

傅立叶描述子识别物体的形状

王 涛^① 刘文印^② 孙家广^① 张宏江^②

^①(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

^②(微软亚洲研究院 北京 100080)

(wangtao@ncc.cs.tsinghua.edu.cn)

摘 要 傅立叶描述子是分析和识别物体形状的重要方法之一. 利用基于曲线多边形近似的连续傅立叶变换方法计算傅立叶描述子, 并通过形状的主方向消除边界起始点相位影响的方法, 定义了新的具有旋转、平移和尺度不变性的归一化傅立叶描述子. 与使用离散傅立叶变换和模归一化的传统傅立叶描述子相比, 新的归一化傅立叶描述子同时保留了模与相位特性, 因此能够更好地识别物体的形状. 实验表明这种新的归一化傅立叶描述子比传统的傅立叶描述子能够更加高效、准确地识别物体的形状.

关键词 多边形近似, 傅立叶描述子, 形状主方向, 形状识别

中图法分类号 TP391.41

USING FOURIER DESCRIPTORS TO RECOGNIZE OBJECT'S SHAPE

WANG Tao^①, LIU Wen-Yin^②, SUN Jia-Guang^①, and ZHANG Hong-Jiang^②

^①(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

^②(Microsoft Research Asia, Beijing 100080)

Abstract Fourier descriptor is an important method used in shape analysis and recognition. In this paper, an efficient and accurate method is used to calculate Fourier descriptors of the shape by polygonal approximation, and a method of removing the phase effect of the start point of the border through a shape's main orientation is presented. A new normalized Fourier descriptor is defined, which is invariant in the rotation, translation and scale transform. The experiments show the accuracy and efficiency of the new normalized Fourier descriptors in shape recognition.

Key words polygon approximation, Fourier descriptor, shape orientation, shape recognition

1 引 言

物体的形状识别是模式识别研究的重要方向, 广泛应用于图像分析、机器视觉和目标识别等应用领域中. 在计算机中物体的形状有多种表示方式, 如: 边界曲线上各点的坐标序列, 边界上的点到物体重心的距离以及边界上的点随弧长变化的切线方向

和曲率等. 基于不同的形状表示方式, 许多种形状识别方法已经被提出, 如: 基于边界特征点^[1], 不变矩^[2], 傅立叶描述子^[3~5]和自回归模型^[6]等方法. 在日常生活中, 人类的视觉能够很容易地根据边界信息识别物体的形状; 但对于机器来说, 自动识别任意物体的形状却相当复杂. 当物体发生平移、旋转、尺度变换甚至扭曲、遮挡后, 使计算机快速、准确的识别任意物体的形状仍然是一件相当困难的事情.

原稿收到日期: 2001-02-12; 修改稿收到日期: 2002-06-25

本课题得到国家自然科学基金(69902004)和国家重点攻关项目基金(2001BA201A07)资助

本文的部分研究为第 1 作者在微软中国研究院实习期间所作

Kauppien 比较了各种典型形状识别方法的能力^[3],实验表明基于物体轮廓坐标序列的傅立叶描述子具有最佳的形状识别性能.傅立叶描述子的基本思想是:假定物体的形状是一条封闭的曲线,沿边界曲线上的一个动点 $P(l)$ 的坐标变化 $x(l)+jy(l)$ ($P(l)$ 坐标用复数形式表示)是一个以形状边界周长为周期的函数.这个周期函数可以展开成傅立叶级数形式表示.傅立叶级数中的一系列系数 $z(k)$ 是直接和边界曲线的形状有关的,称为傅立叶描述子.当系数项取到足够阶次时,它可以将物体的形状信息完全提取并恢复出来.Zahn 首先使用傅立叶描述子来描述和识别物体的形状特征^[5].傅里叶描述子具有简单、高效的特点,已经成为识别物体形状的重要方法之一^[3~5].但是在形状边界的快速傅立叶变换,寻找保留模与相位特性具有旋转、平移和尺度不变性并且鲁棒的归一化傅立叶描述子,以及去掉边界起始点位置在傅立叶描述子中的相位影响等方面仍存在的问题.针对这些问题,本文使用基于曲线多边形近似的连续傅立叶变换方法计算傅立叶描述子并通过形状的主方向消除边界起始点相位影响的方法,定义了一种能够同时保留模与相位特性的归一化傅立叶描述子.实验表明新的归一化傅立叶描述子具有旋转、平移和尺度不变性并且鲁棒的特点,能够快速、准确地识别物体的形状.

2 傅立叶描述子识别物体的形状

傅立叶描述子(FD)是物体形状边界曲线的傅立叶变换系数,它是物体边界曲线信号的频域分析的结果.根据傅立叶变换的性质,傅立叶描述子与形状的尺度、方向和曲线的起始点 P_0 位置有关.因此需要对傅立叶描述子进行归一化,使用具有旋转、平移和尺度不变性的归一化傅立叶描述子(NFD)来识别物体的形状.使用模归一化的传统傅立叶描述子方法丢失了傅里叶变换系数的相位信息,因此降低了识别物体的能力.本文利用边界曲线的多边形近似方法快速计算傅立叶描述子,并通过形状的主方向消除边界起始点相位影响,定义了一种新的归一化傅立叶描述子.

2.1 物体形状的表达

给定任意物体的图像,通过图像分割得到物体所在的区域.然后对该区域的边界进行轮廓跟踪,用逆时针排列的像素点坐标 P_0, P_1, \dots, P_N 来描述物体的形状(其中 $P_0=P_N$).为了去除冗余数据点减少

傅立叶变换的计算量和消除轮廓曲线的噪声影响,在给定的近似精度 D 条件下(如 $1\sim 2$ 个像素)用数字曲线的多边形近似算法提取边界特征点作为原轮廓曲线的近似^[7,8],如图1所示:

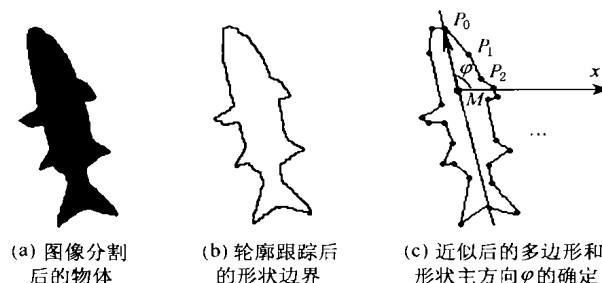


图1 形状边界的多边形近似及形状主方向的确定

通常近似后多边形的顶点数目 \ll 原数字曲线的结点数,可以大大减少形状边界信息的存储量并降低傅立叶变换的运算量.Chen 和 Su 的多边形近似算法原理是提取曲线上局部区域的最大曲率点作为近似多边形的特征点.该算法的具体步骤描述如下^[7]:

Step1. //初始化,从 P_0 点开始提取所有的特征点

let $i=0$; let $j=i+2$; let P_0 点作为第1个特征点;

Step2. //在 (P_i, P_j) 区间的曲线上寻找到直线 $P_i P_j$ 距离最大的点 P_m

if $j>N$ then stop

else find a point P_m , 满足 $d(i, j, m) = \max_{i < k < j} d(i, j, k)$;

Step3. //判断 P_m 是否为特征点

if $d(i, j, k') > D$ then 提取 P_m 作为新的特征点;

let $i=m$; let $j=i+2$;

go to Step2.

else $j=j+1$; go to Step2.

这里,

$$d(i, j, m) = \left| \frac{(y_j - y_i)x_m - (x_j - x_i)y_m + (y_i x_j - x_i y_j)}{((x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2)^{1/2}} \right|,$$

表示点 P_m 到直线 $P_i P_j$ 的距离.

2.2 物体形状的快速傅立叶变换方法

通常,计算傅立叶描述子需要对多边形边界曲线进行离散化,得到具有 N 个等间距的离散点,然后使用式(1)计算这 N 个点 $\{(x(n)+iy(n)) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ 的离散傅立叶变换系数 $z(k)$ 作为傅立叶描述子^[9]:

$$\begin{cases} z(k) = \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) + iy(n)) e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \\ p(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} z(k) e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $k=0, 1, \dots, N-1; n=0, 1, \dots, N-1$.

离散傅立叶变换需要对原边界曲线进行等弦长的离散化. 为保证形状的精度, 采样点数目 N 一般很大 ($N \geq 256$), 因此傅立叶变换的运算量很大 $O(N \log N)$. 同时由于边界曲线离散化采样的误差降低了 $z(k)$ 的精度.

$$\begin{aligned}
 p(l) &= x(l) + jy(l) = \sum_{k=0}^{N-1} z(k) e^{j \frac{2\pi k l}{L}}, \\
 z(k) &= \frac{1}{L} \int_0^L p(l) e^{-j \frac{2\pi k l}{L}} dl = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{N-1} \int_{l_n}^{l_{n+1}} p(l) e^{-j \frac{2\pi k l}{L}} dl = \\
 &= \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{N-1} \int_{l_n}^{l_{n+1}} \left[x_n + (l - l_n) \frac{x_{n+1} - x_n}{l_{n+1} - l_n} + j(y_n + (l - l_n) \frac{y_{n+1} - y_n}{l_{n+1} - l_n}) \right] e^{-j \frac{2\pi k l}{L}} dl = \\
 &= \begin{cases} \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{l_{n+1} - l_n}{2} [(x_{n+1} + x_n) + j(y_{n+1} + y_n)], & k = 0, \\ \frac{1}{j2\pi k} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\left(x_n + jy_n + \left(\frac{x_{n+1} - x_n}{l_{n+1} - l_n} + j \frac{y_{n+1} - y_n}{l_{n+1} - l_n} \right) \left(\frac{L}{j2\pi k} - l_n \right) \right) (e^{-j \frac{2\pi k}{L} l_n} - e^{-j \frac{2\pi k}{L} l_{n+1}}) + \right. \\ \left. \left(\frac{x_{n+1} - x_n}{l_{n+1} - l_n} + j \frac{y_{n+1} - y_n}{l_{n+1} - l_n} \right) (l_n e^{-j \frac{2\pi k}{L} l_n} - l_{n+1} e^{-j \frac{2\pi k}{L} l_{n+1}}) \right], & k \neq 0, \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

以图 1 的形状为例, 形状边界等弦长离散化后含 256 个采样点, 而近似后的多边形的顶点数目仅为 26. 由于形状边界使用近似后的多边形特征点表示 (近似多边形具有很小的顶点数目 $N \ll$ 原采样点数目), 因此在保留形状特征的同时大大降低了傅立叶变换的运算量, 并消除了曲线离散化采样引起的误差.

2.3 归一化的傅立叶描述子

傅立叶描述子与形状的尺度、方向和曲线的起始点 P_0 位置有关. 为了识别具有旋转、平移和尺度不变性的形状, 需要对傅立叶描述子进行归一化. 根据傅立叶变换性质, 将物体形状边界起始点位置平移 a 长度, 物体放大 r 倍, 旋转角度 φ 和平移位移 (x_0, y_0) 后, 新的形状的傅立叶变换系数 $z'(k)$ 为:

$$\begin{aligned}
 z'(k) &= F[(x' + iy')re^{j\varphi} + (x_0 + iy_0)] = \\
 &= re^{j\varphi} F(x' + iy') + F(x_0 + iy_0) = \\
 &= re^{j\varphi} e^{j \frac{2\pi}{L} ka} z(k) + F(x_0 + iy_0) \\
 &\Rightarrow \begin{cases} z'(0)re^{j\varphi}z(0) + F(x_0 + iy_0), & k = 0, \\ z'(k) = re^{j\varphi} e^{j \frac{2\pi}{L} ka} z(k), & k = 1, 2, \dots, N-1, \end{cases} \quad (4) \\
 &\Rightarrow \frac{\|z'(k)\|}{\|z'(1)\|} = \frac{r \|e^{j\varphi} e^{j \frac{2\pi}{L} ka} z(k)\|}{r \|e^{j\varphi} e^{j \frac{2\pi}{L} a} z(1)\|} \equiv \frac{\|z(k)\|}{\|z(1)\|}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

其中: $k=1, 2, \dots, N-1$, $\|\cdot\|$ 表示取模, $x'(l) + jy'(l) = x(l+a) + jy(l+a)$. 从式(3)、式(4)的推导

为了提高傅立叶描述子的计算速度需要减少 N 的数目. 本文通过边界曲线的多边形近似方法, 对近似多边形的各条直线段进行连续傅立叶变换来代替原来的离散傅立叶变换 (推导见式(2)), 其中, 顶点 P_n 的坐标为 (x_n, y_n) , l_n 表示多边形的顶点 P_n 到起点 P_0 间的边长和, L 为多边形的周长).

可以得到, 当物体旋转 φ 和起始点位置变化 a 时, 傅立叶变换改变其相位 $e^{j\varphi} e^{j \frac{2\pi}{L} ka}$, 当物体缩放时改变其幅度 r , 当物体平移时, 仅仅改变其 $z(0)$ 分量 $F(x_0 + iy_0)$. 根据式(5)模的比值的恒等性, 传统的归一化傅立叶描述子 $d(k)$ 定义为:

$$d(k) = \frac{\|z(k)\|}{\|z(1)\|}, \quad k = 1, 2, \dots, N-1. \quad (6)$$

传统的归一化傅立叶描述子 $d(k)$ 通过模的比值消除了模与相位的变化, 计算简便并且具有形状的旋转、平移和尺度的不变性. 然而 $d(k)$ 中仅使用傅立叶变换系数 $z(k)$ 的模作为特征进行识别, 丢失了相位信息. 一般来说, 相位信息对于准确地识别物体形状是很重要的. 对于某些特殊的形状, 其形状不同但 $d(k)$ 值可能相等, 因而将导致形状的错误识别. 如图 2 所示, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 具有相同的傅立叶描述子幅度 (模). 但由于相位的不同, 具有完全不同的形状.

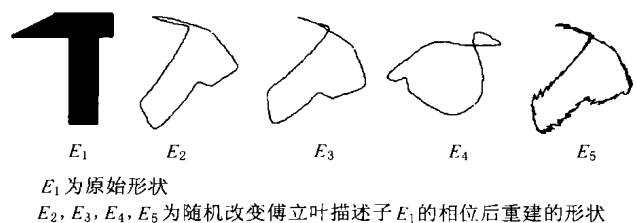


图 2 傅立叶描述子相位的重要性

为了能够同时保留傅立叶描述子的模与相位信息,识别具有旋转、平移和尺度不变性的任意形状,一种可行的方法是将物体旋转到相同的方向(如使形状的主方向 $\varphi=0$ 水平向右),然后令物体与 x 正半轴的交点作为边界的起点形成新的顶点序列,最后利用归一化傅立叶描述子 $z(k)/z(1)$ 进行识别. 这种方法的缺点是需要旋转形状和计算边界的起始点,运算较为麻烦. 本文下面给出了一种同时保留模与相位特性,计算更为简便的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$.

首先定义“归一化形状”:归一化形状的主方向 $\varphi=0$ 为水平正向,选择边界起始点的位置和形状大小恰好使其傅立叶变换系数 $z(1)$ 的相位为零,模为 1,即 $z(1)=1$. 假设任意一个形状由其相应的归一化形状经过边界起始点位置平移 a ,放大 r 倍,主方向旋转角度 φ 得到,其傅立叶变换系数为 $z'(k)$. 由于归一化形状的主方向为水平正向,新形状的主方向恰好是其相对于归一化形状旋转的方向 φ . 根据式(7)的推导,可以通过形状的主方向 φ 估计出边界起始点平移弧长 a 的相位影响 $e^{j\frac{2\pi}{L}a}$,从而消除边界起始点的相位影响. 进一步根据式(8)的恒等性,定义新的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$,见式(9).

$$\begin{aligned}\frac{z'(1)}{\|z'(1)\|} &= \frac{re^{j\varphi}e^{j\frac{2\pi}{L}a}z(1)}{\|re^{j\varphi}e^{j\frac{2\pi}{L}a}z(1)\|} = e^{j\varphi}e^{j\frac{2\pi}{L}a} \Rightarrow \\ e^{j\frac{2\pi}{L}a} &= \frac{z'(1)e^{-j\varphi}}{\|z'(1)\|}, \varphi \text{ 为形状的主方向} \quad (7) \\ \frac{z'(k)}{e^{j\frac{2\pi}{L}(k-1)a}z'(1)} &= \frac{re^{j\varphi}e^{j\frac{2\pi}{L}ka}z(k)}{e^{j\frac{2\pi}{L}(k-1)a}re^{j\varphi}e^{j\frac{2\pi}{L}a}z(1)} \equiv \frac{z(k)}{z(1)}, \quad (8)\end{aligned}$$

其中 $k=1,2,\dots,N-1$.

$$d'(k) \equiv \frac{z(k)}{e^{j\frac{2\pi}{L}(k-1)a}z(1)}, \quad (9)$$

其中 $e^{j\frac{2\pi}{L}a} = \frac{z(1)e^{-j\varphi}}{\|z(1)\|}$, $k=1,2,\dots,N-1$.

重新定义的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$ 计算简便,同时保留了傅立叶变换系数的模与相位特性. $d'(k)$ 值恒等于归一化形状的傅立叶变换系数 $z(k)$ 与 $z(1)$ 之比,与形状的大小、旋转方向、平移和边界起始点位置无关. 由于新的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$ 比传统的傅立叶描述子 $d(k)$ 多包含了相位信息,因此避免了由于归一化傅立叶描述子丢失相位信息引起的形状混淆,可以更加准确地识别物体的形状.

2.4 形状主方向 φ 的确定

形状的方向由物体的形状特征决定,位于通过

重心且倾角为 β 的直线上. 由形状区域的 KL 变换^[10], β 是具有最大特征值的特征矢量的方向(物体最适椭圆的长轴方向):

$$\beta = \tan^{-1} \frac{u_{02} - u_{20} + \sqrt{(u_{02} - u_{20})^2 + 4u_{11}^2}}{2u_{11}}, \quad (10)$$

这里, u_{20} , u_{02} , u_{11} 为形状所围区域的 $p+q$ 阶中心矩. 使用 J. -G. Leu 的方法,由近似多边形的顶点快速计算出形状所围区域的 $p+q$ 阶中心矩^[11]. 该算法的原理是计算多边形每一条边与原点所围三角形区域的 $p+q$ 阶矩,然后通过符号相加得到整个区域的 $p+q$ 阶矩. 该算法仅与多边形的结点数目有关,而与形状面积的大小无关. 由于物体形状的近似多边形的顶点数目很少,因此计算形状区域矩的速度很快.

形状的方向位于倾角为 β 的直线上存在着二义性,必须确定其具体的形状主方向,即选择正向 β 或反向 $\beta+\pi$ 中的一个. 可以利用主轴所在直线与形状边界求交得到两个交点,选择重心到距离最近的一个交点的方向定义为形状的“主方向” φ ,如图 1(c)所示. 如果两个交点距重心的距离相等或相近,则需要进一步判断形状的主方向. 另一种更为实用的方法是将形状旋转角度 $-\beta$,然后由形状的三阶矩决定,见式(11),其原理是比较形状 $x>0$ 与 $x<0$ 两部分的能量,选取能量小的部分对应的方向作为形状的主方向.

$$\varphi = \begin{cases} \beta + \pi, & u_{30} > 0, \\ \beta, & u_{30} \leq 0. \end{cases} \quad (11)$$

2.5 形状的相似度

通过归一化傅立叶描述子 $d(k)$ 可以计算任意两个形状 i 和 j 间的相似程度,识别具有旋转、平移和尺度不变性的物体形状. 由于傅立叶变换的各频率分量互相正交,采用欧氏距离计算归一化傅立叶描述子间的形状差异,见式(12). 由于形状的能量大多集中在低频部分,傅里叶变换的高频分量一般很小且容易受到高频噪声的干扰,一般只使用归一化傅立叶描述子的低频分量计算物体形状的相似差异(根据经验,本文中取 $M=12$). 当 $distance=0$ 时,两个形状完全相似; $distance$ 越大,物体形状的差异越大.

$$distance = \sqrt{\sum_{k=2}^M \|d_i(k) - d_j(k)\|^2}. \quad (12)$$

3 实 验

本文通过 3 个实验来检验新的归一化傅立叶描

述子 $d'(k)$ 识别物体形状的能力. 图 3 中的 7 条鱼属于同一种形状, 但分别具有不同的尺寸、大小和旋转方向. 其中, F_2, F_3, F_4 与 F_1 具有相同的尺寸, 但不同的旋转方向. F_5, F_6, F_7 与 F_1 同时具有不同的尺寸、位置和旋转方向. 首先使用新的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$ 计算同种形状间的相似度差异, 如表 1 所示, 其类内平均离散度为 0.023. 然后使用传统傅立叶描述子 $d(k)$ 计算同种形状间的相似度差异, 其类内平均离散度为 0.012. 实验结果表明新的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$ 具有很好的旋转、平移和尺度不变性.

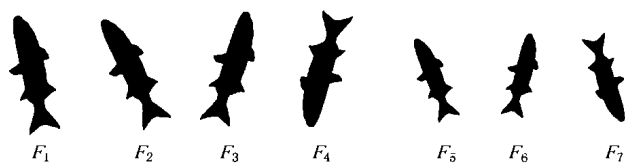


图 3 实验 1 中属于同一种形状, 但具有不同位置、大小和方向的 8 条鱼

表 1 实验 1 中使用 $d'(k)$ 识别图 3 中同种形状鱼的相似差异 distance

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
F_1	0.0000	0.0124	0.0207	0.0122	0.0274	0.0250	0.0241
F_2	0.0124	0.0000	0.0188	0.0142	0.0256	0.0320	0.0277
F_3	0.0207	0.0188	0.0000	0.0134	0.0199	0.0302	0.0275
F_4	0.0122	0.0142	0.0134	0.0000	0.0215	0.0242	0.0230
F_5	0.0274	0.0256	0.0199	0.0215	0.0000	0.0373	0.0251
F_6	0.0250	0.0320	0.0302	0.0242	0.0373	0.0000	0.0276
F_7	0.0241	0.0277	0.0275	0.0230	0.0251	0.0276	0.0000

图 4 中的 8 个规则形状分别为三角形 G_1 、边界含有噪声的三角形 G_2, G_3 、变形的三角形 G_4 、梯形 G_5 、含有噪声的矩形 G_6 、圆角矩形 G_7 和矩形 G_8 . 使用新的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$ 计算不同种形状

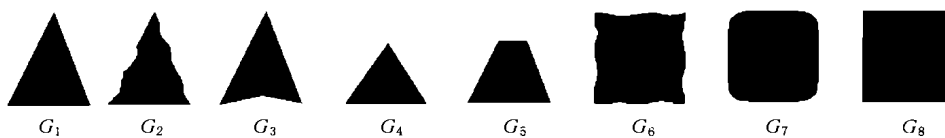


图 4 实验 2 中识别的 8 种不同规则形状

表 2 实验 2 中使用 $d'(k)$ 识别图 4 中不同形状的相似差异 distance

	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	$std\sigma(G_1 \sim G_8)$
G_1	0.0000	0.0244	0.0355	0.3783	0.2125	0.4250	0.3881	0.4091	0.1890
G_2	0.0244	0.0000	0.0420	0.3965	0.2288	0.4397	0.4020	0.4236	0.1955
G_3	0.0355	0.0420	0.0000	0.3716	0.1930	0.4098	0.3708	0.3933	0.1797
G_4	0.3783	0.3965	0.3716	0.0000	0.2269	0.2907	0.2455	0.2728	0.1274
G_5	0.2125	0.2288	0.1930	0.2269	0.0000	0.3010	0.2543	0.2811	0.0928
G_6	0.4250	0.4397	0.4098	0.2907	0.3010	0.0000	0.0758	0.0259	0.1849
G_7	0.3881	0.4020	0.3708	0.2455	0.2543	0.0758	0.0000	0.0534	0.1615
G_8	0.4091	0.4236	0.3933	0.2728	0.2811	0.0259	0.0534	0.0000	0.1798

间的相似度差异如表 2 所示, 类间平均离散度为 0.2704. 而使用傅立叶描述子 $d(k)$ 的类间平均离散度为 0.0569. 比较类间离散度和类内离散度差异的大小, 新的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$ 在实验 2 的类间离散度与实验 1 的类内离散度的比值为 $0.2704/0.023=11.75$, 大于传统的归一化傅立叶描述子 $d(k)$ 的类间离散度与类内离散度的比值 $0.0569/0.012=4.74$. 因此, 新的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$ 是一种比 $d(k)$ 具有更强物体形状区分能力的特征. 此外, 从表 2 中可以看出 G_1 与含有噪声的 G_2, G_3 非常相似, G_8 与含有噪声的 G_6, G_7 非常相似. G_4 与 G_1 虽然都属于三角形, 但由于形状不同, 它们的相似度差异仍然很大. 实验表明 G_4 与 G_5 更加相似. $std\sigma(G_5)=0.093$ 与其它形状的平均差异最小, 表明 G_5 更加接近其它物体的形状, 是介于三角形与矩形形状间的一种过渡. 由此可见新的归一化傅立叶描述子 $d'(k)$ 具有较强的抗噪声能力, 相似距离的大小近似反映了物体间形状差别的变化.

第 3 个实验以图 5 中的 9 种不同形状的工具作为基本形状进行分类测试, 检验归一化傅立叶描述子识别任意形状的能力(实验的数据来自文献[1]). 图中的每一个工具被随机旋转得到 15 个具有不同旋转方向的图像, 然后对每幅图像进行随机的放大和平移得到 5 个新的图像, 最后总共得到 $9 \times 15 \times 5 = 675$ 幅图像. 表 3 给出了使用两种不同傅立叶描述子 $d'(k)$ 和 $d(k)$ 对每一种形状进行识别的精度. 从实验中可以看出, $d'(k)$ 的平均识别精度为 99%, 而传统的归一化傅立叶描述子 $d(k)$ 的平均识别精度为 97%. 由于新的傅立叶描述子同时保留了模与相位特性, 因此具有更强的识别物体的能力.

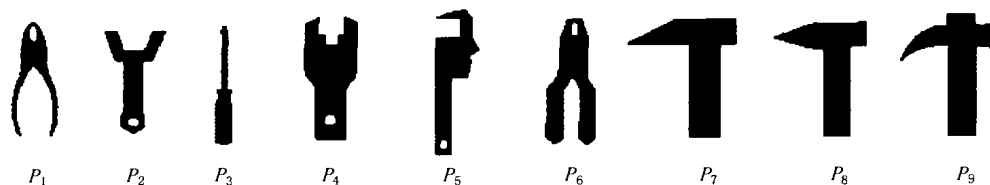


图 5 实验 3 中识别的同时具有旋转平移和尺度变化的 9 种工具

表 3 实验 3 中使用两种傅立叶描述子
识别 9 种工具的精度

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
$d'(k)$	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.95
$d(k)$	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	0.97	0.96	0.85

4 结 论

本文使用数字曲线的多边形近似方法,通过连续傅立叶变换代替离散傅立叶变换计算形状的傅立叶描述子.该方法不但减少了由于边界曲线等间距离散化引起的误差,而且大大降低了傅立叶变换的运算量.针对传统的傅立叶描述子丢失相位信息的缺点,文中利用形状的主方向消除边界起始点位置的相位影响,定义了同时保留模与相位信息的新归一化傅立叶描述子.我们理论上证明了归一化傅立叶描述子 $d'(k)$ 的旋转、平移和尺度不变性.实验中与传统的归一化傅立叶描述子进行了大量比较.实验表明新的归一化傅立叶描述子能够更加鲁棒地识别和区分具有旋转、平移和尺度变化的物体,是快速识别和分析物体形状的一种有效方法.值得一提的是:作为形状全局特征的傅立叶描述子并不适用于物体局部遮挡或局部变形时的识别.这时必须使用基于局部特征的其它改进方法才能够有效识别,相应的文献可以参考文献[12,13].

致谢 衷心感谢清华大学自动化系的常成同学.他在微软中国研究院实习期间为本文的写作提出了不少有益的建议,在此表示衷心感谢.

参 考 文 献

- 1 C C Chang, S M Hwang, D J Buehrer. A shape recognition scheme based on relative distances of feature points from the centroid. *Pattern Recognition*, 1991, 24(11): 1053~1063
- 2 S O Belkasim, M Shridhar, M Ahmadi. Pattern recognition with moment invariant: A comparative study and new results. *Pattern Recognition*, 1991, 24: 1117~1138
- 3 H Kauppi, T Seppanen. An experiment comparison of autoregressive and Fourier-based descriptors in 2D shape classification. *IEEE Trans on PAMI*, 1995, 2: 201~207
- 4 E Persoon, K S Fu. Shape discrimination using Fourier descriptors. *IEEE Trans on PAMI*, 1986, 8: 388~397
- 5 C T Zahn, R Z Roskies. Fourier descriptors for plane closed curves. *IEEE Trans on Computers*, 1972, 21: 269~28
- 6 S R Dubois, F H Glanz. An autoregressive model approach to two-dimensional shape classification. *IEEE Trans on PAMI*, 1986, 8: 55~56
- 7 H H Chen, J S Su. A syntactic approach to shape recognition. In: *Proc Int'l Computer Symp.* Tainan, Taiwan, 1986. 103~122
- 8 J Sklansky, V Gonzalez. Fast polygonal approximation of digitized curves. *Pattern Recognition*, 1980, 12: 327~331
- 9 A K Jain. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall Press, 1989. 370~371
- 10 吴健康. 数字图像分析. 北京:人民邮电出版社, 1989. 28~31 (Wu Jiankang. *Digital Image Analysis (in Chinese)*. Beijing: People's Posts & Telecommunications Press, 1989. 28~31)
- 11 J-G Leu. Computing a shape moments from its boundary. *Pattern Recognition*, 1991, 10: 949~957
- 12 J W Gorman, O R Mitchell, F P Kuhl. Partial shape recognition using dynamic programming. *IEEE Trans on PAMI*, 1988, 10: 257~266
- 13 H J Wolfson. On curve matching. *IEEE Trans on PAMI*, 1990, 12: 483~489



王 涛 男, 1972 年生, 博士研究生, 主要研究领域为计算机视觉、图像处理与模式识别、计算机图形学等。



刘文印 男, 1966 年生, 博士, 微软中国研究院研究员, 主要研究领域为多媒体信息检索、图像理解与模式识别、计算机图形学等。



孙家广 男, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究领域为计算几何、计算机辅助设计、软件工程、PDM & ERP 等。



张宏江 男, 1960 年生, 博士, 微软中国研究院主任研究员, IEEE 和 ACM 高级会员, 主要研究领域为视频和图像的分析处理与检索、多媒体数据压缩和传输等。