

# 基于位置分辨率的折反射全向图像邻域定义

谭树人, 林高鹏, 张茂军

(国防科技大学信息系统与管理学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 由于折反射投影, 两个具有相同欧氏距离的世界点, 当它们成像在折反射全向图像边缘或图像中心时, 它们之间的像素距离却并不相同. 因此, 传统的邻域选取方法并不适合折反射全向图像处理. 本文根据全向图像不同位置分辨率的比例关系, 提出了一套新的邻域定义方法并推导了一种新的折反射全向图像分辨率计算公式. 通过在马尔可夫随机场全向图像运动目标检测应用中与传统邻域进行对比实验, 显示改进后的邻域比传统邻域在整个图像中有更一致的检测效果.

**关键词:** 折反射全向图像; 马尔可夫随机场; 运动目标检测; 分辨率; 邻域

**中图分类号:** TP274. 2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 01-0201-06

## Neighborhood Definition for Catadioptric Omnidirectional Image Based on Resolution of Position

TAN Shu-ren, LIN Gao-peng, ZHANG Mao-jun

(College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Because of catadioptric imaging, two points in the world with same distance will have different distance in omnidirectional image when they are projected to the periphery or center on the image plane. Thus, traditional definition of the neighborhood cannot be appropriate for omnidirectional images. In this paper, make use of ratio of resolution between different position in image, we propose a new system of neighborhood adapted to the omnidirectional images and deduce a new formula for calculating resolution of a catadioptric sensor. We show that this definition of neighborhood for catadioptric omnidirectional image conduce a more coincident result than traditional one in application of moving target detection base on Markov random fields.

**Key words:** catadioptric omnidirectional image; Markov random field; moving target detection; resolution; neighborhood

## 1 引言

邻域定义像素点之间的依赖关系, 进而反映真实世界点之间的依赖关系. 在普通透视图像处理中, 一般在整个图像范围采用统一的大小和形状定义邻域. 这是因为具有相同欧氏距离的世界点在图像中的像素距离也相等. 如果我们将一个折反射全向图像看作一个圆形碟片, 最大的投影分辨率将在碟片的外围, 从图像的外围到中心分辨率逐级降低. 因此由于折反射投影, 两个具有相同欧氏距离的点, 当它们成像在折反射全向图像边缘或图像中心时, 它们之间的像素距离却并不相同. 也就是说在折反射全向图像上, 具有相同像素距离的两个点在真实世界中却并不具有相同的依赖关系, 因此, 传统的邻域选取方法并不适合折反射全向图像处理, 需要采用新的适应全向图像的邻域系统.

对单视点折反射成像系统, 如果成像几何已知, 则

可以从有效视点将图像投影到一个平面上形成平面透视图像, 这个图像称为全景图像. 全景图像尽管仍然存在变形, 但视觉效果很接近透视图像, 这样就可以使用传统的图像处理方法<sup>[1]</sup>. 然而这种解决办法不能令人满意, 因为一方面它要求插值, 这很费时间, 另一方面, 插值给图像带来的影响会影响目标检测的精度. Coleman 等<sup>[2]</sup>和 Scotney 等<sup>[3]</sup>在重构全景图像时不进行插值, 这样形成一幅稀疏的全景图像, 然后设计一种空间变化算子来对图像进行处理. 另外, Bigot 等<sup>[4]</sup>直接在球面上开发算子, 描述了一个新的球面图像平滑方法, 介绍了一个适合的维纳滤波器. Bogdanova 等<sup>[5]</sup>为全向图像分割开发了新的能量函数和偏微分方程以克服成像几何限制. 然而, 这些方法都是在变化后的空间中处理图像, 处理后的结果也在变化后的空间中. 正如 Daniilidis 等<sup>[6]</sup>指出的, 将数据保持在原始空间中对图像处理非常重要. 而如果不改变图像数据空间, 就必须改变邻域.

## 2 相关工作

单视点折反射全向成像系统都具有一个有效视点,即每一束通过摄像机有效孔的光线,如果没有镜子反射也会通过该有效视点.考虑到这一特性 Ieng 等<sup>[7]</sup>将全向图像的像素点反投影到镜面表面,镜面表面的点用角坐标形式表示,也就是以有效视点为坐标原点的方位角  $\theta_m$  和仰角  $\Phi_m$ .然后以镜面投影点为中心,通过设置一个对两个方向都固定的孔径张角参数  $\alpha_m$  在镜面上取一个四边形片,这个片在全向图像上的投影给出像素点的邻域. Svoboda 等<sup>[8]</sup>在折反射图像匹配中也采用了类似的邻域定义方法.我们称这种方法为基于反射镜面的邻域选取方法.

Demonceaux 等<sup>[9]</sup>专门针对全向图像马尔可夫随机场图像处理对邻域系统进行了重新定义.由于折反射图像可以通过统一的球面进行等价的两步投影.他们先用摄像机坐标系统的中心在反射镜轴对应点的极坐标表示全向图像点  $P_i, (\mu, \nu) = (D \cos(\varphi), D \sin(\varphi))$ .然后将这个点反投影到单位球面表面,得到对应点  $P_s$  的球面坐标  $(1, \theta, \varphi)$ .之后他们对方位角  $\varphi$  取固定孔径张角  $1/M$ ,对仰角  $\theta$  取固定孔径张角  $1/N$  得到球面上的邻域.球面邻域再投影到全向图像得到像素点的邻域. Daniilidis 等<sup>[6]</sup>在进行折反射图像处理时采用了类似的邻域选取方法,不同的是他们没有采用单位球面,而是直接将图像点反投影到一个与图像直径相等的半球面上.我们称这种方法为基于球面的邻域选取方法.

由于单视点折反射全向系统能够重构传感器视野范围内的任何透视图像,为了看到没有变形的整个图像,通常将图像投影到一个圆柱面上,变换后的图像变形减小,容易理解.这样, Strauss 等<sup>[10]</sup>在折反射图像的数学形态学操作中,将折反射全向图像反投影到一个环绕旋转镜面的柱面上,并在圆柱面上采用传统的邻域取法获取像素对应的柱面图像邻域,而像素在全向图像中的邻域的选取就是圆柱面上的邻域反投影到全向图像后所对应的部分. Jacquy 等<sup>[11]</sup>在全向图像的边缘检测中采用了同样的邻域定义方法.我们称这种方法为基于柱面的邻域选取方法.

上面描述的全向图像邻域系统的定义方法都是将全向图像投影到另外一个空间.在这个变化的空间,能够部分消除全向传感器引起的变形,然后在该空间中采用一定的邻域选取方法选取像素的邻域并将这个邻域再投影到全向图像上最终获得像素在全向图像上的邻域,这样获得在全向图像分辨率高的位置邻域选取时面积要大些,而分辨率低的位置邻域选取时面积要小些,这样在使用邻域进行图像处理时能改善因全向图像不同位置分辨率不一致而对处理效果产生的影响.

## 3 基于图像分辨率定义的邻域系统

在进行普通透视图像处理时在所有位置都选择相同大小的邻域是因为一般认为普通透视图像在所有的位置的分辨率相差不大.如果忽略光线入射角度造成的分辨率差异,在普通透视图像的任何位置选取的邻域面积(或像素数)与该位置的分辨率的乘积为一个定常数.我们认为,在全向图像上进行新的邻域定义后也应该满足这一条件.这样在全向图像上应用经典的图像处理方法时才能够达到与处理普通透视图像时一样的效果.需要指出的是,我们在全向图像上定义新的邻域系统的目的不是针对特定图像具有最好的处理效果.因为即使对普通透视图像而言,不同的邻域大小和形状对特定的图像也会产生不同的处理效果.我们的目的是在全向图像上定义新的邻域系统后能够象在普通透视图像上一样应用经典的图像处理算子.

定义全向图像的邻域系统的主要目标之一是解决全向图像从图像的外围到中心分辨率不一致的问题.我们注意到,BAKER 等<sup>[12]</sup>已经对全向图像的分辨率进行了分析并给出了折反射传感器的分辨率的计算公式.假设用于折反射成像的普通透视摄像机的光轴与反射镜面轴线重合,在距离针孔为  $u$  的位置上形成正面的平面图像.考虑图像平面上的极小区域  $dA$ ,如果它是空间上极小的立体角  $dv$  形成的像,那么传感器在图像平面上的无穷小的区域  $dA$  中心点的分辨率就是  $dA/dv$ .根据这个定义,折反射照相机的分辨率为:

$$\frac{dA}{dv} = \left[ \frac{r^2 + z^2}{(c-z)^2 + r^2} \right] \frac{dA}{d\omega} \quad (1)$$

其中  $dA/d\omega$  是用于折反射成像的普通透视摄像机的分辨率.  $(r, z)$  是  $dA$  中心像素点在反射镜面表面的反投影点的坐标,坐标原点为折反射照相机的有效视点,  $c$  是有效视点与普通透视摄像机光心的距离.具体的计算过程请参考文献[12].

既然折反射摄像机的分辨率与用于成像的普通透视摄像机的分辨率存在式(1)所示的关系,而对普通透视摄像机采集的普通透视图像进行处理时是采用传统的邻域选取方法的.因此,为了消除由于镜面折射造成的全向图像的分辨率不一致,可以直接根据全向图像不同位置像素点之间分辨率的差别来选取不同的邻域面积.本文设计的邻域系统是以全向图像的中心像素点(即圆心)为参考点,其邻域面积(像素数)取为  $S$ ,而在图像上其他点,邻域面积的选取由该点的分辨率与中心像素的分辨率的比值来确定,为  $S$  再乘以该点分辨率与中心点分辨率的比值得到.这种邻域面积选取方法使得分辨率越高的位置选取的邻域面积越大,而且任意点的分辨率与邻域面积的比值在整个图像中为

常量,这与在普通透视图像中采用传统邻域选取方法时是一致的.同时由于不需要将图像进行空间变换,计算简单,速度快.

得到邻域面积后,如何确定邻域形状是定义全向图像邻域系统的另一个重要方面,必须考虑折反射成像对邻域形状产生的影响.上节中描述的将全向图像投影到另外一个空间中选取像素的邻域后再反投影到全向图像上的方法,在获得像素的邻域面积的同时也得到了形状.然而我们注意到,在具体实现时,由于不可能将在变换空间中选取的整个邻域或它的轮廓全部反投影到全向图像上,这些方法只是将变换空间中选取的邻域的顶点反投影到全向图像上,然后再在全向图像上根据顶点确定邻域形状.基于反射镜面的邻域选取方法中是在全向图像上连接四个顶点得到一个钻石型邻域.基于球面的邻域选取方法中是在全向图像上连接四个顶点,得到一个四方形邻域.基于柱面的邻域选取方法中是在全向图像上以四个顶点为扇形的四个顶点,选取得到一个扇形邻域.根据全向图像的环形几何特点,我们认为,邻域区域的形状应该为以图像的中心为圆心、以像素点为中心的扇形,这样就得到了全向图像中不同位置的点的不同的邻域.

在选取了邻域的面积和形状之后,接下来的问题是如何确定邻域中的像素.由于选取的邻域形状并不是在整个图像中都是水平的放置的,因此包含在邻域中的像素需要一种特定的方法来确定.我们将图像中的每个像素看作一个边长为  $1 \times 1$  的方块,采用两种方法确定邻域中的像素.一种是简单取舍法.这种方法以方块的正中心表示像素,若方块的正中心包含在计算出的邻域面积范围内,则取该像素为邻域像素,否则不取.如图 1(a) 所示,选取浅灰色的像素为深灰色像素的邻域像素.另一种是权重系数法.这种方法以方块包含在计算出的邻域面积范围内的比例作为该像素是否为邻域像素的置信度,可以在图像邻域处理的卷积运算中作为权重系数参与运算.

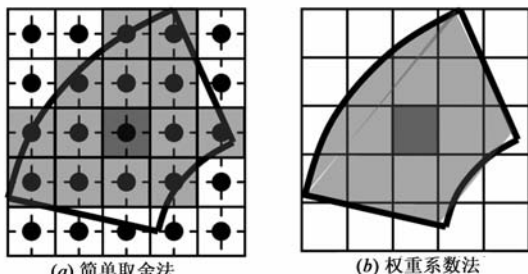


图1 邻域中像素的确定

我们分别采用基于分辨率的邻域、基于反射镜面的邻域和基于单位球面的邻域选取方法在实际的全向图像上进行邻域选取.基于反射镜面的邻域和基于球

面的邻域是我们根据文献[7]和文献[6]中描述的邻域系统选取方法实现的.邻域选取的效果图如图 2 所示.图中方块表示图像不同位置的邻域形状和大小.为了能在图像中清晰地看到邻域的形状,我们通过选择参数使得邻域面积比较大.在我们设计的邻域中,基准点邻域面积(像素数)  $S$  取为 25.同时为计算方便,我们取邻域区域的形状为围绕扇形的四边形.在基于反射镜面的邻域系统中,我们设置的孔径角度参数  $\alpha_m$  的值为 0.03.在基于球面的邻域系统中,我们设置的方位角的孔径角度参数  $M$  的值为 200,仰角的孔径角度参数  $N$  的值为 200.三种方法实现图中邻域像素选取的时间分别为 0.06s、0.09s、0.07s.

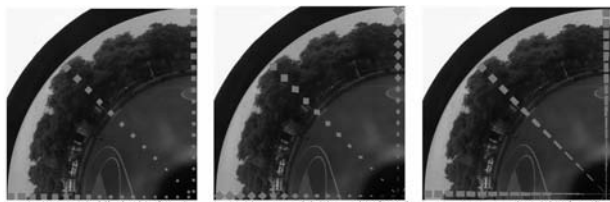


图2 全向图像邻域选取的效果图

#### 4 基于单位球面模型的全向图像分辨率计算方法

根据文献[12]的方法计算全向图像不同位置的分辨率比值时需要知道全向摄像机中反射镜面的形状和曲线参数(如双曲线的参数  $a$ 、 $b$ ),但从市面上购买的折反射全向摄像机一般不提供这些参数.这对基于图像分辨率定义邻域和基于反射镜面定义邻域造成障碍.本节我们将根据单视点折反射系统统一的单位球面成像模型来推导一种新的全向图像分辨率计算方法.

Geyer 等<sup>[13]</sup>将单视点折反射摄像机的成像过程等价两步投影:第一步,将场景透视投影到以反射镜面的焦点  $O$  为球心的单位球面上,此时反射镜面的焦点

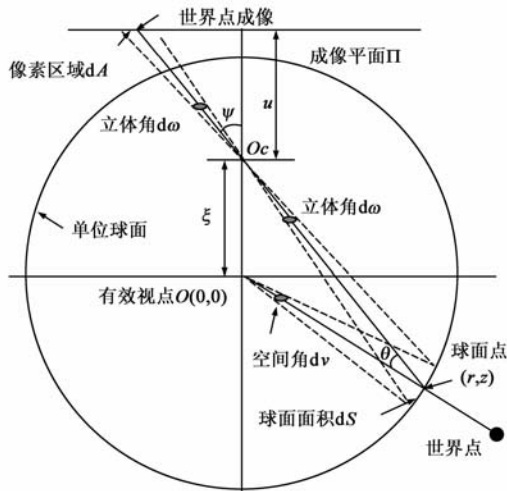


图3 单视点折反射传感器的空间分辨率

即为等效单视点. 第二步, 以某一空间点  $O_c$  为投影中心, 将单位球面点上的投影点再透视投影到与  $OO_c$  垂直的投影平面  $\Pi$  上, 从而形成折反射图像. 如图 3 所示. 其中点  $O_c$  称为虚拟摄像机光心, 虚拟摄像机的光轴是直线  $OO_c$ ,  $O$  到  $O_c$  的距离  $\xi$  称为镜面参数 (mirror parameter), 不同的镜面参数对应不同类型的反射镜面.

设  $\psi$  是球轴和  $O_c$  与折反射图像上的无限小区域  $dA$  中心点连线之间的夹角, 虚拟摄像机焦距为  $u$ , 则无限小区域  $dA$  在  $O_c$  处对应的立体角  $d\omega$  是:

$$d\omega = \frac{dA \cdot \cos^2 \psi}{u^2 / \cos \psi} = \frac{dA \cdot \cos^3 \psi}{u^2}$$

这样, 虚拟摄像机在无限小区域  $dA$  中心的分辨率是:

$$\frac{dA}{d\omega} = \frac{u^2}{\cos^3 \psi}$$

而该无限小区域在球面上成像的区域的面积  $dS$  为:

$$dS = \frac{d\omega \cdot (\xi - z)^2}{\cos \theta \cos^2 \psi} = \frac{dA \cdot (\xi - z)^2 \cdot \cos \psi}{u^2 \cdot \cos \theta}$$

其中  $\theta$  是球面点  $(r, z)$  与  $O_c$  的连线和球面点  $(r, z)$  与  $O$  的连线之间的夹角. 而  $dS$  对有效视点  $O$  在空间成像的立体角  $dv = dS$ , 因此, 折反射照相机的分辨率为:

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dv} &= \frac{u^2 \cos \theta}{(\xi - z)^2 \cdot \cos \psi} = \left[ \frac{\cos \theta \cdot \cos^2 \psi}{(\xi - z)^2} \right] \frac{dA}{d\omega} \\ &= \left[ \frac{\cos \theta}{(\xi - z)^2 + r^2} \right] \frac{dA}{d\omega} \end{aligned}$$

而:

$$\begin{aligned} \cos \psi &= \frac{\xi - z}{\sqrt{r^2 + (\xi - z)^2}} \\ \cos \theta &= \frac{1 + r^2 + (\xi - z)^2 - \xi^2}{2 \times \sqrt{r^2 + (\xi - z)^2}} \end{aligned}$$

因此:

$$\frac{dA}{dv} = \left[ \frac{1 + r^2 + (\xi - z)^2 - \xi^2}{2 \times \sqrt{r^2 + (\xi - z)^2} \times ((\xi - z)^2 + r^2)} \right] \frac{dA}{d\omega}$$

根据 Barreto 等<sup>[14]</sup>提出的球面模型的扩展模型可以推导得到虚拟摄像机的焦距  $u$  与折反射传感器中实际使用的普通透视摄像机的焦距  $u'$  存在关系:

$$u = \sqrt{1 - \xi^2} u'$$

设  $\psi'$  是普通透视摄像机光轴和光心与折反射图像上的无限小区域  $dA$  中心点连线之间的夹角, 无限小区域  $dA$  在光心处对应的立体角为  $d\omega'$ , 则普通透视摄像机的分辨率为:

$$\frac{dA}{d\omega'} = \frac{u'^2}{\cos^3 \psi'} = \frac{u^2}{(1 - \xi^2) \cos^3 \psi'}$$

而:

$$\frac{\cos \psi'}{\cos \psi} = \frac{\sqrt{\cot^2 \psi + 1}}{\sqrt{\cot^2 \psi + 1 - \xi^2}} = \frac{\sqrt{(\xi - z)^2 + r^2}}{\sqrt{(\xi - z)^2 + r^2 \times (1 - \xi^2)}}$$

所以:

$$\begin{aligned} \frac{dA}{d\omega'} &= \frac{((\xi - z)^2 + r^2 \times (1 - \xi^2))^{\frac{3}{2}} dA}{(1 - \xi^2) \times ((\xi - z)^2 + r^2)^{\frac{3}{2}} d\omega} \\ \frac{dA}{dv} &= \left[ \frac{(1 - \xi^2)(1 - \xi^2 + r^2 + (\xi - z)^2)}{2 \times ((\xi - z)^2 + r^2 \times (1 - \xi^2))^{\frac{3}{2}}} \right] \frac{dA}{d\omega} \end{aligned}$$

因此, 折反射图像中不同像素点位置分辨率等于普通透视摄像机的分辨率乘以因子:

$$\frac{(1 - \xi^2)(1 - \xi^2 + r^2 + (\xi - z)^2)}{2 \times ((\xi - z)^2 + r^2 \times (1 - \xi^2))^{\frac{3}{2}}}$$

其中  $(r, z)$  为像素点在单位球面上的反投影点的坐标,  $\xi$  为镜面参数. 这样, 通过标定获得折反射摄像机的内参数矩阵和镜面参数  $\xi$  后<sup>[15]</sup>, 就可以计算得到全向摄像机不同位置像素点的分辨率的比值. 我们已经通过实验验证了这样计算出来的结果与按文献[12]的方法计算出来的结果完全相同.

从上述推导分辨率计算公式的过程中, 很容易看出, 基于反射镜面的邻域选取方法以有效视点为中心, 通过设置一个对两个方向都固定的孔径张角参数  $\alpha_m$  在镜面上取一个四边形片, 而两个方向的孔径张角可以看作全向图像上无限小区域的入射光线空间角, 因此这样选取的四边形片的空间角相同, 进而四边形片再重投影到全向图像上后得到的邻域的面积与该位置分辨率的乘积也相同, 即满足邻域面积与位置分辨率的乘积为一个定常数的条件. 基于单位球面的邻域选取方法, 在全向图像上得到的邻域的面积与该位置的虚拟摄像机成像的分辨率的乘积也相同, 但由于虚拟摄像机与成像装置实际使用的透视摄像机焦距不同, 因而在分辨率一致性的改善方面不如基于反射镜面的邻域选取. 基于柱面的邻域选取, 由于图像投影到不同半径柱面分辨率差异大, 因而难以从理论上分析在分辨率一致性改善方面的效果.

## 5 实验结果

在这一节中, 我们将展示新的全向图像邻域选取方法在马尔可夫随机场运动目标检测方法中的效果. 马尔可夫随机场中某个节点的状态只与它邻域内的各节点有关, 而与其它节点无关<sup>[16]</sup>. 基于马尔可夫随机场的运动目标检测就是给定一个观测图像像素点的邻域中所有像素点的标记场的当前估计, 求使标记场的后验概率最大时的标记场. 因此, 像素点的邻域定义与目标检测效果密切相关.

我们针对三帧全向图像, 在马尔可夫随机场运动目标检测方法中, 分别采用传统邻域选取方法和新的全向图像邻域选取方法进行实验, 实验结果如图 4 所示. 图中从左至右分别为时刻  $t$  图像、采用均一小邻域

( $3 \times 3$ )检测结果、采用均一大邻域( $7 \times 7$ )检测结果、基于分辨率邻域的检测结果、基于反射镜面邻域的检测结果和基于球面邻域的检测结果。

从图中可以看出,当采用传统的邻域选取方法时,若应用均一小邻域,虽然可以在图像中心区域达到精确检测目标轮廓的效果,如图 4(b)所示,目标的两腿之间有 24 个像素的非目标区域,但在靠近图像外围的目标头部处由于邻域太小造成头部轮廓线不完整,头部左下部有一个 16 像素的黑洞.若应用均一大邻域,如图 4(c)所示,虽然可以保持目标头部轮廓的完整性,但在图像中心区域,由于邻域过大而使目标两腿分开的轮廓细节被抹杀.采用针对全向图像改进后的邻域进行检测,在靠近图像中心的人的腿部,邻域像素数为 10 到 11,因此检测到 21 个像素的非目标区域,较好地体现了目标两腿分开的轮廓细节.而在靠近图像外围的人的头部处,邻域像素数为 35 到 39,这样避免了头部出现黑洞,保持了目标头部轮廓的完整性,如图 4(d)所示.这表明采用改进的邻域能够克服全向图像从中心到边缘分辨率不均匀的影响,比传统均一邻域在整个图像有更一致的处理效果.从图 4(d)、图 4(e)、图 4(f)的比较可以看出,基于分辨率邻域的检测结果在图像中心区域的细节表现上优于基于反射镜面邻域和基于球面邻域的检测结果。

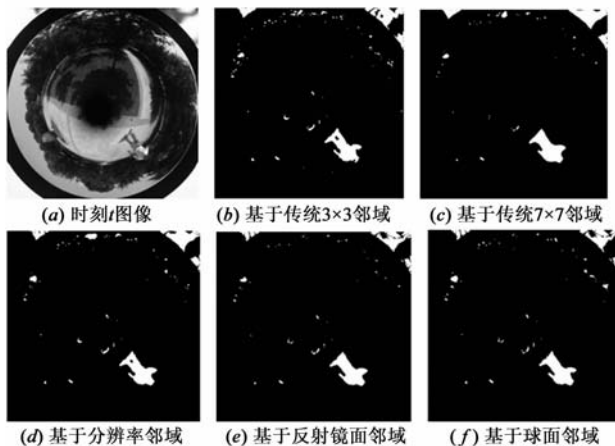


图4 马尔可夫随机场运动目标检测结果

## 6 结论

本文分析了为克服折反射全向图像不一致分辨率而提出的几种图像邻域选取方法,并进而依据全向图像的成像特点和图像不同位置分辨率的比例关系,提出了一种新的邻域定义方法.针对计算全向图像不同位置的分辨率比值需要知道全向摄像机中反射镜面的形状和曲线参数问题,根据单视点折反射系统统一的单位球面成像模型推导了一种新的全向图像分辨率计算公式.从公式的推导过程也可以看出,我们提出的方

法与基于反射镜面的邻域选取方法一样,在全向图像分辨率一致性的改善方面效果最好.我们通过实验在马尔可夫随机场运动目标检测方法中分别采用传统邻域和改进邻域对全向图像进行运动目标检测,结果对比显示出改进后的邻域比传统均一邻域在整个图像有更一致的处理效果,在较好地体现目标轮廓细节的同时保持了目标的完整.这说明了提出的全向图像邻域定义方法在马尔可夫随机场折反射全向图像运动目标检测中是适用的。

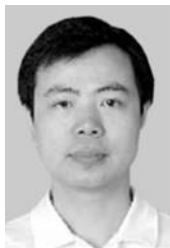
## 参考文献:

- [1] Briggs A J, Detweiler C, Li Y, et al. Matching scale-space features in 1D panoramas [J]. Comput. Vis. Image Underst., 2006, 103(3): 184 - 195.
- [2] Coleman S, Scotney B, Kerr D. Processing sparse panoramic images via space variant operators [J]. J. Math Imaging Vis., 2008, 32(3): 349 - 361.
- [3] Scotney, BW, Coleman, SA, Kerr, D. A graph theoretic approach to direct processing of sparse unwrapped panoramic images [A]. Proceedings of IEEE Int Conf Image Processing [C]. Atlanta: IEEE, 2006. 1557 - 1560.
- [4] Bigot S, Kachi D, Durand S, et. al, Spherical image denoising and its application to omnidirectional imaging [A]. Proceedings of 2nd Int Conf on Computer Vision Theory and Applications [C]. Barcelona: IEEE, 2007. 8 - 11.
- [5] Bogdanova I, Bresson X, Thiran J, et. al. Scale-space analysis and active contours for omnidirectional images [J]. IEEE Trans Image Process. 2007, 16(7): 1888 - 1901.
- [6] Daniilidis, K, Makadia, A, Blow, T. Image processing in catadioptric planes: spatiotemporal derivatives and optical flow computation [A]. Proceedings of IEEE Workshop on Omnidirectional Vision [C]. Denmark: IEEE, 2002. 3 - 10.
- [7] Ieng S., Benosman R, Devars J. An efficient dynamic multi-angular feature points matcher for catadioptric views [A]. Proceedings of Workshop on Omnidirectional Vision and Camera Networks [C]. Madison: IEEE, 2003.
- [8] Svoboda, T, Pajdla, T. Matching in catadioptric images with appropriate windows and outliers removal [A]. Proceedings of Internat Conf On Computer Analysis of Images and Patterns [C]. Poland: IEEE, 2001. 733 - 740.
- [9] Demonceaux C, Vasseur P. Markov random fields for catadioptric image processing [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(16): 1957 - 1967.
- [10] Strauss O, Comby F. Variable structuring element based fuzzy morphological operations for single viewpoint omnidirectional images [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(20): 3578 - 3596.
- [11] Jacquy F, Comby F, Strauss O. Fuzzy edge detection for omnidirectional images [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159

(15):1991 – 2010

- [12] Baker, S., Nayar, S. K. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation[J]. Internat. J. Comput. Vision, 1999, 35 (N2): 175 – 196.
- [13] Geyer, C., Daniilidis, K. Catadioptric projective geometry[J]. Internat J Comput. Vision, 2001, 45(N3): 223 – 243.
- [14] Barreto J P, Araujo H. Geometric properties of central catadioptric line images and their application in calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2005, 27(8): 1327 – 1333.
- [15] Mei C, Rives P. Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Roma: IEEE, 2007. 3945 – 3950.
- [16] 吴永辉, 计科峰, 李禹, 等. 基于 Wishart 分布和 MRF 的多视全极化 SAR 图像分割[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2302 – 2306.  
Wu Yong-hui, Ji Ke-feng, Li Yu, et al. Segmentation of multi-look fully polarimetric SAR images based on Wishart distribution and MRF[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(12): 2302 – 2306. (in Chinese)

#### 作者简介:



**谭树人** 男, 1972 年生于湖南冷水江. 国防科技大学信息系统与管理学院副教授, 博士研究生. 研究方向为多媒体信息系统与虚拟现实技术. Email: srtan@sina.com



**林高鹏** 男, 1986 年生于福建宁德, 硕士研究生. 研究方向为多媒体信息系统与虚拟现实技术.



**张茂军** 男, 1971 年生于湖北黄冈, 国防科技大学信息系统与管理学院教授, 博士生导师. 中国图像图形学会虚拟现实专业委员会委员、中国人工智能学会人工情感及人工心理专业委员会委员、IEEE 会员, ACM 会员, 2006 年入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”. 主要研究方向为虚拟现实、计算机视觉等.