

文章编号: 1001-0920(2011)09-1436-05

一种高阶滑模控制算法的改进及应用

范金锁¹, 张合新¹, 王桂明², 王新国²

(1. 第二炮兵工程学院 301 室, 西安 710025; 2. 91515 部队 二大队, 海南 三亚 572016)

摘要: 针对一类高阶滑模算法收敛速度慢、控制作用不连续等不足, 以二自由度轮式机器人为控制对象设计了改进算法. 首先, 引入虚拟控制项以增加系统相对阶的形式进行高阶滑模算法改进, 得出了一种新的高阶滑模控制律. 与原算法相比, 系统收敛速度快、控制作用平滑连续. 然后, 为解决二阶超螺旋算法仅适用于系统相对阶为 1 的问题, 以跟踪误差的高阶导数建立滑动量, 构造适用于高阶系统的二阶超螺旋算法. 最后, 通过数值仿真验证了改进算法的有效性.

关键词: 高阶滑模; 虚拟控制; 准连续高阶滑模; 超螺旋算法; 平滑连续

中图分类号: TP113

文献标识码: A

Improvement of higher order sliding mode control and its application

FAN Jin-suo¹, ZHANG He-xin¹, WANG Gui-ming², WANG Xin-guo²

(1. The 301 Section, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China; 2. The 2nd Team, 91515 Military Unit, Sanya 572016, China. Correspondent: FAN Jin-suo, E-mail: fanjinsuo1982@yahoo.com.cn)

Abstract: Modifications are made by using two-dimensional wheeled mobile robot as the control object for solving drawbacks existing in higher order sliding mode control algorithms, such as slowness of the convergence rate and discontinuity of the control action. Firstly, by utilizing virtual item for increasing the relative order of system, a new higher order sliding mode algorithm is achieved. Compared with original algorithms, faster convergence rate and smooth control action can be achieved. Then, by using tracking error's derivative of higher order as the sliding surface, the problem that super-twisting algorithm only holds true for systems of first relative order is solved and the new algorithm can be applied to higher relative order systems. Finally, numerical simulations show effectiveness of the algorithms.

Key words: higher order sliding mode; virtual control; quasi-continuous higher order sliding mode; super-twisting; smoothness and continuity

1 引言

为解决传统滑模控制不连续且抖振严重的问题, 近年来一些学者提出高阶滑模(HOSM)的思想^[1-2]. 其特征是不连续的控制输入作用在滑动模的高阶导数上, 而不像传统滑模控制将不连续的控制输入作用在滑动模的一阶导数上, 这样不仅可以大大削弱系统切换时的抖振, 同时 HOSM 考虑了系统高阶动态特性, 即便在系统装置与控制装置存在某些缺陷时, 仍可确保其具有较高的控制准确度. Levant^[3]首先提出二阶滑模超螺旋算法(super-twisting), 此算法所需信息量少, 控制精度高, 在控制系统设计中得到了广泛应用^[4-5], 但该算法仅适用于相对阶为 1 的控制对象; 随后在文献 [6-8] 中基于非线性方程的齐次性理论设计了有限时间收敛的

任意阶 HOSM 控制算法及 quasi-continuous HOSM 算法, 特别是后一种算法较之一般 HOSM 存在收敛时间短、鲁棒性强等优点, 但是理想情况下在 r 阶滑模面上即 $\sigma = \dot{\sigma} = \dots = \sigma^{(r-1)} = 0$ 处不连续, 控制作用出现高频抖振. [9] 基于二阶和三阶 quasi-continuous HOSM 进行了卫星姿态的高精度跟踪. [10] 利用 HOSM 设计了导弹自动驾驶仪系统, 该系统控制精度高、收敛时间短且对外界干扰及参数不确定性具有强鲁棒性. [11] 将 HOSM 应用于移动机械臂系统的轨迹跟踪控制中, 取得了良好的控制效果.

基于以上研究成果, 本文对 Levant 设计的 HOSM 算法进行以下改进: 1) 引入虚拟控制项以增加系统的相对阶的形式, 改进原 quasi-continuous 算法和一般 HOSM 算法. 为了获得滑动量的高阶微分项, 引入

收稿日期: 2010-06-09; 修回日期: 2010-09-29.

作者简介: 范金锁(1982-), 男, 博士生, 从事滑模控制系统的研究; 张合新(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事飞行器制导与控制等研究.

HOSM 鲁棒精确微分器, 得到快速收敛的滑动量高阶导数. 2) 改进二阶滑模 super-twisting 算法. 在不改变算法设计原理的前提下, 改进滑动量设计方法, 设计带有误差高阶导数项的滑动量, 使之适用于高阶系统. 仿真结果表明, 本文所做的改进算法是正确有效的, 而且改进的 quasi-continuous 算法相比其他算法在收敛速度及控制作用的平滑连续性方面具有一定的优越性.

2 问题描述

本文的目的是改进 Levant 所设计的各种 HOSM 算法, 包括二阶滑模 super-twisting 算法, 一般 HOSM 算法和 quasi-continuous HOSM 算法, 因此以文献 [8] 中二自由度轮式机器人模型为控制对象. 为了方便研究, 模型中纵向速度取已知常数, 有别于一般差分驱动二自由度轮式机器人. 具体模型如下:

$$\dot{x} = v \cos \varphi, \dot{y} = v \sin \varphi, \dot{\varphi} = v/l \tan \theta, \dot{\theta} = u. \quad (1)$$

如图 1 所示, x 和 y 为笛卡尔坐标系的两坐标轴, φ 为方向角, v 为纵向速度, l 为轮式机器人两轮轴之间的距离, θ 为转向角, u 为要设计的控制律. 控制任务是将轮式机器人从一给定的位置转到轨迹 $y = g(x)$ 上.

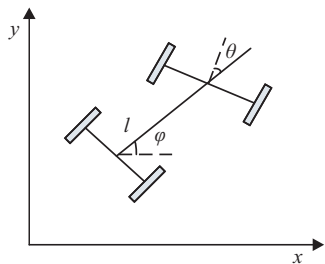


图 1 二自由度轮式机器人运动模型

3 HOSM 改进算法设计

3.1 改进的 quasi-continuous HOSM 控制算法设计

quasi-continuous HOSM 算法基于齐次性理论设计, 该设计方法保证了 SMC 的收敛性, 且使得系统在存在测量噪声、延迟情况下具有可能的最高控制精度. 此算法的缺点是控制作用仅使系统轨迹收敛到平衡点的邻域内, 因为在 r 阶滑模面上, 即 $\sigma = \dot{\sigma} = \dots = \sigma^{(r-1)} = 0$ 处不连续. 此外, 算法在收敛速度、控制作用平滑性方面都有所欠缺, 值得改进.

定义滑动量

$$\sigma = y - g(x), \quad (2)$$

易知系统的相对阶 $r = 3$. 为了对原算法进行改进, 引入虚拟控制 v , 系统 (1) 变为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \varphi, \dot{y} = v \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} &= v/l \tan \theta, \dot{\theta} = u, \dot{u} = v. \end{aligned} \quad (3)$$

系统相对阶变为 $r = 4$. 可见引入虚拟控制项后, 增加了系统的相对阶, 在理论上增加了系统动态的光滑程度. 利用 quasi-continuous 算法, 设计系统的控制律

$$v = -\alpha \phi_{3,4} / N_{3,4}. \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \phi_{3,4} &= \sigma + 3[|\dot{\sigma}| + (|\dot{\sigma}| + 0.5|\sigma|^{3/4})^{-1/3} \times \\ &\quad |\dot{\sigma} + 0.5|\sigma|^{3/4} \text{sign}(\sigma)|]^{-1/2} \times \\ &\quad [\ddot{\sigma} + (|\dot{\sigma}| + 0.5|\sigma|^{3/4})^{-1/3} \times \\ &\quad (\dot{\sigma} + 0.5|\sigma|^{3/4} \text{sign}(\sigma))], \\ N_{3,4} &= |\sigma| + 3[|\dot{\sigma}| + (|\dot{\sigma}| + 0.5|\sigma|^{3/4})^{-1/3} \times \\ &\quad |\dot{\sigma} + 0.5|\sigma|^{3/4} \text{sign}(\sigma)|]^{-1/2} \times \\ &\quad |\ddot{\sigma} + (|\dot{\sigma}| + 0.5|\sigma|^{3/4})^{-1/3} \times \\ &\quad (\dot{\sigma} + 0.5|\sigma|^{3/4} \text{sign}(\sigma))|. \end{aligned} \quad (5)$$

控制律 (4) 和 (5) 除 $\sigma = \dot{\sigma} = \ddot{\sigma} = \sigma^{(3)} = 0$ 外处处连续. 实际控制

$$u = \int v dt, \quad (6)$$

由于积分作用而处处连续, 不仅改善了原算法中的不连续及高频切换等不足, 而且具有收敛时间短、控制平滑连续的优点.

上述改进算法要用到滑动量的高阶微分项, 即 $\sigma^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3$). 因系统状态数据或难以测量, 或测量过程中难免受到噪声影响, 而传统的基于高增益的微分器对测量噪声非常敏感, 这样便有很大的控制误差 [12], 因此在实际应用中 $\sigma^{(k)}$ 很难得到. 这里引入 HOSM 鲁棒精确微分器 [6], 得到快速收敛的滑动量高阶导数. 4 阶滑模鲁棒精确微分器如下:

$$\begin{aligned} \dot{z}_0 &= v_0, \dot{z}_1 = v_1, \dot{z}_2 = v_2, \\ \dot{z}_3 &= -\lambda_3 L \text{sign}(z_3 - v_2), \\ v_0 &= -\lambda_0 L^{1/4} |z_0 - \sigma|^{3/4} \text{sign}(z_0 - \sigma) + z_1, \\ v_1 &= -\lambda_1 L^{1/3} |z_1 - v_0|^{2/3} \text{sign}(z_1 - v_0) + z_2, \\ v_2 &= -\lambda_2 L^{1/2} |z_2 - v_1|^{1/2} \text{sign}(z_2 - v_1) + z_3. \end{aligned} \quad (7)$$

经有限收敛时间, 得

$$\sigma = z_0, \dot{\sigma} = z_1, \ddot{\sigma} = z_2, \overset{\cdot\cdot\cdot}{\sigma} = z_3. \quad (8)$$

将式 (8) 代入 (5), 可得完整的改进型 quasi-continuous HOSM, 即

$$\begin{aligned} v &= -\alpha \phi_{3,4} / N_{3,4}, \\ \phi_{3,4} &= z_3 + 3[|z_2| + (|z_1| + 0.5|z_0|^{3/4})^{-1/3} \times \\ &\quad |z_1 + 0.5|z_0|^{3/4} \text{sign}(z_0)|]^{-1/2} \times \\ &\quad [z_2 + (|z_1| + 0.5|z_0|^{3/4})^{-1/3} \times \\ &\quad (z_1 + 0.5|z_0|^{3/4} \text{sign}(z_0))], \\ N_{3,4} &= |z_3| + 3[|z_2| + (|z_1| + 0.5|z_0|^{3/4})^{-1/3} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & |z_1 + 0.5|z_0|^{3/4}\text{sign}(z_0)|^{-1/2}|z_2 + (|z_1| + \\ & 0.5|z_0|^{3/4})^{-1/3}(z_1 + 0.5|z_0|^{3/4}\text{sign}(z_0))|, \\ & u = \int v dt. \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 改进的一般 HOSM 控制算法设计

一般 HOSM 实际上是 Filippov 意义下不连续集上的运动. 滑动阶描述了滑模面附近邻域内动态的光滑性(具有对时间的高阶导数). 如果控制任务是将系统动态约束到一个光滑函数 $\sigma = 0$ 上, 则滑动阶次即是在滑模面附近邻域内的一系列连续的关于 σ 的全导数. 这里同样引入虚拟控制项 v , 设计理论上具有去抖效果的 HOSM 控制算法.

滑动量和控制对象同样取为式(2)和(3), 计算得

$$\sigma^{(4)} = \phi + \frac{v^2 \sec^2 \theta \cos \varphi}{l} v, \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \phi = & \frac{2v^2 \sec^2 \theta \tan \theta}{l} \dot{\theta} \cos \varphi \cdot u - \frac{v^2 \sec^2 \theta \sin \varphi}{l} \dot{\varphi} u - \\ & \frac{v^3 \sec^2 \theta \sin \varphi}{l^2} \dot{\theta} - \frac{v^3 \tan \theta \cos \varphi}{l^2} \dot{\varphi}. \end{aligned} \quad (11)$$

由已知条件可知 $|\phi|$ 有界, 即 $|\phi| \leq \Phi$, Φ 为正实数, 满足一般 HOSM 存在条件. 当控制 v 取

$$\begin{aligned} v = & -\alpha \text{sign}\{\sigma + 3(\ddot{\sigma}^6 + \dot{\sigma}^4 + |\sigma|^3)^{1/12} \text{sign}[\ddot{\sigma} + \\ & (\dot{\sigma}^4 + |\sigma|^3)^{1/6} \text{sign}(\dot{\sigma} + 0.5|\sigma|^{3/4} \text{sign} \sigma)]\}, \\ \dot{u}(t) = & v \end{aligned} \quad (12)$$

时, HOSM 使 $\sigma = \dot{\sigma} = \ddot{\sigma} = \ddot{\sigma} = 0$ 在有限时间内成立. $\sigma^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3$) 同样难以直接计算获取, 只能由式(7)估计得到. 此改进算法不仅保留了传统滑模控制方法的鲁棒性、算法简单等优点, 而且大大削弱了滑模控制系统的抖振.

3.3 改进的 super-twisting 控制算法设计

高阶滑模控制实现中的主要问题是需要增加信息量, 即保持滑动量 $\sigma = 0$ 的任意 r 阶控制器都需要 $\sigma, \dot{\sigma}, \dots, \sigma^{(r-1)}$ 值. 二阶滑模中的 super-twisting 控制算法^[3]只需要测量 σ 即可, 不需要其对时间的导数 $\dot{\sigma}$. 采用 super-twisting 算法的系统状态运动轨迹在相平面的原点周围旋转, 相轨迹围绕原点旋转有限圈后于有限的时间内收敛于原点. 传统的二阶 super-twisting 算法只适用于相对阶 $r = 1$ 的情形, 而本文的控制对象中 $r = 3$. 为此, 这里引入跟踪误差的高阶导数, 重新设计滑动量.

由 $e = y - g(x)$, 原算法中滑动量取为 $\sigma = e$. 为了同时满足控制对象 $r = 3$ 和算法相对阶 $r = 1$, 设计新的滑动量为

$$\sigma = \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e. \quad (13)$$

选择实常数 c_1 和 c_0 使式(13)具有期望的系统动态. 这里 $e^{(k)}$ ($k = 1, 2$) 同样利用式(7)估计得到.

为了进行 super-twisting 控制算法设计, 首先进行二阶滑模存在条件的判断. 对式(13)微分, 得

$$\dot{\sigma} = \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e, \quad (14)$$

代入控制对象模型可得

$$\dot{\sigma} = \psi(t) + \frac{v^2}{l} \sec^2 \theta \cdot \cos \varphi \cdot u, \quad (15)$$

其中

$$\psi(t) = -\frac{v^3}{l^2} \tan \theta \cdot \sin \varphi - g(x) + c_1 \dot{e} + c_0 e. \quad (16)$$

由已知条件知 $|\psi(t)| \leq N$, N 为正实数, 所以二阶滑模存在条件成立.

引理 1 考虑如下—阶非线性微分方程:

$$\dot{\sigma} + \alpha|\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) + \beta \int \text{sign}(\sigma) d\tau = f(t), \quad (17)$$

其中 $|f(t)| \leq L$, L 为微分方程的 Lipschitz 常数. 如果取 $\alpha = 1.5\sqrt{L}$, $\beta = 1.1L$, 则式(17)解 σ 及其导数 $\dot{\sigma}$ 在有限的时间内收敛于零点.

引理证明过程参见文献[3]. 设控制律

$$u = -\alpha_1 |\sigma|^{1/2} \text{sign} \sigma - \beta_1 \int \text{sign} \sigma d\tau, \quad (18)$$

将式(18)代入(15), 得

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} + \frac{v^2}{l} \sec^2 \theta \cdot \cos \varphi \left[\alpha_1 |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) + \right. \\ \left. \beta_1 \int \text{sign}(\sigma) d\tau \right] = \psi(t). \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)的形式与式(17)完全相同. 因此由引理 1 可知, 在控制律(18)作用下式(19)解 σ 及其导数 $\dot{\sigma}$ 在有限的时间内收敛于零点. 尽管控制作用中出现符号函数 $\text{sign}(\cdot)$, 但是由于积分作用, 式(19)在理论上仍然是连续的. 注意到 $\sigma = \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e$, 因此跟踪误差 e 可以达到渐近收敛的效果.

4 仿真结果及分析

分别进行原 quasi-continuous HOSM 控制算法和的本文改进控制算法仿真(包括改进的一般 HOSM 控制算法、改进的 super-twisting 控制算法及改进的 quasi-continuous HOSM 控制算法, 原一般 HOSM 控制算法仿真见文献[6]), 以验证本文改进算法的有效性. 模型中各变量取值为 $v = \text{const} = 10 \text{ m/s}$, $l = 5 \text{ m}$, $g(x) = 10 \sin 0.05x + 5$, $t = 0$ 时 $x = y = \varphi = \theta = 0$.

4.1 原 quasi-continuous HOSM 控制算法仿真

取 $\alpha = 1$, $L = 400$, 依据文献[7]得控制律

$$\begin{aligned} u = & -[z_2 + 2(|z_1| + |z_0|^{2/3})^{-1/2}(z_1 + \\ & |z_0|^{2/3} \text{sign} z_0)] / [|z_2| + 2(|z_1| + |z_0|^{2/3})^{1/2}], \\ \dot{z}_0 = & v_0, \quad \dot{z}_1 = v_1, \quad \dot{z}_2 = -440 \text{sign}(z_2 - v_1) \\ v_0 = & -14.7361|z_0 - \sigma|^{2/3} \text{sign}(z_0 - \sigma) + z_1, \\ v_1 = & -30|z_1 - v_0|^{1/2} \text{sign}(z_1 - v_0) + z_2. \end{aligned} \quad (20)$$

仿真结果如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 系统可以达到良好的跟踪效果且收敛时间较快, σ 及其一

阶、二阶导数大约9s左右收敛于0,但是此时的控制 u 表现为高频切换.

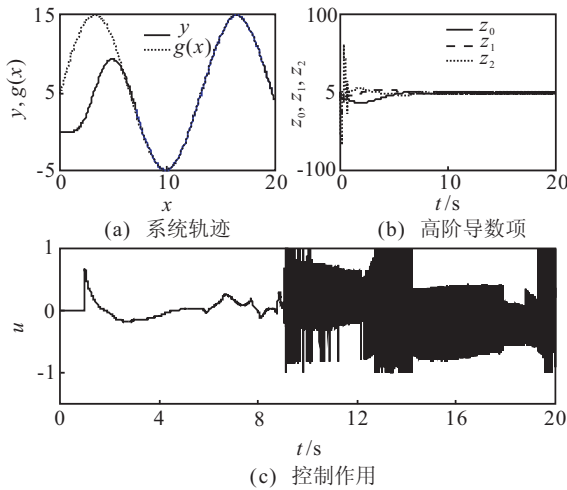


图2 quasi-continuous HOSM控制算法仿真结果

4.2 改进的一般HOSM控制算法仿真

4阶微分器选取为

$$\begin{aligned} \dot{z}_0 &= v_0, \dot{z}_1 = v_1, \dot{z}_2 = v_2, \\ v_0 &= -25|z_0 - \sigma|^{3/4} \text{sign}(z_0 - \sigma) + z_1, \\ v_1 &= -25|z_1 - v_0|^{2/3} \text{sign}(z_1 - v_0) + z_2, \\ v_2 &= -33|z_2 - v_1|^{1/2} \text{sign}(z_2 - v_1) + z_3, \\ z_3 &= -500 \text{sign}(z_3 - v_2). \end{aligned} \quad (21)$$

控制算法(12)中取 $\alpha = 1$, 仿真结果如图3所示. 从图3中可以看出,改进的一般HOSM控制算法同样可以使系统在有限的时间内收敛到预定轨迹,且滑动量 σ 及其高阶导数在有限时间内收敛于0,收敛时间约为11s.但是虚拟控制 v 从一开始就是高频切换的,即使增加积分作用后的控制律 u 并不平滑,甚至在仿真后期出现小幅振荡.

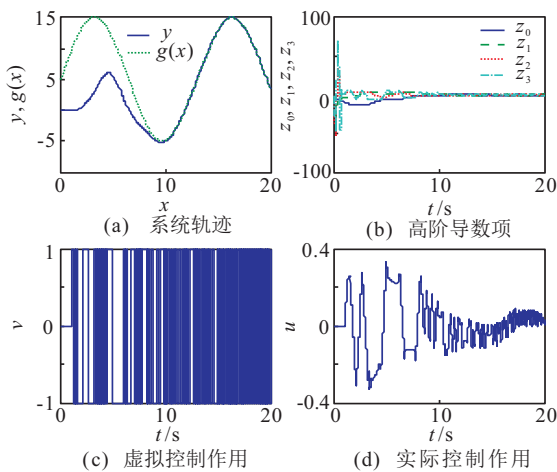


图3 改进的一般HOSM控制算法仿真结果

4.3 改进的一般HOSM控制算法仿真

super-twisting 控制算法中 e, \dot{e}, \ddot{e} 的获取同式(21). 控制律(18)中,令 $\alpha_1 = -0.28, \beta_1 = -0.3$, 于是完整

的改进型 super-twisting 算法为

$$u = -0.28|\sigma|^{1/2} \text{sign}\sigma - 0.3 \int \text{sign}\sigma d\tau. \quad (22)$$

仿真结果如图4所示.从图4中可以看出,改进后的 super-twisting 控制算法可以使得高阶系统收敛,但是只能达到渐近收敛的效果,收敛速度较慢.

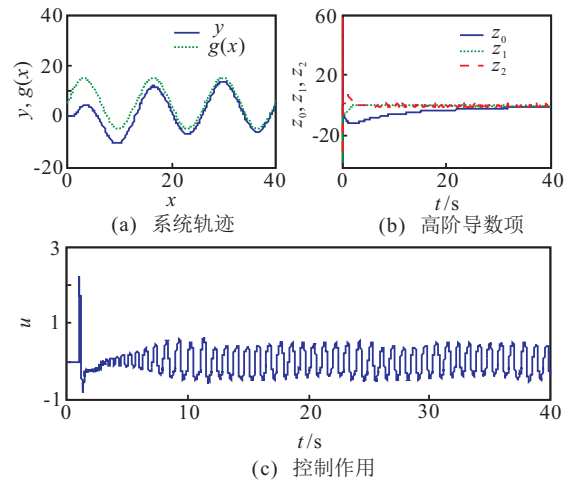


图4 改进的 super-twisting 控制算法仿真结果

4.4 改进的 quasi-continuous HOSM 控制算法仿真

控制律(9)中取 $\alpha = 1$, 仿真结果如图5所示.从图5可以看出,系统不仅可以达到良好的跟踪效果,而且控制作用 u 连续平滑(尽管虚拟控制 v 在滑模面上存在高频振荡).比较图2~图5可以发现,采用改进的 quasi-continuous HOSM 控制算法收敛时间约为6s,小于原算法的9s,改进的一般HOSM控制算法的11s以及改进 super-twisting 控制算法的渐近收敛时间;控制作用相对于其他算法真正达到了连续平滑的效果.

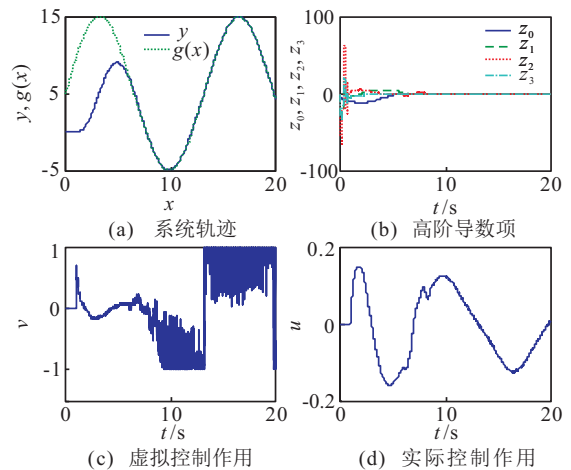


图5 改进的 super-twisting 控制算法仿真结果

5 结论

本文针对 Levant 设计的 HOSM 控制算法存在的收敛速度慢、控制作用不连续等不足之处,分别引入虚拟控制项及高阶跟踪误差项进行了算法的改

进,以二自由度轮式机器人为例分别设计了基于各种HOSM算法的控制器.仿真结果表明,各改进算法均能够实现系统的精确跟踪,其中改进的quasi-continuous HOSM控制算法在收敛速度及控制作用的平滑连续性方面均优于原算法及其他改进算法.

参考文献(References)

- [1] Young K D, Ozguner U. Sliding mode control engineering in practice[C]. Proc of American Conf. San Diego, 1999: 150-162.
- [2] Utkin V, Guldner J, Lianos D. Sliding modes in electromechanical systems[M]. London: Taylor & Francis, 1999.
- [3] Levant A. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control[J]. Int J of Control, 1993, 58(6): 1247-1263.
- [4] Bartolini G, Pisano A, Punta E. A survey of applications of second-order sliding mode control to mechanical systems[J]. Int J of Control, 2003, 76(9/10): 875-892.
- [5] Shtessel Y B, Shkolnikov A, Levant A. Smooth second-order sliding modes: Missile guidance application[J]. Automatica, 2007, 43(8): 1470-1476.
- [6] Levant A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control[J]. Int J of Control, 2003, 76(9/10): 924-941.
- [7] Levant A. Homogeneity approach to high-order sliding mode design[J]. Automatica, 2005, 41(5): 823-830.
- [8] Levant A. Quasi-continuous high order sliding mode controllers[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(11): 1812-1816.
- [9] Pukdeboon C, Zinober A S, Thein M W. Quasi-continuous higher order sliding mode controller designs for spacecraft attitude tracking maneuvers[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 57(4): 1436-1444.
- [10] Shtessel Y B, Christian H. Integrated higher-order sliding mode guidance and autopilot for dual-control missiles[J]. J of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(1): 79-94.
- [11] 吴玉香, 胡跃明. 二阶动态滑模控制在移动机械臂输出跟踪中的应用[J]. 控制理论与应用. 2006, 23(3): 411-420.
(Wu Y X, Hu Y M. Second order dynamical sliding mode control and its application to output tracking of mobile manipulators[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(3): 411-420.)
- [12] Atassi A N, Khalil H K. Separation results for the stabilization of nonlinear systems using different high-gain observer designs[J]. Systems and Control Letters, 2000, 39(3): 183-191

(上接第1435页)

- [6] 郭振凯, 宋召青, 毛剑琴. 基于最小二乘支持向量机的非线性广义预测控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 520-525.
(Guo Z K, Song Z Q, Mao J Q. Nonlinear generalized predictive control based on least square support vector machine[J]. Control and Decision, 2009, 24(4): 520-525.)
- [7] Carlson N A, Berarducci M P. Federated Kalman filter simulation results[J]. J of Institute of Navigation, 1994, 41(3): 29-321.
- [8] 张斌, 陈哲. INS/双星/GPS 联邦最小二乘滤波容错结构研究[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(1): 41-45.
(Zhang B, Chen Z. Federated least square filtering fault-tolerance design on INS/DS/GPS integrated navigation system[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(1): 41-45.)
- [9] 李惠峰, 李应举, 宁伟. 基于CNS仿真器的弹道导弹SINS/CNS/GNSS组合导航系统研究[J]. 弹箭与制导学, 2008, 28(1): 61-63.
(Li H F, Li Y J, Ning W. SINS / CNS / GNSS integrated navigation system based on CNS simulator for ballistic missile[J]. J of Projectiles, Rockets, Missile and Guidance, 2008, 28(1): 61-63.)
- [10] 张明源, 王宏力, 李康伟, 等. INS/CNS/GPS组合导航数据融合算法与仿真研究[J]. 电光与控制, 2008, 15(4): 42-44.
(Zhang M Y, Wang H L, Li K W, et al. On data-fusion algorithm and simulation of INS/CNS/GPS integrated navigation system[J]. Electronics Optics and Control, 2008, 15(4): 42-44.)