

基于三维模型的机载武器运动参数精确测量方法

胡丙华 晏晖 何红丽

Accurate measurement method for motion parameters of airborne weapons based on 3D model

HU Binghua, YAN Hui, HE Hongli

引用本文:

胡丙华, 晏晖, 何红丽. 基于三维模型的机载武器运动参数精确测量方法[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 663–669. DOI: 10.5768/JAO202546.0303001

HU Binghua, YAN Hui, HE Hongli. Accurate measurement method for motion parameters of airborne weapons based on 3D model[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 663–669. DOI: 10.5768/JAO202546.0303001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0303001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机载激光武器试验评估技术研究

Research on test and evaluation technology of airborne laser weapon

应用光学. 2024, 45(3): 507–513 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310003>

基于高斯混合模型的液体电磁参数太赫兹测量方法

Terahertz measurement method of liquid electromagnetic parameters based on Gaussian mixture model

应用光学. 2021, 42(6): 982–988 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601006>

基于图像的空中加油软管平衡拖曳位置测量方法

Image-based method for measuring balance towing position of aerial refueling hose

应用光学. 2021, 42(4): 723–727 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403005>

融合深度学习与外极线约束的三维人体位姿测量方法

3-D human pose measurement method based on deep learning and epipolar constraint

应用光学. 2020, 41(6): 1166–1173 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0601005>

间接飞行时间相机性能参数的测量方法与验证

Measurement method and verification of performance parameters of indirect time-of-flight depth camera

应用光学. 2025, 46(2): 395–403 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0203005>

基于激光雷达和计算流体力学模型的飞机起降通道风场测量

Aircraft takeoff and landing path wind field measurement based on lidar and CFD model

应用光学. 2025, 46(1): 129–136 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0103002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0663-07

引用格式: 胡丙华, 晏 晖, 何红丽. 基于三维模型的机载武器运动参数精确测量方法 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 663-669.

HU Binghua, YAN Hui, HE Hongli. Accurate measurement method for motion parameters of airborne weapons based on 3D model[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 663-669.



在线阅读

基于三维模型的机载武器运动参数精确测量方法

胡丙华, 晏 晖, 何红丽

(中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

摘 要: 针对飞行试验中机载武器投射试验测试需求、测试条件与现有弹体运动参数测量方法的不足, 提出了一种基于三维模型的弹体运动参数精确测量方法。首先, 简要论述了基于三维模型的弹体运动参数精确测量的方法原理和系统构成。其次, 详细论述了弹体高精度几何与纹理建模、弹体三维模型与动态序列影像的自动配准, 以及自动寻点、转点跟踪与高精度位姿解算等方法。最后, 构建了地面试验验证系统, 进行了静态测量数据准确性和动态测量数据有效可靠性的验证试验。试验结果表明, 所提方法有效提升了测量精度与可靠性, 实现了基于弹体模型运动过程的三维重现。

关键词: 机载武器; 飞行试验; 三维模型; 几何与纹理建模; 模型与影像配准; 位姿测量

中图分类号: TN29; V217

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0303001

Accurate measurement method for motion parameters of airborne weapons based on 3D model

HU Binghua, YAN Hui, HE Hongli

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In view of the test requirements, test conditions and the deficiencies of existing projectile motion parameters measurement methods of airborne weapons projection test in flight test, an accurate measurement method of projectile motion parameters based on three-dimensional model was proposed. Firstly, the method, principle and system composition of accurate measurement of projectile motion parameters based on three-dimensional model were briefly discussed. Then, the methods of high precision geometry and texture modeling, automatic registration of three-dimensional model and dynamic sequence image, automatic point finding, turning point tracking and high precision pose and attitude solving were discussed in detail. Finally, a ground test verification system was constructed, and the verification tests for the accuracy of static measurement data and the effective reliability of dynamic measurement data were carried out. The test results show that the proposed method effectively improves the measurement accuracy and reliability, and realizes the three-dimensional reproduction of the motion process based on the projectile body model.

Key words: airborne weapon; flight test; three-dimensional model; geometry and texture modeling; model and image registration; position and posture measurement

引言

机载武器空中投射试验是新型武器和新型战斗机鉴定的必要试飞科目, 准确测试武器发射过程, 特别是武器分离过程的弹体姿态、速度等数据对武器分离安全性、空气动力学研究,

以及加快武器研究进程、提高武器性能等意义重大^[1-4]。

美国在 F-22 和 F-35 飞机研发过程中, 进行了大量关于机载武器分离方面的研究, 最新应用于 F35 机载武器测试的弹体 6D 参数测量方案, 是在

收稿日期: 2023-11-20; 修回日期: 2024-06-02

基金项目: 国家自然科学基金 (62033010)

作者简介: 胡丙华 (1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事摄影测量研究与应用以及光电测试技术研究。E-mail: hbh125@qq.com

特定位置安装高速摄像机获得弹体分离过程,采用所谓“数字存储分离分析系统”(digital store separation analysis system, DSSAS)软件进行影像数据处理,可实现位置精度优于5 mm、航向俯仰角精度优于0.2°、滚转角优于1°的弹体位姿高精度测量^[5]。

目前,国内在机载武器试验测试任务中主要采用双目视觉测量的两点测量法或基于条件约束的多目联合测量^[6]实现弹体运动参数测量,该方案需要在弹舱内加装至少2台高速摄像机,且在弹体姿态测量方面只能进行航向角和俯仰角的测量。由于在机载环境下摄像机布站位置受限,交会测量存在视场遮挡,因此无法实现最优双目视觉测量构型,且机载振动环境对交会测量引起的随机误差不可忽视,从而难以获得很高的位置测量精度,进而影响基于位置信息进行二次计算得到的弹体姿态、速度和加速度等数据的精度和可靠性。随着武器靶试对测试参数、测试精度等方面要求的提升,亟需研究新的弹体运动参数测量方法,从而有效提升弹体位置、姿态、速度和加速度等参数的测量精度与可靠性。

本文针对现有方法的不足,提出一种基于三维建模的内埋武器运动参数高精度测量方法,通过构建三维建模和单站高速摄影联合的测量模式,充分利用弹体的结构信息,使获得的位姿参数更准确、直观、可靠,同时降低摄像机加装要求,提升机载武器视觉测量方法的工程适应性。

1 测量方案

基于三维建模的机载武器运动参数精确测量方法的核心,是通过弹体扫描和模型重建获得高精度的带纹理三维模型,为基于单摄像机的武器位姿计算提供纹理信息和高精度空间几何约束信息,实现了数据智能化处理与弹体位姿稳定、精确测量。

该方法要求在试验前对弹体表面进行处理,即在弹体上随机布设较密集的标志点,通过弹体扫描获得多位姿点云数据和纹理信息,然后经点云数据处理实现弹体三维重建;试验过程中,单摄像机采集弹体运动视频数据;试验后,通过标志点检测定位、弹体运动影像与三维模型配准、标志点自动转点、弹体位姿参数计算等过程获得弹体位姿;之后基于位姿数据进行二次计算,获得弹体的速度和角速度以及相应加速度信息。相比原有测量方法,该方法将弹体不再看做一点进行近似计算,而是当作空间曲面进行测量,所获得的运动参数完整、准确、可靠。

该方法测量原理和系统构成如图1和图2所示。

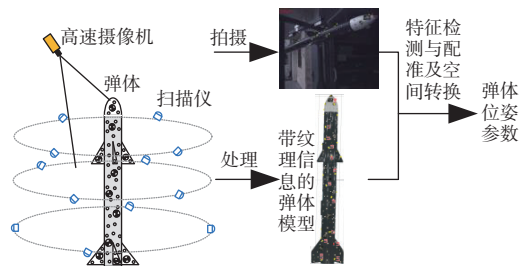


图1 基于三维模型的弹体运动参数测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring projectile motion parameters based on 3D model

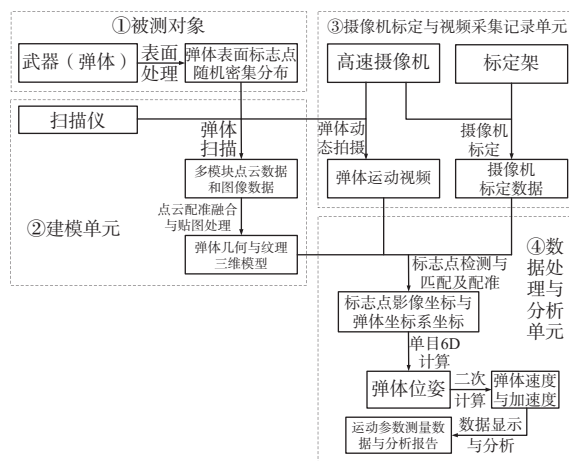


图2 基于三维模型的弹体运动参数测量系统构成与信息关联

Fig. 2 Structure composition and information crosslinking of projectile motion parameter measurement system based on 3D model

2 关键技术

2.1 弹体高精度几何与纹理建模

通过高精度三维扫描设备进行弹体扫描,获得多位姿点云数据和纹理信息,经点云数据处理实现弹体三维重建,获得带清晰纹理的高精度弹体三维模型。模型数据的坐标系应设置为以弹体中心为原点的弹体坐标系,为后续弹体位姿测量提供高精度计算基准,模型重建精度优于0.2 mm。具体处理过程如图3所示,其中关键是点云去噪和点云配准融合处理。

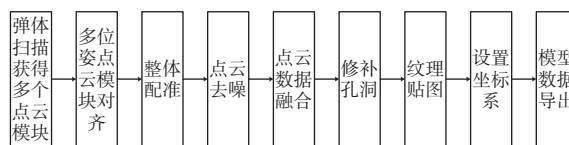


图3 弹体三维建模处理过程

Fig. 3 Processing process of projectile 3D modeling

1) 点云去噪

点云去噪主要采取基于局部离群系数的离群点去噪方法实现噪声滤除^[7-8], 并进行光顺处理, 从而获得精确弹体模型, 其算法流程如图4所示。

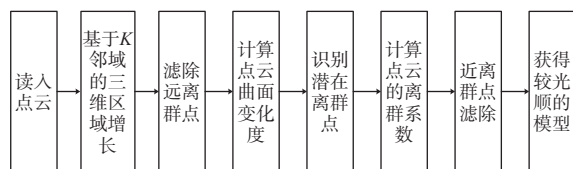


图4 基于局部离群系数的点云去噪算法流程图

Fig. 4 Flow chart of point cloud denoising algorithm based on local outlier coefficient

该算法中, 点云曲面变化度计算主要包括3部分内容: 点云的 K 邻域搜索, 点云的法向量计算和点云的曲率计算^[9]; 潜在离群点识别是依据点云曲率大小, 将曲率大的点标记为潜在离群点; 近离群点滤除是在计算潜在离群点的局部离群系数的基础上, 将大于离群系数阈值的点标记为近离群点, 然后进行滤除。

对实验室弹体模型进行三维扫描, 获得多位姿点云数据。依据图4所示算法, 调整区域增长点数和体积等参数, 以滤除远离群点; 之后, 设置合适的离群系数阈值, 然后滤除近离群点。去噪效果如图5所示, 从图5可以看出, 噪声滤除效果较好。

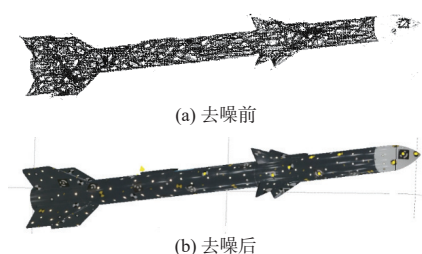


图5 去噪效果

Fig. 5 Denoising effect

2) 点云配准融合

点云配准融合指整体配准和点云数据融合, 主要包含点云的初始配准和精确配准以及点云滤波。

由于弹体属于细长型结构, 扫描过程中容易出现相似度大的两片或多片点云。为避免配准出错, 采用主成分分析法进行点云模型的粗配准, 并通过创建一组旋转校正矩阵, 分别左乘其中一个点云模型矩阵, 以计算后面两组点云模型

的平均欧式距离最小为准则确定有效旋转矩阵, 之后将点云数据进行空间旋转, 实现两组点云模型的主轴方向对齐, 为点云精确配准提供了良好的初始位姿, 也解决了初始位姿相差较大的点云容易陷入局部最优的问题; 再在ICP (iterative closest point) 算法的基础上, 采用K-d (K-dimensional) tree搜索算法进行最近点搜索, 实现点云的快速精确配准^[10]; 配准融合后的点云在重叠区域会形成一定的厚度, 造成点云数据冗余。为此, 结合弹体结构特点, 采用以柱体几何体作为中值滤波的几何单元的法向量引导下的中值滤波改进算法^[11], 实现三维点云重叠区域冗余数据的剔除。

2.2 弹体三维模型与动态序列影像的自动配准

弹体三维模型与动态序列影像的自动配准包含弹体模型三维模型和光学影像的配准和序列影像的二维匹配, 其处理流程示意图如图6所示。首先在弹体三维模型上标注出在弹体实际运动过程中能够在摄像机视场清晰成像且分布跨度较大的所有标志点, 为弹体动态序列影像标志点跟踪与自动转点提供空间约束关系; 然后对弹体运动首状态影像进行标志点半自动检测定位, 结合摄像机标定参数, 获得光学影像与三维模型的初始空间转换参数; 最后是关于其他状态的处理, 主要是依据二维动态匹配的方式实现弹体动态序列影像的标志点跟踪定位^[12], 同时与三维模型进行配准计算, 实现标志点跟踪定位检核与修正。

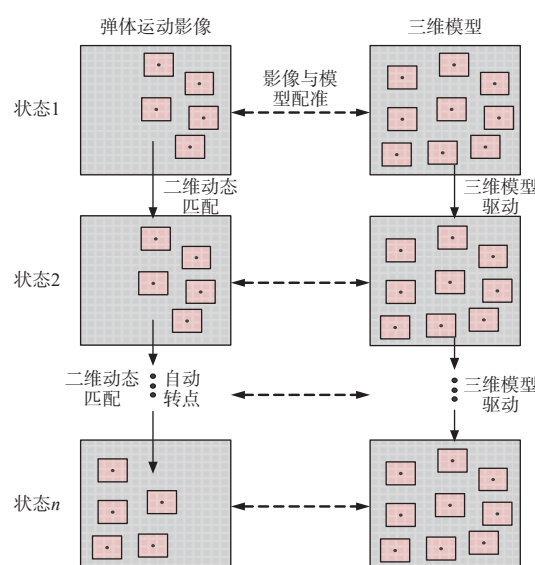


图6 弹体三维模型与动态序列影像的自动配准处理流程图

Fig. 6 Flow chart of automatic registration process of projectile 3D model and dynamic sequence image

图6中,光学影像和弹体模型三维模型配准时,由于两者是不同传感器获取的二维连续数据集和三维离散数据集,其数据结构特点的差异性造成两者配准难度较大^[13]。因此,提出一种基于改进 RIFT(radiation-invariant feature transform)特征算法的光学影像与点云配准方法。根据初始影像的内外方位元素利用针孔成像模型将点云数据转换为深度图影像^[14],然后利用改进 RIFT 算法进行点特征检测,以最大索引映射(masked image modeling, MIM)用于特征描述,在此基础上以最邻近距离作为相似性测度,实现点云深度图与光学影像的配准,进而间接实现模型点云与光学影像的配准^[15],其主要算法流程如图7所示。该方法能够实现模型与影像的精确配准,并实现了影像外方位元素迭代修正,解决了机载高速摄像机振动补偿问题,有效提高了武器运动参数的测量精度。

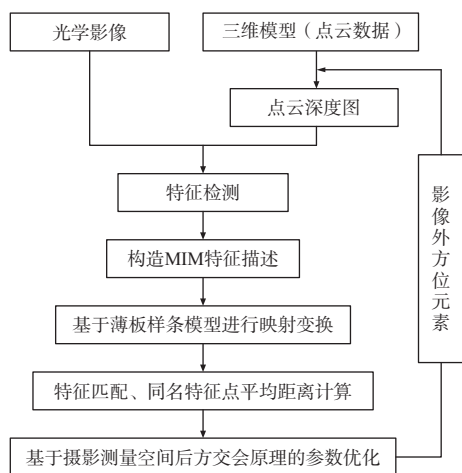


图7 弹体光学影像和三维模型的配准算法流程图

Fig. 7 Flow chart of registration algorithm of projectile optical image and 3D model

2.3 自动寻点、转点跟踪与高精度位姿解算

由于弹体细长,弹体运动容易造成摄像机视场内标志点的消隐和新增,即前面可清晰成像的标志点随着弹体运动部分出现模糊变形或者被遮挡,并且另外显现出一些可清晰成像的标志点。此时,需要进行部分跟踪标志点的自动消隐和新显现标志点的自动检测与跟踪处理,以保证每个状态有足够数量标志点进行弹体位姿高精度计算。因此,提出基于多点空间拓扑关系约束的位姿解算方法,通过弹体位姿解算—自动寻点与精定位—弹体位姿解算的迭代方式^[16],解决弹体运动过程中弹体成像中的标志点自动消隐与增补的问

题,实现了自动寻点、转点跟踪、标志点定位修正,最终实现弹体位姿、速度等参数的高精度测量。具体算法流程如图8所示。

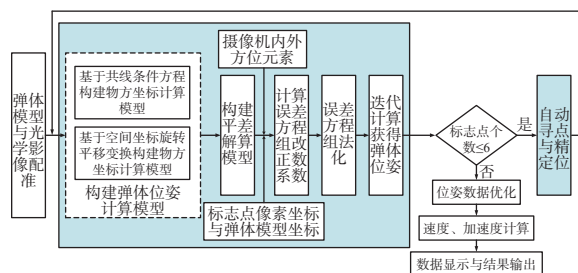


图8 基于多点空间拓扑关系约束的位姿解算方法

Fig. 8 Position and posture solving method based on multi-point space topological relationship constraints

图8中,自动寻点与精定位就是标志点自动消隐与增补处理,其核心是反投影计算,其处理过程如下:

- 1) 进行反投影计算,根据标志点物方坐标和影像的内外方位元素,基于共线条件方程计算弹体模型上标注出的所有标志点在影像中的坐标;
- 2) 筛选出需消隐或增补的点,将反投影计算的坐标值与自动跟踪获得的标志点坐标值进行比较,将未能找到坐标接近的点作为需消隐或增补的点;
- 3) 区分消隐点和增补点,以步骤2中获得的坐标值为中心,进行小区域的标志点自动检测定位。若对应区域检测不到标志点,该点进行消隐处理,否则将检测到的标志点增补为新的跟踪点;
- 4) 进行标志点定位检核与修正,在自动跟踪出现较明显偏离时,以多点空间拓扑关系为约束,并结合共线条件方程对所有跟踪点构建等量关系式,进而构建以像点坐标为未知参数的误差方程,进行最小二乘计算,实现标志点定位检核与修正。

通过以上处理,可以及时准确地将退出摄像机视场的标志点隐藏,并自动检测新出现的标志点,保证每一时刻有足够数量 $n(n \geq 6)$ 的标志点参与弹体位姿计算。

3 地面试验验证

3.1 试验流程

地面静态测量数据准确性和动态测量数据有效可靠性的验证试验流程图如图9所示。

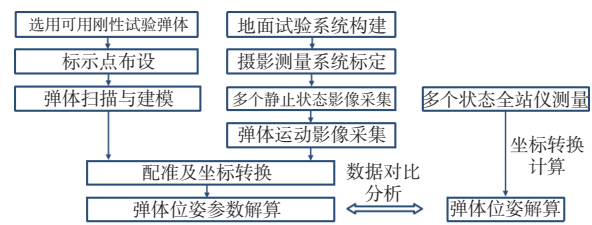


图9 地面试验流程图

Fig. 9 Flow chart of ground test

3.2 试验数据与结果分析

1) 试验弹体三维模型

弹体三维模型重建效果如图10所示。

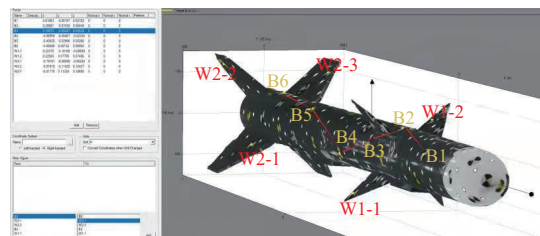


图10 弹体三维模型重建效果

Fig. 10 Reconstruction effect of projectile 3D model

2) 摄像机标定结果

摄像机基于首状态弹体上多个标志点进行镜头畸变校正与外参标定解算后,标志点坐标计算残差如表1所示。

由表1可以看出,三维扫描获得的试验弹体模型数据精度很高,基于其模型上的标志点数据进行摄像机外参标定可获得优于0.5 mm的标定精度,避免常规方法采用全站仪进行标定控制点测量引起的控制误差。

3) 多个状态的弹体位姿测量结果

基于本文方法的6D测量计算精度水平如表2所示,表2中测量参数计算精度是根据平差后残差统计的单位权中误差和未知参数权倒数计算得

到。由表2可看出,基于本文方法,可实现定位误差小于2 mm,姿态误差小于0.2°的静态测量。

将本文方法计算获得的位姿数据与基于全站仪测量数据经坐标转换计算获得的位姿进行对比,如表3所示。由表3可看出,基于本文方法测量的结果与全站仪测量结果一致性很强,说明该方法测量数据准确、可靠性强。

表1 摄像机标定精度分析

Table 1 Analysis of camera calibration accuracy

序号	标志点在弹体模型 坐标系下的三维坐标			以弹纵向Z坐标为基准, 单站解算X和Y坐标残差	
	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$\Delta Z/m$	dX/mm	dY/mm
1	-0.060 8	0.002 9	0.849 7	0.0	0.0
2	-0.052 0	0.031 0	0.618 6	-0.1	0.0
3	-0.054 3	-0.024 9	0.566 7	0.1	0.0
4	-0.059 6	-0.002 1	0.300 3	0.1	-0.3
5	-0.063 3	-0.049 8	0.280 6	-0.3	0.3
6	-0.101 5	-0.087 2	0.223 7	0.1	-0.3
7	-0.054 0	0.026 6	0.180 7	-0.1	0.3
8	0.061 4	0.059 3	0.333 1	0.0	0.1
9	0.098 5	0.090 7	0.262 7	0.0	-0.4
10	0.077 2	0.074 8	0.225 8	0.2	0.2

表2 基于本文方法的6D测量参数计算精度

Table 2 Calculation accuracy of 6D measurement parameters based on proposed method

状态	dX /mm	dY /mm	dZ /mm	航向 $d\Phi/(^\circ)$	俯仰 $d\Omega/(^\circ)$	横滚 $dK/(^\circ)$
2	0.3	0.3	0.9	0.05	0.04	0.08
3	0.5	0.5	1.7	0.09	0.07	0.14
4	0.3	0.4	1.2	0.06	0.05	0.12
5	0.3	0.3	1.5	0.04	0.03	0.13
6	0.5	0.7	2.4	0.04	0.06	0.17
7	0.3	0.6	1.4	0.03	0.03	0.22
均方根误差	0.4	0.5	1.6	0.06	0.05	0.15

表3 基于本文方法和全站仪测量计算所得的姿态数据对比

Table 3 Comparison of attitude data calculated by proposed method and total station measurement

状态	本项目方法测量/ $^\circ$			全站仪测量/ $^\circ$			对比/ $^\circ$		
	航向 Φ	俯仰 Ω	横滚 K	航向 Φ	俯仰 Ω	横滚 K	航向 $d\Phi$	俯仰 $d\Omega$	横滚 dK
2	2.722	-0.923	-0.191	2.818	-1.007	-0.243	-0.096	0.084	0.052
3	2.146	-3.522	-0.408	1.998	-3.567	-0.365	0.148	0.045	-0.043
4	-1.871	-0.032	9.184	-1.702	0.128	8.972	-0.169	-0.160	0.212
5	5.169	1.027	18.747	5.023	0.825	18.816	0.146	0.202	-0.069
6	0.546	11.542	-9.185	0.581	11.663	-8.980	-0.035	-0.121	-0.205
7	7.092	-5.121	85.589	7.015	-4.972	85.812	0.077	-0.149	-0.223
均方根误差							0.121	0.137	0.156

考虑实际飞行试验过程中动态测量可能引入的各项误差和弹体结构特点,结合经验数据,可评估本文方法动态定位测量精度优于5.0 mm,航向角和俯仰角精度优于0.2°,横滚角精度优于1°。

4) 基于三维模型的内埋武器位姿测量数据可视化显示

对试验弹体运动视频数据进行处理,其测量数据显示情况如图11所示,可看出本方法在数据展示方面实现了光学影像、三维模型、位姿测量数据、位姿变化曲线等信息的动态同步显示,特别是数据驱动的三维模型动态显示实现了试验弹体实际运动过程的三维逼真重现,为试验分析提供了更丰富、直观、有效的测量数据。

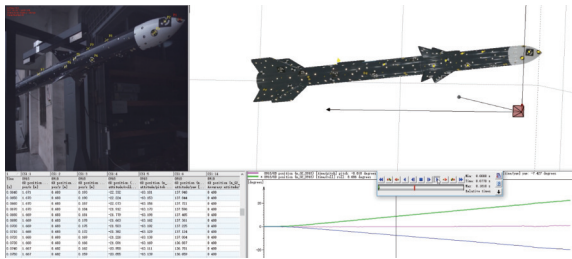


图11 弹体在模拟弹架上进行自由落体运动的位姿测量结果展示

Fig. 11 Display of pose measurement results of projectile body in free fall motion on simulated projectile frame

4 结论

本文针对现阶段采用的双目视觉测量方法受测试条件限制、难以满足机载武器投射试验不断提高的测试需求的问题,开展了基于三维模型的武器运动参数测量方法研究,设计研制了基于三维建模的6D测量与分析系统,实现了标志点的自动检测、自动转点跟踪与配准,以及基于三维模型的位姿解算等功能。经地面试验验证,本文方法准确、可靠,有效提高了视频数据处理的自动化程度和测量精度,降低了对测试环境条件与系统加装等要求,已成功应用于真实飞行试验条件下的武器投射试验测试,获得了完整、准确可靠的弹体运动数据,实现了弹体三维运动过程重构与显性化展示,内容丰富、直观清晰,为试验分析提供了重要支撑。

参考文献:

[1] 宋威,艾邦成. 内埋武器机弹分离相容性及流动控制试

验研究[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(3): 203-211.

SONG Wei, AI Bangcheng. Experimental investigation on aircraft-store compatibility and flow control for internal weapons separation[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(3): 203-211.

[2] FLORA T J, REEDER M F, LOFTHOUSE A, et al. Dynamic store release of ice models from a cavity into Mach 2.9 flow[J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(6): 1927-1941.

[3] 闫盼盼. 内埋武器舱气动特性及武器分离安全性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

YAN Panpan. Study on aerodynamic characteristics and weapon separation safety of embedded weapon cabin[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[4] 董金刚, 张晨凯, 谢峰, 等. 内埋武器超声速分离机弹干扰特性试验研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(3): 46-51. DONG Jingang, ZHANG Chenkai, XIE Feng, et al. Experimental investigations on the separation interference characteristics of supersonic internal weapon releasing from the aircraft[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(3): 46-51.

[5] HETREED C, CARROLL M, COLLARD J, et al. F-35 weapons separation test and verification[C]//2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Virginia: AIAA, 2018: 3680.

[6] 张建花. 某型机载武器投放轨迹姿态测量方法研究[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 953-957.

ZHANG Jianhua. Method for measuring delivery trajectory and attitude of a certain type of airborne weapon[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(6): 953-957.

[7] 何帅, 陈富民, 杨雅棠, 等. 基于点云数据的自由曲面加工误差评定[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10): 135-142.

HE Shuai, CHEN Fumin, YANG Yatang, et al. Machining error evaluation of free-form surface based on point cloudy data[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10): 135-142.

[8] 张星. 基于激光点云与影像融合的三维可视化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

ZHANG Xing. Research on 3D visualization based on laser point cloud and image fusion[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.

[9] 冯上朝, 刘莎. 基于激光扫描的飞机点云预处理技术[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(7): 1279-1283.

FENG Shangchao, LIU Sha. Aircraft point cloud preprocessing technology based on laser scanning[J]. Computer & Digital Engineering, 2018, 46(7): 1279-1283.

- [10] 危双丰, 汤念, 黄帅, 等. 基于建筑物轮廓的地面激光点云与影像匹配点云配准研究[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(8): 2515-2520.
WEI Shuangfeng, TANG Nian, HUANG Shuai, et al. Research on registration of terrain laser scanning point cloud and image matching point cloud based on building footprint[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(8): 2515-2520.
- [11] 陈长海. 基于多视密集匹配点云的三维表面重建方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
CHEN Changhai. Research on 3D surface reconstruction method based on multi-view dense matching point cloud[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [12] 曾凡永, 顾爱辉, 陈海峰, 等. 相关系数和最小二乘影像匹配算法的实现与研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(6): 203-208.
ZENG Fanyong, GU Aihui, CHEN Haifeng, et al. Implementation and research of correlation coefficient and least squares image matching algorithm[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(6): 203-208.
- [13] 俞路路, 李彩林, 王志勇. 近景光学影像和三维激光扫描点云自动配准[J]. 激光杂志, 2021, 42(6): 92-96.
YU Lulu, LI Cailin, WANG Zhiyong. Automatic registration of close-range optical image and 3D laser scanning point cloud[J]. Laser Journal, 2021, 42(6): 92-96.
- [14] 范生宏, 王强, 勾志阳, 等. 一种简易的激光雷达点云与光学影像自动配准方法[J]. 激光杂志, 2021, 42(3): 157-162.
FAN Shenghong, WANG Qiang, GOU Zhiyang, et al. A simple automatic registration method for Lidar point cloud and optical image[J]. Laser Journal, 2021, 42(3): 157-162.
- [15] 赵吉庆. 基于特征的点云数据与光学影像配准方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
ZHAO Jiqing. Research on registration method of point cloud data and optical image based on feature[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [16] 时德才. 基于正交迭代算法的单目视觉位姿测量系统研究[D]. 成都: 西华大学, 2017.
SHI Decai. Research on monocular visual pose measurement system based on orthogonal iterative algorithm[D]. Chengdu: Xihua University, 2017.