

图像几何畸变校正方法

范 勇, 张佳成, 陈念年, 周敬滨, 王俊波

FAN Yong, ZHANG Jia-cheng, CHEN Nian-nian, ZHOU Jing-bin, WANG Jun-bo

西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010

Department of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

E-mail: fanyong@swust.edu.cn

FAN Yong, ZHANG Jia-cheng, CHEN Nian-nian, et al. New method for image geometric distortion correction. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(29): 194-197.

Abstract: There is often some extent distortion existing in the short focal length and wide angle lens camera which is used for machine vision detection, in order to carry out high precision measurement, the lens distortion must be corrected first. A new method for distortion correction is proposed. It obtains the initial distortion coefficients by combining the optical image theory with distortion correction model at first, then the optimization function is used to find the optimal distortion coefficients, cubic B-spline interpolation method is adapted for gray rebuilding at last. Experiments indicate that this method shows perfect results, the radial correction RMS is 0.45 pixel and the gray rebuilding RMS is 0.36 pixel.

Key words: image processing; geometric distortion; correction algorithm; gray rebuilding

摘 要: 在机器视觉检测中大视场短焦距摄像机镜头一般都存在一定程度的光学畸变, 在高精度测量中必须对摄像机镜头畸变进行校正。提出利用光学成像规律和镜头畸变校正模型相结合的畸变校正方法求出初始畸变系数, 然后通过优化目标函数求出最优畸变系数, 最后采用三次 B 样条插值对畸变图像进行灰度重建。实验结果表明该方法在不依赖摄像机内部参数的前提下, 校正后径向均方根误差为 0.45 个像素, 灰度重建后径向均方根误差为 0.36 个像素。

关键词: 图像处理; 几何畸变; 校正算法; 灰度重建

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.29.057 文章编号: 1002-8331(2009)29-0194-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391.1

1 引言

目前, 在航天和航空摄影、医疗以及各种高精度测量仪器上, 为获取更多关于目标景物的图像信息, 常采用大视场短焦距镜头。这类镜头在成像过程中一般都存在一定程度的光学畸变, 使成像图像的大小和形状发生了某些变化, 图像的质量下降, 给后面的图像分析和图像测量带来误差, 甚至造成误判, 因此必须对大视场短焦距摄像机镜头所造成的图像几何畸变进行校正。

对于摄像机镜头非线性畸变的校正算法可分为两类: 第一类是基于标定模板方法, 如采用点阵图、平面网格、同心圆环、西洋棋盘等, 根据模板上特征点的位置和其理想点的位置偏差来求取畸变系数; 若特征点空间坐标已知, 采用摄像机标定算法则可同时求出摄像机内外参数^[1-4]。第二类是不使用标定模板, 如基于畸变率^[5]、基于畸变等效曲面^[6]、基于测量设备^[7]等校正算法迭代或直接求出畸变系数。

基于标定模板的畸变图像校正分两步: 坐标变换和灰度重

建。坐标变换可以分为从畸变图像到理想图像的前向映射方法和从理想图像到畸变图像的后向映射方法; 而灰度重建目前有邻近插值法、双线性插值法和立方卷积插值法。邻近插值法精度不高, 立方卷积插值法精度高但运算量大, 双线性插值可以折中邻近插值法和立方卷积插值法。

大视场短焦距镜头的畸变为非线性畸变, 一般分成两个部分: 径向畸变和切向畸变^[8]。Tsai 已经证明: 对于大多数计算机视觉应用来说, 切向畸变可以忽略^[9]。另外, 许多的文献研究表明, 在机器视觉测量中只需要考虑低次项的畸变系数 k_1 ^[9-10]。该文详细分析了大视场短焦距镜头的畸变校正模型, 利用光学成像规律, 根据圆点在成像前后具有良好的保形性和圆点的质心坐标能真实地逼近样本点的坐标值, 在文献[10]的基础上, 提出了一种基于点阵模板的图像几何畸变校正算法。该算法克服了采用平面网格作和棋盘为标定模板时, 提取的特征点坐标常产生奇异值导致偏离真实坐标较大等缺点, 在不依赖摄像机镜头内部参数和简单的测量装置条件下, 有效地提高了畸变校正后

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.10676029, No.10776028); 四川省教育厅项目(the Research Project of Department of Education of Sichuan Province, China under Grant No.2006C074)。

作者简介: 范勇(1972-), 男, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要研究方向为机器视觉与可视化计算; 张佳成, 硕士研究生, 主要研究领域为计算机视觉; 陈念年, 男, 讲师, 主要研究方向为图像处理与软件工程; 周敬滨, 硕士研究生, 主要研究领域为计算机视觉; 王俊波, 男, 教授, 博士生导师。

收稿日期: 2009-03-26 **修回日期:** 2009-06-02

的图像质量。

2 径向畸变模型

图1是摄像机系统的成像模型, 它包含了4个坐标系, 其中 $x_w y_w z_w$ 表示世界坐标系, $x_c y_c z_c$ 表示摄像机坐标系, xy 表示图像平面坐标系, $x_f y_f$ 表示计算机帧存坐标系。在针孔成像模型下, 世界坐标系中的一点 $P(x_w, y_w, z_w)$ 通过摄像机镜头光心成像在图像平面的 $P_i(x, y)$ 处, $P(x_w, y_w, z_w)$ 在摄像机坐标系的坐标为 $P(x_c, y_c, z_c)$, 则针孔成像模型可表示为:

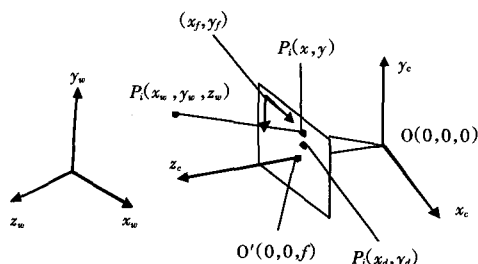


图1 摄像机几何成像系统

$$x = f \frac{x_c}{z_c}, y = f \frac{y_c}{z_c} \quad (1)$$

对于大视场短焦距镜头成像过程并不满足针孔模型, 使得图像平面上实际像点 $P_i(x_d, y_d)$ 偏离理想位置 $P_i(x, y)$ 。若给定一组畸变数据点 $P_i(x_d, y_d)$, 用畸变校正模型^[11]可获得无畸变的理想点 $P_i(x, y)$, 即:

$$\begin{cases} x = x_d + (x_d - c_x)(kr_d^2) \\ y = y_d + (y_d - c_y)(kr_d^2) \end{cases} \quad (2)$$

其中 (c_x, c_y) 表示摄像机镜头的光学中心, $r_d = \sqrt{(x_d - c_x)^2 + (y_d - c_y)^2}$ 。正如前面提到的, 公式(2)忽略了切向畸变, 同时只考虑了视场函数的初级畸变系数 k_1 。

3 径向畸变校正

为对摄像机镜头径向畸变进行校正, 必须求得畸变系数 k 。从公式(2)可知, 该方程是非线性的, 为简化求解过程, 利用光学成像的几个规律对畸变校正模型进行分析求解。

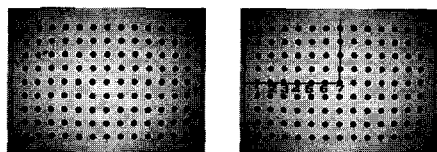
(1) 通过光心的直线成像后仍为直线^[10];

(2) 光轴中心附近畸变量最小;

(3) 垂直于光轴的物平面上两条长度相等的直线段, 在理想光学系统(无畸变)条件下成像在像平面上对应的两条线段长度相同。

3.1 光学中心计算

首先利用直线截取相等的方法^[12]获得良好的畸变图像, 使图像畸变大致关于图像几何中心点对称, 如图2(a)。用图像处理技术精确获得畸变图像边缘上圆点的中心坐标, 这里用圆点区域内的质心坐标作为圆点的中心坐标。分别在水平和垂直方



(a) 源畸变图像 (b) 特征点采样图

图2 畸变图像

向拟合各4条一元三次曲线, 求取每个方向的4条曲线拐点均值作为 CCD 的光学中心 (c_x, c_y) ; 然后在二维支架上移动标定模板, 使得离光心最近的圆点质心与 CCD 光中心 (c_x, c_y) 重合。

3.2 畸变系数的初始值求取

利用光学成像第一和第二个特性对畸变校正模型进行简化。水平过光心的直线成像后没有失真, 则在公式(2)中 $y_d = c_y$; 垂直过光心的直线成像后没有失真, 则 $x_d = c_x$ 。于是对畸变系数的求取可以在这两条相互垂直并过光心的直线上进行。利用第二和第三条特性, 可以分别在水平和垂直方向求出畸变系数 k_1 和 k_2 , 取它们的平均值 k 作为初始的畸变系数。即: 如果在没有畸变的情况下, 两条直线上的圆点间距应该是相等的。如图2(b)。在水平方向取7个点, 其中第7个点为光心点 (c_x, c_y) , 以 (x_0, y_0) 代替 (c_x, c_y) , 在水平直线上有: $x_2 - x_1 = \dots = x_7 - x_6$, 由公式(2)得:

$$\begin{aligned} x_{d2} + k_{11}(x_{d2} - x_0)^3 - x_{d1} - k_{11}(x_{d1} - x_0)^3 = \\ x_{d7} + k_{11}(x_{d7} - x_0)^3 - x_{d6} - k_{11}(x_{d6} - x_0)^3 \end{aligned} \quad (3)$$

由于 $x_7 = x_0$, 故可得:

$$k_{11} = \frac{x_{d7} - x_{d6} - x_{d2} - x_{d1}}{(x_{d6} - x_0)^3 + (x_{d2} - x_0)^3 - (x_{d1} - x_0)^3} \quad (4)$$

利用上述计算方法可在水平直线上计算出15个 k 值, 在垂直方向计算出6个 k 值。

$$k_1 = \frac{\sum_{j=1}^{15} k_{1j}}{15}, k_2 = \frac{\sum_{j=1}^6 k_{2j}}{6} \quad (5)$$

初始畸变系数为 k_1 与 k_2 的平均值:

$$k = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (6)$$

3.3 畸变系数的优化求解

为求得最佳的畸变系数, 设置目标函数 $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}$ 进行优化求解, ε_1 和 ε_2 表示如下:

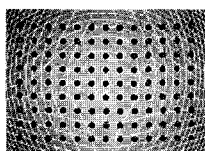
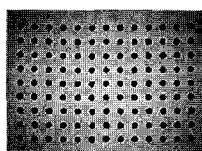
$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j=N} ((x_j - x_{d_j}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (x_i - x_{d_i}))^2}{N}} \\ \varepsilon_2 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j=N} ((y_j - y_{d_j}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (y_i - y_{d_i}))^2}{N}} \end{cases} \quad (7)$$

其中 ε_1 和 ε_2 分别为校正后水平和垂直均方根误差, ε 为径向均方根误差, N 为样本点个数。求出21个初始畸变系数 k_i 后, 对这些 k_i 值求出期望 μ 和均方根 σ , 在 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 范围内一定步长进行搜索, 直到目标函数 ε 满足设定的阈值 T 。

3.4 畸变图像重建

利用求出的畸变系数 k 代入公式(2)即可对畸变图像进行校正。然而不幸的是公式(2)所表示的坐标变换并不能完全覆盖校正后图像上的点, 会在校正后图像上产生一些点的灰度缺失, 如图3中白色的线条就是灰度缺失点。为获得良好的校正图像, 必须对校正后图像进行灰度重建, 即灰度插值。双线性插值和立方卷积插值都是后向映射函数, 不适用公式(2)从畸变图像到理想图像的坐标变换。为此, 对图3用加权线性插值进行灰度重建, 得到图4。校正的精度大大提高, 视觉效果良好。但仔细辨认图4, 会发现有些圆点经过插值后已经失真, 不再是规则的圆形, 这为后面的图像高精度测量带来误差。

为利用后向插值算法-立方卷积插值来提高插值精度, 详

图3 畸变图像上的
不完全映射图4 加权线性插
值校正

细分析了畸变校正模型,对公式(2)进行简单变换得:

$$r^2 = r_d^2 + 2kr_d^4 + k^2 r_d^6 \quad (8)$$

其中, $r = \sqrt{(x-c_x)^2 + (y-c_y)^2}$, $r_d = \sqrt{(x_d-c_x)^2 + (y_d-c_y)^2}$ 。

用卡丹(Cardano)公式解方程(10)得:

$$r_d = \sqrt[3]{\frac{r}{2k} + \sqrt{\left(\frac{1}{3k}\right)^3 + \left(\frac{r}{2k}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{r}{2k} - \sqrt{\left(\frac{1}{3k}\right)^3 + \left(\frac{r}{2k}\right)^2}} \quad (9)$$

于是重写公式(2)得:

$$\begin{cases} x_d = c_x + (x - c_x) \frac{r_d}{r} \\ y_d = c_y + (y - c_y) \frac{r_d}{r} \end{cases} \quad (10)$$

接下来用公式(10)做坐标变换,分别用双线性、一元立方、三次B样条进行灰度插值。

4 实验结果与分析

综上所述,摄像机镜头畸变校正算法流程如图5所示, ε_i 为目标函数, T 为阈值。在 VC6.0 环境下开发了具有畸变校正功能的应用程序,采用 Webcom001 数码通讯 M15 型摄像头为图像成像设备,视场角为 62° ,焦距为 3.6~6.0 mm 之间,图像分辨率为 320×240 。

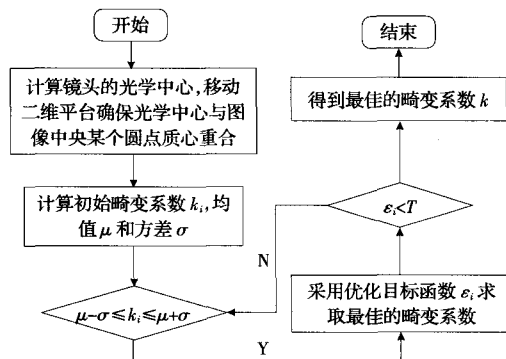


图5 相机校正流程图

首先根据图2(a)上边沿圆点中心坐标拟合水平方向和垂直方向各4条一元三次曲线,求拐点均值得光学中心坐标:(152.01, 118.21),然后移动标定模板使图像中心部位某圆点中心跟光学中心重合,质心法求取过光心并相互垂直的两条圆点带上的圆点中心坐标,采用公式(3)~(6)求取初始畸变系数 k_i ,如表1。

表1 初始畸变系数结算结果

名称	畸变系数 k_i (e-6)
水平畸变系数	1.813 627
垂直畸变系数	2.940 182
平均值	2.376 904
方差(RMS)	3.402 164

为定量评价该文提出的镜头畸变校正算法,采用图像中所有圆点质心坐标作为样本点,用水平方向、垂直方向和径向畸变误差均方根来评估,实验结果如表2所示。为评价光学中心的偏移对畸变系数的影响,在光心点的 9×9 邻域内求取畸变系数。从表2可以看出光心位置的偏移对畸变系数的求解影响比较大,因此在求解以前必须保证光学中心与标定模板图像中心部位的某个圆点中心重合。

表2 该文畸变校正方法评估

序号	光学中心	水平 ERMS	垂直 ERMS	径向 ERMS	畸变系数值
1	156.01, 118.21	0.401 419	0.289 155	0.494 720	2.526 904e-6
2	155.01, 118.21	0.377 805	0.288 188	0.475 173	2.526 904e-6
3	154.01, 118.21	0.359 282	0.287 936	0.460 425	2.516 904e-6
4	153.01, 118.21	0.344 349	0.290 847	0.450 742	2.516 904e-6
5	152.01, 118.21	0.335 733	0.294 434	0.446 551	2.506 904e-6

求得最佳畸变系数后,分别用双线性插值、一元立方插值、三次B样条插值等算法对畸变图像进行灰度重建,对图2(a)进行插值后如图5。从图5中可看出一元立方插值和三次B样条插值后的图像视觉效果良好,圆点规则,几乎没有失真;而双线性插值和加权线性插值后的图像都有不同程度的失真。为定量评价几种插值方法的优劣,采用图像样本点校正后圆点的质心与理想位置下圆点质心差值的均方根作为评价指标,实验结果如表3。

表3 重建误差实验结果

名称	水平 ERMS	垂直 ERMS	径向 ERMS
加权线性插值	0.398 113	0.722 160	0.824 626
双线性插值	0.455 763	0.549 378	0.713 818
一元立方插值	0.340 395	0.318 043	0.465 854
三次B样条插值	0.304 691	0.189 802	0.358 973

由表3知,三次B样条插值方法进行灰度重建的误差最小。径向 RMS 仅为 0.36 个像素。

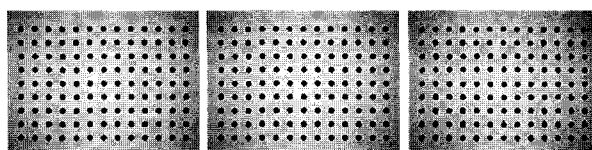


图6 灰度重建

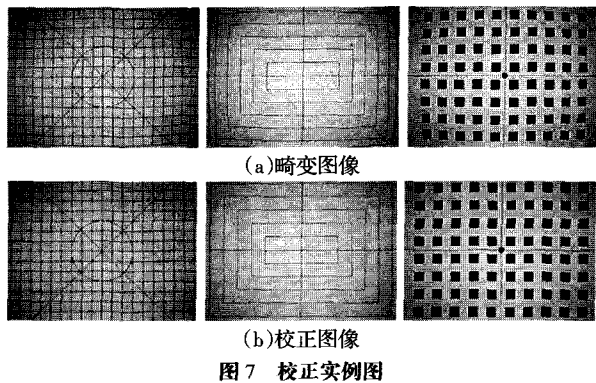
为评价该文提出的畸变校正算法性能,选取经典校正算法^[11]和文献[3]中的算法进行实验对比,用校正后水平 ERMS、垂直 ERMS、径向 ERMS、水平最大偏差和垂直最大偏差等5个指标评价畸变校正算法的优劣,取图像中所有圆点作为校正检验点,实验对比结果见表4。

表4 畸变校正算法实验对比

畸变校正算法	水平 ERMS	垂直 ERMS	径向 ERMS	水平最大偏差	垂直最大偏差
经典校正算法	0.29	0.29	0.41	1.37	0.88
MQ 校正算法	0.32	0.27	0.42	0.99	0.92
提出算法	0.30	0.19	0.36	0.84	0.58

由表4知,提出的图像几何畸变校正算法优于经典校正算法和 MQ 算法。

用标定好畸变系数和光学中心的摄像机对其他景物进行拍摄并进行校正,如图7所示。



影响镜头畸变校正精度的因素很多,大致有:光学中心估计误差、圆点中心定位误差、灰度重建误差、截取误差。因此要提高校正精度,可以从以下几个方面着手:(1)增密模板图像上的样本点,在拟合边缘曲线求拐点来估算光学中心将更加准确,用多点平均值求取无畸变理想图像的圆点距也将更精确。(2)用直方图统计求得合适阈值或者用分块自适应阈值把圆点分割出来。(3)采用神经网络插值再次减少灰度重建误差^[13]。(4)标定模板图在成像时并不能完全保证畸变图像具有良好对称性,可以在截取线段上画上等间距的刻度以减少截取误差。其中光学中心估计误差和圆点中心定位误差是主要误差来源。

5 结论

提出了一种基于点阵图模板的镜头畸变校正方法,结合光学成像规律和畸变校正模型,对畸变模型进行了一些变换,并采用三次B样条插值对校正后图像进行灰度重建,有效地提高了畸变图像校正的精度,减少了畸变图像灰度重建误差。首先用一元三次曲线求拐点来估算光学中心,简单精确;然后在过光心的两条相互垂直线上求取初始畸变系数,简便易懂;接着利用优化目标函数求取最佳畸变系数,精确高效;最后对畸变校正模型进行适当变换,并用三次B样条插值来进行灰度重建,使图像校正后视觉效果良好,灰度重建径向均方根误差大大降低。该方法简便、实用,不依赖摄像机镜头的内部参数和复杂的测量装置,校正后的校正均方根误差和灰度重建均方根

误差均达到亚像素级。该算法适用于大多数大视场短焦距镜头畸变校正,具有一定的工业推广价值。

参考文献:

- [1] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [2] 王占斌, 赵辉, 陶卫, 等. 广角镜头桶形畸变的样条函数修正方法[J]. 光电工程, 2008, 35(4): 140-144.
- [3] 马广彬, 章文毅, 陈甫. 图像几何畸变精校正研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(9): 45-48.
- [4] 郭永刚, 葛庆平, 冯平, 等. 一种基于控制点自动提取的图像畸变校正算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(2): 214-216.
- [5] 崔洪州, 孔渊, 周起勃, 等. 基于畸变率的图像几何校正[J]. 应用光学, 2006, 27(3): 183-185.
- [6] 韩广良, 宋建中. 一种基于畸变等效曲面的图像畸变校正[J]. 光学技术, 2005, 31(1): 122-124.
- [7] 郭羽, 杨红, 杨照金, 等. CCD 摄像系统镜头的畸变测量[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 279-282.
- [8] Lin J M, Xing M L, Sha D G, et al. Distortion measurement of CCD imaging system with short focal length and large-field objective[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43: 1137-1144.
- [9] 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 and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [10] 曾杰. 短焦距摄像头的畸变校正方法[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(2): 53-55.
- [11] Weng J Y, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [12] 朱日宏, 李建欣. 光学成像系统中非线性畸变的数字校正方法[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(4): 414-416.
- [13] Go Jinwook, Sohn Kwanghoon, Lee Chulhee. Interpolation using neural networks for digital still cameras[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2000, 46(3): 610-616.
- [11] Hu A. Cooperative time synchronization using spatial averaging[D]. Cornell University, 2007.
- [12] Palchaudhuri S, Saha A K, Johnson D B. Adaptive clock synchronization in sensor networks[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2004: 340-348.
- [13] Werner-Allen G, Tewari C, Patel A, et al. Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects[C]//Proceedings of 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, San Diego, 2005: 142-153.
- [14] Hong Y, Scaglione A. A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications[J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 2005, 23(5): 1085-1099.
- [15] Hu A, Servetto S D. On the scalability of cooperative time synchronization in pulse-connected networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2725-2748.

(上接 90 页)

- [6] Elson J E, Girod L, Estrin D. Fine grained time synchronization using reference broadcasts[C]//The 5th Symp on Operation System Design and Implementation, Boston, 2002.
- [7] Li Q, Rus D. Global clock synchronization in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55(2): 214-226.
- [8] Dai H, Han R. TSync: A lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks[J]. ACM Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(1): 125-139.
- [9] Xu Chaonong, Zhao Lei, Xu Yongjun, et al. Broadcast time synchronization algorithm for wireless sensor networks[C]//The 1st Conf on Sensing, Computing and Automation (ICSCA'06), Chongqing, 2006.
- [10] Xu Chaonong, Zhao Lei, Xu Yongjun, et al. A time synchronization improvement strategy for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(4): 514-523.