

文章编号: 1672-9897(2011)03-0056-05

振动环境中相机位置坐标与姿态角解算的实验研究

张征宇^{1,2}, 罗川², 孙岩¹, 周桂宇¹, 黄诗捷²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000; 2. 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘要:我国高速暂冲式风洞洞体振动较大,故振动环境中的相机位置坐标与姿态角解算技术对模型变形视频测量(VMD)至关重要。为此,建立振动模拟实验平台,研究相机位置坐标与姿态角求解方法,结果表明:基于蒙特-卡洛法的相机位置坐标与姿态角求解法最适于振动环境中 VMD 测量的相机位置坐标与姿态角求解。

关键词:模型变形测量;相机位置坐标与姿态角;振动环境;蒙特-卡洛法;试验平台

中图分类号:P234

文献标识码:A

Experimental investigation on exterior orientation in vibration environment

ZHANG Zheng-yu^{1,2}, LUO Chuan², SUN Yan¹, ZHOU Gui-yu¹, HUANG Shi-jie²

(1. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China; 2. Information Engineering College, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: The calculation of exterior orientation elements is essential to videogrammetric model deformation(VMD) with multi-camera, because intermittent high-speed wind tunnel tests produce stronger vibrations. Therefore, the vibration simulating platform was established to investigate the performances of several different exterior orientating methods for same images. The results have demonstrated that the exterior orientating methods based on Monte-Carlo solution is most suitable for the vibration environment of VMD.

Key words: model deformation measurement; exterior orientation; vibration environment; Monte-Carlo solution; experimental platform

0 引言

风洞试验是飞行器气动布局设计不可缺少的环节。为了提高试验数据的精、准度,需获取模型变形测量数据。国外有的风洞(如欧洲的 DNW、NLR)即使在模型变形量未超过试验规范要求时,依然测量模型变形,修正试验数据以提高试验数据精度^[1-3]。

美国从 20 世纪 80 年代开始研究模型变形视频测量(VMD)技术^[1-4],现已应用于各种低速、高速、超高速风洞模型的运动轨迹、变形和姿态角的测量^[3-4]。

国内高速暂冲式风洞振动较欧美连续式风洞大,导致 VMD 相机的位置与姿态随着洞体振动而动态变化大。因此,从描述相机、像点、模型待测点三点数学关系的共线方程可知:从 VMD 的相片信息中准确确定相机位置与姿态角,对于振动环境中实现 VMD 测量至关重要^[3-4]。

目前,相机位置坐标与姿态角求解主要有 3 种方法:基于直接线性变换(DLT)的解法、角锥法、光束平差解法^[5-7]。其中,DLT 因至少需要 6 个非共面控点,其实用性受到限制;角锥法主要用于为光束平差解法提供迭代计算的初值,计算精度没有光束平差解法高。

为此,通过搭建的实验平台,研究角锥法、光束平差解法和空气动力学国家重点实验室建立的基于蒙特-卡洛法^[8]的相机位置坐标与姿态角求解法,比较其在风洞试验振动模拟环境中的解算效果,以建立适应我国风洞模型变形测量的相机位置坐标与姿态角解算方法。

1 风洞试验的振动模拟实验平台设计

实验目的:在风洞试验的振动环境下,研究不同的相机位置坐标与姿态角解算方法的效果与稳定性,

收稿日期: 2010-07-22; 修订日期: 2011-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(51075385)资助项目; 国家“973”计划课题(2009CB723802)项目; 四川省科技创新苗子工程(10zd3109)

确定最适于 VMD 采用的相机位置坐标与姿态角解算技术。

实验平台采用的硬件如下: labworks® 的激振器 2 个(包括 ET-126B-4 规格的执行器 2 个, Pa-141 规格的功率放大器 2 个)、DALSA® 相机 2 个(分辨率为 400 万像素, 成像幅面为 17.4mm×12.8mm)、图像采集电脑 2 台、35mm 定焦镜头 2 个、目标靶面一个以及编码标记点, 具体参见图 1。



图1 风洞试验振动环境模拟实验平台

Fig.1 Experimental platform for simulating wind tunnel vibration

2.4m 跨声速风洞试验时的低频振动峰值频率在 7Hz 左右, 因此, 首先进行给定振幅为 8mm、频率为 7Hz 的正弦振动环境实验, 再进行振动频率不超过 10Hz 的随机振动环境实验, 相机曝光时间为 5ms, 以模拟双相机在风洞试验中的测量环境。

2 实验研究的方案

2.1 测量原理

描述相机、目标靶面上编码点及其像点三者关系的共线方程表达式如下:

$$\begin{cases} x-x_0 = -f \frac{a_1(X-X_s) + b_1(Y-Y_s) + c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s) + b_3(Y-Y_s) + c_3(Z-Z_s)} \\ y-y_0 = -f \frac{a_2(X-X_s) + b_2(Y-Y_s) + c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s) + b_3(Y-Y_s) + c_3(Z-Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中 (x_0, y_0) 分别为相机像平面中心, f 为相机焦距, (X_s, Y_s, Z_s) 分别为相机在地面坐标系下的位置坐标, $(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3)$ 为相机姿态角 (φ, ω, k) 所组成的旋转矩阵 R 中的 9 个方向余弦, (x, y) 与 (X, Y, Z) 分别为目标靶面上编码点的像平面坐标与地面坐标系下的坐标。

因此, 当已知 3 个以上的目标靶面上编码点坐标, 即可通过式(1)解得相机位置与姿态角参数。

2.2 实验方案

(1) 用三个控制点的角锥法^[5-7]求得初值, 分别代入基于蒙特-卡洛法的相机位置坐标与姿态角求解

法和光束平差解法^[5-7], 其中基于蒙特-卡洛法的相机位置坐标与姿态角求解法, 是指采用解非线性方程的蒙特-卡洛法^[8], 求解式(1)得到相机位置与姿态角参数;

(2) 用未振动时相机的安装位置与姿态角作初值, 分别代入基于蒙特-卡洛法的相机位置坐标与姿态角求解法和光束平差解法;

研究采用传统的 6 参数畸变^[9-10]模型进行相机畸变校正, 采用的相对误差计算式为:

$$\epsilon = \frac{\Delta l_{\max}}{R} \times 100\% \quad (2)$$

式中 ϵ 为相对误差, Δl_{\max} 为像点残差(像点真实值与计算值之差)的最大值, R 为相机成像幅面的对角线长度。

3 实验数据与结果分析

正弦激振下左相机像片的相机位置坐标与姿态角解算结果的误差如图 2 所示, 随机振动下右相机像片的相机位置坐标与姿态角解算结果数据如表 1 所示, 因激振频率设定值低于 10Hz, 故表 1 与图 2 中仅列出能够描述一激振周期的 10 张照片, 表中 A-D 的具体含义如下:

(A) 表示三控制点的角锥法求解结果;

(B) 表示将角锥法结果作为初值代入光束平差算法解得的数据;

(C) 表示将角锥法结果作为初值代入基于蒙特-卡洛法的相机位置坐标与姿态角求解法解算的数据;

(D) 表示将相机未振动时的位置参数作为初值代入光束平差算法所得的数据, 其中左相机坐标为 $(-407.3525, -165.1383, 1873.696)$, 姿态角为 $(0.2150157, 0.1209951, -0.130937)$; 右相机坐标为 $(-289.3503, 80.00066, 1984.518)$, 姿态角为 $(0.163873, -0.05584956, -0.1130597)$ 。

图 2 与表 1 中的测量实验结果表明:

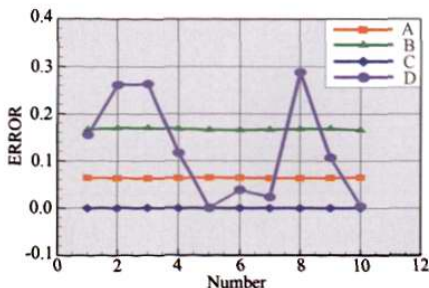


图2 正弦振动下左相机的位置与姿态参数解算误差
Fig.2 Errors of left camera orientation in sine vibration

表 1 随机振动下右相机的位置与姿态参数解算数据
Tabel 1 Exterior orientation of right camera in random vibration

序号	方法	X_i/mm	Y_i/mm	Z_i/mm	φ/arc	ω/arc	k/arc	相对误差/%
1	A	-204.5976	197.385	1348.394	0.1754928	-0.1666186	-0.105522	5.75
	B	-277.6837	142.7851	1992.175	0.07244244	0.2947274	-0.1112709	63.72
	C	-289.3972	83.33838	1983.891	0.1636079	-0.05816195	-0.1127359	2.21E-06
	D	-289.3761	83.34153	1983.904	0.1463655	-0.2157468	-0.09191942	26.671
2	A	-297.2517	-247.2862	1957.814	0.1703978	0.1066208	-0.1315949	0.26
	B	-235.4425	-26.33354	2014.581	0.003712505	-0.4495811	-0.09140602	83.18
	C	-291.9608	84.08558	1983.381	0.1652265	-0.05841117	-0.1127839	2.21E-06
	D	-291.9582	84.19474	1983.389	0.2765082	-0.2634453	-0.07873414	33.380
3	A	-205.5598	199.5414	1347.811	0.1764617	-0.1677044	-0.1053923	5.75
	B	-279.2491	146.9993	1991.375	0.1097464	0.1313529	-0.1136628	35.39
	C	-290.1942	89.13271	1983.507	0.1642282	-0.06071023	-0.1124478	3.31E-06
	D	-290.1134	89.26405	1983.554	0.1692545	-0.1346107	-0.1029428	12.110
4	A	-205.9431	198.5594	1347.903	0.1761073	-0.167289	-0.1054354	5.72
	B	-279.9361	145.2933	1991.437	0.1121432	0.135034	-0.1137857	35.95
	C	-291.3314	87.89272	1983.335	0.1643534	-0.06029878	-0.1124451	1.10E-06
	D	-291.2652	88.02188	1983.373	0.198647	-0.3393415	-0.06846162	47.887
5	A	-202.9927	194.4573	1349.450	0.1744742	-0.1641263	-0.1060228	5.77
	B	-275.6238	137.5844	1993.377	0.1092909	0.1417016	-0.1151603	36.39
	C	-288.1422	76.7957	1984.692	0.1630399	-0.05465721	-0.1134499	3.86E-06
	D	-288.1432	76.81625	1984.693	0.1506127	-0.03692111	-0.1191699	2.709
6	A	-206.6712	200.0766	1347.528	0.1772047	-0.1687584	-0.1055088	5.75
	B	-280.8395	147.686	1991.079	0.1280005	0.04995956	-0.1130675	22.18
	C	-291.8864	90.29273	1983.126	0.165047	-0.06175901	-0.1125278	4.97E-06
	D	-291.7879	90.59151	1983.188	0.1661147	-0.0679597	-0.1119632	0.968
7	A	-298.1781	-252.1387	1956.381	0.1706073	0.1092129	-0.1317888	0.26
	B	-232.1726	-31.66504	2015.148	-0.00703261	-0.4465937	-0.0929981	83.27
	C	-289.164	90.91476	1983.653	0.1635087	-0.06176275	-0.1123049	4.42E-06
	D	—	—	—	—	—	—	发散
8	A	-207.09	200.3213	1347.351	0.1773648	-0.1683058	-0.1053053	5.73
	B	-281.8852	148.7202	1990.631	0.1127062	0.1300352	-0.1134291	35.35
	C	-292.7365	92.82841	1982.815	0.1653901	-0.06257533	-0.1121918	4.42E-06
	D	—	—	—	—	—	—	发散
9	A	-295.969	-260.2028	1955.988	0.1699335	0.1132789	-0.1323544	0.28
	B	-229.5002	-33.57056	2016.857	-0.00940469	-0.4576207	-0.09305328	85.94
	C	-290.0203	93.61159	1983.654	0.1642237	-0.06289539	-0.112331	5.52E-06
	D	-289.8429	93.84518	1983.755	0.1712109	-0.2204795	-0.09533387	26.217
10	A	-204.3842	196.2314	1348.929	0.1754009	-0.1657384	-0.1056893	5.76
	B	-277.6363	140.7438	1992.784	0.1105047	0.1368201	-0.1144885	35.87
	C	-289.7396	81.21669	1984.299	0.1638089	-0.05708918	-0.1129648	4.42E-06
	D	-289.7329	81.21694	1984.303	0.1636025	-0.06081002	-0.1126806	0.610

表 2 使用蒙特-卡洛解算结果为初值的光束法解算数据表(左相机正弦振动)

Tabel 2 Exterior orientation using bundle method with Monte- Carlo solution input (left camera in sine vibration)

序号	X_i/mm	Y_i/mm	Z_i/mm	φ/arc	ω/arc	k/arc	相对误差/%
1	-406.877	-165.4534	1874.432	0.2142949	0.1224785	-0.1316546	9.94E-06
2	-406.5713	-164.2986	1875.549	0.2131841	0.1251218	-0.1318524	7.73E-06
3	-406.0553	-164.6937	1875.454	0.2128494	0.1253034	-0.1317465	2.54E-04
4	-405.3152	-165.4241	1875.002	0.2132285	0.1229673	-0.1310732	7.25E-04
5	-407.6441	-165.1785	1873.619	0.2151717	0.1210113	-0.1309609	3.48E-04
6	-407.0391	-164.7938	1874.676	0.2143487	0.1221056	-0.1315932	3.39E-03
7	-406.7845	-163.7051	1875.659	0.2132829	0.1248194	-0.1317984	9.32E-04
8	-406.695	-165.7099	1875.184	0.2132051	0.12583	-0.1318797	7.73E-06
9	-406.1946	-165.4016	1874.726	0.2136942	0.122943	-0.1310312	2.70E-03
10	-407.7592	-165.329	1873.656	0.2152293	0.1210842	-0.1309712	3.31E-06

(1) 角锥法在两种振动状态下均能得到结果,但其相对误差在 6% 左右。

(2) 基于蒙特-卡洛法的相机位置坐标与姿态角求解法在以角锥法结果和相机初始位置为初值时均能收敛至正确的相机位置坐标与姿态角,实验中最大的误差为 $6.62\text{E-}8$,求解稳定性最好。

(3) 光束平差法在以角锥法所得结果为初值下收敛效果较差,由图 2 和表 1 可以看出,由于角锥法初值相对误差较大,代入光束平差法难以收敛至正确解;将相机初始位置与姿态值代入光束平差法,仅在某些时刻能收敛于正确解,如图 2 序号 1(此时未振动)、序号 6 和序号 11,表 1 序号 1(此时未振动)、序号 11。

光束平差法对初值精度依赖较高的原因是:其采用数值计算理论中解非线性方程组的 Newton 法求解,即通过泰勒展开取一次项线性化方程,然后求解改正数逐步迭代求解,当在真实解附近泰勒展开时,因二次及高阶小项较小,线性化时截断误差较小,此时能迭代收敛至正确解;若初始值偏离真实值太远,舍去二次及高阶小项后,线性化时截断误差较大,导致光束平差法不收敛或收敛至局部最优解,这与数值计算方法的基本理论吻合:“当初值不够准确时,Newton 方法往往得不到正确解”。

角锥体法也采用数值计算理论中解非线性方程组的 Newton 法求解,当相机位置坐标的初值不准确时,同样也导致迭代不收敛或收敛至局部最优解,导致其相对误差较大(在 6% 左右)。

为验证以上分析,如表 2 所示,将蒙特-卡洛法的相机位置坐标与姿态角求解结果代入光束平差算法,发现光束平差算法就能收敛到正确解(最大相对误差 $3.39\text{E-}5$);另一方面也验证了基于蒙特-卡洛法的相机位置坐标与姿态角求解法的正确性。

如图 3 所示,基于 20 张时序照片(即 20 次时序测量)的相机与支杆一起振动轨迹反映了正弦激励规律,其振动频率在 7Hz 左右,由于支杆刚性的影响(如图 1 所示本次实验采用相机支杆较长较细),所以在 x 轴与 y 轴方向有晃动,由于设定振动在 z 轴方向,故 z 轴方向受支杆刚性影响较小,所以能明显看出其周期性,而在 x 轴与 y 轴方向相机位移的周期性不明显,但是 x 轴最大位移与 y 轴方向基本相同;如图 4 所示,在 7Hz 的正弦激励下,相机姿态角的变化基本符合正弦变化规律。如图 5 与 6 所示,相机与支杆一起振动轨迹无规律,其轨迹响应符合设定的随机激励方式。上述分析表明基于蒙特-卡洛法的相机

位置坐标与姿态角求解法结果与振动设定的激励方式相符。

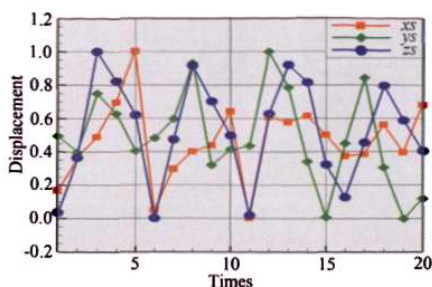


图 3 正弦激励下左相机位置的当量位移图
Fig. 3 Normalized displacements of left camera in sine excitation

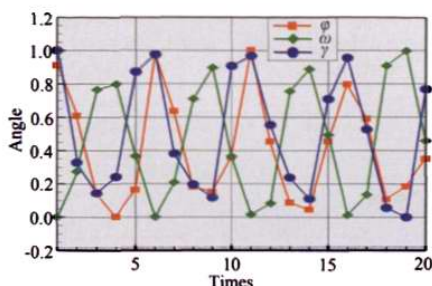


图 4 正弦激励下左相机姿态角的当量角位移图
Fig. 4 Normalized angular displacements of left camera in sine excitation

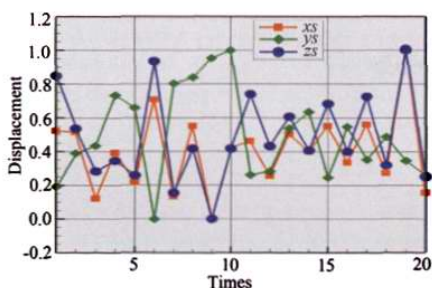


图 5 随机激励下左相机位置的当量位移图
Fig. 5 Normalized displacements of left camera in random excitation

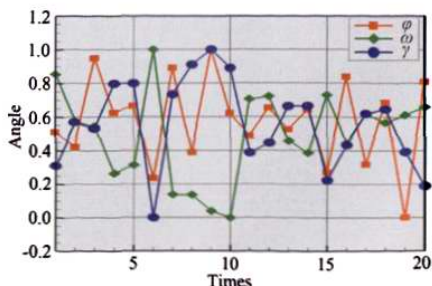


图 6 随机激励下左相机姿态角的当量角位移图
Fig. 6 Normalized angular displacements of left camera in random excitation

(下转第 65 页)

参考文献:

- [1] WALSH J T. A report of acoustic transit time accuracy field work performed in North America[C]. 5th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements, Lucerne, 2004.
- [2] Measurement of gas by multipath ultrasonic meters[R]. American Gas Association. A. G. A. No.9, 1998.
- [3] 熊光德. 新型天然气超声波流量计技术[J]. 天然气与石油, 2002, 2(20): 57-61.
- [4] 杉下钟尾, 覃在清. 提高多声道超声波流量计精度的修正方法[J]. 国外大电机, 1994, (1): 95-100.
- [5] VOSE A. Analyse und fehleroptimierung der mehrpfadigen akustischen durchflussmessung in asserkraftanlagen[D]. Zürich: Diss. ETH, 1999: 92-123.
- [6] VOSE A, BRUTTIN CH, PRÉNAT J E, et al. Improving acoustic flow measurement [J]. International Water Power and Dam Construction, 1996, 48(4): 30-34.
- [7] STAUBLI T, TRESCH T, GRUBER P. A discussion of uncertainties and of potential for improvement of the acoustic transit time method[C]. Hydro, Porto, 2004.

- [8] ASME PTC 18-2002, Hydraulic turbines and pump-turbines[S]. American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [9] PRESS W H, Teukolsky S A. Numerical recipes in C [M]. Cambridge University Press, 1992: 147-156.
- [10] IEC41-1991. International code for the field acceptance test of hydraulic turbines [S]. International Electrotechnical Commission, 1991.
- [11] BARTON N A, BROWN G J. Velocity distribution effects on ultrasonic flowmeters-Part 2 Determination by computational and experimental methods[R]. Report No. 358/99, National Engineering Laboratory, 1999.
- [12] 张也影. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 236-272.

作者简介:



张朋勇(1987-)男, 河南新乡人, 硕士研究生。研究方向: 超声流量计数值仿真。通信地址: 天津市南开区卫津路 92 号天津大学电气与自动化工程学院(300072)。联系电话: 13752484942, E-mail: zhangpengyong01 @ 163.com

通讯作者: 郑丹丹, 天津大学电气与自动化工程学院讲师, 联系电话: 13502194892, E-mail: zhengdandan @ tju.edu.cn

(上接第 59 页)

4 结 论

建立了高速风洞的振动模拟地面实验平台, 对比 4 种相机位置与姿态角求解效果, 发现:

①光束平差法对初始值精度依赖性较强, 难以在振动环境的 VMD 测量中推广;

②基于蒙特-卡洛法的相机位置与姿态角求解法对初始值精度依赖性最弱, 求解稳定性最好, 在振动环境中初始值相对误差达到 6.387%, 其求解结果的相对误差仍然保持在 6.62×10^{-8} 以内, 最适于振动环境中 VMD 测量的相机位置与姿态角求解。

致谢: 该研究得到中国空气动力研究与发展中心高速所的大力支持, 在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] LE SANT Y, MIGNOSI A, DELÉGLISE B. Model deformation measurement (MDM) at Onera[R]. AIAA 2007-3817.
- [2] LIU T, BURNER A W, PAPP A R. Photogrammetric techniques for aerospace applications[R]. AIAA 2008.
- [3] DANNY A BARROWS. Videogrammetric model deformation measurement technique for wind tunnel applications [R]. AIAA 2007-1163.

- [4] LE Sant Y, MERIENNE M C, LYONNET M. A model deformation measurement method and its application on PSP measurements[R]. AIAA 2004-2192.
- [5] 冯文灏. 近景摄影测量-物体外形与运动状态的摄影法测定[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [6] 黄桂平, 叶声华, 李广云. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应[D]. [博士学位论文]. 天津大学, 2005.
- [7] 郑继贵, 叶声华. 基于近景数字摄影的坐标精密测量关键技术研究[J]. 计量学报, 2005(7): 207-211.
- [8] 金 畅, 夏尊铨. 蒙特-卡洛方法中随机数发生器和随机抽样方法的研究[D]. [硕士学位论文]. 大连理工大学, 2005(12): 1-5.
- [9] 武汉大学测绘学院. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [10] 梁 晋, 肖振中, 唐正宗, 等. 大型飞机风洞变形测量的相机标定研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, (43): 55-59.

作者简介:



张征宇(1971-), 男, 河南信阳人, 副研究员, 研究方向: 风洞模型位移光学测量、结构/气动力耦合优化。通讯地址: 四川绵阳 211 信箱空气动力学国家重点实验室(621000)。E-mail: zzyxjd@163.com