

# 基于曲率的全仿射曲线图像配准

柴先涛 梁久祯 稷龙亚

(江南大学物联网工程学院智能系统与网络计算研究所 无锡 214122)

**摘要** 为了解决视点变化造成曲线图像匹配和识别困难的问题,利用全仿射模型建立仿射变换图库,在图库样本中通过曲率信息找出与目标样本相关性最优的样本,从而达到曲线图像匹配和识别的目的。基于曲率的全仿射曲线图像匹配的方法,首先根据全仿射模型对样本图像建立样本库,对样本库中每一个样本通过等间隔偏移进行采样,然后对采样后的子样本建立曲率样本子集,将目标图像与样本子集中的每一个样本进行快速最近邻搜索算法相似性匹配;最后通过匹配结果,找到最优匹配样本。实验结果表明,基于曲率的全仿射曲线图像配准具有较高的成功率,并且与传统算法相比具有更多的优点。

**关键词** 曲率,曲线匹配,全仿射模型,仿射不变

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.1.012

## Full Affine Curve in Curvature Scale Space Image Registration

CHAI Xian-tao LIANG Jiu-zhen LANG Long-ya

(Institute of Intelligent Systems and Network Computing, School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract** To solve the problems that viewpoint change of curve image results in difficult matching and recognition, we used full affine transformation model library in the gallery to find the optimal sample correlated with the target by the curvature information, so as to achieve the matching and identification of curve image. In this paper, based on image matching method of curvature full affine curve, a sample library of sample images was established according to the full affine model. In a sample library, each sample is sampled by equal interval offset sampling. Then curvature subset of samples is established for the sub-samples. A fast nearest neighbor search algorithm is carried out using the target image and the sample subset for similarity matching. Finally the optimal matching sample is found by matching results. Experimental results show that the full affine curve image registration based on curvature has a high success rate, and has more advantages compared with traditional algorithms.

**Keywords** Curvature, Curve matching, Full affine model, Affine invariant

## 1 引言

物体的识别与匹配应用非常广泛,物体识别能在寻找的对象中粗略发现目标,匹配能精确地找到与目标相一致的对象。物体的匹配常常通过目标与模型库中的图像进行匹配来实现,如果物体特征明显、含有足够多的信息,可以通过特征点进行识别与匹配,但在目标图像中信息较少、特征一致的情况下很难用特征点来进行匹配,这时可以通过图像的轮廓信息进行匹配。

传统的曲线匹配算法是在曲线发生尺度和旋转角度变化的情况下实现曲线的匹配,例如傅里叶梅林变换,使图像具有一定的旋转和尺度不变性,常用于发生了尺度和旋转变化的目标图像配准<sup>[1,2]</sup>。Sapiro<sup>[3]</sup>提出曲线的仿射曲率,其在尺度空间具有一定的仿射不变性,但不能精确表示曲线。Mokhtarian<sup>[4]</sup>提出曲率尺度空间(Curvature Scale Space, CSS)的方法,即在曲线中计算不同尺度情况下的曲率,但是

它对全局阈值要求比较高;文献[5]提出仿射变换形状相似性检索的方法。XC He<sup>[6]</sup>等提出自适应阈值和支持动态区域的曲率空间角点检测方法,其弥补了设定全局阈值的不足,能快速提取出曲线角点,但是由于角点信息量较少,造成匹配困难。Cui<sup>[7]</sup>利用曲线曲率积分的方法解决尺度变化的问题,并将其用于曲线匹配,该方法能匹配相似变换下的曲线,匹配计算复杂度较小,但是对仿射变换具有局限性。Lim<sup>[8]</sup>利用小波变化对曲线进行分段,建立描述子,其对部分遮挡的轮廓具有一定的识别能力,但是描述子仿射不变性的能力较弱。

图像提取特征点算法使得特征点具有尺度、旋转、亮度变化等不变特性,故特征点常常应用到图像匹配算法中。例如张云生<sup>[9]</sup>等提出基于改进 ORB 算法的遥感图像自动配准方法,该方法对特征点进行网格划分,使特征点分布均匀。文献[10]提出根据特征点进行图像配准,但是由于特征点是在图像中提取的关键点并对其局部区域的描述,针对图像曲线的特殊性,在关键点的描述过程中,位于曲线上的关键点周围没

到稿日期:2015-04-23 返修日期:2015-05-29 本文受国家自然科学基金(61202312,61170121)资助。

柴先涛(1989-),男,硕士,主要研究方向为机器视觉、图像处理, E-mail: 1043569438@qq.com; 梁久祯(1968-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为机器视觉、图像处理、模式识别; 稷龙亚 硕士,主要研究方向为机器视觉、图像处理。

有信息来描述关键点,因此描述子特性不能发挥,同时当曲线轮廓比较平滑时,相应的特征点会比较少,会导致特征点不能充分描述整个曲线轮廓的信息。

在采集图像的过程中容易产生不同视角的情况,即使是微小的角度差异,也会造成目标无法识别,图像处理算法难以成功。针对这个问题,Morel等在ASIFT算法中建立了全仿射模型<sup>[11]</sup>,即针对原始图像模拟视角变化,建立多种经纬度和旋转角度的匹配库,从而在角度变化大的情况下依然能进行配准。

本文针对视点变化造成曲线图像匹配和识别困难的问题,提出基于曲率的全仿射曲线图像匹配方法,根据全仿射模型对样本图像建立样本库,对样本库中每一个样本进行等间隔偏移采样之后的子样本建立曲率样本子集,将目标图像与样本子集中的每一个样本进行快速最近邻搜索算法相似性匹配<sup>[12]</sup>,通过匹配结果找到最优匹配样本。

## 2 全仿射模型原理

本文对ASIFT的全仿射模型建立样本库<sup>[10]</sup>,模型的基本思想是模拟镜头的旋转角度和倾斜角度以对初始图像进行改变,得到不同旋转角度和倾斜角度下的多个样本,用这些本来近似真实镜头变化情况下的目标图像。全仿射模型可以表示为:

$$u(x, y) \rightarrow u(ax+by+e, cx+dy+f) \quad (1)$$

上述变换可以通过映射矩阵  $A \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$  表示,它可以分解为:

$$A = \lambda \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \sin\phi \end{pmatrix} \quad (2)$$

设仿射矩阵  $A = \lambda R(\psi) T_t R(\phi)$ , 其中  $\lambda > 0$ ,  $\lambda, t$  是  $A$  的决定因子,  $T_t (t \geq 1)$  为倾斜度,  $\psi$  为镜头旋转角度, 如图 1(a) 所示, 变换模型中的  $\phi$  为经度角,  $\theta$  为纬度角。

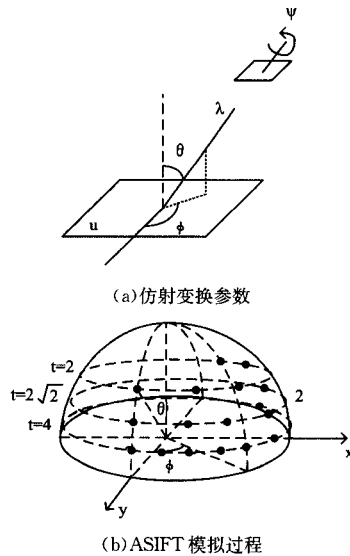


图 1 全仿射模型说明

全仿射库是在全仿射模型的基础上建立的,对式(2)中倾斜参数  $t$  和经度角参数  $\phi$  进行采样,如图 1(b) 所示采样规则为:  $t$  按照等比数列  $t=1, a, a^2, \dots, a^n$  进行采样,其中,  $a=\sqrt{2}$ ,  $n=5$ , 经度角  $\phi$  随着  $t$  按照比例变化 ( $\phi=0, b/t, \dots, kb/t$ ) 进行

采样,其中,  $b=72, kb/t < 180^\circ$ 。按照上述参数的规则进行采样,代入到映射矩阵  $A$  中,对原始图像  $I$  通过  $I'(\phi, t) = A \cdot I$  进行运算,得出全仿射库。

## 3 构造曲率样本子集

ASIFT 全仿射模型通过模拟采样的方式近似相机视点变化的情况,使得全仿射库中有各种仿射样本图像,能够在相似性匹配过程中发挥更大的作用,尤其是在目标对象方式仿射变化时能够更好地找到相似性对应样本。但是全仿射模型并不具备旋转和尺度不变性,因此需要进一步处理曲线匹配,使其具有旋转和尺度不变性。曲率尺度空间(CSS)图像表示法用来表示物体形状,是一种高效、健壮的形状表示方法。

### 3.1 计算曲线曲率

在预处理提取轮廓线后,每一个物体都是由一些  $(x, y)$  坐标组成的边界点的集合。这些点组成一条封闭的平滑曲线,对曲线的参数化表示为:

$$\Gamma(u) = (x(u), y(u)) \quad (3)$$

其中曲率的计算公式为:

$$k(u) = (\dot{x}(u)\ddot{y}(u) - \dot{y}(u)\ddot{x}(u)) / (\dot{x}^2(u) + \dot{y}^2(u))^{3/2} \quad (4)$$

对曲线  $\Gamma(u)$  进行高斯卷积,  $g(u, \sigma)$  为宽度为  $\sigma$  的高斯卷积核,定义为:

$$g(u, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

卷积后曲线为:

$$\Gamma_\sigma = (X(u, \sigma), Y(u, \sigma)) \quad (6)$$

其中,  $X(u, \sigma)$  与  $Y(u, \sigma)$  分别表示为:

$$X(u, \sigma) = x(u) \otimes g(u, \sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} x(v) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-v)^2}{2\sigma^2}} dv \quad (7)$$

$$Y(u, \sigma) = y(u) \otimes g(u, \sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} y(v) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-v)^2}{2\sigma^2}} dv \quad (8)$$

曲线  $\Gamma(\sigma)$  的曲率为:

$$k(u, \sigma) = \frac{X_u(u, \sigma)Y_{uu}(u, \sigma) - X_{uu}(u, \sigma)Y_u(u, \sigma)}{(X_u(u, \sigma)^2 + Y_u(u, \sigma)^2)^{3/2}} \quad (9)$$

其中:

$$X_u(u, \sigma) = \frac{\partial}{\partial u} X(u, \sigma) = x(u) \otimes g_u(u, \sigma) \quad (10)$$

$$X_{uu}(u, \sigma) = \frac{\partial^2}{\partial u^2} X(u, \sigma) = x(u) \otimes g_{uu}(u, \sigma) \quad (11)$$

$$Y_u(u, \sigma) = y(u) \otimes g_u(u, \sigma) \quad (12)$$

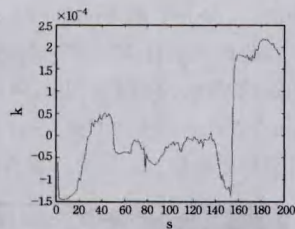
$$Y_{uu}(u, \sigma) = y(u) \otimes g_{uu}(u, \sigma) \quad (13)$$

### 3.2 生成曲率图像样本

预处理后,为了标准化弧长,全仿射模型样本库中每幅图像中的物体边界曲线被重采样并用 200 个等距点表示。然后,将该曲线用高斯函数平滑,平滑后的曲线称为  $\Gamma_\sigma$ , 本文对平滑后的曲线  $\Gamma_\sigma$  计算曲率,每一个采样点对应一个曲率值,用曲率值来表示整个曲线。实验采用  $270 \times 250$  像素的图像,图 2(a) 为原始目标图像,图 2(c) 为目标变小 50% 后的图像。从两个目标图像对应的曲率分布图(图 2(b) 和图 2(d)) 中可以看出,目标图像虽然尺度发生变化,但是对应的曲率分布的形状相近,所以通过标准化弧长可以使曲率分布图像具有尺度不变性。



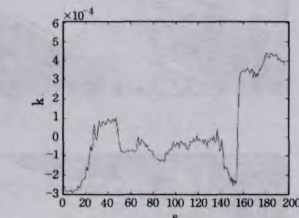
(a)原始目标图像



(b)对应的曲率分布结果



(c)变小50%后的目标图像



(d)对应的曲率分布结果

图2 目标曲线曲率分布结果

### 3.3 建立样本子集

由于图像中目标对象的旋转角度多样,造成在曲率样本子集中每个样本采样的起始点并不一定相同。本文对标准化弧长过程中的200个点采用循环采样的方式进行采样,每隔两个点进行一次采样作为子样本,循环结束后成为样本子集。通过循环采样形成子样本的设置,使得在与待匹配图像匹配时能找到最佳的偏移角度。

## 4 基于曲率的图像配准

将待匹配图像与样本子集中的每一个样本进行快速最近邻搜索算法相似性匹配,匹配过程如图3所示,图中左上图为模板曲线的曲率分布图,左下为仿射库中每一个样本经过平移建立的样本子集的曲率分布图,通过式(4)依次计算归一化互相关系数,求出最佳偏移位置;图中右图为NCC计算出的结果图,横坐标为曲线弧长,纵坐标为计算出的NCC值,最大NCC值对应最佳偏移位置,同时将匹配结果进行排序,找到最优的子样本。此时最优子样本 $I_2(x,y)$ 与待匹配图像 $I_1(x,y)$ 之间建立匹配关系,即两个曲线上的像素点呈一一匹配关系。

$$NCC =$$

$$\frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N (I_2(x,y) - \bar{I}_2)(I_1(x,y) - \bar{I}_1)}{\sqrt{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N (I_1(x,y) - \bar{I}_1)^2} \sqrt{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N (I_2(x,y) - \bar{I}_2)^2}} \quad (14)$$

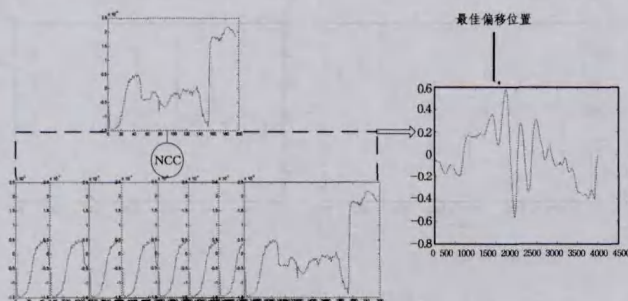


图3 曲线曲率的匹配过程

本文将待匹配图像与样本子集中的每一个样本进行快速最近邻搜索算法相似性匹配,将匹配结果进行排序,找到最优的子样本,同时得出最佳的偏移角度。此时最优子样本 $I_2(x,y)$ 与待匹配图像 $I_1(x,y)$ 之间建立匹配关系,即两个曲线上的像素点呈一一匹配关系。通过匹配关系式(15)求得透射变换矩阵 $H$ 如式(16)所示,二维投影变换的模型:

$$\begin{pmatrix} x_1' \\ y_1' \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中, $s$ 为缩放系数, $h_{33}$ 通常取1,变换的自由度为8,可以由4对点计算出变换矩阵。

将待匹配图像 $I_1(x,y)$ 经透射变换矩阵(式(16))变换为 $I_1'(x',y')$ ,与最优子样本 $I_2(x,y)$ 进行均方根误差运算得到误差值,如式(17)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i' - x_i)^2 + (y_i' - y_i)^2}}{N}} \quad (17)$$

对仿射库中每一个样本建立的样本子集进行匹配后,都得到一个对应的误差值,最后得出最小误差值对应的仿射库样本,将其用透射变换矩阵进行变换,得出最佳匹配。

## 5 本文算法描述

设样本图像与待匹配图像分别为 $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)$ ,利用本文算法进行完全仿射不变曲线图像匹配的步骤如下:

输入:待匹配的样本图像 $I_1(x,y)$ ,模板图像 $I_2(x,y)$

输出:最优曲率子样本 $F'$

1.  $I_1(x,y)$ 通过全仿射模型建立全仿射库为: $I_1(x,y) \rightarrow \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 。
2. 对全仿射库中的样本 $A_1$ 进行曲率计算,通过标准化弧长采样方法和循环偏移生成曲率图像样本子集 $A_1 \rightarrow \{A_{10}, A_{11}, \dots, A_{1m}\}$ ,  $m=200$ ,依次求出 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 对应的曲率图像样本子集,对模板图像 $I_2(x,y)$ 进行曲率,计算生成 $B_2$ 。
3. 将待匹配曲率图像 $B_2$ 与样本子集中的每一个样本 $\{A_{10}, A_{11}, \dots, A_{1m}\}$ 进行快速最近邻搜索算法相似性匹配,将匹配结果进行排序,找到最优的子样本 $A_{1max}$ ,此时最优子样本 $A_{1max}$ 与待匹配图像 $B_2$ 之间建立匹配关系,求出透射变换矩阵 $H_{1max}$ ,将曲率样本集 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 中的子集与 $B_2$ 依次进行匹配得出 $\{H_{1max}, H_{2max}, \dots, H_{nmax}\}$ ,同时得到最优的子样本 $\{A_{1max}, A_{2max}, \dots, A_{nmax}\}$ 。
4. 将仿射库中的最优曲率子样本 $\{A_{1max}, A_{2max}, \dots, A_{nmax}\}$ 对应的采样点转换成图像,经过 $\{H_{1max}, H_{2max}, \dots, H_{nmax}\}$ 变换后与 $I_2(x,y)$ 进行均方差运算,得出最小误差值对应的仿射库样本,即得出最佳匹配。

## 6 实验及结果分析

本实验在Windows7系统、AMD Athlon(tm)II X4645处理器、主频3.1GHz、4GB内存、Visual Studio 2010平台上采用C/C++实现。

本文的实验采用原始飞机图像分别与尺度变化、旋转、视点变化的图像进行匹配,实验样本如图4所示。



图4 飞机样本图

通过本文方法对上述每个样本提取出对应的曲率,曲率分布如图5所示。

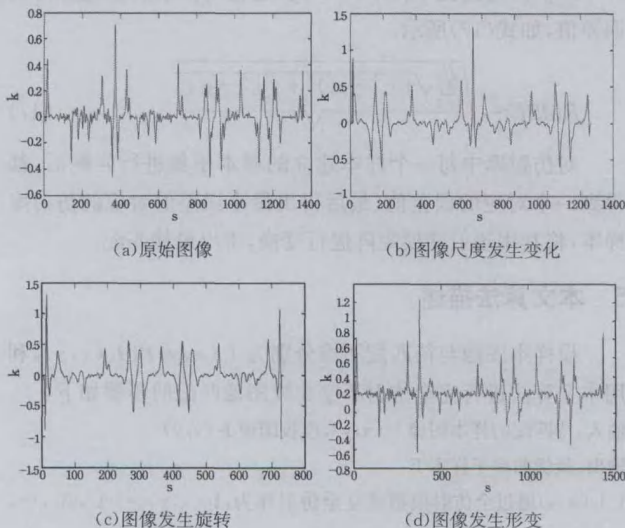


图5 飞机样本图像对应的曲率分布

从上组实验曲率分布中可以看出,通过图5(b)与图5(a)的对比,当尺度变小时,曲线的长度随着变小,造成采样点个数减少,使得曲率在采样点上的分布发生变化;由于图像中目标存在旋转,通过图5(b)与图5(c)的对比可以看出,曲率分布存在偏移;从图5(a)与图5(d)的对比中可以看出,即使存在形变,从曲率分布上也很难辨别出差异,故需要进一步判别。

图6(c1)为发生形变情况下的匹配结果,该图中的飞机是原始图像经过全仿射原理建立的全仿射库中的一个样本,该样本是与形变目标匹配后的最优样本,图6(c2)的图像为形变的图像。图6中(a2)、(b2)和(c2)分别是(a1)、(b1)和(c1)匹配之后通过变换矩阵将原始图像变换后与待匹配图像叠加的配准结果,从图中可以看出其具有非常好的匹配效果。

从上组实验中可以看出,在尺度发生变化、旋转角度发生变化、形状发生变化的情况下,本文算法能够达到很好的匹配效果。

为了能量说明算法的优越性,本文将原始图像变换后与待匹配图像进行均方根误差运算,通过计算RMSE结果来衡量所有匹配曲线段上对应的点的配准精度,同时通过归一化互相关函数(NCC)来度量两条曲线的相似度,并与曲线曲率

积分法<sup>[7]</sup>、ASIFT和Fourier-Mellin3种方法进行了对比实验。实验样本来自Kimia形状数据库<sup>[13]</sup>的两对具有部分闭塞的图像样本,分别是“hand-10”和对其进行旋转变换的“hand-90”、“triangle-02”和“triangle-04”,如图7中(a)、(b)样本具有仿射差异,(c)、(d)样本有旋转差异。

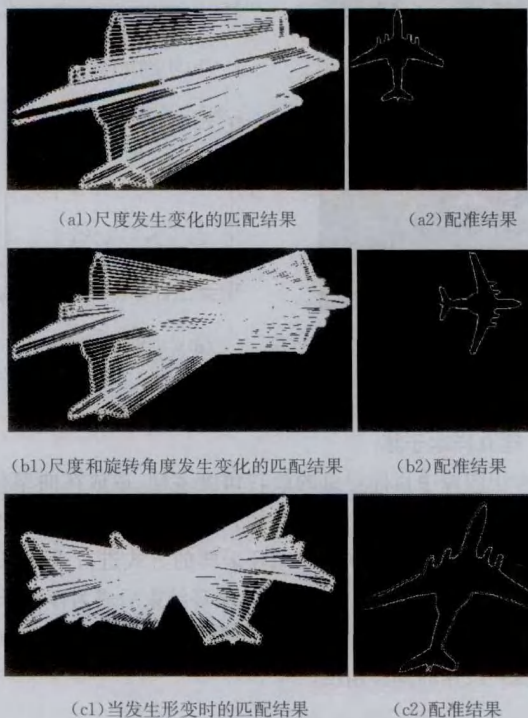


图6 飞机曲线的匹配结果

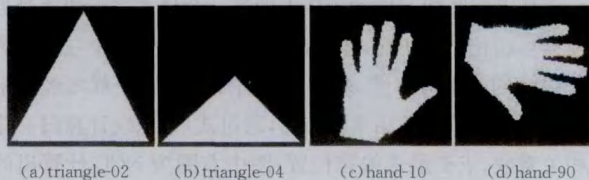


图7 Kimia数据库样本

通过计算图7中4个样本图的曲率,可以得出如图8所示的曲率分布图。

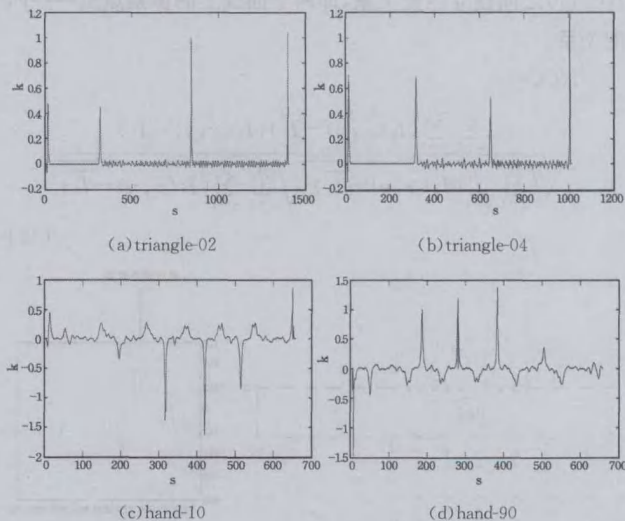


图8 实验样本图像对应的曲率分布图

胡旺, Yen G G, 张鑫. 基于 Pareto 熵的多目标粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2014, 25(5): 1025-1050

[10] Gao Shang, Yang Jing-yu. Swarm intelligence algorithm and its application [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2006: 112-117(in Chinese)  
高尚, 杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 112-117

(上接第 56 页)

从图 8(a)和图 8(b)可以看出, 两者存在仿射差异, 在曲率图上目标图像的轮廓长度发生变化, 并且曲率的值也发生相应的变化, 总体趋势具有一致性; 如图 8(c)和图 8(d)可以看出, 当两个目标存在旋转差异时, 轮廓长度没有变化, 由于计算方向发生变化, 使得曲率值发生变化。

图 9(a1)、(b1)、(c1)、(d1)为实验样本对二配准之后叠加在一起显示的结果, 可以方便地看出两个配准的吻合程度。

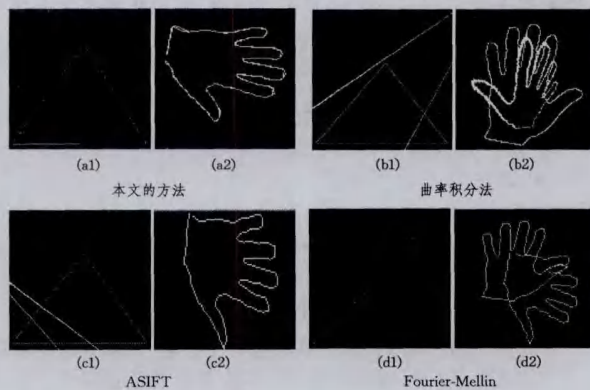


图 9 Kimia 样本配准结果

从上述实验结果的对比中可以看出, 本文的方法可以成功匹配。曲率积分法由于在曲率积分图中根据最大互相关找到最佳偏移位置时存在误差, 因此导致配准存在误差。ASIFT、Fourier-Mellin 方法由于轮廓线所含信息较少, 造成匹配精度下降。从表 1 中算法检测结果可以看出, 本文方法在互相关程度上具有较好优势, RMSE 误差较小。

表 1 算法检测结果

算法	实验样本对一		实验样本对二	
	NCC	RMSE	NCC	RMSE
本文的方法	0.706	1.086	0.786	0.693
曲率积分法	0.605	2.820	0.461	1.851
ASIFT	0.004	14.542	0.055	1.414
Fourier-Mellin	0.342	461.06	0.0926	552.291

**结束语** 本文提出基于曲率的全仿射曲线图像匹配方法, 对样本图像根据全仿射模型建立样本库, 对样本库中每一个样本通过等间隔偏移进行采样后的子样本建立曲率样本子集, 将目标图像与样本子集中的每一个样本进行快速最近邻搜索算法相似性匹配, 通过匹配结果找到最优匹配样本。实验结果表明, 基于曲率的全仿射曲线图像匹配具有较高的匹配成功率, 并且与传统算法相比具有更多的优点。

### 参考文献

[1] Turk M A, Pentland A P. Eigenfaces for recognition[J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 1991, 3(1): 71-86

[11] Gao Shang, Yang Jing-yu. Research on Chaos Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2006, 19(2): 266-270(in Chinese)  
高尚, 杨静宇. 混沌粒子群优化算法研究[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(2): 266-270  
[12] Gao Shang, Yu Hua-long, Qiu Ling, et al. The wading across stream algorithm[J]. International Journal of Computers and Applications, 2014, 36(4): 127-132

[2] Chen Q, Defrise M, Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(12): 1156-1168  
[3] Li X M, Zhang J F. An Evaluation Method for Image Registration by Machine Learning[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(1): 7-13(in Chinese)  
李晓明, 张继福. 一种基于学习的自动图像配准检验方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(1): 7-13  
[4] Sapiro G, Tannenbaum A. Affine invariant scale-space[J]. International Journal of Computer Vision, 1993, 11(1): 25-44  
[5] Mokhtarian F, Mackworth A. Scale-based description and recognition of planar curves and two-dimensional shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986(1): 34-43  
[6] Mokhtarian F, Abbasi S. Shape similarity retrieval under affine transforms[J]. Pattern Recognition, 2002, 35(1): 31-41  
[7] He X C, Yung N H C. Curvature scale space corner detector with adaptive threshold and dynamic region of support [C]// Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04). Aug 2004, 2: 791-794  
[8] Cui M, Femiani J, Hu J, et al. Curve matching for open 2D curves[J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(1): 1-10  
[9] Lim K B, Du T H, Wang Q. Partially occluded object recognition [J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2011, 40(1): 122-131  
[10] Zhang Y S, Zou Z R. Automatic registration method for remote sensing images based on improved ORB algorithm [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(3): 20-24(in Chinese)  
张云生, 邹峥嵘. 基于改进 ORB 算法的遥感图像自动配准方法[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(3): 20-24  
[11] Yuan X G, Peng G H, Wang L. GPU-based Real Time Image Registration with Variant SIFT[J]. Computer Science, 2011, 38(3): 300-303(in Chinese)  
袁修国, 彭国华, 王琳. 基于 GPU 的变型 SIFT 算子实时图像配准[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 300-303  
[12] Morel J M, Yu G. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2): 438-469  
[13] Muja M, Lowe D G. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration[C]//Proc of the VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2009: 331-340  
[14] Kimia shape database [DB/OL]. <http://www.lems.Brown.edu/vision/software/index.html>