

## 激光与光电子学进展

## 空间直线矢量至投影平面姿态映射分析及应用

胡小丽, 唐明刚\*, 刘彪, 贺旭桐, 张乐, 王雨

63875 部队, 陕西 华阴 714200

**摘要** 为了解决靶场典型刚体目标(大多具有线性外化特征)光学姿态处理的算法共性适应问题,提出了直线矢量三维-二维(3D-2D)物像映射通用关系,后依据所需选取直线矢量进行物像方向映射后匹配的方法获取姿态角信息。首先对目标主体直线矢量进行了旋转变换,获取了关键主体直线矢量与所求姿态角的理论对应关系,然后将关键矢量向确定像面进行投影,确立了空间直线矢量至投影像面姿态的映射关系,并通过分站映射结果对空间直线矢量进行了重构,以达到闭环验证映射结果正确性的目的。该研究为基于直线矢量的光学姿态处理提供了重要的直线矢量 3D-2D 姿态映射关系,并以此为基础,进行纯方向姿态解算。尤其在中长远动态目标姿态测量中遮挡、变换过程中具有良好适应性,与现有典型姿态处理结果对比,验证了本文算法的正确性和可靠性。

**关键词** 测量; 物像映射; 姿态测量; 直线矢量; 矢量重构

中图分类号 TP394.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221348

## Analysis and Application of Pose Mapping from Spatial Line Vector to Projection Plane

Hu Xiaoli, Tang Minggang\*, Liu Biao, He Xutong, Zhang Le, Wang Yu

Unit 63875, Huayin 714200, Shaanxi, China

**Abstract** A general relationship of three-dimensional-two-dimensional (3D-2D) object image mapping of line vector is proposed to solve the common adaptation problem of optical pose processing of typical rigid targets (mostly with linear externalization characteristics) in the shooting range. The pose information is then obtained by choosing a line vector for object image direction mapping and matching. First, the linear vector of the target body is rotated, the theoretical correspondence between the line vector of the key subject and the calculated pose angle is obtained, and then the key vector is projected to the determined image plane, the mapping relationship between the spatial line vector and the image of the projected image plane is established for the first time, and the spatial line vector is reconstructed using the substation mapping results, in order to achieve the purpose of closed-loop verification of the correctness of the mapping results. The pure direction pose is solved using the significant line vector 3D-2D pose mapping relationship presented in this paper for optical pose processing based on line vector. Especially in the process of occlusion and transformation in the medium and long-term dynamic target attitude measurement, it has good adaptability. Compared with the existing pose processing results, the correctness and reliability of the algorithm are verified.

**Key words** measurement; object-image mapping; pose measurement; line vector; vector reconstruction

## 1 引言

目前光学姿态处理方法主要基于 3 种目标特征,分别是基于多个(3 个以上)同名角点<sup>[1-5]</sup>、基于目标模型<sup>[6-8]</sup>以及基于直线矢量特征<sup>[9-13]</sup>。针对靶场测量目标而言,目标动态飞行过程中多视角无遮挡、可通视的可提取同名角点非常少,故基于多点测量的方法不太适

用。由于测量外形无法准确获取,模型匹配法失去计算前提,另外,模型匹配法计算量大、耗时、效率低。基于直线矢量交会的方法不仅不需要同名匹配,而且在特征提取方面比较灵活,仅需分站矢量平行即可。中轴线法<sup>[9]</sup>是基于直线矢量空间重构的方法,结果仅依赖单一中轴特征,且只反映偏航角和俯仰角的变化状态。文献[10-12]算法基于位姿耦合,增加了误差来

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-04-24; 录用日期: 2022-06-15; 网络首发日期: 2022-06-25

通信作者: \*scu993@163.com

源。文献[13]算法必须基于同名直线交会,对于目标动态变换和遮挡场景灵活度不足。

本文主要解决目标动态飞行过程中视角变换、特征遮挡等同名特征不足的姿态测量问题。在典型靶场中长远姿态测量中,分站采集的图像通常像质一般、目标不显著,故利用飞机具有的若干轮廓直线特征,采用基于分站直线矢量物像匹配的姿态处理方法,并且分站之间特征不需同名。另外,所用处理方法必须考虑共性适应性问题,以应对靶场典型刚体目标的方案拟制相关计算和事后处理。目前,摄像测量在计算弹道时,具有基本的共线方程,而基于直线矢量交会时,尚没有成熟的空间直线矢量至投影平面姿态映射关系模型。为了提高直线矢量交会计算姿态的直观、方便性,本文利用姿态求解的两种途径——矢量旋转和交会重构,实现了空间直线矢量至投影像面的映射以及方法结果的验证。

## 2 原理分析

从光学测量原理上来看,弹道实质上基于点映射,而姿态变换实质上基于多矢量方向映射,矢量主要为能表征姿态角信息的直线矢量,故:首先需明确目标主体直线矢量特征;其次需推导各类直线矢量的物方像方对应关系;最后则根据物方像方对应关系,对多直线矢量物像匹配状况进行优化求解,即可求解出姿态角信息。

### 2.1 目标主体直线矢量选取

目标主体直线矢量,即在目标由初始零姿态向求解时刻姿态旋转变换过程中,能表征关键姿态角信息(偏航角 $\Psi$ 、俯仰角 $\varphi$ 和滚转角 $\gamma$ )的直线矢量。靶场典型刚体目标,如通常的弹类轴对称回转体,其目标主体直线矢量通常为弹轴矢量,或与弹轴平行的边缘直线矢量。飞机类目标,依外形不同无通用直线矢量特征,

但在建立目标体坐标系时,如图1所示,以中轴所在直线矢量 $BA$ 为 $X$ 轴,翼展所在直线矢量 $CD$ 为 $Z$ 轴, $Y$ 轴与 $X$ 、 $Z$ 轴构成右手坐标系,目标主体直线矢量除了常见的中轴、翼展外,还有其他外化直线矢量特征,如图1中与中轴平行的两条尾撑直线矢量特征 $GE$ 、 $HF$ ,以及与翼展平行的直线矢量特征 $EF$ 。

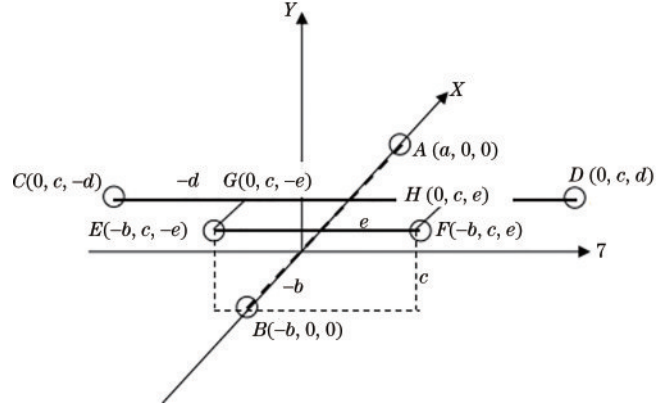


图1 特征直线相对位姿关系构图

Fig. 1 Composition of relative pose relationship of characteristic straight line

所有坐标系以常规姿态处理算法中涉及的坐标系为基准。其中:目标坐标系以目标中轴为 $X_T$ 轴,头部为正;基准坐标系以北向为 $X$ 轴;摄像机坐标系以光轴指向为 $X_C$ 轴,平行于像面向上为 $Y_C$ 轴;像面坐标系 $Y$ 、 $Z$ 轴分别平行于相机坐标系 $Y_C$ 轴、 $Z_C$ 轴。初始零姿态指目标坐标系平行于基准坐标系。

按照姿态旋转与欧拉角的唯一对应顺序,目标从初始零姿态(目标体坐标系与基准坐标系平行)旋转三姿态角( $\Psi$ 、 $\Phi$ 、 $\gamma$ )至求解时刻,可令旋转矩阵 $R'$ 为

$$\begin{cases} R' = R(y, \Psi) R(z, \varphi) R(x, -\gamma) \\ R' = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \phi & -\cos \psi \sin \phi \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma & -\cos \psi \sin \phi \sin \gamma - \sin \psi \cos \gamma \\ \sin \phi & \cos \phi \cos \gamma & \cos \phi \sin \gamma \\ \sin \psi \cos \phi & -\sin \psi \sin \phi \cos \gamma - \cos \psi \sin \gamma & -\sin \psi \sin \phi \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

按照姿态旋转关系及典型坐标系定义可知,式(1)旋转矩阵中:第1列可视为中轴矢量或与之平行矢量 $(1\ 0\ 0)^T$ 旋转后的状态;第2列可视为 $(0\ 1\ 0)^T$ 旋转后的状态;第3列可视为翼展或与之平行矢量 $(0\ 0\ 1)^T$ 旋转后的状态。通过对旋转矩阵 $R'$ 各列元素分析可知,在前述定义的基准坐标系下,分析能携带姿态信息的关键直线,大致可分为如下两类:1)中轴线矢量或与之平行的直线矢量(平行于目标体坐标系 $X$ 轴),可解析偏航角 $\Psi$ 和俯仰角 $\varphi$ 信息;2)除中轴及平行直线以外的直线,可解析三姿态角( $\Psi$ 、 $\Phi$ 、 $\gamma$ )信息。

在实际应用中,可根据测试需求灵活选取相关特征直线获取需要的姿态信息。

### 2.2 直线矢量由物方空间向像方空间映射关系推导

根据测试需求选择合适的直线矢量特征后,需对各直线矢量进行三维-二维(3D-2D)物像映射模拟,以获取归一化直线矢量投影后所在像面的成像方向状态。

以中轴矢量为例,对3D-2D映射关系进行步骤说明。

1) 初始零姿态条件下空间直线矢量在目标坐标系的归一化矢量 $L_0(a\ b\ c)^T$ ,经偏航角 $\Psi$ -俯仰角 $\varphi$ -滚转角 $\gamma$ 旋转[旋转矩阵为 $R = R(Y_T, \Psi) R(Z_T, \varphi) R(X_T, \gamma)$ ]后,获取计算时刻空间直线矢量在基准坐标系下的矢量 $L(l\ m\ n)^T$ ,表示为

$$\mathbf{L} = \mathbf{R}(Y_T, \psi) \mathbf{R}(Z_T, \varphi) \mathbf{R}(X_T, -\gamma) \mathbf{L}_0 \quad (2)$$

2) 将矢量  $\mathbf{L}(lmn)^T$  由基准坐标系经相机光轴指向  $(A, E)$  转换至相机坐标系, 得  $\mathbf{L}_C(X_C Y_C Z_C)^T$ , 表示为

$$\mathbf{L}_C = \mathbf{R}(-E) \mathbf{R}(-A) \mathbf{L} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{R}(-E) = \begin{bmatrix} \cos E & \sin E & 0 \\ -\sin E & \cos E & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}(-A) = \begin{bmatrix} \cos A & 0 & \sin A \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A & 0 & \cos A \end{bmatrix} \quad (5)$$

3) 将空间直线矢量由相机坐标系  $\mathbf{L}_C(X_C Y_C Z_C)^T$  转换至像面坐标系  $l_p(yz)^T$ , 表示为

$$\begin{cases} y = Y_C \\ z = Z_C \end{cases} \quad (6)$$

4) 获取空间直线矢量在投影像面的角度  $\alpha$  (像面  $z$  轴至像面直线矢量法线的角度), 表示为

$$\alpha = \begin{cases} \pi - \arctan(z/y) & , y > 0, z > 0 \\ -\arctan(z/y) & , y > 0, z < 0 \\ 2\pi - \arctan(z/y) & , y < 0, z < 0 \\ \pi - \arctan(z/y) & , y < 0, z > 0 \end{cases} \quad (7)$$

为了验证直线矢量 3D-2D 模拟投影结果的正确性, 可通过式(2)~(7)实现中轴空间直线矢量至投影平面姿态映射, 获取两个分站投影像面角度  $\alpha_1, \alpha_2$ , 经常规中轴线交会法<sup>[10]</sup>实现空间直线矢量重构, 重构结果为  $\mathbf{L}'(l' m' n')^T$ , 比较  $\mathbf{L}'$  与  $\mathbf{L}$  的一致性, 即可验证空间直线矢量至投影平面姿态映射关系结果的正确性。

### 3 算法应用及验证

#### 3.1 直线矢量 3D-2D 映射正确性验证

以目标中轴矢量  $\mathbf{L}_0(100)^T$  为例进行说明, 分站站点、目标轨迹以及姿态角  $(\Psi, \varphi)$  设置 (滚转不影响中轴) 如表 1 所示。

表 1 分站站点、目标轨迹以及姿态角  $(\Psi, \varphi)$  设置  
Table 1 Substation position, target trajectory, and pose angle  $(\Psi$  and  $\varphi)$  setting

Project	X/m	Y/m	Z/m	$\Psi/(^\circ)$	$\varphi/(^\circ)$
Substation 1	50	0	-1700	—	—
Substation 2	50	0	1700	—	—
Ballistic point 1	0	0	0	1	25
Ballistic point 2	25	0.4	10	1	20
Ballistic point 3	50	0.9	15	1	15
Ballistic point 4	75	1.3	20	1	10
Ballistic point 5	100	1.7	25	1	1

根据 2.2 节所述, 获取空间直线矢量 (图 1 中轴矢量  $\mathbf{BA}$ ) 在两个分站投影像面的角度  $\alpha_1, \alpha_2$ , 映射结果如表 2 所示。

表 2 分站投影角度  $\alpha_1, \alpha_2$

Table 2 Projection angle of substation  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$

Key point	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Ballistic point 1	1.13	2.01
Ballistic point 2	1.22	1.92
Ballistic point 3	1.31	1.83
Ballistic point 4	7.68	1.75
Ballistic point 5	7.84	1.59

根据表 1 中所述站点信息及目标位姿设置信息, 以及表 2 中中轴矢量经 3D-2D 模拟投影所得直线矢量方向信息, 利用常规中轴线法对空间中轴矢量进行由像至物反向重构, 得到  $\mathbf{L}'$ 。  $\mathbf{L}'$  与  $\mathbf{L}$  结果对比, 如表 3 所示。

表 3 模拟矢量与重构矢量对比

Table 3 Comparison between analog vector and reconstructed vector

Key point	$\mathbf{L}$			$\mathbf{L}'$		
	$l$	$m$	$n$	$l'$	$m'$	$n'$
Ballistic point 1	0.906	0.422	0.015	0.906	0.422	0.015
Ballistic point 2	0.939	0.342	0.016	0.939	0.342	0.016
Ballistic point 3	0.966	0.258	0.016	0.966	0.258	0.016
Ballistic point 4	0.985	0.173	0.017	0.985	0.173	0.017
Ballistic point 5	0.999	0.018	0.017	0.999	0.018	0.017

由表 3 可知,  $\mathbf{L}'$  与  $\mathbf{L}$  分量完全对应, 说明空间直线矢量映射结果正确。

#### 3.2 基于直线矢量的姿态处理方法应用

以直线矢量物像映射关系为基础, 可根据需求选取不同的直线矢量, 基于多直线物像映射斜率匹配优化求解, 获取所需的姿态角信息, 为光学姿态处理提供一种共性处理方法。输入输出可表示为

$$X(\Psi \varphi \gamma) = F(A_i E_i k_j) \quad (8)$$

式中:  $A_i, E_i$  为分站光轴指向;  $k_j$  为不相关直线矢量像面斜率。

从处理精度上分析, 该算法与通常处理方法相比, 实现了位姿分离。在处理环节, 影响因素仅为分站光轴指向和像面直线矢量斜率提取准确度, 而其他常用处理方法多涉及位置信息, 故误差来源除了上述因素, 还包括焦距、点位输入等信息, 增加了处理误差来源。另外, 该计算方法基于多直线矢量物像匹配优化, 故同等成像条件下, 可提高姿态处理精度。

从方法适应性上分析, 靶场动态目标中长远姿态测量前提下, 通常存在目标不显著、特征角点不突出、被遮挡现象普遍发生等问题, 本文方法利用直线矢量的方向无限延展性, 且仅采用直线矢量斜率进行物像匹配, 另外, 分站之间可独立可联合求解, 不涉及同名特征约束, 故对于靶场动态目标中长远姿态测量具有

显著的优势。

为验证该算法的正确性,采用如下实验剖面进行验证。

实验剖面与点位布设:某型飞机,其上装载遥测姿态数据(精度优于 $0.2^\circ$ );目标沿着靶场主靶道平飞,设计 1200 m 弹道高度;2 套姿态测量系统(1#、4#)分别布设于靶场 X 向 5 km 东、西点位,测试姿态约为距离分站 3~5 km 斜距。

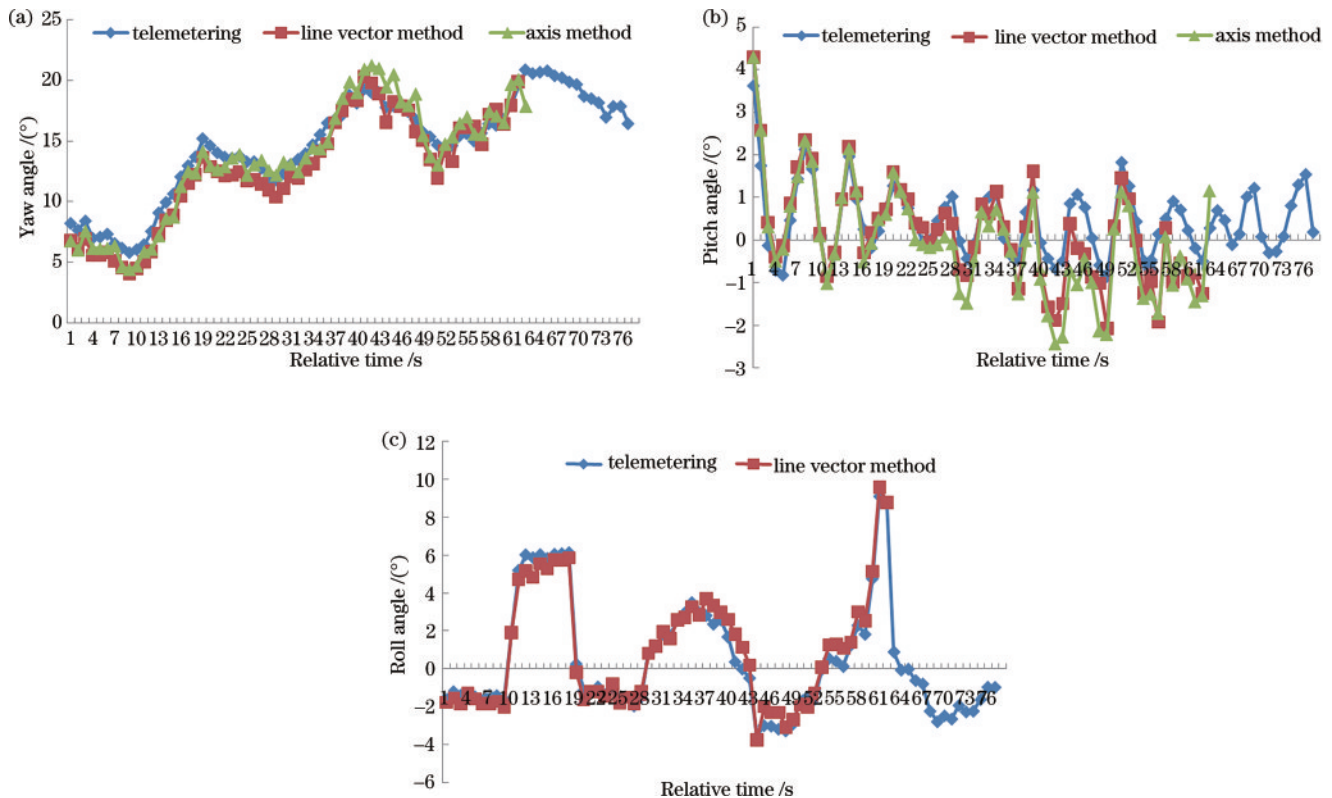


图2 实验结果。(a)偏航角处理;(b)俯仰角处理;(c)滚转角处理

Fig. 2 Experimental results. (a) Yaw angle processing; (b) pitch angle processing; (c) roll angle processing

两种处理方法(中轴线法和直线矢量法)均采用了尾撑特征,由于线性特征良好,故中轴线法与遥测数据吻合良好。采用直线矢量方法,两段弹道高度数据与遥测数据吻合良好,变化细节均能较好反映,且相对中轴线法,其稳定性和一致性有优势,相对于遥测数据,中轴线法偏航角精度、俯仰角精度分别为 $1.2^\circ$ 、 $0.9^\circ$ ,直线矢量法偏航角精度、俯仰角精度以及滚转角精度分别为 $1.2^\circ$ 、 $0.7^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 。另外,可以处理出三姿态角信息,更能完整反映目标的姿态变化,但后端成像质量较差,成像模糊且相对距离较远,故数据稳定性和一致性稍差。

## 4 结 论

本文首次确立了空间直线矢量至投影面姿态的映射关系,并通过分站映射结果对空间直线矢量进行了重构,以达到闭环验证映射结果正确性的目的。本文为基于直线矢量的光学姿态处理提供了重要的3D-

方法验证依据:以遥测高精度姿态数据为依据,采用本文方法与中轴线法(因中轴线法实现了位姿分离,最小化了误差来源,且本试验中目标飞机尾撑直线线性特征良好,故以中轴线法作为比较)同时对采集图像进行姿态处理,其中本文采用尾撑直线(飞机尾端平行于中轴的直线,相对飞机主体的不规则,线性特征良好)和翼展直线特征,中轴线法采用尾撑直线特征,结果如图2所示。

2D姿态映射关系,并以此为重要理论基础,进行典型飞行体光学姿态处理,在本文所设试验剖面下,数据相比于中轴线法,不仅在稳定性和一致性方面具有一定优势,而且在直线特征选取方面将更加灵活,不受同名特征局限,为具有外化直线矢量特征的靶场典型飞行体目标统一了处理途径,尤其在多视角动态飞行目标部分特征受遮挡时具有显著优势。

## 参 考 文 献

- [1] 王鲲鹏, 张小虎, 于起峰. 基于目标特征点比例的单站图像定姿方法[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 974-978.  
Wang K P, Zhang X H, Yu Q F. Measuring cooperative target's pose based on proportions of feature points[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 974-978.
- [2] Haralick B M, Lee C N, Ottenberg K, et al. Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 13(3): 331-356.
- [3] Oberkampf D, DeMenthon D F, Davis L S. Iterative

- pose estimation using coplanar feature points[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1996, 63(3): 495-511.
- [4] Kneip L, Scaramuzza D, Siegwart R. A novel parametrization of the perspective-three-point problem for a direct computation of absolute camera position and orientation[C]//CVPR 2011, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 2969-2976.
- [5] 张世杰, 曹喜滨, 张凡, 等. 基于特征点的空间目标三维位姿单目视觉确定算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(4): 591-604.  
Zhang S J, Cao X B, Zhang F, et al. Monocular vision determination algorithm of three-dimensional pose of space target based on feature points[J]. Scientia Sinica Informationis, 2010, 40(4): 591-604.
- [6] 苏国中. 基于光电经纬仪影像的飞机姿态测量方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005: 1-184.  
Su G Z. Research on the method of aircraft pose surveying from image sequences obtained by photoelectric theodolite [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005: 1-184.
- [7] 蔡伟柯. 基于模型的单相机位姿参数估计方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006: 1-37.  
Cai W K. Study on pose estimation using single camera based on object model[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 1-37.
- [8] 习飞, 文贡坚, 蔡伟柯. 利用三维模型和立体像对估算飞行目标位姿[J]. 计算机仿真, 2007, 24(11): 95-99, 143.  
Xi F, Wen G J, Cai W K. Estimating pose parameters of flying object by using model and stereo images[J]. Computer Simulation, 2007, 24(11): 95-99, 143.
- [9] 于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 15-19.  
Yu Q F, Sun X Y, Chen G J. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(2): 15-19.
- [10] 王彬, 何昕, 魏仲慧. 采用多站图像直线特征的飞机姿态估计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1831-1839.  
Wang B, He X, Wei Z H. Attitude estimation of aircrafts using line features on multi-camera images[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(7): 1831-1839.
- [11] 傅丹. 基于直线特征的空间目标三维结构重建和位姿测量方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.  
Fu D. Researches on three-dimensional structure reconstruction and pose measurements based on line feature for space targets[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [12] 高嵩, 白礼卓. 基于单目相机的三点式激光器测距及位姿估计方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0915001.  
Gao S, Bai L Z. Monocular camera-based three-point laser pointer ranging and pose estimation method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0915001.
- [13] 胡小丽, 唐明刚, 吴海英. 一种特征直线交会求解的姿态处理方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 091203.  
Hu X L, Tang M G, Wu H Y. A pose information acquisition method based on characteristic line intersection analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 091203.