

控制与决策

Control and Decision

基于移动机器人机载视觉云台的有限时间目标跟踪控制

孙训红, 都海波, 陈维乐, 俞波

引用本文:

孙训红, 都海波, 陈维乐, 俞波. 基于移动机器人机载视觉云台的有限时间目标跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(10): 2875–2880.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0389>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

输入约束不确定系统的点对点迭代学习控制与优化

Point-to-point iterative learning control and optimization for uncertain systems with constrained input
控制与决策. 2021, 36(6): 1435–1441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0908>

输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation
控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

纵向速度和艏向角受限的水面艇有限时间协同路径跟踪

Finite-time cooperative path following of surface vessels with surge velocity and yaw angle constraints
控制与决策. 2021, 36(2): 363–370 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0977>

参数不确定离散时间系统的有限时间输出反馈预见控制器设计

Design of finite-time output feedback preview controller for discrete-time systems with parameter uncertainty
控制与决策. 2021, 36(9): 2074–2084 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1584>

一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems
控制与决策. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

基于移动机器人机载视觉云台的有限时间目标跟踪控制

孙训红, 都海波[†], 陈维乐, 俞波

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 研究面向移动目标的移动机器人机载视觉云台跟踪控制系统. 首先, 对视觉云台跟踪控制系统进行数学建模; 然后, 为提高移动目标的跟踪快速性和精度, 基于有限时间控制技术提出一种新的有限时间视觉跟踪控制算法. 严格的理论分析证明即使系统存在外部干扰也可以在有限时间内跟踪上目标, 即通过控制云台转动能够保持在机器人运动过程中移动目标始终在相机视觉中心. 仿真结果表明, 所提出的有限时间控制算法可以实现移动目标的有限时间跟踪.

关键词: 相机; 视觉云台; 视觉跟踪; 动态目标; 有限时间控制; 移动机器人

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0389

引用格式: 孙训红, 都海波, 陈维乐, 等. 基于移动机器人机载视觉云台的有限时间目标跟踪控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(10): 2875-2880.

Finite-time target tracking control based on mobile robot's onboard Pan-Tilt-Zoom camera system

SUN Xun-hong, DU Hai-bo[†], CHEN Wei-le, YU Bo

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper mainly studies the onboard Pan-Tilt-Zoom (PTZ) visual tracking control system of a mobile robot for moving targets. Firstly, the mathematical modeling of the PTZ tracking control system is carried out. Then, in order to improve the rapidity and accuracy of moving target tracking, a new finite-time visual tracking control algorithm is proposed based on finite-time control technology. Rigorous theoretical analysis proves that the system can track the target in limited time even in the presence of external interference. In other words, by controlling the rotation of the PTZ, the moving target is always in the center of camera's view during the robot movement. The simulation results show that the proposed finite-time control algorithm can actually track the moving target in finite time.

Keywords: camera; Pan-Tilt-Zoom (PTZ) camera; visual tracking; moving target; finite-time control; mobile robot

0 引言

随着图像处理与计算机视觉技术的发展, 视觉传感器越来越多地应用到人工智能领域, 而视觉伺服控制也是机器视觉领域核心研究课题之一. 该项技术在移动机器人、机械臂等领域广泛应用, 主要根据相机采集得到的视觉信息调节控制机器人的运动^[1-4]. 然而在实际场景中, 相机的视野范围受到很大限制, 因此对于视觉云台的应用研究有重要的价值. 云台作为一种安装和固定相机的机械装置, 主要将跟踪目标与固定设施之间相连接, 视觉云台可以通过自身的转动使跟踪目标运动空间更大^[5-10]. 本文针对移动机

器人机载视觉云台系统进行数学建模, 并提出一种有限时间控制方法, 实现对移动目标的快速精准跟踪.

目前, 已有不少文献对视觉云台的跟踪控制方法展开了研究. 文献[5]针对机载视觉云台系统, 提出了一种统一的视觉跟踪调节控制器, 使得目标始终保持在相机的视野范围内. 另外一种基于图像特征点视觉反馈的双框架机载视觉云台控制方案, 其关键思想是通过测量相机的惯性角速度解耦控制器的结构, 由此产生的控制器可以补偿视觉云台与被测物体之间相互移动导致的位置误差, 但两者相互平移的速度必须被测量或估计到^[7]. Saha等^[8]探索出一种间接的鲁

收稿日期: 2022-03-14; 录用日期: 2022-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62073113, 62003122); 安徽省自然科学基金项目(2008085UD03, 1808085MF180); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(PA2020GDKC0016).

责任编辑: 易建强.

[†]通讯作者. E-mail: haibo.du@hfut.edu.cn.

棒控制方法,将鲁棒控制设计转化为一个等价的最优控制问题,这样视觉云台跟踪控制的稳定性也能保证最优性.文献[10]中视觉云台被固定在天花板上,根据视觉反馈设计有限时间跟踪控制器,控制机器人按照期望的轨迹运动,但是这种情况会产生较大的图像时延,并且对相机的性能要求比较高.

值得指出的是,前述提及的视觉云台的目标跟踪应用研究中,一部分文献中视觉云台是固定不动的,然而在实际应用中,更希望视觉云台结合移动设备完成目标跟踪任务.对于目标跟踪控制算法,部分研究在跟踪过程中需要测量估计移动设备与目标之间的相对速度.针对上述问题,本文首先基于移动机器人机载视觉云台目标跟踪系统进行数学建模;然后基于有限时间控制理论^[11-13]设计一种有限时间目标跟踪控制器,控制移动目标在有限时间内收敛到相机视野的中心位置,并能够有效抑制视觉跟踪过程中产生的各种干扰,从而达到目标跟踪的目的;最后在Matlab环境下搭建仿真实验平台,将所设计的控制器与LQR控制器和PID控制器进行对比.仿真实验与结果分析表明了所提出方法的有效性以及在目标跟踪精度和跟踪时间方面的优越性.

1 问题描述

1.1 移动机器人机载视觉云台

为了实现移动目标的跟踪,一般需要在移动机器人上搭载视觉云台系统,机载视觉云台系统主要由以下几部分组成:移动机器人、相机、多自由度云台.在移动机器人不断运动以及动态目标的干扰作用下,通过控制云台的转动可以使得目标在相机视野中的像素坐标收敛到期望的位置,从而实现视觉跟踪控制的目的.

本文主要考虑云台控制系统的设计,其中相机在目标跟踪过程中用于捕捉目标物,获得目标物在相机视野中的像素坐标 (u_m, v_m) 作为反馈信号,然后与期望的视觉中心点像素坐标 (u_0, v_0) 相比较得到像素偏差值 (E_u, E_v) .通过有限时间目标跟踪控制器控制云台的转动角速度 ω_x, ω_y ,本文选择的云台具有两个自由度,可以控制相机的俯仰角 β 和偏航角 α 发生改变,规定相机向下和向左转动的方向为正.

1.2 基于视觉云台的移动目标有限时间跟踪控制

视觉云台跟踪控制是指基于视觉反馈信号,通过控制云台使得目标物始终位于相机的中心点.显然,从控制系统性能看,锁定目标的时间与跟踪精度是需要关注的两大性能指标,而有限时间跟踪控制是指可以在有限时间内锁定目标物并控制目标物在视觉的中心点.

1.3 预备知识

引理1^[14] 若 $x \in \mathbf{R}, y \in \mathbf{R}, \gamma, c, d$ 为正实数,则如下不等式成立:

$$|x|^c |y|^d \leq \frac{c}{c+d} \gamma |x|^{c+d} + \frac{d}{c+d} \gamma^{-c/d} |y|^{c+d}.$$

引理2^[15] 对于任意的 $x_i \in \mathbf{R}(i = 1, 2, \dots, n)$ 和实数 $p \in (0, 1]$,如下不等式成立:

$$(|x_1| + \dots + |x_n|)^p \leq |x_1|^p + \dots + |x_n|^p.$$

引理3^[16] 考虑如下系统:

$$\dot{x} = f(x), f(0) = 0, x \in \mathbf{R}^n,$$

其中 $f(\cdot) : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ 是一个连续函数.假设存在一个正定连续函数 $V(x) : U \rightarrow \mathbf{R}$,实数 $c > 0$ 和 $\alpha \in (0, 1)$,并且存在一个包含原点开区域 $U_0 \subset U$,使得 $\dot{V}(x) + c(V(x))^\alpha \leq 0, x \in U_0 \setminus \{0\}$,则 $V(x)$ 将在有限时间内到达0.此外,有限时间 T 满足

$$T \leq \frac{V(x(0))^{1-\alpha}}{c(1-\alpha)}.$$

2 主要结果

为实现上述控制目标,首先进行相关数学建模.

2.1 移动机器人机载视觉云台的数学建模

机载视觉云台坐标系如图1所示.该平台涉及3个坐标系:

1) 世界坐标系 $\{W\} : O^w - X^w Y^w Z^w$.在世界坐标系下,移动目标 M 的坐标为 P_m^w ,机器人坐标系的原点和视觉云台坐标系的原点坐标分别为 P_r^w, P_c^w .

2) 移动机器人坐标系 $\{R\} : O^r - X^r Y^r Z^r$.仅考虑机器人在平面 $X^w - Y^w$ 下的运动,则机器人在世界坐标系 $\{W\}$ 下的位置为 $P_r^w = (x_r^w, y_r^w, \theta)^T$.其中: θ 为移动机器人的偏航角,即 X^r 轴与 X^w 轴之间的夹角,规定逆时针方向为正; ω 为机器人转动角速度.定义 v 为移动机器人的线速度,方向与机器人的 X^r 轴同向,则移动机器人相对于自身坐标系的三轴速度为 $V_r = (v \cos \theta, v \sin \theta, 0)^T$.

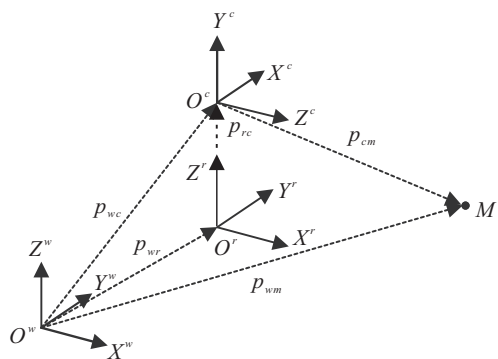


图1 机载视觉云台坐标系

3) 视觉云台坐标系 $\{C\} : O^c - X^c Y^c Z^c$.视觉云台相对于机器人坐标系 $\{R\}$ 的坐标为 $P_c^r = (0, 0, h)^T, h$

为视觉云台与机器人质心的高度之差. 移动目标 M 在视觉云台坐标系 $\{C\}$ 下的位置为 $P_m^c = (x_m^c, y_m^c, z_m^c)^T$. 定义视觉云台相对于自身坐标系的角速度为 $\Omega_c = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$, 相对于自身坐标系的线速度为 $V_c = (v_x, v_y, v_z)^T$, 相对于世界坐标系 $\{W\}$ 的角速度为 Ω_w .

由于移动目标 M 的位置反馈是基于视觉云台系统得到的, 需要推导出移动目标在视觉云台坐标系 $\{C\}$ 下的坐标 P_m^c . 由图1可知

$$P_m^c = (R_c^w)^T \cdot p_{cm}, \quad (1)$$

其中矩阵 R_c^w 为视觉云台坐标系到世界坐标系的旋转矩阵. 根据图1中移动机器人机载视觉云台的几何关系可得

$$p_{wc} = p_{wr} + p_{rc}, \quad p_{wm} = p_{wr} + p_{rc} + p_{cm}. \quad (2)$$

式(2)中各项为世界坐标系下的方向向量, 有

$$\begin{aligned} p_{wm} &= P_m^w, \quad p_{wr} = P_r^w, \quad p_{wc} = P_c^w, \\ p_{rc} &= R_r^w \cdot P_c^r, \quad p_{cm} = R_c^w \cdot P_m^c. \end{aligned} \quad (3)$$

其中矩阵 R_r^w 为机器人坐标系到世界坐标系的旋转矩阵, 矩阵 R_c^w 为视觉云台坐标系到世界坐标系的旋转矩阵. 根据式(2)可得

$$p_{cm} = p_{wm} - p_{wc} = P_m^w - P_c^w. \quad (4)$$

由此得到视觉云台坐标系 $\{C\}$ 下目标 M 的坐标为

$$P_m^c = (R_c^w)^T \cdot (P_m^w - P_c^w). \quad (5)$$

视觉云台和移动机器人在世界坐标系下的线速度为

$$\dot{P}_c^w = R_c^w V_c, \quad \dot{P}_r^w = R_r^w V_r. \quad (6)$$

而移动机器人与云台只在高度上有一个固定的差距, 由此可得视觉云台和移动机器人分别相对于自身坐标系的关系为

$$V_c = R_c^w V_r. \quad (7)$$

视觉云台到世界坐标系的旋转矩阵与视觉云台角速度之间的数学关系为

$$\dot{R}_c^w = \delta(\Omega_w) R_c^w, \quad \Omega_w = R_c^w \Omega_c, \quad (8)$$

其中 $\delta(\cdot)$ 表示反对称矩阵. 结合式(5)~(8), 对坐标 P_m^c 进行一阶求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{P}_m^c &= -(R_c^w)^T [\Omega_w \times (P_m^w - P_c^w)] + G(t) = \\ &\delta^T(\Omega_c) P_m^c + G(t), \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $G(t) = (R_c^w)^T \dot{P}_m^w - R_c^w V_r$.

2.2 基于视觉的移动目标跟踪控制系统建模与分析

为了实现移动目标的跟踪, 需要通过相机获取目标物的位置, 因此涉及到像素坐标系 $\{P\}$: uv . 如图2

所示, 相机采用的是针孔模型, 移动目标 M 在像素坐标系 $\{P\}$ 里的像素坐标以及像平面的中心点坐标分别为 $(u_m, v_m)^T$ 和 $(u_0, v_0)^T$.

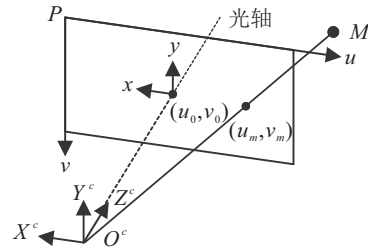


图2 相机成像原理

由图2可得目标 M 的像素坐标为

$$u_m = u_0 - k\lambda x_m^c / z_m^c, \quad v_m = v_0 - k\lambda y_m^c / z_m^c, \quad (10)$$

其中 k 和 λ 分别为相机的像元尺寸和焦距.

将移动目标 M 在相机成像平面中的坐标与期望的位置做差得到系统误差为

$$E = (E_u, E_v)^T = (u_0 - u_m, v_0 - v_m)^T. \quad (11)$$

根据式(10)可以得到

$$E = \frac{1}{z_m^c} \begin{bmatrix} k\lambda & 0 & 0 \\ 0 & k\lambda & 0 \end{bmatrix} \cdot P_m^c. \quad (12)$$

对系统误差分别进行一阶微分可得

$$\dot{E} = L_v(z_m^c) \dot{P}_m^c, \quad (13)$$

$$\text{其中 } L_v(z_m^c) = \begin{bmatrix} k\lambda/z_m^c & 0 & -E_u/z_m^c \\ 0 & k\lambda/z_m^c & -E_v/z_m^c \end{bmatrix}.$$

将视觉云台数学模型(9)代入式(13), 得到基于视觉的目标跟踪控制系统的误差模型为

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \begin{bmatrix} \frac{E_u E_v}{k\lambda} & -k\lambda - \frac{E_u^2}{k\lambda} \\ k\lambda + \frac{E_v^2}{k\lambda} & -\frac{E_u E_v}{k\lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} -q_z/z_m^c & \omega_z \\ -\omega_z & -q_z/z_m^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_u \\ E_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k\lambda q_x/z_m^c \\ k\lambda q_y/z_m^c \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 q_x, q_y, q_z 分别为向量 $G(t)$ 的各行元素.

由于本文采用的云台能够控制相机上下和左右转动, 相机的角速度 ω_x 和 ω_y 可受调节, 定义 $U = (\omega_x, \omega_y)^T$ 为视觉云台目标跟踪系统的输入. 为了简化表达式, 将系统(14)重新整理为

$$\dot{E} = L_u U + F(E, t) + D(t). \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} L_u &= \begin{bmatrix} \frac{E_u E_v}{k\lambda} & -k\lambda - \frac{E_u^2}{k\lambda} \\ k\lambda + \frac{E_v^2}{k\lambda} & -\frac{E_u E_v}{k\lambda} \end{bmatrix}; \\ F(E, t) &= M(t)E = \begin{bmatrix} -q_z/z_m^c & \omega_z \\ -\omega_z & -q_z/z_m^c \end{bmatrix} E \end{aligned} \quad (16)$$

为与系统状态相关的不确定干扰量;

$$D(t) = \left(\frac{k\lambda q_x}{z_m^c}, \frac{k\lambda q_y}{z_m^c} \right)^T \quad (17)$$

为外部干扰量,即机器人和目标运动带来的干扰.

注1 系统(15)中的不确定因素包含与系统状态相关的不确定量 $F(E, t)$ 以及外部干扰量 $D(t)$, 这些干扰量由环境变量 z_m^c 、 ω_z 、 $(R_c^w)^T$ 、 R_r^c 、 \dot{P}_m^w 、 V_r 组成. 考虑到目标移动速度过快以及移动机器人运动过快时会导致目标跟踪失败, 假设两者的运动速度在某一固定范围内, 即变量 \dot{P}_m^w 和 V_r 有界. 同时, 受真实物理环境的限制, 其他几个环境变量也都是有界的. 假设移动目标 M 并不会太过接近视觉云台, 即相机的深度信息 z_m^c 不会趋于0. 综上可得, 干扰量 $F(E, t)$ 和 $D(t)$ 均有界.

目标跟踪控制系统(15)中 L_u 矩阵的行列式为 $|L_u| = k^2\lambda^2 + E_u^2 + E_v^2 > 0$, 因此存在逆矩阵. 令 $U = L_u^{-1}U^*$, 则系统(15)变为

$$\dot{E} = U^* + F(E, t) + D(t). \quad (18)$$

由于整个系统模型都是二维的, 将系统(18)拆分为

$$\begin{aligned} \dot{E}_u &= u_1 + f_1(E, t) + d_1(t), \\ \dot{E}_v &= u_2 + f_2(E, t) + d_2(t). \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $f_1(E, t)$ 、 $f_2(E, t)$ 为状态干扰量, $d_1(t)$ 、 $d_2(t)$ 为外部干扰量. 由注1可知, 系统满足如下假设条件.

假设1 系统(19)满足

$$\begin{cases} |f_i(E, t)| \leq a_1|E_u| + a_2|E_v|, & i = 1, 2. \\ |d_i(t)| \leq l < +\infty, \end{cases} \quad (20)$$

其中 a_1 、 a_2 、 l 为有界常数.

2.3 有限时间跟踪控制器设计

对于该视觉云台移动目标跟踪控制系统, 基于有限时间控制理论设计如下有限时间控制器:

$$\begin{cases} u_1 = -k_{11}E_u - k_{12}\text{sign}(E_u), \\ u_2 = -k_{21}E_v - k_{22}\text{sign}(E_v). \end{cases} \quad (21)$$

分别控制视觉云台两个自由度的转动, 从而控制相机的角速度 ω_x 和 ω_y , 其中 k_{11} 、 k_{12} 、 k_{21} 、 $k_{22} \in \mathbf{R}^+$, 且控制器参数满足如下条件:

$$\begin{cases} k_{12} = k_{22} = k' > l, \\ k_{11} > \frac{3a_1 + a_2}{2}, k_{21} > \frac{a_1 + 3a_2}{2}. \end{cases} \quad (22)$$

定理1 对于视觉云台目标跟踪控制系统模型(15), 若控制器设计为(21), 其中控制器参数满足条件(22), 则该系统有限时间稳定, 即系统最终使得移动目标 M 在相机视野中的像素误差 E_u 、 E_v 在有限时间内均收敛到0.

证明 构造Lyapunov函数为

$$V = V_1 + V_2. \quad (23)$$

其中: $V_1 = E_u^2$, $V_2 = E_v^2$. 对函数 V_1 进行求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= 2E_u\dot{E}_u = 2E_u(u_1 + f_1(E, t) + d_1(t)) \leq \\ &- 2(k_{11} - a_1)E_u^2 - 2k_{12}|E_u| + \\ &2a_2|E_u||E_v| + 2|E_u|l. \end{aligned} \quad (24)$$

同理可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq - 2(k_{21} - a_2)E_v^2 - 2k_{22}|E_v| + \\ &2a_1|E_u||E_v| + 2|E_v|l. \end{aligned} \quad (25)$$

由 $V = V_1 + V_2$, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leq \\ &- 2(k_{11} - a_1)E_u^2 - 2k_{12}|E_u| - 2(k_{21} - a_2)E_v^2 - \\ &2k_{22}|E_v| + 2(a_1 + a_2)|E_u||E_v| + 2l(|E_u| + |E_v|). \end{aligned} \quad (26)$$

由引理1可得

$$|E_u||E_v| \leq \frac{1}{2}|E_u|^2 + \frac{1}{2}|E_v|^2. \quad (27)$$

将式(27)两边同时乘以 $2(a_1 + a_2)$ 并代入式(26), 得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq - 2\left(k_{11} - \frac{3a_1 + a_2}{2}\right)E_u^2 - \\ &2\left(k_{21} - \frac{a_1 + 3a_2}{2}\right)E_v^2 - 2k_{12}|E_u| - \\ &2k_{22}|E_v| + 2l(|E_u| + |E_v|). \end{aligned} \quad (28)$$

将控制器参数条件(22)代入不等式(28), 可得

$$\dot{V} \leq -c_1V - 2(k - l)(|E_u| + |E_v|). \quad (29)$$

其中参数 $c_1 > 0$, 且

$$c_1 = \min\left\{ 2\left(k_{11} - \frac{3a_1 + a_2}{2}\right), 2\left(k_{21} - \frac{a_1 + 3a_2}{2}\right) \right\}. \quad (30)$$

由引理2得

$$V^{\frac{1}{2}} = (|E_u|^2 + |E_v|^2)^{\frac{1}{2}} \leq |E_u| + |E_v|. \quad (31)$$

将式(31)代入(29), 可得

$$\dot{V} \leq -c_1V - c_2V^{\frac{1}{2}}, \quad (32)$$

其中 $c_2 = 2(k' - l)$.

由式(32)和引理3可知系统有限时间稳定, 且像素误差 E_u 、 E_v 在有限时间内均收敛到0, 即目标 M 在相机视野的中心位置. \square

3 仿真实验与分析

仿真实验采用Matlab软件搭建系统模型并进行控制器的设计. 仿真中系统模型采用的相机内部参数以及目标 M 的初始像素误差分别为

$$k = 30, \lambda = 120, E_u = 150, E_v = 200. \quad (33)$$

为验证所设计控制器的有效性和优越性, 仿真过程中将所提出的有限时间目标跟踪控制器(FT)与LQR控制器和PID控制器进行对比, 同时为了保持对比的可靠性, 对各种控制器超调量一致时的跟踪效果

进行分析. 仿真过程采用的控制器参数如表1所示, 表中 P 、 I 、 D 分别为PID控制器中比例、积分、微分环节的控制增益, Q 、 R 分别为LQR控制器中状态权重矩阵和控制权重矩阵.

表1 控制器参数

不同情况下的控制器类型	参数值
有限时间控制(v_1, ω_1)	$k_{11} = 6.76, k_{21} = 5.49, k' = 3682.7$
LQR控制(v_1, ω_1)	$Q = [7.2, 0; 0, 2.8], R = [3.2, 0; 0, 6.7]$
PID控制(v_1, ω_1)	$P = 3.43, I = 2.11, D = 1.23$
有限时间控制(v_2, ω_2)	$k_{11} = 8.94, k_{21} = 6.89, k' = 3703.2$
LQR控制(v_2, ω_2)	$Q = [8.7, 0; 0, 3.2], R = [3.4, 0; 0, 5.8]$
PID控制(v_2, ω_2)	$P = 5.65, I = 2.70, D = 1.55$
有限时间控制(\dot{P}_{m1}^w)	$k_{11} = 14.70, k_{21} = 9.97, k' = 3789.0$
LQR控制(\dot{P}_{m1}^w)	$Q = [10.9, 0; 0, 9.9], R = [1.2, 0; 0, 3.0]$
PID控制(\dot{P}_{m1}^w)	$P = 6.67, I = 4.21, D = 2.75$
有限时间控制(\dot{P}_{m2}^w)	$k_{11} = 19.65, k_{21} = 16.31, k' = 3862.9$
LQR控制(\dot{P}_{m2}^w)	$Q = [12.9, 0; 0, 11.9], R = [0.9, 0; 0, 1.6]$
PID控制(\dot{P}_{m2}^w)	$P = 8.90, I = 5.13, D = 3.95$

3.1 静态目标下视觉跟踪效果

图3和图4分别描述了移动机器人在 X^w-Y^w 平面上不同运动状态时, 视觉云台对于静态目标 M 的视觉跟踪效果. 图3、图4机器人的运动速度分别为 $v_1 = 0.8, \omega_1 = 0.4, v_2 = 2.0, \omega_2 = 1.0$ (单位:m/s, rad/s).

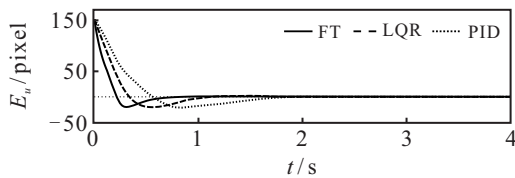


图3 像素误差 E 变化曲线($v_1 = 0.8\text{m/s}, \omega_1 = 0.4\text{m/s}$)

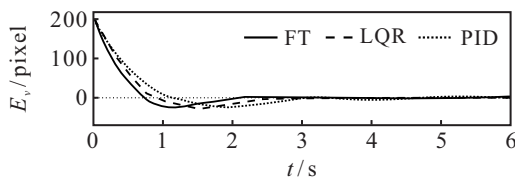
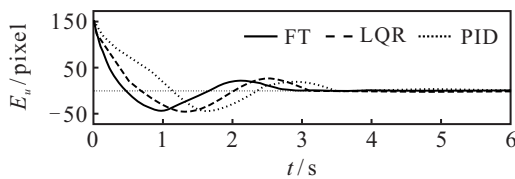
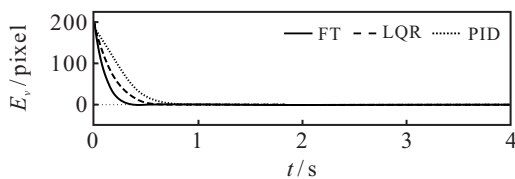


图4 像素误差 E 变化曲线($v_2 = 2.0\text{m/s}, \omega_2 = 1.0\text{m/s}$)

通过对比可以看出, 随着移动机器人运动速度增大, 控制器产生的超调量和误差波动变大, 并且收敛时间变长. 与此同时, 在同等情况下, 有限时间控制器相比于其他两种控制器像素误差收敛时间更快, 抗干扰能力更强, 且稳态误差收敛到0.

3.2 动态目标下视觉跟踪效果

图5和图6分别描述了移动机器人在同一运动状态时机载视觉云台对动态目标 M 的视觉跟踪效果. 机器人的运动速度为 $v_3 = 0.8, \omega_3 = 0.4$, 图5和图6动态目标 M 的运动速度分别为

$$\dot{P}_{m1}^w = (0.5 \cos t, 1.2 \cos 0.8t, 1.5 \sin 0.6t)^T,$$

$$\dot{P}_{m2}^w = (0.8 \cos t, 2.1 \cos 1.5t, 2.0 \sin 1.8t)^T.$$

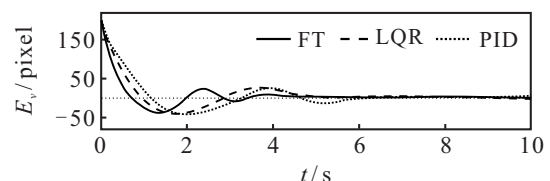
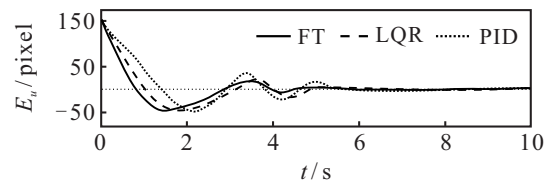


图5 像素误差 E 变化曲线(\dot{P}_{m1}^w)

由图5和图6可以看出, 动态目标移动速度越大频率越快时, 收敛时间越长, 同时对应的像素误差变化的超调量和波动幅度越大. 对比在不同控制器作

用下像素误差的变化曲线,有限时间控制器的跟踪能力更强,控制器精度更高,锁定目标时间更短。

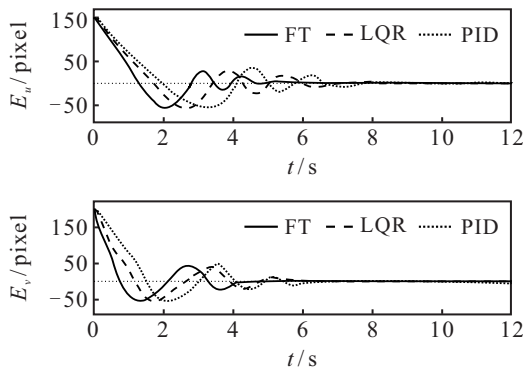


图6 像素坐标 E 变化曲线(\dot{P}_{m2}^w)

4 结论

本文针对机载视觉云台下的动态目标跟踪控制问题,设计了一种有限时间跟踪控制器,以实现目标精准跟踪.对整个机载视觉云台跟踪系统进行建模分析,得到跟踪控制系统的动态方程;然后根据有限时间控制理论设计有限时间目标跟踪控制器,并证明了系统的有限时间稳定性;最后通过仿真实验将所设计的有限时间控制器与PID控制器和LQR控制器进行对比,从而验证了所设计方法在控制精度、抗干扰能力以及收敛时间上均有很大的提高。

参考文献(References)

- [1] Gong Z Y, Tao B, Qiu C R, et al. Trajectory planning with shortest path for modified uncalibrated visual servoing based on projective homography[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(2): 1076-1083.
- [2] Zhang X B, Fang Y C, Sun N. Visual servoing of mobile robots for posture stabilization: From theory to experiments[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2015, 25(1): 1-15.
- [3] 何德峰, 姬超超, 倪洪杰. 移动机器人视觉伺服镇定 quasi-min-max 预测控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1391-1396.
(He D F, Ji C C, Ni H J. Quasi-Min-max predictive control for visual servoing stabilization of mobile robots[J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1391-1396.)
- [4] Fang Y C, Liu X, Zhang X B. Adaptive active visual servoing of nonholonomic mobile robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 486-497.
- [5] Li B Q, Fang Y C, Hu G Q, et al. Model-free unified tracking and regulation visual servoing of wheeled mobile robots[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(4): 1328-1339.
- [6] Yang J, Liu X Y, Sun J K, et al. Sampled-data robust visual servoing control for moving target tracking of an inertially stabilized platform with a measurement delay[J]. Automatica, 2022, 137: 110105.
- [7] Hurak Z, Rezac M. Image-based pointing and tracking for inertially stabilized airborne camera platform[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5): 1146-1159.
- [8] Safa A, Yazdanpanah Abdolmalaki R. Robust output feedback tracking control for inertially stabilized platforms with matched and unmatched uncertainties[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(1): 118-131.
- [9] Deng K, Cong S, Kong D J, et al. Discrete-time direct model reference adaptive control application in a high-precision inertially stabilized platform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 358-367.
- [10] Ou M Y, Li S H, Wang C L. Finite-time tracking control for nonholonomic mobile robots based on visual servoing[J]. Asian Journal of Control, 2014, 16(3): 679-691.
- [11] Zhu W W, Du H B, Li S H. Observer-based output feedback stabilization for perturbed second-order uncertain system with finite-time convergence[C]. Chinese Control Conference. Guangzhou, 2019: 612-617.
- [12] 王宁, 吕帅林. 基于有限时间扰动观测器的无人水面艇精确航迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2491-2497.
(Wang N, Lyu S L. Finite-time disturbance observer based accurate trajectory tracking control of an unmanned surface vehicle[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2491-2497.)
- [13] Wang L N, Du H B, Wu D. A coupled finite-time attitude controller and finite-time observer with an unknown constant drift bias[C]. The 39th Chinese Control Conference. Shenyang, 2020: 526-531.
- [14] Qian C J, Lin W. A continuous feedback approach to global strong stabilization of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(7): 1061-1079.
- [15] Hardy G, Littlewood J, Polya G. Inequalities[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1952: 255-292.
- [16] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751-766.

作者简介

孙训红(1998—),男,硕士生,从事非线性控制理论的研究, E-mail: xunhong.sun@mail.hfut.edu.cn;

都海波(1982—),男,教授,博士生导师,从事非线性控制理论的研究, E-mail: haibo.du@hfut.edu.cn;

陈维乐(1997—),男,硕士生,从事非线性控制理论的研究, E-mail: chenweile1997@mail.hfut.edu.cn;

俞波(1993—),男,博士生,从事非线性控制理论的研究, E-mail: yubo@mail.hfut.edu.cn.