

排爆机器人机械臂定位精度误差 自动补偿方法研究

丁 燕¹, 刘 鑫², 黄炜亮¹

(1. 连云港工贸高等职业技术学校 机械工程系, 江苏 连云港 222000;

2. 中南大学 商学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对于排爆机器人在进行排除爆破物质时, 机械臂不能满足绝对准确的定位要求, 位置检测精度与实际距离之间存在一定的误差; 为了解决这一问题, 提出排爆机器人机械臂定位精度误差自动补偿方法; 基于 D-H 运动模型和微分变换法创建排爆机器人机械臂位姿误差模型, 对误差模型进行重复参数分析, 去除重复参数获得可辨识的线性方程; 在可辨识的运动学参数误差模型线性方程中加入一个增量进行误差补偿; 最后通过仿真实验结果表明, 所提方法通过对机械臂位姿误差模型进行有效补偿, 使排爆机器人机械臂绝对定位精度均值提升 1.3 mm。

关键词: 机械臂; 定位精度; 误差; 补偿

Research on Automatic Compensation Method for Positioning Accuracy Error of Exhaust Robot Manipulator

Ding Yan¹, Liu Xin², Huang Weiliang¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Lianyungang Higher Vocational and Technical School of Industry and Trade, Lianyungang 222000 China; 2. School of Business, Central South University of China, Changsha 410083, China)

Abstract: When the explosive robot is used to eliminate the blasting material, the mechanical arm cannot meet the absolutely accurate positioning requirements, and there is a certain error between the position detection accuracy and the actual distance. In order to solve this problem, an automatic compensation method for the positioning accuracy error of the robot arm of the detonation robot is proposed. Based on the DH motion model and the differential transformation method, the pose error model of the robot arm of the detonation robot is created. The error model is analyzed by repeated parameters, and the repeated parameters are removed to obtain the identifiable linear equation. The linear equation of the identifiable kinematic parameter error model is added. An incremental error compensation. Finally, the simulation results show that the proposed method effectively compensates the absolute positioning accuracy of the robot arm by 1.3 mm by effectively compensating the attitude error model of the robot arm.

Keywords: manipulator; positioning accuracy; error; compensation

0 引言

国际上的恐怖分子所进行的恐怖袭击活动, 爆炸袭击是惯用的手段之一, 在进行排除爆破等工作, 会出现很多突发情况, 危险性极高。而排爆机器人不仅可以在危险的环境下对爆炸物进行检测、搜索、销毁、排除等工作, 同时对人身安全进行保护, 避免受到伤害^[1]。

当排爆机器人进行现场操作的时候, 由于一些爆炸物较小, 对机器人机械臂的定位精度有极高的要求^[2]。但是排爆机器人机械臂连杆与关节之间容易发生弹性变形, 产生传动误差, 导致最终机械臂的绝对定位精度有所降低, 限制了机器人在进行排除爆炸物时无法达到高精度、高灵

活的工作, 造成严重的后果^[3]。

通过对排爆机器人机械臂的误差进行分析可知, 误差的来源是由机械臂的几何构造所引起的, 这些误差无法采用闭环控制方式来减少, 再受到成本以及加工方式的影响, 单纯对加工精度的提高以及装配时的调整来减少或者去掉这些误差是不可能的, 同样, 经济条件也是一种负担。因此采用机器人机械臂误差补偿方法, 提高执行端的定位误差^[4]。

对排爆机器人的机械臂进行误差补偿时候, 常用于两种方法: 一是预测误差法, 在进行设计与工作中尽可能地减少由设计、加工、装配时候带来的误差^[5]; 二是运动学标定法, 根据合理有效的方式来分辨出机械臂理论上运动学轨迹数值和实际上的运动学数值之间误差, 再用数值之间的对比来修正机械臂的运动学数值达到补偿的目的^[6]。这两种方法相互对比, 运动学的定位法要比预测误差法的成本低以及补偿效果好。同时对机器人机械臂零件之间的磨损等一些原因进行补偿, 是现在机器人误差补偿重要的

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2019-11-01。

作者简介: 丁 燕(1982-), 女, 江苏连云港人, 大学本科, 讲师, 主要从事机械设计与自动化方向的研究。

刘 鑫(1982-), 男, 湖南衡阳人, 博士生, 副教授, 主要从事大数据、机器学习、自然语言处理方向的研究。

手段^[7]。

运动学主要有 4 个组成步骤：建模、测量、辨识跟补偿。最常用的两种方法：一是圆周法先求出实际机器人机械臂关节的位置，在用几何关系得出机器人的误差数据。二是回路方法，先构建一个机械臂的运动学误差模型，采用先进手段与模型的数值得出机械臂真实数值。两种方法进行对比，回路法效果更好，避免了人为因素影响。在实际应用中广泛地用于机器人的标定过程^[8]。

1 排爆机器人定位误差模型的构建

通过对排爆机器人机械臂的运动学合理分析，给出排爆机器人转动关节连杆示意图，如图 1 所示。以机械臂的坐标矩阵构建一个运动学模型，也就是 D-H 模型，先在关节处构建一个坐标系，再根据坐标系之间的转换及分析，得出机器人执行端的位置和姿态^[9]。

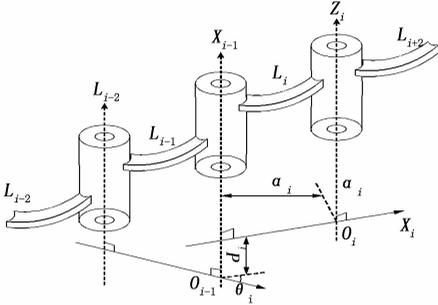


图 1 转动关节连杆示意图

在两个关节之间的坐标矩阵如下：

$${}^{i-1}T_i = Rot(X, \alpha_i) Rot(Z, \theta_i) Trans(Z, d_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_i \\ \sin\theta_i \cos\alpha_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & -d_i \sin\alpha_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_i & \cos\theta_i \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \cos\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， ${}^{i-1}T_i$ 为 i 的坐标系是对于 $i-1$ 坐标系的转换矩阵； θ_i 为排爆机器人机械臂的 X_{i-1} 跟 X_i 围绕 Z_{i-1} 的夹角； d_i 为机械臂关节 X_{i-1} 和 X_i 沿着 Z_{i-1} 轴平移的长度； α_i 为机械臂 Z_{i-1} 和 Z_i 围绕 X_i 轴旋转的角度， α_i 为 Z_{i-1} 与 Z_i 是沿着 X_i 轴平移的长度。

$d_i, a_i, \alpha_i, \theta_i$ 是模型构造的参数，代表机械臂的关节以及连杆之间的关系。

机器人的机械臂关节沿着一定的轴线进行平行时，运动学模型就会产生奇怪的现象，这影响参数分辨的稳定性，所以在两个关节的轴线平行运动时加一个围绕 Y 的轴线运动的数值 β 。在机械臂执行端坐标系位置上，根据关节之间的叠加变换计算出机械臂执行端位姿如下：

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， n, o, a 代表机械臂的执行端姿态的向量； p 表示机械臂

的执行端位置的向量。

因为机械臂连杆参数误差，所以理论上执行端位姿与其实际位姿存在一定的误差，用 $\Delta p = p_r - p_n$ 来表示。 p_r 是机械臂执行端实际的位姿矩阵， p_n 是理论上，机械臂执行端的位姿矩阵。机械臂的执行端位姿误差是由每一个关节之间相互转换积累而成的，因此要对关节的相邻坐标进行分析，获取关节的参数值误差与其执行端关节的函数关系。根据微分间的变换法，对相邻的机械臂关节进行齐次变换，可得：

$$\Delta T_i = \frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial T_i}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i + \frac{\partial T_i}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial T_i}{\partial a_i} \Delta a_i = T_i \Delta i \quad (3)$$

同样，机械臂相邻关节平行坐标系的变换误差如下：

$$\Delta T_i = \frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial T_i}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i + \frac{\partial T_i}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial T_i}{\partial a_i} \Delta a_i + \frac{\partial T_i}{\partial \beta_i} \Delta \beta_i = T_i \Delta i \quad (4)$$

式中， $\Delta \theta_i$ 表示机械臂连杆夹角偏差； $\Delta \alpha_i$ 表示机械臂连杆扭角误差； Δd_i 表示机械臂连杆距离偏差； Δa_i 表示机械臂连杆长度偏差； $T_i \Delta i$ 表示排爆机器人机械臂相邻关节的变换误差； Δi 表示机械臂关节坐标系相邻的变换矩阵； $\Delta \beta_i$ 表示数值 β_i 的偏差。

联立公式 (2) 和 (4)，简化后可得：

$$\Delta i = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\beta_i \Delta \alpha_i \cos\beta_i \Delta \theta_i & dx_i \\ \sin\beta_i \Delta \alpha_i + \cos\beta_i \Delta \theta_i & 0 & dy_i \\ -\sin\alpha_i \Delta \theta_i - \Delta \beta_i & \cos\beta_i \Delta \alpha_i \sin\beta_i \Delta \theta_i & dz_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中， dx_i, dy_i, dz_i 表示机械臂关节 i 相当于关节 $i-1$ 的 X, Y, Z 方向平行移动的偏差，将 e_i 作为两个机械臂之间的关节转换位置与姿态的误差而构成的微分矢量，生成下列公式：

$$e_i = \begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \\ dz_i \\ \delta x_i \\ \delta y_i \\ \delta z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\beta_i \Delta \alpha_i + a_i \sin\beta_i \Delta \theta_i - \sin\beta_i \Delta d_i \\ a_i \Delta \theta_i + \sin\alpha_i \Delta d_i \\ \sin\beta_i \Delta \alpha_i - a_i \cos\beta_i \Delta \theta_i + \cos\beta_i \Delta d_i \\ \cos\beta_i \Delta \alpha_i - \cos\alpha_i \sin\beta_i \Delta \theta_i \\ \sin\alpha_i \Delta \theta_i + \Delta \beta_i \\ \sin\beta_i \Delta \alpha_i + \cos\beta_i \Delta \theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos\beta_i & a_i \sin\beta_i & -\cos\alpha_i \sin\beta_i \\ 0 & 0 & a_i \cos\alpha_i & \sin\alpha_i \\ 0 & \sin\beta_i & -a_i \cos\beta_i & \cos\alpha_i \cos\beta_i \\ \cos\beta_i & 0 & -\cos\alpha_i \sin\beta_i & 0 \\ 0 & 0 & \sin\alpha_i & 0 \\ \sin\beta_i & 0 & \cos\alpha_i \cos\beta_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \alpha_i \\ \Delta a_i \\ \Delta \beta_i \\ \Delta \theta_i \\ \Delta d_i \end{bmatrix} = G_i \Delta x_i \quad (6)$$

式中， G_i 表示是机械臂误差系列的系数矩阵； Δx_i 表示是机械臂的连杆数值误差向量； $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$ 表示是机械臂的一个关节 i 对于关节 $i-1$ 围绕着 X, Y, Z 轴线的旋转偏差。

根据公式 (6) 可得知, 排爆机器人机械臂的连杆数值误差易造成机械臂近邻关节坐标齐次变换矩阵产生误差, 而机械臂的执行端的绝对定位误差是由每个关节出现的一点小误差叠加而成的, 所以将误差全部转移到机械臂的执行端坐标系上, 即可得到机械臂执行端的位姿误差, 根据微分转变原理, 将机械臂的位置误差模型如下式:

$$e = \sum_{i=1}^{n=6} J_i e_i = \sum_{i=1}^{n=6} J_i G_i x_i = J_e X \quad (7)$$

式中, J_i 表示机械臂的关节 i 坐标系到机械臂执行端坐标系的微分坐标矩阵, 根据该矩阵能将机械臂关节处 i 的坐标误差转变到执行端上:

$$J_i = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & (p \times n)_x & (p \times n)_y & (p \times n)_z \\ o_x & o_y & o_z & (p \times o)_x & (p \times o)_y & (p \times o)_z \\ a_x & a_y & a_z & (p \times a)_x & (p \times a)_y & (p \times a)_z \\ 0 & 0 & 0 & n_x & n_y & n_z \\ 0 & 0 & 0 & o_x & n_y & n_z \\ 0 & 0 & 0 & a_x & n_y & n_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: n, o, a, p 表示机械臂的关节坐标系 i 到执行端的坐标系经齐次变换后所得的位姿跟姿态向量; e 表示在平面上机械臂执行端位姿误差向量; J_e 表示机械臂雅克比矩阵; X 表示机械臂的运动学误差参数^[10-11]。

根据式 (7) 可得机械臂的运动学误差分辨模型, 采用设备将机械臂误差的实际位姿测量出来, 而理论上的位姿是根据机械臂的控制装置来获得, 将实际位姿的测量结果输入到运动模型中, 经过分析后即可得到排爆机器人机械臂的运动数值误差。通过对误差数值进行修正补偿, 进一步提高排爆机器人定位精度^[12-13]。

2 排爆机器人机械臂模型位置误差分析

2.1 重复性数值分析处理

在机械臂位置误差模型中进行分析求解时, 模型中会有一些重复性参数, 这些参数会降低误差辨识准确性, 因此对构建的运动学模型, 进行分析与判断, 去掉重复的数值, 以保证模型对重复数值进行有效的分析^[14]。

对机械臂执行端误差模型 (式 7) 根据下面简化方式, 如下:

$$e = J_e \cdot X \quad (9)$$

假如机械臂模型中有重复的数值, 证明分辨雅克比矩阵 J_e 的列不是满秩, 同时说明雅克比矩阵中的向量与线性有关或某列向量为零向量, 因此需要对雅克比矩阵理解分析, 找到与线性有关的列向量, 且将列向量为零的向量进行消除, 对除去列向量有关的误差性数值, 即是重复参数。

2.2 列向量的相关性分析

根据公式 (7) 的微分转变矩阵 J_i 能得到机械臂关节 $i-1$ 的坐标系下的误差 e_{i-1} 。 e_{i-1} 转变到机械臂关节 i 坐标下的变换矩阵:

$$J_{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -d_i \sin\theta_i & 0 \\ -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \alpha_i \sin\alpha_i \sin\theta_i - d_i \cos\alpha_i \cos\theta_i & \alpha_i \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \sin\theta_i & \alpha_i \cos\alpha_i \sin\theta_i + d_i \sin\alpha_i \cos\theta_i & -\alpha_i \sin\alpha_i \\ 0 & -\cos\theta_i & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i \sin\theta_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

机械臂关节坐标系 i 的微分误差是转移到自身坐标下的变换矩阵 J_i :

$$J_i = E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, E 表示单位矩阵。由公式 (10) 跟 (11) 能得到的 ${}^i J_{i-1}$ 第 3 列跟第 6 列存在以下公式:

$$\begin{cases} {}^i J_{(i-1)3} = \sin\alpha_i {}^i J_{i2} + \cos\alpha_i {}^i J_{i3} \\ {}^i J_{(i-1)6} = \alpha_i \cos\alpha_i {}^i J_{i2} - \alpha_i \sin\alpha_i {}^i J_{i3} + \sin\alpha_i {}^i J_{i5} + \cos\alpha_i {}^i J_{i6} \end{cases} \quad (12)$$

将公式 (12) 的两式都左乘 ${}^i J_i$ 微分的误差转变到机器人机械臂的执行端坐标系上, 能得出机器人分辨雅克比矩阵的 J_e 的第 3 列和第 6 列的线性相关, 就是微分误差 dz_i 与 δz_i 用其他的微分误差表示。

根据公式 (7) 可得知, 相邻的两个连杆其次变换误差都是由机器人机械臂的连杆几何参数误差决定的, 所以要将公式 (12) 中的重复数值, dz_i 与 δz_i 转变成连杆几何参数的冗余, 将已知的理论连杆角度 α 代入公式 (7) 中, 即可得到机械臂的几何参数冗余性, 这有两种状况: 平行关节时, 重复参数 dz_i 相对应的是 Δd_i , 即 Δd_i 就是重复参数; 非平行关节时, 重复数值 δz_i , 相对应的是 $\Delta \beta_i, \Delta \beta_i$ 视为冗余参数。

3 机械臂定位精度误差自动补偿方法

当辨识到排爆机器人机械臂的各个参数误差值后, 对这些参数进行误差补偿, 对 $\Delta\alpha, \Delta\alpha, \Delta d, \Delta\theta, \Delta\beta$ 所对应的数值相加, 构成新的参数, 并在系统中对其进行修改。对指定的指令位姿参照新的数值进行逆运动学求解, 得到关节转角 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T$, 在系统中将 $\theta + \Delta\theta$ 的值相加作为 θ 值输出, 从而控制所有轴的转动。

上述过程中构建了一个运动学模型, 它的执行端末端变换矩阵是一个含有 $\alpha_{i-1} \alpha_{i-1} d_i$ 与 θ_i 的矩阵, 可在实际的应用中, 它们存在一定的微小偏差。

假设, 排爆机器人机械臂关节 $\{i\}$ 的偏差值是 $\Delta\alpha_{i-1}, \Delta\alpha_{i-1}, \Delta d_i$ 与 $\Delta\theta_i$, 修正以后的数值是:

$$\begin{cases} \alpha'_{i-1} = \alpha_{i-1} + \Delta\alpha_{i-1} \\ \alpha'_{i-1} = \alpha_{i-1} + \Delta\alpha_i \\ d'_i = d_i + \Delta d_i \\ \theta'_i = \theta_i + \Delta\theta_i \end{cases} \quad (13)$$

为了分析误差,对这些参数的敏感程度进行研究。在不同的位姿下,运动学参数误差对总位置误差的影响不同,假设机械臂所处的关节角度值为:

$$q = [0 \quad p_i/4 \quad p_i/6 \quad -p_i/3 \quad 2p_i/3 \quad p_i/6] \quad (14)$$

假设某一参数存在一个误差,剩余的参数不存在误差。根据一定的步长对所有关节进行改变,记录执行端位姿。最后,计算没有误差的执行端位姿与相应的有误差的执行端位姿的偏差,对其进行补偿。

4 实验结果分析

首先对排爆机器人机械臂几何参数误差进行求解。实验过程中,采用 Mirosot 机器人平台。机械臂执行器位置坐标利用激光跟踪仪进行测量。基于激光跟踪仪建立排爆机器人机械臂标准坐标系,测量不同位置处机械臂执行端实际位置坐标,将实际位置坐标和理论坐标进行对比,基于本文所构建的排爆机器人定位误差模型计算机械臂的几何参数误差。为了最大程度的提高标定的精度,使测量点分布于整个所需要工作的空间,选择了 40 个坐标点(20 组相对点)来进行测量,根据上文中所建立的误差模型,识别的机械臂的几何参数误差如表 1 所示。

表 1 机械臂的几何数值

序号	关节扭角误差/(°)	关节距离误差/mm
1	-0.00224	0.25605
2	-0.10246	-0.40626
3	0.52154	0.05245
4	-0.25316	0.00579
5	0.04024	-0.58216
6	-0.16154	-0.26015
其他	$R_x = 0.00136^\circ, R_y = 0.0034^\circ, d_y = -0.10579\text{mm}$	

接下来采用负重实验来求解排爆机器人的柔度误差。先将重量不同的物体施加排爆机器人关节之上,测量出负重前后关节坐标。利用公式(15)、(16)求出关节 2 与 3 的柔度系数,建立公式如下:

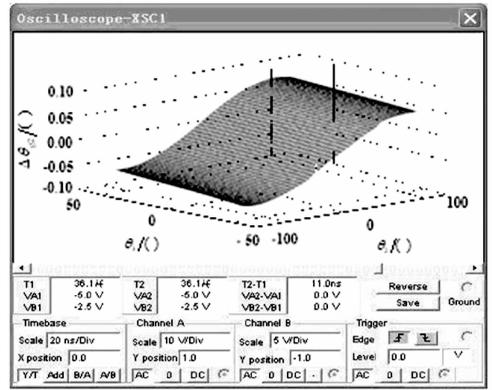
$$k_2 = 5.91725 \times 10^{-7} N^{-1} \cdot m^{-1} \quad (15)$$

$$k_3 = 5.63819 \times 10^{-6} N^{-1} \cdot m^{-1} \quad (16)$$

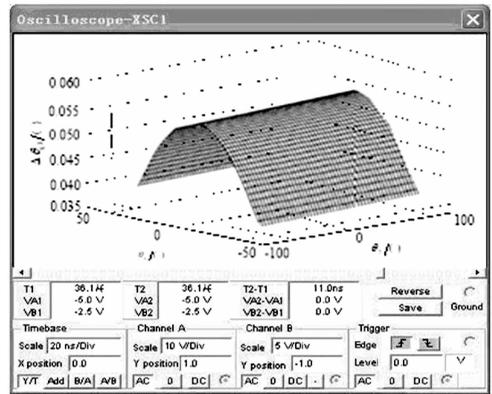
为了精确地计算出排爆机器人的柔性误差的补偿值,需要将关节的柔度系数代入误差模型之中,通过模型分析得到关节 2 与 3 转过不同角度所对应的偏差角度 $\Delta\theta_{g2}$ 与 $\Delta\theta_{g3}$,排爆机器人的偏转角度变化如图 2 所示。

由图 2 可知,排爆机器人机械臂机械臂负重实验所产生的柔度误差是随机臂姿态改变而变化的,负重实验下关节转动所产生的角度误差较小,非常接近关节的 4 与 5 所能产生的转角误差,如表 1 所示。所以柔度误差对机械臂的绝对定位精度影响是可以无法忽略的。

排爆机器人机械臂关节的柔度误差进行准确的计算和有效补偿,能对机械臂的绝对定位精度有效提高。通过几何误差参数值与柔度误差参数数基础上,根据所构建的误差补偿方法,对测量出的 40 个位置点进行误差补偿,实验



(a) 关节 2 偏转角



(b) 关节 3 偏转角

图 2 不同转角度关节偏转角的变化

结果如图 3 所示。

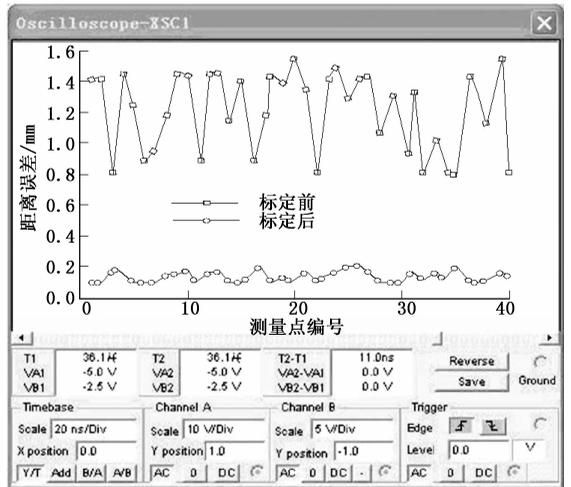


图 3 误差补偿前后定位绝对位置误差对比

通过图 3 可以看出,排爆机器人机械臂标定前的绝对定位误差相对于标定后的绝对定位误差数值要大了很多。由此可见,经误差补偿后,排爆机器人机械臂绝对定位精度均值提升了 1.3 mm。

5 结束语

通过对排爆机器人机械臂的误差建模与实际位置误差进行分析,得出影响到执行端定位精度的主要影响因素包

含几何误差与柔度误差。再通过几何误差标定后与运动学参数辨识结果, 进行误差补偿。仿真实验分析证明, 采用本文方法, 几何结构参数辨识结果与实际位置之间差距很小。通过误差补偿后, 执行端的定位精度相对传统的方法, 误差较小, 说明本文提高了排爆机器人机械臂的执行端绝对定位精度。

参考文献:

[1] 占加林, 朱华炳, 柯振辉, 等. 基于预标定的机器人绝对定位误差补偿 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018, 532 (6): 88-92.

[2] 邹华东, 贾瑞清, 张 畅. 基于机器视觉的影像测量仪工作台定位误差精密补偿方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55 (9): 208-215.

[3] 何晓煦, 田 威, 曾远帆, 等. 面向飞机装配的机器人定位误差和残差补偿 [J]. 航空学报, 2017, 38 (4): 287-297.

[4] 韩哈斯额尔敦, 曾志革, 刘海涛, 等. 光学加工机器人定位误差测量与分析 [J]. 光电工程, 2017, 44 (5): 516-522.

[5] 徐连香, 郭春红, 刘薇娜, 等. 数控机床平动轴误差辨识及补偿研究 [J]. 机床与液压, 2017, 45 (9): 68-71.

[6] 徐连香, 郭春红, 刘薇娜, 等. 非球面数控磨床的误差建模与补偿研究 [J]. 机床与液压, 2017, 45 (7): 64-69.

[7] 曾远帆, 廖文和, 田 威. 面向精度补偿的工业机器人采样点多目标优化 [J]. 机器人, 2017, 39 (2): 239-248.

[8] 张 玮, 王志国, 谭昌柏, 等. 基于夹具主动定位补偿的飞机柔性件装配偏差优化方法 [J]. 航空学报, 2017, 38 (6): 258-266.

[9] 夏 婷, 李 威, 王 超, 等. 综采工作面采煤机定位技术研究现状及展望 [J]. 工矿自动化, 2017, 43 (10): 24-28.

[10] 刘 静, 朱志松, 陈凯聪. 气缸低速爬行特性影响因素及补偿 [J]. 机械设计与制造, 2018, 327 (5): 92-94, 98.

[11] 雷景添, 陈建魁, 马 亮, 等. 面向 SMD 多自由度精确转移的视觉定位方法 [J]. 现代制造工程, 2018, 452 (5): 62-67.

[12] 潘银松, 李政英, 王丽芳, 等. 面向机器视觉的云母槽精确定位系统 [J]. 光电工程, 2018, 45 (7): 16-23.

[13] 黄开启, 魏文彬, 陈荣华, 等. 凿岩机器人钻臂定位误差补偿控制交叉精英反向粒子群优化算法 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37 (7): 27-34.

[14] 陈宵燕, 张秋菊, 孙沂琳. 串联机器人多模式标定与刚柔耦合误差补偿方法研究 [J]. 农业机械学报, 2019, 50 (3): 403-410.

[15] 乔文刚, 王 磊, 秦天碧. 三自由度 Delta 机器人的奇异性分析及空间研究 [J]. 机床与液压, 2018, 46 (9): 61-64.

(上接第 181 页)

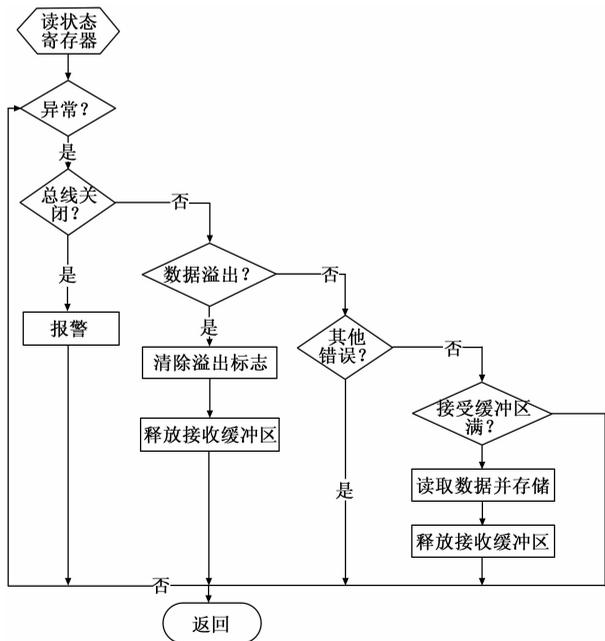


图 11 数据接收流程图

5 结语

针对传统仓储平台普遍存在自动化程度低, 控制不便, 数据存储查询节点远离现场等问题, 本文设计了一种基于 CAN 总线的由控制站与现场网络构成的分布式仓储系统。由于 CAN 总线具有传输距离远 (传输速率 5 Kbps 时直接传输距离可达 10 km) 的优点, 系统的控制站可以脱离控制

现场, 并与前端的数据存储与查询系统整合。得益于 CAN 总线特点, 在总线上可挂载多达 110 个节点, 极大方便了仓储货柜的数量扩展。同时, 在远端的控制站可以有效可靠地对被控节点进行控制, 说明 CAN 总线网络在仓储系统自动化控制设计中具有较高的实用性。

参考文献:

[1] 杨春杰, 等. CAN 总线技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

[2] 牛跃听, 等. CAN 总线应用层协议实例解析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.

[3] 张培仁, 等. CAN 现场总线监控系统原理和应用设计技术 [M]. 北京: 中国科大出版社, 2011.

[4] 史久根. CAN 现场总线系统设计技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

[5] 牛跃听, 等. CAN 总线嵌入式开发 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.

[6] Goma H. 实时嵌入式系统软件设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[7] 郑发跃. 工业网络和现场总线技术基础与案例 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.

[8] Sommerville I. 软件工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[9] 王剑宇. 高速电路设计实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.

[10] 任清晨. 电气控制柜设计制作 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.