

基于空间位置特征的运动阴影检测方法

彭 祺, 仲思东, 屠礼芬, 梅天灿

(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对现有依据光学属性检测阴影的方法对不同场景通用性不强、对光照变化敏感等问题, 提出一种基于空间位置特征的运动阴影检测方法. 用经过标定的双目立体摄像机同时采集背景图像像对. 离线获取背景图像对中各匹配点的位置对应关系. 投射阴影附着在背景表面, 与背景图像像对的位置对应关系相同, 故可以通过比较前景图像像对各点在背景对应位置上像素值的相似程度来剔除阴影. 该方法不需对环境特征及光照条件等先验知识的学习, 各种复杂光照条件均不影响其检测精度. 实验表明, 该方法能够有效地检测出运动阴影.

关键词: 阴影检测; 立体视觉; 空间位置; 运动目标; 匹配

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2012)-05-0614-06

Moving Shadow Detection Based on Space Location Feature

PENG Qi, ZHONG Sidong, TU Lifen, MEI Tiancan

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to overcome the problems of poor universality and sensitivity of light change in the existing shadow detection methods based on optical properties, a moving shadow detection method based on space location feature is introduced. A calibrated binocular stereo camera is used to capture stereo background images at the same time. The position relationships between matching points from the pair of background images is calculated off-line. The cast shadows adhere to the background surface, and the matching points of that shadow have the same position relationships with that of the background stereo images, so the cast shadows can be removed by comparing the level of similarities of pixel values between the left and right images on the position of matching points in the background. Prior knowledge about neither the environment characteristics nor the lighting conditions is required in the proposed approach, and all kinds of complicated lighting conditions will not affect the detection precision. Experimental results demonstrate that this approach can effectively detect moving shadows.

Keywords: shadow detection; stereo vision; space location; moving object; matching

1 引言 (Introduction)

从视频序列影像中提取运动目标, 是机器视觉领域的重要课题^[1]. 运动目标投射到背景上的阴影通常与目标有相似的运动特性. 阴影可以分为自身阴影和投射阴影^[2], 在运动目标检测中, 自身阴影属于目标的一部分, 它是由于物体自身没有被光源照射到而产生的. 投射阴影是由于目标遮挡住光源从而在另一目标表面产生的阴影, 若另一物体为背景, 则需要去除.

目前已经提出的阴影检测方法^[3]主要分为两类: 基于模型^[4-6]和基于特征^[7-9]的方法. 基于模型的方法需要一个学习过程来初始化模型参数, 如目

标的形状、光源属性等, 这种方法由于建模过程比较复杂, 而且对于不同的场景有多变性, 对于同一场景, 也会有易变性, 限制了该类方法的使用. 基于特征的方法利用阴影自身的属性, 如纹理、颜色、梯度、亮度等信息, 来识别阴影. 该方法不需要先验知识的积累, 但是依然存在一些问题, 比如平坦区域、目标与阴影具有相似颜色和纹理区域、深色的前景等, 都很难根据阴影的属性来分辨. 文 [10] 结合了区域的颜色和纹理特征来检测阴影, 效果比单一的属性好, 但同样难以克服光学属性对环境变化敏感的问题.

本文通过对双目立体视觉系统的深入研究, 提出一种基于立体视觉理论的方法, 根据点的空间位

置特征来检测阴影. 投射阴影附着在背景或目标表面, 这是一个稳定的特征, 在运动目标检测中, 只需要去除投射在背景上的阴影, 而投射在目标上的阴影被认为是目标的一部分, 该方法的目的就是把投射在背景上误检为前景的运动阴影去除, 以提高运动目标检测的精度.

2 双目立体视觉原理 (The principle of binocular stereo vision)

双目立体视觉原理、摄像机的标定方法见文 [11]. 空间中的点 P , 其物方空间坐标系中的坐标为 (X, Y, Z) , 在左摄像机的像平面坐标为 (u_{LF}, v_{LF}) , 右摄像机的像平面坐标为 (u_{RF}, v_{RF}) , 如图 1 所示.

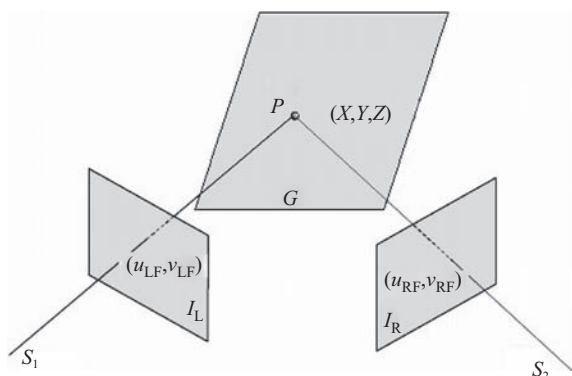


图 1 立体图像的位置关系

Fig.1 Position relationship in stereo image

传统的双目立体视觉系统通过引入建立在一个世界坐标系下的双目摄像机同时拍摄图像, 得到 2 组关于空间点 3 维信息的线性方程 (式 (1) 和 (2)).

$$\begin{aligned} & (a_{L1} - u_{LFC_{L1}})X + (a_{L2} - u_{LFC_{L2}})Y + (a_{L3} - u_{LFC_{L3}})Z \\ &= u_{LF}Z_{LS} - X_{LS}(b_{L1} - v_{LFC_{L1}})X + (b_{L2} - v_{LFC_{L2}})Y + \\ & (b_{L3} - v_{LFC_{L3}})Z \\ &= v_{LF}Z_{LS} - Y_{LS} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & (a_{R1} - u_{RFC_{R1}})X + (a_{R2} - u_{RFC_{R2}})Y + (a_{R3} - u_{RFC_{R3}})Z \\ &= u_{RF}Z_{RS} - X_{RS}(b_{R1} - v_{RFC_{R1}})X + (b_{R2} - v_{RFC_{R2}})Y + \\ & (b_{R3} - v_{RFC_{R3}})Z \\ &= v_{RF}Z_{RS} - Y_{RS} \end{aligned} \quad (2)$$

(a_{L1}, a_{L2}, a_{L3}) 、 (b_{L1}, b_{L2}, b_{L3}) 、 (c_{L1}, c_{L2}, c_{L3}) 、 (X_{LS}, Y_{LS}, Z_{LS}) 为左摄像机的参数 (旋转平移矩阵), (a_{R1}, a_{R2}, a_{R3}) 、 (b_{R1}, b_{R2}, b_{R3}) 、 (c_{R1}, c_{R2}, c_{R3}) 、 (X_{RS}, Y_{RS}, Z_{RS}) 为右摄像机的参数.

所使用的立体摄像机内外参数均已标定, 本课题组已对摄像机模型、各参数的意义及获取方法进

行了大量研究并构建了自主软硬件平台, 见文 [12]. 传统坐标重建的任务是已知 (u_{LF}, v_{LF}) 和 (u_{RF}, v_{RF}) 以及左右摄像机的内外参数, 通过以上 4 个方程求解 3 个未知数, 即点 P 的物方空间坐标 (X, Y, Z) .

现在假设图 1 中平面 G 的方程表示为

$$aX + bY + cZ = 1 \quad (3)$$

若平面方程的系数 $M = (a, b, c)^T$ 已知, 那么该平面中的点就可以根据几何位置快速实现稠密匹配. 对于左图像中的每个点, 满足式 (1) 中的两个方程, 结合平面方程 (3) 的约束, 就可以计算出各点的物方坐标 (X, Y, Z) , 代入式 (2) 中即可求出这些点在右图像中的对应位置.

3 运动阴影检测 (Moving cast shadow detection)

基于空间位置特征的运动阴影检测基于这样一个事实: 阴影投射在实体表面而不会悬浮在空中. 本文需要剔除的阴影, 附着在背景表面, 那么阴影在立体像对中的位置对应关系应该与背景一致, 而真正的运动目标由于会有高度信息, 对应位置将会改变. 摄像机固定以后, 在没有目标的情况下获取背景图像中各点的稠密匹配位置对应关系, 分析运动目标检测结果的掩膜, 剔除在对应位置能够正确匹配的点, 这些点就是附着在背景表面的阴影点, 而目标上各点的匹配位置相对于背景匹配位置已发生改变, 应予以保留. 传统的稠密匹配问题原本就是一个经典难题, 当前最优秀的算法 [13-14] 依然难以达到很高的精度. 在运动目标检测中, 由于阴影投射到的背景通常是地面、墙面等较平坦区域, 那么该平面内部的点都能满足该平面方程的约束 (式 (3)), 对于固定的场景, 本文对每个平面先选定 3 对以上的匹配点对标定该平面方程系数, 那么对于左图像中的任意一点, 结合式 (1) ~ (3) 即可计算出其匹配点在右图像中的位置, 反之亦然, 存储各点的位置对应关系, 用于像素差分别除投射阴影.

3.1 阴影检测原理

基于空间位置特征的运动阴影检测算法原理如图 2 所示.

图 2 中上面两幅图像为没有目标时各点的位置对应关系, A 与 A' 点, B 与 B' 点匹配, 摄像机位置固定, 则左右图像上的点位置对应关系不变. 当有目标进入场景时, 在目标所在位置的点, 其对应位置不再匹配 (B 和 B'), 而非目标区域 (A 与 A') 依然匹配, 检测这种变化就可以得到运动目标, 这是一

种立体像对对应位置上点的差分。左右图像各点位置对应关系通过同一平面上的点映射来实现稠密匹配,这个方法比较简单,但是需要先获取各平面至少 3 对特征点,本文使用该方法。

阴影检测步骤为:首先通过标定背景,获取各平面方程的系数,确定各平面内的点在左右图像上的位置对应关系。然后对目标检测结果的掩膜图像在左右图像中对应位置点做差分运算,如果是目标点,差分结果会较大;由于阴影本身无高度信息,只是改变背景表面光学属性,阴影点对于左右两幅图像而言,空间位置对应关系是不变的,故差分结果会比较小。由于该阴影检测算法比较的是左右图像对应位置像素点的差异,而不是传统的当前帧与背景帧比较,当光照发生变化时,对于左右图像而言,变化是一致的,所以对差分结果影响非常小,对光照变化不敏感。

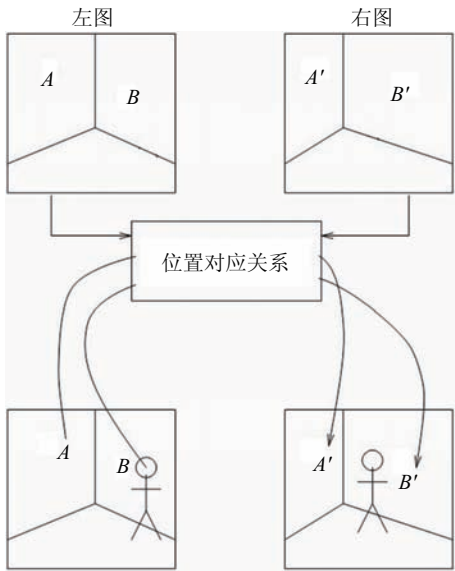


图 2 算法原理说明
Fig.2 Illustration of the algorithm's principle

3.2 初始化点的位置对应关系

图 3 所示为一个背景有 3 个平面的室内场景,3 对以上的匹配点对可以确定 1 个平面,对于一些有纹理的场景,可以手动提取每个平面内 3 对以上匹配点对,根据式 (1)、(2) 计算出其物方空间坐标,进而用最小二乘法拟合该平面方程的最优化系数。对于图 3 所示的场景,由于没有纹理特征,故而标定平面方程系数和公共视场范围时需要人工贴标志点。图 3 中,左边的平面需要 4 个标志点,图中用红绿十字标志表示。同理,要拟合正前方平面和底面分别需要 4 和 5 个标志点。

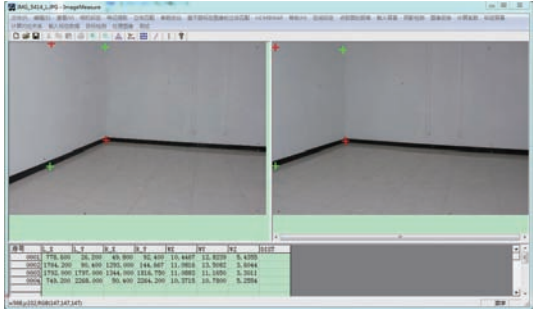


图 3 背景图像对
Fig.3 Background image pair

设 $I_L(x,y)$ 、 $I_R(x,y)$ 分别表示左右图像,其中 x 和 y 分别为图像坐标系中的坐标,图像分辨率为 $M \times N$ 。对于左图像中的点 (x_l, y_l) ,右图像中与之匹配的点位置为 (x_r, y_r) ,可结合式 (1) 和该点所在的平面方程 (3) 计算得到。不在公共视场范围内的点没有匹配点,对应点位置坐标均用 (0,0) 表示,那么在公共区域,与左图匹配的点在右图中的位置可初始化为一个大小为 $M \times N \times 2$ 的数组,表示为式 (4),同理,与右图匹配的点在左图中的位置表示为式 (5)。 $M_L[x_l][y_l][0]$ 和 $M_L[x_l][y_l][1]$ 分别表示与左图中的点 (x_l, y_l) 匹配的点在右图中的列数和行数。同理, $M_R[x_r][y_r][0]$ 和 $M_R[x_r][y_r][1]$ 分别表示与右图中的点 (x_r, y_r) 匹配的点在左图中的列数和行数。

$$\begin{aligned} M_L[x_l][y_l][0] &= x_r \\ M_L[x_l][y_l][1] &= y_r \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} M_R[x_r][y_r][0] &= x_l \\ M_R[x_r][y_r][1] &= y_l \end{aligned} \tag{5}$$

3.3 对应空间位置像素差分

没有运动目标时,在确定各点的位置对应关系后,以左图像为例,将图像中各点与右图像中与该点对应的点进行像素级差分运算得到差分图像。设左图差分图像为 $M(x,y)$,对于非公共部分,像素设置为 0,公共部分像素值如下,其中 (x_r, y_r) 满足式 (4)。

$$M(x_l, y_l) = |I_L(x_l, y_l) - I_R(x_r, y_r)| \tag{6}$$

然后分析此差分图像,根据其差值区分阴影和真正的目标,对于阴影点,由于对应位置表示的是同一点,那么差分值理论上是 0。考虑到两个摄像机成像过程中,由于曝光、白平衡、噪声的差异,成像效果不可能完全一致,允许有一个较小的阈值,在该阈值内则为阴影,反之为目标。为了使该算法能够适应不同的场景及随时间变化的同一场景环境,阈值要根据当前环境自动获取,本文将文 [15] 中提

到的自适应阈值分割算法进行了优化，提出以下阈值自动获取方法：

(1) 查找差分图像中最小灰度值 Z_l 和最大灰度值 Z_k ，设初始阈值为 $T^0 = \frac{Z_l + Z_k}{2}$ 。

(2) 根据阈值 T^k 将图像初步分割成目标和背景，同样，超出阈值为目标，低于阈值为背景。然后求出目标和背景区域的灰度平均值 Z_o 和 Z_b ：

$$Z_o = \frac{\sum_{z(x,y) < T^k} z(x,y) \times N(x,y)}{\sum_{z(x,y) < T^k} N(x,y)} \quad (7)$$

$$Z_b = \frac{\sum_{z(x,y) \geq T^k} z(x,y) \times N(x,y)}{\sum_{z(x,y) \geq T^k} N(x,y)} \quad (8)$$

$z(x,y)$ 是图像上点 (x,y) 的灰度， $N(x,y)$ 是其权重，此处为 1。

(3) 求出新的阈值 $T^{k+1} = \frac{Z_o + Z_b}{2}$ 。

(4) 如果 $T^k = T^{k+1}$ ，则结束，否则 $k \leftarrow k + 1$ ，转 (2)。

设得到的最优化阈值为 m_{th} ，则目标掩膜 $M_0(x,y)$ 的求解见式 (9)。

$$M_0(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } M(x,y) > m_{th} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

4 实验结果与分析 (Experimental results and analysis)

为了验证本文算法的正确性，采用图 4 所示的立体摄像机来采集图像，该立体摄像机为本课题组自主设计组装而成，由 2 个 Canon500D 摄像机组成，用刚体连接，其参数如表 1 所示。图 5 为用来标定该立体摄像机内外参数的 3 维标定场，其 3 维坐标已经用经纬仪测出，最大误差不超过 1 mm，各参数的意义及具体标定方法见文 [12]。



图 4 立体摄像机

Fig.4 The stereo camera



图 5 3 维标定场

Fig.5 3D calibrated field

表 1 立体摄像机的参数

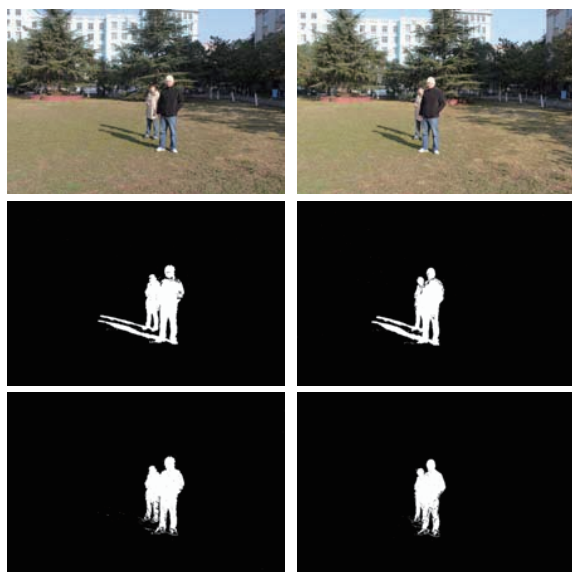
Tab.1 Stereo camera parameters

参数	左摄像机	右摄像机
r_0	2523.2653649033432	2464.3801934506305
c_0	1590.8307249041015	1624.1844602002514
f_u	-4034.8281377311464	-3987.2663702467098
f_v	4033.4216994691492	3986.7395455788937
t_1	11.843299389487933	12.640654817739664
t_2	11.314290276004918	11.313822250441634
t_3	9.135884939574048	9.135854228839211
φ	0.050478232035088	0.013653359791343
ϖ	0.024122099309971	0.023796308510528
κ	-0.000916049912006	0.000448640064624

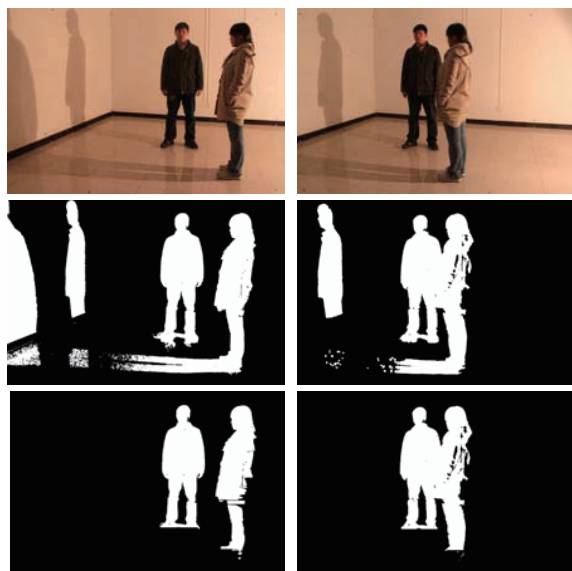
软件以 Microsoft Visual C++ 6.0 为开发环境，使用了 OpenCV 函数库类。为了验证算法的有效性，本文选取了室内、室外场景进行测试，场景中的目标纹理比较单一，颜色有深有浅，阴影有本影、半影、相互重叠阴影等，地面存在镜面反射，开关灯会引入光照变化。阴影主要由目标遮挡阳光或灯光而产生。实验结果见图 6(a)、(b)，第 1 列为左摄像机的处理结果，第 2 列为右摄像机处理的结果，第 1 行为采集到的图像对，第 2 行为背景差分的结果，第 3 行为用本文方法剔除投射阴影后的结果。

实验结果表明，本文提出的算法有效地剔除了投射在背景上的阴影，使检测出来的运动目标区域更加准确。由于本文检测阴影基于空间位置特征，而非其光学属性特征，所以对于背景表面纹理缺失、背景反射光、阴影的强弱都有较强的适应性。在检测阴影时，传统阴影检测算法比较背景和当前帧的特征，这两帧图像在时间上没有一致性，故而本身就会有差异。在室外场景中，白天由于云层的影响，检测阴影是很复杂的，而夜晚，灯光自身的不稳定、多个光源导致多重阴影，导致阴影的光学属性不能

用简单的模型来描述. 本文算法使用左右图像对应位置来差分, 只要摄像机位置固定, 其匹配关系就不变, 用来比较的左右两帧图像由立体摄像机同步采集, 时间上是一致的, 环境的变化对于两帧图像的影响一样, 所以对差分结果的影响非常小.



(a) 室外场景



(b) 室内场景

图 6 阴影检测结果

Fig.6 Shadow detection results

5 结论 (Conclusions)

本文提出基于空间位置特征的运动阴影检测方法, 用标定好的立体摄像机采集图像, 对于固定的场景, 先离线获取并保存背景图像各点的空间位置对应关系, 当有目标进入场景时, 通过比较当前左右图像对应点处的像素值来区分运动阴影和真正的运动目标. 同一时刻, 左右图像光照变化一致, 故对差分结果影响很小, 而投射阴影附着在背景表面,

其位置对应关系与背景相同, 容易剔除. 对于特定的场景, 摄像机位置调整好后, 即可初始化背景图像上各点的位置对应关系, 之后无需再计算视差, 该方法不仅能够克服光照变化的影响, 而且能有效地去除投射到背景上的各种复杂阴影.

实验证明算法能够获得比较理想的效果, 不过该方法也有局限性, 对于紧贴于背景平面的区域, 由于空间位置与背景相似, 故而容易丢失 (如图 6 中紧贴地面的鞋), 在目前的应用中, 该问题需要人工干预. 如果目标颜色及纹理与其对应位置处背景相似程度太高, 也不容易通过比较像素来予以区分, 文 [16] 提出一种区分背景与前景颜色相似的解决方法, 但需要大量的样本和运算. 如何更有效地解决这两个问题, 需要做进一步的研究.

参考文献 (References)

- [1] Cheung S C S, Kamath C. Robust background subtraction with foreground validation for urban traffic video[J]. *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*, 2005, 2005(14): 2330-2340.
- [2] Rao B, Zheng G, Chen T M, et al. An efficient hierarchical method for image shadow detection[C]//2nd International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 622-627.
- [3] Prati A, Mikic I, Trivedi M M, et al. Detecting moving shadows: Algorithms and evaluation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(7): 918-923.
- [4] Martel-Brisson N, Zaccarin A. Learning and removing cast shadows through a multidistribution approach[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(7): 1133-1146.
- [5] Tatsuya T, Atsushi S, Daisaku A, et al. Non-parametric background and shadow modeling for object detection[M]//Lecture Notes in Computer Science, vol.4843. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2007: 159-168.
- [6] Joshi A J, Papanikolopoulos N P. Learning to detect moving shadows in dynamic environments[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(11): 2055-2063.
- [7] Leone A, Distanto C. Shadow detection for moving objects based on texture analysis[J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(4): 1222-1233.
- [8] Cucchiara R, Grana C, Piccardi M, et al. Improving shadow suppression in moving object detection with HSV color information[C]//IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 334-339.
- [9] Zhang W, Fang X Z, Yang X K, et al. Moving cast shadows detection using ratio edge[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2007, 9(6): 1202-1213.
- [10] 曹健, 陈红倩, 张凯, 等. 结合区域颜色和纹理的运动阴影检测方法 [J]. *机器人*, 2011, 33(5): 628-633.

Cao J, Chen H Q, Zhang K, et al. Moving cast shadow detection based on region color and texture[J]. *Robot*, 2011, 33(5): 628-633.

- [11] 马颂德, 张正友. 计算机视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 72-73.
Ma S D, Zhang Z Y. Computer vision[M]. Beijing: Science Press, 1998: 72-73.
- [12] 刘勇. 基于图像的空间三维数据获取及建模 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
Liu Y. 3D scene acquiring and modeling based on images[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [13] Mei X, Sun X, Zhou M C. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 467-474.
- [14] Wang Z F, Zheng Z G. A region based stereo matching algorithm using cooperative optimization[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [15] 仲思东, 高智. 序列图像编码的自动识别 [J]. 计算机应用研究, 2005(5): 148-150.
Zhong S D, Gao Z. Automatic recognition of sequence image coding[J]. Application Research of Computers, 2005(5): 148-150.
- [16] Zhang X, Yang J. A novel algorithm to segment foreground from a similarly colored background[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2009, 63(10): 831-840.

作者简介:

彭 祺 (1983—), 男, 博士生. 研究领域: 图像测量与机器视觉.

仲思东 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 图像测量与机器视觉.

屠礼芬 (1986—), 女, 博士生. 研究领域: 图像测量与机器视觉.

(上接第 613 页)

Authors' Introduction:

LI Haifeng (1984—), male, Ph.D. candidate. His research interest covers computer vision, robot navigation, and networked robot.

LIU Jingtai (1964—), male, Ph.D., professor. His research interest covers robotic technology, computer applica-

tions, automatic information system, intelligence science and technology.

LU Xiang (1987—), male, Ph.D. candidate. His research interest covers visual servo, networked robot.