

基于旋转双棱镜的视场扩大方法和评价

漆勇, 沈英, 黄峰*, 吴衍誉, 吴靖

福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108

摘要 旋转双棱镜系统可以通过光束控制来扩大成像视场、增大棱镜顶角,可提高视场角扩大倍率,但同时加剧成像畸变的问题。为了实现大视场实时成像的目的,针对大顶角双棱镜系统提出了一种快速畸变校正和视频拼接的方法。所提方法采用多次相机预标定、建立查表插值重投影算法,配合图像尺度变换及基于搜寻最佳缝合线的多分辨率融合算法,实现对两路旋转双棱镜成像系统的实时畸变校正和拼接。针对视场扩大情况,提出一种基于矢量形式折射定律的视场扩大评价方法,并以视场角扩大因子作为评价指标。仿真结果表明拼接视场水平视场角扩大因子可达 1.50,垂直视场角扩大因子可达 1.30。实验结果验证了该扩大视场方法的可行性,且可达到 30 frame/s 的实时畸变校正及拼接。

关键词 成像系统; 旋转双棱镜; 视场扩大及评价; 畸变校正; 最佳缝合线; 多分辨率融合

中图分类号 O439; TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1611001

Method and Evaluation of Enlarging Field of View Based on Rotational Double Prisms

Qi Yong, Shen Ying, Huang Feng*, Wu Xianyu, Wu Jing

College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

Abstract The rotating double-prism system allows the expansion of the imaging field of view and increase of apex angle of prisms through beam control, therefore increasing the magnification of the field of view but aggravating imaging distortion. This paper proposes a fast distortion correction and video mosaic method for large-apex-angle double-prism systems to achieve real-time imaging with a large field of view. The real-time distortion correction and video mosaic of a two-way rotational double-prism imaging system are performed by multiple camera pre-calibrations, the construction of a table-lookup-based interpolation re-projection algorithm, and the application of a multi-resolution fusion algorithm with image scale transform based on the search for the optimal seam. For the expansion of the field of view, we propose an evaluation method of the expanded field of view based on the law of refraction in the vector form, and the field angle expansion factor is used as the evaluation index. The simulation results show that the horizontal and vertical field angle expansion factors of the mosaic field of view can reach 1.50 and 1.30, respectively. The experimental results verify the feasibility of the proposed method and achieve real-time distortion correction and video mosaic at 30 frame/s.

Key words imaging systems; rotational double prisms; field of view expansion and evaluation; distortion correction; optimal seam; multi-resolution fusion

OCIS codes 110.2960; 150.1488; 150.1135; 230.5480

1 引言

大视场图像/视频能给人带来视觉享受,也能够

提供更多的空间信息,以便后续进行目标识别、目标追踪等。随着科学技术的不断进步,扩大视场技术正逐渐走向成熟,且越来越多地应用于安防监控、遥

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-03-02; 录用日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(62005049)、福建省中青年教育科研项目(JAT190005)

通信作者: *huangf@fzu.edu.cn

感测绘、无人驾驶等领域。

传统获取大视场的方法可以分为三种:1)使用广角镜头^[1],在这种方法中,通常镜头的视角越大,则视场扩大效果越明显,但镜头带来的畸变也越严重,成像质量得不到保证;2)移动或旋转单个成像传感器以拍摄多幅图片,并利用图像拼接技术得到一幅大视场图片^[2],这种方法操作繁琐、灵活性差,应用范围也很有限;3)将多个探测器固定,采集多路视频,并利用视频拼接技术得到一路大视场的视频^[3]。这种方法稳定性较好、应用较广泛,但固定的成像传感器限制了装置的灵活性。典型的旋转双棱镜设备由一对共轴可独立旋转的楔形棱镜组成^[4],目前研究人员对这方面的研究大多集中在光束或视轴的指向调整方面^[4-8]。旋转双棱镜系统可以在一定角度内连续任意改变光束或视轴的指向,进而改变成像视场,并会扩大单个摄像头的最大成像视场,基于这些特点,利用旋转双棱镜系统来扩大视场的方法相比于传统扩大视场的方法具有应用更灵活的优点。此外,通过增大棱镜顶角可以改善视场扩大效果,但也会使成像畸变更加显著。

为了校正旋转双棱镜系统带来的成像畸变,Lavigne等^[9]根据空间折射模型分析得出了旋转双棱镜导致的成像畸变特性,该方法是基于单映性变

换的校正方法,属于线性校正方法,计算量较少,校正速度快,但校正质量较差。周远等^[10]建立双棱镜空间折射模型,利用逆光线追迹方法实现畸变校正,该方法的校正效果较好,但该校正方法是非线性的,校正速度较慢。

针对上述问题,本文提出了一种采用了大顶角棱镜的两路旋转双棱镜系统的扩大视场方法。利用多次相机预标定的方法得到标定参数,并结合基于查找表的线性插值重投影算法对该旋转双棱镜系统的成像畸变进行校正,提高了畸变校正的质量和速度,实现了对视频实时畸变的校正。在完成畸变校正的基础上,进行图像尺度变换及基于搜寻最佳缝合线的图像融合,以提升视频拼接的质量及速度。

2 扩大视场方法原理

2.1 视频实时畸变校正方法

旋转双棱镜成像系统主要由成像传感器和双棱镜组成,图 1 描述了旋转双棱镜成像系统的工作原理。其中两楔形棱镜安装在成像传感器前面,且具有相同的顶角和折射系数,两棱镜 μ_1 、 μ_2 可绕 z 轴转动,规定沿 y 轴正方向顺时针旋转为正、逆时针旋转为负,旋转包括两棱镜整体旋转和相对旋转。

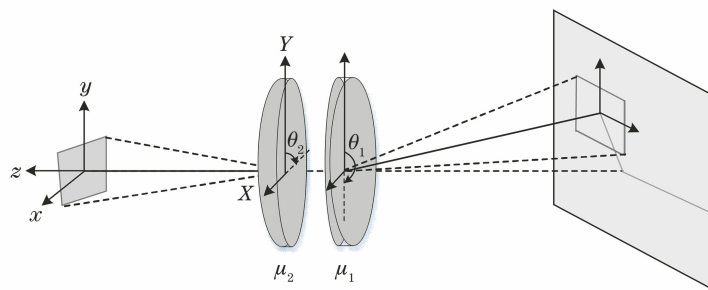


图 1 旋转双棱镜系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of rotational double-prism system

为了方便描述,定义双棱镜位置为 (θ_1, θ_2) ,其中: θ_1 为双棱镜整体转角,取值范围为 $-180^\circ \leq \theta_1 \leq 180^\circ$; θ_2 为双棱镜之间的相对转角,取值范围为 $0 \leq \theta_2 \leq 180^\circ$ 。当双棱镜位置为 $(0, 0)$,即初始位置,双棱镜的放置为斜平平斜,此时光线的等效偏向角为 0。

该成像系统的畸变的来源包括双棱镜带来的成像畸变、镜头畸变及双光轴问题。其中双光轴问题可以拆解为光轴平行性问题,以及两路双棱镜系统成像时存在的视差问题。在加工安装设备时,用大口径平行光管对两光轴进行校正,将平行性误差控制在 $60''$ 内;两路双棱镜系统的孔径间距为 10 cm、

拍摄物距为 6 m 以上时,视差角在 0.95° 以内。因此双光轴问题的影响是很小的,可以忽略。镜头畸变是相机生产时不可避免的,畸变较小,但不可以忽略。双棱镜带来的成像畸变主要是由楔形棱镜对光束的非线性偏折造成的,该畸变较大,是本文畸变的主要来源。

当棱镜绕轴旋转时,不同的视场偏转方向会引起不同的成像畸变,即旋转双棱镜系统引入的是一种动态变参数成像畸变。针对该变参数成像畸变,仅使用线性模型对内、外参矩阵进行描述是不够的,这里结合非线性模型进行描述,非线性模型可表

示为

$$\begin{cases} \bar{x} = x + D_x(x, y) \\ \bar{y} = y + D_y(x, y) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: (\bar{x}, \bar{y}) 为无畸变理想图像平面坐标; (x, y) 是实际图像平面坐标; $D_x(x, y)$ 为 x 方向非线性总畸变, $D_y(x, y)$ 为 y 方向非线性总畸变, 二者可分别表示为

$$\begin{cases} D_x(x, y) = x(k_1 r^2 + k_2 r^4) + \\ \quad [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] + s_1 r^2 \\ D_y(x, y) = y(k_1 r^2 + k_2 r^4) + \\ \quad [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy] + s_2 r^2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; k_1, k_2 为径向畸变系数; p_1, p_2 为切向畸变系数; s_1, s_2 为薄棱镜畸变系数。

考虑到旋转双棱镜会改变光轴的指向, 带来的畸变是动态变参数。本文在利用已有较成熟的标定法^[11-12]计算得到的内外参矩阵和径向畸变系数的基础上, 新加入薄棱镜畸变和切向畸变系数进行计算, 并利用 Levenberg-Marquardt 算法^[13]对参数进行非线性优化。Levenberg-Marquardt 算法是通过迭代来最小化目标函数, 最小化目标函数可表示为

$$F(X) = \sum_{i=1}^n f(\mathbf{M}_i, k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i) = \sum_{i=1}^n (\alpha_x \bar{x}_{d,i} + x_0 - x_i)^2 + (\alpha_y \bar{y}_{d,i} + y_0 - y_i)^2, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}_i, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i$ 为利用线性模型计算得到的参数; α_x, α_y 分别为 x, y 轴的尺度因子; (x_0, y_0) 为像面主点位置; $(\bar{x}_{d,i}, \bar{y}_{d,i}), (x_i, y_i)$ 分别为第 i 个点的模型理论坐标与实际坐标。

为了实现该动态变参数成像畸变的校正, 本文提出一种多次相机预标定方法, 该方法分两步进行: 1) 考虑到校正质量, 对双棱镜的整体转角和相对转角每隔 10° 标定一次; 2) 建立一个标定数据库, 将每次标定所得的参数按双棱镜的位置存储在其中。

畸变校正即根据所用的模型将畸变像素点逐一映射到理想位置, 该模型可以通过求解内外参矩阵和畸变参数矩阵得到。考虑到进行校正映射时校正像素点往往不会落在整数位置, 本文采用综合性能较好的双线性插值算法解决这个问题。校正过程中, 若对每一帧都输入标定参数并对其进行校正, 势必会降低运行速度, 本文采用对标定参数建立查找表、再利用重映射算法对每一帧进行畸变校正的方法, 从而提高畸变校正速度, 实现了视频实时畸变校正。

2.2 快速视频拼接算法

为了进一步扩大视场, 本文将畸变校正后的两幅图像进行拼接, 图像拼接主要包括配准和融合。图像配准是为了根据特定空间变换将多幅有重叠的图像映射到同一参考图像上, 以实现信息匹配。本文将鲁棒性较好且运行速度较快的加速稳健特性 (SURF) 算法^[14-16]与随机抽样一致 (RANSAC) 算法相结合, 以剔除误匹配点^[17]。

图像融合是为了使拼接后的图像在重叠部分过渡得更自然。当图像间亮度差异较大或有运动物体时, 融合结果会出现重影、鬼影等。为了尽量消除这些问题、增强最终的图像融合效果, 本文采用基于寻找最佳缝合线的融合方法。

最佳缝合线是指两幅图像重叠区域灰度差异最小的连续像素点的集合。图割法^[18]是计算最佳缝合线的一种有效方法。本文采用最大流图割算法^[19], 它是以求得两棵不相交的搜索树 S 和 T 为目标, 经过不断迭代求得最佳缝合线。最大流图割算法的迭代重复以下三个步骤:

1) 搜寻子结点 (grow)。在搜索树边缘的激活结点中搜寻到邻近的子结点, 新的子结点成为激活结点, 当在激活结点中未搜寻到子结点时, 这个激活结点成为一个过去结点, 当两颗搜索树的结点首次成为相邻结点时, 则生成一条路径, 进入下一步。

2) 路径增广 (augment)。利用 Fulkerson 和 Ford 的路径增广方法, 将步骤 1) 生成的路径变成饱和路径, 并得到孤儿结点。

3) 路径采用 (adopt)。为孤儿结点分配一个父结点; 如果父结点是搜索树的结点, 则孤儿结点称为搜索树的激活结点; 如果父结点是自由结点, 则孤儿结点称为自由结点。

求得缝合线后, 使用融合算法以最大程度地消除拼接缝。本文采用多分辨率融合算法^[20], 也称拉普拉斯金字塔融合算法。该算法的优点在于能够保留图像的高频部分 (即图像的细节部分)。

多分辨率融合算法的原理是先对待融合的两幅图像 $I(x, y)$ 进行高斯卷积运算, 并进行降采样以得到高斯金字塔, 可表示为

$$\begin{cases} G_n = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \\ G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: G_n 为高斯金字塔; 下标 n 是金字塔层数; $G(x, y, \sigma)$ 为高斯卷积函数; σ 为尺度算子。最底层图像 G_0 为原图。

通过将高斯金字塔的相同层减去它的上一层的扩展(即先升采样,再卷积高斯内核)得到拉普拉斯金字塔,将拉普拉斯金字塔的相同层进行加权平均合并,再对合并后的金字塔进行逆拉普拉斯变换,得到最终的融合图像。其中金字塔变换可表示为

$$L_n = G_n - \text{expand}(G_{n+1}), \quad (5)$$

式中: L_n 为拉普拉斯金字塔; expand 为扩展运算。拉普拉斯金字塔的顶层图像为高斯金字塔的顶层图像。

逆拉普拉斯变换可表示为

$$S_n = R_n + \text{expand}(S_{n+1}), \quad (6)$$

式中: R_n 为拉普拉斯金字塔的相同层加权平均合并后的金字塔; S_n 为融合金字塔, S_n 的顶层为 R_n 的顶层,最后得到的最底层图像 S_0 即为所求的融合图像。

利用以上算法可以提升图像拼接的鲁棒性,但会增加拼接耗时。为了提高拼接速率,本文采用对

待拼接帧进行下采样、上采样的方法。

综上所述,本文提出的基于旋转双棱镜的扩大视场方法,在多次相机预标定并建立数据库的基础上,根据双棱镜旋转位置信息,利用自动搜索程序得到相应位置的标定参数,由标定参数建立查找表,并采用基于双线性插值的重投影算法对采集的两路视频帧进行畸变校正。若是首帧,先进行下采样,使用 SURF 算法对图像进行配准,并结合 RANSAC 算法对特征点进行匹配,采用最大流图割算法搜寻最佳缝合线并生成拼接掩模,将拼接掩模进行上采样,使其恢复到原尺寸。构建高斯金字塔,由高斯金字塔进行差分变换得拉普拉斯金字塔,并将拉普拉斯金字塔同一层进行加权融合,最后对拉普拉斯金字塔进行逆向变换,得到融合结果图像并将其显示出来。若是后续帧,先进行下采样,再根据首帧计算得到的模板进行融合。该方法的流程图如图 2 所示。

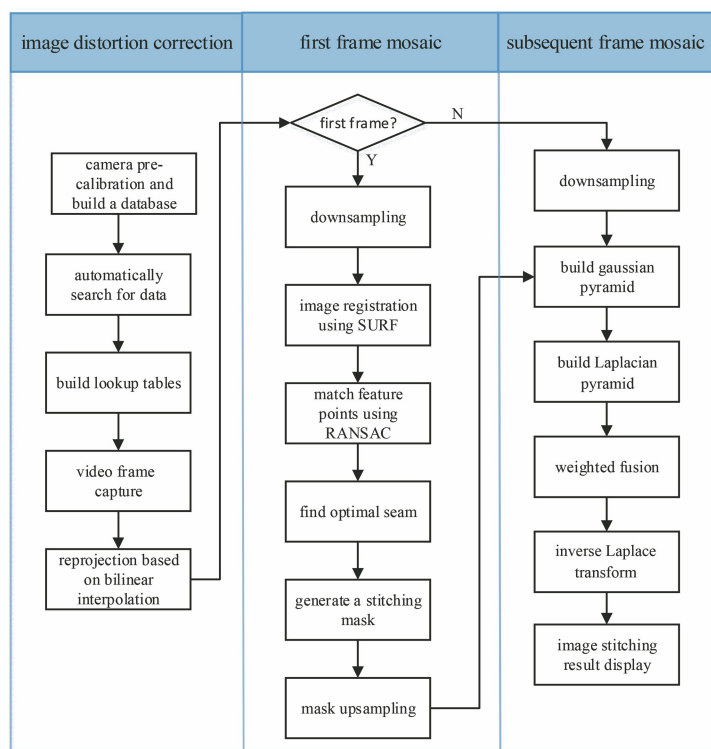


图 2 扩大视场方法流程图

Fig. 2 Flowchart of field of view expansion method

3 扩大视场评价

3.1 基于矢量折射定律的扩大视场评价方法

根据相机的针孔模型^[21],物方视场中边界入射光线矢量 $\mathbf{I}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 到探测器像平面无畸变理想像点 (x, y) 的透视投影变换关系可表示为

$$\begin{cases} (x_0, y_0, z_0)^T = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} (x, y, f)^T \\ x \in \left[-f \tan \frac{h}{2}, f \tan \frac{h}{2} \right] \\ y \in \left[-f \tan \frac{v}{2}, f \tan \frac{v}{2} \right] \end{cases}, \quad (7)$$

式中: h 、 v 、 f 分别为摄像头的水平视场角、垂直视场角及焦距。

棱镜 μ_1 第一个表面的法向单位矢量 \mathbf{N}_{11} 可表示为

$$\mathbf{N}_{11} = (-\sin \alpha \cos \beta_1, -\sin \alpha \sin \beta_1, -\cos \alpha), \quad (8)$$

式中: α 为棱镜的顶角; $\beta_1 = 270^\circ - \theta_1$ 为棱镜 μ_1 的绝对转角。根据矢量折射定律^[22-23], 计算得到经过棱镜 μ_1 第一个表面的折射光线矢量 \mathbf{I}_1 为

$$\mathbf{I}_1 = \frac{n_1}{n_2} [\mathbf{I}_0 - (\mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{N}_{11}) \mathbf{N}_{11}] -$$

$$\mathbf{N}_{11} \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (\mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{N}_{11})^2}, \quad (9)$$

式中: n_1 为光在空气中的折射率, 通常取 1; n_2 为光在棱镜中的折射率。

棱镜 μ_1 第二个表面的法向单位矢量 \mathbf{N}_{12} 、棱镜 μ_2 第一个表面的法向单位矢量 \mathbf{N}_{21} 、棱镜 μ_2 第二个表面的法向单位矢量 \mathbf{N}_{22} 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{12} = (0, 0, -1) \\ \mathbf{N}_{21} = (0, 0, -1) \\ \mathbf{N}_{22} = (\sin \alpha \cos \beta_2, \sin \alpha \sin \beta_2, -\cos \alpha) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: β_2 为棱镜 μ_2 的绝对转角, $\beta_2 = \beta_1 + 180^\circ - \theta_2$ 。

根据求得的 \mathbf{I}_1 及 \mathbf{N}_{12} 、 \mathbf{N}_{21} 、 \mathbf{N}_{22} , 再利用矢量折射定律进行逐步计算, 得到 \mathbf{I}_2 、 \mathbf{I}_3 及最终的边界出射光线矢量 $\mathbf{I}_4 = (x', y', z')$ 。

由 \mathbf{I}_4 计算得到水平视场角 ϕ_1 和垂直视场角 ϕ_v 分别为

$$\begin{cases} \phi_1 = \arctan(x'/z') \\ \phi_v = \arctan(y'/z') \end{cases} \quad (11)$$

依据以上原理, 可以通过计算得到大量的边界出射光线矢量, 以及相应的水平视场角及垂直视场角。再通过对计算的视场角与摄像头的视场角进行对比, 便可得到视场角扩大因子, 本文以此作为扩大视场的评价指标。

3.2 视场仿真及分析

对于该旋转双棱镜系统, 当双棱镜相对转角为 0° 时, 其成像视场与不加双棱镜摄像头本身的成像视场相同。此时视场角扩大因子均为最小值 1。

已知所用的摄像头型号相同, 单个摄像头的水平视场角为 51° 、垂直视场角为 40° 、焦距为 3.8 mm, 单个棱镜的顶角为 14.85° 、折射率为 1.515。当双棱镜的相对转角不为 0° 时, 利用 3.1 节中的方法, 可通过计算得到成像视场。图 3 为计算

得到的双棱镜在 6 个不同位置的理想成像视场图, 可以看出双棱镜整体转角或相对转角的改变都会使成像视场产生变化。

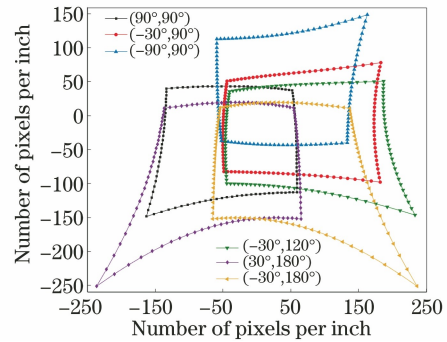


图 3 视场仿真图

Fig. 3 Field of view simulation

为了进一步说明两棱镜不同转角对视场扩大的影响, 图 4 绘制了相对转角和整体转角与视场角扩大因子的关系曲线。图中横坐标均为双棱镜的相对转角, 纵坐标为恰好包含所有像素的最小外切矩形视场的水平/垂直视场角扩大因子。经计算可得, 当双棱镜两个位置的相对转角相同, 整体转角相差 180° 或 -180° 时, 在这两个位置所计算的理想成像的视场角大小相等。图 4 中带有不同标记的曲线分别表示整体转角为 0° (180°)、 30° (-150°)、 60° (-120°)、 90° (-90°)、 120° (-60°) 和 150° (-30°)。

从图 4 中可以看出, 每条曲线的水平/垂直视场角扩大因子随着相对转角的增大有较明显的增大趋势。图 4 中水平/垂直视场角的最大扩大因子与最小扩大因子的差距较大, 分别为 0.36 和 0.51, 这体现出了本文采用的大顶角双棱镜系统对视场扩大有较明显的效果。

对于两套旋转双棱镜系统拍摄的两路视频图像拼接的视场, 其组合繁多。如图 5 所示, 选取了 4 个双棱镜不同位置组合进行了拼接仿真, 其中各张图中的矩形框为拼接后所能获得的最大内切矩形视场, 也称等效视场。对于图 5(a), 根据上面提出的计算视场角的方法, 通过计算 A 点与 E 点的水平视场角即可得到等效视场 ABCD 的水平视场角, 通过计算 A 点与 D 点的垂直视场角即可得到等效视场的垂直视场角。经计算可得, 等效视场的水平视场角扩大不太明显, 垂直视场角扩大因子为 1.30。同样地, 通过计算得到图 5(b)~(d) 中等效视场的垂直视场角扩大不太明显, 水平视场角扩大因子分别为 1.46, 1.50, 1.35。这体现出了所提出的基于大顶角旋转双棱镜视场扩大方法能够有效地扩大视场。

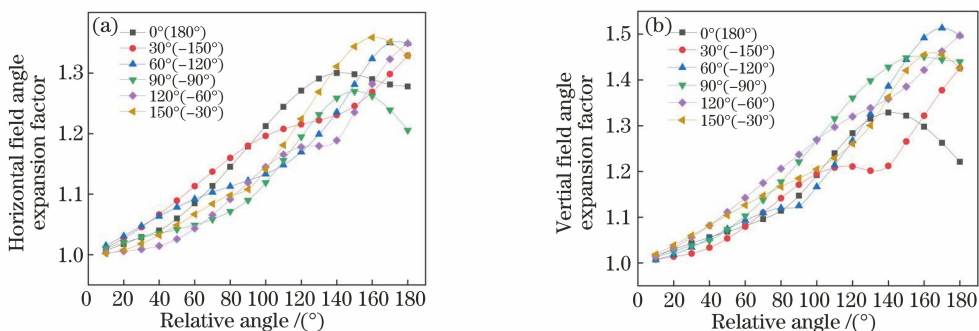


图 4 水平、垂直视角扩大因子随双棱镜转角的变化。(a)水平视角扩大因子;(b)垂直视角扩大因子
Fig. 4 Horizontal and vertical field angle expansion factors varying with rotation angle of double prisms.

(a) Horizontal field angle expansion factor; (b) vertical field angle expansion factor

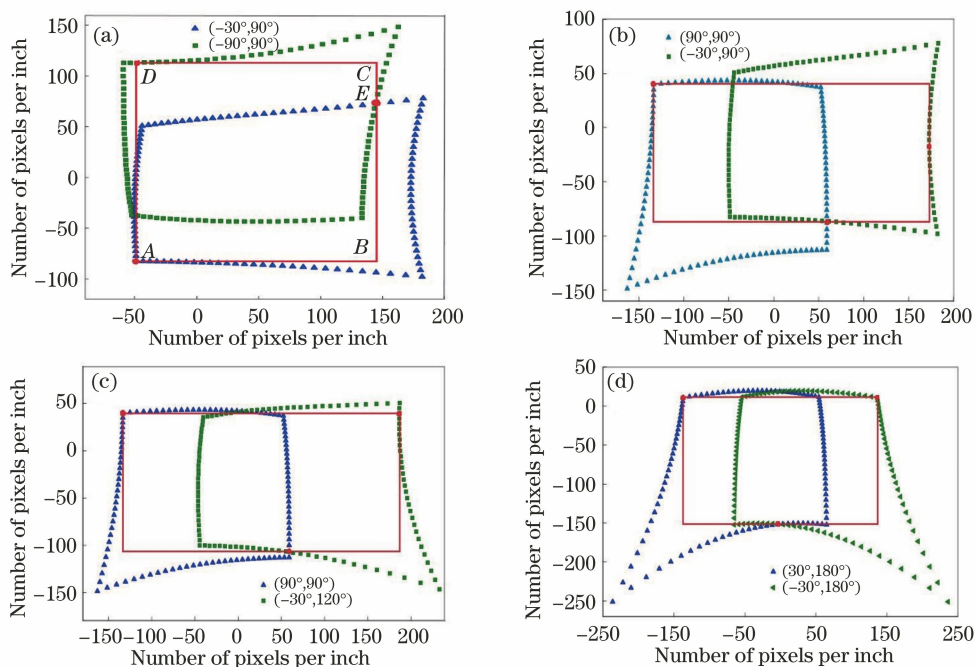


图 5 拼接仿真图。(a)位置为(-30°, 90°)与(-90°, 90°)的视场拼接仿真图;(b)位置为(90°, 90°)与(-30°, 90°)的视场拼接仿真图;
Fig. 5 Mosaic simulations. (a) Mosaic simulation of field of view for positions (-30°, 90°) and (-90°, 90°); (b) mosaic simulation of field of view for positions (-30°, 90°) and (90°, 90°); (c) mosaic simulation of field of view for positions (90°, 90°) and (-30°, 120°); (d) mosaic simulation of field of view for positions (30°, 180°) and (-30°, 180°)

(c)位置为(90°, 90°)与(-30°, 120°)的视场拼接仿真图;(d)位置为(30°, 180°)与(-30°, 180°)的视场拼接仿真图

4 实验验证及分析

根据上述视场扩大方法,构建如图 6 所示的实验系统。图 6 中两套相同的旋转双棱镜系统拍摄的视场会有重叠,当重叠率达到 30 % 及以上时可以进行视频图像拼接。采用的工业相机分辨率为 640 pixel×480 pixel。标定采用棋盘格模板,每个格子的尺寸为 50 mm×50 mm。实验标定过程包括用线性模型计算内外参数,以及用非线性模型计算畸变系数两部分。

完成标定后,根据图 2 中的技术路线图,进行了

视频图像的畸变校正及拼接。图 7 为双棱镜系统在不同位置采集的图片。其中图 7(a)~(c)由 1 号旋转双棱镜系统拍摄得到,图 7(d)~(f)由 2 号旋转双棱镜系统拍摄得到。

图 8 为畸变校正后的图像。将图 8 与图 3 进行对比,可以发现畸变校正后的视场图与计算仿真出的理想成像视场图的形状较为一致,再对比图 8 与图 7,可以看出图 8 中相对应图像的畸变明显减少,这证明了本文提出的方法可以有效校正旋转双棱镜的成像畸变。经实验验证,所提算法校正一张图的耗时仅为 10 ms。与 Lavigne 等^[9]的方法和周远

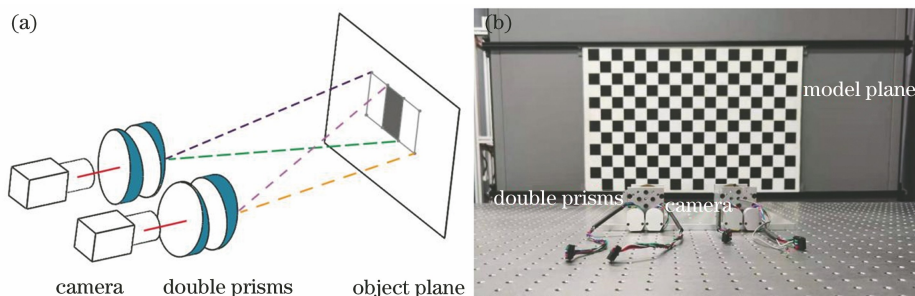


图 6 两路旋转双棱镜成像系统。(a)两路旋转双棱镜成像系统原理图;(b)实验装置图

Fig. 6 Two-way rotating double prism imaging system. (a) Schematic diagram of two-way rotating double prism imaging system; (b) experimental setup

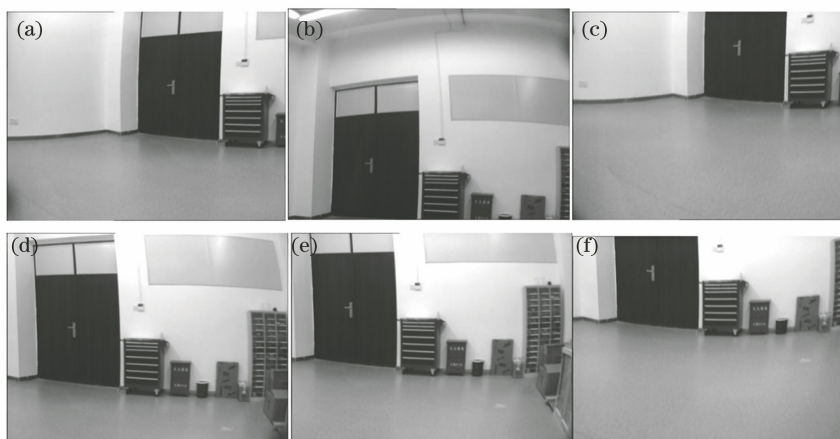


图 7 双棱镜系统采集的图片。(a) $(90^\circ, 90^\circ)$; (b) $(-90^\circ, 90^\circ)$; (c) $(30^\circ, 180^\circ)$; (d) $(-30^\circ, 90^\circ)$; (e) $(-30^\circ, 120^\circ)$; (f) $(-30^\circ, 180^\circ)$

Fig. 7 Pictures collected by double prism system. (a) $(90^\circ, 90^\circ)$; (b) $(-90^\circ, 90^\circ)$; (c) $(30^\circ, 180^\circ)$; (d) $(-30^\circ, 90^\circ)$; (e) $(-30^\circ, 120^\circ)$; (f) $(-30^\circ, 180^\circ)$

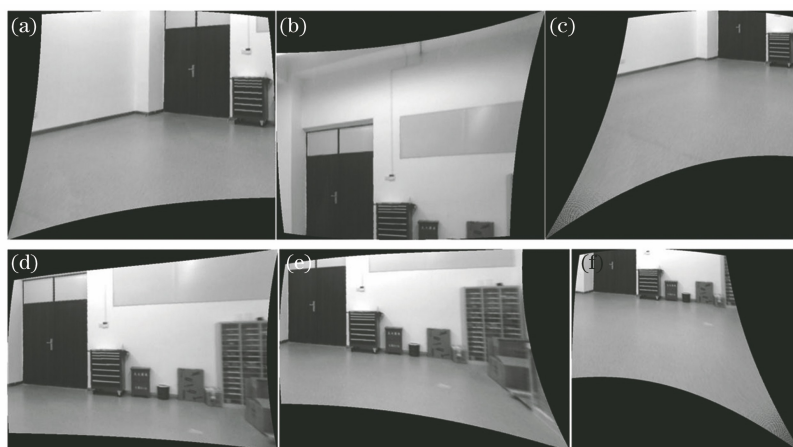


图 8 畸变校正结果图。(a) $(90^\circ, 90^\circ)$; (b) $(-90^\circ, 90^\circ)$; (c) $(30^\circ, 180^\circ)$; (d) $(-30^\circ, 90^\circ)$; (e) $(-30^\circ, 120^\circ)$; (f) $(-30^\circ, 180^\circ)$

Fig. 8 Images after distortion correction. (a) $(90^\circ, 90^\circ)$; (b) $(-90^\circ, 90^\circ)$; (c) $(30^\circ, 180^\circ)$; (d) $(-30^\circ, 90^\circ)$; (e) $(-30^\circ, 120^\circ)$; (f) $(-30^\circ, 180^\circ)$

等^[10]的方法相比,本文所采用的畸变校正方法将线性模型与非线性模型相结合,同时校正了镜头畸变与双棱镜带来的畸变,得到的校正质量较好且校正速度较快,可实现视频实时畸变校正。

从图 9 中可以看出,拼接结果中无重叠、无较明显的拼接缝,拼接质量较好。经实验测得视频经畸变校正及拼接后,帧频可达 30 frame/s。

综上所述,本文所提出的基于旋转双棱镜系统

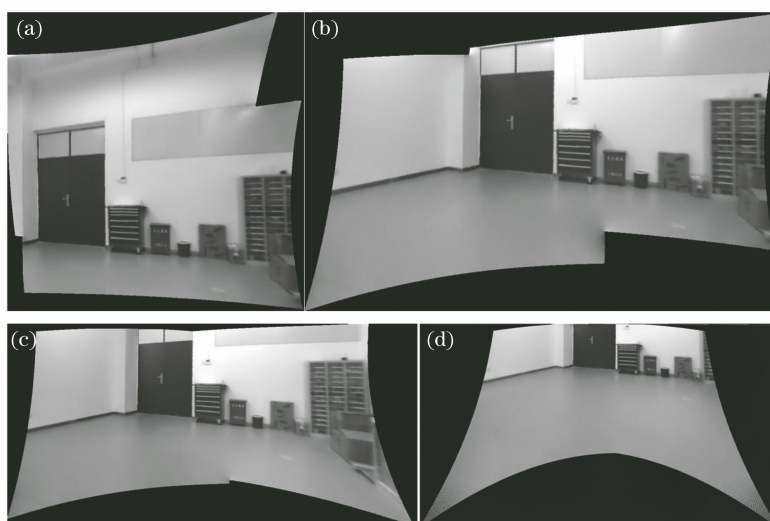


图 9 拼接结果图。(a)图 8(b)与图 8(d)的拼接图;(b)图 8(a)与图 8(d)的拼接图;(c)图 8(a)与图 8(e)的拼接图;(d)图 8(c)与图 8(f)的拼接图

Fig. 9 Mosaic results. (a) Mosaic result of Figs. 8(b) and 8(d); (b) mosaic result of Figs. 8(a) and 8(d); (c) mosaic result of Figs. 8(a) and 8(e); (d) mosaic result of Figs. 8(c) and 8(f)

的视场扩大方法的畸变校正及拼接效果较好,能达到实时性,且最终的拼接视场有较明显的扩大效果。

5 结 论

根据旋转双棱镜系统可以通过控制光束及光轴的指向来扩大视场的特点,提出了一种基于旋转双棱镜的视场扩大方法。其主要技术路线包括三大部分:1)采用多次相机预标定、建立标定数据库,并基于查找表法的插值重投影算法实现视频帧畸变校正,以提升校正质量和速度;2)利用图像尺度变换、基于搜寻最佳缝合线的多分辨率融合算法实现两路视频的实时拼接;3)利用矢量折射定律,建立双棱镜的三维折射模型,并以视场角扩大因子为指标来分析视场扩大情况。按照上述方法进行了实验,实验结果证明了该方法的可行性,鲁棒性较好,具有实时性,且扩大视场效果较明显。

参 考 文 献

- [1] Zhang B L, Li D, Zhang S J, et al. Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222001.
张宝龙, 李丹, 张少敬, 等. 非球面鱼镜头设计及其畸变校正算法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1222001.
- [2] Shum H Y, Szeliski R. Systems and experiment paper: construction of panoramic image mosaics with global and local alignment[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 36(2): 101-130.
- [3] Han J F, Zhang Y. Research on stitching algorithm based on UAV based on aerial photography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 201003.
韩建峰, 张妍. 基于无人机航拍路面的拼接算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 201003.
- [4] Sánchez M, Gutow D. Control laws for a three-element Risley prism optical beam pointer [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6304: 630403.
- [5] Garcia-Torales G, Flores J L, Álvarez-Borrego J. Alignment of vectorial shearing interferometer using a simple recognition algorithm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7073: 707324.
- [6] Clark C S, Gentile S. Flight miniature Risley prism mechanism [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7429: 74290G.
张勇, 曹喜滨, 吴龙, 等. 小面阵块扫描激光成像系统实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0814001.
- [7] Zhang Y, Cao X B, Wu L, et al. Experimental research on small scale Risley prism scanning imaging laser radar system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0814001.
- [8] Fan D P, Zhou Y, Lu Y F, et al. Overview of beam steering technology based on rotational double prisms [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 136-150.
范大鹏, 周远, 鲁亚飞, 等. 旋转双棱镜光束指向控制技术综述[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 136-150.
- [9] Lavigne V, Ricard B. Fast Risley prisms camera steering system: calibration and image distortions correction through the use of a three-dimensional

- refraction model[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(4): 043201.
- [10] Zhou Y, Fan S X, Liu G C, et al. Image distortions caused by rotational double prisms and their correction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0911003.
周远, 范世珣, 刘光灿, 等. 旋转双棱镜引起的成像畸变及其校正[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0911003.
- [11] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [12] Wang P, Zhang Y J, Sun C K, et al. Multi-camera three-dimensional measurement system using an image stitching method based on flexible calibration target positioning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0412003.
王鹏, 张颖杰, 孙长库, 等. 基于柔性靶标定位实现图像拼接的多相机三维测量系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0412003.
- [13] Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1944, 2(2): 164-168.
- [14] Bay H, Tuytelaars T, van Gool L. SURF: speeded up robust features [M] // Leonardis A, Bischof H, Pinz A. *Computer vision-ECCV 2006. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2006, 3951: 404-417.
- [15] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C] // 2011 International Conference on Computer Vision, November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2011: 2564-2571.
- [16] Wang Y P, Qin A N, Hao Q, et al. Semi-global stereo matching of remote sensing images combined with speeded up robust features [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1628003.
王阳萍, 秦安娜, 郝旗, 等. 结合加速鲁棒特征的遥感影像半全局立体匹配[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1628003.
- [17] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- [18] Kwatra V, Schödl A, Essa I, et al. Graphcut textures[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 277-286.
- [19] Siegel M, Ford L R, Fulkerson D R. Flows in networks[J]. *Mathematics of Computation*, 1963, 17(83): 325.
- [20] Burt P J, Adelson E H. A multiresolution spline with application to image mosaics [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1983, 2(4): 217-236.
- [21] Hartley R, Zisserman A. *Multiple view geometry in computer vision*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [22] Born M, Wolf E. *Principles of optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [23] Amirault C T, DiMarzio C A. Precision pointing using a dual-wedge scanner [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(9): 1302-1308.