

文章编号 1004-924X(2017)06-1635-10

应用摄像机位姿估计的点云初始配准

郭清达, 全燕鸣*, 姜长城, 陈健武

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 基于摄像机位姿估计的数学模型, 提出了一种检测摄像机位移前后目标图像特征点的方法, 通过求解摄像机发生位移前后的相对位姿矩阵来解决应用视觉图像获得点云的初始配准问题。首先, 介绍了摄像机位姿估计模型, 包括本质矩阵、旋转矩阵以及平移矩阵; 然后, 介绍了 SURF 算子的特征点检测、描述和匹配的方法, 在此基础上面向双目视觉和单目结构光系统, 分别提出了摄像机位移前后目标图像 SURF 特征点匹配和深度估计模型; 最后, 分别进行双目视觉和单目结构光系统点云的获取、位移前后目标图像特征点检测匹配和深度估计实验, 应用摄像机位姿估计模型求解旋转矩阵和位移矩阵, 并对位移矩阵进行统计分析剔除粗差。实验中采用基于点云空间特征点和基于图像的方法进行对比, 点云对应特征点均方误差缩小至 12.46 mm。实验结果验证了方法的可行性, 表明本文的点云初始配准方法能较好地获得点云精确配准初值。

关键词: 点云初始配准; 位姿估计; SURF 算子; 双目视觉; 结构光

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1635

Initial registration of point clouds using camera pose estimation

GUO Qing-da, QUAN Yan-ming*, JIANG Chang-cheng, CHEN Jian-wu

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of
Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding author, E-mail: meymquan@scut.edu.cn

Abstract: Based on the mathematical model of camera pose estimation, a feature point detection method of camera images before and after movement was proposed to obtain relative posture matrix of camera before and after movement, which can solve initial registration problem of point clouds derived from machine vision. Firstly, the estimation model of camera pose was introduced, including essential matrix, rotation matrix and translation matrix. Secondly, the detection, description and matching of feature points for SURF operator were introduced. On this basis, SURF feature points matching of camera images before and after movement and depth estimation model were respectively proposed for binocular vision and monocular structured light system. Finally, the acquisition of point clouds derived from binocular vision and monocular structured, feature points detection and matching of camera images before and after movement as well as camera depth estimation were realized experimentally. The mathematical model of camera pose was estimated to solve the rotation matrix and the translation matrix, and the residual analysis was carried out on the translation matrix for eliminating gross er-

收稿日期: 2016-10-17; 修订日期: 2016-12-19.

基金项目: 广东省省级科技计划研发与产业化项目 (No. 2013B090600052)

rors. In the experiment, the method of initial registration of point cloud based on feature point and based on images as contrast, the results show that the mean square error of the corresponding feature points are reduced to 12.46 mm. The result verifies the feasibility of the method, and indicates that the point registration method can obtain good initial values for accurate point cloud registration.

Key words: initial registration; pose estimation; SURF operator; binocular vision; structured light

1 引言

通过双目视觉系统或者单目结构光系统拍摄物体,可建立摄像机或投影仪坐标系位姿的几何约束模型以获得目标物的三维点云信息。三维点云信息的预处理包括点云去噪、点云精简、点云分割、点云配准等^[1-2]。其中点云配准技术,目前多应用在产品的逆向检测、建筑或古遗迹的数字化建模、面向机器人的目标物姿态识别等方面。点云配准根据处理过程分为初始配准和精确配准^[3]。国内外大多数学者关注在精确配准算法以及相应的改进应用上,例如最近点迭代算法(Iterative Closest Point, ICP)和正态分布变换算法(Normal Distributions Transform, NDT)^[4-6]。

为了减少精确配准算法的迭代次数以及避免算法局部最优,初始配准可为精确配准提供良好的位姿初值。为了获得初始配准变换矩阵,国内外学者对点云的研究一般侧重于点云的几何属性(曲率、法向、标签等)。罗先波等提出了在三维扫描系统中引入特征点,采用 SVD(Singular Value Decomposition)矩阵求解参数 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} ,作为 ICP 的初始值^[7];戴静兰等提出了一种主方向贴合法实现初始配准,使用曲率特征点和 k-d tree 寻找最近点来提高算法效率^[8];朱延娟等提出了一种将散乱点云直接配准的算法,基于测点的曲率和法矢特征采用几何哈希技术找出有效的匹配点对^[9];辛伟等提出采用不规则曲面点与其一邻域点重心间的距离作为刚性特征对点云进行粗略配准^[10]。

在不依赖于几何属性的点云初始配准方面,张晓等提出了一种通过点云体素化实现采样,建立三维点云相对应的二维图像映射关系,并用 SURF(Speeded up robust feature)算子提取图像特征匹配点以及对应映射的三维点云,最终利用单位四元数法获得变换矩阵的方法^[11];郭慧等提出了一种基于实数编码的多种遗传算法的配准方

法,能够快速获得较好的配准结果^[12];孟禹等提出了一种采样球配准方法,不依赖于点云的特征,采用“宽基”和“最大重合点数统计”技术可对噪声干扰具有抵抗力^[13]。

本文介绍了一种应用摄像机位姿估计的点云初始配准技术,通过摄像机位移前后所拍摄图像,应用 SURF 算子的匹配特征点、双极线约束、内部参数和特征点深度值等获得旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 。求解摄像机位移前后的特征点深度值,分别建立双目视觉以及单目结构光系统的深度估计模型,实验中采用残差分析剔除粗大匹配点对来提高平移矩阵的精度,并对双目视觉的稀疏点云和单目结构光系统的稠密点云进行了初始配准,能够得到较好的配准结果。

2 摄像机位姿估计模型

2.1 本质矩阵与旋转矩阵

图 1 为极线约束关系,其可以用 3×3 的基本

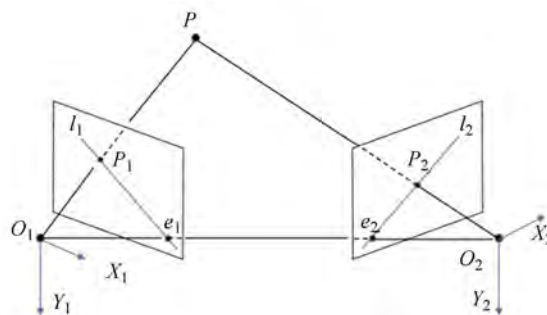


图 1 极线几何约束

Fig. 1 Epipolar geometry constrain

矩阵 \mathbf{F} 来表示^[14,15],通过基本矩阵 \mathbf{F} 可以将一幅图像上的像点 p_1 和 p_2 的坐标关系表示出来,关系如下:

$$\mathbf{p}_2^T \mathbf{F} \mathbf{p}_1 = 0. \quad (1)$$

设 x_1 和 x_2 为像点在摄像机坐标系下的坐标, \mathbf{A} 为摄像机的内部参数矩阵,式(1)进一步表达为:

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{A}^T \mathbf{F} \mathbf{A} \mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_2^T \mathbf{E} \mathbf{x}_1 = 0, \quad (2)$$

其中 \mathbf{E} 为本质矩阵。

设摄像机在对目标物体进行拍摄的过程中发生了一次运动,其运动的旋转矩阵为 \mathbf{R} ,平移向量为 \mathbf{t} ,目标点 P 在摄像机运动前后的摄像机坐标系中的坐标分别为 X_1 和 X_2 ,则有如下关系成立:

$$X_2 = \mathbf{R}X_1 + \mathbf{t}. \quad (3)$$

由于像点坐标与实际目标坐标的关系为 $X_i = \lambda_i x_i$,两边同时乘以反对称矩阵 $\hat{\mathbf{t}}$ ($\hat{\mathbf{t}}\mathbf{t}=0$),式(3)进一步得到:

$$\lambda_2 \hat{\mathbf{t}}x = \lambda_1 \hat{\mathbf{t}}\mathbf{R}x_1. \quad (4)$$

因为向量 $\hat{\mathbf{t}}x = \mathbf{t} \times x$,所以 $x^T \hat{\mathbf{t}}x = 0$,式子两边同时乘以 x_2^T 得到:

$$x_2^T \hat{\mathbf{t}}\mathbf{R}x_1 = 0. \quad (5)$$

由式(2)和式(5)可知, $\mathbf{E} = \hat{\mathbf{t}}\mathbf{R} = \mathbf{t} \times \mathbf{R}$,一般采用 SVD 分解本质矩阵获得 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 。

2.2 平移矩阵

本质矩阵的 SVD 分解获得的 \mathbf{t} ,只是移动方向量的方向,其大小并不是摄像机移动的距离。设像点 $p_1(u_1, v_1)$ 和 $p_2(u_2, v_2)$ 坐标对应的摄像机坐标系中的坐标分别为 $X_{c1} = (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ 和 $X_{c2} = (x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})$,则两个在摄像机坐标系下的坐标之间有如下关系^[16]:

$$X_{c2} = \mathbf{R}X_{c1} + \mathbf{T}, \quad (6)$$

其中 \mathbf{R} 是本质矩阵 \mathbf{E} 分解的旋转矩阵, \mathbf{T} 是摄像机的位移向量。式(6)进一步表示为:

$$\begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \\ z_{c2} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} + \mathbf{T}. \quad (7)$$

根据摄像机的内参数模型,式(7)进一步表示为:

$$z_{c2} \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = z_{c1} \mathbf{R} \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}. \quad (8)$$

即式(8)可表示为:

$$\mathbf{T} = z_{c2} \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} - z_{c1} \mathbf{R} \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

3 SURF 算子原理

Bay 等在 2006 年提出 SURF 算子,是一种基

于尺度空间的图像局部特征提取方法,它不受平移、旋转、缩放、光照等因素影响,对仿射变换的图像具有稳定性。算法一般包括特征检测、主方向确定、特征描述以及特征匹配^[17-20]4 个步骤。

(1)特征检测:算子采用盒子滤波器代替高斯二阶微分模板,用离散化的矩形窗代替高斯二阶微分圆形窗,如图 2 所示。通过不断增加盒子滤波器的窗口尺寸构建不同尺度的图像金字塔,然后使用积分图像,将图像与高斯二阶微分模板的滤波转换为对积分图像的加减运算以提高计算效率。

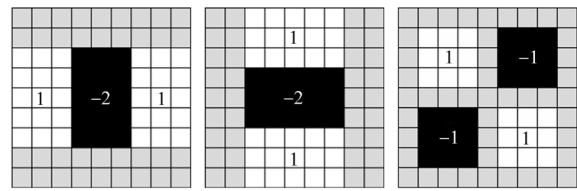


图 2 9×9 方框滤波模板

Fig. 2 9×9 box filter template

(2)主方向确定:利用关键点的领域信息生成关键点的描述子即为关键点的特征。统计以特征点为圆心,6S(S 为特征点所在的尺度值)为半径的圆形域内,60°扇形内所有点的水平和垂直 Haar 小波特征总和。以一定间隔旋转(60°)扇形,选择方向窗口内最长的那个方向向量作为该特征点的主方向。

(3)特征描述:主方向选定后,以特征点为中心取一个边长为 20S 的正方形区域。参考主方向将其分成 4×4 个子区域,在每个子区域内统计 5×5 个像素的水平和垂直方向的 Haar 小波特征。用高斯函数对此小波响应进行加权,然后计算加权小波响应值和响应值的绝对值之和,分别为 $\sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy|$ 。每个子区域形成的 4 维向量,记为 \mathbf{V} :

$$\mathbf{V} = \{ \sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy| \}, \quad (10)$$

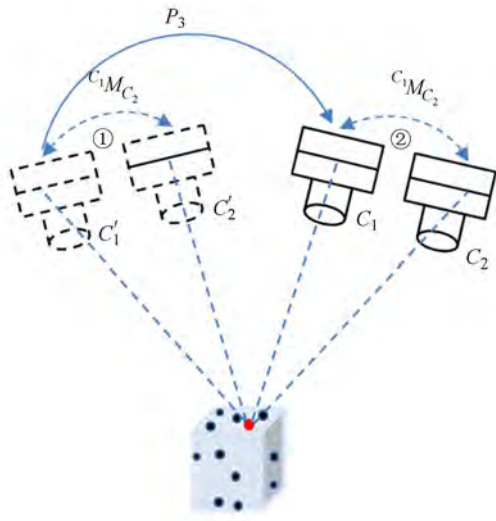
即对每个特征点形成 64 维的描述向量。归一化描述向量,可使其对亮度变化具有一定的鲁棒性。

(4)特征匹配:利用 SURF 算子获得参考图像和待配准图像的特征点后,采用最近邻匹配法进行特征匹配。图像的 SURF 特征点集表示为 $S_{img}(loc, \mathbf{V})$,其中 loc 表示为特征点的坐标, \mathbf{V} 表示特征点所对应的描述向量。

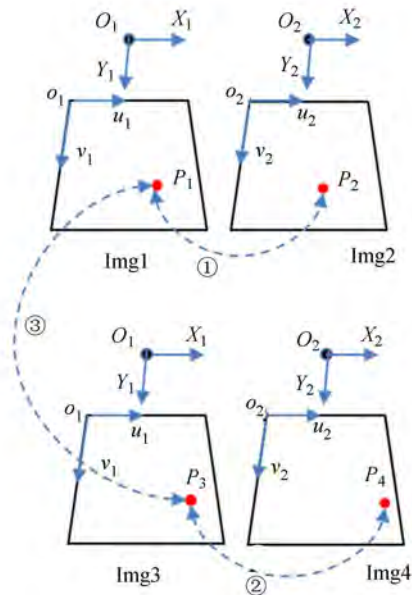
4 点云初始配准模型

4.1 双目视觉点云配准模型

双目立体视觉利用两台摄像机之间的位姿矩阵 ${}^C_1M_{C_2}$ 和图像轮廓特征匹配点对,计算出摄像机坐标系中的空间点坐标,即稀疏点云。如图 3(a)所示,双目视觉在测量有纹理特征的目标物时,



(a) 双目视觉位移前后示意图
(a) Binocular vision before and after moving



(b) 位移动前后的图像特征点匹配
(b) Feature point matching of images before and after moving

图 3 双目视觉点云配准模型

Fig. 3 Point clouds registration model of binocular vision

双目视觉位置①发生在双目视觉位置②之前。在图 3(b)中图像 Img1 和 Img2 是在双目视觉位置①所拍摄,图像 Img3 和 Img4 是在双目视觉位置②所拍摄。

利用 SURF 算子分别检测 Img1~Img4,根据双极限约束获得 4 组点集 $S_{img1}(loc_i, V_i)$ 、 $S_{img2}(loc_j, V_j)$ 、 $S_{img3}(loc_m, V_m)$ 和 $S_{img4}(loc_n, V_n)$ 。

分别对图像 Img1 和 Img2、Img3 和 Img4 的特征点集采用最近邻匹配法,获得相应的匹配点对集 $S_{com1}(loc_{hi}, V_{hi}; loc_{hj}, V_{hj})$ 和 $S_{com2}(loc_{lm}, V_{lm}; loc_{ln}, V_{ln})$,其中:

$$\begin{aligned} S_{com1}(loc_{hi}, V_{hi}) &\subseteq S_{img1}(loc_i, V_i) \\ S_{com1}(loc_{hj}, V_{hj}) &\subseteq S_{img2}(loc_j, V_j) \\ S_{com2}(loc_{lm}, V_{lm}) &\subseteq S_{img3}(loc_m, V_m) \\ S_{com2}(loc_{ln}, V_{ln}) &\subseteq S_{img4}(loc_n, V_n) \end{aligned} \quad (11)$$

对所得图像 Img1 的特征点集 $S_{com1}(loc_{hi}, V_{hi})$ 和 Img3 的特征点集 $S_{com2}(loc_{lm}, V_{lm})$,采用最近邻匹配法所获得点集对 $S_{com12}(loc_{hli}, V_{hli}; loc_{hlm}, V_{hlm})$,其中:

$$\begin{aligned} S_{com12}(loc_{hli}, V_{hli}) &\subseteq S_{com1}(loc_{hi}, V_{hi}) \\ S_{com12}(loc_{hlm}, V_{hlm}) &\subseteq S_{com2}(loc_{lm}, V_{lm}) \end{aligned} \quad (12)$$

根据 Img1 和 Img3 点集对、摄像机内参数、式(2)和(5)获得摄像机的旋转矩阵 R ,由式(11)和(12)的点集对应关系,可得到 4 个图像中依次对应的特征点。在 Img1 和 Img2、Img3 和 Img4 中根据内外参数获得对应特征点的在图 3(a)中位置①、②的深度 z_{hli} 、 z_{hlm} ,由参考式(9)获得摄像机的位移矩阵 T ,由矩阵 R 和 T 获得双目稀疏点云的初始位姿配准。

4.2 单目结构光点云配准模型

4.2.1 稠密点云获取

投影仪可看作一个逆向摄像机,采用与摄像机同样的数学模型来描述。为了增加视觉检测系统的精度,对摄像机和投影仪的标定均采用包括径向畸变和切向畸变的针孔摄像模型。结构光系统获得物体表面点云的具体步骤如下^[21]:

(1)放置摄像机与投影仪,摄像机可拍摄到投影仪所投射的编码光栅区域;

(2)对目标物拍摄明暗视场图和正交格雷码图像序列,如图 4 所示;

(3)根据结构光系统标定所获得的摄像机内外参数和投影仪内外参数,进行图像畸变校正;

(4)使用格雷码高频模式^[22]和稳定像素分类

方法^[23],解码建立摄像机像素坐标与投影仪像素坐标映射关系;

(5)利用摄像机坐标系与投影仪坐标系之间的位姿矩阵,以及第(2)步建立的摄像机与投影仪像素映射关系计算目标区域的点云。

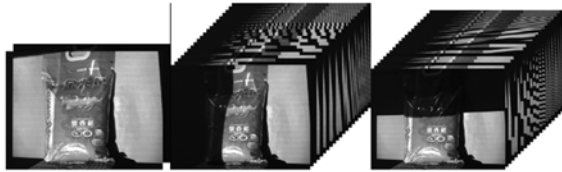


图 4 明暗视场图与正交格雷码图像

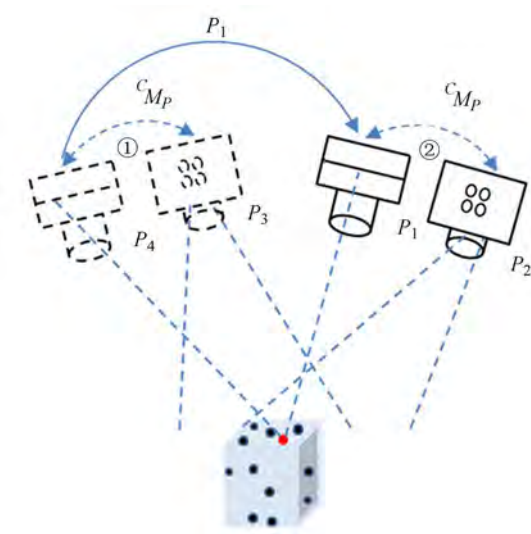
Fig. 4 Bright field image, dark field image and orthogonal Gray Code image sequences

4.2.2 点云配准模型

如图 5(a)所示,结构光系统在测量物体时,结构光系统位置①发生在结构光系统位置②之前。在图 5(b)中,Img1 和 Img3 是结构光系统中的摄像机分别在图 5(a)中位置①、②所拍摄,Img2 和 Img4 是结构光系统中投影仪分别在图 5(a)中①、②位置中的点云像素图像。

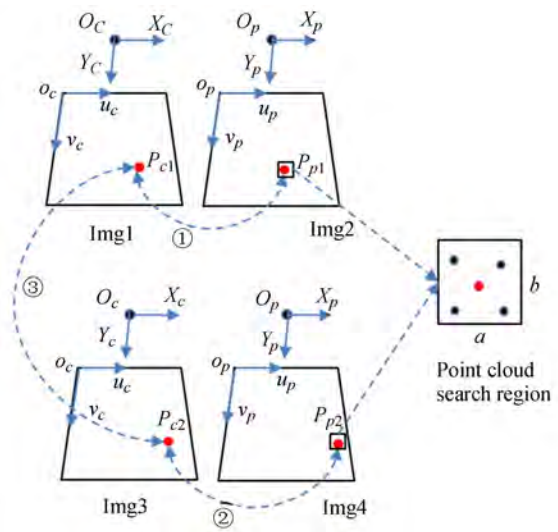
利用 SURF 算子检测 Img1 和 Img3,由极限约束获得 2 组点集 $S_{img1}(loc_i, V_i)$ 和 $S_{img3}(loc_m, V_m)$,采用最近邻匹配法获得匹配点集 $S_{img13}(loc_{hi}, V_{hi}; loc_{hm}, V_{hm})$,其中:

$$\begin{aligned} S_{img13}(loc_{hi}, V_{hi}) &\subseteq S_{img1}(loc_i, V_i) \\ S_{img13}(loc_{hm}, V_{hm}) &\subseteq S_{img3}(loc_m, V_m) \end{aligned} \quad (13)$$



(a)结构光系统位移前后示意图

(a) Structure light before and after moving



(b)位移前后的图像特征点匹配

(b) Feature point matching of images before and after moving

图 5 结构光系统点云配准模型

Fig. 5 Point clouds registration model of structure light system

由点集对、摄像机内参数等 SVD 分解摄像机旋转矩阵 \mathbf{R} 。结构光系统获得的是摄像机坐标系中的点云,根据摄像机的内参模型,获得点云在摄像机图像像素坐标:

$$[u_i, v_i, 1]' = A[x_i/z_i, y_i/z_i, 1]' \quad (14)$$

利用 SURF 算子获得的特征点坐标 $loc_{hi}(u, v)$,与式(14)点云所获得点云像素位置 (u_i, v_i) 不完全匹配。如图 5(b)所示,为了提高搜索效率,在特征点 $loc_{hi}(u, v)$ 位置建立 $a \times b$ 的搜索窗口,并且满足:

$$L_{\min} = \| loc_{hi}(u, v) - (u_i, v_i) \|_2 \quad (15)$$

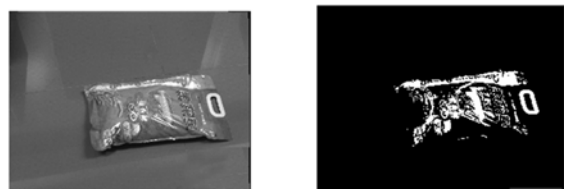
其中 L_{\min} 表示特征点坐标与点云像素坐标的最短距离。由式(15)获得距特征点坐标 $loc_{hi}(u, v)$ 最近的点云坐标 (x_i, y_i, z_i) ,根据式(13)获得 Img1 和 Img3 在图 5(a)中位置①、②的深度 z_{hi} 、 z_{hm} ,参考式(9)获得摄像机的位移矩阵 \mathbf{T} ,由矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 获得单目结构光系统稠密点云的初始配准位姿。

5 实验结果分析

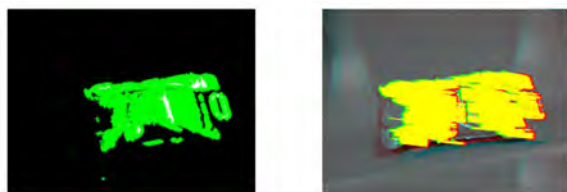
5.1 双目视觉点云初始配准

双目视觉实验采用型号为 MER-500-7UM 的摄影机和 8 mm 定焦镜头,采用 5×7 (尺寸:34

mm)棋盘格标定板摆放 10 种不同姿态,采集 10 组图像数据完成双目标定。在图 6 中,双目视觉公共视野范围内放置目标物,如图(a)所示;采用最大类间方差法进行目标物图像分割,获得目标



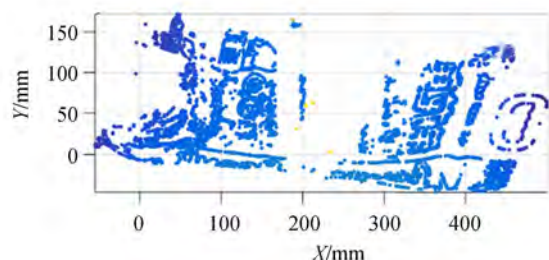
(a) 原始图像
(a) Original image (b) 图像分割
(b) Image segmentation



(c) Harris 特征点检测
(c) Harris feature points detection (d) 特征点跟踪匹配
(d) Feature points tracking and matching



(e) SURF 特征点检测匹配
(e) SURF feature points detection and matching (f) 极限约束
(f) Epipolar geometry constrain



(g) 获得点云
(g) Obtaining point clouds

图 6 稀疏点云获得及其 SURF 特征点

Fig. 6 Obtaining sparse point clouds and corresponding of SURF feature points

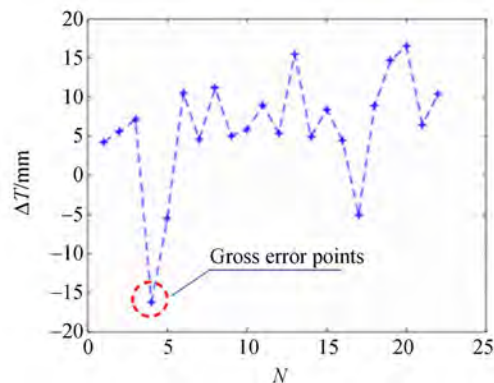
物的纹理信息,如图(b)所示;采用 Harris 算子,检测目标分割后的图像,如图(c)所示;基于 KLT (Kanade - Lucas - Tomasi)光流法对 Harris 算子检测得到的特征点位置进行跟踪^[24-25],即左右摄像机的图像特征点匹配,如图(d)所示;对位移前后的左摄像机图像,采用 SURF 算子检测和特征描述匹配,如图(e)所示;采用双极线约束去掉误匹配点,如图(f)所示,得到 22 组有效点对;根据双目视觉点云生成模型,获得目标物的稀疏点云,如图(g)所示。

根据前后匹配的点对获得本质矩阵,由式(2)和(5)分解旋转矩阵 \mathbf{R} 和位移向量 \mathbf{t} 。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9989 & -0.0416 & 0.0236 \\ 0.0374 & 0.9869 & 0.1568 \\ -0.0298 & -0.1557 & 0.9873 \end{bmatrix} \quad (16)$$

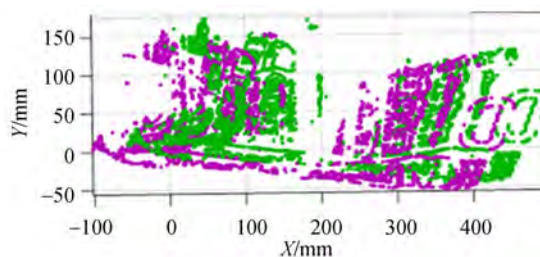
$$\mathbf{T} = [6.6158 \quad -247.1934 \quad 47.0408]'$$

根据 22 个匹配点对坐标、内参数和式(9)获得 22 个摄像机坐标系真实位移向量,由于光照、标定等产生的误差,其 22 个位移向量会引入粗差,如图 7(a)所示。采用残差分析,剔除粗差的位移向量,最后位移向量 \mathbf{T} 采用求和平均获得。



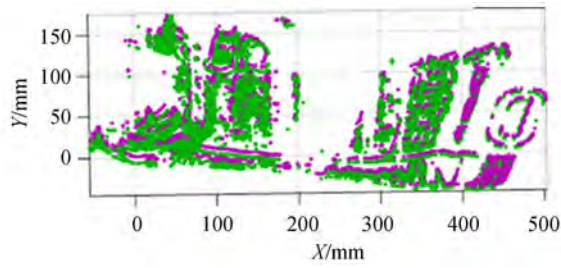
(a) 残差分析

(a) Residual analysis



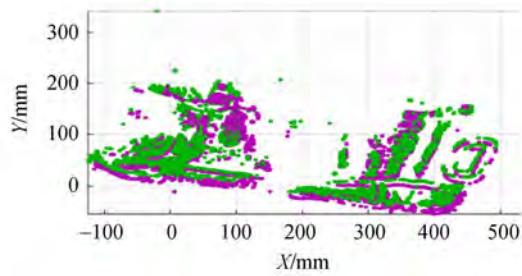
(b) 原始点云

(b) Original point clouds



(c)点云初始配准

(c) Initial registration of point clouds



(d)基于空间特征点的 SVD 矩阵分解方法

(d) SVD matrix decomposition based on spatial feature points

图 7 位移向量残差分析及其稀疏点云初始配准

Fig. 7 Residual analysis of translation vector and initial registration of sparse point clouds

根据 R 和 T 参数如式(16),可以得到稀疏点云初始匹配,如图 7(b)(c)所示。由图 7(c)结果知,点云初始配准已达到了初始配准的要求,并与文献[7]的点云空间特征点 SVD 方法结果一致,如图 7(d)所示。

5.2 单目结构光点云初始配准

单目结构光实验采用型号为 MER-500-7UM (8 mm 定焦镜头)的摄像机和 BenQ 投影仪,采用 5×7 (尺寸:34 mm)棋盘格标定板摆放至少 3 种不同姿态,采集图像数据完成单目结构光系统标定。在图 8 中,目标物放置在摄像机视野范围内,并调整投影仪投射编码光栅区域,如图(a)所示;通过建立的摄像机像素与投影仪像素的对应关系,其投影仪视角的目标物如图(b)所示;投影仪投射正交格雷码序列光栅,摄像机依次采集每次的编码图像,其垂直水平的解码如图(c)(d)所示;对位移前后的摄像机图像,采用 SURF 算子检测和特征描述匹配,如图(e)所示;采用双极线约束去掉误匹配点,如图(f)所示;通过结构光系统的编码解码,以及结构光系统标定的摄像机与投影

仪的内外参数,可获得目标物的稠密点云,如图(g)所示。



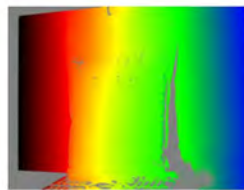
(a)摄像机所拍摄图像

(a) Obtaining image using camera



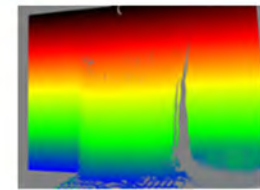
(b)投影仪视角图像

(b) Image in projector view



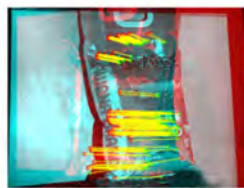
(c)结构光垂直方向解码

(c) Decode in vertical direction



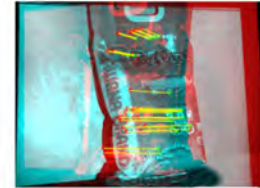
(d)结构光水平方向解码

(d) Decode in horizontal direction



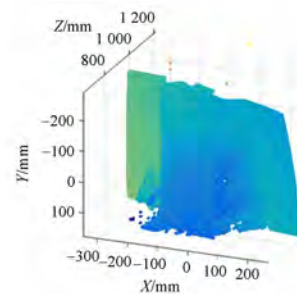
(e)SURF 特征点检测匹配

(e) SURF feature points detection and matching



(f)极线约束

(f) Epipolar geometry constrain



(g)获得点云

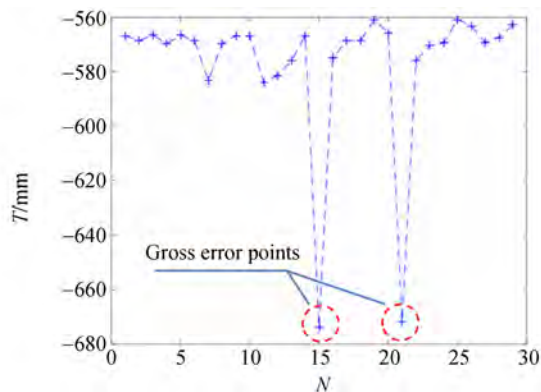
(g) Obtaining point clouds

图 8 稠密点云获得及其 SURF 特征点匹配

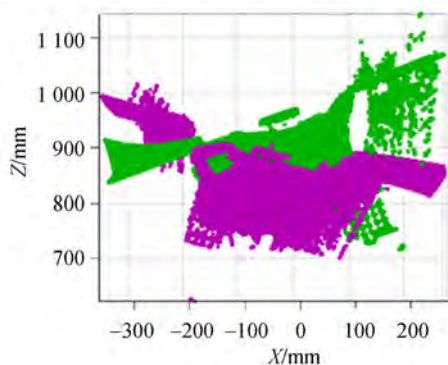
Fig. 8 Obtaining dense point clouds and matching of SURF feature points

结构光系统误差的引入是解码、环境光等因

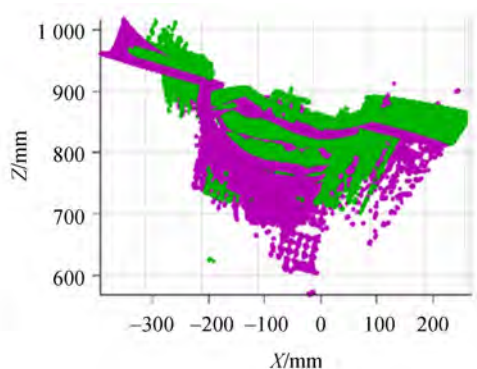
素相关,对位移向量采用残差分析,如图 9(a)所示。位姿求解的 \mathbf{R} 和偏移求和平均得到 \mathbf{T} ,如式(17);对稠密点云进行相应的旋转平移,如图 9(b)(c)所示;点云空间特征点的 SVD 矩阵分解的点云初始配准,如图 9(d)所示。



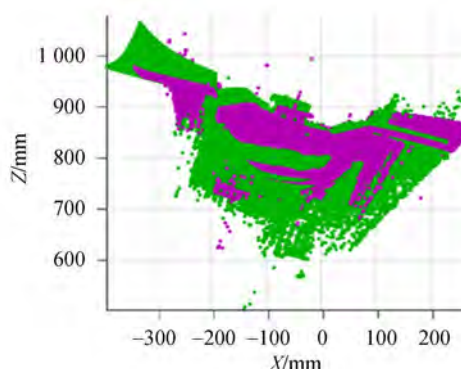
(a) 残差分析
(a) Residual analysis



(b) 原始点云
(b) Original point clouds



(c) 点云初始配准
(c) Initial registration of point clouds



(d) 基于空间特征点的 SVD 矩阵分解方法
(d) SVD matrix decomposition based on spatial feature points

图 9 位移向量残差分析及其稠密点云初始匹配
Fig. 9 Residual analysis of translation vector and initial registration of dense point clouds

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.8321 & -0.0055 & 0.5546 \\ 0.0273 & 0.9991 & -0.0311 \\ -0.5539 & 0.0410 & 0.8315 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = [-569.5861 \quad 5.8418 \quad 88.8101]'$$

(17)

为了验证该算法的有效性,以稠密点云为例,将该算法与文献[7]、[11]算法做对比,如表 1 所示,从对应特征点均方误差做对比,如式(18),并以运行时间和相应的点云数为参考。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \| P_i - P_r \|_2, \quad (18)$$

其中 P_i 和 P_r 分别是目标点云和配准点云的三维特征点, n 是匹配对应点个数。

表 1 本文算法对比结果

Tab. 1 Comparison results of proposed algorithm

算法	均方误差/mm	时间/s	目标/配准点云数
文献[7]	126.56	39.15	目标点云数:669 749 配准点云数:721 372
文献[11]	54.90	4.47	目标点云数:150 039 配准点云数:151 253
本文算法	12.46	35.60	目标点云数:669 485 配准点云数:713 348

文献[7]中,基于点云特征点的 SVD 矩阵分解方法,能满足点云精确配准位置要求;文献[11]中采用点云体素化实现采样,并应用 2D-3D 映射关系和单位四元数法减小了误差精度,本文算法

在对应的特征点均方误差缩小至 12.46 mm;在运行时间方面,由于配准点云数量不同,其结果相应地有差别。综合图 7(c)(d)、9(c)(d)和表 1,本文算法较文献[7]、[11]具有一定的优势。

6 结 论

点云初始配准,已有基于点云几何属性或不依赖于几何特征的方法。在参考摄像机本质矩阵与位姿矩阵的基础上,提出了面向双目视觉与单目结构光系统的 SURF 算子特征点检测匹配以

及深度估计数学模型,并由摄像机位移前后目标图像所对应的 SURF 特征点获得点云旋转平移矩阵。该方法针对机器视觉图像产生的点云,借助目标物图像获得点云初始配准位姿矩阵,而不依赖于点云的空间几何属性。在实验中,阐述了双目视觉稀疏点云与单目结构光稠密点云获取方法步骤、SURF 特征点匹配以及采用残差分析剔除粗大的位移向量,并与基于点云空间特征点和基于图像的点云初始配准方法进行对比,点云匹配特征点均方误差缩小至 12.46 mm,配准结果表明该方法能为点云精确配准提供较好的初始位置。

参考文献:

- [1] 吴禄慎,史皓良,陈华伟. 基于特征信息分类的三维点数据去噪[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1465-1473.
WU L S, SHI H L, CHEN H W. Denoising of three-dimensional point data based on classification of feature information[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1465-1473. (in Chinese)
- [2] 袁小翠,吴禄慎,陈华伟. 特征保持点云数据精简[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2666-2676.
YUAN X C, WU L S, CHEN H W. Feature preserving point cloud simplification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2666-2676. (in Chinese)
- [3] SALVI J, MATABOSCH C, FOFI D, et al.. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation [J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(5): 578-596.
- [4] BESL P, MCKAY N. A method for registration of 3D shape [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [5] BIBER P, STRASSER W. The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching[C]. *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots & Systems*, 2003, 3(3): 2743-2748.
- [6] 李兴东,李满天,郭伟,等. TOF 激光相机六自由度位姿变换估计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2231-2238.
LI X D, LI M T, GUO W, et al.. Estimating 6 DOF pose transformation of a TOF laser camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2231-2238. (in Chinese)
- [7] 罗先波,钟约先,李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术[J]. 清华大学学报, 2004, 44(8): 1104-1106.
LUO X B, ZHONG Y X, LI R J. Data registration in 3-D scanning systems [J]. *J Tsinghua Univ (Sci&Tech)*, 2004, 44(8): 1104-1106. (in Chinese)
- [8] 戴静兰,陈志杨,叶修梓. ICP 算法在点云配准中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(3): 517-521.
DAI J L, CHEN Z Y, YE X Z. The Application of ICP Algorithm in Point Cloud Alignment [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(3): 517-521. (in Chinese)
- [9] 朱延娟,周来水,张丽艳. 散乱点云数据配准算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(4): 475-481.
ZHU Y J, ZHOU L S, ZHANG L Y. Registration of Scattered Cloud Data [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2006, 18(4): 475-481. (in Chinese)
- [10] 辛伟,普杰信. 点到邻域重心距离特征的点云拼接[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(5): 886-891.
XIN W, PU J X. Point cloud integration base on distances between points and their neighborhood centroids [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(5): 886-891. (in Chinese)
- [11] 张晓,张爱武. 基于图像的点云初始配准[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(10): 3507-3512.
ZHANG X, ZHANG A W. Initial registration of point clouds based on images [J]. *Computer Engineering and Design*, 2014, 35(10): 3507-3512. (in Chinese)
- [12] 郭慧,潘家楨,林大钧. 基于实数编码的多种群遗传算法的点云配准[J]. 华东理工大学(自然科学

- 版), 2007, 33(5): 733-736.
- GUO H, PAN J Z, LIN D J. Registration of Point Cloud Data of Multi-population Genetic Algorithm Based on Real Coding[J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 33(5): 733-736. (in Chinese)
- [13] MENG Y, ZHANG H. Registration of point clouds using sample-sphere and adaptive distance restriction [J]. *The Visual Computer*, 2011, 27(6-8): 543-553.
- [14] PHS Torr, A Zisserman, MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry [J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 2000, 78(1): 138-156.
- [15] 徐德, 谭氏, 李原. 机器人视觉测量与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- XU D, TAN M, LI Y. *Visual measurement and control for robots* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [16] 刘立, 万亚平, 刘朝晖, 等. 基于 SIFT 匹配算法的移动机器人单目视觉定位研究[J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(9): 1823-1825.
- LIU L, WAN Y P, LIU Z H, et al.. Object Localization for Mobile Robots Using Single-eye Based on SIFT [J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(9): 1823-1825. (in Chinese)
- [17] BAY H, TUVTELLARS T, GOOL L Van. SURF: speeded up robust features[C]. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 2006: 404-417.
- [18] 张锐娟, 张建奇, 杨翠. 基于 SURF 的图像配准方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 160-165.
- ZHANG R J, ZHANG J Q, YANG C. Image registration approach based on SURF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 160-165. (in Chinese)
- [19] 闫自庚, 蒋建国, 郭丹. 基于 SURF 特征和 Delaunay 三角网格的图像匹配[J]. *自动化学报*, 2014, 40(6): 1216-1222.
- YAN Z G, JIANG J G, GUO Dan. Image Matching Based on SURF Feature and Delaunay Triangular Meshes [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(6): 1216-1222. (in Chinese)
- [20] 黄楠楠, 刘贵喜, 张音哲, 等. 无人机视觉导航算法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 269-277.
- HUANG N N, LIU G X, ZHANG Y Z, et al.. Unmanned aerial vehicle vision navigation algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 269-277. (in Chinese)
- [21] MORENO D, TAUBIN G. Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration [C]. *Second International Conference on 3d Imaging*, 2012: 464-471.
- [22] NAYAR S K, KRISHNAN G, GROSSBERG M D, et al.. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 935-944.
- [23] XU Y, ALIAGA D G. Robust pixel classification for 3D modeling with structured light [J]. *Proceedings of Graphics Interface*, 2007: 233-240.
- [24] 李蓉, 邓春健, 邹昆. 一种基于 MRF 的单幅图像数据的三维重构方法研究[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(3): 301-309.
- LI R, DENG C J, ZOU K. 3D reconstruction method based on single image data by MRF [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 301-309. (in Chinese)
- [25] 马鑫, 魏仲慧, 何昕, 等. 三维枪弹痕点云数据处理及特征提取研究[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(9): 889-896.
- MA X, WEI Z H, HE X, et al.. Processing and feature extraction for three-dimensional bullet point cloud data [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(9): 889-896. (in Chinese)

作者简介:



郭清达(1986—),男,山东聊城人,博士研究生,2009年于济南大学获得学士学位,2012年于华南理工大学获得硕士学位,主要从事机器视觉,工业机器人等方面的研究。E-mail: meguoqingda@mail.scut.edu.cn



全燕鸣(1957—),女,江西南城人,博士,教授,博士生导师,1982年于江西工学院获得学士学位,1993年和1997年于华南理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事机械制造及其自动化技术、制造过程中的检测技术、机器视觉应用研究。E-mail: meymquan@scut.edu.cn