

照度不均匀图像的快速自适应灰度修正

杨 杰,付忠良,阮 波

(中国科学院 成都计算机应用研究所,四川 成都 610041)

(liumangtong@126.com)

摘 要:针对实际应用中近距离成像产生的图像照度不均匀现象,从成像的光照模型出发,提出了一种具有自适应性的灰度修正方法,并与已有的灰度修正方法进行了对比分析。实验表明,该方法快速有效,并特别适用于基于高速图像处理的机器视觉系统。

关键词:近距;照度;灰度修正;不均匀;自适应

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

Fast and adaptive gray-level correction of uneven illumination image

YANG Jie, FU Zhong-liang, RUAN Bo

(Chengdu Institute of Computer Application, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: Imaging at close distance leads to uneven illumination images in practical application. Based on the illumination model, a new gray-level correction method with adaptability was proposed. Being analysed and compared with existent methods, this new method was proved fast and effective, and suitable to high-speed image process in machine vision systems.

Key words: close distance; illumination; gray-level correction; uneven; adaptability

0 引言

在很多基于机器视觉的工业检测和图像分析处理系统中,常常需要用到近距离成像技术。所谓近距离,一是指成像设备 CCD 到物体的距离近,二是指光源到物体成像面的距离也很近。在实际的机器视觉系统中,由于机械等各种环境的限制,往往只能采用比较简单的光源系统,这些光源系统提供的光一般是非均匀的,光线在物体表面某些部分是直射,而在其他部分则是偏射,这样就造成了光场照度不均匀。非均匀的光场照度在图像中产生背景噪声,它和信号混合在一起,造成图像的对比度和灰度分布不均,这种失真往往影响了系统的检测精度和分析结果。比如在对纸张厚度均匀性进行检测的系统中,由此产生的纸张区域明暗不一,会影响系统对于该区域均匀性的判定;在检测印刷质量的印刷检测视觉系统中,则会导致对印刷油墨深浅度的判别失真。因此,对在这种环境拍摄的图像进行合理的灰度修正,克服照度不均匀所带来的问题,是基于近距离成像的工业视觉高精度检测系统必须解决的一个问题。

1 对现有方法的简单分析

现有的灰度修正方法主要包括直方图均衡化方法^[1],基于频域的同态滤波方法^[2,3],以及参考标样的灰度校正方法^[4]。

直方图均衡化是使变换后的图像灰度分布趋于均匀而对各像素点灰度级进行的一种均衡调整。它对于一些灰度分布比较密集或者对比度比较低的图像能取得比较满意的增强结

果。但它只考虑灰度统计信息而未考虑像素空间位置信息,因此对于近距离成像引起的具有明暗渐变性质的图像,补偿光照的效果不好。

同态滤波方法是将图像视为入射分量和反射分量的乘积,非均匀照明体现在入射分量中,它基本上是属于变化较缓慢的低频成分;而图像的细节、反差等特性则主要由图像中物体本身的特性决定,它反映在图像的反射分量中。将二者的乘法组合通过对数处理变成加法运算组合,然后进行傅里叶频域变换。依据入射分量与反射分量所表征的图像性质,设计出一个合适的滤波器,使得低频成分削弱,高频分量适当增强,从而达到克服非均匀光场,压缩动态范围与增强对比度的目的。由于频域的滤波会在图像边界产生模糊效应,并涉及大量的时频转换时间开销,不适合工业视觉在线检测系统。

参考标样的灰度校正方法是对具有均匀分布的(比如干净均匀的白纸)标样成像,以此标样来对实际图像进行灰度调整,主要用于光线不均或 CCD 感光元件差异而造成的图像灰度与实际景物亮度不匹配的场合。但对于一些灰度或者对比度发生变化的图像,效果不是很好,比如,在近距离成像下,光源发光的不稳定性以及光源距离物体的变动都将导致标样图像的不可参考性,即该方法无法满足自适应要求。

基于以上分析,常用的灰度修正方法不能自适应修正近距离成像导致的灰度不真实性。本文从分析光照成像模型出发,提出了一种快速有效的灰度修正方法,能很好地解决这类问题。

2 近距离光照成像模型及其分析

在工业在线检测与识别等机器视觉系统中,由于各种环

境因素的限制,常常只能采用简单的光源系统(比如点光源或线光源),这样,在同一幅图像上,光线对某部分是直射,而对其余部分是偏射。近距离成像时,由于照度的不均匀,就导致灰度的不均匀,如图1中的人民币水印图像,整个图像呈现从右向左明暗渐变的效果,从其直方图可以看到,灰度分布非常不均,分布范围也很广。



图1 明暗渐变图像及其灰度直方图

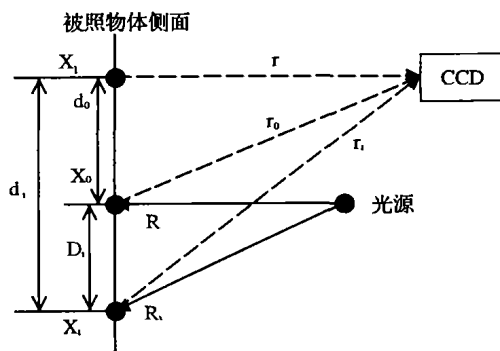


图2 简化的近距离光照成像模型

根据实际情况,可以建立产生这种明暗渐变效果的光照成像系统的简化模型,如图2。其中, X_0 为光线到物体成像面的直射点位置, X_i 为斜射点位置; R_i 为光线到达 X_i 点经过的路程; D_i 为物体成像面上 X_i 到 X_0 的距离。由光学基本知识可以知道,当光源为点光源时,成像面光照度与其到光源的距离平方成反比,即:

$$E = \frac{I \cos \theta}{L^2} \quad (1)$$

其中 I 为光源发光强度, L 为光线到达物体的距离, θ 为入射角即光线与物体表面法线的夹角。由此,不难得到 X_0 和 X_i 点的光照度表达式:

$$E_0 = \frac{I \cos \theta_0}{R^2} = \frac{I}{R^2}, E_i = \frac{I \cos \theta_i}{R_i^2} = \frac{IR}{R_i^3} \quad (2)$$

继而得到它们之间的关系:

$$\frac{E_0}{E_i} = \frac{R_i^3}{R^3} = \frac{(\sqrt{R^2 + D_i^2})^3}{R^3} = \left[1 + \left(\frac{D_i}{R} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (3)$$

由于最终成像的灰度与其照度近似满足正比关系,如果 X_0 和 X_i 点是完全相同的两点,那么, X_0 和 X_i 点在图像上的灰度关系近似体现为:

$$\frac{G_0}{G_i} = l_i, l_i = \left[1 + \left(\frac{D_i}{R} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (4)$$

可以设想, X_i 点的真实灰度值 G_i' 应该是当其位于直射点位置时的灰度值,即此时的 X_0 点灰度值 G_0 。因此,有灰度修正公式: $G_i' = G_i \cdot l_i$ 。若能得到参数 l_i ,以此作为灰度修正的变换因子,就能反向克服近距离光源带来的照度不均匀影响,从像素点当前灰度值 G_i 恢复其真实灰度值 G_i' 。这就是本文提出的灰度修正方法的主要思想。

3 自适应的快速灰度修正

根据上一节提出的思想,为了修正由于光源过近引起的

灰度失真,需要求出参数 l_i 。由 $l_i = \left[1 + \left(\frac{D_i}{R} \right)^2 \right]^{3/2}$ 可知,未知量为 D_i 和 R ,即光源到成像表面的垂直中心点以及垂直距离。

一般可以直接测量得到光源直射点位置和垂直距离。但在简单光源系统中,光源的发光强度通常是不稳定的,光源到被测物的距离也常常需要发生变动,这时变换因子 l_i 也应该随之相应变化。因此希望能够根据当前图像光照特点,自适应地生成该变换因子。

而决定变换因子的光源到成像面的直射点以及垂直距离可以通过一些已知样点来确定。由前面的分析可以知道,只要在图像上找到上一节中提到的具有相同性质的两点 X_0 和 X_i ,由于这两点的灰度值之比是已知的,就可以通过式(4)得到 D_i 和 R 。因此关键是找到点 X_0 ,即首先应求得直射点位置。

实际上,直射点的位置可以这样求得:对于成像表面具有相同性质的区域(这些区域可以通过一些先验知识得到),将其分为很多块微小区域,直射点必然位于平均灰度值最大的那一块区域当中。以图2光照模型为例,将物体侧面看作性质单一的一条线,直射点必然位于平均灰度最大的那一小段直线中。由于直射点很难精确求得,并且由于各种不可预知的干扰因素,使得直射点的灰度值并不一定反映该点的真实灰度,所以将找到的这块微小区域的平均灰度作为直射点灰度值,而将直射点的位置定为该区域的中心位置。再通过多选定几个同样性质区域,进行多次计算,对求得的结果进行统计分析,以确定最终结果。

求得了直射点后,我们就可以由此求出 R 。由式(4)可以得到:

$$R = \frac{D_i}{\sqrt{\left(\frac{G_0}{G_i} \right)^{2/3} - 1}} \quad (5)$$

同样,这里也可以取多个具有同样性质的像素点,或者在光照不变时取多张图像计算,从而求得多个 R 值,再通过统计分析,以修正过后的 R 值作为最终结果。

在光源不产生变动的情况下,直射点和直射距离仅需计算一次,无需对每幅图像都进行该操作,对每幅图像都要进行的只是利用该参数计算变换因子以修正灰度。仅当光源发生变动时,才需要更改参数,但这一过程也是自适应进行的,无需人为设定标准图像等繁琐工作。

由样点得到参数 R ,再结合图像上其余点坐标就能求得任意点的变换因子 l_i 。此时,就可以利用变换因子对各个点的灰度值进行修正,消除近距离偏光影响,以得到近似的真实灰度值。

整个修正过程还可以进行加快,主要可以从两个方面考虑:

第一,通过实验分析发现,当 $\frac{D_i}{R} < 0.002$ 时,误差在一个灰度级以内,因此可以忽略偏光对该点灰度的影响,从而减少计算量;

第二,在修正过程中,光源不变时,参数 R 是固定的,对于不同图像,每个像素点的变换因子是不变的,因此可以将变换因子事先计算好并存储与一张数据表中,在修正时直接查表调用即可;若光源产生变化,则在自适应计算参数 R 的同时重新计算相应的变换因子数据表。另外,在重新计算变换因子时,可以利用泰勒展开式简化运算(在零点取到2阶导数即

可):

$$\left[1 + \left(\frac{D_i}{R}\right)^2\right]^{3/2} \approx 1 + \frac{3D_i^2}{R^2} \quad (6)$$

从而在光源频繁变动时,可以加快自适应调整过程。

前面提到,近距离还指 CCD 到成像面的距离近。同时从图 2 的光照模型中也可以看到,即使是具有真实照度的点 X_0 ,由于成像灰度值还取决于 CCD 感光元件对其反射光强度的感应,因此,成像面上各点到 CCD 距离的不一致也会导致灰度值不能真实反映实际观测点的亮度。虽然在实验中发现,CCD 引起的灰度偏差较之光源要小,表现不是很明显,但在更高精度要求的工业检测系统中,还是需要对其进行修正。成像过程中,由于是反射,CCD 的影响在光源影响之后,因此,修正工作应在修正光源引起的灰度失真之前进行。修正方法的思想与前面一致,所不同的是:CCD 的垂直投影点在图像上正是图像的中心点;在工业检测系统的机械安装中,CCD 的位置通常是确定的,所以 CCD 到成像面的距离 r 也是固定的。具体修正公式为:

$$G_i' = G_i \cdot c_i, \quad c_i = \left[1 + \left(\frac{d_i}{r}\right)^2\right]^{3/2} \quad (7)$$

4 实验结果分析与比较

下面以一幅药品包装盒上的条码图像为例,说明该算法执行的效果。

图 3 中条码区域照度不均,从左下角向其他方向产生明暗渐变。经灰度修正后,如图 4,可以看到整个背景区域的灰度已经比较均匀,图像质量有了明显改善。从二值化以后的效果可以看到,对于质量较好的图像,达到这种分割效果,最快速简单的阈值二值化方法就能适用,这就说明本文提出的方法不仅在灰度修正这一步骤中节省了时间,还减小了后续处理时间。

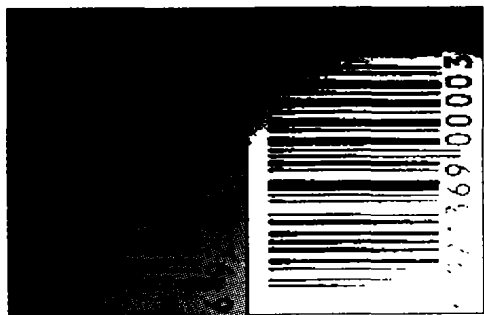


图 3 照度不均图像及其二值图

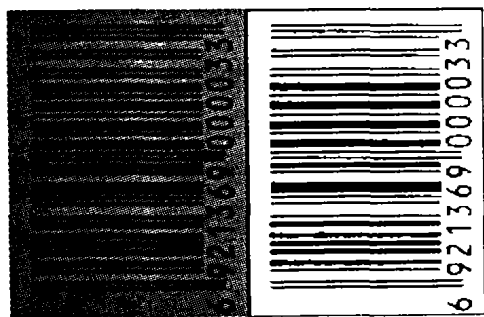


图 4 灰度修正后的图像及其二值图

图 5 是一幅在均匀平行光照下得到的号码图像,由于近距离成像 CCD 引起的灰度失真不如光源引起的灰度失真严重,直接从图像上不易观察到,但直接读取灰度值对比,如表 1,可以发现其失真现象。通过对修正前后四周及中间矩

形框中背景像素灰度的统计平均可以看到,修正的灰度更合理更真实,这对于一些高精度要求的视觉检测系统是非常必要的。

表 1 各区域修正前后平均灰度值

图像	区域				
	上	下	左	右	中
原图	186	183	179	176	195
修正后	191	195	193	192	195

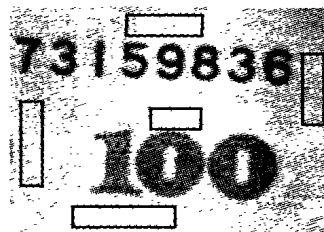


图 5 近距离 CCD 引起的灰度不均图像

再来考虑图 1 中的明暗渐变图像,分别用直方图均衡、同态滤波、参考标样的灰度校正以及本文方法进行处理,对比结果如图 6~图 9(左边为处理效果图,右边为其直方图)。

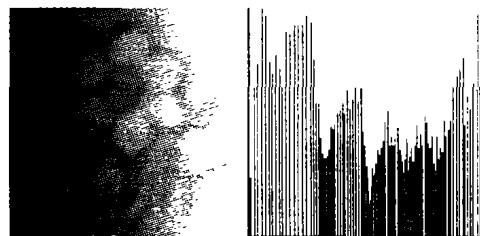


图 6 直方图均衡化结果

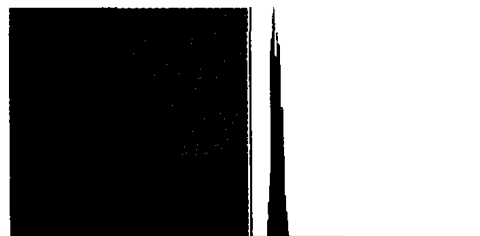


图 7 同态滤波结果

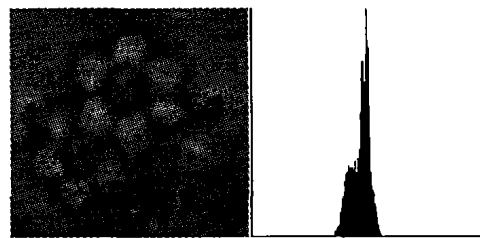


图 8 参考标样的灰度校正方法结果



图 9 本文方法结果

分析上面的实验结果得出:直方图均衡方法对图像有增强效果,但并没有消除照度不均匀现象;同态滤波虽然效果较好,但耗时太长,不适合于工业在线检测系统;本文方法和参

(下转第 602 页)

个 BSP 树在应用中表示整个场景,其中每个树节点分别表示一个凸子空间。每个节点里面包含一个“超平面”作为二分空间的分割平面,该节点的两个子节点分别表示被分割成的两个子空间。另外每个节点还可以包含一个或者多个几何对象。

在网格数据接收端视区内的三角形,根据视点与当前节点分割平面的相对位置生成图 2 的 BSP 二叉树,其中的节点包含层信息和三角形节点信息。

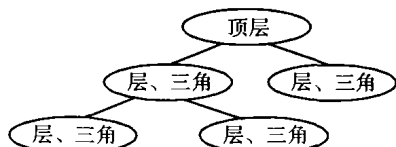


图 2 BSP 树

BSP 树生成的主要算法如下:

- 1) 判断视点与当前节点分割平面的相对位置;
- 2) 视点位于分割平面前,先处理背面的子空间:判断分辨率层次;提取层信息和三角形信息;
- 3) 视点位于分割平面后,先处理前面的子空间:判断分辨率层次;提取层信息和三角形信息;
- 4) 视点位于分割平面内,则任意选取子空间处理:提取层信息和三角形信息。

通过二叉树的生成和可见层三角形信息的提取,大大减少了要传输的三角形的数量。

3 视觉相关传输算法描述

对于视觉相关传输方法^[2]。首先是编码和传输模型的拓扑信息;然后为几何模型不同区域建立一个对视觉敏感的多层次结构表示;接着按照这个层次结构,从低层到高层依次对几何信息进行编码和传输。参看表 1 中编码和解码算法描述,使得接收端也可以用同样的方法自动建立该层次结构,并重建原几何模型。本文设计的传输方法不同之处在于,只需传输几何模型可视区域的层和三角形数据。

视觉相关的三维图形传输的编码算法如下:1)初始化;2)编码拓扑信息和基础网格;3)分解几何模型,建立层次结构;4)根据视觉相关的二叉树对可视三角形进行编码;5)计算、量化和编码输出。

视觉相关的三维图形传输的解码算法如下:1)初始化;2)解码拓扑信息和基础网格;3)合成层次结构;4)解码和计算校正量;5)将传来三角形加入当前的简化网格中。

(上接第 600 页)

考标样的灰度校正方法都能取得很好的均匀效果。从直方图上,可以更加清楚地看到,原图分布很广的灰度经调整后集中到一块很小的区域,其中尖峰为背景灰度级别。在运行时间上,本文方法仅仅增加了一个查表的步骤,相比参考标样的灰度校正方法不会带来明显的额外时间开销。特别在光源不稳定或有变动的情况下,参考标样的灰度校正方法就会失效,而本文方法却能自适应性地调节参数,仍可取得好的修正效果。

5 结语

本文提出了一种近距离成像的灰度失真的快速自适应修正方法,包括照度不均的修正和近距离下成像面各点到 CCD 距离不一致引起的灰度失真的修正。由于本文方法中灰度变换的计算简单,并具有自适应光强和光位的特点,因此非常适

4 拓扑编码

关于三角形网格顶点连接关系的编码问题,采用的方法是动态维护一个顶点循环链表和这个顶点链表上的一条活化边;然后沿着这个顶点链表,对三角形网格进行遍历和编码。编码的基本思想是:每次首先找到与当前活化边相邻的三角形,然后根据三角形第三个顶点的不同情况,对三角形进行编码。对于节点的编码,本文采用 Huffman 编码,Huffman 编码的特点是赋予大概率消息以较短的编码,而赋予小概率消息以较长的编码。可以证明,在给定消息的概率分布的情况下,Huffman 编码冗余信息最少,消息平均码长最短。在这个意义上我们说 Huffman 编码是最优的。

5 结语

该算法通过在接收端建立 Bunny 兔的 BSP 二叉树,提取图 3 中 Bunny 兔前部的相关层和可见三角形的信息,而 Bunny 兔后部只用基础网格数据显示,使传输三角形和顶点数据迅速减少为原来的 40%,但并不影响接收端的敏感数据的处理和显示。实验结果表明,本算法的传输机制能够取得相当满意的效果,不足之处在于过渡边界较明显,但可以通过增加一个过渡带的方法来解决。

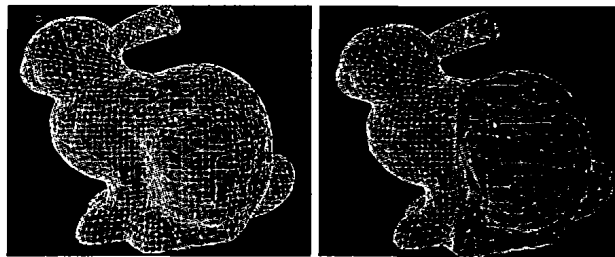


图 3 Bunny 模型

参考文献:

- [1] CHOW M. Optimized Geometry Compression for Real-time Rendering[A]. Proc IEEE Visualization'97 [C], 1997. 19 - 24.
- [2] HOPPE H. Smooth View-Dependent Level-of-Detail Control and Its Application to Terrain Rendering[A]. IEEE Visualization'98 Conference Proceedings[C], 1998. 35 - 42.
- [3] KING D, ROSSIGNAC J. Guaranteed 3.67v Bit Encoding of Planar Triangle Graphs[A]. 11th Canadian Conference on Computational Geometry[C], 1999. 146 - 149.
- [4] DEERING M. Geometric Compression[A]. SIGGRAPH'95 Conference Proceedings[C], 1995. 127 - 131.

用于工业在线检测的机器视觉系统。尽管算法中的一些计算不是绝对精确,不能完全恢复到真实的灰度值,但这并不影响方法的适用性。在实际更复杂的系统中,比如出现不规则光线叠加等光源系统,可以以本文方法为思路进行分步修正,最终满足自己的要求。

参考文献:

- [1] GONZALEZ RC, WOODS RE. Digital Image Processing[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 王兆仲, 周付根. 基于高斯差分滤波器的图像光场矫正[J]. 红外与激光工程, 2000, (6): 64 - 67.
- [3] PEREZ A, GONZALEZ RC. An Iterative Threshold Algorithm for Image Segment[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(6): 742 - 751.
- [4] 王新成. 高级图像处理技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.