

Research on Precision Measurement of Machine Part Based on Radiometric Calibration*

Dexue Bi¹, Xiangxu Li¹, Yongmei Liu²

¹College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin

²Beijing Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Beijing

Email: dexue@tust.edu.cn, xiangxu_li@mail.tust.cn, yongmeiliu@hotmail.com,

Received: May 6th, 2013; revised: May 27th, 2013; accepted: Jun. 5th, 2013

Copyright © 2013 Dexue Bi et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In this paper, a precision measurement method of machine part based on radiometric calibration was proposed. According to radiometric calibration, the response function of our camera's CCD sensor was obtained, and the non-linear mapping relations between image gray value and the radiant energy of machine part were established. Based on this, the real size of machine part in image was restored. The experiments showed that this method can effectively improve the measurement accuracy, and it would be of great importance in non-contact measurement field of machine part.

Keywords: Machine Vision; Radiometric Calibration; Response Function; Non-Contact Measurement

基于辐射标定的机械零件精密测量方法研究*

毕德学¹, 李相旭¹, 刘咏梅²

¹天津科技大学机械工程学院, 天津

²北京出入境检验检疫局, 北京

Email: dexue@tust.edu.cn, xiangxu_li@mail.tust.cn, yongmeiliu@hotmail.com

收稿日期: 2013年5月6日; 修回日期: 2013年5月27日; 录用日期: 2013年6月5日

摘要:提出了一种基于辐射标定的机械零件精密测量方法。通过辐射标定求出摄像机 CCD 传感器的响应函数, 建立图像灰度值与传感器收集的辐射能量之间非线性映射关系, 恢复了图像中机械零件的真实场景, 使机械零件的边缘轮廓更加接近实际。实验表明, 该方法有效地提高了机器视觉的测量精度, 在机械零件非接触测量领域具有重要的意义。

关键词: 机器视觉; 辐射标定; 响应函数; 非接触测量

1. 引言

在现代化的生产过程中, 基于机器视觉的机械零件尺寸测量, 逐渐成为非接触测量领域的主要技术方法, 并且已被广泛应用到工业生产的各个领域。然而, 目前大多数的机器视觉测量方法是建立在 CCD 传感

器收集的辐射能量与灰度值之间存在线性关系这一假设基础之上的^[1]。文献[2-5]中的算法都是基于这一假定的线性关系对图像进行处理, 并没有深入研究图像自身生成的过程。而在实际的视觉传感器中, 由于大多数图像生成过程伴随着光电转换器件中电压的非线性放大, 这导致我们获取的图像并不能真实线性地反映物体的尺寸。因此对于一些响应函数为非线性

*基金项目: 十一五国家科技支撑计划资助(2009BAI71B01)。

的摄像机或图像采集设备来说, 这些算法的精度就会降低。在实际应用中, 当我们通过视觉方法对机械零件进行精密的测量时, 就必须确定相机的非线性响应函数。确定逆响应的过程, 称为辐射标定^[6]。

文献[7]中, Stephen Lin 等人提出了基于单幅图像辐射标定的方法, 该文献使用了 EM 算法, 但易受到参数初始值的影响, 且鲁棒性较差。文献[8]尽管对文献[7]进行了改进, 但仍不能达到较好的效果。文献[9]中, Steve Mann 和 Richard Mann 提出了一种从不同程度曝光图像中评估相机响应函数的方法。该方法在求解过程中使用迭代优化, 收敛性较差且效率不高。在文献[9]基础之上, 本文通过建立多幅图像优化时的相对 K 值的关系, 改进了优化方法并将标定结果应用到了测量实验中。实验表明, 该方法对提高机器视觉测量精度具有重要的意义。

2. 基于图像序列的辐射标定

2.1. 标定原理

我们知道图像中坐标(x, y)处像素的灰度值 $I(x, y)$ 是 CCD 传感器在曝光过程 k 中累计能量(即辐射能量) $E(x, y)$ 的一个非线性函数 $f(\cdot)$:

$$I(x, y) = f[k \cdot E(x, y)] \quad (1)$$

式中 k 是与曝光时间成正比, 与镜头光圈面积成正比的系数。在实际应用中我们通常固定光圈而改变曝光时间。因此, 可以将 k 看作曝光时间。

对公式(1)取反函数可得到:

$$f^{-1}[I(x, y)] = k \cdot E(x, y) \quad (2)$$

公式(2)中 f^{-1} 反应了从像素灰度值到辐射能量的映射关系。辐射标定的目的是确定逆响应 f^{-1} , 通过建立查找表, 将逆响应能够被应用到一幅图像上, 从而实现输出图像灰度值与传感器辐射能量之间的线性响应。

假设对同一场景的物体, 分别用曝光时间 k_1 和 k_2 采集了两幅图像。根据公式(2)有如下关系:

$$f^{-1}[I_1(x, y)] = k_1 \cdot E(x, y) \quad (3)$$

$$f^{-1}[I_2(x, y)] = k_2 \cdot E(x, y) \quad (4)$$

将两个等式相除来消去未知能量 E 可以得到:

$$\frac{f^{-1}[I_1(x, y)]}{f^{-1}[I_2(x, y)]} = \frac{k_1}{k_2} = k_{1,2} \quad (5)$$

两边取对数得:

$$F[I_1(x, y)] - F[I_2(x, y)] = K_{1,2} \quad (6)$$

可以看到, 公式(6)反映了不同曝光时间下, 灰度值 $I(x, y)$ 的辐射能量相差一个常数, 该常数与曝光时间无关, 而是依赖于两次曝光时间的比值。

2.2. 算法实现

对于两幅不同曝光时间的图像 I_1 和 I_2 来说, 存在查找表 F 使得这两幅图像通过查找表映射后得到的辐射能量值之间存在线性关系, 表示为矩阵的形式如下:

$$AF = K \quad (7)$$

这里 A 属于 $R^{L+1 \times N}$, 其中 L 是图像中像素的个数。矩阵 A 的列索引为灰度等级数量, 行索引为图像 I 的行堆叠。矩阵 A 中各元素如下所示:

$$A(x + wy, I_1(x, y)) = -1 \quad (8)$$

$$A(x + wy, I_2(x, y)) = 1 \quad (9)$$

其中未赋值元素均为 0; 向量 F 表示对数逆响应函数的查找表; K 为一个常数向量, 由于在处理图像时只需使用归一化的查找表, 向量 K 内的可统一置为 1。由于 F 收敛于未知的常量, 不妨令其收敛于 0, 即 $F(N) = 0$, 其中 N 为灰度等级数量。因此, 需要分别为 A 和 K 添加一行元素 $A(L+1, N) = 1$ 。

通常情况下, 图像中像素的数量会远远大于其灰度等级数量($L \gg N$), 可知公式(7)是一个超定方程组, 这个超定方程组可以通过正规方程组 $A^T A F = A^T K$ 进行求解, 公式(10)所示(具体推导过程见附录)。

$$F = (A^T A)^{-1} A^T K \quad (10)$$

2.3. 约束与优化

以上我们采用两幅图像对辐射标定的原理和算法进行了讨论, 然而仅仅采用两幅图像并不能覆盖到所有的灰度值范围, 这就需要采用不同程度曝光的图像对进行优化。我们可以从一幅欠曝光的图像开始, 不断增加曝光时间直到采集的图像曝光充分。将相邻

图像两两组对，分别计算他们各自的 \mathbf{A} 和 \mathbf{K} ，然后将所有的 \mathbf{A} 和 \mathbf{K} 分别堆叠在一起代入公式(10)计算。但是要注意到，由于那些过度饱和的像素的过度饱和行为影响了算法的最终优化，必须从 \mathbf{A} 矩阵中删除他们。

在处理多组图像对时，我们要注意到多组图像对之间 K 值的相对关系。设图像对的曝光时间分别为 $\text{Pair1}(k_1, k_2)$, $\text{Pair2}(k_2, k_3)$, $\text{Pair3}(k_3, k_4)$, ..., 记 K_i 为第 i 组图像对的 K 值，那么当我们令第一组图像对 $K_1 = 1$ 时，其它图像对的 K 值如下：

$$K_2 = \frac{\log(k_2/k_3)}{\log(k_1/k_2)}$$

$$K_3 = \frac{\log(k_3/k_4)}{\log(k_1/k_2)}$$

.....

2.4. 标定实验结果

实验中，运用大恒 DH-HV1302UM-T 型号的摄像机对不同曝光时间的图像进行采集，采集过程中固定摄像机的光圈，图像的曝光时间依次为 5 ms、10 ms、20 ms、40 ms、80 ms、160 ms 和 320 ms。如图 1 所示。

将上述相邻图像两两组成图像对，根据算法原理，运用 Matlab 编程实现得到结果如图 2 和图 3 所示。图 2 显示了 CCD 传感器的辐射响应曲线，通过该曲线可以建立查找表，将灰度值映射为辐射光强度。图 3 显示了辐射响应曲线的导数值，它反映了随着光强的改变，像素灰度作为整数输出的灵敏度^[10]。

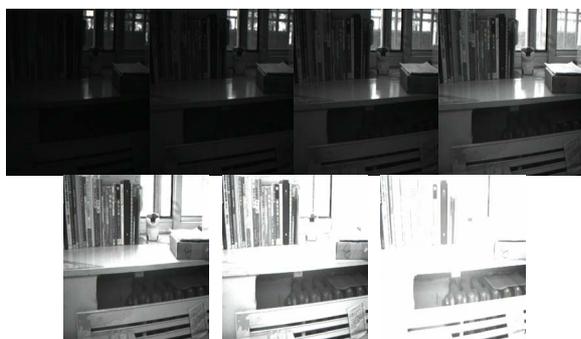


Figure 1. A sequence of differently exposed pictures of the same subject matter
图 1. 同一物体在不同曝光时间下的图像序列

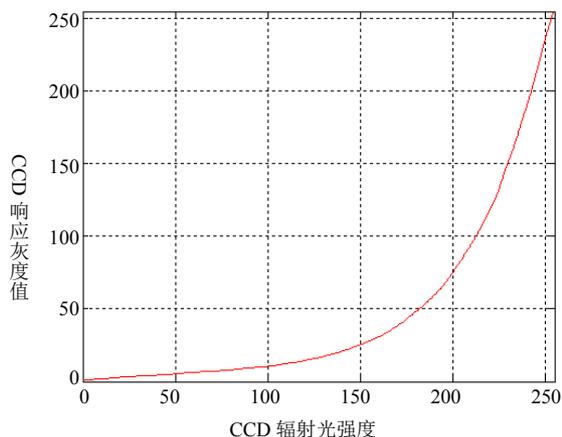


Figure 2. The calibrated inverse response curve
图 2. 标定出的 CCD 传感器响应曲线

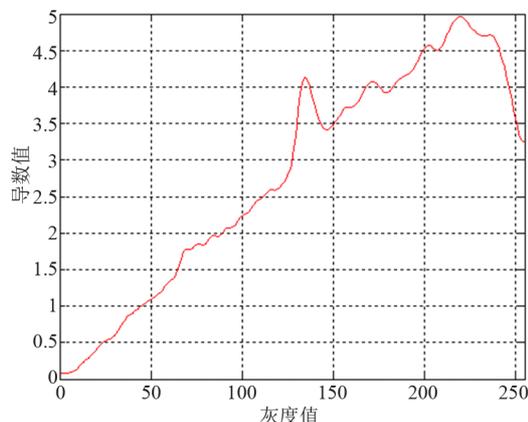


Figure 3. The derivative of the response curve
图 3. CCD 响应曲线的导数

3. 基于 2D 标定靶测量的实验设计

3.1. 实验原理

在空间中，物体所携带的几何度量信息是三维的，仅仅采用普通的单目摄像机是不能对其进行测量的。由于 2D 标定靶在摄像机坐标系中的表示可以通过标定摄像机的外部参数确定^[11]，因此只需添加一个平面约束，就可以用单目相机测量该物体在该平面上所表现出的二维信息，如公式(11)示：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中： α_x 为 u 轴上归一化焦距； α_y 为 v 轴上归一化焦距； γ 为 u 轴和 v 轴的不垂直因子； (u_0, v_0) 为主点坐标。 t 为平移向量，表示从世界坐标系的原点到光心的矢

量; r_1, r_2 为图像平面两个坐标轴在世界坐标系中的方向矢量。

3.2. 实验步骤

实验设备配置:

计算机: 华硕 F80s Inter(R) Core(TM) Duo

CPU T5800 @2.00 2.00

摄像机: 大恒 DH-HV1302UM-T

游标卡尺: 精度 0.02

待测零件: 直径 95.00 mm

具体方法步骤:

- 1) 采用 Matlab 中 TOOLBOX_calib 标定工具箱, 标定摄像机的内部参数;
- 2) 将待测机械零件放置在 2D 平面标定靶上, 用已经标定出内部参数的摄像机, 对其进行采集图像;
- 3) 根据已知的内部参数, 采用标定工具箱, 标定出 2D 平面标定靶的外部参数(旋转分量和平移分量);
- 4) 对所拍摄的待测零件进行边缘提取, 该边缘为机械零件与 2D 平面标定靶的相交位置;
- 5) 根据 2D 平面标定靶的外部参数, 反求待测零

件的空间二维信息;

6) 运用辐射标定的结果, 对图像进行场景还原, 重新测量求解;

7) 对比两次测量结果, 并进行实验分析。

3.3. 实验结果与分析

根据实验设计的原理和步骤, 采用 Matlab 编程方法实现了待测机械零件的测量。图 4 中(a)和(b)分别显示了实验图像在辐射标定处理前后的场景。图 5 中(a)和(b)分别显示了机械零件在辐射标定处理前后的测量结果。具体数据见表 1。

从表 1 的数据分析可知, 辐射标定处理后零件的测量精度提高了 0.1 mm, 相对精度提高了 0.105%。

4. 结论

通过对摄像机 CCD 辐射响应曲线的标定, 建立了图像灰度值与 CCD 所收集辐射光强的非线性映射关系, 使得图像中机械零件的边缘更加贴近真实值。实验表明, 该方法提高了机器视觉测量中亚像素级别精度, 在非接触测量领域具有重要的意义。

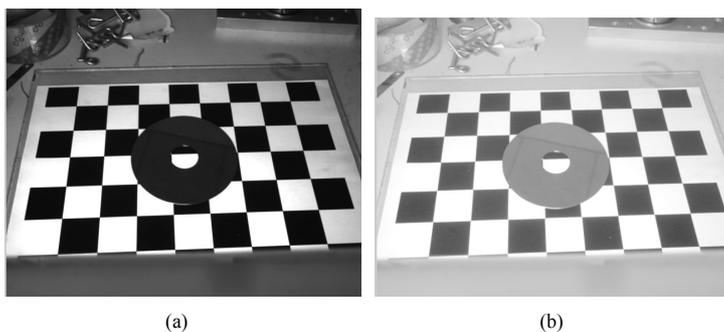


Figure 4. The scene of measurement before and after the radiation calibration.
图 4. 图像辐射标定处理前后

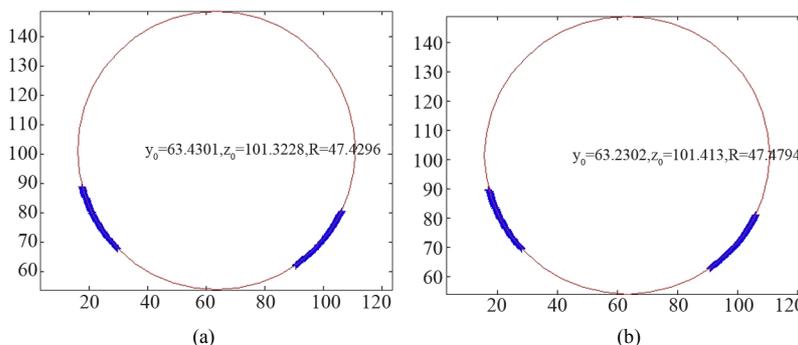


Figure 5. The result of measurement before and after the radiation calibration
图 5. 辐射标定处理前后测量结果

Table 1. Resulting data of measurement experiment
表 1. 测量实验结果数据

	测量结果 (单位: mm)	绝对误差 (单位: mm)	相对误差
标定前	94.8592	0.1408	0.148%
标定后	94.9588	0.0412	0.043%

参考文献 (References)

- [1] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 26-29.
- [2] 祁晓玲, 赵霞霞, 靳武银. 基于机器视觉的轴类零件几何尺寸测量[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, 1: 65-67.
- [3] 高飞, 辛楠, 石米娜, 谭庆昌. 基于机器视觉的机械零件自动精密测量[J]. 试验技术与试验机, 2006, 46(6): 28-31.
- [4] 贺振兴. 基于机器视觉的精密锡膏印刷设备精度研究[D]. 华南理工大学, 2012.
- [5] 罗钧, 黄俊. 基于机器视觉的二维小尺寸精密测量系统[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(1): 11-13.
- [6] C. Steger, M. Ulrich and C. Wiedeman. 机器视觉算法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 101-111.
- [7] S. Lin, J. Gu, Shuntaro, S. Yamazaki and H. Shum. Radiometric calibration from a single image. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC, 27 June-2 July 2004, 938-945.
- [8] 董敏, 朱虹, 邢楠, 赵朝杰. 核密度估计的单幅图像相机响应逆函数求解方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(10): 177-174.
- [9] S. Mann, R. Mann. Quantigraphic imaging: Estimating the camera response and exposures from differently exposed images. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 8-14 December 2001, 842-849.
- [10] S. Mann. Comparometric equations with practical applications in quantigraphic image processing. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(8): 1389-1406.
- [11] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 84-87.

附录：

公式(10)的推导过程

由于公式(7)是一个超定方程组，对于这类方程组的求解，我们通常采用最小二乘法。其具体方法是设 $\varepsilon = \|\mathbf{A}\mathbf{F} - \mathbf{K}\|^2$ ，通过最小化 ε 来求解 \mathbf{F} 。

令：

$$\frac{d\varepsilon}{d\mathbf{F}} = 2\mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{F} - 2\mathbf{A}^T\mathbf{K} = 0$$

即可得到公式(10)

$$\mathbf{F} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T\mathbf{K}$$