

基于触觉感知和伺服的物体三维边缘重建方法

胡静怡^{1,2}, 崔少伟^{1,2}, 张超凡¹, 张伯约¹, 王硕^{1,3,4}

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049;

3. 中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049;

4. 中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心, 上海 200031)

摘要: 机器人的灵巧操作一直是机器人领域研究的前沿热点问题。在很多灵巧操作任务中, 机器人不仅需要视觉反馈, 指尖的触觉反馈也至关重要, 尤其是在光照条件不佳等情况下。目前, 利用触觉伺服对物体进行三维形状感知的工作仍然非常具有挑战性。平面的 GelSight 触觉传感器并不适用于对物体进行三维形状的感知。因此, 对 GelSight 触觉传感器设计进行了改进, 使其更适用于获取三维物体边缘信息。同时, 提出一种基于触觉伺服的物体边缘跟踪控制策略和基于触觉点云的物体三维边缘重建方法, 以支持机器人的三维物体灵巧操作策略生成。针对多种复杂三维边缘模型, 通过机器人的触觉伺服跟踪和三维边缘重建实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 触觉伺服; 触觉感知; 三维重建

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202226

3D edge reconstruction method based on tactile sensing and servo

HU Jingyi^{1,2}, CUI Shaowei^{1,2}, ZHANG Chaofan¹, ZHANG Boyue¹, WANG Shuo^{1,3,4}

1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China

Abstract: The dexterous manipulation of robots has always been a hot topic in the field of robotics. In many dexterous manipulation tasks, robots need not only visual feedback, but also tactile feedback at the fingertips, especially in poor lighting conditions. Currently, 3D shape sensing of objects using tactile servo is still very challenging. The flat GelSight tactile sensors are not suitable for 3D shape sensing of objects. Therefore, the design of GelSight tactile sensor was improved to make it more suitable for the acquisition of edge information of 3D objects. At the same time, an object edge tracking control strategy based on tactile servo and a 3D object edge reconstruction method based on tactile point cloud were proposed to support the generation of dexterous manipulation strategies for robots. For a variety of complex 3D edge models, the effectiveness of the proposed method was verified by the tactile servo tracking and 3D edge reconstruction experiments.

Key words: tactile servo, tactile sensing, 3D reconstruction

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-04-13

通信作者: 王硕, shuo.wang@ia.ac.cn

基金项目: 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目 (No.2018AAA0103003); 国家自然科学基金资助项目 (No.U1913201)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018AAA0103003), The National Natural Science Foundation of China (No.U191320)

0 引言

机器人对物体三维形状的感知是进行灵巧操作的前提条件。虽然基于视觉的物体三维重建算法已经比较成熟^[1],但是不适用于一些特殊应用场景下的机器人,如水下机器人^[2]、管道机器人^[3]以及矿井救援机器人^[4]等。这些机器人面对的环境存在能见度低、光照条件差、视觉信息质量差等问题,机器人单纯依靠视觉难以感知物体形态。即便在常见的机器人抓取操作中,由于机器人的机械臂、环境障碍等对物体的遮挡,基于视觉的物体三维形态感知仍存在局限。而触觉利用物理接触的方式进行感知,能够在这些情况下有效代替或者辅助视觉进行感知^[5]。

近年来,基于相机的触觉传感器研究取得了较大进展^[6]。由于此类触觉传感器的感知面积一般较小,对物体三维形态的感知需要通过触觉伺服或触觉跟踪^[7]实现,即将传感器安装在机械臂末端,机械臂控制传感器与物体接触,并根据触觉反馈探索物体表面。由于物体的边缘包含了丰富的物体形状信息,许多研究聚焦于利用触觉跟踪物体边缘的问题^[5,7-15],如利用触觉点阵或 TacTip 触觉传感器(以下简称 TacTip 传感器)通过神经网络学习的方法来实现触觉跟踪。而触觉点阵或 TacTip 传感器获取的感知信息比较稀疏,通过机器人的触觉伺服跟踪只能获取物体的大致形态,缺少接触区域的细节,误差较大,导致机器人工作效率较低^[12]。

与触觉点阵和 TacTip 传感器不同, GelSight^[16]触觉传感器(以下简称 GelSight 传感器)能够重建

与之接触的三维几何形状。因此,最近的研究工作利用 GelSight 传感器的感知功能,并结合控制来完成线缆或物体表面跟踪、插拔 USB 端口以及重定位物体等机器人触觉伺服任务^[17-20]。然而,这些工作的重点在于触觉伺服,未探讨物体的三维形态感知。Wang S X 等人^[21]先用视觉重建物体的大致三维形状,再用 GelSight 传感器对重建模型中不确定性较高的部分进行局部采集,以提高重建精度。然而,该工作借助了视觉的帮助,并非完全使用触觉感知。

综合以上研究,本文重点关注机器人如何利用触觉传感器实现物体的三维边缘重建,从而为生成机器人灵巧操作策略奠定基础。因此,首先考虑改进 GelSight 传感器设计,使之更适用于三维边缘重建。其次,提出了基于触觉反馈的机器人边缘跟踪控制策略,触觉反馈采用了基于主成分分析(principal component analysis, PCA)的边缘位姿快速估计方法。最后,通过融合三维边缘连续跟踪获得的触觉感知数据重建出物体边缘的三维模型。本文采用的触觉机器人系统以及咖啡杯边缘的三维重建结果如图1所示。

1 Flat-tip GelSight 传感器

受到 GelSight 传感器^[16]和 TacTip 传感器^[22]的启发,本文设计了如图2(b)所示的 Flat-tip GelSight 触觉传感器(以下简称 Flat-tip GelSight 传感器)。该传感器的感知原理为:传感器前端的软胶层被红-绿-蓝三色光照射,当其表面接触物体发生形变后,该形变被位于软胶层之后的相机捕捉为触觉图像,进而通过光度立体算法重建出三维点云。

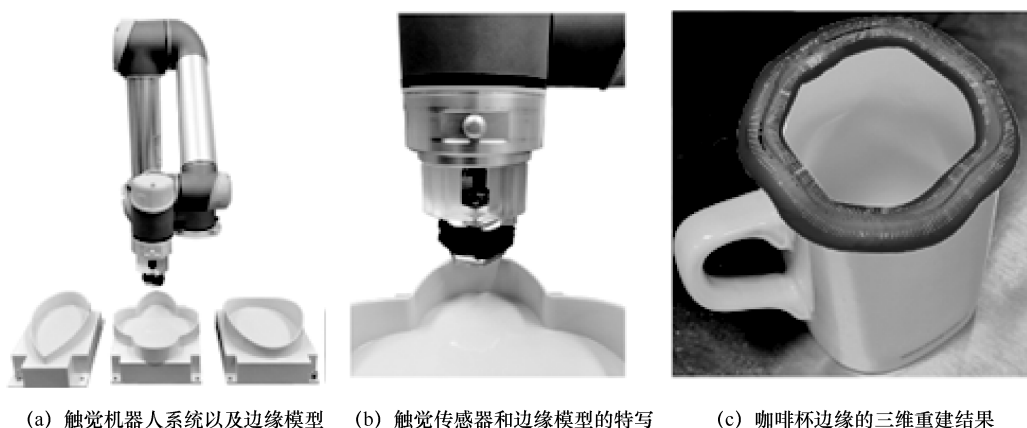


图1 触觉机器人系统以及咖啡杯边缘的三维重建结果

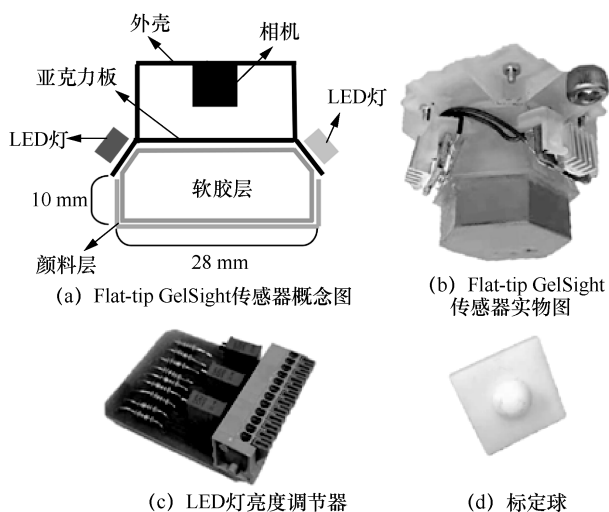


图2 Flat-tip GelSight 传感器概念图、实物图以及配件

Flat-tip GelSight 传感器的优势主要有以下两点。第一，相对于 GelSight 传感器，Flat-tip GelSight 传感器的感知角度变大了，感知深度变深了。如图 3 (b) 所示，当 Flat-tip GelSight 传感器与直线边缘接触深度为 3 mm 时，传感器旋转 13.75°，其外壳仍不会碰到边缘。如图 4 (b) 所示，当 Flat-tip GelSight 传感器与直线边缘的接触深度达到 9 mm 时，传感器外壳仍未触碰边缘。第二，相对于 TacTip 传感器，Flat-tip GelSight 传感器在同样的接触深度下对边缘的感知面积更大，如图 5 所示，Flat-tip GelSight 传感器的平面在其能感知的深度下最大能够感知长为 32 mm 的直线边缘，而 TacTip 的半球头表面在与边缘接触深度为 8 mm 时才能感知长为 32 mm 的直线边缘。这些优势使得 Flat-tip GelSight 传感器与外界接触

的深度较深、面积较大，适用于三维边缘跟踪任务。

此外，由于加厚的软胶层受到较大剪切力时会导致传感器无法准确感知硅胶的形变，降低控制的精度，因此为了保证感知和控制的准确性，本文使用“拍打”的跟踪方式来避免软胶层受到较大剪切力，即先抬起传感器使之不与边缘接触，调整位姿并进行移动，再下压传感器与边缘接触感知^[11]。

如图 2 (a) 所示，Flat-tip GelSight 传感器的硬件部分由相机、外壳、亚克力板、红-绿-蓝 LED 灯、软胶层以及颜料层组成。相机的视角为 70°，分辨率为 640×480，帧率为 30 FPS。透明亚克力板厚度为 1 mm。LED 灯模块倾斜地安装在软胶层周围，保证光线以倾斜的角度照亮颜料层。另外，为了尽量保证 3 种颜色的光线平均地照亮颜料层，本文设计了一个亮度调节器分别调节每种光的亮度，如图 2 (c) 所示。传感器基于光度立体算法^[23]对软胶层表面进行三维重建，使用的标定球如图 2 (d) 所示。

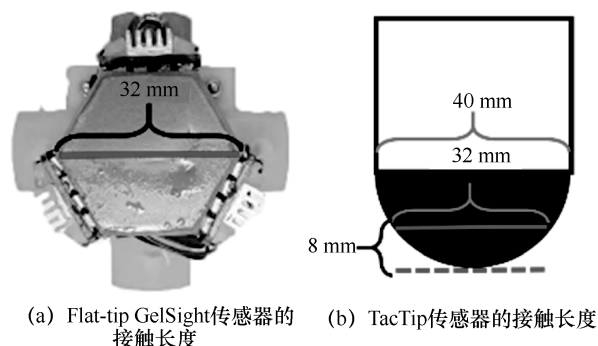


图5 Flat-tip GelSight 传感器和 TacTip 传感器与直线边缘的接触长度

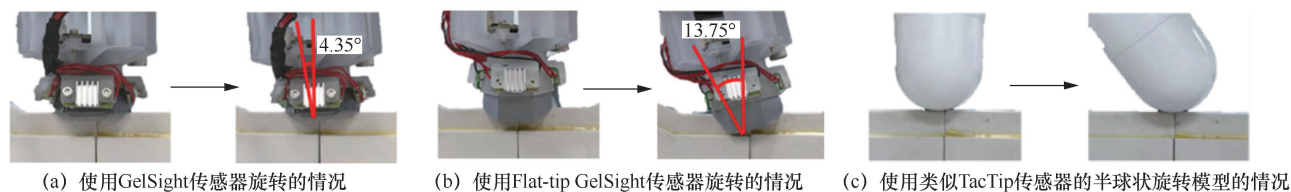


图3 GelSight 传感器、Flat-tip GelSight 传感器以及类似 TacTip 传感器的半球状模型接触直线边缘并旋转

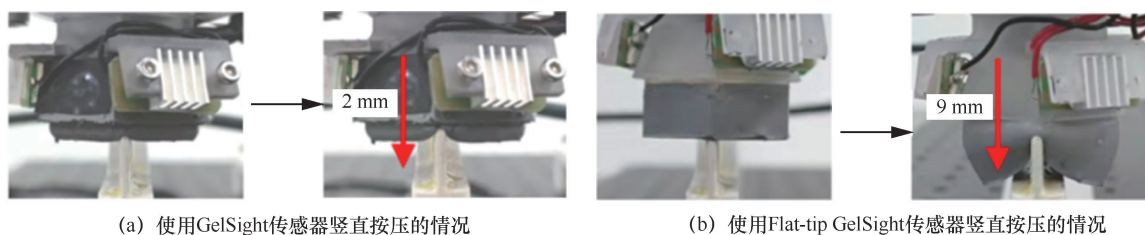


图4 GelSight 传感器和 Flat-tip GelSight 传感器与直线边缘最大接触深度

2 三维边缘重建方法

2.1 坐标系定义

为了阐述本文提出的三维边缘重建方法, 首先定义几个坐标系, 如图6所示, 分别是机器人的基坐标系 B , 传感器坐标系 S , 参考坐标系 R , 特征坐标系 F , 以及估计的特征坐标系 F' 。本文中, 以上所有坐标系都以三维直角坐标系来表示, 三维位移和旋转量分别使用笛卡儿坐标 (x, y, z) 和欧拉角 (α, β, λ) (绕 X - Y - Z 定轴旋转) 来表示。

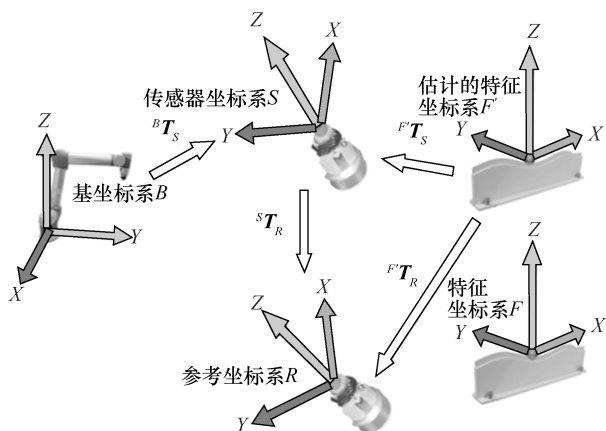


图6 坐标系以及坐标系转换示意图

机器人的基坐标系 B 是以机器人安装基座为基准, 描述机器人本体运动的坐标系, 本文设其 Z 轴是竖直向上的。传感器坐标系 S 是固定连接在传感器上的局部坐标系, 设 S 的 XOY 平面与软胶层的表平面重合, X 轴和 Y 轴方向如图7所示, Z 轴垂直于 XOY 平面。由于机器人的末端与传感器固定连接且传感器的尺寸已知, 传感器坐标系 S 在基坐标系 B 下的位姿可以通过机器人正向运动学计算得到, S 在 B 中位姿的齐次变换矩阵用 ${}^B T_S \in SE(3)$ 来表示。参考坐标系 R 是期望机器人控制传感器到达的位姿。

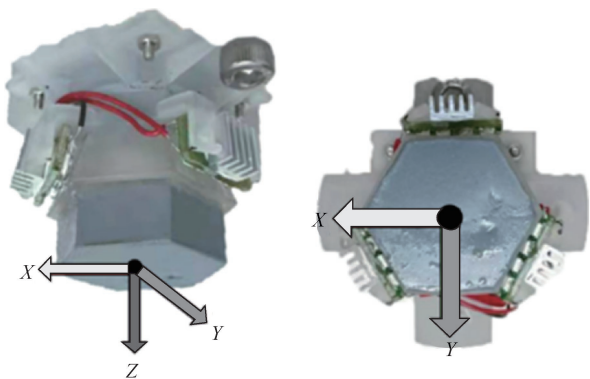


图7 Fla-tip GelSight 传感器坐标系

特征坐标系 F 是固定连接在物体表面特征上的局部坐标系。本文的物体表面特征特指如图8所示的脊状边缘特征。由于脊状边缘是有厚度的, 这里将脊状边缘抽象成一条三维曲线, 如图9中的紫色曲线所示。对于该连续曲线上的每一个点, 都可以建立一个坐标系来表示其三维位姿。图9展示了一个连续三维边缘上某两点的特征坐标系, 将特征坐标系的 X 轴方向定义为三维曲线上对应点的切线方向。由于本文只考虑脊状凸起垂直于水平面的边缘模型, 特征坐标系的 Z 轴方向的确定如图9所示, 设其中一个点的特征坐标系原点为 O , OD 为垂直于水平面的向量, φ 为垂直于 X 轴的平面。平面 φ 与平面 XOD 的交线方向被定义为该特征坐标系的 Z 轴方向。

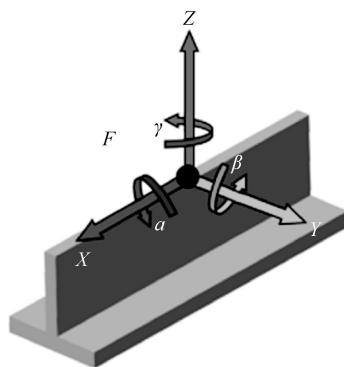


图8 直线脊状边缘以及其上某一点的特征坐标系

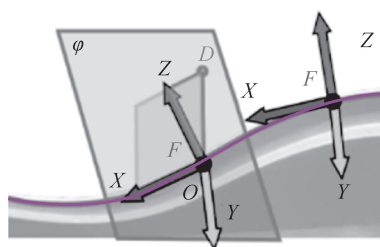


图9 三维脊状边缘上某两点的特征坐标系

估计的特征坐标系 F' 为本文通过边缘点云估计出的特征坐标系位姿, 与真实的特征坐标系 F 之间有一定误差。传感器与边缘稳定接触后, 能够重建出局部边缘的点云, 从点云中得到估计的边缘特征坐标系 F' 在传感器坐标系 S 中的位姿, 记为 $(x', y', z'; \alpha', \beta', \gamma')$ 。设表示 F' 在 S 中位姿的齐次变换矩阵为 ${}^S T_{F'}$, 其逆为 ${}^{F'} T_S$ 。同时, 给定 R 在 F' 中的位姿 $(x_r, y_r, z_r; \alpha_r, \beta_r, \gamma_r)$, 其中, x_r 可被看作传感器沿边缘切线前进的步长。设表示 R 在 F' 中位姿的齐次变换矩阵为 ${}^{F'} T_R$ 。

2.2 三维边缘重建的流程

本文提出的三维边缘重建方法流程如图 10 所示, 经过系统初始化之后, 传感器开始捕捉触觉图像 m 并生成重建的点云, 并通过点云来估计当前传感器与边缘接触的深度。若接触深度小于阈值, 则判定传感器与边缘没有实现稳定接触, 这时机器人控制传感器主动探测边缘, 直到传感器与边缘的接触深度大于设定的阈时, 认为传感器已经与边缘有了稳定的接触, 进而使用此时的点云估计出边缘特征坐标系 F 在传感器坐标系 S 中的位姿。由于人为给定了参考坐标系 R 在估计的特征坐标系 F' 中的位姿, 因此可以计算出传感器位姿与参考位姿之间的位姿误差。该位姿误差通过一个控制器得到位姿调节量, 最后通过坐标系转换输出对机器人末端的位置控制命令, 使得传感器能够按照参考位姿对边缘进行跟踪。同时每个循环中记录传感器的位姿, 进而得到点云的位姿, 将每一个循环中的点云按照位姿进行拼接, 就能够重建连续的三维边缘。

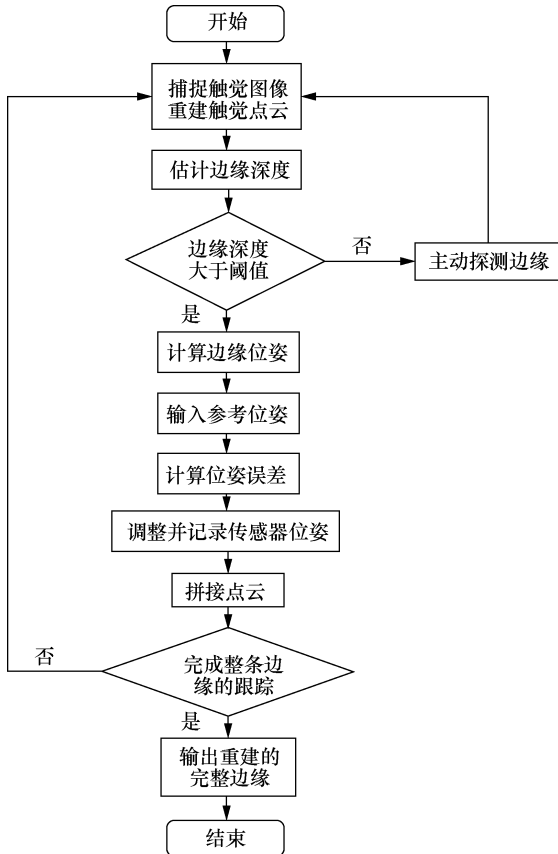


图 10 三维边缘重建方法流程

2.3 三维边缘跟踪控制器设计

本文提出的三维边缘重建方法基于三维边缘

跟踪, 因此本文设计了控制器, 使得机器人能够控制传感器对三维边缘进行稳定跟踪。三维边缘跟踪的控制框图如图 11 所示。使用数字比例积分 (proportional integral, PI) 控制器对传感器的位置进行控制。将 ${}^S T_R$ 的各位姿分量作为输入 PI 控制器的误差 $e = (x_e, y_e, z_e; \alpha_e, \beta_e, \gamma_e)$ 。在 t 时刻, ${}^S T_R$ 可由式 (1) 计算得到:

$${}^S T_R(t) = {}^S T_{F'}(t) \cdot {}^{F'} T_R = {}^{F'} T_S^{-1}(t) \cdot {}^{F'} T_R \quad (1)$$

控制器的输出为传感器坐标系下的位姿调整量 $u = (x_u, y_u, z_u; \alpha_u, \beta_u, \gamma_u)$, 在 t 时刻, 可由式 (2) 计算得到:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i f \left[\sum_{t'=0}^t e(t') \right] \quad (2)$$

其中, 位姿误差用六维向量来表示; K_p 和 K_i 用 6×6 的对角矩阵来表示; 使用一个抗积分饱和函数 f 将积分误差限制在某个范围内。

用 U 表示传感器需要调整到的位姿, 则 t 时刻表示 U 在 S 中位姿的齐次变换矩阵为 ${}^S T_U(t)$ 。由于本文通过在基坐标系下控制机器人末端的位姿来调整传感器的位姿, 因此将在传感器坐标系下的位姿调整量转换到基坐标系下, 有:

$${}^B T_U(t) = {}^B T_S(t) \cdot {}^S T_U(t) \quad (3)$$

3 基于 PCA 的边缘位姿估计方法

3.1 利用点云估计边缘位姿

由于本文考虑的边缘模型都比较平缓, 因此将与传感器接触的部分边缘都近似看作直线边缘, 下面以一条直线边缘为例, 介绍基于 PCA 的边缘位姿估计方法。由于在 Flat-tip GelSight 传感器上使用光度立体算法重建的边缘点云与真实边缘的点云存在多种因素导致的误差。因此当传感器与一条直线边缘以某种位姿进行稳定接触后, 由触觉图像重建出点云, 将点云投影到三维平面并计算 PCA 主轴示意图如图 12 所示。直观来看, 该点云的形状近似一个二维椭圆从一个平面向上凸起, 并且椭圆中心部分点云较高, 边缘的点云高度逐渐减小到零, 凸起部分的形态与直线边缘的形态并不一样。为了从这种点云中估计边缘的位姿, 本文的方法如下。

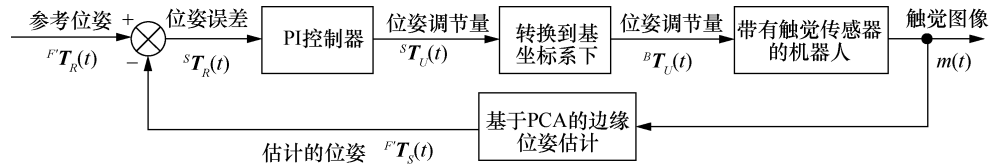


图 11 三维边缘跟踪的控制框图

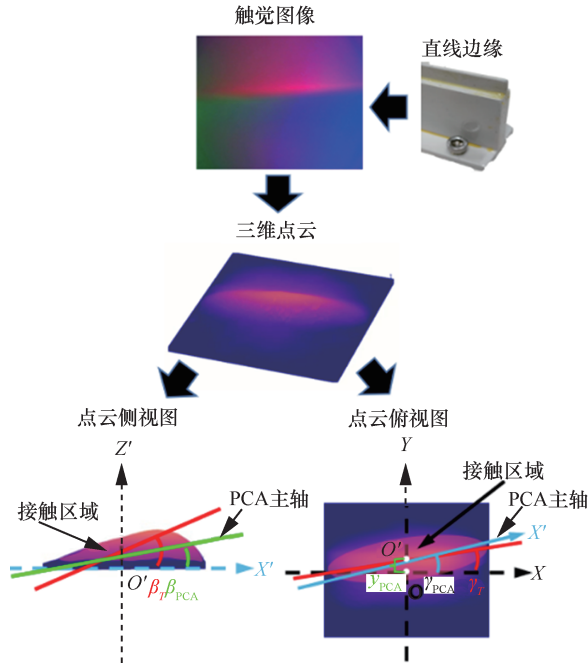


图 12 将点云投影到二维平面并计算 PCA 主轴示意图

首先，使用一个固定的高度阈值筛选出接触区域的点云，将其称为接触点云，如图 12 中点云俯视图和侧视图的红色区域所示。进而利用接触点云估计边缘在传感器坐标系下的位姿。假设与传感器接触的边缘是一条直线线段，如图 13 所示，假设估计的边缘位姿为该线段与传感器 Y 轴交点 O' 的位姿，可以设该点在传感器坐标系下沿 X 轴位移的估计值 x' 为 0。对于横滚角，由于本文考虑的脊状边缘厚度较小，当传感器相对于边缘有较小的横滚角变化时，点云形态的区别不是很大，因此暂时不考虑横滚角的估计值。在以下计算中，都假设横滚角的估计值 α' 为 0；在实验中，也对传感器相对于边缘以横滚角几乎为零的姿态进行初始化。对于边缘偏航角的估计值 γ' 、俯仰角的估计值 β' 、沿 Y 轴位移的估计值 y' 以及边缘与传感器的接触深度的估计值 z' 的计算方法如下。

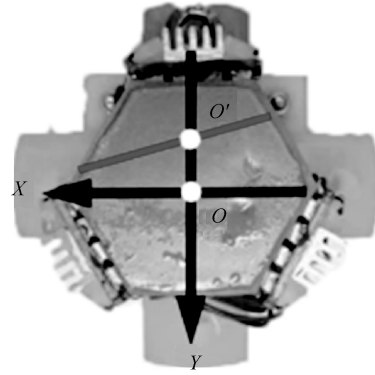


图 13 边缘与传感器表面接触示意图

对于偏航角的估计，首先将接触点云投影到传感器的 XOY 平面，如图 12 的点云俯视图所示。设该二维点集由 n 个点组成，其坐标为 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, n$)，使用 PCA 方法计算其主轴方向。首先计算平均值：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$$

然后计算协方差矩阵：

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (5)$$

再对协方差矩阵求特征值和特征向量，取最大的特征值 λ_1 对应的特征向量 $\mathbf{p}_1 = (a, b)$ ($a \neq 0$)，设 PCA 主轴与 X 轴夹角为 γ_{PCA} ，有：

$$\gamma_{PCA} = \arctan \frac{b}{a} \quad (6)$$

则 PCA 主轴对应的直线如图 12 的点云俯视图中的蓝色直线所示，设其为 X' 轴，直线方程为：

$$y - \bar{y} = \tan \gamma_{PCA} \cdot (x - \bar{x}) \quad (7)$$

$$y = \frac{b}{a}x - \frac{b}{a}\bar{x} + \bar{y} \quad (8)$$

设边缘真实的偏航角为 γ_T ，如图 12 的点云俯视图中的红色直线所示。为了得到偏航角的估计值

γ' ，需要找到 γ_T 与 γ_{PCA} 之间的关系。由于在实验中发现 γ_T 与 γ_{PCA} 的值非常接近，因此设 $\gamma' = \gamma_{PCA}$ 。

对于沿 Y 轴位移量的估计，考虑 X' 轴与 Y 轴的交点，设为 O' ，并设 $y_{PCA} = OO'$ ，边缘真实的 Y 轴偏移量为 y_T 。由于在实验中发现 y_T 与 y_{PCA} 的值非常接近，因此设 $y' = y_{PCA}$ 。

对于俯仰角的估计，设从 O' 点出发，垂直于 XOY 平面的轴为 Z' ，如图 12 的点云侧视图所示。取接触点云位于 $X'O'Z'$ 平面的点，设其坐标为 (x'_i, z'_i) ($i=1, 2, \dots, m$)。使用 PCA 方法计算该二维点集的主轴方向，得到 PCA 主轴与 X' 轴的夹角，设为 β_p 。设边缘真实的俯仰角为 β_T 。由于在实验中发现 β_T 与 β_p 的值相差较大，并且近似为正相关关系，因此设计了一种标定方法来获得俯仰角的估计值 β' 。

对于边缘与传感器的接触深度的估计，将在 $X'O'Z'$ 平面内 $x=0$ 处的点的高度作为深度的估计值 z' 。

3.2 俯仰角的标定

由于边缘位于传感器的 XOZ 平面时重建的点云误差最小，最接近真实的点云，因此在为了边缘重建而进行边缘跟踪时，需要机器人尽量将代表边缘的直线控制在传感器 XOZ 平面附近。故对于俯仰角的标定，本文只考虑代表边缘的直线位于传感器的 XOZ 平面内的情况，标定方法如下。

使用一个脊状凸起并垂直于水平面的直线边缘模型，首先控制机器人的末端，将传感器的 XOZ 平面以垂直于水平面且 X 轴与边缘直线重合的姿态与边缘接触，然后竖直向下按压 3 mm。接着在 $[-14, 14]^\circ$ 改变传感器的俯仰角，每间隔 0.5° 记录俯仰角真值 β_T 和由点云计算出的 PCA 主轴角度值 β_p 。图 14 (b) 为俯仰角真值与 PCA 主轴角度的关系举例的数据，图中的点为 (β_p, β_T) ， β_T 和 β_p 的皮尔逊相关系数 r 约为 0.99，这意味着这两组数据有很强的线性相关性。当 β_T 分别为 $0^\circ, 14^\circ, -14^\circ$ 时，点云侧视图如图 14 (a) 所示。因此俯仰角的估计值 β' 可以由式 (9) 计算：

$$\beta' = k\beta_p + b \quad (9)$$

其中，系数 k 和 b 由最小二乘法计算得到。在该例子中， $k=94.72$ ， $b=2.14$ 。图 14 (b) 中的直线展示了拟合的结果，拟合优度 $R^2=0.99$ ，表明回归预测的值非常接近真实值。

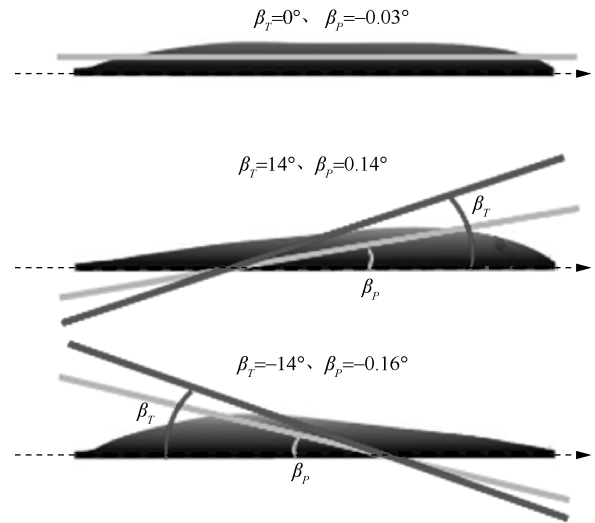
4 实验设计

本文实验的主要目标是回答以下 3 个问题。

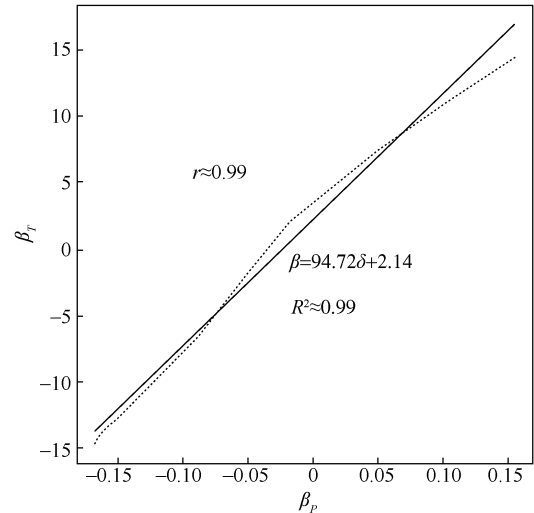
第一，本文提出的基于 PCA 的边缘位姿估计方法的准确性如何？

第二，本文设计的三维边缘跟踪控制系统的跟踪准确性如何？

第三，本文提出的三维边缘重建方法是否能够完成对不同形态的三维边缘的重建，效果如何？



(a) 俯仰角真值分别为 $0^\circ, 14^\circ, -14^\circ$ 时的点云侧视图



(b) 俯仰角真值与 PCA 主轴角度的关系

图 14 俯仰角真值与 PCA 主轴角度之间关系举例

本文在实验中使用 6 自由度的 UR5 机械臂，触觉传感器作为一个“大指尖”被安装在机械臂末端。三维重建算法、位姿估计算法以及控制程序都在一台带有 GeForce GTX 1070 GPU 的普通 PC 上运行。代码利用了 OpenCV 和 Open3D 库，

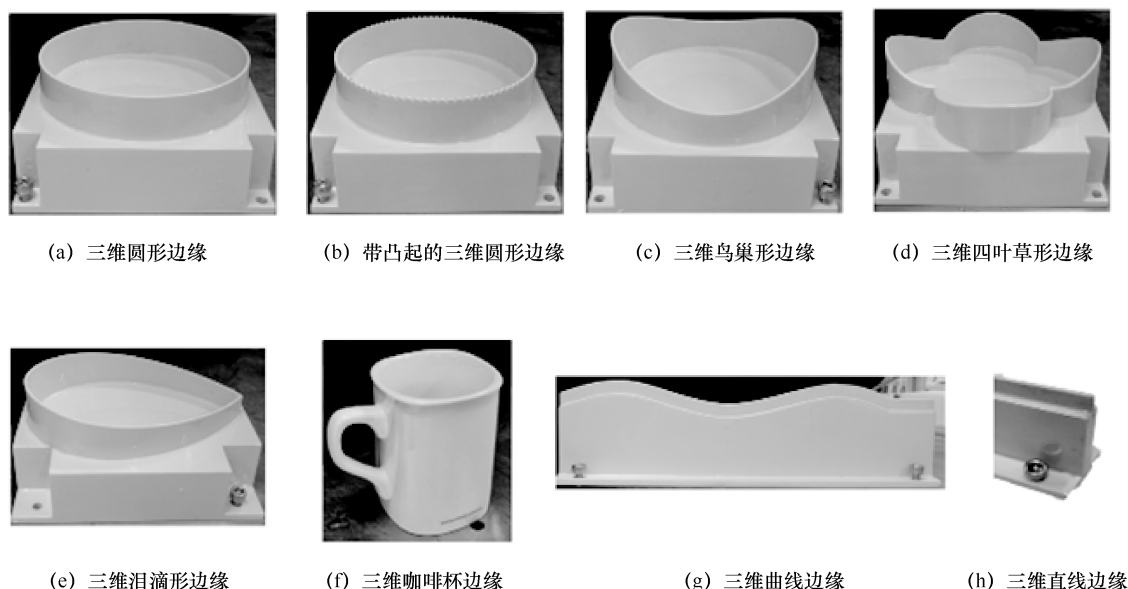


图15 三维边缘模型

并且使用 Python 编写。传感器与边缘发生稳定接触的条件是传感器重建的点云最高高度大于 2 mm。PI 控制器的 P 系数均设为 0.5, I 系数均设为 0.3。所有边缘的模型都使用 3D 打印技术和树脂材料进行制作(除了咖啡杯是陶瓷的),脊状凸起均垂直于水平面放置。三维边缘模型如图 15 所示,分别是三维圆形边缘、带凸起的三维圆形边缘、三维鸟巢形边缘、三维四叶草形边缘、三维泪滴形边缘、三维咖啡杯边缘、三维曲线边缘以及三维直线边缘。

对于位姿估计实验,单独改变边缘在传感器坐标系下每个位姿分量的真实值(单独改变 y_T 、 β_T 、 γ_T 的实验是在 $z_T = -3$ mm 的情况下进行的),在三维直线边缘模型上使用基于 PCA 的边缘位姿估计方法估计位姿。最后计算真实值和估计值的误差。设每个位姿分量的真实值变化范围分别为: $y_T \in [-8, 8]$ mm、 $z_T \in [-8, -1]$ mm、 $\beta_T \in [-14, 14]^\circ$ 、 $\gamma_T \in [-90, 90]^\circ$ 。

对于三维边缘跟踪实验,传感器的初始化位置均使得传感器相对于边缘的横滚角大致为 0。参考位姿 $(x_r, y_r, z_r; \alpha_r, \beta_r, \gamma_r)$ 以 $(3, 0, -3; 0, 0, 0)$ 为基础,每组实验单独改变其中一个分量的值(除了 α_r),在三维圆形和带凸起的三维圆形模型上分别进行跟踪。设每个分量的变化范围分别为: $x_r \in [1, 5]$ mm、 $y_r \in [-2, 2]$ mm、 $z_r \in [-5, -2]$ mm、 $\beta_r \in [-8, 8]^\circ$ 、 $\gamma_r \in [-30, 30]^\circ$ 。

对于三维边缘重建实验,传感器的初始化位置与边缘跟踪实验相同,跟踪的参考位姿均设为 $(3, 0, -3; 0, 0, 0)$ 。分别对三维圆形边缘、带凸起的三维圆形边缘、三维泪滴形边缘、三维鸟巢形边缘、三维四叶草形边缘、三维咖啡杯边缘以及三维曲线边缘进行了三维重建。

为了避免传感器在跟踪边缘的过程中,软胶层与边缘接触的同时发生较大相对移动,软胶层受到较大切向摩擦力而损坏,本文使用拍打的运动模式进行跟踪。该模式的运动过程为传感器与边缘稳定接触进行边缘位姿感知后,沿传感器的 Z 轴方向抬起一定距离,使传感器与边缘不接触,传感器在空中调整位姿后,再沿其 Z 轴向下运动同样距离。若此时无法与边缘发生稳定接触,则传感器继续沿 Z 轴向下移动,直到与边缘产生稳定接触,进而进行位姿感知,如此循环,直至跟踪结束。

5 实验结果

5.1 位姿估计实验结果

各位姿分量真值与估计值之间的绝对误差如图 16 所示,在单独变化 y_T 的实验中,平均绝对误差(mean absolute error, MAE)为 0.31 mm。当 y_T 在 $(-5, 6)$ mm 变化时,绝对误差小于 0.7 mm。当 y_T 在 $[-8, -5]$ mm 和 $[6, 8]$ mm 变化时,绝对误差最大能够达到 1.6 mm 左右,这是因为点云重建的误差在

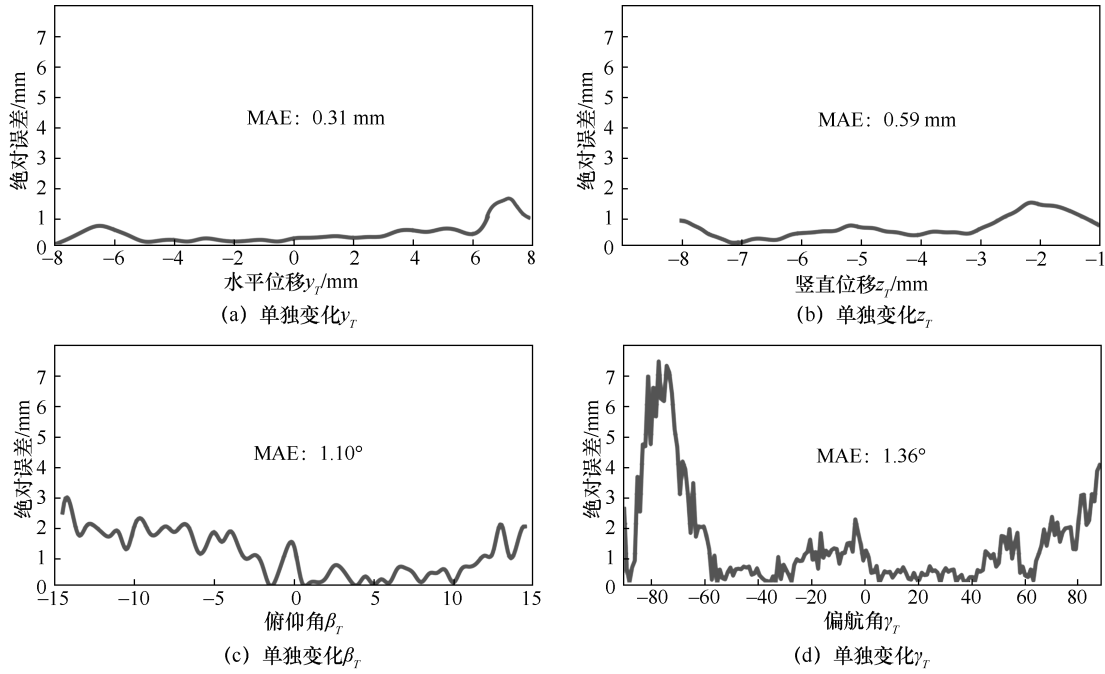


图 16 各位姿分量真值与估计值之间的绝对误差

传感器边缘处较大, 该估计方法依赖于点云的分布, 因此在传感器边缘处估计的误差较大。

在单独变化 z_T 的实验中, MAE 为 0.59 mm。当 z_T 在 $(-7, -3)$ mm 变化时, 绝对误差小于 0.9 mm。当 z_T 在 $[-3, -1]$ mm 和 $[-8, -7]$ mm 变化时, 绝对误差最大约为 1.5 mm, 这是因为传感器使用的标定球半径为 5 mm, 这意味着传感器只能在深度为 5 mm 附近比较准确地重建点云, 过浅或过深都会导致光分布的变化较大, 使得原来标定的查找表不可靠, 点云重建的误差较大。由图 16 (b) 可以看出, z_T 在 -5 ± 2 mm 的位置误差都较小, 可以验证这一点。

在单独变化 β_T 的实验中, MAE 为 1.10° 。当 β_T 在 $(-3, 13)^\circ$ 变化时, 绝对误差小于 1.5° 。当 β_T 在 $[-15, -3]^\circ$ 和 $[13, 15]^\circ$ 变化时, 绝对误差最大约为 3° , 这是因为本文使用的俯仰角标定方法是用一条直

线拟合了角度的非线性变化, 因此误差较大。

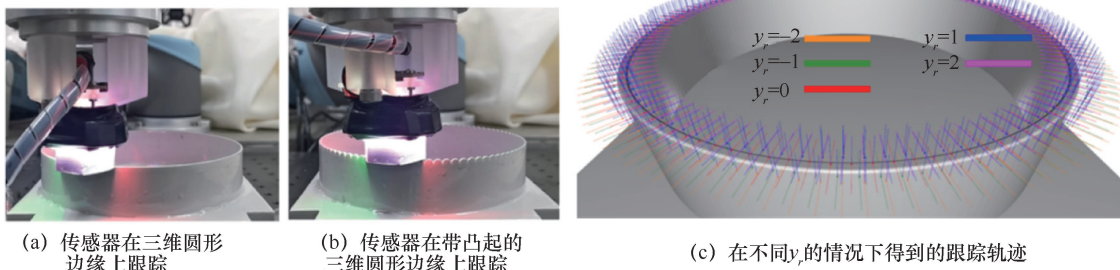
在单独变化 γ_T 的实验中, MAE 为 1.36° 。当 γ_T 在 $(-60, 60)^\circ$ 变化时, 绝对误差小于 2.2° , 当 γ_T 在 $[-90, -60]^\circ$ 和 $[60, 90]^\circ$, 绝对误差的波动非常大, 这是因为传感器光分布的不均匀性导致了重建点云在不同位置误差不同, 使得角度的估计不稳定。

该实验结果表明, 本文提出的基于 PCA 的边缘位姿估计方法的准确性较高, 能够满足对日常物体进行三维边缘跟踪的要求。

5.2 三维边缘跟踪实验结果

跟踪实验的示意图以及在三维圆形边缘上设置不同 y_r 时的跟踪轨迹示意图如图 17 所示。

对于三维圆形边缘的跟踪实验, 图 18 (a) 为使用不同 y_r 跟踪的位姿估计结果随时间变化的曲线, 图 18 (b) 为使用不同 y_r 跟踪的真实位姿结果

图 17 跟踪实验的示意图以及在三维圆形边缘上设置不同 y_r 时的跟踪轨迹示意图

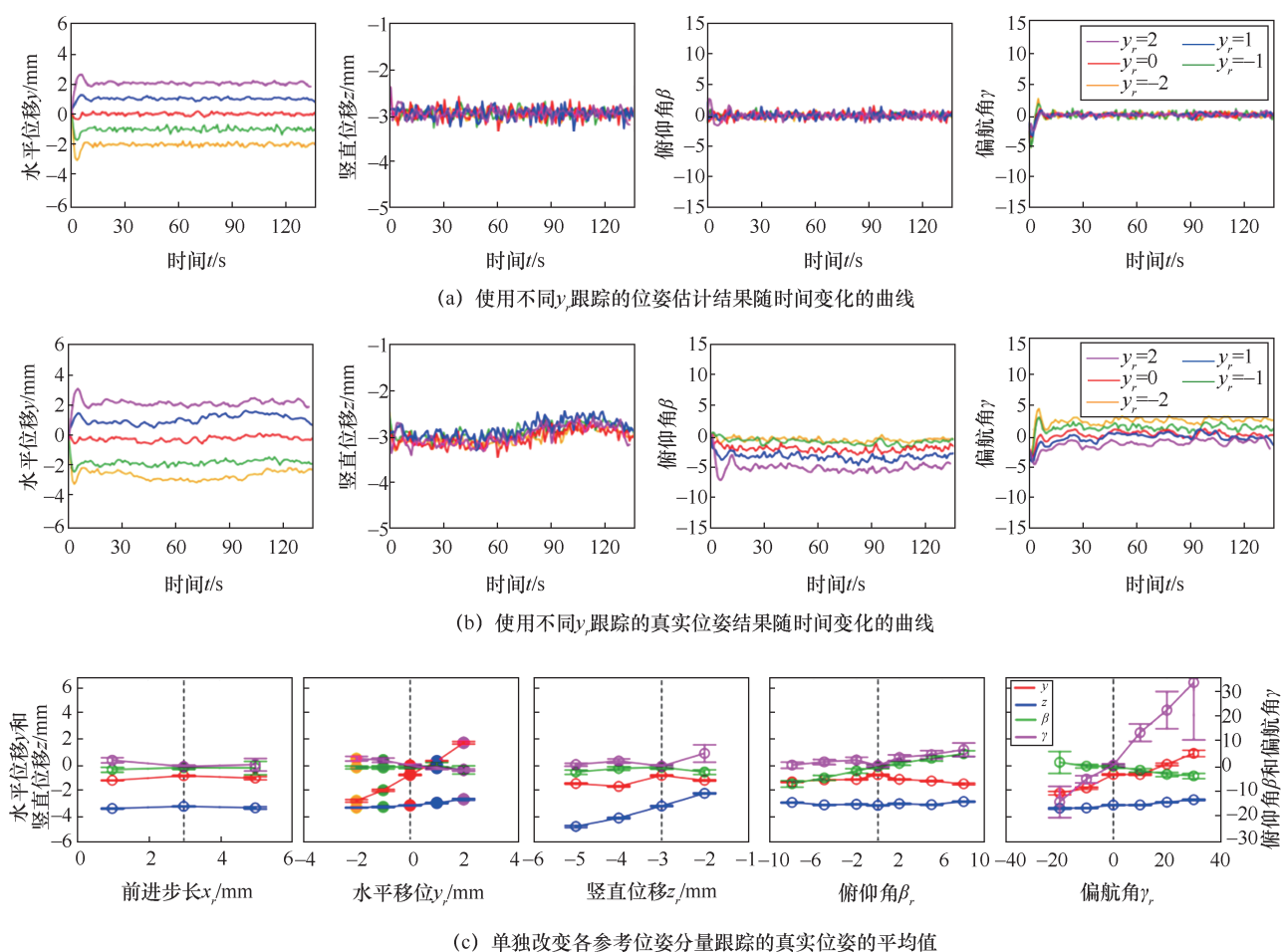


图 18 在三维圆形边缘上跟踪的实验结果

随时间变化的曲线。从图 18 中可以看出, 使用基于 PCA 的边缘位姿估计方法估计的位姿与真实位姿随时间的变化趋势是一致的, 但是由于传感器的估计误差, 估计位姿与真实位姿之间存在一些偏差。当参考位姿位于传感器的中心部分时, 偏差较小, 小于 0.5 mm 和 2° ; 靠近传感器边缘, 偏差较大。另外, z 分量的真实值出现了周期性的波动, 经检查, 这是桌面不平整导致的。图 18 (c) 为单独改变各参考位姿分量跟踪的真实位姿的平均值。可以看出, 在 $\gamma_r = 30^\circ$ 时没有数据, 表明实验失败了, 这是因为传感器的光分布不均匀导致了在该情况下位姿估计误差过大, 传感器的跟踪很快偏离边缘, 无法完成跟踪。由其他数据可知, 各参考位姿分量的变化主要影响对应的位姿分量的变化, 均值与参考值较为接近, 并且大部分情况的方差都小于 0.5 mm 和 2° 。图 18 (c) 中带颜色的点与图 17 (c) 中的轨迹颜色相对应。

在带凸起的三维圆形边缘上跟踪的实验结果如图 19 所示, 在带凸起的三维圆形边缘上跟踪的结果与在三维圆形边缘上跟踪的结果类似, 只是波动更大, 证明传感器能够很好地感知这些小凸起, 控制器能及时地调整位姿来保持传感器稳定跟踪边缘, 反映了该跟踪系统的鲁棒性。

5.3 三维边缘重建实验结果

在不同边缘模型上的三维边缘重建结果如图 20 所示。由图 20 可知, 本文提出的三维边缘重建方法能完成图中所有边缘的重建, 并且重建的边缘与真实的边缘是相符合的。对于规则形状的边缘: 三维圆形边缘和带凸起的三维圆形边缘的重建效果较好, 重建点云比较平滑, 并且带凸起的三维圆形边缘的重建结果明显反映了这些小凸起。对于不规则形状的边缘, 重建效果较差, 重建点云较不平滑, 这是因为不规则的边缘形状导致位姿预测误差较大, 使得传感器在跟踪过程中

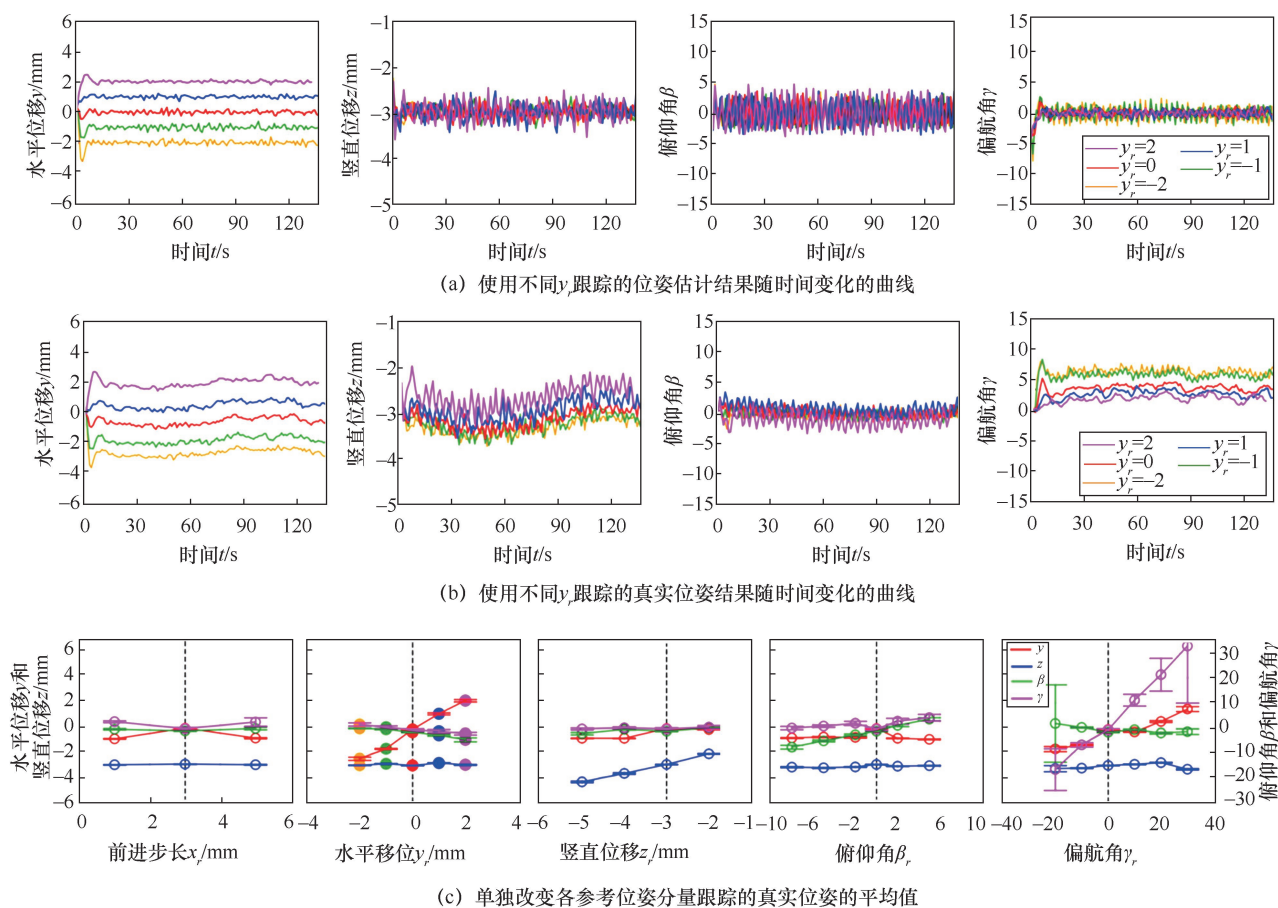


图 19 在带凸起的三维圆形边缘上跟踪的实验结果

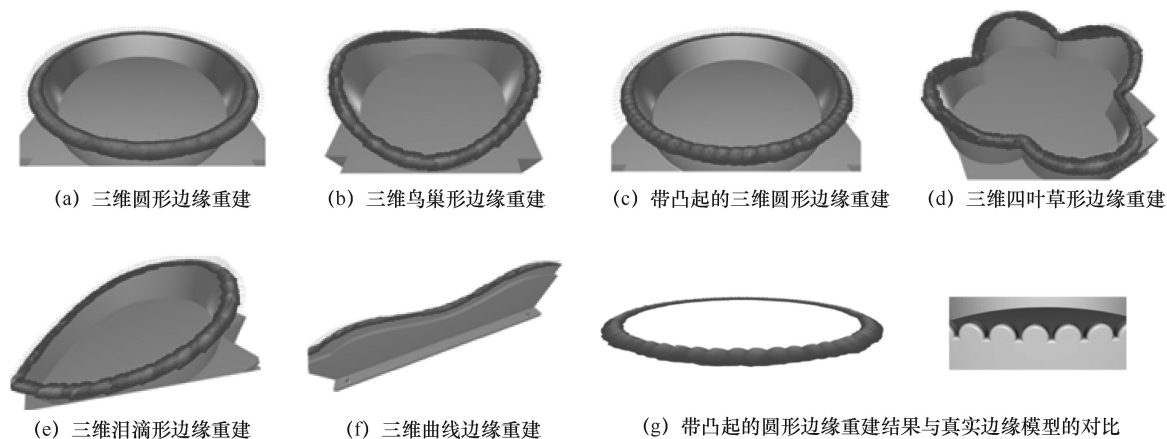


图 20 在不同边缘模型上的三维边缘重建结果

的位姿波动较大。最具有挑战性的情况是在泪滴模型的尖端处和四叶草形模型的内凹处。在这两种情况下，边缘的斜率变化剧烈，但该控制系统依然能够在几步内将传感器位姿调整到正确的轨道上，并且反映正确的边缘形状，说明本文提出的重建方法能够适应边缘拐角较大的极端情况。

6 结束语

本文提出了一种利用改进的 GelSight 传感器重建物体三维边缘的方法。该方法利用触觉跟踪以及改进的 GelSight 传感器重建接触表面点云的特性，以重建物体完整的边缘。实验表明，本文设计的 Flat-tip GelSight 传感器能够适用于

有较大起伏的复杂三维边缘重建任务。此外,本文提出的触觉边缘跟踪控制系统能够对多种复杂三维边缘进行稳定的跟踪。在使用 Flat-tip GelSight 传感器中心部分进行跟踪的情况下,位姿误差小于 0.5 mm 和 2°。其中,基于 PCA 的边缘位姿估计方法能够准确快速地估计边缘相对于传感器的位姿。最后,将三维点云与该触觉跟踪系统进行结合,能够重建与实物相符合的三维边缘。

然而,本文的方法也存在一些问题,比如,三维重建仅局限于脊状边缘这种比较明显的表面特征。在接下来的研究中,笔者希望将该触觉三维重建方法扩展到任意表面的情况,这将需要进一步改进传感器、升级重建算法以及优化跟踪控制方法。

参考文献:

- [1] 郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(4): 631-652.
ZHENG T X, HUANG S, LI Y F, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: a review[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(4): 631-652.
- [2] QIAO X, RAUSCHENBACH T, LI D L. Review of underwater machine vision technology and its applications[J]. Marine Technology Society Journal, 2017, 51(1): 75-97.
- [3] SHAO L, WANG Y, GUO B Z, et al. A review over state of the art of in-pipe robot[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2015: 2180-2185.
- [4] REDDY A H, KALYAN B, MURTHY C S N. Mine rescue robot system - a review[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 11: 457-462.
- [5] CHEN N, ZHANG H, RINK R. Edge tracking using tactile servo[C]//Proceedings of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots. Piscataway: IEEE Press, 1995: 84-89.
- [6] SHIMONOMURA K. Tactile image sensors employing camera: a review[J]. Sensors, 2019, 19(18): 3933.
- [7] LEPORA N F, LLOYD J. Pose-based servo control with soft tactile sensing[J]. arXiv preprint, 2020, arXiv:2012.02504.
- [8] CHEN N N, ZHANG H, RINK R E. Touch-driven robot control using a tactile Jacobian[C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 1997: 1737-1742.
- [9] LI Q, SCHÜRMANN C, HASCHKE R, et al. A control framework for tactile servoing[C]//Proceedings of Robotics: Science and Systems IX. Robotics: Science and Systems Foundation, 2013.
- [10] MARTINEZ-HERNANDEZ U, METTA G, DODD T J, et al. Active contour following to explore object shape with robot touch[C]//Proceedings of 2013 World Haptics Conference. Piscataway: IEEE Press, 2013: 341-346.
- [11] LEPORA N F, AQUILINA K, CRAMPHORN L. Exploratory tactile servoing with active touch[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(2): 1156-1163.
- [12] LEPORA N F, CHURCH A, DE KERCKHOVE C, et al. From pixels to percepts: highly robust edge perception and contour following using deep learning and an optical biomimetic tactile sensor[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 2101-2107.
- [13] STONE E A, LEPORA N F, BARTON D A W. Learning to live life on the edge: online learning for data-efficient tactile contour following[C]//Proceedings of 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2021: 9854-9860.
- [14] BERGER A D, KHOSLA P K. Using tactile data for real-time feedback[J]. The International Journal of Robotics Research, 1991, 10(2): 88-102.
- [15] KAPPASSOV Z, CORRALES J A, PERDEREAU V. Touch driven controller and tactile features for physical interactions[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 123: 103332.
- [16] YUAN W Z, DONG S Y, ADELSON E. GelSight: high-resolution robot tactile sensors for estimating geometry and force[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2762.
- [17] LI R, PLATT R, YUAN W Z, et al. Localization and manipulation of small parts using GelSight tactile sensing[C]//Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2014: 3988-3993.
- [18] TIAN S, EBERT F, JAYARAMAN D, et al. Manipulation by feel: touch-based control with deep predictive models[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2019: 818-824.
- [19] LU C, WANG J, LUO S. Surface following using deep reinforcement learning and a GelSightTactile sensor[J]. arXiv preprint, 2019, arXiv:1912.00745.
- [20] DONG S Y, WANG S X, SHE Y, et al. Cable manipulation with a tactile-reactive gripper[C]//Proceedings of Robotics: Science and Systems XVI. Robotics: Science and Systems Foundation, 2020.
- [21] WANG S X, WU J J, SUN X Y, et al. 3D shape perception from monocular vision, touch, and shape priors[C]//Proceedings of 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1606-1613.
- [22] WARD-CHERRIER B, PESTELL N, CRAMPHORN L, et al. The TacTip family: soft optical tactile sensors with 3D-printed biomimetic morphologies[J]. Soft Robotics, 2018, 5(2): 216-227.
- [23] JOHNSON M K, ADELSON E H. Retrographic sensing for the measurement of surface texture and shape[C]//Proceedings of 2009 IEEE

Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1070-1077.

[作者简介]



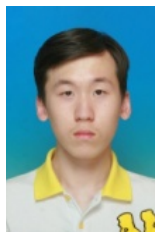
胡静怡（1997—），女，中国科学院自动化研究所博士生，主要研究方向为机器人触觉主动感知。



崔少伟（1996—），男，中国科学院自动化研究所博士生，主要研究方向为机器人触觉感知与灵巧操作。



张超凡（1998—），女，中国科学院自动化研究所博士生，主要研究方向为机器人多模态感知与灵巧操作。



张伯约（1998—），男，中国科学院自动化研究所博士生，主要研究方向为基于触觉的机器人的灵巧操作。



王硕（1973—），男，博士，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员，中国科学院大学人工智能学院首席教授，国家重点研发计划“智能机器人”重点专项总体组专家，国际标准化组织 ISO/TC 299 专家，中国机电一体化技术应用协会常务理事。主要从事机器人学习、视触融合灵巧操作、仿生机器鱼、

水下机器人-作业臂系统等研究。在国内外期刊和会议上发表学术论文 120 余篇，合著图书 4 本，获授权发明专利 21 项、软件著作权 12 项，主持制定机器人国家标准 2 项。主持我国科学技术部科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目“自主智能体灵巧精准操作学习方法研究与验证”、国家 863 计划项目、国家自然科学基金联合基金重点项目和面上项目、支撑计划项目、国际合作项目、北京市科学技术委员会项目等多项项目。曾获得国家自然科学奖二等奖 1 项，北京市科学技术奖一等奖 1 项，省部级二等奖 4 项，中国自动化学会技术发明奖一等奖 1 项，中国自动化学会科普奖 1 项。中国科学院、中国自动化学会、中国人工智能学会优秀博士论文指导教师，曾获得中国科学院大学“领雁银奖·振翅奖”。