

光束法平差应用于太阳能电池翼的摄影测量

朱宪伟 孙祥一

(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

摘要 由于太阳能电池翼的大跨度,低刚度特点,加之太空中阻尼较弱,使得电池翼极易产生低频非线性的持续振动。传统的传感器测量振动的方法很难实现。因此设计了非接触的摄影测量方案,并提出了采用光束平差法来修正目标点位置坐标,并且在某些相机参数可能发生变化的情况下,采用光束平差的方法来修正相机的外参数,大大提高了本方案的鲁棒性能。最后采用数值仿真的方法验证了光束平差法修正相机外参数的可行性。

关键词 光束平差法 太阳能电池翼 摄影测量

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)12-1537-05

Bundle Adjustment Applied in Photogrammetric Survey of Solar Panel

ZHU Xian-wei, SUN Xiang-yi

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Due to the large span, small elasticity and feebleness damp in aerospace, the solar panel easily generates non-linear vibration with low frequency. It is difficult to measure the vibration with traditional sensors. This paper gives a design to measure the vibration with photogrammetric survey, and at the same time, the method of bundle adjustment is applied to modify the position of targets. Sometimes the parameters of the camera may be changed, bundle adjustment is secondly applied to modify the changed parameters, which advances the robust of this design. At last, this paper testifies the feasibility of bundle adjustment applied in the design to modify the camera's parameters with numerical emulator.

Keywords bundle adjustment, solar panel, photogrammetric survey

1 引言

由于空间平台对电能的特殊需求以及对有效载荷的限制,决定了其太阳能电池翼或太阳能帆板的特殊结构,在总体上表现为大跨度、大挠性、低刚度、弱阻尼。这些结构特点使得空间平台在加速,改变方向等因素作用下,极易产生低频、非线性、大变形持续振动^[1-4]。这种长时间的持续振动会对空间平台造成非常恶劣的影响。因此必须对空间平台大面积太阳能电池翼的振动进行有效地控制。为了给振动控制提供参数,必须测量电池翼全场的3维振动。考虑到电池翼结构尺寸大、质量轻、固有频率低,如

果采用传统的传感器测量方法,在传感器的选择和安装以及导线的布置方面都存在较大的困难,而且采用接触测量对太阳能电池翼的结构影响较大。因此采用非接触摄影测量是一个很好的替代方案。

2 振动分析

以太阳能电池翼整体为研究对象,其一边固定在空间平台基体上。由于电池翼宽度方向的刚度比前后方向的刚度大得多。因此电池翼的运动可以分为绕电池翼转轴的摆动和绕空间平台基体的摆动。实际状态下,通常是这两种振动的合成^[1]。如图1所示。

收稿日期:2005-01-19; 改回日期:2005-04-20

第一作者简介:朱宪伟(1979~),男,2004年于国防科技大学获得硕士学位,现为国防科技大学航天与材料工程学院博士研究生。主要研究方向为基于序列图像的运动跟踪。E-mail:zhuxianwei_2008@sina.com

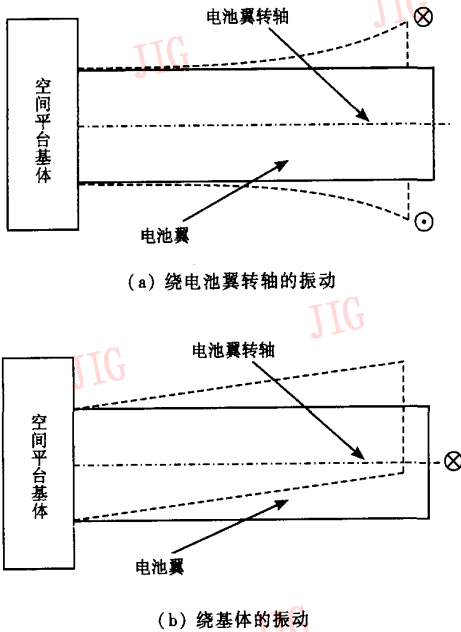


图 1 电池翼振动示意图
Fig. 1 Sketch map of vibration of solar panel

如若在电池翼的右边上制作合作标志点,那么在实际的振动过程中,标志点基本上在垂直于电池翼的平面内运动,如图 2 所示。因此采用单台相机即可实现目标点的定位。

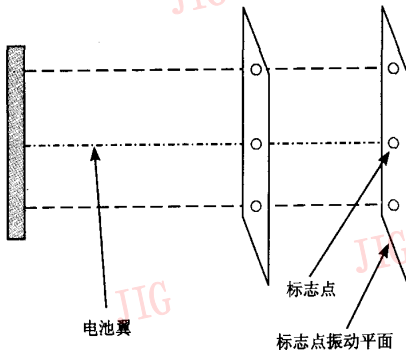


图 2 合作标志点振动平面示意图
Fig. 2 Sketch map of vibration of cooperated point

3 总体方案

在太阳能电池翼上可以正确反应帆板振动的特殊位置(如:每块帆板的联接点)放置合作标志点,在空间平台基体上安装摄像机拍摄电池翼全场,应

用数字图像处理技术对电池翼上特征点进行测量定位,由此计算出电池翼的全场位移。如图 3 所示。

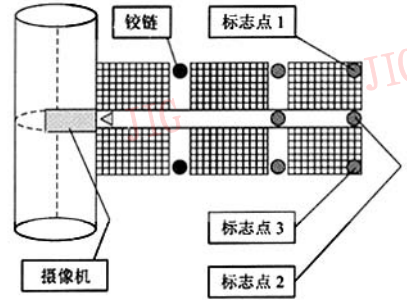


图 3 电池翼振动跟踪测量方案示意图
Fig. 3 Scheme of measurement of vibration of solar panel

4 目标点运动约束关系

虽然整个太阳能电池翼的振动是一种非线性的复杂振动合成,而且此时的电池翼整体不能作为一个刚体来研究。现在假设合作标志点 1,2,3 组成一个物体,由于电池翼宽度方向的刚度相对于长度方向比较大,因此可以近似认为标志点 1,2,3 组成了一个刚体 G ,刚体 G 实际就是一条线段。根据上面的振动分析可知,此时 G 的运动是由两方面的运动合成。一方面是以标志点 2 为质心,刚体 G 绕空间平台基体的转动;另一方面是标志点 1 和标志点 3 绕通过标志点 2 且垂直于刚体 G 的电池翼转轴的转动。显然,标志点 2 的振动很简单,即为绕空间平台基体的摆动。标志点 1 和 3 的振动由两方面合成,一方面是随着标志点 2 的运动;另一方面是绕标志点 2 的相对运动。建立世界坐标系如图 4。

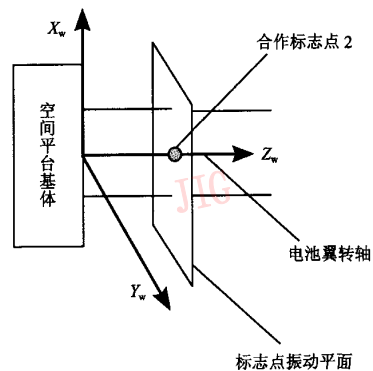


图 4 世界坐标系示意图
Fig. 4 Reference frame

此时对刚体 G 运动的描述如下,一方面是质心(标志点 2)在 Y_w 轴方向的平移,一方面是绕 Z_w 轴的滚转。前后两个时刻内,刚体 G 上对应点的坐标约束关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \\ Z_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (1)$$

其中, \mathbf{R} 为描述刚体 G 的旋转矩阵, \mathbf{T} 为描述刚体 G 的平移向量。

根据上面的分析可知,旋转矩阵中俯仰和偏航角度为 0, 平移向量中的 X 和 Z 分量为 0。假设 k 为刚体 G 的滚转角, y 为 Y 方向的平移量。可知 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 的表达形式如下:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos(k) & \sin(k) & 0 \\ -\sin(k) & \cos(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(1)、(2)、(3), 可知前后两个时刻对应点的坐标约束方程如下:

$$\begin{cases} X_{i+1} = \cos(k)X_i + \sin(k)Y_i \\ Y_{i+1} = -\sin(k)X_i + \cos(k)Y_i + y \\ Z_{i+1} = Z \end{cases} \quad (4)$$

5 光束平差法获得目标点空间坐标

光束法平差是解析摄影测量中一种严密有效的方法^[5-7]。其约束方程为摄影测量中最基本的共线方程^[8]

$$\begin{cases} \frac{u_{i+1} - u_0}{f_u} = \frac{r_{00}X_{i+1} + r_{01}Y_{i+1} + r_{02}Z_{i+1} + T_x}{r_{20}X_{i+1} + r_{21}Y_{i+1} + r_{22}Z_{i+1} + T_z} \\ \frac{v_i - v_0}{f_v} = \frac{r_{10}X_{i+1} + r_{11}Y_{i+1} + r_{12}Z_{i+1} + T_y}{r_{20}X_{i+1} + r_{21}Y_{i+1} + r_{22}Z_{i+1} + T_z} \end{cases} \quad (5)$$

其中, u_0, v_0, f_u, f_v 为摄像机的 4 个内参数, $r_{00} \sim r_{22}$, T_x, T_y, T_z 是摄像机的外参数。

将共线方程改写如下

$$\begin{cases} \Phi_u = f_u(r_{00}X_{i+1} + r_{01}Y_{i+1} + r_{02}Z_{i+1} + T_x) - \\ (u_{i+1} - u_0)(r_{20}X_{i+1} + r_{21}Y_{i+1} + r_{22}Z_{i+1} + T_z) = 0 \\ \Phi_v = f_v(r_{10}X_{i+1} + r_{11}Y_{i+1} + r_{12}Z_{i+1} + T_y) - \\ (v_{i+1} - v_0)(r_{20}X_{i+1} + r_{21}Y_{i+1} + r_{22}Z_{i+1} + T_z) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)左边进行一阶泰勒展开, 其中摄像机

的内外参数为已知量, 固定不变。

$$\begin{cases} \Phi_u = \Phi_u^0 + \frac{\partial \Phi_u}{\partial X} dX + \frac{\partial \Phi_u}{\partial Y} dY + \frac{\partial \Phi_u}{\partial Z} dZ = 0 \\ \Phi_v = \Phi_v^0 + \frac{\partial \Phi_v}{\partial X} dX + \frac{\partial \Phi_v}{\partial Y} dY + \frac{\partial \Phi_v}{\partial Z} dZ = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} \Phi_u^0 = f_u(r_{00}X_i + r_{01}Y_i + r_{02}Z_i + T_x) - \\ (u_{i+1} - u_0)(r_{20}X_i + r_{21}Y_i + r_{22}Z_i + T_z) \\ \Phi_v^0 = f_v(r_{10}X_i + r_{11}Y_i + r_{12}Z_i + T_y) - \\ (v_{i+1} - v_0)(r_{20}X_i + r_{21}Y_i + r_{22}Z_i + T_z) \end{cases} \quad (8)$$

根据式(4)可知

$$\begin{cases} dX = -\sin(k)X_i dk + \cos(k)Y_i dk \\ dY = -\cos(k)X_i dk - \sin(k)Y_i dk + dy \\ dZ = 0 \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入式(7), 再依次将 3 个合作标志点的图像坐标, 以及上一时刻合作标志点的空间坐标代入式(7), 其中 k 和 y 的初始值设为 0, 得到 6 个关于 dk 和 dy 的线性方程组, 求这 6 个线性方程组的最小二乘解, 得到 dk 和 dy , 首先根据 dk 修正滚转角 k , 根据 dy 修正 y 。然后将 dk 和 dy 以及修正之后的 k 代入式(9), 求出 dX, dY 的值, 从而求出当前目标的空间坐标。将求得的空间坐标再次代入方程式(7), 求解 dk 和 dy , 如此循环, 直至结果稳定, 便可以得到精度较高的标志点空间坐标。

6 光束平差法修正相机外参数

虽然相机的内外参数在地面可以非常精确地标定好, 但当空间平台在轨运行时, 相机的外参数不可抵制地会发生变化。而且在某种情况下, 空间平台会根据太阳的角度调整电池翼的姿态。将电池翼围绕电池翼转轴转动, 此时世界坐标系是随着电池翼的旋转而旋转, 因此相机的外参数自然也就发生变化。由此可见修正相机的外参数是必须的。

实际情况下, 当空间平台围绕电池翼转轴旋转电池翼时, 世界坐标系旋转, 导致了相机外参数中的 3 个角度, 即旁向倾角、航向倾角和旋角发生变化。虽然可以通过世界坐标系旋转的角度来求取当前的相机外参数, 但对于高精度的测量任务来说, 这是不够的。故拟采用光束平差的方法来修正相机的 3 个角度外参数。虽然世界坐标系发生了旋转, 但世界坐标系的原点在相机坐标系中是不变的, 可以认为

相机的 3 个平移向量参数没有发生变化。

(5)), 此时:

此时的平差约束方程仍然为共线方程(式

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) \cos(\varphi) & \sin(\kappa) \cos(\omega) - \cos(\kappa) \sin(\varphi) \sin(\omega) & \sin(\kappa) \sin(\omega) + \cos(\kappa) \sin(\varphi) \cos(\omega) \\ -\sin(\kappa) \cos(\varphi) & \cos(\kappa) \cos(\omega) + \sin(\kappa) \sin(\varphi) \sin(\omega) & \cos(\kappa) \sin(\omega) - \sin(\kappa) \sin(\varphi) \cos(\omega) \\ -\sin(\varphi) & -\cos(\varphi) \sin(\omega) & \cos(\varphi) \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, κ, φ, ω 为摄像机坐标系和世界坐标系的 3 个欧拉角。

将式(10)中 R 的各分量依次代入式(6), 再对式(6)进行一阶泰勒展开, 此时变量为 κ, φ, ω 。

$$\begin{cases} \Phi_u = \Phi_u^0 + \frac{\partial \Phi_u}{\partial \kappa} d\kappa + \frac{\partial \Phi_u}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial \Phi_u}{\partial \varphi} d\varphi = 0 \\ \Phi_v = \Phi_v^0 + \frac{\partial \Phi_v}{\partial \kappa} d\kappa + \frac{\partial \Phi_v}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial \Phi_v}{\partial \varphi} d\varphi = 0 \end{cases} \quad (11)$$

将各个合作标志点的图像坐标与采用平差法修正后的空间坐标代入式(11)得出关于 $d\kappa, d\omega$ 和 $d\varphi$ 的超线性方程, 同样通过求最小二乘解的方法来求取变量值, 根据结果修正 κ, φ, ω , 再次代入式(11), 如此循环, 直至结果稳定。

在上面的修正过程中, 为了修正相机 3 个角度外参数的误差, 必须代入目标的真实空间坐标值, 然而实际情况中真实的空间坐标值又是未知的, 需要利用相机的参数来求取。这二者实际上是耦合在一起了。因此若利用光束平差来修正相机外参数, 同时也必须使用光束平差来修正目标点的空间坐标。因为随着相机角度误差的不断修正, 最开始根据图像坐标计算的空间坐标也变得是有误差的。所以修正的过程通常为用光束平差法获得目标点的空间坐标, 再根据求得的空间坐标修正相机的角度外参数, 再根据新修正的相机外参数去修正目标的空间坐标, 如此循环, 直至结果稳定。

7 修正结果分析

为了检验光束平差法修正相机外参数以及标志点空间点坐标的效果, 进行了两组数值仿真试验。表 1 是在相机外参数发生扰动的情况下, 采用光束平差后的结果与实际真值的对照。

表 2 和表 3 则是在当前相机外参数已发生改变的情形下, 某个时刻直接解算的目标点位置坐标与经过光束平差法修正之后的结果的对照。

表 4 是在相机外参数发生扰动的情况下, 采用光束平差后的结果与实际真值的对照。

表 1 相机角度外参数修正结果

Tab.1 Modified angle parameters of camera

地面标值	太空实际值	平差修正值
$\kappa = 0.05$	$\kappa = 0.000\ 000$	$\kappa = 0.025\ 733$
$\varphi = 0.02$	$\varphi = 0.000\ 000$	$\varphi = -0.002\ 370$
$\omega = 0.109\ 669$	$\omega = 0.099\ 669$	$\omega = 0.109\ 744$

表 2 目标点空间位置对照

Tab.2 Comparison of position of target

	真值	线性解算值	平差修正值
目标 1	$x = 0.298\ 501$	$x = 0.241\ 117$	$x = 0.294\ 798$
	$y = 0.029\ 950$	$y = -0.022\ 523$	$y = 0.015\ 166$
目标 2	$x = 0.000\ 000$	$x = -0.054\ 733$	$x = -0.000\ 484$
	$y = 0.000\ 000$	$y = 0.022\ 287$	$y = -0.022\ 233$
目标 3	$x = -0.298\ 501$	$x = -0.352\ 698$	$x = -0.295\ 766$
	$y = -0.029\ 950$	$y = -0.067\ 417$	$y = -0.059\ 632$

表 3 目标点空间位置对照

Tab.3 Comparison of position of target

	真值	线性解算值	平差修正值
目标 1	$x = 0.497\ 502$	$x = 0.441\ 544$	$x = 0.494\ 953$
	$y = 0.049\ 917$	$y = 0.052\ 436$	$y = 0.047\ 341$
目标 2	$x = 0.000\ 000$	$x = -0.054\ 733$	$x = -0.000\ 168$
	$y = 0.000\ 000$	$y = -0.022\ 287$	$y = -0.022\ 340$
目标 3	$x = -0.497\ 502$	$x = -0.552\ 527$	$x = -0.495\ 289$
	$y = -0.049\ 917$	$y = -0.097\ 683$	$y = -0.092\ 021$

表 4 相机角度外参数修正结果

Tab.4 Modified angle parameters of camera

地面标值	太空实际值	平差修正值
$\kappa = 0.060\ 000$	$\kappa = 0.000\ 000$	$\kappa = 0.048\ 922$
$\varphi = 0.010\ 000$	$\varphi = 0.000\ 000$	$\varphi = -0.004\ 117$
$\omega = 0.119\ 669$	$\omega = 0.099\ 669$	$\omega = 0.113\ 750$

表 5 和表 6 则是在当前相机外参数已发生改变的情形下, 某个时刻直接解算的目标点位置坐标与

表 5 目标点空间位置对照

Tab.5 Comparison of position of target

	真值	线性解算值	平差修正值
目标 1	$x = 0.497\ 502$	$x = 0.461\ 141$	$x = 0.494\ 043$
	$y = 0.049\ 917$	$y = 0.035\ 483$	$y = 0.043\ 021$
目标 2	$x = 0.000\ 000$	$x = -0.035\ 024$	$x = -0.000\ 419$
	$y = 0.000\ 000$	$y = -0.044\ 447$	$y = -0.031\ 190$
目标 3	$x = -0.497\ 502$	$x = -0.531\ 071$	$x = -0.494\ 881$
	$y = -0.049\ 917$	$y = -0.124\ 803$	$y = -0.105\ 401$

表 6 目标点空间位置对照

Tab.6 Comparison of position of target

	真值	线性解算值	平差修正值
目标 1	$x = 0.199\ 001$	$x = 0.166\ 599$	$x = 0.196\ 536$
	$y = 0.019\ 967$	$y = -0.012\ 232$	$y = -0.014\ 887$
目标 2	$x = 0.000\ 000$	$x = -0.035\ 024$	$x = -0.002\ 337$
	$y = 0.000\ 000$	$y = -0.044\ 447$	$y = -0.036\ 093$
目标 3	$x = -0.199\ 001$	$x = -0.232\ 929$	$x = -0.201\ 209$
	$y = -0.019\ 967$	$y = -0.076\ 506$	$y = -0.057\ 298$

经过光束平差法修正之后结果的对照。

可以看出直接线性解算对于相机的外参数扰动不能进行修正。导致后面求取的目标点空间坐标误差较大。而光束平差法则可以较好地修正相机外参数产生的扰动,对标志点空间坐标的计算精度也有了较大程度的提高。但仍然可以看出对目标点 y 方向的计算精度虽然比直接线性解算有了提高,但提高的幅度不是很大。这是因为相机外参数的扰动和标志点的运动产生了相关性,而光束平差的解算方法只能在二者之间找到一个平衡点,若要正确地得到相机的外参数扰动量以及标志点的空间位置,就需要添加其他约束条件。

8 结 论

本文在设计了太阳能电池翼的振动非接触摄影测量方案的基础上,提出了采用光束平差的算法来修正目标点的位置,以及可能发生变化的相机外参

数,数值仿真的结果证明,采用光束平差法相对于不采用光束平差的直接线性解算方法,精度有了较大提高,并且可以修正可能发生变化的相机外参数,从而大大提高了该摄影测量振动方案的鲁棒性。

如果知道了空间平台调整太阳能电池翼的方案之后,就可以知道相机光轴的 3 个角度外参数的变化规律,即 3 个角度变化量的约束关系,则光束平差修正相机外参数的方法具有了更强的针对性,可以较大程度提高算法的处理精度。

参考文献 (References)

- 1 WANG Li-bin. Research of measurement methods of solar cell and solar panel's mechanical characteristic [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. [王荔斌. 太阳能电池片及电池帆板力学性能测量方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.]
- 2 ZHOU Zhou, LU Qiu-hai, REN Ge-xue, et al. On-orbit Identification and vibration control for solar arrays with low and close frequencies [J]. Engineering Mechanics, 2003, 21(3): 85 ~ 86. [周舟, 陆秋海, 任革学等. 低密频太阳能帆板动力学参数在轨辨识和振动控制 [J]. 工程力学, 2003, 21(3): 85 ~ 86.]
- 3 Nurre G S, Ryan S, Scofield H N, et al. Dynamics and control of large space structures [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1984, 7(5): 514 ~ 526.
- 4 Cochran J E, No T S Jr. New developments in dynamics and control of flexible structures [A]. In: International Congress on Recent Developments in Air-and-Structures-Borne Sound and Vibration [C], USA, 1990: 1 ~ 3.
- 5 HUANG Gui-ping, LI Guang-yun. Study of system orientation and coordinate calculation of IMS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(3): 256 ~ 257. [黄桂平, 李广云. 电子经纬仪工业测量系统定向及坐标解算算法研究 [J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 256 ~ 257.]
- 6 ZHOU Zheng-rong, ZENG Zhuo-qiao. Bundle adjustment applied in data processing of IMS [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2000, (2): 53 ~ 54. [邹峥嵘, 曾卓乔. 电子经纬仪工业测量系统的光束平差法数据处理 [J]. 工程勘察, 2000, (2): 53 ~ 54.]
- 7 Ray M, Obidow ski, Michael A. Chapman. Processing theodolite observations with a photogrammetric bundle adjustment: an industrial survey application [J]. GEOMATICA, 1993, (3): 1 ~ 3.
- 8 YU Qi-feng, LU Hong-wei, LIU Xiao-lin. Exact Measurement and Motive Measurement Based on Image [M]. Beijing: Science Press, 2002: 96 ~ 97. [于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 96 ~ 97.]