

# 自适应分层粒子群稠密视差图估计

邵泽明 朱剑英

(南京航空航天大学 机械电子工程研究所, 南京 210016)

**摘要** 分析了遗传算法的缺陷,提出了自适应分层粒子群(PSO)立体匹配算法计算稠密视差图。首先采用 SIFT (scale invariant feature transform) 特征检测和匹配算法准确地确定视差范围;其次根据图像和视差范围的大小分层,建立由粗及细的自适应分层图像金字塔结构,加快搜索速度、减少错误匹配;然后在优化函数中引入能根据匹配窗口大小自动变化的因子来调整灰度项和平滑项数据的权重,并用改进的带变异算子的整数形式的 PSO 进行优化,避免了遗传算法搜索的盲目性以及容易陷入局部最优的缺陷,更快、更好地找到最优解。最后合成图像以及真实图像的实验结果表明该方法精度较高,速度较快。

**关键词** 自适应分层 粒子群算法 视差图 立体匹配

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)04-0725-06

## Dense Disparity Map Estimation Using PSO Algorithm with Adaptive Hierarchical Images

SHAO Ze-ming, ZHU Jian-ying

(Institute of Mechanical & Electronical Engineering, Nanjing University of  
Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** An approach to addressing the stereo correspondence problem is presented using particle swarm optimization algorithm with adaptive hierarchy to obtain a dense disparity map. Firstly, the image features are precisely extracted by using SIFT feature detection, and accurately matched by using SIFT matching algorithm, so the disparity range is rightly and easily calculated from matching features. Secondly, according to restriction of the image size and the disparity range, the coarse to fine adaptive hierarchical image pyramid is built to search fast and reduce wrong matching. Thirdly, a regulation parameter varying with matching window is used to give different power for grayness and smoothness data in optimization function while the matching window is different in dissimilar supporting areas, and improved particle swarm optimization algorithm with variation operation for integer is used to find the fittest solution from a set of potential disparity maps avoiding Genetic algorithm's blind searching and easy getting in local best solutions. Finally, experimental results on synthetic and real images show that the proposed approach performs dense disparity estimation accurately and quickly.

**Keywords** adaptive hierarchy, particle swarm optimization, disparity map, stereo correspondence

## 1 引言

立体匹配利用计算机模拟人眼感知距离,把多

幅(一般为左、右两幅)图像中的映像点对应起来,得到视差图,由视差图可以很容易地得出场景中可见点的深度信息。

由于自然景物的复杂性、图像中的重复特征、光

基金项目:国家自然科学基金项目(50275078,50605031)

收稿日期:2007-04-10;改回日期:2007-12-05

第一作者简介:邵泽明(1975~),男,南京航空航天大学机械电子工程专业博士研究生。主要从事图像处理、机器视觉等研究。

E-mail:bj\_szm@163.com

照、阴影、噪声、视角变化等因素的影响,导致图像匹配比较困难。视差估计是一个复杂的问题,通常必须应用一些额外的信息或约束条件来得到正确的匹配点<sup>[1]</sup>,所以可以描述成基本约束条件下的优化问题,利用遗传算法来解决<sup>[2-4]</sup>。选择、交叉和变异是遗传算法的主要算子,但是选择算子对优势个体并未充分利用,只是简单、机械地重复保留这些个体;而交叉算子与变异算子的搜索过程具有盲目性和任意随机性,搜索效率不高<sup>[5]</sup>。

粒子群(PSO)利用生物群体中个体之间的信息共享产生进化,个体之间通过协作寻找最优解,是解决复杂优化问题的有效方法<sup>[6]</sup>。PSO中每个粒子所特有的记忆功能,使其可以根据当前的搜索情况来动态调整搜索策略,达到追随当前最优粒子的目的。每次迭代并不是完全随机的,都是根据当前的较好解,寻找下一个最优解,与其他的进化算法相比较,PSO是一种更高效的并行搜索算法<sup>[7-8]</sup>。

本文研究 PSO 估计立体视差图,提出了自适应分层 PSO 稠密视差图估计算法,该算法首先检测视差范围,然后建立由粗及细的自适应分层图像金字塔结构,再对改进的适应度函数用带变异算子的 PSO 进行优化。实验结果表明该方法精度较高,速度较快,是一种有效的方法。

## 2 视差范围的检测

对于给定的图像对,事先并不知道真实的视差值是多少,当然也不知道视差的范围,而视差范围是个非常重要的参数,否则计算出来的视差图不准确。在研究中可以采用激光或手工测定真实视差图,用来评估算法,但是在实际应用中并不可行。图像对中存在着周围支撑区域的细节信息比较丰富的像素对,相互匹配性比较强,很容易匹配,而且匹配的准确性比较高,借助于这些像素对,很容易就能估算出视差范围。SIFT<sup>[9]</sup>匹配能力比较强,能够处理图像平移、旋转、亮度、尺度、仿射等变化,对应点之间匹配的可靠性比较高,可以借助 SIFT 进行视差范围的检测。

## 3 自适应分层

图像对的视差范围越大,匹配时需要搜索的空间就越大,但实际上只有一个匹配值,其他的都是无效搜索,浪费时间,使速度变慢;另外图像的分辨率越

高,需要处理的像素就越多,搜索时间就越长,也会使速度变慢,由粗及细的图像金字塔分层结构提供了解决方法<sup>[10]</sup>。在分辨率低的层次上,图像的尺寸变小了,图像对之间的视差范围也相应地缩小了,而匹配窗口相对变大了,从而可以更准确地确定匹配点的大致位置,为高层次上的匹配奠定基础;在分辨率高的层次上,以低层次上的粗糙匹配结果为基础,在一个小的视差范围内寻找准确匹配点。这种由粗及细的逐层迭代逼近,不仅提高了速度,而且减少了匹配错误。

图像金字塔的层次不是越多越好,也不能太少,否则达不到目的,实验表明当图像尺寸介于  $64 \times 64$  与  $128 \times 128$  范围内时,匹配速度与匹配精度都比较好;每层的视差范围也不能太小,至少应该大于 2。故以  $64 \times 64$  为界,视差范围大于 2,对给定的图像对进行自适应的分层,建立金字塔结构。

图像金字塔分层结构的图像对匹配过程如图 1 所示。低分辨率层次  $L_i$  上的左右图像对经 PSO 优化生成  $L_i$  层的视差图,经视差图转换形成高分辨率层次  $L_{i-1}$  层上的初始视差图, $L_{i-1}$  层上的左右图像对以初始视差图为基础,经 PSO 优化生成  $L_{i-1}$  层上的视差图,循环逼近真实视差图。

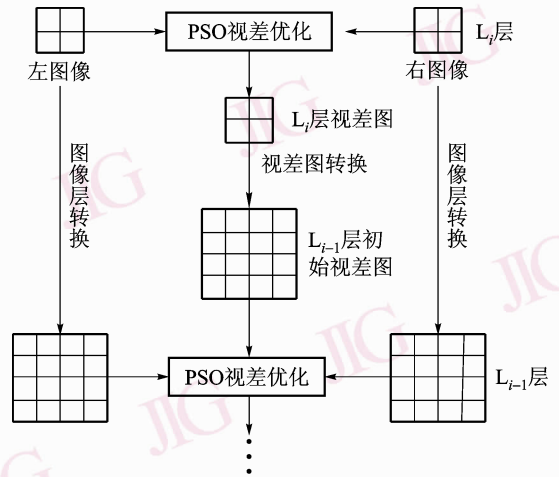


图 1 金字塔分层结构的图像对匹配过程

Fig. 1 Image pair matching process of pyramid

视差图转换过程如图 2 所示。先将  $L_i$  层上的视差图尺寸增大一倍形成  $L_{i-1}$  层的过渡视差图,然后将  $L_i$  层的视差值传递到  $L_{i-1}$  层过渡视差图相应的位置(图中只演示了中间一行的传递过程),再将相邻的视差值分别相加形成  $L_{i-1}$  层的视差图,以此作为循环时  $L_{i-1}$  层的初始视差值。

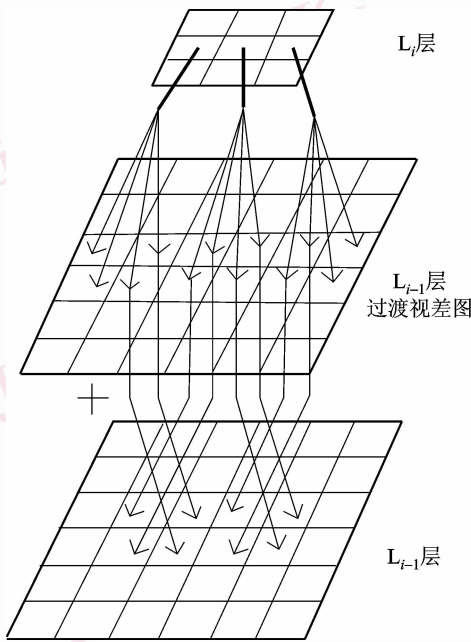


图 2 视差图转换过程

Fig. 2 Transition process of disparity image

## 4 粒子群优化算法

把视差图估计作为最优化问题,最优解就是在适应度函数的控制下每个像素点的估计视差最贴近真实视差的视差图,故把每幅视差图作为一个个体,视为一个“粒子”,多幅视差图就形成了粒子群体,每个像素位置上的视差值视为一个“小粒子”,这样每个粒子由大量的小粒子(其数目为基准图像的大小)组成。粒子和小粒子之间相互影响,粒子的适应度是以小粒子的适应度为基础的,而粒子对小粒子的变化起指导作用。

### 4.1 适应度函数

通常小粒子的适应度函数由两项组成:灰度相似性度量和视差平滑性度量<sup>[4,11-12]</sup>。灰度相似性度量表示对应像素匹配的一致性程度;视差平滑性度量约束邻接像素间具有一致视差。

小粒子的适应度函数为:

$$E(d) = (1 + B_{u,v})E_{\text{data}}(d) + (1 - B_{u,v})E_{\text{smooth}}(d) \quad (1)$$

$E_{\text{data}}$ 表示灰度相似性度量, $E_{\text{smooth}}$ 表示视差平滑性度量。

$$E_{\text{data}}(d) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=-m/2}^{m/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} |L_{u+i,d,v+j} - R_{u+i,v+j}| \times W(u,v) \quad (2)$$

$$E_{\text{smooth}}(d) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=-m/2}^{m/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} |d_{u+i,v+j} - d_{u,v}| \times W(u,v) \quad (3)$$

$L,R$ 分别表示左右图像; $d$ 表示视差值;窗口中各像素的相关值对适应度的贡献是不一样的,设置 $W(u,v)$ 高斯窗口表示不同权重, $m,n$ 表示 $(u,v)$ 处窗口的大小。 $B_{u,v}$ 为像素 $(u,v)$ 处灰度相似性度量和视差平滑性度量的调整系数,取值范围为 $[-1,1]$ 。

像素之间匹配时,在变化剧烈或者边缘区域,细节信息比较丰富,出现歧义的可能性比较小,此时匹配窗口比较小,应该减少视差平滑项的惩罚量,更多的依靠数据项;而在平滑或者无纹理区域,情况正好相反<sup>[13]</sup>。所以 $B_{u,v}$ 受到匹配窗口尺寸的影响,应该根据匹配窗口的变化自适应地调整<sup>[13]</sup>。

Kanade<sup>[14]</sup>使用高斯模型以及视差的不确定度估计匹配窗口的大小,算法复杂;周秀芝<sup>[15]</sup>提出仅利用灰度信息确定匹配窗口的方法,但是把匹配窗口与视差揉合在了一起,不是一个独立的过程。本文仅根据灰度信息,使用阈值 $\lambda$ 进行确定,要求匹配窗口内的像素与中心像素的灰度差值小于 $\lambda$ 。

$$|g_{i,j} - g_{u,v}| < \lambda \quad i,j \in WS \quad (4)$$

$WS$ 为匹配窗口的大小, $g_{u,v}$ 为匹配窗口中心像素 $(u,v)$ 的灰度, $g_{i,j}$ 为周围的像素灰度。

$B_{u,v}$ 要根据匹配窗口的大小 $WS$ 变化,以调整灰度相似性度量和视差平滑性度量的权重,实验发现大部分像素的匹配窗口比较小,少数像素的匹配窗口比较大( $>13$ ),据此经过多次实验,最佳 $B_{u,v}$ 与 $WS$ 的关系如表 1。

表 1 窗口与调整系数的关系

Tab. 1 The relation of regulation coefficient with window size

WS	3	5	7	9	11	>13
$B_{u,v}$	0.9	0.8	0.6	-0.6	-0.8	-0.9

粒子(个体)的适应度函数为:

$$E = \text{mean}(E(d)) \quad (5)$$

### 4.2 带变异算子的整数形式的 PSO 优化算法

PSO 提出之后,很多学者进行了改进和完善,提高了 PSO 算法的性能,文献<sup>[16]</sup>对其进行了总结。一个比较重要的改进模型是 Clerc 构造的引入压缩因子的 PSO<sup>[17]</sup>,有效平衡了全局和局部最优之间的关系,文献<sup>[18]</sup>进行了实验,证明了带压缩因子的

PSO 比不带压缩因子的 PSO 具有更好的搜索及收敛性能。由于视差为整数, PSO 模型采用如下的整数形式:

$$v_{id} = \chi(v_{id} + c_1 r_1 (pbest_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (gbest_{id} - x_{id})) \quad (6)$$

$$x_{id} = \text{round}(x_{id} + v_{id}) \quad (7)$$

式中,  $c_1$ 、 $c_2$  是加速常数,  $r_1$ 、 $r_2$  是  $[0, 1]$  内取值的随机函数,  $\chi$  是压缩因子, 经验值为  $\chi = 0.729$ ,  $c_1 = c_2 = 2.05$ ,  $\text{round}$  表示四舍五入取整, 粒子总数为  $N$ ,  $v_{id}$  表示粒子的飞行速度,  $gbest_{id}$  表示所有个体中的最优位置,  $pbest_{id}$  表示每个个体当前最优位置,  $x_{id}$  表示个体的当前位置。

实际中两幅图像的视差在一定的范围内, 因此必须检验新速度  $v_{id}$ , 以保证其不超出视差范围, 设定一个  $v_{\max}$ , 按照下列公式进行调整。

$$v_{id} = v_{\max} \quad \text{if } v_{id} > v_{\max} \quad (8)$$

$$v_{id} = v_{\min} \quad \text{if } v_{id} < v_{\min} \quad (9)$$

PSO 搜索性能优异, 但当逼近最优解时表现不佳, 容易陷入局部最优, 导致精度不高<sup>[19-20]</sup>, 因此对 PSO 加以改进, 增加变异算子, 提高全局搜索能力。根据适应度的差值决定如何变异, PSO 在迭代初期适应度的差值变化较大, 全局搜索能力较强, 但是局部搜索能力较差, 容易错过最优解, 这时以较优解  $gbest$  为中心, 随机产生  $M$  个粒子加入到寻优过程; 在逼近最优解时, 局部搜索能力较强, 但是全局搜索能力较差, 容易陷入局部最优, 这时在视差范围内随机产生  $M$  个粒子加入到寻优过程。

## 5 实验结果

通过合成图像以及真实图像的实验对本文算法进行了验证, 实验中所用硬件平台为 P4/1.8 GHz/256 MB, 软件平台为 Matlab7.1。

首先对合成图像进行了实验。图 3 为合成的图像对“Corridor”参考图像(左图像)及其标准视差图([http://www-dbv.cs.uni-bonn.de/stereo\\_data/](http://www-dbv.cs.uni-bonn.de/stereo_data/)), 其真实的视差为  $[1.252\ 2, 10.808\ 0]$  pixel (以左图像为基准)<sup>[21]</sup>。该图像对的特点是地板的重复图案多, 无纹理区域多, 使得匹配比较困难, 特别是右边完全无纹理, 特征检测与匹配比较困难。通过 SIFT 算法只能检测到视差范围为  $[1, 9]$ , 为了充分验证本文的算法, 视差范围设为  $[1, 11]$ , 根据自适应分层算法分为 3 层。图 4(a) 为遗传算法计算结

果<sup>[4, 13]</sup>, 图 4(b) 为未分层时 PSO 计算结果, 需要 11 分钟, 图 4(c) 为本文计算结果, 需要 7 分钟。图 4(c) 的计算结果有了很大的提高, 球体及锥体更加清晰, 特别是图像中心最远处的物体, 轮廓很清晰。

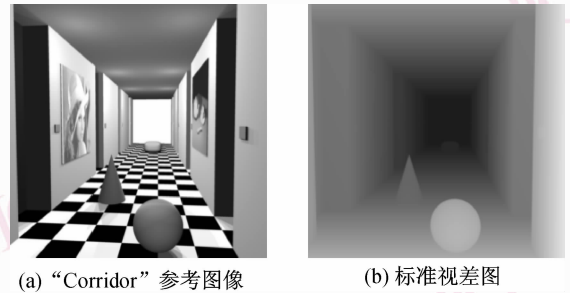


图 3 走廊参考图像及真实视差图

Fig. 3 Reference image and true disparity of Corridor

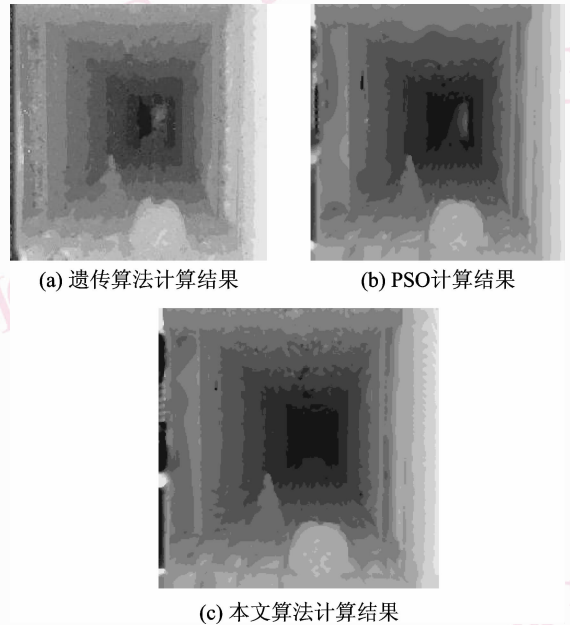


图 4 走廊图像的计算结果

Fig. 4 The results of Corridor images

图 5 是著名的“Tsukuba”图像对 (<http://cat.middlebury.edu/stereo/>) 中的参考图像。该图像对是自然景物的真实场景, 景深的层次、深度不连续区域比较多, 存在无纹理区域, 而且有遮挡以及较强的镜面反射(头像以及灯等表面), 图像对匹配的难度很大, 视差图不容易准确计算。SIFT 算法检测到的视差范围为  $[5, 14]$ , 与真实视差范围<sup>[11]</sup>相符, 根据自适应分层算法分为 3 层处理。

图 6(a) 为遗传算法计算结果<sup>[4, 13]</sup>, 图 6(b) 为未分层时 PSO 计算结果, 需要 15 分钟, 图 6(c) 为本文算法计算结果, 需要 9 分钟。图 6(c) 中景物的轮

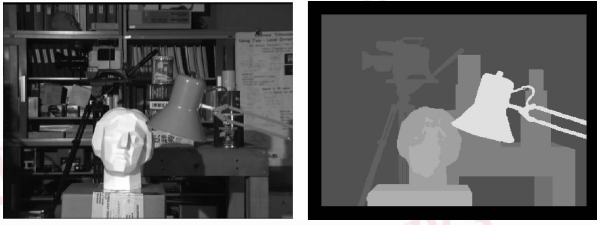
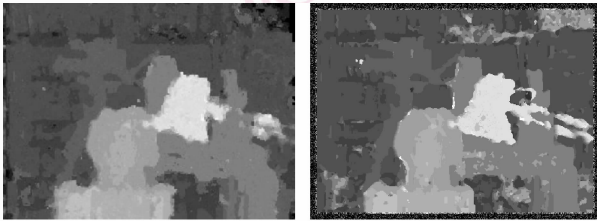


图 5 Tsukuba 参考图像及真实视差图

Fig. 5 Reference image and true disparity of Tsukuba

廓更加清晰,背景更加规则,光滑,视觉效果更好。表 2 为图 6 中各图像计算结果比较,其中遮挡区域未参与统计(没有意义),表中数据是计算结果与真实视差误差大于 1 的统计结果。Total 表示所有的像素的错误率,Flat 表示平滑区域的错误率,Discontinuous 表示不连续区域的错误率,都不包括遮挡区域的像素。从表中可见,未分层的 PSO 算法的错误率比遗传算法的低很多,轮廓较清晰,但是其视觉效果较差(图 6(b)),而自适应分层 PSO 算法的错误率更低,轮廓更清晰,背景更加规则、光滑、效果最好(图 6(c))。



(a) 遗传算法结果

(b) PSO 计算结果

(c) 本文算法计算结果

图 6 Tsukuba 图像对计算结果

Fig. 6 The results of Tsukuba

表 2 视差误差结果比较

Tab. 2 Error comparison of disparity map

(单位:%)

算法	Total	Flat	Discontinuous
Genetic <sup>[4,13]</sup>	19.08	23.55	39.53
PSO(未分层)	12.28	17.31	24.57
Proposed	6.72	3.83	22.67

## 6 结 论

提出了自适应分层 PSO 稠密视差图估计算法,利用 SIFT 特征检测与匹配算法自动准确计算视差范围,并充分利用了匹配支撑区域的灰度变化,使匹配窗口随之变化的原理,在优化函数中引入根据匹配窗口变化的调整因子使灰度项和平滑项数据的利用更加合理,进而 PSO 优化克服了遗传算法搜索的盲目性和任意随机性,变异算子避免了容易陷入局部最优的缺陷,个体的进化受到自身及群体的约束,能够更快、更好地找到最优解,同时由粗及细的自适应分层图像金字塔结构不仅加快了搜索速度而且减少了错误匹配。

视差范围的检测是算法的一个重要步骤,特征的检测需要支撑区域,如果图像中没有纹理,支撑区域比较差,就检测不出特征;而重复性的纹理比较多的话,相似的特征太多,准确匹配比较困难。还需要对特征的有效检测与正确匹配做进一步的研究,以提高算法的可靠性。另外,通过自适应分层算法,算法的运行时间有了很大的提高,但是在应用中还需要与硬件结合,加快运算速度,进一步节省运算时间,达到实时要求。

## 参考文献 (References)

- Shu Zhi-long, Ruan Qiu-qi. Fast orthogonal trinocular stereo matching with symmetry multi-window [J]. Journal of Computer Research and Development, 2001, 38(10): 1229-1235. [舒志龙, 阮秋琦. 快速对称多窗口正交三目立体匹配[J]. 计算机研究与发展, 2001, 38(10): 1229-1235.]
- Lv Chao-hui, Zhang Zhao-yang, An Ping. A stereo matching method based on genetic algorithm [J]. Computer Engineering, 2003, 29(20): 24-25. [吕朝辉, 张兆扬, 安平. 一种基于遗传算法的立体匹配方法[J]. 计算机工程, 2003, 29(20): 24-25.]
- Zheng Jun, Zhu Jing. Image matching based on adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2003, 37(6): 689-692. [郑军, 诸静. 基于自适应遗传算法的图像匹配[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(6): 689-692.]
- Wang Biao, Chung Ronald, Shen Chun-lin. Genetic algorithm-based stereo vision with no block partitioning of input images [A]. In: Proceedings of 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation [C], Kobe, Japan, 2003: 830-836.
- Zhang Li-bing, Jin Ju-liang, Liu Li. Real-coding-based immune genetic algorithm and its application [J]. Operations Research and Management Science, 2004, 13(4): 17-20. [张礼兵, 金菊良, 刘丽.]

- 基于实数编码的免疫遗传算法研究[J]. 运筹与管理, 2004, **13**(4):17-20. ]
- 6 Liu Bo, Wang Ling, Jin Yi-hui, *et al.* Advances in particle swarm optimization algorithm [ J ]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2005, **32**(3): 1-6. [ 刘波, 王凌, 金以慧等. 微粒群优化算法研究进展[J]. 化工自动化及仪表, 2005, **32**(3): 1-6. ]
- 7 Yang Wei, Li Qi-qiang. Survey on particle swarm optimization algorithm[J]. Engineering Science, 2004, **6**(5):87-94. [ 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, **6**(5):87-94. ]
- 8 Zhang Rong-yi. A new swarm optimization method—particle swarm optimization algorithm [ J ]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2004, **18**(4):34-36. [ 张荣沂. 一种新的集群优化方法—粒子群优化算法[J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版), 2004, **18**(4):34-36. ]
- 9 David G. L. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [ J ]. International Journal of Computer Vision, 2004, **60**(2): 91-110.
- 10 Alexandrov V V, Gorsky N D, Mysko S N. A fast technique for recursive scene matching using pyramids [ J ]. Pattern Recognition Letters, 1985, **3**(6):413-419.
- 11 Scharstein D, Richard S. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [ J ]. International Journal of Computer Vision, 2002, **47**(3):7-42.
- 12 Wang Biao. The Study of Computer Vision Techniques Applied into Low Penetration and Precision Strike [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. [ 王彪. 计算机视觉技术在低空突防与精确打击中的应用研究][D]. 南京:南京航空航天大学, 2004, 4. ]
- 13 Peng Qi-min, Jia Yun-de. An Algorithm for dense disparity mapping by using graph cuts [ J ]. Journal of Software, 2005, **16**(6): 1090-1095. [ 彭启民, 贾云得. 一种基于最小割的稠密视差图恢复算法[J]. 软件学报, 2005, **16**(6): 1090-1095. ]
- 14 Kanade T, Okutomi M. A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, **16**(9):920-932.
- 15 Zhou Xiu-zhi, Wen Gong-jian, Wang Run-sheng. Fast stereo matching using adaptive window [ J ]. Chinese Journal of Computers, 2006, **29**(3): 473-479. [ 周秀芝, 文贡坚, 王润生. 自适应窗口快速立体匹配[J]. 计算机学报, 2006, **29**(3): 473-479. ]
- 16 Shi Yu-hui. Particle swarm optimization [ J ]. IEEE Neural Networks Society, 2004, **11**(2):8-13.
- 17 Clerc M. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization [ A ]. In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation [ C ], Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Service Center, 1999:1951-1957.
- 18 Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization [ A ]. In: Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation [ C ], Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Service Center, 2000:84-88.
- 19 Yang Yan, Jin Fan, Kamel M. Research and development of particle swarm optimization [ J ]. Computer Engineering, 2004, **30**(21): 3-4. [ 杨燕, 靳蕃, Kamel M. 微粒群优化算法研究现状及其进展[J]. 计算机工程, 2004, **30**(21):3-4. ]
- 20 Xia Gui-mei, Zeng Jian-chao. A researchful performance and tendency of particle swarm optimization algorithms [ J ]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2005, **19**(1): 23-25. [ 夏桂梅, 曾建潮. 微粒群算法的研究现状及发展趋势[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2005, **19**(1):23-25. ]
- 21 Gerdes V. Stereo image data notes [ EB/OL ]. [http://www-student.info.rmatik.uni-bonn.de/~gerdes/MRTStereo/corridor\\_notes.html](http://www-student.info.rmatik.uni-bonn.de/~gerdes/MRTStereo/corridor_notes.html), 2006-10-18.