

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210804

基于激光传感器的钻柱输送自动纠偏算法*

臧日高 张春堂 樊春玲

(青岛科技大学自动化与电子工程学院 青岛 266061)

摘要: 在陆地钻井中,陆地钻柱输送机器人可以自动完成从钻柱抓取、调姿、输送到鼠洞的过程。但是钻柱在放置过程中会产生倾斜,导致机器人抓取失败。因此本文设计基于激光传感器的钻柱输送自动纠偏算法。首先,采用两个激光传感器扫描并获取钻柱任意两处切面距离信息,利用最小二乘法拟合得到切面圆心位置。由于实际现场作业时,钻柱表面粘附泥土将会影响采集的数据,采用格拉布斯准则通过多次迭代进行数据筛选。然后通过圆心位置计算出钻柱偏转角度并发送给机械手,以便进行定位抓取。最后模拟钻井现场中钻柱附着泥土的位置和厚度不同,进行了算法有效性实验。实验结果表明,该算法切实可行,工程可移植性高,满足工程应用要求,提高了钻柱输送机器人的自动化水平。

关键词: 钻柱输送机器人;钻柱中心识别;格拉布斯准则;自动纠偏

中图分类号: TE241 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440.45

Automatic deviation correction algorithm of drill column transportation based on laser sensors

Zang Rigao Zhang Chuntang Fan Chunling

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: In land drilling, the land drill column conveying robot can automatically grab drill columns, adjust the attitude of drill columns, and then transport drill columns to the rat hole. However, drill columns may be inclined when placed, causing the robot to fail to grasp. Therefore, this paper designs an automatic deviation correction algorithm for drill column transportation based on laser sensors. Firstly, two laser sensors are used to scan and acquire the distance information of any two sections of the drill column, and the position of the center of the section is obtained by least square fitting. Due to the fact that the soil adhered to the surface of drill strings will affect the collected data during actual field operations, the Grubbs criterion is used to screen the data through multiple iterations. Then, the deflection angle of the drill string is calculated by the center of the circle and sent to the manipulator for positioning and grabbing. Finally, the effectiveness of the algorithm is tested by simulating the different positions and thicknesses of the soil attached to the drill string in the drilling site. The experimental results show that the algorithm is feasible, highly portable in engineering, meets the requirements of engineering application, and improves the automation level of drill string conveying robots.

Keywords: drill column conveying robot; drill column center identification; Grubbs criterion; attitude correction

0 引言

在陆地钻井平台上,现场作业目前多采用猫道机完成钻柱的自动上、下钻台的操作^[1-2],然后使用钻井平台上的机械手抓取钻柱并送入鼠洞。但是这种作业模式要求多人在二层平台协作完成,需要大量劳动力,制造与维护成本高,而且容易发生安全事故。随着科学技术的发展,人们开

始逐渐采用机器人来代替人工进行劳动强度大、危险系数高的工作。国内外目前针对夹持类机器人均在不断进行设计与改进,Giulio等^[3]针对目前机器人末端执行器通用性差的情况,设计了可变孔径的夹持器,提高了机器人可抓取物体的范围;张奇梁^[4]等设计一种搬运机器人夹持机构,并仿真分析机器人抗颠覆性,实现自动化手段完成搬运码垛处理;林宝泉^[5]通过分析钻井平台机器人的作业流程,对机

收稿日期:2022-07-24

* 基金项目:山东省自然科学基金(ZR2019MEE071)项目资助

机器人末端执行器结构进行设计优化,提高了夹持稳定性。随着研究的持续深入,机器人的优越性不断增强,钻井平台采用机器人输送钻柱占用空间小,转换使用场地灵活,生产效率和自动化程度高,提高了钻井的开采效率。因此,在陆地钻井中采用能自动完成钻柱定位、抓取、传输、并直接放置到鼠洞的陆地钻柱输送机器人具有重要的实际应用价值和意义。

但是这种钻井平台机器人在抓取钻柱时,由于钻柱摆放不规则、不平整,可能会产生抓取失败的问题。目前针对偏差、偏转等问题常采用机器视觉或激光传感器进行测量分析^[6-8]。机器视觉法采用相机作为前端传感器^[9],但是相机在实际钻井现场中容易受到大雾等环境影响,镜头容易被污染,且为了保证成像质量,高精度的相机与镜头会显著增加成本。而激光传感器价格便宜,测量速度快,精确度和灵敏度较高,穿透力强,不易受到现场环境的干扰。因此,本文设计采用激光传感器获取位置信息,进而计算得到钻柱偏转角,使得机械手可以动态调节角度抓取钻柱。

由于现场作业时钻柱表面可能会粘附泥土,只采集钻柱任意两点的距离信息不能保证准确计算偏转角。通常对于规则性的物体,采用中心点进行定位识别是常见的方案。因此本文通过激光传感器获取钻柱任意两切面的距离信息,并采用拟合算法找到任意两切面的圆心,计算出偏转角进而实现对钻柱的精准定位。目前常用的曲线拟合方法有代数逼近法、最小二乘法等^[10-11]。其中最小二乘法计算简单,工程应用较广,因此采用最小二乘法拟合钻柱任意位置切面圆。考虑到采集的数据中存在干扰信息,在拟合切面圆之后进行数据处理^[12-13]。然后多次迭代拟合并进行数据处理,直到数据不再发生变化拟合找出钻柱任意两处切面圆圆心坐标。利用圆心坐标计算出钻柱偏转角度,以此控制机械手进行定位,完成钻柱抓取任务。该算法简单易实现,对硬件要求较低,工程实用性好,满足工程应用要求,解决了钻柱输送过程中机械手可能抓取失败的问题。

1 系统设计

1.1 系统总体设计

钻柱输送机器人主要由底盘小车、折臂和机械手三部分组成。钻柱输送机器人主要组成与动作如图1所示。

机器人通过控制底盘小车实现自身在轨道上的移动,通过折臂来控制机械手的上升或下降。首先,当机器人运动到指定位置时,机器人下降折臂并旋转机械手抓取钻柱。抓取钻柱成功后,折臂提升到固定的高度。然后,机械手将钻柱旋转到与钻井二层平台垂直,并举升钻柱。最后,通过底盘小车移动将钻柱定位到钻井二层平台上鼠洞正上方,机械手逐步释放钻柱。动画模拟钻井现场如图2所示。

1.2 激光传感器

该设计在机械手上采用了激光传感器,能更好地适应

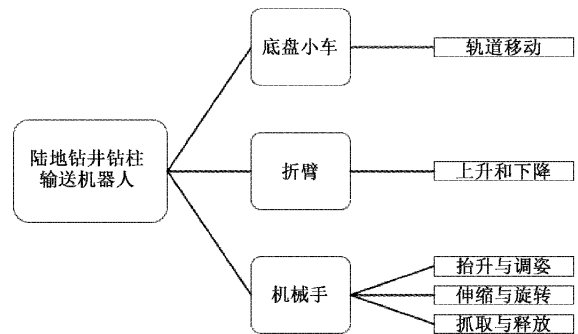


图1 钻柱输送机器人主要组成与动作

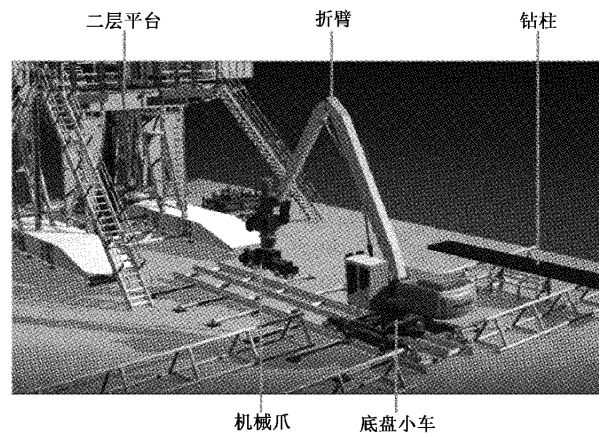


图2 动画模拟

大雾等恶劣天气,降低成本。如图3所示,在机械手两端间隔固定距离 L 安装两个激光传感器,分别测量到钻柱的距离^[14-15]。

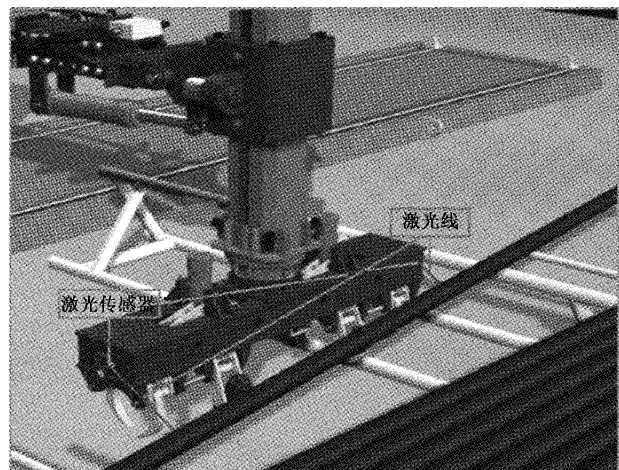


图3 激光测距

机械手在垂直于地面的方向按照固定的间隔向上或向下移动。通过控制机械手的升降检测出钻柱某切面表面各处到机械手的距离。将向下移动的距离作为Y轴方向的数据点,将测出钻柱到机械手的水平距离作为X轴方向的数据点。

据点。然后利用数据点构建笛卡尔坐标系^[16]。通过获取的距离信息拟合出钻柱圆心,进而求出钻柱偏转角,实现对钻柱的定位。

2 自动纠偏算法

在陆地钻井平台的钻柱抓取作业中,机械手与钻柱倾斜方向不一致时可能抓取失败。所以机械手抓取钻柱前需要事先定位。最主要的问题是如何准确找出钻柱的圆心并进行偏转角的计算。本文采用工程应用较广的最小二乘法拟合采集的距离信息,获取圆心位置。

2.1 最小二乘法

通过任意一个激光传感器采集到某一切面的一组二维数据 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$, 寻求一个函数 $\hat{y} = f(x)$, 使 $f(x)$ 在某种准则下与所有数据点最为接近, 即曲线拟合得最好。

本文采用最小二乘法进行曲线拟合, 基本思路为:

$$f(x) = l_0 + l_1x + \dots + l_mx^m \quad (1)$$

其中, $l_k (k = 1, 2, \dots, m; m < n)$ 为待定系数。

拟合准则是使 $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 与 $f(x_i)$ 的距离 δ_i 的平方和最小, 称为最小二乘准则。

通过机理分析, 拟合钻柱切面曲线为圆, 设函数 \hat{y}_i 如式(2)和(3)所示。

$$(x_i + b_1)^2 + (\hat{y}_i + b_2)^2 = b_3^2 \quad (2)$$

$$\hat{y}_i = -b_2 \pm \sqrt{b_3^2 - (x_i + b_1)^2} \quad (3)$$

然后, 确定参数 $b_k, k = 1, 2, 3$ 。

$$J(b_1, b_2, b_3) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [\hat{y}_i - y_i]^2 \quad (4)$$

为求 b_1, b_2, b_3 使 $J(b_1, b_2, b_3)$ 达到最小, 只需利用极值的必要条件, 即式(5)。

$$\frac{\partial J}{\partial b_j} = 0 (j = 1, 2, 3) \quad (5)$$

根据计算结果, 可获得钻柱切面的圆心 (b_1, b_2) 和半径 b_3 。

2.2 数据处理

由于现场作业钻柱表面会粘附泥土, 因此测量的距离信息中存在的误差数据可能会导致拟合的钻柱切面的圆心和半径产生偏差。在每次使用钻柱时钻柱表面粘附泥土厚度及位置分布具有随机性。考虑到粘附泥土的厚度和位置可能符合高斯分布, 即泥土厚度和位置服从正态分布, 正态分布概率密度函数如下:

$$H(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

可表示泥土厚度 $X_1 \sim N(\mu_x, \sigma_x^2)$, 泥土位置 $X_2 \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$, 其中 μ_x 为泥土厚度均值, $\hat{\sigma}_x$ 为泥土厚度标准差, μ_y 为泥土位置均值, $\hat{\sigma}_y$ 为泥土位置标准差。

为排除钻柱表面存在粘附泥土的干扰, 需要根据距离

信息对数据进行处理^[17]。研究发现, 利用格拉布斯准则迭代拟合可以很好地解决由于泥土粘附影响计算钻柱圆心这一问题。通过格拉布斯准则配合最小二乘法多次迭代拟合, 获得激光传感器所测钻柱切面位置的圆心。

首先, 利用获取的距离信息拟合出圆心, 将采集的数据点 x_1, x_2, \dots, x_n 带入到式(7)求出此时每个采样点到圆心的距离 R_i 。

$$R_i = \sqrt{[(x_i - b_1)^2 + (y_i - b_2)^2]} (i = 1, \dots, n) \quad (7)$$

计算 R_i 平均值 \bar{R} 和标准差的估计值 $\hat{\sigma}_R$,

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_R = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (9)$$

为了更方便检查测定值中是否含有粗大误差, 将 R_i 由小到大排列成顺序统计量, 可得:

$$R_{(1)} \leq R_{(2)} \leq \dots \leq R_{(n)} \quad (10)$$

格拉布斯准则按照数理统计理论导出了统计量 $g_{(1)}$ 和 $g_{(n)}$ 的分布:

$$g_{(n)} = \frac{R_{(n)} - \bar{R}}{\hat{\sigma}_R} \quad (11)$$

$$g_{(1)} = \frac{\bar{R} - R_{(1)}}{\hat{\sigma}_R} \quad (12)$$

取定危险率 α , 查表可求得临界值 $g_0 = (n, \alpha)$, 而:

$$P\left(\frac{R_{(n)} - \bar{R}}{\hat{\sigma}_R} \geq g_0(n, \alpha)\right) = \alpha \quad (13)$$

$$P\left(\frac{\bar{R} - R_{(1)}}{\hat{\sigma}_R} \geq g_0(n, \alpha)\right) = \alpha \quad (14)$$

那么由式(13)和(14)得到了判定粗大误差的格拉布斯准则: 若测量列中最大值或最小值的残差不满足式(15), 那么判定含有残差 $V_{(i)}$ 的 R_i 是坏值, 因而该值按危险率 α 应该剔除。同时 R_i 所对应的 x_i 和 y_i 也需要被删除。

$$|V_{(i)}| < g_0(n, \alpha) \hat{\sigma}_R (i = 1 \text{ 或 } n) \quad (15)$$

如果利用格拉布斯准则判定数据中存在含有粗大误差的坏值, 在剔除坏值之后, 还需要对余下的数据继续进行判定, 直至全部测定值满足式(15)。

在筛选完成后剩余的采样点组合成新的数据集, 使用新的数据集拟合圆心和半径, 然后重新计算 R_i 和进行格拉布斯准则的判断, 重复上述操作, 直到新数据集采样点数不再减少。

根据筛选后的数据, 拟合钻柱切面圆心。利用钻柱两端测算出的圆心数据, 通过三角函数公式计算, 即可得到机械手与钻柱之间的偏转角。将应偏转的角度传输给机械手, 机械手旋转相应角度, 使其可以准确抓取钻柱。

该算法大致分为数据读取、数据处理、数据输出三部分, 如图 4 和表 1 所示。

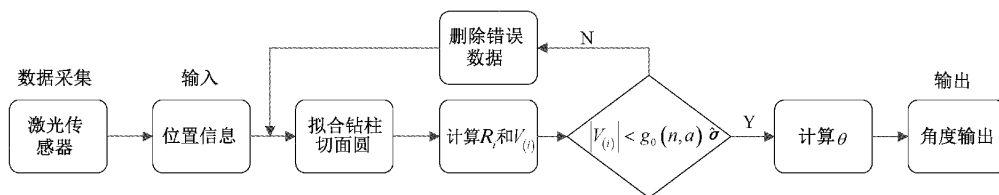


图4 算法流程

表1 算法步骤

算法	自动纠偏算法
输入:	采样点 (x_i, y_i)
输出:	1: 拟合圆心 (b_1, b_2) 和半径 b_3 2: 计算 R_i , 利用格拉布斯准则做判断 3: 删除误差点并重新拟合判断 4: 计算偏转角 θ

3 实验与结果分析

为了验证自动纠偏算法的有效性,利用丝杆滑轨、激光传感器、圆柱、大三角尺等若干物品,模拟了一个微型现场。图5为实验装置图。

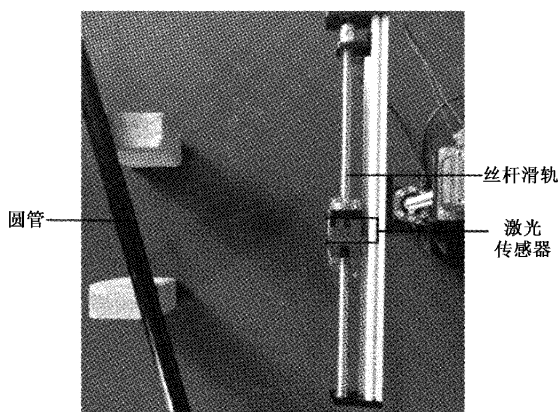


图5 实验装置图

激光传感器对钻柱某位置切面表面的距离信息进行采集,丝杆滑轨每次向下移动0.1 cm,存储每次移动后钻柱到机械手的距离,共采样100个数据点,并以激光传感器初始位置为原点,构建笛卡尔坐标系。实验中取某切面圆圆心横坐标为-15 cm、纵坐标为-10 cm处,使用半径7 cm长的圆柱代替钻柱进行实验。

读取采集的数据并进行迭代拟合。假定激光传感器初始位置为坐标系原点,那么获取的数据点位于坐标系第三象限。距离信息通过数值表达时均为负数,但在应用中采用绝对值并不影响结果。如图6为拟合圆柱切面过程。随着迭代次数的增加,误差数据(图中标注部分)逐渐被排除,拟合的圆心与半径数据不断被修正,直至数据点全部

满足判断条件,拟合得到最终结果。最终结果如图6(d)所示。

从图6中可以看到,随着迭代次数的增加,拟合值不断修正,最终拟合圆心值在(-15 cm, -10 cm)附近,拟合半径约为7 cm,验证了算法的有效性。

考虑到粘附泥土的厚度和位置具有随机性,为了进一步验证算法有效性,进行了多次不同情况的实验。

首先,对圆柱表面粘附不同的泥土厚度进行实验,如图7和8所示。图7(a)为粘附约0.2 cm厚度泥土的未数据处理的拟合图,其中标注部分为粘有泥土的部分。图7(b)为数据处理后的切面拟合图。图8(a)为增加粘附泥土厚度至约1 cm后未数据处理的拟合图。图8(b)为数据处理后的切面拟合图。由图7和8可知,拟合圆心值在(-15 cm, -10 cm)附近,拟合半径约为7 cm,粘附泥土厚度越薄初始拟合结果误差越小,但经过迭代筛选,受粘附泥土影响的异常值均被清除,拟合得到准确结果。

其次,对圆柱表面附着泥土的位置不同进行实验,如图9和10所示。图9(a)和图10(a)为不同位置附着泥土的未数据处理的拟合切面图,其中图中标注部分为泥土位置。图9(b)和图10(b)为数据处理后的拟合切面图。由图9和图10可知,拟合圆心值在(-15 cm, -10 cm)附近,拟合半径约为7 cm,无论粘附的泥土位于圆柱的上半部分还是下半部分通过迭代均可被清除,拟合结果准确。

然后,对圆柱表面不同位置同时粘附泥土进行实验,如图11和12所示。图11(a)为粘附泥土位置间距较近时未数据处理的切面拟合图,图12(a)为粘附泥土位置间距较远时未数据处理的切面拟合图,图11(b)和图12(b)为数据处理后的切面拟合图。如图11(b)和图12(b)所示,拟合圆心值在(-15 cm, -10 cm)附近,拟合半径约为7 cm,不同位置同时粘附泥土也可迭代拟合得到目标值。

本文进行了100次实验,实验结果如表2所示,实验拟合结果分布如图13~15。图13为拟合横坐标值分布图,拟合最小值为-15.002 84 cm,拟合值最大绝对误差0.002 84 cm;图14为拟合纵坐标值分布图,拟合最小值为-10.000 86 cm,拟合最大值为-9.999 33 cm,拟合值最大绝对误差0.000 86 cm;图15为拟合半径长度分布图,拟合半径长度最大值7.002 41 cm,拟合值最大绝对误差0.002 41 cm。从表2和图13~15中可以看出通过算法拟合计算的钻柱中心坐标及半径的误差均小于0.01 cm,满足工程应用的要求。

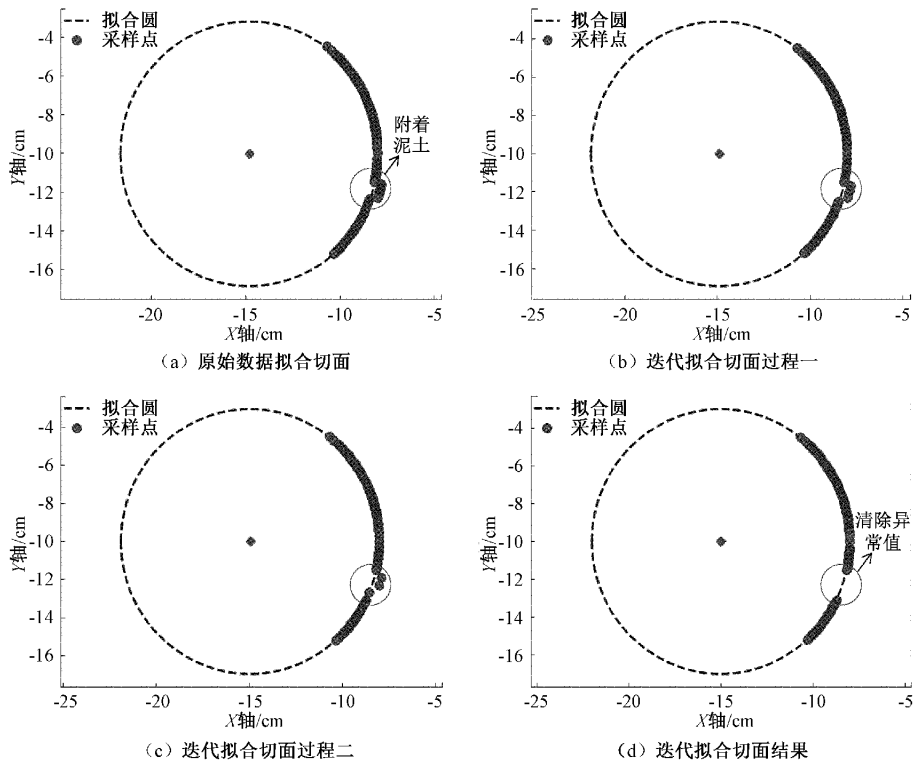


图 6 迭代拟合圆柱切面过程图

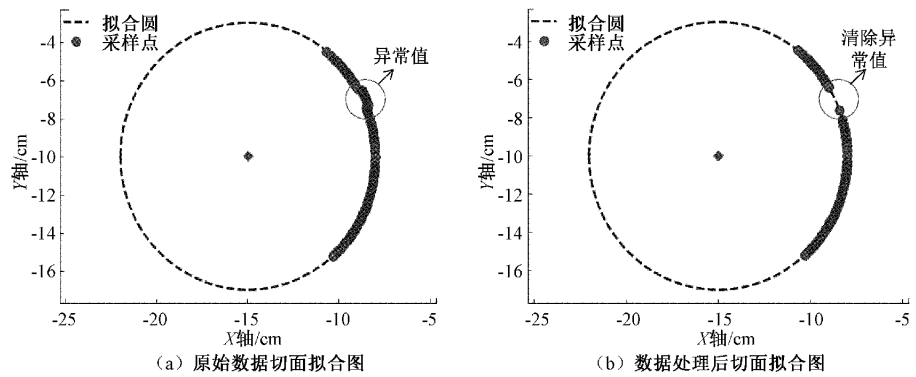


图 7 粘附较薄泥土实验图

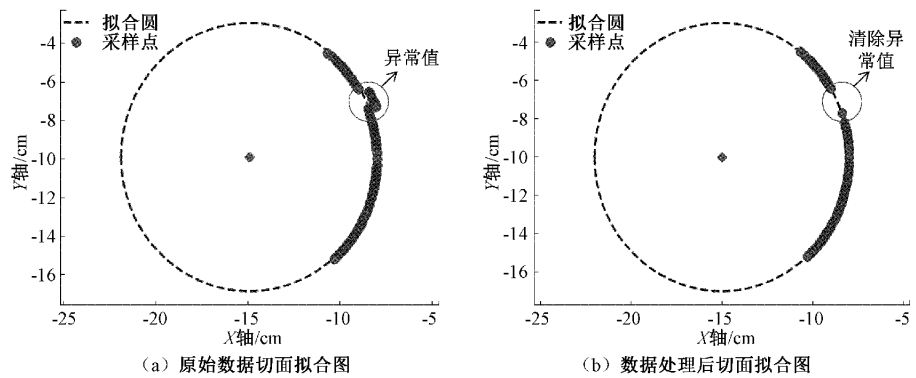


图 8 粘附较厚泥土实验图

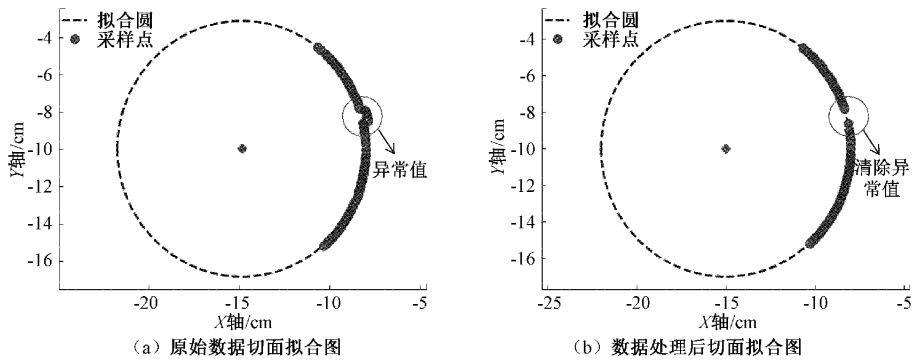


图 9 上半部分粘附泥土实验图

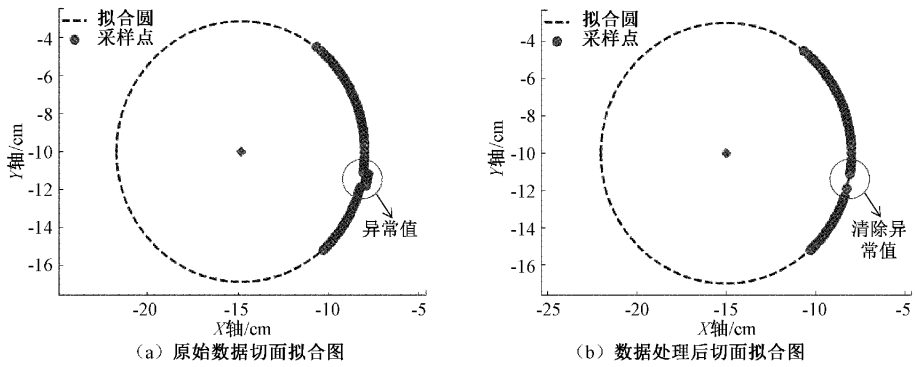


图 10 下半部分粘附泥土实验图

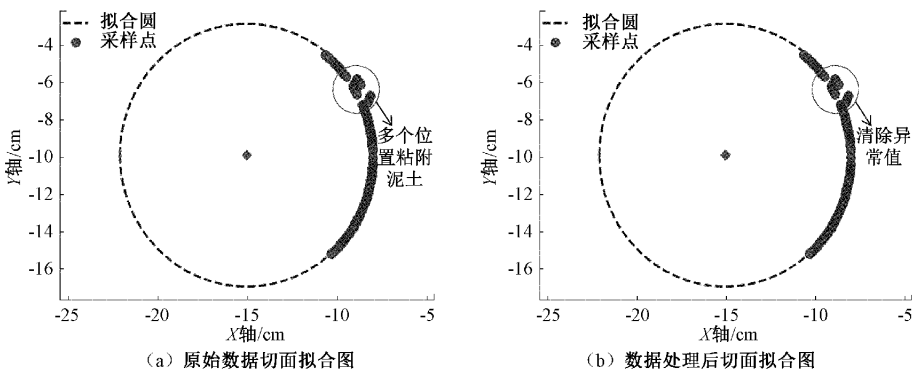


图 11 较近位置同时粘附泥土实验图

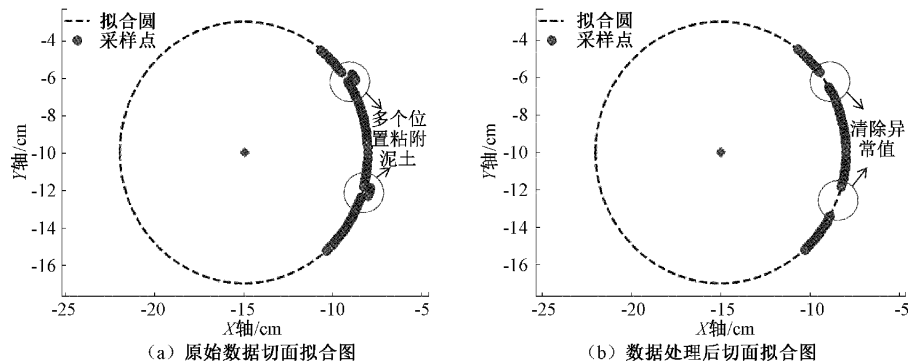


图 12 较远位置同时粘附泥土实验图

表 2 实验结果

cm

次数	拟合半径	拟合圆心	拟合半径偏差	拟合横坐标值偏差	拟合纵坐标值偏差
1	7.001 32	(-15.002 14, -10.000 65)	0.001 32	0.002 14	0.000 65
2	7.001 82	(-15.002 84, -10.000 86)	0.001 82	0.002 84	0.000 86
3	7.000 47	(-15.000 91, -10.000 24)	0.000 47	0.000 91	0.000 24
4	7.000 03	(-15.000 35, -10.000 18)	0.000 03	0.000 35	0.000 18
5	7.001 18	(-15.001 92, -9.999 81)	0.001 18	0.001 92	0.000 19
...					
96	7.000 89	(-15.001 45, -10.000 29)	0.000 89	0.001 45	0.000 29
97	7.001 63	(-15.002 4, -10.000 40)	0.001 63	0.002 40	0.000 40
98	7.000 97	(-15.001 64, -9.999 88)	0.000 97	0.001 64	0.000 12
99	7.000 85	(-15.001 38, -10.000 25)	0.000 85	0.001 38	0.000 25
100	7.000 83	(-15.001 34, -10.000 24)	0.000 83	0.001 34	0.000 24

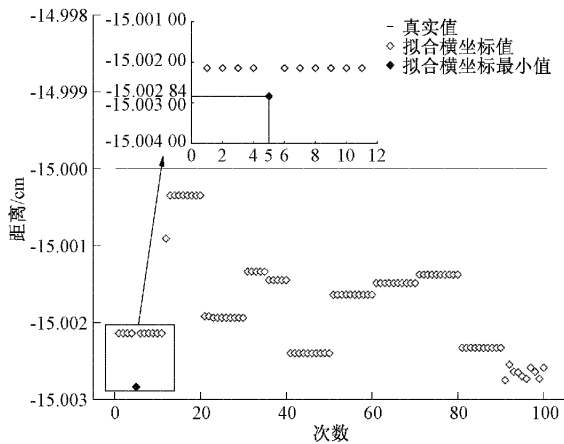


图 13 拟合横坐标值分布图

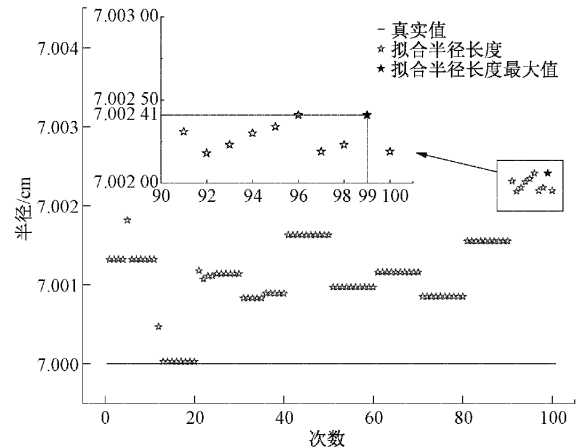


图 15 拟合半径长度分布图

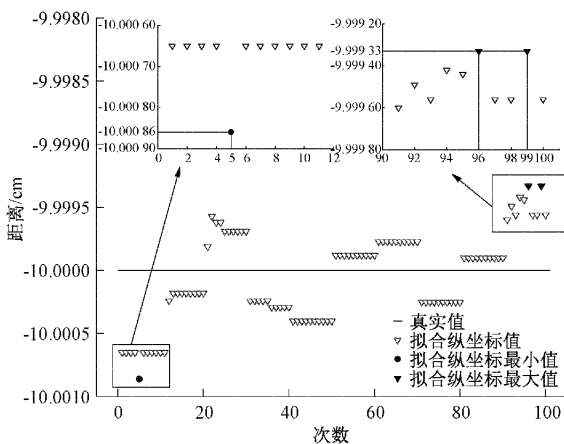


图 14 拟合纵坐标值分布图

求出钻柱相对于机械手的偏转角度 θ ，然后将角度传送给机械手进行定位。实验中放置钻柱偏转角度为 45° ，由于拟合结果精确度较高，取小数点后两位用于计算，计算结果均为钻柱偏转 45° ，验证了算法的有效性。

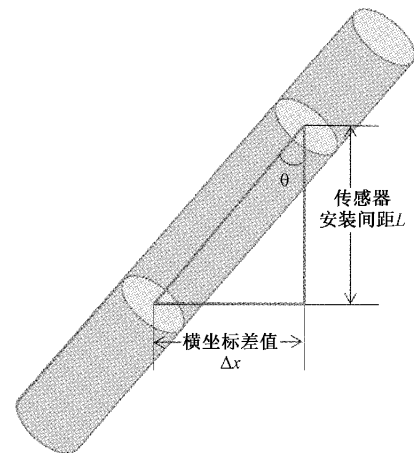


图 16 钻柱偏转角示意图

最后，根据该算法拟合的两个圆柱某位置切面的圆心计算出偏转角。如图 16 所示，两圆心的横坐标差值 Δx ，即为三角形的一条直角边。另一条直角边在安装激光传感器时位置已固定，即两个传感器的安装间距 L 。据此可

本文实验硬件配置为 Windows10 64 位操作系统, Intel(R) Core(TM) i5-4200H CPU, 板载内存为 4 GB, 使用 Python3.7 语言编写程序, 算法运行时间约为 0.32 s, 在机械手下降完成数据采集后的上升过程中, CPU 可完成偏转角度的计算并传送给机械手, 机械手完成上升动作后立刻旋转相应角度并进行抓取操作, 在运动过程中不停顿, 整个纠偏过程响应时间短, 提高自动化生产效率。

4 结 论

本文针对钻柱放置不平整导致机械手抓取失败的问题, 设计了基于激光传感器的钻柱输送自动纠偏算法, 模拟了钻柱粘附不同厚度、不同位置泥土的多种情况, 验证了算法的有效性, 实现了机械手对钻柱的精确抓取定位。本文所提出的纠偏算法计算简单, 实用性高, 成本低, 满足工程应用的要求, 使得钻柱抓取机器人可以更好地作业, 提高了钻井效率和自动化水平。

参考文献

- [1] QI S, CHENG S, WANG W, et al. Design of automated catwalks machine control system for offshore drilling platform[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 568-570: 1143-1146.
- [2] 王宇翔, 王元忠, 卢光荣, 等. 基于 S7-1200 的全液压力猫道机控制系统的设计与实现[J]. 电气自动化, 2017, 39(2): 106-109.
- [3] GIULIO R, SIMONE M, FABIO O. Design and construction of a variable-aperture gripper for flexible automated assembly [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing: An International Journal of Manufacturing and Product and Process Development, 2017, 48: 157-166.
- [4] 张奇梁, 孙江宏, 杜宏辰, 等. 一种搬运机器人夹持机构设计与抗倾覆性分析[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 259-261, 265.
- [5] 林宝泉. 陆地钻井平台机器人末端执行器结构设计与优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [6] 邓伟伦, 于涛, 詹洪陈, 等. 基于视觉技术的非接触测量精度优化研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(5): 118-123.
- [7] 刘永治, 张周强, 郭忠超, 等. 基于线激光扫描的零件三维表面检测系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2): 67-72.
- [8] 尹力, 洪波, 李湘文, 等. 基于激光位移传感器的大梁自动焊偏差识别[J]. 焊接学报, 2018, 39(7): 60-64, 131-132.
- [9] ZHANG C, GUAN L. Automatic drill pipe emission control system based on machine vision[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2019, 9(4): 2737-2745.
- [10] 魏新园, 钱牧云, 冯旭刚, 等. 基于偏最小二乘的数控机床热误差稳健建模算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 34-41.
- [11] 黄文浩, 韩伟. 基于 ExEX-2E1-Z 金属传感器的钢球运动状况系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(6): 27-32.
- [12] DING K, ZHANG J, DING H, et al. Fault detection of photovoltaic array based on Grubbs criterion and local outlier factor [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(4): 551-559.
- [13] ZHOU Y, JIANG X, ZHANG M, et al. Modal parameters identification of bridge by improved stochastic subspace identification method with Grubbs criterion[J]. Measurement and Control, 2021, 54(3-4): 457-464.
- [14] BUSA J, DOVICA M, KACMAR L. Derivation of a coordinate system of three laser triangulation sensors in a plane[C]. International Conference on Numerical Methods and Applications. Borovets, Bulgaria: NUSOD, 2019, 11189: 64-71.
- [15] 吴培鹏, 蔡文郁, 唐国栋, 等. 激光测距动态多阈值误差修正技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 170-177.
- [16] VOLKWYN T, GREGORCIC B, AIREY J, et al. Learning to use cartesian coordinate systems to solve physics problems: The case of "movability" [J]. European Journal of Physics, 2020, 4(41): 045701.
- [17] PAWE D, DOMANSKI. Study on statistical outlier detection and labelling [J]. International Journal of Automation and Computing, 2020, 17(6): 788-811.

作者简介

臧日高, 硕士研究生, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: rigao_zang@163.com

张春堂(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能检测技术及开发、机器视觉、嵌入式系统、人工智能技术的研究和应用。

E-mail: zct1999@163.com

樊春玲, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为多相流传感与流体流动, 机器视觉和信息处理。