

文章编号: 1001-3806(2009)03-0262-04

空间光通信终端精跟踪伺服系统研究

黎明^{1,2}, 艾勇^{2*}, 曹阳²

(1. 湖北师范学院 信息工程系, 黄石 435002; 2. 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430079)

摘要: 为了提高空间光通信中的精跟踪伺服系统的跟踪精度, 采用神经网络比例-积分-微分算法, 解决精跟踪伺服系统中光斑抖动时变不确定性和压电陶瓷驱动中存在的迟滞、蠕变和位移非线性等不足。通过3层结构反向传播神经网络自学习方法, 在线调整比例-积分-微分控制器的系数, 控制压电陶瓷驱动精瞄偏转镜偏转, 最终达到精跟踪伺服系统优化控制。进行了理论分析和实验验证, 取得了室内精跟踪数据。结果表明, 神经网络比例-积分-微分控制算法增强了伺服系统鲁棒性, 并提高了伺服系统实时性; 采用400Hz的CCD, 精跟踪伺服系统对40Hz以下的抖动能有效抑制, 基本能满足在空间光通信中跟踪带宽需要。

关键词: 光通信; 精跟踪; 自适应神经网络比例-积分-微分控制器; 压电陶瓷驱动

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A

Research of fine tracking servo system for FSO terminal

Li Ming^{1,2}, Ai Yong², Cao Yang²

(1. Department of Information Engineering, Hubei Normal University, Hangshi 435002, China; 2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to improve tracking precision, and solve the control problem of uncertainty of beacon vibration, creep resistance and nonlinearity long lagging of fast steering mirror(FSM), the fine tracking servo system was designed based on the proportion-integral-differential(PID) like neural network algorithm in free spatial optic(FSO) communication. With three layers of back propagation(BP) neural networks, the weights of neural network and the parameters could be adjusted to reduce beacon vibration by means of the function of self-learning and adaptability in real time, finally the system was optimally controlled with the mirror driven by piezoelectric ceramic(PZT) actuator on line. Experimental results demonstrate that the system effectively restrains 40Hz and less than 40Hz facular trembles, and can satisfy the tracking bandwidth in free space optic communication. Furthermore, the robust performance and real time are improved in the fine tracking servo system.

Key words: optic communication; fine tracking; adaptive neural network; proportion-integral-differential controller; piezoelectric ceramic actuator

引言

捕获瞄准和跟踪(acquisition, pointing and tracking, APT)技术是空间光通信关键技术之一, 主要完成大范围、高概率和快速空间捕, 及两运动平台间高精度视轴对准和动态跟踪。而精跟踪是 APT 核心技术, 它直接决定了通信链路能否建立以及通信系统的性能。由于激光光束窄、发散角小, 在传输过程中受到大气散射、折射、湍流等很多因素的影响, 加上空间通信平台的振动等因素, 会造成激光光束偏离目标, 对精跟踪的性能要求很高, 一般需要达到十几个甚至几个微弧度。

基金项目: 湖北省教育厅教研基金资助项目(20070321)

作者简介: 黎明(1970-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事激光通信方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: aiyong@public.wh.hb.cn

收稿日期: 2008-05-04; 收到修改稿日期: 2008-08-19

有关精跟踪技术, 国外学者已进行了较深入的研究^[1-2], 国内也有不少工作在开展^[3-6], 但只给出了精跟踪系统结构或仿真结果。本文中重点对精瞄微定位跟踪的伺服单元控制方法研究与实现。

1 精跟踪伺服系统

精跟踪伺服系统构成见图1, 具体包括: CCD 光斑检测和视频信号处理单元、精瞄控制器、压电陶瓷驱动模块、精瞄偏转镜(fast steering mirror, FSM)和电阻应

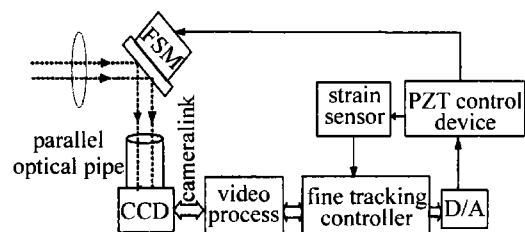


Fig. 1 Block diagram of fine tracking system

变式传感器。精跟踪伺服系统的工作过程: CCD 接收到信标光, 视频图像预处理和光斑中心位置提取, 精瞄控制器确定精瞄偏转镜绝对位置, 同时将其转换为电压, 驱动压电陶瓷模块的 4 支压电陶瓷运动, 控制 FSM 偏转, 使光斑聚焦在 CCD 中合适位置; 通过每支压电陶瓷内置的电阻应变式传感器实时采集压电陶瓷的位移信息, 经过检测转换电路处理后发送到精跟踪控制器形成闭环精确控制。

系统要求具有极强的实时性, 否则因相位滞后, 控制效果将会受到严重影响。故在精跟踪伺服系统系统中, 单片机难以达到实时性要求, 选用高速现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 作为系统的处理器。系统实时性的好坏很大程度上取决于比例-积分-微分 (proportion-integral-differential, PID) 控制算法。

2 神经网络 PID 控制

在控制 FSM 微位移运动过程中, 具有非线性、时变不确定性和纯滞后等特点。在噪声、机械等因素的影响下, 过程参量甚至模型结构均会发生变化, 此时, 采用常规的 PID 控制很难实现良好的控制效果。因此, 要求 PID 控制器的系数在形成控制量的过程中得到准确而又实时的在线调整。将神经网络与 PID 控制相结合, 不仅引入了经典 PID 调节器原理简单, 调节细腻等特点, 而且具有神经网络控制器的灵活性、适应性等特点。将二者优点结合, 使之具有自适应控制特点, 提高了系统的控制精度。

2.1 基于反向传播 (back propagation, BP) 网络的 PID 控制器结构

非线性动态控制系统设计的神经网络自适应 PID 控制系统如图 2 所示。神经网络 (neural network, NN) 根据系统运行状态, 通过自学习和修正网络权值, 在线调整 PID 控制器的系数, 达到指定性能指标下的最优化。

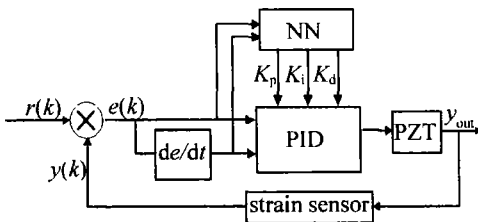


Fig. 2 Block diagram of neuron PID control system

BP 神经网络采用 3 层结构, 如图 3 所示, 3 层分别为输入层 I, 隐含层 J, 输出层 P。x₁, x₂ 为输入层输入, 输出层的输出即为 PID 控制器的 3 个系数 K_p, K_i, K_d, 它们分别为比例、积分、微分系数。经典增量式数字 PID 的控制算法为:

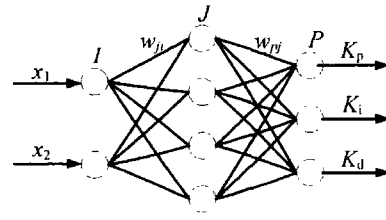


Fig. 3 BP neural network with three-layers

$$u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

u(k) 完成控制规律的综合和输出。

2.2 神经网络 PID 控制算法

BP 网络的输入为:

$$x_1 = e(k) - e(k-1), x_2 = e(k) \quad (2)$$

隐含层 J 的节点 j 输入:

$$y_{j,j}(k) = \sum_{i=1}^2 w_{ji} o_{i,i}(k) \quad (3)$$

输入层 J 的节点 j 输出:

$$o_{j,i}(k) = f_1[y_{j,j}(k)], (j = 1, \dots, 4) \quad (4)$$

式中, y_{j,j}(k) 是隐含层 J 的节点 j 输入, o_{i,i}(k) 是输入层 I 的节点 i 输出, w_{ji} 是输入层节点 i 到隐含层节点 j 的加权系数, f₁ 是隐含层激活函数, 取为正负对称的 Sigmoid 函数, 如:

$$f_1(x) = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)} \quad (5)$$

输出层输入节点:

$$y_{p,p} = \sum_{j=1}^5 w_{pj} o_{j,j}(k) \quad (6)$$

输出层输出节点:

$$o_{p,p}(k) = f_2[y_{p,p}(k)], (p = 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中, w_{pj} 是隐含层节点 j 到输出层节点 p 的加权系数, f₂ 是输出层激活函数, 由于 PID 控制器系数不能为负值, 所以 f₂ 取为非负的 Sigmoid 函数:

$$f_2(x) = \frac{\exp(x)}{\exp(x) + \exp(-x)} \quad (8)$$

输出层的输出为 PID 控制器的系数, 即:

$$K_p(k) = o_{p,1}(k), K_i(k) = o_{p,2}(k), K_d(k) = o_{p,3}(k) \quad (9)$$

将 (9) 式代入 (1) 式, 则得到 PID 控制器的输出 u(k)。取 BP 网络的性能指标函数为:

$$E(k) = [r(k) - y(k)]^2 / 2 \quad (10)$$

用 BP 学习算法来修正加权系数, 使 E(k) 达到最小, 得到输出层权的学习算法为^[3,7]:

$$\begin{cases} w_{pj}(k+1) = w_{pj}(k) + \eta \delta_p o_{j,j}(k) + \alpha \Delta w_{pj}(k) \\ \delta_p = e(k+1) \frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial o_{p,p}(k)} f_2'[y_{p,p}(k)] \end{cases} \quad (11)$$

式中, η 为学习速率, α 为加快算法收敛速度而添加的

惯性系数, $\Delta w_{pj}(k)$ 是上一采样时刻的加权系数变化量。也可以自学习调整学习速率 η 和惯性系数 α , 调整原则是: 如某 k 次修正使 E 进一步减小, 则下一步 ($k+1$) 次的 η 放大 2%; 如某 k 次修正反而使 E 增大, 则下一步 ($k+1$) 次的 η 减小 2%。隐含层权的学习算法为^[3,7-8]:

$$\begin{cases} w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta \delta_j o_{i,i}(k) + \alpha \Delta w_{ji}(k) \\ \delta_j = f_i' [y_{j,j}(k)] \sum_{p=1}^3 \delta_p w_{pj}(k) \end{cases} \quad (12)$$

当 BP 神经网络产生输出的期望值时, 各单元之间的权值就被保存下来并用来预测新的输入数据结果, 当网络工作的时候, 则是记忆或预测的过程, 向前传播的输出时确认数据的预测模型。

3 实验结果分析

实验系统框图如图 4 所示, 实验平台搭建实物照片如图 5 所示, 实验环境是日光灯照射下的白天室内

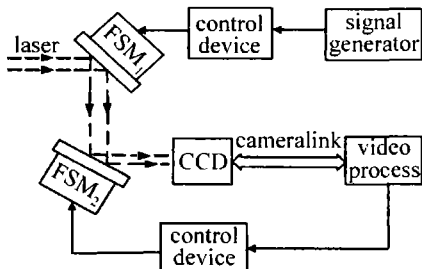


Fig. 4 Block diagram of the experimental system



Fig. 5 Demonstration platform for fine tracking

环境。快速压电偏转镜(见图 4 中 FSM₁) 高频抖动模拟大气湍流、通信平台震动造成的信标光抖动。CCD 帧频为 400Hz, FSM、压电陶瓷 (piezoelectric ceramic, PZT) 控制箱采用了德国 PI 公司产品。FSM 分辨率达到 0.2rad, 偏转量程为范围 $\pm 1\text{mrad}$, 谐振频率大于 2kHz。PZT 控制箱控制输出电压范围为 0V ~ 10V, 线性对应 FSM 的 $\pm 1\text{mrad}$ 的偏转。

图 6、图 7 抖动跟踪曲线图中学习速率 $\eta = 0.28$, 惯性系数 $\alpha = 0.03$, 网络初始权值均取 $[-0.5, 0.5]$ 之间的随机数。图 6 为 15Hz 抖动跟踪曲线图, 图 6a 为 PZT 控制箱输出电压; 图 6b 分别绘出没有精跟踪和实现精跟踪后光斑坐标。图 7 为 40Hz 抖动跟踪曲线图。从实验结果来看, 15Hz 抖动源下角度压缩比为 5,

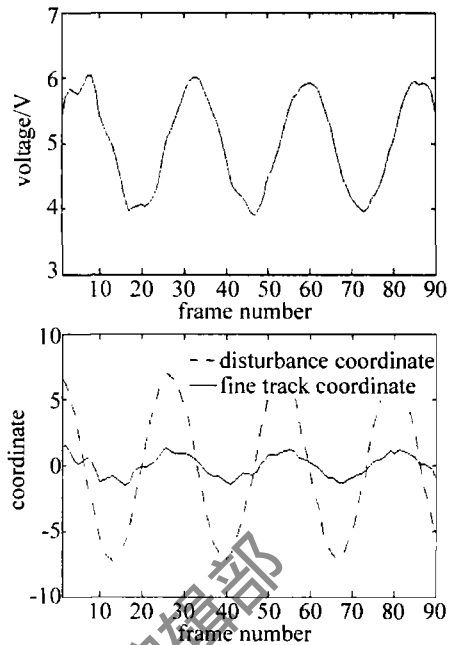


Fig. 6 Tracking curve for 15Hz disturbance

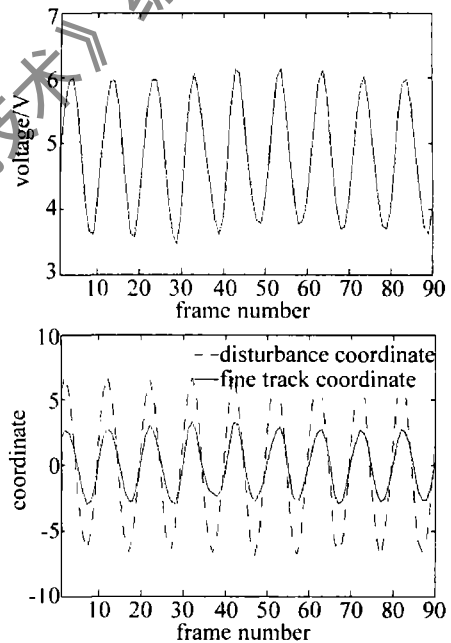


Fig. 7 Tracking curve for 40Hz disturbance

40Hz 抖动源下角度压缩比为 2.8, 精跟踪伺服系统都能够完成跟踪。但随着抖动频率的升高, 抖动角度范围压缩减小, 在 40Hz 抖动源下跟踪效果较差, CCD 频率和跟踪带宽比大约是 8 倍 ~ 10 倍。在空间光通信中, 由于大气湍流引起信标光斑抖动频率在 50Hz 以内, 且频率越高幅度越小, 该精跟踪伺服系统能满足其跟踪带宽需要。

加大学习速率 η 可以加快跟踪速度, 缩短跟着时间, 但学习速率太大会使被调量变化太快, 导致网络训练跳出最佳点, 跟踪精度也降低。惯性系数 α 的作用在于记忆上一时刻的加权系数的变化方向, 这样就可以用来抑制网络训练中可能出现的振荡, 起到了缓冲平滑的

Table 1 The comparison of three kinds BP neural network algorithm

algorithm	common algorithm		add-in momentum item		dynamically adjusting learning	
parameter	$\eta=0.35, \alpha=0.0$	$\eta=0.28, \alpha=0.0$	$\eta=0.35, \alpha=0.03$	$\eta=0.28, \alpha=0.03$	$\eta=0.35, \alpha=0.03$	$\eta=0.28, \alpha=0.03$
iteration step	3729	5368	854	1062	298	311
ratio of angle compression	2	2.5	2.5	3.2	3.3	5

作用。系统的跟踪精度和跟踪速度性能指标决定了学习速率 η 和惯性系数 α 选取,在满足跟踪速度前提下,尽量提高跟踪精度。表1是学习速率 η 和惯性系数 α 不同取值时,不同算法的迭代步数和角度范围压缩的比较。通过实验可知,取 $\eta=0.28, \alpha=0.03$,采用自学习法迭代步数仅311次,跟踪时间不到1s。

4 结论

介绍了精跟踪伺服系统,采用自适应神经网络PID智能控制算法,控制压电陶瓷PZT驱动精瞄偏转镜偏转。实验表明,采用400Hz帧频的CCD,精跟踪伺服系统对40Hz以下的抖动能有效抑制,跟踪时间不到1s,基本能满足在空间光通信中精跟踪需要。进一步的工作将研究具有预测功能的PID算法,提高系统鲁棒性和扩展系统带宽。

参考文献

[1] SKORMIN V A, TASCILLO M A, NICHOLSON D J. A jitter rejection technique in a satellite-based laser communication system [J]. Opt

Engng, 1993, 32(11):2764-2769.

- [2] ZHANG L M, GUO J. Simulative research on dual x - y axis control of fast steering mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(2):142-147 (in Chinese).
- [3] NIU Y A, YANG Ch W. Adaptive control based on PID-link neural network [J]. Acta Armamentari, 2005, 13(2):142-147 (in Chinese).
- [4] SUN A X, WANG J, HE H X. Testing precision analysis of centrobaric of laser facula [J]. Laser Technology, 2004, 28(6):667-672 (in Chinese).
- [5] ZHANG Y X, TAO Ch K. Effects of the turbulent scales on aperture averaging of a Gaussian-Schell beam propagation in a turbulent atmosphere [J]. Laser Technology, 2005, 29(3):318-321 (in Chinese).
- [6] JONO T, TOYOSHIMA M, TAKAHASHI N, et al. Laser tracking test under satellite microvibrational disturbances by OICETS ATP system [J]. Proc SPIE, 2002, 4714:97-104.
- [7] SUN L I, SUN Sh W, QU D S, et al. Micro-drive positioning system based on PZT and its control [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(1):55-58 (in Chinese).
- [8] WEI Q, ZHANG Y L, YU X L, et al. Study on neural network PID control for micro-displacement stage of scanning tunneling microscope [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3):423-427 (in Chinese).

(上接第261页)

系数保持不变,减小双芯间的空气孔孔径或增大孔内折射率都会使耦合器的耦合效率增加,耦合长度减小,不同偏振方向的耦合长度差别减小,损耗也会减小。另外双芯间空气孔内折射率可调性强,使得光纤耦合器的耦合性能有易调节的优点,为合理设计可调谐双芯光子晶体光纤耦合器提供了理论支持。

参考文献

- [1] RUSSELL P. Photonic crystal fibers [J]. Science, 2003, 299(17):358-362.
- [2] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J, et al. Photonic crystal fiber and laser [J]. Laser Technology, 2004, 28(1):48-51 (in Chinese).
- [3] MANGAN B J, KNIGHT J C, BIRKS T A, et al. Experimental study of dual core photonic crystal fibre [J]. Electron Lett, 2000, 36(16):1358-1359.
- [4] LEE B H, EOM J B, KIM J, et al. Photonic crystal fiber coupler [J]. Opt Lett, 2002, 27(10):812-814.
- [5] SAITOH K, SATO Y, KOSHIBA M. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers [J]. Optical Express, 2003, 11(24):3188-3195.
- [6] FOGLI F, SACCOMANDI L, BASSI P. Full vectorial BPM modeling of

index-guiding photonic crystal fibers and couplers [J]. Optical Express, 2002, 10(1):54-59.

- [7] REICHENBACH K L, XU C. Independent core propagation in two-core photonic crystal fibers resulting from structural nonuniformities [J]. Optical Express, 2005, 13(25):10336-10348.
- [8] JESPER L, OLE B, ANDERS B. Photonic crystal fiber design for broadband directional coupling [J]. Opt Lett, 2004, 29(21):2473-2475.
- [9] REN G B, WANG Zh, LOU Sh Q, et al. Modal interference in dual-core photonic crystal fibers [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(8):2600-2606 (in Chinese).
- [10] NIELSEN M D, MORTENSEN N A. Photonic crystal fiber design based on the V-parameter [J]. Optical Express, 2003, 11(21):2762-2767.
- [11] WHITE T P, MCPHEDRAN R C, STERKE C M D. Confinement losses in microstructured optical fibers [J]. Opt Lett, 2001, 26(21):1660-1662.
- [12] WHITE T P, KUHLMEY B T, MCPHEDRAN R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers I. Formulation [J]. J O S A, 2002, B19(10):2322-2330.
- [13] KUHLMEY B T, WHITE T P, RENVERSEZ G, et al. Multipole method for microstructured optical fibers II. Implementation and results [J]. J O S A, 2002, B19(10):2331-2340.