

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.046

基于视觉的吊装机器人卷扬随动控制研究

徐春博¹ 赵丁选^{1,2} 孔维天¹ 邹少元¹ 倪涛¹ 舒礼志¹

(1. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春 130022; 2. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 海洋浪涌对海洋物流吊装机械工作安全及可靠性有很大的影响。目前海浪运动补偿多基于 IMU 或 MRU 等船舶专用传感器,其成本较高。采用组合标识,提出基于视觉的吊装机器人卷扬随动控制方法。首先,对机械臂进行运动学分析以及手眼标定,采用视觉标识对复杂环境下的目标进行检测,采用主方向定位以及 DLT 算法对标识进行定位;然后通过建立卷扬系统模型,在速度环上采用伪微分反馈复合控制算法,使用基于双 S 形曲线运动规划加减算法进行目标运动跟踪、路径重规划,并采用加减速方法生成运动轨迹。通过搭建试验平台,模拟海上工作环境并进行静态目标和动态目标跟随试验,验证了卷扬升降控制的可行性以及随动控制策略的有效性。

关键词: 吊装机器人; 运动学分析; 手眼标定; 视觉标识定位; 运动规划

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)01-0417-10

OSID:



Visual Based Robotic Hoisting Motion Following Control

XU Chunbo¹ ZHAO Dingxuan^{1,2} KONG Weitian¹ ZOU Shaoyuan¹ NI Tao¹ SHU Lizhi¹

(1. College of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The marine economy plays a very important and positive role in the national economy and social development. Because the ocean surges have a great impact on the safety and efficiency of marine logistics hoisting machine. At present, the wave motion compensation is mostly based on ship-specific sensors such as IMU or MRU, and the cost is high. A combination of logos was used, and a vision-based robotic hoisting motion following control method was proposed. Firstly, the kinematics analysis and hand-eye calibration of the manipulator were carried out. By using visual marker, the target objects in complex environments can be detected and identified. The man direction and direct linear transfer algorithm was used to calculate the orientation and position of the marker. A combination marker resisting image noise and occlusion issues with pose confusion scheme was designed. A quaternion based Kalman filter was used for pose estimation of combined marker. Then by establishing the hoist system model, the pseudo-differential feedback compound control algorithm was used on the speed loop. Trajectory tracking performance was improved. Based on the double S-shaped curve motion planning algorithm, the target motion tracking and path re-planning were performed, and the acceleration/deceleration method was used to generate motion trajectory. Based on the comprehensive experimental platform of marine automatic and intelligent lifting equipment which can simulate the offshore working environment, the visual-based hoisting robot arm winch lifting and following control method was studied. And static targets and dynamic target following experiments were performed, the feasibility of the hoisting lift control and the effectiveness of the follow-up control strategy were verified.

Key words: hoisting robot; kinematics analysis; hand-eye calibration; visual marker based localization; motion planning

收稿日期: 2019-06-10 修回日期: 2019-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575219)

作者简介: 徐春博(1986—),男,博士生,主要从事机器人技术和复杂机械系统动力学建模研究,E-mail: xueb13@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 倪涛(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事机器人技术及应用和虚拟现实与仿真研究,E-mail: nitao@jlu.edu.cn

0 引言

在海洋浪涌的影响下,船舶产生了横倾、纵倾和升沉等运动,海洋物流吊装设备的安全性、可靠性和工作效率受到了严重的影响。目前主要通过海浪补偿、吊重减摆和主动轨迹规划等方法实现吊运的智能控制。

对于岸对船或船对岸吊装,虽然港口或海岸是静止的,但在浅岸海况较差时,仍需知道在浪涌作用下船舶相对港口地平面的升沉偏移,以实现补偿以及平稳的吊装作业^[1]。对于船对船的情况,王生海^[2]提出一种基于波浪趋势判断的主动式波浪补偿控制系统,通过气介式声学波浪仪和运动参考单元(Motion reference units, MRU)等传感器网络感受波浪起伏状况、船舶姿态等运动,由变参数比例积分微分算法(Proportion integral differential, PID)控制液压执行机构进行主动补偿。尹海兵等^[3]用MRU和位移传感器分别计算要求补偿位移和实际位移,并进行比较,进而通过调节液压缸位移补偿波浪对船体的影响。GODHAVN^[4]采用全球定位系统(Global positioning system, GPS)实时动态(Real time kinematic, RTK)和MRU估计船舶的运动姿态,并成功应用在海浪补偿系统中。徐小军等^[5]设计了一种基于数字信号处理(Digital signal processing, DSP)的船用起重机控制系统,具有良好的工作稳定性。缪鑫^[6]将伪微分控制策略和神经网络进行结合,提出了一种新的控制策略。SAGATUN^[7]针对船用吊装系统提出了前馈补偿的控制方法,实现了主动补偿控制技术。何平^[8]对前馈补偿和反馈校正结合的补偿系统进行了研究。冯林等^[9]采用基于模糊自适应的PID控制策略对主动升沉补偿系统进行研究。

上述研究大多采用MRU对补偿量进行测量,其价格昂贵,具有一定的时滞性,并且此种方式在作业过程中需要人工输入货物位置信息,应用成本较高。本文将计算机视觉引入海浪补偿问题中,提出一种基于视觉的卷扬随动控制系统,并尝试将运动补偿中保持相对静止的问题转换为运动跟随问题进行研究。该系统依托于实验室搭建的海洋物流装备智能控制模拟试验平台,采用机器视觉的方式,在手眼关系的基础上,实现对目标位置的定位与跟踪,进而控制吊装机械臂卷扬升降,实现随动控制。

1 系统组成

图1为卷扬随动控制系统,主要依托于搭建的

综合试验平台,其主要包括运动模拟平台、吊装机械臂、视觉相机及标识、卷扬机构等。运动模拟平台可根据海浪谱模型生成的波浪曲线模拟海浪运动对船舶造成的横摇、纵摇、垂荡等影响;卷扬机构安置于吊装机械臂的小臂末端,机械臂和卷扬整体模拟起重设备,实现折臂式起重机的回转、起吊、前伸等运动的自动控制,使末端卷扬到达指定的吊装点上方。系统的控制流程框图如图2所示。

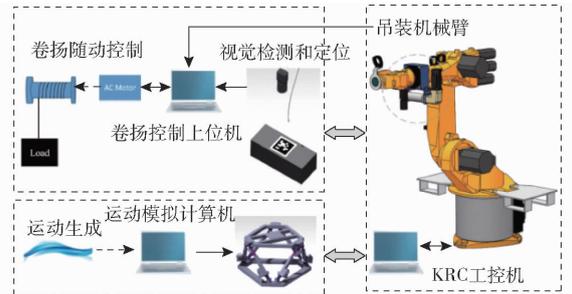


图1 基于视觉的吊装机械臂卷扬随动控制系统总体方案

Fig. 1 Overall plan of vision-based hoisting robot follow-up control system

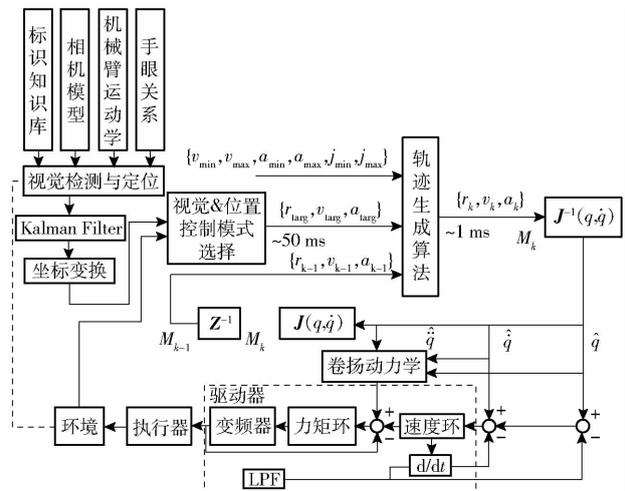


图2 基于视觉的吊装机械臂卷扬随动控制框图

Fig. 2 Block diagram of vision-based hoisting robot follow-up control system

如图2所示,控制系统主要分为视觉模块和运动控制模块。视觉模块在组合标识知识库标识、相机模型、卷扬执行机构和卷筒之间的手眼关系等前提信息基础上,实现对组合标识的检测和定位,并且通过机械臂运动学使卷扬处于正常的工作位置。在视觉系统检测到标识后,首先采用四元数法以及平均权值向量法实现子标识的位姿融合,其次进行坐标变换,得到了卷扬执行机构相对于标识目标对象的相对位姿,最后据此获取卷扬执行机构相对目标对象的高度。运动控制模块通过卷扬的运动雅可比函数将运动控制量从笛卡尔空间变换到关节空间中,采用速度环反馈控制的方式,实现对关节控制量的连续控制。

2 运动学分析及手眼标定

2.1 机器人正运动学

采用 Kuka R16 六自由度机械臂模拟折臂式起重结构。该机器人前三关节中,大臂模拟折臂式起重机的的主臂,小臂模拟折臂式起重机的辅助臂,采用文献[10]的约定对吊装机械臂的运动学进行建模,如图3所示。其中,吊装机械臂的末端为卷扬系统在机械臂小臂上的固定点,其坐标系为 $\{O_4\}$,卷扬系统即末端执行器的坐标系为 $\{O_5\}$,这两个坐标系均为相对前一个坐标系固定的位姿,坐标系 $\{O_5\}$ 不随卷筒的转动而变化。

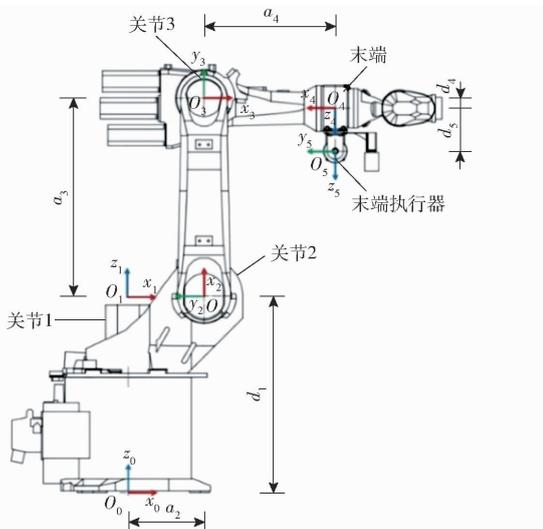


图3 吊装机器人及卷扬几何坐标

Fig.3 Hoisting robot and hoist geometric coordinates

为方便从关节角3到末端执行器坐标系的建立

$$\begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_2c_3c_4 - c_2s_4 & s_2(c_3s_4s_5 + s_3c_5) - c_2c_4s_5 & s_2(s_3s_5 - c_3s_4c_5) + c_2c_4c_5 & -s_2(410c_3c_4 - 82s_3 + 210c_3) - 410c_2s_4 - 90s_2 \\ c_2c_3c_4 - s_2s_4 & -c_2(c_3s_4s_5 + s_3c_5) - s_2c_4s_5 & -c_2(s_3s_5 - c_3s_4c_5) + s_2c_4c_5 & c_2(410c_3c_4 - 82s_3 + 210c_3) - 410s_2s_4 + 90c_2 \\ s_3c_4 & c_3c_5 - s_3s_4s_5 & s_3s_4c_5 + c_3s_5 & 410s_3c_4 + 82c_3 + 210s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 s 表示 \sin , c 表示 \cos 。

通过整理得到

$$\sin(2\theta_1)(n_x n_y - o_x o_y - a_x a_y) + \cos(2\theta_1)(o_x^2 + a_x^2 + n_x^2 - o_y^2 - a_y^2 - n_y^2) = 1$$

令

$$m = n_x n_y - o_x o_y - a_x a_y \\ n = o_x^2 + a_x^2 + n_x^2 - o_y^2 - a_y^2 - n_y^2$$

解得

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \left(\arctan \left(\pm \frac{1}{\sqrt{r^2 - 1}} \right) - \arctan \frac{n}{m} \right)$$

同理,由式(3)中左右两边3行1列和3行4

与坐标变换的推导,将末端和末端执行器也按照上述关节参数的定义统一到 D-H 表,其中关节3到末端坐标系 $\{O_4\}$ 之间的距离作为杆件4,末端 $\{O_4\}$ 到末端执行器 $\{O_5\}$ 的距离作为杆件5,根据图3建立的 D-H 参数如表1所示。

表1 机器人 D-H 参数

Tab.1 D-H parameters of robots

i	$\alpha_i / (^\circ)$	a_i / mm	d_i / mm	$\theta_i / (^\circ)$
1	0	0	0.675	$[-185, 185]$
2	90	0.26	0	$[-125, 60]$
3	0	0.68	0	$[-140, 244]$
4	90	0.45	0.035	180
5	0	0	0.147	-90

令 $\{O_i\}$ 到 $\{O_{i-1}\}$ 的旋转矩阵为 ${}^{i-1}R$, $\{O_i\}$ 坐标原点到 $\{O_{i-1}\}$ 的平移向量为 ${}^{i-1}P$,则可以得到 $\{O_i\}$ 到 $\{O_{i-1}\}$ 的齐次变换矩阵为 ${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R & {}^{i-1}P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,再由 D-H 参数即可得到齐次变换矩阵 ${}^{i-1}T$ 。

2.2 机器人逆运动学

根据文献[11]的矩阵逆乘解析法求逆解。由正运动学已知末端执行器相对基座总变换矩阵为

$${}^0T_5 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 \quad (1)$$

$({}^0T_1)^{-1}$ 、 $({}^1T_2)^{-1}$ 、 $({}^2T_3)^{-1}$ 依次左乘式(1)有

$$({}^0T_1)^{-1} {}^0T_5 = {}^1T_5 = {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 \quad (2)$$

$$({}^1T_2)^{-1} ({}^0T_1)^{-1} {}^0T_5 = {}^2T_5 = {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 \quad (3)$$

$$({}^2T_3)^{-1} ({}^1T_2)^{-1} ({}^0T_1)^{-1} {}^0T_5 = {}^3T_5 = {}^3T_4 {}^4T_5 \quad (4)$$

由式(2)可得

列相等可解得

$$\theta_2 = \arctan \frac{c_1(410n_x - p_x) - s_1(410n_y - p_y)}{410n_z - p_z}$$

同理,由式(4)中3行4列元素为0可解得

$$\theta_3 = \arctan \frac{p_x s_1 - p_y c_1}{p_x c_1 s_2 + p_y s_1 s_2 + p_z c_2}$$

2.3 手眼系统标定

对机械臂进行两次旋转轴非平行的位姿变换可得到相机相对参考物的坐标变换 ${}^oH_{c,1}$ 、 ${}^oH_{c,2}$,机械

臂末端执行器相对基座的坐标变换 ${}^bH_{t,1}$ 、 ${}^bH_{t,2}$,可构建具有封闭环的坐标转换

$$({}^bH_{t,2})^{-1}{}^bH_{t,1}X = X({}^oH_{c,2})^{-1}{}^oH_{c,1} \quad (5)$$

其中 $X = \begin{bmatrix} R_X & t_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (X \in SE(3))$

进行多次测量以消除测量噪声带来的误差,并进行整体迭代优化求解

$$A_k X = X B_k \quad (6)$$

其中 $A_k = {}^{t,k}A_{t,k-1} = ({}^bH_{t,k})^{-1}{}^bH_{t,k-1}$
 $B_k = {}^{c,k}B_{c,k-1} = ({}^oH_{c,k})^{-1}{}^oH_{c,k-1}$

用 Park - Martin 算法^[12]对 X 分步求解

$$\begin{cases} R_{A_k} R_X = R_X R_{B_k} \\ R_{A_k} t_X + t_{A_k} = R_{B_k} t_{B_k} + t_X \end{cases} \quad (7)$$

对式(7)旋转部分右乘 R_X^T 可得

$$R_{A_k} = R_X R_{B_k} R_X^T \quad (8)$$

其在李群中的对数映射为

$$\lg R_{A_k} = \lg(R_X R_{B_k} R_X^T) \quad (9)$$

其中 $\lg R = \begin{cases} 0 & (\theta = 0) \\ \frac{\theta}{2\sin\theta}(R - R^T) & (\theta \neq 0) \end{cases}$

其中 $\theta = \arccos((\text{Tr}(R) - 1)/2)$ 。令 $\lg A_k = [\alpha_k]$ 、 $\lg B_k = [\beta_k]$, 即

$$[\alpha_k] = R_X [\beta_k] R_X^T = [R_X \beta_k] \quad (10)$$

由式(10)转换为最小二乘拟合问题, 即

$$\min \sum_{k=1}^n \| R_X \beta_k - \alpha_k \|^2 \quad (11)$$

得到 R_X 的最优解为

$$R_X = (M^T M)^{-\frac{1}{2}} M^T \quad (12)$$

其中 $M = \sum_{k=1}^n \lg R_{B_k} \lg R_{A_k}^T$

最后求得 X 的平移向量为

$$t_X = (C^T C)^{-1} C^T D \quad (13)$$

其中 $C = \begin{bmatrix} I - R_{A_1} \\ I - R_{A_2} \\ \vdots \\ I - R_{A_n} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} t_{A_1} - R_X t_{B_1} \\ t_{A_2} - R_X t_{B_2} \\ \vdots \\ t_{A_n} - R_X t_{B_n} \end{bmatrix}$

通过控制吊装机械臂在不同位置共采集 16 幅图像,如图 4 所示。

最终得到摄像头与卷扬卷筒之间的手眼关系坐标变换矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 0.9972 & -0.0427 & -0.0617 & 0.0565 \\ 0.0418 & 0.9990 & -0.0158 & 0.1304 \\ 0.0623 & 0.0132 & 0.9980 & -0.0250 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

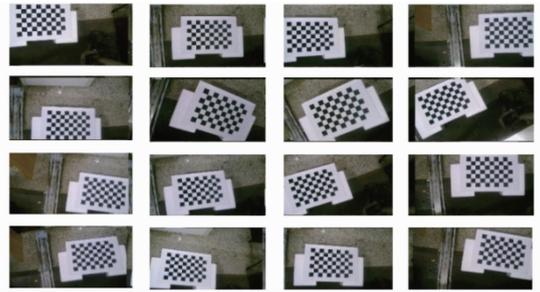


图 4 手眼标定采集图像

Fig. 4 Hand-eye calibration image acquisition

3 基于视觉标识的目标定位跟踪

3.1 标识的识别与定位

标识识别主要包括图像预处理与解码。本小节以 AprilTags 标识为例,对其进行检测识别算法处理,处理流程如图 5 所示。

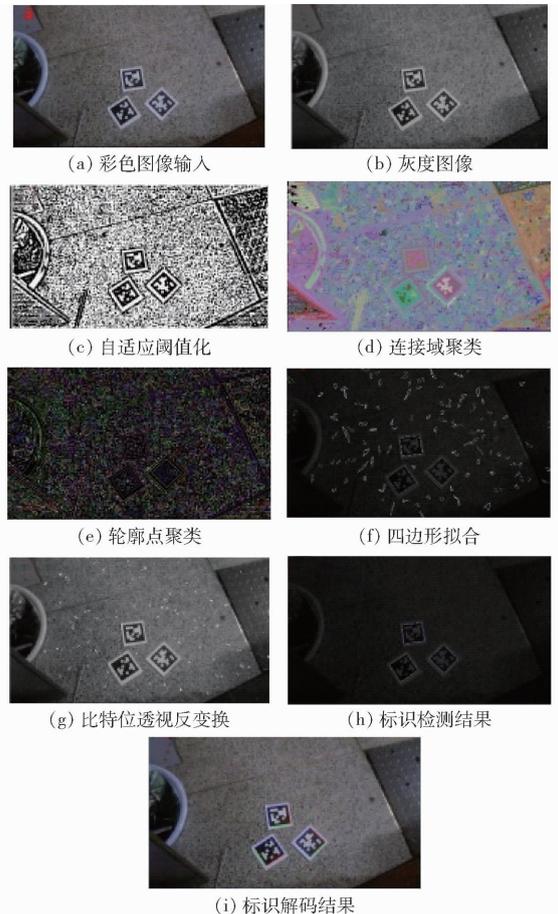


图 5 复杂环境下标识检测识别流程图

Fig. 5 Identification detection flow chart in complex environment

首先对采集的图像进行灰度处理,将图像特征分割为特征相同区域和不同区域,并对灰度图进行二值化处理,加大图像对比度,过滤对比度不足的区域。接下来基于联合查找聚类算法,采用 Jordan 曲线定理查找每个像素块的近邻域具有相同明暗的部

分^[13],并拟合成具有封闭轮廓的连通域,结合低通滤波以增加聚类分割效率,结果如图 5d、5e 所示。再对封闭轮廓进行四边形线段拟合,以少量角点作为节点,通过主成分分析(Principal component analysis,PCA)对两相邻节点之间边界轮廓点进行线性拟合,最佳拟合线段为第一主成分的特征向量,效果如图 5f 所示。解码之前按照预先设定的标识种类,对提取的轮廓透视投影为正方形图像,划分具有相同单元格规格的区域,从左至右分层提取标识的黑色边框内部采样点的黑白像素信息作为该处比特位,效果如图 5g 所示。

基于 Hamming 距离对 Apriltags 标识进行解码识别,将预定义的 Hamming 编码以哈希表形式生成并对编码信息序列进行校验,最终获得具有唯一编码的识别号,检测结果如图 5h 所示。

为了提高定位精度,对原图四边形区域边缘梯度进行提取,沿着垂直边缘法线方向朝标识内查找梯度值最大的位置排除噪点。以边缘梯度为权重,对法线方向的点进行加权平均,对同一边的加权平均点做线段拟合,获得标识细化的边缘,识别效果如图 5i 所示。

标识定位分为两步,一是在 Hamming 解码时通过 Hamming 校验计算获得标识相对正方位的旋转角度^[14];二是通过已知的多个特征点解算图像中标识四边形相对相机的位姿,其流程如图 6 所示。

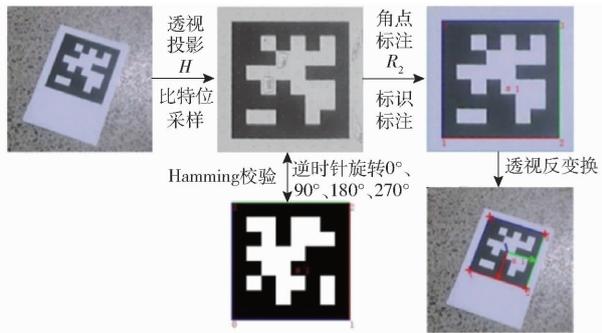


图 6 标识位姿解算流程图

Fig. 6 Identification pose calculation flow chart

为获得标识的主方向,定义距离计算函数为

$$H(m_t, r_{ot}(m_k)) = \sum_{i=1}^{n \times n} m_{t,i} \otimes r_{oti}(m_k) \quad \left(r_{ot} = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, 2\pi \right) \quad (14)$$

式中 m_t ——目标标识

m_k ——待识别标识

n ——标识编码格行、列数

\otimes ——异或操作符

旋转因子 r_{ot} 将标识逆时针旋转 4 次,每次旋转 90° ,当 $H(m_t, r_{ot}(m_k))$ 为零时即为标识的主方向。

通过直接线性转换(Direct linear transformation, DLT)算法求解标识坐标系相对相机坐标系的变化矩阵。已知理想成像模型有

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = s\mathbf{K} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

令 $\mathbf{h}_i = [h_{1i} \ h_{2i} \ h_{3i}]^T (i=1,2,3)$,有

$$[\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3] = s\mathbf{K}[\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}] \quad (16)$$

对式(15)左右两边同乘像素坐标向量的叉乘矩阵,有

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & v \\ 1 & 0 & -u \\ -v & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{O}_{3 \times 1}$$

式中 \mathbf{O} ——零矩阵

展开后可得到

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -X_1 & -Y_1 & -1 & vX_1 & vY_1 & v_1 \\ X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_1 & -u_1Y_1 & -u_1 \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中

$$\mathbf{x} = [h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{31} \ h_{32} \ h_{33}]^T$$

\mathbf{x} 存在 8 个未知量,构建四组像素点信息,矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -X_1 & -Y_1 & -1 & v_1X_1 & v_1Y_1 & v_1 \\ X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_1 & -u_1Y_1 & -u_1 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -X_4 & -Y_4 & -1 & v_4X_4 & v_4Y_4 & v_4 \\ X_4 & Y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_4X_4 & -u_4Y_4 & -u_4 \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{O}_{9 \times 1}$$

通过奇异值分解(Singular value decomposition, SVD)求解最小化 $\|\mathbf{Ax}\|$ 的优化问题,矩阵 \mathbf{A} 最小奇异值对应向量即为 \mathbf{x} 解集。

3.2 组合标识设计及位姿选取

单个标识可能会因为采样点被遮挡而导致识别失败。故本文采取组合标识的设计。其优势在于:①能够增加对标识遮挡的鲁棒性。②能够用于姿态计算的角点增多,提高定位精度。

组合标识有二维、三维两种方案,由于本文相机为俯视作业,采用二维组合标识(图 7)。

求解组合标识的位姿,可先将子标识中心点平移到组合标识的中心

$${}^c\overline{\mathbf{M}}_o = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} {}^c\mathbf{M}_{m,i} ({}^o\mathbf{M}_{m,i})^{-1} \quad (18)$$

式中 ${}^c\mathbf{M}_{m,i}$ ——标识相对相机的变换矩阵

采用双 S 形曲线对已知始末位置的运动进行规划,其次在该曲线的基础上实现运动跟随中的卷扬速度过渡以及加减速决策。加加速度边界值变化 7 段式 S 形曲线如图 9 所示。

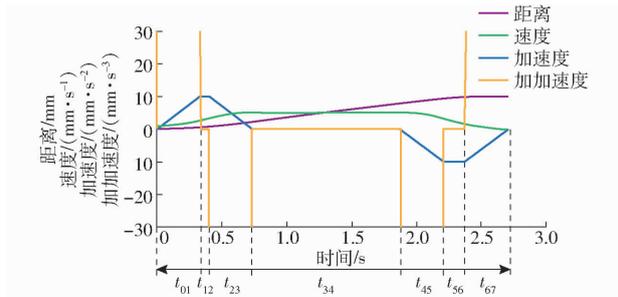


图 9 双 S 形曲线运动规划

Fig. 9 Double S-curve motion planning

假设运动的初始状态为 (s_0, v_0) , 时间 T 后的目标状态为 (s_f, v_f) 。根据该距离以及设定的速度,各规划阶段的加加速度、加速度、速度和位移之间的关系可递推表示如下:

(1) 加速段加加速

$$\begin{cases} s(t) = s_0 + v_0 t + \frac{1}{6} j t^3 \\ v(t) = v_0 + j \frac{t^2}{2} \\ a(t) = j t \\ j(t) = j \end{cases} \quad (t \in t_{01}) \quad (28)$$

(2) 加速段匀加速

$$\begin{cases} s(t) = s_0 + v_0 t + \frac{j t_{01}^3}{6} (3t^2 - 3t_{01}t + t_{01}^2) \\ v(t) = v_0 + j t_{01} \left(t - \frac{t_{01}}{2} \right) \\ a(t) = j t_{01} \\ j(t) = 0 \end{cases} \quad (t \in t_{12}) \quad (29)$$

(3) 加速段加减速

$$\begin{cases} s(t) = s_0 + \frac{v_0 t_{03}}{2} + v_{lim} \left(t - \frac{t_{03}}{2} \right) + j \frac{(t_{03} - t)^3}{6} \\ v(t) = v_{lim} - j \frac{(t_{03} - t)^2}{2} \\ a(t) = j t_{01} - j t \\ j(t) = j \end{cases} \quad (t \in t_{23}) \quad (30)$$

(4) 匀速段

$$\begin{cases} s(t) = s_0 + \frac{t_{03}}{2} (v_0 - v_{lim}) + v_{lim} t \\ v(t) = v_{lim} \\ a(t) = 0 \\ j(t) = 0 \end{cases} \quad (t \in t_{34}) \quad (31)$$

(5) 减速段减加速

$$\begin{cases} s(t) = s_f - \frac{v_f t_{47}}{2} - v_{lim} \left(t - T + \frac{t_{47}}{2} \right) - j \frac{\left(t - T + \frac{t_{47}}{2} \right)^3}{6} \\ v(t) = v_{lim} - j \frac{\left(t - T + \frac{t_{47}}{2} \right)^2}{2} \\ a(t) = -j \left(t - T + \frac{t_{47}}{2} \right) \\ j(t) = -j \end{cases} \quad (t \in t_{45}) \quad (32)$$

(6) 减速段匀减速

$$\begin{cases} s(t) = s(t_{45}) - \frac{j}{6} [3(t - T + t_{47})^2 - 3t_{45}(t - T + t_{47}) + t_{45}^2] \\ v(t) = v_{lim} - j \left(t - T + t_{47} - \frac{t_{45}}{2} \right) \\ a(t) = -j t_{45} \\ j(t) = 0 \end{cases} \quad (t \in t_{56}) \quad (33)$$

(7) 减速段减减速

$$\begin{cases} s(t) = s_f - v_f (T - t) - j \frac{(T - t)^3}{6} \\ v(t) = v_f + j \frac{(T - t)^2}{2} \\ a(t) = -j (T - t) \\ j(t) = j \end{cases} \quad (t \in t_{67}) \quad (34)$$

其中速度上限 $v_{lim} = v_f + j t_{45} (t_{47} - t_{45})$ 。

对于运动的目标可以对运动规划过程进行简化^[22]。假设加加速度变化未达到上限,即 $t_{12} = t_{56} = 0$, 此时运动规划可划分为 5 段,这种方式的速度和加速度曲线仍连续。设采样周期为 T ,加速阶段和减速阶段如图 10 所示。

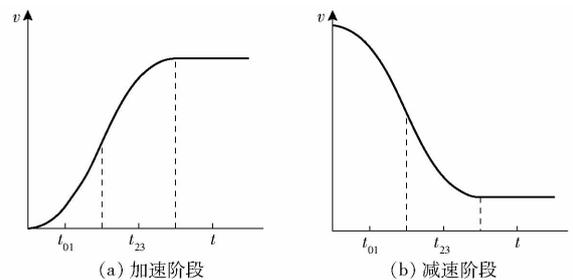


图 10 双 S 形曲线加减速运动规划

Fig. 10 Double S-curve acceleration and deceleration motion planning

由图 10 可知,加速过程和减速过程分别为从加速到匀速和减速到匀速的过程,结合 S 形运动规划曲线,加速阶段为

$$\begin{cases} v_{i,f} = v_{i,0} + jt_m^2 \\ s_{i,acc} = 2v_{i,0}t_m + jt_m^3 \\ T = 2t_m + t_c \\ s_i = s_{i,acc} + v_{i,f}t_c \end{cases} \quad (35)$$

减速阶段为

$$\begin{cases} v_{i,f} = v_{i,0} - jt_m^2 \\ s_{i,dec} = 2v_{i,0}t_m - jt_m^3 \\ T = 2t_m + t_c \\ s_i = s_{i,dec} + v_{i,f}t_c \end{cases} \quad (36)$$

式中 t_m ——加速度的加速或减速时间

t_c ——加速度的巡航时间

根据式(35)、(36)可得,加速过程的加加速度

为 $j_{acc} = \frac{(v_f - v_0)^3}{(v_f T - s)^2}$, 加加速时间为 $t_{m,acc} = \frac{v_f T - s}{v_f - v_0}$, 减

速过程与加速过程相同,可以获得 T 内任意时刻的加速度和速度,实现运动轨迹的加减速平滑。

当加加速度、加速度和速度超出机械系统的限制时,将目标数值设置为能够允许的最大值,并将本周期内由于速度未达到期望值而造成未达到期望位移量的剩余值转入到下一周期的运动规划;当 t_m 小于 0 时,表明该周期内不足以完成整个加速或减速过程,此时可设定 $t = 0$,得到新规划的当前目标速度

$$v_f = \frac{2s}{T} - v_0。$$

5 试验及结果分析

试验平台主要由上下 2 个 Stewart 六自由度平台和包括卷扬机构在内的吊装机械臂组成,如图 11 所示。



图 11 海洋物流装备综合试验平台

Fig. 11 Marine logistics equipment comprehensive experimental platform

5.1 静态目标下卷扬升降试验

为了验证具有完整运动规划周期内卷扬升降控制策略的可行性,本文首先设计了静态目标下的卷扬升降试验,首先位于卷扬上的彩色摄像机检测作业环境中的静止目标标识,在识别后对其进行定位,

获取其相对位姿关系;其次根据手眼关系获得在竖直方向上卷扬到目标标识的距离。

经计算及多次调试,本文所提出的控制算法各增益参数最终分别为:位置环比增益 K_p 为 900,速度前馈增益 $K_{v,f}$ 为 60,加速度前馈增益 $K_{a,f}$ 为 4,速度环比增益 $K_{v,p}$ 为 0.3,积分增益 $K_{v,i}$ 为 40,前馈增益 $K_{v,f}$ 为 0.05。根据试验目的,该高度即为绳索需下放的距离,由双 S 形曲线运动规划算法生成运动轨迹,根据该轨迹离散化后的电机规划轨迹如图 12、13 所示。

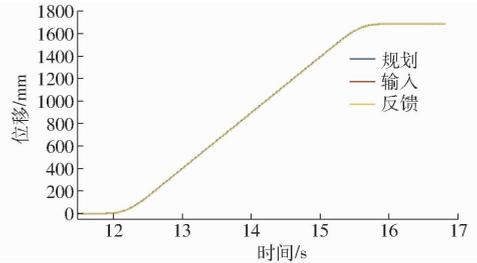


图 12 卷扬升降控制双 S 形曲线(规划)位移曲线
Fig. 12 Displacement curve of hoist lifting control with double S-curve

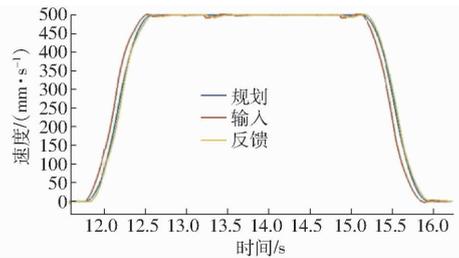


图 13 规划与反馈速度曲线

Fig. 13 Error diagram of planning curve and feedback curve

根据试验结果可以看到,双 S 形曲线规划算法可以实现合理规划及平稳启停。由图 12、13 可以看出,在复合算法控制下,规划位移曲线误差较小,位置跟随较为紧密,反馈速度变化曲线在运动控制过程中无较大速度突变,从速度规划上有效避免了过程震荡。综上,本文提出的控制策略具有一定的可行性。

5.2 动态目标下卷扬随动试验

动态目标跟随试验是由 Stewart 平台做升降运动,在视觉定位下,卷扬在升降运动方向对目标对象的运动进行跟随控制试验。考虑电动缸运动行程,假设下平台的升降运动输入曲线为

$$h = 120\sin(0.99t) + 230 \quad (37)$$

由于主要研究卷扬在升降方向的随动情况,本文采用时间序列的位姿输入模式,仅有 z 轴方向按照上述曲线运动,其他位姿无输入量,平台通过洗出算法得到各个电动缸输入量。运动模拟模块控制平台使其先到达下平台电动缸运动行程中位,然后开

始根据运动曲线输入实现 z 轴方向升沉运动模拟, 平台整体运行时间约为 75 s, 运动模拟平台 z 轴方向运动反馈位移如图 14 所示。

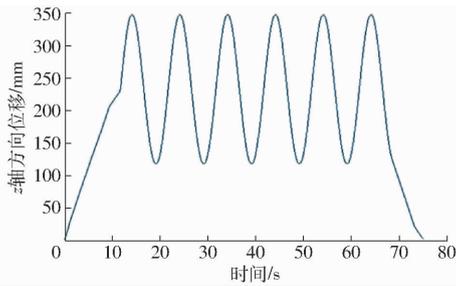


图 14 运动模拟平台升沉运动反馈曲线

Fig. 14 Heaving motion feedback curve of motion simulation platform

跟随试验的整体过程如图 15 所示。在满足吊装工作空间的前提下, 视觉检测模块不断检测并识别运动中的视觉标识, 并通过手眼关系换算得到卷扬执行机构相对目标在 z 轴方向上的坐标, 该视觉运动轨迹如图 15 所示。当卷扬运动控制模块接收到随动控制开始指令后, 规划算法根据位移变化, 从当前位置开始进行轨迹规划并加减速决策, 并将视觉周期内重规划的运动轨迹点作为执行机构在控制周期内的控制量输入。

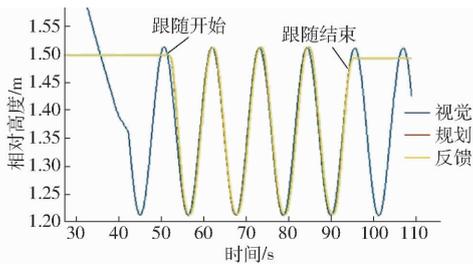


图 15 卷扬随动控制结果

Fig. 15 Result of hoisting follow-up control

当跟随结束指令发出后, 卷扬根据当前速度规

划减速段进行减速运动, 直至停止。图 16 为执行机构反馈位移与视觉位移的误差变化曲线, 由该曲线可以看出, 在跟随开始时, 由于加速段的存在, 位置误差变化增大, 而后速度逐渐增大, 误差逐渐缩小; 在稳定跟随后, 在 0.5 个平台运动周期内的跟随误差均方根约为 7.27%, 在跟随结束时, 由于减速段已无目标量存在, 故误差逐渐增大。该试验结果证实了提出的随动控制策略的有效性。

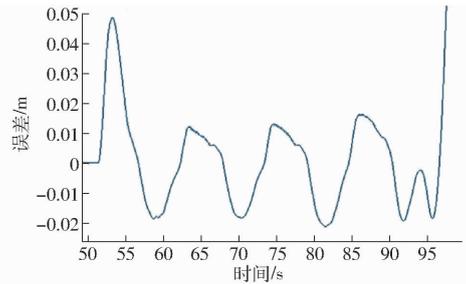


图 16 跟随误差曲线

Fig. 16 Error curve of following motion

6 结论

(1) 搭建了海洋物流装备综合试验平台, 设计了卷扬控制模块和视觉检测模块, 由视觉系统检测组合标识, 通过运动学解算使卷扬处于正常工作位置, 之后进行坐标变换, 得到卷扬执行机构相对于标识目标对象的相对位姿, 据此获取卷扬执行机构相对目标对象的高度。

(2) 分别进行了静态目标和动态目标下的卷扬升降试验, 验证了双 S 形曲线规划算法可以实现合理规划及平稳启停, 验证了卷扬升降控制的可行性; 在卷扬对目标对象的运动跟随控制中, 能够在稳定跟随后使卷扬有效且平稳地跟随目标对象运动, 验证了随动控制策略的有效性。

参 考 文 献

- [1] 金飞. 岸边集装箱起重机浪涌补偿控制系统[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2013.
JIN Fei. Swell compensation control system of the shore container crane[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013. (in Chinese)
- [2] 王生海. 垂直方向主动式波浪补偿控制系统设计研究[D]. 大连:大连海事大学, 2013.
WANG Shenghai. The design research on active heave compensation control system in vertical direction[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)
- [3] 尹海兵, 刘冬一. 复合型液压缸在主动波浪补偿系统中的应用[J]. 流体传动与控制, 2015(4):36-38.
YIN Haibing, LIU Dongyi. Application of compound cylinder on active heave compensation system[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2015(4):36-38. (in Chinese)
- [4] GODHAVN J M. High quality heave measurements based on GPS RTK and accelerometer technology[C]//Oceans IEEE, 2002: 309-314.
- [5] 徐小军, 何平, 陈循, 等. 基于 DSP 的主动式波浪补偿起重机控制系统设计[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1):114-118.
XU Xiaojun, HE Ping, CHEN Dun, et al. Design of control system for an active heave compensation crane with DSP[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(1):114-118. (in Chinese)
- [6] 缪鑫. 基于神经网络的主动式波浪补偿吊机系统研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2017.

- [7] SAGATUN S I. Active control of underwater installation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(5): 743 - 748.
- [8] 何平. 主动式波浪补偿控制系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.
HE Ping. Study on the active heave compensation control system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] 冯林,张新福,翟性泉,等. 基于模糊自适应PID的波浪补偿控制器研究[J]. 船舶工程,2012(增刊2):107 - 109.
FENG Lin, ZHANG Xinfu, ZHAI Xingquan, et al. Study of heave compensation controller based on fuzzy self-adaptive PID [J]. Ship Engineering, 2012(Supp. 2):107 - 109. (in Chinese)
- [10] BRUNO S, OUSSAMA K. Springer 机器人手册[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [11] 姜宏超,刘士荣,张波涛. 六自由度模块化机械臂的逆运动学分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(7):1348 - 1354.
JIANG Hongchao, LIU Shirong, ZHANG Botao. Inverse kinematics analysis for 6 degree-of-freedom modular manipulator[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2010, 44(7):1348 - 1354. (in Chinese)
- [12] PARK C F, MARTIN J B. Robot sensor calibration: solving $AX = XB$ on the euclidean group[J]. Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(5):717 - 721.
- [13] BERTHOLD K P H. 机器视觉[M]. 王亮,蒋欣兰,译. 北京:中国青年出版社, 2014.
- [14] 刘经纬. 增强现实中基于三维标志物的跟踪技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2011.
- [15] ALBERTO L C, JOSE M C. Accuracy analysis of marker-based 3D visual localization[C]//XXXVII Jornadas de Automatica Workshop, 2016.
- [16] MARKLEY F L, CHENG Y, CRASSIDIS J L, et al. Quaternion averaging[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(4):1193 - 1197.
- [17] HARTLEY R, TRUMPF J, DAI Y, et al. Rotation averaging[J]. International Journal of Computer Vision, 2013, 103(3): 267 - 305.
- [18] ITZHACK Y B. New method for extracting the quaternion from a rotation matrix[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2000, 23(6):1085 - 1087.
- [19] KJERLLAND B M. Offshore wind turbine access using Knuckle Boom cranes[D]. Norway: University of Agder, 2016.
- [20] CHEN L. Application of root configuration theory in dynamic system design[C]//ASME Winter Annual Meeting, 1987.
- [21] CHEN L. Selection of control coefficients for the optimum linear system[M]. American Society of Mechanical Engineers, 1984.
- [22] 夏旭. 船用稳定平台运动规划算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
XIA Xu. The research of motion planning algorithm for stabilized platform on ship [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)