

控制与决策

Control and Decision

移动机器人视觉伺服镇定quasi-min-max预测控制

何德峰, 姬超超, 倪洪杰

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0743>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[轮子打滑状态下全向移动机器人轨迹跟踪控制](#)

Trajectory tracking control for omnidirectional mobile robot in presence of wheel slipping

控制与决策. 2020, 35(4): 833–842 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0644>

[含未标定摄像机参数的非完整移动机器人的自适应动力学跟踪控制](#)

Adaptive dynamics tracking control for nonholonomic mobile robots with uncalibrated camera parameters

控制与决策. 2019, 34(10): 2164–2170 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0191>

[UHF-RFID环境下的移动机器人定位方法](#)

Mobile robot localization method in UHF-RFID

控制与决策. 2018, 33(10): 1807–1812 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0741>

[基于雅可比预测的机器人无模型视觉伺服定位控制](#)

Jacobian prediction-based for robot model-free visual servoing positioning control

控制与决策. 2018, 33(10): 1813–1819 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0717>

[基于视觉反馈的非完整机器人不确定链式系统的指数稳定](#)

Exponential stabilization of uncertain chained systems of nonholonomic robots based on visual feedback

控制与决策. 2016(3): 535–540 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1984>

移动机器人视觉伺服镇定 quasi-min-max 预测控制

何德峰[†], 姬超超, 倪洪杰

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 针对受限移动机器人视觉伺服系统, 提出一种移动机器人视觉伺服镇定准最小最大模型预测控制策略. 基于移动机器人视觉伺服镇定误差模型, 建立移动机器人视觉伺服线性参数时变预测模型, 进而引入准最小最大策略, 设计移动机器人视觉伺服镇定模型预测控制器. 与传统视觉伺服预测控制器相比, 所提控制器只需求解线性矩阵不等式表示的凸优化问题, 降低了视觉伺服预测控制器的计算耗时, 同时保证了闭环视觉伺服系统的渐近稳定性. 仿真结果验证了所提出策略的有效性和在计算效率上的优越性.

关键词: 移动机器人; 视觉伺服; 模型预测控制; 准最小最大策略; LPV 模型

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Quasi-min-max predictive control for visual servoing stabilization of mobile robots

HE De-feng[†], JI Chao-chao, NI Hong-jie

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming to constrained visual servoing systems of mobile robots, this paper proposes a quasi-min-max model predictive control (MPC) scheme for visual servoing stabilization of mobile robots. Based on visual servoing error models of mobile robots, a linear parameter varying (LPV) predictive model is presented for visual servoing of the mobile robot. Then by introducing the min-max strategy, the model predictive controller is designed for visual servoing stabilization of mobile robots. Comparing to the traditional visual servoing predictive controllers, the presented controller is obtained by only solving the convex optimization problem formulated by linear matrix inequalities, which decreases the computational demand of the visual servoing predictive controller and guarantees the asymptotic stability of the closed-loop visual servoing system. The simulation results verify the effectiveness of the proposed scheme and its merits in terms of the computational efficiency.

Keywords: mobile robot; visual servoing; model predictive control; quasi-min-max strategy; LPV models

0 引言

近年来, 利用视觉信息对机器人进行控制(即视觉伺服系统)极大地提高了机器人的智能化水平, 吸引了学术界和工业界的广泛关注^[1-2]. 对于移动机器人单目视觉伺服系统, 通常面临的难题是三维场景的构建与深度信息的缺失^[3-5], 同时由于移动机器人通常受到非完整约束, 使得移动机器人单目视觉伺服镇定控制问题变得极具挑战性^[6-8].

为求解移动机器人视觉伺服镇定问题, 国内外相关学者采用构造的几何学原理开展移动机器人视觉伺服镇定控制方法研究, 并取得了一系列成果. 例如, 文献[9]采用对极几何概念设计移动机器人视觉伺服控制器, 但对极几何可能出现病态状态. 一种解决方

法是采用单应矩阵分解, 如文献[10]利用单应矩阵分解设计视觉伺服镇定控制器, 但在移动机器人视觉伺服场景内, 如果特征点不在同一平面, 则单应矩阵将失去意义. 对此, 文献[11]结合对极几何和单应矩阵分解设计了移动机器人视觉伺服镇定控制器. 进一步, 文献[12]基于运动估计技术提出了混合视觉伺服镇定控制策略, 并应用于平面场景和非平面场景的视觉伺服镇定控制.

在现有的移动机器人视觉伺服镇定控制器设计中, 大多没有考虑视觉可见性约束和执行机构物理约束. 但如果违反视觉可见性约束, 移动机器人将无法从相机中获取视觉数据, 导致视觉伺服控制失败. 同理, 如果违反执行机构的物理约束, 将导致视觉

收稿日期: 2018-05-31; 修回日期: 2018-12-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773345); 浙江省重点研发计划项目(2017C03060).

责任编辑: 方勇纯.

[†]通讯作者. E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn.

伺服控制性能变差. 模型预测控制(model predictive control, MPC)具有显式处理约束的优点^[13-14],近年来在机器人视觉伺服控制中取得了初步成果. 如文献[15]利用像素坐标构建基于视觉特征的视觉伺服镇定偏差模型,再利用常规MPC方法设计视觉伺服控制器. 进一步,考虑机器人在移动中受到的扰动,文献[16]利用Tube鲁棒MPC方法^[17]设计移动机器人视觉伺服控制器. 在现有移动机器人视觉伺服MPC算法中,由于预测时域有限,得到的最优解不能保证视觉伺服系统的渐近稳定性^[13]. 此外,由于移动机器人视觉伺服系统的非线性特性,视觉伺服MPC本质上是一个非线性、非凸的优化问题^[14],这将限制移动机器人视觉伺服系统的应用范围.

考虑移动机器人视觉伺服系统视觉可见性约束和执行机构物理约束,本文利用准最小最大策略^[18-19],设计移动机器人视觉伺服镇定模型预测控制策略. 采用移动机器人视觉伺服镇定误差模型,先建立移动机器人视觉伺服线性参数时变预测模型. 在此基础上,采用准最小最大策略设计移动机器人视觉伺服镇定模型预测控制器. 由于采用无穷预测时域性能函数和线性矩阵不等式约束描述,移动机器人视觉伺服镇定MPC问题转变为半正定优化控制问题,既保证了所得视觉伺服闭环系统的渐近稳定性,又可以显著降低预测控制器的在线计算量. 最后,通过与移动机器人视觉伺服系统常规MPC算法^[15]比较,验证本文结果的有效性和实用性.

1 移动机器人视觉伺服LPV模型

移动机器人视觉伺服镇定是指机器人在运动过程中用相机实时获取目标特征点图像,与提前存储的目标图像作对比,根据两者的差异计算伺服控制量,控制机器人移动到目标位置. 其中,目标图像是移动机器人在目标位置时对特征点进行拍照所获取的图像. 当移动机器人到达目标点时,实时获取的图像将与目标图像一致^[20].

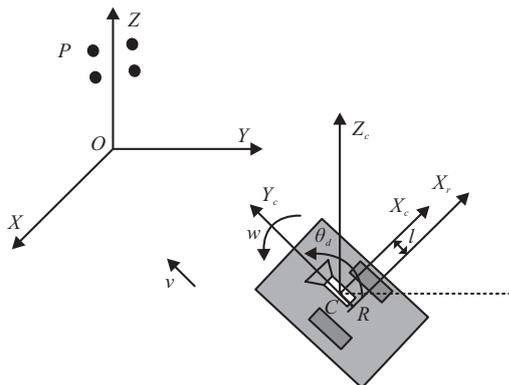


图1 移动机器人视觉伺服系统示意图

考虑如图1所示的移动机器人视觉伺服系统. 其中: $O-XYZ$ 为世界坐标系,在移动机器人质心处建立机器人坐标系 $R-X_r Y_r Z_r$,距离机器人质心 l 处建立相机坐标系 $C-X_c Y_c Z_c$. 图1中,原点为机器人所要到达的目标位置,选取目标位置上方的点 P 作为特征点.

1.1 移动机器人视觉伺服镇定误差模型

根据图像投影模型^[11],特征点 P 在相机成像平面的坐标 (P_x, P_y) 与其在相机坐标系内坐标 (x_c, y_c, z_c) 之间的关系满足

$$P_x = f \frac{x_c}{y_c}, P_y = f \frac{z_c}{y_c}, \quad (1)$$

其中 $f > 0$ 为相机焦距,并假设相机焦距不变. 设特征点 P 在目标图像内的坐标为 (P_{xd}, P_{yd}) , θ_d 为移动机器人到达目标位置处的角度,则利用图像坐标定义新坐标

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x/P_y \\ -f/P_y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

及理想坐标 $s_d = [P_{xd}/P_{yd} \quad -f/P_{yd} \quad \theta_d]^T$. 进一步,定义包含图像信号与姿态角的镇定误差信号

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} - T_e \begin{bmatrix} s_{1d} \\ s_{2d} \\ s_{3d} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中变换矩阵

$$T_e = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e & 0 \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

θ_e 为移动机器人视觉伺服镇定角度误差.

假设移动机器人在平面移动无滑动发生,其移动受到非完整约束限制,则移动机器人运动学方程^[8]为

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta(t)) & 0 \\ \cos(\theta(t)) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

考虑误差信号 e 和相关坐标系间的正交变换,结合式(5)得到误差信号的微分方程^[15]为

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega e_2 + \omega l \\ va + \omega e \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (6)$$

1.2 移动机器人视觉伺服镇定LPV模型

令采样时间为 T_s ,用欧拉近似法可得式(6)的离散时间差分方程

$$e(k+1) = \begin{bmatrix} e_1(k) - T_s \omega(k) e_2(k) + T_s \omega(k) l a \\ e_2(k) + T_s v(k) a + T_s \omega(k) e_1(k) \\ e_3(k) + T_s \omega(k) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} e_1(k) \\ e_2(k) \\ e_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & T_s l a - T_s e_2(k) \\ T_s a & T_s e_1(k) \\ 0 & T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 $a = 1/Z_c$, Z_c 为目标点所处的高度, 本文假设高度值不变. 将式(7)写为更加紧密的形式

$$e(k+1) = e(k) + B(k)u(k). \quad (8)$$

其中: 输入矩阵 $B(k)$ 是误差变量 $e_1(k)$ 和 $e_2(k)$ 的函数, 控制输入 $u = [v \ \omega]^T$. 注意, $B(k)$ 随参数向量 $p(k) = [e_1(k) \ e_2(k)]^T$ 的变化而变化, 即 $B(k) = B(p(k))$, 因此视觉伺服系统(8)可以重新表示为

$$e(k+1) = e(k) + B(p(k))u(k). \quad (9)$$

考虑视觉伺服系统(9), 根据相机分辨率及移动机器人移动范围和执行结构物理约束, 令误差变量和控制输入变量的取值满足区间约束

$$e_{1 \min} \leq e_1(k) \leq e_{1 \max}, \quad e_{2 \min} \leq e_2(k) \leq e_{2 \max}; \quad (10)$$

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}, \quad \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}. \quad (11)$$

其中: 式(10)表示通过限制机器人移动范围满足视觉可见性约束, 式(11)表示机器人执行结构物理约束; 下标“min”表示对应变量取值的下界, 下标“max”表示对应变量取值的上界, 上下界视实际工况而定.

考虑区间约束(10), 定义参数向量 $p(k)$ 的顶点为

$$p_1 = [e_{1 \min} \ e_{2 \min}], \quad p_2 = [e_{1 \max} \ e_{2 \min}],$$

$$p_3 = [e_{1 \min} \ e_{2 \max}], \quad p_4 = [e_{1 \max} \ e_{2 \max}].$$

将各个顶点分别代入矩阵 $B(p(k))$ 中对应的输入矩阵 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 , 则 $B(p(k))$ 可被顶点矩阵的凸组合覆盖^[21-22], 即在任意时刻 k , $B(p(k))$ 属于凸多面体 Ω , 有

$$B(p(k)) \in \Omega = C_0\{B_1, B_2, B_3, B_4\}, \quad (12)$$

其中符号 C_0 表示多面体覆盖.

本文目标是考虑移动机器人视觉伺服 LPV 系统(9)和(12), 设计视觉伺服模型预测控制器, 在满足约束条件(10)和(11)的同时镇定视觉伺服系统, 即移动机器人移动到目标图像位置.

2 控制器设计

考虑受限移动机器人视觉伺服系统(9)~(12), 其视觉特征参数 $p(k)$ 实时可测, 即输入矩阵 $B(p(k))$ 在当前时刻 k 已知, 但对于未来时刻, 输入矩阵 $p(k+i)$, $i \geq 1$, 不能提前获取, 但位于多面体(12), 因此移动机器人视觉伺服系统的镇定控制器采用准最小最大 MPC 方法设计.

为保证闭环视觉伺服系统的渐近稳定性, 取预测

时域为 ∞ , 定义当前 k 时刻目标函数

$$J_0^\infty = e(0|k)^T Q_x e(0|k) + u(0|k)^T Q_u u(0|k) + J_1^\infty. \quad (13)$$

其中: $e(0|k) = e(k)$, $u(0|k) = u(k)$, Q_x 和 Q_u 分别为状态和控制加权矩阵, J_1^∞ 为从 $k+1$ 到 ∞ 时刻的目标函数. 由于未来时刻输入矩阵不确定性, 采用 min-max 策略设计相应的控制器, 即

$$\min_{U_0^\infty(k)} \max_{B(p(k+i)) \in \Omega} J_0^\infty(k), \quad (14)$$

其中 $U_0^\infty = [u(0|k), u(1|k), \dots, u(i|k), \dots]$. 考虑视觉伺服系统模型不确定性, 目标函数最差情况下的性能为 $\max_{B(p(k+i)) \in \Omega} J_0^\infty(k)$, 即由于系统模型不确定性所造成的目标函数上界. 为得到最优性能指标, 极小化目标函数上界, 从而得到优化问题(14).

考虑目标函数(13), 视觉伺服系统未来时刻的模型不确定性只对 J_1^∞ 影响, 而不会影响当前时刻的性能指标. 因此, 将当前时刻和未来时刻的控制输入分开, 即

$$U_0^\infty = \{u(0|k), U_1^\infty\}. \quad (15)$$

其中: $u(0|k)$ 为当前 k 时刻的控制输入, U_1^∞ 为未来时刻的控制输入序列 $\{u(1|k), \dots, u(i|k), \dots\}$. 进一步, 为求取在 k 时刻最坏情况下的性能上界, 需要确定 J_1^∞ 的上界. 为此, 定义二次函数

$$V(e(i|k)) = e(i|k)^T P(k)e(i|k), \quad i = 1, 2, \dots, \quad (16)$$

其中 $P(k)$ 为待求的正定矩阵. 再将 U_1^∞ 序列定义为状态反馈控制律

$$u(i|k) = F(k)e(i|k), \quad i = 1, 2, \dots, \quad (17)$$

其中 $F(k)$ 为待求的反馈增益. 如果将序列(17)依此作用于视觉伺服系统(9)使闭环系统渐近稳定, 则 $V(e(i|k))$ 满足单调递减性^[18], 即

$$\begin{aligned} & V(e(i+1|k)) - V(e(i|k)) \leq \\ & - [e(i|k)^T Q_x e(i|k) + u(i|k)^T Q_u u(i|k)], \\ & i = 1, 2, \dots. \end{aligned} \quad (18)$$

将式(9)代入(18), 并化简得

$$\begin{aligned} & (I + B(p(i|k))F(k))^T P(k)(I + \\ & B(p(i|k))F(k)) - P(k) \leq \\ & - Q_x - F(k)^T Q_u F(k). \end{aligned} \quad (19)$$

将 $i = 1$ 累加到 ∞ 可得

$$V(e(1|k)) - V(e(\infty|1)) \geq \sum_{i=1}^{\infty} l_i(e(i|k), u(i|k)). \quad (20)$$

其中

$$l_i(e(i|k), u(i|k)) = e(i|k)^T Q_x e(i|k) + u(i|k)^T Q_u u(i|k),$$

$$i = 1, 2, \dots$$

考虑到闭环系统的渐近稳定性,有 $V(e(\infty|k)) = 0$, 则 $V(e(1|k)) \geq J_1^\infty(k)$, 即

$$J_1^\infty \leq e(1|k)^T P(k) e(1|k). \quad (21)$$

考虑当前 k 时刻 $e(0|k) = e(k)$ 和 $u(0|k) = u(k)$, 整理式(18)~(21)可得

$$\max J_0^\infty(k) \leq e(k)^T Q_x e(k) + u(k)^T Q_u u(k) + e(1|k)^T P(k) e(1|k), \quad (22)$$

则移动机器人视觉伺服准最小最大模型预测控制问题定义为

$$\min_{u(k), F(k), P(k)} = \{e(k)^T Q_x e(k) + u(k)^T Q_u u(k) + e(1|k)^T P(k) e(1|k)\}.$$

s.t. $e(1|k) = e(k) + B(p(k))u(k);$

$$(I + B(p(i|k))F(k))^T P(k) (I + B(p(i|k))F(k)) - P(k) \leq -Q_x - F(k)^T Q_u F(k), \quad i = 1, 2, \dots;$$

$$v_{\min} \leq u_1(k) \leq v_{\max}, \quad \omega_{\min} \leq u_2(k) \leq \omega_{\max};$$

$$e_{\min} - e \leq B(p(k))u(k) \leq e_{\max} - e. \quad (23)$$

但未来时刻矩阵 B 未知,其数值在多面体(12)中变化. 根据线性系统性质,当多面体顶点满足式(18)时, B 也满足约束(23),即约束重新表示为

$$(I + B_j F(k))^T P(k) (I + B_j F(k)) - P(k) \leq -Q_x - F(k)^T Q_u F(k), \quad (24)$$

其中 B_j 为凸多面体的顶点, $j = 1, 2, 3, 4$.

考虑当前 k 时刻误差信号 $e(k)$, 定义矩阵

$$H_j(k) = \begin{bmatrix} 1 & [e(k) + B(p(k))u(k)]^T \\ [e(k) + B_j u(k)]^T & Q(k) \\ Q_x^{0.5} e(k) & 0 \\ Q_u^{0.5} e(k) & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_j(k) = \begin{bmatrix} Q(k) & Q(k) + Y(k)^T B_j^T \\ Y(k)^T B_j^T & Q(k) \\ Q(k) Q_x^{0.5} & 0 \\ Q_u^{0.5} Y(k) & 0 \end{bmatrix},$$

$$G(k) = \begin{bmatrix} e(k)^T Q_x^{0.5} & u(k)^T Q_u^{0.5} \\ 0 & 0 \\ \gamma I & 0 \\ 0 & \gamma I \end{bmatrix},$$

$$D(k) = \begin{bmatrix} Q(k)^T Q_x^{0.5} & Y(k)^T Q_u^{0.5} \\ 0 & 0 \\ \gamma I & 0 \\ 0 & \gamma I \end{bmatrix}.$$

其中: 变量 γ 和矩阵 $Q(k)$ 和 $Y(k)$ 为待求参数, $j = 1, 2, 3, 4$. 令优化问题(23)的目标函数满足

$$e_k^T Q_x e_k + u_k^T Q_u u_k + e(1|k)^T P(k) e(1|k) \leq \gamma, \quad (25)$$

则将 $e(1|k) = e(k) + B(p(k))u(k)$ 代入式(25), 并对其应用 Schur 补引理^[22], 可得等价条件

$$D(k) \geq 0, \quad G(k) \geq 0. \quad (26)$$

进一步, 对不等式(25)应用 Schur 补引理, 可得等价条件

$$H_j(k) \geq 0, \quad C_j(k) \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (27)$$

结合线性矩阵不等式(26)和(27), 优化问题(23)可等价改写为可实现的线性矩阵不等式描述, 即

$$\min_{\gamma, u(k), Q(k), Y(k)} \gamma.$$

s.t. $H_j(k) \geq 0, \quad C_j(k) \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, 4;$

$$v_{\min} \leq u_1(k) \leq v, \quad \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max};$$

$$e_{\min} - e(k) \leq B(p(k))u(k) \leq e_{\max} - e(k). \quad (28)$$

优化问题(28)是一个半正定优化, 求解后得到最优解 γ^* 、 $u(k)^*$ 、 $Q(k)^*$ 和 $Y(k)^*$. 则移动机器人视觉伺服镇定控制器定义为 $u^{\text{mpc}}(k) = u(k)^*$, 矩阵 $P(k) = \gamma Q(k)^{-1}$ 和 $F(k) = Y(k)^* Q(k)^*$, 相应的闭环视觉伺服镇定控制系统为

$$e(k+1) = e(k) + B(p(k))u^{\text{mpc}}(k), \quad k > 0. \quad (29)$$

总结上述描述过程并应用文献[18]的结果, 可以得到如下结论.

定理1 考虑受限移动机器人视觉伺服系统(9)~(12), 如果优化问题(28)在初始时刻是可行的, 则它在所有时刻都存在最优解, 且所形成的闭环视觉伺服镇定控制系统(29)关于原点渐近稳定.

3 仿真实证

与移动机器人视觉伺服常规 MPC 方法^[15]作仿真比较研究, 仿真软件采用 Matlab 2016b, 运行平台为处理器 Intel(R) Core(TM)i5-7300HQ CPU@2.50 GHz, 电脑内存为 8.0 GB. 仿真场景假定相机放置在距离机器人中心 $l = 0.1$ m 处, 目标点所处的高度 $a = 0.4$ m, 则移动机器人视觉伺服系统为

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega e_2 + 0.25\omega \\ 2.5v + \omega e \\ \omega \end{bmatrix}.$$

进一步的约束条件为

$$0 \leq e_1(k) \leq 3.75, 0 \leq e_2(k) \leq 12.5, \\ |v(k)| \leq 5 \text{ m/s}, |\omega(k)| \leq 3 \text{ rad/s}.$$

则计算多面体的顶点

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & T_s/4 \\ T_s/4 & 0 \\ 0 & T_s \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 & T_s/4 \\ 2.5T_s & 3.75T_s \\ 0 & T_s \end{bmatrix}, \\ B_3 = \begin{bmatrix} 0 & -12.25T_s \\ T_s/4 & 0 \\ 0 & T_s \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} 0 & T_s/4 \\ 2.5T_s/4 & 3.75T_s \\ 0 & T_s \end{bmatrix}.$$

在仿真中,令采样时间 $T_s = 0.1 \text{ s}$,状态加权矩阵 $Q_x = \text{diag}\{0.1, 0.1, 0.1\}$,控制加权矩阵 $Q_u = \text{diag}\{0.1, 0.1\}$,常规MPC预测时域为3 s. 假定移动机器人在世界坐标系的初始位置为 $(-1.5, 5.0, 1.0)$,对应偏差初始值为 $(3.75, 12.5, 1.0)$,其仿真对比结果如图2~图5所示. 其中:实线为采用本文控制方法所取得的控制器,虚线为常规MPC所对应的控制效果.

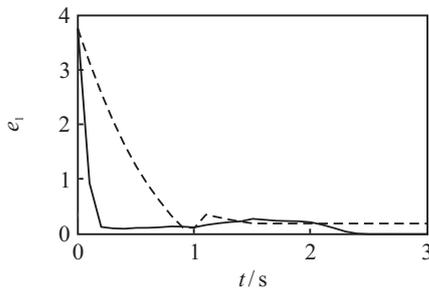


图2 e_1 变化曲线

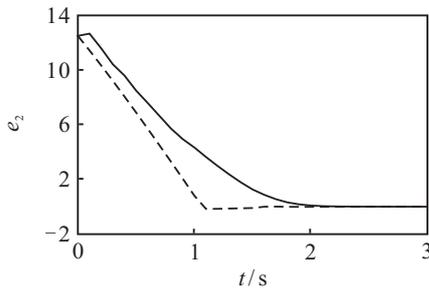


图3 e_2 变化曲线

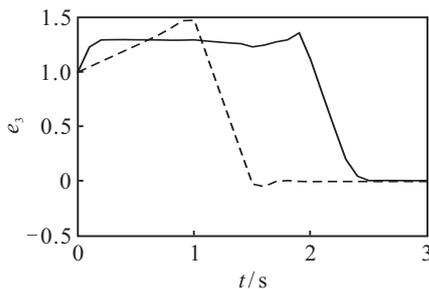


图4 e_3 变化曲线

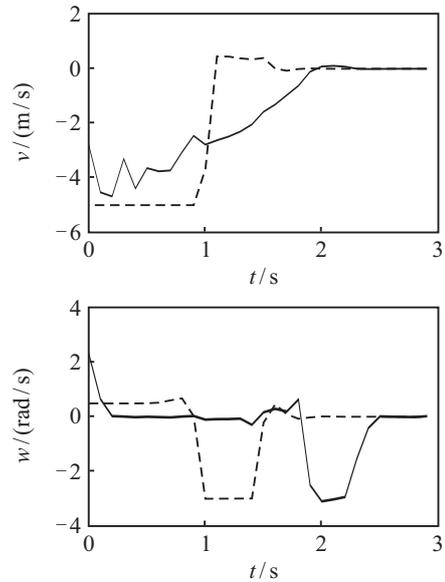


图5 线速度与角速度变化曲线

由图2分析可知,实线 e_1 大致在2.5 s衰减到零点,虚线 e_1 大致在2.0 s收敛到非零值,即移动机器人视觉伺服系统在常规MPC控制作用下存在稳态误差. 同理,由图3和图4分析可以得到类似的结论. 尽管从图2~图4看,本文MPC控制器对应的闭环系统收敛速度慢,但本文MPC控制器可以保证移动机器人视觉伺服系统的渐近稳定性,镇定机器人移动到目标图像位置. 尽管增加常规MPC的预测时域可以减小镇定误差,但由此将增加MPC优化问题的在线计算量,结果如表1所示. 此外,两种MPC控制器都满足控制量约束,如图5所示,但本文MPC控制器的输出更加平缓,有利于移动机器人执行结构的运行.

表1 常规MPC控制下的 e_1 残差和平均单步计算时间

	预测时域/s			
	3	5	10	15
残差 e_1	0.1847	0.086	0.057	0.0497
平均计算时间/s	0.06	0.08	0.14	0.22

在实际情况下,移动机器人视觉伺服控制需要实时性要求,远程预测时域不可能取为无穷,系统总是具有一定的残差. 本文假定 e_1 残差小于0.05时满足实际要求,此时常规MPC控制器所需要的单步计算时间约为0.22 s. 在相同仿真环境下,本文提出的准最小最大MPC所需要的单步计算时间约为0.09 s,且能控制机器人准确地移动到目标图像位置. 相较于常规MPC控制器,本文MPC控制器在提高控制性能的同时,可以大幅度降低优化的在线计算量,这将有利于增加移动机器人视觉伺服镇定MPC系统的应用范围和适用能力.

4 结论

考虑受限移动机器人视觉伺服系统,本文提出了一种视觉伺服镇定准最小最大模型预测控制策略.首先通过视觉伺服镇定误差模型得到移动机器人视觉伺服线性参数时变预测模型.在此基础上,采用无穷预测时域性能函数和线性矩阵不等式约束描述,定义准最小最大MPC半正定优化控制问题,通过在线求解得到移动机器人视觉伺服镇定模型预测控制器.对比实验结果验证了本文提出的移动机器人视觉伺服镇定MPC具有渐近稳定性,同时能显著降低MPC在线计算量.本文结果将为后续研究移动机器人视觉伺服MPC鲁棒性设计和实验奠定基础.

参考文献(References)

- [1] Wang K, Liu Y, Li L. A simple and parallel algorithm for real-time robot localization by fusing monocular vision and odometry/AHRS sensors[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4): 1447-1457.
- [2] Hu G, Tay W P, Wen Y. Cloud robotics: Architecture, challenges and applications[J]. *IEEE Network*, 2012, 26(3): 21-28.
- [3] Wang Y, Lang H X, Silva C W. A hybrid visual servo controller for robust grasping by wheeled mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(5): 757-769.
- [4] Fabian J, Clayton G M. Error analysis for visual odometry on indoor wheeled mobile robots with 3-D sensors[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(6): 1896-1906.
- [5] Song X, Miaomiao F. CLFs-based optimization control for a class of constrained visual servoing systems[J]. *ISA Transactions*, 2017, 67(C): 507-514.
- [6] Salaris P, Pallottino L, Bicchi A. Shortest paths for finned, winged, legged, and wheeled vehicles with side- looking sensors[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(8): 997-1017.
- [7] Kayacan E, Ramon H, Kaynak O, et al. Towards agrobots: Trajectory control of an autonomous tractor using type-2 fuzz logic controllers[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(1): 287-298.
- [8] 张雪波, 方勇纯, 刘玺. 移动机器人自适应视觉伺服镇定控制[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(9): 1123-1130. (Zhang X B, Fang Y C, Liu X. Adaptive visual servo regulation of mobile robots[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(9): 1123-1130.)
- [9] Mariottini G L, Oriolo G, Prattichizzo D. Image-based visual servoing for nonholonomic mobile robots using epipolar geometry[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(1): 87-100.
- [10] Fang Y, Dixon W E, Dawson D M, et al. Homography-based visual servo regulation of mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2005, 35(5): 1041-1050.
- [11] Lopez-Nicolas G, Guerrero J J, Sagues C. Visual control of vehicles using two-view geometry[J]. *Mechatronics*, 2010, 20(2): 315-325.
- [12] Zhang X B, Fang Y C, Liu X. Motion-estimation-based visual servoing of nonholonomic mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(6): 1167-1175.
- [13] 陈虹, 刘志远, 解小华. 非线性模型预测控制的现状与问题[J]. *控制与决策*, 2001, 16(4): 385-391. (Chen H, Liu Z Y, Xie X H. Nonlinear model predictive control: The state and open problems[J]. *Control and Design*, 2001, 16(4): 385-391.)
- [14] 何德峰, 丁宝苍, 于树友. 非线性系统模型预测控制若干基本特点与主题回顾[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(3): 273-287. (He D F, Ding B C, Yu S Y. Review of fundamental properties and topics of model predictive control for nonlinear systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(3): 273-287.)
- [15] Cao Z C, Yin L J, Fu Y L, et al. Predictive control for visual servo stabilization of nonholonomic mobile robots[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(8): 1239-1245.
- [16] Ke F, Li Z. Robust tube-based predictive control for visual servoing of constrained differential-drive mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3437-3445.
- [17] Yu S, Maier C, Chen H, et al. Tube MPC scheme based on robust control invariant set with application to Lipschitz nonlinear systems[J]. *Systems & Control Letters*, 2013, 62(2): 194-200.
- [18] Lu Y, Arkun Y. Quasi-min-max MPC algorithms for LPV systems[J]. *Automatica*, 2000, 36(2): 527-540.
- [19] He D F, Huang H, Chen Q. Quasi-min-max MPC for constrained nonlinear systems with guaranteed input-to-state stability[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(6): 3405-3423.
- [20] 王婷婷, 刘国栋. 结合深度信息的准最小最大MPC方法[J]. *控制与决策*, 2013, 28(7): 1018-1022. (Wang T T, Liu G D. Quasi-min-max MPC for visual servoing system with depth information[J]. *Control and Design*, 2013, 28(7): 1018-1022.)
- [21] Baranyi P. TP model transformation as a way to LMI-based controller design[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(2): 387-400.
- [22] Vanantwerp J G, Braatz R D. A tutorial on linear and bilinear matrix inequalities[J]. *Journal of Process Control*, 2000, 10(4): 363-385.

作者简介

何德峰(1979—),男,教授,博士生导师,从事模型预测控制理论与应用等研究, E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn;

姬超超(1992—),男,硕士生,从事视觉伺服预测控制的研究, E-mail: jccvictory@zjut.edu.cn;

倪洪杰(1978—),男,高级工程师,从事机电一体化、智能演艺装备等研究, E-mail: zdfynhj@zjut.edu.cn.