

利用两侧边线空间几何关系的单幅图像 圆柱位姿实时估计

贾昕宇, 夏晓华, 苗龙龙

(长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 710064, 西安)

摘要: 针对现有圆柱位姿估计方法多利用二维图像通过迭代优化的方式对三维空间中圆柱的位姿进行估计, 并且未充分利用三维空间中二维像平面、投影中心和圆柱位姿之间的线性几何关系以及存在耗时长的问题, 提出了一种利用两侧边线空间几何关系的单幅图像圆柱位姿实时估计方法。首先对圆柱图像进行镜头畸变校正并结合最小二乘法提取圆柱图像两侧边线方程, 然后通过坐标变换求取其在相机坐标系中的解析表达, 之后基于相机成像原理利用光心坐标构建圆柱切平面的几何表示, 最后通过建立的基于切平面平移交会的圆柱轴线空间位姿计算方法获得圆柱位姿参数。实验结果表明, 采用所提方法进行圆柱位姿估计的距离误差小于 0.41 mm, 角度误差小于 0.39°, 单次运算时间小于 2 ms, 在不降低位姿估计精度的同时, 运算时间较目前速度最快的圆柱位姿估计方法节省了 96%, 大幅度提高了圆柱位姿估计速度, 实现了对圆柱位姿的实时估计。

关键词: 位姿估计; 圆柱体; 空间几何关系; 圆柱边线; 单幅图像; 实时

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202506018 **文章编号:** 0253-987X(2025)06-0177-08

Real-Time Cylinder Pose Estimation from a Single Image via Bilateral Contour-Based Spatial Geometric Relationships

JIA Xinyu, XIA Xiaohua, MIAO Longlong

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Existing cylindrical pose estimation methods predominantly utilize 2D images to iteratively optimize the pose of a cylinder in 3D space, which fails to fully exploit the linear geometric relationships among the 2D image plane, projection center, and cylindrical pose in 3D space, resulting in time-consuming computations. To address this, this paper proposes a real-time cylindrical pose estimation method using a single image based on the spatial geometric relationships of the two lateral edge lines. The proposed method first corrected lens distortion for the cylindrical image and extracted the equations of the two lateral edge lines using the least squares method. Subsequently, the analytical expressions of these edge lines in the camera coordinate system were derived through coordinate transformation. Then, based on the camera imaging principle, the geometric representation of the cylindrical tangent planes was constructed using the optical center coordinates. Finally, the spatial pose parameters of the cylindrical axis were calculated through the proposed tangent plane intersection-based pose estimation algorithm. Experimental results

收稿日期: 2024-12-26。 作者简介: 贾昕宇(2002—), 男, 硕士生; 夏晓华(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。 基金

项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2024GX-YBXM-197); 陕西省交通运输厅科研资助项目(23-10X, 24-74K)。

网络出版时间: 2025-02-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250228.1545.002>

demonstrated that the proposed method achieved a distance error of less than 0.41 mm, an angular error of less than 0.39° , and a single computation time of less than 2 ms. Compared with the fastest existing cylindrical pose estimation method, the proposed approach has reduced computation time by 96% without sacrificing estimation accuracy, significantly improving computational efficiency and enabling real-time cylindrical pose estimation.

Keywords: pose estimation; cylinder; spatial geometric relationships; cylindrical edge; single image; real time

圆柱体作为一种常见三维几何结构,在航空航天、船舶制造、电力、化工、运输、精密加工等诸多工业领域都有着广泛应用。圆柱位姿是三维空间中圆柱的重要属性,其快速且准确的测量^[1]对圆柱表面成像失真校正^[2]等领域有重要意义。

圆柱体的位姿测量方法主要分为接触式测量和非接触式测量,其中接触式测量^[3]需要机械探头等测量仪器获得圆柱体表面测量点坐标或圆柱轴线倾角等特征,该类方法耗时较长且操作复杂。非接触测量方法按照测量信息可分为点云方法和图像方法,其中点云方法^[4-6]通过飞行时间法或回声测距法等方法直接或间接获取空间中圆柱体表面点的三维坐标信息,进而通过特征值法、最小二乘法^[7]、投影圆度法^[8]或遗传算法^[9]等方式对圆柱体位姿参数进行估计。高帅等^[10]以空间圆柱投影圆度作为衡量指标,采用遗传算法寻优的方式完成圆柱位姿估计。史鹏程等^[11]基于圆柱几何特性对点云数据进行投影拟合以获取空间中圆柱位姿,结合初始点云地图中的定位圆柱进行机器人自主定位。Huang等^[12]利用激光雷达扫描环境中预设圆柱体并进行位姿估计,从而为机器人提供位置信息。但是,上述方法对点云进行处理过程中计算量大、流程复杂、无法实现实时测量。

相较于点云方法,基于图像的圆柱体三维位姿估计方法^[13]具备效率高、成本低、灵活性好等优点。图像方法根据方法策略不同分为特征点匹配方法、基于形状的三维匹配方法^[14-15]和特殊图案标记方法^[16]。其中特征点匹配方法通过多视角相机获得的多幅图像进行相同特征点匹配,由于相机间相对位置关系已知,通过对PnP问题^[17]进行求解便可得到点的深度信息,从而精确测量圆柱的位姿参数。尚国威等^[18]利用多视角图像对圆柱端面像素坐标进行三维坐标求解,从而实现对圆柱位姿的精确测量。Liu等^[19]采用多视角相机获取不同视角图像,对圆柱位姿进行迭代估计;张一鸣等^[20]利用双目相机获取不同相机坐标系下的特征点坐标,并线性化求解圆柱位姿。但是,求解过程的高计算量会影响

方法实时性,匹配结果会影响圆柱估计精度。基于形状的三维匹配方法通过将实际采集图像与其三维模型产生的二维投影进行比较,获得姿态参数。段智威等^[21]提取圆柱图像边线信息,与虚拟圆柱投影图像进行对比,最后利用迭代求解方法进行圆柱位姿估计。已有的方法未能建立投影和真实位姿之间的关系,大部分方法使用迭代计算或暴力匹配的方式来估计圆柱位姿参数,运行时间较长,无法达到实时估计的要求。特殊图案标记方法会在圆柱表面覆盖具有特定位置和大小图案,通过相机获取图像后,通过图案信息确定圆柱的位姿。Yu等^[22]对圆柱表面进行标准圆贴附,并利用其轮廓形成的空间曲线的集合特性进行姿态估计。王朕等^[23]对圆柱电池表面漫反射纹理进行区域划分,进而对传送带上电池进行位姿估计。Wang等^[24]利用交叉比编码对类圆柱表面进行标记,进而实现类圆柱物体的快速定位和三维重建。

针对上述圆柱位姿估计方法存在的问题,本文运用空间解析几何原理建立了圆柱位姿与投影图像之间的数学关系,提出了一种利用单幅图像中圆柱两侧边线完成圆柱位姿实时估计的方法。该方法所需的系统成像参数和圆柱半径易于获得,无需在圆柱表面布置特殊纹理,能够有效估计任意位姿圆柱的参数信息,且方法采用线性求解的方式,求解速度快,可以实现圆柱实时位姿估计。

1 圆柱位姿估计方法

1.1 方法流程

本文所提圆柱位姿估计方法的主要步骤如下。

步骤1 使用目前成熟的相机标定方法^[25]对拍摄圆柱的相机进行标定,根据标定结果对采集的圆柱图像进行镜头畸变校正。

步骤2 在像素坐标系下采用边缘检测算法提取图像中圆柱两侧边线信息后,采用最小二乘拟合获取其直线方程,并利用像素坐标系和图像坐标系之间的位置变换关系将其转换为在图像坐标系下的方程。

步骤3 基于相机参数和标定结果,将像平面圆柱边线在图像坐标系下的二维直线方程转换为相机坐标系下的三维解析表达。

步骤4 考虑到相机成像原理,三维空间中使用光心和像平面圆柱边线构建的平面和圆柱之间相切;借助光心坐标和像平面圆柱边线的解析表达,在相机坐标系下构建圆柱切平面几何表示。

步骤5 由于圆柱轴线和其相切平面之间平行且距离为半径 R ,故通过建立的基于切平面平移交会的圆柱轴线空间位姿计算方法,使步骤4构建的两相切平面相向平移,交会得到圆柱轴线的空间位姿参数,完成圆柱位姿估计。

1.2 像平面圆柱边线空间位置的求解方法

在镜头畸变校正后的图像中,使用边缘检测算法提取图像中圆柱两侧边线,其中圆柱左边缘轮廓点集为 $S_L = \{(U_{L,i}, V_{L,i}), i = 1, 2, \dots, M\}$,右边缘轮廓点集为 $S_R = \{(U_{R,j}, V_{R,j}), j = 1, 2, \dots, N\}$,其中 R/L 为区分圆柱右、左边缘轮廓的标号, (U, V) 为提取图像中圆柱边缘轮廓得到点的像素坐标, i, j 分别为提取得到点的序号, M, N 分别为圆柱左边缘轮廓点数和右边缘轮廓点数。

结合最小二乘法可以分别拟合圆柱左、右侧边线,即

$$\begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_R & 0 & b_R & 0 \\ 0 & a_L & 0 & b_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_R \\ u_L \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (u, v) 为像素坐标系下圆柱边缘轮廓线上点的坐标变量; a, b 分别为像素坐标系下圆柱边线方程的斜率参数和截距参数,具体如下

$$\begin{aligned} a_R &= \frac{N \sum_{j=1}^N U_{R,j} V_{R,j} - \sum_{j=1}^N U_{R,j} \sum_{j=1}^N V_{R,j}}{N \sum_{j=1}^N U_{R,j}^2 - (\sum_{j=1}^N U_{R,j})^2} \\ b_R &= \frac{\sum_{j=1}^N V_{R,j} - a_L \sum_{j=1}^N U_{R,j}}{N} \\ a_L &= \frac{M \sum_{i=1}^M U_{L,i} V_{L,i} - \sum_{i=1}^M U_{L,i} \sum_{i=1}^M V_{L,i}}{M \sum_{i=1}^M U_{L,i}^2 - (\sum_{i=1}^M U_{L,i})^2} \\ b_L &= \frac{\sum_{i=1}^M V_{L,i} - a_R \sum_{i=1}^M U_{L,i}}{M} \end{aligned}$$

圆柱的投影透视变换模型如图1所示,图中点

在像素坐标系 $o-uv$ 和图像坐标系 $o'-xy$ 间的位置变换关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/s_x & 0 & c_x \\ 0 & -1/s_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: (X, Y) 为图像坐标系下点的二维坐标; (s_x, s_y) 为图像坐标到像素坐标的像元尺寸; (c_x, c_y) 为像素坐标系中原点相对于图像坐标系原点的偏移量。

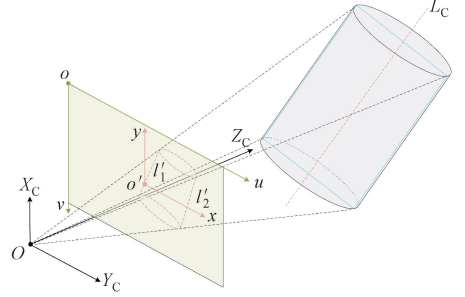


图1 圆柱的投影透视变换模型

Fig. 1 Projection and perspective transformation model of the cylinder

根据式(2),可求解图像坐标系下的圆柱左、右侧边线为

$$\begin{bmatrix} y_R \\ y_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R & 0 & 1 & 0 \\ 0 & x_L & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_R \\ a'_L \\ b'_R \\ b'_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R & 0 & 1 & 0 \\ 0 & x_L & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{s_y}{s_x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{s_y}{s_x} & 0 & 0 \\ -s_y c_x & 0 & s_y & -s_y \\ 0 & s_y & -s_y c_x & -s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_R \\ a_L \\ b_R \\ b_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: (x, y) 为图像坐标系下圆柱边缘轮廓线上点的坐标变量; a', b' 分别为图像坐标系下圆柱边线方程的斜率参数和截距参数。

相机坐标系和图像坐标系之间的坐标变换关系为

$$Z_C \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: f 为相机焦距; (X_C, Y_C, Z_C) 为相机坐标系下点的三维坐标。

根据式(4),在相机坐标系下圆柱边缘轮廓直线的解析表达可表示为

$$\begin{cases} r(t) = \mathbf{r}_0 + t\mathbf{d}_R \\ l(s) = \mathbf{l}_0 + s\mathbf{d}_L \end{cases} \quad (5)$$

式中: t, s 为参数方程变量; $\mathbf{r}_0, \mathbf{l}_0$ 分别为相机坐标系下左、右边缘轮廓直线上任一点坐标; 此处取 $\mathbf{r}_0$ 为 $(0, b'_R, f)$, $\mathbf{l}_0$ 为 $(0, b'_L, f)$, $\mathbf{d}$ 为直线的方向向量, $\mathbf{d}_R = (1, a'_R, 0)$, $\mathbf{d}_L = (1, a'_L, 0)$ 。

1.3 圆柱切平面构建及轴线位姿估计

为实现圆柱位姿估计, 本文提出了基于切平面平移交会的圆柱轴线空间位姿计算方法, 原理如图2所示。对于空间中任意位姿圆柱, 利用1.2节所述方法求解得到的像平面圆柱边线空间位置和光心坐标 O_C , 可以分别构建圆柱左、右侧的相切平面 P 和 Q 。基于圆柱空间特征, 构建的两相切平面与圆柱中心轴线距离均为 R , 当平面 P 和平面 Q 沿着平面法线方向移动 R 距离后分别得到平面 P' 和平面 Q' , 则最终圆柱轴线 L_C 可通过平面 P' 和平面 Q' 位置参数求解获得。

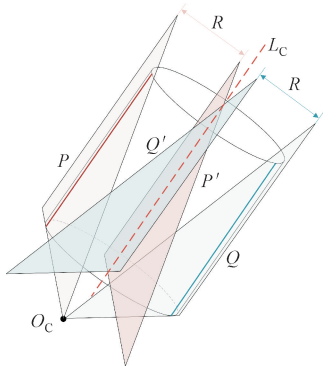


图2 相切平面及其平移平面

Fig.2 Tangential plane and its translated plane

相切平面 P 和平面 Q 几何关系表示为

$$\begin{bmatrix} A_Q & B_Q & C_Q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_P & B_P & C_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \\ x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $[A_Q \ B_Q \ C_Q] = \mathbf{d}_R \times \mathbf{v}_R = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 1 & a'_R & 0 \\ 0 & b'_R & f \end{bmatrix}$;

$\mathbf{v}_R = (0, b'_R, f)$; $[A_P \ B_P \ C_P] = \mathbf{d}_L \times \mathbf{v}_L = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 1 & a'_L & 0 \\ 0 & b'_L & f \end{bmatrix}$; $\mathbf{v}_L = (0, b'_L, f)$ 。

当平面 P 和平面 Q 沿着平面法线方向移动 R 距离后, 分别得到平面 P', Q' , 平面 P', Q' 在相机坐标系中空间位置可表示为

$$\begin{bmatrix} A_Q & B_Q & C_Q & D_Q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_P & B_P & C_P & D_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $D_Q = \text{sgn}(A_Q x_{L,i} + B_Q y_{L,i} + C_Q z_{L,i}) R \sqrt{A_Q^2 + B_Q^2 + C_Q^2}$, $(x_{L,i}, y_{L,i}, z_{L,i})$ 为相机坐标系下圆柱图像左边缘轮廓直线上任一点; $D_P = \text{sgn}(A_P x_{R,j} + B_P y_{R,j} + C_P z_{R,j}) R \sqrt{A_P^2 + B_P^2 + C_P^2}$, $(x_{R,j}, y_{R,j}, z_{R,j})$ 为相机坐标系下圆柱图像右边缘轮廓直线上任一点。

利用式(7)建立的平面 P' 和平面 Q' , 此时圆柱轴线方向向量可表示为

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} m \\ n \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_Q \\ B_Q \\ C_Q \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_P \\ B_P \\ C_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ A_Q & B_Q & C_Q \\ A_P & B_P & C_P \end{bmatrix} \quad (8)$$

定位点 $P_0(0, y_0, z_0)$ 中的 y_0, z_0 求解方程为

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_Q & C_Q \\ B_P & C_P \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D_Q \\ D_P \end{bmatrix} \quad (9)$$

中心轴线 L 可表示为

$$\frac{x}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{l} \quad (10)$$

2 方法计算复杂度分析

本文方法具有较低的计算复杂度, 为避免统计法测试结果高度依赖测试环境和受数据规模影响较大的问题, 从理论层面对提出方法进行计算复杂分析。对于圆柱位姿估计问题, 首先通过最小二乘拟合获取圆柱两侧边线直线方程; 然后利用坐标变换将像素坐标系下图像中圆柱边线方程转换为在图像坐标系下的方程; 之后转换为相机坐标系下的三维解析表达; 然后借助光心坐标在相机坐标系下构建圆柱左、右切平面几何表示; 最后通过建立的基于切平面平移交会的圆柱轴线空间位姿计算方法得到圆柱轴线的空间位姿。

本文方法主要步骤包括圆柱两侧边线直线拟合、像平面圆柱边线空间位置坐标变换、圆柱切平

面构建及轴线位姿估计。其中圆柱两侧边线直线拟合环节借助最小二乘拟合对圆柱边缘点集中所有数据进行处理,求解得到圆柱两侧边线直线方程参数。该环节主要对点集数据求和,结合式(1)可知,所有参数的计算为线性的,当圆柱左边缘轮廓点数为 M ,右边缘轮廓点数为 N 时,其计算复杂度为 $O(M+N)$ 。

结合式(3)~(10)可知,像平面圆柱边线空间位置坐标变换和圆柱切平面构建及轴线位姿估计均为线性化过程,故其计算复杂度为 $O(1)$,本文方法的计算复杂度为 $O(M+N)$ 。方法实现过程中除圆柱两侧边线直线拟合环节外均为线性化过程,由于不同位姿和半径条件下圆柱图像左、右边缘轮廓点数变化不大,且由于线性拟合过程计算简单,故该环节也可以保持良好的计算复杂度。

在现有点云方法中,方法计算复杂度与求解策略相关。当点数为 n ,迭代次数为 k 时,基于最小二乘法的方法计算复杂度为 $O(n^2)$,基于迭代的方法计算复杂度为 $O(kn)$ 。现有图像方法因其具体算法不同而有显著差异,但由于该类方法未能建立圆柱位姿与图像之间的数学关系,大部分采用迭代逼近的方式对圆柱位姿进行估计,实时性不高。相较于所提方法的计算复杂度 $O(M+N)$,图像方法^[21]和点云方法^[7]计算复杂度分别为 $O(2T(n,n_j))$ 、 $O(N(T_1+T_2+T_3+1))$,所提方法在理论层面具有较高的计算速度。

3 验证结果及分析

首先利用仿真验证提出方法的可行性,然后在实验中将所提方法与目前先进的方法进行对比,从圆柱位姿估计精度和运算时间两个方面验证所提方法的有效性、先进性。

3.1 仿真

为验证所提方法的可行性,对圆柱位姿真值已知情况进行了仿真。首先生成确定位姿的标准圆柱点云;然后对于标准圆柱表面上任意点 $P(X_0, Y_0, Z_0)$,可在图像平面确定唯一交点 P' ,遍历所生成的标准圆柱点云内所有点并求交点,可得到仿真图像;最后进行圆柱位姿估计并通过距离误差和角度误差两个方面评估本文方法的可行性。仿真原理如图 3 所示。

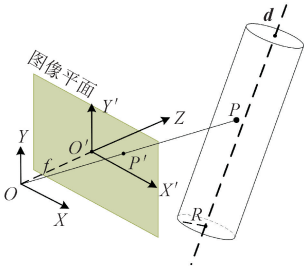


图 3 仿真图像生成原理
Fig. 3 Principle of simulated image generation

仿真实验单元长度为 1 mm,仿真像元尺寸为 $3.45\text{ }\mu\text{m}\times 3.45\text{ }\mu\text{m}$,相机焦距为 4.163 mm,图像分辨率为 $2\text{ }048\times 1\text{ }024$ 。仿真实验中,测试了 70、55、37.5、30、22.5、12.5 mm 共 6 种不同半径的圆柱体。针对每个半径组,首先使方向向量为 $(0,1,0)$ 的圆柱绕相机坐标系 X 轴以固定角度增量 20° 旋转 9 次;再在每个绕 X 轴的旋转状态下,使圆柱绕相机坐标系 Z 轴旋转 9 次,每次增量 20° ,并使定位点的 (x, y, z) 坐标参数均在 $(-10,10)$ 范围内随机变动。每组圆柱依照以上策略分别生成 81 种角度和距离不同的仿真圆柱图像并分别进行圆柱位姿估计,共计进行 486 次圆柱位姿估计实验。不同位姿圆柱体估计位姿的距离误差 d 、角度误差 θ 为

$$d = \frac{|\boldsymbol{m} \times \boldsymbol{v}_T|}{|\boldsymbol{v}_T|} \tag{11}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{\boldsymbol{v}_T \cdot \boldsymbol{v}_S}{|\boldsymbol{v}_T| |\boldsymbol{v}_S|}\right) \tag{12}$$

式中: $\boldsymbol{v}_T$ 为圆柱的方向向量真值; $\boldsymbol{v}_S$ 为圆柱的方向向量求解值; $\boldsymbol{m}$ 为轴线求解结果定位点到轴线真值上任一点的向量。

仿真结果如表 1 所示,可知圆柱位姿估计结果的距离误差为 0.15 mm,角度误差为 0.05° ,而现有方法的距离误差均值为 0.3 mm,角度误差均值为 0.6° ,因此所提方法具有良好的位姿估计精度。

表 1 不同半径圆柱体测量的角度误差和距离误差
Table 1 Angular and distance errors for cylinders with different radius

半径/mm	角度误差/($^\circ$)	距离误差/mm
12.5	0.006 5~0.049 7	0.036~0.146
22.5	0.005 2~0.045 7	0.033~0.134
30.0	0.003 3~0.046 3	0.031~0.126
37.5	0.004 1~0.044 9	0.021~0.109
55.0	0.004 9~0.043 9	0.018~0.115
70.0	0.003 2~0.035 8	0.025~0.103

3.2 实验

为了验证本文方法对实际圆柱位姿的有效性与先进性,搭建了圆柱位姿估计实验平台,并选取了最新的图像方法(方法 1)^[21]和点云方法(方法 2)^[7]进行求解精度、计算时间对比。其中方法 1 位姿迭代加权系数取值为 1,迭代次数上限为 300,收敛判定阈值为 0.1。方法 2 中的 RANSAC 算法优化迭代次数上限为 500,内点距离阈值为 1 mm,采用经过半径滤波的已处理点云,点数为 $1\times 10^5\sim 1.4\times 10^5$ 。由于单相机对圆柱进行数据采集时只能获取圆柱表面一侧点云,点云完整度为 45%~50%。

3.2.1 求解精度实验

由于实验中圆柱位姿真值难以获得,因此通过圆柱端面固定的倾角传感器获取当前圆柱相对于相机坐标系 Y_c 轴和 Z_c 轴的倾斜角度,并通过实验平台平移装置获取当前圆柱的位置信息。设圆柱标准轴线方向向量 $\boldsymbol{d}'(0,0,1)$, α 、 β 分别表示圆柱轴线绕 Y_c 、 Z_c 轴的倾斜角度,利用式(10)求解得到的圆柱方向向量 $\boldsymbol{d}(m,n,l)$,圆柱的倾斜角度可表达为

$$\begin{cases} \alpha = \arccos l \\ \beta = \arcsin\left(\frac{n}{\sqrt{1-l^2}}\right) \end{cases} \quad (13)$$

考虑到圆柱位置和偏移角度之间存在干涉,将不同位姿圆柱测量结果的距离差 M^* 和角度差 N^* 作为真值来衡量位姿估计方法的准确性。通过测量不同位姿圆柱的倾斜角度信息和距离信息,计算得到圆柱位姿参数差值(M^*, N^*),并与本文方法估计的圆柱位姿差值(M, N)作对比,来验证对实际圆柱位姿的估计精度。

实验平台包括相机、角度传感器和固定台架。相机采用 surfaceHD 50 工业双目相机,其分辨率为 $1\,920\times 1\,080$,像素尺寸为 $3\,\mu\text{m}\times 3\,\mu\text{m}$,重复精度为 $\pm 0.15\text{ mm}$,相机内部 RGB 图相机和点云相机之间位置固定,固定台架可控制圆柱进行定向移动和旋转,平移精度为 $\pm 0.1\text{ mm}$,圆柱端面固定的角度传感器精度误差为 $\pm 0.01^\circ$ 。实验中对半径分别为

37.5、30、22.5、12.5 mm 的圆柱体进行实际位姿估计实验,为减少实验误差,对不同半径的圆柱分别进行 20 组不同位姿的估计实验,每组实验重复 3 次并求均值。不同位姿圆柱体估计位姿的距离差 M_i 、角度差 N_i 的计算式为

$$M_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \sqrt{(x_{i,j} - x_{i-1,j})^2 + (z_{i,j} - z_{i-1,j})^2} \quad (14)$$

$$N_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \arccos\left(\frac{\boldsymbol{n}_{i,j} \cdot \boldsymbol{n}_{i-1,j}}{\|\boldsymbol{n}_{i,j}\| \|\boldsymbol{n}_{i-1,j}\|}\right) \quad (15)$$

式中: $k=3$ 为实验重复次数; x, z 为圆柱定位点在相机坐标系中的坐标分量; i 为圆柱位姿序列数; j 为同一位姿圆柱进行测量序列数; $\boldsymbol{n}$ 为圆柱轴线的方向向量。

实验结果如表 2 所示,使用本文方法进行位姿估计时,其角度估计结果与测量值最大误差为 0.49° ,角度平均误差为 0.30° ,距离最大误差为 0.47 mm ,距离平均误差为 0.27 mm 。使用方法 2 进行估计时,角度结果与测量值最大误差为 1.28° ,角度平均误差为 0.61° ,距离最大误差为 1.15 mm ,距离平均误差为 0.62 mm ,其估计结果差异较大,且稳定性不高。

本文方法实际估计精度高于方法 2,在使用方法 2 进行圆柱位姿求解时,所获取的点云数据并非圆柱面完整点云数据,且存在一定干扰点,使用滤波方法进行误差点云处理时,很难得到无误差的点云数据,从而对最终结果造成影响。而使用方法 1 时,其估计结果与测量值之间角度最大误差为 0.65° ,角度平均误差为 0.33° ,距离最大误差为 0.53 mm ,距离平均误差为 0.28 mm 。本文方法和方法 1 在计算精度方面没有明显差异,两种方法都是使用图像中圆柱边线位置信息对圆柱位姿进行估计,当两种方法使用边线信息相同时,所得到结果也趋同,但是由于方法 1 中将圆柱位姿估计问题视为非线性问题去处理,最终求解策略为迭代方法,其误差会受到迭代阈值的影响。

表 2 不同方法的圆柱位姿估计角度误差与距离误差

Table 2 Angular and distance errors in cylindrical pose estimation by different methods

半径/mm	角度误差/($^\circ$)			距离误差/mm		
	本文方法	方法 1	方法 2	本文方法	方法 1	方法 2
12.5	0.15~0.42	0.14~0.44	0.23~1.28	0.13~0.42	0.13~0.53	0.26~1.15
22.5	0.16~0.44	0.12~0.65	0.28~1.10	0.14~0.47	0.13~0.46	0.29~0.97
30.0	0.13~0.43	0.12~0.53	0.30~0.98	0.15~0.44	0.16~0.39	0.28~1.01
37.5	0.14~0.48	0.15~0.45	0.30~0.83	0.12~0.43	0.10~0.50	0.10~1.05

3.2.2 计算时间对比

为验证本文方法的实时性,使用 3 种不同方法对 4 种半径的圆柱分别进行圆柱位姿估计并计时,通过对比 3 种方法的计算时间反映方法计算效率。为减小实验误差,对 4 组不同半径的圆柱分别进行 20 次不同位姿的估计实验,每次实验重复 3 次并计时,以平均耗时作为最终计算时间,实验结果如表 3 所示。

表 3 3 种方法实际计算时间

Table 3 Actual computation time of three methods

半径/mm	计算时间/ms		
	本文方法	方法 1	方法 2
20	1.70	62.31	8 137
45	1.45	64.22	9 126
60	1.60	60.49	10 281
75	1.70	61.42	11 453

由表 3 可知,方法 2 计算效率最差,且不同直径圆柱位姿估计时间会随点云中点数变化而变化。由于方法 1 和本文方法均采用图像进行圆柱位姿求解,不同半径条件下求解时间稳定性较高,而本文方法采用数值求解的方式,求解过程平均用时小于 2 ms,实验结果可以证明本文方法对圆柱曲面位姿的估计具有良好的实时性。

4 结 论

为实现对圆柱位姿实时、准确的估计,本文提出了一种利用两侧边线空间几何关系的单幅图像圆柱位姿实时估计方法。首先对提出方法进行计算复杂度理论分析,然后利用仿真实验验证方法可行性,最后在实际实验中与引言中部分较新的点云方法和图像方法进行求解精度对比和计算耗时对比。得到以下结论。

(1)针对现有点云方法计算量大等不足,和流程复杂、处理时间较长、无法实现实时测量等问题,提出了利用单幅图像中圆柱两侧边线计算三维空间轴线方程的圆柱位姿实时估计方法,通过降维处理方式极大的减小了数据量。针对图像方法多采用迭代求解、计算时间久的问题,本文运用空间解析几何原理,建立了圆柱位姿与图像投影之间的数学关系,实现了对圆柱位姿的线性化求解。

(2)通过对提出方法进行计算复杂度理论分析,提出方法的计算复杂度为 $O(M+N)$ 。方法实现过程中除圆柱两侧边线直线拟合环节外均为线性化过程,计算速度较快,而圆柱两侧边线直线拟合环

节由于其数据数量变化小且计算简单,可以保持良好的计算复杂度。

(3)在仿真实验中进行仿真图像采集并进行方法可行性验证,所提方法面对不同半径和位姿的圆柱均表现出较好的性能,圆柱位姿估计结果的距离误差为 0.15 mm,角度误差为 0.05°,而现有方法的距离误差均值一般为 0.3 mm,角度误差均值一般为 0.6°,因此提出方法具有良好的位姿估计精度。

(4)在实际实验中,先进的点云方法和图像方法进行精度对比和计算耗时对比,实验结果表明,所提方法在求解精度方面相较方法 2 有较大提升,与方法 1 持平。所提方法计算时间小于 2 ms,在不降低求解精度的条件下较目前最快方法,计算时间减少了 96%,大幅提高了圆柱位姿估计速度。

参考文献:

[1] WANG Gu, MANHARDT F, LIU Xingyu, et al. Occlusion-aware self-supervised monocular 6D object pose estimation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024, 46(3): 1788-1803.

[2] 夏晓华,李玉强,邹易清,等. 圆柱曲面透视投影失真的图像校正 [J]. 光学精密工程, 2023, 31(11): 1691-1699.

[3] XIA Xiaohua, LI Yuqiang, ZOU Yiqing, et al. Image correction for perspective projection distortion of cylindrical surface [J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(11): 1691-1699.

[4] SCHALK P, OFNER R, OLEARY P. Pipe eccentricity measurement using laser triangulation [J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(7): 1194-1203.

[5] ZHANG Jieyu, QIU Yuanying, DUAN Xuechao, et al. Precise on-line non-target pose measurement for cylindrical components based on laser scanning [J]. Assembly Automation, 2019, 39(4): 596-606.

[6] WEI Quanmao, JIANG Zhiguo, ZHANG Haopeng. Robust spacecraft component detection in point clouds [J]. Sensors, 2018, 18(4): 933.

[7] 陈平,李灿,雷学军. 3D 视觉结合图像检测与导纳控制的圆轴孔零件机器人装配 [J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 963-970

[8] CHEN Ping, LI Can, LEI Xuejun. Robotic assembly of cylindrical shaft and hole parts based on 3D vision, image detection and admittance control [J]. Control and Decision, 2023, 38(4): 963-970.

[9] 罗成文,黎东,聂胜,等. 一种稳健的激光点云拟合空间圆柱面方法 [J]. 测绘地理信息, 2024, 49(3):

- 31-34.
- LUO Chengwen, LI Dong, NIE Sheng, et al. A robust method of fitting cylindrical surface with laser point cloud [J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(3): 31-34.
- [8] ZHANG Jieyu, QIU Yuanying, DUAN Xuechao, et al. An improved robust method for pose estimation of cylindrical parts with interference features [J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2234.
- [9] KYUWON J. Pose estimation of a cylindrical object using genetic algorithm [J]. *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 2005, 14(3): 54-59.
- [10] 高帅, 夏良斌, 盛亮, 等. 基于投影圆度和遗传算法的空间圆柱面拟合方法 [J]. *计算机科学*, 2021, 48(S2): 166-169.
- GAO Shuai, XIA Liangbin, SHENG Liang, et al. Spatial cylinder fitting based on projection roundness and genetic algorithm [J]. *Computer Science*, 2021, 48(S2): 166-169.
- [11] 史鹏程, 李加元, 刘欣怡, 等. 室内圆柱引导的激光雷达全局定位与回环检测 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(7): 1088-1099.
- SHI Pengcheng, LI Jiayuan, LIU Xinyi, et al. Indoor cylinders guided LiDAR global localization and loop closure detection [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(7): 1088-1099.
- [12] HUANG Fengyun, LIU Junqiang, FANG Dehao. Research on autonomous positioning method for inspection robot based on distributed 2D LiDARs [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 195436-195449.
- [13] DENG Zhengping, SUN Lili, HAO Fei, et al. An improved posture evaluation method for cylindrical intersecting holes on large aerospace components based on monocular vision [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(5): 055016.
- [14] LONG Chenrong, HU Qinglei. Monocular-vision-based relative pose estimation of noncooperative spacecraft using multicircular features [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(6): 5403-5414.
- [15] LIU Chang, HU Weiduo. Real-time geometric fitting and pose estimation for surface of revolution [J]. *Pattern Recognition*, 2019, 85: 90-108.
- [16] ZHANG Lin, YE Menglong, CHAN Poling, et al. Real-time surgical tool tracking and pose estimation using a hybrid cylindrical marker [J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2017, 12(6): 921-930.
- [17] GONG Xuanrui, LV Yaowen, XU Xiping, et al. Pose estimation of omnidirectional camera with improved EPnP algorithm [J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 4008.
- [18] 尚国威, 梁晋, 李磊刚, 等. 空间最优投影平面的斜口圆截面管路端头位姿测量 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(1): 95-110.
- SHANG Guowei, LIANG Jin, LI Leigang, et al. Accurate measurement of end position of inclined pipe with optimal projection plane of space [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(1): 95-110.
- [19] LIU Song, XU De, LIU Fangfang, et al. Relative pose estimation for alignment of long cylindrical components based on microscopic vision [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(3): 1388-1398.
- [20] 张一鸣, 李广, 徐自力, 等. 融入几何先验的圆柱表面三维应变场双目视觉测量方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(6): 162-173.
- ZHANG Yiming, LI Guang, XU Zili, et al. A binocular-vision-based method for measuring the 3D strain field on cylindrical surfaces integrating geometric prior knowledge [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(6): 162-173.
- [21] 段智威, 夏晓华, 贺鹏程, 等. 任意位姿圆柱曲面透视投影失真的图像校正 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(16): 2577-2589.
- DUAN Zhiwei, XIA Xiaohua, HE Pengcheng, et al. Image correction for perspective distortion of cylindrical surfaces at arbitrary poses [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(16): 2577-2589.
- [22] YU Aidi, WANG Yujia, GUO Bing, et al. Cylinder object 6-DOF pose estimation via single perspective circle on cylindrical surface [J]. *Measurement Science and Technology*, 2025, 36(1): 015205.
- [23] 王朕, 叶文华, 陈煜昊, 等. 复杂背景下退役圆柱锂电池轮廓精确提取与位姿检测方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(5): 119-129.
- WANG Zhen, YE Wenhua, CHEN Yuhao, et al. Accurate contour extraction and pose detection method for retired cylindrical lithium batteries in complex backgrounds [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(5): 119-129.
- [24] WANG Shaoan, ZHU Mingzhu, HU Yaoqing, et al. CylinderTag: an accurate and flexible marker for cylinder-shape objects pose estimation based on projective invariants [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2024, 30(12): 7486-7499.
- [25] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.

(编辑 赵炜)