

文章编号 1004-924X(2008)02-0314-05

CCD 像素响应非均匀的校正方法

程万胜^{1,2}, 赵 杰¹, 蔡鹤皋¹

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 辽宁科技大学 电信学院, 辽宁 鞍山 114044)

摘要:分析了造成 CCD 像素灰度不均匀的原因,提出了一种基于最小二乘法的 CCD 非均匀校正算法。在不同辐照度下,采集每个像素的灰度值。用最小二乘法估计出辐照度和期望灰度值的对应关系。计算出每个像素的校正参数,形成 CCD 的校正矩阵。最后,对每个像素的实际灰度值进行校正,实现了在同一辐照度下,各像素灰度响应的一致性。校正前,各像素灰度值的最大偏差为 76.5;采用该方法校正后,像素的灰度值最大偏差只有 0.001 08。实验结果表明:该方法有效地校正了 CCD 像素响应的非均匀性。

关键词: CCD; 像素响应不均匀; 灰度值校正; 最小二乘法

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A

Correction method for pixel response nonuniformity of CCD

CHENG Wan-sheng^{1,2}, ZHAO Jie¹, CAI He-gao¹

(1. *State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*; 2. *School of Electronic and Information Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114044, China*)

Abstract: After analyzing the reasons related to the pixel nonuniformity in details, an algorithm based on least square method is presented to correct the pixel nonuniformity of a CCD. The grey level datum sets of each pixel are acquired on the cases of different irradiances, then a least square method is used to estimate the relation between irradiance and desired grey level data. The correct parameters of each pixel are computed, and the correct matrix is established. Finally, the pixel response uniformity is achieved by using the matrix to correct the grey level data of each pixel. The maximum deviation is 76.5 before correcting, while correcting by the proposed method, the maximum deviation is only 0.001 08. The experimental results indicate that the method is effective to correct CCD nonuniformity.

Key words: CCD; pixel response nonuniformity; grey level correcting; least square method

1 引言

在机器视觉的应用中,提起标定,人们自然就想到了空间坐标和图像坐标对应关系的标定,即对摄像机内外参数的标定^[1-4],而忽略了图像灰度值的标定,默认摄像机形成的图像正确地反映了目标的细微特征。实际上,由于 CCD 中的暗电流、量子效应、材质结构等局部差异性和各种噪声的存在,各像素对于相同的辐照度产生的灰度值并不相同,甚至有较大的差异。虽然 CCD 制造企业和摄像机的研制企业极力想克服这些差异,但一般摄像机还是客观存在这种差异,并且很可能随着应用时间和环境的变化,差异的大小也随之发生变化。因此,在精密光学测量中,为了真实地反映被测目标的实际情况,达到精密测量的目的,必须对 CCD 中各像素的光电响应特性进行标定,使每个像素在相同强度的辐照度下输出的灰度值在允许的误差范围之内,这样才能客观真实地反映目标的实际图像。分析可知,在同一辐照度下 CCD 各像素由于各种原因(比如暗电流、光电转换效率等)造成灰度值的统计性偏差,都是 CCD 像素响应非均匀性的表现,因此对摄像机像素响应的非均匀性进行校正正是图像质量正确性的基本保证。

目前,对 CCD 像素响应不均匀校正的研究还不是很多。国内学者在这方面做了大量工作,比如张丕壮等人提出把暗电流和光电非均匀性分开校正的方法^[5];陈迎娟等人在忽略暗电流等因素的条件下,提出了采用量子效率和变波长输入光的校正方法^[6];王传珂等人对 CCD 面均匀性进行了检测,说明了非均匀性的存在^[7];其它相关文献^[8-9]都是针对图像噪声进行处理,没有对所用 CCD 的非均匀性进行研究,因此不能完全达到校正 CCD 非均匀性的效果。本文经过对 CCD 光电响应的特性分析,从输出灰度值的全局角度出发,提出了一种采用最小二乘法求取校正系数阵的校正方法。该方法采用不同辐照强度下 CCD 像素响应的期望值,用最小二乘法估计了辐照强度和期望灰度值的对应关系,然后在实际中,用已取得的关系参数对每个像素的灰度值进行校正,实现了相同辐照度下,各像素响应的一致性,校正了由于 CCD 噪声和各种系统因素造成的像素响应不

均匀性。

文中首先对造成 CCD 像素响应不均匀的各种原因进行了详细分析,然后描述了最小二乘法参数估计的基本原理,推导了基于最小二乘法求取校正系数的公式,最后是该方法的实验验证和结论。

2 CCD 像素响应不均匀的原因

2.1 CCD 的工作原理

CCD 的基本工作原理是:在一定强度的光照射下,光子和硅原子之间发生能量交换,使硅晶体中出现电子-空穴对,然后把这些离散电子收集到一定电势的势阱中,形成电荷包,通过有序控制势阱电势,使电荷包输出并转换为电流或电压,完成光电信息转换。CCD 中单一像素的理论电荷量计算公式为^[10]:

$$Q_m = \frac{qA}{h\nu} \int_t Ee dt, \quad (1)$$

其中, Q_m 是像素的电荷量, q 是光电转换效率, q 为电子电荷量, h 为普朗克常数, ν 为入射光辐照频率, A 为像素面积, t 为曝光时间, Ee 为像素接受的辐照度。

2.2 像素响应不均匀的原因

摄像机工作时,各个像素的电子电荷量、普朗克常数、光频率和曝光时间都是一致的,但不同像素的光电转换效率和有效面积并不一定一致,因此公式(1)可以改写为:

$$Q_m = \delta \eta A Ee, \quad (2)$$

其中,常数 δ 是电子电荷量、普朗克常数、辐照光频率和曝光时间的组合函数。

从公式(2)可以看出,由于 η 和 A 不同,不同像素在辐照度 Ee 相同的条件下,产生的电荷也不相同,即像素生成的电荷和辐照度的关系对不同像素来说是斜率不同的直线,辐照度越大偏差越大。

CCD 在工作中由于热能的作用,也会形成电子-空穴对,出现自由电子,进入相邻的电势阱中,而 CCD 各部分温度不一致,就影响各像素电荷包的一致性,这一现象就是人们常说的暗电流噪声;另外由于每个像素电荷包输出过程的路径长短不

一致(接近输出寄存器的像素路径短,远离输出寄存器的像素路径长),电荷包移动过程中遗留在路径上的电荷量也不一致,以上这些因素都造成 CCD 不同像素输出的信号与实际的辐照度对应关系不一致,因此电荷和辐照度的关系式可表示为公式(3),即在公式(2)的基础上增加了由噪声引起的电荷变化 σ_e 。

$$Q_m = \delta\eta A E e + \sigma_e. \quad (3)$$

从式(3)可以看出各像素在相同辐照度下生成的电荷量与辐照度的关系是初始值和斜率不同的线性关系。因此第 i 个像素在辐照度 $E e$ 作用下输出的电荷量可表示为:

$$Q_i = \alpha_i E e + \sigma_i, \quad (4)$$

其中 $\alpha_i = \delta\eta A, \sigma_i = \sigma_e$ 。

如果能求出 α_i, σ_i 的估计值 $\hat{\alpha}_i, \hat{\sigma}_i$, 使修正后每个像素在相同辐照度下输出相同的电荷量,就可以达到修正 CCD 像素响应不均匀的目的,这是因为像素输出的电荷量与其对应图像的灰度值成正比。

3 基于最小二乘法的参数估计

最小二乘法是实际观测值与模型计算值误差平方和最小的最优估计算法^[11],其原理直观、算法简单、收敛性能好,不要求先验知识,因此常用于模型的参数估计。本研究中把辐照度 $E e$ 看作输入,像素的灰度值(电荷量的数字值) Q 看作观测值,对其关系参数 $\hat{\alpha}_i, \hat{\sigma}_i$ 进行估计,根据式(4)建立模型如式(5),其中 $\bar{\omega}_i$ 为观测误差:

$$Q_i - \alpha_i E e_i - \sigma_i = \bar{\omega}_i. \quad (5)$$

可用矩阵表示为:

$$\mathbf{Q} - \mathbf{M}\mathbf{A} = \bar{\boldsymbol{\omega}},$$

其中: $\mathbf{Q} = [Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_N]^T$,

$$\mathbf{M} = [E e_1, 1; E e_2, 1; \dots; E e_n, 1],$$

$$\mathbf{A} = [\alpha, \sigma].$$

对 N 个不同 $E e$ 的输入,取得 N 个采样值 \mathbf{Q} , 其误差的平方和为:

$$J = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 = (\mathbf{Q} - \mathbf{M}\mathbf{A})^T (\mathbf{Q} - \mathbf{M}\mathbf{A}). \quad (6)$$

根据极值原则建立方程组:

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{A}} = 0, \quad (7)$$

得到:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{Q}, \quad (8)$$

从而求得每个像素的参数估计 $\hat{\alpha}_i, \hat{\sigma}_i$ 。

4 CCD 像素校正参数的确定

在均匀辐照度 $E e$ 下,对 CCD 所有像素的灰度值进行统计,可确定 CCD 像素相应的灰度值的期望 Q 。在不同 $E e$ 作用下,求出相应的灰度值输出期望,用最小二乘法,可确定辐照度与期望灰度值的关系参数的估计 α_q, σ_q , 即确定期望的辐照度和灰度值的对应关系:

$$Q = \alpha_q E e + \sigma_q. \quad (9)$$

再依据式(7)可得到每个像素的光电参数估计,即可确定式(4)的关系。据此,根据实际测得像素的灰度值即可反求得该像素相应的辐照度为:

$$E e = \frac{Q_i - \sigma_i}{\alpha_i}. \quad (10)$$

把式(10)代入式(9)就可求得该像素的实际灰度估计值为:

$$\hat{Q}_i = \frac{\alpha_q}{\alpha_i} (Q_i - \sigma_i) + \sigma_q,$$

即:

$$\hat{Q}_i = K_{1i} Q_i + K_{2i}, \quad (11)$$

其中:

$$K_{1i} = \frac{\alpha_q}{\alpha_i}, K_{2i} = \sigma_q - \frac{\alpha_q}{\alpha_i} \sigma_i, \quad (12)$$

为第 i 个像素的均匀修正参数,式(11)完成了从测得灰度值 Q_i 到期望灰度值 \hat{Q}_i 的转换,实现了像素响应不均匀的修正。

5 实验和结果

在标准检测环境下,使摄像机达到热平衡,然后调节积分球输出不同辐射强度,记录摄像机各像素的灰度值(即对应不同辐照度采集多幅图像)。图 1 是其中 4 个像素的灰度值与辐照度的对应关系,从图中可以看出在相同辐照度下不同像素的灰度值并不相同,辐照强度越强,不同像素的灰度值相差越大。取每幅图像灰度值的均值作

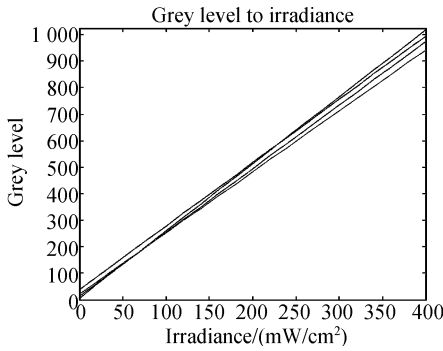


图 1 不同像素灰度值和辐照度的关系

Fig. 1 Relation between different pixel's grey levels and irradiances

为相应辐照度的灰度值期望,表 1 是辐照度和灰度期望值数据,图 2 是灰度期望值与辐照度的对应关系。

表 1 辐照度—灰度值期望对应表

Tab. 1 Irradiance and expected grey level

序号	辐照度/(mW/cm ²)	灰度期望值
1	0	12
2	20	59
3	40	109
4	60	160
5	80	210
6	100	261
7	140	362
8	180	463
9	200	514
10	260	665
11	300	766
12	340	868
13	360	918
14	400	1 020

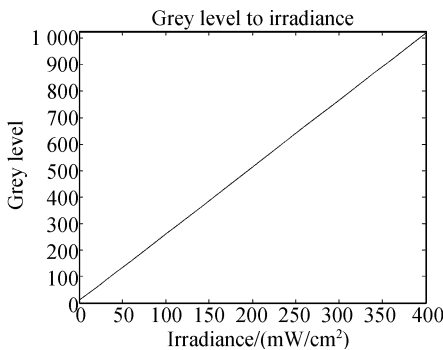


图 2 期望灰度值和辐照度的关系

Fig. 2 Relation between irradiance and expected grey level

用最小二乘法确定的期望灰度值和辐照度的对应关系为:

$$Q = 2.5254Ee + 8.8561,$$

即: $\alpha_q = 2.5254; \sigma_q = 8.8561$ 。

同理求得每个像素的光电对应关系为:

$$Q_1 = 2.4Ee + 15,$$

$$Q_2 = 2.528Ee + 8.3,$$

$$Q_3 = 2.39Ee + 40,$$

$$Q_4 = 2.3Ee + 23.$$

根据式(12)确定像素 1 的补正参数为:

$$K_{11} = \frac{\alpha_q}{\alpha_1} = \frac{2.5254}{2.4} = 1.05225,$$

$$K_{21} = \sigma_q - \frac{\alpha_q}{\alpha_1} \sigma_1 = 8.8561 - 1.05225 \times 15 = -6.92765.$$

同理可确定像素 2、像素 3 和像素 4 的补正参数,如像素 2 的补正参数为:

$$K_{12} = 0.99897; K_{22} = 0.5646.$$

在实际作业中,如果测得像素 1 的实际灰度值是: $Q_1 = 630$,测其补正后的灰度值估计应该是:

$$\hat{Q}_1 = K_{11} \times Q_1 + K_{21} = 1.05225 \times 630 - 6.92765 = 655.98985.$$

可见,校正前像素灰度值的最大偏差为 76.5,校正后最大偏差只有 0.00108,取得了理想的效果。

6 结 论

提出了一种基于最小二乘法参数估计的 CCD 像素响应非均匀性的校正算法,该算法首先确定 CCD 期望的灰度值和辐照度的对应关系,然后针对每个像素确定其独立的补正参数,在应用中,用确定好的补正参数修正每个像素的灰度值,达到了非均匀性校正的目的。实验所用的 CCD 校正前灰度值最大偏差为 76.5,校正后仅为 0.00108,表明了该方法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] XIAOCHUN C, HASSAN F. Camera calibration using symmetric objects [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2006, 15(11): 3614-3619.
- [2] 陈利红,毛剑飞,诸静. CCD 摄像机标定与修正的简便方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(4): 406-409.
CHEN L H, MAO J F, ZHU J. Easy method for calibration and correction of camera [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2003, 37(4): 406-409. (in Chinese)
- [3] 叶东,徐巧玉,车仁生. 视觉测量系统的相机校准[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 883-890.
YE D, XU Q Y, CHE R SH. Camera calibration technique for vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 883-890. (in Chinese)
- [4] ZHU J G, LI Y J, YE SH H. Calibration of line structured light vision system based on camera's projective center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5): 584-591.
- [5] 张丕壮,路宏年. 面阵 CCD 微光像感器图像的校正[J]. 兵工学报, 2000, 21(4): 362-364.
ZHANG P ZH, LU H N. The correction of image photographed by CCD image sensors [J]. *Acta Armamentarii*, 2000, 21(4): 362-364. (in Chinese)
- [6] 陈迎娟,张之江,张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 216-220.
CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel non-uniformity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 216-220. (in Chinese)
- [7] 王传珂,刘慎业,王哲斌. 科学级光学 CCD 谱响应与面均匀性的标定方法[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(4): 474-477.
WANG CH K, LIU SH Y, WANG ZH B. Calibration of spectrum phototonus and surface uniformity for optical CCD system [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2006, 26(2): 474-477. (in Chinese)
- [8] 李云飞,司国良,郭永飞. 科学级 CCD 相机的噪声分析及处理技术[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增): 158-163.
LI Y F, SI G L, GUO Y F. Noise analyzing and processing for scientific grade CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 158-163. (in Chinese)
- [9] FARAJI H, MACLEAN W J. CCD noise removal in digital images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(9): 2676-2685.
- [10] 王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
WANG Q Y. *Image Sensor Application Technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)
- [11] 邓自立. 最优估计理论及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2005.
DENG Z L. *Optimal Estimation Theory with Applications* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005. (in Chinese)

作者简介:程万胜(1969—),男,山西人,博士生,副教授,主要研究方向为机器视觉在工业检测中的应用。E-mail: cws_hit@126.com

赵杰(1968—),男,吉林人,教授,博士生导师,主要从事机器人技术的研究。E-mail: jzhao_vip727@sina.com

蔡鹤皋(1934—),男,吉林人,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事机器人技术的研究。E-mail: hgcai@hit.edu.cn