



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104267743 B

(45)授权公告日 2017.01.11

(21)申请号 201410351761.1

(22)申请日 2014.07.22

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104267743 A

(43)申请公布日 2015.01.07

(73)专利权人 浙江工业大学
地址 310014 浙江省杭州市下城区朝晖六区潮王路18号

(72)发明人 张文安 马剑 董辉 赖宏焕
刘凯

(74)专利代理机构 杭州斯可睿专利事务所有限
公司 33241

代理人 王利强

(51)Int. Cl.
G05D 3/12(2006.01)

(56)对比文件

CN 102117075 A,2011.07.06,
CN 102122172 A,2011.07.13,
CN 102322816 A,2012.01.18,
CN 102355574 A,2012.02.15,
US 2014/0028992 A1,2014.01.30,

审查员 徐东亮

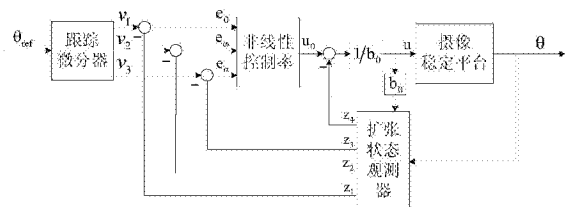
权利要求书3页 说明书8页 附图2页

(54)发明名称

一种采用自抗扰控制技术的船载摄像稳定平台控制方法

(57)摘要

一种基于自抗扰控制技术的船载摄像稳定平台控制方法。包括以下步骤:1)建立船载摄像稳定平台控制系统的离散时间状态空间模型;2)设计跟踪微分器,使摄像稳定平台的转动角度尽可能快而无超调地跟踪上参考角度;3)设计扩张状态观测器,估计出摄像稳定平台的转动角度、转动角速度、转动角加速度以及总和扰动;4)根据跟踪微分器和扩张状态观测器的输出获得角度、角速度、角加速度的跟踪误差,进而根据这些误差信息设计非线性控制律和扰动补偿策略。本发明不仅能保证摄像稳定平台的跟踪精度和跟踪的快速性,又具有强抗干扰能力。



1.一种采用自抗扰控制技术的船载摄像稳定平台控制方法,所述方法包括如下步骤:

步骤(1)、通过分析方位、俯仰和横滚三个方向子系统的组成,建立船载摄像稳定平台控制系统模型,摄像稳定平台的各方向子系统均由PWM驱动器、功率放大器、步进电机和传动机构组成,串联后所得的摄像稳定平台各方向子系统的三阶传递函数模型是:

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{b}{s^3 + a_2s^2 + a_1s} \quad (1)$$

其中, $a_1 = \frac{C_e C_m}{JL}$, $a_2 = \frac{L}{R}$, $b = \frac{iK_a C_m}{JL}$, R为电枢回路总电阻, L为电枢回路的电感, C_e

为电动势系数, C_m 为电机额定励磁下的转矩系数, J为电机的转动惯量, K_a 为功放的传递函数, i是传动机构的减速比, $\theta(s)$ 为电机转角的拉氏变换, $u(s)$ 为导通电压的拉氏变换;

进一步,将传递函数模型(1)转换为如下状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) = -a_1x_2(t) - a_2x_3(t) + bu(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x_1(t)$ 为摄像稳定平台的转角, $x_2(t)$ 为摄像稳定平台的转动角速度, $x_3(t)$ 为摄像稳定平台的转动角加速度, $u(t)$ 为控制量,即导通电压;

将状态空间模型(2)以采样周期T离散化得到如下离散化的状态空间模型:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tx_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + T[-a_1x_2(k) - a_2x_3(k) + bu(k)] \end{cases} \quad (3)$$

步骤(2)、为参考角度安排过渡过程并设计跟踪微分器,使摄像稳定平台转动角度尽可能快而无超调地跟踪上参考角度,参考角度的过渡过程信号及其微分跟踪器按如下方程给出:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hv_3(k) \\ v_3(k+1) = v_3(k) + hfs \\ fs = -r(r(v_1(k) - \theta(k)) + 3v_2(k)) + 3v_3(k) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $v_1(k)$ 是对摄像稳定平台的转动参考角度安排的过渡过程信号, $v_2(k)$ 和 $v_3(k)$ 分别是此过渡过程信号的近似一阶微分信号和近似二阶微分信号, fs 为快速综合函数, r 为快速跟踪因子,与过渡过程达到稳态值想要的时间成反比,且受系统承受能力制约,取值不可太大, h 为积分步长,一般取系统的采样周期T;

步骤(3)、设计扩张状态观测器,获得摄像稳定平台的转角、角速度、角加速度以及总和

扰动量的估计值,对于如式(3)所示的摄像稳定平台离散时间系统模型,令 $x_4(k) = -a_1x_2(k) - a_2x_3(k)$ 作为扩张出的新的状态变量,并记 $w(k) = \frac{x_4(k+1) - x_4(k)}{T}$,那么状态扩张

后的摄像稳定平台离散时间系统模型是:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tx_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + T[x_4(k) + bu(k)] \\ x_4(k+1) = x_4(k) + Tw(k) \end{cases} \quad (5)$$

系统(5)的扩张状态观测器是:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - x_1(k) \\ fe = fal(e(k), \alpha_1, \delta) \\ fe1 = fal(e(k), \alpha_2, \delta) \\ fe2 = fal(e(k), \alpha_3, \delta) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e(k)) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}fe) \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h(z_4(k) - \beta_{03}fe1 + b_0u(k)) \\ z_4(k+1) = z_4(k) + h(-\beta_{04}fe2) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $e(k)$ 是摄像稳定平台转动角度估计值与实际转动角度的差, $z_1(k)$ 是摄像稳定平台实际转动角度 $x_1(k)$ 的估计值, $z_2(k)$ 是摄像稳定平台转动角速度 $x_2(k)$ 的估计值, $z_3(k)$ 是摄像稳定平台转动角加速度 $x_3(k)$ 的估计值, $z_4(k)$ 是扩张状态变量 $x_4(k)$ 即系统总和扰动的估计值, b_0 是对状态空间模型(2)中 b 的估计值, h 是积分步长, $fal(e(k), \alpha_i, \delta)$ 是一非线性函数,具体表达式如下:

$$fal(e(k), \alpha_i, \delta) = \begin{cases} \frac{e(k)}{\delta^{1-\alpha_i}}, & |e(k)| \leq \delta \\ |e(k)|^{\alpha_i} \text{sign}(e(k)), & |e(k)| > \delta \end{cases} \quad (7)$$

其中, α_i 为幂指数,在扩张状态观测器中一般取 $\alpha_i = \frac{1}{2^i}$, δ 为线性段的区间长度, $\text{sign}()$

为符号函数,并具有如下形式:

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

β_{0i}, δ 为一组待整定参数, $i=1, \dots, 4$,一般取 $\delta = kh$, k 为整数, $\beta_{01} = \frac{1}{h}$,

$$\beta_{02} \approx \frac{1}{1.6h^{1.5}}, \quad \beta_{03} \approx \frac{1}{8.6h^{2.2}}, \quad \beta_{04} \approx \frac{1}{4.2h^{3.4}},$$

步骤(4)、根据扩张状态观测器和跟踪微分器的输出获得摄像稳定平台的转角、角速度、角加速度的跟踪误差,将这些误差信号通过非线性组合获得误差反馈控制律,基于该控制律并通过总和扰动的动态线性化补偿达到参考角度快速跟踪和抑制内外扰动的目的,根据步骤(3)中的扩张状态观测器和步骤(2)中的跟踪微分器的输出可得到如下误差信号:

$$\begin{cases} e_1(k) = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2(k) = v_2(k) - z_2(k) \\ e_3(k) = v_3(k) - z_3(k) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $e_1(k)$ 是摄像稳定平台的转角跟踪误差, $e_2(k)$ 是摄像稳定平台的角速度跟踪误差, $e_3(k)$ 是摄像稳定平台的角加速度跟踪误差,这些误差量经过非线性组合

$u_0(k) = \sum_{i=1}^3 \beta_i \text{fal}(e_i(k), \alpha_i, \delta)$ 得到误差反馈控制律 u_0 ,其中 β_i 和 α_i 是待整定的参数,一般地 $\alpha_1=0.75, \alpha_2=1.25, \alpha_3=1.75, \beta_i$ 为各误差的反馈增益,可参考PD控制增益进行调节;将

由步骤(3)获得的总和扰动的估计值 $z_4(k)$ 通过形如 $u(k) = \frac{u_0(k) - z_4(k)}{b_0}$ 的补偿过程得

到最终的控制量 $u(k)$,那么如式(5)所示的摄像稳定平台离散状态空间模型转化为:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tx_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + Tu_0(k) \end{cases} \quad (10)$$

如此,摄像稳定平台控制系统的总和扰动被补偿消除,成为不含扰动项的积分串联型系统,从而达到抑制内外扰动的目的。

一种采用自抗扰控制技术的船载摄像稳定平台控制方法

技术领域

[0001] 本发明应用于摄像稳定平台控制领域,涉及一种适用于船载摄像的基于自抗扰控制技术的稳定平台实时控制方法。

背景技术

[0002] 摄像稳定平台集电机运动控制、数据采集、信号处理、惯性导航和图像处理等多项技术于一身,是以机电一体化、目标识别自动控制技术为主体、多个学科相结合的产物,它广泛应用于某些舰船、飞行器、车辆等运动载体上。

[0003] 船舶在水上航行时,受风浪的影响会出现晃动现象。船舶上的摄像机受到船舶晃动的影响而不稳定,导致被摄像目标丢失。为了克服船舶摇摆对船载摄像机的影响,摄像机必须架设在稳定平台上。通过控制稳定平台的方位、俯仰和滚转等驱动系统对船舶的晃动进行补偿,达到隔离船体扰动的目的,保证稳定平台一直处于预期的位置状态,从而使摄像机准确地保持对海、空目标的跟踪与定位。

[0004] 摄像稳定平台按照有无动力源可分为无源平台和有源平台。无源平台利用重力摆原理直接隔离船舶的运动但是响应速度慢。有源平台利用惯性器件检测船舶的晃动,通过伺服控制系统隔离船舶的晃动影响。评价摄像稳定平台控制性能的指标有平台转动角度、平台转动角速度、目标跟踪精度、目标跟踪时间和平台抗干扰能力等。平台转动角度和角速度主要依靠平台的结构设计和优化达到要求,而提高系统的动静态响应性能,增强系统抗干扰的能力主要依靠伺服系统的控制算法设计。现有的稳定平台控制方法包括经典的PID控制、变结构控制以及模糊控制。其中,传统PID控制使用方便且有较好的抗干扰能力,但是无法同时达到满意的目标跟踪时间和目标跟踪精度;变结构控制对平台的干扰有自适应性,但它的缺点是滑动运动的同时伴随着高频抖振,这将对系统的性能造成很大影响;模糊控制设计尚缺乏系统性,对复杂系统控制难以奏效,而且其平台跟踪精度和模糊决策的速度存在矛盾。

发明内容

[0005] 为了克服现有的船载摄像技术的不能兼顾跟踪精度和跟踪快速性、抗干扰能力较差的不足,本发明提供了一种基于自抗扰控制技术的船载摄像稳定平台控制方法,在保证稳定平台的跟踪精度和跟踪快速性的同时,又具有很强的抗干扰能力。

[0006] 本发明解决上述技术问题是通过以下技术方案实现的:

[0007] 一种采用自抗扰控制技术的船载摄像稳定平台控制方法,所述方法包括如下步骤:

[0008] 步骤1)、通过分析方位、俯仰和横滚三个方向子系统的组成,建立船载摄像稳定平台控制系统模型,串联后所得的摄像稳定平台各方向子系统的三阶传递函数模型是:

$$[0009] \quad \frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{b}{s^3 + a_2s^2 + a_1s} \quad (1)$$

[0010] 其中, $a_1 = \frac{C_e C_m}{JL}$, $a_2 = \frac{L}{R}$, $b = \frac{iK_a C_m}{JL}$, R为电枢回路总电阻, L为电枢回路的电

感, C_e 为电动势系数, C_m 为电机额定励磁下的转矩系数, J为电机的转动惯量, K_a 为功放的传递函数, i是传动机构的减速比, $\theta(s)$ 为电机转角的拉氏变换, $u(s)$ 为导通电压的拉氏变换;

[0011] 将传递函数模型(1)转换为如下状态空间模型:

$$[0012] \quad \begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) = -a_1 x_2(t) - a_2 x_3(t) + bu(t) \end{cases} \quad (2)$$

[0013] 其中, $x_1(t)$ 为摄像稳定平台的转角, $x_2(t)$ 为摄像稳定平台的转动角速度, $x_3(t)$ 为摄像稳定平台的转动角加速度, $u(t)$ 为控制量, 即导通电压;

[0014] 将状态空间模型(2)以采样周期T离散化得到如下离散化的状态空间模型:

$$[0015] \quad \begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tx_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + T[-a_1 x_2(k) - a_2 x_3(k) + bu(k)] \end{cases} \quad (3)$$

[0016] 步骤2)、为参考角度安排过渡过程并设计跟踪微分器, 使摄像稳定平台转动角度尽可能快而无超调地跟踪上参考角度; 参考角度的过渡过程信号及其微分跟踪器按如下方程给出:

$$[0017] \quad \begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hv_3(k) \\ v_3(k+1) = v_3(k) + hfs \\ fs = -r(r(v_1(k) - \theta(k)) + 3v_2(k)) + 3v_3(k) \end{cases} \quad (4)$$

[0018] 其中, $v_1(k)$ 是对摄像稳定平台的转动参考角度安排的过渡过程信号, $v_2(k)$ 和 $v_3(k)$ 分别是此过渡过程信号的近似一阶微分信号和近似二阶微分信号, fs 为快速综合函数; r 为快速跟踪因子, 与过渡过程达到稳态值想要的时间成反比, 且受系统承受能力制约; h 为积分步长;

[0019] 步骤3)、设计扩张状态观测器, 获得摄像稳定平台的转角、角速度、角加速度以及总和扰动量的估计值;

[0020] 对于如式(3)所示的摄像稳定平台离散时间系统模型, 令 $x_4(k) = -a_1 x_2(k) - a_2 x_3(k)$ 作为扩张出的新的状态变量, 并记 $w(k) = \frac{x_4(k+1) - x_4(k)}{T}$, 那么状态扩张后的摄像稳定平台离散时间系统模型是:

$$[0021] \quad \begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tx_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + T[x_4(k) + bu(k)] \\ x_4(k+1) = x_4(k) + Tw(k) \end{cases} \quad (5)$$

[0022] 系统模型(5)的扩张状态观测器是：

$$[0023] \quad \begin{cases} e(k) = z_1(k) - x_1(k) \\ fe = fal(e(k), \alpha_1, \delta) \\ fe1 = fal(e(k), \alpha_2, \delta) \\ fe2 = fal(e(k), \alpha_3, \delta) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e(k)) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}fe) \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h(z_4(k) - \beta_{03}fe1 + b_0u(k)) \\ z_4(k+1) = z_4(k) + h(-\beta_{04}fe2) \end{cases} \quad (6)$$

[0024] 其中, $e(k)$ 是摄像稳定平台转动角度估计值与实际转动角度的差, $z_1(k)$ 是摄像稳定平台实际转动角度 $x_1(k)$ 的估计值, $z_2(k)$ 是摄像稳定平台转动角速度 $x_2(k)$ 的估计值, $z_3(k)$ 是摄像稳定平台转动角加速度 $x_3(k)$ 的估计值, $z_4(k)$ 是扩张状态变量 $x_4(k)$ 即系统总和扰动的估计值, b_0 是对状态空间模型(2)中 b 的估计值。 h 是积分步长, $fal(e(k), \alpha_i, \delta)$ 是一非线性函数, 具体表达式如下：

$$[0025] \quad fal(e(k), \alpha_i, \delta) = \begin{cases} \frac{e(k)}{\delta^{1-\alpha_i}}, & |e(k)| \leq \delta \\ |e(k)|^{\alpha_i} sign(e(k)), & |e(k)| > \delta \end{cases} \quad (7)$$

[0026] 其中, α_i 为幂指数, 在扩张状态观测器中一般取 $\alpha_i = \frac{1}{2^i}$; δ 为线性段的区间长度, $sign()$ 为符号函数, 并具有如下形式：

$$[0027] \quad sign(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

[0028] $\beta_{0i} (i=1, \dots, 4)$ 、 δ 为一组待整定参数；

[0029] 步骤4)、根据扩张状态观测器和跟踪微分器的输出获得摄像稳定平台的转角、角速度、角加速度的跟踪误差, 将这些误差信号通过非线性组合获得误差反馈控制律；

[0030] 根据步骤3)中的扩张状态观测器和步骤2)中的跟踪微分器的输出得到如下误差信号：

$$[0031] \quad \begin{cases} e_1(k) = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2(k) = v_2(k) - z_2(k) \\ e_3(k) = v_3(k) - z_3(k) \end{cases} \quad (9)$$

[0032] 其中, $e_1(k)$ 是摄像稳定平台的转角跟踪误差, $e_2(k)$ 是摄像稳定平台的角速度跟踪误差, $e_3(k)$ 是摄像稳定平台的角加速度跟踪误差, 这些误差量经过非线性组合

$u_0(k) = \sum_{i=1}^3 \beta_i \text{fal}(e_i(k), \alpha_i, \delta)$ 得到误差反馈控制律 u_0 , 其中 β_i 和 α_i 是待整定的参数, β_i 为各

误差的反馈增益, 参考 PD 控制增益进行调节; 将由步骤 3) 获得的总和扰动的估计值 $z_4(k)$ 通

过形如 $u(k) = \frac{u_0(k) - z_4(k)}{b_0}$ 的补偿过程得到最终的控制量 $u(k)$, 那么如式 (5) 所示的摄

像稳定平台离散状态空间模型转化为:

$$[0033] \quad \begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tx_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + Tu_0(k) \end{cases} \quad (10)$$

[0034] 摄像稳定平台控制系统的总和扰动被补偿消除, 成为不含扰动项的积分串联型系统。

[0035] 与现有技术相比, 本发明的优点在于:

[0036] 本发明设计的船载摄像稳定平台自抗扰控制方法包括跟踪微分器, 扩张状态观测器和非线性控制律。其中, 跟踪微分器给出平台参考转角的过渡过程, 使得误差量不发生突变, 避免稳定平台角度的突变而造成超调问题; 扩张状态观测器能快速估计转角的各个状态信息, 实时跟踪扰动并给予补偿; 非线性控制律有高效调节控制量的作用。本发明不仅能保证摄像稳定平台的跟踪精度和跟踪快速性, 又具有强抗干扰能力。

附图说明

[0037] 图1是船载摄像稳定平台三轴正交的框架式结构图。

[0038] 图2是船载摄像稳定平台控制系统结构图。

[0039] 图3是方位角控制原理示意图。

[0040] 图4是自抗扰控制器结构图。

具体实施方式

[0041] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清晰, 下面结合附图对本发明的技术方案作进一步描述。

[0042] 参照图1~图4, 一种采用自抗扰控制技术的船载摄像稳定平台控制方法, 所述方法包括以下步骤:

[0043] 步骤1)、建立船载摄像稳定平台控制系统的离散时间状态空间模型。

[0044] 摄像稳定平台的各方向子系统均由PWM驱动器、功率放大器、步进电机和传动机构

组成,串联后所得的摄像稳定平台各方向子系统的三阶传递函数模型是:

$$[0045] \quad \frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{b}{s^3 + a_2s^2 + a_1s} \quad (1)$$

[0046] 其中, $a_1 = \frac{C_e C_m}{JL}$, $a_2 = \frac{L}{R}$, $b = \frac{iK_a C_m}{JL}$, R为电枢回路总电阻, L为电枢回路的电

感, C_e 为电动势系数, C_m 为电机额定励磁下的转矩系数, J为电机的转动惯量, K_a 为功放的传递函数, i是传动机构的减速比, $\theta(s)$ 为电机转角的拉氏变换, $u(s)$ 为导通电压的拉氏变换。

[0047] 将传递函数模型(1)转换为如下状态空间模型:

$$[0048] \quad \begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) = -a_1x_2(t) - a_2x_3(t) + bu(t) \end{cases} \quad (2)$$

[0049] 其中, $x_1(t)$ 为摄像稳定平台的转角, $x_2(t)$ 为摄像稳定平台的转动角速度, $x_3(t)$ 为摄像稳定平台的转动角加速度, $u(t)$ 为控制量, 即导通电压。

[0050] 将状态空间模型(2)以采样周期T离散化得到如下离散化的状态空间模型:

$$[0051] \quad \begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tx_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + T[-a_1x_2(k) - a_2x_3(k) + bu(k)] \end{cases} \quad (3)$$

[0052] 步骤2)、设计跟踪微分器和安排参考角度信号的过渡过程

[0053] 跟踪微分器的作用是使摄像稳定平台转动角度 θ 尽可能快而无超调地跟踪上参考角度 θ_{ref} , 同时给出参考角度信号的过渡过程以及跟踪过程中转动角度的近似一阶微分信号和近似二阶微分信号, 跟踪微分器的具体形式是:

$$[0054] \quad \begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hv_3(k) \\ v_3(k+1) = v_3(k) + hfs \\ fs = -r(r(r(v_1(k) - \theta(k)) + 3v_2(k)) + 3v_3(k)) \end{cases} \quad (4)$$

[0055] 其中, $v_1(k)$ 是为摄像稳定平台的转动参考角度 θ_{ref} 安排的过渡过程信号, $v_2(k)$ 和 $v_3(k)$ 分别是此过渡过程的近似一阶微分信号和近似二阶微分信号, fs 为快速综合函数, r 为快速跟踪因子, h 为积分步长。

[0056] 步骤3)、设计扩张状态观测器

[0057] 对如式(3)所示的摄像稳定平台控制系统模型, 令 $x_4(k) = -a_1x_2(k) - a_2x_3(k)$ 为扩张

出的新的状态变量,并记 $w(k) = \frac{x_4(k+1) - x_4(k)}{T}$,那么状态扩张后的摄像稳定平台离散时间系统模型是:

$$[0058] \quad \begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tx_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + T[x_4(k) + bu(k)] \\ x_4(k+1) = x_4(k) + Tw(k) \end{cases} \quad (5)$$

[0059] 系统模型(5)的扩张状态观测器是:

$$[0060] \quad \begin{cases} e(k) = z_1(k) - x_1(k) \\ fe = fal(e(k), \alpha_1, \delta) \\ fe1 = fal(e(k), \alpha_2, \delta) \\ fe2 = fal(e(k), \alpha_3, \delta) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e(k)) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}fe) \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h(z_4(k) - \beta_{03}fe1 + b_0u(k)) \\ z_4(k+1) = z_4(k) + h(-\beta_{04}fe2) \end{cases} \quad (6)$$

[0061] 其中, $e(k)$ 是摄像稳定平台转动角度估计值与实际转动角度的差, $z_1(k)$ 是摄像稳定平台实际转动角度 $x_1(k)$ 的估计值, $z_2(k)$ 是摄像稳定平台转动角速度 $x_2(k)$ 的估计值, $z_3(k)$ 是摄像稳定平台转动角加速度 $x_3(k)$ 的估计值, $z_4(k)$ 是扩张状态变量 $x_4(k)$ 即系统总和扰动的估计值, b_0 是对状态空间模型(2)中 b 的估计值。 h 是积分步长, $fe = fal(e(k), \alpha_i, \delta)$ 是一非线性函数,具体表达式如下:

$$[0062] \quad fal(e(k), \alpha_i, \delta) = \begin{cases} \frac{e(k)}{\delta^{1-\alpha_i}}, & |e(k)| \leq \delta \\ |e(k)|^{\alpha_i} \text{sign}(e(k)), & |e(k)| > \delta \end{cases} \quad (7)$$

[0063] 其中, α 为幂指数,在扩张状态观测器中一般取 $\alpha_i = \frac{1}{2^i}$ 。 δ 为线性段的区间长度, $\text{sign}()$ 为符号函数,并具有如下形式:

$$[0064] \quad \text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

[0065] $\beta_{0i} (i=1, \dots, 4)$ 、 δ 为一组待整定参数,一般取 $\delta = kh$ (k 为整数), $\beta_{01} = \frac{1}{h}$,

$$\beta_{02} \approx \frac{1}{1.6h^{1.5}}, \quad \beta_{03} \approx \frac{1}{8.6h^{2.2}}, \quad \beta_{04} \approx \frac{1}{4.2h^{3.4}}。$$

[0066] 步骤4)、设计非线性控制律和扰动补偿策略

[0067] 由步骤2)中的跟踪微分器和步骤3)中的扩张状态观测器可得到如下误差信号:

$$[0068] \quad \begin{cases} e_1(k) = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2(k) = v_2(k) - z_2(k) \\ e_3(k) = v_3(k) - z_3(k) \end{cases} \quad (9)$$

[0069] 其中, $e_1(k)$ 是摄像稳定平台的转角跟踪误差, $e_2(k)$ 是摄像稳定平台的角速度跟踪误差, $e_3(k)$ 是摄像稳定平台的角加速度跟踪误差, 这些误差量经过非线性组合

$u_0(k) = \sum_{i=1}^3 \beta_i \text{fal}(e_i(k), \alpha_i, \delta)$ 得到误差反馈控制律 u_0 , 其中 β_i 和 α_i 是待整定的参数, 一般

地 $\alpha_1=0.75, \alpha_2=1.25, \alpha_3=1.75, \beta_i$ 为各误差的反馈增益, 可参考PD控制增益进行调节。

[0070] 将由步骤3)得到的总和扰动的估计值 $z_4(k)$ 通过形如 $u(k) = \frac{u_0(k) - z_4(k)}{b_0}$ 的补

偿过程得到最终的控制律 $u(k)$, 那么如式(5)所示的摄像稳定平台离散状态空间模型转化为:

$$[0071] \quad \begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tx_3(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) + Tu_0(k) \end{cases} \quad (10)$$

[0072] 如此, 摄像稳定平台控制系统的总和扰动被补偿消除, 成为不含扰动项的积分串联型系统, 从而达到抑制内外扰动的目的。

[0073] 如图1所示, 船载摄像稳定平台通常采用以支架式底座为主体的三轴正交的框架式结构。摄像稳定平台由空间上互相垂直的三个框架构成, 其中内框为方位框, 中框为俯仰框, 外框为横滚框, 分别控制摄像设备的方位、俯仰和横滚运动。通过建立伺服控制系统控制三个轴向的框架运动即可达到跟踪被摄像目标的目的。

[0074] 如图2所示, 船载摄像稳定平台由方位、俯仰、横滚三个框架的子系统组成。三个子系统的控制结构基本相同。图2所示的转动角度参考值输入是由上位机通过跟踪解算出目标相对于船舶的角度, 位置数据采集模块由安装在稳定平台的陀螺仪和加速度计组合构成, 两者传给单片机中应用本发明的自抗扰控制技术进行实时处理, 输出相应控制信号来控制步进电机的运行从而调整稳像框架的状态, 对偏离的角度进行补偿和纠正以保证摄像设备一直保持对目标的跟踪拍摄。

[0075] 如图3所示, 方位角控制系统是船载摄像稳定平台三方向子系统中的一个, 由于三个子系统有相似的控制结构, 以方位角控制系统为例阐述摄像稳定平台的控制原理。对摄像稳定平台转动角度的控制属于位置伺服系统控制。稳定平台在受到船舶晃动的情况下, 通过陀螺仪和加速度计组合及时检测出稳定平台的倾斜角度, 单片机在接收到角度信息后

与参考值经过自抗扰控制技术计算出需要的控制量并用软件的方法实现脉冲环形分配器控制脉冲输出,从而控制步进电机带动传动机构使得稳定平台向相应的方向转动。

[0076] 如图4所示,本发明设计的船载摄像稳定平台自抗扰控制方法由三部分组成,分别为跟踪微分器、扩张状态观测器和非线性控制律。其中,跟踪微分器给出平台参考转角的过渡过程,使得误差量不发生突变,避免稳定平台角度的剧烈突变所造成的超调问题;扩张状态观测器能快速估计转角、角速度和角加速度,实时跟踪扰动并给予补偿;非线性控制律有高效调节控制量的作用。跟踪微分器为转动角度的参考值安排合理的过渡过程,得到转角的过渡信号 v_1 、转角的近似角速度信号 v_2 以及转角的近似角加速度信号 v_3 。扩张状态观测器通过实测的平台角度和输入量 u 实时地观测出转角的过渡信号 z_1 、转角的近似角速度信号 z_2 以及转角的近似角加速度信号 z_3 以及将总和扰动量的估计值 z_4 。非线性控制律将跟踪微分器和扩张状态观测器求出的角度误差量 $e_\theta = v_1 - z_1$ 、角速度误差量 $e_\omega = v_2 - z_2$ 和角加速度误差

量 $e_a = v_3 - z_3$ 经过非线性组合 $u_0 = \sum_{i=1}^3 \beta_i fal(e_i, \alpha_i, \delta)$ 得到误差反馈控制律 u_0 ,通过一个误差

补偿环节 $u = \frac{u_0 - z_4}{b_0}$ 计算出最终控制律 u ,如此,摄像稳定平台系统就转化为一个不含扰动的积分串联型系统,这样不仅能保证摄像稳定平台的跟踪精度和跟踪的快速性,又具有强抗干扰能力。

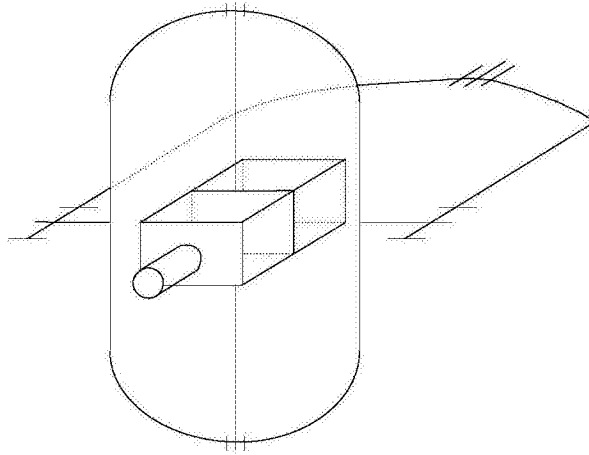


图1

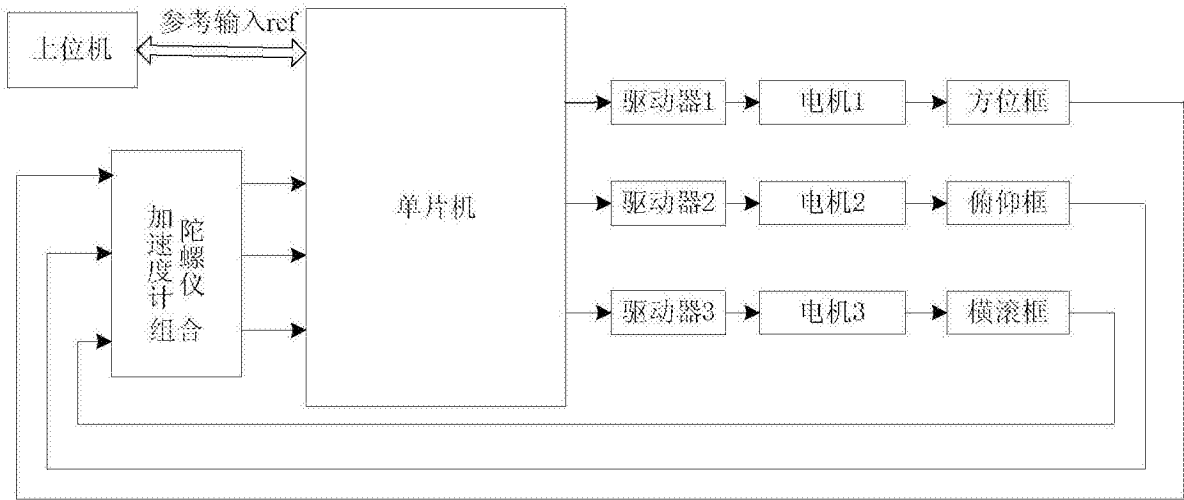


图2

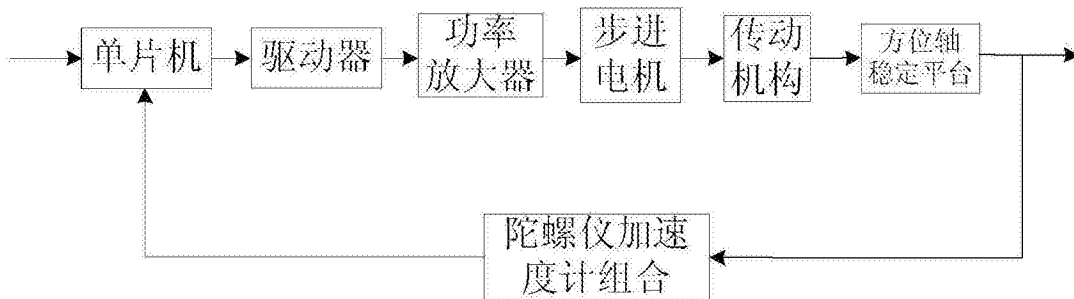


图3

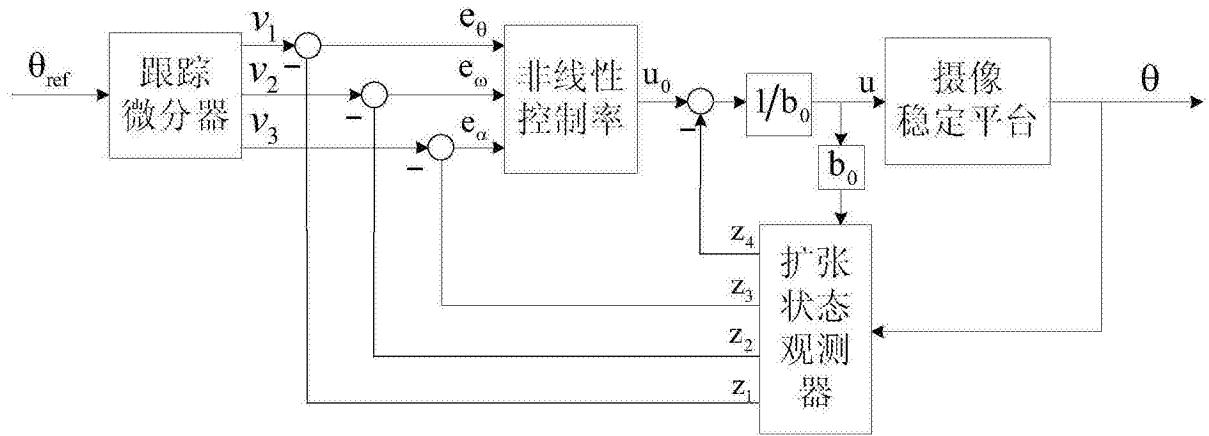


图4