

基于 IR-SFS 算法空间目标红外影像 3D 重建

曾蔚¹, 王汇源^{1*}, 刘莹奇², 王斌², 张振铎², 曾子晗³

(1. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250100;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 北京联合大学 自动化学院, 北京 100095)

摘要: 在利用单幅影像的明暗恢复形状(Shape From Shading, SFS)三维重构算法的基础上, 提出同时考虑外界辐射源和目标自身红外辐射的 IR-SFS(infrared-SFS)算法。首先通过分析 SFS 算法原理和空间目标的红外成像特性, 建立 IR-SFS 辐射方程并进行了仿真研究, 然后利用温度场估计获得红外差值图, 在人工合成的理想半球体、半圆柱体卫星红外影像上进行算法测试, 并以美国 STS107 真实红外影像作为实验目标进行三维重建。实验结果表明, 所提出 IR-SFS 算法经过参数优化后, 与原 SFS 算法相比, 重建模型的峰值信噪比更高, 对 STS107 顶部舱门、尾翼、机舱、机舱内方形部件具有更佳显示度, 整体效果得到明显改善。

关键词: 红外影像; 明暗恢复形状; 三维重建; 空间目标

中图分类号: TN215; TJ765.43 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20140703.0376

3D reconstruction of space target IR image based on IR-SFS algorithm

ZENG Wei¹, WANG Hui-yuan^{1*}, LIU Ying-qi², WANG Bin², ZHANG Zhen-duo², ZENG Zi-han³

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. College of Automation, Beijing Union University, Beijing 100095, China)

* Corresponding author, E-mail: hywang@sdu.edu.cn

Abstract: In this paper, a new 3D surface reconstruction algorithm named IR-SFS(shape from shading for infrared images) for infrared images of space targets is proposed based on the traditional single image SFS(shape from shading) algorithm, in which both external light source and self-radiation of infrared objects are considered. Firstly, the traditional SFS algorithm is described and the features of IR imaging of space targets are then analyzed to build the IR-SFS radiation equation followed by simulation study. Using temperature estimation to get the IR residual gray image, 3D reconstruction models are achieved on the synthetic infrared images of he-

收稿日期: 2013-12-16; 修订日期: 2014-02-13

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2013FM032, No. 2009ZRB01675)

mi-sphere, hemi-cylinder satellite and the real infrared image of USA STS107 (Space Transportation System Program 107) as the experimental targets. The experiment results show that higher peak signal to noise ratio (PSNR) and better visibility at the top of the space shuttle door, the tail, the cabin and the square equipment in the cabin of STS107 can be obtained by using the proposed 3D reconstruction algorithm with optimized parameters. The overall performance is significantly improved compared to the original SFS algorithm.

Key words: infrared images; Shape From Shading (SFS); 3D reconstruction; space object

1 引言

光学成像是获取目标三维模型的重要手段之一,美国麻省理工大学的 Horn 认为图像的明暗变化隐藏三维信息^[1-3],并于 1970 年提出明暗恢复形状 (Shape From Shading, SFS) 算法用于 NASA 月球表面图像三维重建。传统的 SFS 算法假设光源为无限远处的点光源或平行光^[2],但考虑到红外 (Infrared, IR) 目标具有自身辐射,灰度明暗变化不仅隐藏三维信息还包括温度信息,在 SFS 三维重构中的理论模型和具体实现方法有待研究。本文分析了空间目标红外成像特性,建立 IR-SFS 算法用于红外图像三维重建。

SFS 算法是基于单幅灰度图像非接触式三维测量,无需相机标定和目标先验信息,该算法相关的研究主要解决下述问题^[4-8]:辐射模型的建立、光照和反射率估计、欠定偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 方程组的解法,以及与其它三维重构方法的融合。其理论的核心思想是电磁波辐射理论与光度学,通过辐射模型将辐射源、辐亮度、物体的几何形状关联在一起,求解辐射方程组可以获得物体表面形状。SFS 辐射模型与真实辐射模型相比存在较多的简化处理,比如光源位置和强度估计、反射率估计,欠定 PDE 方程组病态求解,物体形状的光滑约束,传感器成像过程模型被忽略等等。这样做的结果是,SFS 算法的适应性和运算速度极高,但其精度却大打折扣,且数十年来被广泛研究而尚未形成完备的理论和应用体系。

主要的 SFS 辐射模型有漫反射辐射模型 (Lambertian)、镜反射辐射模型 (Phong),以及混合辐射模型,这 3 种经典的模型均只考虑了物体

对辐射能量的反射,对于一般的可见光成像来说,这种假设是非常合理的,而对于不透明物体,其表面红外辐射能量是反射辐射和自身辐射的叠加。在红外成像领域对传统的 SFS 辐射模型进行扩展研究,构建充实完备的理论模型和具体算法,可以提高红外影像三维重建的精度。

上述 3 种模型中,Lambertian 辐射模型应用最广泛,且与远距离暗弱目标成像领域的空间目标表面辐射模型比较相符。本文提出的 IR-SFS 算法正是对该模型在红外成像领域的理论模型和三维重建实现算法的扩展研究,研究对象是空间目标(包括卫星、航天飞机、空间站等)。为了提高三维重建的精度,详细的理论研究、参数运算和算法设计是必不可少的,研究内容涵盖了:空间目标和地基传感器的坐标变换,外部红外光源的位置和强度的详细分析和计算,自身辐射强度计算,自身辐射对 SFS 三维重建影响的仿真分析;依据以上理论和仿真分析结果,提出 SFS 红外温度场概念,利用离散余弦变换 (DCT) 估计温度场形状,通过自身红外辐射能量和反射辐射能量的比例系数,获得红外差值图,然后进行三维恢复。一系列分析和计算,虽然算法比较复杂,但实验结果可获得更高的信噪比,验证了算法的有效性。该算法不能像立体视觉的方法那样获得尽可能高的模型精度,对于空间目标红外成像来说,立体视觉的方法难以实现。

本文第二部分讲述传统的 SFS 算法;第三部分分析空间目标红外成像特性并建立 IR-SFS 辐射模型;第四部分为 IR-SFS 辐射模型仿真分析;第五部分为 IR-SFS 算法说明;第六部分为实验结果和分析;第七部分为全文的总结。

2 传统的 SFS 算法

传统的 SFS 算法一般假设目标为朗伯体,表面光滑连续;存在唯一光源,发出平行光。其归一化表面辐射图和归一化灰度图相等,辐射方程为:

$$\begin{aligned}
 0 &= R(p, q) - E(x, y) \\
 &= k_s \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{S}}{\|\mathbf{N}\| \cdot \|\mathbf{S}\|} - E(x, y) \\
 &= k_s \frac{(p_s \cdot p + q_s \cdot q + 1)}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \cdot \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} - E(x, y), \tag{1}
 \end{aligned}$$

式中: $E(x, y)$ 是灰度图像, $R[p(x, y), q(x, y)]$ 是物体表面辐射图;三维曲面 $Z = Z(x, y)$ 表示目标点的高程或与传感器距离; $(p, q) = (\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y})$ 是表面梯度, $\mathbf{N} = (n_x, n_y, n_z)$ 是表面法向,且 $(p, q) = (-\frac{n_x}{n_z}, -\frac{n_y}{n_z})$; $\mathbf{S} = k_s(-p_s, -q_s, 1)$ 是光源位置矢量。若图像有 N 个像素,那么可以建立 N 个方程、 $2N$ 个未知数的非线性方程组,通过解欠定方程组求得三维模型 $Z = Z(x, y)$ 。

3 空间目标红外成像特性分析

参照传统 SFS 算法,空间目标红外成像特性分析的假设条件为:

- (1) 目标为朗伯体,表面光滑连续,在成像波段内有单一的反射率和发射率;
- (2) 外部辐射包括:太阳辐射、大气和地球反照的太阳辐射、地球红外辐射;
- (3) 目标具有温度场,发出自身红外辐射。

3.1 理论基础

在上述假设条件的基础上,展开红外辐射的基础理论分析,然后结合传统 SFS 算法的辐射模型,推导出 IR-SFS 辐射模型方程。

(1) 坐标系

坐标系如图 1 所示,地平坐标系 $O-XYZ$ 以传感器为原点,正东为 X 轴,正北为 Y 轴,天顶为 Z 轴,成像时的偏角和仰角为 α 和 β ;目标坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 以目标为原点,两者齐次坐标变换矩阵 \mathbf{H} 如

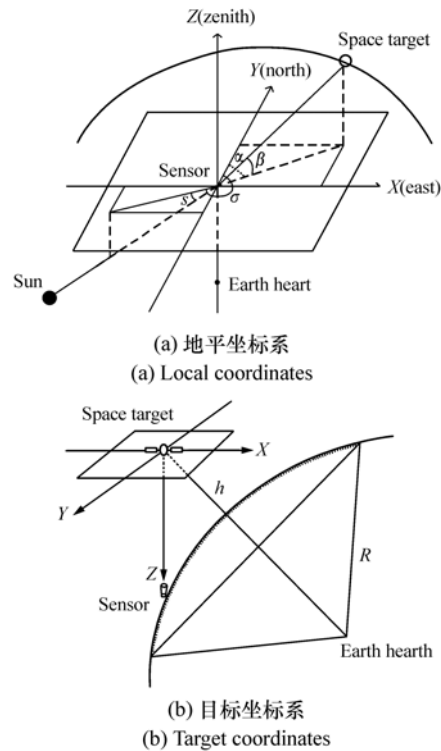


图 1 坐标系

Fig. 1 Coordinates

式(2)。传感器观测参数以前者为参考;三维模型 $Z = Z(x, y)$ 以后者为参考。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_{\text{object}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\frac{\pi}{2} - \beta) & -\sin(-\frac{\pi}{2} - \beta) & 0 \\ 0 & \sin(-\frac{\pi}{2} - \beta) & \cos(-\frac{\pi}{2} - \beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

(2) 外部辐射和自身辐射

太阳辐射 Q_1 , 大气和地球对太阳辐射的反照辐射 Q_2 , 地球红外辐射 Q_3 , 如式(3) ~ (5); 自身

辐射 Q_4 如式(6)^[9]。

$$Q_1 = \rho \cdot S \cdot \gamma_1 \cdot F_1 \cdot F_s \cdot dA, \quad (3)$$

$$Q_2 = \rho \cdot 0.35S \cdot [R/(R+h)]^2 \cdot$$

$$\gamma_1 \cdot F_2 \cdot F_\Omega \cdot dA, \quad (4)$$

$$Q_3 = \rho \cdot 220 \cdot [R/(R+h)]^2 \cdot$$

$$\lambda \cdot \gamma_3 \cdot F_3 \cdot dA, \quad (5)$$

$$Q_4 = \varepsilon \cdot Q'_4 \cdot F_4 \cdot dA. \quad (6)$$

式中, dA 为微面元, ρ 为反射率, ε 为发射率, S 为太阳辐射常数, γ_1, γ_3 为成像波段因子, R 为地球半径, h 为轨道高度, λ 为大气透过率; Q'_4 为等效黑体辐射强度, 由温度 T 和成像波段 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 根据普朗克辐射定律、斯蒂芬-玻尔兹曼定律计算获得; F_s 为成像类型因子, F_Ω 为大气和地球反射因子; F_1, F_2, F_3, F_4 为形状因子, 采用蒙特卡洛方法计算获得, 基本计算式如式(7)~(10)。

$$F_1 = \frac{\mathbf{S}_{\text{sun}} \cdot \mathbf{N}}{\|\mathbf{S}_{\text{sun}}\| \cdot \|\mathbf{N}\|} \cdot \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{S}_{\text{telescope}}}{\|\mathbf{N}\| \cdot \|\mathbf{S}_{\text{telescope}}\|}, \quad (7)$$

$$O = f(z_{(i,j)}, z_{(i-1,j)}, z_{(i,j-1)}) = \frac{\zeta_1 \cdot p + \zeta_2 \cdot q + \zeta_3}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} + \zeta_4(i,j) - E(i,j), \quad (11)$$

式中:

$$\zeta_1 = \chi\rho \cdot (S \cdot \gamma_1 \cdot F_s \cdot x_s + 0.35S \cdot (\frac{R}{R+h})^2 \cdot \gamma_1 \cdot F_\Omega \cdot x_\Omega + 220 \cdot (\frac{R}{R+h})^2 \cdot \lambda \cdot \gamma_3 \cdot x_e), \quad (12)$$

$$\zeta_2 = \chi\rho \cdot (S \cdot \gamma_1 \cdot F_s \cdot y_s + 0.35S \cdot (\frac{R}{R+h})^2 \cdot \gamma_1 \cdot F_\Omega \cdot y_\Omega + 220 \cdot (\frac{R}{R+h})^2 \cdot \lambda \cdot \gamma_3 \cdot y_e), \quad (13)$$

$$\zeta_3 = \chi\rho \cdot (S \cdot \gamma_1 \cdot F_s \cdot z_s + 0.35S \cdot (\frac{R}{R+h})^2 \cdot \gamma_1 \cdot F_\Omega \cdot z_\Omega + 220 \cdot (\frac{R}{R+h})^2 \cdot \lambda \cdot \gamma_3 \cdot z_e), \quad (14)$$

$$\zeta_4(i,j) = \chi\varepsilon \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(\frac{c_2}{\lambda T(i,j)}) - 1} d\lambda. \quad (15)$$

式中: c_1 是第一辐射常数; c_2 是第二辐射常数; σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数; $T(i,j)$ 是热力学温度场图。

4 IR-SFS 辐射方程仿真分析

式(11)所示 IR-SFS 辐射方程与式(1)所示传统 SFS 辐射方程的差异在于 $\zeta_4(i,j)$ 项。下面

$$F_2 = \frac{\mathbf{S}_\Omega \cdot \mathbf{N}}{\|\mathbf{S}_\Omega\| \cdot \|\mathbf{N}\|} \cdot \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{S}_{\text{telescope}}}{\|\mathbf{N}\| \cdot \|\mathbf{S}_{\text{telescope}}\|}, \quad (8)$$

$$F_3 = \frac{\mathbf{S}_{\text{earth}} \cdot \mathbf{N}}{\|\mathbf{S}_{\text{earth}}\| \cdot \|\mathbf{N}\|} \cdot \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{S}_{\text{telescope}}}{\|\mathbf{N}\| \cdot \|\mathbf{S}_{\text{telescope}}\|}, \quad (9)$$

$$F_4 = \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{S}_{\text{telescope}}}{\|\mathbf{N}\| \cdot \|\mathbf{S}_{\text{telescope}}\|}. \quad (10)$$

式中: $\mathbf{S}_{\text{sun}} = (x_s, y_s, z_s)$ 是太阳位置矢量, $\mathbf{S}_\Omega = (x_\Omega, y_\Omega, z_\Omega)$ 是大气和地球反照位置矢量, $\mathbf{S}_{\text{earth}} = (x_e, y_e, z_e)$ 是地球红外辐射位置矢量, $\mathbf{S}_{\text{telescope}}$ 是传感器位置矢量, $\mathbf{N} = (-p, -q, 1)/\sqrt{p^2 + q^2 + 1}$ 是微面元法向矢量。

3.2 建立 IR-SFS 辐射方程

综合上述理论得红外辐射图 $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$, 根据传统 SFS 辐射理论 $O = Q(x,y) - E(x,y)$, 整理并离散化得 IR-SFS 辐射方程:

考虑两种情况分析它对目标几何形状的影响:
(1) $\zeta_4(i,j) = 0$, 即自身辐射为 0, 只考虑目标对外界辐射的反射, 此时对应传统 SFS 算法的辐射模型;
(2) $\zeta_4(i,j) \neq 0$, 即自身辐射不为 0, 同时考虑目标对外界辐射的辐射以及目标自身辐射, 对应本文提出的 IR-SFS 辐射模型。三维重建过程中, 欠定 PDE 方程组求解方法采用 Ping-Sing Tsai and Mubarak Shah 的线性化方法^[7], Newton-Raphson

迭代次数 20 次。

4.1 第一种情况 $\zeta_4(i,j) = 0$

灰度级为 L 的图像中两相邻微面元 dA_1 、 dA_2 (如图 2(a)), 灰度值 (g_1, g_2) , 光源矢量 $(0,0,1)$ 。

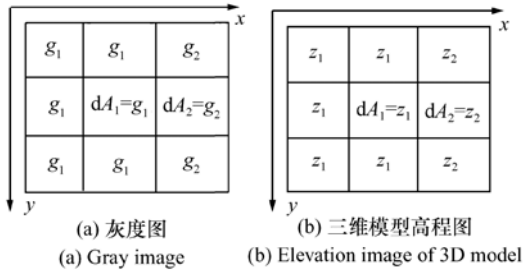


图 2 微面元 dA_1 与 dA_2 的灰度图和三维模型

Fig.2 Gray image and 3D model of microfacet dA_1 , dA_2

将各参数代入式(1), 利用 Tsai 方法求解出三维模型见图 2(b)。其中 dA_1, dA_2 在三维模型中梯度 (p_1, q_1) 、 (p_2, q_2) 为 $q_1 = q_2 = p_1 = 0, p_2 = |z_1 - z_2|$ 。法向矢量夹角 θ 为:

$$\theta = \arccos \frac{(p_1 p_2 + q_1 q_2 + 1)}{\sqrt{p_1^2 + q_1^2 + 1} \cdot \sqrt{p_2^2 + q_2^2 + 1}} = \arccos \frac{1}{\sqrt{p_2^2 + 1}}, \quad (16)$$

仿真参数: $L=8, g_1=0, g_2=0:255$ 递增。

仿真结果: 求得 θ 变化曲线如图 3 所示, 其中最小、最大值分辨角分别为 $\theta_{\min} = 0.81^\circ$ 和 $\theta_{\max} = 74.47^\circ$ 。

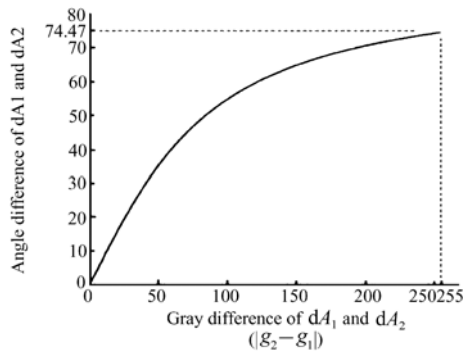


图 3 仿真结果曲线 [$\zeta_4(i,j) = 0, dA_1$ 和 dA_2 的夹角为 θ]

Fig.3 Simulation results [$\zeta_4(i,j) = 0, \theta$ is the angle between dA_1 and dA_2] (calculated by Tsai method)

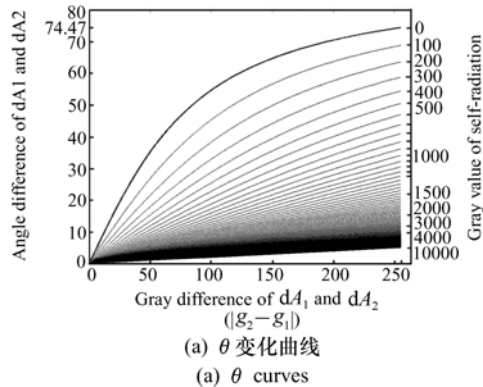
仿真结果分析: 像素间灰度差异越大, 法向矢量角度越大, 若像素灰度值变化则会导致三维形状失真; 最大分辨角仅为 74.47° , 无法表示大于该角度的几何形状, 这也是“假设物体表面光滑”的理论依据。

4.2 第二种情况 $\zeta_4(i,j) \neq 0$

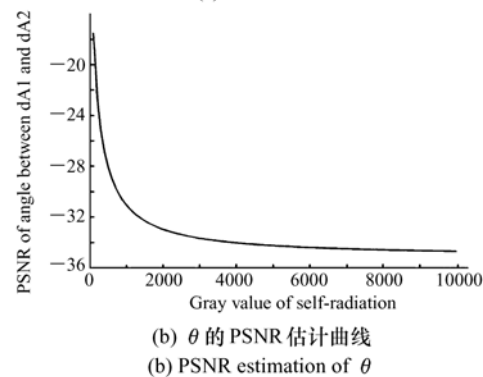
第二种情况, 分析 $\zeta_4(i,j) > 0$ 对三维重构模型的影响, 即 θ 的变化情况。

假设条件: 目标前景的温度和发射率一致, 自身辐射强度等效灰度值 $\zeta_4(i,j) > 0$ 。不失一般性灰度级取值为 $L=8$, 前景灰度范围从 $(0, 255)$ 变为 $(0 + \zeta_4, 255 + \zeta_4)$, 背景灰度范围仍为 $(0, 255)$ 。 dA_1, dA_2 在新图像中灰度值 $(g'_1, g'_2) = [255 \cdot (g_1 + \zeta_4) / (255 + \zeta_4), 255 \cdot (g_2 + \zeta_4) / (255 + \zeta_4)]$, θ 的新值为 θ' 。

仿真参数: 取 $\zeta_4 = 0:100:10\ 000, g_1 = 0, g_2 = 0:255$ 。



(a) θ 变化曲线
(a) θ curves



(b) θ 的 PSNR 估计曲线
(b) PSNR estimation of θ

图 4 仿真结果曲线 [$\zeta_4(i,j) \neq 0, dA_1$ 和 dA_2 的夹角 θ']

Fig.4 Simulation results [$\zeta_4(i,j) \neq 0, \theta'$ is the angle between dA_1 and dA_2] (calculated by Tsai method)

仿真结果: θ' 的变化见图 4(a); 峰值信噪比

(PSNR)估计见图4(b)。随着自身辐射的增强,角度估计值逐渐恶化,见表1;当 $\zeta_4 = 50$ 时,最大角度失真达到 2.76° ;当 $\zeta_4 = 500$ 时,最大角度失真达 23.92° 。

仿真结果分析:自身辐射对三维模型有弱化效应,弱化程度与信噪比有关;随着温度逐渐升高弱化效应是渐变的。

表1 仿真结果

Tab.1 Simulation results

| Parameters | $\theta'_{\min}/(^{\circ})$ | $\theta'_{\max}/(^{\circ})$ |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $\zeta_4 = 0$ | 0.81 | 74.47 |
| $\zeta_4 = 50$ | 0.68 | 71.61 |
| $\zeta_4 = 500$ | 0.27 | 50.55 |

5 基于 IR-SFS 三维重建算法

基于上述研究,提出针对空间目标红外影像三维重建的 IR-SFS 算法。

首先,根据已知条件进行目标红外成像特性分析,计算目标、太阳、地球的相互位置关系,外部辐射强度。其次,提出渐变温度场概念,温度场信息隐藏在图像的低频区域;通过 DCT 变换和低通频域滤波器 $H(i,j)$ 得到温度场,利用普朗克辐射定律、斯蒂芬-玻尔兹曼定律计算其等效辐射强度,按照能量比例因子获得归一化自身辐射图 ζ_4 ,进而得红外差值图 $[E(i,j) - \zeta'_4(i,j)]$ 。然后,根据 Tsai 方法求解目标三维模型。最后,根据 SFS 评价因子 EQ1(收敛性)、EQ2(收敛到预期值)、EQ3(运算速度)、EQ4(鲁棒性)、EQ5(主观评价)对算法结果进行分析。

此外,基于温度场估计需要对温度场类型(即滤波器类型)、温度范围和温度场半径进行估计,不同的估计值会得出不同结果。因此,增加评价因子 EQ6,即在不同的参数设定下,计算目标反射辐射和自身发射辐射强度,以及三维模型的截面周长、截面积、曲面面积、体积、平均高度和最大高度的等效估计值。本文提出的 IR-SFS 算法流程如图5(a)所示;传统的 SFS 算法并没有考虑红外影像中目标自身辐射,如果将其直接应用于红

外影像则没有第二、三、四个环节,其算法流程如图5(b)所示。

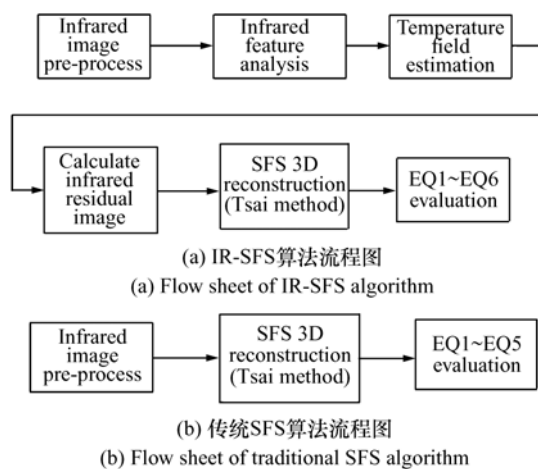


图5 算法流程图

Fig.5 Flow sheet of IR-SFS algorithm and traditional SFS algorithm

5.1 温度场估计

温度场属于低频分量,通过低频滤波器提取温度场的空间分布特征,并根据前述的空间目标红外特性分析将温度场映射到合理的强度,获取红外差值图。

下式为温度场空间分布特征估计方法:

$$T(i,j) = \text{IDCT}\{H(i,j) \cdot \text{DCT}[E(i,j)]\}, \quad (17)$$

式中:DCT是离散余弦变换;IDCT是离散余弦逆变换; $H(i,j)$ 是频域低通滤波器; $T(i,j)$ 是温度场估计值。限于本文的篇幅和研究重点,仅选用以下3种常用低通滤波器^[13-16]进行算法测试:

$$H_1(i,j) = \begin{cases} 1, \sqrt{i^2 + j^2} \leq R_T \\ 0, \sqrt{i^2 + j^2} > R_T \end{cases}, \quad (18)$$

$$H_2(i,j) = \begin{cases} 1 - \frac{\sqrt{i^2 + j^2}}{R_T}, \sqrt{i^2 + j^2} \leq R_T \\ 0, \sqrt{i^2 + j^2} > R_T \end{cases}, \quad (19)$$

$$H_3(i,j) = \exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma_1^2} + \frac{-j^2}{2\sigma_2^2}\right). \quad (20)$$

式中: R_T 是温度场滤波器截止频率, σ_1, σ_2 是温度场高斯低通滤波器方差, 均称之为温度场半径。

5.2 红外差值图

经过前述红外特性分析获得外部辐射系数 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ 和温度场 $T(i, j)$, 然后根据普朗克辐射定律、斯蒂芬-玻尔兹曼定律计算辐射强度, 并归一化为 $\zeta_4(i, j)$, 根据式(21)得到红外差值图:

$$\Delta E_{\zeta}(i, j) = E(i, j) - \zeta' = E(i, j) - \frac{|\bar{\zeta}_4|}{\sqrt{\zeta_1^2 + \zeta_2^2 + \zeta_3^2 + |\bar{\zeta}|}} \zeta_4(i, j), \quad (21)$$

式中, $\bar{\zeta}_4$ 为 ζ_4 的均值。

5.3 评价因子 EQ6

评价因子 EQ6 包括: 目标反射外界辐射强度和自身辐射强度 (见式(13) ~ (16)), 以及横截面周长 L_{Ω} 、横截面积 S'_{Ω} 、表面积 S_{Ω} 、体积 V_{Ω} 、平均高度 \bar{h}_{Ω} 和最大高度 h_{\max} (见式(22) ~ (27))。

$$L_{\Omega'} = \sqrt{x} \sum_{[i(t), j(t), Z(i, j)] \in \Omega'} \cdot \sqrt{\left(\frac{di}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dj}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dt}\right)^2}, \quad (22)$$

$$S'_{\Omega} = \sum_{(i, j) \in \Omega} \chi, \quad (23)$$

$$S_{\Omega} = \sum_{(i, j) \in \Omega} \chi \sqrt{p^2(i, j) + q^2(i, j) + 1}, \quad (24)$$

$$V_{\Omega} = \sum_{(i, j) \in \Omega} \chi Z(i, j), \quad (25)$$

$$\bar{k}_{\Omega} = \frac{1}{N} \sum_{(i, j) \in \Omega} Z(i, j), \quad (26)$$

$$h_{\max} = \max_{(i, j) \in \Omega} [Z(i, j)]. \quad (27)$$

式中, Ω 表示 ROI 区域, Ω' 表示 Ω 的八连通边界。由于该算法的三维模型高度无量纲, EQ6 对测试算法具有参考价值, 但不都代表绝对物理量; 如果高度信息经过标校的话, 会具有较好的实际含义。

6 实验结果及分析

算法程序用 Matlab7.0 在 Intel i5-3470 的 CPU, 4GB 内存的计算机上实现。图 6 为进行算法测试的 STS107 红外影像^[10], 它是“哥伦比亚航天飞机失事前四天, 利用 3.67 m 望远镜长波红外摄像机获得的高清晰图像”^[11], 目标信息见

表 2^[10,12]。

表 2 STS107 目标参数

Tab.2 Parameters of target STS107

| 参数 | 值 |
|---|-------------------|
| Sensor name | AEOS(美国) |
| Target name | Columbia 航天飞机 |
| Target size/m | 56 × 24 |
| Orbit altitude/km | 280 |
| Imaging time | 2003-1-28 13:53 Z |
| Resolution/(m ² /pixel) | 0.104 8 × 0.158 |
| Sensor imaging waveband/μm | [8.3, 9.2] |
| Skin reflectance and emissivity values | 0.7, 0.3 |
| Atmospheric transmissivity | 0.45 |
| External radiation intensity/(W·m ⁻²) | 3.76 |

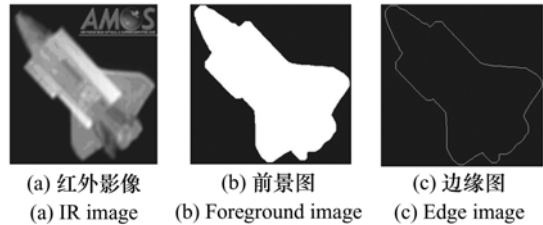


图 6 STS107 目标图像

Fig.6 Image of target STS107

为描述方便, 测试参数温度场估计滤波器、温度场半径、温度估计范围和迭代次数, 分别以 TF、TR、TD 和 Iter 表示。由于缺乏 STS107 目标的真实三维模型, 难以对重建结果进行客观评价, 我们首先对人工合成的红外目标的红外影像进行算法测试。

6.1 人工合成目标实验

分别利用 SFS 算法和 IR-SFS 算法对人工合成的球体、圆柱体卫星的红外影像进行三维重建, 比较两者重建模型的视觉效果、与真实模型的差值和峰值信噪比。

(1) 合成球体卫星

假设存在一球体空间目标, 半径 $r = 10$ m, 我们能观察到卫星的一侧, 其曲面方程为:

$$z = \sqrt{r^2 - x^2 - y^2}, \quad -10 \leq x \leq 10, \quad -10 \leq y \leq 10, \quad (28)$$

表面梯度为:

$$(p, q) = \left(\frac{-x}{\sqrt{r^2 - x^2 - y^2}}, \frac{-y}{\sqrt{r^2 - x^2 - y^2}} \right),$$

$$-10 \leq x \leq 10, -10 \leq y \leq 10, \quad (29)$$

人工合成目标的条件和方法:假设成像类型是地影成像,等效红外光源矢量(0, 0.15, 1),轨道高度为 280 km,卫星蒙皮反射率为 0.7,成像波段为 8.3 ~ 9.2 μm,大气透过率为 0.45,根据式(12) ~ (14)计算出目标反射外界辐射平均强度为 3.76 W/m²;卫星温度为 250 ~ 400 K 的随机值(本文测试值为 300 K),红外发射率为 0.3,只考虑成像波段内的红外辐射,根据式(14)计算出平均辐射强度为 3.41 ~ 41.00 W/m²;根据式(28)、(29)生成理想球体卫星模型见图 7(a、b),根据式(11)、(21)合成的卫星红外图像如图 7(c)所示。

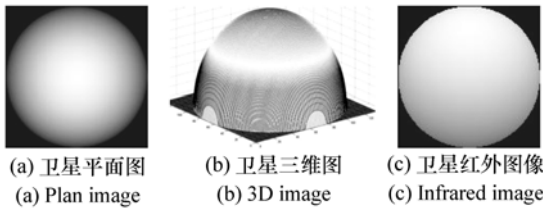


图7 球体卫星图

Fig. 7 Images of hemi-sphere satellite

分别采用传统的 SFS 算法、本文提出的 IR-SFS 算法对图 7(c) 表示的目标红外影像进行三维重构,其中欠定 PDE 方程组求解方法采用 Ping-Sing Tsai and Mubarak Shah 的线性化方法^[7],Newtong-Raphson 迭代次数 20 次。SFS 算法测试参数 Iter = 20,生成三维模型见图 8(a),与真实模型的差值图见图 8(b);IR-SFS 算法测试参数 TF = H3, TR = 20, TD = 250 ~ 350 K, Iter = 20,生成三维模型见图 8(c),与真实模型的差值图见图 8(d);由于已知真实的三维模型,可以计算出迭代过程中的 PSNR,见图 9。

结果分析:从图 8、9 可以看出两种算法都可以重建出目标的三维模型,并且都存在一定的误差。进行比较发现:原 SFS 方法虽然也能收敛,但是由于没有考虑目标自身辐射对三维重建的影

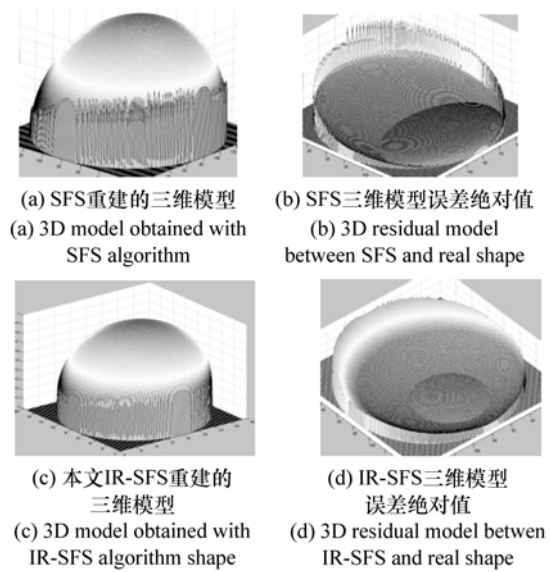


图8 球体卫星红外图三维重建模型

Fig. 8 3D reconstruction results of hemi-sphere satellite

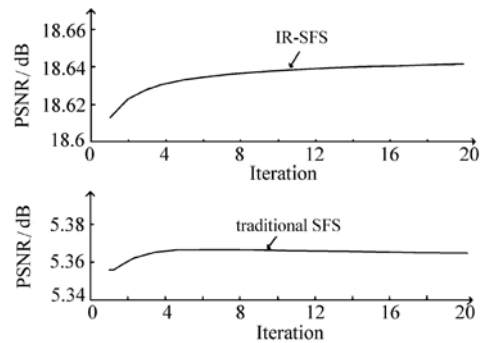


图9 球体卫星红外图三维重建实验 PSNR

Fig. 9 3D reconstruction PSNR of hemi-sphere satellite

响,迭代过程中信噪比仅为 5.3 dB 左右;而本文 IR-SFS 算法一定程度上考虑了自身辐射,虽然没能完全消除误差,但是随着迭代过程误差减小的更快,PSNR 比原 SFS 算法提高约 13 dB。

(2) 合成圆柱卫星

假设存在一个圆柱形的卫星,尺寸底半径 $r = 4$ m、高 $h = 10$ m,传感器能观察到目标的一侧,其曲面方程为:

$$Z = \sqrt{r^2 - x^2},$$

$$-4 \leq x \leq 4, -5 \leq y \leq 5, \quad (30)$$

表面梯度为:

$$(p, q) = \left(\frac{-x}{\sqrt{r^2 - x^2}}, 0 \right),$$

$$-4 \leq x \leq 4, -5 \leq y \leq 5. \quad (31)$$

人工合成目标的条件和方法与前述球体卫星一致。理想半圆柱体卫星平面图见图 10(a), 其三维图见图 10(b), 红外图像见图 10(c)。目标实际温度为恒定的 300 K, 在 IR-SFS 算法中估计目标温度为 250 ~ 400 K, 而 SFS 算法中忽略目标温度, 因为目标的真实温度往往是未知的, IR-SFS 算法通过对目标的红外特性分析, 大致已知了其真实温度范围, 理论上来说更逼近真实温度值; 传

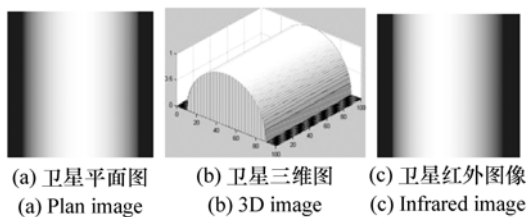


图 10 圆柱卫星

Fig. 10 Images of cylindrical satellite

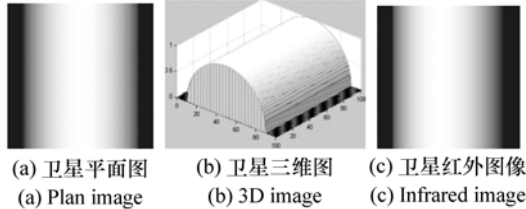


图 11 圆柱卫星红外图三维重建模型

Fig. 11 3D reconstruction results of cylinder satellite

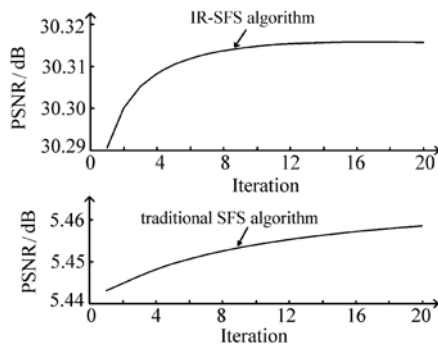


图 12 球体卫星红外图三维重建实验 PSNR

Fig. 12 3D reconstruction PSNR of cylinder satellite

统的 SFS 算法重建的三维模型、以及误差图见图 11(a)、11(b), 本文的 IR-SFS 算法重建的三维模型和误差图分别见图 11(c)、11(d)。迭代过程中, 与真实模型的 PSNR, 见图 12。结果分析: 从图 11、12 可以看出两种算法都可以重建出目标的三维模型, 并且都存在一定的误差。进行比较发现: 虽然新方法没能完全消除误差, 但是较原 SFS 方法 PSNR 提高约 25 dB。

6.2 STS107 三维重建实验一

通过人工合成目标的仿真实验, 验证了新算法在一定程度上提高了重建三维模型的准确度。下面在空间目标 STS107 真实红外影像上进行三维重建实验。

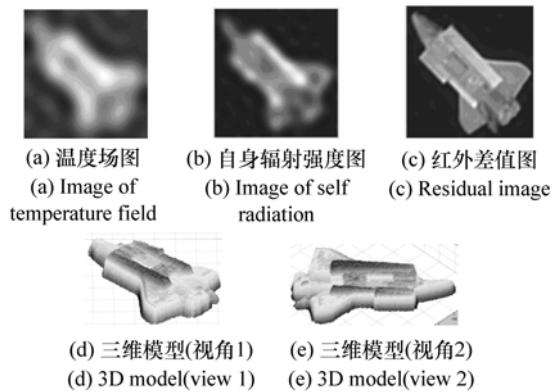


图 13 实验结果

Fig. 13 Test results

初步测试参数: TF = H1, TR = 50, TD = 200 ~ 300 K, Iter = 15。测试结果如图 13 所示, 可以看出, 红外差值图目标细节比原图有所改善, 重建模型对目标各部位的细节表现丰富。

结论和分析: 由温度场估计获得的红外差值图重建的三维模型具有较好的显示度。

6.3 STS107 三维重建实验二

这部分详细地介绍三维重建实验以及实验分析。评价因子包括 EQ1 ~ EQ6, 以及 SFS 和 IR-SFS 效果对比。根据本文的重点, 对 EQ5、EQ6 实验进行了较详细的说明。

(1) SFS 和 IR-SFS 的 EQ1、EQ2、EQ3 对比实验

SFS 实验参数: Iter = 50, 光照方向 (0, 0, 1); IR-SFS 实验参数: TF = H1、H2、H3, TR = 50, TD = 200 ~ 350 K, Iter = 50。

由于缺乏目标的真实模型作为参考,收敛均方误差 (MSE) 值为相邻两次迭代的均方误差; PSNR 的参考模型是最后一次迭代的三维模型。

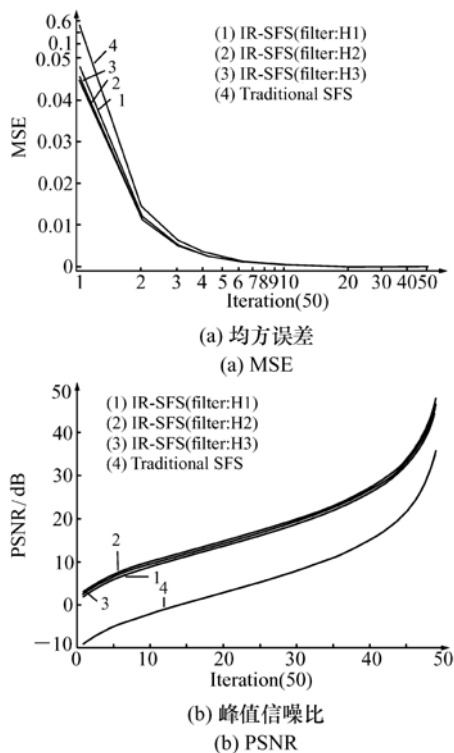


图 14 SFS 与 IR-SFS 的 MSE 和 PSNR 对比

Fig. 14 MSE and PSNR of IR-SFS compared with SFS

实验结果 MSE 见图 14 (a), PSNR 见图 14 (b),从图中可以看出 IR-SFS 较 SFS 均具更佳的收敛性。第 50 次迭代误差从 $2.58e - 004$ 减小为 $1.85e - 5$; PSNR 统计平均提高 11.47 dB;50 次迭代的对比实验共耗时约 12 s,能满足非实时数据处理的一般要求。

(2)鲁棒性评价(EQ4)

图 15(a) 为被高斯噪声污染的目标红外影像,图 15b 为经过中值滤波的影像,图 15(c) 为重建结果。重建的三维模型具有一定的主观评价,目标的机翼、机舱、尾翼等的三维模型均被明显重构出来,说明算法对噪声具有一定程度的鲁棒性。由于本文算法实质是考虑目标自身辐射作为一种噪声对 SFS 三维重构的影像,其它形式的噪声对 SFS 算法的鲁棒性影响将在后续论文中深入研究。

(3)主观评价(EQ5)

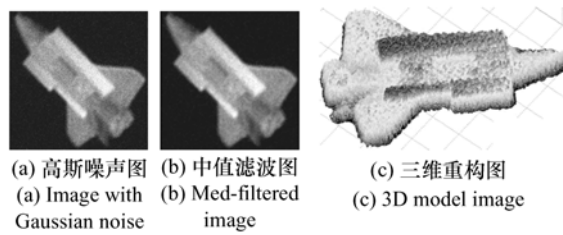


图 15 EQ4 测试

Fig. 15 Test results of EQ4

测试参数: TF = H1、H2、H3, TR = 10、50, TD = 200 ~ 280 K, 200 ~ 350 K, Iter = 15。

测试结果:三维模型见图 16,其中图 16(a,b,c,d) 为 TF = H1 产生的三维模型,图 16(e,f,g,h)

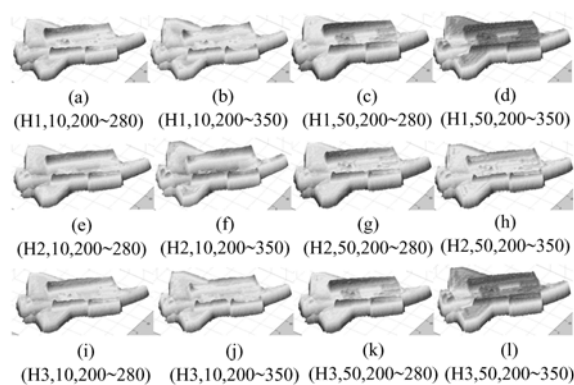


图 16 IR-SFS 三维重构图 (TF = H1 或 H2 或 H3, TR = 10 或 50, TD = 200 ~ 280 K 或 200 ~ 350 K)

Fig. 16 3D models of IR-SFS algorithm (TF = H1、H2、H3, TR = 10、50, TD = 200 ~ 280 K, 200 ~ 350 K)

为 TF = H2 产生的三维模型,图 16(i,j,k,l) 为 TF = H3 产生的三维模型,图下标 3 个参数分别表示 TF、TR、TD 的取值。将 SFS 算法直接应用于红外图像,得到的三维模型如图 17 所示。分析:从图 16 可以看出,滤波器为 H1、H3,温度场半径等于 50 时,航天飞机顶部舱门、尾翼、机舱内方形部件具有较佳显示度;滤波器为 H2,温度场半径等于 10 时,航天飞机机舱空间有明显凹陷感;SFS 算法能重建出目标的三维模型,对各部分也具有显示度;对比两种算法对目标不同部件的表现度,如飞机尾翼的形状,机舱内方形部件形状,顶部两侧机翼的形状,主观比较之下新算法对目标细节的显示效果有所优化。



图 17 SFS 算法重建的三维模型

Fig. 17 3D model obtained with SFS algorithm

结论:IR-SFS 算法参数 TF、TR、TD、Iter 的优化能表现出目标的不同特性,较 SFS 算法对目标细节的表现力有所改善。

(4) 温度递增实验(评价因子 EQ5 和 EQ6)

分别对 TF = H1、H2、H3 3 种温度场估计滤波器进行测试,由于对 TF = H2、H3 进行的测试结果与 TF = H1 基本一致,在此仅对 TF = H1 的情况进行说明。

测试参数:TF = H1, TR = 50, TD = 200 ~ 220 :1:1 000 K, Iter = 20。EQ6 测试结果见图 18,以及重构三维模型见图 19。

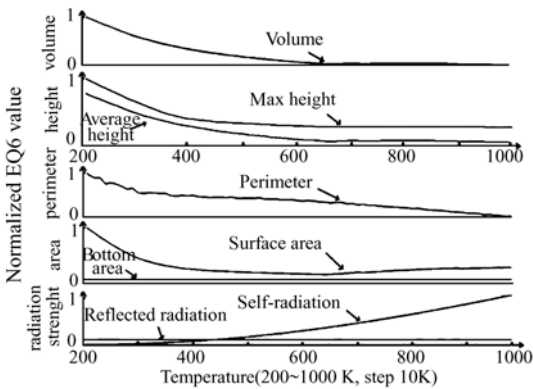


图 18 EQ6(温度递增实验)的测试结果

Fig. 18 Test results of EQ6 with TD increasing

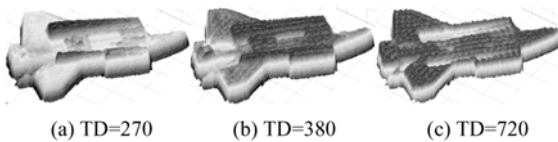


图 19 温度递增实验三维模型

Fig. 19 3D models with TD increasing

分析:随着温度升高,自身辐射强度增大,几何形状参数不断减小,三维模型的主观评价在 TD = 380 左右逐渐下降。

结论:温度估计差异对 EQ6 具有较大影响,不易获得稳定值;对于当前样本,温度估计为 200 ~ 380 K 时,3D 模型具有较好的主观评价,这与文献^[10]中对空间目标的实际温度范围估计一致。

(5) 温度场半径递增实验(评价因子 EQ5 和 EQ6)

测试参数:TF = H1、H2、H3, TR = 1:1:455, TD = 200 ~ 350 K, Iter = 15。

TF = H1、H2、H3 时的 EQ6 评价结果基本一致,在此仅将 TF = H1 的 EQ6 测试图列在图 20 中;TF = H1、H2、H3 时重建的三维模型分别见图 21、22、23,分别进行主观评价。

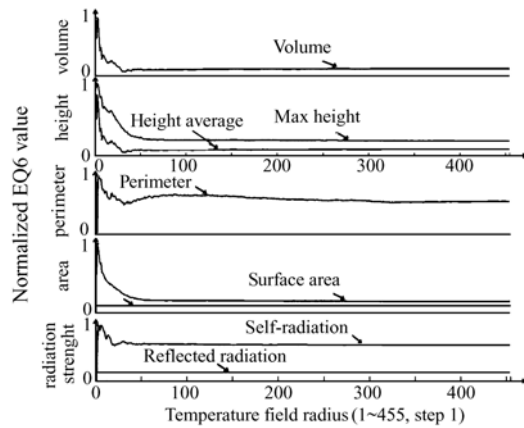


图 20 EQ6(温度场半径递增实验)的测试结果

Fig. 20 Test results of EQ6 with TR increasing

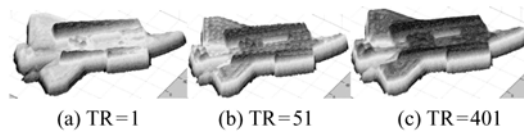


图 21 温度场半径递增实验三维模型(TF = H1)

Fig. 21 3D model with TR increasing at TF = H1

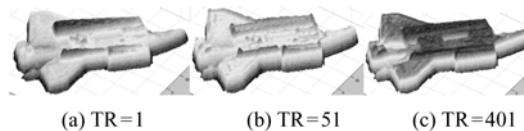


图 22 温度场半径递增实验三维模型(TF = H2)

Fig. 22 3D model with TR increasing at TF = H2

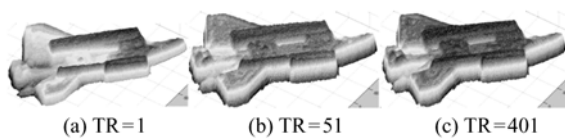


图 23 温度场半径递增实验三维模型(TF = H3)

Fig. 23 3D model with TR increasing at TF = H3

分析:当温度场半径小于 50 时, EQ6 各参数存在极大值、极小值, 目标不同细节的表现度差异较大; 当温度场半径大于 50 时, EQ6 参数趋于稳定, 模型的形状变化不大, 并且对航天飞机船舱、尾翼、机翼具有较好的细节表现度。

结论: 通过优化温度场半径可以获得目标稳定的三维模型, 且具有较好的主观评价, 当前目标的 TR 优化参数为 50。

参考文献:

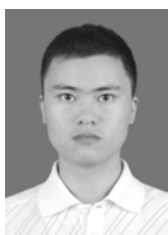
- [1] HORN B K P. Shape from shading: a method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1970.
- [2] HORN B K P. *Obtaining Shape from Shading Information*[M]. Cambridge: MIT Press, 1989.
- [3] HORN B K P. *The Variational Approach to Shape from Shading*[M]. Cambridge: MIT Press, 1989.
- [4] ZHANG R, TSAI P S, CRYER J E, et al. Shape from shading: a survey[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 8(21): 690-706.
- [5] DANIEL P, DENIS J. From deterministic to stochastic methods for shape from shading[C]. Asian Conference on Computer Vision, Taipei, Taiwan, China: ACCV2000, 2000: 187-192.
- [6] DUROU J D, FALCONE M, SAGONA M. Numerical methods for shape-from-shading: a new survey with benchmarks[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 109(1): 22-43.
- [7] ZHENG Q F, CHELLAPPA R. Estimation of Illuminant Direction Albedo and Shape from Shading[C]. Proceedings CVPR '91. , IEEE Computer Society Conference, Maui, Hawaii, 3-6 Jun 1991.
- [8] TSAI P S, SHAK M. Shape from shading using linear approximation[J]. *Image and Vision Computing*, 1994, 12(8): 487-498.
- [9] WU X D, HUANG CH CH, LING Y SH. Surface temperature and infrared feature of a satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 805-810.
- [10] TOMBASCO J. Air force Maui optical & supercomputing site tutorial[C]. AMOS 2006 conference proceedings, Hawaii, USA, 2006: 979-972.
- [11] 王建立, 陈涛, 张景旭. 地基高分辨率光电成像望远镜总体需求及关键技术分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 5(16): 1-16.
WANG J L, CHEN T, ZHANG J X. General requirement and key technologies for the ground-based high resolution EO imaging telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 5(16): 1-16. (in Chinese)
- [12] 张景旭. 国外地基光电系统空间目标探测进展[J]. *光学精密工程*, 2008, 5(16): 17-23.
ZHANG J X. Progress of foreign space target detection using the ground-based optoelectronic tracking system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 5(16): 17-23. (in Chinese)
- [13] 刘伟宁. 基于小波域扩散滤波的弱小目标检测[J]. *中国光学*, 2011, 4(5): 503-508.

7 结 语

本文将 SFS 算法扩展为 IR-SFS 算法, 建立了 IR-SFS 辐射模型和三维重建算法, 并进行了仿真分析, 在此基础上对合成球体、圆柱体卫星和真实的空间目标 STS107 的红外影像进行了算法验证。对于 STS107 红外影像, 当参数优化为温度范围估计 $TD = 200 \sim 350$ K、温度场半径 $TR = 50$ 、迭代次数大于 $Iter = 15$ 次时, 目标的顶部舱门、尾翼、机舱、机舱内的方形部件具有较好的显示度, 算法的收敛性、信噪比和三维模型的主观评价较原 SFS 算法有一定程度的改善。在今后工作中, 要对温度场估计方法和参数优化进行深入研究, 比如滤波器的设计, 温度场半径的选取, 温度范围的设定方法等。

- LIU W N. Dim target detection based on wavelet field diffusion filter[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5):503-508. (in Chinese)
- [14] 靳永亮, 王延杰, 刘艳滢, 等. 红外弱小目标的分割预检测[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1):171-178.
JIN Y L, WANG Y J, LIU Y Y, *et al.*. Pre-detection method for small infrared target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1):171-178. (in Chinese)
- [15] 邓建青, 刘晶红, 刘铁军. 基于 DSP 系统的超分辨率图像重建技术研究[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(1):114-120.
DENG J Q, LIU J H, LIU T J. Super-resolution image reconstruction technology based on DSP system[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(1):114-120. (in Chinese)
- [16] 王娴雅, 陈钱, 顾国华. 基于灰度相关的高分辨率红外图像重建[J]. *光学与光电技术*, 2009, 7(2):33-36.
WANG X Y, CHEN Q, GU G H. High resolution infrared image reconstruction based on pixel gray correlation[J]. *Optics Optoelectronic Technology*, 2009, 7(2):33-36. (in Chinese)

作者简介:



曾蔚(1982—),男,湖南郴州人,硕士研究生,2005年于解放军信息工程大学获学士学位,主要从事图像分析、运动目标跟踪等方面的研究。E-mail: iewgnez200107091@sohu.com



王斌(1980—),男,吉林省吉林市人,助理研究员,2003年于长春理工大学获得学士学位,2006年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事数值分析、数学最优化以及图像处理与恢复等方面的研究。E-mail: eatingbeen@sohu.com



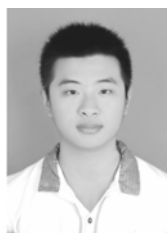
王汇源(1958—),男,山东淄博人,博士,教授,硕士生导师,2007年于山东大学获博士学位,主要从事图像处理,模式识别和视频通信等方面的研究。E-mail: hywang@sdu.edu.cn



张振铎(1982—),男,吉林长春人,副研究员,2001年于长春理工大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事主动光学等方面的研究。E-mail: zhengduo69@163.com



刘莹奇(1984—),男,吉林长春人,副研究员,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事空间目标红外光电探测等方面的研究。E-mail: a10325210@126.com



曾子晗(1994—),男,湖南郴州人,本科生,主要从事目标跟踪、自动控制方面的研究。E-mail: 243883873@qq.com