

文章编号 1004-924X(2017)05-1291-09

耦合扰动下船载成像系统的复合稳像

卢晓东, 吴天泽*, 周 军, 赵 斌, 马晓媛

(西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘要:针对船载精密成像系统在船体晃动时产生的杆臂牵连平动和等效圆锥旋转,提出了一种将惯性量测信息引入电子稳像技术对耦合干扰进行补偿的方法。首先,基于俯仰-偏航式光学稳定平台分析其在视线稳定过程中所产生的等效圆锥旋转,推导了视线旋转角与平台转角之间的数学关系。然后,分析了杆臂牵连平动对像点虚化的影响,并结合圆锥旋转构建了耦合扰动模型;针对耦合扰动模型提出利用惯性测量信息复合电子稳像的方法来实现低特征背景下的高精度稳像。最后,通过半实物仿真验证了该方法在低特征环境中的成像稳定精度和实时性。结果显示:提出的方法能够有效补偿俯仰-偏航式稳定平台转动以及船体晃动时形成的耦合干扰,在低特征环境中具有较高的成像稳定精度和实时性,修正误差为亚像素级。图像稳定后的峰值信噪比平均提高了 4 dB,基本满足船载光学精密探测系统对实时性、精度、抗干扰能力和稳定性的要求。

关键词:高精度成像;船载成像;圆锥旋转;杆臂平动;电子稳像;复合稳像

中图分类号:U674.82;TP274.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172505.1291

Compound image stabilization for coupled disturbance in ship-borne imaging system

LU Xiao-dong, WU Tian-ze*, ZHOU Jun, ZHAO Bin, MA Xiao-Yuan

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

* Corresponding author, E-mail: wutianze12@sina.com

Abstract: For the lever arm translational motion and equivalent coning rotation of a ship-borne optical detection system under a great hull attitude, a compound Electronic Image Stabilization(EIS) method which brought inertial information was proposed to compensate the coupled disturbance. Firstly, the equivalent coning rotation existed in the LOS (Line Of Sight) stabilization process was analyzed based on a pitch-yaw optical stabilization system, and the relationship between LOS rotation angle and platform roll angle was deduced. Then, the influence of lever arm disturbance on weak spots was analyzed and a coupled disturbance model combined with the equivalent coning rotation was built. On the basis of the model, a compound image stabilization method by combing inertial information and the EIS method was proposed to realize the image stabilization under a low characteristic environment. Finally, the image stabilization and real time ability of the proposed method were verified through hardware-in-the-loop simulation under the low characteristic environment. The results demonstrate

收稿日期:2016-10-08;修订日期:2016-12-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61104194);航天支撑技术基金资助项目(No. 2015-HT-XGD);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 3102015BJ(II)ZS024)

that the method compensates the coupled disturbance from the lever arm translational motion and equivalent coning rotation. It has higher image stabilization and real time ability, and motion estimation is at a sub-pixel level. After compensation, the peak signal-to-noise ratio (PSNR) of image stabilization improves by 4 dB on average. It satisfies the requirements of ship-borne optical imaging systems for strong instantaneity, high precision, strong anti-interference and stable and reliable characteristics.

Key words: high precision imaging; ship-borne imaging; coning rotation; lever-arm translation; electronic image stabilization; compound image stabilization

1 引言

“远望”号等测量船上的船载高精度光学成像系统是在遥远海域对空间目标实施精确观测的重要设备。这些舰船在水面上对空间目标进行探测时,除船舶的定向运动外,还会受风浪的影响产生缓慢的横滚或俯仰运动,并随浪涌上下起伏,从而使精密成像系统的光轴不稳定而引起图像虚化,严重影响了对目标的成像观测^[1-2]。

为了消除这些干扰运动,精密光学成像系统会采用陀螺机械稳定平台进行解耦稳定。但是陀螺稳定平台受到机械误差、惯组精度和驱动系统特性的限制,无法完全消除这些干扰的影响^[3]。另外,船载光学稳定平台通常采用俯仰-偏航式稳定平台,这种稳定平台在两个方向摆动时会产生一种类似圆锥效应的光轴旋转,从而引起成像旋转。再者,光学稳定平台的安装位置远离船体的转动中心,船体姿态变化会产生明显的杆臂牵连平动,引起光轴的牵连平动。这两种效应是俯仰-偏航式稳定平台无法完全补偿的,会直接影响航船的高精度观测^[4-6]。

现代精密观测系统常采用电子稳像技术来进一步消除上述干扰。电子稳像技术是利用图像处理的方法进行视频序列帧间运动估计和运动补偿的技术^[7-8],较为代表的电子稳像方法有块匹配法、位平面匹配法、灰度投影法等^[9-10],其中块匹配方法具有较好的稳定精度,但计算量大,效率较低,实时性差^[11];位平面匹配法是一种较新的方法,计算效率比块匹配方法高,但牺牲了运动估计的精度^[12];灰度投影法计算简单,具有较好的实时性,但对前景局部运动较为敏感,易受到小运动物体的干扰^[13-14]。这些方法的共同点是较强地依赖于图像的纹理信息或特征点^[15],而在夜间或海面上对航天器进行观测时所形成的图像纹理特

征并不明显,不便于进行帧间运动估计,且这些稳像方法对图像的旋转运动不很敏感,因此目前的电子稳像技术并不完全适用^[16-17]。

针对以上问题,考虑到观测平台的惯性量测信息除了能够对平台提供机械稳定的数据外,也能对电子稳像提供有益的信息,本文提出将其引入电子稳像技术来实现对光轴干扰残余量的估计,从而在较低的运算量要求下实现低特征背景环境下的船载成像系统高精度稳像的方法。这种方法能够有效补偿俯仰-偏航式稳定平台转动中存在的等效圆锥旋转以及船体晃动时引起的杆臂牵连平动等耦合干扰。

2 耦合干扰对成像影响的建模

2.1 等效圆锥的旋转干扰

对于常见的船载俯仰-偏航式光学稳定平台,当偏航和俯仰方向同时摆动时,会引起类似于圆锥效应的视线旋转^[18],这种圆锥旋转干扰的产生机理可建模如图 1 所示。

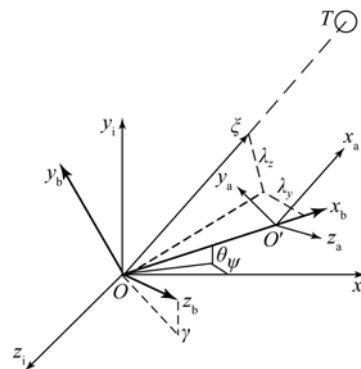


图 1 视线稳定坐标系关系示意图

Fig. 1 Coordinate systems for the Line of Sight (LOS) stabilization

图 1 变量中的角标 i 代表惯性坐标系,角标 b

代表载体(船体)坐标系,角标 a 代表平台坐标系, θ, ψ, φ 表示船体姿态角。当船体姿态变化时,观测光轴矢量 $\mathbf{o}\xi$ 会发生偏转,故在船体姿态变化时首先需要保持视线在惯性空间的稳定,满足:

$$\mathbf{C}_{bk} \mathbf{o}\xi_{bk} = \mathbf{C}_{b0} \mathbf{o}\xi_{b0}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \lambda_z = \arcsin[-\sin \theta \cos \varphi \cos \lambda_{z0} \cos(\psi - \lambda_{y0}) + \sin \varphi \cos \lambda_{z0} \sin(\psi - \lambda_{y0}) + \cos \theta \cos \varphi \sin \lambda_{z0}] \\ \lambda_y = \arcsin\{-\sin \theta \sin \varphi \cos \lambda_{z0} \cos(\psi - \lambda_{y0}) - \cos \varphi \cos \lambda_{z0} \sin(\psi - \lambda_{y0}) + \cos \theta \sin \varphi \sin \lambda_{z0}\} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\lambda_{zk}, \lambda_{yk}$ 分别表示稳定平台高低方向和方位方向的理论框架偏转角度值。

如果伺服机构系统比较理想,忽略其动态特性,有如下关系成立:

$$\begin{cases} q_x = \arcsin\{-\sin \lambda_z \cos \psi \sin \theta \sin \varphi + \sin \lambda_z \sin \psi \cos \varphi - \cos \lambda_z \cos \theta \sin \varphi\} / \cos q_z \\ q_y = \arcsin\{-(-\cos \lambda_z \sin \lambda_y \cos \psi \cos \theta + \sin \lambda_z \sin \lambda_y \sin \theta - \cos \lambda_y \cos \theta \sin \psi) / \cos q_z\} \\ q_z = \arcsin\{\sin \lambda_z \cos \psi \cos \theta + \cos \lambda_z \sin \theta\} \end{cases} \quad (4)$$

对于俯仰-偏航式稳定平台来说,当俯仰及偏航同时摆动时,根据公式(2)和(4)可知,在稳定平台保持视线指向稳定过程中,探测器光轴将发生圆锥旋转,其大小与船体摆动幅度的关系如图 2 所示,而俯仰-偏航式双轴稳定平台没有多余的自由度来补偿此扰动。

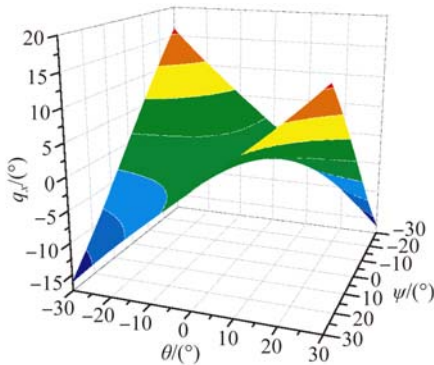


图 2 俯仰及偏航扰动对视线转动的影响

Fig. 2 Effects of pitch and yaw disturbances on LOS rotation

定义等效圆锥旋转的干扰项为 $\delta \mathbf{r}_q$, 对于图像中的某点 $[z \ y]^T$, 这种干扰可以表示为:

$$\delta \mathbf{r}_q = \begin{bmatrix} \Delta z_q \\ \Delta y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_x & \sin q_x \\ -\sin q_x & \cos q_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2.2 杆臂牵连的平动扰动

船载光学稳定平台的旋转中心通常与船体姿

即使得任意时刻 k 的光轴在惯性空间的指向与初始时刻相同,式中 \mathbf{C} 表示姿态变换矩阵,求解方程(1)即可求出使光轴在惯性空间保持指向稳定的伺服框架角的指令值为:

$$\mathbf{C}_i^a(q_x, q_y, q_z) = \mathbf{C}_b^a(\lambda_y, \lambda_z) \cdot \mathbf{C}_i^b(\theta, \psi, \varphi), \quad (3)$$

式中: q_x, q_y, q_z 分别为表示视线旋转角、视线方位和视线高低角。根据公式(3)可以求得:

态旋转中心不同,那么载体姿态转动除影响平台光轴的旋转外,还会产生杆臂牵连平动。以一个方向的船体姿态运动为例,其形成原理如图 3 所示。

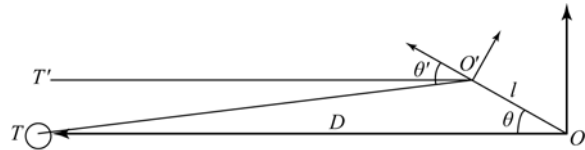


图 3 稳定平台与载体质心杆臂的影响

Fig. 3 Influence by lever arm effects

图 3 中假设点目标 T 距离观测点的距离为 D , 杆臂长度为 l , 当载体产生的姿态角为 θ 时,在杆臂的影响下,实际视线角 θ' 与 θ 产生误差:

$$\theta' = \theta + \arcsin[(l \sin \theta) / D]. \quad (6)$$

由于稳定平台保持光轴指向稳定,则点目标在图像会发生偏移,进一步,由于观测点沿光轴方向的运动量很小,满足 $l(1 - \cos \theta) \ll D$, 较观测距离可忽略其变化,故这种影响可视为使整幅图像产生了牵连平移。

考虑三维的情况,假设图像稳定平台在载体坐标系中的安装位置为 $\mathbf{r}_s = [l_x \ l_y \ l_z]^T$, 那么,由于载体姿态的运动,导致的平台坐标系原点的牵连平移量 $\delta \mathbf{R}_l$ 为:

$$\delta \mathbf{R}_l = (\mathbf{C}_b - \mathbf{C}_{b0}) \mathbf{r}_s. \quad (7)$$

定义由杆臂牵连平动引起的图像干扰项为

δr_l , 对于图像中某的点 $[z \ y]^T$, 则这种干扰可以表示为:

$$\delta r_l = g(\delta R_l) = \begin{bmatrix} \Delta z_l \\ \Delta y_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: $[z' \ y']^T$ 为平移后目标点在图像中的坐标, $g(\cdot)$ 表示目标物理三维坐标与其图像二维坐标之间的映射关系。

2.3 耦合扰动下对图像干扰的建模

文中针对等效圆锥旋转和杆臂牵连平动两种耦合干扰建立其对成像影响的数学模型。

当两种干扰同时存在时, 定义耦合干扰项为 $\delta r = [\Delta z \ \Delta y]^T$, 即有:

$$\delta r = \delta r_q + \delta r_l. \quad (9)$$

展开得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \cos q_x - y \sin q_x + z' - z \\ -z \sin q_x + y \cos q_x + y' - y \end{bmatrix}. \quad (10)$$

耦合干扰对成像的影响如图 4 所示, 目标在图像中从位置 1 旋转至位置 2, 同时图像中心由 O 平移至 O' , 可视为目标在图像中沿等效旋转中心 R 旋转了相同的角度, 由于 R 不可知, 文献 [19] 假设图像旋转中心近似为图像中心 O' 。这种假设在稳定精度要求不是很高时可以近似, 但是在高精度要求时要考虑这种近似误差。本文利用公式 (9) 的模型, 采用电子稳像的方法并引入惯性量测信息对图像扰动进行精确补偿。

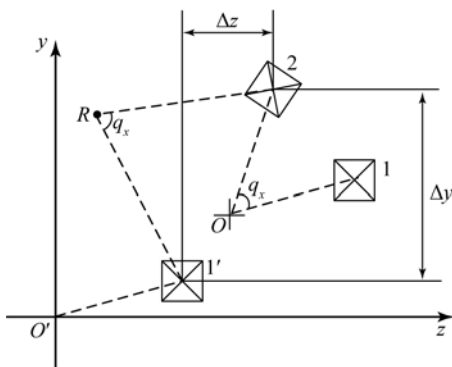


图 4 旋转中心不同引起的误差

Fig. 4 Errors from different rotation centers

3 耦合扰动下的复合稳像算法

通常船载光学观测系统对光轴稳定精度的要求很高, 需要对上述两种耦合干扰进行解耦补偿。

从摄像机运动的角度分析, 假设摄像机的焦距为 f , 定义 $R_{Ta} = [X_a \ Y_a \ Z_a]^T$ 为目标在平台坐标系中的位置, 根据成像原理有:

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \frac{f}{X_a} \begin{bmatrix} Z_a \\ Y_a \end{bmatrix}, \quad (11)$$

进一步, 定义 $R_{Ta} = [X_a \ Y_a \ Z_a]^T$ 为目标在平台坐标系中的初始位置坐标, $\delta R_{Ta} = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$ 为受到扰动后目标在平台系中的位置变化量, 其于当前时刻在图像中的位置相对初始时刻的变化量为 $\delta r = [\Delta z \ \Delta y]^T$, 则有:

$$\begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta y \end{bmatrix} = \frac{f}{X_{a0} + \Delta X} \begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta Y \end{bmatrix} - \frac{f \Delta X}{X_{a0} (X_{a0} + \Delta X)} \begin{bmatrix} Z_{a0} \\ Y_{a0} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

从公式 (12) 中可以看出, 目标在成像面上的位移主要由两部分构成, 第一部分是目标在平台系中的位置变化, 另一部分是目标的初始位置。考虑目标距离观测点相对较远, 载体姿态扰动引起的 ΔX 相对很小, 于是公式 (12) 可简化为:

$$\begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta y \end{bmatrix} = \frac{f}{X_{a0}} \begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta Y \end{bmatrix}. \quad (13)$$

公式 (13) 说明整幅图像中只存在平移和旋转扰动, 符合公式 (9) 的模型假设。

根据简化模型, 引入惯性量测信息求解 δR_{Ta} , 假设在三维空间中静止点目标 T 在惯性坐标系中的位置 $R_T = [X_T \ Y_T \ Z_T]^T$, 理想情况下, 目标在平台坐标系中的位置 $R_{Ta} = [X_a \ Y_a \ Z_a]^T$ 为:

$$R_{Ta} = C_i^e R_T - T, \quad (14)$$

式中 T 表示平台坐标系的平移向量, 考虑系统中可能存在的误差 δ , 则有:

$$\delta R_{Ta} = (C_i^e - C_i^{e0}) R_T + (T_0 - T) + \delta. \quad (15)$$

对于公式 (15) 的第一项, 由于稳定平台在载体晃动时保持光轴指向稳定, 即 q_y, q_z 保持不变, 展开有:

$$(C_i^e - C_i^{e0}) R_T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\cos q_x - 1) & \sin q_x \\ 0 & -\sin q_x & (\cos q_x - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{a0} \\ Y_{a0} \\ Z_{a0} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

将其映射至图像中, 得到与等效圆锥旋转相同的表达式, 那么:

$$\delta r_q = f[(C_i^e - C_i^{e0}) R_T](2:3, :) / X_{a0}. \quad (17)$$

再考虑公式 (15) 的第二项, 其表示平台坐标

系原点的平移量,利用杆臂牵连扰动的模型,有:

$$(\mathbf{T}_0 - \mathbf{T}) = \mathbf{C}_i^a (\mathbf{C}_{b_0}^i - \mathbf{C}_b^i) \mathbf{r}_S = (\mathbf{C}_{b_0}^i - \mathbf{C}_b^i) \mathbf{r}_S, \quad (18)$$

式中 a' 表示视线坐标系,有:

$$\mathbf{C}_i^a = \mathbf{C}_i^a(0, q_y, q_z). \quad (19)$$

由于载体坐标系与视线坐标系之间的变换只用到了两个姿态角 q_y 和 q_z ,故这一项的影响与视线的转动并不耦合,仅是由杆臂引起的平动扰动,那么:

$$\delta \mathbf{r}_t = f[(\mathbf{C}_{b_0}^i - \mathbf{C}_b^i) \mathbf{r}_S] (2:3, :) / X_{a_0}. \quad (20)$$

另外,对于系统的误差项 δ ,考虑到两轴存在解耦误差 $\Delta \lambda_y$ 和 $\Delta \lambda_z$,使光轴还会存在很小的角度摆动,这种小角度摆动可近似为小量平移运动,即:

$$\begin{bmatrix} \Delta z' \\ \Delta y' \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} -\Delta \lambda_y \\ \Delta \lambda_z \end{bmatrix}, \quad (21)$$

其中 k 为比例系数,定义 $\delta \mathbf{r}_\lambda = [\Delta z' \quad \Delta y']^T$ 为平台系统引起的图像平移扰动,引入视线转动的影响,则:

$$\delta \mathbf{r}_\lambda = k \mathbf{C}(-q_x) \delta \boldsymbol{\lambda}, \quad (22)$$

式中 $\delta \boldsymbol{\lambda} = [-\Delta \lambda_y \quad \Delta \lambda_z]^T$. 对于其它系统误差的影响,例如平台的安装误差、测角噪声等,相比 $\delta \mathbf{r}_\lambda$ 的扰动较小,可忽略不计^[20]. 综上,得到修正的耦合扰动下俯仰-偏航式稳定平台成像的帧间误差模型为:

$$\delta \mathbf{r} = \delta \mathbf{r}_q + \delta \mathbf{r}_t + \delta \mathbf{r}_\lambda. \quad (23)$$

4 仿真试验验证

为验证本文所提算法的正确性,利用实验室中双框架稳定平台和转台等硬件设备模拟船体摇晃开展了半实物试验验证。如图 5 所示,仿真回路中,惯组及稳定平台与三轴转台捷联,转台模拟船体姿态变化,惯组将姿态角速度信息采集后传输给工控机,工控机经过解算得到框架角,控制稳定平台光轴指向稳定,与此同时软件将抖动的图像序列进行解耦修正。

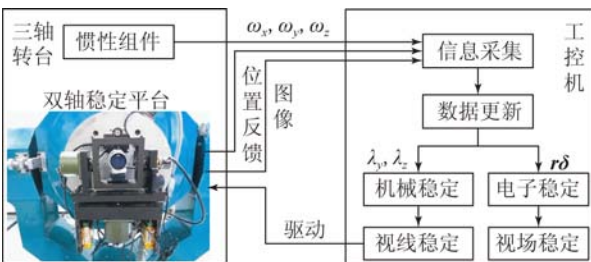


图 5 半实物仿真回路

Fig. 5 Circuit of hardware-in-the-loop simulation

仿真初始时刻船体姿态角与天线指向角均为 0° 。根据观测船的舰体自然频率和常见海况可知,通常船体的摆动周期小于 15 s,摆动角度小于 20° ^[21]。令转台俯仰和偏航进行同频率摆动,摆动角度分别为 $+15^\circ$ 和 -20° ,整个过程中同时进行平台机械稳定和图像电子稳定,共采集图像 290 frame,则单纯平台机械稳定结果如图 6 和图 7 所示。

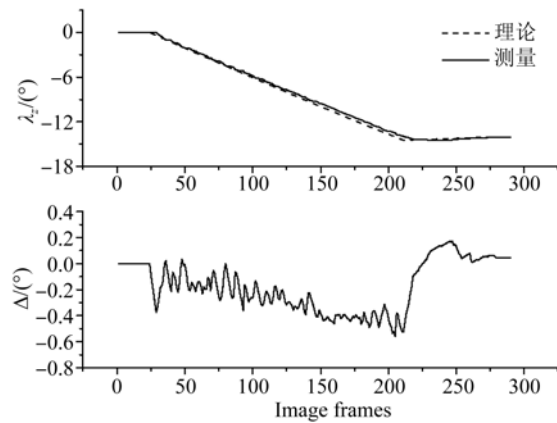


图 6 平台内框机械稳定后的角度误差

Fig. 6 Frame stability results inside stable platform

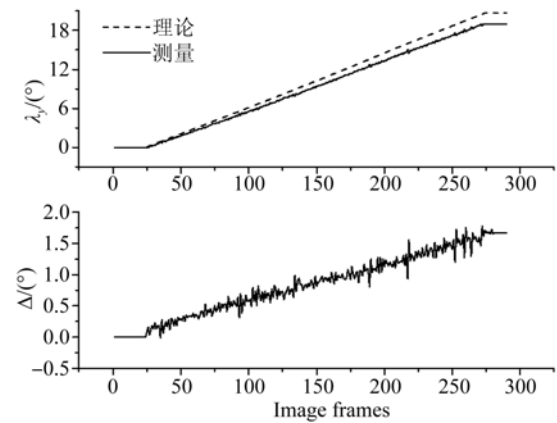


图 7 平台外框机械稳定后的角度误差

Fig. 7 Frame stability results outside stable platform

图 6 和图 7 中上方曲线对应稳定平台内框和外框的理论角度值及测量角度值。理论角度值为公式(2)的计算结果,测量角度值为稳定平台上码盘反馈的角度, Δ 为每一时刻理论角位置与测量角位置的差值,体现了光轴稳定效果。从图中可以看出理论角度与测量角度存在一定误差,这主要是机械伺服系统的累积误差造成的,误差大小在 2° 以内,说明机械稳定只能基本消除船体姿态

运动的干扰。同时,转台的两轴摆动引起了光轴的等效圆锥旋转,如图 8 所示,摆动过程中光轴旋转角度最大可以达到 -5° ,而这个旋转是俯仰-偏航式稳定平台无法补偿的。

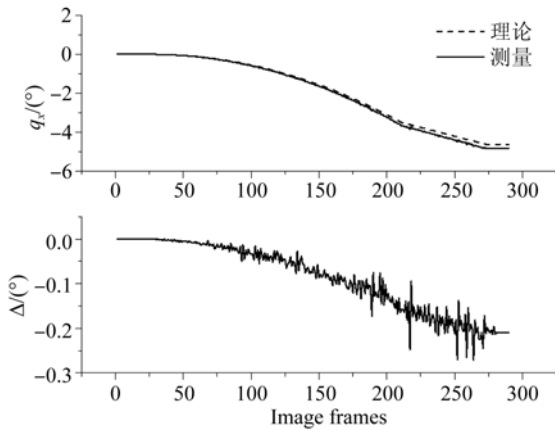


图 8 圆锥旋转引起的光轴旋转角度
Fig. 8 Angle values of LOS rotation

为了消除光轴旋转采用电子稳像技术进行了修正。光轴旋转误差可以利用惯性测量信息带入公式(4),通过计算旋转角进行反向旋转修正,计算结果如图 8 中的理论值计算曲线,图中的测量值曲线为图像旋转的真实角度,可见利用本文算法进行角度估计的精度较高,累积误差小于 0.3° 。

对于平台稳定平移残差的修正,需要估计出平移量。图 9 所示为采用图像块匹配方法得出的平移量估计结果。

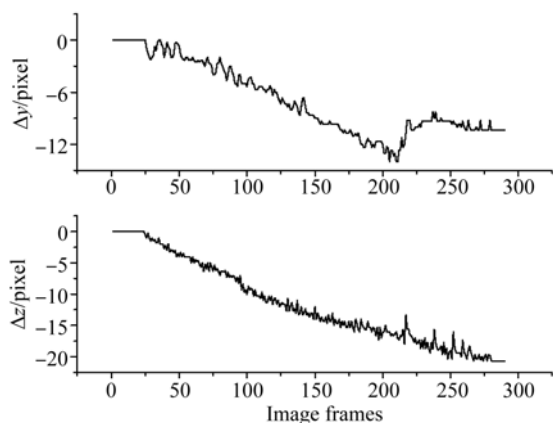


图 9 块匹配算法的图像运动估计误差
Fig. 9 Results of motion detection by block matching

图像块匹配算法为目前国际上常采用估计图像平移的标准算法^[22-23],从估计结果中可以看出待稳定图像序列不但存在小范围内的抖动,而且

还存在较大位置漂移。根据公式(22)可知小抖动由机械平台稳定残差造成,图像位置漂移主要是受到了杆臂牵连运动的影响。

利用本文提出的方法对相同视频序列进行偏移量计算,其中,在实验室条件下测量得到的摄像机成像面的在三轴转台上的安装位置为 $r_s = [0.3 \ 0.02 \ 0]^T$,探测距离为 12 m。得到的结果如图 10 所示,可以看到本文结果与标准块匹配的结果具有相同的变化趋势。

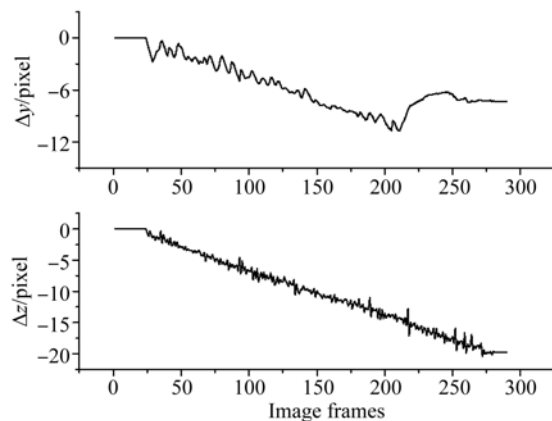


图 10 本文算法的图像运动估计误差
Fig. 10 Results of motion detection by proposed method

为了进一步验证本文算法的精确性,将视频序列的第 1 帧作为参考帧,选取具有较大旋转角度以及具有较大偏移量的第 170~270 frame 计算其与参考帧的峰值信噪比(PSNR),结果如图 11 所示:

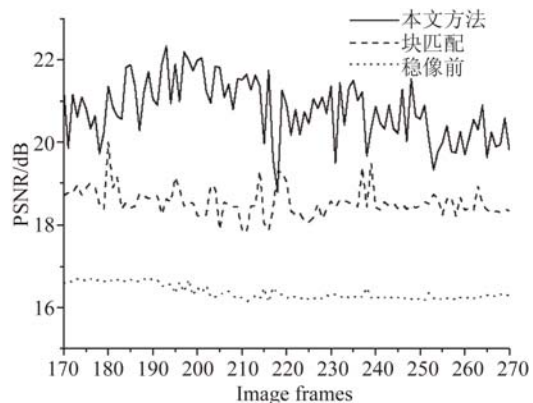


图 11 PSNR 值计算结果
Fig. 11 Results of PSNR

结果可见,在未进行稳像前图像序列的 PSNR 值在 17 dB 左右,利用块匹配方法可将其

平均提升 2 dB,利用本文方法可将其平均提升 4 dB。上述为在光照条件良好的条件下进行的试验,其他条件不变,仅在试验开始一段时间后降低光照强度重复相同的试验,得到的第 170~270 帧的 PSNR 值如图 12 所示。

从图 12 中可见,在降低光照条件后,块匹配方法在某些时刻由于图像特征质量下降,出现了匹配失效的现象,导致误匹配图像的 PSNR 值相比稳像前几乎没有提升,而本文方法没有明显受到环境变化的影响。两组试验表明,本文方法相比块匹配方法具有较高的稳定精度以及较好的环境适应性。

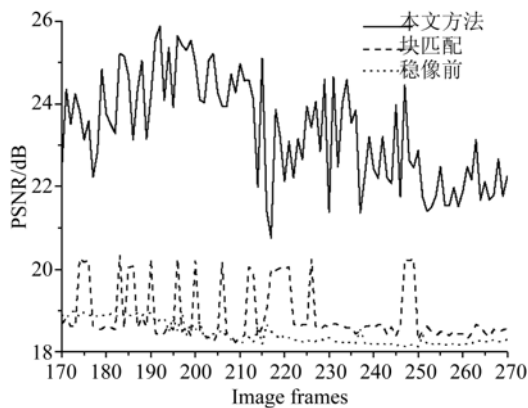


图 12 PSNR 值计算结果(低光照条件)

Fig. 12 Results of PSNR (low light)

图 13 为正常光照条件下第 290 frame 图像的稳像结果,两种不同方法对比如表 1 所示。

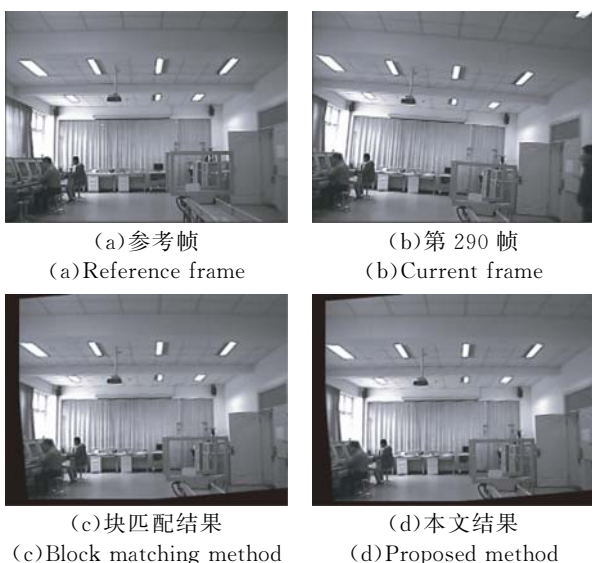


图 13 两种方法的电子稳像结果

Fig. 13 Results of two methods

表 1 两种稳像方法的峰值信噪比对比

Tab. 1 Comparison of two methods

估计方法	z/pixel	y/pixel	PSNR/dB	时间 /(frame · s ⁻¹)
块匹配	-20.66	-10.33	18.27	8
本文方法	-19.72	-7.36	20.20	20

原始图像序列的第 290 帧图像与参考帧图像的 PSNR 值为 16.37 dB,从表 1 中可以看出,采用本文所提出的方法对第 290 帧进行稳像后,其 PSNR 值达到了 20.20 dB,比原始图像提升了 3.83 dB,而国际通用的块匹配标准方法提高了 1.90 dB。此外在相同的硬件和软件仿真平台,对于所采集的 400 pixel×300 pixel 图像,块匹配算法的运行速度为 8 frame/s,而本文算法的运行速度为 20 frame/s,可见提出的方法实时性也有所提高。

图 14 为低光照条件下第 290 frame 图像的稳像结果,此条件下两种方法的对比如表 2 所示。在低光照条件下,原始图像序列的第 290 frame 图像与参考帧图像的 PSNR 值为 18.42 dB,而本文方法使稳像后的 PSNR 值达到了 21.56 dB,比原始图像提升了 3.14 dB,而块匹配方法由于匹配错误只进行了旋转稳定,PSNR 值没有明显的提升。对于算法执行的速度来讲,与正常光照条件下没有显著差异。

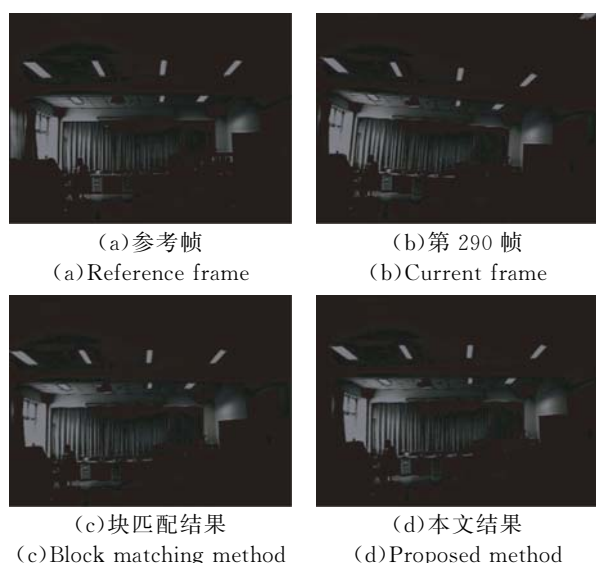


图 14 两种方法的电子稳像结果(低光照)

Fig. 14 Results of two methods (low light)

表 2 两种稳像方法的峰值信噪比对比(低光照)

Tab. 2 Comparison of two methods (low light)

估计方法	z/pixel	y/pixel	PSNR/dB	时间 /(frame \cdot s $^{-1}$)
块匹配	0	0	18.52	8
本文方法	-19.72	-7.36	21.56	20

5 结 论

针对车载高精度成像系统在船体姿态变化产生的等效圆锥旋转和杆臂牵连运动,本文基于俯

仰-偏航式稳定平台,提出了一种复合惯性测量信息的电子稳像方法。该方法对杆臂牵连平动和等效圆锥旋转的耦合干扰进行建模,引入惯性器件量测信息对旋转误差和平移误差进行了估计,从而实现了不利用图像纹理或特征信息的快速电子稳像。半实物仿真试验结果表明,本文提出的方法能够有效补偿俯仰-偏航式稳定平台所不能补偿的耦合干扰,提高了图像的的稳定精度,稳像结果的 PSNR 值比国际通用的块匹配算法平均提高 2 dB,比原始图像序列平均提高 4 dB,并具有较高的实时性及环境适应性,图像稳定效果明显改善。

参考文献:

- [1] YAN F, ILIYASU A M, YANG H M, *et al.*. Strategy for quantum image stabilization [J]. *Science China: Information Sciences*, 2016, 59(5): 052102.
- [2] 王平,王伟,丁金伟,等. 机载光电侦察平台复合减振设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 83-89.
WANG P, WANG W, DING J W, *et al.*. Vibration damping design for airborne electro-optical surveillance platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 83-89. (in Chinese)
- [3] 王洪福,郑昌健,吴晓峰,等. 高精度稳像平台静平衡测量系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1618-1621
WANG H F, ZHENG C J, WU X F, *et al.*. Design of ultra precision static balance testing system for video-stabilization gimbals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1618-1621. (in Chinese)
- [4] 宗艳桃,蒋晓瑜,汪熙,等. 车载微光瞄准镜电子稳像技术研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(9): 1041-1047.
ZONG Y T, JIANG X Y, WANG X, *et al.*. Research on Electronic Image Stabilization Technique for Vehicle-borne Low-light-level Telescope [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(9): 1041-1047. (in Chinese)
- [5] 曹小涛,孙天宇,赵运隆,等. 空间大口径望远镜稳像系统发展现状及趋势[J]. *中国光学*, 2014, 7(5): 739-748.
CAO X T, SUN T Y, ZHAO Y L, *et al.*. Current status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 739-748. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 张坤,许廷发,王平,等. 高精度实时全帧频 SURF 电子稳像方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1964-1972.
ZHANG K, XU T F, WANG P, *et al.*. Real-time full-frame digital image stabilization system by SURF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1964-1972. (in Chinese)
- [8] CHENG X M, HAO Q, XIE M D. A comprehensive motion estimation technique for the improvement of EIS methods based on the SURF algorithm and kalman filter [J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 486.
- [9] YI M, GUO B L, YAN C M. Improved image alignment algorithm based on projective invariant for aerial video stabilization [J]. *Ksii Transactions on Internet and Information Systems*, 2014, 8(9): 3177-3195.
- [10] 蔡成涛,梁小龙,谭吉来,等. 自适应最优块匹配视频稳像算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(6): 1324-1329.
CAI C T, LIANG X L, TAN J L, *et al.*. Adaptive optimal block matching video stabilization algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(6): 1324-1329. (in Chinese)
- [11] SHUKLA D, JHA R K, OJHA A. Digital image stabilization using similarity transformation over constrained differential-radon warping vectors [J]. *Signal Processing Image Communication*, 2016, 47: 115-130.
- [12] 王志民,徐晓刚. 电子稳像技术综述[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(3): 470-480.

- WANG Z M, XU X G. A survey on electronic image stabilization [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(3):470-480. (in Chinese)
- [13] 初守艳,席志红.改进 Noble 算子匹配的电子稳像法[J]. *光学精密工程*, 2014,22(1): 204-212.
- CHU SH Y, XI ZH H. Digital image stabilization based on improved Noble feature matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(1): 204-212. (in Chinese)
- [14] 於俊,汪增福.基于经验模式分解和多种评价准则的电子稳像[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2014,48(3): 423-429.
- YU J, WANG Z F. Video stabilization based on empirical mode decomposition and several evaluation criterions [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2014, 48(3): 423-429. (in Chinese)
- [15] SHUKLA D, JHA R K. A robust video stabilization technique using integral frame projection warping [J]. *Signal Image and Video Processing*, 2015,9(6): 1287-1297.
- [16] 逢晓光,靳万鑫,余颖.大运动前景和旋转抖动视频的快速数字稳定[J]. *光学精密工程*, 2014,22(1): 177-185.
- DI X G, JIN W X, YU Y. Digital video stabilization for large-scale moving foreground object and rotation jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(1): 177-185. (in Chinese)
- [17] SHUKLA D, JHA R K. Robust motion estimation for night-shooting videos using dual-accumulated constraint warping [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, 38: 217-229.
- [18] 贾筱媛,赵超.半捷联稳定控制方案与制导信息提取方法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2474-2479
- JIA X Y, ZHAO CH. New stabilization control and guidance information extract approach with a semi-strap-down structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2474-2479. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 孙高,朱明超,刘慧,等.半捷联导引头光轴稳定性[J]. *红外与激光工程*, 2013,42(2): 489-494.
- SUN G, ZHU M C, LIU H, et al.. Optical axis stabilization of semi-strapdown seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2013,42(2): 489-494. (in Chinese)
- [21] 施建荣,施诗,张燕.论舰船装备倾斜和摇摆环境适应性及试验[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(4): 41-44.
- SHI J R, SHI S, ZHANG Y. On environmental worthiness and test of ship equipments in inclination and swing environment [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2011, 8(4): 41-44. (in Chinese)
- [22] 白丰,张小俊,张明路,等.基于分区灰度投影的稳像算法在卫星装配中的应用[J]. *中国机械工程*, 2016,27(2): 195-200.
- BAI F, ZHANG X J, ZHANG M L, et al.. Video stabilization method based on subzone gray projection in applications of satellite assembly [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016,27(2): 195-200. (in Chinese)
- [23] ZHU J J, GUO B L. Electronic image stabilization system based on global feature tracking [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008,19(2): 228-233.

作者简介:



卢晓东(1978—),男,河南鲁山人,博士,副教授,2006年于西北工业大学获得博士学位,主要从事飞行器半实物仿真、多源信息处理技术研究。E-mail: luxiaodong@nwpu.edu.cn



吴天泽(1992—),男,江苏盐城人,硕士研究生,2014年于西北工业大学获得学士学位,主要从事飞行器半实物仿真、图像处理与目标跟踪技术等方面的研究。E-mail: wutianze12@sina.com