

基于特征的宽基线立体匹配技术研究

李竹林^{1,2}, 张根耀^{1,2}

(1. 延安大学 计算机学院, 陕西 延安 716000;
2. 延安大学 软件研究与开发中心, 陕西 延安 716000)

摘要:在立体匹配技术中,宽基线匹配技术具有更广泛的应用领域。在宽基线条件下,由于摄像机视点范围的变大,使得同一空间目标在两视图上的方向和尺度都发生变化。同时,透视变形使得目标的形状也发生变化,所以需要选择具有仿射不变特性的局部特征实现立体匹配。文中对近年来的基于特征的宽基线立体匹配技术进行了归类总结,包括特征提取算法及算法分析、相似性度量方法以及误匹配的剔除算法等。最后指出了宽基线立体匹配算法迫切需要解决的问题。

关键词:宽基线;立体匹配;特征检测;误匹配剔除

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)05-0086-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.05.022

Research for Wide Baseline Stereo Matching Technology Based on Features

LI Zhu-lin^{1,2}, ZHANG Gen-yao^{1,2}

(1. Institute of Computer Science, Yan'an University, Yan'an 716000, China;
2. Study and Development Center for Software, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract:In stereo matching technology, wide baseline stereo matching technology has more wide application than small baseline. In the wide baseline, due to the change of camera view range, make the same space target in two views on the direction and scale are changed. At the same time, perspective deformation causes the change of target shape, so need to choose the local characteristics with affine invariant properties to realize stereo matching. In this paper, wide baseline stereo matching technology based on features was summarized and classified, including the features extraction algorithm and analysis, similarity measures method and error matching elimination method etc. Finally, point out the problems need to solve urgently in wide baseline stereo matching algorithm.

Key words:wide baseline; stereo matching; features detector; error matching elimination

0 引言

双目立体视觉是基于视差原理,由多幅图像获取物体三维几何信息的方法。影像对一般是由双摄像机从不同的角度同时获取的。根据两摄像机光心间的距离长短划分,立体匹配技术可分为短基线立体匹配技术和宽基线立体匹配技术。短基线立体匹配完全遵循极线几何约束,因此对应点的估计相对容易,遮挡的区域较小。但是由于其基于小三角形相似原理,所以大深度信息不能准确估计,更何况在实际应用中,需要从大范围视点拍摄目标,短基线的立体技术有时不能满

足实际需要。

在宽基线的条件下,由于摄像机的旋转和较大距离的平移,使得目标影像形状会产生变化。另外,由于摄像机拍摄时空的不同,可能造成光照、形状变化等。因此不能直接使用基于窗口灰度的影像相关匹配算法进行影像匹配,需选择具有仿射不变特性的局部特征及恰当的局部区域来实现立体匹配。从匹配基元角度划分,宽基线立体匹配主要有三类:基于点的立体匹配法、基于线的立体匹配法和基于区域的立体匹配法。

1 特征检测

1.1 兴趣点检测器

从文献[1,2]中可以看到,仿射不变检测器往往先提取影像的兴趣点来简化算法。提取点特征的算子称为兴趣算子。经典兴趣点检测算子有 SUSAN 算子、Moravec 算子、Forstner 算子、Harris 算子等^[3,4]。

收稿日期:2012-08-02;修回日期:2012-11-05

基金项目:陕西省自然科学基金(2009JM8004-7);陕西省高水平大学建设专项资金资助项目(2012SXTS06)

作者简介:李竹林(1972-),女,副教授,博士,CCF 会员,研究方向为数字图像处理与立体匹配技术;张根耀,教授,博士,研究方向为数字图像处理。

1)Harris 算子。

由于 Harris 算子计算简单,稳定性好,且不受阈值影响,所以好多文献都采用 Harris 算子提取兴趣点。Harris 算子描述步骤如下:

① 计算影像中每一个像素 (x,y) 的自相关矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中, $A = \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 \otimes w, B = \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 \otimes w, C = \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y}\right) \otimes w$ 。 \otimes 是卷积符号, w 是高斯窗。

② 构造角点的响应函数。对每一个像素点 (x,y) ,通过计算角点测度 $C(x,y)$ 来构造:

$$C(x,y) = \det(M) - k(\text{trace}(M))^2 \tag{2}$$

其中, $\det(M) = \lambda_1 \lambda_2 = AB - C^2, \text{trace}(M) = \lambda_1 + \lambda_2 = A + B, k$ 是常量。

③ 将 $C(x,y)$ 的值与给定的阈值进行比较,把结果大于阈值的像素点作标记(阈值的大小可以根据角点的个数决定)。

2)SUSAN 算子。

由于 SUSAN 算法简单,具有较高的算法效率,而且不需要微分计算,抗噪声能力强,同时,SUSAN 算子既可提取图像的边缘,又可提取图像的角点,因此 SUSAN 算子也被经常应用。若面积近似为模板区域的一半,则为边缘点;若大约为模板面积的 1/4 或 1/6,则为角点。

图像中某一点 USAN 区的大小可用式(3)表示:

$$n(r_0) = \sum_{r \in C(r_0)} C(r_0, r) \tag{3}$$

其中, $C(r_0)$ 是以 r_0 为圆心的圆形模板, $C(r_0, r)$ 是模板内属于 USAN 区的像素的判别函数,定义如下:

$$C(r_0, r) = e^{-\left(\frac{I(r_0) - I(r)}{T}\right)^2} \tag{4}$$

式中, t 为亮度差门限; $I(*)$ 代表 $*$ 处像素的亮度值。基于特征点的立体匹配法,实质上是利用点及点的邻域信息的匹配方法。

Harris 算子与 SUSAN 算子的比较见表 1。

1.2 直线段检测器

基于线段匹配是一项挑战性工作。因为:首先不能直接利用极线几何作为全局几何约束条件;其次线段与线段之间没有较为显著的区别特征,且线段的另一端点定位往往是不准确的。但由于线段包含着场景的几何和拓扑信息,也被作为立体匹配的特征^[5~7]。

最常用的直线提取算法有 Hough 算子、Canny 算子以及 Radon 变换等方法。文献[7]提出了一种层次结构化直线提取方法,其基本思想是通过连接局部直

线边缘逐渐构造较长的直线线段,优点是可获得较高的直线定位精度。文献[5]提出了一种基于 Canny 算子和 Harris 特征的梯度方向与梯度幅值特性的直线提取算法,其优点是算法的速度较快。文献[6]提出了基于角点的直线提取方法,可以解决直线段定位难的问题。基于直线段特征的立体匹配,实质上是以提取的直线段为基,然后构造立体匹配基元,如矩形、椭圆等。然后利用匹配基元的颜色、纹理、形状等信息建立图像对的立体匹配模型,解决对应问题。

表 1 Harris 算子与 SUSAN 算子的性能比较

算子名称	检测率	定位	抗噪	速度	重复率
Harris	好	交叉点提取效果好,其它一般	一般	差	若对图像实施各向同性梯度计算,则对仿射变换效果较好;对尺度变换效果一般
SUSAN	好	对模糊的图像效果差,其它的效果较好	优	好	适合于尺度变换图像;对仿射变换图像效果较差

1.3 仿射不变区域检测器

在立体匹配中所构造的区域(region)仅指一组像素点的集合,是一个简单的连通区域。在仿射变换下,它是一个协变区域。

(1)基于角点的仿射不变区域检测。

文献[8]用 Harris 算子提取角点,然后用二次矩阵的特征值测量点邻域的仿射区域,最后迭代生成邻域椭圆区域。该方法不仅考虑了仿射不变性,同时也考虑了尺度变化,对变视点和遮挡具有很高的适应性。其算法复杂度为 $O(n) + O(m + k)p$,其中 n 为图像像素的数目, p 为初始角点数目, m 为选取尺度的数目, k 是形状生成迭代的次数。文献[9]提出了基于边缘的区域检测方法。基本思想是从角点 p 的两个边缘方向引两条线段,构造一个平行四边形仿射不变区域。在此基础上,利用二次矩函数定义了形状函数,形成了更稳定的极值区域。算法复杂度为 $O(n) + O(pd)$, n 为图像像素的数目, p 为角点的个数, d 为一个角点邻近边缘的平均数目。

(2)基于亮度极值的区域检测。

T. Tuytelaars 和 L. Van Gool 提出了基于边缘的区域检测器和基于亮度极值的区域检测器^[10],基本思想是从局部灰度极值点开始,以某一半径沿着散射的光线形成一个区域(可用椭圆)。该检测器不适合对光照条件改变大的影像,算法复杂度为 $O(n) + O(p)$,其中 p 为区域极值点的个数, n 为图像像素的数目。文献[11]提出了一种改进的基于亮度极值的区域检测算法。改进的思想是将区域的灰度实施指数变换,突显灰度变化,使得灰度值接近的区域更容易被检测到。

J. Matas 等^[12]提出了一种最大稳定极值区域(MSER)的宽基线匹配算法。“极值”是指在最大稳定的极值区域内的所有像素的亮度比区域边界外的像素高(高亮度区),或者比区域边界外像素亮度值低(低亮度区);“最大稳定”描述了阈值选取过程的最优化。该极值区域具有几何仿射变换或亮度仿射变换不变的性质,适用于有尺度变化、遮挡、局部各向异性等的场景。同时,MSER 生成算法的效率非常高,几乎是线性的,其算法复杂度为 $O(n) + O(n(\log \text{cogn}))$ 在构造不变区域时,好多文献选择了椭圆或长方形,对椭圆形状描述最合适的方法便是惯量椭圆。在宽基线立体视觉中,要求提取的匹配基元仅具有 RST 不变性是不够的,必须具有仿射不变性。因此二次矩函数得到了应用,经常用于特征检测或描述图像的局部区域结构。它描述了角点邻域的梯度分布情况:

$$\mathbf{M} = \mu(X, \sigma_l, \sigma_d) = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \end{bmatrix} \\ = \sigma_d^2 g(\sigma_l) * \begin{bmatrix} I_x^2(X, \sigma_d) & I_x I_y(X, \sigma_d) \\ I_x I_y(X, \sigma_d) & I_y^2(X, \sigma_d) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, σ_d 为高斯核尺度(核窗宽)大小, σ_l 为高斯平滑窗的尺度(高斯平滑窗宽)。

2 相似性度量

立体匹配在确立相似性测度时,根据所选匹配基元的不同,所采用的相似性测度方式也有所不同。一般地,先计算出不变特征的不变属性量,构成相似性度量向量,如 $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_n\}$ (φ_i 为匹配基元的第 i 个不变属性描述量),然后用距离法或相关测量等方法度量匹配基元间的相似程度。

2.1 常用的距离法

经常用来测量相似性程度的距离法有 Mahalanobis 距离、欧氏距离以及 Hausdorff 距离。

① Mahalanobis 距离:表示数据的协方差距离,是两个或多个相关变量所定义空间中两点间距离,它考虑了基准图像局部邻近区域的相关性,但也排除了各特征间的相关性干扰,所以在宽基线立体匹配中用得较多^[9,12]。矢量 \mathbf{a}, \mathbf{b} 的 Mahalanobis 距离表达式如下:

$$d_m(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sqrt{(\mathbf{b} - \mathbf{a})^T \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{b} - \mathbf{a})} \quad (6)$$

其中 \mathbf{A} 是基准图像区域的协方差矩阵。协方差矩阵能考虑到噪声、光照亮度的变化以及所提取兴趣点的不精确性。

② Hausdorff 距离:是一种极大极小距离,主要用于测量两个点集的匹配程度^[13]。给定两个有限点集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$, 则 A, B 间的 Hausdorff 距离 $H(A, B)$ 定义为:

$$H(A, B) = \max \{h(A, B), h(B, A)\} \quad (7)$$

其中 $h(A, B)$ 和 $h(B, A)$ 分别为 $A \rightarrow B$ 与 $B \rightarrow A$ 的有向 Hausdorff 距离,定义为:

$$h(A, B) = \max_{a \in A} [\min_{b \in B} (\|a - b\|)] \\ h(B, A) = \max_{b \in B} [\min_{a \in A} (\|b - a\|)] \quad (8)$$

其中符号 $\|\cdot\|$ 为定义在点集 A 和 B 上的某种距离范数,比如欧氏距离。

2.2 相关测量函数

常用的相关函数测度有:差平方和(SSD)测度,差绝对值和(SAD)测度,标准化互相关(NCC)测度以及协方差函数测度等。

① 差平方和测度:差平方和的计算公式是:

$$\rho(i, j) = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n (I(u, v) - \bar{I}(u+i, v+j))^2 \quad (9)$$

归一化差平方和的计算公式是:

$$\rho(i, j) = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n \left(\frac{I(u, v) - \bar{I}}{\sqrt{\sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n (I(u, v) - \bar{I})^2}} - \frac{\bar{I}(u+i, v+j) - \bar{I}}{\sqrt{\sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n (\bar{I}(u+i, v+j) - \bar{I})^2}} \right)^2 \quad (10)$$

式中, $0 \leq i \leq c, 0 \leq j \leq d, m$ 和 n 分别是匹配窗口的宽度和高度, $c+m$ 和 $d+n$ 是搜索区域的宽度和高度,

$$\bar{I} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n I(u, v), \bar{I}' = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n I'(u, v)。$$

② 差绝对值和方法:差绝对值和的计算公式是:

$$\rho(i, j) = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n |I(u, v) - I'(u+i, v+j)|, 0 \leq i \leq c, 0 \leq j \leq d \quad (11)$$

式中的参数意义同表达式(10)。显然,使用本方法的目的就是获得计算的高效率。

3 剔除误匹配算法

由于噪声、光照变化、遮挡和透视畸变等因素的影响,以及匹配基元提取、特征描述等计算中产生的误差,空间中同一点投影到两个摄像机平面上形成的对应点的特性可能不同,对一幅图像中可能存在好几个相似的候选匹配,也可能不存在它的对应匹配,因此,仅根据相似性度量不能解决对应问题。所以需要另外的约束条件作为辅助判据,以便得到唯一的准确匹配。常用的约束有^[14]:极线约束、唯一性约束、视差连续性约束、顺序一致性约束等。其中极线约束用的最多。然而在宽基线立体匹配中,虚假匹配点对相对较多,通过匹配点获得的极线可能包含较大误差,因此无法正确判定假匹配点。另外,反复计算基本矩阵需要消耗

过多的时间。

文献[10]提出了拓扑过滤法,这是根据物体的拓扑性质在影像面上任意伸展、旋转时都具有不变性的原理提出的,比如同侧原理。采用拓扑约束剔除误匹配的优点是:第一,避免计算基础矩阵,也就是不需要利用极线几何约束;第二,该方法对特征的局部精度不敏感。拓扑过滤法可以采用边约束条件,设影像 I_1 中的三个区域用 (R_1^1, R_1^2, R_1^3) 表示,在影像 I_2 中对应的区域为 (R_2^1, R_2^2, R_2^3) 。记 c_v^i 为区域 R_v^i 的中心,函数:

$$\text{side}(R_v^1, R_v^2, R_v^3) = \text{sign}((c_v^2 \times c_v^3) \cdot c_v^1) \quad (12)$$

如果 c_v^1 在从 c_v^2 到 c_v^3 的连线 $c_v^2 \times c_v^3$ 的右侧,则其值为 -1 ;否则,在左侧,值为 1 ,即同侧原理。

满足边约束条件的方程:

$$\text{side}(R_1^1, R_1^2, R_1^3) = \text{side}(R_2^1, R_2^2, R_2^3) \quad (13)$$

执行匹配算法后,大多数的误匹配点被剔除了。所以,可以利用极线几何约束进一步剔除假匹配点以提高精度。也可以选取8点算法的结果作为迭代算法的初始值,利用RANSAC方法进一步剔除误匹配点,优化求解基础矩阵,估计影像的极线几何。

4 不变性分析

影像拍摄时的时空对立体匹配算法都有影响,下面介绍几种常见的情况^[15]。

(1)视点不变性(viewpoint invariance):视点的变化并不是没有限制的,现有的文献表明,一般情况下,变化范围不能大于60度。如果大于这个角度,就不能保证最低的匹配数量,比如8点算法需要 $n = 8$,SANSAC算法需要 $n = 7$ 。

(2)尺度不变性(invariance to scale changes):尺度变化对立体匹配的影响比视点变化的影响小(weakest point)。随着尺度增大,匹配数量在减小。不过,提取不变区域能够解决尺度变化的范围是 $2/3$ 至 $3/2$ 。

(3)光照不变性(illumination invariance):光照对影像的影响比视点和尺度要大,光照条件不同,正确匹配的数量和均衡(symmetric)数量都是不相同的。基于亮度极值的匹配检测器不适合光照变化太大的情况。

(4)遮挡影响(occlusion effect):随着视点范围的增大,遮挡情况频率增高。检测区域越小越有利于解决遮挡问题。针对这种情况,检测区域尽可能的小,比如基于Harris角点检测器,其邻域范围取的不宜过大。

5 结束语

文中对近年来的基于特征的宽基线立体匹配算法进行了归类总结,主要包括常用的特征检测方法、相似

性度量方法、立体匹配算法以及常用的几种不变性分析。可以看出,角点检测器比较成熟,区域检测和直线检测已取得很大的成绩。但目前的立体匹配算法大多是针对某一特定应用设计的,算法的适应性受到很大的限制。另外,算法的准确性和实时性很难同时得到兼顾。因此如何提高立体匹配算法的准确性、实时性及适应性是一项艰巨的任务。

参考文献:

- [1] 毛雁明,杨慧玲.一种新的立体匹配算法[J].计算机技术与发展,2011,21(3):105-108.
- [2] 陈冰,赵亦工,李欣.一种新的宽基线图像匹配方法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2011,38(2):116-123.
- [3] Harris/Plessey Operator[EB/OL]. 2012. <http://kiwi.cs.dal.ca/~dparks/CornerDetection/mainHarris.htm>.
- [4] 章毓晋.图像工程(中册)图像分析[M].第2版.北京:清华大学出版社,2005.
- [5] McKinnon B P. Point, Line Segment, and Region-based Stereo Matching for Mobile Robotics[D]. Manitoba: University of Manitoba, 2009.
- [6] 李竹林,刘芬,赵宗涛.一种基于角点的直线段特征提取新方法[J].微电子学与计算机,2011,28(6):153-155.
- [7] 王宇宙.计算机视觉三维重建理论与应用[D].西安:西北大学,2004.
- [8] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors[J]. International Journal on Computer Vision, 2004,60(1):63-86.
- [9] Tuytelaars T, van Gool L. Matching Widely Separated Views Based on Affine Invariant Regions[J]. International Journal on Computer Vision, 2004,59(1):61-85.
- [10] Tuytelaars T, van Gool L. Wide Baseline Stereo Matching Based on Local, Affinely Invariant Regions[C]//Proceedings of the 11th British Machine Vision Conference. Bristol, UK: [s. n.], 2000.
- [11] 李竹林,赵宗涛,刘彦保,等.基于稳定极值区域的宽基线双目立体匹配算法[J].计算机工程,2007,33(22):212-214.
- [12] Matas J, Chum O, Urban M, et al. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions[J]. Image and Vision Computing, 2004,22(10):761-767.
- [13] 朱伟冬,胡剑凌.基于马氏距离的稀疏表示分类算法[J].计算机技术与发展,2011,21(11):27-30.
- [14] Koschan A. What is New in Computational Stereo Since 1989: A Survey on Current Stereo Papers[R]. Berlin: Technical Univ. of Berlin, 1993.
- [15] Schmid C, Mohr R, Bauck C. Evaluation of Interest Point Detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2000,37(2):151-172.