

文章编号:1001-9944(2008)02-0001-04

## 遥操作机器人全局摄像机图像畸变校正

李 帅<sup>1,2</sup>,周亚金<sup>1,2</sup>,刘 晓<sup>3</sup>,梁华为<sup>1</sup>

(1.中国科学院合肥智能机械研究所,合肥 230031;2.中国科学技术大学 自动化系,合肥 230027;  
3.聊城锅炉压力容器检验所,聊城 252000)

**摘要:**遥操作中采用全局摄像机对机器人进行定位时存在图像畸变带来的误差,针对这一问题提出了一种图像畸变校正方法,该方法采用径向基神经网络(RBFNN)进行畸变校正,从而获得机器人在实际空间中的坐标位置。实验表明,该方法简单有效,适用于广角镜头带来的图像畸变校正,可以满足利用定位坐标进行路径规划的要求。

**关键词:**遥操作;图像畸变;定位

**中图分类号:**TP23 **文献标志码:**A

### Image Distortion Correction for Telerobots

LI Shuai<sup>1,2</sup>,ZHOU Ya-jin<sup>1,2</sup>,LIU Xiao<sup>3</sup>,LIANG Hua-wei<sup>1</sup>

(1.Institute of Intelligent Machines,Chinese Academy of Sciences,Hefei 230031,China;2.Department of Automation,University of Science and Technology of China,Hefei 230027,China;3.Liaocheng Boiler and Pressure Vessel Supervision and Inspection Institute,Liaocheng 252000,China)

**Abstract:**Errors exist in telerobot system,in which the robot is localized by global camera,because of image distortion. Aiming at correcting the error,an image distortion correction method is presented in this paper. In order to acquire the real coordinates of the robot,a radial basis function neural network (RBFNN)is applied for mapping the robot's coordinates in image plane to them in real space. Experiment shows that this presented method is effective and simple for image distortion correction introduced by wide-angle lens and is able to meet needs of path planning.

**Key words:**teleoperation;image distortion;localization

随着机器人遥操作技术的发展及 Internet 的普及,基于 Internet 的机器人遥操作逐渐成为当今遥操作研究的热点<sup>[1-8]</sup>。通过 Internet 控制移动机器人对家庭环境进行遥控也越来越得到关注,这种方式有望应用于家庭监护。进行基于 Internet 的遥操作研究如图 1,遥操作客户端通过台式机上运行的遥操作客户端软件进行远程遥控,遥操作者只需根据

全局摄像机反馈的视频图像,指定机器人的最终目标点。目标点坐标通过 Internet 发送到遥操作服务器端。在遥操作服务器端,一方面利用全局摄像机定位获得机器人当前位置坐标,并结合目标点坐标以及环境地图信息进行路径规划,并根据规划出的路径对机器人进行运动控制,控制量通过无线局域网发送给机器人,从而使机器人最终到达目标点。

收稿日期:2007-04-23;修订日期:2007-09-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60535010);国家自然科学基金面上项目(60475027)

作者简介:李帅(1983-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为移动机器人导航、机器人遥操作;梁华为(1966-),男,研究员,硕士生导师,研究方向为智能仪器仪表与移动机器人。

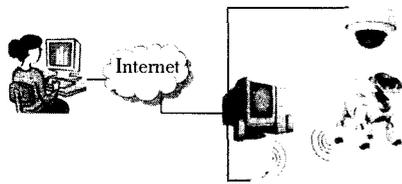


图1 基于 Internet 的遥操作系统原理图

Fig.1 Principle diagram of telerobot system based on Internet

本方法采用视觉定位来获得机器人的坐标。为了在较大的活动空间内都可以对机器人进行定位,需要摄像机的视野尽可能的大,因此采用具有大视野范围的广角镜头,但是,广角镜头带来了较大的图像畸变,如果不进行校正,视觉定位将会产生较大的误差,影响定位精度。

通过合理的设计广角镜头,可以在一定程度上减小畸变,但是由于各种加工误差、安装误差的存在,畸变仍然是不可避免的。并且,利用光学方法来校正畸变,往往会产生一个复杂的光学系统,这不但使设计难度加大,而且给制造工艺也带来一定的难度,提高了光学系统的制造成本。因此,对于要求比较高的广角镜头视觉系统,除了在镜头设计时进行光学校正外,还要通过软件对图像进行畸变校正。通过校正,可以对光学系统进行畸变补偿,有效地改善其图像的畸变失真,使得到的结果满足定位要求。Faig 直接非线性最小优化方法建立了空间点和像平面上点的映射函数关系,建立实际空间的控制点与其对应的图像像素坐标,根据残差目标检验函数最小作为准则进行优化,从而获得参数的值。由于这种方法参数很多,参数的确定比较麻烦,计算复杂<sup>[9]</sup>。Tsai 提出基于径向排列约束的两步法,这种方法分两步逐步对参数求解,每一步只需要求解线性方程组,算法过程简洁,收敛速度快,但是当像素分辨率较高时,运算精度比较低<sup>[10,11]</sup>;混合法考虑图像的径向和切向畸变,不需要设定参数的初始值,虽然该方法可以获得比较好的结果,但是算法的迭代运算耗费较多时间,实时性差<sup>[12]</sup>;文献[13]提出基于光学成像规律的工程校正方法,该方法简单有效地解决了径向畸变校正问题,它能够通过缩小网格间距、增加网格点数目,使测量误差控制在 1% 以内。

上述方法都是通过理论分析建立图像畸变的数学模型,对于模型描述比较准确的场合,可以获得很好的效果。但是,建模过程不可避免会忽略一些次要

因素的影响,这些因素会给最终模型带来一定的系统误差,有些时候这些误差是不可忽视的。神经网络是一种不基于模型的算法,具有非线性逼近的能力,只需要通过输入输出样本的训练就可以逼近模型的输入输出特性,非常适合这种精确的数学模型难以获得或求解的场合。本文采用径向基神经网络(RBFNN)逼近图像畸变模型,实现基于全局摄像机的移动机器人视觉定位,通过样本来训练该神经网络,优化网络权值,实现逼近目的。由于这种方法不依赖于畸变模型,因此,适用于多种畸变形式。

### 1 方法描述

一般认为光学镜头的径向误差是由于镜头中各组透镜的表面曲率存在的误差引起的,切向误差是由镜头中各组透镜的光学中心不共线引起的。径向畸变起主要作用,切向畸变相对影响较小,校正的主要目标应该是减小径向误差,工程上处理时经常只考虑径向误差的影响,而忽略切向误差。在此,也作此假设,忽略切向误差(图 2)。在像平面上,以像平面中心为坐标原点建立坐标系,直角坐标记为  $(x', y')$ ,对应的极坐标记为  $(\rho', \theta')$ 。在实际空间中,以与像平面上的坐标原点对应的点作为坐标原点,像平面上的坐标轴方向为对应的坐标轴方向,建立坐标系,直角坐标记为  $(x, y)$ ,对应的极坐标记为  $(\rho, \theta)$ 。

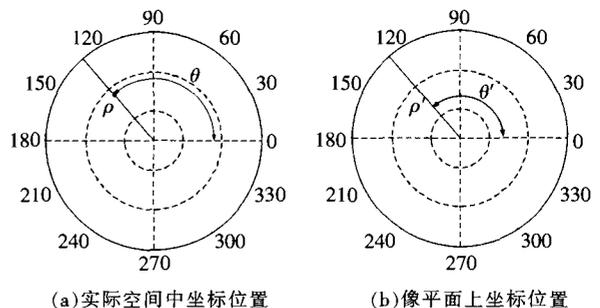


图2 实际空间中和像平面上坐标位置

Fig.2 Coordinates in world plane and image plane

其中:

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = \rho \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x' = \rho' \cos \theta' \\ y' = \rho' \sin \theta' \end{cases} \quad (2)$$

由于不考虑切向畸变,对于实际空间和像平面上对应的点,有:

$$\theta = \theta' \quad (3)$$

由式(2)可得:

$$\begin{cases} \rho' = x'^2 + y'^2 \\ \theta' = \arctan \frac{y'}{x'} \end{cases} \quad (4)$$

计算步骤描述如下:

**Step 1** 根据公式(4)计算像平面上机器人对应点的极坐标 $(\rho', \theta')$ 。

**Step 2** 根据公式(3)确定机器人在实际空间中的 $\theta'$ 。

**Step 3** 将 $\rho'$ 作为神经网络的输入得到输出 $\rho$ 。

**Step 4** 根据公式(1)利用 $(\rho, \theta)$ 计算 $(x, y)$ 。

在 step 3 中,需要利用神经网络实现从输入 $\rho'$ 到输出 $\rho$ 的映射,神经网络的逼近效果决定着本方法的精度,下面进行详细讨论。

## 2 神经网络畸变校正

已经证明,一个三层的径向基神经网络能够以任意精度逼近任何非线性函数<sup>[14]</sup>。虽然,在理论上采用三层 BP 网络,隐节点函数为 Sigmoid 函数,输出节点函数采用线性函数,一样能以任意精度逼近任何非线性函数<sup>[15]</sup>。但由于与 RBF 网络使用的激励函数不同,其逼近性能也不相同,文献[16,17]已经证明,RBF 网络是连续函数的最佳逼近,而 BP 网络不是。并且,BP 网络的训练是一个很慢的过程,并且很容易陷入局部极小,而采用局部激励函数的 RBF 网络,网络训练速度快,并且其收敛性易于保证<sup>[18]</sup>。基于上述考虑,此处采用 RBF 神经网络进行逼近。

### 2.1 网络结构的确定

按照上述分析,采用三层 RBF 神经网络逼近从 $\rho'$ 到 $\rho$ 的非线性函数。由于该非线性函数具有单输入单输出,因此 RBF 神经网络输入层具有一个神经元,输出层具有一个神经元。隐含层径向基函数选用高斯函数,输出层选用线性函数作为激活函数。在 RBF 网络训练中,隐含层神经元数量的确定是一个关键问题,数量太少则难以满足拟合精度的要求,数量太多则容易导致过拟合,影响泛化性能。为了获得恰当的隐含层神经元个数,这里采用的方法是:从 0 个神经元开始训练,通过检查输出误差使网络自动增加神经元。每次循环使用,使网络产生的最大误差所对应的输入向量作为权值向量,产生一个新的隐含层,然后检查新网络的误差,重复此过程,直到达到误差要求。

### 2.2 训练样本的选取

样本的选取对网络的训练结果起着至关重要的作用,好的样本需要具有代表性,这样才能保证即使在非样本点处,逼近误差不致过大。这里采用畸变轴径向等距的一系列点作为训练样本,在像平面上畸变图像对应的数据作为网络输入,在真实空间中的数据作为网络输入。训练时采集了 50 个样本点。

### 2.3 网络训练

用上述的样本点对网络进行训练,根据定位精度的要求,选取神经网络训练的均方根误差(RMSE)为 0.8cm。隐含层高斯函数的伸展系数的取值决定了不同类别的影响范围,必须慎重选择。经过试验,发现当系数为 1.1 时可以获得较好的效果。训练结果显示,当隐含层神经元个数为 12 时,可以满足 RMSE 不大于 0.8cm 的要求,此时 RMSE 为 0.73cm。

## 3 实验验证

为了验证本文所提方法的有效性,通过实验进行验证。在摄像机视野空间中选择实验样本,像平面上点的坐标输入 RBF 神经网络获得对应点在实际空间中的坐标估计值,通过在真实空间中实际测量可以获得对应点在实际空间中坐标的真实值。数据如表 1。从表中可以看出,对于靠近视野边界的点,该方法仍可以达到较高的校正精度,满足误差要求。

表 1 实验结果数据分析

Tab.1 Analysis of experimental result

| 实测坐标/m          | RBFNN 估计坐标/m    | 像平面上坐标/pixel | 误差/m  |
|-----------------|-----------------|--------------|-------|
| (1.400 0.000)   | (1.393 0.000)   | (148 0)      | 0.007 |
| (1.400 1.000)   | (1.406 0.999)   | (145 103)    | 0.006 |
| (0.000 1.000)   | (0.000 1.009)   | (0 108)      | 0.009 |
| (-1.400 1.000)  | (-1.406 0.999)  | (-145 103)   | 0.006 |
| (-1.400 0.000)  | (-1.393 0.000)  | (-148 0)     | 0.007 |
| (-1.400 -1.000) | (-1.406 -0.999) | (-145 -103)  | 0.006 |
| (0.000 -1.000)  | (0.000 -1.009)  | (0 -108)     | 0.009 |
| (1.400 -1.000)  | (1.406 0.999)   | (145 -103)   | 0.006 |

## 4 方法应用

本方法通过一组典型样本对 RBF 神经网络进行训练,从而获得满足一定精度要求的一组网络权值。当网络训练结束后,就可以对该组权值对应的神经网络进行逼近,实现图像畸变校正的目的。一般情况下,图像畸变校正一方面要进行几何畸变校正,另一方面要进行灰度畸变校正,但是,该方法旨在应用

于机器人视觉定位,因此不需要进行灰度校正。应用本文的方法进行实验(如图3),实验中以索尼公司的商业机器狗 AIBO 作为机器人平台,以配备有广角镜头的普通数码摄像头作为全局摄像机,对 AIBO 尾部红色 LED 中心进行定位。实验表明,本文的方法可以满足视觉定位的要求。

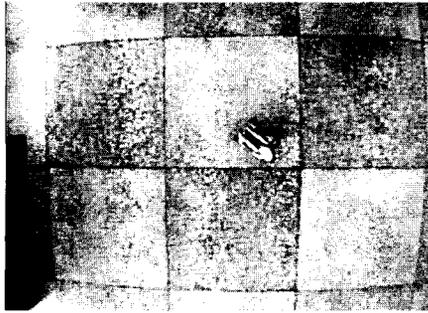


图3 对 AIBO 尾部红色 LED 定位

Fig.3 Localizing the red LED in the rear of AIBO

## 5 结语

本文提出了一种基于 RBF 神经网络的图像畸变校正方法,该方法不需要掌握图像畸变的数学模型,不会出现传统方法由于建模误差对定位精度带来的影响。并且该方法简单易行,便于实施,可以满足机器人定位的精度要求。为遥操作中局域自主控制创造了条件。

### 参考文献:

- [1] Hannaford B. A design for arm work for teleoperation with time delay [J]. *IEEE Trans. on Auto Conf.*1989,5(4):426-434.
- [2] Hannaford B. Performance testing of passive communication and control in teleoperation with time delay [C]// In *Proceeding of IEEE International Conference on Rob. And Auto.*1993,776-783.
- [3] Costas S,Tzafestas. Teleplanning by human demonstration for Vr-based teleoperation of a mobile robotic assistant [C]// In *Proceeding of IEEE International Conference on Robot and Human Communication*,2001,462-467.
- [4] Zhou Yajin,Meng M Q H *et al.* TFRC-PROBE:A transport protocol for teleoperation systems of mobile robots [C]// In *Proceeding of IEEE Conference on Information Acquisition*. 2006,1492-1496.
- [5] Peter Liu Xiaoping,Meng M Q H,Gu Jason,Yang S X,Hu Chao.Control and data transmission for internet robots [C]// In *Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation*,2003,1659-1664.
- [6] 周亚金,李帅,林子敬,孟庆虎,梁华为.一种用于移动机器人遥操作的传输协议[J]. *控制工程*,2008,15(2):47-51.
- [7] 汤宇松,刘景泰,卢桂章.利用远程网络技术的机器人遥操作系统分析[J]. *机器人*,2000,22(1):67-72.
- [8] 赵明国,赵杰,崔泽,蔡鹤皋.一种基于 Internet 的遥操作机器人系统—Telerobot[J]. *哈尔滨工业大学学报*,2001,33(1):8-12.
- [9] Faig W. Calibration of close-range photogrammetric systems: mathematical formulation [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*,1975,41:1479-1486.
- [10] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]// In *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami Beach,FL,USA,1986,6:364-374.
- [11] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal of Robotics Automation*,1987,3(4):323-344.
- [12] 姜大志,郁倩,王冰洋,等.计算机视觉成像的非线性畸变研究与综述[J].*计算机工程*,2001,27(12):108-110.
- [13] 曾峦.短焦距摄像机镜头的畸变校正方法[J].*装备指挥技术学院学报*,2002,13(2):53-55.
- [14] Chen T,Chen H. Approximation capability to functions of several variables,nonlinear functions and operator by radial basis function neural network [J]. *IEEE Trans on Neural Networks* 1995,(6):904-910.
- [15] Funahashi K. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks [J]. *Neural Networks*,1989,2(3):183-192.
- [16] Poggio T,Girosi F. Networks for approximation and learning [J]. *Proceedings of the IEEE*,1990,78(9):1481-1497.
- [17] Girosi F,Poggio T. Networks and the best approximation property [J]. *Biological Cybernetics*,1990,63(3):169-176.
- [18] Moody J,Darken C. Fast learning in networks of locally-tuned processing units [J]. *Neural Computation*,1989,(1):281-294.

欢迎订阅《自动化与仪表》杂志 (月刊)

邮发代号:6-20 定价:8.00元