

一种基于小波多尺度边缘分析的散焦测距方法

A Wavelet Multiresolution Edge Analysis Method for Recovery of Depth from Defocused Images

王 强 胡建平

(北京航空航天大学计算机科学与工程系 北京100083)

Abstract A approach of depth recovery from defocused image based on wavelet multiresolution analysis is proposed. A parameter-Lipschitz exponent is used to describe the singularity of the edge of an object in image. A curve of relationship between Lipschitz exponent and the distance from object interested to camera is obtained. Experiment proves the effective of the method.

Keywords Wavelet tranformation, Multiresolution edge analysis, Lipschitz exponent, Depth from defocus

一、概述

随着工业自动化生产的日益普及,大规模生产线上的产品质量检测需求越来越使得人工检测方法无法适应。计算机视觉正在成为一种提高生产效率、保证产品质量的关键技术而被日益广泛采用。例如机械零件产品的自动检测及生产流水线的自动测控等都可以采用计算机视觉技术。在一般的应用场合中大多只需要二维的灰度图像就能够满足基本的检测要求,但也有相当多的应用场合需要在三维环境中对目标对象实现检测,这时就必须研究景物的三维结构并实现三维测距。

三维测距有主动测距和被动测距之分^[1],两种方式的主要差别在于测距装置本身是否发光。如果测距装置仅仅接受场景中物体所发出的光,则为被动测距。测距装置本身发光,光线投射在场景中的物体上,物体上的反射光又为测距装置所接收的为主动测距。人眼是高效的测距系统,通过将两个不同视点所得到的两个二维图像进行组合建立所观测物体表面的深度。由于这种双目视觉是在自然光线下进行的,故应该属于被动测距。人体视觉的双目视觉非常有效,而要让计算机模仿人眼建立立体视觉却是非常困难的。首先就是需要在左右两幅图像中寻找对应点,而这需要大量耗时的复杂计算,并且有可能不存在充分的视觉信息来确定在所感兴趣的点上建立一一对应关系。那么,能否绕过三维视觉分析中对应点的寻找和计算,通过对单幅灰度图像的分析 and 计算获取场景中的不同物体的深

度信息?本文就针对这个问题提出一种基于小波变换多尺度边缘分析的散焦测距方法并给出初步的实验结果。实验结果说明这种方法是有效的。

场景中物体的边缘非常重要,它集中地携带了有关物体的大量有用信息。常见的图像处理中一般仅对图像物体的边缘进行提取^[2]、二值化等处理,并未充分地利用所有信息。利用小波变换多尺度方法来分析和刻画图像物体边缘的奇异度^[2,5,6]、用参数化的方法客观地描述图像物体边缘的各种性质有助于我们对图像中物体的理解。本文就试图利用小波变换来获取图像中物体边缘的 Lipschitz 指数,并以此来判断该物体边缘图像的散焦程度,从而得到图像中物体边缘的 Lipschitz 指数与该物体与摄像机镜头的距离之间的曲线关系。

二、物体的散焦成像

计算机视觉系统的前端为传感器部分。在工业自动化检测应用方面为满足实时检测要求和减少数据处理量,一般都采用灰度摄像机(256级灰度)作为传感器。传感器的光学系统一般可抽象成图1所示结构^[4]。

图1中,假设 P 为所观测物体的一点恰好位于透镜的光轴上,并假设 P 点经过透镜恰好成像在摄像机的 CCD 板面上,形成一个聚焦点。这时如果用实际物体代替 P 点就会在 CCD 成像平面上形成一个清晰的物体图像。如果在图1中将 P 点向离开透镜的方向移一段距离,就会出现 P 的像点不再位于 CCD 成像板面上,即出现了图2所示的情况。这时点 P 不再在成像板

王 强 博士生,副教授,主要研究领域为计算机视觉、模式识别、智能检测等。胡建平 教授,博士生导师,主要研究领域为分布式并行计算和人工智能应用。

面上形成清晰的聚焦点,而是形成一个散焦的圆域,圆域的半径(用 r 表示)大小与散焦的程度有关。如果现

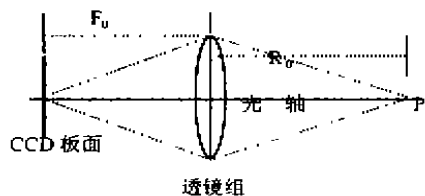


图1

在实际的应用系统中,当摄像机选定以后,透镜组和摄像机 CCD 板面之间的距离是固定的。当将摄像机镜头的焦距调定,实际上能使被摄物体清晰成像的距离也确定了。这时若沿着光轴改变被摄物体与摄像机镜头之间的距离就会影响成像清晰度,当偏离 P 点位置距离越大,散焦现象就越严重,成像也越模糊(当然原则上会出现 $R > R_0$ 及 $R < R_0$ 两种散焦情况,但如果我通过调整摄像机镜头的焦距将 R_0 调得较小,这时一般就可以只考虑 $R > R_0$ 这种情况了)。

通过对上述两种情况进行分析,可以抽象出由于散焦造成的模糊圆域半径、聚焦良好时物点与镜头的距离 R_0 、散焦时物点与镜头的距离 R 三者之间存在下列关系^[1]:

$$r = K(1/R_0 - 1/R) \quad (1)$$

这里 K 为系数,它与摄像机像平面(CCD 板面)和透镜之间的距离、摄像机镜头的聚焦及光圈调整数值有关,当选定摄像机并调整好各参数后 K 就确定了。由式(1)可见像点的散焦圆域的半径随着偏离 R_0 位置的距离变大而增大。(1)式稍变化一下可为:

$$R = R_0 * K / (K - r * R_0) \quad (2)$$

此式表明在已知 R_0 和 K 的情况下,物点与摄像机镜头的距离 R 可以通过测量它的散焦圆域半径 r 的大小来确定。此原理的实现方法已有研究报道^[4,7],本文拟根据这个原理引用一种基于小波的多尺度边缘分析的算法,同时引入能较为准确地描述物体边缘的奇异度的量—Lipschitz 指数来刻画并分析场景中各物体的边缘以此识别该物体与某参考点的距离。

如果研究的物体对象具有较为明显的纹理特征,则纹理图像的散焦程度也可作为测量物体深度的一种依据^[4],本文中主要考虑的是在一般情况下的情景,暂不考虑纹理,主要考虑物体边缘的轮廓散焦。

三、小波变换多尺度边缘分析和 Lipschitz 指数

上面分析得到的一个结论为摄像机与被摄物点之间的距离可由分析被摄物点在像平面上的散焦圆域半

在用一物体代替 P 点,就会在摄像机 CCD 成像板上形成模糊的物体图像。

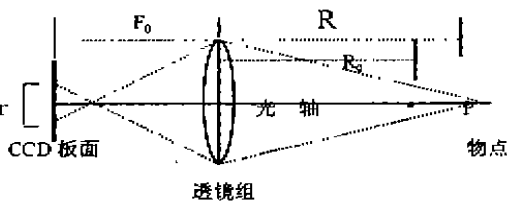


图2

径的大小而求得。如果用真实的物体代替被摄物点,物体的轮廓边缘可以认为是由很多个点组成的,这些点如果都处于散焦位置就会造成物体轮廓边缘的变模糊并且展宽。实际上我们可以通过分析垂于物体轮廓边缘的灰度梯度变化值—即所谓的奇异度来实现对物体所在的距离深度的分析。分析图像中物体边缘奇异度的一种行之有效的办法是小波变换多尺度边缘分析。

·小波变换 二维图像的小波变换的基本理论已在许多参考书上进行了详细的介绍,这里不多赘述,需要了解的请参考文[5],[6]。本文采用的二维图像的小波变换算法为 Mallat 快速算法:

```

j=0
while(j<J)
w_{2^j+1}^1 f = s_{2^j}^d f * (G_j, D)
w_{2^j+1}^2 f = s_{2^j}^d f * (D, G_j)
s_{2^j+1}^d f = s_{2^j}^d f * (H_j, H_j)
j=j+1
end of while
    
```

算法中的 G, D, H 均为滤波系数, G 为高频分量的滤波系数, H 为低频分量的滤波系数, D 为 Dirac 函数,它们的具体数值及与二维图像信号的卷积方法请参阅文[5]。

若以 $w_{2^j}^1 f(x, y)$ 及 $w_{2^j}^2 f(x, y)$ 分别表示二维图像 $f(x, y)$ 的水平与垂直方向上的一维小波变换,那么在二维图像的某点 (x, y) 经小波变换后的系数模值与梯度变化方向分别为:

$$M_{2^j} f(x, y) = \sqrt{|w_{2^j}^1 f(x, y)|^2 + |w_{2^j}^2 f(x, y)|^2} \quad (3)$$

$$A_{2^j} f(x, y) = \arctan\left(\frac{|w_{2^j}^2 f(x, y)|}{|w_{2^j}^1 f(x, y)|}\right) \quad (4)$$

·Lipschitz 指数的计算 对包含被分析物体的图像进行不同尺度下的二进制小波变换,保留超过一定阈值的变换系数。在一定的邻域中求取沿梯度方向的最大值,连接相邻的、最大值接近的、相位相似的象素,形成物体轮廓的单象素边缘链并求出链上的变换系数平均值。在不同的二进尺度下对图像进行上述操作(一般连续作 3 到 4 个二进尺度即可)。可以证明,二维图像信号的二进制小波变换系数满足下列不等式:

$$|w_{2^j} f(x, y)| \leq k 2^{j s_0^{-1}} \quad (6)$$

这里 $s_0 = \sqrt{2^{2j} + \sigma^2}$, 将各尺度下小波变换的最大系数链的均值代入(6), 使不等式两边近似相等, 即下式为最小:

$$\sum_{j=1}^J (\log_2 |M_j| - \log_2(k) - J - \frac{j-1}{2} \log_2(\sigma^2 + 2^{2j}))^2 \quad (7)$$

此式中的输入参数为不同尺度下的二进制小波变换的尺度 j 及在该尺度下进行小波变换的最大系数链均值 M_j , 输出参数值 (a, k, σ) 可以采用反复迭代法求出。其中 a 为一致 Lipschitz 指数, 它能够较为理想地刻画图像中边缘的奇异度。

四、实验数据

这里实验中采用了256级灰度的工业摄像机, 焦点距离调到最近(30cm)、光圈调到最大以减小镜头的有效景深, 以提高由于被摄物体的距离变化引起成像散焦的灵敏度。实验中共采集了五幅图像, 图3(a)为字符平面正好处于摄像机镜头的聚焦平面上(距镜头30cm), 图3(b)到图3(e)分别为依次后退5cm 拍摄的。



图3

实验中的小波函数采用二次样条函数。实验中分别求出了 $j=1, 2, 3$ 不同尺度的二进小波变换并通过图像处理方法求出了不同尺度下对应于物体边缘的小波变换系数的最大值链, 设其平均值分别为 M_1, M_2, M_3 , 分别计算各幅图像中字母的边缘的奇异度, 如表1。

表1

样本	d(cm)	M_1	M_2	M_3	a	k	σ
#1	30	103	119	135	0.24	83.8	0.00
#2	35	93	120	139	0.31	74.95	0.00
#3	40	63	96	128	0.50	46.34	0.72
#4	45	47	72	115	0.64	30.50	0.77
#5	50	34	55	94	0.65	24.22	12.83

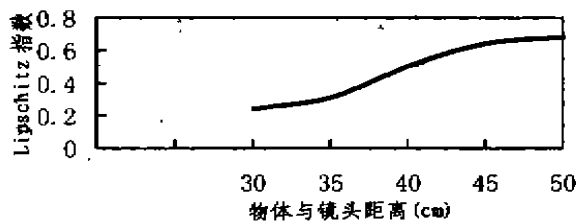


图4

根据表1各项的距离 d 与其所对应的 Lipschitz 指数可作出如图4的曲线。

对未知深度和距离的物体进行拍摄(在一定的范围内), 从图像中求出物体边缘的 Lipschitz 指数就能由图4的曲线得到物体在原场景中的深度距离。

五、结果分析

以上从实验结果证明了本文所提出的方法的有效性。此方法的主要特点为:

- 所使用的设备简单, 实现起来比较容易, 绕开了双目或三目视中所必须面对的在二维图像间求解对应点的计算。

- 有利于图像分割, 可以根据对于场景中物体的先验知识有选择地抽取某种类型边缘的物体。

存在的一些问题是: ①目前尚难明确地从图像中某物体的边缘模糊程度断定该物体与摄像机镜头的距离是小于还是大于焦点与镜头间的距离。②当摄入的物体本身就不存在锐利的边缘(如松软的棉花团、天空的云彩等)时, 如何辨别这些边缘特征是由于物体本身造成的还是由于该物体处于摄像机系统的散焦位置造成的。这个问题的解决对于图像的理解和分割是至关重要的。

参考文献

- 1 郑南宁. 计算机视觉与模式识别. 国防工业出版社, 1998. 169~191
- 2 章国宝, 等. 基于正交小波变换的多尺度边缘提取. 中国图象图形学报, 1998, 3(8): 651~654
- 3 Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. IEEE T-PAMI, 1986, 8(6): 679~698
- 4 Kundur S R. Novel Active Vision-Based Visual Threat Cue for Autonomous Navigation Tasks. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(2): 169~182
- 5 Mallat S, Zhang S. Characterization of Signals from Multi-scale Edge. IEEE T-PAMI, 1992, 14(7): 710~732
- 6 Mallat S, Hwang W. Singularity Detection and Processing with Wavelets. IEEE Transaction on Information Theory, 1992, 38(2): 617~643
- 7 Rajagopalan A N, Chaudhuri S. A MRF Model-based Approach to Simultaneous Recovery of Depth and Restoration from Defocused Images. IEEE T-PAMI, 1999, 21(7): 578~589