

基于图像相似几何特征的双目匹配算法

解则晓 陆文娟*

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要 针对传统外极线约束的匹配算法存在误匹配率、漏匹配率较高的问题,提出了基于图像相似几何特征的双目匹配检验和筛选算法。利用外极线几何约束算法获得不共外极线和共外极线的初始匹配点。根据左右图像正确的匹配点具有相似的几何位置关系,引出最大向量角和最大角度差准则。对于不共外极线的初始匹配点,提出了基于更新策略的视差梯度约束与最大向量角准则相结合的误匹配剔除算法,降低了误匹配率,并且克服了只用视差梯度约束过多误剔除的缺陷。对于共外极线的初始匹配点,提出利用最大角度差和最大向量角准则筛选正确的匹配点,然后进一步利用顺序一致性约束和视差梯度约束检验筛选的匹配点,降低了漏匹配率。实验结果表明,该算法匹配准确率高,通用性强,误匹配率和漏匹配率分别能控制在 0.1% 和 7% 以内,适用于不同复杂程度的被测物体。

关键词 双目匹配; 相似几何特征; 最大向量角准则; 最大角度差准则; 视差梯度约束; 外极线约束

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0508002

A Binocular Matching Algorithm Based on Similar Image Geometric Features

Xie Zexiao Lu Wenjuan

(Engineering College, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract Concerning the high probability of mismatching and matching-loss that exists in traditional epipolar constraint matching algorithm, an algorithm based on similar image geometric features is proposed for binocular matching. The initial matching points which locate in the same or different epipolar lines are identified respectively using epipolar geometric constraint algorithm. According to the position similarity of matching points, maximum vector angle criterion and maximum angle difference criterion are derived. In order to match the points locat in different epipolar lines, utilizing disparity gradient limited constraint as well as maximum vector angle criterion, a mismatching elimination algorithm based on updating strategy is proposed, which can reduce the rate of mismatching and erroneous elimination. For the initial matching points locating in the same epipolar line, maximum angle difference and maximum vector angle criterion are used to extract candidate matching points. These candidate matching points are further examined, thus decreases the rate of matching-loss. Experimental results indicate that the algorithm has high matching accuracy and versatility. The incidence rate of mismatching and matching-loss can be controlled within 0.1% and 7%, respectively, and the algorithm is appropriate for objects with different structural complexity.

Key words binocular matching; similar geometric features; maximum vector angle criterion; maximum angle difference criterion; disparity gradient limited constraint; epipolar constraint

OCIS codes 150.0155; 100.2000; 150.4232

1 引言

近年来,随着计算机视觉^[1]的不断发展,基于视

觉理论的非接触式测量^[2-5]系统越来越多地应用于
航空航天、汽车制造业、重工业等领域。作为视觉非

收稿日期: 2013-10-29; 收到修改稿日期: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61171162)、教育部博士点专项基金(20110132110010)

作者简介: 解则晓(1968—),男,教授,博士,主要从事机器视觉和机器人运动控制及机器人测量等方面的研究。

E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: luwenjuan19900107@163.com

接触测量领域的一个重要分支,基于特征点的双目视觉测量^[6-7]方法以其可自由移动、高精度的优点受到越来越多的关注,该方法通过匹配特征点实现三维重建,因此特征点的双目匹配是必不可少的一个环节。

目前,对于特征点的双目匹配,通常采用基于外极线几何约束的匹配算法^[8-9]。外极线几何约束将特征点的搜索限定在一条外极线上,减小了特征点的搜索空间。但是当有多个特征点位于同一条外极线上时,就容易产生共外极线的匹配点无法筛选的问题,对于此类问题,传统的基于外极线几何约束算法是舍弃所有共外极线的匹配点,这样就会造成漏匹配。当被测物体因起伏较大而存在遮挡时,左图像中的某个点在右图像中不可见,而另外一个恰好与之共外极线的点在左图像中不可见却在右图像中可见,这样就会将这两个点误匹配。在许多工程应用中,虽可以容许一定的漏匹配率,但对误匹配率却有严格的限制^[10]。

针对传统外极线几何约束匹配算法的缺陷,文献^[11]提出了一种基于编码点的匹配算法,对编码点解码,匹配两幅图像的对应编码点,利用编码点与非编码点之间特征的相似性与相容性,对非编码点进行匹配。此方法要求在左右图像上看到较多的公共编码点,由于编码点尺寸较大,对于小视场的双目匹配并不适用。文献^[10]提出了一种基于自适应迭代松弛的稳健匹配算法,有效地降低了误匹配率和误剔除率,此算法对于较大视场的匹配效果较好,每次拍摄的范围较大,左右图像包含比较多(大于100个)的公共点,能较好地利用匹配支持度对候选匹配点进行筛选;而对于小视场的双目匹配,左右图像包含较少的公共点,不适合利用该算法筛选共外极线的匹配点。文献^[12]针对外极线几何约束匹配算法中的误匹配问题,根据图像上圆形特征点轮廓计算出特征点的空间法向,然后利用正确匹配点法向一致的准则剔除误匹配点,然而对于平面或者起伏不大的被测物体,特征点的空间法向均比较一致,此方法无法剔除误匹配点。

鉴于此,本文提出了一种适用于不同复杂程度被测物体的小视场匹配检验及筛选算法。该算法依据左右图像的匹配点具有相似的几何位置关系,提出两个准则:最大向量角准则和最大角度差准则。利用外极线几何约束算法确定初始匹配点;对不共外极线的初始匹配点,提出了基于更新策略的视差梯度约束与最大向量角准则相结合的误匹配点剔除

算法,减小了误匹配率;对共外极线的初始匹配点,提出了最大角度差与最大向量角准则相结合的筛选算法,并结合顺序一致性约束与视差梯度约束检验筛选出的匹配点,减小了漏匹配率。

2 基于外极线约束算法的初匹配

如图1所示,空间点 P 在左像平面上的投影点 P_a 对应于右像平面的匹配点 P_b 必在外极线 L_b 上,同时空间点 P 在右像平面上投影点 P_b 对应于左像平面的匹配点 P_a 必在外极线 L_a 上,这称为外极线几何约束^[13]。由于系统标定、圆心提取等过程存在误差,实际计算时,若特征点 P_a 到相应外极线 L_a 的距离小于一个阈值 ϵ ,且 P_b 到外极线 L_b 的距离小于 ϵ ,则认为 P_a 与 P_b 是匹配点。这样就可以获得初始的匹配点对集合,该集合中既包含一对一的匹配点又包含一对多、多对多的匹配点,一对一的匹配点是不共外极线的点,一对多、多对多的匹配点是共外极线的点。

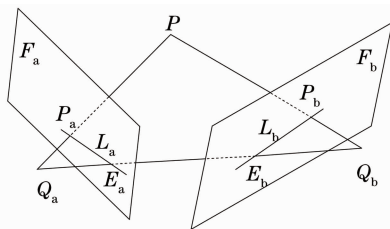


图1 外极线几何约束示意图

Fig. 1 Scheme of epipolar geometric constraint

3 误匹配点的剔除

对于不共外极线的一对一的初始匹配点,文献^[10]利用视差梯度约束进行匹配点的正确性检验,将违反视差梯度约束次数最多的匹配点剔除。该方法可以较为有效地剔除误匹配点,但是当违反视差梯度约束次数最多的匹配点不止一对时,这多对匹配点可能既有误匹配点也有正确的匹配点,如果直接将违反视差梯度约束次数最多的匹配点全部剔除,这对公共视场特征点较多的情况影响较小;而对于小视场双目系统,由于公共视场的特征点数量较少,这样就会对最终匹配点的数量产生较大的影响。

为减少误剔除,在已有视差梯度约束的基础上,提出了基于更新策略的视差梯度约束和最大向量角准则相结合的误匹配点剔除算法,利用最大向量角准则对违反视差梯度约束次数最多的匹配点作进一步剔除。给出视差梯度的定义,如图2所示, m_i, m_j 为左图像中的点, m'_i, m'_j 为右图像中的点, (m_i, m'_i)

是一对匹配点, (m_j, m'_j) 是另一对匹配点, 其中 $m_i = [u_i, v_i], m'_i = [u'_i, v'_i], m_j = [u_j, v_j], m'_j = [u'_j, v'_j], u, v$ 为图像中点的像素坐标。定义 d 为点 m 到点 m' 的向量, 视差梯度为 D_G , 视差梯度约束阈值为 K , 则视差梯度约束可表示为^[10,14]

$$D_G = \frac{\|d_j - d_i\|}{\|[m_j - m_i + (m'_j - m'_i)]/2\|} \leq K. \quad (1)$$

考虑到匹配点具有相似的位置关系, 提出了最大向量角准则的概念: 左右图像的匹配点之间的走向大致相同, 其方向比较一致, 即左右图像中正确匹

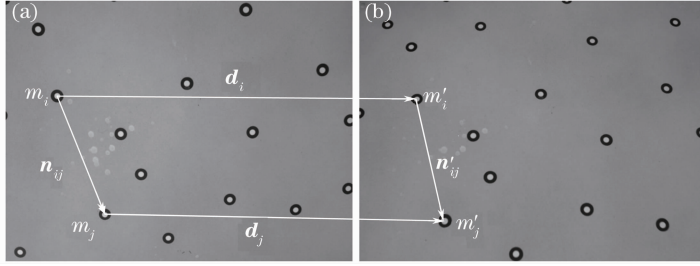


图2 视差梯度约束和最大向量角准则示意图。(a) 左图像; (b) 右图像

Fig. 2 Scheme of disparity gradient limited constraint and maximum vector angle criterion. (a) Left image; (b) right image

配向量的夹角较小, 而误匹配向量的夹角较大。如图2, 定义左图像中 n_{ij} 为由第 i 个不共外极线的点 m_i 指向第 j 个不共外极线的点 m_j 的向量, 右图像中 n'_{ij} 为由 m_i 的匹配点 m'_i 指向 m_j 的匹配点 m'_j 的向量, θ_{i_sum} 为左图中第 i 个不共外极线的点 m_i 与其它点组成的向量和右图中匹配向量的夹角之和, 则

$$\theta_{i_sum} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \left| \cos^{-1} \frac{n_{ij} \cdot n'_{ij}}{\|n_{ij}\| \cdot \|n'_{ij}\|} \right|, \quad (2)$$

式中 N 为不共外极线的匹配点对的个数。最大向量角准则的几何意义是指错误的匹配点 θ_{sum} 最大。

基于更新策略的剔除算法综合利用视差梯度约束与最大向量角准则, 每次最多剔除一个不共外极线的匹配点对, 之后对更新后的不共外极线的匹配对重新计算视差梯度 D_G 及向量差 θ_{sum} , 具体算法如下:

- 1) 根据(1)式计算某个不共外极线的匹配对与其余不共外极线的匹配对的视差梯度, 以图2中的 (m_i, m'_i) 为例, 计算该对匹配点与其余不共外极线的匹配对之间的视差梯度 D_G , 若 $D_G > K$, 则认为该对匹配点违反了视差梯度约束, 并统计 (m_i, m'_i) 违反视差梯度约束的次数;

- 2) 计算每对不共外极线的匹配点违反视差梯度约束的次数, 并找出违反视差梯度次数最多的匹配对;

- 3) 如果违反视差梯度约束最多的次数为0, 表明没有误匹配点, 结束该算法; 否则继续步骤4);

- 4) 若违反视差梯度约束次数最多的匹配点对只有一个, 则剔除该匹配对, 更新不共外极线的匹配对, 重新计算视差梯度 D_G , 即继续步骤1), 直至没有违反视差梯度约束的匹配对。若违反视差梯度约束次数最多的匹配点不止一对, 为降低误剔除率, 将违反视差梯度约束次数最多的匹配对继续步骤5);

- 5) 根据(2)式计算违反视差梯度约束次数最多的匹配对的 θ_{sum} , 根据最大向量角准则, 将 θ_{sum} 最大的匹配对剔除。更新不共外极线的匹配对, 重新计算视差梯度 D_G , 转至步骤1), 直至没有违反视差梯

度约束的匹配对。

经过以上步骤, 可以将不共外极线的误匹配点有效地剔除, 从而保证了匹配的准确性。将剔除后剩余的不共外极线的匹配点作为真正的匹配点, 并用于下一部分共外极线匹配点的筛选及检验。

4 共外极线匹配点的筛选及检验

唯一性约束^[15]要求匹配点是一一对应的。图3中空间两点 P, Q 在左图像中的投影点 P_a, Q_a 是共外极线 L_a 的, 在右图像中的投影点 P_b, Q_b 是共外极线 L_b 的, 这样通过外极线几何约束算法得到的共外极线的匹配点有 $(P_a, P_b), (P_a, Q_b), (Q_a, P_b), (Q_a, Q_b)$, 显然不是一一对应的。针对共外极线的点, 提出了一种基于最大角度差与最大向量角准则的筛选算法, 筛选后的匹配点是一一对应的; 同时, 为保证筛选准确, 提出了利用顺序一致性约束与视差梯度

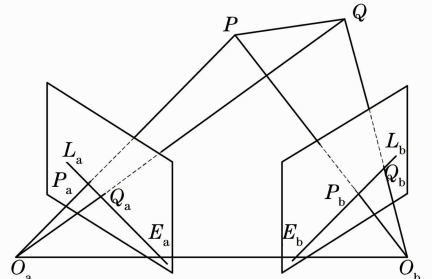


图3 多个特征点共外极线示意图

Fig. 3 Scheme of feature points lied on the same epipolar

约束的检验算法,剔除筛选后的错误匹配点。

4.1 基于最大角度差和最大向量角准则的共外极线匹配点的筛选

根据左右图像中匹配点相似的位置关系,提出了最大角度差准则:正确的共外极线的匹配点与真正匹配点构成的对应角的角度差较小,而错误的共外极线的匹配点与真正匹配点构成的对应角的角度差较大,因此对于共外极线的匹配点,对应角度差之和最大的是错误匹配点。

$$\alpha_{\angle ACB-\angle A'C'B'} = |\angle ACB - \angle A'C'B'| = \left| \cos^{-1} \frac{AC \cdot BC}{\|AC\| \cdot \|BC\|} - \cos^{-1} \frac{A'C' \cdot B'C'}{\|A'C'\| \cdot \|B'C'\|} \right|. \quad (3)$$

定义 α_{sum} 为某个共外极线的匹配点与任意两个真正匹配点所构成的对应角度差的和,则对于匹配点对 (C, C') ,

$$\alpha_{\text{sum}}(C, C') = \alpha_{\angle ACB-\angle A'C'B'} + \alpha_{\angle ACE-\angle A'C'E'} + \alpha_{\angle ACF-\angle A'C'F'} + \alpha_{\angle ACG-\angle A'C'G'} + \alpha_{\angle BCE-\angle B'C'E'} + \alpha_{\angle BCF-\angle B'C'F'} + \alpha_{\angle BCG-\angle B'C'G'} + \alpha_{\angle ECF-\angle E'C'F'} + \alpha_{\angle ECG-\angle E'C'G'} + \alpha_{\angle FCG-\angle F'C'G'}. \quad (4)$$

同理,计算 $\alpha_{\text{sum}}(C, D')$, $\alpha_{\text{sum}}(D, D')$, $\alpha_{\text{sum}}(D, C')$,并按从小到大的顺序排序。根据最大角度差准则, α_{sum} 最大的是错误匹配对。

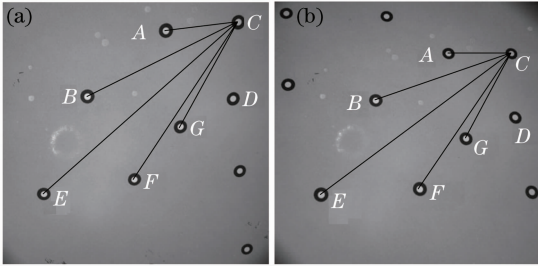


图 4 最大角度差准则示意图。

(a) 左图像; (b) 右图像

Fig. 4 Scheme of maximum angle difference criterion. (a) Left image; (b) right image

同时,以匹配对 (C, C') 为例,计算点 C 和真正的匹配点 A, B, E, F, G 组成的向量 CA, CB, CE, CF, CG 分别与对应向量 $C'A', C'B', C'E', C'F', C'G'$ 的夹角和 $\theta_{\text{sum}}(C, C')$, 同理计算 $\theta_{\text{sum}}(C, D')$, $\theta_{\text{sum}}(D, C')$, $\theta_{\text{sum}}(D, D')$ 。根据最大向量角准则, θ_{sum} 最大的是错误匹配对。

为提高筛选的准确度,结合最大角度差与最大向量角准则,定义 $\beta = \alpha_{\text{sum}} + \theta_{\text{sum}}$, 计算每对匹配点的 β 。对违反一一对应原则的共外极线的匹配对,剔除 β 最大的匹配对,直至剩余的匹配对不违反一一对应原则,将筛选后剩余的共外极线的匹配对定义为准匹配对。

大角度差准则的几何描述如下:如图 4 所示, $(A, A'), (B, B'), (E, E'), (F, F'), (G, G')$ 为真正的匹配点对,即剔除误匹配后的匹配点, $(C, C'), (D, D'), (C, D'), (D, C')$ 为共外极线的匹配点对。以 (C, C') 这对匹配点为例,定义左图中共外极线的匹配点 C 和两个真正的匹配点 A, B 形成的 $\angle ACB$ 与右图中对应角 $\angle A'C'B'$ 角度差的绝对值为 $\alpha_{\angle ACB-\angle A'C'B'}$, 则

4.2 基于顺序一致性约束和视差梯度约束的准匹配点检验

为保证共外极线的匹配点筛选正确,算法对筛选出的准匹配点作进一步检验。将准匹配点分为两类: 1) 多对多的共外极线的匹配点,即筛选后还有与之共外极线的准匹配点,例如图 4 中筛选后的准匹配点有 $(C, C'), (D, D')$, 仍然是共外极线的匹配点; 2) 一对多的共外极线的匹配点,即筛选后没有与之共外极线的准匹配点,例如,当共外极线的匹配点只有 $(A, A'), (A, B')$, 筛选后就只剩下一对准匹配点。

对于第一类准匹配点,采用以顺序一致性为约束的检验方法。顺序一致性约束^[16]是指对于共外极线的点,对应匹配点一般以相同的次序落在外极线上。这样可利用共外极线的准匹配点与外极点的距离关系对筛选出的候选匹配点进行检验,如图 3, 空间点 P, Q 在左右摄像机像面 F_a, F_b 的投影分别是 P_a, P_b, Q_a, Q_b , 左右像面的外极点分别为 E_a 和 E_b 则其投影点与外极点的距离满足下式

$$[d(P_a, E_a) - d(Q_a, E_a)] \cdot [d(P_a, E_b) - d(Q_b, E_b)] < 0, \quad (5)$$

式中 $d(P, E)$ 表示点 P 与点 E 之间的欧氏距离。将违反(5)式的准匹配点剔除。

顺序一致性约束只能检验那些有与之共外极线的准匹配点,对于第二类准匹配点,再一次采用视差梯度约束进行检验。由于只需检验筛选后的第二类准匹配点,剔除算法较第 3 部分误匹配点的剔除算法略有不同:计算筛选后不共外极线的准匹配点与

每对真正匹配点之间的视差梯度,若违反视差梯度约束,则将该准匹配点剔除。

经过上述的检验,可以进一步剔除错误的准匹配点对,检验后剩余的准匹配点也作为真正的匹配点。

5 实验验证

为验证该算法的可靠性,对误匹配点的剔除和共外极线匹配点的筛选检验两个环节进行了实验。实验所采用的两个摄像机分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。实验中所用的特征点为内部白色外环黑色的圆形特征点,用文献[17]的方法提取特征点中心。需要指出的是,虽然本实验用的是这种圆形特征点,但该匹配算法并不局限于用此特征点,对于其它种类的特征点,均可以用本文的匹配算法进行匹配。实验前对双目系统立体标定^[18-19],整个实验过程两个摄像机相对位置关系固定不变。

基于外极线约束算法的初匹配中涉及到特征点到相应外极线的距离阈值 ϵ , ϵ 的选取应依据标定精度及圆心提取的精度,精度越高,该阈值可以设得越小。但当 ϵ 太小时,有些本应该匹配的点会被漏掉;当 ϵ 太大时,共外极线的匹配点会增多。在实验中, ϵ 取为 2 pixel ,这样既避免了匹配遗漏,又可以控制共外极线匹配点的数量。误匹配点的剔除算法中涉及到视差梯度阈值 K ,根据文献[14], K 的取值最好在 $0.5 \sim 1$ 范围内。本实验 K 取为 0.7 ,通过实验证实,当 K 的取值在 $0.5 \sim 1$ 范围变化时,对匹配结果影响不大。

5.1 误匹配点的剔除实验

在图 5 所示的工件上粘贴若干标记点,图中相同编号的点为匹配正确的点。由于遮挡左右摄像机分别只看到 16 号点和 17 号点,且 17 号点恰好落在 16 号点在右图所对应的外极线上,故外极线约束的

匹配算法获得的匹配对包含 $(16, 17)$,由图 5 知,左图像的 16 号点与右图像的 17 号点为误匹配点,利用本文基于更新策略的视差梯度约束和最大向量角准则相结合的误匹配点的剔除算法可将这对误匹配点剔除。

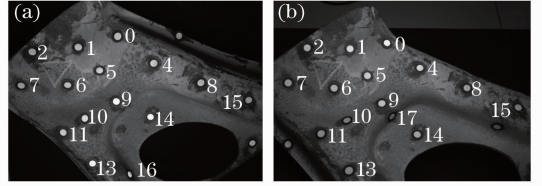


图 5 汽车钣金件图像。(a) 左图像; (b) 右图像
Fig. 5 Image of panel beater. (a) Left image; (b) right image

5.2 共外极线匹配点的筛选及检验实验

在图 6 所示的玻璃板表面贴上若干标记点,其中相同标号的点为匹配正确的点。通过外极线几何约束后共外极线的匹配点包括 $(2, 2)$, $(2, 6)$, $(6, 2)$, $(6, 6)$ 。利用本文算法对共外极线匹配点的筛选检验结果是 $(2, 2)$, $(6, 6)$,由图 6 知筛选检验正确。

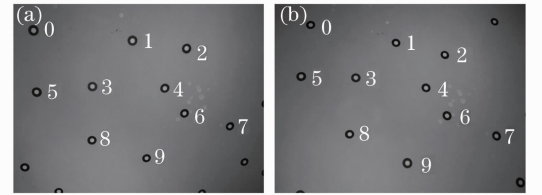


图 6 不透明玻璃板图像。(a) 左图像; (b) 右图像
Fig. 6 Image of opaque glass plate. (a) Left image; (b) right image

5.3 不同复杂程度被测物体的匹配实验

分别采用本文算法与外极线约束匹配算法,对不透明玻璃板、汽车钣金件、石膏面具、复杂工件等不同复杂程度的被测物体进行实验,以误匹配率和漏匹配率为评价标准,结果如图 7 所示。

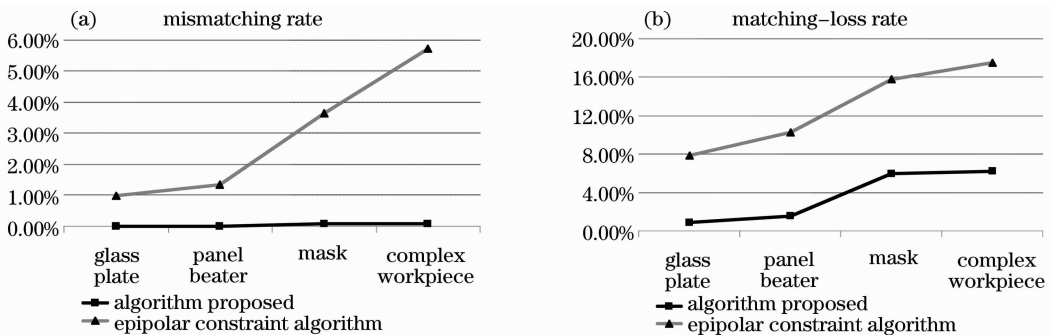


图 7 多个物体的匹配结果对比。(a) 两种算法误匹配率的比较; (b) 两种算法漏匹配率的比较
Fig. 7 Contrast matching results of objects. (a) Contrast mismatching rate of two algorithms; (b) contrast matching-loss rate of two algorithms

图 7 横轴从左向右,被测物体的表面起伏变化越来越大,复杂程度越来越高。与外极线几何约束算法相比,本文算法的误匹配率及漏匹配率均能控制在较小的范围。对于表面复杂程度较高的物体,误匹配率、漏匹配率可分别控制在 0.1% 和 7% 以内;对于平坦的、起伏不大的物体,误匹配率几乎为 0,漏匹配率可控制在 2% 以内。

同时,随着物体表面复杂程度的提高,外极线几何约束算法与本文算法的误匹配率及漏匹配率均越来越大,特别是外极线几何约束算法,误匹配率及漏匹配率增大的幅度很大;本文算法的误匹配、漏匹配率虽也增大,但幅度较小,尤其能将误匹配率控制在较小范围内。复杂物体比平坦物体的漏匹配率大得多,这是因为复杂物体的左右图像匹配点几何位置相似性降低,利用本文算法可能会出现原来正确的匹配点被误剔除的情况。但在工程应用中,误匹配的危害是巨大的,为严格控制误匹配率,可以牺牲一定程度的漏匹配率,故本文算法满足工程应用的要求。

6 结 论

根据左右图像匹配点相似的位置关系,提出了最大向量角和最大角度差准则。针对外极线约束匹配算法的误匹配问题,提出了基于更新策略视差梯度约束与最大向量角准则相结合的误匹配剔除算法,避免了仅采用视差梯度约束过多误剔除的问题。对于共外极线的匹配点无法筛选的问题,提出了基于最大角度差与最大向量角准则的筛选算法,同时为保证筛选的正确性,利用顺序一致性约束和视差梯度约束进一步检验筛选出的匹配点,克服了漏匹配率过高的问题。实验结果表明,误匹配点的剔除及共外极线匹配点的筛选算法精度高、通用性强。在误匹配率方面,该算法对于平坦物体的误匹配率几乎为 0,对于起伏较大的复杂物体的误匹配率也能控制在很小的范围;在漏匹配率方面,平坦物体与复杂物体分别能控制在 2% 和 7% 以内。该算法牺牲了一定程度的漏匹配率,从而保证很小的误匹配率,满足了工程应用对误匹配率严格限制的要求。

参 考 文 献

- 1 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. 1—22.
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 1—22.
- 2 Quan Yanming, Li Shumei, Mai Qingqun. On-machine 3D measurement of workpiece dimensions based on binocular vision [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 1054—1061.

- 全燕鸣, 黎淑梅, 麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1054—1061.
- 3 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin, *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.
张旭苹, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.
- 4 Xie Zexiao, Li Xuyong, Xin Shaohui, *et al.*. Underwater line structured-light self-scan three-dimension measuring technology [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2010—2014.
解则晓, 李旭勇, 辛少辉, 等. 水下线结构光自扫描三维测量技术[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2010—2014.
- 5 Zhang Xiaohu, Ou Jianliang, Yuan Yun, *et al.*. Stack-yard 3D measurement based on photogrammetry and projected contour aiding on linear-structure light[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612002.
张小虎, 欧建良, 苑云, 等. 投影轮廓线辅助下的堆场三维形貌摄影测量研究[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612002.
- 6 Barbero B R, Ureta E S. Comparative study of different digitization techniques and their accuracy [J]. Computer Aided Design, 2011, 43(2): 188—206.
- 7 Sun Junhua, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong, *et al.*. Mobile 3D vision measurement system for large-scale free for surface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1688—1691.
孙军华, 张广军, 魏振忠, 等. 大型自由曲面移动式三维视觉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1688—1691.
- 8 Yang Min, Shen Chunlin. Study on scene matching based on epipolar geometric constraint [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(2): 235—239.
杨敏, 沈春林. 基于对极几何约束的景象匹配研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 235—239.
- 9 Jiang Hongzhi, Zhao Huijie, Liang Xiaoyue, *et al.*. Phase-based stereo matching using epipolar line rectification [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2520—2525.
姜宏志, 赵慧洁, 梁宵月, 等. 基于极线校正的快速相位立体匹配[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2520—2525.
- 10 Zhang Hui, Zhang Liyan, Chen Jianfu. A robust stereo matching algorithm based on adaptive relaxation [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(7): 1378—1385.
张辉, 张丽艳, 陈鉴富. 基于自适应迭代松弛的立体点对匹配稳健算法[J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(7): 1378—1385.
- 11 Zhang Weixhong, Zhang Liyan, Wang Xiaoyan, *et al.*. Robust algorithm for image feature matching based on reference points [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(22): 2415—2418.
张维中, 张丽艳, 王晓燕, 等. 基于标记点的图像特征匹配的鲁棒算法[J]. 中国机械工程, 2006, 17(22): 2415—2418.
- 12 Li Zhanli, Liu Hang. Improved matching method of artificial makers [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(9): 3598—3600.
李占利, 刘航. 一种改进的人工标记点匹配方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(9): 3598—3600.
- 13 Zhang Hongwei. The Study of Binocular Vision Probe [D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
张宏伟. 双目视觉形貌测头的研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- 14 Zhengyou Zhang, Ying Shan. A progressive scheme for stereo matching [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2001, 2018: 68—85.
- 15 Bai Ming, Zhuang Yan, Wang Wei. Progress in binocular stereo matching algorithms [J]. Control and Decision, 2008, 23(7): 721—729.
白明, 庄严, 王伟. 双目立体匹配算法的研究与进展[J]. 控制与决策, 2008, 23(7): 721—729.
- 16 He Liang. Research on Binocular Vision Stereo Matching Algorithm [D]. Shanghai: East China Institute of Technology,

- 2012.
- 贺亮. 双目视觉立体匹配算法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- 17 Xie Zexiao, Gao Xiang, Cui Jian. Extraction algorithm of circular targets used for mobile 3D measurement[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1208002.
- 解则晓, 高翔, 崔健. 移动式三维测量用圆形标记点提取算法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208002.
- 18 Ai Saijiang, Wang Xiang. Correction of geometric distortion of wide-angle imaging system by cross ratio invariability[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0108005.
- 艾赛江, 王翔. 基于交比不变性的广角成像系统几何失真校正[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0108005.
- 19 Sun Nan, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.*. Calibration of binocular stereo measurement system based on calibration cross[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412001.
- 孙楠, 张丽艳, 叶南, 等. 基于十字靶标的双目立体测量系统标定[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412001.

栏目编辑: 张浩佳