

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.016

基于 Kalman 滤波的移动机械臂动态抓取研究*

王兆权, 吴海彬, 叶锦华*, 许金山
(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对机械臂在交通路锥自动取放系统中的抓取问题,对系统运动过程中路锥位置的预测、机械臂的抓取策略等方面进行了研究。提出了一种基于 Kalman 滤波与位置伺服的路锥动态抓取方法,建立了路锥的相对运动模型,采用 Kalman 滤波算法对路锥位置进行了预测,以补偿系统动态抓取的滞后;采用矢量积法构造了机械臂的雅克比矩阵,从而建立了基于路锥位置伺服的运动控制模型;在此基础上,论述了路锥在不同距离时机械臂的两个运动阶段,提出带速度补偿的抓取方法,使得机械臂可以在移动过程中完成对路锥的抓取;通过所搭建的实验平台,对所提方法进行了验证。研究结果表明:该方法能够有效地提高机械臂的路锥跟踪精度,避免了动态抓取时机械臂与路锥间的直接碰撞,使整个抓取过程更加平稳。

关键词:交通路锥;移动机械臂;Kalman 滤波;位置伺服;动态抓取

中图分类号:TP241

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)08-0851-06

Dynamic catch for mobile manipulator based on Kalman filter

WANG Zhao-quan, WU Hai-bin, YE Jin-hua, XU Jin-shan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the problem of realizing the dynamic catch application about traffic cones' automatic extraction& placement system, the prediction of cone position, the catch strategies of manipulator were researched, and traffic cone dynamic catch method which based on Kalman filter and cone's position servo control was proposed. The relative motion model of cone was established. To compensate for the lag of the system during dynamic catch, the Kalman filter algorithm was adopted in the prediction of cone position. To establish the servo control model which based on cone's position, the vector product method was used to construct the manipulator's Jacobian matrix. By this, two moving stages of the manipulator were proposed for the different cone's distances. Finally, by the method of velocity compensation, traffic cone was caught by manipulator during the mobile process. An experimental platform was built to validate the proposed method. The results indicate that the dynamic catch method can effectively improves the tracking accuracy of the manipulator, and it avoids the direct collision between cones and manipulator, and makes the whole catch process more stable.

Key words: traffic cone; mobile manipulator; Kalman filtering; position servo; dynamic catch

0 引 言

近年来,有关路锥自动收放技术,国内外已经开展了诸多研究。美国的 AHMCT 中心与英国的 SafeTcone 公司均有较为成熟的路锥自动收放产品^[1-2];国内在这

方面的研究起步较晚,2013 年南京理工大学研制出首台路锥收放车^[3];黄珍等人^[4]设计了以皮卡车为平台的路锥自动收放设备;郭凡良^[5]发明了一款液压夹爪与传送带结合的路锥回收平台;周子豪等^[6]发明了外挂拖车式的路锥投收系统。路锥自动收放技术已成为

收稿日期:2018-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605093);工信部智能制造综合标准化与新模式应用项目(2018);福建省科技厅产学研重大基金专项资助项目(2015H6012)

作者简介:王兆权(1993-),男,福建泉州人,硕士研究生,主要从事工业机器人应用方面的研究。E-mail:wzqaction@qq.com

通信联系人:叶锦华,男,讲师,硕士生导师。E-mail:yejinhua@fzu.edu.cn

高速路安全使用与维护急需解决的关键技术,已有的研究成果存在设计方案及使用复杂,可靠性、灵活性和实用性不够等问题。

由于路锥摆放的随意性,必须解决两项关键技术:(1)以工程车为参考系,要能实时对地面路锥进行定位;(2)机械臂在动态抓取过程中,要对车辆运动进行必要的补偿。

本文拟将机械臂安装到一辆工程车上,以实现地面路锥的机械臂自动取放。关于路锥的识别定位,本文将采用鲁棒性较好的激光雷达作为识别传感器,解决移动过程中机械臂的路锥抓取问题。

1 路锥自动收放系统方案

本文所提出的路锥取放系统如图 1 所示。

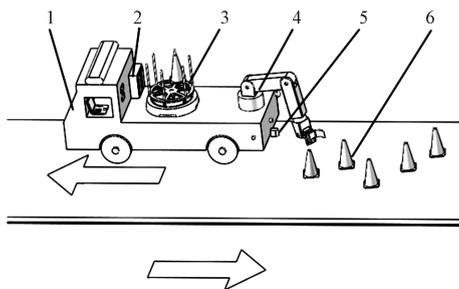


图 1 系统工作图示

1—工程车;2—主控制器;3—路锥库;4—机械臂;5—雷达;6—路锥

通常情况下,工程车上高速路后,不允许掉头逆行,为此,在路锥摆放的过程中,车辆缓慢前行,机械臂按照一定的时间间隔从路锥库取路锥,并放置到地面。在路锥自动回收的过程中,车辆缓慢后退(而非掉头逆行),机械臂通过雷达实时获取路锥位置信息,并实施抓取。

2 路锥位置预测

由于传感器数据采集与路锥识别计算需要消耗一定时间,且机械臂为典型的延迟环节,这样容易导致机械臂无法准确地抓取目标。为了减少误差,本文采用 Kalman 滤波算法预测目标位置^[7], Kalman 滤波算法具有良好的可靠性与实时性^[8]。

分别在雷达坐标系的 x_{rad} 与 y_{rad} 方向上设计 Kalman 滤波器,设 T 为雷达更新扫描数据的时间,取 $T = 0.1 \text{ s}$,由于采样时间较短,可将路锥在 T 内的相对运动视为匀速运动。

系统所建坐标系如图 2 所示。

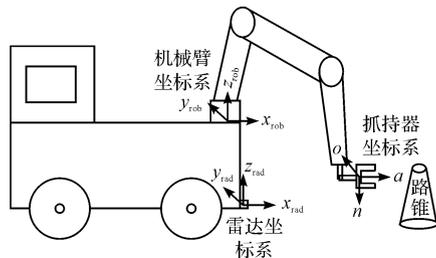


图 2 系统坐标系示意图

路锥在坐标系中的状态可以用位置 x_k 与速度 v_k 描述,则系统的状态量为:

$$\mathbf{S}_{(k)} = [x_k \quad v_k]^T \quad (1)$$

根据路锥在 x_{rad} 方向上的运动方程有:

$$x_{(k+1)} = x_k + v_k \cdot T \quad (2)$$

建立系统的状态方程:

$$\begin{bmatrix} x_{(k+1)} \\ v_{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{(k)} \\ v_{(k)} \end{bmatrix} + \omega_{(k)} \quad (3)$$

式中: $\omega_{(k)}$ —状态方程的系统噪声(服从 $p(\omega_{(k)}) \sim N(0, \mathbf{Q}_{(k)})$ 的高斯分布); $\mathbf{Q}_{(k)}$ —噪声协方差矩阵。

距离 $x_{(k)}$ 为系统所能直接观测到的参量,因此建立观测方程:

$$\begin{bmatrix} Z_{(k+1)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{(k)} \\ v_{(k)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过状态方程与观测方程可知系统状态转移矩阵为:

$$\mathbf{A}_{(k)} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

系统观测矩阵为:

$$\mathbf{H}_{(k)} = [1 \quad 0] \quad (6)$$

为完成 Kalman 滤波算法,还需要用到状态预测方程,即:

$$\mathbf{S}_{(k+1|k)} = \mathbf{A}_{(k)} \mathbf{S}_{(k|k)} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{(k+1|k)} = \mathbf{A}_{(k)} \mathbf{P}_{(k|k)} \mathbf{A}_{(k)}^T + \mathbf{Q}_{(k)} \quad (8)$$

测量更新方程为:

$$\mathbf{K}_{(k+1)} = \mathbf{P}_{(k+1|k)} \mathbf{H}_{(k+1)}^T (\mathbf{H}_{(k+1)} \mathbf{P}_{(k+1|k)} \mathbf{H}_{(k+1)}^T + \mathbf{R}_{(k+1)})^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{S}_{(k+1|k+1)} = \mathbf{S}_{(k+1|k)} + \mathbf{K}_{(k+1)} (Z_{(k+1)} - \mathbf{H}_{(k+1)} \mathbf{S}_{(k+1|k)}) \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{(k+1|k+1)} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k+1)} \mathbf{H}_{(k+1)}) \mathbf{P}_{(k+1|k)} \quad (11)$$

以目标首次出现位置为初始化系统状态量, $\mathbf{S}_{(0)} = [x_0 \quad 0]^T$, 取 $\mathbf{P}_{(0|0)} = 20 \cdot \mathbf{I}_{2 \times 2}$, $\mathbf{Q}_{(0)} = 10 \cdot \mathbf{I}_{2 \times 2}$ ($\mathbf{I}_{2 \times 2}$ 表示 2 阶单位矩阵) 为初始化系统协方差矩阵与噪声协方差矩阵。通过状态预测方程预测下一时刻的状态量 $\mathbf{S}_{(k+1|k)}$, 将其代入测量更新方程, 结合目标观测值 $Z_{(k+1)}$

完成对状态量的修正,并将结果反馈于状态预测方程,进行下一次预测。在这样反复迭代的过程中,就可以完成对目标位置的预测。

3 机械臂运动控制模型

路锥相对雷达的位置处于实时变化的状态,为了使机械臂能够对路锥位置变化作出及时调整,笔者采用基于目标位置的伺服运动控制方式。用 D-H 法建立机械臂的运动学模型后,进一步取关于时间的导数,得到机械臂末端空间速度与六关节轴角速度的函数关系:

$$J(q) \dot{q} = [\vec{v} \quad \vec{\omega}]^T \quad (12)$$

式中: \vec{v} —机械臂末端在基座坐标系 $\{o\}$ 下的空间线性速度; $\vec{\omega}$ —机械臂末端在 $\{o\}$ 中的空间旋转速度; \dot{q} —机械臂 6 个关节的角速度; $J(q)$ —雅可比矩阵。

机械臂的每一组关节角度对应一个 $J(q)$ 。无需运用逆运动学,将上式两边左乘 $J(q)^{-1}$,得到空间速度到关节角速度的逆向映射关系:

$$\dot{q} = J(q)^{-1} [\vec{v} \quad \vec{\omega}]^T \quad (13)$$

即在已知末端速度的情况下,便可求得机械臂所需关节角速度。文中所使用的运动控制策略也是建立在末端抓持器速度到关节角速度的逆映射上。

关于机械臂的雅可比矩阵求解,常见的方法有微分法^[9]、矢量积法^[10]。本文采用矢量积法求解机械臂的雅可比矩阵。机械臂每个关节轴的转动,都会对末端的空间速度 \vec{e} 造成影响,现考虑机械臂只在关节 i 的转动作用下所对应 \vec{e} 的关系,速度 \vec{e} 可用矢量积的方式表达,即:

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} \vec{v} \\ \vec{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i \times {}^i p_6^0 \\ z_i \end{bmatrix} \theta_i \quad (14)$$

式中: z_i —关节轴 $i+1$ 所在坐标系 $\{i\}$ 中 z 轴单位向量在基座坐标系 $\{0\}$ 中的表示; ${}^i p_6^0$ —连结坐标系 $\{i\}$ 的原点与末端坐标系 $\{6\}$ 的原点所形成的矢量在 $\{0\}$ 中的表示。

${}^i p_6^0$ 可进一步写成向量 ${}^0 p_6$ 与 ${}^0 p_i$ 相减的形式,即:

$${}^i p_6^0 = {}^0 p_6 - {}^0 p_i \quad (15)$$

若同时考虑 6 个关节角速度对末端空间速度的影响,则只需分别将每个关节角对应末端的空间速度矢量进行叠加:

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} z_0 \times {}^0 p_6^0 & z_1 \times {}^1 p_6^0 & z_2 \times {}^2 p_6^0 & z_3 \times {}^3 p_6^0 & z_4 \times {}^4 p_6^0 & z_5 \times {}^5 p_6^0 \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \end{bmatrix} \dot{q} =$$

$$[J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4 \quad J_5 \quad J_6] \dot{q} \quad (16)$$

对比(12)式,可知机械臂的雅可比矩阵为 $J(q) =$

$$[J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4 \quad J_5 \quad J_6]$$

机械臂末端抓持器 $\{e\}$ 在基座坐标系 $\{0\}$ 中的位姿矩阵为:

$${}^U T_e = \begin{bmatrix} {}^U R_e & {}^U P_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: ${}^U R_e$ — $\{e\}$ 相对于 $\{0\}$ 中的 3×3 旋转矩阵; ${}^U P_e$ — $\{e\}$ 在 $\{0\}$ 中的 3×1 笛卡尔坐标矩阵。

雷达相对于 $\{0\}$ 的变换矩阵记为 ${}^U T_r$,路锥在雷达坐标系的位姿记为 ${}^r T_c$,可得路锥在机械臂基坐标中的变换矩阵:

$${}^U T_c = {}^U T_r {}^r T_c = \begin{bmatrix} {}^U R_c & {}^U P_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

在 $\{0\}$ 坐标系下,抓持器若从 ${}^U T_e$ 运动至 ${}^U T_c$ 位姿,存在的变化矩阵为:

$${}^e T_c = {}^U T_c {}^U T_e^{-1} = \text{Trans}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \text{Rot}(z, \Delta \theta_z) \text{Rot}(y, \Delta \theta_y) \text{Rot}(x, \Delta \theta_x) \quad (19)$$

式中: $\text{Trans}(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ —沿 $\{0\}$ 中的 x, y, z 轴分别平移了 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$; $\text{Rot}(x, \Delta \theta_x)$ —绕 $\{0\}$ 中的 x 轴旋转 $\Delta \theta_x$ 角度,其余公式同理。

抓持器运行至路锥姿态的变化矩阵 ${}^e R_c$ 为:

$${}^e R_c = \text{Rot}(z, \Delta \theta_z) \text{Rot}(y, \Delta \theta_y) \text{Rot}(x, \Delta \theta_x) = \begin{bmatrix} c_x c_z & c_x s_x s_y - c_x s_z & s_x s_z + c_x c_z s_y & 0 \\ c_y s_z & c_x c_z + s_x s_y s_z & c_x s_y s_z - c_z s_x & 0 \\ -s_y & c_y s_x & c_x c_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $c_x = \cos(\Delta \theta_x)$; $s_x = \sin(\Delta \theta_x)$; $c_y = \cos(\Delta \theta_y)$; $s_y = \sin(\Delta \theta_y)$; $c_z = \cos(\Delta \theta_z)$; $s_z = \sin(\Delta \theta_z)$ 。

同理, ${}^e R_c$ 中元素的具体数值可以由公式 ${}^e R_c = {}^U R_c {}^U R_e^{-1}$ 求出,根据两者在矩阵同一位置的值相等,可解得抓持器的旋转量:

$$\begin{cases} \Delta \theta_z = \arctan\left(\frac{{}^e R_c(2,1)}{{}^e R_c(1,1)}\right) \\ \Delta \theta_y = \arctan\left(\frac{-{}^e R_c(3,1)}{{}^e R_c(1,1)c_z + {}^e R_c(2,1)s_z}\right) \\ \Delta \theta_x = \arctan\left(\frac{-{}^e R_c(2,3)c_z + {}^e R_c(1,3)s_z}{{}^e R_c(2,2)c_z - {}^e R_c(1,2)s_z}\right) \end{cases} \quad (21)$$

将 $\Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \theta_z$ 代入:

$${}^U T'_e = \text{Rot}(z, \Delta \theta_z) \text{Rot}(y, \Delta \theta_y) \text{Rot}(x, \Delta \theta_x) {}^U T_e \quad (22)$$

进一步得到抓持器的平移量:

$$\begin{cases} \Delta x = {}^U T_c(1,4) - {}^U T'_e(1,4) \\ \Delta y = {}^U T_c(2,4) - {}^U T'_e(2,4) \\ \Delta z = {}^U T_c(3,4) - {}^U T'_e(3,4) \end{cases} \quad (23)$$

在基坐标系中抓持器从 ${}^U T_e$ 到 ${}^U T_c$ 位姿的变化量为:

$$\Delta \mathbf{r} = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad \Delta \theta_x \quad \Delta \theta_y \quad \Delta \theta_z]^T \quad (24)$$

将 $\Delta \mathbf{r}$ 除以一个时间量 Δt ,可以得到在当前时刻抓持器从 ${}^U T_e$ 运动至 ${}^U T_c$ 所需空间速度为:

$$\dot{\mathbf{r}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (25)$$

由此建立机械臂运动控制模型,机械臂在一次循环内完成周期性运动,通过比较当前抓持器与目标的位姿偏差,由式(17 ~ 24)得到 $\Delta \mathbf{r}$,由式(25)计算抓持器运动到目标所需空间速度 $\dot{\mathbf{r}}$,并代入式(13)得到机械臂对应关节角速度 $\dot{\mathbf{q}}$,经积分环节得到机械臂的期望角度 \mathbf{q} ,将 \mathbf{q} 发送至机械臂执行运动,而后更新下一周期的目标位姿,在循环过程中,抓持器将迅速移动至目标位置。基于位置的机械臂运动控制被简化为一个伺服系统,机械臂充当系统中的执行环节。

控制模型如图 3 所示。

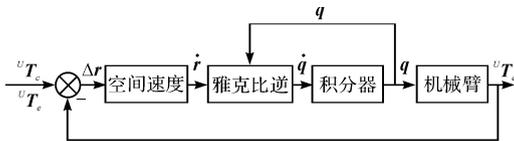


图 3 运动控制模型

4 机器臂动态抓取策略

采用关节角度控制机械臂运动,经正运动学方程可以求得末端抓持器的位姿,若要完成对路锥目标的伺服控制,还需将路锥在雷达坐标系中的平面位置转为一个 4×4 的位姿矩阵。在抓取过程中,抓持器保持在高度为 h_{catch} 的平面内运动, h_{catch} 小于路锥高度 h_{cone} 。由于机械臂的抓取范围有限,路锥未进入到可抓取范围内时,对机械臂进行位姿调整:作机械臂原点与路锥中心的连线 AC , R_{max} 为机械臂的运动极限圆弧半径,抓持器移动至 AC 与圆弧交点 P 处(抓取极限上距目标位置的最近点),抓持器张开,保持朝向路锥的姿态。

具体如图 4 所示。

雷达检测到路锥的距离为 \overline{BC} ,夹角为 β_1 , \overline{AB} 为机械臂在 X 轴方向上到雷达原点的偏移量,在三角形 ABC 中,利用几何关系可计算出路锥到机械臂原点的

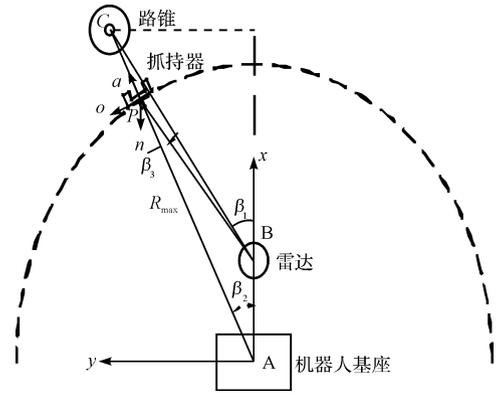


图 4 抓持器位姿示意图

距离 \overline{AC} :

$$\overline{AC} = \sqrt{(\overline{AB} + \overline{BC} \cos \beta_1)^2 + (\overline{BC} \sin \beta_1)^2} \quad (26)$$

夹角 β_2 为:

$$\beta_2 = \arcsin\left(\frac{\overline{BC} \sin \beta_1}{\overline{AC}}\right) \quad (27)$$

P 点在基坐标中的位置为: $P_x = R_{\text{max}} \cos \beta_2$, $P_y = R_{\text{max}} \sin \beta_2$, $P_z = h$ 。

在移动至距路锥最近点后,为满足抓持器始终朝向路锥,即抓持器 a 轴与图 4 中 AC 共线,需进一步对其进行姿态调整:抓持器绕自身所在坐标系 o 轴逆时针旋转 90° ,再绕自身 n 轴旋转 β_2 ,由于路锥为圆锥形,为了在抓取时抓持器更好贴合路锥,抓持器再绕自身 o 轴逆时针旋转 ϕ_o ,使抓持器呈向下倾斜状态。得到抓持器的最终位姿为:

$${}^U T_e = \text{Trans}(P_x, P_y, P_z) \text{Rot}\left(o, \frac{\pi}{2}\right) \text{Rot}(n, -\beta_2) \text{Rot}(o, \phi_o) =$$

$$\begin{bmatrix} -s(\phi_o)c(\beta_2) & -s(\beta_2) & c(\phi_o)c(\beta_2) & R_{\text{max}}c(\beta_2) \\ -s(\beta_2)s(\phi_o) & c(\beta_2) & s(\beta_2)c(\phi_o) & R_{\text{max}}s(\beta_2) \\ -c(\phi_o) & 0 & -s(\phi_o) & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中: $s(\phi_o) = \sin(\phi_o)$; $c(\phi_o) = \cos(\phi_o)$; $s(\beta_2) = \sin(\beta_2)$; $c(\beta_2) = \cos(\beta_2)$ 。

车往后运动,路锥进入机械臂可抓取范围,即 $\overline{AC} \leq R_{\text{max}}$, $\overline{BP} = \overline{BC}$ 。此时抓持器的位置为 $P_x = \overline{AB} + \overline{BC} \cos \beta_1$, $P_y = \overline{BC} \sin \beta_1$, $P_z = h$ 。姿态同样为朝向路锥。

路锥相对于机械臂基坐标系 $\{0\}$ 的运动速度记为 ${}^U v_c$,抓持器运动速度记为 ${}^U v_e$ 。由于机械臂在控制器比较当前位置与路锥位置存在偏差后才进行运动,运动的执行存在一定的滞后,在路锥刚进入可抓取范围 R_{max} 时, ${}^U v_c > {}^U v_e$,两者速度不一致,若在此时对路锥进行抓取,路锥与抓持器将会产生碰撞,对抓持器造成冲

击,影响机械臂的工作性能,因此本文提出速度补偿的抓取模式。

前文所述 Kalman 滤波算法在对位置信息进行预测的同时,也能够对运动目标的速度进行预测。经滤波得到的目标状态量 $S_{(k+1|k)}$ 中包含了路锥相对于 $\{0\}$ 坐标系的运动速度分量 v_{k+1} ,在预测下一时刻路锥位置 C_{k+1} 进入到半径为 R_{max} 的抓取范围后,机械臂末端将产生一个与路锥相对运动一致的速度 v_e 跟随路锥运动,取 ${}^U v_e = v_{k+1}$,将 ${}^U v_e$ 代入式(13) 得到机械臂的所需关节角速度 \dot{q} ,进而得到机械臂在经历一个循环周期 Δt 后的角度值:

$$q_{t+\Delta t} = q_t + \dot{q} \cdot \Delta t \quad (29)$$

$q_{t+\Delta t}$ 发送至机械臂执行运动,由正运动学方程计算抓持器运动后的位姿 ${}^U_{t+\Delta t} T_e$,将 ${}^U_{t+\Delta t} T_e$ 与当前路锥位姿 ${}^U_{t+\Delta t} T_c$ 进行对比,得到抓持器与路锥的新偏差量 $\|\Delta r\|$,若满足 $\|\Delta r\|$ 保持在 $\|\Delta r\| \leq d_{max}$ 时,抓持器闭合,完成抓取 d_{max} 为所设定抓持器关于路锥闭合的最大抓取距离。

路锥动态抓取流程如图 5 所示。

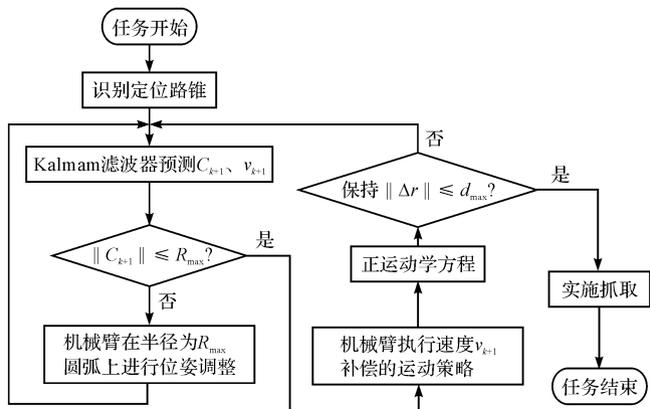


图 5 路锥动态抓取流程图

5 实验

由 ABB 公司 IRB120 的六自由度机械臂搭载于推车上,SLAMTEC 公司的 RPLIDAR - A2 激光雷达置于推车的前端。基于 VS2015 软件开发环境,本研究采用 C# 编程语言与机械臂二次开发函数库 ABB. Robotics 编写算法与运动控制界面程序。相较于文献[1 - 4] 中所述设备,该路锥取放系统取放范围大,能够完成对车后侧以及两侧路锥的取放,能够实现对路锥识别定位后准确抓取。

实验平台如图 6 所示。

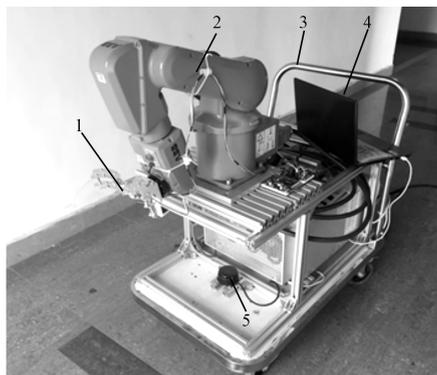


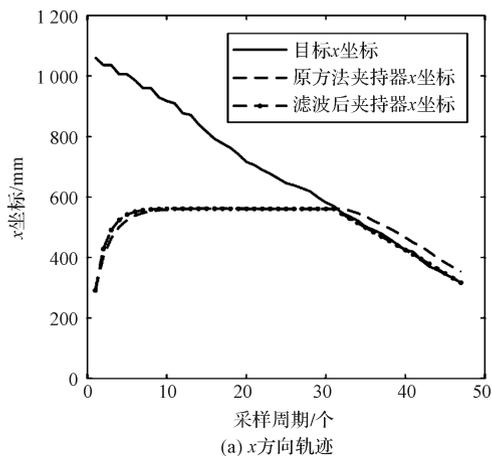
图 6 实验平台

1— 抓持器;2— 机械臂;3— 推车;4— 上位机;5— 雷达

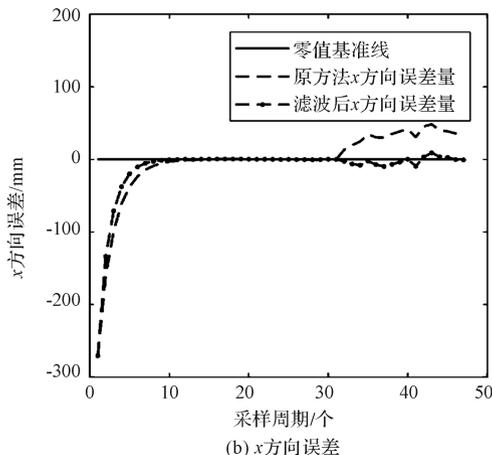
设置参数: $R_{max} = 568 \text{ mm}$, $d_{max} = 12 \text{ mm}$,采样周期为 0.1 s 。首先,机械臂运行至初始位置,移动推车朝向路锥运动,待雷达检测目标后,发送至机械臂,起初路锥位于抓取范围外,抓持器在抓取半径 R_{max} 上调整位姿;接着,当路锥进入 R_{max} 后,抓持器产生一个与路锥相对运动一致的速度跟随路锥运动;最后,在路锥与抓持器保持在抓取距离 d_{max} 以内时,夹爪闭合,完成抓取。

另外,提升抓持器高度,使得 $h_{catch} > h_{cone}$,沿同一路径移动推车,分别在 x 方向与 y 方向上,对比使用文中所提方法前后的机械臂目标跟踪效果。

机械臂目标跟踪效果对比图如图 7 所示。



(a) x方向轨迹



(b) x方向误差

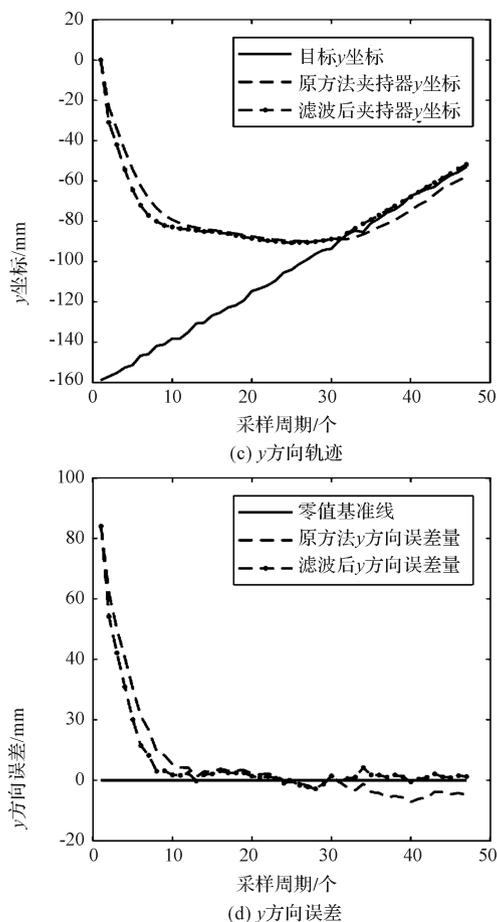


图 7 机械臂目标跟踪效果对比图

图 7 中:第 1 阶段约为 0 到第 30 个采样周期,其间机械臂在抓取半径上调整位姿;第 2 阶段约为 30 到第 47 个采样周期,其间机械臂跟随路锥运动。可以看出:在 x 与 y 方向上,相较于原先所使用的单纯点位控制方法,在加入位置预测与速度补偿后得到的运动轨迹更贴近于实际目标轨迹;为了便于比较路锥在未进入机械臂抓取范围时的跟踪精度,现将位于抓取范围外的路锥位置换算成在抓取极限圆弧上的目标位置,将抓持器位置与路锥在抓取极限半径上的位置做差值,可以得到在 x 方向上的跟踪误差分布,以及在 y 方向上的跟踪误差分布,可以看到:原先的单纯点位控制方法存在较大跟踪误差,且 x 方向上的误差大于 0 (y 方向上小于 0),这表明在跟随目标时抓持器所在位置超出路锥所在位置,即路锥与抓持器之间存在有明显碰撞,对比在通过位置预测与速度补偿方法后,跟踪误差控制在 11 mm 以内,且抓持器位置误差基本保持在零值

基准线附近,避免了抓持器与路锥间的碰撞,使机械臂能够更加平稳地完成对路锥的抓取。

6 结束语

针对路锥的动态抓取问题,本文构建了机械臂的雅克比矩阵,采用伺服运动控制模型,通过 Kalman 滤波算法对目标位置进行了预测,针对路锥相对于机械臂的位置,提出了机械臂抓取范围外的位姿调整策略,以及抓取范围内带速度补偿的抓取策略。

实验结果表明:引入 Kalman 滤波后,可以有效地减少系统误差,提高目标的跟踪精度,采用速度补偿的方式能够更加平稳地完成对路锥的动态抓取。

参考文献 (References):

- [1] LEE Y C, WHITE W A, VELINSKY S A. Integration and testing of a multistack automated cone machine[R]. California; California AHMCT Research Center, 2004.
- [2] VELINSKY S A, WHITE W A. Automated machine for highway cone placement and retrieval[J]. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 2004, 11(2): 174-194.
- [3] 张秀维. 交通路锥自动收放系统的设计与研究[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院, 2013.
- [4] 黄 珍, 舒 心, 唐文龙, 等. 路锥投收自动控制系统的研制[J]. *交通信息与安全*, 2017, 35(2): 48-58.
- [5] 郭凡良. 一种路锥自动回收和摆放装置[P]. 中国: 201720246392. 9, 2017-12-15.
- [6] 周子豪. 路锥自动摆放与回收装置[P]. 中国: 201720448794. 7, 2017-12-19.
- [7] JIA X, WU Z L, GUAN H. The target vehicle movement state estimation method with radar based on kalman filtering algorithm[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013 (347-350): 638-642.
- [8] WEILL L R, LAND P N D. The Kalman filter: an introduction to the mathematics of linear least mean square recursive estimation[J]. *International Journal of Mathematical Education in Science & Technology*, 1986, 17(3): 347-366.
- [9] NIKUB S. 机器人学导论——分析、控制及应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [10] 董志丹, 刘士荣, 姜宏超. 基于图像矩和矢量积法的六自由度机械臂视觉伺服控制[J]. *上海理工大学学报*, 2013, 35(3): 221-226.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

王兆权, 吴海彬, 叶锦华, 等. 基于 Kalman 滤波的移动机械臂动态抓取研究[J]. *机电工程*, 2019, 36(8): 851-856.

WANG Zhao-quan, WU Hai-bin, YE Jin-hua, et al. Dynamic catch for mobile manipulator based on Kalman filter[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(8): 851-856.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>