

星箭分离相对位姿摄影测量方法*

丁少闻^{1,2}, 陈浩³, 王洁^{1,4}, 张小虎^{1,5}

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;

2. 国防科技大学图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073;

3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 4. 北京空间机电研究所, 北京 100094;

5. 中山大学航空航天学院, 广东广州 510000)

摘要:提出一种基于视觉的星箭分离相对位姿测量方法。在相机内参数已知的情况下,将相机安装于运载火箭,并在卫星上固连不少于6个合作标志,利用相机对合作标志实时成像;基于单目位姿估计的基本原理,采用高效n点渗透与正交迭代结合的方式解算卫星与火箭之间的相对位姿关系。仿真实验结果、半实物仿真实验结果证明了所提测量方法的可行性和准确性。

关键词:星箭分离;位姿估计;高效n点渗透;正交迭代

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)05-014-06

Photogrammetry for relative pose measurement of satellite and rocket

DING Shaowen^{1,2}, CHEN Hao³, WANG Jie^{1,4}, ZHANG Xiaohu^{1,5}

(1. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China;

4. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

5. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510000, China)

Abstract: A method of measuring the relative pose of satellite-rocket separation based on vision was presented. For the camera parameters were known, the camera was installed on the carrier rocket, and more than six cooperation signs were fixed on the satellite. The cameras can take pictures of the cooperation signs in real time. Based on the basic principle of monocular vision pose estimation, the relative pose relationship between satellite and rocket was solved by combining efficient perspective-n-point with orthogonal iteration. The simulation experiment and the semi-physical simulation experiment prove the feasibility and accuracy of the proposed method.

Key words: satellite-rocket separation; position and attitude estimation; efficient perspective-n-point; orthogonal iteration

星箭分离是使用爆炸螺栓将卫星和运载火箭分离,该过程中卫星与火箭末端的受力情况会发生变化,使卫星相对火箭末端产生纵向运动、横移和绕质心的转动。卫星和火箭末级的相对位姿发生异常的变化可能会导致二者发生相互碰撞^[1]。在星箭分离后,若卫星未钻出火箭末级上的主星适配器,会导致卫星无法以正常的姿态进入预定轨道,进而导致发射任务失败。因此研究星箭分离过程中火箭末端和卫星的相对位置、姿态和速度,并根据分离结果采取相应的措施进行纠正和补偿是非常必要的。这些测量结果也能更好地实现对卫星、火箭的控制,是卫星成功发射的重要保

证^[2-3]。传统的星箭分离过程相对位姿测量方法是基于箭载星载传感器完成的,但在恶劣的太空环境下一旦传感器出现故障,将无法准确完成位姿测量。为保证测量结果的可靠性和准确性,可使用多种测量方法对星箭分离后的相对位姿进行测量。

随着计算机技术的发展,目前基于计算机视觉的位姿测量方法在航天器近距离对接、大型工件现场安装过程中已经有了广泛的应用。视觉测量是一种非接触式的测量方法,通过光学测量原理和设备来实现对被测结构的测量。具有装置简单、成本低、精度和灵敏度高、自主性强、易于实现

* 收稿日期:2017-05-31

基金项目:国防科技大学科研计划资助项目(ZK16-03-27)

作者简介:丁少闻(1989—),男,浙江义乌人,博士研究生, E-mail: dswn0611@126.com;

张小虎(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师, E-mail: zhangxiaohu@nudt.edu.cn

等诸多优势,能在保证精度的同时,不对卫星的结构特征、载荷质量和运动特性带来任何干扰。另外,基于单摄像机的视觉测量系统无须立体匹配,就能够满足位姿测量系统的要求,非常适用于星箭分离过程中的相对位姿测量。将基于视觉的位姿测量结果与通过箭载设备上安装的传感器获得的测量结果进行结合,可以更好地完成星箭分离后卫星相对于火箭的位置姿态测量。本文提出基于视觉的星箭分离相对位姿被动式测量方法^[4]。

1 基本原理

1.1 位姿测量方法设计原理

设计的星箭分离相对位姿测量情况如图1所示。 $O_s - X_s Y_s Z_s$ 为卫星坐标系, $O_R - X_R Y_R Z_R$ 为火箭坐标系, $O_C - X_C Y_C Z_C$ 为相机坐标系。在卫星上布设在卫星坐标系中位置已知的标志点。将测量相机安装于运载火箭上,相机坐标系与运载火箭坐标系之间的固连关系可通过辅助设备高精度标定。实际应用中,以相机坐标系为传递,将相机与卫星的相对位姿转换为运载火箭与卫星的相对位姿。

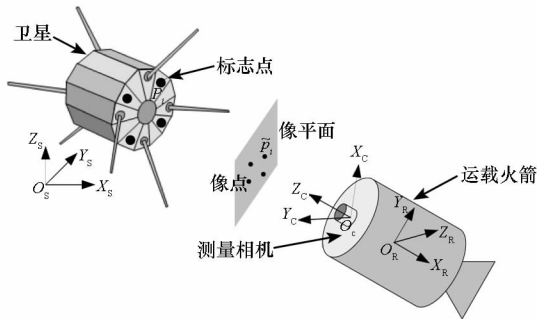


图1 星箭分离相对位姿测量示意图

Fig. 1 Relative position and attitude measurement of satellite-rocket separation

中心透视投影成像模型如图2所示。

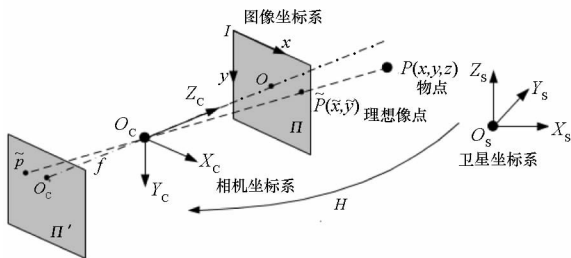


图2 中心透视投影成像模型

Fig. 2 Central perspective projection imaging model

图中, O_C 为相机光心,点划线为光轴, Π' 平面为反片位置, Π 平面为正片位置。为了表达直观,一般取正片做研究。 O 为图像主点, P 为物

点, \bar{p} 为 P 的像点,虚线为 P 点成像的光线^[4]。

相机安装前,对相机的内参数进行标定,并精确测量标志点在卫星坐标系中的坐标。星箭分离后,火箭上的相机对包含标志点的卫星进行采图。采图完毕后,按以下流程解算星箭分离时的相对位姿:

1)采用手动提点的方法提取标志点在图像上的像点坐标;

2)根据标志点的像点坐标和其在卫星坐标系中的坐标采用高效n点透视(Efficient Perspective-n-Point, EPnP)算法进行单目位姿测量得到位姿初值^[4],再对该值进行正交迭代优化,即可计算出卫星和火箭分离时,卫星坐标系相对于相机坐标系的旋转、平移关系;

3)由于相机坐标系与运载火箭坐标系的相对位姿关系已知,以相机坐标系为传递,计算火箭相对于卫星的相对位姿关系;

4)采用欧拉角来表示坐标系的旋转,令卫星坐标系 $O_s - X_s Y_s Z_s$ 先绕 Z 轴旋转 A_z ,再绕当前的 X 轴旋转 A_x ,最后绕当前的 Y 轴旋转 A_y ,则旋转矩阵 $R = R_y R_x R_z$,其中, R_x, R_y, R_z 分别由 A_x, A_y, A_z 确定^[5]。

1.2 位姿估计与优化算法

核心算法是单目位姿估计,高精度测量星箭分离时卫星相对火箭的位姿关系的关键在于是否能精确地求解出相机坐标系与世界坐标系之间的旋转、平移关系。

单目位姿估计是根据空间点在世界坐标系中的坐标和在图像坐标系中的坐标计算相机坐标系与世界坐标系之间位姿关系的方法。而求解相机位置和姿态的问题,通常被称为PnP问题。空间中至少有3个空间点才可以求解PnP问题,在求解P3P问题时,最多可有4个解^[6-7],PnP问题在求解时按照是否迭代可分为线性算法和非线性迭代算法两大类。其中非线性算法精度一般较高,且只输出一个解,求解的基本方法是迭代算法,该算法要求控制点个数 $n \geq 4$ 。迭代算法在计算时大多需要初始值,且计算复杂度较高,但由于该算法解算精度高而被广泛用于解决位姿测量问题^[8]。Ansar等提出的方法^[9]和Lepetit等提出的EPnP方法^[10]是两种比较好的解决位姿估计问题的算法。刘进博等^[11]在对基于特征点的空间运动目标的姿态估计算法进行科学的性能评价时提出,稳健n点透视(Robust Perspective-n-Point, RPnP)与正交迭代结合和EPnP与正交迭代结合

两种位姿测量算法的精度相当,且与其他传统的基于点的位姿估计算法相比,效率和精度最高。

先采用 EPnP 算法估计位姿初值,再利用非线性迭代的方法对初值进行优化,获得相机坐标系相对于世界坐标系的旋转、平移关系。

EPnP 算法的基本思想是利用由 4 个虚拟控制点建立的坐标系来表示空间内所有的点。再根据空间点在图像坐标系下的坐标求解 4 个虚拟控制点在相机坐标系下的坐标,可得到被测目标上的特征点在世界坐标系和相机坐标系下的坐标。根据空间点在两个坐标系下的坐标,可计算相机坐标系与世界坐标系的相对旋转、平移关系。该算法是一种高效且高精度的线性算法,可以求解所有控制点个数 $n \geq 4$ 的问题。以上过程的具体算法见文献[12]。

在得到相对位姿关系的初值后,采用 Lu 等提出的正交迭代(Orthogonal Iteration, OI)算法[13]对初值进行优化。该算法具有全局快速收敛、精度高和计算效率高等特点。

但迭代算法的全局最优和全局收敛是两个不同的概念[14],正交迭代算法会受到目标函数局部极小值的干扰,属于局部最优化方法。下面对该算法进行简要介绍。

正交迭代法采用正交投影模型建立坐标系[15],如图 3 所示。

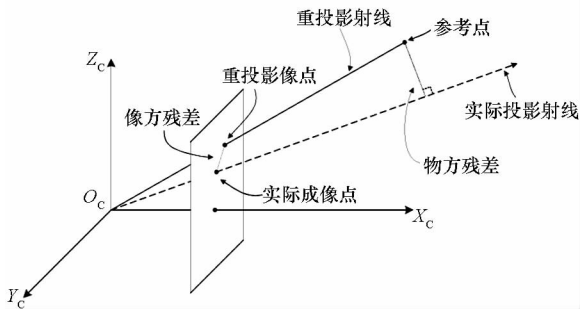


图 3 正交迭代算法坐标系

Fig. 3 Orthogonal iterative algorithm coordinate system

正交迭代的目的是最小化物方残差,物方残差的目标函数[16]为:

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{e}_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(I - \hat{\mathbf{V}}_i)(\mathbf{R}\mathbf{P}_i + \mathbf{T})\|^2 \quad (1)$$

式中, i 为第 i 个空间点, n 为控制点个数, I 为单位阵, $\hat{\mathbf{V}}_i = \frac{\hat{\mathbf{v}}_i \hat{\mathbf{v}}_i^T}{\hat{\mathbf{v}}_i^T \hat{\mathbf{v}}_i}$ 为视线投影矩阵, \mathbf{P}_i 为控制点坐标, $\hat{\mathbf{v}}_i = [u_i, v_i, 1]$ 为空间控制点在归一化像面上投影的像点坐标, \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 为相机在控制点坐标系下的

位姿。

而目标函数(1)在旋转矩阵 \mathbf{R} 已知的情况下,平移向量 \mathbf{T} 存在最优解,为:

$$\mathbf{T}(\mathbf{R}) = \frac{1}{n} \left(I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\mathbf{V}}_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{\mathbf{V}}_i - I) \mathbf{R} \mathbf{P}_i \quad (2)$$

迭代开始时给一个 \mathbf{R} 初值,可求出最优值 \mathbf{T} ,再采用基于奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法的绝对定向问题[17]的最优解对 \mathbf{R} 值更新,可不断迭代更新 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 。当第 k 次迭代的 \mathbf{R}^k 和 \mathbf{T}^k 已知时,可通过求解式(3)的绝对定向问题,获得第 $k+1$ 次迭代的 \mathbf{R} 。

$$\mathbf{R}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R}^k \mathbf{P}_i + \mathbf{T}^k - \mathbf{O}_i^k\|^2 \quad (3)$$

式中, $\mathbf{O}_i^k = \hat{\mathbf{V}}_i \mathbf{q}_i^k$ 表示 \mathbf{q}_i^k 在对应视线上的投影点, $\mathbf{q}_i^k = \mathbf{R}^k \mathbf{P}_i + \mathbf{T}^k$ 为第 k 次迭后参考点在经过当前的 \mathbf{R}^k 、 \mathbf{T}^k 变换,在相机坐标系下的坐标。

迭代停止的条件是目标函数或目标函数的相对变化量小到一定程度,或者迭代次数达到人为设定的次数上限。

2 实验结果

为验证所提方法,搭建实验平台,模拟星箭分离过程。在六自由度桁车上安装平面标志板模拟卫星,面对桁车方向并排布设高精度全站仪和单反相机。实验过程中,全站仪和相机保持静止,并且保证光照条件不变。在 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 平面标志板中心建立一个半径为 40 cm 的圆,在圆心处和圆周上每隔 30° 粘贴 13 个方形对角标志作为合作标志,并对其进行编号。定义标志板坐标系的坐标原点在圆心处, X 轴由原点 O 指向 1 点, Y 轴由原点 O 指向 4 点, Z 轴与平面标志板法向方向平行构成右手正交坐标系。用高精度全站仪测量得到这 13 个合作标志在全站仪坐标系下的坐标,再将其转换到标志板(目标)坐标系。实验前,采用 Zhang 的棋盘格标定法[18]对单反相机的内参数进行标定。经标定,相机分辨率为 4288×2848 ,主点为 $(1967.35576, 1542.44298)$,等效焦距为 $(5641.06664, 5623.34738)$,相差系数为 $[-0.05735, 0.13437, 0.00106, -0.00448, -0.12310]$ 。

用全站仪测量标志板上的 13 个标志点在全站仪坐标系下的坐标。通过坐标转换,标志点在标志板坐标系下的坐标值见表 1。

定义标志板先绕 Z 轴旋转形成偏航角 A_z ,再绕 X 轴旋转形成俯仰角 A_x ,最后绕 Y 轴旋转形成滚转角 A_y 。计算得到的旋转矩阵 $R = R_y R_x R_z$,将旋转矩阵分解为欧拉角,即为标志板绕 X 轴和 Y 轴的旋转角度。

将空间点按照表 1 进行共面分布,按照上述单反相机标定结果设置内参数及像差系数,在像差系数为 0、像差系数等于标定值、像差系

数为 0 时在图像中加入随机噪声、像差系数等于标定值时在图像中加入随机噪声这四种情况下进行仿真实验。真值与仿真实验结果见表 2。

在上述条件下,改变位姿估计时共面控制点个数,采用 EPnP + 正交迭代的位姿估计算法进行位姿估计,判断控制点个数对结果精度的影响,实验结果见表 3。

表 1 半实物仿真实验标志点坐标值(标志板坐标系)

Tab. 1 Semi physical simulation experiment mark point coordinate value(sign board coordinate system)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X/mm	0	396.246	354.838	199.773	1.601	-205.284	-346.615	-393.133	-332.301	-196.083	2.035	199.424	343.446
Y/mm	0	0.000	200.477	348.012	393.379	359.696	200.149	8.262	-194.867	-338.521	-395.574	-345.155	-195.375
Z/mm	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 2 真值与仿真实验结果

Tab. 2 Truth-value and simulation results

	真值	像差系数=0	像差系数=0 存在图像随机误差	像差系数=标定值	像差系数=标定值 存在图像随机误差
$R(1,1)$	1	1.000 000	0.999 994	0.999 994	1.000 000
$R(1,2)$	0	0.000 000	0.000 081	-0.000 002	0.000 058
$R(1,3)$	0	0.000 002	-0.003 504	0.003 475	0.000 846
$R(2,1)$	0	0.000 000	0.000 074	0.000 003	0.000 061
$R(2,2)$	-1	-1.000 000	-0.999 998	-0.999 999	-0.999 995
$R(2,3)$	0	0.000 000	-0.002 091	-0.001 498	-0.999 995
$R(3,1)$	0	0.000 002	-0.003 504	0.003 475	0.000 846
$R(3,2)$	0	0.000 000	0.002 091	0.001 498	0.003 065
$R(3,3)$	-1	-1.000 000	-0.999 992	-0.999 993	-0.999 995
$A_x/(^\circ)$	0	0.000 000	-0.004 640 985 7	0.000 115	-0.003 323 155 2
$A_y/(^\circ)$	0	0.000 114 591 56	-0.200 764 82	0.199 103	0.048 472 237
$A_z/(^\circ)$	-180	-180.000 00	179.880 19	179.914 170	179.824 39
$T(1,1)/mm$	0	-0.000 021	0.037 503	0.145 350	0.173 603
$T(2,1)/mm$	0	0.000 011	0.028 026	-0.060 784	-0.039 753
$T(3,1)/mm$	5000	5000.000	5000.187 500	4997.601 563	4997.764 160

表 3 不同个数控制点仿真实验结果

Tab. 3 Simulation results of different control points

n	$A_x/(^\circ)$	$A_y/(^\circ)$	$A_z/(^\circ)$	$T(1,1)/mm$	$T(2,1)/mm$	$T(3,1)/mm$
13	-0.003 3	0.048 5	179.824 4	0.173 6	-0.039 8	4997.764 2
12	-0.004 6	-0.024 9	179.809 8	0.182 7	-0.041 6	4997.819 3
11	-0.003 8	-0.034 7	179.799 6	0.180 6	-0.049 0	4997.810 6
10	-0.002 1	-0.159 0	179.860 1	0.124 8	-0.031 1	4998.065 9
9	-0.000 3	-0.189 0	179.795 9	0.108 5	-0.062 6	4998.047 4
8	0.005 9	-0.436 5	179.770 1	0.011 6	-0.081 5	4998.045 4
7	0.022 8	-0.750 0	179.481 9	-0.171 8	-0.175 0	4998.281 3
6	0.026 5	-0.382 3	179.136 4	-0.140 7	-0.036 1	5001.418 5
5	-0.006 7	0.360 1	178.992 6	0.250 1	0.129 3	5004.326 7
4	-0.019 1	-3.480 1	177.004 6	-0.056 9	0.485 9	5016.002 4

通过六自由度桁车控制标志板沿 X 轴 Z 轴做旋转和平移运动,每运动一次用单反相机采集图像,并用全站仪测量每次运动后标志板上的标志点在全站仪坐标系下的坐标。根据 13 个合作标志点在标志板坐标系中的坐标和每一时刻的像点坐标,计算采图时刻标志板坐标系与相机坐标系的旋转、平移关系,再以标志板为传递,计算两

个时刻标志板的旋转、平移关系作为测量值。根据两个时刻全站仪打点得到的标志点在全站仪坐标系下的坐标值和标志点在标志板坐标系下的坐标值分别计算标志板相对于全站仪的位姿关系,再以全站仪为传递,计算对应两个时刻标志板的相对旋转、平移关系作为真值。测量值与真值的结果见表 4。

表 4 半实物仿真实验误差统计结果

Tab. 4 Error statistics of semi physical simulation experiment

序号	T_x/mm	T_y/mm	T_z/mm	定位相对 误差/mm	姿态相对 测量 $A_x/(^\circ)$		姿态相对 测量 $A_y/(^\circ)$		姿态相对 测量 $A_z/(^\circ)$	
					测量值	误差	测量值	误差	测量值	误差
					1	-44.707 2	-168.856 0	3202.637 5	0.464 9	0.019 6
2	51.854 3	-159.498 6	3209.321 3	-1.485 4	0.071 7	0.003 1	0.017 5	-0.365 2	18.672 9	-0.237 4
3	180.142 5	-122.753 7	2716.871 1	5.824 6	0.016 3	-0.167 4	-0.018 2	-0.119 6	-10.318 3	-0.086 4
4	45.500 0	-148.875 7	2707.369 4	4.037 0	-0.055 0	-0.256 1	0.001 2	-0.228 3	-28.991 2	-0.323 7
5	188.530 9	-123.732 3	2716.159 7	-9.141 3	-10.885 5	2.673 2	-0.123 2	-0.969 1	0.034 8	-0.479 0
6	188.530 9	-123.732 3	2716.159 7	-9.504 7	10.257 0	2.945 3	0.070 3	-0.240 8	-0.088 1	-0.392 3
7	192.229 2	-141.921 7	2658.376 5	-9.944 2	21.142 7	2.959 3	0.160 6	-0.955 1	-0.156 7	-0.991 6
8	-0.372 0	-87.203 5	6278.459 5	9.689 6	0.005 0	-0.058 2	0.007 3	-0.710 1	0.052 2	-0.809 6
9	-0.372 0	-87.203 5	6278.459 5	9.411 1	-0.004 5	-0.028 2	-0.011 6	-0.802 8	0.073 8	-0.122 7
10	32.184 6	-132.197 6	4397.159 7	8.278 8	0.009 5	-0.021 4	0.018 9	-0.078 0	-0.021 6	-0.643 3

3 分析与讨论

改变仿真实验条件,由表 2 仿真实验结果可得,在存在图像随机噪声和像差系数的情况下,采用 EPnP + 正交迭代的方法进行位姿估计,相对位置测量误差小于千分之一,相对姿态测量误差小于 0.3° 。验证了所提测量方法在理论上的可行性。

根据文献[19,20]可知,当空间内有 4 个以上共面特征点时,可线性求解旋转矩阵和平移向量。由表 3 仿真实验结果可得,当控制点个数不少于 6 个时, (A_x, A_y, A_z) 接近于真值 $(0^\circ, 0^\circ, 180^\circ)$, (T_x, T_y, T_z) 接近于真值 $(0^\circ, 0^\circ, 5000^\circ)$,

其相对位置精度和姿态精度均较高。

根据表 4 可知,将半实物仿真实验结果与全站仪打点的真值对比得出,在 6 m 范围内,相对位置测量误差小于 1 cm,在 21° 范围内,相对姿态测量误差小于 3° 。绕 X 轴的姿态角测量误差略大于绕 Z 轴的姿态角测量误差。相对位置测量误差随分离距离的增加而增大,但测量误差在可控范围内,因此所提测量方法真实有效。

4 结论

根据上述理论分析和实验验证,可得出以下结论:

1) 采用 EPnP + 正交迭代算法进行单目位姿

估计时,当控制点个数不少于6个时,相对位置精度和姿态精度均较高。

2)方法真实有效,相对位置6 m范围内,相对位置测量误差小于1 cm。在 21° 范围内,相对姿态测量误差小于 3° 。

本文所提方法也存在一定的缺陷,例如实验过程中,无法保证标志板在桁车上完全静止,这可能是测量标志板绕 X 轴旋转角度时误差较大的原因之一,相机标定和像点提取时也存在误差,造成了实验的系统误差。如何对这些误差进行修正接下来的研究中的主要工作。

参考文献 (References)

- [1] 付碧红,杜光华. 搭载星与运载火箭分离的动力学研究[J]. 飞行力学, 2006, 24(1): 55-58.
FU Bihong, DU Guanghua. Separation dynamics process of piggyback satellite from launch vehicle[J]. Flight Dynamics, 2006, 24(1): 55-58. (in Chinese)
- [2] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1998.
ZHANG Renwei. Satellite orbit attitude dynamics and control[M]. Beijing: Beihang University Press, 1998. (in Chinese)
- [3] 李中郢,崔乃刚. 载人飞船与运载火箭分离过程的仿真研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(1): 119-122.
LI Zhongzhi, CUI Naigang. Separation process of manned spaceship from launch vehicle [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(1): 119-122. (in Chinese)
- [4] 丁少闻,张小虎,于起峰,等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070003.
DING Shaowen, ZHANG Xiaohu, YU Qifeng, et al. Overview of non-contact 3-D reconstruction measurement methods [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070003. (in Chinese)
- [5] 于起峰,尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社, 2009: 26-31.
YU Qifeng, SHANG Yang. Videometrics: principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009: 26-31. (in Chinese)
- [6] Gao X S, Hou X R, Tang J L, et al. Complete solution classification for the perspective-three-point problem [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(8): 930-943.
- [7] 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]//Proceedings of the 24th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011: 2969-2976.
- [8] Hartley R I, Kahl F. Global optimization through searching rotation space and optimal estimation of the essential matrix[C]// Proceedings of IEEE 11th International Conference on Computer Vision, 2007: 1-8.
- [9] Ansari A, Daniilidis K. Linear pose estimation from points or lines[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 578-589.
- [10] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EPnP: an accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [11] 刘进博,郭鹏宇,李鑫,等. 基于点对应的相机姿态估计算法性能评价[J]. 光学学报, 2016(5): 129-138.
LIU Jinbo, GUO Pengyu, LI Xin, et al. Evaluation strategy for camera pose estimation algorithm based on point correspondences[J]. Acta Optica Sinica, 2016(5): 129-138. (in Chinese)
- [12] 杨兵兵. 飞机进近及着陆视觉导航研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
YANG Bingbing. Vision-based navigation research for aircraft approaching and landing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [13] Lu C P, Hager G D, Mjolsness E. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6): 610-622.
- [14] 龙古灿. 无人机视觉着陆引导中的位姿估计问题研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2011.
LONG Gucan. Researches on pose estimation problem for UAV vision-based landing guidance[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [15] 姜广文. 相机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2010.
JIANG Guangwen. Study on pose relay videometrics method with camera-series and ship deformations measurement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [16] 李鑫,龙古灿,刘进博,等. 相机位姿估计的加速正交迭代算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 266-273.
LI Xin, LONG Gucan, LIU Jinbo, et al. Accelerative orthogonal iteration algorithm for camera pose estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 266-273. (in Chinese)
- [17] Umeyama S. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(4): 376-380.
- [18] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] 胡占义,雷成,吴福朝. 关于P4P问题的一点讨论[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 770-776.
HU Zhanyi, LEI Cheng, WU Fuzhao. A short note on P4P problem[J]. Acta Automatic Sinica, 2001, 27(6): 770-776. (in Chinese)
- [20] Penna M A. Determining camera parameters from the perspective projection of a quadrilateral [J]. Pattern Recognition, 1991, 24(6): 533-541.