

# 星球漫游车超广角实时立体视觉系统<sup>1)</sup>

贾云得 吕宏静 徐一华 徐岸

(北京理工大学计算机科学与工程系 北京 100081)  
(E-mail: yjiar@bit.edu.cn)

**摘 要** 给出了一种用于星球漫游车障碍检测和定位的超大视场立体视觉系统的实现方法. 该系统采用具有超广角镜头 (对角视场角约 160 度) 的双目或三目摄像机获取场景立体图像对, 利用摄像机标定参数对大变形图像进行修正等预处理, 然后在外极线、连续性等约束条件下, 基于查找表和 Intel MMX 指令集, 使用 SAD 算法快速进行对应点匹配计算. 实验表明, 该系统在图像分辨率为  $320 \times 120$  像素、视差为 64 级时, 利用普通工控机恢复稠密深度图的速度为 10 帧 / 秒, 并能使机器人以 1 米 / 秒的速度行走.

**关键词** 立体视觉, 视觉导航, 超广角摄像机, 星球漫游车  
**中图分类号** TP391

## A Real Time Stereo Vision System for Planetary Rover with a Very Large Field of View

JIA Yun-De LU Hong-Jing XU Yi-Yua XU An

(Department of Computer Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)  
(E-mail: yjiar@bit.edu.cn)

**Abstract** Implementation of a real time stereo vision system for obstacle detection and localization is discussed for planetary rover. The system employs binocular or trinocular stereo with fish-eye lenses to capture stereo pairs with a very large field of view (FOV $\sim 160^\circ$ ). Camera calibration parameters are used to perform distorted image correction, epipolar rectification and LoG filtering, and the SAD similarity is computed to estimate dense depth maps under the epipolar and smooth constraints. Using the Intel MMX instruction set and LUT, the system can complete dense depth mapping and obstacle detection in real time. The test result shows that the system can produce dense depth maps at 10Hz with a resolution of  $320 \times 120$  pixels and a disparity of 64 levels using standard PCs, are allow the robot to safely travel at 1m/s.

**Key words** Stereo vision, vision navigation, FOV camera, planetary rover

## 1 引言

近年来, 随着计算机视觉技术的发展和计算机硬件性能的提高, 立体视觉技术已经越

1) 国家“863”计划项目(2002AA735051)和国家自然科学基金(K60075005)资助  
Supported by the National “863” High-Tech Program(2003AA735051) and National Natural Science Foundation of P.R. China(K60075005)  
收稿日期 2003-05-26 收修改稿日期 2003-11-24  
Received May 26, 2003; in revised form November 24, 2003

来越多地 在移动机器人导航中得到应用<sup>[1,2]</sup>。目前, 用于移动机器人或自主车辆的立体系统大多数采用常规镜头的摄像机, 其视场角一般在 40 度左右, 非常适合于中大型机器人或自主车辆在公路或结构化场景中的视觉导航和避障<sup>[3]</sup>。对于微小型机器人, 比如星球漫游车, 由于体型较小, 常规镜头获取的视觉信息远远不能满足需要, 需要仿照昆虫和鱼类等小生物的视觉功能, 使用超广角镜头摄像机或鱼眼镜头摄像机<sup>[4~6]</sup>, 以使得机器人在复杂环境中灵活高效地行走。本文给出了一种用于星球漫游车的超广角镜头双目 / 三目立体视觉系统, 能够以 10 帧 / 秒的速度恢复场景稠密深度图, 可用于确定机器人行走路径方向上大视场范围内的岩石、河沟, 实现机器人安全避障和路径规划。

## 2 具有立体视觉系统的实验车

图 1 所示的是我们自制的一台具有前视和后视立体视觉系统的实验车, 由车体、运动控制器、前轮转向控制器、两组立体视觉成像头和计算机组成。两组立体视觉成像头分别安装在实验车的前部桅杆上和后部车架上, 实现实验车前行和倒退时获取车体前、后场景的大视场深度信息。每一组立体视觉头由三个黑白摄像机组成, 视场角约为  $160^\circ$ , 可以完成双目立体视觉和三目多基线立体视觉两种视觉感知模式。在图像分辨率为  $320 \times 120$  时, 视差为 64 级时, 使用普通工控机来恢复稠密深度图的速度达到 10 帧 / 秒, 能使机器人以 1 米 / 秒的速度安全漫游。如果使用基于 FPGA 的并行处理器, 则稠密深度图恢复速度达到 30 帧 / 秒以上<sup>[7]</sup>。



图 1 具有前部和后部立体视觉系统的实验车

Fig. 1 The mobile robot with stereo vision heads in front and back

## 3 稠密深度图恢复

尽管使用超广角镜头摄像机可以一次获取很大场景的图像, 但同时也引入了非常严重的光学变形, 使得图像各处的分辨率不同, 导致对应的匹配区域表现出很大的不相似性。为了正确而高效率地搜索对应点, 需要对图像进行变形修正 (image correction)。

### 3.1 图像变形修正

造成图像变形的因素主要有两种: 一种是由大视场物理成像特性引起的光学几何变形, 另一种是光学系统设计和加工误差引起的光学几何变形。建立图像几何变形模型的方法有许多, 根据超广角镜头的成像特点, 可以采用球面变形模型。设未变形图像像素坐标为  $u, v$ , 变形中心为球面中心  $(X_d, Y_d)$ , 球面方程为

$$(u - X_d)^2 + (v - Y_d)^2 + z^2 = R^2$$

在  $(X_d, Y_d, \gamma)$  处放置一个点光源, 其在平面  $z = 0$  上的投影  $(\tilde{u}, \tilde{v})$  满足

$$\tilde{u} = \frac{\gamma(u - X_d)}{\gamma - \sqrt{R^2 - (u - X_d)^2 - (v - Y_d)^2}} + X_d \quad (1a)$$

$$\tilde{v} = \frac{\gamma(v - Y_d)}{\gamma - \sqrt{R^2 - (u - X_d)^2 - (v - Y_d)^2}} + Y_d \quad (1b)$$

考虑到其它光学几何变形对图像变形的贡献<sup>[8]</sup>, 实际像素坐标  $(u_f, v_f)$  应表示为

$$u_f = \tilde{u} + s_1(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) + 3p_1\tilde{u}^2 + p_1\tilde{v}^2 + 2p_2\tilde{u}\tilde{v} + k_1\tilde{u}(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) \quad (2a)$$

$$v_f = \tilde{v} + s_2(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) + 2p_1\tilde{u}\tilde{v} + p_2\tilde{u}^2 + 3p_2\tilde{v}^2 + k_1\tilde{v}(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) \quad (2b)$$

其中  $s_1, s_2, p_1, p_2, k_1$  是光学几何变形模型参数, 这些参数 (包括  $X_d, Y_d, \gamma$ ) 可以通过摄像机系统标定来确定.

将式 (1) 改写为

$$u = D \times (\tilde{u} - X_d) + X_d, \quad v = D \times (\tilde{v} - Y_d) + Y_d \quad (3a), (3b)$$

其中  $D$  是校正变换系数

$$D = \frac{\gamma^2 - \sqrt{((\tilde{u} - X_d)^2 + (\tilde{v} - Y_d)^2)(R^2 - \gamma^2) + R^2\gamma^2}}{(\tilde{u} - X_d)^2 + (\tilde{v} - Y_d)^2 + \gamma^2}$$

因此, 获取实际变形图像  $(u_f, v_f)$  后, 首先利用式 (2) 计算, 然后通过式 (3) 计算出变形修正后的图像坐标  $(u, v)$ . 实际中为了方便计算, 常将  $(u_f, v_f)$  和  $(\tilde{u}, \tilde{v})$  的位置互换<sup>[8]</sup>, 当然对应的模型参数  $s_1, s_2, p_1, p_2, k_1$  也不同.

### 3.2 立体匹配

立体匹配的最大问题是匹配正确率低, 时间代价高. 为此需要对修正后的图像进行外极线校正 (epipolar rectification) 和 LoG 滤波<sup>[9]</sup>. 外极线校正的基本思想是定义一个公共投影平面, 该平面平行于连接两个摄像机光学中心的空间直线, 校正平面一旦确定, 就可利用标定参数得到校正矩阵. 图像校正后, 可以用 LoG 滤波器对图像进行处理, 以增强图像的特征. 本系统采用 SAD 算法求解对应性问题, SAD 的计算公式为

$$Q_{\text{SAD}}(I, J, z_i) = \sum_{p=-N_1}^{N_1} \sum_{q=-N_2}^{N_2} W_{p,q} |F(I+p, J+q, z_i) - G_0(I+p, J+q)| \quad (4)$$

其中  $W_{p,q}$  是窗口中  $(p, q)$  位置的权值,  $G_0(I, j)$  为参考图像的灰度值,  $F(I, j, z_i)$  为另一图像中候选点的灰度值, 使得式 (4) 最小的  $z_i$  值即为所求空间点的深度值. 通过对 SAD 曲线的抛物线拟合, 可求得其子像素级最小值位置, 可以大大提高深度恢复的精度.

采用查找表 (LUT) 和 Intel MMX 与 SIMD 指令集技术可以进一步缩短系统执行周期. 本系统建立了两类查找表. 一类是关于校正图像与原始图像对应关系的查找表, 即根据摄像机标定参数, 建立图像校正函数 (单值函数), 实现校正图像中的每一点对应原始图像中一个点的映射关系, 并生成查找表. 在立体视觉恢复过程中, 只需通过查找表将校正

图像中的每点投影到原始图像中, 并使用双线性插值获得子像素级的校正图像. 另一类是深度值与视差对应关系查找表. 将深度恢复区间 (比如 0.5–2.5 米) 均分为  $n$  段 (比如 64 段), 得到  $n$  个候选深度值. 对于任一候选深度值, 根据外极线约束, 求解基准图像中任一像素在另一图像中的对应位置, 即对于基准图像中的任一像素, 先将其投影到绝对坐标系并得到指定深度下对应空间点的三维坐标, 再将该三维坐标投影到另一个图像中, 得到对应点的位置坐标.

## 4 实验结果

本系统在多种环境下进行了测试. 摄像机选用了具有外同步的单板摄像机, 场角为 160 度, 工控计算机是 P4 1.5 GHz, 场景深度恢复范围为 0.2–8 米. 图 2 所示的是在水磨石地面上任意放置几块岩石的环境中检测障碍物的结果. 图 3 所示的是在室外草地树林场景的深度恢复试验结果和最近距离障碍物检测结果.

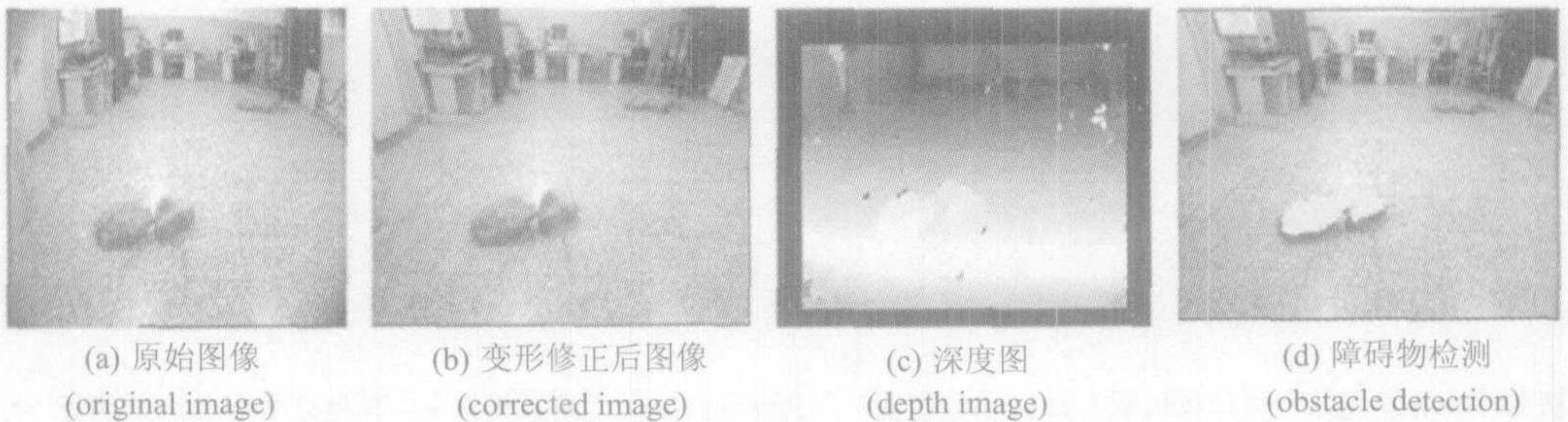


图 2 水磨石地面上的试验结果

Fig. 2 Test result on the floor

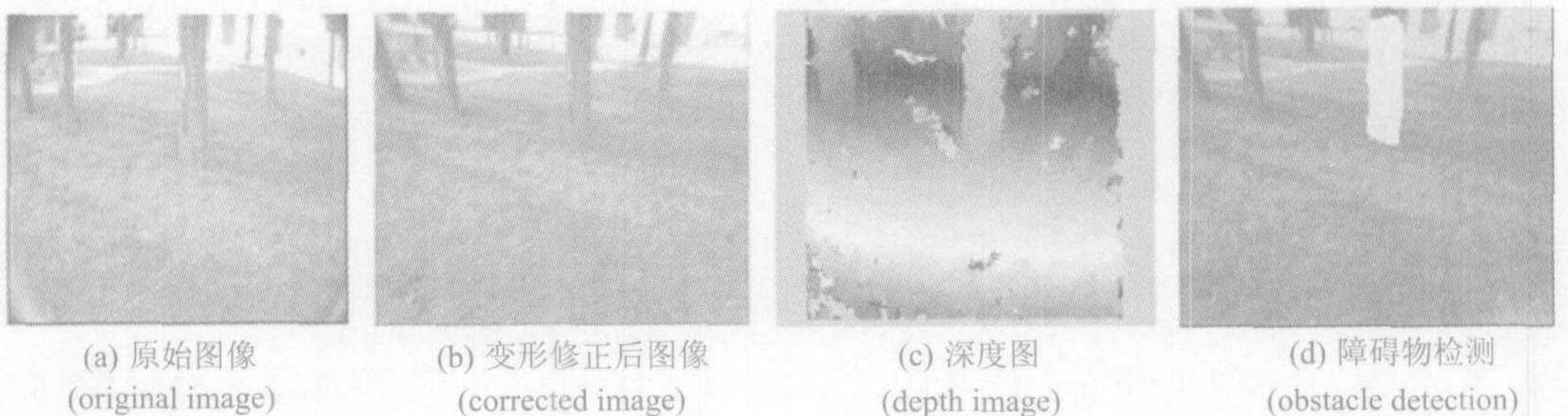


图 3 草地上的试验结果

Fig. 3 Test result on the grass

## 5 结论

本文讨论了一种用于移动机器人导航的超广角镜头双目立体视觉系统, 该系统基于查找表和 Intel MMX 指令集, 使用 SAD 算法实现大视场角场景的稠密深度图的实时恢复计算. 实验表明, 该系统在普通工控机上能以 10Hz 的速度高精度恢复大视场场景的稠密

深度图. 该系统已经成功地用于我们自行设计的移动机器人上, 能使机器人在室内外以 1 米 / 秒的速度行走. 本文所讨论的系统不仅可以用于星球漫游车视觉导航, 也可以用于服务机器人、作战机器人等其它特种机器人的视觉导航.

### References

- 1 Murry D, Jennings C. Stereo vision based mapping and navigation for mobile robots. In: Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation. USA: 1997
- 2 Mathies L, Brown E. Machine vision for Obstacle detection and ordnance Recognition. In: Proceedings of Annual meeting of the Association for Unmanned Vehicle Systems. USA: 1996
- 3 Williamson T. A high performance stereo system for obstacle detection [Ph.D. dissertation]. Pittsburgh, USA: Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1998
- 4 Sharon L, Burdick J, Matthies L. Autonomous path planner implemented on the Rocky 7 prototype micro-rover. In: Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation. UAS: 1998. 292~297
- 5 Shah S, Aggarwal J. Depth estimation using stereo fish-eye lenses. In: Proceedings of International Conference on Image Processing. USA: 1995. 740~744
- 6 Shah S, Aggarwal J. A simple calibration procedure for fish-eye lens camera. In: Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation. USA: 1994. 3422~3427
- 7 JIA Y D, XU Y H, LIU W C et al. Miniature Stereovision Machine for Real-Time Dense Depth Mapping, In: Proceedings of International Conference on Computer Vision Systems. Austria: 2003. 268~277
- 8 Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transaction On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 965~980
- 9 Ayache N, Hansen C. Rectification of images for binocular and trinocular stereovision. In: Proceedings of IEEE Conference on Pattern Recognition. USA: 1988. 11~16

**贾云得** 北京理工大学计算机系教授, 博士生导师, 主要研究方向是计算机视觉、媒体计算和智能系统等.

(**JIA Yun-De** Professor of Computer Science in Beijing Institute of Technology. His current research interests include computer vision, media computing, intelligent systems. )

**吕宏静** 1997 年和 2000 年分别获得北京理工大学机械电子工程专业学士和硕士学位, 现在美国加州大学落山矶分校攻博士学位. 研究方向为计算机视觉、生物计算等.

(**LU Hong-Jing** Received her bachelor degree and master degree both in Mechtronics from Beijing Institute of Technology in 1997 and 2000. Now she is a Ph.D candidate in the UCLA. Her research interest include computer vision, bioinformatic computing.)

**徐一华** 1998 年和 2001 年分别获得北京理工大学计算机专业学士和硕士学位, 现为微软亚洲研究院助理研究员, 主要从事计算机视觉、网络媒体研究.

(**XU Yi-Hua** Received his bachelor degree and master degree both in Computer Science from Beijing Institute of Technology in 1998 and 2001. Now he has been with the Microsoft Research Asia as an assistant researcher. His research interest include computer vision, networking media computing.)

**徐岸** 1999 年和 2002 年分别获得北京理工大学计算机专业学士和硕士学位, 现为微软亚洲研究院助理研究员, 主要从事计算机视觉、嵌入式计算技术研究.

(**XU An** Received his bachelor degree and master degree both in Computer Science from Beijing Institute of Technology in 1999 and 2002. Now he has been with the Microsoft Research Asia as an assistant researcher. His research interest include computer vision, embedded computing.)