



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS
主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
11
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



中国图象图形学报

刊名题字：宋健 | 月刊（1996年创刊）



第18卷第11期（总第211期）

2013年11月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

综述

- 多媒体技术研究: 2012——多媒体数据索引与检索技术研究进展
中国计算机学会多媒体专业委员会 1383

图像处理和编码

- 热扩散和整体变分模型自适应调整的图像放大模型
王相海, 艾新南 1398
- 椒盐图像的方向加权均值滤波算法
李佐勇, 汤可宗, 胡锦涛, 林亚明 1407
- 3维自适应最小误差阈值分割法
刘金, 金炜东 1416
- 结构约束和样本稀疏表示的图像修复
康佳伦, 唐向宏, 任澍 1425
- 结合小波变换和自适应分块的多聚焦图像快速融合
刘羽, 汪增福 1435

图像分析和识别

- 飞行时间3维相机的多视角散乱点云优化配准
张旭东, 吴国松, 胡良梅, 王竹萌, 邱维巍 1445
- 采用独立色素浓度分布分割皮损图像
徐舒畅 1452
- 基于CUDA的并行加速渲染算法
刘镇, 郝冬宁, 梅向东 1457
- 连续最大流图像分割模型及算法
杨晓艺, 王小欢, 宋锦萍 1462
- 词袋特征压缩算法比较研究
杨赛, 赵春霞 1468

图像理解和计算机视觉

- 融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D
袁红星, 吴少群, 朱仁祥, 安鹏 1478

计算机图形学

- 多风格融合的复杂森林场景自适应可视化
董天阳, 夏佳佳, 范菁 1486

遥感图像处理

- 保留结构细节的遥感海表温度图像的采样与重构
崔雪森, 杨胜龙, 伍玉梅, 戴阳, 范秀梅 1497
- 组合四相机拼接影像的颜色平衡
任超锋, 姚娜, 林宗坚 1504
- 复杂背景下多样水体遥感自动解译
夏列钢, 沈占锋, 李均力, 骆剑承 1513

“第十届全国智能CAD与数字娱乐会议”专栏

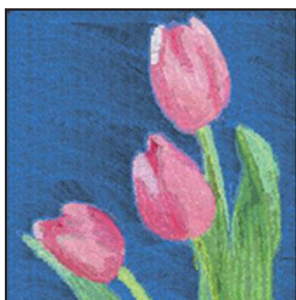
- 3D树木建模技术研究进展
谭云兰, 贾金原, 张晨, 李光耀 1520
- 网格分割的3维网格模型非盲水印算法
杜顺, 詹永照, 王新宇 1529
- 基于放缩系数和均值的多参数颜色迁移
王世亮, 徐岗, 储清林, 胡维华, 汪国昭 1536
- 基于参考图像的色粉画模拟
郑智斌, 张岩, 孙正兴, 杨克微 1542



融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D(第1478页)



网格分割的3维网格模型非盲水印算法(第1529页)



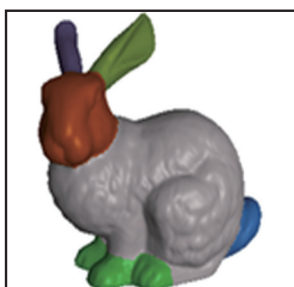
基于参考图像的色粉画模拟(第1542页)

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency(P1478)



Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation(P1529)



Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values(P1542)

Review

- Researches on multimedia technology, 2012
Multimedia data indexing and retrieval technology: a review
CCF Multimedia Technology Committee 1383

Image Processing and Coding

- Image magnification model based on adaptive adjustment of thermal diffusion and TV model
Wang Xianghai, Ai Xinnan 1398
Directional weighted mean filter for image with salt & pepper noise
Li Zuoyong, Tang Kezong, Hu Jinmei, Lin Yaming 1407
Three-dimensional adaptive minimum error thresholding segmentation algorithm
Liu Jin, Jin Weidong 1416
Image inpainting by structural constraints and sample sparse representation
Kang Jialun, Tang Xianghong, Ren Shu 1425
Multi-focus image fusion based on wavelet transform and adaptive block
Liu Yu, Wang Zengfu 1435

Image Analysis and Recognition

- Multi-view scattered point cloud optimization registration using a TOF camera
Zhang Xudong, Wu Guosong, Hu Liangmei, Wang Zhumeng, Di Weiwei 1445
Skin lesion segmentation by using independent pigment concentration distribution
Xu Shuchang 1452
Based on the parallel rendering algorithm in CUDA
Liu Zhen, Hao Dongning, Mei Xiangdong 1457
Image segmentation model and algorithm based on continuous max-flow approach
Yang Xiaoyi, Wang Xiaohuan, Song Jinping 1462
Comparative research on compression algorithms of bag-of-features
Yang Sai, Zhao Chunxia 1468

Image Understanding and Computer Vision

- Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency
Yuan Hongxing, Wu Shaoqun, Zhu Renxiang, An Peng 1478

Computer Graphics

- Adaptive visualization of multi-style composition for complex forest scene
Dong Tianyang, Xia Jiajia, Fan Jing 1486

Remote Sensing Image Processing

- Structural detail-reserving method of sampling and reconstruction of remote sensing SST image
Cui Xuesen, Yang Shenglong, Wu Yumei, Dai Yang, Fan Xiumei 1497
Color balancing of the stitched images of a combined four-head camera
Ren Chaofeng, Yao Na, Lin Zongjian 1504
Automatic interpretation of diverse water bodies from remotely sensed images in complex background
Xia Liegang, Shen Zhanfeng, Li Junli, Luo Jiancheng 1513

Issum of CIDE' 2013

- Survey on Virtual 3D Tree Modeling Technologies
Tan Yunlan, Jia Jinyuan, Zhang Chen, Li Guangyao 1520
Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation
Du Shun, Zhan Yongzhao, Wang Xinyu 1529
Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values
Wang Shiliang, Xu Gang, Chu Qinglin, Hu Weihua, Wang Guozhao 1536
Image-based pastel simulation
Zheng Zhibin, Zhang Yan, Sun Zhengxing, Yang Kewei 1542

中图法分类号: TP391.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)11-1445-07

论文引用格式: 张旭东, 吴国松, 胡良梅, 王竹萌, 邸维巍. 飞行时间 3 维相机的多视角散乱点云优化配准[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(11): 1445-1451. [DOI:10.11834/jig.20131107]

飞行时间 3 维相机的多视角散乱点云优化配准

张旭东, 吴国松, 胡良梅, 王竹萌, 邸维巍

合肥工业大学计算机与信息学院图像信息处理研究室, 合肥 230009

摘要: 针对目前基于飞行时间(TOF)原理的 3 维相机实现物体完整表面的 3 维点云重建过程中, 多视角散乱点云配准精度低的问题, 提出一种优化配准方法。该方法通过构建一个目标功能函数, 并结合相邻点云的转换矩阵对该目标函数进行最小化求解, 直接获取任意位置的点云到基准点云所处坐标系的绝对转换矩阵, 避免了对连续点云之间的配准而引起误差的累加。对不同的物体进行实验, 实验结果表明, 该方法在保证点云配准速度的同时, 提高了多视角点云配准的精度, 物体点云模型重建效果较好, 有利于实现后期 3 维曲面网格的重建。

关键词: 多视角优化配准; 最小化目标函数; 全局优化; TOF 相机

Multi-view scattered point cloud optimization registration using a TOF camera

Zhang Xudong, Wu Guosong, Hu Liangmei, Wang Zhumeng, Di Weiwei

Laboratory of Image Information Processing, School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: To solve the problem of low accuracy of multi-view scattered point cloud registration in objects surface 3D point cloud reconstruction process using TOF (time-of-flight) cameras, this paper presents an optimization registration method. The method obtains the absolute transformation matrix of any point-cloud to the reference coordinate system by building a target functions and combining adjacent point-cloud transformation matrix to minimize the objective function, avoid the accumulation of errors caused by registration of continuous point clouds. We use different objects for our experiments, and the results show that the method ensures the speed of point cloud registration. At the same time, it improves the accuracy of the multi-view point cloud registration, as well as enhances the effect of the objects point cloud model reconstruction. Furthermore, it is conducive to realize 3D surface mesh reconstruction.

Key words: multi-view optimization registration; minimized objective function; global optimization; TOF camera

0 引言

物体 3 维重建是指为物体建立适合计算机表示和处理的数学模型, 以便在计算机环境下对其进行处理、操作和分析其性质。近年来, 实时的物体 3 维

重建技术已经成为计算机视觉领域里非常热门的研究课题。快速有效地实现物体的 3 维重建, 将在目标识别与跟踪、智能导航、增强虚拟现实等众多军用和民用领域里发挥越来越重要的作用^[1-3]。

实时获取物体表面的 3 维几何信息是实现物体 3 维重建的一项关键任务。传统的 3 维激光扫描

收稿日期: 2013-01-10; 修回日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273237, 61271121, 61102153); 教育部博士点基金项目(20091111110015); 安徽省自然科学基金项目(11040606M149)

第一作者简介: 张旭东(1966—), 男, 副教授, 硕士生导师, 2005 年于中国科学技术大学获模式识别与智能系统专业博士学位, 主要研究方向为机器视觉、传感器技术、智能信息处理以及相关应用系统的开发。E-mail: xudong@hfut.edu.cn

仪、结构光扫描仪采集速度较难达到实时应用的需求,且激光扫描技术需要不断地以帧率把线性读取的数据聚合成完整的 3D 扫描数据,这样容易造成数据的缺失。而立体视觉系统要求物体表面的纹理丰富,对于缺少纹理的区域,算法自身的鲁棒性得不到保证^[4-5]。而作为一种新近涌现的硬件设备,基于飞行时间(TOF)原理的 3 维测距相机,通过测量主动光线发射到物体表面后反射回来的时间差计算出物体表面的距离信息,具有帧率高,实时性好,对反射光的变换具有鲁棒性等特点,可以实时地采集到物体表面的 3 维几何信息^[6]。

由于受 TOF 相机的视角所限(本文所使用的 PMD 相机的视角仅为 $32^\circ \times 32^\circ$),不可能在某一时刻扫描到物体完整表面的 3 维几何信息,需要把不同视角的点云进行对齐,该过程涉及点云的配准。Besl 等人最初提出的一种高层次的基于自由形态曲面的配准方法^[7],即迭代最近点法(ICP)。戴静兰等人在 ICP 算法的基础上进行了改进^[8]。Akca 提出了使用幅度和强度信息进行点云的配准^[9],Basdogan 等人提出了使用 K 邻近的方法估计局部邻域点^[10],实现点云的配准。以上方法都是针对具有重叠区域的相邻视角点云进行配准,若点云之间没有重叠区间,采用上述方法在点云配准过程中,会难于获取匹配点对,或出现错误匹配点对的情况,造成配准精度不高。对此,许多学者针对不相邻视角点云的配准方法进行了研究^[11-14]。Chen 等人^[15]提出了一种全局刚体模型配准方法。该方法采用先将所有点云配准到基准坐标系中,合成一片新的点云。然后将新加入的点云和配准后的点云进行配准,实现多视角配准。但是由于这种方法仅仅是将新加入的点云模型和其前经过配准过后的一片点云模型进行配准,所以在连续的配准过程中仍然会造成误差的累积,降低最终点云配准的精度。Bergevin 等人^[16]对 Chen 的方法进行了改进,该方法对新加入的点云模型与先前加入的所有点云模型不断进行两两对齐,并不断迭代这个过程,直到误差被均匀地分散到所有模型中,但是该方法的速度却受到了一定的影响。

结合 Chen 提出的传统多视角点云配准方法与 Borrmann 提出的多视角点云配准的方法,提出一种基于 TOF 距离数据的多视角点云优化配准方法,该方法构建了一个目标函数,把已知获取的相邻点云模型的转换矩阵作为该目标函数的初始值,通过对该目标函数进行最小化求解,可以直接获取任意点

云模型到基准点云模型的转换矩阵,避免了对连续点云的配准而引起误差的累加,从而能够更精准地把不同视角下的点云模型配准到基准点云模型中,重构出物体完整表面的 3 维点云模型。

1 传统的多视角散乱点云配准方法

Chen 于 1992 年提出了一种传统的多视角散乱点云配准方法,该方法首先对 ICP 迭代最近点算法进行改进,提出利用点的切平面来逼近点云,实现具有重叠部分的两片点云之间的配准,然后将新加入的点云模型和以前配准后的点云模型进行配准,获取新加入的点云模型到基准点云模型的转换矩阵,实现多视角点云的配准。

如图 1 所示, $o_1x_1y_1z_1$ 与 $o_2x_2y_2z_2$, $o_2x_2y_2z_2$ 与 $o_3x_3y_3z_3$ 分别是相邻视角间的两个坐标系。假设 D_1 是坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 中的点云模型,令 D_1 为基准点云。 D_2 与 D_3 分别是位于坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 、 $o_3x_3y_3z_3$ 中的点云模型。Chen 提出的多视角散乱点云配准方法,利用改进的 ICP 算法获取坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 到坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 的转换矩阵 $[R_{21}, t_{21}]$, 坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 到坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 的转换矩阵 $[R_{32}, t_{32}]$ 。

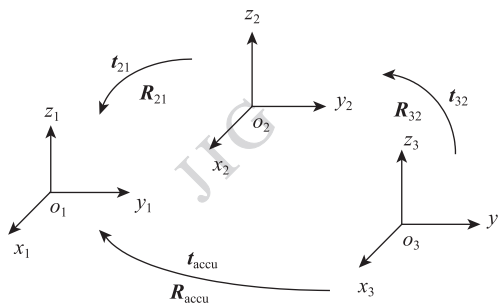


图 1 传统多视角配准坐标系变换

Fig. 1 Coordinate transformation of the traditional multi-view registration

为了实现 D_3 点云与 D_1 点云的配准,首先通过转换矩阵 $[R_{21}, t_{21}]$ 把 D_2 点云配准到坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 中,并与 D_1 点云合成一片新的点云 D_4 ,然后根据 ICP 迭代最近点算法,对 D_3 点云与 D_4 点云进行迭代配准,从而获取 D_3 点云到坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 的转换关系 $[R_{accu}, t_{accu}]$ 。迭代执行该过程,可以实现多视角点云的配准。

Chen 提出的多视角点云配准方法在进行不同视角的点云配准时,虽然避免了通过对相邻视角点云之间的转换矩阵进行累加而引起误差的累积,但

是由于这种方法仅仅是将新加入的点云模型和其前经过配准过后的一片点云模型进行配准,同样会在连续的点云配准过程中造成误差的累积,直接影响到多视角点云配准的精度和物体完整表面3维点云重建的效果。为了解决这一问题,提出一种改进的多视角点云配准方法。

2 多视角散乱点云优化配准方法

本文提出的优化配准方法,采用构建一个目标功能函数,并把相邻点云的转换矩阵作为该目标函数的初始值,利用 Active-set(有效集算法)对该目标函数进行最小化求解,可以直接获取任意视角的点云到基准点云所处坐标系的绝对转换矩阵,从而可以实现物体完整表面的3维点云重建。该方法的流程图如图2所示,具体实现步骤如下:

- 1) 确定某一视角物体点云作为基准点云。
- 2) 顺时针水平旋转物体40°,获取对应视角的点云。
- 3) 使用改进的ICP迭代算法计算相邻的两片3维点云之间的转换矩阵 $G_{i,j}$,在这里 $G_{i,j}$ 表示把 j 视角的点云配准到 i 视角的坐标系中。

$$G = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

4) 若步骤3)中点云配准的精度满足要求,则存储该转换矩阵 $G_{i,j}$ 到一个矢量 x_0 中,否则去除掉该矩阵,并通过微调物体的旋转角度,获取对应的点云,同时根据步骤3)获取新的相邻点云转换矩阵。

5) 如果物体相对于基准视角的旋转角度小于80°,则返回到步骤2),继续获取相邻视角点云的转换矩阵。

6) 最小化目标函数

$$\min \sum_{i,j} \left(\left(\frac{\text{angel}(R_i R_j (R_j)^T)}{\delta_\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\|R_i t_j + t_i - t_j\|}{\delta_t} \right)^2 \right) \quad (2)$$

式中,当给定一个旋转矩阵 R 时, $\text{angel}(\dots)$ 返回物体绕转轴转动轴相对于物体初始时刻旋转的角度 θ ($-\pi < \theta < \pi$)。 δ_α 和 δ_t 是标准化因子,可以分别根据式(3)(4)进行计算,即

$$\delta_\alpha = \sum_{i=1}^N \left(\left(\theta_i / \sum_{i=1}^N \theta_i \right) \cdot \theta_i \right) \quad (3)$$

$$\delta_t = \sum_{i=1}^N \left(\left(\|t_i\| / \sum_{i=1}^N \|t_i\| \right) \|t_i\| \right) \quad (4)$$

式中, t_i 表示转换矩阵 $T_{i-1,i}$ 的平移部分。为了求解

目标函数,把步骤4)获取的矢量 x_0 作为该目标函数的初始值。

$$x_0 = [q_{12}^T; t_{12}; q_{23}^T; t_{23}; \dots; q_{ij}^T; t_{ij}] \quad (5)$$

在式(5)中,转换矩阵 $\{q_{ij}, t_{ij}\}$ 表示把第 j 片点云配准到第 i 片点云中, q_{ij} 用四元数表示。在每一步,根据式(6)实现旋转矩阵的正交。

$$R(q) = \frac{1}{q \cdot q} R_u(q) \quad (6)$$

$q = [u, v, w, s]$ 是一个四元数, $R_u(q)$ 表示欧氏旋转矩阵,并且可以根据式(7)计算获取。

$$R_u(q) = \begin{bmatrix} s^2 + u^2 + v^2 - w^2 & 2(uv - sw) & 2(uw + sv) \\ 2(uv + sw) & s^2 - u^2 + v^2 - w^2 & 2(vw - su) \\ 2(uw - sv) & 2(vw + su) & s^2 - u^2 - v^2 + w^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

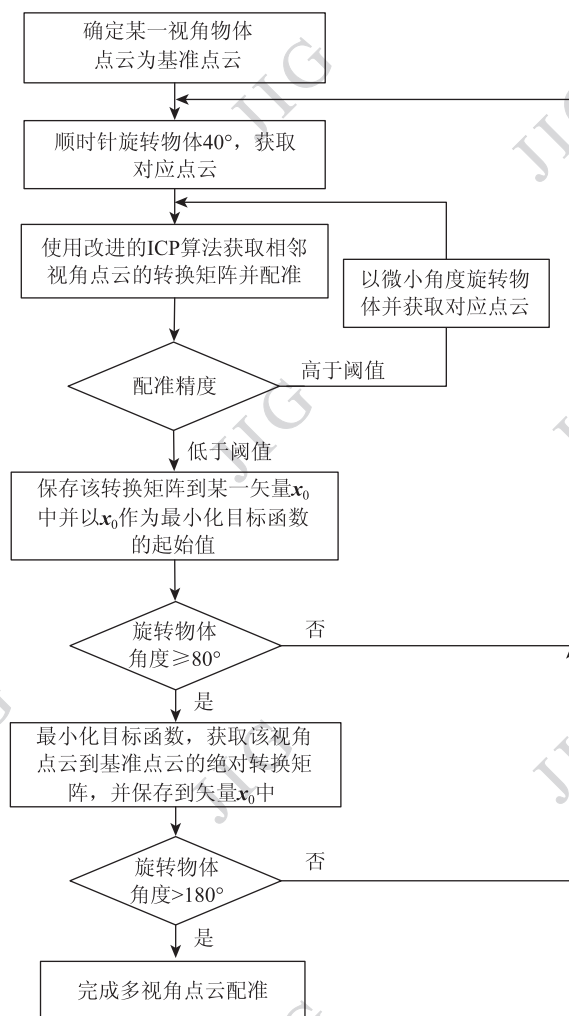


图2 多视角点云优化配准方法流程图

Fig.2 Flowchart of multi-view point cloud to optimize registration method

由式(5)(6)(7)计算可知,矢量 $\mathbf{x}_0$ 可以表示为

$$\mathbf{x}_0 = [\mathbf{R}_{12}^T; \mathbf{t}_{12}; \mathbf{R}_{23}^T; \mathbf{t}_{23}; \cdots; \mathbf{R}_{ij}^T; \mathbf{t}_{ij}] \quad (8)$$

为了加快目标函数的收敛,本文令 $\|\mathbf{q}\| = 1$ 。在求解目标函数的过程中,将矢量 $\mathbf{x}_0$ 作为目标函数的初始假定值,采用 Active-set(有效集算法)最小化目标函数,获取目标函数的最优解。

7)由步骤6)获取该视角点云到基准点云的绝对转换矩阵,并保存到矢量 $\mathbf{x}_0$ 中,作为目标函数的初始值。

8)判断此时物体相对于基准视角的旋转角度,如果小于 180° ,则返回到步骤2),否则停止旋转物体,完成了多视角点云的配准,获取到物体完整表面的3维点云重建模型。

在本文方法的点云重建过程中,采用全局点云优化配准算法直接计算获取不同视角的点云模型到基准点云模型坐标系中最佳的绝对变换矩阵 $\{\mathbf{T}^{1,2}, \mathbf{T}^{1,3}, \cdots, \mathbf{T}^{1,n}\}$,避免了由于不断地对相邻点云进行匹配而引起了误差的累积。该方法配准精度较高,实现过程简单,并且计算耗时不大。

3 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性,选择了立体盒子、杯子、台灯和凳子等物体进行了3维重建实验。实验环境如图3所示,物体置于转台上并可顺时针旋转 180° ,每隔 40° 转台水平旋转一次,由位置固定的TOF 3维相机获取物体各侧面的距离数据。然后对于不同视角的距离数据,采用多视角点云优化配准方法,实现物体完整表面的3维点云重建。

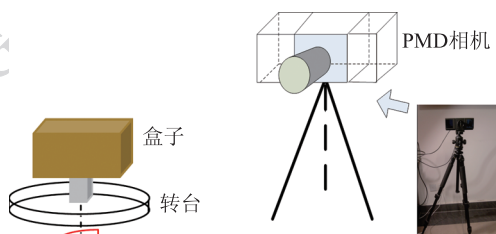


图3 多视角立体成像系统示意图

Fig. 3 Multi-view stereo imaging system diagram

以立体盒子的多视角点云配准为例,按照如图3所示的实验环境,获取了立体盒子处于5个不同视角时的距离图像,如图4所示。仅对前3个视角

应用多视角点云配准方法进行详细分析。

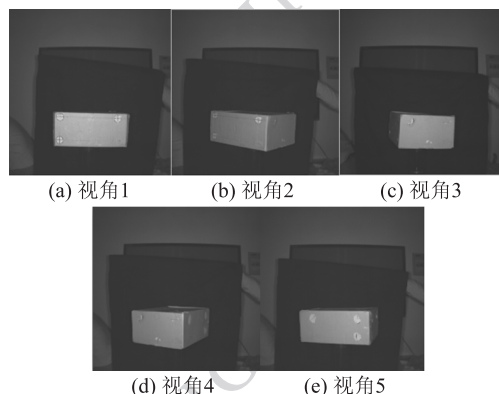
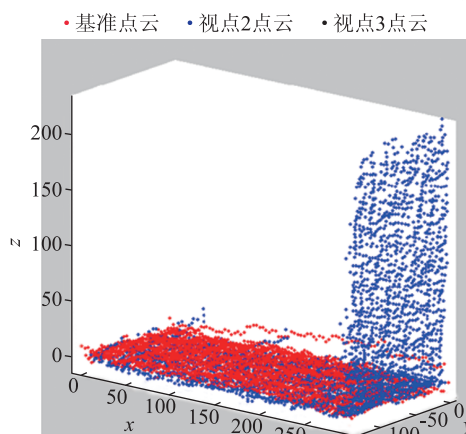


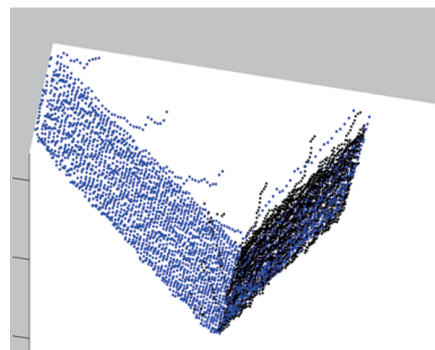
图4 PMD相机获取的立体盒子的距离图像

Fig. 4 Three-dimensional distance image of the box obtained by PMD camera

在图4中,令视角1中物体的点云为基准点云。基于改进的ICP迭代算法,可以获取视角2物体点云对齐到基准点云的最佳变换矩阵 $[\mathbf{R}, \mathbf{T}]$ 配准结果如图5(a)所示。



(a) 视角2到视角1



(b) 视角3到视角2

图5 相邻点云配准结果

Fig. 5 Results of adjacent point cloud registration

$$R = \begin{bmatrix} 0.7631 & -0.0872 & -0.6403 \\ 0.0668 & 0.9962 & -0.0560 \\ 0.6428 & 0.0000 & 0.7660 \end{bmatrix}$$

$$T = [102.198 \quad -9.9175 \quad -64.6843]^T$$

同理, 可以获取视角3物体点云对齐到视角2点云的最佳变换矩阵 $[R_1, T_1]$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.8059 & -0.0872 & -0.5855 \\ 0.0705 & 0.9962 & -0.0512 \\ 0.5878 & 0.0000 & 0.8090 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = [85.0025 \quad -6.680 \quad -62.1011]^T$$

配准结果如图5(b)所示。

为了获取视角3点云到基准点云的转换矩阵, 根据Chen提出的多视角点云配准方法, 需要把视角2点云配准到基准点云所处坐标系中, 与基准点云合成一片新的点云。然后再根据ICP迭代算法, 对视角3点云与配准后的点云进行配准, 获取视角3点云到基准点云的转换矩阵 $[R_2, T_2]$, 即

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.2335 & -0.1503 & -0.9612 \\ 0.0891 & 0.9866 & -0.1355 \\ 0.9683 & -0.0490 & 0.2434 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = [207.4140 \quad -7.4178 \quad -57.6179]^T$$

应用该转换矩阵进行配准, 配准结果为如图6(a)所示。

根据本文提出的多视角点云优化配准方法, 把 $[R, T; R_1, T_1]$ 作为目标函数的初始值, 并根据整个

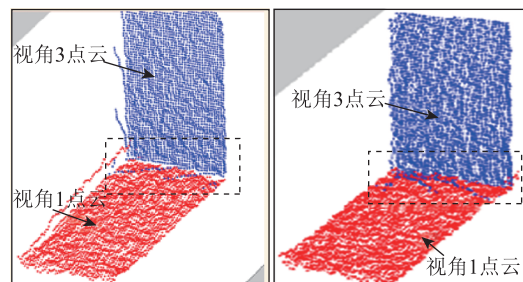


图6 多视角点云配准

Fig. 6 Multi-view point cloud registration

算法的具体实现步骤, 对目标函数进行最优化解, 可以直接获取视角3点云到基准点云的转换矩阵 $[R_3, T_3]$, 即

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.2418 & -0.0349 & -0.9697 \\ 0.0084 & 0.9994 & -0.0339 \\ 0.9703 & 0.0000 & 0.2419 \end{bmatrix}$$

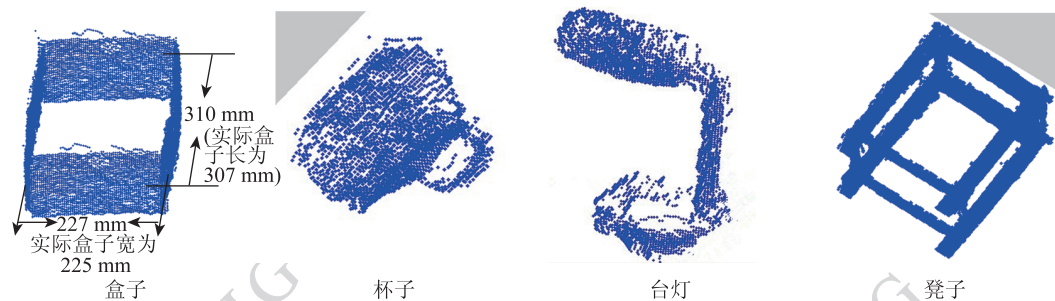
$$T_3 = [204.73 \quad -3.2711 \quad -59.313]^T$$

应用该转换矩阵 $[R_3, T_3]$ 进行配准, 配准结果如图6(b)所示。由绝对转换矩阵的计算可知, 两种多视角点云配准方法获取的结果是不同的。并由图6(a)与图6(b)的直观对比可知, 在图6(a)中两片点云的连接处存在缝隙(由图6中虚框标明), 而在图6(b)中两片点云连接紧密。

选择如图7(a)所示的4个物体, 分别应用Chen



(a) 实物图



(b) 实物3维点云重建模型

图7 不同物体的3维点云重建模型

Fig. 7 3D point cloud reconstruction model of different objects

提出的多视角配准方法、Bergevin 提出的多视角配准算法和本文的配准方法进行了 3 维重建的实验,并从配准精度和配准速度两方面进行对比。图 7 分别为应用本文提出的多视角点云优化配准方法,对获取的多片点云进行配准,从而重构出物体完整表面的 3 维点云立体模型。

在点云配准精度方面,以残差均方差 RMS 值为度量配准精度的指标,即

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|p_i - (Rq_i + t)\|^2} \quad (9)$$

式中, q 为原点云, p 是目标点云。

首先确定物体处于某一视角的点云作为基准点云,然后通过 3 种不同的多视角点云配准算法,把物体旋转 180° 获取的点云与基准点云进行对齐,并称该片点云为 180° 旋转点云。同时把其他不同视角的点云配准到基准坐标系中,与基准点云合成一片点云,称之为融合点云。在这里,从 180° 旋转点云中随机选取 1 000 个点,根据 Knn(K 迭代最邻近点)算法获取这 1 000 个点在融合点云中欧式距离最近的点,并把当前的点对作为匹配点对 $(p_i, q_i) i = 1, 2 \cdots, 1\,000$, 根据式(9),可以分别计算出应用 Chen 的多视角点云配准方法、Bergevin 的多视角点云配准方法与本文多视角点云配准方法的 RMS 值并进行对比,如表 1 所示。

由表 1 可知,针对不同的物体采用本文的配准方法计算获取的 RMS 值均小于 Chen 的配准方法和 Bergevin 的配准方法计算获取的 RMS 值,从而可知本文方法的配准精度较高。

表 1 3 种方法配准精度对比
Table 1 Comparison of three algorithms registration accuracy

方法	RMS 值/mm			
	盒子	水杯	台灯	凳子
Chen	2.24	3.56	4.16	2.61
Bergevin	1.42	2.06	2.30	1.71
本文	1.25	1.81	2.12	1.56

在 3 种方法的配准速度方面,由于 3 种多视角点云配准方法,都需要结合相邻视角点云之间的转换矩阵,所以应用 3 种方法实现多视角点云配准的时间包括基于 TOF 距离数据进行相邻点云配准的时间和获取绝对转换矩阵的时间。从而可

知,对于不同物体的点云在一次多视角点云配准过程中,3 种多视角点云配准方法的配准时间,如表 2 所示。

由表 2 可知,针对不同的物体采用本文提出的多视角点云配准方法的配准时间与 Chen 的配准方法的配准时间相当,远小于 Bergevin 配准方法的配准时间。

表 2 3 种算法配准速度对比
Table 2 Comparison of three algorithms registration speed

方法	配准时间/s			
	盒子	水杯	台灯	凳子
Chen	19.5	21.8	23.3	21.2
Bergevin	31.2	35.7	38.9	35.1
本文	20.2	22.5	24.1	21.7

4 结 论

针对基于 TOF 相机对物体完整表面进行 3 维点云重建中多视角点云配准精度低的问题,提出了一种优化配准方法,该方法构建了一个目标函数,把 ICP 迭代算法获取的相邻点云之间的转换矩阵作为目标函数的初始值,并采用 Active-set(有效集算法)对目标函数进行最小化求解,计算获取任意点云到基准点云的绝对转换矩阵,避免了对连续点云之间进行配准而引起误差的累积。实验结果表明,该算法在保证多视角点云配准速度的同时,提高了多视角点云配准的精度,同时还增强了物体整体点云模型重建的效果,使重构出的点云模型可以直接应用于曲面网格重建中。

在目前工作的基础上,进一步的研究工作主要有以下 2 个方向:

- 1) 研究基于隐式函数的拟合方法,对获取的 3 维点云重建模型进行表面重建。
- 2) 研究数据融合技术,把 TOF 3 维相机的距离信息与 RGB 2 维相机的彩色信息进行融合,自动生成物体完整表面高分辨率的纹理贴图。

参考文献 (References)

[1] Rao Z P, Liu J, Xia Y. Method of 3D reconstruction[J]. Micro-nanoelectronic Technology, 2010, 47(9): 564-572. [饶志鹏,刘健,夏洋. 三维物体的重建方法[J]. 微纳电子技术,

- 2010, 47(9):564-572.]
- [2] Gao J. Application system research on 3D reconstruction [D]. Shandong: Shandong University, 2009:1-5. [高剑. 三维重建应用系统研究 [D]. 山东:山东大学, 2009:1-5.]
- [3] Gao J. An Introduction to Intelligent Information Processing Method [M]. Beijing: China Machine Press, 2004:11-16. [高隽. 智能信息处理方法导论 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004:11-16.]
- [4] Yuan X. 3D laser scanning point cloud data processing and application technology [D]. Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology. 2006. [袁夏. 三维激光扫描点云数据处理及应用技术 [D]. 江苏:南京理工大学, 2006.]
- [5] Zhang C X. 3D Reconstruction based on binocular vision [D]. Tianjing: Tianjing University. 2010. [张春秀. 基于双目视觉的三维重建 [D]. 天津:天津大学, 2010.]
- [6] Tong J, Xiang X Q, Tian H B, et al. 3D reconstruction of non-rigid shapes using one TOF camera [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(3): 377-384. [童晶, 向学勤, 田洪波, 等. 利用飞行时间三维相机的非刚体形状三维重建 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(3):377-384.]
- [7] Besl P, McKay N. A method for registration of 3-D shapes [J]. Trans. PAMI, 1992, 14(2): 239-256.
- [8] 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. [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.]
- [9] Akca D. Registration of point clouds using range and intensity information [C]// The International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage. Ascona, Switzerland: Taylor & Francis/Balkema, Leiden, 2005:115-126.
- [10] Basdogan C, Oztireli AC. A new feature based method for robust and efficient rigid-body registration of overlapping point clouds [J]. The Visual Computer, 2008, 24(7/8/9):679-688. [DOI 10.1007/s00371-008-0248-6]
- [11] Krishnan S, Lee P Y, Moore J B, et al. Global registration of multiple 3D point sets via optimization-on-a-manifold [C]//The 3rd Eurographics Symposium on Geometry Processing. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2005: 187.
- [12] Gao J W, Deng M Z, Shi H X, et al. Total least squares fitting of point sets in md [C]//Computer Graphics International. Beijing, China: Inst. of Comput. Technol., Chinese Acad. of Sci., 2005:82-86.
- [13] Wiklund A. Registration approaches for noisy 3D data representing natural scenes [D]. Lulea: Lulea Tekniska Universitet, 2006.
- [14] Borrmann D, Elseberg J, Lingemann K, et al. Globally consistent 3d mapping with scan matching [J]. Robot. Auton. Syst., 2008, 56(2): 130-142. [DOI: 10.1016/j.robot.2007.07.002]
- [15] Yang C, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images [J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145-155. [DOI: 10.1016/0262-8856(92)90066-C]
- [16] Bergevin R, Soucy M, Gagnon H, et al. Towards a general multi-view registration technique [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(5): 540-547.