

基于自适应迭代松弛的立体点对匹配鲁棒算法

张辉¹⁾ 张丽艳¹⁾ 陈鉴富²⁾ 郑建冬¹⁾

¹⁾(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016) ²⁾(江苏技术师范学院计算机科学与工程学院, 常州 213015)

摘要 图像匹配是立体视觉的重要部分,也是双目立体测量系统必须解决和最难解决的问题。为了对图像进行鲁棒性匹配,提出了一种基于自适应迭代松弛的立体点对匹配方法。该方法首先利用视差梯度约束来构造匹配支持度函数;然后通过松弛方法优化该函数来完成立体点对的匹配。由于利用了动态更新松弛匹配过程参数的方法,因此有效地降低了误匹配率和误剔除率。在此基础上还提出了对松弛过程结束后的匹配结果,再次使用视差梯度约束来进行进一步检验的策略,该策略能够以一定幅度的误剔除率提升为代价,大幅度降低了误匹配率,从而可满足许多要求严格限制误匹配率的应用。实验结果证明,该新算法是有效的,并已经用于一个双目立体测量原型系统当中。

关键词 立体匹配 极线约束 松弛法 双目立体测量 3维重建

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)07-1378-08

A Robust Stereo Matching Algorithm Based on Adaptive Relaxation

ZHANG Hui¹⁾, ZHANG Li-yan¹⁾, CHEN Jian-fu²⁾, ZHENG Jian-dong¹⁾

¹⁾(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

²⁾(School of Computer Science and Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213015)

Abstract Establishing stereo image correspondence is a vital and the most difficult problem for binocular stereo measure system. An adaptive relaxation algorithm for dealing with feature point stereo matching is proposed. In this algorithm, a correspondence support function is constructed based on disparity gradient limit, and the matching can be achieved through a relaxation optimizing procedure. A new scheme for dynamically updating the relaxation parameter during the matching procedure is introduced, by which the FAR (false acceptance rate) & FRR (false rejection rate) can be significantly reduced compared with other algorithms with parameters being fixed. After the relaxation procedure, the disparity gradient limit is re-imposed to further filter out false correspondences. It has been validated by experiments that this strategy can efficiently reduce FAR at a modest cost of increase in FRR, which meets the requirement of restrict FAR limitation in many industrial applications. The algorithm has been used in a binocular stereo measurement prototype system, and its robustness and effectiveness is affirmed by subsequent stereo reconstruction.

Keywords stereo correspondence, epipolar constraint, relaxation, binocular stereo vision, 3D reconstruction

1 引言

立体视觉就是由不同角度拍摄的两幅或多幅图像来获取物体的3维几何信息,图像间的立体点对

匹配是其中最重要也是最困难的一步。立体匹配的实质就是先给定一幅图像中的一点,然后寻找另一幅图像中的对应点,这两个图像点为空间中同一点分别在两幅图像上的投影。目前,立体点对的匹配(也称为同名点对匹配)算法概括起来可以分为基

基金项目:国家自然科学基金项目(50475041);江苏省自然科学基金项目(BK2006192)

收稿日期:2007-06-29;改回日期:2008-04-07

第一作者简介:张辉(1981~),男。现为南京航空航天大学机电学院工学博士研究生。研究方向为计算机视觉、逆向工程、非接触3维测量、CAD/CAM。E-mail: zimmerman532@yahoo.com

于区域、基于相位及基于特征的匹配方法^[1]3类。其中基于区域的匹配算法是利用待匹配图像点的周围局部区域的亮度(纹理)互相关的大小来进行匹配,其可以得到高密度的视差图,这种方法适合于图像有较丰富的纹理信息,即不同窗口之间的灰度分布具有较强的可区分性的情况;基于相位的匹配方法,虽然也可以得到致密的视差图,但是一般需要在物体表面主动投射结构化光线,文献[2]给出了关于两幅图像间高密度立体点对匹配的各种方法的详细综述和分析比较;而基于特征的立体匹配算法则是首先提取点、线或边缘等特征,然后再对特征进行匹配。一般而言,由于特征对噪声不太敏感,所以可以得到比较精确稳定的匹配结果,同时由于通常待匹配的特征比较少,因此运行速度一般比较快。对于离散特征点的匹配,主要有全局优化法^[3-4]、特征描述子直接匹配法^[5-6]、迭代松弛法^[7-10]等。其中全局优化法是通过建立全局能量函数,并使之取得最小来得到优化的匹配结果。由于这类方法力图搜索全局最优解,因此一般比较费时,而且往往对能量函数有一定限制,例如要求能量函数具有连续的二阶导数等;特征描述子直接匹配方法的典型代表是SIFT(scale-invariant feature transform)^[5]及其基础上的各种改进方法^[6]。该类方法将着眼点放在如何稳定地提取特征点,并根据局部亮度(纹理)信息,首先计算得到某一图像点处的有高区分能力的特征矢量(SIFT方法具体采用了一个128维的特征矢量描述子),然后根据不同图像上两个特征点的特征矢量间的Hausdorff距离的大小来判定它们是否是对应特征点;迭代松弛方法是一种近似最优的方法,这类方法根据不同的应用,首先获得一个初始的匹配集,其中含有错误的匹配,然后根据匹配约束条件建立匹配点对的代价函数(或支持度函数),并根据一定的更新策略不断剔除错误的匹配。该方法不仅对初始匹配以及支持度函数没有特别的要求,而且适用范围广。其中Pollard等人基于生理学研究的结果提出的PMF(Pollard-Mayhew-Frisby)算法^[7]以“形状连续性”作为整体匹配准则,利用“视差梯度”的概念来描述形状连续性,同时使用松弛法处理匹配中的错误,其对后续的立体匹配研究产生了重要影响。Zhang和Galo等人在求未知各摄像机姿态参数情况下的匹配时,同样使用了松弛法来处理误匹配问题^[8-9],其中文献[8]中改进的更新策略能够取得更好的匹配效果。文献[10]与文献[8]类似,

主要是在代价函数中考虑了邻近候选匹配的尺度、旋转,以及局部区域匹配和邻近点的协调性支持。文献[11]则将迭代松弛法应用于基于区域的匹配方法中。但以上迭代松弛算法中都没有考虑松弛过程结束后的匹配结果的正确性检验问题。

本文研究工作的背景是基于双目立体视觉方法的3维坐标测量。为了精确获得定位点的3维坐标,可在物体表面粘贴黑色背景白色前景的圆形标记,标记中心为目标特征点。这些精确重建出的3维标记点既可以直接用于模型重建,也可以作为多视角测量的点云数据拼合的定位基准。由于每个标记基本没有视觉上的差异,因此,要建立它们在不同图像之间的对应关系,只能主要利用唯一性和几何相容性(连续性)约束,而没有特征点局部窗口的亮度差异等其他特征描述可资利用。这使得SIFT一类以根据局部亮度信息计算得到的特征矢量为特征点身份判别依据的方法以及以局部区域互相关程度为依据的特征点对匹配方法^[12]无法适用于点的匹配。在比较几类相关算法的基础上,结合本文面临的3维坐标定位与曲面重建问题,本文着重讨论了离散特征点的迭代松弛法,并将侧重点放在更新策略的对比分析,及松弛迭代后的进一步误匹配检验。

本文的贡献主要有以下两个方面:一是提出了一种自适应确定松弛过程中更新策略参数的方法,即通过动态参数更新,有效地降低了误匹配率和误剔除率;二是提出了对于松弛过程结束后的匹配结果再次使用视差梯度约束进行进一步检验的策略,实验证明,该策略能够以一定幅度的误剔除率提升为代价,大幅度降低误匹配率,以满足许多要求严格限制误匹配率的应用。

2 初匹配的获取

如前所述,由于本文感兴趣的特征点是黑色背景白色前景的圆形标记,因此,可以通过对由圆点成像出的椭圆进行识别,并通过对椭圆中心进行亚像素级的精确定位来稳定地获取高精度特征点的图像坐标^[13]。但需要指出的是,本文方法并不局限于这种特征点,对于任何其他方法获得的特征点,都可以应用本文方法进行立体点对的匹配。

由于特征点自身因素、特征提取算法、摄像机镜头畸变、视线遮挡、场景照明等都会对特征识别产生

影响,从而使两幅图像中的特征点集不能完全匹配。尽管本文不研究具体的特征点提取算法,但是由于识别出的特征点的数量和识别出的特征点中的同名匹配点数量的多少对立体匹配算法有直接影响,为此本文后面的匹配算法及实验会对此做出分析。

本文假定立体相机对是经过标定的,因此提取出待匹配的两幅图像中的特征点集后,就可以利用极线约束来得到候选匹配点对。

如图 1 所示,设左摄像机坐标系的原点为 O_L ,右摄像机坐标系的原点为 O_R , p_L 和 p_R 分别为空间中的点 P 在左右摄像机像素平面上的投影像素坐标,则 p_L 和 p_R 满足如下关系:

$$p_R^T F p_L = 0 \quad (1)$$

其中, F 为基础矩阵,有 $F = A_R^{-T} E A_L^{-1}$, A_L 、 A_R 分别为左右摄像机的内参数矩阵, E 为本质矩阵。

式(1)描述了左右图像上的对应点的极线约束关系。在实际计算过程中,若图像点离相应极线的欧氏距离小于一个阈值 ε_d ,即

$$\frac{|p_R^T F p_L|}{\|F p_L\|} < \varepsilon_d \quad (2)$$

则本文就认为 p_L 和 p_R 是一个候选匹配点对。

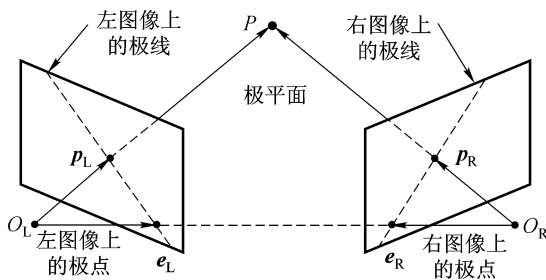


图 1 极线约束

Fig. 1 Epipolar Constraint

这样选取匹配点对之后,就可以得到初始的匹配点对集合。由于特征点的定位误差、特征点分布、系统标定误差等原因,致使经过极线约束产生的初始匹配点对中会有很多的误匹配存在,特别是当图像中的特征点比较多的情况下,一幅图像上的某个特征点可能对应另一幅图像上的多个特征点,即会产生一对多的匹配,因此,去除误匹配是接下来算法的关键。

3 剔除误匹配

本文采用松弛算法的思想,即允许匹配点对集合中的元素可通过迭代自我解散、自我重新配对来

使得“唯一性”和“连续性”条件得到最大满足,从而排除误匹配。“唯一性”约束是指一幅图像中的某个特征点,在另一幅图像中的对应特征点最多只有一个。“连续性”约束可以理解为正确的匹配点对的邻域周围通常存在着较多的其他正确的匹配点对,或者可以表述为,候选的匹配点对若为正确的匹配点对,则其周围就存在着较多的候选匹配点对;而候选匹配点对若为错误的匹配点对,则其周围应该只会有较少的候选匹配点对。

3.1 匹配的支持度

首先定义候选匹配点对的支持度。考虑一个候选匹配点对 (p_i, \tilde{p}_j) ,其中 p_i 是在第 1 幅图像上的一个像素点, \tilde{p}_j 是在第 2 幅图像上的对应点。令 $N(p_i)$ 和 $N(\tilde{p}_j)$ 分别为点 p_i 和 \tilde{p}_j 的半径为 R 的范围内的邻域。如果候选匹配点对 (p_i, \tilde{p}_j) 是一个正确的匹配点对,那么可以期望在 p_i 和 \tilde{p}_j 的邻域 $N(p_i)$ 和 $N(\tilde{p}_j)$ 内看到很多的支持匹配点对 (q_k, \tilde{q}_l) ;反之,如果 (p_i, \tilde{p}_j) 是一个误匹配点对,那么就认为只会看到很少的支持匹配点对,甚至没有。为此匹配支持度定义为^[7]

$$SM(p_i, \tilde{p}_j) = \sum_{q_k \in N(p_i)} \left[\max_{\tilde{q}_l \in N(\tilde{p}_j)} \frac{\delta(p_i, \tilde{p}_j, q_k, \tilde{q}_l)}{1 + \text{dis}(p_i, \tilde{p}_j, q_k, \tilde{q}_l)} \right] \quad (3)$$

其中,

$$\delta(p_i, \tilde{p}_j, q_k, \tilde{q}_l) = \begin{cases} e^{-r/\varepsilon_r} & \text{如果 } r < \varepsilon_r \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{dis}(p_i, \tilde{p}_j, q_k, \tilde{q}_l) = \frac{d(p_i, q_k) + d(\tilde{p}_j, \tilde{q}_l)}{2} \quad (5)$$

$d(p, q)$ 表示点 p 和点 q 之间的欧氏距离, ε_r 是视差梯度约束的阈值, r 是候选图像对应点的相对视差距离,即

$$r = \frac{|d(p_i, q_k) - d(\tilde{p}_j, \tilde{q}_l)|}{\text{dis}(p_i, \tilde{p}_j, q_k, \tilde{q}_l)} \quad (6)$$

式(3)计算了候选匹配点对 (p_i, \tilde{p}_j) 的有效邻域 $N(p_i)$ 和 $N(\tilde{p}_j)$ 内符合视差约束的其他候选匹配点对的支持度之和。其中的 \max 算子是考虑到如果左图像中的一个匹配点 q_k 在右图像中有不止一个候选匹配点 \tilde{q}_l 存在,则只取支持度最大的那个,以免重复计算;式中使用 e^{-r/ε_r} 对视差进行指数加权;分母中的 1 是为了防止分母为 0。

上面得到的匹配支持度比较好地衡量了邻域中的候选匹配点对该候选匹配点对的支持度,但是却

不是对称的,亦即左右图像中的特征点的地位是不一致的,在调换了点 p_i 和点 \tilde{p}_j 在式(3)中的位置之后,得到的支持度有可能会发生变化。图2表示了发生不对称时候的情况。

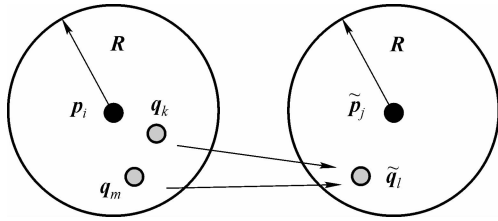


图2 匹配支持度不对称的情况

Fig.2 Dissymmetry of matching support

针对这种情况,为了满足公式定义的对称性,本文在计算式(3)中的求和之前,先判断是否有多个点 $q \in N(p_i)$ 满足条件,如果是,则在求和过程中,只考虑值最大的一点,以便使支持度函数满足对称性。

3.2 自适应松弛过程

所有候选匹配点对的支持度之和为能量函数,即

$$E = \sum_{(p_i, \tilde{p}_j)} SM(p_i, \tilde{p}_j) \quad (7)$$

去除误匹配的过程可以看作是减少这个能量函数的过程。整个松弛过程可以简单表述如下:

- (1) 根据极线约束来求得所有可能的候选匹配点对;
- (2) 根据式(3),计算所有候选匹配点对的匹配支持度;
- (3) 根据唯一性约束,选用一定的更新策略来更新候选匹配集;
- (4) 如果候选匹配点对集中的点都是一对一匹配了,则迭代结束,否则返回步骤2继续迭代。

步骤3中的更新策略主要有“赢者通吃(winner-take-all, WTA)”、“输者全无(loser-take-nothing, LTN)”和“部分赢者通吃(some-winners-take-all, SWTA)”。WTA更新策略是指每次迭代时,候选匹配点对只要对于左右像素点来说,支持度都是最高的,则认为是正确的匹配点对;根据唯一性约束,与该候选匹配点对的左像素特征点或右像素特征点对应的其他候选匹配点对都认为是错误的匹配点对,可将其从匹配点对集中去除。这种策略迭代很快,是一种有广泛影响的优化更新策略,在文献[2]综述列举的30多篇典型文献中,有近一半采用

了WTA更新策略方法进行匹配选优。但是WTA更新策略很可能得到不正确的匹配结果,本文第5节将进一步对此做出实验比较与分析。“输者全无”策略与之相反,候选匹配点对只要对于左右像素点来说其中支持度都是最小的,将会被去除,但可以看出,这个方法很慢。SWTA更新策略^[8,10]对WTA更新策略进行了改进,使匹配更趋稳定,但是该更新策略中的参数需要人为设定,不能根据不同的待匹配图像自适应地确定最佳参数。文献[12]还提出了一个“赢者更新(winner-update)”策略,与WTA和SWTA更新策略虽有一定的联系,但该方法需要对图像进行预处理,先得到多个细节层次的图像,然后基于窗口互相关通过计算出匹配点对的邻近窗口互相关的下限来加速优选过程。由于要用到窗口互相关,因此根据前面的说明,其不适用于本文研究的只有几何相容性约束的问题。

本文在已有更新策略的基础上,提出了“自适应部分赢者通吃(adaptive-some-winners-take-all, ASWTA)”的更新策略,并首先称候选匹配集中对于左右像素点来说,支持度都是最高的那些候选匹配点对为正确匹配点对,可用集合 $M^p = \{(p_i^p, \tilde{p}_j^p)\}$ 表示。建立两个表 L_{SM} 和 U_{SM} 。其中,表 L_{SM} 是将集合 M^p (上角P代表potential,下同)中的元素按照支持度从大到小的顺序进行了排序;表 U_{SM} 用于存放每一个正确匹配 (p_i^p, \tilde{p}_j^p) 的区分度 $U_1^{[8]}$:

$$U_p = 1 - SM_2^p / SM_1^p \quad (8)$$

其中, SM_1^p 就是当前正确匹配的支持度:

$$SM_1^p = SM(p_i^p, \tilde{p}_j^p) \quad (9)$$

SM_2^p 是对应于当前正确匹配的次最佳匹配的支持度,即

$$SM_2^p = \max_{(p_i^p, \tilde{p}_j^p) \in A} SM(p_i^p, \tilde{p}_j^p) \quad (10)$$

其中

$$A = \{(p_i^p, \tilde{p}_j^p)\} \cup \{(p_i, \tilde{p}_j^p) / (p_i^p, \tilde{p}_j^p)\} \quad (11)$$

即对于当前正确匹配 (p_i^p, \tilde{p}_j^p) 而言,除其本身以外,次最佳匹配是指由左图像点 p_i^p 与右图像点组成的所有候选匹配点对集以及由右图像点 \tilde{p}_j^p 与左图像点组成的所有候选匹配点对集的并集。表 U_{SM} 同样也按照从大到小顺序进行了排序。从表 L_{SM} 和 U_{SM} 中分别选择前 α 比例的元素,先将它们的交集作为正确的匹配点对集,然后再把与该候选匹配点

对集的左像素或右像素对应的其他候选匹配点对都认为是错误的匹配点对集,将其从匹配点对集中去除。文献[8]中仅简单地指出,为了保证迭代过程收敛,需要 $\alpha > 0.5$,并推荐使用 $\alpha = 0.6$ 。

在实际实验过程中发现,在很多情况下,某个 α 值对某些图像点对的匹配比较合适,而对其他一些图像点对则需选取另外一个 α 值方能取得比较好的匹配结果。为了适应不同图像特征点的匹配,本文提出的“自适应部分赢者通吃”策略就是在每一次迭代中通过动态前向来预估计 α 的取值,即

$$\alpha_m = 1 - n_m/n \quad (12)$$

其中, n 为提取出来的像素特征点的总个数, n_m 是迭代 m 次状态下,对应多个候选匹配点对的特征点的个数。式(12)是基于如下考虑:当对于候选匹配点对中一对多的对应比较多时,则容易陷于某个错误的匹配结果, α 的取值应较小;而当一对多的对应比较少时,则认为得到错误匹配结果的概率相对较小,可以更新较多的准匹配点对。为了保证迭代过程收敛,如果发生一次迭代中没有可以更新的准正确匹配点对,则取表 L_{SM} 中第 1 个准正确匹配点对进行更新。这种迭代过程中动态更新 α 值的方法,对不同图像和特征点分布具有很强的适应性,可以有效地降低误匹配率和误剔除率。第 5 节的实验也验证了 ASWTA 更新策略的优势。

4 匹配检验

从第 3 节迭代松弛方法的分析中可以看出,松弛过程去除只是一对多的情况。当整个匹配点集都达到一对一匹配时,松弛过程即结束。但是,经过松弛过程之后的一对一匹配仍然可能存在错误匹配,即有些不应该被匹配的点对被误匹配了。造成这种情况的原因主要是由于一幅图像中的某些特征点在另一幅图像中不可见,或其同名像点没有被识别出来,而另外一个碰巧在相应极线上的特征点却被误认为是匹配点所致。由于其不违反一对一约束,所以这样的误匹配不能通过松弛过程排除。

为了衡量左右图像被识别出的特征点集中能够匹配的同名点对的多少,本文定义干扰率为:

$$\beta = \frac{|F \setminus M|}{|F|} \quad (13)$$

其中, F 是左右图像上被识别出的所有特征点的集

合, M 表示两幅图像上互有匹配点的那些特征点的集合,这里 $| \cdot |$ 表示集合中所含元素的个数。同时,定义误匹配率(false acceptance rate, FAR)和误剔除率(false rejection rate, FRR)分别为

$$FAR = \frac{|\tilde{M} \setminus M|}{|M|} \quad (14)$$

$$FRR = \frac{|M \setminus \tilde{M}|}{|M|} \quad (15)$$

其中, \tilde{M} 表示两幅图像上由匹配算法实际找到了匹配点的那些特征点的集合。

在基于迭代松弛方法的研究报道中大多都是以松弛过程结束后的匹配结果作为特征点立体匹配的最终结果。从本文第 5 节的实验中可以发现,当干扰率达到 50% 时,这些算法都会有 10% ~ 20% 的错误匹配率,本文提出的自适应“部分赢者通吃”更新策略也仍然存在 7% 左右的误匹配。在许多工程应用中,虽可以容许一定的误剔除率(匹配遗漏),但是对误匹配率却有严格的限制。例如,在本文的 3 维特征点测量应用中,成功匹配的同名点对会得到其 3 维坐标,如果某些同名点对没有被匹配上,则这次测量就不会输出相应的 3 维点坐标,这虽可以通过再次补充测量得到,然而,如果存在错误匹配的点对,那么就会造成错误的测量结果,这是应严格避免的。所以本文在由迭代松弛过程得到的匹配结果的基础上,进一步采用视差梯度约束来进行匹配的正确性检验,以降低误匹配率。算法过程如下:

(1) 根据式(6)计算每两个匹配点对之间的视差梯度,如果 $r > \varepsilon_r$ (ε_r 为视差梯度约束阈值),则认为这两个匹配点对违反了视差梯度约束。

(2) 计算每一个匹配点对违反视差梯度约束的次数,并将这些次数排序。

(3) 将违反视差梯度约束次数最多的一个匹配点对作为错误匹配点对去除。

(4) 重新计算每两对匹配点之间的视差梯度,将违反了视差梯度约束,即将 $r > \varepsilon_r$ 的匹配点对记下,如果没有违反视差梯度约束的匹配点对,则算法结束;否则转到步骤 2。

经过这样的匹配检验之后,可以进一步消除错误的匹配点对。在这个过程中,可能会出现原来正确的匹配点对被误去除的情况,后面的实验将验证该匹配检验策略在降低误匹配率方面的综合效果。

5 实验验证

为了验证本文提出的算法的匹配效果,本文做了大量的实验。实验是在一个双目立体测量验证系统上进行的。其应用的主要硬件如下:两个摄像机采用 Watec 902B CCD 视觉传感器,相面尺寸为: $6.4 \times 4.8 \text{ mm}^2$,分辨率为 768×576 ;光学镜头使用 computar M1614 - MP 镜头,焦距为 16 mm;两个摄像机安装在带有三机云台的三角架上。

实验时,首先使用文献[14]的方法,通过对一对立体摄像机进行标定来得到左右摄像机的内外参数矩阵,进而采用文献[1]的方法求得基础矩阵 F ;然后根据式(2)得到的左右图像点的极线约束来进行初匹配;最后用本文的迭代松弛过程和匹配检验方法去除错误匹配。

实验中的特征点是采用先在物体表面粘贴容易识别的圆形标记,然后用文献[13]的方法在图像中将其识别成椭圆,再进行亚像素中心点定位的方法产生。实验中总共用到了 15 对图像,其中既有特征点排列很整齐规则的情况,也包括不规则的不同稠密程度等各种不同特征点的分布情况。为了系统地验证干扰率对算法的影响,还从识别出的特征点集中随机删除不同数量的特征点来实现不同的干扰水平。

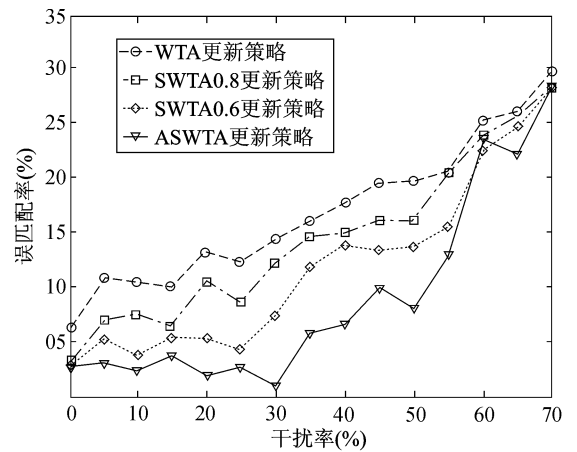
5.1 更新策略的影响

本实验具体对比了“赢者通吃”、“部分赢者通吃”以及本文提出的“自适应部分赢者通吃”更新策略对误匹配率和误剔除率的影响。对于 SWTA 更新策略,则验证了 $\alpha = 0.8$ 和 $\alpha = 0.6$ 两组参数的情况,其中 $\alpha = 0.6$ 为文献[8]推荐的取值。

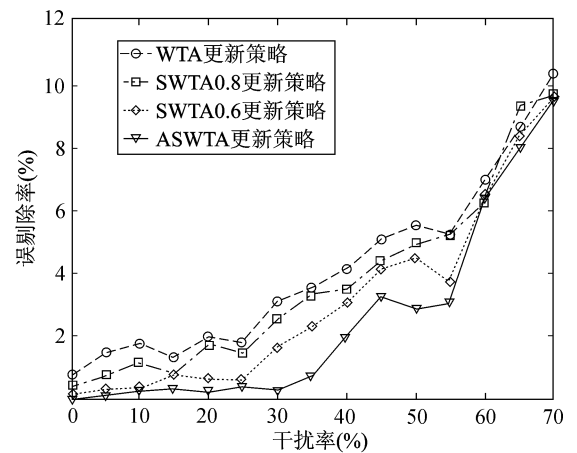
图 3 是使用不同的更新策略所得到的匹配结果的具体情况。由图 3 可见,匹配结果的总体趋势是随着干扰率的增加,误匹配率和误剔除率都在增加。通过对比可以看到,使用 WTA 更新策略得到的误匹配率以及误剔除率都是最高的,使用 SWTA 更新策略比 WTA 更新策略得到的匹配结果稍好,其中使用推荐的参数 $\alpha = 0.6$ 又比 $\alpha = 0.8$ 要好,而本文提出的 ASWTA 更新策略得到的匹配结果是最好的,无论是误匹配率还是误剔除率都低于其他方法。

5.2 更新策略对视差梯度检验的影响

从图 3 可以看出,本文提出的 ASWTA 更新策略虽然较其他策略可得到更好的匹配结果,但还是



(a) 不同更新策略的误匹配率与干扰率的关系曲线

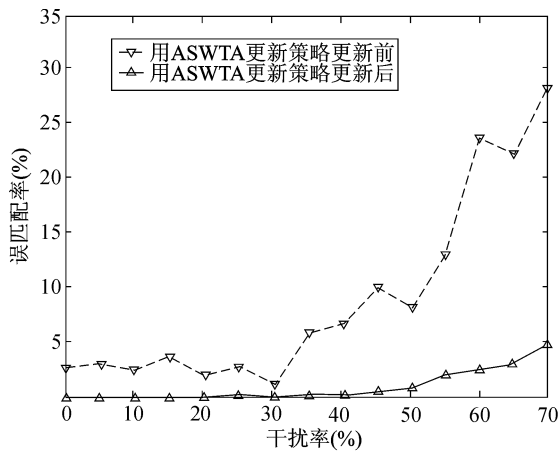


(b) 不同更新策略的误剔除率与干扰率的关系曲线

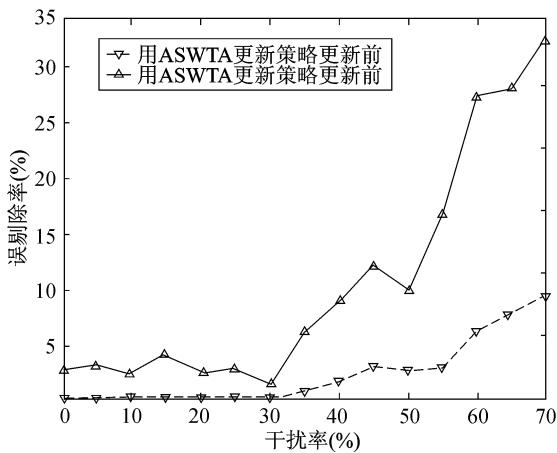
图 3 不同的更新策略对匹配结果的影响

Fig. 3 Effect on matching result of different update strategy

存在一定的误匹配率。本次实验是在上一节实验的基础上,来考察加入视差梯度对本文的自适应迭代松弛匹配算法所得到的匹配结果做进一步检验的影响,实验结果如图 4 所示。图 4(a) 表示加入视差梯度检验前后误匹配率的对比情况,从图中可见,在 $\beta \leq 30\%$ 时,视差梯度检验后的误匹配率几乎为零,当干扰率 β 达到 50% 时,误匹配率也控制在 1% 以内。图 4(b) 表示加入视差梯度检验前后误剔除率的对比情况。显然,误匹配率的减少是以误剔除率的增加为代价的。但是,从图中也可以看出,在 $\beta \leq 30\%$ 时,上升后的误剔除率仍然在 5% 以内,当干扰率 β 达到 50% 时,误剔除率也控制在 10% 左右。而在一般的实际匹配问题中, $\beta > 30\%$ 的情况是很少见的。因此,加入松弛迭代后的视差梯度检验是切实可行的,其能够在可接受的无剔除率下,有



(a) 使用ASWTA更新策略前后误匹配率与干扰率的关系曲线



(b) 使用ASWTA更新策略前后误剔除率与干扰率的关系曲线

图 4 视差梯度检验的影响

Fig. 4 Effect of disparity gradient check

效地控制误匹配,并可满足工程应用中对误匹配率的严格限制。

5.3 关于阈值参数的讨论

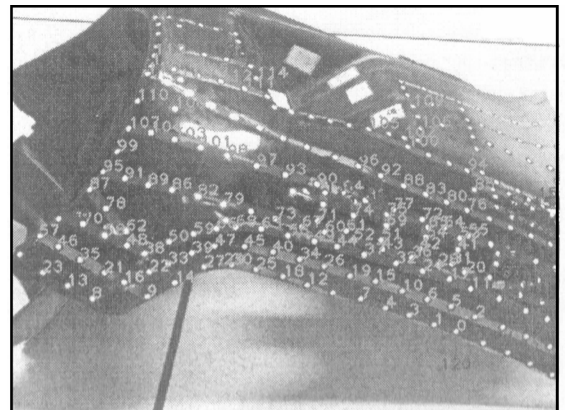
本文算法涉及以下两个阈值参数:一是极线约束阈值 ε_d ,另一个是视差梯度约束阈值 ε_r 。其中, ε_d 的选取理论上应基于系统的标定精度。标定精度越高,则该阈值可以取得越小,即可以施加更加严格的极线约束。在本文的实验系统中,由于标定精度可以保证优于 1 pixel,因此阈值 ε_d 取为 1 pixel,这样既不会产生误剔除,同时又能控制仅有相对较少的误匹配点对进入后续环节。本文也取 $\varepsilon_d > 1$ 做过若干实验,匹配结果相对于 $\varepsilon_d = 1$ 而言,尽管在初始匹配中有较多的误匹配点对,但通过后续的自适应迭代松弛和视差梯度检验,就可以剔除这些初始匹配中的误匹配点对,最终达到的匹配效果实际上与 $\varepsilon_d = 1$ 是一致的。这也说明本文方法并不敏感地

依赖于 ε_d 的取值。

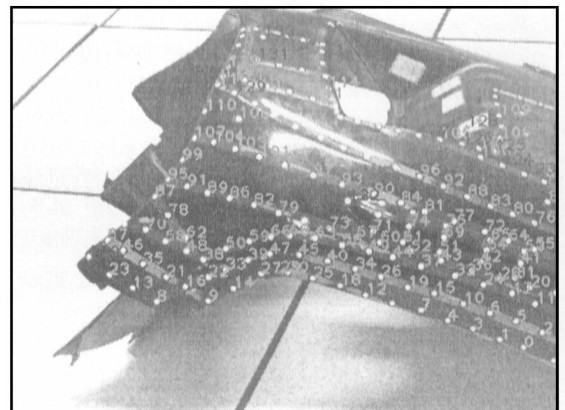
视差梯度约束阈值 ε_r 越大,则施加的视差梯度约束就越弱;反之, ε_r 越小,则施加的约束就越大。在本文的实验条件下,当 ε_r 接近或大于 1 pixel 以后,最终的匹配结果中的匹配错误也随之增大。而当 $\varepsilon_r < 1$ 时,尤其是该阈值在 0.3 ~ 0.7 范围内变化时,其对匹配结果的影响很小。这表明采用本文方法,阈值参数 ε_r 能在较为宽松的一个取值范围内稳定地取得良好的匹配结果。基于上述实验结果,在本文的所有实例中,均取 $\varepsilon_r = 0.5$ 。

5.4 应用实例

在表面特征不明显的摩托车前罩表面贴上若干特征圆点,一共检测出了左图 165 个特征圆点,右图 134 个特征圆点(如图 5 所示)。其中第 0 到 119 个特征点在另一幅图像中有匹配点,从第 120 个之后特征点没有匹配点。由图 5 可见,利用本文算法进行匹配,特征圆点全部匹配正确。



(a) 摩托车前罩左图像



(b) 摩托车前罩右图像

图 5 摩托车前罩匹配结果

Fig. 5 Matching result of a motorcycle front cover

在立体匹配结果的基础上,再利用三角测量原理^[14]来得到圆点中心的3维坐标。由于该物体表面比较大且比较复杂,摄像机无法一次拍摄得到整个场景,故需通过数据拼合,才能得到整个模型的数据(如图6所示)。图6是根据3维重建获得的特征点集,用逆向工程软件 Surfacar[®] 完成的曲面重建,这里利用了模型的对称性。

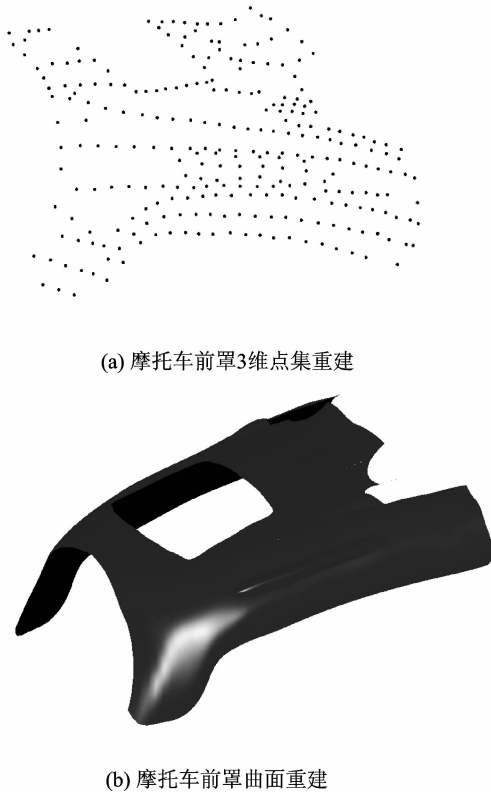


图6 在本文算法基础上完成的摩托车前罩3维测量建模
Fig. 6 3D reconstruction of motorcycle front cover

6 结 论

本文综合利用极线约束、视差梯度约束和迭代松弛方法进行图像特征点对的匹配,并提出了一种自适应确定松弛过程中更新策略参数的方法,从而既避免了WTA更新策略容易陷入局部错误解的问题,又克服了SWTA更新策略中固定参数取值的问题。通过不同干扰水平的匹配实验结果表明,该策略在误匹配率和误剔除率方面都优于已有的松弛更新策略。

在自适应迭代松弛的基础上,本文提出了对松弛过程结束后的匹配结果再次使用视差梯度约束来进行进一步检验的策略,并对提出的方法做了实验

统计分析,结果表明,该策略在可接受的误剔除率下,能够显著地降低误匹配率,可满足工程应用中误匹配率严格限制的要求。

参考文献 (References)

- 1 Trucco E, Verri A. Introductory Techniques for 3D Computer Vision [M]. Upper Saddle River New Jersey USA: Prentice Hall, 1998.
- 2 Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, **47**(1/2/3):7-42.
- 3 Maciel J, Costeira J P. A global solution to sparse correspondence problems[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, **25**(2):187-199.
- 4 Kolmogorov V, Zabih R. Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts [A]. In: Proceedings of 8th IEEE International Conference on Computer Vision [C], Vancouver, BC, Canada, 2001, **2**:508-515.
- 5 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, **60**(2):91-101.
- 6 Ke Y, Sukthankar R. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors [A]. In: Proceedings of 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Washington, DC, USA, 2004, **2**:506-513.
- 7 Pollard S B. The PMF stereo algorithm: theory and implementation [J]. Parallel Architectures and Computer Vision, 1988, 61-79.
- 8 Zhang Z, Deriche R, Faugeras O, et al. A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry [J]. Artificial Intelligence, 1995, **78**(1-2):87-119.
- 9 Galo M, Tozzi C L. Feature-point based matching: a sequential approach based on relaxation labeling and relative orientation [J]. Journal of WSCG (the Winter School Computer Graphics), 2004, **12**(1-3):1-8.
- 10 Zhang W, Gao X, Sung E, et al. A feature-based matching scheme: MPCD and robust matching strategy [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, **28**(10):1222-1231.
- 11 Yoon K J, Kweon I S. Adaptive support-weight approach for correspondence search [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, **28**(4):650-656.
- 12 Chen Y S, Hung Y P, Fuh C S. Fast block matching algorithm based on the winner-update strategy [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, **10**(8):1212-1222.
- 13 Zhou L, Zhang L Y, Zheng J D, et al. Automated reference point detection in close range photogrammetry [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, **25**(3):288-294. [周玲,张丽艳,郑建冬等.近景摄影测量中标记点的自动检测[J].应用科学学报,2007, **25**(3):288-294.]
- 14 Zhang H, Zhang L Y, Chen J, et al. Field calibration of binocular stereo system based on planar template and free snapping [J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2007, **28**(3):695-701. [张辉,张丽艳,陈江等.基于平面模板自由拍摄的双目立体测量系统的现场标定[J].航空学报,2007, **28**(3):695-701.]