

# 基于向量模的坐标变换不变性的碎片匹配方法

张春玉,王冰

ZHANG Chun-yu, WANG Bing

西北大学 信息科学与技术学院,西安 710127

School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China

E-mail: zcy@scy.cn

ZHANG Chun-yu, WANG Bing. Fragments matching method based on invariance of vector module in coordinate transformation. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(12): 176-179.

**Abstract:** Based on the vector module's characteristics of invariance of translation and rotation coordinate transformation, a new fragment matching method is brought forward. Firstly, the images of fragments are pretreated in order to get boundaries. Secondly, after calculating the values of vector modules which are composed by every two points in boundaries and arranging them in extracting boundary order, the longest matching segments which are the matching boundaries are found. Finally, also in accordance with the nature of invariants of modules, because some coordinates of points and modules have been known, the rest coordinates of boundary points in target coordinate system are solved based on solution of equations. Experimental results show that the method with simple principle, easy programming and rapid calculation speed is effective.

**Key words:** fragments match; vector module; coordinates transformation; invariance

**摘要:** 根据向量模在平移、旋转等坐标变换中具有不变性的特征,给出了一种新的碎片匹配算法。先对碎片图像进行预处理得到图像边界,然后计算每条边界曲线上任意两点构成的向量的模(欧式距离),并按边界点顺序排列向量模值,比较向量模值,找出最长的匹配段就是两个碎片的匹配边。在拼接时,同样根据模的这一特征,已知点坐标和模值,解方程组即可求得其余边界点在目标坐标系的坐标。该方法原理简明,编程容易,计算速度快。最后通过实验验证了该方法的有效性。

**关键词:** 碎片匹配;向量模;坐标变换;不变性

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.12.052 文章编号: 1002-8331(2010)12-0176-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391

## 1 引言

碎片匹配是模式识别、计算机视觉等领域的重要研究课题,开辟了模式识别新的应用领域,具有广泛的实用价值。非规则碎片相对规则碎片的匹配难度更大,尚有许多研究创新的方面,该文主要针对非规则碎片匹配进行讨论。

碎片匹配有不同的思路,可以基于碎片的内容进行匹配,比如碎片的纹理图案、颜色、线条、文字的内容等。按照这种思路匹配难度比较大,要用到很多先验知识,目前很难解决实质问题。大多数研究从图像的边缘着手,两个原本属于一体的(匹配的)碎片必然有相同的边缘,基于碎片的边缘曲线进行匹配就无需考虑碎片的内容。目前这方面的研究取得了一定的成果,如陈海峰<sup>[1]</sup>的利用改进遗传算法实现图像特征点的匹配,其算法是一种匹配策略或框架。Ying Shan<sup>[2]</sup>提出了一种概率框架的曲线匹配算法,根据特征点的相似性和与邻域的距离得到初始概率,然后不断地迭代,直到特征点的概率达到稳定值,该方法可以适合于平面曲线的匹配。Maher<sup>[3]</sup>把曲线用同心圆的两个角度的集合重新表示,两条曲线匹配的条件是对应的同心圆的

角度集合必须相等。Helana<sup>[4]</sup>提出算法通过比较曲率编码的轮廓线,使用动态规划的匹配算法,在不断增加的尺度上比较轮廓线,减少搜索代价。吕科等<sup>[5]</sup>提出基于 Fourier 变换的曲线匹配算法,通过比较两条曲线的 Hash 矢量来分析曲线段的相似度。周石林<sup>[6]</sup>针对之前离散点曲率计算粗糙、不适合做碎片匹配曲率计算的情况,结合曲线插值法,形成了新的曲率计算方法,并在三维空间提出了与曲线上点的曲率和挠率密切相关的 3 个不变量,给出了基于特征点的三维非规则碎片的匹配算法。

从国内外研究现状来看,在碎片匹配技术研究中已经取得了一定的成果,但其中还存在很多需要改进的方面,比如,存在角点检测不完全问题;关于离散点曲率的计算精度问题也始终没有得到很好的解决;另外,碎片的数量成千上万,设计快速的匹配算法也不容忽视。碎片匹配过程中,不变量的选择非常关键,已有的成果中,大部分将曲率作为不变量,理论性很强,但是离散点的曲率计算存在近似问题,阈值选取很重要,并且计算量非常大。该文提出一种新的方法,基于向量模在平移、旋转等坐标变换中具有不变性的特点,将模值作为不变量,通过计

基金项目:陕西省科技攻关基金(the Key Technologies R&D Fund of Shaanxi Province, China under Grant No.2004K05-G25)。

作者简介:张春玉(1979-),女,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理、模式识别;王冰(1954-),男,教授,主要研究方向:数字图像处理、计算机视觉、模式识别。

收稿日期:2008-10-17 修回日期:2008-12-25

算每条边界曲线上任意两点构成的向量的模(欧式距离)进行匹配和拼接。

## 2 算法

### 2.1 基本原理

#### 2.1.1 向量模的定义

已知向量的起点  $M_1(x_1, y_1, z_1)$  和终点  $M_2(x_2, y_2, z_2)$ , 向量  $M_1M_2$  的模为:

$$|M_1M_2| = \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2} \quad (1)$$

它就是  $M_1$  和  $M_2$  两点间的距离。

#### 2.1.2 向量模的平移变换不变性

设新坐标系  $O'-x'y'z'$  与旧坐标系  $O-xyz$  的坐标轴方向相同, 但原点不同, 新系可看作由旧系平移得到, 已知向量的起点  $M_1$  和终点  $M_2$  在旧坐标系的坐标分别是  $(x_1, y_1, z_1)$  和  $(x_2, y_2, z_2)$ , 在新坐标系的坐标分别是  $(x'_1, y'_1, z'_1)$  和  $(x'_2, y'_2, z'_2)$ 。假设新系的原点  $O'$  在旧系中的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 从而从旧系到新系的变换公式为:

$$x'_1 = x_1 - x_0, y'_1 = y_1 - y_0, z'_1 = z_1 - z_0 \quad (2)$$

$$x'_2 = x_2 - x_0, y'_2 = y_2 - y_0, z'_2 = z_2 - z_0 \quad (3)$$

由向量模的定义式(1)知, 变换到新系后, 向量  $M_1M_2$  的模为:

$$|M_1M_2| = \sqrt{(x'_2-x'_1)^2 + (y'_2-y'_1)^2 + (z'_2-z'_1)^2} \quad (4)$$

将式(2)和式(3)代入式(4), 即:

$$|M_1M_2| = \sqrt{[(x_2-x_0)-(x_1-x_0)]^2 + [(y_2-y_0)-(y_1-y_0)]^2 + [(z_2-z_0)-(z_1-z_0)]^2} = \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2} \quad (5)$$

故向量的模经过平移变换后是不变的。

#### 2.1.3 向量模的旋转变换不变性

设新坐标系  $O'-x'y'z'$  与旧坐标系  $O-xyz$  的坐标轴方向不同, 原点相同, 新系可看作由旧系旋转得到, 设新系的 3 个坐标轴关于旧系的方向余弦如表 1:

表 1 新系 3 个坐标轴关于旧系的方向余弦

	$i$	$j$	$k$
$i'$	$\cos\alpha_1$	$\cos\beta_1$	$\cos\gamma_1$
$j'$	$\cos\alpha_2$	$\cos\beta_2$	$\cos\gamma_2$
$k'$	$\cos\alpha_3$	$\cos\beta_3$	$\cos\gamma_3$

新系的 3 个基本单位向量在旧系中的分解式为:

$$\begin{cases} i' = \cos\alpha_1 i + \cos\beta_1 j + \cos\gamma_1 k \\ j' = \cos\alpha_2 i + \cos\beta_2 j + \cos\gamma_2 k \\ k' = \cos\alpha_3 i + \cos\beta_3 j + \cos\gamma_3 k \end{cases} \quad (6)$$

同理, 旧系的 3 个基本单位向量在新系中的分解式为:

$$\begin{cases} i = \cos\alpha_1 i' + \cos\alpha_2 j' + \cos\alpha_3 k' \\ j = \cos\beta_1 i' + \cos\beta_2 j' + \cos\beta_3 k' \\ k = \cos\gamma_1 i' + \cos\gamma_2 j' + \cos\gamma_3 k' \end{cases} \quad (7)$$

设任意一点  $P$  在旧系和新系中的坐标分别为  $(x, y, z)$  和  $(x', y', z')$ , 则

$$x'i' + y'j' + z'k' = xi + yj + zk \quad (8)$$

分别以  $i', j', k'$  点乘式(8)的两端, 并注意式(7), 使得

$$\begin{cases} x' = x\cos\alpha_1 + y\cos\beta_1 + z\cos\gamma_1 \\ y' = x\cos\alpha_2 + y\cos\beta_2 + z\cos\gamma_2 \\ z' = x\cos\alpha_3 + y\cos\beta_3 + z\cos\gamma_3 \end{cases} \quad (9)$$

这就是点坐标从旧系变到新系的公式。

另外, 在式(7)中分别做  $i \cdot j, j \cdot k$  和  $k \cdot i$  可得:

$$\begin{cases} \cos\alpha_1\cos\beta_1 + \cos\alpha_2\cos\beta_2 + \cos\alpha_3\cos\beta_3 = 0 \\ \cos\beta_1\cos\gamma_1 + \cos\beta_2\cos\gamma_2 + \cos\beta_3\cos\gamma_3 = 0 \\ \cos\gamma_1\cos\alpha_1 + \cos\gamma_2\cos\alpha_2 + \cos\gamma_3\cos\alpha_3 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

在式(7)中分别做  $i \cdot i, j \cdot j$  和  $k \cdot k$  可得:

$$\begin{cases} \cos^2\alpha_1 + \cos^2\alpha_2 + \cos^2\alpha_3 = 1 \\ \cos^2\beta_1 + \cos^2\beta_2 + \cos^2\beta_3 = 1 \\ \cos^2\gamma_1 + \cos^2\gamma_2 + \cos^2\gamma_3 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

已知向量的起点  $M_1$  和终点  $M_2$  在旧坐标系的坐标分别是  $(x_1, y_1, z_1)$  和  $(x_2, y_2, z_2)$ , 在新坐标系的坐标分别是  $(x'_1, y'_1, z'_1)$  和  $(x'_2, y'_2, z'_2)$ 。由式(9)可知:

$$\begin{aligned} (x'_2-x'_1)^2 &= [(x_2\cos\alpha_1+y_2\cos\beta_1+z_2\cos\gamma_1)-(x_1\cos\alpha_1+y_1\cos\beta_1+z_1\cos\gamma_1)]^2 = \\ &= (x_2-x_1)^2\cos^2\alpha_1 + (y_2-y_1)^2\cos^2\beta_1 + (z_2-z_1)^2\cos^2\gamma_1 + \\ &+ 2(x_2-x_1)(y_2-y_1)\cos\alpha_1\cos\beta_1 + 2(x_2-x_1)(z_2-z_1)\cos\alpha_1\cos\gamma_1 + \\ &+ 2(y_2-y_1)(z_2-z_1)\cos\beta_1\cos\gamma_1 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (y'_2-y'_1)^2 &= [(x_2\cos\alpha_2+y_2\cos\beta_2+z_2\cos\gamma_2)-(x_1\cos\alpha_2+y_1\cos\beta_2+z_1\cos\gamma_2)]^2 = \\ &= (x_2-x_1)^2\cos^2\alpha_2 + (y_2-y_1)^2\cos^2\beta_2 + (z_2-z_1)^2\cos^2\gamma_2 + \\ &+ 2(x_2-x_1)(y_2-y_1)\cos\alpha_2\cos\beta_2 + 2(x_2-x_1)(z_2-z_1)\cos\alpha_2\cos\gamma_2 + \\ &+ 2(y_2-y_1)(z_2-z_1)\cos\beta_2\cos\gamma_2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} (z'_2-z'_1)^2 &= [(x_2\cos\alpha_3+y_2\cos\beta_3+z_2\cos\gamma_3)-(x_1\cos\alpha_3+y_1\cos\beta_3+z_1\cos\gamma_3)]^2 = \\ &= (x_2-x_1)^2\cos^2\alpha_3 + (y_2-y_1)^2\cos^2\beta_3 + (z_2-z_1)^2\cos^2\gamma_3 + \\ &+ 2(x_2-x_1)(y_2-y_1)\cos\alpha_3\cos\beta_3 + 2(x_2-x_1)(z_2-z_1)\cos\alpha_3\cos\gamma_3 + \\ &+ 2(y_2-y_1)(z_2-z_1)\cos\beta_3\cos\gamma_3 \end{aligned} \quad (14)$$

由向量模的定义式(1)知, 变换到新系后, 向量  $M_1M_2$  的模为:

$$|M_1M_2| = \sqrt{(x'_2-x'_1)^2 + (y'_2-y'_1)^2 + (z'_2-z'_1)^2}$$

将式(12)、(13)和(14)代入, 得

$$|M_1M_2| = \sqrt{\begin{aligned} &(x_2-x_1)^2(\cos^2\alpha_1 + \cos^2\alpha_2 + \cos^2\alpha_3) + \\ &(y_2-y_1)^2(\cos^2\beta_1 + \cos^2\beta_2 + \cos^2\beta_3) + \\ &(z_2-z_1)^2(\cos^2\gamma_1 + \cos^2\gamma_2 + \cos^2\gamma_3) + \\ &2(x_2-x_1)(y_2-y_1)(\cos\alpha_1\cos\beta_1 + \cos\alpha_2\cos\beta_2 + \cos\alpha_3\cos\beta_3) + \\ &2(x_2-x_1)(z_2-z_1)(\cos\alpha_1\cos\gamma_1 + \cos\alpha_2\cos\gamma_2 + \cos\alpha_3\cos\gamma_3) + \\ &2(y_2-y_1)(z_2-z_1)(\cos\beta_1\cos\gamma_1 + \cos\beta_2\cos\gamma_2 + \cos\beta_3\cos\gamma_3) \end{aligned}} \quad (15)$$

再将式(10)、(11)代入式(15)得:

$$|M_1M_2| = \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2} \quad (16)$$

故向量的模经过旋转变换后是不变的。

## 2.2 算法描述

### 2.2.1 匹配算法描述

对碎片  $A_i$  预处理后得到边界  $B_i$ ,  $B_i$  是由提取边界时确定的起点  $S(P_1)$  到终点  $T(P_n)$  的一系列离散点构成的封闭的环, 记作  $B_i(P_1P_2 \cdots P_i \cdots P_j \cdots P_n)$ 。如图 1 所示, 将任意两点  $P_i, P_j$  构成的向量的模(即它们之间的距离)记作  $d(P_iP_j)$ 。分别计算  $P_1$  到各个点的距离  $d(P_1P_1), d(P_1P_2), \dots, d(P_1P_n)$ , 将它们作为矩阵的第 1 行, 再计算  $P_2$  到各个点的距离  $d(P_2P_1), d(P_2P_2), \dots, d(P_2P_n)$  作为矩阵的第 2 行, 依次类推直至  $P_n$  到各个点的距离  $d(P_nP_1), d(P_nP_2), \dots, d(P_nP_n)$  作为矩阵的第  $n$  行, 这样就构成了一个  $n \times n$  的方阵称为模值矩阵  $D_i$  (或距离矩阵), 因为  $d(P_iP_j) = d(P_jP_i)$  且  $d(P_iP_i) = 0$ , 所以距离矩阵  $D_i$  是一个主对角线为 0 元素的对称阵。

如图 2 所示, 如果两个匹配碎片  $A_i$  和  $A_j$  的匹配边(即两个

匹配碎片的公共边是 $(P_i P_{i+1} \dots P_j)$ ,则根据碎片 $A_i$ 的边界计算得到的距离矩阵 $D_i$ 的第 $i$ 行必然与和它匹配的碎片 $A_j$ 的边界计算得到的距离矩阵 $D_j$ 的某一行(假设是第 $k$ 行)有最大匹配(连续的距离值相等的序列达到最长),即 $\{d(P_i P_{i+1}), d(P_i P_{i+2}), \dots, d(P_i P_j)\} = \{d(P'_k P'_{k+1}), d(P'_k P'_{k+2}), \dots, d(P'_k P'_{k+(j-i)})\}$ 。

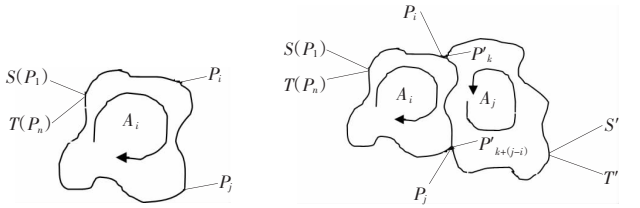


图1 碎片 $A_i$ 的边界 图2 碎片 $A_i$ 和碎片 $A_j$ 的边界匹配情况

需要指出的是,如果碎片 $A_j$ 的边界提取方向不是逆时针而是顺时针的话,则需要将其距离矩阵 $D_j$ 沿着副对角线翻转即可得到沿顺时针计算的矩阵,然后用同样的方法与距离矩阵 $D_i$ 比较,依然能找到正确的最大匹配。后续程序实现时需特别注意这个问题的正确处理。

2.2.2 拼接算法描述

在进行两个匹配碎片的拼接时,最大匹配段是两碎片共有的部分,是拼接的基础。如图3所示,要将碎片 $A_i$ 和 $A_j$ 拼接在一起,固定一个碎片不动,如固定 $A_i$ ,那么一般方法下,先求得 $A_j$ 需旋转的角度是重点,然后对 $A_j$ 的边界点逐点进行坐标变换。在该文提出的方法中,无须求 $A_j$ 需要旋转的角度,就能实质性地解决拼接中的平移和旋转问题。

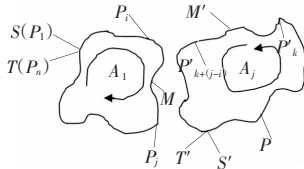


图3 碎片 $A_i$ 和碎片 $A_j$ 的拼接

在前面的匹配过程中已经求得最大匹配段的起点和终点(或起点和最大匹配长度),计算可以得到最大匹配段的中点,在碎片 $A_i$ 中分别是 $P_i, P_j$ 和 $M$ ,在碎片 $A_j$ 中分别是 $P'_k, P'_{k+(j-i)}$ 和 $M'$ ,如图3所示。设 $P_i, P_j$ 和 $M$ 的坐标分别是 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 和 $(x_m, y_m)$ ,已知在碎片 $A_j$ 中最大匹配段的起点、终点和中点到其他非匹配边界上任意一点 $P$ 的向量模 $d_s, d_t$ 和 $d_m$ ,设碎片 $A_j$ 中非匹配边界上任意一点 $P$ 变换到碎片 $A_i$ 坐标系中的坐标为 $(x_p, y_p)$ ,那么根据向量模平移、旋转不变性可得方程组:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} = d_s \\ \sqrt{(x_p - x_j)^2 + (y_p - y_j)^2} = d_t \\ \sqrt{(x_p - x_m)^2 + (y_p - y_m)^2} = d_m \end{cases} \quad (17)$$

解式(17)的二元二次方程组即可得到碎片 $A_j$ 中非匹配边界上的任意一点 $P$ 拼接到碎片 $A_i$ 中的坐标位置 $(x_p, y_p)$ ,其中:

$$\begin{cases} x_p = \frac{x_s^2 - x_t^2 + y_s^2 - y_t^2 - d_s^2 + d_t^2 - \frac{y_t - y_s}{y_m - y_s} (x_s^2 - x_m^2 + y_s^2 - y_m^2 - d_s^2 + d_m^2)}{2 \left( \frac{(y_t - y_s)(x_m - x_s)}{y_m - y_s} - x_t + x_s \right)} \\ y_p = \frac{x_s^2 - x_t^2 + y_s^2 - y_t^2 - d_s^2 + d_t^2 - \frac{x_t - x_s}{x_m - x_s} (x_s^2 - x_m^2 + y_s^2 - y_m^2 - d_s^2 + d_m^2)}{2 \left( \frac{(x_t - x_s)(y_m - y_s)}{x_m - x_s} - y_t + y_s \right)} \end{cases} \quad (18)$$

2.3 实现步骤

解决碎片匹配问题一般需要一系列相关技术的支撑,包括:数据来源、边界检测技术、特征点检测技术和匹配拼接技术。该文方法指出选取向量模作为特征不变量,按2.2节的算法描述可以得出基于向量模的新碎片匹配方法的实现步骤:

- 步骤1 获得图像碎片的数据源;
- 步骤2 对碎片图像进行预处理,然后提取边界;
- 步骤3 按2.2.1节的匹配算法描述计算碎片边界上每一点到各个点的距离矩阵;
- 步骤4 对碎片的距离矩阵两两比较找出允许误差范围内的最大匹配段;
- 步骤5 对有匹配的碎片按2.2.2节的拼接算法描述解方程组,以某种策略进行拼接。

多个碎片拼接时可以采用不同的匹配拼接策略,比如,可以先挑选两个碎片拼接后作为新的碎片重复步骤2至步骤5,直至没有匹配;也可以先固定一个碎片依次拼接上所有和它有匹配的其他碎片,然后再固定上一轮拼接中第一个被拼接到固定碎片中去的那个碎片,并继续依次拼接上所有和它有匹配的其他碎片,如此这般按照广度优先的方法,拼接完所有碎片。文中实验将使用第二种策略。

3 实验和分析

3.1 实验结果

实验1,先针对二值图像的较理想状态的碎片进行。如图4~图6所示的是3个碎片的二值图像,按二值图像的边界跟踪算法提取的单像素边界结果如图7~图9所示。实验中碎片两两匹配找到的最大匹配段的起点和长度等数据如表2所示(表中的起始位置是指找到的最大匹配段的起始点在碎片边界点序列中的位置,该边界点序列是将碎片的边界点按边界跟踪算法跟踪时排成的序列)。与表2对应的实验图示结果如图10~图12所示。碎片的两两匹配拼接结果如图13~图15所示,实

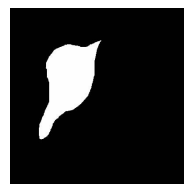


图4 碎片1的二值图像



图5 碎片2的二值图像



图6 碎片3的二值图像

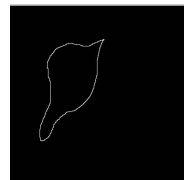


图7 提取的碎片1的边界



图8 提取的碎片2的边界

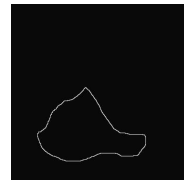


图9 提取的碎片3的边界

表2 实验1中碎片两两匹配的最大匹配段实验结果

碎片编号	碎片 $i, j$ 中的起始位置	碎片 $i, j$ 中的最大匹配段在碎片 $i$ 中的起始位置	碎片 $i, j$ 中的最大匹配段在碎片 $j$ 中的起始位置	实验得到的碎片 $i, j$ 的最大匹配段长度	碎片 $i, j$ 的实际公共边长度
1 2	365	621	162	163	
1 3	533	571	155	187	
2 3	563	352	180	209	

验采用 2.3 节中提出的第二种拼接策略拼接的最后的匹配结果如图 16 所示。



图 10 碎片 1、2 的最大匹配段

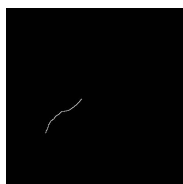


图 11 碎片 1、3 的最大匹配段

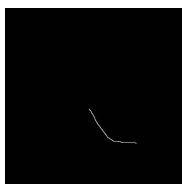


图 12 碎片 2、3 的最大匹配段

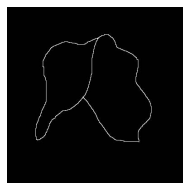


图 13 碎片 1、2 的匹配结果

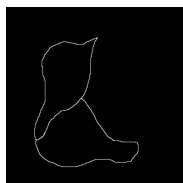


图 14 碎片 1、3 的匹配结果



图 15 碎片 2、3 的匹配结果

为了进一步验证该算法的有效性,进行了实验 2,针对灰度图中国地图的青海省和甘肃省地图进行,原始碎片如图 17、图 18 所示,按灰度图像的边界跟踪算法提取的单像素边界结果如图 19、图 20 所示,匹配结果如图 21 所示。

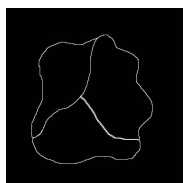


图 16 碎片 1、2、3 的匹配结果



图 17 原始碎片 1 (甘肃省)

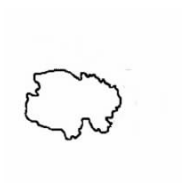


图 18 原始碎片 2 (青海省)

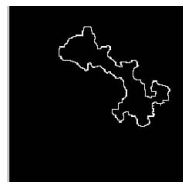


图 19 碎片 1 提取的边界

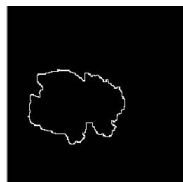


图 20 碎片 2 提取的边界

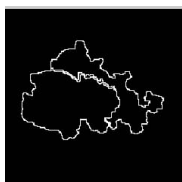


图 21 碎片 1、2 的拼接结果

### 3.2 结果分析

该文方法在较理想状况下,噪声干扰非常小,边界提取效果很好时,匹配结果会非常好,比较图 16 和图 22 会发现实验碎片拼接结果和原始碎片邻接情况几乎一样。比较图 21 和图 23 发现实验 2 的碎片拼接效果不精确,但是匹配的准确性还是可以保证的。

经过反复多次多个数据源的实验比较分析,新方法基本原理简单明了,算法实现切实可行,选取的不变量向量模的运算量少、计算速度快,这一点可以通过表 3 中与已有算法所选取的不变量曲率的运算量对比结果明显得出。周石林<sup>[6]</sup>提出的多尺度离散曲率近似计算方法和李星秀<sup>[7]</sup>提出的用相邻点直接估算离散曲率方法的计算量都远远超过向量模的计算量。

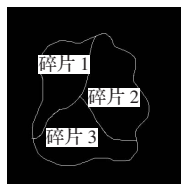


图 22 实验 1 的原始碎片邻接情况



图 23 实验 2 的原始碎片邻接情况

表 2 各种匹配不变量的运算量对比结果

算法	选取的不变量	碎片边界长度	加法次数	乘法次数
周石林 <sup>[6]</sup>	曲率	$M$	$40M$	$39M$
李星秀 <sup>[7]</sup>	曲率	$M$	$24M$	$20M$
该文算法	向量模	$M$	$3M$	$2M$

当然该文方法也存在局限性,当噪声大,提取的边界粗糙时,得到的最大匹配段和实际公共边相比较的效果不理想,常表现为只检测到实际公共边的一部分而不完整,但是从该文的拼接算法来看,它可以弥补公共边检测不完全的缺点,因为该拼接方法不依赖未检测完全的公共边,也就是说,只要已检测到的最大匹配段是准确的,就不影响最后拼接结果的准确性。

## 4 结论

证明了向量模的坐标平移、旋转不变性,并基于这个特性提出将它应用到非规则碎片匹配问题中来。该方法将向量模值作为不变量,求提取到的碎片边界上每一点到各个点的向量模值,通过模值比较得到匹配碎片的最大匹配段。在最后的拼接过程中,依然根据向量模的坐标变换不变性,利用已知点坐标和模值反求待移动(平移或旋转)碎片边界点坐标的方法较好地解决了拼接问题,从而避免了许多已有方法中提到的相对一个碎片旋转另一个匹配碎片需要的大量计算。

该文方法的基本原理在高维空间同样成立,因此,可以把该方法扩展到三维空间进行三维碎片匹配的实验。

## 参考文献:

- [1] 陈海峰,纪圣谋,叶桦,等.利用改进遗传算法实现图像特征点的匹配[J].南京大学学报,2000,36(2):171-176.
- [2] Ying Shan.New measurements and corner-guidance for curve matching with probabilistic relaxation[J].International Journal of Computer Vision,2002,46(2):157-171.
- [3] Al\_Khaiyat M,Kamangar F.Planar curve representation and matching[EB/OL].http://www.bmva.ac.uk/bmvc/1998/pdf/p055.pdf.
- [4] da Gama H C,Stolfi J.A multi-scale technique for computer assisted reassembly of fragmented objects,Technical Report IC-01-04[R].Inst of Computing,Univ of Campinas,2001.
- [5] 吕科,周明全.基于傅立叶变换的三维轮廓线快速匹配算法[J].西北大学学报,2003,33(2):1551-1554.
- [6] 周石林.非规则碎片匹配关键技术的研究及实现.南京航空航天大学,2004.
- [7] 李星秀.非规则平面碎片匹配关键技术研究[D].西北大学,2006.