

## 组合全景相机多圆柱投影全景拼接方法

崔红霞<sup>1\*</sup>, 王雪莹<sup>1\*\*</sup>, 赵紫为<sup>1</sup>, 张芳菲<sup>2</sup><sup>1</sup>渤海大学信息科学与技术学院, 辽宁 锦州 121013;<sup>2</sup>中电太极(集团)有限公司, 北京 100083

**摘要** 针对 360°全景视场的物距不一致性、多相机一个柱面的全景柱面投影方程导致的全景影像拼接误差,以及直接全景拼接方法容易导致“空白”像素的问题,本文提出了一种基于多圆柱投影优化的多相机组合全景柱面间接拼接方法。利用低成本网络摄像机设计一个八组合全景相机系统,根据多镜头组合型全景相机的严格成像原理,推导出一套完整的组合全景平面投影与子相机透视投影的间接映射方程;以相邻相机同名特征点的投影一致性为约束条件、以投影误差最小为目标函数,采用梯度下降法求解多个圆柱半径的最优解,将一个圆柱投影的方法拓展为多圆柱投影。实验结果表明,在 360°全景视场不一致的情况下,多圆柱组合全景拼接的各重叠区域的最大投影误差不超过 1 pixel,均方根误差(RMSE)优于 0.27 pixel,拼接精度明显高于一个圆柱投影的传统组合全景拼接方法,达到了视觉上的几何一致性且无空白像素。

**关键词** 成像系统; 组合全景相机; 间接方法; 柱面投影; 相机标定; 损失函数

**中图分类号** TP391.4

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1804004

## 1 引言

全景视觉成像已被广泛应用于交通监督、虚拟现实、机器人导航、街景图像采集、移动测量等相关领域<sup>[1-4]</sup>。一般来说,目前市场上存在三种类型的全景成像方式,即旋转扫描式、折反射式和多镜头组合式。旋转扫描式成像通过控制单目相机进行 360°旋转来实现大视场区域的连续扫描成像及影像的合成,需要分时扫描获取各个角度的影像,一般只用于静态或低速摄影<sup>[5-8]</sup>。折反射式全景成像利用平面镜折射周围的光至透镜,透镜再实现成像;由于其成像机理和制造工艺比较复杂,应用相对较少<sup>[9-10]</sup>。多镜头组合成像,就是利用多个相机建立组合全景相机,通过影像的拼接方法建立柱面或者球面投影的全景影像<sup>[11-14]</sup>。采用这种方式可以根据需要设计出水平视场为 360°、垂直视场从几十度到 180°的组合全景相机。此类方法方便灵活,市场上已经出现了镜头数目、类型、组织结构不同的具有不同特点的全景相机。测绘等应用领域的专业组合式全景相机,如 Point Grey 公司的 Ladybug 系列相机<sup>[15-16]</sup>、谷歌公司的车载 NCTech<sup>[17]</sup>、徠卡公司的移动实景全景测量背包等,配备有高精度 GPS/IMU(全球定位系统/惯性测量单元)位姿测量系统,体积较大,价格较昂贵。多镜头组合全景拼接方法可

以分为两类。一类是基于特征点匹配<sup>[18-21]</sup>获取单应矩阵的拼接方法。徐弘祯等<sup>[22]</sup>、刘自金等<sup>[23]</sup>都提出了尺度不变特征变换(SIFT)特征点提取和匹配的方法,这些方法通过对图像变换矩阵进行优化,提高了影像拼接的精度和一致性。但是此类拼接方法没有考虑相机之间的相对定向关系,对特征点的依赖性强,不论是基于全局矩阵还是基于局部单应矩阵的图像拼接方法,其拼接精度都主要取决于匹配点对的数量和质量。因此:当场景中的特征点不足或特征点分布不均匀时,图像变换矩阵的解算精度和鲁棒性就会比较低;而当特征点数量足够多时,就需要大量运算,会降低拼接速度。另一类是基于相机预标定的全景拼接成像方法,即:利用相机高精度标定预先获取相机间的相对定向参数,直接建立原始平面透视成像与柱面全景成像的关系,实现全景拼接,不受场景制约以及重叠视场低的限制。这种方法也是用于测量目的的组合全景相机常用的拼接方法<sup>[24-29]</sup>。文献[24-25]忽略了全景投影中心与实际相机投影中心的“偏心误差”,采用理想的全景球面成像模型实现全景拼接,因此产生了系统误差;文献[26]提出了一种严格成像模型;文献[27]对理想和严格全景成像模型的系统误差进行了详细分析;文献[28-29]利用严格的全景成像模型分别进行了运动恢复结构

收稿日期: 2022-01-07; 修回日期: 2022-02-05; 录用日期: 2022-02-18

基金项目: 自然资源部测绘科学与地球空间信息技术重点实验室开放研究基金课题(2020-2-4)、辽宁省教育厅重点攻关项目(LZ2020004)

通信作者: \*cuihongxia@bhu.edu.cn; \*\*839039734@qq.com

(SFM)和同步定位与地图构建(SLAM)的三维重建技术研究和实验,进一步利用三维重建的结果精确纠正全景影像,这是一种基于移动三维重建的解决方案;文献[30]提出了一种双目全景相机设计和双目三维重建的方法,该方法可以提高全景影像的拼接精度。

综上,第一类方法主要通过提高特征点提取和配准的准确率来提高全景成像的几何拼接精度,第二类方法主要通过三维重建提高全景拼接的精度。然而,目前的已有文献缺少直接利用单目全景相机内部的约束条件来提高虚拟全景拼接平面影像拼接精度和几何一致性方面的研究,而且,已有的文献集中于柱面或者球面全景直接法成像模型的研究,而关于间接法的全

景拼接、模型推导和应用还不完整。本团队建立了一种由低成本网络摄像头组合的全景摄像机,通过预标定相机的内方位元素、畸变参数以及相机之间的相对定向关系,构建了间接法严格全景拼接模型;同时提出了一种多圆柱投影的组合全景拼接优化方法,该方法可以减小重叠区域在视觉上的拼接误差,改进全景图像的拼接精度。最后,本团队通过室内实际数据的对比,验证了本文所述方法的有效性,总结了该方法的适用范围。

## 2 单相机成像模型

根据理想小孔成像模型,任意物方点  $P$  及其像点  $p$  的坐标转换关系为

$$Z_C \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2$ ,  $\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{H}_2 =$

$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ;  $Z_C$  为尺度因子;  $(u_p, v_p)$  为点  $p$  在像素坐标系中的坐标;  $f_x, f_y$  分别为相机在  $x$  轴、 $y$  轴方向的主距;  $(u_0, v_0)$  为像主点坐标;  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$  分别为相机的像空间坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵和相机摄影中心的平移向量;  $[X_P \ Y_P \ Z_P]^T$  为点  $P$  在世界坐标系下的坐标向量;  $\mathbf{H}, \mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$  分别为投影矩阵、内参矩阵和外参矩阵。

式(1)所示的理想成像模型忽略了相机畸变。实际上,由于相机镜头本身以及安装等因素,成像光线会发生弯曲,因此实际像点会偏离其理想的成像位置。相机畸变主要分为径向畸变和切向畸变,本文仅考虑径向畸变的前两项。假定畸变中心与相机光心重合,则可建立径向畸变模型,即

$$\begin{cases} u' = u + (u - u_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ v' = v + (v - v_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $(u', v')$  为实际图像的像素坐标;  $(u, v)$  为理想图像的像素坐标;  $(u_0, v_0)$  为像主点坐标;  $k_1, k_2$  为径向畸变系数;  $(x, y)$  为像点的理想坐标。

张氏标定法以高精度棋盘格作为平面靶标,标定摄像机的内方位元素和畸变参数,是计算机视觉领域常用的标定方法。首先获取不同位置和姿态的标定靶标的影像,利用提取的特征点和物方点,构建式(1)所示的投影方程,以线性方法求解出投影矩阵  $\mathbf{H}$ ; 然后利用旋转矩阵的单位正交关系,建立至少 6 个约束方

程,求解相机内参和外参的初始值。进一步,基于式(1)、(2)构建非线性优化方程,构建的方程如式(3)所示。采用最小二乘法中的 Levenberg-Marquardt 方法求解并优化方程各参数。

$$e = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - m'(K, k_1, k_2, R_i, t_i, X_j)\|^2, \quad (3)$$

式中:  $e$  为待优化函数;  $n$  为标定图片的数量;  $m$  为棋盘格角点的个数;  $m_{ij}$  为三维点  $X$  对应的理想的二维像点;  $m'$  为三维点  $X$  通过相机内参矩阵  $\mathbf{K}$ 、畸变系数  $k_1$  和  $k_2$ 、旋转矩阵  $\mathbf{R}$ 、平移向量  $\mathbf{t}$  变换后得到的实际二维像点。

## 3 改进的组合全景柱面拼接方法

### 3.1 严格的柱面全景间接拼接方法

本团队设计了一种八组合全景相机系统,图 1(a)为该全景相机系统的俯视图。1 号子相机设为主相机,其他子相机为从相机。利用张氏标定法,以高精度棋盘格作为平面靶标,标定各子相机的内方位元素和畸变参数;通过同时观测同一平面靶标,标定任意两个相邻子相机的相对定向关系,通过外方位元素的传递建立各从相机相对于主相机的相对定向关系。

如图 1(c)所示,子相机的投影中心为  $C_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ ,全景柱面中心为  $O$ 。一般情况下,投影中心  $C_i$  与虚拟全景柱面圆心  $O$  无法完全重合。设  $[X_{i-1} \ Y_{i-1} \ Z_{i-1}]^T$  和  $[X_i \ Y_i \ Z_i]^T$  分别为子相机  $i-1, i$  的外方位线元素坐标向量,  $\mathbf{R}_{i-1}, \mathbf{R}_i$  分别为相邻子相机  $i-1, i$  的旋转矩阵,则可建立如式(4)、(5)所示的方程,求解相邻相机间的相对旋转矩阵  $\mathbf{R}_i^{i-1}$  和相邻相机的相对线元素  $[X_i^{i-1} \ Y_i^{i-1} \ Z_i^{i-1}]^T$ 。

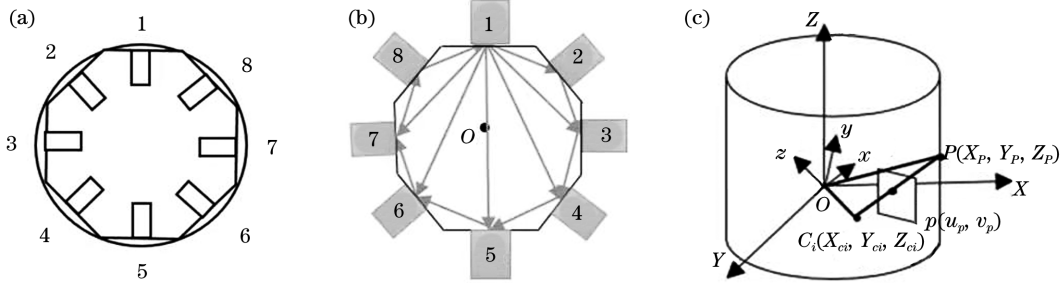


图 1 八组合全景相机系统。(a)全景相机的俯视图;(b)向量关系图;(c)严格的柱面投影模型图  
Fig. 1 Eight-combination panoramic camera system. (a) Top view of panoramic camera; (b) vector relation diagram; (c) strict cylindrical projection model figure

$$\mathbf{R}_i^{i-1} = (\mathbf{R}_{i-1})^{-1} \cdot \mathbf{R}_i, i = 1, 2, \dots, 8, \quad (4)$$

$$[X_i^{i-1} \ Y_i^{i-1} \ Z_i^{i-1}]^T = (\mathbf{R}_{i-1})^{-1} \cdot [X_{i-1} - X_i \ Y_{i-1} - Y_i \ Z_{i-1} - Z_i]^T, i = 1, 2, \dots, 8. \quad (5)$$

由式(4)、(5)可进一步导出从相机与主相机之间的相对旋转矩阵  $\mathbf{R}_i^1$ , 即

$$\mathbf{R}_i^1 = \mathbf{R}_2^1 \cdots \mathbf{R}_{i-1}^{i-2} \mathbf{R}_i^{i-1} (i > 2). \quad (6)$$

如图 1(b)所示,根据向量法则,可求解所有子相机与主相机之间的相对线元素  $[X_i^1 \ Y_i^1 \ Z_i^1]^T$ , 即

$$[X_i^1 \ Y_i^1 \ Z_i^1]^T = [X_{i-1}^1 \ Y_{i-1}^1 \ Z_{i-1}^1]^T + \mathbf{R}_{i-1}^1 \cdot (\mathbf{R}_{i-1})^{-1} \cdot [X_{i-1} - X_i \ Y_{i-1} - Y_i \ Z_{i-1} - Z_i]^T, (i > 1). \quad (7)$$

令虚拟柱面空间坐标系的投影中心为各子相机投影中心的几何重心,则子相机在全景柱面像空间坐标系下的坐标为

$$[X_i^c \ Y_i^c \ Z_i^c]^T = \left[ X_i^c - \sum_{j=1}^8 \frac{X_j^1}{8} \quad Y_i^c - \sum_{j=1}^8 \frac{Y_j^1}{8} \quad Z_i^c - \sum_{j=1}^8 \frac{Z_j^1}{8} \right]^T, \quad (8)$$

式中:  $[X_i^c \ Y_i^c \ Z_i^c]^T$  为子相机在虚拟柱面空间坐标系下的投影中心坐标。

如图 1(c)所示,令  $O-XYZ$  为虚拟全景柱面坐标系,其像空间坐标系的  $X, Y, Z$  轴分别与 1 号主相机像空间坐标系的各对应坐标轴平行,  $r$  为半径(即物距),以柱面投影中心  $O$  为原点、 $r$  为半径建立柱面投影模型。令  $C_i-xyz$  为子相机  $i$  的像空间坐标系,任意空间点  $P'$  的柱面投影点  $P$ 、投影中心  $C_i$ 、理想像点  $p$  三点共线,由式(1)可推导出理想无畸变像点  $p(u_p, v_p)$ 、对应的全景虚拟柱面成像点的线性成像方程,即

$$[u_p \ v_p \ 1]^T = t \cdot \mathbf{K}_i \cdot \mathbf{R}_i^1 [X_P - X_i^v \ Y_P - Y_i^v \ Z_P - Z_i^v]^T, \quad (9)$$

点  $P$  在柱面上,满足方程

$$X_P^2 + Y_P^2 = r^2, \quad (10)$$

式中:  $t$  为比例因子;  $\mathbf{K}_i$  为子相机  $i$  内的方位元素;  $\mathbf{R}_i^1$  表示子相机 ( $i=1, 2, \dots, 8$ ) 与主相机之间的相对旋转矩阵;  $r$  为柱面投影半径;  $[X_P \ Y_P \ Z_P]^T$  和

$[X_i^v \ Y_i^v \ Z_i^v]^T$  分别为柱面投影点  $P$ 、子相机  $i$  投影中心的全景柱面坐标向量。

式(9)、(10)联立可构成虚拟柱面全景间接成像方程,如图 2 所示。设柱面空间点  $P$  在展开的全景平面坐标系  $O-xy$  中的投影点为  $p_v(x_p, y_p)$ ,则可建立虚拟全景像平面坐标系与子相机的间接转换方程,即

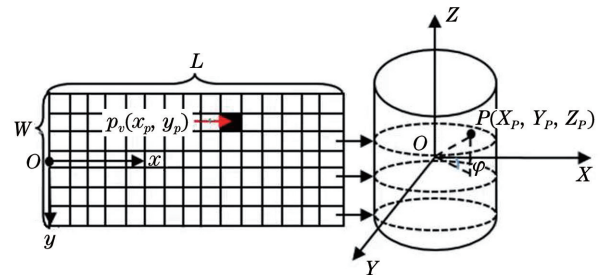


图 2 全景平面坐标系到全景柱面坐标系的转换关系图  
Fig. 2 Transformation diagram from panoramic plane coordinate system to panoramic cylindrical coordinate system

$$[u_p \ v_p \ 1]^T = t \cdot \mathbf{K}_i \cdot \mathbf{R}_i^1 \left[ r \sin \frac{\pi x_p}{L} - X_i^v \quad r \cos \frac{\pi x_p}{L} - Y_i^v \quad \frac{2\pi r}{L} \left( \frac{W}{2} - y_p \right) - Z_i^v \right]^T, \quad (11)$$

式中:  $L$  为全景平面坐标系的横向像素;  $W$  为全景平面坐标系的纵向像素。

式(10)、(11)建立了柱面全景平面虚拟影像像点

与真实相机影像理想像点之间的间接投影方程。仅考虑径向畸变的前两项,根据式(2)所示的非线性畸变模型,通过理想的无畸变像点直接求出原始影像的像点

$p'(u'_p, v'_p)$ 。由于像点  $p$  不一定是像素中心,故通过双线性内插灰度重采样该像点灰度,并将其作为全景平面像点  $p_v(x_p, y_p)$  的灰度。

### 3.2 多圆柱投影的组合全景拼接方法

如图 3 所示,多张单相机影像经过投影变换投影到一个虚拟柱面,虚拟柱面的成像可分为重叠区和非重叠区,其中重叠区是指图中的红色区域。场景中的物距因存在差异无法完全一致,受柱面半径  $r$  (也称为物距) 的设置以及相机预标定等多种因素的影响,虚拟全景影像会出现拼接误差。

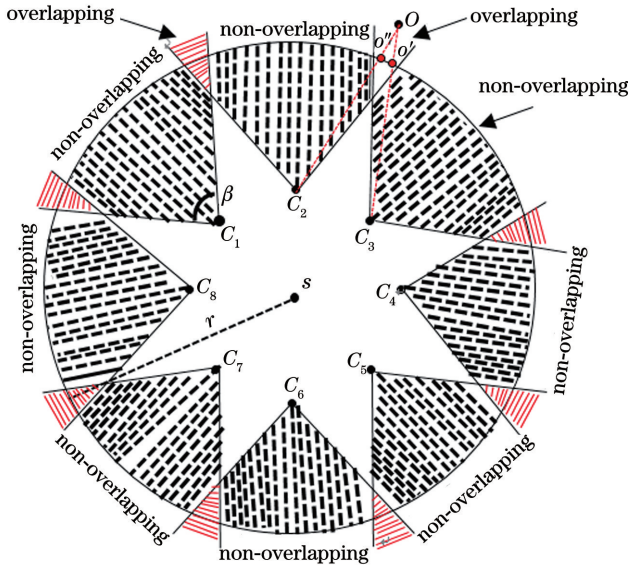


图 3 组合全景相机重叠结构

Fig. 3 Overlapping architecture of panoramic camera system

令  $Q$  为重叠区域的物方点,若以图中设定的  $r$  为物距进行柱面投影,则相邻相机影像中的同名点进行柱面投影会得到两个物方点  $Q'$  和  $Q''$ ,两点未能重合,存在投影误差,且会出现重影、错位等视觉观测的不一致性情况。非重叠区域是指图中黑色区域,当物距  $r$  偏离真实的物距时,柱面投影像点产生投影误差,但这

种误差通过直观视觉观测不到,不存在视觉不一致性。基于上述特点,本文提出了一种多圆柱投影的分区域物距优化方法,也就是利用组合相机子影像之间的内部约束关系,以非线性优化法获取重叠区域的局部优化物距,以加权插值法获取非重叠区域局部优化物距,达到全景影像在全局直观视觉上的一致性。

理想情况下,“同名点同投影位置”。假定每两个相邻相机的重叠区域的物距相同,利用重叠影像间的同名特征点,构建重投影误差和最小的目标函数,求解局部圆柱“半径”,构建局部投影成像方程。设同一曝光时刻相邻相机  $i, j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, 8$ ) 同时获取两个子影像,其第  $m$  个特征点互为同名点,  $q_i^m, q_j^m$  分别表示其对应的坐标向量,则由式(11)可以分别导出其柱面投影点的坐标向量  $Q_i^m$  和  $Q_j^m$ ,即

$$Q_i^m = t_i(r)(R_i^1)^{-1}(K_i)^{-1}q_i^m + T_{C_i}, \quad (12)$$

$$Q_j^m = t_j(r)(R_j^1)^{-1}(K_j)^{-1}q_j^m + T_{C_j}, \quad (13)$$

式中:  $R_i^1, R_j^1$  分别为相机  $i, j$  与虚拟柱面像空间坐标系之间的相对旋转矩阵;  $K_i, K_j$  分别为子相机的内方位元素;  $T_{C_i}, T_{C_j}$  分别为相机  $i, j$  的投影中心在全景像空间坐标系下的坐标平移向量;  $t_i(r), t_j(r)$  分别为柱面半径  $r$  的函数,其表达式为

$$t_i(r) = \frac{a_i}{\sqrt{a_i r^2 - b_i^2 - c_i}}, \quad t_j(r) = \frac{a_j}{\sqrt{a_j r^2 - b_j^2 - c_j}}, \quad (14)$$

其中,  $a_i = x_i^2 + y_i^2, b_i = x_i Y_{C_i} + y_i X_{C_i}, c_i = x_i X_{C_i} + y_i Y_{C_i}, [x_i \ y_i \ 1]^T = (R_i^1)^{-1} \cdot (K_i^{-1}) \cdot [u_i \ v_i \ 1]^T$ 。

同理,可以求解  $a_j, b_j, c_j$ 。

经过高精度标定,已知子相机间的相对定向关系以及子相机的内方位元素、畸变参数,采用最小二乘法构建目标函数,求解使同名点的柱面重投影误差最小的柱面半径  $r$ ,即

$$f(\text{loss}) = \min \frac{1}{2} \sum_{m=1}^n \|Q_i^m - Q_j^m\|^2, \quad (15)$$

$$r_k = r_{k-1} - \epsilon \left[ \left( \frac{dX_i^m}{dr} - \frac{dX_j^m}{dr} \right) (X_i^m - X_j^m) + \left( \frac{dY_i^m}{dr} - \frac{dY_j^m}{dr} \right) (Y_i^m - Y_j^m) + \left( \frac{dZ_i^m}{dr} - \frac{dZ_j^m}{dr} \right) (Z_i^m - Z_j^m) \right], \quad (16)$$

式中:  $f(\text{loss})$  为目标函数;  $n$  为匹配点对总数;  $r_k, r_{k-1}$  分别为第  $k, k-1$  次迭代计算的柱面半径;  $\epsilon$  为步长;  $\frac{dX_i^m}{dr} = \frac{dX_i^m}{dt(r)} \cdot \frac{dt(r)}{dr}, \frac{dY_i^m}{dr} = \frac{dY_i^m}{dt(r)} \cdot \frac{dt(r)}{dr}, \frac{dZ_i^m}{dr} = \frac{dZ_i^m}{dt(r)} \cdot \frac{dt(r)}{dr}, \frac{dX_j^m}{dr} = \frac{dX_j^m}{dt(r)} \cdot \frac{dt(r)}{dr}, \frac{dY_j^m}{dr} = \frac{dY_j^m}{dt(r)} \cdot \frac{dt(r)}{dr}, \frac{dZ_j^m}{dr} = \frac{dZ_j^m}{dt(r)} \cdot \frac{dt(r)}{dr}$ ;  $X_i^m, Y_i^m, Z_i^m$  分别为第  $i$  个相机第  $m$  个同名特征点对应的柱面投影点在  $X, Y, Z$  方向的坐标;  $X_j^m, Y_j^m, Z_j^m$  分别为第  $j$  个相机第  $m$  个同名特征点对应的柱面投影点在  $X, Y, Z$  方向的坐标。

优化过程的求解过程是一个非线性的最小二乘问题,本文使用梯度下降法来求解该问题,第  $k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) 次优化后,如式(16)所示;当  $|r_k - r_{k-1}| < e$  ( $e$  为经验系数,本实验设为 10) 时,迭代终止。

由式(16)解算一组重叠区域的一组优化物距

$r_1^q, r_2^q, \dots, r_8^q$ 。场景中的物距无法完全一致,为了达到视觉一致性,利用重叠区域的一组优化物距,以加权插值法计算非重叠区域的局部物距,计算公式为

$$r_c^h = w_1 r_1^q + (1 - w_1) r_{i+1}^q, \quad (17)$$

式中： $r_c^h$  为柱面图像非重叠区域第  $h$  列的物距； $h = 1, 2, \dots, r_l^q, r_{l+1}^q$  表示第  $l, l+1$  重叠区的优化物距； $w_l$  表示权重。

### 4 实验分析

如图 4 所示,本文设计的八组合全景相机由 8 个高清网络网口 NVR 摄像机构成,并由八边形支架固定。每个摄像头的分辨率为  $2952 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$ ,传感器尺寸为  $1/2.8 \text{ inch}$  ( $1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$ ),焦距为  $5 \text{ mm}$ ,水平视场角均为  $60^\circ$ ,垂直视场角均为  $45^\circ$ 。利用 VS2020 实现本文所述方法并开发了一套专用的组合全景拼接软件。在保证组合全景相机系统固定不动的情况下,利用  $12 \times 10$  的高精度标定板进行实验,每个相机获取同一棋盘格的  $20 \sim 30$  张不同位姿的图片,然后使用张正友等<sup>[31]</sup>提出的棋盘格标定方法标定每个相机的内方位元素、畸变系数和外方位元素。每两个相邻相机同时获取棋盘格不同位姿

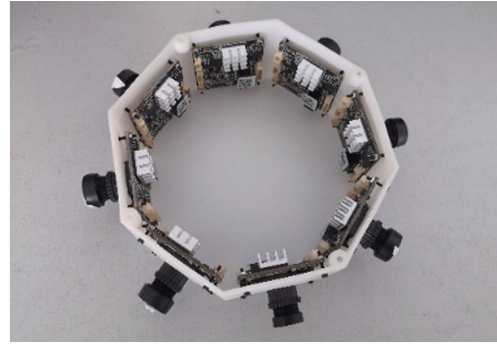


图 4 组合全景相机的系统架构

Fig. 4 Panoramic camera system architecture

的影像共 10 组,计算每组影像的相对定向元素,取 10 组平均值为相邻相机的相对定向元素( $\alpha$  为  $x$  方向的旋转角度, $\beta$  为  $y$  方向的旋转角度, $\gamma$  为  $z$  方向的旋转角度)。组合相机的相对定向元素如表 1 所示。利用预标定的结果,构建组合全景间接拼接成像模型。

表 1 组合相机的相对定向元素

Table 1 Relative orientation elements of combined cameras

Camera	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	$\gamma / (^\circ)$	X /cm	Y /cm	Z /cm
Camera 1	0	0	0	0.0238	4.0950	0.3325
Cameras 1-2	-0.0248	0.6691	-0.0285	3.2273	2.5220	1.1306
Cameras 2-3	0.0838	0.6387	0.0802	4.8675	-1.0091	1.6011
Cameras 3-4	-0.0210	0.8555	0.0715	3.0778	-4.3322	0.8516
Cameras 4-5	-0.0505	0.7016	0.0234	0.9727	-5.1819	-0.5938
Cameras 5-6	-0.0485	0.5106	0.0760	-4.8667	-1.5885	-1.2025
Cameras 6-7	0.1119	0.7537	-0.0580	-3.0730	1.3413	-1.7926
Cameras 7-8	0.0116	0.7006	0.0207	-2.2840	4.1536	0.6732

将传统的一个圆柱的柱面全景拼接方法记为方法 A,该方法以一个半径的间接投影方法生成虚拟全景影像;将多圆柱的柱面全景拼接方法记为方法 B,该方法基于多圆柱的组合全景成像拼接模型生成全景柱面平面影像。为避免拼接后图像间灰度的不一致过渡,两种方法均采用加权平均融合的方法完成重叠区域的辐射校正。

如图 5(a)所示,预设定的柱面半径为  $3989.4 \text{ mm}$ ,方法 A 生成的虚拟全景影像的重叠区域存在明显的拼接误差;如图 5(b)所示,利用方法 B 优化重叠区域的局部圆柱半径和非重叠区域的圆柱半径,各重叠区域的圆柱半径分别优化为  $r_1 = 1510 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 2300 \text{ mm}$ ,  $r_3 = 2900 \text{ mm}$ ,  $r_4 = 2300 \text{ mm}$ ,  $r_5 = 1480 \text{ mm}$ ,  $r_6 = 2100 \text{ mm}$ ,  $r_7 = 2930 \text{ mm}$ ,  $r_8 = 2780 \text{ mm}$ 。各重叠区域生成的虚拟影像的重叠区域无明显的几何拼接缝隙,非重叠区域的影像几何平滑过渡到重叠区域,保证了全景影像的几何连续性。方法 A、方法 B 生成的全景虚拟影像重叠区域的各子相机同名点的投影误差如

表 2 所示。可以看出,方法 A 的重叠区域同名点投影均方根误差(RMSE)均在  $1.98 \text{ pixel}$  以内,而本文方法(方法 B)的投影均方根误差在  $0.27 \text{ pixel}$  以内,约为方法 A 的  $1/7$ 。此外,对于方法 A 来说,其  $y$  方向的反投影像点坐标误差均比  $x$  方向的小,说明物距  $r$  对  $x$  方向的影响较大。当场景复杂、各方向景深不一致时,应选择视场内主体景物的特征点对进行优化计算。

由图 6 可以看出:利用预标定的结果,以已有的柱面严格直接成像方法生成虚拟全景影像,全景拼接影像上存在“空白像素”;而利用严格的间接反投影方法映射,所有像点都有其对应的灰度值,解决了像点丢失或累加的问题,拼接效果更好。此外,针对室内稀少特征点场景(如图 5 所示,即场景 I)和室外多特征点场景(如图 6 所示,即场景 II),分别基于经典的 SIFT 方法、OpenCV 开发包的拼接方法、本文所述拼接方法进行拼接实验,每两幅图像的拼接效率如表 3 所示。



图 5 一个圆柱和多个圆柱全景拼接方法。(a)  $r=3989.4$  mm; (b)  $r_1=1510$  mm,  $r_2=2300$  mm,  $r_3=2900$  mm,  $r_4=2300$  mm,  $r_5=1480$  mm,  $r_6=2100$  mm,  $r_7=2930$  mm,  $r_8=2780$  mm  
 Fig. 5 Single-cylinder and multiple cylinders panoramic stitching methods. (a)  $r=3989.4$  mm; (b)  $r_1=1510$  mm,  $r_2=2300$  mm,  $r_3=2900$  mm,  $r_4=2300$  mm,  $r_5=1480$  mm,  $r_6=2100$  mm,  $r_7=2930$  mm,  $r_8=2780$  mm

表 2 方法 A 和方法 B 的投影误差

Table 2 Projection error of methods A and B

unit: pixel

Camera	RMSE in $x$ direction	RMSE in $y$ direction	Total RMSE in $x$ and $y$ directions	Max error in $x$ direction	Max error in $y$ direction
A (1-2)	1.86	0.22	1.87	3.0839844	0.8300781
B (1-2)	0.18	0.20	0.26	0.6301269	0.5999023
A (2-3)	1.53	0.20	1.54	2.8520203	0.6999512
B (2-3)	0.17	0.16	0.23	0.6000976	0.5998535
A (3-4)	1.21	0.16	1.22	2.8099976	0.7309875
B (3-4)	0.09	0.15	0.17	0.5400390	0.4454994
A (4-5)	1.47	0.19	1.48	2.0769958	0.8701172
B (4-5)	0.16	0.15	0.22	0.6599121	0.5300293
A (5-6)	1.97	0.21	1.98	4.2009890	0.9804687
B (5-6)	0.20	0.19	0.27	0.8798828	0.6479502
A (6-7)	1.62	0.17	1.63	3.0959778	0.9199219
B (6-7)	0.19	0.16	0.25	0.6880035	0.6389770
A (7-8)	1.14	0.13	1.15	1.7539978	0.7353958
B (7-8)	0.07	0.13	0.14	0.4942016	0.6752014
A (8-1)	1.19	0.15	1.20	1.9709778	0.7695312
B (8-1)	0.08	0.14	0.16	0.5745430	0.6852951

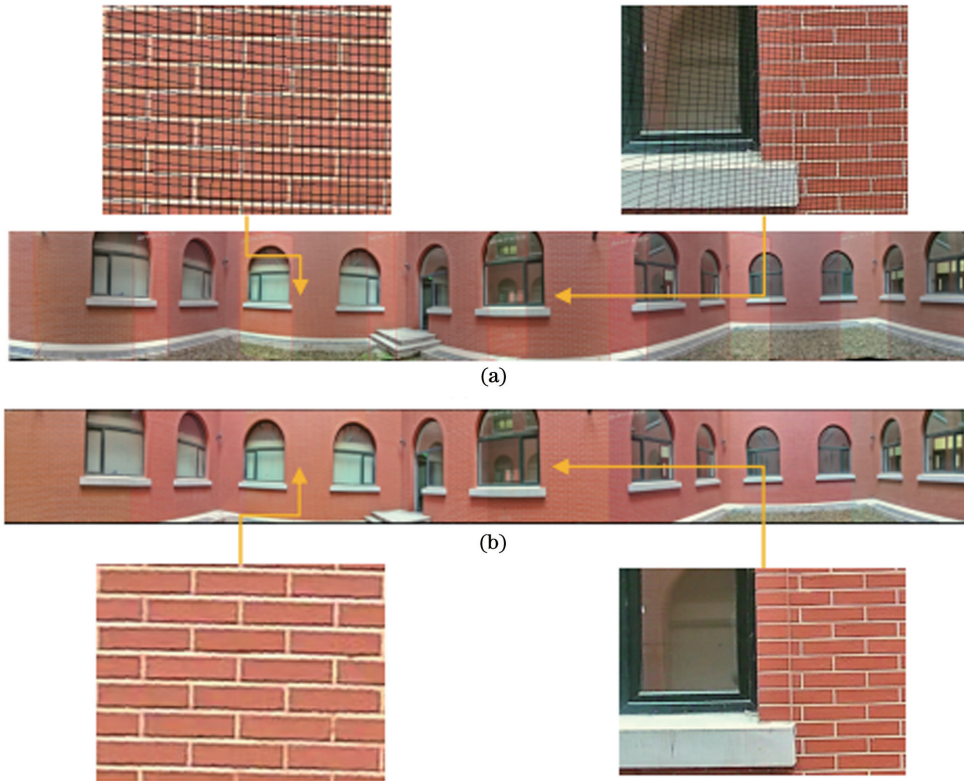


图 6 直接法和间接法投影的全景影像。(a)直接法;(b)间接法

Fig. 6 Panoramic images from direct and indirect methods. (a) Direct method; (b) indirect method

表 3 影像拼接效率对比

Table 3 Comparison of image mosaic efficiency

Scene	Method	Time-consuming /s						
		Cameras 1-2	Cameras 2-3	Cameras 3-4	Cameras 4-5	Cameras 5-6	Cameras 6-7	Cameras 7-8
I	SIFT	2.8327	3.2834	2.7098	3.2543	2.8534	3.1927	3.2734
	OpenCV	0.5060	0.5109	0.5874	0.5647	0.5459	0.5774	0.5521
	Ours	<b>0.0538</b>	<b>0.0534</b>	<b>0.0572</b>	<b>0.0528</b>	<b>0.0532</b>	<b>0.0528</b>	<b>0.0542</b>
II	SIFT	4.0127	4.5892	4.2384	4.2384	4.9203	4.1294	4.3038
	OpenCV	0.7829	0.7968	0.7375	0.7283	0.7736	0.7205	0.7710
	Ours	<b>0.0593</b>	<b>0.0588</b>	<b>0.0541</b>	<b>0.0567</b>	<b>0.0502</b>	<b>0.0564</b>	<b>0.0512</b>

Notes: I and II represent indoor rare feature points scene and outdoor multi-feature points scene, respectively.

由表 3 可知,在相同的计算机硬件和软件配置条件下,无论是特征点较少的室内环境还是多特征点的室外环境,本文拼接方法的平均耗时约为 OpenCV 方法的 1/10,约为 SIFT 方法的 1/55。显然,SIFT 特征点提取和匹配的计算量较大,耗时最长,OpenCV 开发包基于 ORB 特征点的拼接时间也较长,而本文方法只需根据预标定结果与严格成像模型原理,利用多圆柱间接法投影即可实现快速拼接,在保证拼接精度的同时有效提高了拼接效率。

## 5 结 论

利用出厂前预标定的方法获取各子相机参数和相机间的相对定向参数,直接建立原始平面透视成像与柱面全景平面成像的关系,实现全景拼接,是用于测量

目的的多镜头组合全景相机常用的拼接方法。然而,传统的多镜头组合型全景相机采用的是一个柱面或者球面半径的成像方程,360°全景视场的物距不一致性,容易导致全景影像拼接出现裂缝、错位等几何不一致性问题。此外,直接法的拼接容易产生空白像素等问题。利用低成本网络摄像机,本团队设计了一个八组合全景相机系统,建立了一套完整的虚拟柱面全景平面成像和原始相机平面透视成像的间接映射方程,并在此基础上,以投影误差最小作为目标函数,以梯度下降法求解多个柱面半径。室内环境和室外环境下的实验结果说明,与经典的 SIFT 方法和 OpenCV 开发包的拼接方法相比,本文所述拼接方法能够取得更高的拼接精度和视觉一致性,而且本文方法采用间接映射方法解决了“空白像素”的问题。本文方法适用于环形

设计的组合全景相机系统,也可以拓展应用到 720°球形设计的组合全景相机系统中。

### 参 考 文 献

- [1] Kao S T, Ho M T. Ball-catching system using image processing and an omni-directional wheeled mobile robot [J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 3208.
- [2] Xu H Z, Li S C, Ji Y H, et al. Dynamic obstacle detection based on panoramic vision in the moving state of agricultural machineries [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 184: 106104.
- [3] 卢秀山, 俞家勇, 田茂义, 等. 车载激光点云与序列化全景影像融合方法 [J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510004.  
Lu X S, Yu J Y, Tian M Y, et al. Fusion method of vehicle laser point cloud and serialized panoramic image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510004.
- [4] 崔红霞, 陈丽君, 王宁, 等. 基于标志自动编码的多视组合相机隐式约束标定方法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 011003.  
Cui H X, Chen L J, Wang N, et al. Calibration method with implicit constraints for multi-view combined camera using automatic coding of marker points [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 011003.
- [5] 郭伟青, 吴小刚, 汤一平. 单目多视角全景视觉感知三维重构技术研究 [J]. *小型微型计算机系统*, 2019, 40(7): 1525-1531.  
Guo W Q, Wu X G, Tang Y P. Research of 3D reconstruction based on monocular multi-view panoramic visual perception [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2019, 40(7): 1525-1531.
- [6] 张成, 高文武, 陈小宇. 一种车载线阵激光扫描测量系统几何标定模型 [J]. *测绘科学技术学报*, 2013, 30(6): 610-613, 618.  
Zhang C, Gao W W, Chen X Y. A geometric calibration model for the vehicle-borne linear laser-scanning surveying system [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2013, 30(6): 610-613, 618.
- [7] 吴越前, 徐欣, 王吉祥, 等. 基于线扫描成像的光片荧光显微镜 [J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2018001.  
Wu Y Q, Xu X, Wang J X, et al. Light sheet fluorescence microscope based on line-scanning imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2018001.
- [8] 李云梦, 关丽敏, 王会峰, 等. 旋转扫描结构光的三维检测系统及其标定 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(7): 66-73.  
Li Y M, Guan L M, Wang H F, et al. Three-dimensional detection system of rotating scanning structured light and its calibration [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(7): 66-73.
- [9] 景文博, 高雪峰, 黄炳坤, 等. 圆柱物体内壁的锥面折射反射全景图像展开 [J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0311002.  
Jing W B, Gao X F, Huang B K, et al. Expansion of conical catadioptric panoramic image of inner surface of cylindrical objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0311002.
- [10] Chen X, Zhou F Q, Xue T. Omnidirectional field of view structured light calibration method for catadioptric vision system [J]. *Measurement*, 2019, 148: 106914.
- [11] 王冬, 刘凤英, 陈天恩, 等. 一种相机标定参数的柱面全景影像拼接方法 [J]. *测绘科学*, 2016, 41(7): 150-154, 143.  
Wang D, Liu F Y, Chen T E, et al. The method of cylinder panoramic image mosaic based on camera calibration parameters [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(7): 150-154, 143.
- [12] 陈朝勇, 王凯, 吴敏, 等. 基于 CUDA 的场面全景图像柱面投影并行算法 [J]. *控制工程*, 2020, 27(9): 1636-1641.  
Chen C Y, Wang K, Wu M, et al. Parallel implementation of airport panoramic image cylindrical projection based on CUDA [J]. *Control Engineering of China*, 2020, 27(9): 1636-1641.
- [13] 何林飞, 朱煜, 林家骏, 等. 基于球面空间匹配的双目鱼眼全景图像生成 [J]. *计算机应用与软件*, 2020, 37(2): 166-170, 239.  
He L F, Zhu Y, Lin J J, et al. Panoramic image generation with dual fisheye based on spherical spatial matching [J]. *Computer Applications and Software*, 2020, 37(2): 166-170, 239.
- [14] 刘帅, 陈军, 孙敏, 等. 双球面投影几何可量测全景模型的构建 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27(4): 657-665.  
Liu S, Chen J, Sun M, et al. Measurable panorama construction based on binocular spherical projective geometry [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(4): 657-665.
- [15] 曹文君, 赵祚喜. Ladybug 系列多目全景视觉技术的应用研究 [J]. *机械与电子*, 2017, 35(12): 27-30.  
Cao W J, Zhao Z X. Study on application of multi-view panoramic vision technology to Ladybug series [J]. *Machinery & Electronics*, 2017, 35(12): 27-30.
- [16] Ke X L, Huang F, Zhang Y, et al. 3D scene localization and mapping based on omnidirectional SLAM [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 783(1): 012143.
- [17] Perfetti L, Polari C, Fassi F. Fisheye multi-camera system calibration for surveying narrow and complex architectures [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-2: 877-883.
- [18] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [19] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C]//*Proceedings of the Alvey Vision Conference*, September, 1988, Manchester, UK. London: Alvey Vision Club, 1988: 1-6.
- [20] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [21] 王才东, 刘丰阳, 李志航, 等. 基于双目视觉特征点匹配的图像拼接方法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(12): 1211002.  
Wang C D, Liu F Y, Li Z H, et al. Research on image mosaic method based on binocular vision feature point matching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1211002.
- [22] 徐弘祯, 李世超, 季宇寒, 等. 基于特征点匹配的全景相机图像拼接方法研究 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(S1): 150-158.  
Xu H Z, Li S C, Ji Y H, et al. Panoramic camera image mosaic method based on feature points [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(S1): 150-158.
- [23] 刘自金, 石玉英. 基于信息熵的改进 SIFT 图像快速匹配算法 [J]. *激光杂志*, 2021, 42(12): 129-135.  
Liu Z J, Shi Y Y. Improve fast SIFT image matching algorithm based on information entropy [J]. *Laser Journal*, 2021, 42(12): 129-135.
- [24] 季顺平, 史云. 车载全景相机的影像匹配和光束法平差 [J]. *测绘学报*, 2013, 42(1): 94-100, 107.  
Ji S P, Shi Y. Image matching and bundle adjustment using vehicle-based panoramic camera [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 94-100, 107.
- [25] Payá L, Fernández L, Gil A, et al. Map building and Monte Carlo localization using global appearance of omnidirectional images [J]. *Sensors*, 2010, 10(12): 11468-11497.
- [26] Shi Y, Ji S P, Shi Z C, et al. GPS-supported visual SLAM with a rigorous sensor model for a panoramic camera in outdoor environments [J]. *Sensors*, 2012, 13(1): 119-136.
- [27] 季顺平, 史云. 多镜头组合型全景相机两种成像模型的定位精度比较 [J]. *测绘学报*, 2014, 43(12): 1252-1258.  
Ji S P, Shi Y. Comparison of two sensor models for multi-camera rig system in measurements [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(12): 1252-1258.
- [28] 季顺平, 秦梓杰. 多镜头组合式相机的全景 SLAM [J]. *测绘学报*, 2019, 48(10): 1254-1265.  
Ji S P, Qin Z J. Panoramic SLAM for multi-camera rig [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(10): 1254-1265.
- [29] 尹双双. 多镜头组合式全景相机的 SFM 算法 [D]. 武汉: 武汉大学, 2020.



- Yin S S. SFM algorithm for multi-lens combined panoramic camera[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.
- [30] Wang X H, Li D Y, Zhang G. Panoramic stereo imaging of a bionic compound-eye based on binocular vision [J]. *Sensors*, 2021, 21(6): 1944.
- [31] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.

## Multicylinder Projection Stitching Method of Multicamera Panoramic System

Cui Hongxia<sup>1\*</sup>, Wang Xueying<sup>1\*</sup>, Zhao Ziwei<sup>1</sup>, Zhang Fangfei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Information Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning, China;

<sup>2</sup> China Electronics Technology Taiji (Group) Co., Ltd., Beijing 100083, China

### Abstract

**Objective** Panoramic imaging technology has been extensively employed in traffic supervision, robot navigation, mobile measurement, etc. Several panoramic systems have been developed by combining numerous cameras to offer a horizontal field of view of 360° and a vertical field of view ranging from decades degrees to 180°, with the development of sensors and computing abilities. The panoramic images can be created from the combined panoramic systems using two approaches. The first solution may be transformation, registration, and blending only based on the feature points. The approach often has a strong dependence on the feature points in the surrounding environment. Alternatively, the panoramic stitching approach depends on the direct or indirect transformation between the cylindrical or sphere and perspective projection. The second approach is more robust and effective than the first approach because of its independence of the feature points. However, the panoramic imaging would experience the mosaic error and geometric inconsistency of vision due to the surrounding environment's unknown depth. To solve the difficulties of panoramic mosaicking, empty pixels, and multiple pixel projection in one pixel caused by the traditional panoramic stitching approaches, a multicylinder projection-based mosaicking approach is proposed to ensure that panoramic images are produced effortlessly.

**Methods** In this study, we proposed an indirect panoramic cylindrical stitching approach based on multicylinder projection optimization to reduce the visual stitching error of overlapping regions while improving the panoramic images' stitching accuracy. We hope that our study approach can be beneficial in computer vision and other related fields. First, we developed a panoramic camera system combined with eight low-cost network cameras. A set of indirect mapping equations between panoramic planar and perspective projections of subcameras were developed according to the rigorous imaging model for a multicamera panoramic system. Particularly, a cost function was developed that employs the minimizing projection error based on the projection constraint of homonymy points on the cylinder. Furthermore, the optimal solution of multiple cylinder radius was solved using the gradient descent approach. Thus, the approach of one cylinder projection is extended to numerous cylinder projections.

**Results and Discussions** Table 1 shows the high-precision relative orientation elements between combined cameras. The panoramic indirect stitching imaging model was fabricated based on the precalibration findings. The experimental findings show that the multicylinder panoramic stitching approach offers a better visual effect than the traditional single-cylinder stitching approach (Fig. 5). In this manner, the corresponding points' projection error in the panoramic images formed from the proposed approach was about 1/7th of the traditional single-cylinder stitching approach. The projection error of single-cylinder and multicylinder panoramic stitching approaches were calculated (Table 2). Furthermore, compared with the traditional direct approach, the difficulties of empty pixels and accumulation of pixels are solved (Fig. 6). The stitching speed of a panoramic image generated from the proposed approach is 10 times that of the traditional SIFT feature-based approach and 55 times that of the mosaicking approach in the OpenCV package (Table 3).

**Conclusions** The proposed multicylinder projection-based mosaicking approach is effective in solving the difficulty of panoramic mosaicking errors due to traditional single-cylinder panoramic imaging equation in a 360° panoramic environment with inconsistent object distances. Additionally, the indirect projection approach is employed to solve the difficulties of empty and multiple pixel projections in one pixel due to the direct panoramic stitching approach. The approach proposed in this study exhibits higher stitching accuracy and visual consistency and is suitable for the panoramic systems combined with multiple cameras, which are designed with eight cameras arranged cylindrically. Indeed, it can also be extended to the sphere panoramic camera system.

**Key words** imaging systems; combined panoramic camera; indirect method; cylinder projection; camera calibration; loss function