

快速收敛的置信度传播立体匹配算法

张红颖*, 刘奕萱, 杨宇

(中国民航大学 航空自动化学院, 天津 300300)

(*通信作者电子邮箱 hy-zhang@cauc.edu.cn)

摘要:针对传统基于置信度传播的立体匹配算法运算次数较多、效率低下的问题,提出一种快速收敛的置信度传播算法。该算法在计算每一个像素点的置信度时,只考虑当前像素点自适应大小邻域内像素点对它的信息传递,而忽略距离较远的像素点的影响。实验结果表明提出的算法在保持相近匹配精度的前提下,运算时间减少 40%~50%,满足立体匹配的实时性要求。

关键词:立体匹配;置信度传播;快速收敛;匹配代价;自适应窗口;信息传递

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

Stereo matching algorithm based on fast-converging belief propagation

ZHANG Hongying*, LIU Yixuan, YANG Yu

(College of Aeronautical Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Concerning the high computation complexity and low efficiency in traditional stereo matching method based on belief propagation, a fast-converging algorithm was proposed. When calculating the confidence level of each pixel, the algorithm only utilized the information translated from the neighboring pixels in an adaptive support window, while ignoring the impact of the pixels beyond the window. The experimental results show that the proposed algorithm can reduce 40% to 50% of computation time while maintaining the matching accuracy. Therefore, it can meet the real-time requirement for stereo matching.

Key words: stereo matching; belief propagation; fast convergence; cost aggregation; adaptive window; message passing

0 引言

置信度传播(Belief Propagation, BP)算法^[1]利用迭代原理寻找整幅图像的全局能量最小值,与局部算法^[2-3]相比较,能够获得较高的匹配准确性。传统 BP 算法需要遍历图像中各节点的取值范围,不断迭代更新消息,计算时间较长。为了减少运算时间,Felzenszwalb 等^[4]提出分层置信度传播(Hierarchical Belief Propagation, HBP)算法,即通过线性距离转化、二分图节点交替更新消息和分层预测消息初始值三种方法分别减少计算一次信息迭代的时间,减少信息存储空间,以及减少传递信息的迭代次数。该算法在保证得到与传统算法相似的匹配精度的同时大大提高了置信度传播算法的运行效率。Brunton 等^[5]、Yang 等^[6]则尝试利用图像处理器(Graphics Processing Unit, GPU)数据处理高度并行化的特点,将 HBP 算法移植到 GPU 上,将每个像素作为一个线程(thread)单独处理,实现了大规模高性能的并行计算,减少了计算时间,但对算法本身改进不大。Srivastava 等^[7]定义了一个新的信息传递顺序以取代原来的极线搜索方式,消息传递顺序由每一像素点的标记域的差异决定。这些差异评估了这些标记域的多值性,而消息沿着多值性梯度分层更新。该方法虽然可获得较高的匹配精度,但在速度方面无明显改善。Lai 等^[8]提出了一种减少存储空间和带宽的优化算法,但该算法没有减少每个节点的遍历搜索空间,因此在运算时间方

面改进不大。

虽然置信度传播算法能够获得精度较高的视差结果,但在计算每点信息时都需要进行多次迭代,计算耗时量大,不能满足实时性要求。因此本文提出一种快速收敛的 BP 算法,在保证计算精度的前提下,有效地减少了消息迭代次数,提高算法的运行效率。

1 全局置信度传播算法

Sun 等^[1]将马尔可夫随机场模型引入立体匹配算法中,即把图像中每个像素点分配给马尔可夫随机场中的每一节点,并采用贝叶斯最大概率估计方法对马尔可夫网络中节点间的概率进行迭代和推理,求出迭代后节点的最大置信度信息,再根据节点的置信度得到致密视差图。消息传递的示意图如图 1 所示。

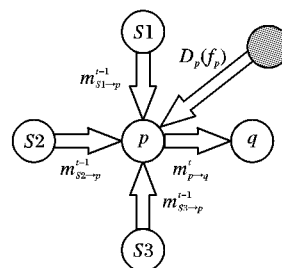


图 1 消息传递机制的示意图

收稿日期: 2012-08-17; **修回日期:** 2012-11-05。 **基金项目:** 国家自然科学基金委与中国民用航空局联合基金资助项目(60979005); 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项项目(ZXH2009B004); 中国民航局科技基金资助项目(MHRD201002); 天津市自然科学基金青年基金资助项目(12JCQNJC00600)。

作者简介: 张红颖(1978-), 女, 天津人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 数字图像处理; 刘奕萱(1988-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字图像处理; 杨宇(1986-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字图像处理。

图1中, $S1, S2, S3, q$ 均为 p 点的邻域节点, 每个消息可表示成维数为可能视差个数的向量, 在第 t 次迭代过程中节点 p 向其邻域节点 q 传递的信息为

$$m_{pq}^t(f_p) = \min_{f_p} \left(V(f_p, f_q) + D_p(f_p) + \sum_{s \in N(p)/q} m_{sq}^{t-1}(f_p) \right) \quad (1)$$

其中: 数据项 $D_p(f_p)$ 表示像素点 p 在不受邻近像素点影响的前提下为其分配视差值为 f_p 时的匹配代价; 平滑项 $V(f_p, f_q)$ 表示为两个相邻像素视差不连续的惩罚量, 视差差异越大, 惩罚量越大, 反之越小; $\sum_{s \in N(p)/q} m_{sq}^{t-1}(f_p)$ 表示在 $t-1$ 迭代过程中 p 点邻域像素 (除像素点 q) 传递来的信息之和, 初始值为零; $N(p)$ 为像素点 p 的四邻域像素点集合。经过 t 次迭代后, 每个像素点的置信度为

$$b_p(f_p) = D_p(f_p) + \sum_{s \in N(p)} m_{sp}^t(f_p) \quad (2)$$

p 点的最优视差值通过最小化置信度获得, 如式(3)所示:

$$d_p^* = \arg \min b_p(f_q) \quad (3)$$

2 快速收敛 BP 算法

传统 BP 算法在计算每个像素点的置信度信息时需考虑固定的较大区域内所有像素点对当前像素点的影响, 计算复杂度较高。本文提出一种快速收敛的 BP 算法, 该算法在计算图像中任一节点的置信度信息时, 只接受以该像素点为中心像素, 自适应大小区域内的像素点对其传递的信息, 而忽略与中心像素点距离较远的像素点对它的影响, 减少了计算复杂度, 从而提高了算法的运行效率。

2.1 快速收敛 BP 算法原理

在图像内部各像素点之间进行消息传递的过程中, 不同位置的像素点对当前像素点的影响不尽相同, 因此以当前像素点为中心, 分析不同大小区域内的像素点对当前像素点的影响, 结果如图2所示。

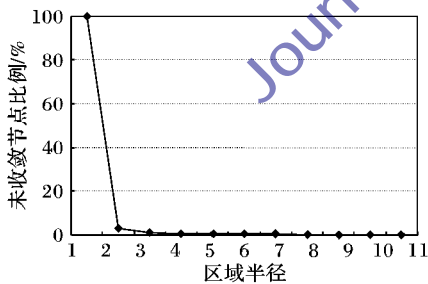


图2 未收敛节点百分比示意图

图2表示传统 BP 算法在计算马尔可夫随机场模型中能量方程最小化问题时节点信息的更新及节点的收敛情况。当区域半径为 n 时, 即考虑中心像素的 $n \times n$ 邻域内像素对其进行信息传递之后该点的置信度为 b_p^n , 计算当区域半径足够大 (为某一定值 a) 时的节点置信度为 b_p^a , 统计在不同大小区域的影响下中心像素点的置信度 $b_p^1, b_p^2, b_p^3, \dots$ 收敛到 b_p^a 的节点数, 设置一个阈值 η , 通过文献[1, 10]置信度算法中传递信息的误差是单向收敛的这一结论可知, 当满足

$$\|b_p^n - b_p^a\| < \eta \quad (4)$$

时判断该节点置信度收敛, 在实际应用中, η 为 b_p^a 的 0.5% ~ 1%。

由图2可以看出每一节点只需较小范围的信息更新即可达到收敛的状态, 所以传统算法中的固定窗口会大大增加计算每个节点置信度的计算量。

为了有效地减少传统 BP 算法中的冗余计算, 本文提出快速收敛算法, 即仅更新尚未收敛像素点的置信度信息。由式(2)可知, 某一节点在接受 $n \times n$ 邻域内消息传递时的置信度信息 (b_p^n) 只与数据项 ($E_{D,X}$) 和该节点 $n \times n$ 邻域内像素点向它传递的信息之和 $\sum_{Y \in N(X)} M_{Y,X}^n$ 有关, 因为数据项始终保持不变, 而 $\sum_{Y \in N(X)} M_{Y,X}^n$ 的更新仅与 $\sum_{Y \in N(X)} M_{Y,X}^{n-1}$ 相关, 所以 b_p^n 的更新也仅与 b_p^{n-1} 相关, 当满足

$$\|b_p^n - b_p^{n-1}\| < \eta \quad (5)$$

时 (η 为一个足够小的阈值, 与式(4)取相同值), 则判断该节点收敛, 停止扩大消息的更新范围。通过快速收敛的方法, 大部分节点不需要接受固定的较大区域范围内像素点的消息传递就已经满足计算要求的结果, 客观上缩减了算法整体计算时间。

2.2 快速收敛 BP 算法的实现

根据快速收敛 BP 算法的原理, 给出该算法的流程如图3所示。

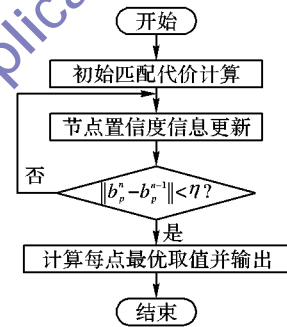


图3 快速收敛 BP 算法流程

由于自适应机制的引入, 本文算法中每个像素点接受不固定大小的邻域像素对其传递的信息, 如果图像包含的像素较多, 节点信息的取值范围比较大, 收敛速度较慢; 若图像包含的像素点较少, 节点信息的收敛速度较快。所以具体的执行时间与具体的处理对象有关。

2.2.1 初始匹配代价计算

作为置信度传播算法的全局能量函数的数据项, 初始匹配代价表示待匹配像素对的颜色相关性, 定义 I_L 为参考图像 (也称左图像), I_R 为目标图像 (也称右图像), x_L 和 x_R 为在左右两幅图像中对应视差为 d_s 的匹配像素对, $e_0(x_L, x_R)$ 表示根据 x_L 与 x_R 的色度计算出的基于像素的初始匹配代价。

$$e_0(x_L, x_R) = \sum_{c(r,g,b)} |I_c(x_L) - I_c(x_R)| \quad (6)$$

在实际采样过程中, 图像中像素点灰度的相异性在灰度不连续处会变得很大, 因此像素的相异性不能仅用灰度的相异性来衡量。因此, 可在基于绝对值差异 (Absolute Difference, AD) 的相异性度量公式中引入灰度截断阈值 T 。

$$e_0(x_L, x_R) = \min \left\{ \sum_{c(r,g,b)} |I_c(x_L) - I_c(x_R)|, T \right\} \quad (7)$$

T 值的选取也至为重要, 若 T 值选取过小, 将影响相异性度量的准确性; 如果 T 值选取过大, 又起不到控制相异性度量的作用。根据文献[8], T 的取值标准为除去少数异常点外, 其他可能匹配像素点的灰度相异性平均值的 2 倍, 本文选取 $T = 20$ 。

2.2.2 置信度消息的更新

图像中大部分像素点在接收其某一邻域内像素点的信息传递后都趋于收敛,快速收敛 BP 算法忽略这些收敛像素点,而仅仅更新那些尚未收敛像素点的置信度信息,直至收敛为止。因此在整个计算过程中无需计算图像中所有像素点的置信度信息,只需在计算之前对该像素点进行收敛判断,再根据判断结果进行下一步计算即可。

快速收敛 BP 算法需要对式(5)的结果进行判断,这时, η 值的选取就显得尤为重要。当 η 过大时,一些尚未收敛的像素点会被错误判定为收敛点从而停止信息更新,导致计算结果不准确;当 η 过小时,由于每次更新置信度信息时都要引入条件判断,增加计算量,并不能有效减少算法的运行时间。综上所述,选择合理的阈值是非常必要的。

根据文献[11]的证明,由于在实际算法操作中验证 η 的取值范围比较复杂,因此可以对判断收敛条件 $\|b_p^n - b_p^{n-1}\| < \eta$ 稍作修改。由式(3)可知每个节点的置信度信息都对应一个为该点分配的视差值,那么可以将收敛条件改为判断每个像素点相邻两次信息更新后对视差值的差,即 $\|d_p^n - d_p^{n-1}\| < \sigma$ (σ 为 η 对应的一个足够小的视差值),由于为每个像素点分配的视差值范围为 0~15,通过多次实验验证只有当 $\sigma = 1$ 和 $\sigma = 2$ 时,该算法能在保证原始精确度的前提下大大减少运行所需时间。

表1 不同立体匹配算法的误匹配率比较

算法	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones		
	Nonocc	All	Disc	Nonocc	All	Disc	Nonocc	All	Disc	Nonocc	All	Disc
HBP ^[4]	1.84	3.73	9.90	1.68	2.83	9.90	22.30	30.20	33.40	19.00	26.60	28.50
AdaptDomainBP ^[12]	4.82	7.10	16.10	1.57	2.82	13.60	9.13	18.90	20.90	4.16	14.40	11.50
CSBP ^[13]	2.35	4.17	10.50	1.48	3.41	17.70	11.10	20.20	27.50	5.98	16.50	16.00
BP + MLH ^[14]	4.17	6.34	14.60	1.96	3.31	16.80	10.23	18.90	24.00	4.93	15.50	12.30
本文算法	2.33	4.13	8.63	2.72	3.81	13.10	15.90	21.60	22.70	12.60	19.30	19.70

表1中,Nonocc(non-occluded regions)表示非遮挡区域的误匹配率,All(all regions)表示整体图像的误匹配率,Disc(depth discontinuity regions)表示深度不连续区域的误匹配率。由表1可以看出,本文算法对 Tsukuba 图像和 Venus 图像得到的误匹配率与其他 BP 算法相比较低,而对 Teddy 图像和 Cones 图像的误匹配率较高,可知本文算法对视差值相差较小的图像对匹配效果较好,但仍需完善;且本文算法在深度不连续区域的表现优异,说明该算法能够较好地处理边界及遮挡区域的误匹配现象,但在无纹理区域误匹配率较高,仍需进一步改进。

快速收敛 BP 算法由于引入了判断收敛的条件,与传统 BP 算法相比减少了各个节点不必要的信息更新,从而减少了算法的运行时间,如表2所示。

综合表1和表2可以看出,本文算法在保证与其他全局匹配算法精度相近的同时所需运行时间减少了48%。

传统 BP 算法的运算时间与接收信息传递的区域大小呈线性增长关系,而本文提出的快速收敛 BP 算法在 $\sigma = 1$ 和 $\sigma = 2$ 时随着区域的增大变化较为平缓,所需的计算时间与传统 BP 算法相比要少,这种特性在图像像素数越多、视差范围越大时,计算时间优势就愈加明显。图4为传统 BP 算法与本文算法在 $\sigma = 1$ 和 $\sigma = 2$ 的计算时间对比。从图中可以看出,随着接收信息传递区域的不断扩大,传统 BP 算法的运算时间线性增加,而快速收敛 BP 算法的运算时间增幅较缓。

在计算每一像素点的最终视差值后,可根据误匹配像素百分比(Percantage of Bad Matching,PBM)对算法进行误差分析。

$$PBM = \frac{1}{N} \sum_p (\|d_p - d_{pT}\| > \delta_d) \quad (8)$$

式中: N 为像素点个数, d_p 为最终估计视差值, d_{pT} 为真实视差值,通常 $\delta_d = 1$ 。这一结果反映了计算所得视差值的误差大于某一阈值的像素点占整幅图像的比例。为了衡量不同立体匹配算法在图像中不同区域的匹配效果,可以从图像中取出三类典型区域进行测试,分别为非遮挡区域(高纹理区域和低纹理区域)、整体图像和深度不连续区域(遮挡和边界区域),并将算法的匹配结果交由 Middlebury 大学立体视觉算法评测网站 <http://vision.middlebury.edu/stereo> 进行测评,给出该算法在不同区域的误差。

3 实验结果与分析

本文算法用 C 语言实现,测试机器的操作系统为 Windows 7(64 位),处理器为 Intel core i5 2300,主频 2.8 GHz,内存 8 GB, Visual Studio 2010 开发平台,运用 OpenCV2.2 进行编程实现。实验使用 Middlebury 大学立体视觉算法评测网站 <http://vision.middlebury.edu/stereo> 提供的四幅标准测试图像(Tsukuba, Venus, Teddy, Cones)来检测最终视差估计的结果,测试图像对之间相差的视差值范围分别为:0~15, 0~19, 0~59, 0~59。表1为不同立体匹配算法的误匹配率比较。

表2 不同置信度传播算法的运行时间比较 s

算法	Tsukuba	Venus	Teddy	Cones
传统 BP 算法 ^[1,9]	28.000	36.000	157.000	146.000
AdaptDomainBP ^[12]	37.180	56.210	224.750	216.290
CSBP ^[13]	26.510	35.620	141.240	150.370
BP + MLH ^[14]	24.670	31.140	137.320	133.470
本文算法	13.213	18.952	93.239	94.391

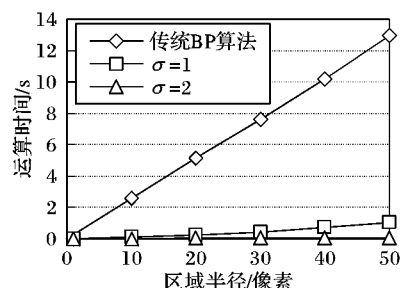


图4 Tsukuba 计算时间对比

4 结语

本文对传统 BP 算法中的节点信息更新环节进行研究,提出了一种快速收敛的改进算法。该算法在节点的置信度信息更新策略中引入了收敛的条件判断,即节点前后两次的置信度差异小于某一阈值时判定收敛,停止信息的继续更新,能

(下转第494页)

5 结语

本文在LBF模型与ADPLS算法的基础上提出一种新的稳定的分割算法,它充分利用了ADPLS和LBF各自的边界和区域分割优势。与LBF模型相比,该文分割算法不仅不受初始轮廓的影响,而且总能获得较好的分割效果;与ADPLS方法相比,该融合算法不仅能完全避免在分割某些灰度不均匀图像时产生边缘泄漏和分割不足的现象,而且保持了分割稳定的特点。即使在各种算法分割效果良好的情况下,本文算法在速度上也有明显的优势。综上所述,本文改进的融合算法在分割精度、速度及算法稳定性等综合性能指标上明显优于ADPLS和LBF算法。

参考文献:

- [1] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: active contour models [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1988, 1(4): 321-331.
- [2] CASELLES V, CATTE F, COLL T, *et al.* A geometric model for active contours in image processing [J]. *Numerische Mathematik*, 1993, 66(1): 1-31.
- [3] TSAI A, YEZZI A, Jr, WILLISKY A S. Curve evolution implementation of the Mumford-Shah functional for image segmentation, denoising, interpolation, and magnification [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(8): 1169-1186.
- [4] RONFARD R. Region-based strategies for active contour models [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(2): 229-251.
- [5] CHAN T F, VESE L A. Active contour without edges [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(2): 266-277.
- [6] MUMFORD D, SHAD J. Optional approximation by piecewise smooth functions and associated variational problems [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1989, 42(5): 577-685.
- [7] 徐玲凌, 肖进胜, 易本顺, 等. 改进的C-V水平集模型图像分割算法 [J]. *计算机工程*, 2009, 35(10): 209-213.
- [8] 文静, 陈占伟. 变分水平集分割方法 [J]. *计算机工程*, 2010, 36(9): 212-213, 216.
- [9] 何传江, 唐利明, 詹毅. 用于图像分割的自适应距离保持水平集演化 [J]. *软件学报*, 2008, 19(12): 3161-3169.
- [10] LI C M, XU C Y, GUI C F, *et al.* Level set evolution without re-initialization: a new variational formulation [C]// *CVPR 2005: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE, 2005: 430-436., 2005.
- [11] LI C M, KAO C-Y, GORE J C, *et al.* Implicit active contours driven by local binary fitting energy [C]// *CVPR 2007: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE, 2007: 1-7.
- [12] LI C M, KAO C-Y, GORE J C, *et al.* Minimization of region-scalable fitting energy for image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(10): 1940-1949.
- [13] SURI J S, LIU K C, SINGH S, *et al.* Shape recovery algorithms using level sets in 2-D/3-D medical imagery: a state-of-the-art review [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2002, 6(1): 8-28.
- [14] 林颖, 印桂生, 杨耘. 基于变分水平集的灰度不均匀医学图像分割 [J]. *计算机工程*, 2010, 36(24): 203-205.
- [15] 林亚忠, 顾金库, 郝刚. 一种新的自适应水平集融合算法 [J]. *计算机工程*, 2011, 37(13): 216-218.

(上接第486页)

有效地减少信息的冗余计算。实验结果表明,在不影响计算精度的前提下,该方法能够大大提高算法的运行效率。下一步的工作目标将考虑如何减少无纹理区域的误匹配以及如何降低针对视差值相差较大的图像对的误匹配率,以进一步提高算法的视差匹配准确性

参考文献:

- [1] SUN J, ZHENG N N, SHUM H Y. Stereo matching using belief propagation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(7): 787-800.
- [2] SCHARSTEIN D, SZELISKI R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2003, 47(1/3): 7-42.
- [3] SZELISKI R, ZABIH R, SCHARSTEIN D, *et al.* A comparative study of energy minimization methods for Markov random fields with smoothness-based priors [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(6): 1068-1080.
- [4] FELZENSZWALB P F, HUTTENLOCHER D P. Efficient belief propagation for early vision [C]// *CVPR 2004: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004, 1: 261-268.
- [5] BRUNTON A, SHU C, ROTH G. Belief propagation on the GPU for stereo vision [C]// *The 3rd Canadian Conference on Computer and Robot Vision*. Quebec: [s. n.], 2006: 76.
- [6] YANG Q X, WANG L, YANG R G, *et al.* Real-time global stereo matching using hierarchical belief propagation [C]// *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. Edinburgh: British Machine Vision Association, 2006: 989-998.
- [7] SRIVASTAVA S, HA S J, LEE S H, *et al.* Stereo matching using hierarchical belief propagation along ambiguity gradient [C]// *ICIP'09: Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing*. Piscataway: IEEE, 2009: 2061-2064.
- [8] LAI Y-C, CHENG C-C, LIANG C-K, *et al.* Efficient message reduction algorithm for stereo matching using belief propagation [C]// *17th IEEE International Conference on International Conference on Image Processing*. Piscataway: IEEE, 2010: 2977-2980.
- [9] YOON K-J, KWEON I-S. Locally adaptive support-weight approach for correspondence search [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(4): 650-656.
- [10] IHLER A, FISHER J, WILLISKY A S. Loopy belief propagation: convergence and effects of message errors [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2006, 6(1): 905-936.
- [11] YANG Q X, WANG L, YANG R G. Stereo matching with color-weighted correlation, hierarchical belief propagation, and occlusion handling [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 492-504.
- [12] Anonymous. Adaptive domain belief propagation for sub-pixel stereo matching [C]// *Proceedings of 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE, 2011: 1665.
- [13] YANG Q X, WANG L, AHUJA N. A constant-space belief propagation algorithm for stereo matching [C]// *Proceedings of 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE, 2011: 1458-1465.
- [14] STANKIEWICZ O, WEGNER K. Depth map estimation software version 2 [S]. [S. l.]: ISO/IEC Moving Picture Experts Group, 2008.
- [15] 杨宝海, 刘小莉, 查代奉. 基于视差空间采样的区域增长稠密立体匹配算法 [J]. *计算机应用*, 2009, 29(10): 2690-2692.
- [16] 刘效勇, 李大海, 王琼华, 等. 彩色图像对自适应匹配算法 [J]. *计算机应用*, 2011, 31(1): 163-166.