

DOI:10.11918/202006012

吊装用起重机自动定位视觉伺服控制

佟圣皓,张珂,石怀涛,赵金宝

(沈阳建筑大学 机械工程学院,沈阳 110168)

摘 要:传统起重机自动定位方法精度低,稳定性差,不能形成真正的闭环控制,现有起重机视觉定位方法普遍存在抗扰动性能差和视觉雅可比矩阵参数难以获得等问题。为了解决外部扰动影响视觉伺服定位精度和稳定性的问题,建立了扰动工况下吊装末端执行器的位姿数学模型,提出一种基于自抗扰控制器的视觉伺服扰动抑制方法。根据图像投影特性,得出雅可比矩阵参数与图像特征微分关系方程,设计了雅可比矩阵参数估计值自适应更新率,并建立闭环动力学方程。根据图像特征误差,构建李亚普诺夫函数,给出了系统稳定性证明。进行仿真与实验分析,结果表明:当视觉误差收敛后,位置与速度曲线均趋于零值,说明在视觉不确定性和恒定、瞬时扰动的情况下,本文方法仍然具有令人满意的定位精度。通过与其他控制方法的对比结果分析可知,本文方法在保证视觉伺服系统定位精度的同时,能够加快视觉误差的收敛速度,具有更好的稳定性,因此,适用于吊装用起重机自动定位视觉伺服系统。

关键词: 起重机;自动定位;视觉伺服;自抗扰控制;自适应

中图分类号: TH21 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)01-0149-07

Vision servo control for automatic positioning of hoisting crane

TONG Shenghao, ZHANG Ke, SHI Huaitao, ZHAO Jinbao

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The traditional crane automatic positioning method has low accuracy and poor stability, which can not form a real closed-loop control. The existing crane vision positioning methods generally have problems such as poor anti-interference performance, difficulty in convergence of vision error and difficulty in obtaining visual Jacobian matrix parameters. To solve the problem that the external disturbance affects the positioning accuracy and stability of visual servo system, this paper establishes the mathematical model of the position and attitude of the end effector under the disturbance condition, and proposes a visual servo disturbance suppressing method based on the Active Disturbance Rejection Controller. According to the characteristics of image projection, the relation between the parameters of Jacobian matrix and the differential of image feature is obtained, the adaptive updating rate of the parameters of Jacobian matrix is designed, and the closed-loop dynamic equation is established. According to the image feature error, the Lyapunov function is constructed and the system stability is proved. The simulation result shows that when the visual error converges, the position and velocity curves tend to zero. The method in this paper has satisfactory positioning accuracy in the case of visual uncertainty and external disturbance. It can ensure the positioning accuracy of the visual servo system and accelerate the convergence speed of the visual error under the disturbance condition. So, it is suitable for the control of the automatic positioning visual servo system of the hoisting crane.

Keywords: crane; automatic positioning; visual servo; active disturbance rejection control; self-adaptive

近年来,用于核电站或大型装配式建筑综合施工平台上的吊装用起重机,由于其特殊的使用环境,起重机运行过程中的稳定性与定位准确性是起重吊装作业的首要考虑因素^[1-2]。传统的定位方法是在起重机传动轴上安装一个绝对值编码器^[3]。绝对

值编码器将轴的转动转换为移动距离,进行定位控制。但是,当起重机车轮与轨道发生滑动的时候,偏差是不可避免的。此外,射频技术^[4]也在这一领域得到了应用,但由于信号的屏蔽和干扰,其性能大打折扣。文献[5]建立了包括扰动因素在内的吊装动力学模型,但是,其并未将视觉信息模型用于自主精确定位。文献[6]实现了基于 PLC 控制的起重机吊装精确定位,但是该方法并未考虑起重机运行过程中的扰动工况及其对控制系统带来的影响。文献[7]提出了一种基于李雅普诺夫的未标定算法来估计视觉伺服定位系统中的雅可比矩阵。文献[8]重

收稿日期:2020-06-02

基金项目:国家“十三五”重点研发计划课题(2017YFC0703903);

辽宁省教育厅项目(lnqn202009);

国家自然科学基金项目(52075348)

作者简介:佟圣皓(1989—),男,博士,讲师;

张珂(1969—),男,教授,博士生导师

通信作者:张珂,zhangke@sjzu.edu.cn

点研究基于光度矩的视觉伺服技术。但上述两种方法稳定性难以保证。文献[9]提出了一种基于神经网络的视觉伺服方案,但对神经网络的构建提出了更高的要求。文献[10]提出了一种基于嵌入式概念的视觉伺服定位方法,但多摄像头系统的精度受到限制,增加了系统的处理负荷。

在起重机视觉伺服定位过程中,存在外部环境扰动和视觉雅可比矩阵参数难以获得等问题。本文通过构建自抗扰控制器进行扰动抑制,设计自适应更新算法对雅可比矩阵参数值进行自适应估计,提高起重机视觉伺服系统定位精度和鲁棒性。

1 模型建立

1.1 吊装动力学模型

四自由度吊装简化模型如图 1 所示, G 表示世界坐标系, v_x 表示大车行走装置沿 X 轴的运动速度, v_y 表示小车行走装置沿 Y 轴的运动速度, v_z 表示重物沿 Z 轴的运动速度, ω_φ 表示重物绕 Z 轴的旋转角速度。

理想状态下,吊装动力学模型可以表示为

$$M(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{v})\boldsymbol{v} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{Q} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \varphi, 0, 0]^T \in \mathbb{R}^6$ 表示重物的位置状态向量,包括位移向量 $\boldsymbol{\eta}_a = [x, y, z]^T$ 和角度向量 $\boldsymbol{\eta}_b = [\varphi, 0, 0]^T$, $\boldsymbol{v} = [v_x, v_y, v_z, \omega_\varphi, 0, 0]^T \in \mathbb{R}^6$ 表示运动速度向量,包括线速度向量 $\boldsymbol{v}_a = [v_x, v_y, v_z]^T$ 和角速度向量 $\boldsymbol{v}_b = [\omega_\varphi, 0, 0]^T$ 。 $\boldsymbol{M}(\cdot) > 0$ 表示系统的正定惯性矩阵, $\boldsymbol{C}(\cdot)$ 是科里奥利向心矩阵, $\boldsymbol{G}(\cdot)$ 表示重力矢量, $\boldsymbol{Q}$ 表示控制矢量^[11]。

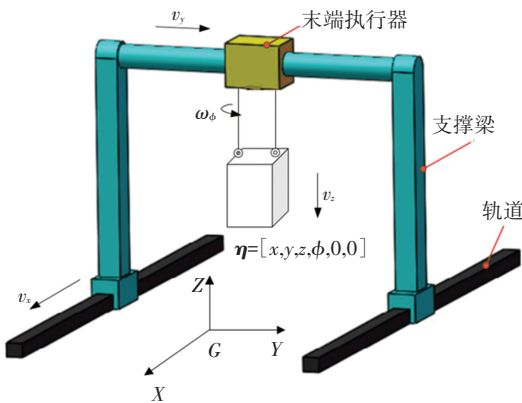


图 1 吊装起重机模型

Fig.1 Model of hoisting crane

但在实际吊装定位工程中,考虑吊装设备自身因素而存在的不确定性和外界干扰,本文引入扰动项,将吊装动力学方程描述如下:

$$M(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{v})\boldsymbol{v} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{Q} + \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})$ 表示阻尼项, $\boldsymbol{\tau}$ 表示扰动项。

1.2 视觉投影模型

将摄像机以“手在眼”的形式固定在吊装末端执行器上,如图 2 所示。我们假定相机坐标系 C 与末端执行器中心重合,则相机与末端执行器位置与运动速度一致。 G 表示世界坐标系, C^* 表示期望位置相机坐标系。

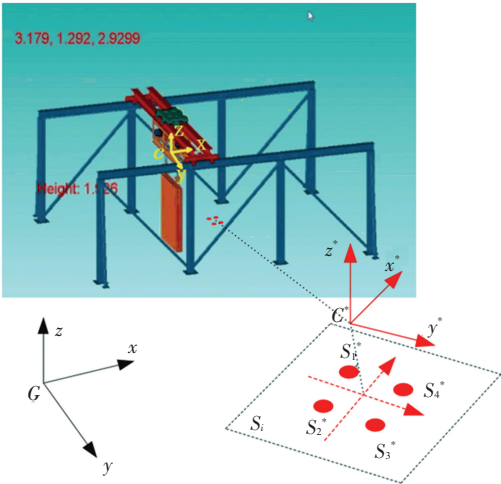


图 2 视觉投影模型

Fig.2 Visual projection

$\boldsymbol{S}_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$ 和 $\boldsymbol{S}_i^* = (X_i^*, Y_i^*, Z_i^*)^T$ 分别表示相机坐标系 C 和期望位置相机坐标系 C^* 中的特征点坐标,对 $\boldsymbol{S}_i$ 进行微分计算可得

$$\dot{\boldsymbol{S}}_i = \boldsymbol{v}_a + \boldsymbol{v}_b \times \boldsymbol{S}_i \quad (3)$$

根据焦距与成像关系^[12],可得

$$\begin{cases} x_i = \frac{l}{Z_i} X_i \\ y_i = \frac{l}{Z_i} Y_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: l 表示焦距, x 和 y 表示图像物理坐标。然后我们进行图像坐标系与像素坐标系转换:

$$\begin{cases} u = \frac{x_i}{dx} + u_0 = \alpha_1 x_i + u_0 \\ v = \frac{y_i}{dy} + v_0 = \alpha_2 y_i + v_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: α_1 表示 x 方向上单位距离内像素的个数,而 α_2 则表示 y 方向上内像素的个数, u_0, v_0 表示图像平面的原点。根据透视投影原理^[13],计算图像坐标系和期望坐标系中特征点的坐标:

$$\boldsymbol{s}_i = [u_i, v_i]^T = \frac{\boldsymbol{F}}{Z_i} [x_i, y_i]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{s}_i^* = [u_i^*, v_i^*]^T = \frac{F}{Z_i} [x_i^*, y_i^*]^T \quad (7)$$

式中: $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \alpha_1 l & 0 \\ 0 & \alpha_2 l \end{bmatrix}$, 而 u_i, v_i 表示特征点在像素坐标系中的坐标。

根据目标特征微分方程, 我们可以这样定义图像特征, 视觉雅可比矩阵与运动速度之间的关系:

$$\dot{\mathbf{s}}_i = \mathbf{J}_c \mathbf{v} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{v}$ 表示运动速度, $\mathbf{J}_c$ 是依赖于相机参数和图像深度的雅可比矩阵。

根据实时目标特征 $\mathbf{s}$ 和期望目标特征 $\mathbf{s}^*$, 则图像特征误差可表示如下:

$$\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}^* \quad (9)$$

在 $\mathbf{s}^*$ 为常数的情况下, 对上式进行微分可得

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{J}_c \mathbf{v} \quad (10)$$

2 基于图像的视觉伺服

2.1 自抗扰控制器设计

利用视觉信息进行四自由度吊装定位反馈, 将目标特征点个数设为 4, 精确定位的目的是使特征点在图像平面中的投影趋于期望位置, 即视觉误差逐渐趋于零。我们利用雅可比矩阵将视觉误差定义为

$$\boldsymbol{\sigma} = \hat{\mathbf{J}}_c^+ \mathbf{e} \quad (11)$$

式中 $\hat{\mathbf{J}}_c^+$ 是估计雅可比矩阵的伪逆^[14], $\mathbf{e}$ 是图像特征误差。

扰动工况下, 末端执行器的位姿公式可以表示如下:

$$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta}_b + \boldsymbol{\eta}_\tau \quad (12)$$

式中, $\boldsymbol{\eta}_b$ 表示控制系统位姿反馈信号, $\boldsymbol{\eta}_\tau$ 表示扰动位姿信号。

由于线性自抗扰具有广泛的通用性和较好的抗扰动性能, 将比例积分控制转化为二阶自抗扰控制算法, 建立位姿数学模型

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}(t) = B_o \mathbf{e}(t) + \gamma(\boldsymbol{\eta}(t), \mathbf{e}(t), \boldsymbol{\tau}(t)) \quad (13)$$

式中: B_o 表示高频增益, $\gamma(\boldsymbol{\eta}(t), \mathbf{e}(t), \boldsymbol{\tau}(t))$ 代表观测总扰动项。

设 $\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3]$, 其中 $f_1 = v, f_2 = \dot{v}, f_3 = y$, 则式(13)可以写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{f}} = \mathbf{M}_a \mathbf{f} + \mathbf{N}_a \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{P}_a \dot{\boldsymbol{\eta}} \\ \boldsymbol{\eta} = \mathbf{H}_a \mathbf{f} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{N}_a = \begin{bmatrix} 0 \\ B_o \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{P}_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{H}_a = [1 \ 0 \ 0].$$

由此设计的线性扩张状态观测器可以表示为

$$\dot{\hat{\mathbf{f}}}(t) = \mathbf{M}_a \hat{\mathbf{f}} + \mathbf{N}_a \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{L}_o (\mathbf{v} - \mathbf{H}_a \hat{\mathbf{f}}) \quad (15)$$

式中: $\hat{\mathbf{f}}$ 表示 $\mathbf{f}$ 的估计值, $\mathbf{L}_o$ 表示观测器增益。

为了得到渐进稳定项, 对式(15)相关项进行合并, 可得

$$\dot{\hat{\mathbf{f}}}(t) = (\mathbf{M}_a - \mathbf{L}_o \mathbf{H}_a) \hat{\mathbf{f}} + \mathbf{N}_a \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{L}_o \mathbf{v} \quad (16)$$

式中: 当 $\mathbf{M}_a - \mathbf{L}_o \mathbf{H}_a$ 逐渐趋于 0 时, $\hat{f}_1$ 趋近于 v , $\hat{f}_2$ 趋近于 $\dot{v}$, $\hat{f}_3$ 趋近于 y 。

为了消除系统扰动, 设定

$$\boldsymbol{\eta}(t) = \frac{\lambda_p(r(t) - \hat{f}_1(t) + \lambda_d(\dot{r}(t) - \hat{f}_2(t)) - \hat{f}_3(t))}{B_o} = \frac{\lambda_o(\dot{r}(t) - \hat{f}(t))}{B_o} \quad (17)$$

式中: $\dot{r}(t)$ 为扩张状态信号, λ_o 是反馈增益, 且 $\lambda_o = [\lambda_p/B_o \ \lambda_d/B_o \ 1/B_o]$ 。

2.2 自适应算法设计

根据图像投影特性, 可以将雅可比矩阵与图像特征微分关系表示如下:

$$\dot{\mathbf{s}} = \hat{\mathbf{J}}_c \mathbf{v} = \boldsymbol{\psi}(\dot{\boldsymbol{\eta}}) \hat{\boldsymbol{\theta}}_c \quad (18)$$

式中 $\boldsymbol{\psi}(\dot{\boldsymbol{\eta}})$ 是不依赖于相机内外参数的位姿映射矩阵^[15]。 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_c$ 表示估计雅可比矩阵 $\hat{\mathbf{J}}_c$ 中的参数向量。

根据动力学方程(2), 位姿模型(13)以及图像特征微分方程(18), 将视觉伺服系统控制方程定义如下:

$$\begin{cases} \mathbf{Q} + \boldsymbol{\tau} = \mathbf{G}(\boldsymbol{\eta}) + \|\dot{\boldsymbol{\eta}}\| \mathbf{K}_1 \boldsymbol{\psi}(\dot{\boldsymbol{\eta}}) \hat{\boldsymbol{\theta}}_c - \mathbf{K}_2 \dot{\boldsymbol{\eta}} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} = -\mathbf{K}_3 \hat{\mathbf{J}}_c^+ \mathbf{e} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3$ 均为正定增益矩阵。

根据方程(2)和方程(19), 得闭环动力学方程

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta}) \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{D}(\dot{\boldsymbol{\eta}}) = \|\dot{\boldsymbol{\eta}}\| \mathbf{K}_1 \boldsymbol{\psi}(\dot{\boldsymbol{\eta}}) \hat{\boldsymbol{\theta}}_c - \mathbf{K}_2 \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (20)$$

雅可比矩阵参数估计值的更新率定义为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_c = -\|\dot{\boldsymbol{\eta}}\| \mathbf{B}_o^{-T} \mathbf{K}_1 \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (21)$$

根据图像特征误差, 构建李雅普诺夫函数

$$V(t) = \frac{1}{2} \|\mathbf{e}(t)\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) \quad (22)$$

对李雅普诺夫函数进行求导

$$\dot{V}(t) = \frac{d}{dt} \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) = \mathbf{e}^T(t) \dot{\mathbf{e}}(t) \quad (23)$$

将图像特征误差微分方程(9)和视觉伺服系统控制方程(31)代入(35), 可得

$$\dot{V}(t) = e(t)^T \dot{e}(t) = -e(t)^T J_c K_3 \hat{J}_c^+ e(t) \quad (24)$$

由于 K_3 正定, $J_c K_3 \hat{J}_c^+$ 半正定, 有 $e(t)^T J_c K_3 \hat{J}_c^+ e(t) \geq 0$, 则 $\dot{V}(t) \leq 0$ 。根据李雅普诺夫稳定性原理可知该控制系统是稳定的。

视觉伺服控制架构如图 3 所示, 系统获得参考视觉特征 s 与期望视觉特征 s^* , 图像特征误差 e 可

以表示为(9)。视觉与控制信号处理框架中包含雅可比矩阵估计和系统控制方程。雅可比矩阵参数估计值的更新率定义为式(21), 系统控制方程表示为(19)。自抗扰控制框架中, P 表示被控对象, ESO 表示线性扩张状态观测器, λ_0 表示反馈控制增益。位姿数学模型表示为式(13)。

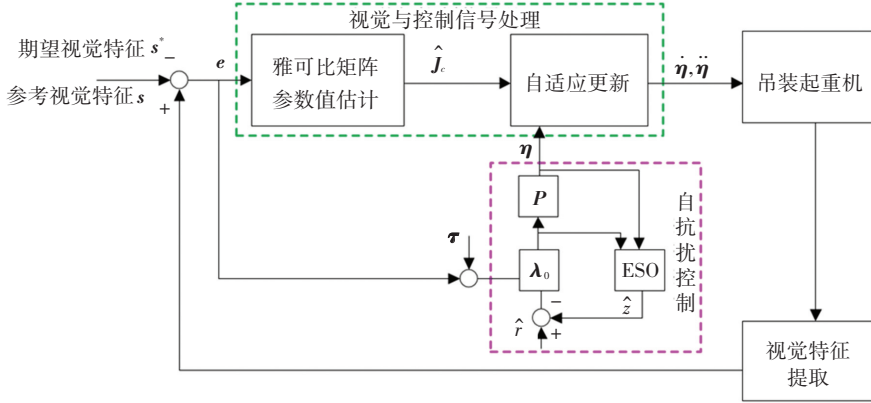


图 3 基于自抗扰控制的视觉伺服架构

Fig.3 Visual servo architecture based on Active Disturbance Rejection Control

3 仿真

3.1 仿真结果分析

本节将所提出的视觉伺服定位方法应用于仿真平台。仿真研究了该控制器在外部扰动工况下的控制性能。该仿真研究的目标是在提出算法的控制下, 使吊装执行器到达期望位姿。与实际情况一致, 采用了“手在眼”的相机固定方式。在精确定位过程中, 认为目标点在视域范围内。为了模拟真实摄像机投影模型, 使用了一个可视化工具箱, 基本参数: 焦距 8 mm, 成像像素帧 1 024×1 024。施加于控制量中的恒定扰动项设置为 $[1, 1, 1, 0.5, 0, 0]^T$, 系统采样时间 10 ms, 系统参数设置:

$$K_1 = \text{diag}\{0.9, 0.65, 0.4, 0.25, 0, 0\}$$

$$K_2 = \text{diag}\{0.8, 0.65, 0.65, 0.6, 0, 0\}$$

$$K_3 = \text{diag}\{0.6, 0.6, 0.4, 0.2, 0, 0\}$$

该仿真研究使用的电脑配置为 Intel Core i5 2.67 GHz CPU, 4 GB RAM。在仿真中不考虑延迟, 即在理想状态下不计算视觉特征提取和处理的时间, 且视觉误差曲线平滑。我们将采样的数据作为后续分析和计算的更新数据。

图像平面上的初始特征点和期望特征点如图 4(a) 所示。 s_1, s_2, s_3, s_4 表示初始特征点, s_1^*, s_2^*, s_3^* ,

s_4^* 表示期望特征点。在图 4(b) 中, t_1, t_2, t_3, t_4 表示 4 个特征点的移动轨迹。可以看到, 虽然在初始位置和期望位置之间有一定的位移, 但是最终仍然可以被驱动到准确的位置。在整个运动过程中, 我们以特征中心点作为记录点, 在三维空间中显示其轨迹, 如图 4(c) 所示。从仿真曲线中可以看出, 在视觉误差收敛后, 位置与速度均在零点处保持稳定, 说明存在视觉不确定性和恒定扰动的情况下, 本文方法仍然具有令人满意的定位精度。本文方法采用自抗扰控制算法来减小外部干扰的影响, 基于自适应算法实现雅可比矩阵参数估计, 并建立闭环动力学方程实现精确定位控制。仿真结果表明, 控制算法可以平稳地将对象驱动到目标位置, 且具有较好的定位精度与收敛性。

3.2 对比分析

为了进一步验证本文方法的性能, 将其与其他几种控制方法进行对比研究, 包括: 比例积分控制 (PI) 视觉伺服系统, 滑模控制 (SMC) 视觉伺服系统, 比例滑模控制 (PSMC) 视觉伺服系统。采用同样初始条件进行对比仿真, 将视觉累积误差作为评价指标, 对比结果如图 5 所示。视觉累积误差公式表示如下:

$$\xi = |\sigma_x| + |\sigma_y| + |\sigma_z| + |\sigma_\varphi| \quad (25)$$

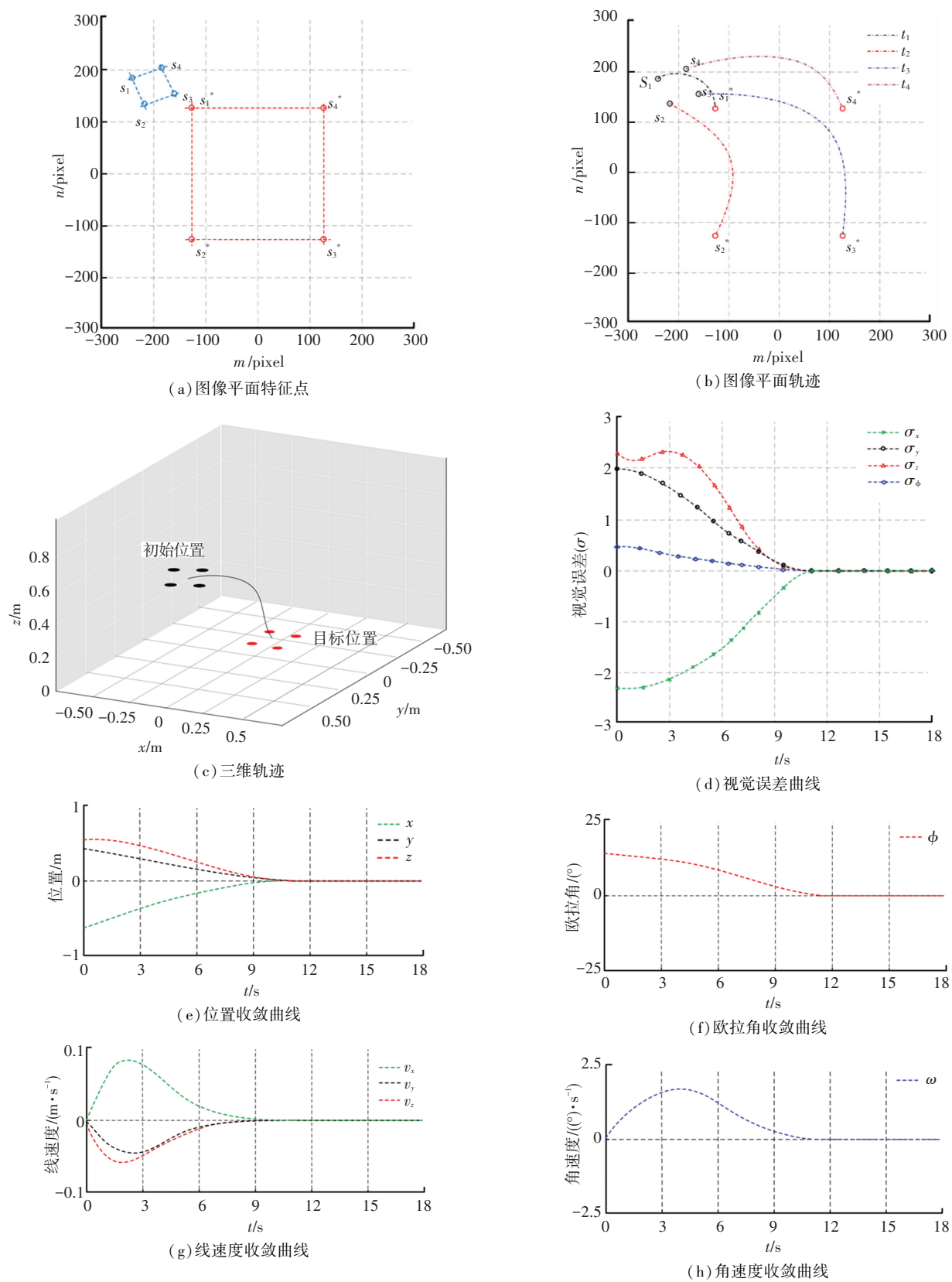


图 4 仿真结果分析

Fig.4 Analysis of simulation results

具体定量比较的结果见表 1。由收敛时间可以看出相比其他方法本文方法在收敛速度方面提高了 17% 左右。由图 5 可以看出,在初始视觉累积误差相同的情况下,采用本文方法的视觉累积误差比其

他方法更早收敛,虽然本文提出方法比其他视觉伺服的单次循环计算时间长,但本文提出方法的迭代循环次数更少,总收敛时间最短,说明它可以更快地到达目标点。此外,视觉累积误差最终可以准确地

收敛到零值,说明目标点定位精度高。本文方法通过将比例积分控制转化为二阶自抗扰控制算法,建立位姿数学模型,在高频增益与图像误差乘积的基础上增加了位姿观测扰动项,大大提高了位姿数学模型的表达精度,并可以更好的消除扰动。由于自抗扰控制较好的抗扰动性能以及基于自适应算法实现雅可比矩阵参数估计,并建立闭环动力学方程实现精确定位控制,使得本文方法在扰动工况下相比其他方法具有更好的收敛性能。

表 1 定量对比结果

Tab.1 Quantitative comparison results

方法	收敛时间/s	单次循环计算时间/ms	迭代循环次数
本文方法	10.8	103	105
PSMC	11.8	101	117
SMC	12.2	98	125
PI	12.9	94	137

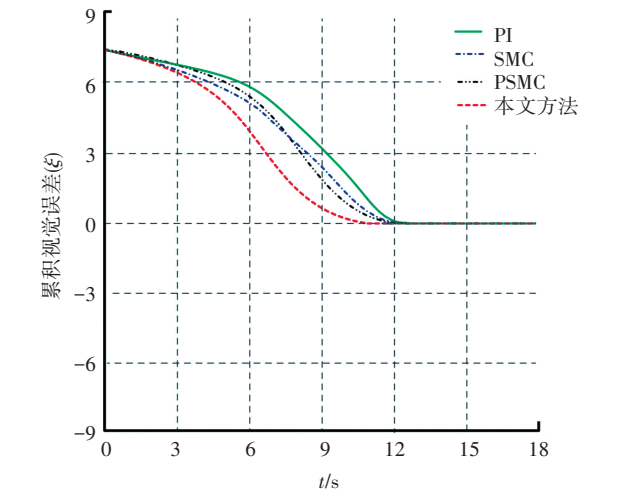


图 5 仿真对比结果

Fig.5 Comparison of simulation results

4 实 验

在上述仿真中采用在控制量中施加恒定扰动的方式,分析了恒定扰动工况下本文方法与比例积分控制(PI)视觉伺服系统,滑模控制(SMC)视觉伺服系统和比例滑模控制(PSMC)视觉伺服系统的收敛性能与定位精度。本节中,进行实验对比分析上述几种方法对随机瞬时扰动的抑制能力及收敛性能。本实验在实验室门式起重机平台上进行,实验台如图 6 所示。吊装重物固定在起重机电磁挂钩上,电磁挂钩由固定在小车上的末端控制器驱动。将 OMRON 编码器同轴固定在旋转电机轴端,将 MiniAHRS (3Dsuit) 固定在电磁挂钩上,可以通过速比来测量各个方向的运动速度。将相机固定在吊装重物底部位置,通过手动操作系统将起重机初始定

位到某一位置,然后启动视觉伺服控制系统,将吊装重物驱动到目标点位置。

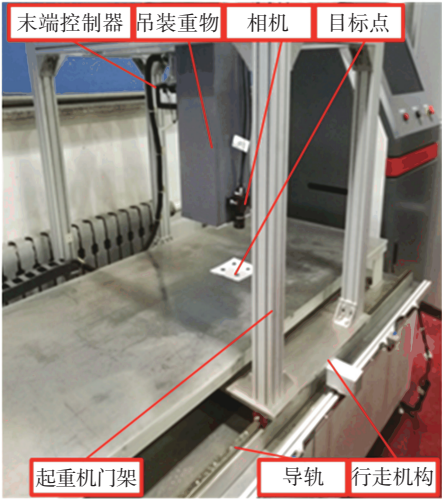


图 6 实验台

Fig.6 Experimental bench

在实验过程中,通过在吊装重物上施加瞬时敲击模拟吊装过程中受到的外部瞬时扰动。实验对比结果如图 7 所示。从实验结果中可以看出,在 4.5 s 左右施加于吊装重物上的瞬时敲击对视觉伺服控制系统产生影响,累积视觉误差曲线发生了突变,其中采用本文方法的累积视觉误差曲线在突变处具有单峰特性,而其他几种对比方法的累积视觉误差曲线在突变处具有双峰特性。这说明本文方法具有较好的扰动抑制能力,受到外部瞬时扰动的情况下,仍然可以快速收敛,并且最终成功收敛到零值。且实验结果与仿真结果基本相符,验证了仿真结果的正确性。

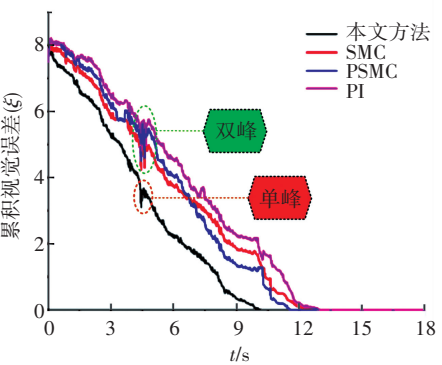


图 7 实验对比结果

Fig.7 Comparison of experimental results

5 结 论

本文提出了一种吊装用起重机自动定位视觉伺服控制方法。首先,建立了吊装动力学模型和视觉投影模型。针对外部扰动影响视觉伺服定位精度和稳定性的问题,将扰动工况下,末端执行器的位姿表

示为系统反馈信号和扰动位姿信号。基于二阶自抗扰控制算法,建立位姿数学模型,设计了自抗扰控制器进行扰动抑制。而后,构建雅可比矩阵参数与图像特征微分关系。根据动力学方程,位姿模型以及视觉特征微分方程定义视觉伺服系统控制方程。并设计雅可比矩阵参数估计值的自适应更新率,实现了雅可比矩阵参数值的估计。通过仿真与实验分析验证了本文提出方法的有效性,通过仿真与实验对比结果可知,本文方法在保证视觉伺服系统定位精度的同时,有效提高了视觉误差的收敛速度,具有视觉伺服控制的高精度与强鲁棒性。

参考文献

[1] 吕宇飞. 基于动力学分析的核环吊运行定位研究[D]. 大连:大连理工大学,2018:35
LÜ Yufei. Research on positioning of nuclear ring crane based on dynamic analysis[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2018: 35

[2] 祁鹏, 曹旭阳, 吕宇飞. 三代核环行起重机结构刚度对精确定位的影响[J]. 起重运输机械, 2018, 523(9):104.
QI Peng, CAO Xuyang, LÜ Yufei. The influence of the structural rigidity of the third generation nuclear ring crane on the precise positioning[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2018, 523(9):104

[3] 翁振粤. PLC 和旋转编码器在塔式起重机位置控制中的应用[J]. 机电工程技术, 2013, (6):157
WENG Zhenyue. Application of PLC and rotary encoder in position control of tower crane [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2013, (6):157. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2013.06.042

[4] 徐亮, 单珊. 无线射频技术在造船起重机定位系统中的应用[J]. 工程建设与设计, 2019, (13):191
XU Liang, SHAN Shan. The application of radio frequency technology in shipbuilding crane positioning system [J]. Construction & Design for Engineering, 2019, (13):191. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2019.07.061

[5] 张洁. 基于自抗扰控制技术的吊车控制研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016:12
ZHANG Jie. Research on crane control based on ADRC technology

[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016:12

[6] 秦长海. 基于视觉定位的起重机智能化控制系统[J]. 建筑机械化, 2009(05):46
QIN Changhai. Intelligent control system of crane based on visual positioning[J]. Construction Mechanization, 2009(05):46. DOI:10.13311/j.cnki.conmec.2009.05.002

[7] NAVARRO A D, LIU Y H. Fourier-based shape servoing: a new feedback method to actively deform soft objects into desired 2D image contours[J].IEEE Transactions on Robotics, 2017, 99:1. DOI: 10.1109/TRO.2017.2765333

[8] TAHRI O, TAMTSIA A Y, MEZOUAR Y, et al. Visual servoing based on shifted moments [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(3):798. DOI: 10.1109/TRO.2015.2412771

[9] WANG F J, LIU Z, CHEN L P. Adaptive neural network-based visual servoing control for manipulator with unknown output nonlinearities[J]. Information Sciences: An International Journal, 2018, 15: 1

[10] KORNUTA T, ZIELINSKI C. Robot control system design exemplified by multi-camera visual servoing[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 77: 499. DOI: 10.1007/s10846-013-9883-x

[11] GAO J, PROCTOR A, BRADLEY C. Adaptive neural network visual servo control for dynamic positioning of underwater vehicles [J]. Neurocomputing, 2015, 167:604. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.04.028

[12] QIU Y, LI B, SHI W, et al. Visual servo tracking of wheeled mobile robots with unknown extrinsic parameters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 15: 1. DOI: 10.1109/TIE.2019.2891407

[13] LIU H, ZHU W, DONG H, et al. An adaptive ball-head positioning visual servoing method for aircraft digital assembly[J]. Assembly Automation, 2019, 39:287. DOI: 10.1108/AA-05-2018-066

[14] LI S, GHASEMI A, XIE W, et al. An enhanced IBVS controller of a 6DOF manipulator using hybrid PD-SMC method[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2018,16:844. DOI: 10.1007/s12555-016-0720-4

[15] WU B, LI H. Uncalibrated visual servoing of robots with new image Jacobian estimation method [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20:32. DOI: 10.3724/SP.J.1001.2008.01707

(编辑 王小唯)