

用线性加速度计实现无陀螺平台稳定的理论研究

刘 向, 王连明, 葛文奇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为实现加速度计在平台稳定控制中的应用, 需要建立相关的理论基础。简述了线性加速度计在光电稳定平台装置中的应用研究; 在证明刚体角运动与基点位置选择无关的理论基础上, 提出了线性加速度计在稳定平台中可行的配置方案; 解决了线性加速度计在实际应用中安装不便所带来的问题。

关键词: 线性加速度计; 稳定平台; 角速度; 角加速度

中图分类号: TH824.4 文献标识码: A

Application of linear accelerometer for stabilization of nongyroscopic platform

LIU Xiang, WANG Lianming, GE Wenqi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A necessary theoretical basis must be provided for the application of linear accelerometer in the platform stability control. The study of the application of linear accelerometer in electrooptically stabilized platform is briefed, and from the theoretical basis that the angular motion of a rigid body is irrelevant to the selection of reference point, a feasible arrangement scheme is proposed for the application of linear accelerometer for stabilization of platform so that the problems resulting from inconvenient installation of linear accelerometers in reality can be solved.

Key words: linear accelerometer; stabilization platform; angular velocity; angular acceleration

1 引言

在机载、舰载或车载等动基座光电跟踪设备中通常使用陀螺仪作为空间测速传感器以实现对工作平台的稳定。但是, 陀螺仪价格较贵, 一般具有较高的输出噪声和较低的频带, 致使很难设计出高性能的平台稳定系统。随着微电子技术的

迅速发展, 线性加速度计的制造技术日趋成熟, 使得线性加速度计的主要性能指标不断得到提高^[1], 从而使得线性加速度计作为空间测速装置替代陀螺仪成为可能。线性加速度计与陀螺仪相比有着外围辅助电路简单、价格低廉、体积小、重量轻、功耗低等优点, 因此基于线性加速度计的空间测量装置比陀螺仪具有明显的性价比优势。

收稿日期: 2003-09-29; 修订日期: 2003-12-11.

基金项目: 中科院知识创新工程资助 (No. Q01R04)

但是, 为了通过线性加速度计解算出稳定平台的角运动必须在平台上按一定的物理原理安装若干个线性加速度计, 文献^[2,4]提出的安装方法由于要求条件苛刻, 很难被工程实践所采用。本文首先对“刚体角运动与基点位置选择无关”的理论给出证明, 在此基础上研究了线性加速度计在稳定平台中切实可行的配置方法, 解决了在实际应用中线性加速度计安装不便带来的问题。

2 理论证明

2.1 基本物理学原理

因为线性加速度计与稳定平台是刚性连接, 可以把平台系统作为一个刚体进行研究。设 P 、 Q 为刚体中任意两点, 见图 1。

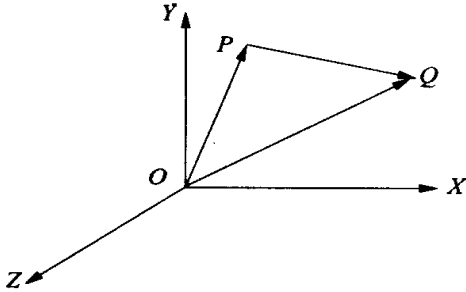


图 1 P 、 Q 两点位置

Fig. 1 P 、 Q position

根据刚体力学原理^[5]有

$$A_{Q|O} = A_{P|O} + \dot{\omega} \times R_{Q|P} + \omega \times (\omega \times R_{Q|P}), \quad (1)$$

其中, $A_{Q|O}$ 、 $A_{P|O}$ 分别为 Q 点、 P 点相对于惯性空间(如大地坐标系) $OXYZ$ 的线性加速度值, $\dot{\omega}$ 、 ω 分别为刚体的角加速度与角速度, $R_{Q|O}$ 、 $R_{P|O}$ 及 $R_{Q|P}$ 为空间位置矢量。根据方程式 1, 如果能够得到 Q 点、 P 点的线性加速度, 则能够利用公式 1 解算出刚体的角运动量 $\dot{\omega}$ 与 ω 。

2.2 刚体角运动与基点位置选择无关的理论证明

设 M 、 O 、 O' 为刚体中任意 3 点, V_M 、 V_O 、 $V_{O'}$ 、 A_M 、 A_O 、 $A_{O'}$ 分别为 M 、 O 、 O' 点相对于惯性空间的线速度、线加速度, 假设 ω_O 、 $\omega_{O'}$ 分别为以 O 点为刚体基点的刚体角速度、以 O' 点为刚体基点的刚体的角速度见图 2。

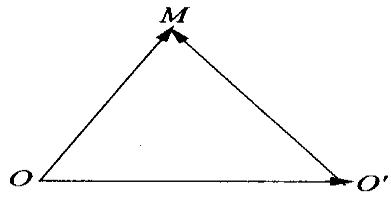


图 2 选择不同的基点位置

Fig. 2 Select different base points

根据刚体力学有

$$R_{M|O} = R_{M|O'} + R_{O'|O}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} V_M = V_O + \omega_O \times R_{M|O} \\ V_{O'} = V_O + \omega_O \times R_{O'|O} \\ V_M = V_{O'} + \omega_{O'} \times R_{M|O'} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_M = A_O + \dot{\omega}_O \times R_{M|O} + \omega_O \times (\omega_O \times R_{M|O}) \\ A_{O'} = A_O + \dot{\omega}_O \times R_{O'|O} + \omega_O \times (\omega_O \times R_{O'|O}) \\ A_M = A_{O'} + \dot{\omega}_{O'} \times R_{M|O'} + \omega_{O'} \times (\omega_{O'} \times R_{M|O'}) \end{cases}. \quad (4)$$

求解方程组 (3) 得 $\omega_O \times R_{M|O} = \omega_{O'} \times (R_{M|O'} + R_{O'|O})$ 代入方程式 (2), 可得 $\dot{\omega}_O = \dot{\omega}_{O'}$

上式说明刚体的角速度与刚体基点的选择无关。同理, 利用上述结论求解方程组 (4), 可得 $\dot{\omega}_{O'} = \dot{\omega}_O$

上式说明刚体的角加速度与刚体基点的选择无关。

以上理论说明: 空间测速装置在平台中的安装位置的选择有着充分的灵活性, 这种灵活性在保证线性加速度计安装方案正确的前提下在工程实践中也能便于使用。

3 线性加速度计配置方案的研究

3.1 一般配置方案及其推广方法

参考文献 [2] 给出了一种一般方法 (见图 3)。其中 A 、 B 、 C 、 D 位置安装线性加速度计。 $OXYZ$ 为惯性坐标系。因为刚体的角运动与刚体基点的选择无关, 所以在 A 、 B 、 C 、 D 4 点安装线性加速度计并使其按图 3 所示固联在平台中任意位置即可测得刚体的角运动。对于这种配置方案, 根据方程式 1 有

$$\begin{cases} A_{B|O} = A_{A|O} + \dot{\omega} \times R_{B|A} + \omega \times (\omega \times R_{B|A}) \\ A_{C|O} = A_{A|O} + \dot{\omega} \times R_{C|A} + \omega \times (\omega \times R_{C|A}) \\ A_{D|O} = A_{A|O} + \dot{\omega} \times R_{D|A} + \omega \times (\omega \times R_{D|A}) \end{cases}, \quad (5)$$

求解方程组 (5) 可得

$$\begin{cases} \dot{\omega}_X = \frac{1}{2R_{C1A}}(A_C^Z - A_A^Z) - \frac{1}{2R_{D1A}}(A_D^Y - A_A^Y) \\ \dot{\omega}_Y = \frac{1}{2R_{D1A}}(A_D^X - A_A^X) - \frac{1}{2R_{B1A}}(A_B^Z - A_A^Z) \\ \dot{\omega}_Z = \frac{1}{2R_{B1A}}(A_B^Y - A_A^Y) - \frac{1}{2R_{C1A}}(A_C^X - A_A^X), \end{cases} (6)$$

$$\begin{cases} \omega_X^2 = \frac{1}{2} [\frac{1}{R_{B1A}}(A_B^X - A_A^X) - \frac{1}{R_{C1A}}(A_C^Y - A_A^Y) - \frac{1}{R_{D1A}}(A_D^Z - A_A^Z)] \\ \omega_Y^2 = \frac{1}{2} [\frac{1}{R_{C1A}}(A_C^X - A_A^X) - \frac{1}{R_{D1A}}(A_D^Y - A_A^Y) - \frac{1}{R_{B1A}}(A_B^Z - A_A^Z)] \\ \omega_Z^2 = \frac{1}{2} [\frac{1}{R_{D1A}}(A_D^X - A_A^X) - \frac{1}{R_{B1A}}(A_B^Y - A_A^Y) - \frac{1}{R_{C1A}}(A_C^Z - A_A^Z)] \end{cases} (7)$$

分析方程组 (6)、(7) 可知, 这种配置方案要求在 A、B、C、D 4 点分别安装 3 个互相正交的线性加速度计。虽然这种方法的思路比较简单, 但是实际应用中在同一点同时安装 3 个线性加速度计是十分不便的, 而同时要求安装在 A、B、C、D 的加速度计组成的 3 条轴线互相正交安装也是比较困难的。即便如此, 在工程实践中, 机载、舰载或车载的稳定平台的机械结构一般都很紧凑, 使得上述配置方案也难以实现。

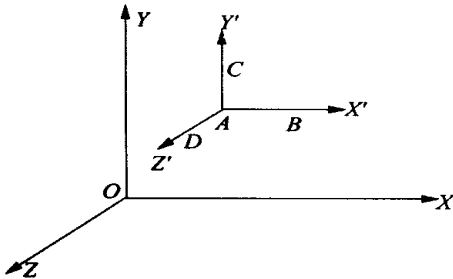


图 3 一般配置方案
Fig. 3 Normal configuration

3. 2 线性加速度计配置方案的改进

此种改进方法的关键在于把上述测量装置化整为零, 整个测量装置由 3 个平面结构的安装板组成, 每块板由 3 个能够测量 2 个方向的线性加速度计组成 (图 4)。这种同时能够测量 2 个方向

的线性加速度计的生产技术已经成熟^[68], 这就保证了本文提出的方法在工程实践中的可用性。

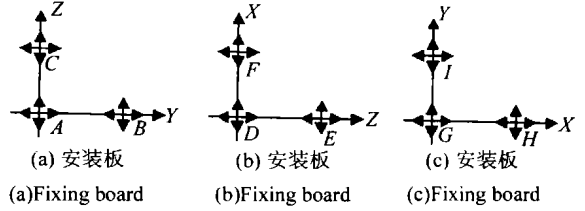


图 4 平面结构安装板示意图
Fig. 4 Flat structure fixing board

在安装时只需要使 (a)、(b)、(c) 3 块板互相垂直即可。特别在光电稳定平台应用中, 只要保证 (a)、(b)、(c) 3 块板分别垂直于稳定平台的俯仰轴、偏转轴以及横摇轴即可正常工作, 如图 5 所示。这种安装方法只要保证板的垂直性而在平台中的安装位置可以是任意的, 所以这种方法在工程实践中是比较容易实现的。

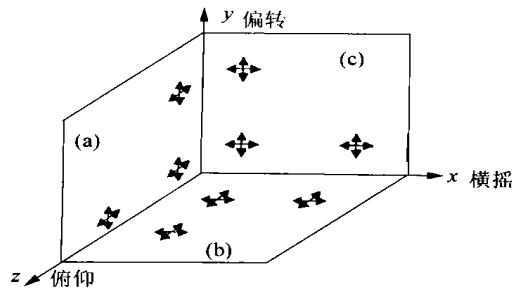


图 5 一种安装方法
Fig. 5 A kind of fixing method

根据方程式 (1) 对 (a) 板进行分析有

$$\begin{cases} A_{B1O} = A_{A1O} + \omega \times R_{B1A} + \omega \times (\omega \times R_{B1A}) \\ A_{C1O} = A_{A1O} + \omega \times R_{C1A} + \omega \times (\omega \times R_{C1A}), \end{cases} (8)$$

求解方程组 (8) 有

$$\begin{cases} A_B^Y - A_A^Y = -R_{B1A}(\omega_X^2 + \omega_Z^2) \\ A_B^Z - A_A^Z = -R_{B1A}\omega_X + R_{B1A}\omega_Y\omega_Z, \end{cases} (9)$$

$$\begin{cases} A_C^Y - A_A^Y = -R_{C1A}\omega_X + R_{C1A}\omega_Y\omega_Z \\ A_C^Z - A_A^Z = -R_{C1A}(\omega_X^2 + \omega_Y^2), \end{cases} (10)$$

通过方程组 (9-2)、方程组 (10-1) 可以求得

$$\omega_X = \frac{1}{2R_{B1A}}(A_B^Z - A_A^Z) - \frac{1}{2R_{C1A}}(A_C^Y - A_A^Y), \quad (11)$$

同理可求得

$$\omega_Y = \frac{1}{2R_{E1D}}(A_E^X - A_D^X) - \frac{1}{2R_{F1D}}(A_F^Z - A_D^Z), \quad \omega_Z = \frac{1}{2R_{H1G}}(A_H^Y - A_G^Y) - \frac{1}{2R_{I1G}}(A_I^X - A_G^X), \quad (13)$$

(12) 通过方程组 (9-1)、方程组 (10-2) 以及由 (b)、(c) 板构成的方程组可以求得

$$\begin{cases} \omega_X^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_{H1G}}(A_H^X - A_G^X) - \frac{1}{R_{B1A}}(A_B^Y - A_A^Y) - \frac{1}{R_{E1D}}(A_E^Z - A_D^Z) \right] \\ \omega_Y^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_{B1A}}(A_B^Y - A_A^Y) - \frac{1}{R_{E1D}}(A_E^Z - A_D^Z) - \frac{1}{R_{H1G}}(A_H^X - A_G^X) \right] \\ \omega_Z^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_{E1D}}(A_E^Z - A_D^Z) - \frac{1}{R_{H1G}}(A_H^X - A_G^X) - \frac{1}{R_{B1A}}(A_B^Y - A_A^Y) \right] \end{cases}, \quad (14)$$

或

$$\begin{cases} \omega_X^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_{F1D}}(A_F^X - A_D^X) - \frac{1}{R_{G1I}}(A_G^Y - A_I^Y) - \frac{1}{R_{C1A}}(A_C^Z - A_A^Z) \right] \\ \omega_Y^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_{G1I}}(A_G^Y - A_I^Y) - \frac{1}{R_{C1A}}(A_C^Z - A_A^Z) - \frac{1}{R_{F1D}}(A_F^X - A_D^X) \right] \\ \omega_Z^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_{C1A}}(A_C^Z - A_A^Z) - \frac{1}{R_{F1D}}(A_F^X - A_D^X) - \frac{1}{R_{G1I}}(A_G^Y - A_I^Y) \right] \end{cases}, \quad (15)$$

由方程组 (14) 和方程组 (15) 可见, 这种安装方法存在着信息冗余。一方面此方法存在着一定的资源浪费, 但同时也可以凭借着信息冗余提高角速度的测量精度, 所以这种方法在工程实践中能够很容易实现。若只安装两块板 (如图 5 中的 (a)、(b) 板) 则能够测得 2 个轴向上的 ω_X 、 ω_Y 与 ω_X 、 ω_Y 、 ω_Z 。

关”这个结论是正确的, 并在此基础上研究了线性加速度计在光电稳定平台中可行的配置方案, 解决了线性加速度计在实际应用中安装不便带来的问题, 为平台稳定控制技术的进一步发展奠定了基础。

4 结 论

本文证明了“刚体角运动与基点位置选择无

参考文献:

- [1] 顾英. 惯导加速度计技术综述 [J]. 飞航导弹, 2001, (6): 78-85.
GU Y. A survey of accelerometer technology in inertial navigation [J]. *Cruise Missiles*, 2001, (6): 78-85.
- [2] 张赛金. 瞄准跟踪系统的无陀螺瞄准线稳定 [J]. 舰船光学, 1994, (4): 15-19.
ZHANG S J. Nongyroscopic line of sight stabilization in pointing and tracking system [J]. *Ship Optics*, 1994, 4: 15-19.
- [3] 熊永虎, 马宝华, 彭兴平. 用线加速度计测量角加速度和线加速度 [J]. 北京理工大学学报, 2000, 9 (3): 307-311.
XIONG Y H, MA B H, PENG X P. Measurement of angular and linear acceleration using linear accelerometers [J]. *Journal Beijing Institute of Technology*, 2002, 9 (3): 307-311.
- [4] Marcelo C Algrain. Accelerometer based platform stabilization [J]. *SPIE*, 1991, 1482: 367-382.
- [5] 周衍柏. 理论力学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社. 1986. 204-208.
ZHOU Y B. *The tutorial of theoretical mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press. 1986. 204-208.
- [6] 屈翠香, 李刚. 具有数字信号输出的双轴加速度传感器 ADXL202 [J]. 国外电子元器件, 1999, 8: 8-12.
QU C X, LI G. Biaxial acceleration sensor ADXL202 with digital output [J]. *International Electronic Elements*, 1999, 8: 8-12.
- [7] 解旭辉, 刘危, 张明亮, 等. 微惯性测量组合关键技术与应用 [J]. 光学精密工程, 2002, 10 (2): 154-158.

XIE X H, LIU W, ZHANG M L, *et al.* Key technologies and applications of micromechanical inertial measurement units [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10 (2): 154-158.

[8] 周华, 沈连官, 尤辉, 等. 电容式微加速度计结构的建模及仿真 [J]. 光学精密工程, 1999, 7 (4): 59-64.

ZHOU H, SHEN L G, YOU H, *et al.* Structure design and simulation of capacitive micro accelerometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7 (4): 59-64.

作者简介: 刘 向 (1978-), 男, 河南洛阳人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读硕士研究生, 主要研究方向为光电平台稳定系统。

向您推荐《液晶与显示》期刊

《液晶与显示》是中国最早的液晶学科期刊, 也是中国惟一的液晶学科和显示领域中综合性学术期刊。它由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办, 科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述、信息与动态和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示领域中最新理论研究、科研成果和创新能力, 及时反映国内外本学科领域及产业信息动态。本刊是英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA) 和“中国科学引文数据库”、“中国科技论文统计源期刊”等国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色, 其内容丰富, 信息量大, 涵盖面广, 可读性强。既是启迪科技人员开拓创新思路的参考期刊, 又是从事液晶和显示技术研究的广大科技人员、大专院校师生及相关领域的科技工作者进行学术交流的良好园地, 也是图书、情报等部门必不可少的信息来源。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿, 将您的科技创新、产品信息、企业风貌通过这一窗口展示出来。同时, 竭诚欢迎社会各界洽谈广告业务、合作组织技术交流与信息发布活动。

《液晶与显示》为双月刊, A4开本, 80页, 国内定价 10.00元, 国内外公开发行。国际标准刊号: ISSN 1007-2780, 国内统一刊号: CN 22-1259/04, 国际刊名代码 (CODEN): YYXIFY。广告经营许可证号: 200004100137。国内邮发代号: 12-203; 国外发行代号: 4868Q。同时, 《液晶与显示》编辑部将竭诚为广大读者服务, 随时办理订阅。

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登产品信息

地 址: 吉林省长春市东南湖大路 16 号 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

《液晶与显示》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431) 6176862

传 真: (0431) 5682346

E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn

网 址: www.ciomp.ac.cn