表 2 分析网络输出结果。由于测量曲线的连续性和单调性,插入点的位置和姿态应该位于相临两个测量点位姿之间,比较表 2 和测量点集表 1 发现,结果确实如此。并且回测点 8 的后一个点 8′也表现出回测特性,证明了网络学习输出的可靠性。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在机器人自身已经进行工具补偿时,该位姿可以直接驱动机器人进行激光加工。

表 2　网络输出结果　　mm

序号	方位		网络输出			
	x	y	z 向坐标	法矢		
			z	a_x	a_y	a_z
4′	- 711.511	0.000	- 753.078 000	0.800 310	0.000 050	0.570 230
5′	- 784.577	0.000	- 710.816 400	0.776 678	0.000 014	0.621 862
6′	- 848.451	0.000	- 586.301 000	0.725 508	0.000 058	0.674 188
7′	- 912.460	0.000	- 585.735 600	0.710 702	0.000 090	0.729 094
8′	- 836.926	0.000	- 667.086 000	0.720 826	0.000 052	0.664 728
9′	- 893.856	0.000	- 606.443 400	0.710 638	0.000 082	0.713 988
10′	- 913.018	0.000	- 583.816 800	0.699 368	0.000 090	0.730 462

4　结论

测量和激光加工属于不同类型的过程。利用本文描述的方法,基于测量激光加工一体化的设备可实现测控加工算法一体化。在自适应测量的过程中,得到了测点的位置和姿态,这种位姿数据被神经网络利用,可成功地映射加工方位和用于驱动机器人进行激光加工的加工点位姿。因此,可以得到如下结论:

(1) 线性插值或样条插值测量利用优化的原理,可以实现对任意曲面的自适应测量。

(2) 测量过程中不仅获取了测点位置,还得到姿态信息,位姿数据被后续加工利用,使得测量和加工紧密结合。这不仅在思路上非常新颖,而且在技术上也切实可行。

(3) 神经网络加工轨迹生成方法直接把曲面拟合和加工轨迹生成结合在一起考虑,它比传统的 CAX 方法更加直观,并且具有智能化特性。

(4) 当加工面型较大时,可对面型进行区域分割,形成多个网络,以减少单个网络负担。

对于这种激光加工数据生成方法,在加工误差方面还有待进一步研究。一般来讲,其误差来源包括:网络训练集位姿数据的近似性(主要是法矢),训练集合点数不足,网络算法误差,加工方位的确定等。

参　考　文　献

1　虞钢,王洪才,张风林,等. 一种具有柔性传输和多轴连动的激光加工装置. 中国专利,ZL98101217.5,1998

2　Yu Gang, Zhang Sheng. A 5 - axis machine for 3 - D laser materials processing. In: 5th International Conference on Manufacturing Technology, Beijing, 1999

3　虞钢. 多轴激光加工系统促进汽车车身制造技术的发展. 激光集锦,1997,7(5):56～58

4　Zhang Sheng, Yu Gang. Adaptive measurement enhancing the performance of a 5 - axis laser robot machine. In: Advanced High - Power Lasers and Applications AHPLA'99, Osaka, Japan, 1999

5　唐荣锡. CAD/CAM 技术. 北京:北京航空航天大学出版社,1994

6　Gu P, Yan X. Neural network approach to the reconstruction of freeform surfaces for reverse engineering. CAD,1995,27(1):58～64

7　贵忠华,夏京星. 人工神经网络在几何造型中的应用,计算机辅助设计与制造,1998(7):47～49

8　崔华林. 机械设计优化设计方法与应用. 沈阳:东北工学院出版社,1989

9　Rumelhart DE, Hinton G E, Williams R J, Learning Internal Representations by Error Propagation. Cambridge, MA: MIT Press, 1986

10　侯祥林,陈长征,虞和济,等. 神经网络权值和阈值的优化方法. 东北大学学报,1999(4):447～450

ADAPTIVE MEASURE AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS METHOD ORIENTED TO LASER MACHINING

Zhang Sheng　　Yu Gang

(*Institute of Mechanics, CAS*)

Abstract　Based on the existing integrated measure / control / laser processing equipment, not only position of measured points but also posture of theses points may be obtained via adaptive measuring. Data with position and posture information can be used to train the neural networks comprehensively, then to produce track data for laser materials processing. This method brings measure and machine more closely, and CAX processes may be avoided, therefore it is more intelligent.

Key words: Adaptive measure　Neural networks　Laser machining

作者简介　张省,男,1971 年出生,工学博士,1998 年进入中科院力学所博士后流动站,从事柔性测控与激光加工系统的研究,2000 年出站。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net