

文章编号 1004-924X(2009)12-3062-07

深空背景点目标红外序列图像生成

李克新, 丛明煜, 张 伟, 曹移明, 鲍文卓

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对空间目标天基探测仿真系统需求,提出了一种基于卫星工具套件(STK)+MATLAB的深空背景点目标红外序列图像生成方法。点目标表面温度计算采用了比节点网络法更高效的等温简化模型以提高仿真效率;由比低分辨率光谱仪(LRS)模型更完备的中段空间实验卫星(MSX)红外星表提供深空背景模型,扩展了探测系统仿真应用领域;同时,建立了以电子数表征的目标背景照度和图像灰度转换模型。图像仿真过程中加入卫星扰动误差、相机测量误差和焦面电子学噪声,仿真生成的图像序列更接近真实物理过程。该仿真方法可以模拟任意时刻、任意指向和任意光学视场 $4\sim 26\mu\text{m}$ 的点目标红外图像序列,图像生成实时性好。文章最后给出了某空间目标的红外序列图像仿真实例。

关键词:红外序列图像;图像生成;空间目标;深空背景;红外星表

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A

Infrared sequence image generation of point target in deep space

LI Ke-xin, CONG Ming-yu, ZHANG Wei, CAO Yi-ming, BAO Wen-zhuo

(Research Center of Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to meet the demands of space-based detection simulation system, a method of infrared sequence image generation for point targets in deep space background is presented based on the Satellite Tool Kit(STK) and MATLAB. A simple isothermal model more efficient than the node network method is used to calculate the temperature of the space targets to improve the simulation efficiency, and a model of celestial background is presented based on Midcourse Space Experiment(MSX) infrared stellar catalog more complete than the Low Resolution Spectra(LRS) stellar catalog to extend the application of the space-based detection simulation system. The conversion model between the irradiance of target background and the image gray is established by calculating the electron numbers received by the detectors. The disturbance error of satellite, measurement error of camera and electronic noise of Focal Plane Array(FPA) are considered to generate images closed to a real world. Experimental results show that the proposed method can simulate the infrared sequence images of point targets at anytime, any viewpoint and any Field of View(FOV) (wavebands range from $4\mu\text{m}$ to $26\mu\text{m}$). Finally, an infrared image sequence of some point targets are simulated.

收稿日期:2008-12-12;修订日期:2009-03-09.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA1280)

Key words: infrared sequence image; image generation; space target; deep space background; infrared stellar catalog

1 引言

天基平台对空间目标信息的获取和处理是当前一个热门研究领域。近年来,对空间目标探测系统的仿真受到了越来越多的重视,而空间目标红外动态图像生成技术是其中一项关键技术。由于其既可以降低系统的研制成本,又能提高整个系统的效费比,从而使其具有重要的理论意义和广泛的应用前景。

目前,直接使用红外目标仿真软件包,结合传热学定律和红外传感器模型进行图像仿真是红外图像仿真工作的主要思路^[1]。对于空间目标的图像仿真,北京航空航天大学姜志国等人进行了星载红外传感器成像仿真,并利用真实大气地球背景作为底图,将导弹目标嵌入背景图像中合成了预警图像,利用 VC 设计开发了导弹预警卫星红外图像计算机仿真软件^[2];浙江大学和国防科技大学的王章野和李霞等人开发了卫星和深空背景的红外辐射特性理论模型,实现了空间目标及其深空环境的动态景象生成^[3];国防科技大学的李志军、陈曾平等研究了不同距离、不同姿态空间目标与深空背景合成的红外图像仿真序列,实现了探测器不断接近目标过程中的红外辐射图像仿真^[4]。清华大学的郭明等人提出了一种基于 OpenGL 的空间目标图像生成方法,空间目标采用 AutoCAD 几何建模,红外模型采用节点网络法建立热平衡方程,软件开发环境为 VC++^[5]。上述文献均采用对空间目标进行几何分割,然后使用节点网络法建立目标的热平衡方程计算目标温度,深空背景红外模型均是采用 IRAS 的 LRS 红外星表,最终将目标和背景合成为红外图像序列。采用节点网络法计算目标温度场精度较高,但是运算量大,不利于图像仿真的实时实现。对于点目标成像,可以采用简化的温度计算模型。此外,上述仿真方法都没有考虑成像过程的相机测量误差、卫星扰动误差及焦面电子学噪声。

本文提出的深空背景点目标红外图像序列生

成方法考虑了仿真的实时性及有效性,目标温度计算采用了简化的等温模型,深空背景恒星模型采用 MSX 红外点源星表,仿真过程加入了相机测量误差和卫星抖动误差及焦面电子学噪声,使得仿真结果更接近于真实物理过程。

2 空间目标平衡温度计算模型

空间目标在宇宙空间的热平衡方程为:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6, \quad (1)$$

其中, Q_1 是太阳对目标的直接加热, Q_2 是地球及大气系统对太阳的反射加热, Q_3 是地球自身辐射加热, Q_4 是空间背景辐射(一般为 3.5 K,可忽略不计); Q_5 是目标自身向空间的辐射, Q_6 是目标内能的变化。其空间热平衡示意图如图 1 所示。

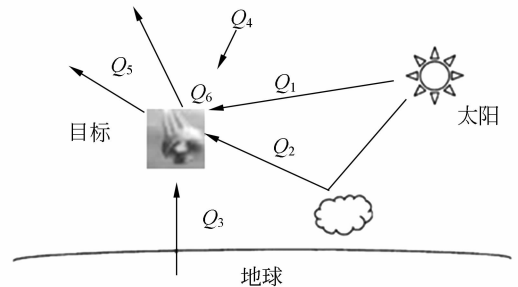


图 1 空间目标热平衡示意图

Fig. 1 Schematic of heat equilibrium for space target

假设空间目标表面温度各处相同,且没有内部热源。在日照区,根据方程(1)可建立灰体假设下目标的热平衡方程:

$$\epsilon_{ir} A_s \sigma T^4 + mc \frac{dT}{dt} = \alpha_s A_p (\Phi_s + \rho F \Phi_s + F \Phi_e), \quad (2)$$

其中, α_s 表示空间目标表面材料的太阳光吸收率, A_p 是空间目标的投影面积, Φ_s 是入射到空间目标的太阳光通量($1\ 360\ \text{W}/\text{m}^2$), ρ 是地球反照率(一般取平均值 0.35), Φ_e 是地球自身长波热辐射的能量通量($238\ \text{W}/\text{m}^2$), A_s 是空间目标的表面积, ϵ_{ir} 是空间目标表面材料的红外发射率, σ 是玻尔兹曼常数, F 是地球视角因子, m 是目标的

质量, c 是目标表面材料的比热, dT/dt 是目标表面温度的变化率。

目标处于阴影区的热平衡方程为:

$$\epsilon_{ir} A_s \sigma T^4 + mc \frac{dT}{dt} = \alpha_s F A_p \Phi_e, \quad (3)$$

地球视角因子定义如式(4):

$$F = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1}{2}(1 - \cos \beta). \quad (4)$$

式中, $\beta = \arcsin(\frac{R_e}{R_e + h})$, Ω 为目标对地球可见部分所张的立体角, h 为目标距地表高度。给定目标初始温度 T_0 , 解上述微分方程(2)和(3)即可求得目标温度 T 随时间的变化关系。

3 深空背景点源红外辐射模型

深空背景辐射源主要包括恒星红外辐射、行星辐射和黄道尘埃辐射三部分。恒星红外点源辐射是天体背景中最主要的杂波源。大多数的红外点源模型都是使用实际观测数据, 大都采用 IRAS (infrared astronomical satellite) 点源编目^[6]。

本文的深空背景建模采用的星表是 MSX 点源红外星表。MSX 红外天体点源编目星表包括了 177 860 颗天文星, 其中 61 242 颗与 IRAS 的红外编目星相匹配。该星表给出了 $4 \sim 26 \mu\text{m}$ 的 6 个波长处的通量密度估计值。其随携带的红外望远镜的空间分辨率是 IRAS 的 30 倍, 并且将观测天区扩展到 IRAS 未能观测的 4% 天区。该星表将恒星位置换算到 2000 年 1 月 1.5 日。

若给定视场中心指向(赤经、赤纬)和视场大小以及传感器灵敏度, 就可从星表中查询视场范围内的恒星, 并记下该恒星的 ID(标识序号), 然后在地心惯性系下进行位置坐标变换, 将恒星的惯性位置转换到焦面坐标位置上, 完成背景星位置变换。图像显示采用了电子数与图像灰度的变换关系, 点源衍射模型采用二元高斯模型。深空背景图像生成流程图如图 2 所示, 仿真结果如图 3 所示。(视场中心指向 $Ra = 1.5053$; $Dec = -0.6135$, 相机分辨率 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$; 波段 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 视场 $11.7^\circ \times 11.7^\circ$ (487 颗))

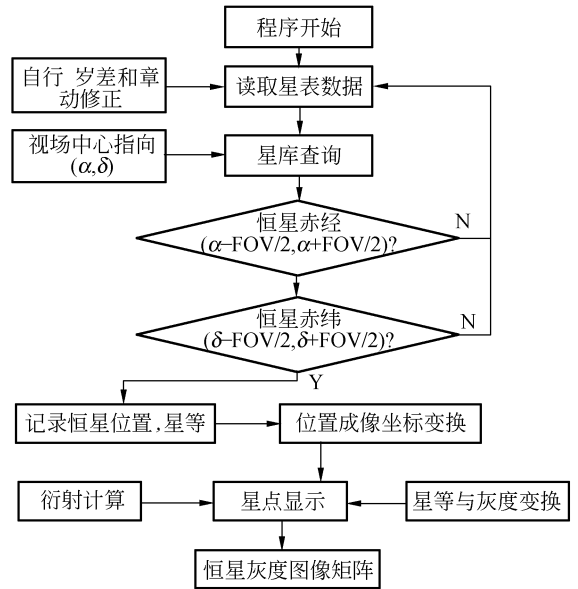


图 2 深空背景建模流程图

Fig. 2 Flow chart of deep space background model



图 3 深空背景恒星点源红外图像

Fig. 3 Simulated image of infrared point stellar in deep space

4 序列图像生成技术

4.1 图像生成总体方案

图像生成总体方案框图如图 4 所示。

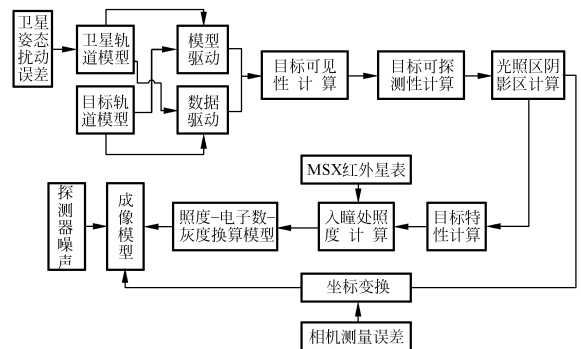


图 4 图像生成总体方案流程图

Fig. 4 Flowchart of general scheme for image generation

卫星轨道模型及空间目标轨道模型由 STK 提供,可以选择模型驱动或数据驱动模式。由 Matlab 程序读取 STK 生成的轨道数据,并计算目标可见性、可探测性、光照、阴影区判断及目标等效温度计算。图像生成程序根据指定的传感器参数,计算进入视场的目标和背景位置及灰度,进行图像生成及成像显示。

4.2 空间目标位置坐标变换模型

图 5 为惯性空间目标和观测星在地心惯性坐标系下的观测示意图,坐标变换模型如式(5):

$$r_c = M_{CI}(r_t - r_s), \quad (5)$$

$$M_{CI} = M_{CB}M_{BO}M_{OI}, \quad (6)$$

其中 M_{CB} 、 M_{BO} 、 M_{OI} 分别为安装矩阵、姿态矩阵和赤道惯性坐标与轨道坐标转换矩阵。 r_c 为目标在传感器测量坐标系的位置矢量, r_t 、 r_s 分别为目标和卫星在地心惯性系下的矢量^[7]。

目标在像面的像点坐标为:

$$\begin{cases} x_i = -f(X_c/Z_c) = -f \cot E \cos A \\ y_i = -f(Y_c/Z_c) = -f \cot E \sin A \end{cases}, \quad (7)$$

目标在焦平面的位置坐标为:

$$\begin{cases} u = x_i/d_x + u_0 \\ v = y_i/d_y + v_0 \end{cases}, \quad (8)$$

其中 d_x 、 d_y 分别是探测器单元尺寸, u_0 、 v_0 是像面原点处的焦面坐标。

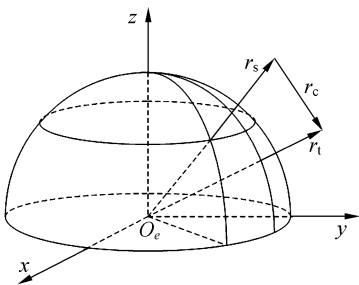


图 5 坐标变换示意图

Fig. 5 Schematic of coordinate transform

4.3 焦面成像模型

根据普朗克辐射理论,光谱辐射是由一定频率的光子组成,经探测器转换为电子,进而形成电流/电压。其中, h 为普朗克常量, c 为光速, η 为量子效率, τ_{int} 为积分时间。

目标辐射到达入瞳处的照度与光电转换产生的电子数的关系为^[8-9]:

$$N_s = \frac{1}{hc} \frac{A_0 \tau_0}{R^2} \cdot \tau_{int} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_a(\lambda) I_s(\lambda) \eta \lambda d\lambda, \quad (9)$$

其中: A_0 为光学系统入瞳直径, τ_0 为光学系统透过率。

目标像元产生的电子经 A/D 量化后,即可得到电压值。

$$V = k N_s, \quad (10)$$

式中 k 表示转换因子($\mu V/e^-$),电压与灰度换算关系如下:

$$G_{gray} = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} [(2^d - 1) - V_{min}] + V_{min}. \quad (11)$$

4.4 图像显示模型

目标衍射斑的能量分布用二维高斯模型表示:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2}\right)\right], \quad (12)$$

式中, (x_0, y_0) 是衍射斑中心位置, $f(x, y)$ 是以 (x_0, y_0) 为中心的光斑在 (x, y) 处的强度; σ_x 、 σ_y 是点扩散函数宽度。

4.5 误差和噪声模型

卫星在轨运行时受到周期性空间外扰力矩,使得卫星姿态发生周期性变化。相机抖动会带来测量误差。因此图像生成中要建立这些误差模型。

4.5.1 卫星姿态扰动误差

在此利用周期性正弦函数来模拟卫星姿态的抖动,利用高斯随机数来模拟卫星姿态的指向误差。建立卫星姿态扰动模型如(13)式:

$$\phi(t) = \sum_{i=1}^N \psi_{mi} \sin(2\pi f_i t + \phi_i) + \psi_0, \quad (13)$$

式中, $\phi(t)$ 表示姿态角; t 表示仿真时间; f_i 、 ψ_{mi} 和 ϕ_i 分别为姿态抖动第 i 个分量的频率、幅度和初始相位; ψ_0 为高斯随机数。

4.5.2 相机测量误差模型

假设测量误差主要来自焦面像元分辨率 $p_x \times p_y$ 的影响,则有下式成立^[10]。

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_{x,LOS}^2}{\cos^2 E} & 0 \\ 0 & \sigma_{y,LOS}^2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中, R_k 是测量噪声协方差, σ_{LOS} 是传感器角测量标准差。

4.5.3 焦面噪声模型

焦面电子学热噪声一般服从高斯分布, 因此噪声模型用时间高斯模型表示:

$$f_N = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right). \quad (15)$$

5 图像仿真实验结果

卫星和目标的动力学模型由 STK 生成, 成像模型由 MATLAB 编程实现。STK/Connect 是 STK 的重要模块之一, 提供用户在客户机/服务器环境下与 STK 连接的功能, 使用 TCP/IP 与 STK 之间传输数据(包括实时数据传输)。其仿真模块如图 6 所示。

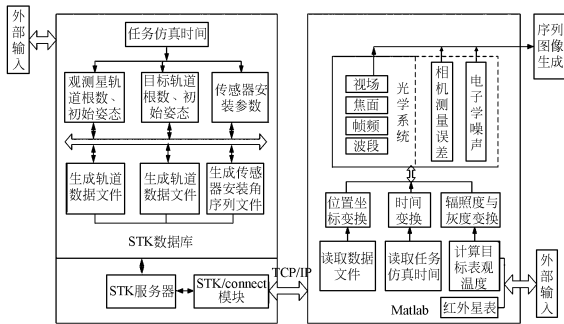


图 6 图像生成功能模块流程图

Fig. 6 Flowchart of function block for image generation

选取某空间目标作为仿真对象, 仿真时间为 2008 年 1 月 1 日 00:12:04.50, 仿真结束时间为 00:12:12.50, 利用本文方案生成 160 帧序列图像, 结果如图 7 所示。方框内为目标。仿真探测器视场 $4.4^\circ \times 4.4^\circ$, 探测器分辨率 128×128 , 图像灰度为 8 bit/pixel, 帧频 20 frame/s, 波段 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 。仿真时加入的高斯噪声为均值 20, 方差 64。从左至右, 从上至下依次为第 1、10、20、30、40、50、60、70、

80、90、100、110、120、130、140、150 帧。

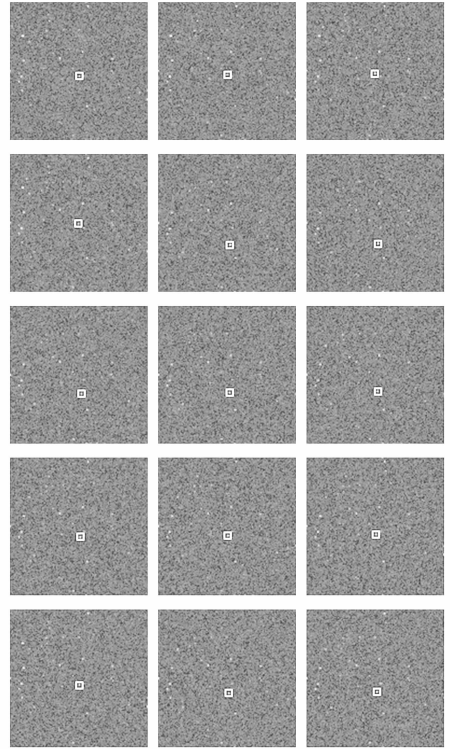


图 7 深空背景点目标红外序列图像仿真结果

Fig. 7 Simulated image sequence of point target in deep space

6 结 论

本文提出了一种深空背景点目标红外序列图像生成方法。空间目标和卫星动力学及姿态数据由 STK 提供, 目标温度计算采用了简化的计算模型, 深空背景恒星模型由 MSX 红外星表提供, 目标及恒星光学成像模型由 MATLAB 程序实现, MATLAB 通过 Connect 模块调用 STK 的轨道和姿态数据。仿真模型中考虑了卫星姿态扰动、相机测量误差和探测器噪声, 使得仿真图像序列更接近真实物理过程, 图像生成实时性好, 具有一定的实用性。本文背景建模所采用的 MSX 红外星表的恒星数目多达 1.7×10^5 颗, 比采用 LRS 星表的已有深空背景恒星模型更加完善, 所适用的红外载荷视场范围更宽。能够仿真光学视场大于 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ (128×128 , $NEI = 6 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$)、波段为 $4 \sim 26 \mu\text{m}$ 的红外序列图像。

参考文献:

- [1] 吴晗平. 掠海红外动态点目标图像仿真系统[J]. 光学精密工程, 2007,15(8):1275-1279.
WU H P. Image simulation system of dynamic infrared point targets sweeping on sea surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1275-1279. (in Chinese)
- [2] 江龙,姜志国,薛斌党,等. 导弹目标红外场景仿真技术的研究与实现[J]. 宇航学报, 2006,27(5):1087-1090.
JIANG L, JIANG ZH G, XUE B D, *et al.*. Research and realization of infrared scene simulation technology of a missile [J]. *Journal of Astronautics*, 2006,27(5):1087-1090. (in Chinese)
- [3] 毛宏霞,李霞,王章野,等. 空间目标与环境红外特性理论建模及其场景生成[J]. 红外与激光工程, 2007,36(5):607-610.
MAO H X, LI X, WANG ZH Y, *et al.*. Simulation of infrared radiation from outer space targets and environment, and its generation technique of scene [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5):607-610. (in Chinese)
- [4] 李志军,王卫华,陈曾平. 深空动态场景目标红外图像仿真研究 [J]. 红外技术, 2007,29(7):413-418.
LI ZH J, WANG W H, CHEN Z P. Dynamic target IR image simulation in deep space background [J]. *Infrared Technology*, 2007,29(7):413-418. (in Chinese)
- [5] SHEN T SH, GUO M. IR image generation of space target based on OpenGL[C]. *Proc. of SPIE*, 2007,6786:67865A. (in Chinese)
- [6] Validation report for the celestial background scene descriptor (CBSD) stellar point sources model cbsky4 [R]. 2003, AFRLVSTR20011579, ADA418711.
- [7] 周彦平,陶坤宇,曲晓彤. 天基目标瞄准多传感器联合探测[J]. 光学精密工程, 2008,16(6):1003-1008.
ZHOU Y P, TAO K Y, QU X T. Multi-sensor joint detection in space-based pointing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(6):1003-1008. (in Chinese)
- [8] MICHAEL J, CANTELLA. *The Infrared & Electro-optical Systems Handbook* [M]. Washington USA:SPIE Press,1993:159-205.
- [9] 张春华,陈标,周晓东. 运动背景星空图像中小目标的运动轨迹提取算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3):524-530.
ZHANG CH H, CHEN B, ZHOU X D. Small target trace acquisition algorithm for sequence star images with moving background[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):524-530. (in Chinese)
- [10] YEDDANAPUDI M, BAR-SHALOM Y. Ballistic missile track initiation from satellite observations [J]. *IEEE Trans AES*,1995,31(3):1054-107.

作者简介:



李克新(1977—),男,河北保定人,博士研究生,2001年于河北农业大学获得学士学位,2004年于哈尔滨理工大学获得硕士学位,主要从事空间光学信息获取及信息处理方面的研究。E-mail: dillonlkx@163.com



丛明煜(1964—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,2001年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事空间光学工程的研究工作。E-mail: mycong@hit.edu.cn



曹移明(1982—),男,江苏泰州人,博士研究生,2006 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光电传感器设计方面的研究。E-mail: caoyiming888@126.com

鲍文卓(1983—),男,内蒙古通辽人,博士研究生,2007 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间目标光学特性及图像仿真方面的研究。E-mail: latermouse@126.com

导师简介:



张 伟(1962—),男,黑龙江牡丹江人,教授,博士生导师,1983 年,1992 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2000 年于日本获得博士学位,主要从事空间光学工程研究的工作。E-mail: wzhang@hit.edu.cn

●下期预告

大尺寸工业视觉测量系统

刘建伟¹,梁 晋¹,梁新合¹,曹巨明²,张德海¹

(1. 西安交通大学 机械工程学院,陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学 电子与信息工程学院,陕西 西安 710049)

针对工业制造领域普遍存在的大型工件全尺寸测量难题,提出并实现了一种基于立体视觉技术的便携式工业测量系统。对该系统所采用的特征识别、相机定向、立体匹配、三维重建、多视点云配准等关键算法进行了研究。提出了改进的 CANNY 边缘亚像素检测算法,使用先验规则去除误识别的标志点,多次拟合定位标志点中心,对标志点环带多次采样取中值求取编码点的 ID。根据 ID 号找出不同照片中的同名编码点,顺次对照片进行相对定向和绝对定向。然后,根据多幅图像的多极线几何约束,实现非编码点的匹配,消除误匹配。采用前方交会法重建标志点的三维坐标,利用光束平差对计算出的结果和内外部参数做迭代修正。最后,设计了双目结构光扫描系统,提出了一种改进的双目像机标定算法,详细描述了利用全局和局部标志点的子图同构实现多视点云配准的新算法。实验表明,该系统可在生产现场对大型工件进行快速测量,整体测量精度达到 0.112 mm/3 m。