

文章编号 1004-924X(2012)10-2268-07

预测扫描提前跳转的电子稳像方法

王 鹏, 赵跃进*, 孔令琴, 李 冰, 董立泉
(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:提出一种基于传感器电子稳像技术的扫描稳像方法——预测扫描提前跳转法,用以处理电子稳像过程中摄像系统的扫描运动问题。首先,利用传感器敏感摄像系统运动,实现对图像序列帧间偏移量的估计,并根据估计偏移量预测图像序列是否存在扫描运动;然后,对存在扫描运动的图像将参考帧提前跳转到扫描后位置,再运用稳像算法进行处理。该方法通过提前跳转参考帧将扫描模式下的稳像过程简化为不存在扫描运动的稳像过程,简化了扫描稳像的数学模型,降低了算法复杂度,同时通过跳转步长的设置和缓存参考帧技术进一步提高了算法的准确度和可靠性。实验结果表明,该方法可在输出稳定图像的同时正确显示视频序列的扫描运动。

关键词:陀螺;传感器电子稳像;主动扫描;被动扫描

中图分类号:TP391;TN941.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122010.2268

Scanning image stabilizing algorithm: Predicting scanning motion and jumping in advance

WANG Peng, ZHAO Yue-jin*, KONG Ling-qin, LI Bing, DONG Li-quan

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: yjzhao@bit.edu.cn

Abstract: A novel scanning image stabilizing algorithm, predicting scanning motion and jumping in advance, is proposed based on sensor electronic image stabilization to process active scanning and passive scanning problems in a camera system. Firstly, it uses a gyro to detect the motion situation of the camera system and estimate the offset of image sequences. Then, it judges whether the scanning motion is in the camera system based on the estimated offsets. If the scanning motion exists, the reference frame will be converted into the predicting frame which is a image after scanning. Finally, the electronic image stabilization is used to process the motion vectors of image sequences. The algorithm is different from traditional image stabilizing algorithm. It transforms the image stabilization from scanning model to un-scanning model, so it greatly simplifies the image stabilizing process and reduces the complexity of algorithm. Furthermore, the proper step size and cache reference frame improve the accuracy and reliability of the algorithm. The experimental result shows that the algorithm can output stable images, meanwhile can display the scanning motions of image sequences correctly.

Key words: gyro; sensor electronic image stabilization; active scanning; passive scanning

收稿日期:2012-04-09;修订日期:2012-06-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61036006;No. 61177094)

1 引 言

近些年来,数字摄像系统在各个领域得到广泛应用。但是,摄像系统载体自身运动的不稳定性使采集到的图像序列发生不规则抖动,不利于人眼长时间的观测,也不利于视频图像的后续处理和分析,因此有必要对视频图像进行稳像处理。电子稳像就是利用数字图像处理方法对视频图像进行处理,达到输出稳定图像的目的^[1-2]。电子稳像由运动估计和运动补偿 2 大部分组成。通过运动估计算法得到的帧间相对运动包括 2 个部分:随机抖动和扫描运动,随机抖动需要进行运动补偿,扫描运动要在稳定图像中正确显示。目前电子稳像的大多数算法都是针对监视(凝视)模式下提出的。监视(凝视)工作模式下,摄像系统视场内三维场景不变,运动估计得到的帧间相对运动都是随机抖动,因此该模式下的稳像方法相对简单。当摄像系统工作在扫描模式时,摄像系统视场内三维空间场景是变化的,需要对随机抖动和扫描运动进行分离,然后计算、输出稳定扫描图像,因此该模式下数学模型复杂,稳像算法难度大。对于安装摄像系统的飞机或车辆等载具运动引起摄像系统被动扫描过程,扫描运动参数是未知的^[3-5]。因此需要使用复杂算法进行随机抖动和扫描运动的分离,计算难度大,并且由于存在扫描运动的图像序列帧间运动都较大,因此对稳像算法的稳定范围和精度要求更高。常用的运动分离方法有 Kalman 滤波、粒子滤波^[6-9]等,而这些算法相对比较复杂,且实时性较差。

基于此,本文提出了一种基于传感器电子稳像技术对存在扫描运动的摄像系统进行有效实时稳像的方法。该方法原理简单,计算速度快,准确度较高,此外,本文还提出缓存参考帧技术以进一步改进监视模式下算法匹配准确度和扫描模式下参考帧的误差。

2 传感器电子稳像的扫描稳像方法

本文提出的预测扫描提前跳转的电子稳像方法,通过参考帧的提前跳转实现将扫描模式下的稳像过程简化为不存在扫描运动的稳像过程。算法流程如图 1 所示。

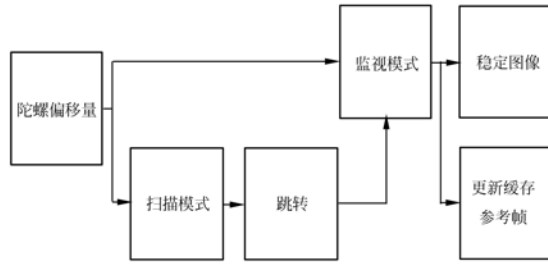


图 1 扫描稳像算法流程示意图

Fig. 1 Flow diagram of scanning image stabilization algorithm

首先由陀螺传感摄像系统的抖动,并将陀螺输出换算为图像平面的偏移量,通过设置扫描阈值并将其与陀螺偏移量进行比较,预测当前帧图像是否存在扫描运动。然后将视频图像分为监视模式和扫描模式分别处理,监视模式下,计算得到的帧间运动都作为随机抖动进行运动补偿;扫描模式下设定跳转步长,将图像序列的参考帧提前跳转到扫描运动后位置,将稳像问题简化为监视模式的情况;接着计算帧间相对运动,对图像进行运动补偿。最后利用补偿后图像更新缓存参考,并使用缓存参考补全输出图像的无定义区域。

2.1 缓存参考帧

本文算法主要通过参考帧的提前跳转来实现将扫描模式下的稳像过程转化为不存在扫描的稳像过程,因此缓存参考帧的设计是该算法的重要内容。本文提出了参考帧缓存更新技术。将一段时间内的多帧图像经过匹配后拼接成一幅大视场图像保存在缓存作为参考帧(下文简称缓存参考帧),同时将当前帧图像针对缓存参考帧进行匹配和运动补偿,输出稳定图像的同时更新缓存参考帧。缓存参考帧模型如图 2,图中阴影部分为输出稳定后图像的显示范围。

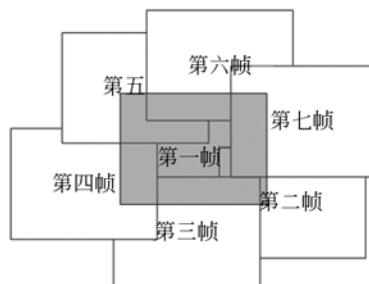


图 2 缓存参考帧模型

Fig. 2 Model of cache reference frame

使用缓存参考帧,在监视模式时可以使当前帧与参考帧有更多的重合区域,能够有效地提高匹配精度和可靠性;在扫描模式时可以使跳转后的参考帧与跳转前图像匹配更准确,提高帧间运动估计的精度,使输出的图像稳定性更好。

2.2 监视模式

假设参考帧 I_R 与当前帧 I_C 之间的关系可以通过二维图像间的变换模型 R 来表示,如 6 参数仿射模型或 4 参数相似模型等,表达公式如下:

$$I_C = I_R \times R, \quad (1)$$

那么第 n 帧图像 I_n 与运动补偿后的第 $n-1$ 幅图像为参考帧,则有以下表达式:

$$I_n = I_{n-1} \times R_n = I_R \times R_1 \times R_2 \cdots R_n. \quad (2)$$

从式(2)可以看到,当前帧图像与第一帧图像的关系是由之前各帧图像计算的帧间运动参数矩阵累乘所确定,因此如果某一帧产生误差,这一误差将会传递下去,并且误差以乘积形式传递,速度快影响大。

由于监视模式中视场内的三维场景固定,如果不存在前景物体的运动,那么理论上稳像后图像都应该和第一帧图像对准或者一致。那么考虑一直使用第一帧图像作为参考帧进行帧间运动估计,则第 n 帧图像的表达式为:

$$I_n = I_R \times R. \quad (3)$$

这样就避免了产生误差的传递,使每帧图像的稳定精度都与所采用的稳像算法精度相当。但是实际应用中场景内的物体一般是有变化的,比如日照光线变化、前景物体的运动等,使用第一帧图像作为参考帧算法也会产生误差,缓存参考帧的应用可以有效地解决这一矛盾。首先使用第一帧图像作为参考帧进行帧间运动估计,然后用稳定后的当前帧填充和更新缓存参考帧,这样既保留了第一帧图像位置的准确性,又可以实时反映场景内容,同时扩大了参考帧内容,增加了当前帧与参考帧的重合区域,提高了匹配的可靠性。缓存参考帧的更新表达式为:

$$I_{\text{cache}}' = I_{\text{cache}}(W) + I_C \times R. \quad (4)$$

式中 I_{cache} 和 I_{cache}' 为更新前和更新后的缓存参考帧, W 代表补偿后当前帧与缓存参考帧的不重合区域, R 为当前帧的运动补偿参数矩阵。

如果计算的帧间运动矢量不准确,更新后的缓存参考帧就会引入误差;因此需要设定更新判定条件,文中使用匹配准确且画质清晰的当前帧

对参考帧进行更新。采用峰值信噪比 PSNR 对运动补偿后当前帧的质量进行判定。其计算公式如下:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{\varphi_{\text{max}}^2}{\text{MSE}} \right), \quad (5)$$

其中, φ_{max} 是视频信号的峰值强度,对于通常的 8 bit 视频, $\varphi_{\text{max}} = 255$ 。MSE 是平均绝对误差,其公式如下:

$$\text{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [I_{\text{cache}}(m, n) - I_C'(m, n)]^2. \quad (6)$$

式中, I_C' 为补偿后的当前帧, M, N 为运动补偿后当前帧与参考帧中的图像重合区域的长、宽。当 PSNR 值大于阈值时(根据经验,本文选择阈值为 32),认为稳定后图像清晰度和精度较高,根据式(4)对缓存参考帧进行更新。此外在输出补偿后的当前帧图像时,画面中会有当前帧内没有的信息,表现为无定义的黑色边框,可以用缓存参考帧中的信息补全该区域,使输出图像完整。

2.3 扫描模式

摄像系统存在扫描运动时,本文提出的基于陀螺的预测扫描并提前跳转的方法,在计算帧间相对运动之前就将参考帧中心位置的输出图像范围移动到扫描运动后的位置,将扫描模式稳像简化监视模式进行处理,使运动估计算法需要处理的抖动始终在理想范围内。该算法简化了传统算法需要对扫描运动和随即抖动进行分离的难点问题,简化了数学模型,提高了算法的精度和运算速度。

当陀螺估计偏移量超过设定的扫描阈值时,算法将给定一个主动扫描参数,对前一段监视模式中图像序列的缓存参考帧中心坐标(也是输出图像范围的中心)进行主动跳转,并生成新的缓存参考帧,然后使用新的缓存参考帧与当前帧图像进行运动估计。其跳转过程可以用下式表示:

$$A' = A \times R_s = A \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 A 为跳转前缓存参考帧中心的坐标, A' 为跳转后缓存参考帧中心在跳转前缓存参考帧内的坐标, R_s 是扫描参数矩阵, Δx 和 Δy 是跳转步长。因为扫描运动一般不旋转,而是按照水平或垂直方向平移,所以 R_s 只设置位移量。由上式可知,

如果要跳转后输出稳定图像的无意义边界能够被缓存参考帧补齐,扫描阈值就要小于或等于缓存参考帧的范围,换言之如果设定了扫描阈值,那么缓存参考帧的缓存范围要等于该阈值(大于该阈值的情况发生跳转不会更新缓存),本文的扫描阈值和缓存参考帧缓存范围设置为 50 pixel。

跳转步长也是算法的一个重要参数,它直接关系到算法的运算速度和精度。如果将步长设置为陀螺偏移量与扫描阈值的差值,如图 3(b)所示。那么在连续扫描的视频序列中,稳定后图像是随动的序列。这样会造成稳像算法需要逐帧计算帧间运动大于扫描阈值像素数的情况,并且每帧都要进行主动跳转。为此将跳转的步长设置为大于偏移量与阈值的差值,如图 3(c)所示。这样使得跳转一次后算法再次进入监视模式中,而监视模式中算法的稳定性和准确度都更好,所以这种步长设置有利于算法运算速度和精度的提高。



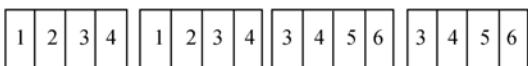
(a) 存在扫描运动的视频序列

(a) Video sequences with scanning motion



(b) 跳转步长等于偏移量与阈值差值

(b) Jump step is equal to the difference between offset and threshold



(c) 跳转步长大于偏移量与阈值差值

(c) Jump step is greater than the difference between offset and threshold

图 3 跳转示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of jumping

设定一个监视范围(监视阈值),通过陀螺估计偏移量和监视阈值来确定合适的跳转步长,其表达式如下:

$$|S_{step}| \leq |S_{gyro}| - |T_{gaze}|, \quad (8)$$

其中, S_{gyro} 是陀螺估计偏移量, T_{gaze} 是监视阈值,这样跳转后将扫描模式简化为监视模式,再计算帧间相对运动,并更新缓存参考帧。由于跳转后

的参考帧是跳转前缓存参考帧的一部分,由式(4)可知其误差等于算法误差, N 次跳转后第 n 帧的误差理论值 E_j 的表达式为:

$$E_j = e^N, \quad (9)$$

其中 e 为稳像算法误差。

而随动方法第 n 帧的误差 E_F 的表达式为:

$$E_F = e^n. \quad (10)$$

因为跳转次数 N 远小于帧数 n ,所以本文提出的预测扫描提前跳转方法精度更高。

2.4 算法流程

本文提出的基于传感器电子稳像的扫描稳像方法的步骤如下:

(1) 设定缓存参考帧,设置扫描阈值,设置监视范围,设置更新阈值;

(2) 将陀螺估计偏移量与扫描阈值进行比较。小于阈值时进行步骤(3),大于阈值时进行步骤(5);

(3) 使用缓存参考帧与当前帧进行稳像算法的运算,得到的运动矢量是图像帧间的抖动,对该运动进行补偿,并输出稳像后的图像,稳定图像显示范围中无定义区域使用参考帧进行补全。然后进行步骤(4);

(4) 对比稳像后图像与参考帧重合区域的 PSNR 值,如果大于更新阈值则对参考帧进行更新。然后继续下一帧的运算,即进行步骤(2);

(5) 计算跳转步长,使图像主动跳转后,帧间抖动在监视范围内。然后进行步骤(6);

(6) 根据跳转步长,重新设置缓存参考帧中心

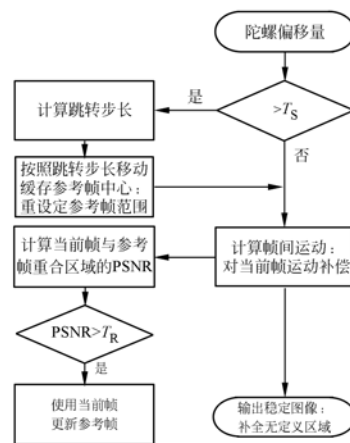


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of algorithm

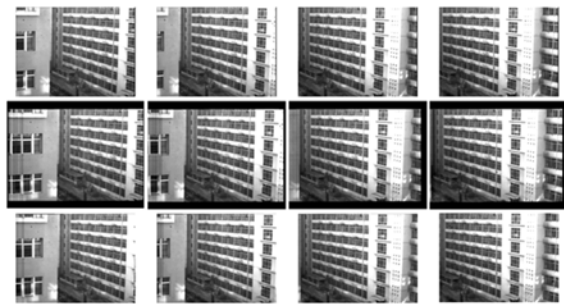
位置及范围、重新设置图像输出范围,然后进入步骤(3)。

本文算法的算法流程如图 4 所示。

3 实验验证

实验中将 MEMS 陀螺(零偏稳定性小于 $0.05(^{\circ})/s$,线性误差小于 0.05% of F. R)固定在摄像系统(敏通 MTV-1501CB768 pixel \times 576 pixel)上,采集扫描视频图像及同步的陀螺数据。通过 PC 机(主频 2.9 GHz,内存 2G)上使用的 MATLAB 软件做算法验证。本文使用传感器稳像与数字稳像块匹配算法相结合的复合式传感器电子稳像算法来实现帧间相对运动的估计。

图 5 是使用本文算法对一组摄像系统向右扫描运动的视频序列进行处理后的结果,第一行是原图像,第二行是对应的缓存参考帧,第三行是稳定后图像。图中可以看出本文算法正确显示了原视频图像中的扫描运动,输出了稳定的图像序列;同时缓存参考帧正确补全了输出图像的无定义边框。

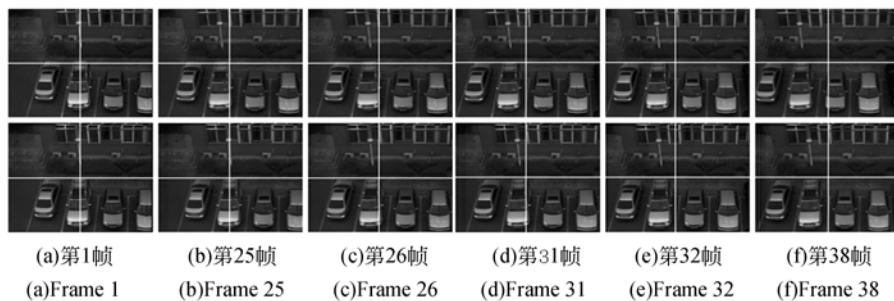


(a)第 50 帧 (b)第 100 帧 (c)第 150 帧 (d)第 200 帧
(a)No. 50 (b)No. 100 (c)No. 150 (d)No. 200
frame frame frame frame

图 5 向右扫描图像序列的原图、缓存参考帧及稳定后图像

Fig. 5 Original images, cache reference frames and stable images of right scanning image sequences

图 6 是本文算法对一组摄像系统向左扫描运动的视频序列进行处理后的结果,第一行是原图像,第二行是稳定后图像。图中可以看到本文算法通过第 26 帧(图 6(c))和第 32 帧(图 6(e))发生的主动跳转,正确显示了原视频序列中的扫描运动。跳转前后视频图像处在监视模式中,对竖直和水平方向抖动的稳定效果较好。



(a)第 1 帧 (b)第 25 帧 (c)第 26 帧 (d)第 31 帧 (e)第 32 帧 (f)第 38 帧
(a)Frame 1 (b)Frame 25 (c)Frame 26 (d)Frame 31 (e)Frame 32 (f)Frame 38

图 6 左扫描抖动图像序列的原图和稳定后图像

Fig. 6 Original images and stable images of left scanning image sequences

4 结 论

本文提出了一种通过参考帧的提前跳转实现将扫描模式下稳像过程简化为不存在扫描运动稳像过程的扫描稳像方法——预测扫描提前跳转方法。该方法利用陀螺输出估计图像帧间偏移量,

并通过偏移量与扫描阈值的比较,预测图像序列是否存在扫描运动。对存在扫描运动的图像,先将缓存参考帧的中心位置和图像输出范围跳转到扫描后的位置,并重新设置缓存参考帧,然后再进行运动估计和补偿,从而将扫描模式简化为监视模式处理。此外本文采用缓存参考帧技术,在监视模式下,减小算法误差传递,提高运动估计精

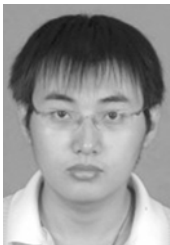
度;同时提高了扫描模式下跳转前后参考帧的对照精度,提高算法的精确度和稳定性。实验验证,本文算法可以正确显示摄像系统的扫描运动,输

出的视频图像稳定效果较好。本文提出的算法对应用于机载、舰载、车载和手持等存在扫描运动的电子稳像系统具有较高的参考价值。

参考文献:

- [1] 韩绍坤,赵跃进,刘明奇. 电子稳像技术及其发展[J]. 光学技术,2001,27(1):71-73.
HAN SH K, ZHAO Y J, LIU M Q. Electronic image stabilization techniques and development[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(1): 71-73. (in Chinese)
- [2] 赵红颖,金宏,熊经武. 电子稳像技术概述[J]. 光学精密工程,2001,9(4):353-359.
ZHAO H Y, JIN H, XIONG J W. Overview of the electronic image stabilization technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(4):353-359. (in Chinese)
- [3] 罗诗途,王艳玲,张玘,等. 车载图像跟踪系统中电子稳像算法的研究[J]. 光学精密工程,2005,13(1):95-103.
LUO SH T, WANG Y L, ZHANG Q, *et al.*. Electronic image stabilization algorithm for image tracking system on vehicle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(1):95-103. (in Chinese)
- [4] 赵红颖,晏磊,熊经武. 舰船图像序列电子稳定算法的研究[J]. 光学精密工程,2003,11(6):602-606.
ZHAO H Y, YAN L, XIONG J W. Image composition based on EIS model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(6):602-606. (in Chinese)
- [5] 钟平,于前洋,金光,等. 机载摄像设备图像稳定方法探讨[J]. 光电工程,2002,29(增):73-76.
ZHONG P, YU Q Y, JIN G, *et al.*. Study on image stabilizing methods for airborne image pickup equipment [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(Supp.):73-76. (in Chinese)
- [6] KRAMER K A, STUBBERUD S C. Tracking of multiple target types with a single neural extended Kalman filter[J]. *IEEE International Conference of Intelligent Systems*,2006:463-468.
- [7] 赵其杰,屠大维,高健,等. 基于 Kalman 滤波的视觉预测目标跟踪及其应用[J]. 光学精密工程,2008,16(5):937-942.
ZHAO Q J, TU D W, GAO J, *et al.*. Kalman filter based vision predicting and object tracking method and its application[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5):937-942. (in Chinese)
- [8] LINDER S P, SHAFAI B. Robust PFI Kalman filters[J]. *IEEE Transactions on American Control Conference*,1998,5:3163-3164.
- [9] 王斌,赵跃进. 基于电子稳像跟踪技术的运动滤波算法[J]. 光学精密工程,2009,17(1):202-206.
WANG B, ZHAO Y J. Motion filtering algorithm for tracking technology based on image stabilization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):202-206. (in Chinese)

作者简介:



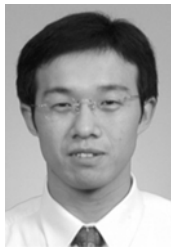
王 鹏(1983—),男,辽宁锦州人,博士研究生,2006年于云南大学获得学士学位,主要从事电子稳像方面的研究。
E-mail: wing52@163.com



孔令琴(1983—),女,山西临汾人,博士研究生,2006年、2009年于太原理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事图像处理、红外成像等方面的研究。
E-mail: xiaoxiao6171875@163.com



李冰(1984—),男,河北秦皇岛人,博士研究生,2007年、2010年于燕山大学分别获得学士、硕士学位,主要从事图像处理、红外激光探测等方面的研究。E-mail:linuocao@163.com



董立泉(1979—),男,江苏徐州人,副教授,2000年、2007年于北京理工大学光电工程系分别获得工学学士、工学博士学位,现为国际光学工程学会(SPIE)北京理工大学分会主席,主要从事光电仪器和光电信息处理领域的教学与科研工作。E-mail:kylind@bit.edu.cn

导师简介:



赵跃进(1958—),男,河北涉县人,教授,博士生导师,1982年、1986年、1990年于北京理工大学光电工程系光学仪器专业分别获得工学学士、工学硕士、工学博士学位,现任“仪器科学与技术”一级学科和“精密仪器及机械”二级学科负责人,主要从事电子稳像、THz成像技术、基于MEMS的红外成像技术等方面研究。E-mail:yjzhao@bit.edu.cn

●下期预告

积分反馈自抗扰控制力矩陀螺框架伺服系统设计

陈茂胜^{1,2*},金光¹,张涛¹,戴路¹,朴永杰¹,周美丽¹,曲宏松¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春130033;

2.中国科学院研究生院,北京100039)

设计了永磁同步电机直驱的控制力矩陀螺(CMG)框架伺服系统,并提出积分反馈自抗扰控制(ADRC)伺服跟踪算法用于实时跟踪CMG操纵律输出的框架角速度指令。首先,采用电机轴电流 $i_d=0$ 的矢量控制策略建立了CMG框架伺服系统的数学模型;然后,分析摩擦力矩、齿槽力矩对CMG框架伺服系统性能的影响,并在Matlab中搭建速度环采用ADRC的框架伺服仿真系统;最后,对框架伺服系统的速度环分别采用模糊PI、ADRC、积分反馈ADRC算法进行实验。实验结果表明:采用积分反馈ADRC算法跟踪 $0.1\sim 2.0$ rad/s时,稳态精度为 $0.005\sim 0.012$ rad/s;跟踪 $0.0\sim 0.1$ rad/s时,稳态精度为 $0.001\sim 0.005$ rad/s,临界爬行速度为 0.003 rad/s;跟踪 $2\sin(t)$ rad/s速度曲线时,幅值误差为 0.55% ,相位滞后 0.09978 rad。结果满足CMG框架伺服系统精度高、鲁棒性强的要求。