

航天光学遥感成像半实物仿真系统研究

李明譔, 江刚武, 张锐, 张一
(解放军信息工程大学, 河南 郑州 450001)

摘要:航天光学遥感器的研究周期长、成本高,为了保证航天遥感卫星在轨成像性能,在卫星发射前,必须在地面进行深入可靠的仿真试验研究。本文建立了由六自由度机械臂为运动平台的航天光学遥感成像半实物仿真系统,首先建立坐标系模型并求取坐标转换参数,然后依据STK(System Tool Kit)软件生成星历数据,经坐标转换后输入到机械臂控制系统,最后根据TDI CCD相机的成像原理,控制机械臂使TDI CCD相机对三维地形沙盘线性推扫,从而获取线阵仿真影像。仿真结果表明,建立了正确有效的仿真坐标系,可快速、稳定、实时地模拟航天遥感对地推扫成像过程,且仿真影像中均匀分布的12个圆形靶标的圆度均优于0.95,证明仿真影像质量较高,可满足遥感目标的探测与识别仿真算法研究的需求,为航天光学遥感成像仿真系统的研究提供一定参考。

关键词:半实物仿真;时间延时积分电荷耦合器件;六自由度机械臂;坐标转换;推扫成像

中图分类号:TP722.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.018

Research on HIL simulation system for space optical remote sensing imaging

LI Ming-xuan, JIANG Gang-wu, ZHANG Rui, ZHANG Yi
(The PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract:Space optical remote sensor has the characteristics of long development cycle and high cost. Before the launch of the satellite, the simulation experiment must be carried out in detail on the ground in order to ensure the performance of aerospace remote sensing imaging system. An aerospace remote sensing imaging HIL simulation system is constructed, which uses six degrees of freedom manipulator as its motion platform. Firstly, the coordinate systems were established and the coordinate system transformation parameters were obtained. Then the ephemeris data which were generated by STK (system Tool Kit) software were input to the control system after coordinate transformation. Lastly, according to the imaging principle of TDI CCD camera, the target's simulation image was obtained along with the movement of the manipulator by push-broom scanning three-dimensional terrain sand table. The results of simulation test show that the correct and effective simulation coordinate systems can fast, stably, and real-time simulate the process of aerospace remote sensing imaging in this system. The circularities of 12 circular targets uniformly distributed in the simulation image are better than 0.95, which proves that the quality of simulation image is higher, and the simulation image of terrain sand table could meet the demand of remote sensing target detection and research on simulation recognition algorithm, which provides a reference for the research on space optical remote sensing imaging simulation system.

Key words:hardware in the loop simulation; time delayed and integration CCD; six degrees of freedom manipulator; coordinate transformation; push-broom imaging

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41471387)资助。

作者简介:李明譔(1990-),男,硕士研究生,主要研究领域为计算机视觉与智能测量系统。E-mail: lmxuan0529@163.com

收稿日期:2016-09-27; **修订日期:**2016-10-27

1 引言

半实物仿真技术是一种介于物理仿真与数字仿真之间的仿真方法,具有比物理仿真节约成本、比数字仿真具有更高可靠性的优点,在一定程度上可减少建模所带来的仿真误差^[1]。航天光学遥感器的研究周期长、成本高,在卫星发射前,对航天遥感卫星的成像仿真的研究具有重要意义。目前国内外采用半实物仿真方法对航天光学遥感成像系统的研究较少,国外的遥感仿真系统多采用数字仿真方法可以得到精度较高的仿真图像^[2-5]。国内有少数机构采用全物理仿真方法研究星载光学遥感成像仿真系统^[6],多数学者、机构采用数字仿真方法实现光学遥感成像系统的仿真,且实时仿真方法使用较少^[7-10]。本文首先系统地介绍了整个航天光学遥感成像半实物仿真系统,并提出了相应的坐标系模型和坐标转换标定方法,在此基础上结合六自由度机械臂运动特性与 TDI CCD 相机成像原理进行路径规划,从而对三维地形沙盘推扫成像,以模拟航天 TDI CCD 相机对地推扫成像过程。

2 半实物仿真系统构成与实现

2.1 半实物仿真系统构成

航天光学遥感系统是指地面景物目标经过反射或辐射的信息,经大气传输到卫星平台上的遥感器成像,光电转换之后传输至地面,经处理再现景物信息的全系统^[11]。航天光学遥感成像链路通常由场景目标、照明源、大气、卫星平台、光学遥感器、数据处理与传输、地面接收与处理等组成,整个航天遥感对地观测成像过程示意图如图 1 所示。

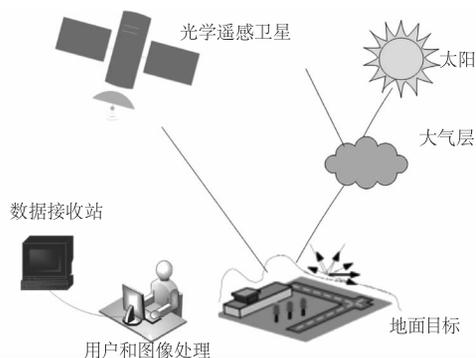


图 1 航天遥感对地观测成像示意图

Fig. 1 Earth observation imaging for Space RS

针对航天光学遥感卫星对地面目标推扫成像环节,本文构建了一种基于六自由度机械臂为运动平台的航天光学遥感成像半实物仿真系统,由三维地形沙盘、激光投线仪、光源、线阵 TDI CCD 相机、高精度六自由度机械臂、圆形靶标和计算机软硬件

组成。

三维地形沙盘根据郑州及附近区域的实际地形按照一定比例制作而成,安置固定在墙上,主要用于仿真目标场景搭建,其中沙盘的水平比例尺 1:10000,垂直比例尺 1:3000,长 7 m,宽 3.5 m,线阵 TDI CCD 相机采用加拿大 Teledyne DALSA 公司的 Dalsa ES-S0-12K40 线阵 CCD 全色摄像机,Dalsa ES-S0-12K40 线阵摄像机是新一代高灵敏度的 TDI 线阵工业数字摄像机,集合了高分辨率、高灵敏度等特点,镜头采用德国 Schneider 公司 Apo Componon HM 型号,相机和镜头的主要参数如表 1 所示。

表 1 TDI CCD 相机和镜头参数

Tab. 1 Parameters of TDI CCD camera and lens

分辨率	像元尺寸	最大行频	镜头焦距
12000 × 64 TDI	5.2 μm	90 kHz	60 mm

相机运动平台采用 ABB 公司 IRB2600ID 型号机器人,具有荷重能力强、工作范围大等特点,机器人最大载荷、供电电压、定位精度等性能参数见表 2。

表 2 机器人性能参数

Tab. 2 Performance parameters of robot

最大载荷	位置重定位	路径重定位	供电电压
15 kg	0.03 mm	0.3 mm	380 V

本文采用在航空航天领域广泛应用的仿真设计软件 STK 软件来完成半实物仿真系统的轨道仿真与坐标数据生成。STK 是由美国 AGI 公司开发的一款在航天工业领域处于领先地位的可视化、组件化仿真分析软件,具备良好的可视化效果、强大的数据处理能力以及多种分析工具,核心功能包括生成轨道星历表、可见性分析及遥感器覆盖分析等^[12]。

仿真过程如下:

1) 首先确定目标仿真卫星的轨道参数,STK 根据轨道参数可生成仿真卫星对地观测二维和三维场景模型,仿真卫星开始运行后,当仿真卫星星下点轨迹过郑州时,此时遥感卫星对郑州地区成像,输出并保存仿真遥感卫星成像时间的地心地固坐标值数据,由于卫星过顶郑州时间很短,在此成像时间段内卫星的轨道运动可近似为直线运动。

2) 获得仿真卫星的轨道坐标后经坐标转换输入到六自由度机械臂控制系统中,并控制相应运动模式,TDI CCD 相机搭载在六自由度机械臂末端,伴

随着六自由度机械臂的运动,TDI CCD 相机对三维地形沙盘进行推扫。

3)在六自由度机械臂运动的同时,根据 TDI CCD 成像原理设置相机行频使其清晰成像,最终经图像采集卡传入计算机设备获得仿真遥感图像,从而模拟航天 TDI CCD 相机对地推扫成像过程。

整个半实物仿真系统框图如图 2 所示。

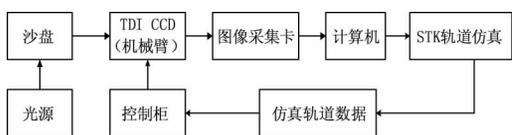


图 2 半实物仿真系统框图

Fig. 2 Block diagram of HIL simulation system

2.2 半实物成像仿真系统实现

2.2.1 仿真系统坐标系建立

模拟航天遥感对地观测成像时,需要获取航天遥感成像实际坐标数据和仿真坐标数据,因此系统中定义了地心地固坐标系、大地坐标系、沙盘坐标系和机器人坐标系。

地心地固坐标系又称地心固连坐标系,它是随着地球一起转动的坐标系。坐标系原点为地心,基本面为地球赤道面, Z 轴是垂直于赤道面的地球自转轴。 X 轴和 Y 轴在赤道平面内, X 轴指向本初子午线和赤道交点, Y 轴与 X 轴垂直, X 、 Y 、 Z 符合右手定则,地心地固坐标系坐标值用于描述卫星及星下点的位置。

大地坐标系是以参考椭球面为基准面的坐标系,它的坐标面是起始大地子午面和赤道面。地面点的位置可用大地经度、大地纬度和大地高表示。文中通过在沙盘上选取若干位置的大地经度和大地纬度用于建立地心地固坐标系与沙盘坐标系的转换关系。

沙盘坐标系 $O_1 - X_1Y_1Z_1$ 是自定义坐标系,考虑地形沙盘的安装位置以及水平比例尺和垂直比例尺等因素,通过激光投线仪在地形沙盘上投射水平和垂直激光,分别作为沙盘坐标系的 X_1 轴和 Y_1 轴,其中 X_1 轴与沙盘的长边大致平行, Y_1 轴与沙盘的短边大致平行, Z_1 轴方向由右手定则得出,沙盘坐标系作为物方坐标系用于描述仿真目标的实际位置。

机器人坐标系包括基坐标系 $O_2 - X_2Y_2Z_2$ 和工具坐标系 $O_3 - X_3Y_3Z_3$ 。基坐标系原点位于机器人安装基座的中心, X_2 轴指向安置基座的正前方, Z_2 轴方向为基座平面的法线方向且向上为正, Y_2 轴方向由右手定则得到,基坐标系作为过渡坐标系,用于

联系沙盘坐标系与工具坐标系的作用;工具坐标系原点默认情况下在机械臂第六轴法兰盘中心, X_3 轴、 Y_3 轴在法兰盘平面内且相互垂直, Z_3 轴右手定则得到,机器人工具坐标系用于模拟卫星轨道坐标系,工具坐标系和基坐标系的转换关系可在机器人移动的同时设置一定的采样频率由控制系统直接输出获取。

其中沙盘坐标系和机器人基坐标系与工具坐标系在仿真实物中示意图如图 3 所示。

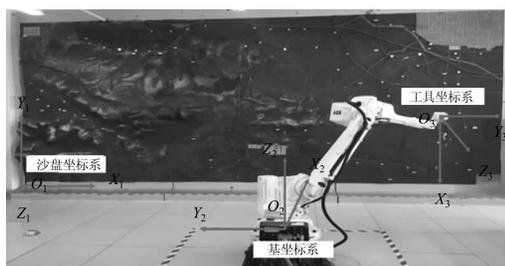


图 3 仿真实物图

Fig. 3 Simulation physical image

2.2.2 坐标系转换

建立仿真所需的坐标系后,为了将仿真轨道坐标输入到六自由度机械臂的控制系统中驱动机器人运动,从而搭载 TDI CCD 相机对沙盘进行推扫成像,需要对上述坐标系下的坐标值在同一时刻下进行坐标转换,图 4 为整个坐标转换流程, $M1$ 表示地心地固坐标系与沙盘坐标系的转换关系; $M2$ 表示沙盘坐标系与机器人基坐标系转换关系; $M3$ 表示机器人基坐标系与工具坐标系转换关系。

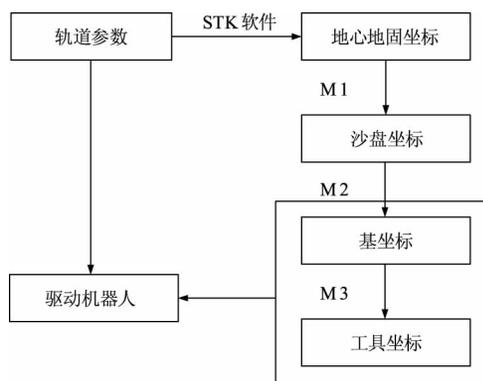


图 4 坐标转换流程

Fig. 4 Process of coordinate transformation

在沙盘中多个位置布设反光靶标作为控制点,控制点在沙盘坐标系下的分布如图 5 所示,通过全站仪量测可得控制点在沙盘坐标系下坐标值,通过在地图上量测获得控制点的经纬度,每一个点的经纬度都可以转换到地心地固坐标系,最终根据对偶四元数方法^[13]可解出地心地固坐标系与沙盘坐标

系的转换关系 M1。

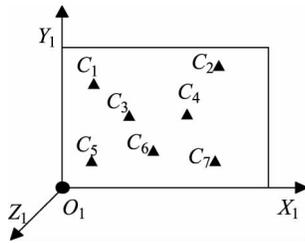


图 5 控制点分布示意图

Fig. 5 Distribution of control points

在机器人工具坐标系原点 O_3 布设一个反光靶标作为控制点,如图 6 所示,多次改变机器人位置和姿态,通过全站仪量测可获得控制点在沙盘坐标系下坐标值,通过机器人运动控制系统可获得控制点在基坐标系下的坐标值,最终根据对偶四元数方法可求出沙盘坐标系和基坐标系的转换关系 M2。

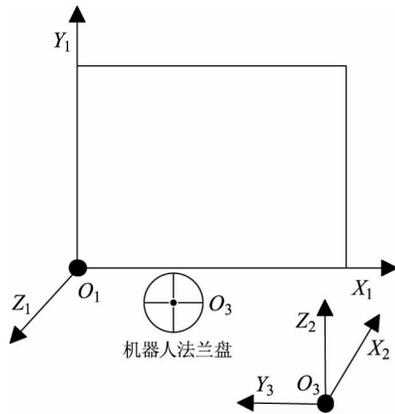


图 6 控制点位置示意图

Fig. 6 Position of control point

基坐标系与工具坐标系的转换关系 M3 由机器人控制系统直接输出获得。

通过上述方法求解的坐标转换参数 M1 和 M2 如表 3、表 4 所示,表中 λ 表示缩放比例因子, X 、 Y 、 Z 表示平移量, Q1 到 Q4 表示四元数的四个分量。

表 3 坐标转换参数

Tab. 3 Parameters of coordinate transformation

转换关系	λ	X/m	Y/m	Z/m
M1	0.091641	-5.6273	-8.5833	-629.6572
M2	0.999328	2.6672	3.8008	-0.1435

表 4 坐标转换参数

Tab. 4 Parameters of coordinate transformation

转换关系	Q1	Q2	Q3	Q4
M1	0.1742	-0.0900	0.4645	0.8636
M2	0.4966	-0.5055	-0.5047	0.4931

2.2.3 推扫成像与质量评价

TDI CCD 在低照度下具有良好的成像性能,具有信噪比高、结构小型轻量化的优点^[14],是航天光学遥感成像中最常用的遥感器之一。TDI CCD 是一种线阵推扫式 CCD,采用时间延迟方法实现对同一目标多次曝光,以增强光能的吸收。TDI CCD 相机在推扫成像时要求运动平台具有相当的稳定性且需要防止像移失配,否则难以获取正确的目标图像信息^[15]。

由于 TDI CCD 的特殊工作方式,需同一列上的每一个像元都对同一个目标曝光积分,即要求 TDI CCD 的行扫描速率与平台的运动速率要严格同步,才能保证成像质量。因此根据 TDI CCD 的成像原理,目标景物的像移动一行时间 t 称为延迟积分时间,则有:

$$t = d/V_1 \tag{1}$$

式中, d 为像元尺寸; V_1 为像移速度。对于摄影系统有:

$$V_1 = (V_g/H) \times f \tag{2}$$

式中, f 为相机焦距; V_g 为目标景物相对移动速率; H 为摄影距离。因此有:

$$t = \frac{d/f}{V_g/H} \tag{3}$$

为了保证成像质量,需满足 TDI CCD 的行周期 T 与延迟积分时间 t 相等,即有:

$$T = t = \frac{d/f}{V_g/H} \tag{4}$$

则行扫描速率为:

$$f_v = 1/T = \frac{V_g/H}{d/f} \tag{5}$$

TDI CCD 相机可通过相机控制软件改变行扫描速率和仿真影像的分辨率。在像元尺寸和焦距不变时,行扫描速率与摄影距离和目标景物的移动速度有关。式(5)中分子被称作速高比,可见速高比的变化必会引起行扫描速率的变化,因此只有设置相应的行扫描速率才能得到高质量的仿真影像。

为评价仿真系统的成像质量,在系统中三维地形沙盘上布设圆形靶标,采用最小二乘法拟合圆形靶标,通过求取各个圆形靶标的圆度来评价 TDI CCD 相机的像移失配误差,从而评价成像质量。设边缘点的坐标为:

$$(x_i, y_i), (i = 1, 2, \dots, n) \tag{6}$$

则最小二乘法求取的圆心坐标 (x_0, y_0) 和半径 R 分别为:

$$\begin{cases} x_0 = 2/n \sum_{i=1}^n x_i \\ y_0 = 2/n \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (7)$$

$$R = 1/n \sum_{i=1}^n [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2]^{1/2} \quad (8)$$

圆度是指用于描述一个闭合轮廓接近圆的程度,圆度 C 定义为:

$$C = F/(D_{max}^2 \times \pi), C \in (0,1] \quad (9)$$

式中, F 为拟合得到的闭合轮廓的面积; D_{max} 为拟合圆心到轮廓上最远距离; π 值取 3.1415926, 当闭合轮廓为标准圆时; C 值为 1。

3 仿真试验

3.1 星下点轨迹生成

为了模拟遥感卫星的成像特性和获得遥感卫星对郑州地区成像时刻星下点坐标数据,在 STK 软件仿真场景中设置仿真卫星名称为 Satellite, 选取高度 694 km 的近圆形太阳同步回归轨道, 轨道倾角 98.7° , 降交点时刻选取上午 10:30, 遥感卫星搭载一台 TDI CCD 相机, 对地进行成像。针对上述卫星场景, 以垂直成像为例, 仿真区间为遥感卫星由北向南对郑州某地推扫成像过程, 得到过顶郑州 UTC 时间为 17 Jun 2016 10:57:05 ~ 17 Jun 2016 10:57:09, 二维场景星下点轨迹如图 7 所示, 三维场景星下点轨迹如图 8, STK 输出的地心地固坐标数据如表 5 所示。

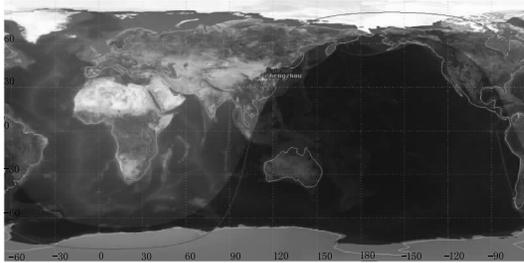


图 7 二维场景星下点轨迹图

Fig. 7 Ephemeris image of two-dimensional scene

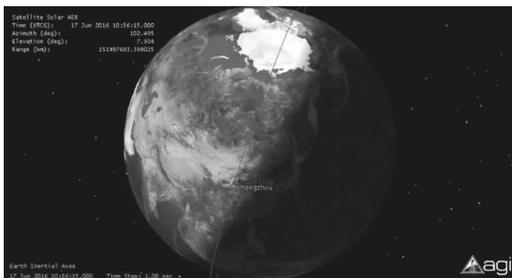


图 8 三维场景星下点轨迹图

Fig. 8 Ephemeris image of three-dimensional scene

表 5 大地坐标与地心地固坐标

Tab. 5 Geodetic coordinates and ECEF

点号	大地坐标/(°)		地心地固坐标/km		
	经度	纬度	X	Y	Z
S1	113.562	34.781	-2262.777404	5188.759471	3907.093827
S2	113.554	34.718	-2262.814647	5193.370697	3900.940818
S3	113.525	34.656	-2262.848467	5197.975611	3894.783043
S4	113.507	34.594	-2262.878866	5202.574206	3888.620509
S5	113.489	34.531	-2262.905844	5207.166475	3882.453224

其中 S1 ~ S5 表示仿真星下点轨迹过郑州的坐标点号, 每一个星下点点号的位置对应相应的经纬度坐标和地心地固坐标; 经坐标转换后得到沙盘坐标与基坐标如表 6 所示。

表 6 沙盘坐标与基坐标

Tab. 6 Coordinates of sand table and robot base

点号	沙盘坐标/m			基坐标/m		
	X	Y	Z	X	Y	Z
S1	5.2463	3.3812	0.4577	2.0878	-1.4407	3.2187
S2	5.0833	2.6958	0.4731	2.0787	-1.2756	2.5342
S3	4.9203	2.0104	0.4878	2.0704	-1.1106	1.8496
S4	4.7572	1.3251	0.5016	2.0629	-0.9455	1.1652
S5	4.5941	0.6397	0.5147	2.0562	-0.7804	0.4807

3.2 路径规划与成像仿真

六自由度机械臂作为 TDI CCD 相机的运动平台, 具有良好的稳定性和可靠性, 直接决定了最终 TDI CCD 相机推扫成像的质量, 下面为六自由度机械臂的路径规划与成像仿真过程。

1) 考虑沙盘模型大小和目标仿真影像的成像时间的限制, 设置相机采集行扫描速率为 800 Hz, 控制六自由度机械臂的运动速度为 0.15 m/s, 在像元尺寸和焦距一定的条件下, 依据公式(5) 可得相机的摄影距离 H 为 2.1635 m, 结合通过对偶四元数方法求取的坐标转换参数, 沙盘坐标系原点在机器人基坐标系的 X 方向坐标值为 2.6672 m, 得到推扫成像时机器人目标点在基坐标系下 X 方向的坐标为 0.5037 m, 从而得到最终仿真坐标数据, 如表 7 所示, 其中 ST1 ~ ST5 表示成像时间内机器人第六轴法兰盘中心在机器人基坐标系下的位置。

2) 控制机器人将第六轴法兰盘中心移动到表 7 中的第一个目标点坐标值的位置, 记录此时工具坐标系原点相对于机器人基坐标系的四元数姿态、轴配置参数。

3) TDI CCD 相机搭载在机械臂末端, 且相机垂

直安装在机械臂第六轴法兰盘平面即相机光轴中心与法兰盘中心在工具坐标系 X 方向重合,设置机器人第六轴的角度使工具坐标系的 Y 轴沿着表7中目标点运动方向。

表7 目标点坐标

Tab.7 Coordinates of targets

点号	时间/UTCG	最终基坐标/m		
		X	Y	Z
ST1	17 Jun 2016 10:57:05.000	0.5037	-1.4407	3.2187
ST2	17 Jun 2016 10:57:06.000	0.5037	-1.2756	2.5342
ST3	17 Jun 2016 10:57:07.000	0.5037	-1.1106	1.8496
ST4	17 Jun 2016 10:57:08.000	0.5037	-0.9455	1.1652
ST5	17 Jun 2016 10:57:09.000	0.5037	-0.7804	0.4807

4) 设置好目标点运动方向后,将目标点坐标输入到机器人控制系统中,驱动六自由度机械臂运动。TDI CCD 相机伴随着六自由度机械臂的运动对沙盘推扫成像,经图像采集卡直接传输、存储到计算机中。

5) 根据公式(6)、(7)、(8)求解仿真影像中圆形靶标参数。

通过上述步骤,获取的仿真影像以及圆形靶标检测结果如图9所示,仿真影像求解的圆形靶标参数如表8所示。

表8 圆形靶标参数

Tab.8 Parameters of circular targets

x_0 /pixel	y_0 /pixel	R /pixel	C
298.4	5334.4	28.2	0.969
669.7	3705.6	28.0	0.957
1258.6	4502.9	27.9	0.965
1293.8	7652.2	28.2	0.952
1548.4	7980.5	28.1	0.967
1612.9	3355.4	27.8	0.958
2860.3	3500.3	28.0	0.956
3227.6	2512.1	27.8	0.953
3458.7	6865.8	27.9	0.956
4791.5	5470.4	27.7	0.964
5095.0	9907.8	27.9	0.977
5166.2	8250.8	28.0	0.958

仿真结果表明,仿真影像成像清晰,影像中均匀分布的12个圆形靶标的圆度优于0.95,证明仿真系统获取了影像质量较高,达到仿真的预期目的,可

为后续仿真系统的评估以及遥感目标探测与识别提供重要的数据源。

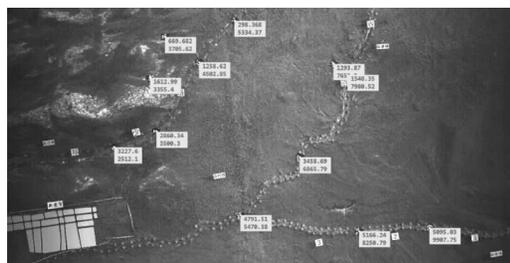


图9 仿真影像

Fig.9 Simulation image

4 结论

针对航天光学遥感成像链的关键环节构建了航天遥感成像半实物仿真系统,建立了仿真所需坐标系模型并求取坐标转换参数,根据TDI CCD相机的成像原理对机械臂路径规划,控制机械臂使TDI CCD相机对三维地形沙盘推扫成像。仿真试验结果表明依据建立的仿真坐标系可快速、稳定、实时模拟航天TDI CCD相机对地推扫成像过程,获得了三维地形沙盘的线阵仿真影像,且仿真影像中12个圆形靶标的圆度均优于0.95,证明仿真影像质量较高,可满足遥感目标的探测与识别仿真算法研究的需求,为航天光学遥感成像仿真系统的研究提供一定参考。

参考文献:

- [1] SHAN Yong. Research and implementation of key technologies of Real-Time Semi-Physical simulation platform [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
单勇. 实时半实物仿真平台关键技术研究及实现[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
- [2] Kerekes J P, Landgrebe D A. Modeling, simulation and analysis of optical remote sensing systems [D]. Indiana: Doctoral Dissertation of Purdue University, 1989.
- [3] Borner A, Wiest L, Keller P, et al. Sensor; a tool for the simulation of hyper spectral remote sensing systems [J]. ISPRS J. Photogr. Remote Sensing, 2001, 55: 299 - 312.
- [4] SUN Weijian, LIN Jun, RUAN Ningjuan, et al. Summarization and consideration of overseer's simulation software development for optical remote sensing system [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 03: 70 - 75. (in Chinese)
孙伟健, 林军, 阮宁娟, 等. 国外光学遥感成像系统仿真软件发展综述与思考 [J]. 航天返回与遥感, 2010, 03: 70 - 75.

- [5] BU Fan. Study on modeling and simulation of optical remote sensing system and image processing technology [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
卜凡. 光学遥感系统的建模仿真及图像处理技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [6] ZHANG Liu, SUN Zhiyuan, JIN Guang. Design of physical simulation system for TDI CCD dynamic imaging[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 03: 641 - 650. (in Chinese)
张刘, 孙志远, 金光. 星载 TDI CCD 动态成像全物理仿真系统设计[J]. 光学精密工程, 2011, 03: 641 - 650.
- [7] PAN Haibin, CONG Mingyu, ZHANG Wei, et al. Imaging model study of space objects from space remote sensor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 11: 1699 - 1702. (in Chinese)
潘海斌, 丛明煜, 张伟, 等. 航天遥感器的空间目标成像模型研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 11: 1699 - 1702.
- [8] YUE Qingxing. Research on image simulation of satellite three-line-array TDI CCD camera [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. (in Chinese)
岳庆兴. 卫星三线阵 TDI CCD 相机成像仿真研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [9] RUAN Ningjuan, ZHUANG Xuxia, LI Tuotuo. End to end simulation and analysis of space optical remote sensing system [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013, 06: 36 - 43. (in Chinese)
阮宁娟, 庄绪霞, 李妥妥. 空间光学遥感系统全链路仿真与分析 [J]. 航天返回与遥感, 2013, 06: 36 - 43.
- [10] MA Xiaoshan, MENG Xin, YANG Zhen, et al. Framework of entire image chains simulation for optical remote sensing images system [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2012, 04: 392 - 399. (in Chinese)
马晓珊, 孟新, 杨震, 等. 光学遥感成像系统全链路仿真框架研究 [J]. 量子电子学报, 2012, 04: 392 - 399.
- [11] MA Wenpo. Space optical remote sensing technology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010: 10 - 15. (in Chinese)
马文坡. 航天光学遥感技术 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 10 - 15.
- [12] CHEN Xijun, LI Ren. Simulation technology of satellite flight orbit based on STK [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2008, 03: 339 - 343. (in Chinese)
陈希军, 李仁. 基于 STK 的卫星飞行轨迹仿真技术 [J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2008, 03: 339 - 343.
- [13] GONG Hui, JIANG Gangwu, JIANG Ting. Close-Form solution of absolute orientation based on dual quaternion [J]. Surveying and Mapping Technology University, 2009, 06: 434 - 438. (in Chinese)
龚辉, 江刚武, 姜挺, 等. 基于对偶四元数的绝对定向直接解法 [J]. 测绘科学技术学报, 2009, 06: 434 - 438.
- [14] ZHOU Gang, ZHAI Linpei, WANG Dejiang. High speed image real-time storage system for airborne TDI CCD camera [J]. Laser & Infrared, 2009, 03: 322 - 325. (in Chinese)
周刚, 翟林培, 王德江, 等. 机载 TDI CCD 相机高速图像实时存储系统 [J]. 激光与红外, 2009, 03: 322 - 325.
- [15] JIN Shuying, HU Fen, WANG Mi, et al. A novel coordinate inverse transform method for TDI CCD push broom images [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 05: 590 - 597. (in Chinese)
金淑英, 胡芬, 王密, 等. 一种 TDI CCD 推扫影像的坐标反变换方法 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2016, 05: 590 - 597.