

基于 BP 神经网络的姿态测量系统摄像机标定

蔡 盛^{1,2*}, 李清安³, 乔彦峰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 130023; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 北京华北光学仪器有限公司, 北京 100050)

摘要:针对摄像机标定过程中复杂的成像和畸变模型,利用误差逆传播(BP)神经网络对复杂非线性映射关系的强大逼近能力,对姿态测量系统中的摄像机进行隐式标定,建立了姿态测量中三维空间目标特征点与它在图像平面上像点间的映射关系,使姿态测量系统无须进行复杂的摄像机标定,直接恢复目标特征点的三维信息,从而计算得到目标姿态信息。结果表明,该方法对于空间点坐标恢复的均方根误差小于 0.015 mm,可以获得较高的精度。

关键词:姿态测量; 摄像机标定; 误差逆传播; 误差逆传播(BP)神经网络

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2007)07-0832-03

Camera Calibration of Attitude Measurement System Based on BP Neural Network

CAI Sheng^{1,2*}, LI Qing-an³, QIAO Yan-feng¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033,

China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Beijing Huabei Optical Instrument Company, Beijing 100050, China)

Abstract: For the complicated models of image formation and lens distortion that exist in the camera calibration, cameras are calibrated implicitly by using BP neural network because it is able to fit the complicated nonlinear mapping relation. And the mapping relationship between objects under 3-D coordinate and pixels under image coordinate system is set up, so the 3-D information can be reconstructed, then the tri-dimensional gesture can be obtained. Experimental results show that the root mean square error(RMSE) of space coordinate reconstruction is less than 0.015 mm, and the proposed calibration method based on BP neural network could obtain high accuracy.

Key words: attitude measurement; camera calibration; error back propagation; error back propagation(BP) neural network

1 引 言

目前,在靶场试验中,飞机、导弹和卫星等飞行目标是作为点目标处理的,要获得它们的姿态信息主要是通过遥测设备和陀螺仪。通过光测图像来获得目标姿态信息是近年研究的热点,摄像机的标定是其中重要且难度大的步骤^[1]。摄像机标定技术大体可以归结为传统的摄像机标定方法和摄像机自标定方法两类。前者需要在场景中放置标定参照物,利用其上一些点的已知三维坐标和它们的图像点坐标,计算摄像机的内外参数;而后者则是利用图像序列中的约束关系来计算摄像机模型的参数^[2]。在某些特定领域,可以通过计算中间参数而不必确定摄像机的物理参数的方法进行标定,即隐式标定^[3]。人工神经网络与摄像机的隐式标定具有极为相似的内在机理,借助人工神经网络方法来标定姿态测量系统中的摄像机,不需要建立摄像机成像的数学模型,从而能减少因数学模型的不完善而带来的系统误差,有利于提高姿态测量精度。本文利用误差逆传

播(BP)神经网络完成了空中目标姿态测量系统摄像机标定,建立了姿态测量中三维空间目标特征点与它在图像平面上像点之间的映射关系,使姿态测量系统无须进行复杂的摄像机标定,直接恢复目标特征点的三维信息,从而计算得到目标姿态信息。

2 姿态测量原理

光电经纬仪成像系统中,大多采用透视投影模型。图 1 为目标姿态测量系统的数学模型,不失一般性,以两测站坐标系连线的中点作为目标发射坐标系的原点 O_F ,垂直于水平面指向天顶为发射坐标系的 Y_F 轴的正向, $\overline{O_{h2}O_{h1}}$ 为发射坐标系 X_F 轴的正向, O_{h1} 、 O_{h2} 分别是两测量坐标系的原点, X_F 、 Y_F 和 Z_F 构成右手坐标系,两测量坐标系的坐标轴分别和发射坐标系的坐标轴平行。测量时 2 台经纬仪的高速摄像机捕获目标,此时,目标分别成像于 2 台经纬仪的摄像机上,摄像机采集目标视频信号后送至微机信号处理系统将视频信号转换为全数字信号

进行图像处理,从而实时提取出目标像的中轴线矢量,中轴线和两测量站的坐标原点分别形成一平面,求得这2个平面相交的直线在发射坐标系下的方程也就是唯一确定了目标在空中的俯仰角和偏航角的姿态信息。这也是交会测量的基本原理。

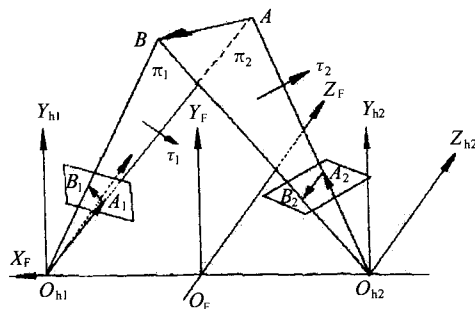


图1 目标姿态测量系统的数学模型

Fig. 1 Math model of attitude measurement system

3 基于BP神经网络的摄像机标定

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。BP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,利用梯度下降法,从输出层开始逐层修改权值。已经证明,若多层前馈神经网络隐层节点可自由设定,则它可实现任意精度近似任何连续函数^[4]。

摄像机标定是要确定空间坐标系中物体点与它在图像平面上像点间的相应关系。针孔模型是摄像机标定研究的基本模型,但由于其没有考虑成像过程中的一些线性或非线形畸变,使标定精度受到了很大影响。为此,许多研究者设计了各种摄像机畸变模型^[5~7],考虑了更多的畸变影响,但这同时也导致了更为复杂的数学方程,使计算费时费力。而基于BP神经网络的摄像机标定方法,很好地利用了BP神经网络的非线性映射能力和灵活处理的柔性网络结构,避免了建立复杂的摄像机畸变模型。

基于BP算法的单隐层神经网络模型拓扑结构包括输入层、隐层和输出层,BP网络能够学习大量的模式映射关系,而不需要任何已知的数学函数知识描述输入、输出模式间的映射,将输入模式映射到期望的输出模式,只需要用已知的模式对网络进行训练,通过学习网络就具有了这种映射能力。因此,利用BP神经网络直接实现图像坐标系中像点与世界坐标系中空间点的映射关系是可行的,如图2所示。

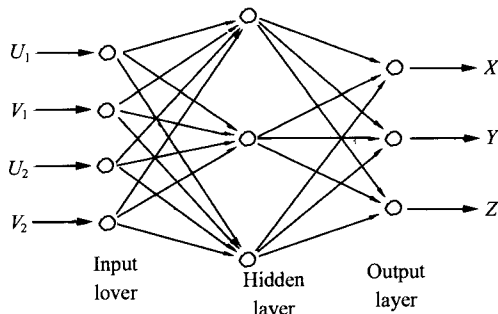


图2 3层BP神经网络模型

Fig. 2 Three-layer BP neural network model

4 实验及分析

4.1 样本数据的获取

由于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的标定精度,实验中采用圆形靶标来进行摄像机标定。如图3所示的标定板是由激光打印机输出的,图片质量好,30个圆形的白色的标记点及其中心的黑色十字丝清晰可辨、对比度好,将打印纸粘贴在平板玻璃上,并将其放置在摄像机前端2~3 m处,白色的定标点的直径为1 mm,它成像在CCD的靶面上占2~3 pixel,每个圆点的中心标有宽度为50 μm的黑色的十字丝作为电子经纬仪视轴瞄准标记点的基准。CCD相机通过固定板固定在电子经纬仪视轴的上方。如图4所示,通过双经纬仪交会测量来获得定标点的空间坐标,空间任意点的坐标为

$$\begin{cases} x = L(\operatorname{tg}\alpha_1 + \operatorname{tg}\alpha_2)/(\operatorname{tg}\alpha_1 - \operatorname{tg}\alpha_2) \\ z = (x - L)\operatorname{tg}\alpha_1 \\ y = z\operatorname{tg}\lambda_1/\sin\alpha_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:2L为基线长; α_1 、 λ_1 、 α_2 和 λ_2 分别是 O_1 、 O_2 站经纬仪测得目标M的方位角、俯仰角, α_1 、 $\alpha_2 \in (-\pi/2, 3\pi/2)$ 均以全局坐标系的 X_F 轴正向为零位,经纬仪的顺时针为增量方向, λ_1 、 $\lambda_2 \in (0, \pi)$ 均以水平面为零位,即平行于全局坐标系的 X_F-Z_F 平面为零位。

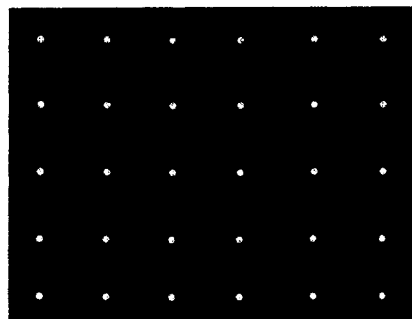


图3 标定板样图

Fig. 3 Calibration board sample

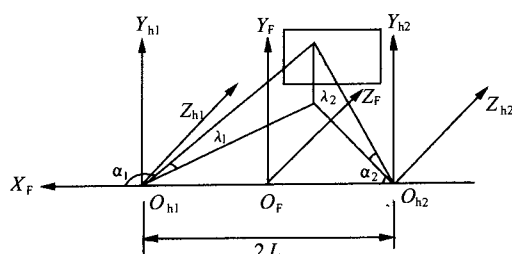


图4 双经纬仪交会测量

Fig. 4 Bino-theodolites intersection measurement

通过CCD相机可以得到的30个定标点的图像坐标,然后通过电子经纬仪I、II交会测量计算可以得到它们的空间坐标,即得到所需要的样本数据。

4.2 神经网络的参数设置及训练

在神经网络的训练中,隐层传递函数用 tan sig,输出层传

递函数用 purelin,并用动量法^[4]改进 BP 算法,经过实验测试,确定用单隐层数为 6 的网络结构。采用样本分离法^[4]检验网络的泛化能力,选择 8、11、15、16、20 和 23 等 6 个点作为测试集,其他 24 个点作为训练集。

4.3 实验结果

考虑到摄像机线性标定方法的简单性和快速性^[8],将其作为对比。利用这两种方法对提供测试的 6 个已知空间点进行了三维恢复。将每点的均方根误差(RMSE) P_e 和整个测试点集的 RMSE R_e 作为评价指标,计算公式分别为^[9]

$$P_e = \sqrt{\frac{(x-x_w)^2 + (y-y_w)^2 + (z-z_w)^2}{3}} \quad (2)$$

$$R_e = \sqrt{\frac{P_{e1}^2 + P_{e2}^2 + \dots + P_{eI}^2}{I}} \quad (3)$$

式中: x_w, y_w, z_w 为测试点的真实坐标; x, y, z 为 BP 网络计算的坐标值; P_{ei} 为第 i 点的 RMSE; I 为测试点总数。

最后确定的网络结构为 4-6-3,对测试集空间点坐标恢复的效果如图 5 示,空间点坐标恢复 RMSE 见表 1,2 到 6 列为测试点集中单个点的 RMSE,最后一列为 2 种不同方法下整个测试点集的 RMSE。从表可看出,基于 BP 神经网络的方法可以很好地对姿态测量系统进行摄像机标定, RMSE 在 0.015 mm 左右,精度高于线性标定方法。

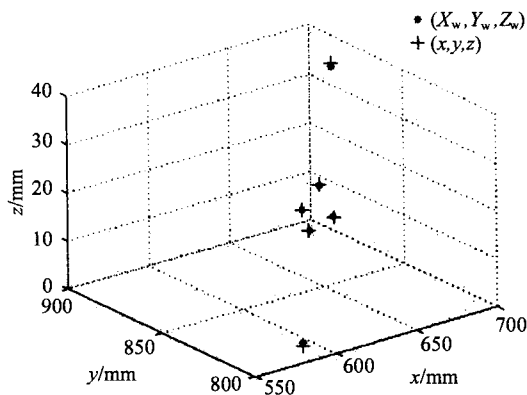


图 5 空间点坐标恢复效果图

Fig. 5 Effect graph of space coordinate reconstruction

表 1 各种方法下空间点坐标恢复 RMSE

Tab. 1 RMSE of space coordinate reconstruction

	Unit: mm						
	8	11	15	16	20	23	R_e
Linear calibration	0.1061	0.0986	0.1028	0.0913	0.1153	0.1217	0.1064
BP neural network	0.0180	0.0147	0.0103	0.0065	0.0163	0.0181	0.0146

8,11,15,16,20,21;Number of the test combination; R_e ;RMSE of the total test combination

8, 11, 15, 16, 20, 21; Number of the test combination; R_e ; RMSE of the total test combination

4.4 精度分析

影响摄像机标定精度的主要因素有^[10]:

1) CCD 摄像机和图像采集卡的分辨率。它对标定点在空间的测量精度影响较大,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通过软件补偿进一步减小,使其达到亚像素级。

2) 特征点像斑的中心定位。在系统学习和测量 2 个步

骤中, CCD 像面上特征点像斑的中心定位精度是影响测量精度的主要原因,实验中选用圆形靶标正是基于这方面的考虑。

3) 电子经纬仪的测角精度。它直接影响样本中标定点空间坐标测量精度。

4) 训练样本和网络算法。合理标定点数目和分布,从理论上采样密度的依据是香农定理,实验中受条件限制没有进行具体研究,但选择合适的传递函数是学习算法的关键。

5 结 论

人工神经网络能够实现对复杂非线性映射关系的高度逼近,为姿态视觉测量系统的建模提供了一种有效的方法。该方法不用考虑透镜畸变、环境因素等带来的影响,能减小因数学模型的不完善带来的误差,有利于提高测量精度。应用 BP 神经网络的方法,建立了姿态测量中三维空间目标特征点与它在图像平面上像点间的映射关系,使姿态测量系统无须进行复杂的摄像机标定,直接恢复目标特征点的三维信息,从而计算得到目标姿态信息。结果表明,该方法可以获得较高的精度。

参考文献:

- [1] LI Yong-bin, ZHANG Chang-bing. A new method to get tridimensional gesture of flying target[J]. *Laser Technology* (激光技术), 2003, 27(3): 185-189. (in Chinese)
- [2] LIU Li-shuang, ZHANG Yao, LU Hui-qing. Calibration method for the two-dimensional image measurement system by double-frequency laser[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2005, 16(11): 1355-1358. (in Chinese)
- [3] WEI Guo-qing, SONG De-ma. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(5): 469-480.
- [4] WANG Wen-cheng. *Neural network and its application on auto engineer*[M]. Beijing: Bit-Press, 1998.
- [5] Weng J, Cohen P, Herniou M. Calibration of stereo cameras using a non-linear distortion model[A]. *International Conf on Pattern of Recognition*[C]. 1990, 246-253.
- [6] Jarne Heikkila, Olli Silven. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[A]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*[C]. 1997, 1106-1112.
- [7] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE Trans on PAMI*, 1992, 14(10): 965-980.
- [8] CUI Yan-ping, LIN Yu-chi, ZHANG Xiao-ling. Study on camera calibration for binocular vision based on neural network[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2005, 16(9): 1097-1100. (in Chinese)
- [9] Yingen X, Guangzhao Z. On-line inspection and accuracy analysis for parts using neural network[A]. *SPIE*[C]. 1998, 3251: 168-178.
- [10] LU Nai-guang, FENG Di, DENG Wen-yi, et al. A new method for 3-D vision measurement system by the use of BP neural network[J]. *Huazhong Univ of Sci & Tech* (华中科技大学学报), 2002, 30(5): 19-21. (in Chinese)

作者简介:

蔡 盛 (1983—), 男, 湖北武穴人, 硕士研究生, 主要从事光电测量技术的研究。