

文章编号 1004-924X(2011)07-1701-07

# 反射型立体视觉系统的视差估计和图像复原

姜 伟\*, 魏世衡

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**根据反射型立体视觉系统的成像特点,提出了一种基于倒谱分析的反射型立体视觉系统视差估计方法,并利用滤波原理对反射型立体视觉系统的重影图像进行复原,获得目标场景的清晰图像。反射型立体视觉系统是一种新型单目测距方式,可以实时获取目标场景的重影图像。首先,将图像分割为矩形观测区域小块;然后,对各观测区域块进行倒谱分析,并通过检测倒谱域峰值位置估计图像的重影位移量(即视差),计算目标点的三维空间距离;最后,利用估计的视差构造逆滤波器,对重影图像进行滤波复原,获取场景清晰图像。通过真实场景实验验证了本文方法的正确性和有效性,结果表明,本文方法的视差估计结果比自相关法提高了15%~20%,实现了稳定视差估计,复原了场景的清晰图像。

**关键词:**反射型立体视觉;视差估计;倒谱分析;图像复原

**中图分类号:**TP242.62;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111907.1701

## Disparity estimation and image restoration for reflection stereo vision

JIANG Wei\*, WEI Shi-heng

(State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

\* Corresponding author, E-mail: jiang wei@ csc. zju. edu. cn

**Abstract:** On the basis of imaging characteristics of a reflection stereo vision, an approach for disparity estimation and image restoration of reflection stereo vision was proposed and the double image of the vision system was restored. The reflection stereo vision is a monocular system, and can capture the double image in real time. In experiment, the image was segmented into the rectangle observing blocks firstly, then, the cepstrum analysis was used to estimate the displacement amount (disparity) of each pixel in the double image by detecting the two symmetrical peaks from the cepstrum domain and to calculate the 3D space distance of a target point. Finally, the disparity was used to combine an inverse filter to restore the double image and to obtain a good scene image. Experimental results show that the method is effective for disparity estimation and image restoration, and the accuracy of the disparity estimation has improved by 15%—20%.

**Key words:** reflection stereo vision; disparity estimation; cepstrum analysis; image restoration

## 1 引言

基于三角测量原理的立体视觉技术是模式识别领域的一个研究热点<sup>[1-3]</sup>,因其在三维场景重建和机器人导航等领域应用广泛,自上 20 世纪 60 年代即备受关注。

机器视觉系统可分为主动式和被动式两种。主动式视觉方式使用投影仪等信号投射设备和相机构成硬件系统,通过分析相机获取的结构光信号,获取目标场景的三维信息。该方式结果稳定,精度高;但系统造价高、构造复杂,阻碍了应用推广。被动式视觉方式由两台或多台位置固定并经过精确标定的摄像机组成,通过匹配相机图像间各像素的对应点来估计视差,进而计算空间点距离信息,重建三维场景<sup>[1-3]</sup>。该方法三维重建精度高、结果稳定、应用领域广泛,是机器视觉领域的代表性方法。针对于该类方法的多机系统标定、外极线约束关系的计算与应用<sup>[1]</sup>、对应点匹配方法以及三维模型的生成方法等内容仍然是机器视觉领域的研究热点,每年都有大量的研究成果被发表<sup>[1-3]</sup>。然而,由于该方法使用多台相机,相机间的构造差异(包括内部参数差异和颜色系统差异)增加了对应点匹配的复杂性,影响距离测量结果的稳定性,是该类方法无法回避的难题;同时,该类系统造价高、不利于小型化。

单目立体视觉系统使用单个相机重建三维场景,在原理上弥补了上述多机视觉系统的缺点,具有广泛的应用前景。单目立体视觉系统重建三维场景方法大致可分为 3 种:多视角法<sup>[4-5]</sup>、多图像法<sup>[6-7]</sup>以及多曝光法<sup>[8]</sup>。多视角方法利用平面镜反射光线,在相机投影面上同时生成目标物体多个影像,并利用多机系统的方法,实现视差估计和三维重建。多图像方法通过移动一台相机,拍摄目标场景的不同视点图像,进而实现距离测量和三维重建;该方法只适用于静态场景。多曝光单目立体视觉方法使用一台可变焦相机拍摄不同焦距下的目标场景图像,并通过分析图像的散焦情况,实现三维复原;该方法也只适用于静态场景。反射型立体视觉<sup>[9]</sup>属于多曝光法,但可应用于动态场景,且具有设备结构和成像模型简单,造价低

廉、易于小型化等优点。

本文根据反射型立体视觉系统的成像特点,提出了一种基于倒谱分析的视差估计方法来实现稳定视差估计,并进一步实现目标物体的三维形状复原;同时提出了基于逆滤波原理进行重影图像复原的方法,复原得到了目标物体清晰图像。

## 2 反射型立体视觉系统

反射型立体视觉系统是一种新型的单目测距视觉装置,由一块半透明玻璃板和一台摄像机组成,其设备结构如图 1 所示。半透明玻璃板上表面的半透明镀膜使得物体部分光线透过该上表面进入玻璃板内部,部分光线被上表面直接反射,投影到相机投影面;照射进入玻璃板内部的部分光线被玻璃板内表面反射后再次折射出上表面,进入相机视野。因此经过半透明板上、下表面反射的物体光线在摄像机投影面上生成叠加的重影图像,如图 2 所示。

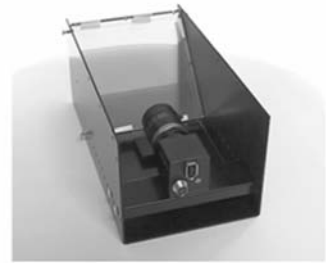


图 1 反射型立体视觉系统

Fig. 1 Reflection stereo system

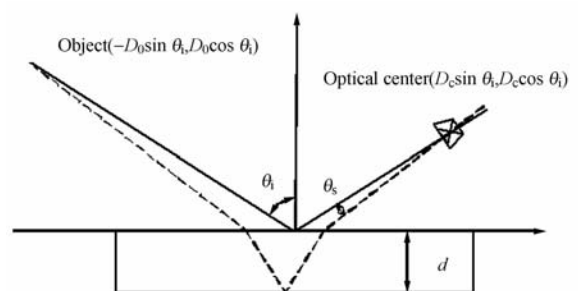


图 2 反射型立体视觉原理

Fig. 2 Geometry of reflection stereo apparatus

图 2 为反射型立体视觉成像模型<sup>[10]</sup>,由于半透明玻璃板内部存在光线折射效果,玻璃板上、下

表面反射光线生成的两条光路之间存在视差角,即图2中的光路夹角 $\theta_s$ 。 $\theta_s$ 的存在导致物体点在摄像机投影平面上生成两个投影点,形成重影效果。设半透明板上表面折射中心为坐标原点,半透明玻璃板厚度为 $d$ ,玻璃板折射率为 $n$ ,则物体点到镜头中心的距离可以通过式(1)计算获得:

$$D_0 + D_c = d \frac{\sin(2(\theta_i - \theta_s))}{\sin \theta_s \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta_i - \theta_s)}}, \quad (1)$$

式(1)中玻璃板厚度 $d$ 和玻璃板折射率 $n$ 可以通过实验测量获得;根据相机和玻璃板的位置关系及观测像素点的位置,可以计算角度 $\theta_i$ 。因此,估计出视差角度 $\theta_s$ 即可使用式(1)计算物体点的距离信息。由图2可以看出,视差角 $\theta_s$ 关联于重影图像上像素点的重影位移量,本研究通过在重影图像上估计各像素点重影位移量(为叙述简便,本文称该位移量为重影视差),计算相应的视差角度 $\theta_s$ ,进而计算出物体点的距离,实现物体三维形状复原。

$$|F(\log |F(f(x))(u)|^2)(\chi)| = |F(\log |F(I(x))(u)(I + ge^{-j\Delta u})|^2)(\chi)| = |F(\log |F(I(x))(u)|^2)(\chi)| + 2\pi \log(1 + g^2)\delta(\chi) + \frac{2g}{1 + g^2}\pi\delta(\delta \pm \Delta) + \left| F\left(\sum_{m=2}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{m} \left(\frac{2g}{1 + g^2} \cos \Delta u\right)^m\right)(\chi) \right|, \quad (2)$$

式(2)表示回声间距方程,等式右侧第一项为原信号的幅值倒频谱,一般原信号为非周期信号,因此该项不具有特殊意义;第二项是一个加权冲击信号,将使所有峰值变得更加尖锐;第三项是与叠加位移量 $\Delta$ 有关的冲击信号,该项将在倒谱域生成两个距离为 $2\Delta$ 的对称峰值,通过在倒谱域检测该尖峰位置,可以获得叠加位移量 $\Delta$ 的估计值,进而实现原始信号和叠加信号的分离。

### 3.2 重影图像视差估计

由反射型立体视觉系统重影图像的成像原理可知,重影图像是二维原始图像信号的错位叠加,可以应用倒谱分析方法实现其叠加位移量估计。

3.1节以一维信号为例说明了基于倒谱分析的叠加信号位移量估计方法,该方法应用于二维离散信号时需注意如下两点:

(1) 重影图像同时存在 $x$ 轴与 $y$ 轴两个方向的移位,需分别计算;

## 3 基于倒谱分析的视差估计

### 3.1 倒谱分析

倒谱分析方法于1963年被首次提出<sup>[11]</sup>,用于处理复杂频谱图上的周期结构,其在雷达回波分析、地震波、超声波和语音信号识别等领域得到了广泛应用。

倒谱有很多种计算方式,实域倒谱、复域倒谱、功率倒频谱等,其中常用的是功率倒频谱,是信号对数功率谱的功率谱,数学算式为 $|FFT(\log |FFT(f(x))(u)|^2)(\chi)|^2$ 。这里以一维信号为例简单介绍倒谱分析方法。

设 $I(x)$ 为原信号,则位移信号(比如回声信号)与原信号的叠加信号可以描述为 $f(x) = I(x) + gI(x - \Delta)$ ,其中 $g$ 表示叠加信号衰减强度, $\Delta$ 表示叠加位移量。对该信号进行倒谱计算(为了叙述方便,此处使用幅值倒频谱代替功率倒频谱),可以得到等式(2),其中 $u$ 表示原信号在傅里叶域中的变量, $\chi$ 表示原信号在倒谱域中的变量。

(2) 图像中各像素对应场景中不同三维空间点,各点的距离信息不同,因此重影图像上不同像素点的重影位移量也不同。本研究为计算需要,假设图像上局部区域相邻像素间视差一致。

以下详述位移视差估计方法。

(1) 重影图像进行高通滤波等预处理操作

相对于图像本身的平滑信号,重影叠加信号往往出现在高频区域,应用高通滤波器增强高频信号,可以增强倒谱域重影位移对应峰值的强度,效果非常明显。

(2) 观测区域进行倒谱分析

图3为一真实场景的重影图像。对于图像上每一像素点,以该像素点为中心的的正方形区域为观测区域。本研究中,观测区域是大小为 $48 \times 48$ 的正方形区块。以图3为例,取该图像左侧观测区域(图中左上部黑色正方形区域),计算其倒谱信息,图4显示了该区域的倒谱域信号。图4中

(a)和(b)分别为倒谱域信号的三维坐标显示结果和  $y-z$  平面投影结果。可以看出,在主峰左、右两侧对称位置存在两个明显的峰值,由第 2.1 节分析可知,该第二峰值信号与主峰值信号之差即为该观测区域的重影位移量。

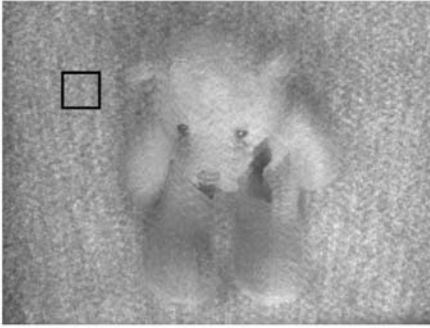
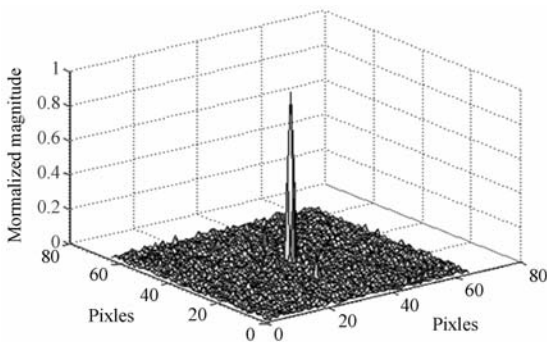


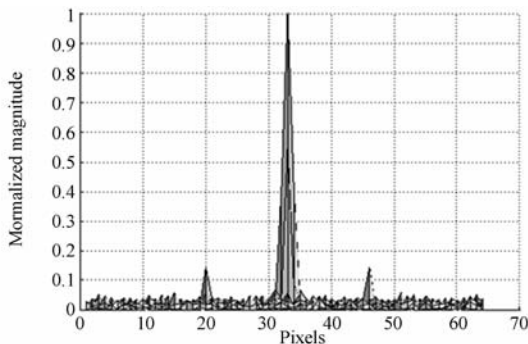
图 3 反射型立体视觉重影图像

Fig. 3 A double image



(a) 倒谱分析结果

(a) Cepstrum analysis



(b) 结果侧视图

(b) Cross-section view

图 4 重影图像倒谱域信号

Fig. 4 Cepstrum analysis of a double image

### (3) 峰值检测

由于真实场景中深度在变化,往往会导致观测区域内各像素点的位移视差不一致,造成真实位移视差对应的峰值不明显,甚至淹没于其它峰值中而无法正确检测。类似于双目立体视觉系统的外极几何,反射型立体视觉系统也存在外极约束关系。在本研究的先期工作中已经推导出了反射型立体视觉系统的外极几何约束条件,并给出了计算方法<sup>[10]</sup>。本文方法使用该约束关系,对每一个基准像素点计算图像上该像素点的外极约束线,并在外极线上探查第二峰值位置,使得峰值搜索由二维退化为一维,从而降低了搜索的暧昧性,提高了峰值检测的正确率。

本研究依此方法,对整幅图像的全部像素点循环二和三步操作,逐点计算,实现整幅图像的视差估计。

## 4 图像复原

本节将介绍基于逆滤波器的重影图像复原方法。设  $I(x, y)$  表示清晰图像信号,  $f(x, y)$  表示重影图像信号, 等式(3)表示重影模糊处理模型<sup>[12]</sup>, 其中  $H(I(x, y))$  表示退化函数,  $\eta(x, y)$  为噪声。

$$f(x, y) = H(I(x, y)) + \eta(x, y). \quad (3)$$

图像复原的目的是根据重影图像得到原图像的一个估计  $\hat{I}(x, y)$ , 同时要使这个估计尽可能接近原图像。若  $H$  是线性、空间不变的过程, 则图像退化模型在空间域可以通过等式(4)给出, 其中  $*$  表示图像卷积。

$$f(x, y) = h(x, y) * I(x, y) + \eta(x, y), \quad (4)$$

对上式进行傅里叶变换后可得到与等式(4)等价的频域模型, 如等式(5)所示, 其中大写字母分别对应等式(4)各项傅里叶变换对,  $N(u, v)$  对应噪声  $\eta(x, y)$ , 进而可以通过傅里叶逆变换获得清晰图像的一个估计值  $\hat{I}(x, y)$ , 见等式(6)。

$$F(u, v) = H(u, v) \text{DFT}(I(x, y)) + N(u, v), \quad (5)$$

$$\hat{I}(x, y) = \text{IDFT}\left(\frac{F(u, v) - N(u, v)}{H(u, v)}\right). \quad (6)$$

本研究应用上述方法实现重影图像复原。重影图像生成模型可用下式(7)表示, 其中  $g$  表示透明板上层表面的光线透过率和反射率之比,  $I(x, y)$  表示重影叠加前的清晰图像,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分

别表示  $x$  和  $y$  方向叠加位移量,即位移视差:

$$f(x,y) = I(x,y) + gI(x+\Delta x,y+\Delta y) + \eta(x,y). \quad (7)$$

对等式(7)进行傅里叶变换,得到等式(8):

$$F(u,v) = DFT(I(x,y)) (1 + ge^{-j2\pi(\frac{u\Delta x}{M} + \frac{v\Delta y}{N})}) + N(u,v), \quad (8)$$

其中  $M,N$  为图像观察区域的长和宽,  $F(u,v)$  表示重影图像  $f(x,y)$  的傅里叶变换。进而通过傅里叶逆变换可以获得原图像的一个估计值,由等式(9)表示:

$$\hat{I}(x,y) = IDFT\left(\frac{F(u,v)}{H} - \frac{N(u,v)}{H}\right), \quad (9)$$

其中,  $H = 1 + ge^{-j2\pi(\frac{u\Delta x}{M} + \frac{v\Delta y}{N})}$ 。

式(9)中  $F(u,v)$  为重影图像的傅里叶变换,比率系数  $g$  可以通过实验获得,视差  $\Delta x$  和  $\Delta y$  使用第4节方法估计,图像观察区域的长和宽( $M,N$ )已知,因此,在忽略噪声影响的情况下,利用式(9)可以计算出观察区域的清晰图像。同时,对图像中的各像素点循环处理,可以实现整幅图像复原。

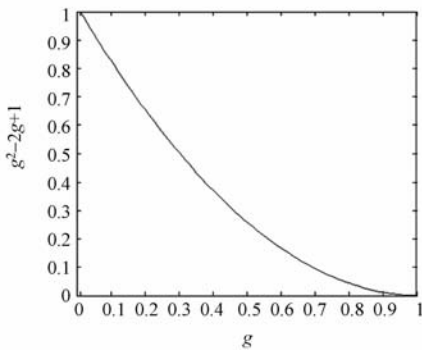


图5  $g$  与  $g^2 - 2g + 1$  关系图

Fig. 5 Relationship between  $g$  and  $g^2 - 2g + 1$

然而,在使用逆滤波器进行图像复原时,式(9)的分母  $H$  为零或接近于零时,噪声成分  $N(u,v)$  将被无限放大,不能忽略,影响复原效果,被称为“病态问题(ill-condition)”<sup>[13]</sup>。

本研究中,由

$$\|H\|^2 = g^2 + 2\cos\left(\frac{u\Delta x}{M} + \frac{v\Delta y}{N}\right)g + 1,$$

其中,  $u, v \in [0, 2\pi], g \in [0, 1]$  可以获得关系

$\|H\|^2 \geq g^2 - 2g + 1$ 。图5是变量  $g$  与等式  $g^2 - 2g + 1$  间的关系图。由该图可见,  $g$  小于 0.6 时,  $\|H\|^2$  的值大于 0.25, 远离零值,可以避免“病态问题”的出现。因此,本研究在半透明板上表面镀膜时,选择透光系数  $g$  为 0.5 来避免逆滤波器“病态问题”出现,保证图像复原结果的稳定性。

## 5 实验结果

为了检验本文方法的正确性和有效性,本研究针对位移视差估计和清晰图像复原做了检定实验。

图6和图7显示了几个实验结果。图6中(a)为拍摄的目标物体,(b)为拍摄的重影图像。

利用2节中的倒谱分析方法和参考文献9中基于自相关的方法对重影图像6(b)进行视差估计(实验中两种方法的观察区域大小均为  $48 \text{ pixel} \times 48 \text{ pixel}$ ),图7(a)为本研究方法视差估计结果图(即视差图),图中灰度值代表视差大小;同图的结果(b)为文献9中基于自相关方法的视差估计结果。与自相关方法相比较,倒谱分析的信号功率谱对数加权使傅里叶再变换后的信号能量集中,信号的功率谱峰值更加尖锐,利于峰值位置检测和提高检测精度。由图7(a)和(b)可以看出,本研究方法结果稳定、形状轮廓清晰,明显优于文献9自相关方法的结果。图7(c)为利用(a)的视差复原的目标物体三维形状,该图可以看出,三维复原结果正确地反映了玩具熊的头部和四肢间的相对位置关系和形状。



(a) 摄影目标物  
(a) Object

(b) 重影图像  
(b) Double image

图6 试验用目标物体和拍摄的重影图像

Fig. 6 Experimental object and its double image



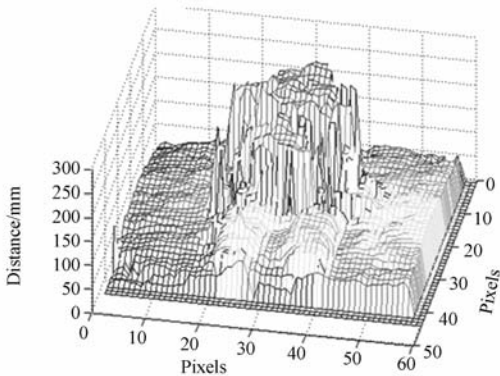
(a) 本文方法实验结果

(a) Disparity map estimated by proposed method



(b) ZNAC 法实验结果

(b) Disparity map estimated by ZNAC method



(c) 三维重建结果

(c) Result of 3D reconstruction

图 7 视差图和三维复原结果

Fig. 7 Disparity map and 3D restoration result

图 8 为基于第 3 节方法的清晰图像复原结果。与重影图像 6(b) 相比较可以看出, 图 8 的复原图像去除了重影图像中类似“镜头上、下抖动”的影响, 得到了理想的清晰图像。



图 8 图像复原结果

Fig. 8 Image restoration

## 6 结 论

本文提出了一种基于倒谱分析的反射型立体视觉系统视差估计和图像复原方法。该方法首先分析反射型立体视觉获取图像的倒谱域特性, 通过在倒谱域检测第二峰值估计重影图像的位移视差; 然后, 利用逆滤波原理, 使用估计的视差信息复原重影图像, 获得目标的清晰图像; 最后, 通过真实场景实验验证了本文方法的正确性和有效性。

今后, 将利用已知几何形状的物体等作为对象进行三维复原精度检定实验; 同时, 考虑算法实时性问题, 进行动态场景三维复原和高清晰视频复原方面的研究。致谢: 感谢日本大学清水雅夫教授提供本研究用实验素材。

## 参考文献:

- [1] JAMES P M, ALAN C B, LAWRENCE K C. Active, foveated, uncalibrated stereovision[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 85(2): 192-207.
- [2] MONACO J P, BOVIK A C, CORMACK L K. Nonlinearities in stereoscopic phase-differencing[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17

(9): 1672-1684.

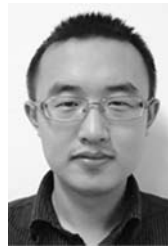
- [3] JAVIER D, EDUARDO R, SILVIO P S, *et al.*. A phase-based stereo vision system-on-a-chip[J]. *Bio-Systems*, 2007, 87: 314-321.
- [4] GLUCKMAN J M, NAYAR S K. Catadioptric stereo using planar mirrors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2001, 44(1): 65-79.
- [5] JIANG W, SHIMIZU M, OKUTOMI M. Single-camera multi-baseline stereo using fish-eye lens and

- mirrors[C]. *Proceedings of the 9th Asian Conference on Computer Vision, Xi'an P. R. China; IEEE*,2009;347-358.
- [6] GAO C, AHUJA N. A refractive camera for acquiring stereo and super-resolution images[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York; IEEE*, 2006;2316-2323.
- [7] SEITZ S, CURLESS B, DIEBEL J, *et al.*. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York; IEEE*, 2006; 519-528.
- [8] PACHIDIS T P, LYGOURAS J N. Pseudo-stereo vision system: a detailed study[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2005, 42(2):135-167.
- [9] SHIMIZU M, OKUTOMI M. Reflection stereo-no-vel monocular stereo using a transparent plate[C]. *Canadian Conference on Computer and Robot Vision, CRV*, 2006;14-14.
- [10] SHIMIZU M, OKUTOMI M. Calibration and rectification for reflection stereo[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, AK; IEEE*,2008;1-8.
- [11] BOGERT B P, HEALY M J R, TUKEY J W. The quefrency alalysis of time series for echoes; cepstrum, pseudo- autocovariance, cross-cepstrum, and saphe cracking[J]. *Time Series Analysis*, 1963(15):209-243.
- [12] GIANNIS C, NIKOLAOS G, ARISTIDIS L, *et al.*. Variational bayesian image restoration based on a product of t-distributions image prior [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(10): 1795-1805.
- [13] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A review of image denoising algorithms, with a new one[J]. *Multiscale Modeling and Simulation*, 2005,4(2): 490-530.

#### 作者简介:



姜 伟(1969—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副研究员,2005年于日本东京工业大学获得博士学位,主要从事图像处理和机器视觉等方面的研究。E-mail: jiangwei@csc.zju.edu.cn



魏世衡(1987—),男,吉林长春人,硕士研究生,2010年于浙江大学获得学士学位,主要从事机器视觉及自动控制方面的研究。E-mail: wsh1987@zju.edu.cn

(本栏目编辑:李树军)