

中图法分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-0968-08

论文索引信息: 陶沁沁, 冯远静, 俞立, 黄国川, 欧林林. 复杂相变热图序列相变线跟踪与应用 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 968-975

复杂相变热图序列相变线跟踪与应用

陶沁沁^{1),2)}, 冯远静^{1),2)}, 俞立^{1),2)}, 黄国川³⁾, 欧林林^{1),2)}

¹⁾ (浙江工业大学信息工程学院信息处理与自动化研究所, 杭州 310023)

²⁾ (浙江省嵌入式系统联合重点实验室, 杭州 310023)

³⁾ (中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

摘要: 针对复杂相变热图序列相变线自动提取问题, 提出一种基于帧间差分信息的 C-V 主动轮廓模型提取方法。首先建立一种基于结构特征的图像精确匹配指标, 解决相变热图序列中部分帧的位置偏移问题; 然后利用与模板图像的帧间差分及差分图像的对比度增强获取有效相变信息; 最后在考虑帧间相变线关联性的基础上, 提出一种融合形状先验特征的 C-V 主动轮廓模型相变线跟踪算法。实验结果表明, 该算法解决了目前方法无法解决的序列图像中多相变线、拓扑变化等问题, 能适应多种不同类型的模型实验物, 且运算速度较经典 C-V 模型有很大提高。基于该算法开发的软件系统在实际中得到成功应用。

关键词: 相变热图; C-V 主动轮廓模型; 图像分割; 图像序列

Phase-change line tracking and application from complex phase-change thermography sequence

Tao Qinqin^{1),2)}, Feng Yuanjing^{1),2)}, Yu Li^{1),2)}, Huang Guochuan³⁾, Ou Linlin^{1),2)}

¹⁾ (College of Information Engineering, Information Processing and Automation Research Institution, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023 China)

²⁾ (Zhejiang Provincial United Key Laboratory of Embedded System, Hangzhou 310023 China)

³⁾ (China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000 China)

Abstract: A new method based on C-V active contour model is proposed to extract phase-change line automatically from complex phase-change thermography sequence. First, an accurate image matching measure based on structural characteristics is developed to solve the location bias in some frames of phase-change thermography sequence. Second, effective phase-change information is obtained according to the inter-frame difference between the template image and the differential image contrast enhancement. Finally, a phase-change line tracking algorithm is presented by introducing shape priori characteristics into C-V active contour model. The method is able to rapidly solve multi-phase change lines and topology change problems which can't be solved with existing methods. The effectiveness of the proposed algorithm is validated and compared to alternative methods with variant test models. The software system based on the algorithm has been successfully applied in practice.

Keywords: phase-change thermography; C-V active contour model; image segmentation; image sequence

收稿日期: 2010-04-07; 修回日期: 2010-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(60704021); 浙江省自然科学基金项目(Y106660)。

第一作者简介: 陶沁沁(1986—), 男, 浙江工业大学信息工程学院控制理论与控制工程专业硕士研究生, 研究方向为机器视觉、群体智能系统。E-mail: fellowtao@sina.com。

通讯作者: 冯远静, E-mail: fyjing@zjut.edu.cn。

0 引言

在航空航天飞行器的研制中,需要准确获取飞行器表面的热流分布特性。相变热图测试技术是获得热图谱的有效方法^[1-2]。该技术通过 CCD 获取飞行器模型表面的相变材料颜色变化图像序列,经过图像处理 and 热图谱分析技术获得热流分布数据。该技术的关键是准确获得相变序列图像的相变线。由于风洞环境和实验模型表面的复杂性、相变材料的相变特性等,相变序列图像成为模糊和具有噪声的复杂图像,造成热图谱分析困难,普通的边缘提取方法难以奏效。

为了有效解决相变线的准确提取问题,王晓年等人^[3]针对一类模型表面情况较为简单的相变热图提出了一种自动提取方法,该方法将原图像序列转换成一组具有关联关系的合成图像,并用合成图像的分割方法实现相变线的提取。进一步针对光照不均问题建立了光照模型和协调优化模型,分别采用动态规划^[4]和蚁群算法^[5]对模型进行求解。目前的方法基于如下前提:首先,相变线没有拓扑变化,且其运动方向为简单的单向运动;其次,图像序列转换方式易于人工确定,合成图像需具有优于原图的相变线特征。因此,目前的算法只能针对某一类相变热图实现有效分割,且需要人工确定图像转换方式,从而限制了相变热图测试系统模型多样化的需求。

随着我国航空航天飞行器技术的发展,风洞试验物模型与模型表面的热流分布越来越复杂,相变热图相变线往往具有复杂的拓扑变化且难以简单描述相变线的进化方向,使得现有算法难以适应甚至无法解决。因此,基于相变序列图像帧间差分信息,提出一种融合相变线结构特征的水平集分割方法,既有效利用了序列图像的关联信息,又解决了相变线拓扑变化问题,使得算法更加具有通用性。

1 相变热图序列预处理

在风洞试验中,试验物的相变过程非常短,一般需要先使风洞试验环境达到稳定状态,再投放试验物至试验位置。在投放过程中,试验物也存在相变。因此在试验过程获得的视频数据是包含试验物运动的序列图像。试验物相变过程是初始相变漆渐变变化的过程,相变线往往不明显,很难有效地从孤立的

单帧图像中提取相变线。实际上,相变序列图像之间存在关联信息。首先,由于相变漆相变的不可逆性,其相变过程存在单调性;其次,相变热图序列前后帧图像存在递推关系。从实际图像可以看出,相邻帧图像的色差很小,但每帧图像跟原始图像的色差很大。为了便于利用帧间色差信息与相变线约束信息,首先需要对试验物下放过程中的初始部分进行位置调整,保证序列图像中试验物位置的一致性,再对相变热图序列进行帧间差分预处理。

1.1 序列图像帧间位置精确匹配

试验物在风洞试验中的投放机制使其在达到稳定状态以前的图像与其他图像处于不一致位置。从投放机构的运动方式可以看出,图像序列中模型本身无形变,只是位置发生了平移。因试验物旋转是由于投放机构的误差造成的,所以试验物旋转对图像匹配影响很小。序列图像帧间位置矫正实际上是基于试验物模型的图像匹配问题。由于试验物相变过程是初始相变漆渐变变化过程,序列图像之间色差变化不大。现有基于目标边缘信息的图像匹配指标,如 Hausdorff 距离边缘匹配指标^[6]、基于边界方向直方图的匹配方法^[7];基于区域特征的图像匹配指标,如最大后验概率指标、巴氏指标等,难以取得满意效果。本文提出一种改进的结构特征图像匹配方法。

设模板特征矩阵(特征矩阵为标准图像中边缘特征较为明显的区域)用 p_u 表示,待匹配区域某一特征矩阵用 q_u (q_u, p_u 拥有相同的空间大小)表示,本文所提边缘特征统计指标为

$$\phi(p_u, q_u) = \sum_{i=1}^N (\sqrt{(\varepsilon_1 * p_u)^2 + (\varepsilon_2 * p_u)^2} - \sqrt{(\varepsilon_1 * q_u^i)^2 + (\varepsilon_2 * q_u^i)^2}) \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\varepsilon_2 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, N

为待匹配区域内存在与 q_u 大小相同但各不相等的矩阵个数, $\varepsilon_1 * p_u$ 为 ε_1 与 p_u 横向平面上的卷积, $\varepsilon_2 * p_u$ 为 ε_2 与 p_u 纵向平面上的卷积。

式(1)中两项分别对应于目标区域和待匹配区域中试验物边缘信息。当特征为 u 的像素全部出现在待匹配区域中的 q_u 时, $\phi(p_u, q_u)$ 取最小值,且特征 u 对该区域的支持程度最高。

某试验物采用不同匹配指标的实验结果如图 1 所示:(a)是基于边界方向直方图指标的分布图,其

分布图中相似点存在但不唯一;(b)是基于 Hausdorff 距离边缘匹配指标的分布图,其分布图中尖峰不明显;(c)为基于结构特征的分布图,其分布图中尖峰非常明显,极值唯一且极值点为匹配后的新模型位置。

试验物的模型匹配结果如图 2 所示:(a)为未匹配矫正的图像,模型存在明显的位置偏移;(b)为模板图位置,试验物下放固定后的确定位置;(c)为试验物矫正后的位置,消除了由于试验物在下放过程中带来的位置影响。

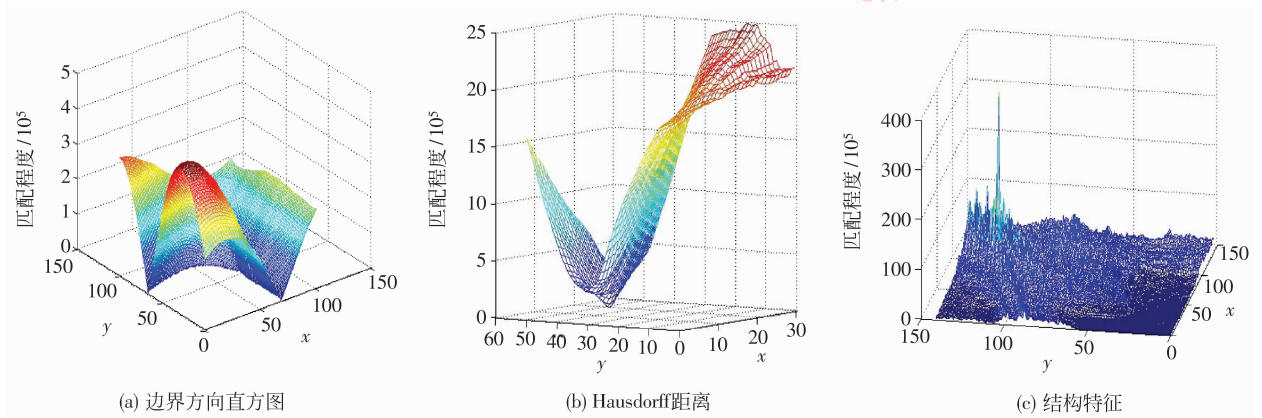


图 1 各边缘匹配指标实验结果

Fig. 1 The experimental results of edge matching measure

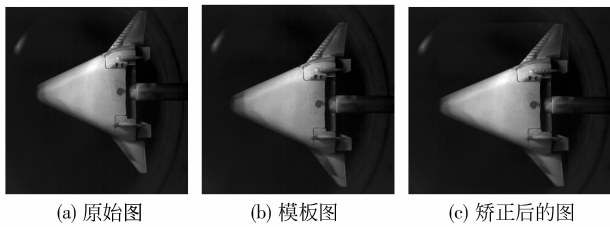


图 2 序列图像位置的精确匹配

Fig. 2 Accurate match of sequence image

1.2 图像序列帧间差分

通过以上序列图像帧间位置匹配,保证了相变热序列图像的变化过程归一化为试验物表面相变漆的渐变过程。可以采取以序列图像第 1 帧为模板图像,后序图像与其差分的方法,得到序列图像变化的有效信息。

差分过程如下:假设开始帧图像为 G , 大小为 $N \times M$, 后序变化图像中的一帧为 K , 具体大小也为 $N \times M$, 则图像 G 与图像 K 的差分为

$$G(i, j) - K(i, j) = \begin{cases} 0 & G(i, j) \leq K(i, j) \\ C(i, j) & G(i, j) > K(i, j) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $C(i, j)$ 为后序图像 K 的具体相变信息。本文序列图像对比差分实验结果如图 3 所示。因图像相变过程中存在模糊的区域,采用指数灰度拉伸的方法对其进行对比度增强,使有效的相变信息变得更为明

显,减少了模糊区域对相变线提取的影响(见图 4)。



图 3 序列图像差分结果

Fig. 3 The results of image sequence difference

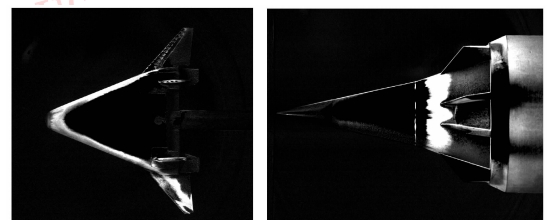


图 4 对比度灰度拉伸调整结果

Fig. 4 The results of contrast gray-spread adjustment

2 基于 C-V 主动轮廓模型的相变线提取算法

复杂相变试验物的相变过程并不是单一的渐变过程,相变线存在明显的拓扑变化,如图 4 所示。水平集方法^[8]是解决拓扑变化问题与提取边缘轮廓

的有效方法,但其曲线演化和搜索速度并不理想,考虑到相变线变化的曲线演化特征,本文引入结合曲线演化和水平集理论的 C-V 主动轮廓模型。在实际应用中,如果分别对每帧图像单独处理,非常耗时。实际上,序列图像相变线之间存在形状相似性和关联性,前帧图像的相变线为后序相变线提供先验知识。鉴于此,提出一种融合形状先验特征的 C-V 主动轮廓模型相变线跟踪算法提高处理速度。

2.1 C-V 主动轮廓分割模型

C-V 主动轮廓模型是 Chan 和 Vese 等人^[9]提出的一种基于 Mumford-Shah 模型的区域最优主动轮廓模型。假定 Ω 为 R^2 中的有界开集, $\partial\Omega$ 为开集的边界, $u_0: \Omega \rightarrow R$ 是给定的图像。假设图像 u_0 是由有两个灰度值分别近似于常数 c_1 和 c_2 的区域组成。进一步假定要分割的对象轮廓是 C_0 , 对象的点数值为 $u_0(x, y)$, 那么在对象内部, 有 $u_0 = c_1$, 而在对象外部有 $u_0 = c_2$ 。可以构造如下能量函数

$$\begin{aligned}
 E(c_1, c_2, \phi) = & \mu \int_{\Omega} \delta(\phi(x, y)) |\nabla\phi(x, y)| dx dy + \\
 & \nu \int_{\Omega} H(\phi(x, y)) dx dy + \\
 & \lambda_1 \int_{\Omega} |u_0(x, y) - c_1|^2 H(\phi(x, y)) dx dy + \\
 & \lambda_2 \int_{\Omega} |u_0(x, y) - c_2|^2 (1 - H(\phi(x, y))) dx dy
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中, $\lambda_1, \lambda_2, \nu, u$ 为各项的系数常量。固定 c_1, c_2 , 将 E 看成水平集函数 ϕ 的泛函。根据欧拉-拉格朗日方程法推导出使式(3)极小化的水平集函数 ϕ 满足的偏微分方程

$$\begin{cases}
 c_1(\phi) = \frac{\int_{\Omega} u_0(x, y) H(\phi(x, y)) dx dy}{\int_{\Omega} H(\phi(x, y)) dx dy} \\
 c_2(\phi) = \frac{\int_{\Omega} u_0(x, y) (1 - H(\phi(x, y))) dx dy}{\int_{\Omega} (1 - H(\phi(x, y))) dx dy} \\
 \frac{\partial\phi}{\partial t} = \delta(\phi) \begin{pmatrix} \mu \operatorname{div}\left(\frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|}\right) - \nu \\ -\lambda_1 (u_0 - c_1)^2 \\ +\lambda_2 (u_0 - c_2)^2 \end{pmatrix} (0, \infty) \times \Omega \\
 \phi(0, x, y) = \phi_0(x, y) \quad (x, y) \in \Omega
 \end{cases} \tag{4}$$

式中, $H(x), \delta(x)$ 分别为 Heaviside 函数和 Dirac 函

数, 在实际计算中, 分别取

$$H_{\varepsilon}(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{2}{\varepsilon}\right) \right) \tag{5}$$

$$\delta_{\varepsilon}(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 + x^2} \tag{6}$$

2.2 融合形状先验特征的相变线跟踪算法

传统的 C-V 主动轮廓模型需通过初始化水平集函数 ϕ 保持符号距离函数(假设给定平面上的一条闭合曲线, 有 $\phi(x, y)$ 是点 (x, y) 到当前轮廓曲线的最短距离, 称 $\phi(x, y)$ 为符号距离函数(SDF)), 并在曲线演算过程中重构水平集函数 ϕ ^[10]。序列图像是由很多帧组合而成的, 数量庞大, 采用传统的 C-V 主动轮廓模型需对每帧图像在演算过程中重构水平集函数 ϕ , 这是一步非常耗时的步骤。在实际应用中, 相变序列图像前后帧的相变线存在关联, 前帧相变线可以为后者提供先验信息。为此, 本文从水平集函数 ϕ 的初始化、重构以及如何融合相变线形状特征方面对 C-V 主动轮廓模型进行改进以提高相变线的提取速度。

初始化 ϕ : 以前帧所提取的相变热线为基准, 快速初始化水平集函数 ϕ 。设 η 为前帧提取得到的相变线, 计算当前图像帧中各像素坐标点与闭合曲线 η 的距离 $d(x, y)$, 通过计算 $\phi = \pm d(x, y)$ (前帧轮廓内部为负, 外部为正), 得到水平集函数。因为相变热图序列是一个渐变过程, 单帧之间区别很小, 选择以前帧为初始轮廓 ϕ , 大大减少了搜索的迭代次数, 减少了运算时间。

前帧相变线获取之后, 可以作为当前帧的先验知识。构造相变线形状先验特征函数^[11]

$$E_{\text{initial}}(\phi, \phi_l) = \int (H(\phi) - H(\phi_l))^2 dx \tag{7}$$

式中, ϕ 为当前帧的水平集函数, ϕ_l 为前帧的水平集函数。

无需重构 ϕ : 为了提高算法的演化速度, Li 基于水平集函数提出一个水平集协调函数^[12], 可以无需考虑水平集函数的重构问题, 其式如下

$$\rho(\phi) = \int \frac{1}{2} (|\nabla\phi(x, y)| - 1)^2 dx dy \tag{8}$$

根据该演算函数可以解决水平集函数重构问题, 即水平集函数不必重构为水平集函数, 提高曲线演化的速度。

本文结合式(7)(8), 提出一种基于差分信息且

融合形状先验特征的 C-V 主动轮廓模型

$$\begin{aligned}
 E(c_1, c_2, \phi) = & \mu_2 \int_{\Omega} \frac{1}{2} (|\nabla \phi(x, y)| - 1)^2 dx dy + \\
 & \mu_1 \int_{\Omega} \delta(\phi(x, y)) |\nabla \phi(x, y)| dx dy + \\
 & \alpha \int (H(\phi) - H(\phi_i))^2 dx + \\
 & \lambda_1 \int_{\Omega} |I_0(x, y) - c_1|^2 H(\phi(x, y)) dx dy + \\
 & \lambda_2 \int_{\Omega} |I_0(x, y) - c_2|^2 (1 - H(\phi(x, y))) dx dy
 \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $I_0(x, y) = \gamma \cdot (g(x, y) - k(x, y))$, $k(x, y)$ 为序列图像中的初始图像, $g(x, y)$ 为序列图像中后序相变图像, γ 为对比度增强的系数, $\mu_1, \mu_2, \alpha, \lambda_1, \lambda_2$ 为各项系数常量。根据欧拉-拉格朗日方程推导出使式(9)极小化的水平集函数 ϕ 满足的偏微分方程

$$\begin{cases}
 c_1(\phi) = \frac{\int_{\Omega} I_0(x, y) H(\phi(x, y)) dx dy}{\int_{\Omega} H(\phi(x, y)) dx dy} \\
 c_2(\phi) = \frac{\int_{\Omega} I_0(x, y) (1 - H(\phi(x, y))) dx dy}{\int_{\Omega} (1 - H(\phi(x, y))) dx dy} \\
 \frac{\partial \phi}{\partial t} = \delta(\phi) \left(\mu_1 \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) - \lambda_1 (I_0(x, y) - c_1)^2 + \right. \\
 \left. \lambda_2 (I_0(x, y) - c_2)^2 \right) + \\
 u_2 \left(\nabla^2 \phi - \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right) + \\
 \alpha \cdot \delta(\phi) \cdot (H(\phi) - H(\phi_i)) \quad (0, \infty) \times \Omega \\
 \phi(0, x, y) = \phi_0(x, y) \quad (x, y) \in \Omega
 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $H(x), \delta(x)$ 分别如式(5)(6)。本文算法既保证了初始区域简单方便的选取, 又保证了计算速度的提高和相变热选取的正确性。

2.3 算法步骤

基于上述思想, 相变热图序列相变线提取算法的步骤如下:

- 1) 选取复杂图像序列的起始帧。
- 2) 通过间隔 N 帧, 自动选取后序帧, 通过差分及对比度的调整, 得到差分变化的有效信息, 完成对水平集函数 ϕ 的初始化。

- 3) 根据式(10)计算 $c_1(\phi_{i,j}^n), c_2(\phi_{i,j}^n)$, 然后通过计算

$$\begin{aligned}
 \phi_{i,j}^{n+1} = & \phi_{i,j}^n + \tau \left(\delta(\phi_{i,j}^n) \cdot \left(\mu_1 \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi_{i,j}^n}{|\nabla \phi_{i,j}^n|} \right) - \right. \right. \\
 & \lambda_1 (I_0(x, y) - c_1)^2 + \lambda_2 (I_0(x, y) - c_2)^2 \left. \left. + \right. \right. \\
 & \alpha \cdot \delta(\phi_{i,j}^n) \cdot (H(\phi_{i,j}^n) - H(\phi_{i,j}^{n-1})) \left. \left. + \right. \right. \\
 & \left. \left. u_2 \left(\nabla^2 \phi_{i,j}^n - \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi_{i,j}^n}{|\nabla \phi_{i,j}^n|} \right) \right) \right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

得到后帧的水平集函数。 τ 为迭代步长, 演化水平集函数, $\phi_{i,j}^n$ 为当前帧的水平集函数, $\phi_{i,j}^{n+1}$ 为后帧的水平集函数, $\phi_{i,j}^{n-1}$ 为前帧的水平集函数。

- 4) 计算收敛条件 $Q = \sum_{i,j} |\phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i,j}^n|$, 该式表示轮廓上的变化情况。取阈值 ξ , 若 $Q < \xi$, 则认为收敛, 迭代停止; 反之则返回步骤 3) 继续处理。

- 5) 判别后序帧是不是最后一帧, 如果是则退出, 得到所需的所有序列图像的相变过程及精确相变线; 不是则返回步骤 2) 继续运行。

3 实验分析及系统实现

为了验证本文算法的有效性, 对复杂相变热图序列进行实验计算。本文所用图像是风洞实验中采集速度为 50 帧/s 的序列图像。图 5(a)(b) 为模型 1 的序列相变图的两帧图像(模型 1 的图片分辨率为 1280×1024), 从图 5(a) 中可以观察得到其表面模糊并存在拓扑变化。图 5(c)(d) 为模型 2 中的两帧图像(模型 2 的图片分辨率为 1156×712), 图 5(d) 中模型表面多区域相变, 共存着多条相变线。本文分别采用现有算法^[4] 和本文算法对复杂相变热图相变线提取进行实验分析, 并基于所提算法开发整个相变热图图像处理系统, 在实际中进行应用。

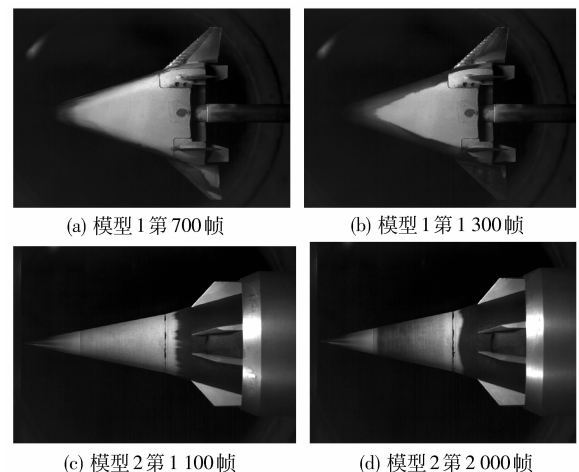


图 5 两种相变热图序列图像

Fig. 5 Two kinds of phase-change thermography sequence

3.1 现有算法实验分析

针对实验物模型的序列图像,采用文献[4]方法将所有的相变序列图像直接分割转化为合成图像。图 6(b)为模型 1 原始图(图 6(a))经转换得到的合成图像,图 6(d)为模型 2 原始图(图 6(c))进行分割转化后得到的合成图像。由图 6(b)可知,原模型表面存在的拓扑变化相对于整个模型区域,变化范围较小。轮廓边缘点与周围点进行叠加平均后,在合成图像中已不存在拓扑变化点。分析图 6(d)可知,该合成图像中存在较多的模糊区域,实验物模型多相变线的相变情况受其影响也变得非常模糊,很难找出统一的规律。所以该算法缺少通用性,无法解决模型中存在多相变线及边缘存在拓扑变化的情况。

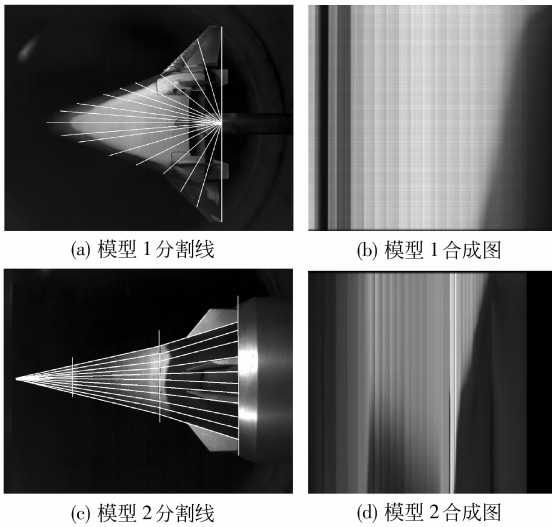


图 6 不同实验物的分割结果

Fig. 6 The segment results of different experimental models

3.2 本文算法与经典 C-V 模型对比分析

在实际实验中,采用模型 1 图片对两种算法进行对比分析,C-V 模型参数值为 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1, \mu_1 = 0.02 \times 255^2, \mu_2 = 1, \alpha = 1, \gamma = 3, \tau = 0.1$ 。图 7 介绍了无改进 C-V 模型和本文 C-V 模型做不同迭代次数下所需要的时间,可以看出,基于本文改进的 C-V 算法较原有算法计算时间上提高了近一倍。为了更近一步的了解算法间的速度情况,定义偏差量为

$$\text{Offset} = \text{当前运算符号距离函数} - \text{上轮符号距离函数}$$

相同的迭代次数下,偏差量 Offset 越小,说明算法的运算速度越快,所需运算时间越少。图 8 为无改进 C-V 模型和本文 C-V 模型在相同迭代次数下的偏差量。

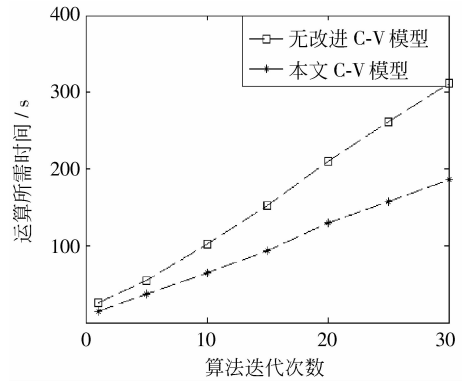


图 7 时间对比

Fig. 7 Time contrast

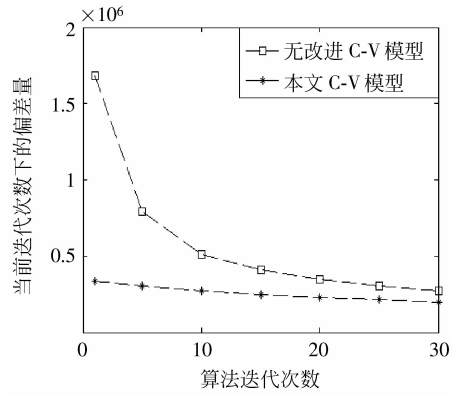


图 8 偏移量对比

Fig. 8 Offset contrast

3.3 本文算法分割结果

在 MATLAB 实验环境下按本文算法步骤(图像帧间隔 N 本文取 5, 阈值 $\zeta = 200\ 000$)自动提取模型的相变线。图 9(a)中相变线实时跟踪相变区域的

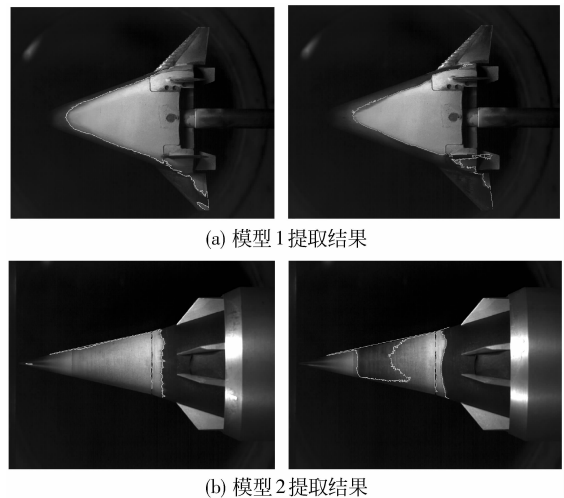


图 9 实验中各模型的提取结果

Fig. 9 The extract results of models in the experiment

拓扑变化;图(b)中模型中间区域随着时间推移发生了相变,区域呈现不规则扩散,相变线始终跟随区域变化。结果表明,本文算法很好地解决模型表面的拓扑变化问题,也解决了模型中多相变线的提取问题。

3.4 系统实现及验证

在完成对相变线自动提取后,还需完成对实验物模型表面气动加热参数和热流的计算,方程求解方法参见文献[1]。采用 VC++ 6.0 开发工具在 Windows XP 环境下实现本文算法,实现对各模型相

变线自动提取及模型表面气动加热参数和热流的计算。图 10(a)为各模型的相变线自动提取及过程显示;图 10(b)为热谱图的分布所形成相变线的合集,其中也包含了模型表面参数的输入、气动加热系数与热流的计算结果;图 10(c)的曲线是热图谱上一直线上的气动加热系数的动态分布。通过对比实例数据,验证了本文算法可靠可行,而且从图 10(b)可知,相变热图序列相变线变化过程是缓慢向前递进变化的过程,从而也验证了本文结果的正确性。

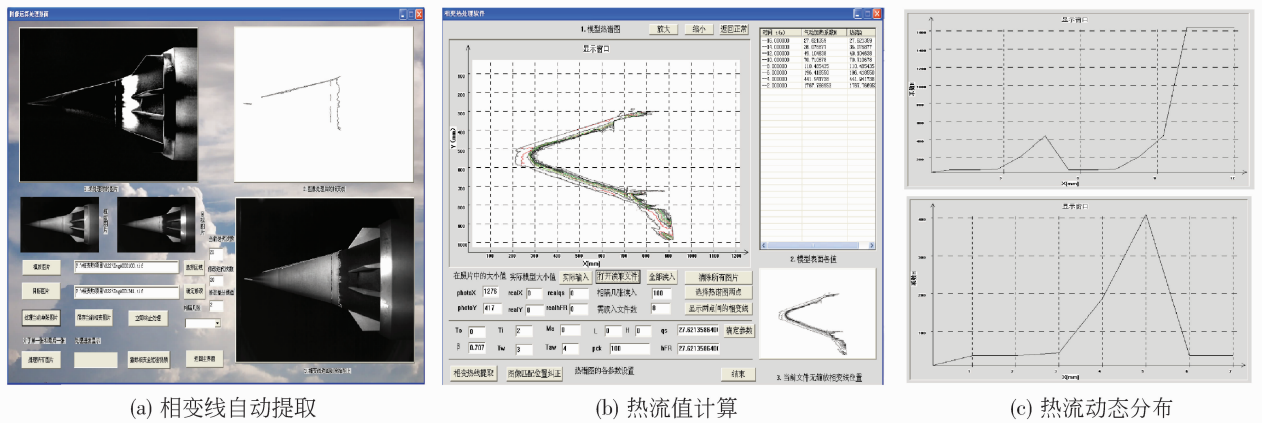


图 10 相变热图软件系统

Fig. 10 Software system of phase-change thermography sequence

4 结论

因难以有效地从孤立的相变热图中提取相变线,通过边缘特征统计指标修正了部分相变热图序列中实验物的位置偏移,并对序列图像做差分运算和对比度灰度拉伸处理。根据序列图像的前后关联性,融合前帧形状先验特征,提出一种基于帧间差分信息的 C-V 主动轮廓模型提取方法,为后序帧提供更精确的初始范围,减少了计算量,提高了计算速度。且本文算法具有很好的通用性及拓展性,适用于各种复杂模型。基于本文算法开发的软件系统已成功应用于实际检测中,实现自动提取相变热线和计算模型表面热流值。

参考文献 (References)

[1] Tang Qiaoqi, Huang Guochuan. The research and application of phase change thermography technique [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(1) : 15-17. [唐巧琪, 黄国川. 相变热图试验技术研究与应用 [J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(1) : 15-17.]

[2] Zhang Jintao, Fang Derun. The application of the phase change thermography technology in measurement of surface heat transfer rate [J]. Aerodynamic Experiment and Measurement Control, 1995, 9(1) : 67-72. [张金涛, 方德润. 相变热图技术在表面热流测量中的应用 [J]. 气动实验与测量控制, 1995, 9(1) : 67-72.]

[3] Wang Xiaonian, Feng Zuren. The automatic extraction of isothermal line in phase-change thermography sequence [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2007, 20(4) : 469-477. [王晓年, 冯祖仁. 相变热图序列中等温线的自动提取 [J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(4) : 469-477.]

[4] Wang Xiaonian, Feng Zuren. A new segmentation method for phase change thermography sequence [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(7) : 1868-1878.

[5] Feng Zuren, Feng Yuanjing. Decentralized, hierarchical colony algorithm and its phase transition sequence of image segmentation application [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(2) : 136-140. [冯祖仁, 冯远静. 分散、递阶蚁群算法及其在相变序列图像分割中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(2) : 136-140.]

[6] Gope C, Kehtarnavaz N. Affine invariant comparison of point-sets using convex hulls and hausdorff distances [J]. Pattern

- Recognition, 2007, 40(1):309-320.
- [7] Malki J, Mascarilla L. Directional relations composition by orientation histogram fusion [J]. Proceeding of the International Conference on Pattern Recognition, 2000, 15(3):758-761.
- [8] Vese L, Chan T. A multiphase level set framework for image segmentation using the Mumford and Shah model [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 50(3):271-293.
- [9] Chan T, Vese L. Active contours without edges [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2):266-277.
- [10] Wang X F. An efficient local Chan-Vese model for image segmentation [J]. Pattern Recognition, 2009, 43(3):603-618.
- [11] Chan T, Zhu W. Level set based shape prior segmentation [C]//Proceeding of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005, 2:1164-1170.
- [12] Li C M, Kao C Y. Minimization of region-scalable fitting energy for image segmentation [J]. IEEE Transactions Image Processing, 2008, 17(10):1940-1949.