

基于 BP 神经网络的光电测量系统畸变校正

柏旭光^{1,2}, 蔡盛^{1,2}, 高峰端³, 乔彦峰¹, 戴明¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 中国船舶重工集团公司江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222006)

摘要:在大视场光电测量系统中,由于光学系统畸变的影响使得目标在线阵 CCD 上的成像偏离了理论成像点,导致系统产生测量误差,为了提高测量精度,必须进行畸变校正。根据畸变光学原理,利用 BP 神经网络对非线性畸变进行良好的逼近,通过对由畸变测量装置获得的数据进行训练建立网络模型,从而建立整个视场畸变校正的数学模型。实验结果表明,当目标物高为 200.115 mm 时,利用 BP 神经网络方法,可将畸变误差从校正前的 -2.080 mm 提高到校正后的 -0.104 mm,使得整体检测精度从 1.039% 提高到 0.052%。

关键词:BP 神经网络;大视场光电测量;畸变校正;误差分析

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A

Distortion correction for photoelectric measuring system based on BP neural network

BAI Xu-guang^{1,2}, CAI Sheng^{1,2}, GAO Feng-duan³, QIAO Yan-feng¹, DAI Ming¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Jiangsu Automation Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Lianyungang 222006, China)

Abstract:In the big visual field photoelectric measuring system, distortion produced by optical system makes the image of objects on the linear CCD deviate from the theoretical point and lead to the system measuring error. In the practical measuring system, in order to improve measurement precision, distortion correction is necessary. According to optical theory of distortion and utilizing BP neural network to approach nonlinear distortion, distortion correction mathematic model of whole field was set up through training the distortion measurement data which were measured by distortion detection device. This device has eleven equidistance points of laser goals and is designed based on the basis of distortion mechanism and radical character. The distortion correction method based on BP neural network can realize high precision of correction without knowing the mathematic model. The experiment result shows that the device can reduce error obviously from -2.08 mm to -0.104 mm according to the BP neural network correction when the object height is 200.115 mm, and raise the whole systematic detection precision from 1.039% to 0.052%.

Key words:BP neural network; photo electricity measuring system of large field; distortion correction; error analysis

1 引言

随着光学技术和 CCD 技术的发展,带有大视场短焦距镜头的摄像系统由于能够提供较大的成像范围,在医学、军事及工业等方面有着越来越广泛的应用,如军用炸点测量系统、医用电子内窥镜以及工业

机器视觉上的精确定位操作等。但由于加工误差和装配误差的存在,以及大视场短焦距镜头所引起的

作者简介:柏旭光(1983-),男,博士研究生,主要从事光电测量与嵌入式系统研究。E-mail:bxg_1212@163.com

收稿日期:2009-07-07;修订日期:2009-08-14

彗差、像散、像曲和畸变等像差的影响,光学系统与理想的小孔透视模型有一定的差别,使得目标在像面上实际所成的像与理想成像之间存在不同程度的非线性光学畸变。为了提高测量系统的测量精度,必须对大视场光电测量系统的成像畸变进行修正。

光电测量系统的几何畸变校正方法包括实验法和基于图像的数字校正方法^[1-4]。实验法是借助实验仪器,测出不同视场处的畸变量进行修正;基于图像畸变校正可归纳为综合标定法和垂轴法。综合标定法将非线性畸变的求解和测量装置的内、外参数求解混合在一起,不仅需要控制点的物方坐标,而且求解过程复杂,很难获得满意的精度,并且当检测首尾的位置改变后需要重复求解。垂轴法让光学系统光轴垂直于网格标定板,认为实际图像是标定板缩放加几何畸变形成,从而确定畸变系数,但实际操作中很难严格达到光轴垂直于标定板的条件,近似条件下求得的与测量设备方位元素相关的畸变系数往往与实际相差很大。

BP神经网络的优点在于,在无须知道数学模型的情况下,可以很好地逼近任意非线性连续函数。这一特点与非线性光学畸变有着极为相似的内在机理。本文利用专门设计的大视场线阵 CCD 光电测量系统畸变校正装置,对获得的测量数据利用 BP神经网络的方法进行标定校正,建立了整个视场畸变校正的数学模型,从而能减少因数学模型的不完善而带来的系统误差,有利于提高光点测量系统的测量精度。

2 畸变光学原理

根据高斯光学理论,由于自然点发出的光束中,远离近轴区的不同视场的主光线在系统中的传播光路偏离理想途径,与高斯像面不再交于理想成像点,使得交点的高度不再等于理想像高,其差别就是视场的畸变。畸变是视场的函数,不同视场的实际垂轴放大率不同,畸变也不同。

光学检测系统在 CCD 上的成像过程,实际上就是将空间三维场景变换为二维平面图像的过程。根据畸变的产生原理,在图像传递函数中可以消除系统的线性畸变,则图像畸变只包含有垂轴几何畸变。由像差理论可知,对于已知结构的光学系统,当物距和入瞳位置给定时,光学系统的几何畸变像差主要取决于视场。导致垂轴几何畸变的因素很多,主要

包括3类^[2-3]:①成像系统镜头的径向畸变,主要由透镜的径向曲率变化引起;②偏心畸变,主要由成像系统各组透镜不同轴引起,包括径向和切向畸变;③与图像传感器及处理电路有关的畸变,主要是由于采样方向不同及像平面与系统光轴不垂直导致。通常认为,在短焦距大视场光学系统的垂轴畸变中,径向畸变起主要作用,切向畸变相对影响较小,因此主要是校正径向畸变。

对于短焦距大视场线阵 CCD 光电测量系统,可以通过重心法确定采集到的圆目标中心位置。以 f 表示光学系统的标定焦距; h 表示物高; h' 表示目标在线阵 CCD 上的实际成像高度; R 为目标距离光学系统中心的距离,即物距; t 为理想像高与实际像高的比值,即畸变参数。则可以得到下式:

$$t = \frac{h \cdot f}{R \cdot h'} \quad (1)$$

3 基于 BP 神经网络的畸变校正

3.1 BP 神经网络原理

BP神经网络是应用非常广泛的多层前馈神经网络,它可以处理难以用数学模型描述的系统,具有很强的非线性映射能力及根据具体问题灵活处理的柔性网络结构。其算法的基本思想是根据样本的期望输出与实际输出间的平方误差,利用梯度下降算法,从输出层开始通过隐层向输入层逐层修改权值。已经证明,若多层前馈神经网络隐层节点可自由设定,则它可以实现任意精度近似任何连续函数^[4-7]。

3.2 基于 BP 神经网络的畸变校正

由 BP神经网络的基本原理可以知道,我们可以通过样本数据的训练建立输入层和输出层之间的映射关系,而无须知道输入层与输出层之间精确的数学关系。而畸变校正的根本目的在于建立实际测量值与校正结果(理论值)之间的映射关系。因此,我们可以把实际测量值作为输入,校正结果作为输出,通过由畸变校正装置获得的样本数据进行训练,从而建立整个视场畸变校正的数学模型,如图1所示。

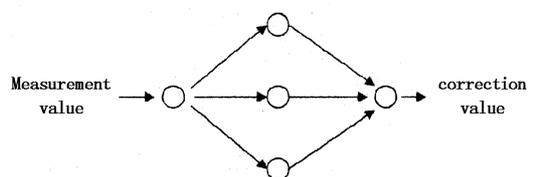


图1 三层 BP 神经网络模型

Fig. 1 three-layer BP neural network model

如何获得理论值是我们建立模型的基础。由于

近轴小视场范围内的畸变很小,根据实际测试的物距和标高情况及理论畸变系数,计算设定近轴理想畸变系数为 1.0004,根据光学系统成像公式可以求得物平面距离光学系统中心的距离 R ,即:

$$R = \frac{h \cdot f}{h' \cdot t} = \frac{h \cdot f}{n \cdot l \cdot t} \tag{2}$$

其中, h 为标定的物高; f 为光学系统的焦距; h' 为物高在线阵 CCD 上的实际成像高度; t 为畸变校正系数; n 为像高在线阵 CCD 上所占的像元数目; l 为像元尺寸。以求得的 R 作为标定物距,根据公式(1)就可以计算出其他标定点的畸变校正系数,从而得到相应的理论像高。

4 实验及分析

4.1 样本数据的获取

由于测量系统的测量范围大,必须采用大视场、短焦距的像方远摄光学系统。实际测量设备的有效视场角范围为 $2\omega = 70^\circ$,为了减小畸变对系统测量精度的影响,必须通过畸变校正装置对系统进行精确标校,标校后在算法中进行畸变补偿,根据在线阵 CCD 上的实际成像位置恢复目标的准确位置。为此设计了一套专用畸变校正装置,如图 2 所示,在一方钢管上安装 11 个等间距目标点,使用两台经纬仪交会测量出其实际间距,误差不大于 0.1 mm。该工装除了按设计要求进行加工外,在进行测试前要进行调平,保证其与水平面垂直,然后用两台莱卡经纬仪组成的三坐标标定系统进行标校。由旋转机构带动光学系统对畸变检测装置上的目标点进行扫描测量,成像于光学系统后部的线阵 CCD 上。在系统安装过程中,旋转机构的旋转中心需要和测量光学系统的主点重合,以达到最佳的校正效果。

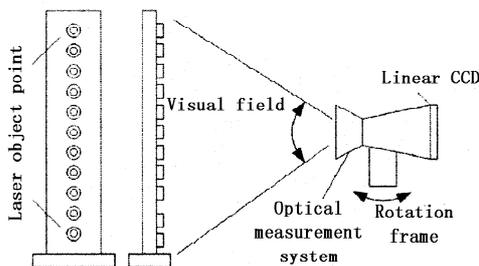


图 2 光学系统畸变测量装置
Fig.2 device for detecting optical system distortion

畸变检测及校正过程为:①基于物方过光心的直线成像到像面后仍为直线的原理,标定出光学系统的主点和测量装置的中心点(即第六个目标点)一致;②基于近轴缩放图像上畸变系数 t_0 ,定出实际

物距,并确定相对中心目标点每组对称目标的畸变系数 t_1, t_2, t_3, t_4 ;③把测得的 11 个目标点成像的实测位置与理论位置数据作为 BP 神经网络的训练样本进行训练,建立整个视场畸变校正的数学模型。

表 1 物高、对应测量、理论像元数和校正值
Tab.1 parallelism value object, pixel number of measurement, theory and correction

No.	Object height/mm	Theory pixel	Measurement pixel	Correction pixel
1	500.207	1456.183	1453.341	1456.398
2	400.189	1164.983	1162.771	1165.009
3	300.255	873.9323	872.5926	874.3179
4	200.238	583.1462	582.5926	583.4269
5	100.110	291.3365	290.9463	291.4786
6	0	0	0	0.000315
7	100.161	291.3965	290.5762	291.1247
8	200.191	582.8253	580.8875	582.5035
9	299.897	873.4897	870.9472	873.1983
10	400.038	1165.276	1162.629	1164.866
11	499.892	1456.000	1452.813	1455.870

4.2 实验结果

用一个焦距为 30.02 mm 的光电测量系统,通过上述畸变检测过程得到的测量值与理论值实验数据如表 1 中第 3 列和第 4 列所示,这些数据作为训练 BP 神经网络的样本数据。在神经网络的训练中,隐层传递函数选择 tan sig,输出层选择 pureline,并用动量法改进 BP 算法,经过实验测试,确定采用单隐层数为 5 的网络结构。网络训练结果如表 1 中第 5 列,训练误差曲线如图 3 所示。结果表明,相对于校正前 2.07263 pix 的测量方差,校正值与理论值已非常接近,方差只有 0.27238 pix。

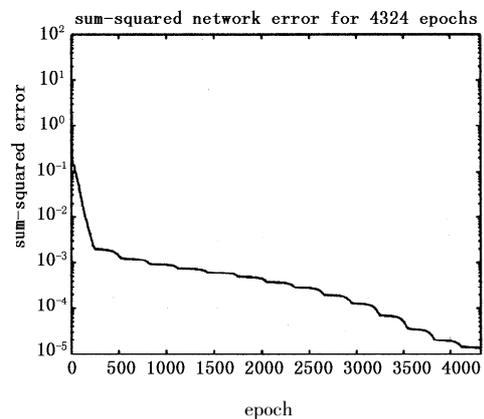


图 3 误差随训练次数的变化
Fig.3 relation between error and training times

对一物高为 200.115 mm 的目标进行了实验测量,目标经过该光电测量系统成像在线阵 CCD 上,实际测得所占像元数目为 577.5000,其理论所占像元数为 582.5900,按照网络训练的结果进行计算,补偿后其所占像元数目为 582.0156,校正前的畸变误差为 -2.080 mm,经过校正后,畸变误差只有 -0.104 mm,使系统整体检测精度从 1.039% 提高到 0.052%。

4.3 误差分析

影响畸变校正及系统测量精度的主要误差因素有^[4]:

1) 线阵 CCD 的分辨率。它对实际像高的测量精度有着直接影响,一般采用高分辨率,同时因硬件分辨率造成的像面像素点的定位误差可以通过软件算法进一步减小,使其达到亚像素级。

2) 目标点在线阵 CCD 上的中心定位。在系统畸变模型建立的神经网络学习以及系统测量工作过程中,目标点在 CCD 上的中心定位精度是影响测量精度的主要原因,校正装置选用圆形目标点正是基于这方面的考虑,因为圆形对图像的阈值不敏感,且特征点坐标容易确定,可以比较容易得到亚像素级精度。

3) 经纬仪测角精度。它直接影响标定物高的测量精度,从而影响理论像高的计算,对训练样本数据的准确度产生影响。

4) 训练样本和网络算法。合理的目标点数目和分布,从理论上讲采样密度的依据是香农定理,在实验中受条件限制没有进行具体研究,同时选择合适的隐层神经元数目和传递函数是学习算法的关键。

5 结论

针对大视场光电测量系统由于畸变引起的测量误差问题,设计了一套畸变校正装置,利用 BP 神经网络方法对通过校正装置获得的畸变标定数据进行处理,建立了整个视场畸变校正的数学模型。实验结果表明,BP 神经网络方法能够在无须精确给出畸变数学模型的情况下,对畸变模型进行良好的逼近,实现了高精度校正。由于该畸变校正装置的目标点数量有限,所获得的训练样本数据量也有限,对于校正精度会有一些影响,同时如何合理确定隐层节点数目、转移函数类型等网络结构参数还需要进一步进行实验研究。

参考文献:

- [1] 史泽林,康皎,孙锐. 基于 BP 神经网络的大视场成像校正方法[J]. 光学·精密工程,2005,13(3):348-353.
Shi Z L, Kang J, Sun R. BP NN-based method for lens distortion correction of large-field imaging[J]. Opt. Precision Eng., 2005, 13(3): 348-353. (in Chinese)
- [2] 凌伟,王志乾,高峰端. 光电测量系统畸变的实时数字校正[J]. 光学·精密工程,2007,15(2):277-282.
Ling W, Wang Zh Q, Gao F D. Real time digital correction for distortion in photoelectric measuring system[J]. Opt. Precision Eng., 2007, 15(2): 277-282. (in Chinese)
- [3] 乔彦峰,高峰端,王志乾,等. 基于三次拟合方程畸变校正的光电测量系统[J]. 光电工程,2008,35(6):28-31.
Qiao Y F, Gao F D, Wang Zh Q, et al. Distortion correction for the photoelectricity measuring system based on the cubic fitting equation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(6): 28-31. (in Chinese)
- [4] 俞东宝,苏真伟,晏开华. 一种新型机器视觉系统及其图像矫正算法探讨[J]. 激光与红外,2008,38(11):1173-1176.
Yu Dong-bao, Su Zhen-wei, Yan Kai-hua. A New Type of Machine Vision Systems with Algorithm for Image Correction[J]. Laser&Infrared, 2008, 38(11): 1173-1176.
- [5] 蔡盛,李清安,乔彦峰. 基于 BP 神经网络的姿态测量系统摄像机标定[J]. 光电子·激光,2007,18(7):832-834.
Cai Sh, Li Q A, Qiao Y F. Camera calibration of attitude measurement system based on BP neural network[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2007, 18(7): 832-834. (in Chinese)
- [6] 王自强,李银妹,楼立人,等. BP 神经网络用于光镊力的非线性修正[J]. 光学·精密工程,2008,16(1):6-10.
Wang Z Q, Li Y M, Lou L R, et al. Application of BP neural network to nonlinearity correction of optical tweezer force[J]. Opt. Precision Eng., 2008, 16(1): 6-10. (in Chinese)
- [7] 郑逢勋,吉书鹏. 一种改进的神经网络非均匀性校正算法[J]. 激光与红外,2008,38(9):937-938.
Zheng F X, Ji S P. An Improved Nonuniformity Correction Algorithm for IRFPA Based on Neural Network[J]. Laser&Infrared, 2008, 38(9): 937-938.