

基于球面透视投影旋转矩阵的鱼眼图像匹配

祝海江 徐晓波 周靖林

(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘要 针对视场范围大、变形严重的鱼眼图像,提出了一种基于球面透视投影模型鱼眼图像匹配算法。在仅估计鱼眼图像焦距和主点的情况下,该方法先将鱼眼图像上的特征点投影到球面透视图像上,通过估计球面透视图像之间的旋转矩阵和平移向量来建立鱼眼图像特征点的对应区域,并利用球面图像上反投影点误差和的最小化优化旋转矩阵和平移向量,根据优化的参数确定鱼眼图像之间正确的匹配点。实验结果表明,在畸变较大的鱼眼图像上,提出的方法能得到比较满意的匹配结果。

关键词 机器视觉;球面透视投影;旋转矩阵;匹配;鱼眼图像

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0215001

Fisheye Image Matching Based on Rotation Matrix under Spherical Perspective Projection

Zhu Haijiang Xu Xiaobo Zhou Jinglin

(College of Information and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract A stereo matching algorithm based on spherical perspective projection model for fisheye images which have severe distortions and a large field of view with 180° is presented. Only estimating the focal length and the principal point of two fisheye images, all feature points on two fisheye images are first projected onto two spherical perspective images. Then rotation matrix and translation vector between two spherical perspective images are computed to find two corresponding spherical image patches, which are mapped into two fisheye images. And these estimated parameters are refined through minimizing the re-projected error of all feature points on the spherical perspective images. The corrected correspondence points between two fisheye images are determined through the refined rotation and translation. Experiments with real fisheye images show that this method has satisfactory matching results for the severely distorted fisheye images.

Key words machine vision; spherical perspective projection; rotation matrix; matching; fisheye image

OCIS codes 100.3010; 100.2960; 150.1135

1 引 言

在过去的十多年中,随着大视角的全景监控、机器人导航等应用的兴起,鱼眼镜头因视场能达到甚至超过 180° 而受到广泛的关注。2008 年,日本 Nissan 公司^[1]开发的基于四台鱼眼摄像机的车载视觉监控系统能有效消除司机的视点盲区,保障行车安全。

2011 年,美国 Intersil 公司^[2]开发出一种可对鱼眼镜头的超广角视野的视频图像失真进行实时校正的技术。目前,关于鱼眼摄像机标定、鱼眼图像校正等研究的文献已经比较常见^[3~9],而关于鱼眼图像对应点匹配的研究,大多是采用类似基于透视图像对应点匹配的方法。Micusik 等^[5,6]在提出一种估计鱼眼镜头

收稿日期: 2012-08-12; 收到修改稿日期: 2012-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(60875023, 61004045)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(ZZ1013, ZZ1134)资助课题。

作者简介: 祝海江(1971—),男,博士,副教授,主要从事计算机视觉和信号处理等方面的研究。

E-mail: zhuhj@mail.buct.edu.cn

非线性模型参数的基础上,采用对极约束估计两幅鱼眼图像间的基本矩阵,从而确定两幅图像之间的对应点,该方法仅处理了鱼眼图像中间变形较小的区域,而没有研究鱼眼图像较大畸变的区域。Barreto 等^[7]在将鱼眼图像特征点提升到变形空间三维点的基础上,提出了一种估计径向变形基本矩阵来确定变形图像的对应点的方法。许振辉等^[10]将基于透视图像的扩散算法推广到鱼眼图像,利用邻域传递的思想,提出采用局部仿射模型来建立鱼眼图像对应区域之间的变换关系,从而进行匹配扩散。

然而,在基于透视图像的匹配算法中都需要将图像校正^[11,12],使两幅图像的极线都在水平方向上,而对存在较大畸变的鱼眼图像,校正本身就非常困难,甚至理论上不可行^[10]。因此,基于透视图像的匹配方法就不能完全推广到鱼眼图像的匹配。

根据鱼眼图像近似投影模型^[13,14],入射光线首先线性地投影到单位球面上,然后再非线性地映射到鱼眼图像上。本文给出了一种基于球面透视投影的鱼眼图像匹配方法。在只要估计鱼眼摄像机焦距和图像主点坐标的情况下,该方法先将鱼眼图像上的特征点投影到单位球面上,在单位球面上建立对应关系,再由非线性映射关系确定鱼眼图像之间对应点。该方法不需要精确估计鱼眼镜头的变形参数,不需要校正图像,并且对畸变较大的鱼眼图像区域也同样有效。

2 鱼眼图像的球面透视投影模型

正如文献[13,14]中描述的,鱼眼摄像机成像主要有两步:首先世界坐标系中的一个三维点线性地投影到一个虚拟的单位球面上,该球面通常也称为球面图像,然后单位球面上的点非线性地映射到鱼眼图像上。如图 1 所示,一个三维点 Q 先投影为球面上的点 q ,然后 q 点经过鱼眼摄像机的非线性模型映射为鱼眼图像点 m 。

令 (R, T) 表示世界坐标系与摄像机坐标系之间的旋转矩阵和平移向量,则三维空间点 Q 和单位球面点 q 之间的关系为

$$q = \frac{R \cdot Q + T}{\|R \cdot Q + T\|} \quad (1)$$

而单位球面点 q 经过鱼眼摄像机模型映射到鱼眼图像上的点 m 。

选择鱼眼镜头模型为等距模型^[8],即

$$r = f\theta + k_1\theta^3 + k_2\theta^5 + \dots, \quad (2)$$

式中 r 为鱼眼图像点到图像中心的距离, f 为鱼眼

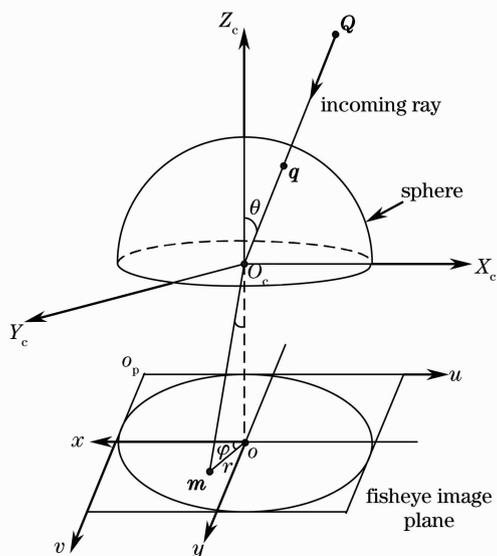


图 1 鱼眼图像的球面透视投影模型示意图
Fig. 1 Spherical perspective projection model for fisheye images

镜头焦距, θ 为入射光线与鱼眼镜头光轴的夹角, k_1, k_2, \dots 为系数。

在球面坐标系中,单位球面上的点可以表示为

$$q_i = (\sin \theta_i \cos \varphi_i \quad \sin \theta_i \sin \varphi_i \quad \cos \theta_i)^T, \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

式中 $\theta_i = \frac{r_i}{f} \in [0, \pi]$, $\varphi_i = \arctan\left(\frac{v_i - v_0}{u_i - u_0}\right) \in [0, 2\pi]$, $r_i = \sqrt{(u_i - u_0)^2 + (v_i - v_0)^2}$, $(u_i, v_i)^T$ 为鱼眼图像上点的像素坐标, $(u_0, v_0)^T$ 为鱼眼图像的主点坐标, N 表示鱼眼图像上特征点的数目。

3 基于球面透视投影的鱼眼图像匹配算法

3.1 估计旋转矩阵和平移向量

如图 2 所示,令 O 和 O' 分别为两幅球面透视图

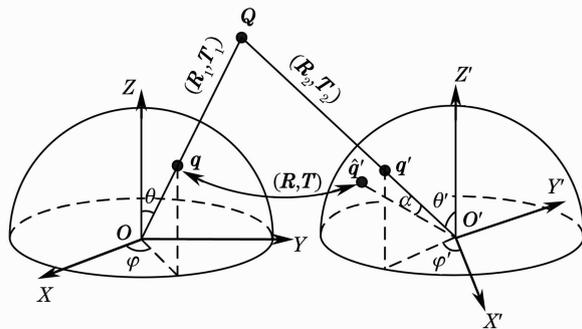


图 2 左球面图像和右球面图像对示意图
Fig. 2 Left spherical image and right spherical image

像所在摄像机坐标系的原点的三维坐标,三维点 Q 在两幅球面透视图像上的投影点三维坐标分别为 q 和 q' ,则

$$\lambda_1 q = \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{Q} + \mathbf{T}_1, \quad (4)$$

$$\lambda_2 q' = \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{Q} + \mathbf{T}_2, \quad (5)$$

式中 λ_1 和 λ_2 是非零因子, $(\mathbf{R}_1, \mathbf{T}_1)$ 为 Q 所在的世界坐标系与 q 所在的摄像机坐标系间的旋转矩阵和平移向量, $(\mathbf{R}_2, \mathbf{T}_2)$ 为 Q 所在的世界坐标系与 q' 所在的摄像机坐标系间的旋转矩阵和平移向量。

由(4)式和(5)式,可得

$$\lambda_2 q' = \lambda_1 \mathbf{R}q + \mathbf{T}, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_1^{-1}$, $\mathbf{T} = \mathbf{T}_2 - \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^{-1} \cdot \mathbf{T}_1$ 。

$$\text{令 } \mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \text{ 和 } \mathbf{T} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}, \text{ 则由(3)式}$$

和(6)式,可得

$$\lambda_2 \begin{pmatrix} \sin \theta' \cos \varphi' \\ \sin \theta' \sin \varphi' \\ \cos \theta' \end{pmatrix} = \lambda_1 \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}. \quad (7)$$

由(7)式,可消去非零因子 λ_2 ,得到约束关系式

$$\begin{cases} \frac{\sin \theta' \cos \varphi'}{\cos \theta'} = \frac{\lambda_1 r_{11} \sin \theta \cos \varphi + \lambda_1 r_{12} \sin \theta \sin \varphi + \lambda_1 r_{13} \cos \theta + t_x}{\lambda_1 r_{31} \sin \theta \cos \varphi + \lambda_1 r_{32} \sin \theta \sin \varphi + \lambda_1 r_{33} \cos \theta + t_z} \\ \frac{\sin \theta' \sin \varphi'}{\cos \theta'} = \frac{\lambda_1 r_{21} \sin \theta \cos \varphi + \lambda_1 r_{22} \sin \theta \sin \varphi + \lambda_1 r_{23} \cos \theta + t_y}{\lambda_1 r_{31} \sin \theta \cos \varphi + \lambda_1 r_{32} \sin \theta \sin \varphi + \lambda_1 r_{33} \cos \theta + t_z} \end{cases}. \quad (8)$$

令 $\lambda_1 r_{ij}$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$)为一项,则由两幅球面图像之间一对对应点能提供关于参数 λ_1 、旋转矩阵 \mathbf{R} 中元素及平移向量 \mathbf{T} 中元素的两个线性约束。因此,根据直接线性变换(DLT)方法^[11]可以得到

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{L} = 0, \quad (9)$$

式中 \mathbf{L} 为包含 12 个未知元素的列向量,即

$$\mathbf{L} = (\lambda_1 r_{11} \quad \lambda_1 r_{12} \quad \lambda_1 r_{13} \quad \lambda_1 r_{21} \quad \lambda_1 r_{22} \quad \lambda_1 r_{23} \quad \lambda_1 r_{31} \quad \lambda_1 r_{32} \quad \lambda_1 r_{33} \quad t_x \quad t_y \quad t_z)^T, \quad (10)$$

而 \mathbf{A} 为两幅球面透视图像间由 N 对对应点构成的 $2N \times 12$ 的系数矩阵,即

$$\mathbf{A} = (\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{A}_{2N-1} \quad \mathbf{A}_{2N})^T$$

$$\mathbf{A}_1 = (\sin \theta_1 \cos \varphi_1 \cos \theta'_1, \sin \theta_1 \sin \varphi_1 \cos \theta'_1, \cos \theta_1 \cos \theta'_1, 0, 0, 0, -\sin \theta'_1 \cos \varphi'_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1, -\sin \theta'_1 \cos \varphi'_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1, -\sin \theta'_1 \cos \varphi'_1 \cos \theta_1, \cos \theta'_1, 0, -\sin \theta'_1 \cos \varphi'_1)$$

$$\mathbf{A}_2 = (0, 0, 0, \sin \theta_1 \cos \varphi_1 \cos \theta'_1, \sin \theta_1 \sin \varphi_1 \cos \theta'_1, \cos \theta_1 \cos \theta'_1, -\sin \theta'_1 \sin \varphi'_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1, -\sin \theta'_1 \sin \varphi'_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1, -\sin \theta'_1 \sin \varphi'_1 \cos \theta_1, 0, \cos \theta'_1, -\sin \theta'_1 \sin \varphi'_1)$$

.....

$$\mathbf{A}_{2N-1} = (\sin \theta_N \cos \varphi_N \cos \theta'_N, \sin \theta_N \sin \varphi_N \cos \theta'_N, \cos \theta_N \cos \theta'_N, 0, 0, 0, -\sin \theta'_N \cos \varphi'_N \sin \theta_N \cos \varphi_N, -\sin \theta'_N \cos \varphi'_N \sin \theta_N \sin \varphi_N, -\sin \theta'_N \cos \varphi'_N \cos \theta_N, \cos \theta'_N, 0, -\sin \theta'_N \cos \varphi'_N)$$

$$\mathbf{A}_{2N} = (0, 0, 0, \sin \theta_N \cos \varphi_N \cos \theta'_N, \sin \theta_N \sin \varphi_N \cos \theta'_N, \cos \theta_N \cos \theta'_N, -\sin \theta'_N \sin \varphi'_N \sin \theta_N \cos \varphi_N, -\sin \theta'_N \sin \varphi'_N \sin \theta_N \sin \varphi_N, -\sin \theta'_N \sin \varphi'_N \cos \theta_N, 0, \cos \theta'_N, -\sin \theta'_N \sin \varphi'_N). \quad (11)$$

由 DLT 方法^[11]可知,应用至少 6 对对应点能线性地求解(9)式中的未知参数。

由于利用 DLT 方法估计出的参数 $\lambda_1 r_{ij}$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$)为 λ_1 与 r_{ij} ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$)的乘积,所以需要对其进行分离。令

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \lambda_1 r_{11} & \lambda_1 r_{12} & \lambda_1 r_{13} \\ \lambda_1 r_{21} & \lambda_1 r_{22} & \lambda_1 r_{23} \\ \lambda_1 r_{31} & \lambda_1 r_{32} & \lambda_1 r_{33} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

对(12)式两边同时取行列式,则有

$$|\mathbf{B}| = \begin{vmatrix} \lambda_1 r_{11} & \lambda_1 r_{12} & \lambda_1 r_{13} \\ \lambda_1 r_{21} & \lambda_1 r_{22} & \lambda_1 r_{23} \\ \lambda_1 r_{31} & \lambda_1 r_{32} & \lambda_1 r_{33} \end{vmatrix} = \lambda_1^3 \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} = \lambda_1^3 |\mathbf{R}|. \quad (13)$$

由于旋转矩阵 \mathbf{R} 是正交阵, 其行列式 $|\mathbf{R}| = 1$, 所以参数 $\lambda_1 = \sqrt[3]{|\mathbf{B}|}$ 。

讨论如何根据在单位球面图像上的反投影误差来优化旋转矩阵和平移向量。如图 2 所示, \mathbf{Q} 在右球面透视图像上的投影点 \mathbf{q}' 和左球面透视图像上的投影点 \mathbf{q} 经过 (\mathbf{R}, \mathbf{T}) 与右球面透视图像上的反投影点 \mathbf{q}' 之间在球面上构成了一个夹角

$$\alpha = \theta(\mathbf{q}', \mathbf{q}') = \theta[\mathbf{q}', (\mathbf{R}\mathbf{q} + \mathbf{T})], \quad (14)$$

式中 $\theta(\cdot, \cdot)$ 为两个向量 $\mathbf{O}'\mathbf{q}'$ 和 $\mathbf{O}'\mathbf{q}'$ 之间的夹角。反之, 在左球面透视图像上 \mathbf{q} 和 \mathbf{q}' 与左球面透视图像上的反投影点 \mathbf{q} 之间也构成了一个夹角。

因此, 在已知两幅球面透视图像上一组对应点集的情况下, 通过最小化两幅球面透视图像上的反投影点误差和, 得到最优的旋转矩阵和平移向量 (\mathbf{R}, \mathbf{T}) , 即

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N \{ \theta[\mathbf{q}', (\mathbf{R}\mathbf{q}_i + \mathbf{T})] + \theta[\mathbf{q}_i, [\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{q}'_i - \mathbf{T})]] \} \right\}. \quad (15)$$

3.2 匹配算法

为了提高图像匹配正确率, 文献[6, 7, 10]等都采用了随机抽样一致 (RANSAC) 策略剔除外点。在 RANSAC 方法中, 重复若干次的随机采样, 通过

寻找匹配误差的最小值得到一组与估计的模型一致的数目最多的内点, 并从这些内点中重新计算出精确的模型参数。本文的鱼眼图像匹配算法中也使用 RANSAC 策略, 但是在计算旋转矩阵和平移向量时选择样本点的方法与随机选择样本点的 RANSAC 方法不同。图 3 是对三维标定块拍摄的两幅鱼眼图像, 通过这两幅鱼眼图像, 简要介绍随机选择计算模型参数样本点的方法。

1) 在左鱼眼图像上随机选择 6 个特征点, 如图 3(a) 的鱼眼图像中标记为“o”所示。

2) 对随机选择的 6 个特征点中的每个特征点应用 Zhang 等^[15]的方法在图 3(b) 的鱼眼图像上估计出一组候选匹配点, 图 3(b) 鱼眼图像中矩形方框内标记为圆点的就是分别与图 3(a) 鱼眼图像上 6 个特征点相对应的 6 组候选匹配点。

3) 在图 3(b) 鱼眼图像上 6 组候选样本点中, 分别从每一组随机选择一个点, 组成与图 3(a) 鱼眼图像上 6 个特征点相对应的一组样本点。由于 6 组候选样本点中的每一组都包含有若干个, 因此, 在图 3(b) 鱼眼图像上可能有多组候选样本点与图 3(a) 鱼眼图像上的 6 个特征点相对应。

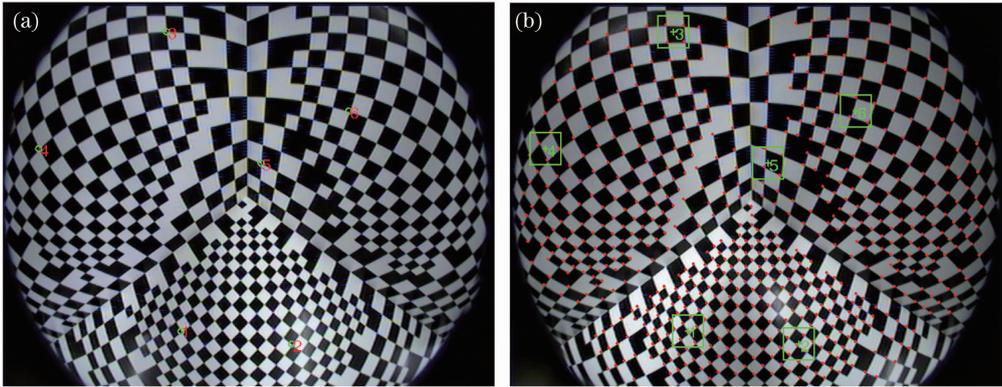


图 3 随机选择计算模型参数的样本点示意图

Fig. 3 Selecting sample points of the calculation model parameters randomly

因此, 通过估计两幅鱼眼图像间的旋转矩阵和平移向量的基于球面透视投影的鱼眼图像匹配算法可以归纳如下。

步骤 1: 利用 Harris 等^[16]的方法分别提取左、右两幅鱼眼图像上的所有特征点, 令其为 \mathbf{m}_i 与 \mathbf{m}'_j , 其中 i, j 为特征点数目。

步骤 2: 通过拟合鱼眼图像的圆形视野边缘, 粗略估计出摄像机的焦距 f 和鱼眼图像的主点坐标 $(u_0, v_0)^T$ 。

步骤 3: 应用给出的选择样本点的方法在左、右鱼眼图像上分别选择 6 个样本点, 构成一组样本点 $\{\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \mathbf{m}_3, \mathbf{m}_4, \mathbf{m}_5, \mathbf{m}_6\} \leftrightarrow \{\mathbf{m}'_1, \mathbf{m}'_2, \mathbf{m}'_3, \mathbf{m}'_4, \mathbf{m}'_5, \mathbf{m}'_6\}$, 根据鱼眼图像的焦距 f 和主点坐标 $(u_0, v_0)^T$ 映射到单位球面上, 分别得到左球面透视图像点和右球面透视图像点 $\mathbf{q}_i \leftrightarrow \mathbf{q}'_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 。

步骤 4: 利用左球面透视图像点和右球面透视图像点 6 对样本点 $\mathbf{q}_i \leftrightarrow \mathbf{q}'_i (i=1, 2, \dots, 6)$, 根据 2.1 节中的算法估计出两幅鱼眼图像之间的旋转矩阵和

平移向量；由于在右鱼眼图像上存在多组候选样本点集与左鱼眼图像上随机选择的6个特征点集相对应，所以可以计算出多组旋转矩阵和平移向量 $(\mathbf{R}_k, \mathbf{T}_k)$ 。

步骤5：给定球面图像点及反投影点的夹角误差阈值 α_T ，根据估计出的旋转矩阵和平移向量 $(\mathbf{R}_k, \mathbf{T}_k)$ 来确定两幅鱼眼图像上特征点中的内点数目，选择内点数目最多的一组样本点估计出的旋转矩阵和平移向量作为初值，通过最小化代价函数(15)式来优化旋转矩阵和平移向量。

步骤6：根据优化的旋转矩阵和平移向量来最终确定左右两幅鱼眼图像之间的正确对应点。

4 实验结果及分析

给出了两组不同场景的真实鱼眼图像实验结果。第一个实验用三维坐标已知的标定块作为背景拍摄了一组鱼眼图像，选择了其中两幅图像来验证提出的匹配方法；另一个实验是用鱼眼摄像机对实验室场景拍摄了图像进行实验。

4.1 三维标定块的鱼眼图像实验

第一组实验中，利用鱼眼镜头对三维标定块获取了12幅图像，图像分辨率为640 pixel×480 pixel。实验中选择第1幅及第10幅图像组成一对鱼眼图像对，如图3所示。实验中先根据不同的搜索窗口验证了选择样本点集方法对于第一幅图像中随机选择的6个特征点能够在第二幅图像上找到候选匹配点的可能性，每一个搜索窗口随机进行了100次实验，实

验结果如表1所示。表1的结果说明搜索窗口在30 pixel×40 pixel时，在第二幅图像上基本能确定对应的候选匹配点集范围。

表1 估计的确定样本点集概率随搜索窗口大小变化的结果

Table 1 Probability of correctly estimated sample point changes with size of search window

Size of search window / pixel	Probability of correctly estimated sample point / %
20×20	63
20×30	89
30×40	95
40×40	96

利用提出的随机选择样本点集的方法，在图3(a)中随机选择的6个特征点中，每一个特征点在图3(b)中的矩形框(矩形方框大小为40 pixel×40 pixel)内有不同数量的候选对应点，即分别有7、6、4、3、3、3个候选的匹配点。因此，在图3(b)与图3(a)中6个样本点集对应的样本点集合有 $C_7^1 \times C_6^1 \times C_4^1 \times C_3^1 \times C_3^1 \times C_3^1 = 4536$ 。先利用Harris等^[16]的方法提取了图3中两幅鱼眼图像的角点，其中图3(a)有841个特征点，图3(b)有849个特征点，并估计了鱼眼镜头的焦距为150 pixel，图3(a)的主点坐标为 $(314.65, 239.91)^T$ ，图3(b)的主点坐标为 $(317.25, 246.07)^T$ ；然后根据匹配算法确定了两幅鱼眼图像之间正确的匹配点对为699对，正确率为82.33%，匹配的结果如图4所示，图中红色“+”表示正确的匹配点，绿色“·”为错误匹配点(彩图见网络电子版)。

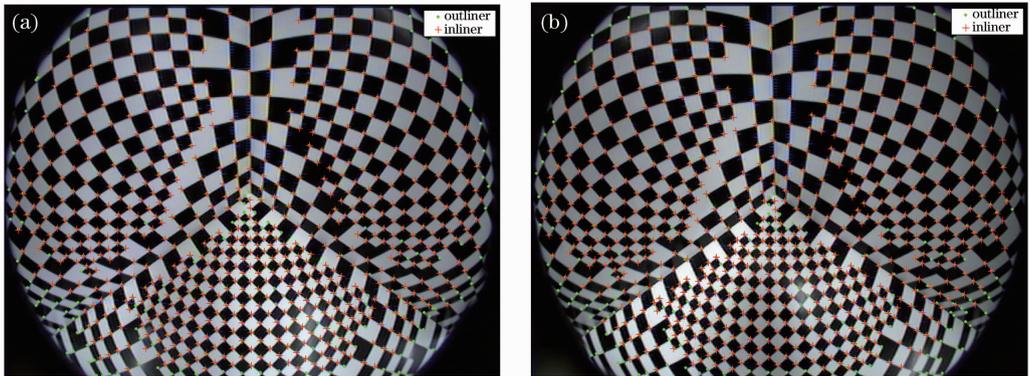


图4 两幅鱼眼图像匹配结果

Fig. 4 Matching result of two fisheye images

为了进一步验证提出的方法，实验中利用两幅图像正确的匹配点以及鱼眼图像的参数重建了三维标定块，结果如图5所示。图5是重建的标定块三个平面上的点，各坐标轴均为规一化后的空间距离，

直线表示三个平面的分界线，通过用部分重建三维点拟合空间平面并计算其夹角，结果分别为88.70°、91.62°和92.34°，这与标定块三个面相互垂直的实际情况比较接近，只是由于鱼眼图像变形较大而偏

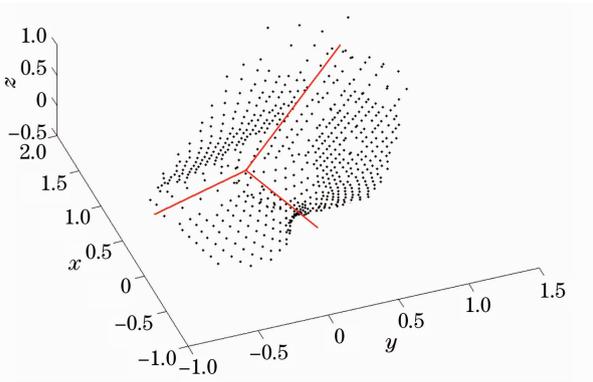


图5 鱼眼图像特征点三维重建结果

Fig. 5 Result of 3D reconstruction of feature points on the fisheye image

差稍大些。

4.2 真实场景的鱼眼图像实验

该实验中使用的是用鱼眼摄像机拍摄的两幅实

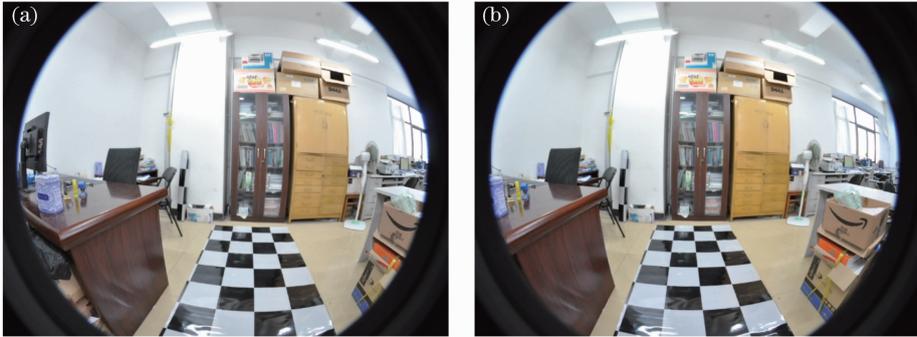


图6 实验室场景的两幅鱼眼图像

Fig. 6 Two fisheye images of laboratory scene



图7 两幅鱼眼图像间特征点匹配结果

Fig. 7 Matching result of two fisheye images

为了进一步说明提出的方法,利用两幅图像间的匹配点进行三维重建,重建结果如图8所示。图8(a)是重建的三维点正视图,红色矩形内的点为鱼眼图像中书柜表面的重建三维点,而图8(b)是重建三维点侧视图,红色矩形内几乎在同一直线上的点对应的是鱼眼图像中书柜表面三维重建点,从这

验室场景的鱼眼图像,如图6所示,原始图像大小为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。实验中先利用 Harris 等^[16]的方法提取出两幅鱼眼图像上的特征点,在 Harris 角点检测方法中,选择的高斯函数方差为 1、非极大抑制邻域的 3 pixel、角点数阈值为 500。

然后,根据提出的方法确定了两幅鱼眼图像之间的对应点,结果如图7所示,红色“·”点表示在一幅图像上的特征点,绿色“+”表示另一幅图像上的特征点,蓝色直线表示对应关系,而单个红色或绿色特征点则表示在另一幅图像上没有找到相应的对应点。在确定正确的对应点时,选择的夹角误差阈值 $\alpha_T = 0.6^\circ$,在初始匹配 438 个对应点中有 353 对正确的对应点,两幅鱼眼图像间特征点的正确匹配率为 81%。

个角度上可以看出书柜表面重建三维点绝大部分在同一个平面上,这与书柜表面为一平面是相符合的。图9是贴纹理后的三维重建结果图,从图中可以看出,在鱼眼图像变形较小的区域重建结果较好,而在鱼眼图像变形更严重的边缘,重建三维点的误差就要大些。

为了检测鱼眼图像焦距估计的准确性对匹配结果的影响,本文应用两组鱼眼图像进行了实验,其中一组实验所用的图像大小为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,另一组图像大小为 $2144 \text{ pixel} \times 1424 \text{ pixel}$ 。实验结果如表2所示。表中第二列是拟合鱼眼图像外边缘所选取点的个数。从表中看到,两组实验中,选取不同数目的点拟合的外边缘计算的焦距长度相差不大,对实验结果影响很小。

另外,选取表2第二组($2144 \text{ pixel} \times 1424 \text{ pixel}$)中的两幅鱼眼图像分别比较了利用 Micusik^[6]的方法,Barreto^[7]的方法和本课题组提出的方法得到的特

征点正确匹配率及运行时间。实验中检测特征点都选择参数一致的 Harris^[16]方法,然后分别根据三种方法进行实验,每种方法都进行了 50 次独立实验,得到两幅鱼眼图像间特征点正确匹配率的平均值及运行时间平均值。三种算法的程序都用 Matlab 软件实

现,程序运行平台为主频 2.93 GHz,内存 2.93 GB 的计算机。三种方法比较结果如表 3 所示,从表 3 中的结果可以看出,在不需要准确估计鱼眼摄像机变形参数的情况下,利用所提出的方法比 Micusik^[6]的方法得到更准确的匹配结果,并且本文

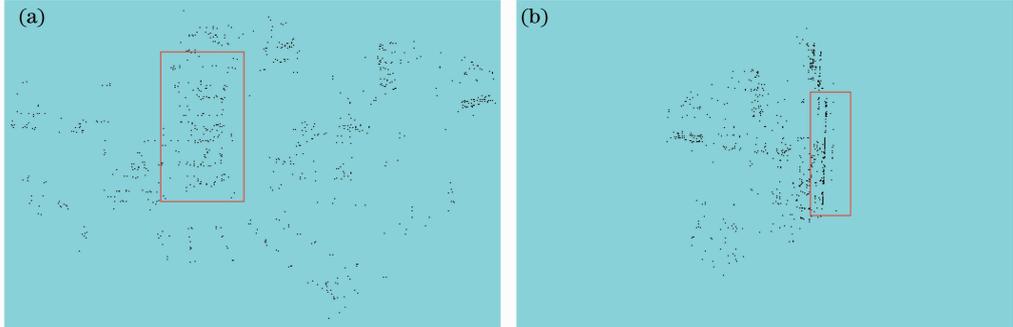


图 8 (a)重建三维点的正视图;(b)重建三维点的侧视图

Fig. 8 (a) Front view and (b) side view of reconstructed 3D points

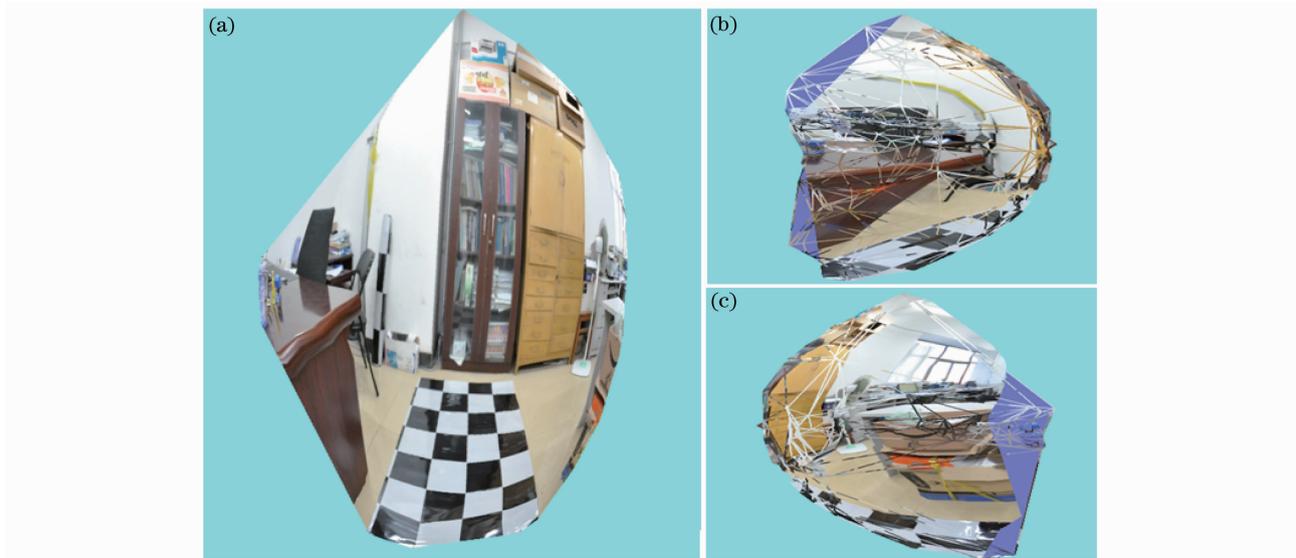


图 9 (a)贴纹理后正向的重建结果;(b),(c)向左右方向旋转一定角度后的重建结果

Fig. 9 (a) Result of the positive reconstruction; (b), (c) results of reconstruction after rotating a certain angle to left and right respectively

表 2 鱼眼图像焦距估计的准确性对实验结果的影响

Table 2 Influence of the accuracy of the estimated focal length on experimental result

Size of image /pixel	Number of points	Focal length /pixel	Correct matching rate /%
640×480	10	187.5638	81
	50	187.3077	80
2144×1424	10	548.8586	83
	50	549.6797	83

表 3 三种方法估计的特征点正确匹配率比较

Table 3 Comparison of correct matching rate by using three kinds of methods to estimate feature points

Method	Correct matching rate /%	Runtime /s
Micusik's method ^[6]	75	10.75
Barreto's method ^[7]	61	10.77
Ours	83	10.96

的方法比 Barreto^[7]的方法中通过估计径向变形基本矩阵来确定正确匹配点的准确率明显要高些;而在运行时间上本文的方法耗时稍微多一点,这相对于近 1000 个特征点来说可以忽略。

5 结 论

研究了一种基于球面透视投影模型的鱼眼图像匹配算法。在仅仅根据鱼眼图像估计焦距和主点坐标的情况下,通过估计与鱼眼图像对应的球面投影图像间的旋转矩阵和平移向量来建立图像特征点的对应区域,并根据优化的旋转矩阵及平移向量参数来确定鱼眼图像之间的正确匹配点。实验结果表明,在畸变较大的鱼眼图像上,所提出的方法能得到比较满意的匹配结果。但是,由于鱼眼图像边缘畸变较大的图像点是光线经过多次折射后投影到图像平面上得到的,而在重建三维点时实际上是估计两条直射光线的交点,因此估计的三维点误差较大。

参 考 文 献

- 1 S. Li. Binocular spherical stereo [J]. *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, 2008, **9**(4): 589~600
- 2 Intersil. Intersil Announces Fisheye Lens Image Correction Technology [OL]. <http://www.intersil.com/en/about-intersil/press-release/intersil-announces-fisheye-lens-image-correction-technology2098.html>, (2012.10.23)
- 3 T. Svoboda, T. Pajdla. Epipolar geometry for central catadioptric cameras [J]. *Int. J. Computer Vision*, 2002, **49**(1): 23~37
- 4 C. Geyer, K. Daniilidis. Conformal rectification of omnidirectional stereo pairs [C]. *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, 2003, **7**: 73~78
- 5 B. Micusik, T. Pajdla. Estimation of omnidirectional camera model from epipolar geometry [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003, **1**: 485~490
- 6 B. Micusik, D. Martinec, T. Pajdla. 3D metric reconstruction from uncalibrated omnidirectional images [C]. *Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, 2004, 545~550
- 7 J. P. Barreto, K. Daniilidis. Fundamental matrix for cameras with radial distortion [C]. *IEEE Conference on Computer Vision*, 2005, **1**: 625~632
- 8 J. Kannala, S. S. Brandt. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**(8): 1335~1340
- 9 C. Hughes, P. Denny, M. Glavin *et al.*. Equidistant fish-eye calibration and rectification by vanishing point extraction [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, **32**(12): 2289~2296
- 10 Xu Zhenhui, Zhang Feng, Sun Fengmei *et al.*. Quasi-dense matching by neighborhood transfer for fish-eye images [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(9): 1159~1167
许振辉, 张 峰, 孙凤梅等. 基于邻域传递的鱼眼图像的准稠密匹配[J]. *自动化学报*, 2009, **35**(9): 1159~1167
- 11 R. Hartley, A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision (Second Edition)* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
- 12 Hu Chunhai, Xiong Ying. Graph-cut-based stereo-matching algorithm using image segmentation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 43~47
胡春海, 熊 英. 利用图像分割的基于图割的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 43~47
- 13 C. Geyer, K. Daniilidis. Catadioptric projective geometry [J]. *Int. J. Computer Vision*, 2001, **45**(3): 223~243
- 14 Ying Xianghua, Hu Zhanyi. Fisheye lense distortion correction using spherical perspective projection constraint [J]. *Chinese J. Computers*, 2003, **26**(12): 1702~1708
英向华, 胡占义. 一种基于球面透视投影约束的鱼眼镜头校正方法 [J]. *计算机学报*, 2003, **26**(12): 1702~1708
- 15 Z. Zhang, R. Deriche, O. Faugeras *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
- 16 C. Harris, M. J. Stephens. A combined corner and edge detector [C]. *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, 1988, 147~151

栏目编辑: 李文喆