

折反射全向图像柱面展开校正算法研究

陈旺 徐玮 熊志辉 张茂军

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院,长沙 410073)

摘要 传统图像校正方法无法直接应用于折反射全向图像。为了有效解决折反射全向图像的校正问题,提出了一种通过校正对应柱面展开图来校正折反射全向图像的方法。该文首先分析了全向图的获取与展开,而后根据柱面全景图像成像原理,讨论了其对极几何约束与求解;接着依据校正图像是否充分有效利用参考图像,提出了图像校正重采样效应的评估准则;最后分析了在这一准则下,柱面图像的基于极线采样校正方法在像素保持率和像素有效率上的优势,并重点研究了如何依据对极几何来最大限度对参考图像进行采样,以减少像素损失和图像畸变。实验结果表明,该方法可以有效提高校正图像的像素保持率和像素有效率。

关键词 折反射全向图 柱面全景图像 极线采样 图像校正 对极几何

中图法分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1006-8961(2009)12-2559-07

Rectification of Catadioptric Omnidirectional Images Via Cylindrical Unwarping

CHEN Wang, XU Wei, XIONG Zhi-hui, ZHANG Mao-jun

(National University of Defense Technology, College of Information System and Management, Changsha 410073)

Abstract A rectification approach for catadioptric omnidirectional image pair via the rectification of corresponding unwarping cylindrical image is proposed. The acquisition and unwarping process of omnidirectional image is discussed firstly. Then, according to imaging principle of cylindrical panoramic image, corresponding epipolar geometry and solving is analyzed. Meanwhile this paper develops an criteria for resampling-effect assessment depending on the degree of pixel information exploitation that rectified images based on the reference images. And it shows that, under this criterion, rectification for cylindrical image by resampling reference images along epilines has obvious advantage in terms of pixel-maintain-rate and effective-pixel-rate compared to other approaches. To reduce resolution degradation and image deformation resulted from proposed rectification algorithm, issue of how to sampling reference images maximum as much as possible according to the epipolar geometry is mainly studied and solved. Lastly results of our approach applied to both synthetic and real scenes are given at the end of this paper.

Keywords catadioptric omni-directional image, cylindrical panoramic image, epiline-sampling, image rectification, epipolar geometry

1 引言

由于折反射全向成像具有360°大视域成像等优点,因此近年来,基于全向图像的计算机视觉技术

迅速发展,且在3维重建、场景漫游、机器人导航、目标检测与跟踪等方面应用广泛。笔者于2005年提出了一种自行研制的抛物面折反射全向成像系统(paraboloid reflective omnidirectional imaging system, PROIS)^[1],但是该系统所获取的原始全向图

基金项目:国家自然科学基金项目(60705013);湖南省自然科学基金项目(08JJ5027)

收稿日期:2008-04-30;改回日期:2008-09-17

第一作者简介:陈旺(1981~),男,国防科学技术大学系统工程专业博士研究生。研究方向为立体视觉技术、图像处理与分析。

E-mail: ifhavetime@163.com

像存在同心圆环状变形,必须进行展开才能得到符合人眼视觉习惯的柱面全景图像。沿用这一思路,如果需要基于全向图像进行立体匹配,进而恢复场景的深度或进行 3 维重建,则必须首先校正展开后的柱面图像,以便将立体匹配过程中的对应点搜索空间从 2 维降为 1 维,使得在降低计算复杂度的同时,提高匹配准确度。

文献[2]~文献[4]研究了柱面全景图像的对极几何约束,给出了相关的数学表示。文献[3]~文献[6]讨论了基于柱面全景图像的全光建模、深度估计和 3 维重建中的对应点匹配问题,但没有具体研究如何对全景图像进行校正以及如何搜索对应点。文献[7]、文献[8]提出了一种特殊的用于深度估计的全景相机结构,并讨论了这种特殊结构下的柱面全景图像的校正问题,然而对于任意放置的全景相机对所产生图像的校正问题,该文并未研究。为校正柱面图像,文献[9]先将全景图按轴线方向分割为多个部分,每部分投影为与柱面相切的平面图,而后使用平面图像校正方法进行校正,由于该方法在校正平面图像时,需要对图像进行透视投影变换,因此不可避免地会造成图像的像素损失和图像畸变^[10-12],从而影响校正后图像的质量。虽然文献[11]提出用柱面投影的方法,将平面图像的每条扫描线变换为柱面图像的一列,以减少透视变换所带来的不良影响,但是该方法是针对平面图像提出来的,由于柱面成像的特殊性,因而并不能直接应用。

为此,本文首先根据柱面全景图像的成像原理,讨论了其对极几何约束与求解;而后针对图像校正的重采样效应,提出了相应的评估准则,同时分析了在这一准则下,柱面图像的基于极线采样校正方法在像素保持率和像素有效率上的优势,并重点研究了如何依据对极几何来最大限度地对参考图像进行采样以取得较好的像素保持率和像素有效率。实验表明,与依据普通对极几何约束进行柱面图像校正的方法相比,本文方法能有效减少图像畸变和像素损失。

2 全向图像获取与展开

文献[1]中,PROIS 系统的成像原理与展开过程如图 1 所示^[13]。

图 2 描述了全向图柱面展开算法的原理,其中图 2(a)表示内径为 r 、外径为 R 的圆环状全景图像,内

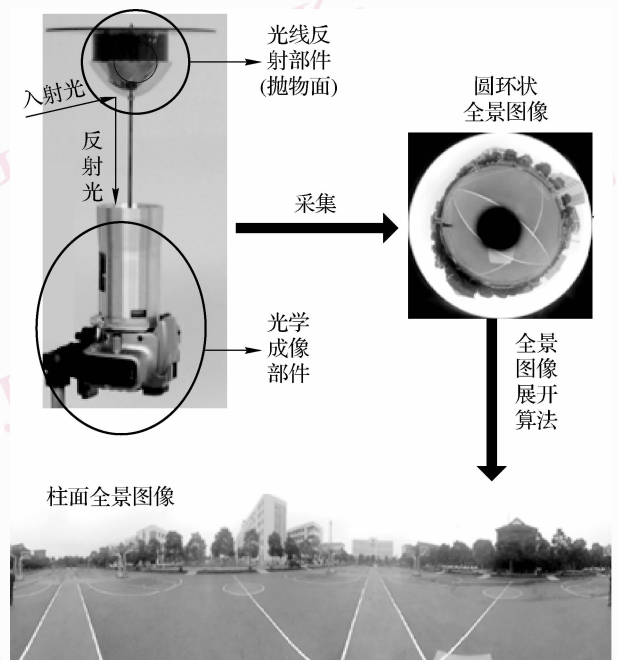


图 1 折反射全景成像原理及其展开过程
Fig. 1 Principle of catadioptric omnidirectional imaging and its unwarping

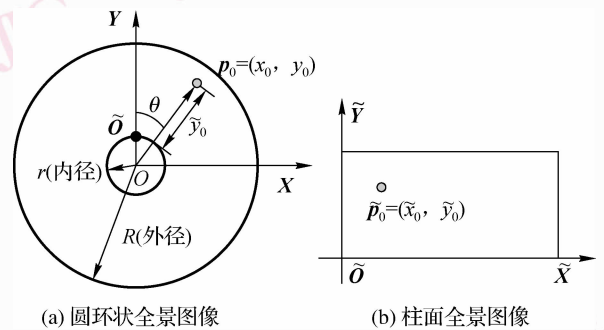


图 2 全景图像同心圆环近似展开原理
Fig. 2 Principle of co-centric unwarping of omnidirectional images

外径之间是圆环状全景图像的有效信息区。图 2(b)表示展开后的柱面全景图像。对于图 2(b)所示的柱面全景图像中的任意一点 $\tilde{p}_0 = (\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$,它在图 2(a)所示的圆环状全景图像上的对应点 p_0 的坐标值可表示为

$$\begin{cases} x_0 = (r + \tilde{y}_0) \times \sin\theta \\ y_0 = (r + \tilde{y}_0) \times \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\theta = \frac{\tilde{x}_0}{(r + \tilde{y}_0)}$ 。

3 柱面全景图像对极几何约束与求解

3.1 柱面全景图像对极几何约束

对极几何约束是两摄像机拍摄立体图像对的重要约束关系,它揭示了空间场景在两摄像机成像面上像点位置的内在联系^[2,4,6]。

如图 3 所示, V_1, V_2 是以 v_1, v_2 为原点的两视点坐标系, C_1 和 C_2 为两个成像柱面, p 为场景点。不失一般性, 设世界坐标系与视点坐标系 V_1 重合, 点 p_1, p_2 分别为点 p 在视点坐标系 V_1, V_2 的两柱面上的像点, 点 p_1 的摄像机坐标为 $(x_1, y_1, z_1)^T$, 点 p_2 的摄像机坐标为 $(x_2, y_2, z_2)^T$, 则由 v_1, v_2 和点 p 构成的平面称为对极平面, 该平面与成像柱面 C_1, C_2 的交线 L_{EPL1}, L_{EPL2} 称为极线。设点 p_1, p_2 满足以下关系: $p_2 = R p_1 + T$, 其中, R 为 3×3 的旋转矩阵, T 为 3×1 的位移向量, 则由 T 和点 p_1 就定义了一个平面, 该平面的法线方程为 $N_{TP1} = T \times p_1$ (\times 表示外积), 而由 T 和点 p_2 定义的平面的法线方程为 $N_{TP2} = R N_{TP1} = R(T \times p_1)$, 由于点 p_2 位于极平面和成像柱面 C_2 的交线之上, 因此有 $N_{TP2} \cdot p_2 = 0$, 即

$$R(T \times p_1) \cdot p_2 = 0 \quad (2)$$

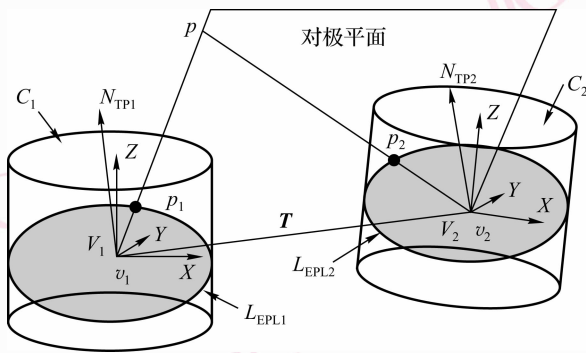


图 3 柱面成像对极几何

Fig. 3 Epipolar geometry of cylindrical image pairs

设 $T = [t_x, t_y, t_z]^T$, 记 $[T]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}$, 则

式(1)可表示为

$$(R[T]_{\times} p_1) \cdot p_2 = (M p_1) \cdot p_2 = p_2^T M p_1 = 0 \quad (3)$$

其中, $M = R[T]_{\times}$ 为 3×3 大小、秩为 2 的矩阵。式(2)和式(3)表示了柱面全景图像的对极约束关系。

3.2 坐标变换

由于采集得到的是图像的像素坐标, 因此需要对柱面图像上的像点进行像素坐标和摄像机坐标变换。变换公式如下:

$$p_1 = (x_1, y_1, z_1)^T = \begin{cases} x_1 = f \cos \alpha \\ y_1 = f \sin \alpha \\ z_1 = (v_c - v_1) S_{\text{pixel}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\alpha = u_1 \times 2\pi / W_{\text{cylind}}$, f 为相机的焦距, 即圆柱体横截面半径, (u_1, v_1) 为点 p_1 的图像坐标, v_c 为柱面图展开后中心点的行像素坐标, W_{cylind} 为柱面图展开后以像素为单位的宽度, S_{pixel} 为像素大小。点 p_2 的坐标变换同理可得。令 $M p_1 = (k_{i,j})_{3 \times 1} = K$, 则将式(4)代入式(3)得

$$K \cdot \begin{bmatrix} f \cos \alpha_2 \\ f \sin \alpha_2 \\ (v_c - v_2) S_{\text{pixel}} \end{bmatrix} = 0$$

其中, $\alpha_2 = u_2 \times 2\pi / W_{\text{cylind}}$, 不考虑下标, 则有

$$v = v_c + \frac{k_{1,1} f \cos \alpha + k_{2,1} f \sin \alpha}{k_{3,1} S_{\text{pixel}}}$$

其中, $\alpha = u \times 2\pi / W_{\text{cylind}}$ 。

当 u 取值为 $1 \rightarrow W_{\text{cylind}}$, 即相当于以 u 为自变量, 以 v 为变量绕柱面一周采样。

3.3 极线方程求解

对全向图进行柱面展开时, 由展开算法知: 由于 f 可指定, v_c, S_{pixel} 可知 (即相机底片大小可知, 且不变), 因此只考虑以下两种情况下的对极约束方程求解:

(1) 相机外参数已标定, 即 R, T 已知。则根据式(3), 如果已知点 p_1 的坐标 (u_1, v_1) , 则式(3)是一个关于点 p_2 的线性方程组, 即点 p_1 所对应的成像柱面 C_2 上的极线方程, 反之亦然。

(2) 相机外参数未标定。这种情况下, 需要先计算参数 M 的值。令 $M = (m_{i,j})_{3 \times 3}$, 则式(3)可展开为

$$m_{1,1} x_1 x_2 + m_{1,2} y_1 x_2 + m_{1,3} z_1 x_2 + m_{2,1} x_1 y_2 + m_{2,2} y_1 y_2 + m_{2,3} z_1 y_2 + m_{3,1} x_1 z_2 + m_{3,2} y_1 z_2 + m_{3,3} z_1 z_2 = 0 \quad (5)$$

如果 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 值已知, 则式(5)是一个关于 $m_{i,j}$ 的九元线性方程。参照平面对极几何问题中求解基础矩阵 F 的 8 点算法, 即可估算矩阵 M , 进而可求得各点所对应的极线方程。

4 柱面全景图像极线采样校正

4.1 重采样效应评估准则

在几种典型的平面图像校正方法中^[14-16],由于需要使用投影变换将极点变换到无穷远处,且变换矩阵不唯一,因而这些算法往往不能得到理想的校正结果,并会使图像产生重采样效应(resampling effects),其主要表现为校正图像畸变、物体变形以及分辨率损失等。虽然对于非平行的未校正图像来说,重采样效应不可避免,但不同的校正算法具有不同的畸变和损失程度^[17-20]。笔者认为,参考图像是图像校正的根源,由于它具有完备的初始场景信息,因此是否充分和有效利用参考图像可以作为衡量校正算法优劣的标准。依据这一考虑,参照文献[17]、文献[18],本文提出以下两条评估准则:

(1) 像素保持率 ρ_c , 即从参考图像中采样至校正图像中的不同像素点的数量占参考图像总的像素个数的比例。 ρ_c 越大,说明参考图像越被充分采样,也即减少了弱采样效应;

(2) 像素有效率 ρ_v , 即从参考图像中采样至校正图像中的不同像素点的数量占校正图像总的像素个数的比例。 ρ_v 越大,说明参考图像越被有效采样,即减少了过采样效应。

而基于投影变换的校正方法在这两方面都存在一定不足,主要为

(1) 基于投影变换的校正方法,由于实质上使用了反算算法,因而可能导致对参考图像的采样出现空洞,即参考图像的某些区域没有被采样;

(2) 由于需要将极点变换到无穷远处,且变换矩阵不唯一,因此某些情况下(如极点在图像内)校正后的图像会发生较大拉伸,致使图像尺寸过大,从而导致 ρ_v 变小。

为减少重采样效应的影响,本文使用极线采样方法对柱面全景图像进行校正,即不对图像进行投影变换,而直接在参考图像上沿极线采样。采用这一方法的原因主要基于以下两点:一方面,对于 ρ_v , 由于极线是柱面上的二次曲线,其长度受柱面(即参考图像)大小限制,因此当沿极线对参考图像进行采样时,可确保校正图像相对于参考图像不会出现大的拉伸变形;另一方面,提高 ρ_c 的关键在于如何充分采样参考图像,虽然基于极线的采样并不是新的方法,极线方程求解也并不困难,但针对柱面图

像如何确定采样极线的方程、数量、范围以及起止位置,以便最大限度地采样参考图像的像素信息,也是柱面图像校正中值的研究内容。

4.2 极线采样校正

为减少像素损失和图像畸变,以及为提高 ρ_c 和 ρ_v , 需要依据对极几何来最大限度地对参考图像进行采样。

不失一般性,假定两成像柱面 C_1, C_2 的半径和高度分别为 f_1, f_2, h_1, h_2 , 且 $f_1 = f_2, h_1 = h_2$ (f, h 在全向图柱面展开时可指定), V_1, V_2 是以 v_1, v_2 为原点的两视点坐标系, X 轴位于 v_1, v_2 连线上, 并设世界坐标系与视点坐标系 V_1 重合(如图 2 所示)。为便于讨论,下面以柱面图像的一部分 A_1, A_2 为例来研究极线的采样问题。

设 e_1, e_2 为柱面图像的 1, 2 部分 A_1, A_2 上的两个距离最近的极点(4 个极点位于同一直线上, 因此只要计算比较任意两极点间的距离即可), 其坐标分别为 $(x_{e_1}, y_{e_1}, z_{e_1}), (x_{e_2}, y_{e_2}, z_{e_2})$, 则对极平面必定过极点 e_1, e_2 的连线, 即所有对极平面构成了以 $\overrightarrow{e_1 e_2}$ 为交线的平面簇。设由对极平面与 $\overrightarrow{e_1 e_2}$ 和成像柱面 C_1 上的特定点 $p = (-my_{e_1}, mx_{e_1}, 0)$ ($m = \frac{f}{\sqrt{y_{e_1}^2 + x_{e_1}^2}}$) 所构成的平面 PH 的夹角为 β , 为尽可能多地采样柱面图像的 1, 2 部分 A_1, A_2 的像素信息, 由图 4 可知, β 的取值范围应当尽可能大, 即对极平面应当最大限度地与柱面图像的 1, 2 部分 A_1, A_2 相交。

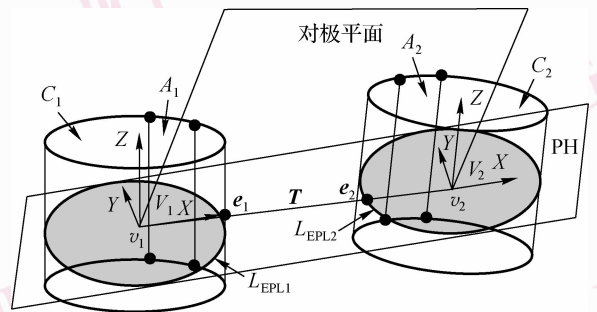


图 4 极线采样示意图

Fig. 4 Principle of epiline-sampling on cylindrical images

为计算 β 的最大取值范围, 需考虑柱面图像的 1, 2 部分 A_1, A_2 的顶点坐标。设 A_1, A_2 的顶点坐标为 $(x_i^{(j)}, y_i^{(j)}, z_i^{(j)})$, $i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2$ ($i = 1, 2$ 时, 表示是平面 PH 上方的顶点, $i = 3, 4$ 时, 为平面 PH 下方的顶点), 顶点 $(x_i^{(j)}, y_i^{(j)}, z_i^{(j)})$, v_1, v_2 所在平面的法向量为 $n_i^{(j)}$, 平面 PH 的法向量为 n_{PH} , 则两个平面的夹角

$\beta_i^j = \arccos \frac{\mathbf{n}_i^{(j)} \cdot \mathbf{n}_{PH}}{\|\mathbf{n}_i^{(j)}\| \|\mathbf{n}_{PH}\|}$, 因此, 当交柱面图像的

j 部分 A_j 于平面 PH 以上部分的极平面与平面 PH 的夹角 β 的取值范围为 $[0, \max(\beta_{i=1,2}^{(j)})]$, 交柱面图像的于部分 A_j 于平面 PH 以下部分的极平面与平面 PH 的夹角 β 的取值范围为 $[0, \max(\beta_{i=3,4}^{(j)})]$ 时, 则极平面与成像柱面 C_1, C_2 的交线 (即极线) 可以最大限度地对柱面图像的 1, 2 部分 A_1, A_2 的像素信息进行采样。

柱面图像的 1, 2 部分 A_1, A_2 上的极线对的具体计算方法如下: 设 $\max(\beta_{i=1,2}^{(j)}) = \beta_m^{(l)}$, $\max(\beta_{i=3,4}^{(j)}) = \beta_n^{(k)}$, $m, l, k \in \{1, 2\}$, $n \in \{3, 4\}$, 直线

$$\begin{cases} x = x_m^{(l)} \\ y = y_m^{(l)} \end{cases} \text{ 与过点 } (x_m^{(l)}, y_m^{(l)}, z_m^{(l)}) \text{, 极点 } \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \text{ 的平}$$

面的交点的 Z 坐标为 z_{\max} , 与过点 $(x_n^{(k)}, y_n^{(k)}, z_n^{(k)})$, 极点 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 的平面的交点的 Z 坐标为 z_{\min} , 则在线段

$$\begin{cases} x = x_m^{(l)} \\ y = y_m^{(l)} \\ z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

上任取一点 $\mathbf{p}_k = (x_k, y_k, z_k)$, 即可求得该点在成像平面 C_2 上的极线方程 $(\mathbf{M}\mathbf{p}_k) \cdot (x, y, z)^T = 0$, 而成像平面 C_1 上对应的极线则为过点 $\mathbf{p}_k, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 的平面与圆柱面的交线。圆柱面方程为

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = f^2 \\ 0 \leq z \leq h \end{cases} \quad (7)$$

极平面方程为

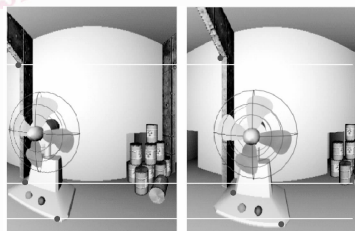
$$[(\mathbf{p}_k - \mathbf{e}_1) \times (\mathbf{p}_k - \mathbf{e}_2)] \cdot [\mathbf{p}_k - (x, y, z)] = 0 \quad (8)$$

式(7)、式(8)两式联立所得方程即为点 \mathbf{p}_k 所对应的成像柱面 C_1 上的极线方程。当 z_k 的取值从 $z_{\min} \rightarrow z_{\max}$ 时, 则可得到 $(z_{\max} - z_{\min})$ 组极线方程, 以完成对柱面图像的 1, 2 部分 A_1, A_2 的采样。

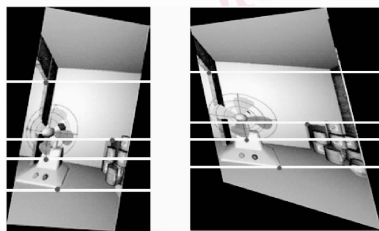
4.3 算法流程

总的算法流程步骤如下:

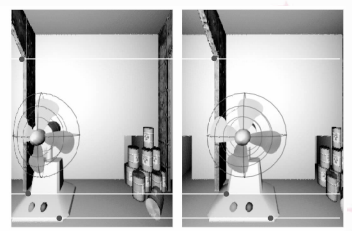
(1) 对全向图像对进行柱面展开;



(a) 仿真柱面图像对



(b) 投影变换方法的校正结果



(c) 本文算法的校正结果

图 6 仿真柱面图像校正结果

Fig. 6 Retification results of synthesized cylindrical images

(2) 如摄像机外参数未标定, 则可通过提取特征点信息以确定初始匹配点。否则转至步骤(4);

(3) 根据初始匹配点估算式(3)中的矩阵 \mathbf{M} , 否则根据摄像机参数直接计算矩阵 \mathbf{M} ;

(4) 计算极点并根据矩阵 \mathbf{M} 计算距离最近的极点 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 的坐标;

(5) 根据极点 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 和柱面图像 1, 2 部分 A_1, A_2 的顶点坐标计算 $\max(\beta_{i=1,2}^j), \max(\beta_{i=3,4}^j)$, 进而求得 z_{\min} 和 z_{\max} 的值;

(6) 对 z_k 从 $z_{\min} \rightarrow z_{\max}$ 取值, 根据点 (x_k, y_k, z_k) , $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$, 计算成像柱面 C_1, C_2 上对应的极线方程;

(7) 根据极线方程对极线采样。

5 实验与讨论

为验证算法的有效性, 本文采用 discreet 3DMax 中的合成图像和真实场景图像进行了实验, 并比较了本文算法与基于平面透视投影变换的校正算法^[9]的实验结果:

首先, 分析了柱面全景图像极线的形式。图 5 为虚拟 3 维场景柱面全景图的平面展开, 极线形式如图中曲线所示, 曲线的两个交点即为柱面全景图像的极点。

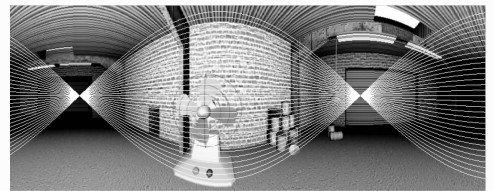


图 5 柱面全景展开图上的部分极线

Fig. 5 Epilines on unwarping cylindrical image

对图 6(a)、图 7(a) 所示的柱面全景图像对的部分图像分别用基于平面投影变换的校正算法^[9]和本文算法进行校正, 校正结果如图 6(b)、图 6(c)、图 7(b)、图 7(c) 所示。

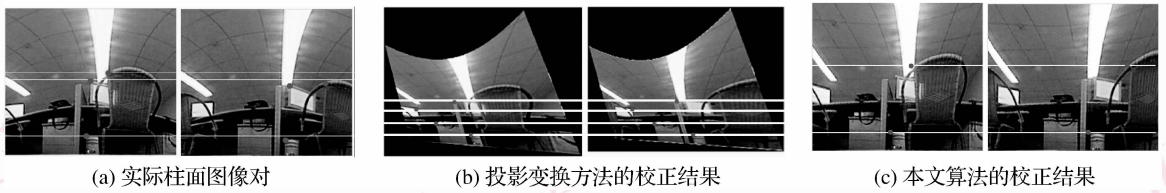


图 7 实际柱面图像校正结果

Fig. 7 Rectification results of real cylindrical images

实验表明,当使用基于投影变换的算法校正图像时,会导致相对较大的图像变形和分辨率损失。与此相比,本文算法能取得较好的校正效果,它不仅能保持极线长度不变,而且可使极线上的像素不损失(除离散化误差),同时校正后图像的高度和宽度不发生变化,图像内容形变较小(如图 6(c)、图 7(c)所示)。

另一方面,如果对未标定的图像进行校正,基于投影变换的校正算法还可能引入新的误差。参照文献[9]的算法过程,在图像校正过程中可能会出现以下情况:

(1)柱面图像投影为平面图像时,会产生图像变形和像素离散化误差,从而影响特征点的提取和初始匹配点计算;

(2)初始匹配不准确会影响基础矩阵的估计;

(3)基础矩阵的不准确会影响平面图像的校正结果;

(4)根据透视投影原理,平面图像在校正时也会损失部分像素信息和发生图像变形。

这一系列误差最后必然影响到图像校正的最终结果。与此相比,本文算法则不需要进行反复的柱面到平面、平面到柱面的投影变换,而且结合柱面图像的对极几何特点,通过最大限度地采样参考图像,有效地提高了校正图像的像素保持率和像素有效率。

6 结 论

本文采用间接方法来校正全向图像对,即对全向图的柱面展开进行校正,并通过分析图像校正的重采样效应,提出了重采样效应的评估准则,进而针对现有柱面图像校正方法中存在的不足,首先结合柱面图像的对极几何特点,分析了柱面图像极线采样校正算法的优势,然后通过最大限度地采样参考图像,较好地保留了原始场景信息,减少了校正图像

的失真和畸变。实验表明,与基于投影变换的柱面图像校正算法相比,本文算法能取得更好的校正效果。

参考文献 (References)

- Zhang Mao-jun, Xu Wei, Wang Wei, *et al.* Real Space Construction and Its Instruments for Conicoid Reflective Imaging [P]. Patent Application No. ZL200520050779.4, Patent Office of the People's Republic of China, 2005. [张茂军,徐玮,王伟等.二次凸曲面反射成像的实景空间构造方法及其装置[P].专利授权号 ZL200520050779.4,中华人民共和国国家专利局,2005.]
- Smadja L, Benosman R, Devars J. Determining epipolar constraint on cylindrical images and using it for 3D reconstruction [A]. In: Proceedings of International Conference on Advanced Robotics [C], Budapest, Hungary, 2001:24-31.
- Bunschoten R, Krose B. Range estimation from a pair of omnidirectional images [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C], Seoul, Korea, 2001:1174-1179.
- Bunschoten R, Krose B. 3-D scene reconstruction from cylindrical panoramic images [J]. Robotics and Autonomous Systems (special issue), 2002, 41(2/3):111-118.
- Kimura M, Saito H. 3D reconstruction based on epipolar geometry [J]. IEEE Transactions on Information and Systems, 2001, E84-D(12):1690-1697.
- McMillan L, Bishop G. Plenoptic modeling: An image-based rendering system [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH [C], New York, USA, 1995:39-46.
- Koyasu H, Miura J, Shirai Y. Real-time Omnidirectional Stereo for obstacle detection and tracking in dynamic environments [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and System [C], Maui, Hawaii, USA, 2001:31-36.
- Gluckman J, Nayar S K, Thorek K. Real-time omnidirectional and panoramic stereo [A]. In: Proceedings of Image Understanding Workshop [C], Monterey, Mexico, 1998:698-705.
- Lawrence A, Nathan D. Method and System for Panoramic Image Morphing [P]. United States Patent, 6795090, 2004.
- Oram D. Rectification for any epipolar geometry [A]. In: Proceedings of 12th British Machine Vision Conference [C], Manchester, UK, 2001:653-662.
- Roy S, Meunier J, Cox I J. Cylindrical rectification to minimize

- epipolar distortion [A] . In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], San Juan, Puerto Rico, USA, 1997:393-405.
- 12 Wu H H P, Yu Y H, Chen W C. Projective rectification based on relative modification and size extension for stereo image pairs [J]. Proceedings of IEE on Vision, Image and Signal Processing, 2005, **152**(5):623-633.
- 13 Xiong Zhi-hui, Xu Wei, Wang Wei *et al.* Reduce look-up table space in panorama unrolling of catadioptric omni-directional images by eight direction symmetry reuse strategy [J]. Mini-micro Systems, 2007, **28**(10):1832-1836. [熊志辉, 徐玮, 王炜等. 八向对称重用策略降低全景图像查表展开法查找表空间 [J]. 小型微型计算机系统, 2007, **28**(10):1832-1836.]
- 14 Pollefeys M. Self-calibration and Matrix 3D Reconstruction from Uncalibration Image Sequences [D]. Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium, 1999.
- 15 Loop C, Zhang Z Y. Computing rectifying homographies for stereo vision [A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Fort Collins, CL, USA, 1999: 125-131.
- 16 Fusiello A, Trucco E. A compact algorithm for rectification of stereo pairs [J]. Machine Vision and Applications, 2000, **12**(1): 6-22.
- 17 Geyer C, Daniilidis K. Conformal rectification of omnidirectional stereo pairs [A]. In: Proceedings of Workshop on Omnidirectional Vision and Camera Networks [C], Madison, Wisconsin, USA, 2003: 73-73.
- 18 Song Han-chen. Research on Image-base Object Modeling and Rendering in Virtual Environment [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. [宋汉辰. 虚拟环境中图像对象的建模与表现技术研究 [D]. 长沙:国防科技大学, 2004.]
- 19 Yang B W. Minimizing deformation geometric rectification of non-calibration stereovision [J]. Guangdong Gongcheng/Opto-Electronic Engineering, 2007, **34**(1): 80-84.
- 20 Guo J, Guo X, Lei L, *et al.* A deformation-minimized reprojection method based on generalized planar rectification [A]. In: Proceedings of International Conference on Signal Process [C], Beijing, China, 2007:16-20.