

车载惯性平台稳定位置解算算法

刘廷霞¹, 王伟国¹, 陈健^{1,2*}

(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 100049)

摘要:根据船摇位置自稳定的思想,提出了基于坐标转换的惯性平台位置稳定解算算法。该算法通过坐标变换实时解算出惯性平台相对载体的位置值并将其作为位置稳定控制的位置环输入,从而有效隔离载体对平台位置的干扰,实现平台的稳定。实验结果表明:平台的外框架稳定精度为0.1 mrad,内框架稳定精度为0.3 mrad,满足了指标1 mrad的要求。该算法有效地解决了车载惯性平台的稳定性问题,提高了整个稳定系统的性价比。

关键词:坐标转换;惯性平台;自稳定;定位算法

中图分类号:V556; TJ811 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120505.0537

Position arithmetic for a vehicular inertial stabilized platform

LIU Ting-xia¹, WANG Wei-guo¹, CHEN Jian^{1,2*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: chenjian4500@163.com*

Abstract: According to the idea of the position-self-stabilization of a ship, this paper proposes a position calculation arithmetic for an inertia platform based on coordinate conversion. This arithmetic calculates the position value between the inertia platform and the carrier in real time by coordinate conversion, then the value is used as a position stabilization controllable input to insulate the position interference of the carrier and to stabilize the platform. The experimental result shows that the stabilities of the outer and inner frames for the platform are 0.1 mrad, and 0.3 mrad, respectively, which satisfies the index requirement of 1 mrad. The position calculation arithmetic for the inertia platform based on coordinate conversion availability solves the stabilization problem for the inertia platform carried by the car and also improves the cost of the entire stabilization system.

Key words: coordinate conversion; inertial platform; self-stabilization; position arithmetic

1 引言

惯性稳定平台能建立稳定的工作基准面,与载体的角运动干扰相隔离,在惯性空间内保持水平姿态稳定,使安装在稳台上的光电设备能正常使用^[1]。目前,稳定视轴平台常采用陀螺平台稳定法^[2-3],该方法由速率陀螺构成速度闭环,形成系统的内回路,加上电视跟踪器构成位置外回路,形成双闭环控制,保证跟踪过程中视轴始终稳定,起到了有效隔离扰动的作用。视轴平台稳定的位置值输入由电视跟踪器解算出的脱靶量提供,而惯性平台没有传感器,所以该方法不适用于惯性平台的位置稳定。文献[4]中提出了船摇位置自稳定模型,即通过船摇坐标转换把大地坐标系下的目标极坐标值转到甲板坐标系的目标极坐标值,作为位置外回路。这种船摇坐标转换自稳定模型也不适用于惯性稳定平台,因为系统并不跟踪目标,不提供目标极坐标值。

本文借鉴了文献[4]视轴稳定模型的思想,提出了基于坐标转换的车载惯性平台位置稳定解算算法,即假设惯性平台有视轴,始终指向大地坐标系下的一静止目标,通过坐标转换实时求出随载体姿态角变化的平台不稳定坐标值,用求出的不稳定坐标值作为稳定控制的位置环输入,使它保持水平姿态,有效地隔离载体对平台的位置扰动,实现了平台的稳定,满足工程指标要求,提高

了整个稳定系统的性价比和可靠性。

2 平台稳定位置解算算法原理及推导

2.1 惯性平台稳定方法的原理

目前对惯性平台最有效的稳定方法是采用安装在平台(内框架)上的姿态传感器确定平台基准面的横滚角和俯仰角,即平台稳定位置解算值,补偿运动恰好与摇摆运动大小相等、方向相反,使载体摇摆过程中平台基准面相对大地(海平面)保持水平姿态不变^[1,7]。火控系统搜索雷达天线的两轴惯性平台的稳定^[7]也与文献[1]相同。这种方法与本工程项目应用很类似,都是对惯性平台稳定,但是,惯性平台在载车上的结构配置特点导致该方法也不能应用到本工程。该解算方法的结构配置如图1(a)所示,外框架对应载体横摇方向;而本工程中的结构配置如图1(b)所示,外框架对应载体纵摇方向。根据惯导测量载体姿态的定义可知,车载惯导输出的横滚和纵摇两个方向的姿态角不再与内外框架的转角直接对应,即文献[1]和[7]中的位置解算方法不能应用于本工程。最关键的是:在装甲车的下底板上已经安装了测姿传感器(总体提供的车载惯导),为降低成本,利用现有惯导解算稳定位置值。因此,在这种研制背景下,研究由车载惯导姿态值解算惯性平台干扰位置值的方法是非常必要的。

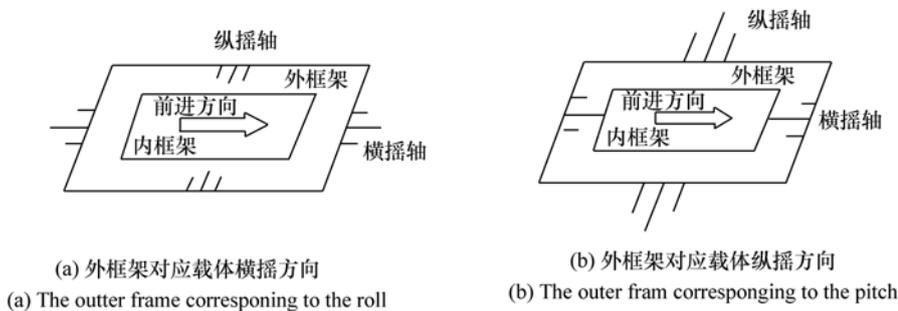


图1 内框架、外框架与载体的关系

Fig. 1 Relation of inner frame, outer frame and carrier

车载惯性平台稳定的实质是解决载体对安装平面的影响。工程中由于受载荷安装及回转空间

的限制,平台只能按图2所示安装,稳定平台是水平式结构^[5-6],其外框架通过纵摇轴固定在载车上

舱板上,纵摇轴线垂直于载体艏艉线;在外框架上安装着另一个横摇框架,即内框架,该框架的转动

轴线同载体艏艉线平行。载体的艏艉线沿 X 方向,即载体前进的方向。

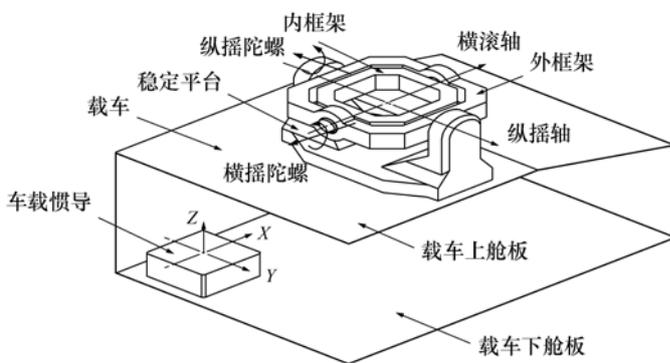


图 2 载体、稳台、车载惯导的安装关系

Fig. 2 Fixing relationship of carrier, platform and inertial navigation

惯性平台稳定原理:采用位置和速度双闭环控制。对于速度扰动的隔离,采用速率陀螺测量载体对稳台的速度干扰值,敏感纵摇方向的陀螺安装在稳台的左立柱内,敏感轴与纵摇轴平行;敏感横滚方向的陀螺安装在外框架上,敏感轴随外框架动且垂直纵摇轴、平行横滚轴,如图 2 所示。根据陀螺工作原理,这样安装的陀螺直接敏感载体对平台的速度干扰值,与稳定回路速度反馈值大小相等、方向相反;位置扰动的隔离和扰动量的

解算是本文的创新点,根据车载惯导测量姿态的原理及定义^[2,4,7]可知,只有外框架对应载体横摇、内框架对应载体纵摇才能直接利用车载惯导姿态隔离位置干扰,因此为了利用现有车载惯导实现平台稳定,提出了基于坐标转换的位置解算算法,即通过坐标转换公式求出由载体引起的平台位置干扰值,将其作为稳定控制的位置环输入,隔离载体的位置干扰。惯性平台稳定原理如图 3 所示。

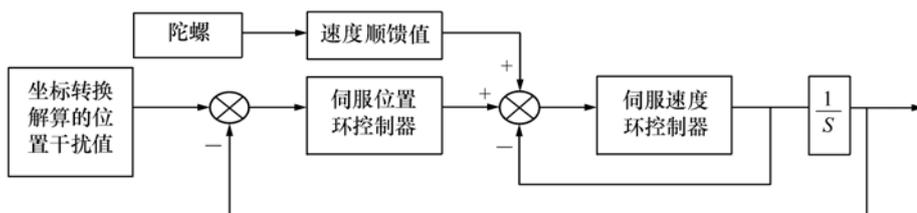


图 3 惯性平台稳定原理图

Fig. 3 Principle sketch map of inertial stabilized platform

2.2 平台稳定位置解算算法推导

平台稳定位置解算算法基于舰载视轴自稳定模型的思想,舰载视轴自稳定模型是采用大地到甲板(载体)的坐标变换把大地坐标系的目标位置值转换到甲板坐标系,引导光电跟踪器在甲板坐标系捕获目标,以解决船摇位置扰动问题^[3-4]。

所以可以把车体当作船体,把稳定平台当作船体上的经纬仪,虽然平台上没有视轴进行光路闭环,但是可以假设稳台有视轴,始终“指向”一静止目标,进行坐标转换即解算出载体位置干扰值。具体解算分两个过程:

第一解算过程原理如图 4 所示。

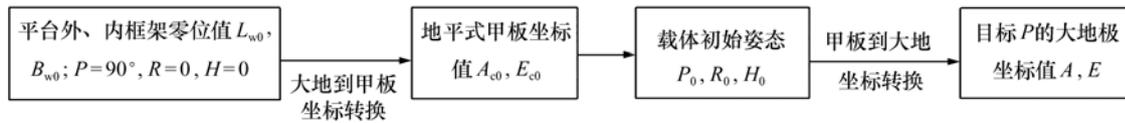


图4 第一转换过程示意图

Fig. 4 Sketch of the first conversion process

稳台水平标定:载体静止时,记下稳台水平时外框架和内框架编码器值 L_{w0} 和 B_{w0} (稳台零位值)和这时对应的载体初始姿态值 P_0 、 R_0 和 H_0 ;假设稳台有视轴,在甲板(载体)坐标系下指向一静止目标 P ,该目标在载体初始姿态下的水平式甲板极坐标值为 L_{w0} 和 B_{w0} ,通过大地到甲板坐标转换公式,求出目标 P 地平式甲板极坐标值 A_{c0} 和

E_{c0} [5]:

$$\begin{cases} \sin E_{c0} = \cos B_{w0} \cdot \sin L_{w0} \\ \tan A_{c0} = \frac{\sin L_{w0}}{\tan B_{w0}} \end{cases} \quad (1)$$

把载体初始姿态值带入甲板到大地坐标转换公式中,求出静止目标 P 的大地极坐标值 A 和 E 。

$$\begin{cases} A = \arctan \left\{ \frac{[\sin E_{c0} \cdot \sin R_0 + \cos E_{c0} \cdot \cos R_0 \cdot \sin A_{c0}] / [\cos E_{c0} \cdot (\cos P_0 \cdot \cos A_{c0} + \sin P_0 \cdot \sin R_0 \cdot \sin A_{c0}) - \sin E_{c0} \cdot \sin P_0 \cdot \cos R_0]}{\sin E_{c0} \cdot \cos P_0 \cdot \cos P_0 \cdot \cos R_0} \right\} \\ E = \arcsin \{ \cos E_{c0} \cdot (\sin P_0 \cdot \cos A_{c0} - \cos P_0 \cdot \sin R_0 \cdot \sin A_{c0}) + \sin E_{c0} \cdot \cos P_0 \cdot \cos P_0 \cdot \cos R_0 \} \end{cases} \quad (2)$$

这一过程的基本原理:通过甲板到大地坐标转换公式求出假设静止目标 P 的大地极坐标值,稳定的基本原理就是稳台隔离载体扰动,使稳台始终“指向”这一静止目标 P ,即稳台在惯性空间

保持水平。这一过程在标稳台水平时利用 MATLAB 一次性即可求出,无需在程序里实现,为第二过程做好准备。

第二解算过程原理如图5所示。

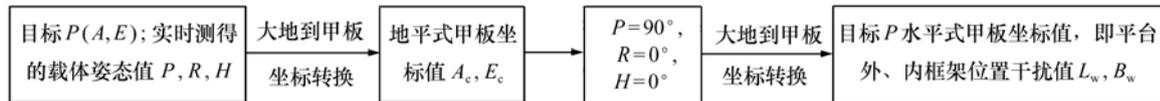


图5 第二转换过程示意图

Fig. 5 Sketch of the second conversion process

为使稳台在惯性空间内保持不变,即稳台始终“指向”静止目标 P ,需要隔离载体的扰动。根据视轴自稳定原理,通过大地到甲板坐标转换公

式,实时求出新载体姿态下的目标 $P(A, E)$,地平式甲板极坐标值 A_c 和 E_c :

$$\begin{cases} A_c = \arctan \left\{ \frac{[\cos E [\cos R \sin(A - H) + \sin R \sin P \cos(A - H)] - \sin E \sin R \cos P]}{[\cos E \cos P \cos(A - H) + \sin E \sin P]} \right\} \\ E_c = \arcsin \{ \cos E [\sin R \sin(A - H) - \cos R \sin P \cos(A - H)] + \sin E \cos R \cos P \} \end{cases} \quad (3)$$

通过大地到甲板坐标公式,带入 $P = -90^\circ$, $R = 0$, $H = 0$ 求出甲板坐标系下水平式两轴的坐标值,即稳台需要转动的量 B_w (内框架轴需要转动的量)和 L_w (外框架轴需要转动的量):

$$\begin{cases} B_w = \arcsin(\cos E_c \cdot \sin A_c) \\ L_w = \arctan\left(\frac{\sin A_c}{\tan E_c}\right) \end{cases} \quad (4)$$

稳定控制位置回路输入以上解算出的位置

干扰值(大小相等、方向相反)和陀螺敏感的速度顺馈干扰值,有效地隔离了载体干扰,达到了稳定平台始终“指向”目标 P 的目的,即保持了稳台的水平姿态。

3 工程应用及结果分析

3.1 位置解算算法的工程实现

由稳定原理及位置解算算法可知,首先要标定惯性平台的水平零位值,即在装甲车静止时,用精度为 $1''$ 的水平仪标定平台水平,读取平台内外框架的编码器值:外框架 $L_{w0} = 351.006\ 04^\circ$,内框架 $B_{w0} = 356.256\ 12^\circ$,同时读取载体姿态值:艏摇值 $H_0 = 179.75^\circ$,横摇值 $R_0 = 0^\circ$,纵摇值 $P_0 = 1.4^\circ$;读取的 L_{w0} 和 B_{w0} 是甲板坐标系下水平式经纬仪的极坐标值,由式(1)和(2)求出假设目标的大地坐标系下的极坐标值 $A = 179.763\ 2^\circ$, $E = 88.58^\circ$,这一过程在标轴时计算一次即可。由视轴稳定原理可知,只要稳台始终“指向”该目标,即可达到稳台在惯性空间的水平位置。由式(3)和(4)可知,代入所求的目标指向值 A 和 E 及实时载体的姿态值,即可求出由载体带来的位置干扰值 L_w 和 B_w 。

根据稳定原理,由求出的外框架位置干扰值 L_w 和内框架位置干扰值 B_w 构成稳定控制回路的位置输入,由陀螺所测得的速度干扰值构成速度顺馈,采用先进的 PID 控制器,试验表明:装甲车在三级公路以 20 km/h 的速度行驶,经过 10 余次

的动态跟踪实验,平台稳定精度满足了指标要求。具体结果如下:载体运动时对稳定平台的速度干

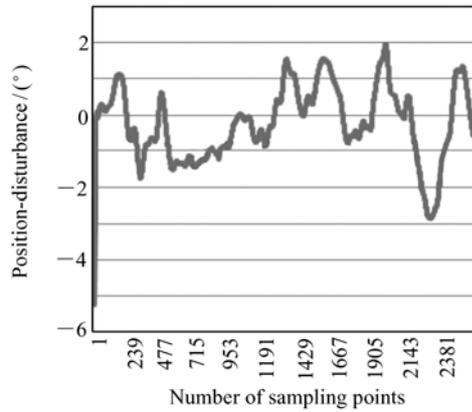


图7 载体纵摇方向位置干扰值

Fig. 7 Vehicular position-disturbance of the pitch

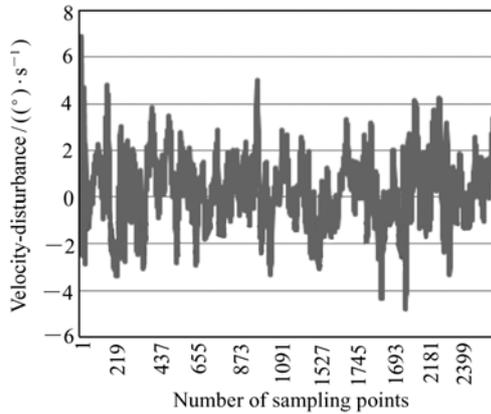


图8 载体横滚方向速度干扰值

Fig. 8 Vehicular velocity-disturbance of the roll

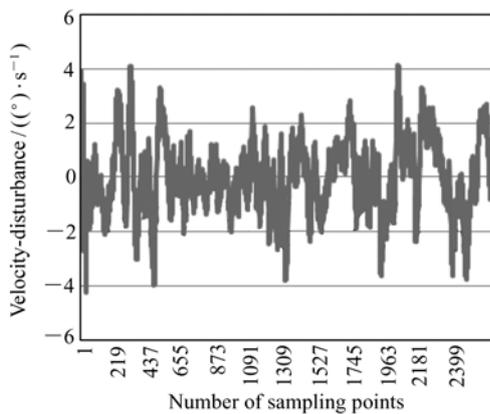


图6 载体纵摇方向速度干扰值

Fig. 6 Vehicular velocity-disturbance of the pitch

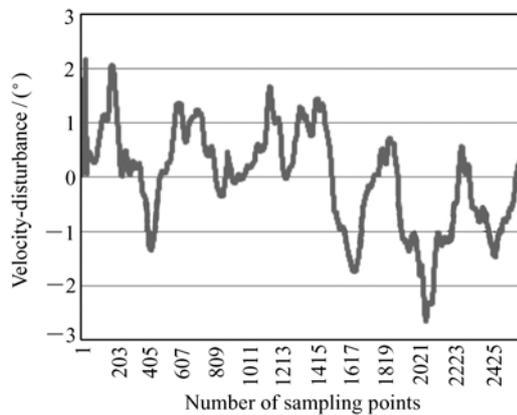


图9 载体横滚方向位置干扰值

Fig. 9 Vehicular position-disturbance of the roll

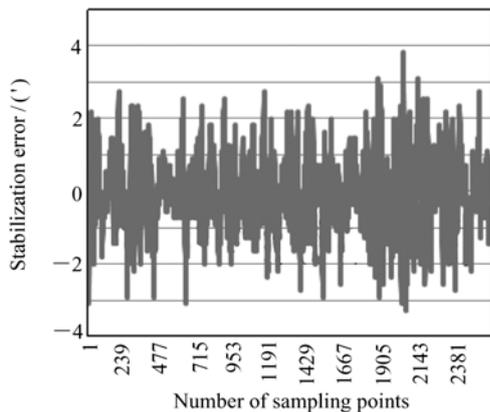


图10 内框架稳定精度

Fig. 10 Stabilization precision of the inner frame

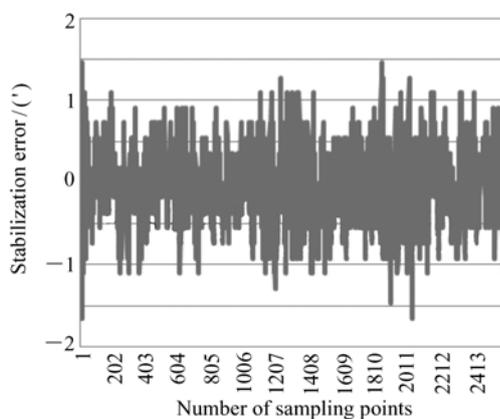


图11 外框架稳定精度

Fig. 11 Stabilization precision of the outer frame

扰值变化情况如图6和图8所示;由式(3)和(4)根据载体姿态值结算出的位置干扰值如图7和图9所示;内外框架稳定精度如图10和图11

参考文献:

- [1] 李勇建. 惯性稳定平台的稳定条件与陀螺安装位置[J]. 压电与声光, 2011, 33(2): 203-206.
LI Y J. The stability condition and gyro installment position of the inertially stabilized platform[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, 33(2): 203-206. (in Chinese)
- [2] 杨蒲, 李奇. 三轴陀螺稳定平台控制系统设计与实现[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(2): 171-176.
YANG P, LI Q. Design and realization of control system for three-axis gyro stabilized platform[J]. *J. Chinese Inertial Technol.*, 2007, 15(2): 171-176. (in Chinese)
- [3] 王凤英, 张显库, 任承志, 等. 光电跟踪器船摇自稳定建模及仿真[J]. 光电工程, 2005, 32(7): 11-14.
WANG F Y, ZHANG X K, REN CH ZH, et al. Self-stabilization modeling and simulation on ship-sway of a photoelectric tracker[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2005, 32(7): 11-14. (in Chinese)
- [4] 王凤英. 船载电视跟踪仪自稳定问题研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
WANG F Y. Study on the self-stabilization problem of the ship borne TV tracker[D]. Changchun: Changchun Institute of

所示。

3.2 结果分析

图中的横坐标为采样点个数, 采样时间为0.01 s。从图6和图7中的干扰值可以看出, 纵摇的最大干扰速度值为 $4.2(^{\circ})/s$, 在加速度比较大的两点处出现最大稳定偏差为 $1.52'$, 在姿态角变化较缓慢处稳定误差都在 $1'$ 以内, 外框架稳定精度为10, 稳定精度均方根值为 0.1 mrad ; 对比图8和图9可以看出, 横摇方向的干扰速度比纵摇方向大很多, 最大值为 $7(^{\circ})/s$, 速度变化也很快, 因此, 内框架稳定误差稍大, 最大值为 $3'$, 稳定精度如图11所示, 均方根为 0.3 mrad 。结果表明: 通过坐标变换法根据车载惯导求得的位置干扰值能够有效地隔离载体对平台的干扰, 满足在三级公路上跑车时 1 mrad 的稳定精度。

4 结 论

在实际工程项目中, 受到稳台安装负载及回转半径的限制及稳台在载体上的结构配置的特殊性, 传统的平台稳定位置解算算法不能直接利用。本文借鉴了船摇坐标转换视轴稳定模型的思想, 根据平台稳定原理及坐标转换原理, 提出了基于坐标转换的平台稳定位置解算算法, 利用现成的车载惯导姿态来稳定平台。该算法不仅扩展了坐标转换的应用领域, 而且有效地解决了工程中平台稳定问题, 实验结果表明: 外框架稳定精度为 0.1 mrad , 内框架稳定精度为 0.3 mrad , 满足了指标 1 mrad 的要求。

- Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [5] 刘廷霞,李建海,薛乐堂,等. 水平式经纬仪坐标转换的研究与应用[J]. 测试技术学报, 2009, 23(5): 377-380.
LIU T X, LI J H, XUE L T, et al.. The study and application of coordinate transformation of the level mounting theodolite [J]. *J. Test and Measurement Technol.*, 2009, 23(5): 377-380. (in Chinese)
- [6] 张耀明, 邹丽新, 沈江. 水平式光电经纬仪主要性能的分析[J]. 苏州大学学报, 2004, 18(2): 22-24.
ZHANG Y M, ZHOU L X, SHEN J. Main feature analysis of photoelectric theodolite of horizon type[J]. *J. Suzhou University*, 2004, 18(2): 22-24. (in Chinese)
- [7] 戴自立. 现代舰载作战系统[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002.
DAI Z L. *Modern Ship Combat System* [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [8] 沈宏海, 刘晶红. 航空光电成像平台角位置陀螺和角速率陀螺的稳定效果分析[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1293-1299.
SHEN H H, LIU J H. Stabilization properties of airborne imaging platform based on position gyro and rate gyro[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1293-1299. (in Chinese)

作者简介: 刘廷霞(1973—), 女, 吉林抚松人, 博士, 副研究员, 主要从事光电经纬仪的精密控制及其算法等方面的研究。

E-mail: liutingxia2001@sohu.com

陈健(1981—), 男, 吉林长春人, 硕士, 助理研究员, 主要从事高精度快速数字伺服系统等方面的研究。

E-mail: chenjian4500@163.com

《光学精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备); 微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械); 信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址: 长春市东南湖大路 3888 号

邮编: 130033

电话: 0431-86176855

传真: 0431-84613409

电邮: gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价: 50.00 元/册