

基于渐进可靠点生长的散斑图快速立体匹配

张彦峰^{1,2} 黄向生² 李杭^{2,3} 王梦伟²

(中国测绘科学研究院 北京 100830)¹ (中国科学院自动化研究所 北京 100190)²
(清华大学 北京 100083)³

摘要 传统的区域生长匹配结果过于依赖生长阈值,而渐进可靠点生长匹配设置由高到低的种子点选取阈值和生长阈值迭代地生长区域,有效增强了匹配结果对于生长阈值的鲁棒性。有研究将该方法用于散斑图的立体匹配,取得了较好的效果,但是计算速度慢且仍存在不少非法点。实现了一种划分网格进而筛选种子点的方法,并在生长过程中丢弃传统的四邻域生长,提出一种跳跃式生长方法,其在确保匹配质量的同时大大提高了计算速度。进一步地,将渐进可靠点生长的方法用在匹配后处理中消除了一半的非法点。

关键词 立体匹配,散斑图,区域生长,非法点

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A

Fast Stereo Matching Based on Progressive Reliable Point Growing Matching for Speckle Pattern Images

ZHANG Yan-feng^{1,2} HUANG Xiang-sheng² LI Hang^{2,3} WANG Meng-wei²

(Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100830, China)¹

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)²

(Tsinghua University, Beijing 100083, China)³

Abstract Different from the traditional region growing matching algorithm which is excessively dependent on the growing threshold, PRPGM (Progressive Reliable Points Growing Matching) sets a sequence of thresholds from high to low for both seed point selection and growing matching to implement the stereo matching in an iterative process, thus enhancing the results' robustness on the thresholds. A research has employed this method for depth estimation for speckle projection system and achieved good results. However, it motivates us to conduct this research that the calculation is not fast enough for practical applications as well as there are still many illegal points on the disparity map. We proposed a sparse seed point selecting method that selects seed point from grid divided by certain size on the speckle pattern image in the stage of selecting seed point and a jumping growing matching method instead of the conventional connectivity constraint of 4-neighbors domain during the growth of the reliable points. Both of the above revises have been verified to improve calculation speed greatly. Meanwhile, we applied the PRPGM to handle illegal points in post-processing of stereo matching and eliminated most of illegal points consequently.

Keywords Stereo matching, Speckle pattern image, Region growing, Invalid point

1 引言

基于投影散斑图的三维重建系统^[1-6]与传统的双目或多目三维重建系统^[7,8]的成像原理不同,但算法核心都是图像的立体匹配(见图1)。由于应用领域如体感游戏等的驱动,前者更加关注重建的实时性,对立体匹配算法在速度方面有更高的要求。立体匹配是通过匹配两张或多张图像的同名像素而重建场景三维模型的过程^[9]。立体匹配算法有很多种,根据匹配基元的不同分为稀疏的特征匹配和稠密的面元匹配^[10],前者使用从场景图像中提取的特征点和特征线作为基元实现稀疏匹配,后者使用场景图中每个像素作为基元实现

稠密匹配。现有的立体匹配算法都是基于 Marr 提出的立体视觉理论^[11]的以下两个基本前提假设:

1. 灰度唯一性(uniqueness)
2. 视差连续性(smoothness)

其中,灰度唯一性是指场景中同一个点在两幅图像中的灰度一致,而视差连续性是指场景中相邻像素的视差不会出现突变。

基于区域生长的匹配算法是一种快速匹配方法,传统的基于区域生长的立体匹配方法^[12]利用特征点匹配取得稀疏的种子点然后进行区域生长,生长条件是被生长点视差与该可靠点视差相近且相应的匹配代价足够低,其中,视差相近体

本文受国家自然科学基金项目(61175034),青年基金项目(61103154)资助。

张彦峰(1990—),男,硕士生,主要研究方向为航空摄影测量和计算机视觉, E-mail: 200732590184@whu.edu.cn; 黄向生(1975—),男,副研究员,主要研究方向为计算机视觉和三维建模; 王梦伟(1989—),女,硕士生,主要研究方向为计算机视觉和三维建模。

现了视差连续性假设,而匹配代价则体现了灰度唯一性假设。

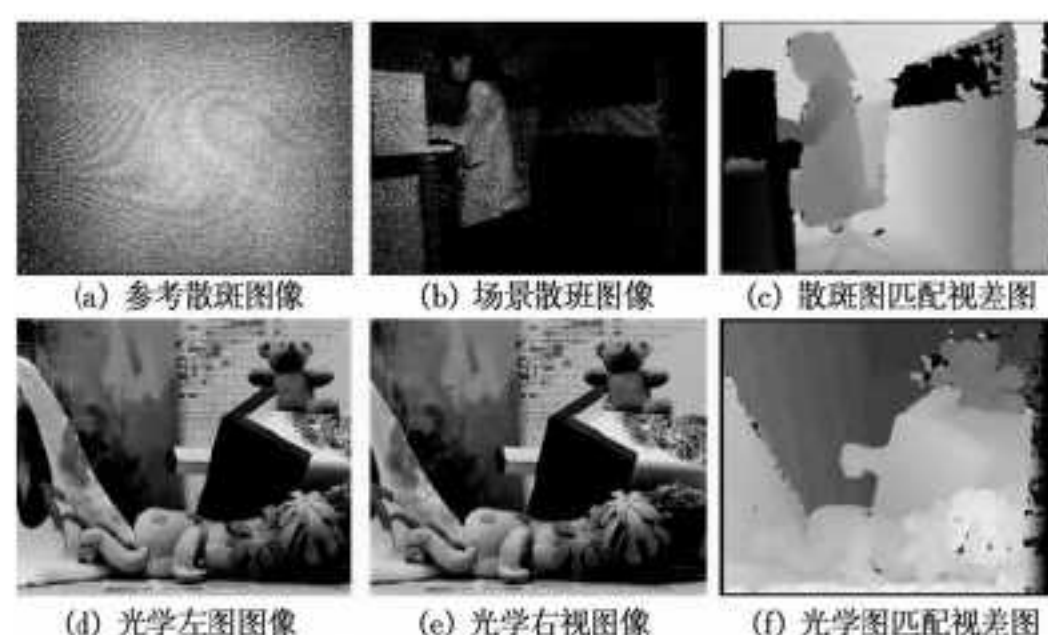


图1 立体匹配的数据源和匹配结果

但红外散斑投影系统用散斑图案来对物体进行深度编码,削弱了场景中物体本身的特征信息,因此基于特征匹配的种子点选择方法并不适用,同时,这种区域生长方法对于生长阈值的鲁棒性较差。

Wang等针对投影散斑系统提出了一种渐进可靠点生长的重建算法^[6],通过采用由高到低逐渐降低的生长阈值,取得了较好的实验结果。但该算法的种子点从图像所有像素点中选取,对于每个种子点都要计算所有视差对应的匹配代价值,计算量很大,不利于实现实时重建。事实上只需少量的种子点就可同样地重建整个场景,于是我们将场景图像划分了格网,只有格网点是候选种子点,因此只需对格网点计算所有视差对应的代价,大大降低了计算量。同时,我们在进行区域生长时,不用传统的四邻域联通,而是跨越两个像素计算相似性,然后将满足条件的像素连同被跨越的这两个像素直接进行生长,实验表明在保证同样匹配结果的同时进一步加快了计算速度。最后,因为场景中物体吸收反射率等诸多因素的影响,渐进区域生长的立体匹配结果总会有一些最终也没有生长到的点,我们继续使用区域生长的思想对这些非法点进行了匹配的后处理,去除了一半的非法点。

2 快速渐进可靠点生长算法

这部分我们首先介绍文献^[6]提出的 PRPGM(Progressive Reliable Points Growing Matching)算法,然后介绍我们实现的加速方法。

2.1 渐进可靠点生长匹配(PRPGM)

如图2所示,PRPGM算法的核心是种子点选择和可靠点生长两个步骤的迭代进行。伴随着迭代,可靠点选择和生长的阈值不断地降低,保证了较低的误匹配率和较高的成功匹配率。

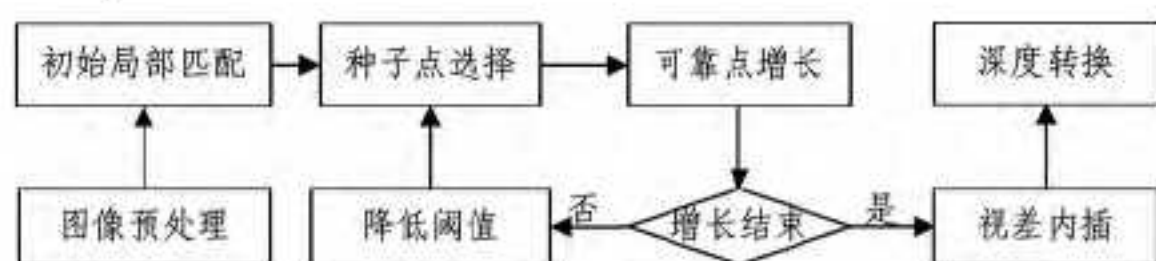


图2 PRPGM算法流程

2.1.1 种子点选择

PRPGM首先对整个图像进行局部匹配,然后设置3个判据筛选种子点,分别是匹配度、置信度和连续度。匹配度是指每个像素当前视差对应的匹配代价。文献^[6]使用了自适应滤波和逻辑相关求取匹配度。我们在实验中使用更加稳健的ZNCC(Zero-Based Normalized Correspondence Coefficient)

作为匹配测度^[13]。置信度是指每个像素点最优视差对应匹配代价和次优视差对应匹配代价之间的比值,这一判据表征了当前视差是正确视差的可信度。连续度是指左右图像分别作为参考图像得出的视差的自洽程度。

2.1.2 可靠点生长

生长步骤如下:

a) 设置两个阈值 T_{fM} , T_{fL} 。

b) 创建一个可靠点堆栈 Q ,把所有种子点标记为可靠点并加入堆栈。

c) 从 Q 中弹出可靠点进行生长。假设可靠点视差 $D(x_0, y_0) = d_0$,分别计算四邻域未被标记为可靠或非法的点对应 $d_0 - 1, d_0$ 和 $d_0 + 1$ 处的代价 f ,若 $\max\{f(d_0 - 1), f(d_0), f(d_0 + 1)\} > T_{fM}$,则把 $d = \arg \max\{f(d_0 - 1), f(d_0), f(d_0 + 1)\}$ 赋给该邻域点,并把该点加入 Q ,将该点标记为可靠点,若 $T_{fL} < d < T_{fM}$,则只把 d 赋给该邻域点,若 $d < T_{fL}$,则将邻域点设为非法点。如此直到 Q 为空,本轮生长结束。

2.1.3 渐进生长过程

渐进生长是个迭代的过程,每次迭代要不断降低种子点选取阈值和可靠点生长阈值。在筛选种子点时分别给3个判据设定阈值 T_{fH}^0 , T_{Conf}^0 和 T_{LRC}^0 ,选择初始种子点进行生长,生长阈值为 T_{fM}^0 和 T_{fL}^0 。每次迭代都分别减去一个常数,然后进行种子点选取和可靠点生长。要求最后一次计算时的 T_{fH}^0 不小于 T_{fM}^0 。

2.2 划分格网筛选种子点

PRPGM算法在进行渐进生长之前,首先要遍历整个图像进行局部匹配,目的是从中选取种子点。我们在实验中发现,PRPGM最耗时的部分就是这一步的计算,也叫做代价矩阵^[13]的计算,假设每个点都计算整个视差搜索范围 D 的所有代价,那么对于一幅宽为 W 像素高为 H 像素的图像,匹配计算量是 $O(WHD)$ 。我们也发现,相比代价矩阵的计算,渐进生长的耗时是微不足道的。事实上,在PRPGM过程中大多数的点的视差都是生长得到的,换言之,代价矩阵的大多数元素的计算是不必要的,因此我们无需计算一个稠密的代价矩阵,而只需一个稀疏的候选种子点集再加上渐进生长算法就可以完成整个图像的稠密匹配,而匹配计算量约为 $O(3WH)$,比原来减少了一个量级。

基于这一考虑,我们对散斑图像划分格网,然后将格网点作为候选种子点,这样便可大大降低计算量,比如采用 10×10 的格网进行筛选种子点,计算量将减小近100倍。然而理论上讲,这种做法有可能导致一些没有落在格网点上且其四邻域也一直没有生长出可靠点的像素点最终无法得到匹配。我们在实验中发现这个问题虽然的确存在,但是影响甚微,而且我们所提出的渐进可靠点生长非法点处理的方法可以消除这一影响。

2.3 跳跃式生长

划分格网选择种子点的方法是针对PRPGM种子点选取的改进,可靠点生长的过程同样有优化的空间。我们发现,如果改用ZNCC作为相似性测度PRPGM对散斑图像的生长能力非常强。于是丢弃传统的区域生长算法中对连通性采用四邻域或八邻域的要求,改为进行一种跳跃式的生长方法,具体方法为:

如图3所示,如果 p 点为可靠点,其视差为 d_0 ,则把

PRPGM 中的四邻域点改为图中的 a, b, c 和 d 点进行生长。例如对于 a 点, 如果 $\max\{f(d_0-1), f(d_0), f(d_0+1)\} > T_{fM}$, 则把 $d = \arg \max\{f(d_0-1), f(d_0), f(d_0+1)\}$ 同时赋给 $a, a1$ 和 $a2$, 并把 3 个点都标记为可靠点加入堆栈 Q , 其他操作和 PRPGM 一致。实验表明, 如果将跳跃的步长设为 2, 则基本不会影响匹配结果, 但是可以显著加快渐进生长的计算速度。

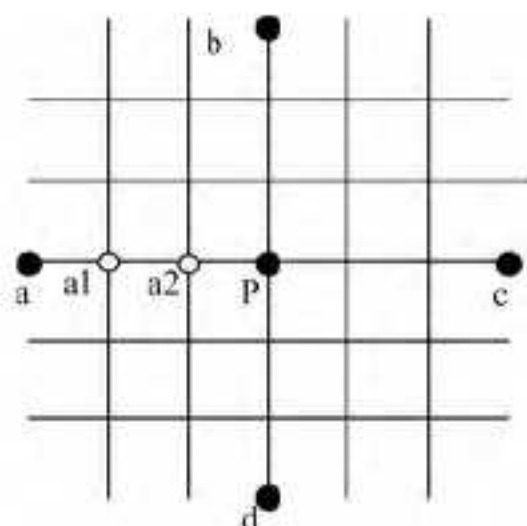


图 3 跳跃式生长方法

3 渐进可靠点生长去除非法点

渐进生长法得到的视差图一般仍存在不少非法点, 即直到最后一轮生长也没有被标记为可靠的点, 在视差图上表现为大小散乱分布的黑洞。经过仔细观察, 我们发现这些点真实的视差其实与其周围那些可靠点的视差邻近甚至完全一致, 没能正确匹配可能是由投影到这些场景上的点的散斑图案因吸收反射率等因素被污染造成的。总之, 这些点不能按照一般的匹配度阈值进行取舍, 而应该通过其与周围像素的视差连续性得到自身的视差。

为此我们设计了一种渐进生长法消除非法点的匹配后处理算法, 即迭代地由非法点周围的可靠点生长出非法点本身的视差。步骤如下:

- 设置聚类元素个数阈值 T_N 、周围可靠点视差方差阈值 T_δ 、非法点生长阈值 T_{Inv}^0 以及迭代次数上限 T_{iter} 。
- 用区域生长法对非法点进行聚类, 聚类条件是四邻域连通和标记为非法, 记录每个类别 i 的元素个数 N_i 及其周围可靠点位置和视差信息。
- 如果 $N_i < T_N$, 则计算周围可靠点方差 δ_i , 如果 $\delta_i < T_\delta$, 那么直接用周围可靠点视差均值给 i 中的元素赋值, 否则转入 d)。
- 与 2.1 类似, 对类别 i 将其周围可靠点作为种子点进行生长, 生长阈值为 T_{Inv}^{iter} , 然后更新非法点生长阈值 $T_{Inv}^{iter+1} = T_{Inv}^{iter} - \Delta T_{Inv}$ 。
- 如果迭代次数 $iter++ < T_{iter}$, 则转入 b), 否则输出当前视差图, 结束。

4 实验分析

我们用 Kinect 拍摄的参考图像和场景图像进行匹配实验, 利用 C 语言实现算法, 硬件为 2.00GHz P6100 CPU 和 2G RAM。使用的参数为: $T_{fH}^0 = 0.85$, $T_{fM}^0 = 0.3$, $T_{fConf}^0 = 0.55$, $T_{LRC} = 1$, $\Delta T_{Conf} = 0.025$, $\Delta T_{fH} = 0.025$, $\Delta T_{fM} = 0.025$, $T_N = 500$, $T_\delta = 200$, $T_{Inv}^0 = 0.25$, $\Delta T_{Inv} = 0.03$, $T_{iter} = 3$, 视差搜索范围为 57。另外与文献[6]不同, 我们所用的匹配相似性测度是 ZNCC, 窗口大小为 11。

4.1 划分格网筛选种子点

我们划分了 10×10 的格网来筛选种子点和实现渐进可

靠点生长匹配, 并把每次迭代过程中新增的种子点和由此生长出的可靠点显示出来。如图 4 所示, 可靠点生长性能是很强的, 少数的种子点正确地长出了绝大多数的可靠点, 这也就反过来证明了我们采用稀疏的种子点筛选格网是合理的。

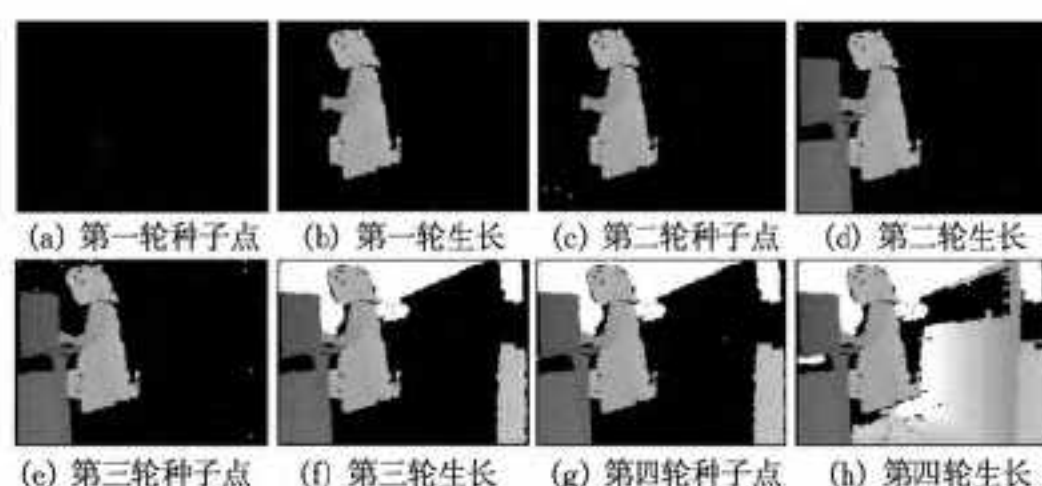


图 4 划分格网筛选种子点的 PRPGM 算法执行过程示例

我们将划分格网前后的匹配结果做了对比, 如图 5 所示, 发现划分格网筛选种子点的做法偶尔会导致部分区域无法匹配, 但整体上基本不会影响匹配结果。同时根据 1.2 节的分析, 这种做法可以大大降低计算量。然而为了进一步地加速, 我们采用了盒式滤波[14]的方法计算匹配代价, 这种做法减少了匹配代价的冗余计算, 总体上更进一步地提高了计算速度, 但是该方法必须预先遍历计算图像的相关值, 所以降低了我们提出的划分格网方法相对遍历图像方法的加速比。即便如此, 实验表明划分格网的方法对计算速度的提升还是非常明显的(见表 1)。从表 1 中我们发现整体计算速度也不是与格网大小成线性关系, 原因是无论如何选择种子点总存在一个最低的运算量 $O(3WH)$, 这是所有点都是被生长得到的情况下的计算量。通过对几组不同场景图像的匹配实验, 我们发现 10×10 的格网划分比较稳健。

表 1 划分格网筛选种子点匹配总耗时统计(单位: ms)

格网大小	遍历	3*3	10*10	15*15	25*25
匹配耗时	955	255	162	160	159



图 5 原始匹配结果与本文方法匹配结果对比

4.2 跳跃式生长

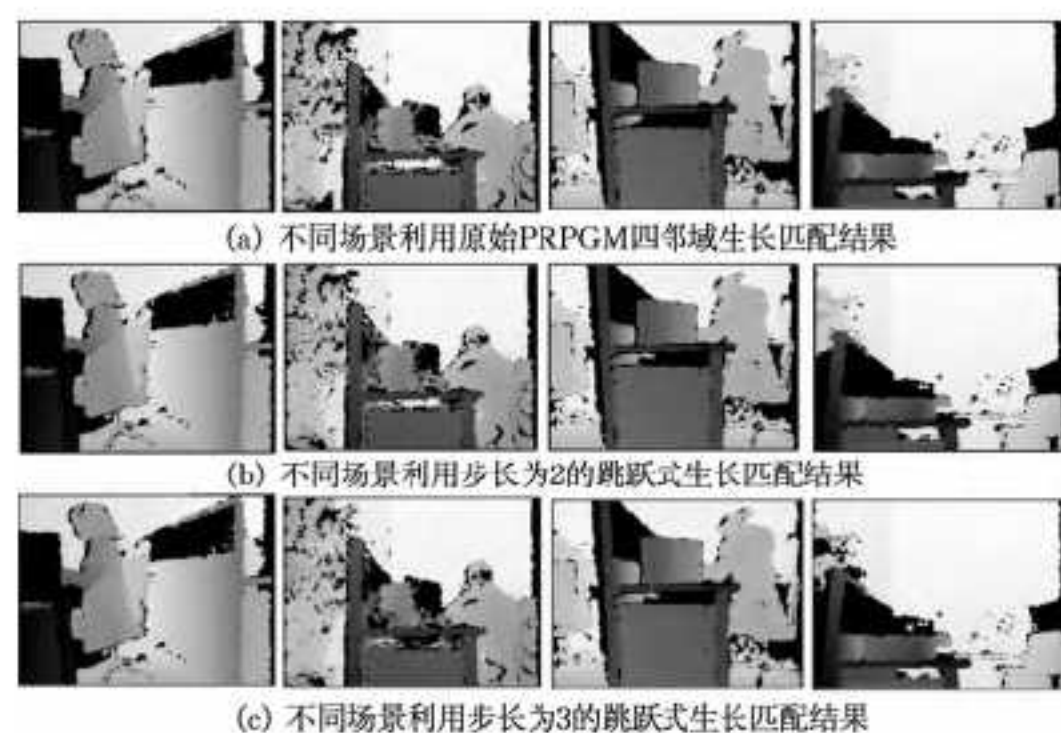


图 6 四邻域生长和不同步长跳跃式生长匹配结果

根据 3.1 节的分析, 可靠点生长能力很强, 极少数的种子点生长匹配了绝大多数的点, 这个事实在理论上支持了跳跃式生长方法。跳跃式生长的步长越长则越省时, 但是过长的

步长有可能破坏匹配结果,如导致有些点的无法匹配或错误匹配。如图6所示,我们通过实验发现跳跃式生长步长为2时基本不会影响匹配结果,而步长为3时有些区域将生长不出来,如第4幅图的植物叶子,同时有些区域出现错误的匹配,如第2幅图的桌子。实验也表明,跳跃式生长将步长设为2时明显提高了计算速度(见图7)。

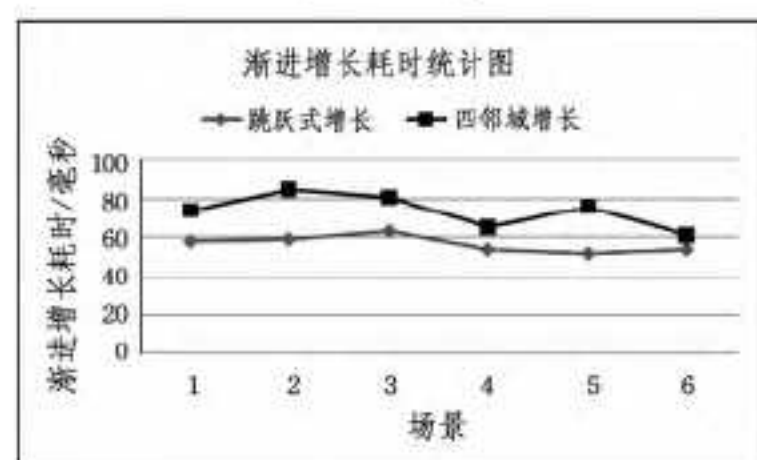


图7 渐进生长耗时统计图

4.3 渐进可靠点生长去除非法点

如图8所示,渐进可靠点生长的方法显著地去除了平面上的非法点,使得视差图更加平滑整洁。定量地统计匹配的非法点率表明,相比原来的结果渐进可靠点生长的方法减少了一半的非法点(见表2)。

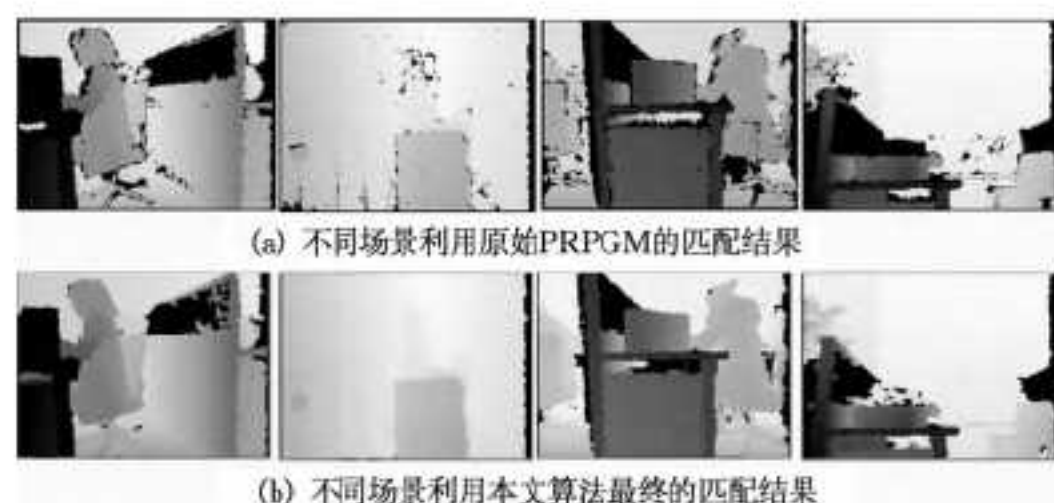


图8 原始 PRPGM 和本文算法最终结果对比图

表2 不同算法非法点率的比较(4个场景分别对应图7所示的4幅图像,单位:%)

方法	1	2	3	4
PRPGM	14.96	2.30	14.24	14.80
本文方法	7.23	0.10	7.21	7.51

结束语 首先,速度方面,我们从种子点选取和可靠点生长两个方面改进了 PRPGM 算法,成倍地加快了计算速度,达到了实时匹配。具体地,对于前者不再遍历整个图像而是划分格网,然后从中选取种子点,对于后者实施跳跃式的生长。这两个改进都是基于一个由我们的实验表明的事实,即散斑图的立体匹配中绝大多数的点是由极少数的可靠点生长得到的。

其次,在后处理方面我们设计了一种渐进可靠点生长的

非法点处理算法,将 PRPGM 算法中的非法点率降低了一半。

另外,本文的研究是基于散斑图的立体匹配开展的,但是从马尔计算机视觉关于立体匹配的理论分析也应该适用于可见光图像的匹配,这也是我们下一步的研究内容。

参考文献

- [1] Javier G. Three-dimensional mapping and range measurement by means of projected speckle patterns [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(16):3032-3040
- [2] Freedman B, Shpunt A, Machline M, et al. Depth mapping using projected patterns: US, 20100118123 [P]. 2010-05-13
- [3] 亚历山大, 施庞特, 泽夫, 扎勒夫斯基. 利用散斑图案的三维传感, 中国, 200780016625 [P]. 2009-07-29
- [4] 亚历山大, 施庞特, 泽夫, 扎勒夫斯基. 三维传感的深度变化光场, 中国, 200780009053 [P]. 2009-08-05
- [5] 泽夫, 扎勒夫斯基, 亚历山大, 施庞特, 雅维尔, 加西亚, 等. 用于物体重现的方法和系统, 中国, 200680038004 [P]. 2008-10-15
- [6] Wang G J, Yin X W, Pei X K, et al. Depth estimation for speckle projection system using progressive reliable points growing matching [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(3):516-524
- [7] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47(3):7-42
- [8] El-Hakim S F, Beraldin J A, Blais F. A comparative evaluation of the performance of passive and active 3-d vision system [C] // *Proc. SPIE. Canada*, NRC 39160, 1995:14-25
- [9] Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications* [M]. New York: Springer, 2010
- [10] Zhang L. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images [D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2005
- [11] Marr D, Poggio T. A computational theory of human stereo vision [C] // *Proc of the Royal Society of London*. London: Royal Society, 1979:301-328
- [12] 石春琴. 随机光照双目立体测量系统中的若干关键问题研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011
- [13] Hirschmüller H, Scharstein D. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometric differences [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 31(9):1582-1599
- [14] 舒志龙, 阮秋琦. 一种二维均值滤波快速算法及应用 [J]. *北方交通大学学报*, 2001, 25(2):22-24

(上接第124页)

- [2] 李晓明. 基于 SIFT 特征的遥感影像自动匹配 [D]. 北京: 北京理工大学机电工程学院, 2006
- [3] 甘哑莉. 频率域基于梯度预处理的互相关图像匹配方法 [D]. 长沙: 国防科技大学信息系统与管理学院, 2007
- [4] 许晓帆, 杜江. 面向景象匹配辅助导航的 SIFT 图像配准算法 [J]. *电子设计工程*, 2013, 21(18):139-141
- [5] 李彤斐, 杨马英. 足球机器人视觉目标识别的 PCA-SIFT 算法 [J]. *江南大学学报, 自然科学版*, 2013, 12(5):601-606
- [6] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features [C] // *International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece (September 1999). 1999:1150-1157

- [7] Lowe D G. Distinctive image features from scale invariant key points [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110
- [8] 王国美. SIFT 特征匹配算法研究 [D]. 贵阳: 贵州大学计算机学院, 2007
- [9] Ke Y, Sukthankar R. Pca-sift: a more distinctive representation for local image descriptors [C] // *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2004
- [10] Ledwich L, Williams S. Reduced SIFT Features for Image Retrieval and Indoor Localization [C] // *Australian Conference on Robotics and Automation*. Canberra, Australia, 2004
- [11] 叶波, 陆雪松, 张素, 等. 基于互信息图像匹配中的局部极值问题研究 [D]. 上海: 上海交通大学生物医学仪器研究所, 2007