

# 复杂地面背景的红外热像合成\*

宣益民 李德沧 韩玉阁

(南京理工大学动力工程学院热能工程教研室, 江苏, 南京, 210094)

**摘要** 提出了一种新的合成地面背景红外热像的方法, 建立了基于马尔可夫随机场理论的图像分割模型, 获取了地面背景的标记图像; 综合考虑环境、气象等因素的影响, 模拟计算了不同植被地面红外辐射特性; 通过将红外辐射特性计算结果的灰度值赋予相应的可见光图像分割区域, 实现标记图像与红外辐射特性的合成, 获取复杂地面背景的红外热像。

**关键词** 马尔可夫随机场, 图像分割, 红外辐射特性, 红外热像合成

## SYNTHETIC INFRARED IMAGE OF COMPLICATED TERRAIN BACKGROUNDS\*

XUAN Yi-Min LI De-Cang HAN Yu-Ge

(School of Power Engineering, Nanjing University of Sci. & Tech., Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** A new method was presented for synthesis of infrared images of complicated terrain background and an image segmentation model was established based on the theory of Markov random field. By taking the effects of ambient and meteorological factors into account, the infrared features of different terrain scenes were simulated and calculated. The segmented visible pictures and the calculated values of the infrared features were synthesized by assigning the different gray scales to the pixels of the corresponding regions of the segmented pictures in order to obtain the infrared images of the complicated terrain scenes.

**Key words** Markov random field, image segmentation, infrared radiation characteristics, synthesis of infrared scenes.

### 引言

随着红外制导武器的发展, 对目标与背景的红外辐射特性及其对比特性描述得是否精确将直接影响到红外导引头对目标的发现、识别和跟踪, 因此, 对其特性进行研究对红外制导具有重要的意义。现阶段的研究方法主要有外场实验和数值模拟。后者在一定的理论和实验基础上, 建立目标与背景的红外辐射特性理论模型, 通过计算机模拟获得各种条件下的目标与背景红外辐射及其对比特性, 从而为红外热像的获取提供了一种极为经济有效的手段。本文采用数值模拟方法, 从地面背景的可见光图像入手, 获取地面背景的红外热像。

### 1 可见光图像的的分割

#### 1.1 马尔可夫随机场图像分割模型

在图像分割领域中, 马尔可夫随机场理论 (MRF)<sup>[1]</sup> 得到了广泛应用。本文采用最大后验概率估计 (MAP) 算法, MAP 估计器可描述为

$$\hat{\omega}^{MAP} = \arg \max_{\omega \in \Omega} P_{X|F}(\omega | f), \quad (1)$$

$$P_{X|F}(\omega | f) = \frac{P_{X,F}(\omega | f)P_X(\omega)}{P_F(f)}. \quad (2)$$

式(2)中  $P_X(\omega)$  是标记  $\omega$  的先验概率,  $P_{X|F}(\omega | f)$  是观察值  $f$  的似然函数,  $P_F(f)$  是观察值  $f$  的概率, 由于观察值是  $f$  给定的,  $P_F(f)$  是一常量。

我们可将地面背景图像中的每个地面目标看成一个标记, 则图像分割问题可转化为图像标记问题。结合贝叶斯方法, 进而求标记场的最大后验概率估计。运用大数定理, 可以确定先验概率  $P_X(\omega)$  和似然函数  $P_{F|X}(f|\omega)$ 。

在图像分割的过程中计算各地面背景目标的统

\* 国防科技预研基金(批准号 98J3.3.2BQ0202)资助项目  
稿件收到日期 2001-04-04, 修改稿收到日期 2001-08-28

\* The project supported by the Preliminary Research Fund of National Defense(No. 98J3.3.2BQ0202)

Received 2001-04-04, revised 2001-08-28

计参数集,作为其分割判据,每一个参数集对应一个图像标记类.根据大数定理,可得到每个标记类的经验均值  $\mu_k$  和经验方差  $\sigma_k$ .

## 1.2 基于博弈理论的决定性模拟退火算法

求标记场的最大后验概率属于组合优化问题,计算复杂度很高,本文采用一种基于博弈理论的决定性退火算法(GSA)进行图像标记<sup>[2]</sup>.

本文应用的是不合作的  $n$  人博弈理论<sup>[3]</sup>;在一个  $n$  人博弈游戏中,玩家的集合为  $I = (1, 2, \dots, n)$ ,每个玩家都有自己的一个游戏策略集合  $S_i$ . 博弈过程就是每个玩家从自己的游戏策略中选择一种策略  $s_i \in S_i$ ,于是就得到了一种状态  $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ ,每个玩家都有一个代价函数  $H_i(s)$ . 博弈的目的就是使总的代价最小,即对于状态  $s^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)$ ,没有一个玩家可以通过只改变自己的策略来减少总的代价.代价函数可以表示为

$$\forall i: H_i(s^*) = \min_{s_i \in S_i} H_i(s^* \parallel s_i). \quad (3)$$

式(3)中  $s^* \parallel s_i$  表示用  $s_i$  代替  $s^*$  中的  $s_i^*$  而得到的状态.对于一个  $n$  人博弈游戏来说,游戏的最小代价总是存在的.而在一个不合作的  $n$  人博弈游戏中,由于每个玩家可以独立地选择自己的策略以最小化自己的代价,为了使总的代价最小,可采用如下的松弛算法:令  $s^{(k)} = (s_1^{(k)}, s_2^{(k)}, \dots, s_n^{(k)})$  表示第  $k$  次时的状态; $H_i(s)$  表示在状态  $s$  下玩家  $i$  的代价; $\alpha \in (0, 1)$  表示接受新策略的概率.

在 GSA 方法中,初始值的选取是任意的,候选标记是以决定性的方法选出的,而候选标记的接受是随机的;随机的主要目的是从振荡中逃逸出来.

## 2 地面背景温度场及亮度场的计算

一幅图像中包含有不同类型的背景,不同类型的背景与外界的传热传质关系不同,因此地面背景温度场和红外辐射亮度场的计算模型也不同,在利用基于马尔可夫随机场理论的图像分割模型进行可见光图像分割成不同的区域后,根据图像中每个区域的地面类型属性,分别建立地面背景温度场和红外辐射亮度场模型,本文下述的模型是针对本文图像实例所建立的.

根据红外辐射理论,地表的红外辐射由自身的辐射和反射两部分组成:反射辐射部分主要包括地表表面对太阳、大地背景以及其它地表表面辐射的反射,而地表自身的辐射则主要取决于地表温度.

### 2.1 地表的一维瞬态温度计算模型

地表温度的计算,除了必要的热物性参数以外,还需要当时的环境和大气参数.地表温度的计算可由一维瞬态导热微分方程描述

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4)$$

式(4)中  $\rho$  为地表组成物质的密度,  $c$  为定压比热,  $\lambda$  为导热系数,  $T$  为温度,  $z$  为深度坐标.该方程的下边界条件为,在某一深度处温度为常数.而上边界条件,即地表的热平衡方程为<sup>[4]</sup>

$$E_s + E_c + M_g + H + EL + G = 0, \quad (5)$$

式(5)中  $E_s$ 、 $E_c$  分别为地表吸收的太阳短波辐射和大气长波辐射,  $M_g$  为地表的自身辐射,  $H$  为显热交换,  $EL$  为潜热交换,  $G$  为地表向下的导热通量.针对不同的地表属性,式(5)可有不同的表现形式.

对于地表温度的计算,表面植被的覆盖状况对地表与周围环境间的显热和潜热交换的影响很大.因而方程中  $H$  和  $EL$  项的确定可按裸露地表和植被型地表这两种情况进行.

$E_c$ 、 $E_g$  和  $M_g$  可由式(6)~式(8)确定<sup>[4]</sup>

$$E_s = (1 - \alpha) E_0, \quad (6)$$

$$E_c = \varepsilon \sigma T_a^4 (\alpha + b \sqrt{e_a}), \quad (7)$$

$$M_g = \varepsilon \sigma T_g^4. \quad (8)$$

式(6)~式(8)中  $E_0$  为到达地表处的太阳辐射,  $\alpha$  为地表反射率,  $\varepsilon$  为地表发射率,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $T_a$ 、 $T_g$  分别为空气温度和地表温度,  $e_a$  为大气水汽压,  $a$ 、 $b$  为经验常数.

对于不同类型的地表,  $H$  和  $EL$  取相应的表达式<sup>[4]</sup>,例如,对于裸露型地表,  $H$  和  $EL$  可由下面两式计算

$$H = \rho_a C_p C_D \mu_a (T_a - T_g), \quad (9)$$

$$EL = \rho_a L C_D \mu_a (q_a - q_g). \quad (10)$$

式(9)和式(10)中,  $\rho_a$ 、 $C_p$  分别为空气的密度和定压比热,  $L$  为汽化潜热,  $T_a$ 、 $q_a$  分别为参考高度处的大气温度和比湿,  $T_g$ 、 $q_g$  分别为地表表面处的温度和比湿,  $C_D$  为拖曳系数,  $\mu_a$  为风速.

### 2.2 红外辐射特性计算模型

地表在红外波段范围内(3~5 $\mu\text{m}$  或 8~14 $\mu\text{m}$ )的辐射通量,包括本身辐射和反射辐射两部分.

#### 2.2.1 本身辐射

在计算得到地表的表面温度以后,该部分辐射通量可以从普朗特公式出发,通过对红外波段范围积分得到

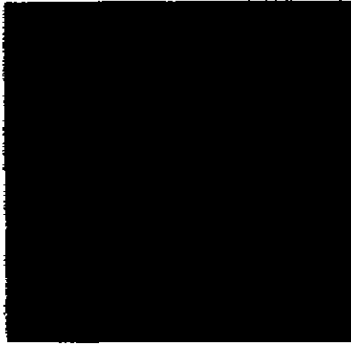


图 1 待处理的可见光图像  
Fig. 1 Original visual image



图 2 分割得到的标记图像  
Fig. 2 Marked image after partition

$$E_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda, T) \cdot \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda \quad (11)$$

式(11)中  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为红外波段范围的下、上限,  $T$  为单元表面温度,  $\epsilon(\lambda, T)$  为表面发射率,  $C_1, C_2$  分别为第一、第二辐射常数。

2.2.2 反射辐射

对于反射辐射部分,包括地表的表面对太阳、大地背景以及其他单元表面辐射的反射,计算表达式如下:

$$E_{st}^{infra} = \rho_{sun}^{infra} \cdot q_{sun}^{infra} + \rho^{infra} (q_{sky}^{infra} + q_{grd}^{infra}) \quad (12)$$

式(12)中  $\rho_{sun}^{infra}, \rho^{infra}$  分别为地表表面对红外波段范围的反射率和太阳反射率,  $q_{sun}^{infra}, q_{sky}^{infra}, q_{grd}^{infra}$  分别为地表表面接收的红外波段范围内的太阳辐射能量、天空背景辐射能量、地面背景辐射能量。

3 地面背景的红外热像合成

在地面红外热像的模拟合成中,以一幅含有浙青地面、草地及山地的地面背景可见光图像为例(如图 1 所示),图像大小为  $256 \times 256$ ,灰度级为 256。采用 GSA 方法对图 1 所示的图像进行非监督分割,在图像分割的过程中计算其统计参数集,结果如表 1 所列,每一个参数集对应一个图像标记类。在 GSA 算法中,我们取模拟退火的初始温度为  $T_0 = 5.0$ ,算法终止条件为后验能量的变化  $\Delta U$  小于当前能量值的  $1/1000$ ,降温方法则采用指数方法,即  $T_{k-1} = 0.95 \cdot T_k$ ,同构参数  $\beta$  为 0.6,接受概率  $\alpha$  为 0.7,分割后得到的标记图像如图 2 所示。

根据分割后的标记图像中的图像类别,分别计算不同类别的地表温度场和对应的红外辐射亮度场。在地表温度场的计算过程中,环境和气象参数分

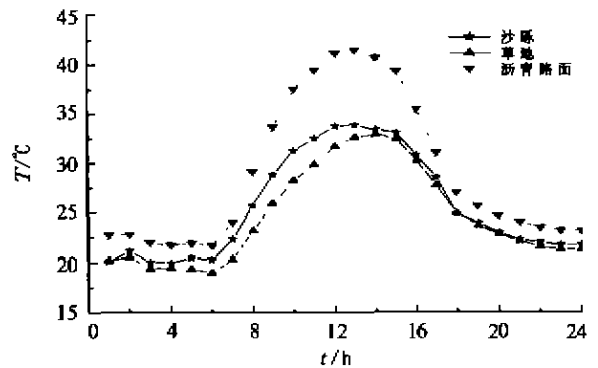


图 3 地表温度随时间的变化  
Fig. 3 Temperature of terrain vs time

别给定为:时间为某年的 8 月 1 日,风速为 5m/s,纬度为北纬  $30^\circ$ ,气温和湿度随时间而变化,则地表温度随时间的变化关系如图 3 所示。求得地表的温度后,可以获得其对应的辐射亮度场。将各种地表类型的辐射亮度折算成对应的灰度级,然后赋值到图像的相应区域,合成地面背景的红外热图像,结果如图 4 所示,(a)为 13 时 30 分,(b)为 16 时 30 分。

4 结论

本文综合运用图像处理技术和红外辐射理论,建立了复杂地面背景的红外热像模拟方法,采用基于马尔可夫随机场理论的图像分割模型对地面背景

表 1 监督参数集

Table 1 Observation parameter set

	均值 $\mu_i$	方差 $\sigma_i$
山 地	44.52	13.96
低矮草地	110.42	17.03
浙青公路	87.04	24.31

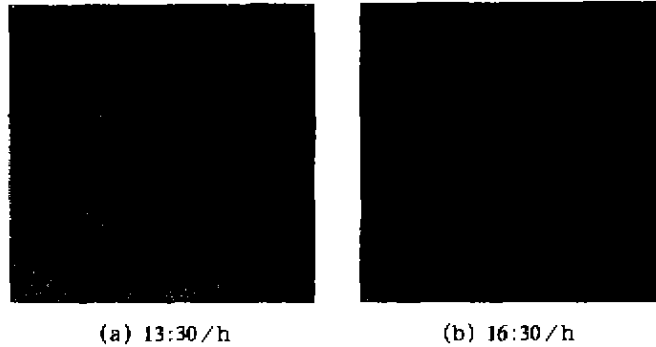


图4 合成得到地面背景的红外热像  
Fig.4 Synthesized infrared images of terrain

中的目标进行分割,获得了地面背景的标记图像;在计算地面背景的红外辐射特性的过程中,分区域综合地面背景的分割标记图像和红外热像理论模型的计算结果,最终获得复杂地面背景的红外热像.本文的实例说明建立相应的红外热像理论模型,集合构成整个地面背景的红外辐射特征模型,通过可见光图像和数值模拟方法得到地面背景红外热像的方法是可行的.

#### REFERENCES

- [1] Geman S, Geman D, Graffigne C, *et al.* Boundary detection by constrained optimization. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intel* 1, 1990, 12: 609-628
- [2] LIU Yan. The background of simulation annealing and the monotonic temperature rising. *Computer Research and Development* (刘岩. 模拟退火算法的背景和单调升温的模拟退火算法. *计算机研究与发展*), 1996, 33(1): 4-10
- [3] Tan H L, Gelfand S B, Delp E J. A cost minimization approach to edge detection using simulated annealing. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intel* 1, 1991, 14(1): 3-18
- [4] HAN Yu-Ge, XUAN Yi-Min. Random generation of natural terrain and the IR feature simulation. *J. Infrared Millim. Waves* (韩玉阁, 宣益民. 天然地形的随机生成及其红外辐射特性研究. *红外与毫米波学报*), 2000, 19(2): 129-133
- [5] Yosef N B, Rahat B, Feigin G. Simulation of IR images of natural backgrounds. *Applied Optics*, 1983, 22(1): 190-193