

文章编号 1004-924X(2008)10-2002-07

区域立体匹配算法的实现及改进

王 昕¹, 马 岩², 杨 剑¹, 申 盛¹

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055;

2. 中国第一汽车集团公司技术中心 基础研究部, 吉林 长春 130011)

摘要:为了精确地建立两幅图像的匹配单元之间的对应关系,解决区域匹配算法计算量大等缺点,给出了一种区域立体匹配算法的实现及改进方法。将图像进行外极线校正,并在此基础上,采用一种结合隐含约束条件和唯一性约束条件的单向匹配算法(SMP算法)完成初次匹配及初次去除伪匹配;然后采用一种伪极线约束条件,对得到的匹配对进行二次去除伪匹配;最后,对得到的视差图进行插值运算。与SMP算法相比,本文算法的匹配精度提高了10%左右。另外,在匹配过程中,通过利用Box滤波加速方法,减少了计算匹配窗口相似性的复杂度,程序运行时间比BM算法缩短了50%。结果表明,改进后的算法提高了精度且能满足系统对实时性的要求。

关键词:立体匹配; 区域匹配; 唯一性约束; 伪极线约束

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Implementation and improvement of area-based stereo matching algorithm

WANG Xin¹, MA Yan², YANG Jian¹, SHEN Sheng¹

(1. Harbin Institute of Technology, Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China;

2. Science Research Department, R&D Center, China FAW Group Corporation, Changchun 130011, China)

Abstract: In order to obtain the relationship of matching cells between two homologous images accurately and to solve the problem of large computation in the area-based stereo matching method, an area-based stereo matching method is presented in the paper. Based on rectifying the images by searching range from two dimensions to one dimension, an implicit constraint algorithm and an SMP algorithm with a uniqueness constraint is combined to achieve the matching of stereo pairs. Then, several fake matching points in the primary matching process are detected and removed by using the false epipolar constraint method. Finally, a disparity map is interpolated. Experimental results show that the accuracy of the presented method is improved by 10% as compared with that of conventional SMP algorithm. In addition, a Box-filtering accelerating method is also implemented to decrease computational complexity, the program running time is about 50% that of BM algorithm. These results show that the improved algorithm obtains higher accuracy and satisfies the requirement for a real-time image processing system.

Key words: stereo matching; area-based matching; uniqueness constraint; false epipolar constraint

收稿日期:2007-12-02;修订日期:2008-04-27.

基金项目:2007年深圳科技计划资助项目(No. NSKJ-200704);2007深圳市重点实验室(产学研)资助项目

1 引 言

计算机立体视觉是场景理解的重要部分,广泛应用于物体军事、航空、数字化医学、现代工业设计、商业、娱乐、教育以及传媒等领域。其中,立体匹配是计算机视觉中最重要、最困难的一环。其难点主要体现在^[1]:(1)两个成像系统由于在空间上存在平移和旋转或者由于成像焦距的变化造成两幅图像间存在平移、旋转、缩放变化及遮挡等情况;(2)成像时外部条件的变化,如光强、大气条件等;(3)摄像机镜头存在光学畸变;(4)各种噪声的影响。

目前,立体匹配问题的研究基本上可以分为两个方向^[2]:一是研究人类的立体融合和视觉形成机制,试图建立通用的计算模型,Marr 创立的立体匹配三大约束、零交叉感知基元以及多通道协同处理方式是这一方向的重要成果;另外一种则是根据具体的需要设定一些约束条件和匹配模型,降低匹配难度,从而提高匹配算法的实用性。

根据选择的匹配基元和匹配方式不同,常用的立体匹配算法大致可以分为基于特征匹配 (Feature-based)^[3], 基于区域匹配 (Area-based)^[4] 和基于相位匹配 (Phase-based)^[5] 3 类算法。其中,基于区域匹配的算法可得到稠密的视差图。基于区域的稠密匹配算法又可再分为两种:一是局部窗口匹配法,例如爬山法^[6], 这种方法的优点是简单、计算量小,但是匹配时有许多局部最小值,本文采取的就是局部窗口匹配法;另外一种则是全局优化算法,此方法有很高的匹配代价,不适于实时系统,例如基因演算法^[7], 虽然能够得到全局最优解,但是计算过程复杂。局部窗匹配法通过比较摄像机摄取的左右两幅图像上同样大小的窗口中像素的灰度相似性,来确定两幅图像上窗口对应点是否匹配。在灰度匹配中,匹配窗口的大小决定了匹配效果,因此目前有很多关于变窗口策略的研究以提高匹配精度。

本文首先采用一种基于 QR 分解的极线校正算法^[8],对采到的两幅图像进行了外极线校正。对校正后的图像进行立体匹配时加入 $u_l > u_r$ 这一约束条件^[9],减少了搜索空间,采用 SMP 算法^[10]完成了初次匹配和去除伪匹配。在实现了 SMP 算法的基础上,引入了一种新的约束条件—

伪极线约束^[11],对得到的匹配对进行二次去除伪匹配,提高了匹配精度。另外,在匹配阶段应用了一种称之为盒滤波技术的递归二维均值滤波快速计算方法^[12]对区域匹配算法进行了优化,大大降低了匹配的计算代价,很好地满足了系统的实时性。

2 匹配算法

2.1 SMP 匹配算法

图 1 所示为简单的平视双目立体成像原理图。

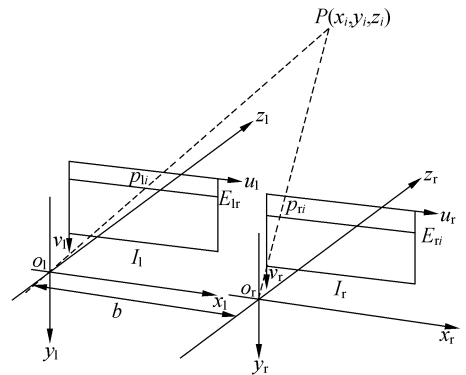


图 1 平行双目视觉系统成像原理图

Fig. 1 Imaging principle of parallel binocular vision

x_l, y_l, z_l 和 x_r, y_r, z_r 分别为左右摄像机的摄像机坐标系。两坐标系的 x 轴是平行的。 z_l, z_r 分别代表摄像机光轴,也是互相平行的。两摄像机的投影中心连线的距离即为基线距,记为 b 。

假设在平行双目视觉系统中,空间中任一点 P 在两个图像坐标系中均成像,分别为 p_l, p_r 且坐标分别为 (U_l, V_l) 和 (U_r, V_r) 。由于经过校正后的图像,极线与水平扫描线平行,对应点的纵坐标相同,因此得到的新的摄像机模型的内部参数也完全相同,不同的仅仅是光心在水平方向上有一个平移。所以存在一隐含条件:恒有 $U_l > U_r$ 。

极线校正后,立体图像对间的对应极线都已位于相应图像的同一条扫描线上。假定以右图像为参考图像,在左图像中的匹配搜索将以从上至下、从左至右的顺序进行。不失一般性,现从右图像中取出一待匹配点 $R(x - d_{\max}, y)$,根据隐含条件 $U_l > U_r$,其对应匹配点将依次在其左图像中对应的极线扫描线上 $[L(x - d_{\max}, y), \dots, L(x, y)]$

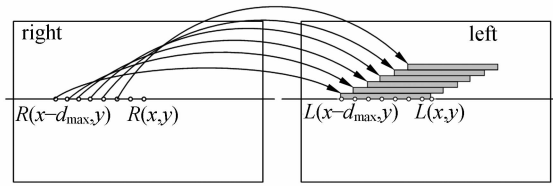


图 2 在一定范围内从右至左匹配

Fig. 2 Matching from right to left at certain range

的区间中搜索,采用一个误差函数 ϵ 来判断匹配对之间的相似程度, ϵ 值越小,说明两个窗口越相似,这里的视差范围最大值 d_{\max} 为一估计值,搜索完毕时,将对应 ϵ 值最小的一组暂视为最佳匹配对。对于右图像中其他连续点如 $R(x+1-d_{\max}, y)$, 将在区间 $[L(x+1-d_{\max}, y), \dots, L(x+1, y)]$ 中重复上面的步骤寻找最佳匹配点。

如图 2 所示,如果 $R(x+\beta-d_{\max}, y)$ 的最佳匹配点为 $L(x, y)$, $0 < \beta < d_{\max}$, 则记为 $R(x+\beta-d_{\max}, y) \rightarrow L(x, y)$, 对应的误差函数(相似性算子)为 $\epsilon(x+\beta-d_{\max}, x, y)$ 。

然而,在实际采集图像的过程中,不可避免地存在光照失真、噪声、畸变等不利因素,使得在匹配过程中出现错误匹配,如两个点的对应匹配点为同一个点,甚至出现多对一的情况,这就违背了唯一性约束准则——一幅图像中的任意特征点在对应的图像上有且仅有一个对应点。例如,可能会存在这样两对匹配对,即:

$$\begin{cases} R(x+\alpha-d_{\max}, y) \rightarrow L(x, y) \\ R(x+\beta-d_{\max}, y) \rightarrow L(x, y) \quad \alpha \leq \beta \end{cases}$$

其对应误差函数分别为 $\epsilon(x+\alpha-d_{\max}, x, y)$ 和 $\epsilon(x+\beta-d_{\max}, x, y)$ 。那么,可以首先假设这两组匹配对中的一组是错误的,如果 $\epsilon(x+\beta-d_{\max}, x, y) \leq \epsilon(x+\alpha-d_{\max}, x, y)$, 说明第二次得到的匹配对相似程度更高,那么,即可抛弃前一次得到的最佳匹配点而保留新一组。同样,如果存在

$$\begin{cases} L(x+\gamma-d_{\max}, y) \rightarrow R(x, y) \quad \gamma \geq \beta \\ \epsilon(x+\gamma-d_{\max}, x, y) \leq \epsilon(x+\beta-d_{\max}, x, y) \end{cases}$$

这时可保留 $L(x+\gamma-d_{\max}, y)$ 作为最佳匹配对,抛弃 $L(x+\beta-d_{\max}, y)$ 点。通过上述过程可以看出,在匹配过程中,此算法可以很快地纠正先前得到的伪匹配,接受更好的匹配点,整个过程为是动态的,而且只需要在单方向上完成。

2.2 改进后的算法

在原 SMP 算法中,最后去除伪匹配是采用一种“伪最小值”的方法来提高匹配可靠性的^[10], 场景层次越复杂,需要的候选伪最小值越多,计算量越大,而本文采用的去除伪匹配的方法只需在初次完成图像对校正之后,手动选取 8 对对应采样点,利用图像对中的对应采样点来估计基础矩阵 $F^{[13]}$, 并由此计算待匹配点所对应的极线 F_x 即可。

如图 1 所示,著名的极线约束可以表述为:如果图像 I_1 中的点 p_1 与图像 I_r 中的点 p_r 相对应,那么 p_r 必定在 p_1 的外极线上,反之, p_1 也必定在 p_r 的外极线上。该关系式可以用公式表示为:

$$\mathbf{X}'\mathbf{F}\mathbf{X}=0, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{X}=(X_1, X_2, 1)^T$ 为左图中的对应坐标; $\mathbf{X}'=(X_1', X_2', 1)^T$ 为右图中与 \mathbf{X} 对应点的坐标; \mathbf{F} 为 3×3 矩阵,称为基础矩阵。

伪极线约束的基本思想是:在采样点坐标上增加一个很小的偏移量 ϵ , 得到一组新的带有偏移量的采样点,利用新采样点计算“伪基础矩阵” F' , 并由 $F'x$ 得出待匹配点的“伪极线”。该伪极线与原极线必定有一个交点,那么,精确匹配点必定在该交点附近。具体过程如下:

(1)由式(1)可得:

$$\begin{aligned} x_1'x_1F_{11} + x_1'x_2F_{12} + x_1'F_{13} + x_2'x_1F_{21} + \\ x_2x_2'F_{22} + x_2'F_{23} + x_1F_{31} + x_2F_{32} + F_{33} = 0 \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{x}=(x_1, x_2, 1)$, $\mathbf{x}'=(x_1', x_2', 1)$ 分别为两幅图像中对应点的齐次坐标,利用所谓“八点法”^[14], 可以估计出基础矩阵 F 。

(2)对已知采样点 \mathbf{x}, \mathbf{x}' 做如下变换:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}=(x_1, x_2, 1) \text{ 变为 } \mathbf{x}_\epsilon=(x_1+\epsilon_1, x_2+\epsilon_2, 1) \\ \mathbf{x}'=(x_1', x_2', 1) \text{ 变为 } \mathbf{x}'_\epsilon=(x_1'+\epsilon_1', x_2'+\epsilon_2', 1) \end{aligned}$$

同样,利用 \mathbf{x}_ϵ 和 \mathbf{x}'_ϵ 可以估计出伪基础矩阵 F' , 显然,不同的 ϵ 将会得出不同的 F' 。但是实验证明, ϵ 的改变不会影响精确匹配点在极线与伪极线交点附近这一事实。因此可以将匹配范围限定在很小范围内。

(3)计算极线和伪极线,并求取它们的交点。然后利用该交点和相关匹配策略求取精确匹配点。在采用 SMP 算法完成了对立体图像对的匹配之后,会得到大量的对应匹配对,在此基础上,利用伪极线约束对其进行二次剔除虚假匹配,最终得到致密的、效果较好的视差图。在原 SMP

算法中,需要将每次得到的视差值及其对应的误差函数保存下来,最后用来做一个统计,找出几个伪最小值,而本文的方法则不需要再考虑这些,只需要在首次匹配后得到伪基础矩阵即可,以后的去除伪匹配都在此基础上进行,从优化系统的角度来说节省了大量的内存空间,而且实验证明,该约束条件可以快速有效地剔除误匹配点,进一步提高匹配精度。具体实验结果将在后续给出。

2.3 Box 滤波加速算法

为了提高均值滤波的速度,McDonnell 提出了一种称之为盒滤波技术的递归二维均值滤波快速计算方法,Faugeras、Karsten 等人将盒滤波思想成功应用于立体匹配中,从而大大提高了区域相关匹配算法的速度。其基本思想是采用一个滑动窗口,在计算窗口匹配代价时充分利用前一个像素的累积结果,从而消除了冗余计算。本文选择了 SAD 算子^[15]作为相似性度量因子。

假设左图像中待匹配点为 (x_0, y_0) ,建立以 (x_0, y_0) 为中心,大小为 $(2n+1) \times (2n+1)$ 的匹配窗口 (n 为正整数),依次与右图中以每一个候选匹配点为中心的匹配窗口进行相似度比较。

同理, $\sigma(x_0, y_0 + 1, dis)$ 在 x 方向上也存在一种递归关系:

$$\begin{aligned} \sigma(x_0, y_0 + 1, dis) = & \sigma(x_0 - 1, y_0 + 1, dis) + \\ & (|L(x_0 + n, y_0 + n + 1) - R(x_0 + dis + n, y_0 + n + 1)| - \\ & |L(x_0 + n, y_0 - n) - R(x_0 + dis + n, y_0 - n)|) - \\ & (|L(x_0 - n - 1, y_0 + n + 1) - R(x_0 + dis - n - 1, y_0 + n + 1)| - \\ & |L(x_0 - n - 1, y_0 - n) - R(x_0 + dis - n - 1, y_0 - n)|). \end{aligned} \quad (4)$$

从上面分析可以知道每计算一个后续窗口的差异和,只需要计算 4 个点。

3 实验结果

为了验证本算法的快速性和精确性,本文以 Matlab 为工具,用多组校正后的图像对进行验证。首先采用著名的筑波图像对将其与 BM 算法^[16]做了一个比较,而后,又选择了两组场景比较复杂的图像对来验证本算法的高效性和精确度。

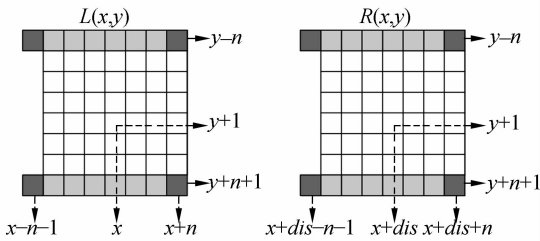


图 3 Box 加速滤波算法

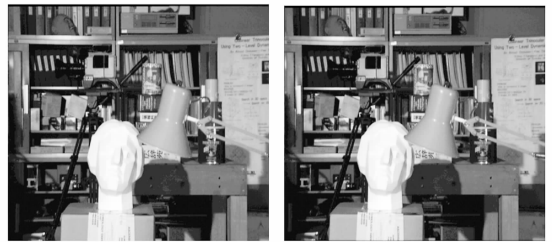
Fig. 3 Box accelerating filter algorithm

现假设其在右图中的对应匹配窗口中心为 $(x_0 + dis, y_0)$,如图 3 所示。可以看到,在 y 方向上将匹配窗口下移一个位置, $SAD(x_0, y_0, dis)$ 和 $SAD(x_0, y_0 + 1, dis)$ 存在如下关系:

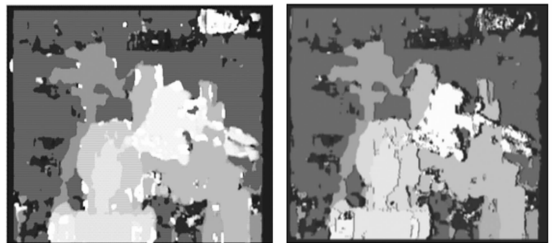
$$\begin{aligned} SAD(x_0, y_0, dis) = \\ SAD(x_0, y_0 + 1, dis) + \sigma(x_0, y_0 + 1, dis), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\sigma(x_0, y_0 + 1, dis)$ 代表前一窗口的最上一行的和与后一窗口最下一行的和的差值,即

$$\begin{aligned} \sigma(x_0, y_0 + 1, dis) = & \sum_{j=-n}^n |L(x_0 + j, y_0 + n + 1) - \\ & R(x_0 + dis + j, y_0 + n + 1)| - \sum_{j=-n}^n |L(x_0 + j, \\ & y_0 - n) - R(x_0 + dis + j, y_0 - n)|. \end{aligned} \quad (3)$$



(a) Tsukuba 立体图像对
(a) Tsukuba stereo pairs



(b) 视差图
(b) Disparity maps

图 4 分别采用 BM 算法和 SMP 算法得到的视差图
Fig. 4 Disparity maps obtained by BM and SMP algorithms

实验平台:

MATLAB 版本: MATLAB 7.0; 硬件配置: Teli CCD; Intel Pentium(R) 4 2.80 GHz; 512 M 内存; NVIDIA GEFORCE2 MX/MX 400; WIN_XP SP2 操作系统。

表 1 分别采用 BM 算法和 SMP 算法得到的结果

Tab. 1 Results with BM algorithm and SMP algorithm respectively

$d_{\max} = 30 \text{ pixel}$	时间(s)	匹配点(%)	误匹配率(%)
SMP(384×288)	14.41	89.13	32.36
BM(384×288)	30.13	88.79	27.92

如表 1 所示, SMP 算法和 BM 算法在匹配率方面不相上下, 但前者的计算速度是后者的 2 倍左右, 在时间方面占有很大优势, 可以较好地满足实时系统的要求。

本文还利用几组标准图像对分析比较了 SMP 算法和改进后的算法在精度和计算时间上的差异。



(a) 建筑物

(a) Buildings



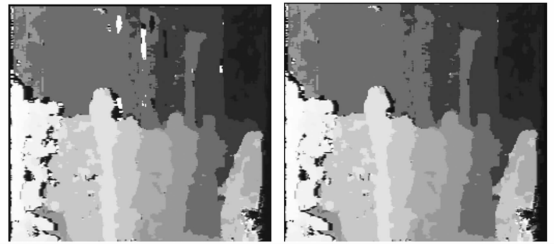
(b) 树林

(b) Woods

图 5 原始图像

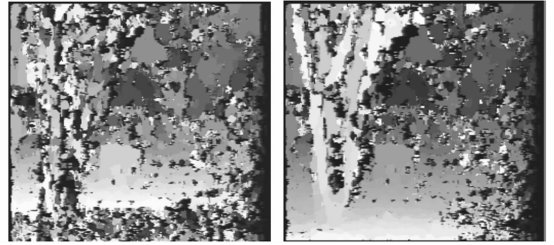
Fig. 5 Original images

下面几组数据是分别采用两种算法得到的视差图(每组左侧图像为由 SMP 算法得到的视差图, 右侧为改进后的算法得到的视差图), 其中, 视差 $d_{\max} = 25 \text{ pixel}$ 。



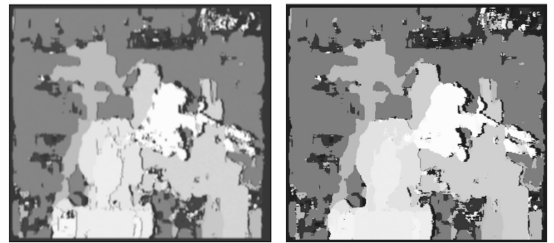
(a) 建筑物视差图

(a) Disparity maps of buildings



(b) 树林视差图

(b) Disparity maps of woods



(c) Tsukuba 立体图像对的视差图

(c) Disparity maps of Tsukuba stereo paris

图 6 视差图

Fig. 6 Disparity maps

由表 2 可以看出, 伪极线约束去除伪匹配所用的时间约为整个匹配时间的 1/50, 对于复杂场景, 它可以将误匹配率降低 10% 左右, 最终得到较为准确的视差图, 因此是一个比较有效的方法。

表 2 分别采用 SMP 算法和改进算法的时间及精度的比较

Tab. 2 Comparison of time and accuracy between SMP algorithm and improved algorithm

	SMP 算法		改进后的算法	
	时间(s)	误匹配率(%)	时间(s)	误匹配率(%)
Tsukuba(384×288)	12.64	32.78	12.89	22.98
建筑物(256×240)	6.76	30.25	6.91	20.07
树林(256×233)	5.74	39.96	5.85	28.30

4 结 论

实验结果表明,采用 SMP 算法实现了图像对的第一次匹配后,在获得了大量匹配对的基础上,采用伪极线约束条件二次剔除伪匹配是可行的,对原 SMP 算法的速度影响不大,但是精度却提高了很多。因为 SMP 算法本身就能很好地满足系统的实时性要求,因此改进后的算法不仅可以很好地满足实时性要求,而且在精度方面又得到了进一步的提高。此外,通过对比伪极线与极线的求法可知,求得伪极线约束条件,可以将其视为标定过程中的一部分,在完成了对图像对的校正后,只要摄像机相对所拍摄场景的深度不再发

生变化,伪极线的参数值就不会再改变,因此,无需额外的计算。

本文的结果都是在 Matlab 环境下实现的,如果将其移植至 VC++ 环境下,在运行时间上会有大幅度的提高。如果用汇编语言实现,则更能体现出其优势。另外,对软件程序的合理安排也会大大提高算法速度,这些也是本课题下一步要深入研究的。

实验同时又表明,改进后的 SMP 算法,对外在硬件设备还是有一定的要求,如光照、设备噪声的影响等,此外,Matlab 的计算速度也依赖于系统配置。因此,此算法还需进一步改进,减少对硬件的依赖性,增加对复杂场景的辨别能力。

参考文献:

- [1] 伊世明. 立体匹配中若干问题的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
YI SH M. *Research in several problems of stereo matching* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [2] 黄海波. 立体匹配研究及三维重建[D]. 上海:上海交通大学,2000.
HUANG H B. *Research in stereo matching and 3D rebuild* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2000. (in Chinese)
- [3] RAYMOND V E, CLIFTON M S. Unconstrained stereoscopic matching of lines[J]. *Vision Research*, 2000,40: 151-162.
- [4] KANADE T, OKUTOMI M. A stereo matching algorithm with an adaptive window[J]. *Theory and Experiment*, 1994,16(9):920-931.
- [5] 李德广,李科杰,高丽丽. 基于多尺度多方向相伴匹配的立体视觉方法[J]. 仪器仪表学报, 2004,25(4):600-602.
LI D G, LI K J, GAO L L. Stereo vision using multiresolution and multiorientation phase matching[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4):600-602. (in Chinese)
- [6] MILLAN W, CLARK A, DAWSON E. Smart hill climbing finds better boolean functions[J]. *Workshop on Selected Areas in Cryptology*, 1997:50-63.
- [7] 陈华,叶东,陈刚. 遗传算法的数字图像相关搜索法[J]. 光学精密工程, 2007,15(10):1633-1637.
CHEN H, YE D, CHEN G. Digital image correlation search method based on genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1633-1637. (in Chinese)
- [8] ANDREA F, EMANUCLE T, ALESSANDRO V. A compact algorithm for rectification of stereo pairs[J]. *Machine Vision and Application*, 2000(12):16-22.
- [9] 曾峦,张可黛,李生良. 用极线约束方法进行图像匹配后的质量控制[J]. 光学精密工程, 2000,8(3):221-224.
ZEN L, ZHANG K D, LI SH L. Quality control after matching or image using constraint of epipolar line bunch [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 221-224. (in Chinese)
- [10] STEFANO L D, MATTOCCIA S. A fast area-based stereo matching algorithm[J]. *Image and Vision Computing* 2004(22):983-1005.
- [11] WANG X, YANG J, LIU H B, et al.. A fast stereo matching algorithm for real-time robot application[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Sanya, 2007:908-913.
- [12] MCDONNELL M J. Box-filtering techniques[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981(17):65-70.

- [13] SALVI J, ARMANGUE X. A survey addressing the fundamental matrix estimation problem[C]. *International Conference on Image Processing*, 2001,2(3):209-212.
- [14] WANG W, TSAI H T. A SVD decomposition of essential matrix with eight solutions for the relative positions of two perspective cameras[C]. *Proceedings of 15th International of Conference on Pattern Recognition, Barcelona*, 2000,1:362-365.
- [15] CHANG C, KUBE P R. On an analysis of static occlusion in stereo vision[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition, Maui*, 1991: 722-723.
- [16] 闵联营, 赵婷婷. BM 算法的研究与改进[J]. 武汉理工大学学报, 2006(6):528-530.
MING L Y, ZHAO T T. Research and improvement of BM algorithms[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006(6):528-530. (in Chinese)

作者简介:王 昕(1971—),女,副教授,主要从事机器人技术、视觉技术、数控技术、自动控制技术的应用研究。E-mail: wangxinsz@hit.edu.cn

● 下期预告

氢气/空气当量比对微燃烧器燃烧特性的影响

朱 林^{1,2},徐进良³,孔凡让¹,刘明侯⁴,姜 海⁴

- (1. 中国科学技术大学 精密机械及仪器系,安徽 合肥 230026;2. 安徽农业大学 工学院,安徽 合肥 230036;
3. 中国科学院 广州能源研究所,广东 广州 510640;4. 中国科学技术大学 热科学与能源系,安徽 合肥 230026)

为了研究氢气/空气当量比对微尺度燃烧器燃烧特性的影响程度,以美国麻省理工学院(MIT)研制的硅基六晶片微燃烧器为研究对象,采用考虑了基元反应动力学机理燃烧程序的二维 CFD 数值分析方法,研究在微尺度燃烧器入口处混合气体流量不变的情况下,改变氢气/空气当量比对燃烧器燃烧特性的影响程度。整个模拟计算主要包括混合气体的流动路径、微燃烧器的内部区域以及整个燃烧器的墙壁面;同时在计算过程中我们考虑了氢气/空气的流体动力学特性、传热学特性和详细的基元反应机理。计算结果表明,当氢气/空气当量比为 0.4 时,燃烧器发生熄火;当量比为 0.5、0.6 时,燃烧器内部能维持稳定燃烧;当量比为 0.7 时,燃烧器的微细通道内出现回燃现象。还表明利用二维 CFD 数值模拟的方法研究微尺度燃烧器燃烧特性可行。