# 基于归一化椭圆傅里叶描述子的黄瓜形状识别*

戚利勇[1]　高　峰[1]　谭豫之[2]　杨庆华[1]

(1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014;
2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 为定量描述水果形状以便为后续识别提供特征信息,以黄瓜为研究对象,通过对黄瓜图像进行增强、阈值、形态学及边界提取操作,提取黄瓜边界并用数对表示。采用椭圆傅里叶描述子定量描述边界信息,并做尺度变换、旋转变换及起始点变换归一化处理。利用描述子对黄瓜边界进行重建,对重建后边界做误差分析。实验结果表明:采用椭圆傅里叶描述法,只需少量描述子即可完成黄瓜形状识别,并可准确重建原始形状。

**关键词**: 黄瓜　形状描述　边界　傅里叶描述子

**中图分类号**: TP391.41　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2011)08-0164-04

# Cucumber Shape Description Based on Elliptic Fourier Descriptor

Qi Liyong[1]　Gao Feng[1]　Tan Yuzhi[2]　Yang Qinghua[1]

(1. *The Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology*, *Ministry of Education*, *Zhejiang University of Technology*, *Hangzhou* 310014, *China*
2. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

**Abstract**

Aiming at identifying the shape of arbitrary object quickly and accurately, cucumber was taken as a research object. The boundary of cucumber image was extracted through digital image processing including image enhancing, threshold processing, morphological operations and edge extraction operation. Then elliptic Fourier descriptors were used to describe the boundary information of cucumber quantitatively, and the elliptic Fourier descriptors were normalized at start point, rotation and size after that. The cucumber shape was reconstructed by using different numbers of harmonics of elliptic Fourier descriptors with error analysis. The experiment results showed that the complex shape of cucumber could be described by a small amount of elliptic Fourier descriptor through the description of elliptic Fourier method, and the elliptic Fourier descriptor could reconstruct the original shape accurately.

**Key words**　Cucumber, Shape description, Boundary, Fourier descriptor

## 引言

果蔬收获属劳动密集型工作,其人工收获成本占生产成本比例高达 33% ~50%,因此实现果蔬收获机械化变得越来越迫切[1]。研制机器人实现果蔬自动化采摘成为一种趋势,其中一个难点是如何将成熟果实从复杂背景中识别出来,而定量的描述水果形状可为后续的识别提供特征信息。

近年来,国内外众多学者对其进行了研究,部分学者充分利用果实的光谱特性进行果实的目标识别[2~5]。部分学者利用物体的几何形状来进行物体的识别[6]。也有学者用傅里叶描述子描述水果边界特性[7]。Zahn 使用傅里叶描述子来描述和识别物体的形状特征[8],它可将物体的形状信息完全提

收稿日期: 2010-10-09　修回日期: 2011-03-25

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA04Z209)、浙江省自然科学基金杰出青年团队资助项目(R1090674)和浙江省机械电子工程重中之重学科开放基金资助项目(20090324)

**作者简介**: 戚利勇,博士生,主要从事机器视觉、数字图像处理研究,E-mail: 010831@163.com

**通讯作者**: 杨庆华,教授,博士生导师,主要从事机器人研究,E-mail: robot@zjut.edu.cn

取并恢复出来，但在形状边界的快速傅里叶变换、归一化傅里叶描述子等方面尚存在问题。

本文以黄瓜作为研究对象，首先对黄瓜图像进行处理，提取黄瓜边界，然后使用椭圆傅里叶描述法来定量描述黄瓜的边界信息，得到椭圆傅里叶描述子，最后用得到的描述子对黄瓜边界进行重建，分析重建结果并作误差分析。

## 1　黄瓜边界获取

要对边界进行描述，首先要获得具有封闭曲线的边界。本研究将黄瓜放置于白纸上，然后用数码相机拍摄图像，得到尺寸为 368 像素 ×278 像素的 24 位 RGB 真彩色图像，如图 1a 所示。为方便后续图像处理，对其进行灰度化处理，得到灰度图像，如图 1b 所示。由于原始图像中通常带有各种噪声与畸变，会大大影响图像的质量，因此在进行进一步分析之前，要改善图像质量。使用灰度拉伸得到增强后的图像，如图 1c 所示。

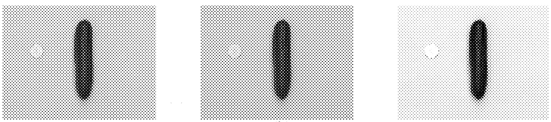
(a)　(b)　(c)

图 1　黄瓜图像

Fig. 1　Cucumber image

（a）原始图像　（b）灰度图　（c）增强图

从图 2a 所示灰度直方图中可以看到，原图像的亮度分布不均匀，从灰度拉伸增强后的直方图（图 2b）可以明显地看到整个图像的亮度已经提高。

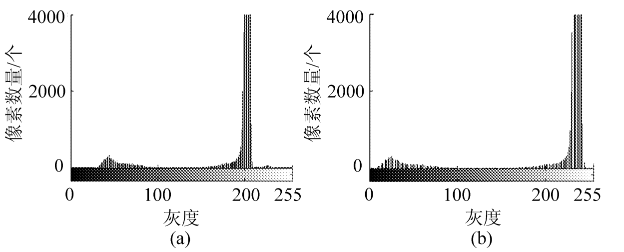


图 2　直方图

Fig. 2　Histogram

（a）灰度直方图　（b）增强后直方图

为得到黄瓜边界，需将目标和背景分离开。本文采用阈值法进行分割，经过实验由迭代算法得到阈值 $T=0.541$，把像素灰度 0～255 转换到 0～1，用此阈值对图像进行分割，得到二值图，如图 3a 所示。为方便后续处理，把得到的图像进行灰度反转（图 3b）。

由于噪声的影响，图像在阈值化后得到的边界通常都很不平滑，物体区域具有一些噪声孔，而背景区域上散布着一些小的噪声物体。连续的开和闭运算可以有效地改善这种情况。


(a)　(b)

图 3　阈值分割

Fig. 3　Threshold segmentation

（a）二值图　（b）反相图

利用 3 次开运算操作后得到二值图，如图 4 所示，其中白色代表目标像素，黑色代表背景像素。用 Matlab 的边界提取函数得到边界，如图 5 所示。边界的起始点位于边界左边上端，其坐标为（79，173），按顺时针排序，遍历整个边界，共得到边界坐标点 410 对，形成封闭边界，完成黄瓜边界的表示。

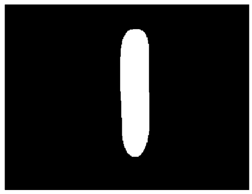

图 4　形态学操作

Fig. 4　Mathematical morphology operations

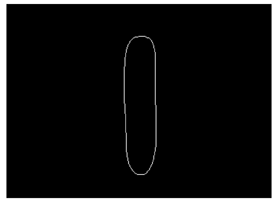

图 5　黄瓜边界

Fig. 5　Cucumber boundary

## 2　椭圆傅里叶描述

椭圆傅里叶描述子就是利用椭圆叠加来逼近物体的边界曲线。傅里叶描述子已经成功地被很多学者用来获得闭合边界的特征，但是由于傅里叶变换基在空域中并不是局部的，因此局部形状的改变会影响傅里叶系数，进而导致描述的不准确。而椭圆傅里叶是在傅里叶级数的分析基础上提取出来的，它可以以多次谐波的形式无限逼近边界，并且具有尺度变换、旋转变换、起始点变换的不变性且不丢失任何形状信息的优点。

### 2.1　椭圆傅里叶

因为边界是连续封闭并且有周期的，所以傅里叶级数可以用来逼近边界[9~11]。对于一个封闭的边界，其边界在 $x$、$y$ 方向的傅里叶级数可以展开为

$$x(t)=A_0+\sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n\cos\frac{2n\pi t}{T}+b_n\sin\frac{2n\pi t}{T}\right)\tag{1}$$

$$y(t)=C_0+\sum_{n=1}^{\infty}\left(c_n\cos\frac{2n\pi t}{T}+d_n\sin\frac{2n\pi t}{T}\right)\tag{2}$$

其中

$$a_n=\frac{T}{2n^2\pi^2}\sum_{p=1}^{K}\frac{\Delta x_p}{\Delta t_p}\left(\cos\frac{2n\pi t_p}{T}-\cos\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right)\tag{3}$$

$$b_n=\frac{T}{2n^2\pi^2}\sum_{p=1}^{K}\frac{\Delta x_p}{\Delta t_p}\left(\sin\frac{2n\pi t_p}{T}-\sin\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right)\tag{4}$$

$$c_n = \frac{T}{2n^2\pi^2}\sum_{p=1}^{K}\frac{\Delta y_p}{\Delta t_p}\left(\cos\frac{2n\pi t_p}{T} - \cos\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \quad (5)$$

$$d_n = \frac{T}{2n^2\pi^2}\sum_{p=1}^{K}\frac{\Delta y_p}{\Delta t_p}\left(\sin\frac{2n\pi t_p}{T} - \sin\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \quad (6)$$

$$A_0 = \frac{1}{T}\sum_{p=1}^{K}\left[\frac{\Delta x_p}{2\Delta t_p}(t_p^2 - t_{p-1}^2) + \xi_p(t_p - t_{p-1})\right] \quad (7)$$

$$C_0 = \frac{1}{T}\sum_{p=1}^{K}\left[\frac{\Delta y_p}{2\Delta t_p}(t_p^2 - t_{p-1}^2) + \delta_p(t_p - t_{p-1})\right] \quad (8)$$

$$\Delta t_p = (\Delta x_p^2 + \Delta y_p^2)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$t_p = \sum_{i=1}^{p}\Delta t_i \quad (10)$$

$$\xi_p = \sum_{j=1}^{p-1}\Delta x_j - \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p}\sum_{j=1}^{p-1}\Delta t_j \quad (11)$$

$$\delta_p = \sum_{j=1}^{p-1}\Delta y_j - \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p}\sum_{j=1}^{p-1}\Delta t_j \quad (12)$$

$$\xi_1 = \delta_1 = 0 \quad (13)$$

式中 $n$——椭圆所代表的阶数，$n>0$

$K$——边界上点的数量

$T$——周期

$p$——边界上的点序号

$a_n$、$b_n$、$c_n$、$d_n$——椭圆傅里叶系数

$\Delta t_p$、$\Delta t_j$——两个边界点之间的距离

$\Delta x_p$、$\Delta x_j$——在 $x$ 方向上的增量

$\Delta y_p$、$\Delta y_j$——在 $y$ 方向上的增量

$A_0$ 和 $C_0$ 为谐波的直流分量，从边界上来说它代表了边界的中心点，同时还是一次谐波椭圆的中心。每一个 $n$ 构成的 4 个系数 $a_n$、$b_n$、$c_n$、$d_n$ 代表了一个椭圆，$n$ 阶椭圆也就是 $n$ 次谐波。利用式(1)～(13)，对处理后得到的边界数据进行傅里叶变换计算，得到边界的椭圆傅里叶描述子(取前 10 次谐波系数)，如表 1 所示。

**表 1 黄瓜边界的椭圆傅里叶描述子**

**Tab. 1 Elliptic Fourier descriptors of cucumber boundary**

| $n$ | $a_n$ | $b_n$ | $c_n$ | $d_n$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 131.165 2 | 0 | 195.470 4 | 0 |
| 1 | -58.377 6 | -61.255 6 | -19.040 9 | 17.566 8 |
| 2 | 0.249 6 | 0.056 9 | -0.631 5 | 0.288 3 |
| 3 | 5.859 7 | -4.920 0 | -4.490 9 | -4.171 5 |
| 4 | -0.210 7 | 0.070 7 | 0.088 9 | -0.265 2 |
| 5 | 1.028 5 | 1.597 2 | 1.793 0 | -1.219 5 |
| 6 | -0.013 2 | -0.185 8 | 0.149 7 | -0.021 5 |
| 7 | -0.635 8 | 0.399 6 | 0.392 9 | 0.686 6 |
| 8 | 0.190 1 | 0.002 5 | 0.024 3 | 0.030 0 |
| 9 | -0.153 6 | -0.217 8 | -0.375 8 | 0.087 8 |
| 10 | -0.000 4 | 0.141 7 | 0.054 5 | 0.027 8 |

## 2.2 归一化

对于每一个描述子，希望它具有尺度变换、旋转变换和起始点变换的不变性，因此对得到的椭圆傅里叶描述子进行尺寸、起始点和旋转的归一化。把任意起始点得到的椭圆傅里叶描述子记为 $a_n$、$b_n$、$c_n$、$d_n$，当起始点沿着边界顺时针移动了 $\lambda$ 个单位，并且当原始的 $x$、$y$ 坐标轴逆时针旋转 $\psi$ 角至坐标轴 $u$、$v$，如图 6 所示，图中 A、B、C 为不同次数谐波，得到新的椭圆系数 $a_n^{**}$、$b_n^{**}$、$c_n^{**}$、$d_n^{**}$，有

$$\begin{bmatrix} a_n^{**} & b_n^{**} \\ c_n^{**} & d_n^{**} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi_1 & \sin\psi_1 \\ -\sin\psi_1 & \cos\psi_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \cos(n\theta_1) & -\sin(n\theta_1) \\ \sin(n\theta_1) & \cos(n\theta_1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中
$$\theta_1 = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2(a_1b_1 + c_1d_1)}{a_1^2 + c_1^2 - b_1^2 - d_1^2}\right) \quad (15)$$

$$\psi_1 = \arctan\left(\frac{y_1^*(0)}{x_1^*(0)}\right) = \arctan\frac{c_1^*}{a_1^*} \quad (0 \leqslant \psi_1 < 2\pi) \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} a_1^* & b_1^* \\ c_1^* & d_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

同时，半长轴的大小为

$$E^*(0) = (a_1^{*2} + c_1^{*2})^{1/2} \quad (18)$$

通过式(14)～(18)计算得到关于起始点和旋转角度的归一化系数；再对尺度进行归一化，把得到的系数除以半长轴的大小即可；对平移进行归一化，只需忽视直流分量 $A_0$ 和 $C_0$ 即可。表 2 为计算得到的归一化椭圆傅里叶描述子(取前 10 次谐波系数)，这里保留了边界的中心点信息 $A_0$ 和 $C_0$。

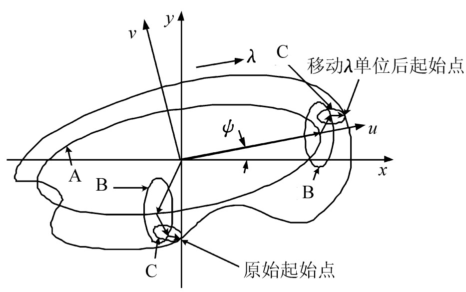


图 6 边界的椭圆逼近

Fig. 6 Elliptic approximation to a boundary

# 3 实验与分析

对归一化的椭圆傅里叶描述子进行傅里叶反变换，重新计算各个边界点的坐标，也就是对边界进行重建，实验中采用不同数量的谐波 1、4、8、10 来重建边界，得到重建后的图像如图 7 所示。

采用不同数量的谐波重建边界，耗时 0.3 s，从

表 2　归一化的椭圆傅里叶描述子

**Tab. 2　Normalized elliptic Fourier descriptors**

| $n$ | $a_n$ | $b_n$ | $c_n$ | $d_n$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 1.550 1 | 0 | 2.310 0 | 0 |
| 1 | 1.000 0 | 0 | 0 | -0.306 1 |
| 2 | -0.000 6 | 0.002 9 | -0.003 7 | -0.007 3 |
| 3 | 0.090 4 | 0.001 4 | -0.008 0 | -0.072 1 |
| 4 | -0.002 4 | 0.001 0 | 0.000 8 | -0.003 2 |
| 5 | 0.022 3 | 0.002 1 | 0.001 8 | -0.025 6 |
| 6 | -0.002 2 | 0.000 4 | -0.000 5 | -0.001 7 |
| 7 | 0.008 9 | 0.000 5 | 0.001 0 | -0.009 3 |
| 8 | -0.002 2 | 0.000 4 | -0.000 3 | -0.000 3 |
| 9 | 0.003 2 | -0.000 1 | 0.001 6 | -0.004 3 |
| 10 | -0.001 6 | 0.000 4 | -0.000 2 | 0.000 7 |

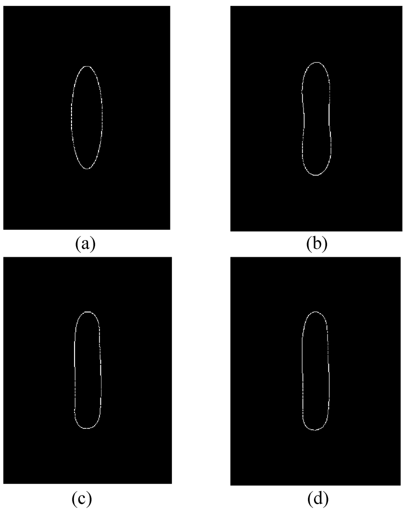


图 7　谐波重建

Fig. 7　Harmonic reconstruction

（a）$n=1$　（b）$n=4$　（c）$n=8$　（d）$n=10$

图 7 中可以观察到，随着重建系数的增多，重建后的边界越来越接近原始边界（图 5）。定义平均误差为原始坐标和重建坐标误差和的平均值（单位：像素），图 8 为用于重建的谐波次数与平均误差的关系。

从图 8 误差曲线中可以看出，当用于重建的椭圆傅里叶系数小于 5 时，重建的边界与原始边界误差较大，随着用于重建的谐波次数不断增加，误差越来越小，从图形上的表现为重建得到的边界不断的逼近原始边界，当用于重建的谐波次数大于 10 次时，误差可忽略不计。

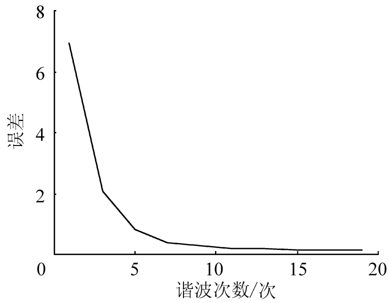


图 8　重建谐波次数与误差曲线

Fig. 8　Relation between harmonic number and average error

## 4　结论

（1）用椭圆傅里叶描述法进行形状的描述只需要少量描述子即可完成复杂的形状描述。

（2）当用于重建的谐波次数大于 10 次时，误差可忽略不计，且可准确地重建原始形状。

## 参　考　文　献

1　汤修映，张铁中．果蔬收获机器人研究综述[J]．机器人，2005，27(1)：90～96.
Tang Xiuying, Zhang Tiezhong. Robotics for fruit and vegetable harvesting: a review[J]. Robot, 2005, 27(1): 90～96. (in Chinese)

2　Henten E J, Hemming J, Tuijl B J, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouse[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(3): 241～258.

3　袁挺，张俊雄，李伟，等．基于机器视觉的非结构环境下黄瓜目标特征识别[J]．农业机械学报，2009，40(8)：170～174.
Yuan Ting, Zhang Junxiong, Li Wei, et al. Feature acquisition of cucumber fruit in unstructured environment using machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 170～174. (in Chinese)

4　Kondo N, Nakamura H, Monta M, et al. Visual sensor for cucumber harvesting robot[C]∥Proceedings of the Food Processing Automation Conference Ⅲ, London, 1994.

5　袁挺，李伟，谭豫之，等．温室环境下黄瓜采摘机器人信息获取[J]．农业机械学报，2009，40(10)：151～155.
Yuan Ting, Li Wei, Tan Yuzhi, et al. Information acquisition for cucumber harvesting robot in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 151～155. (in Chinese)

6　王津京，赵德安，姬伟，等．采摘机器人基于支持向量机苹果识别方法[J]．农业机械学报，2009，40(1)：148～151.
Wang Jinjing, Zhao Dean, Ji Wei, et al. Apple fruit recognition based on support vector machine using in harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 148～151. (in Chinese)

（下转第 142 页）

## 参 考 文 献


1 McMahon D J, Oberg C J, McManus W. Functionality of Mozzarella cheese[J]. Australian Journal of Dairy Technology, 1993, 48(2): 99 ~ 104.

2 Metzger L E, Barbano D M, Runda M A, et al. Effect of milk preacidification on low fat Mozzarella cheese composition and yield[J]. Journal of Dairy Science, 2000, 83(4): 648 ~ 658.

3 Tunick M H, Mackey K L, Smith P W, et al. Effect of composition and storage on the texture of Mozzarella cheese[J]. Netherlands Milk and Dairy Journal, 1991, 45: 117 ~ 125.

4 Kosikowski F V, Mistry V V. Cheese and fermented milk foods: volume 1[M]. Westport: Origins and Principles, 1997.

5 Berger W, Klostermeyer H, Merkenich K, et al. Processed cheese manufacture: a JOHA guide[P]. BK Giulini Chemie GmbH & Co, OHG, Ladenburg, Germany, 1998.

6 Mizuno R, Lucey J A. Effect of two types of emulsifying salts on the functionality of pasta filata cheese [J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(10): 3 411 ~ 3 425.

7 Mizuno R, Lucey J A. Effect of emulsifying salts on the turbidity and calcium phosphate protein interactions in casein micelles [J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(9): 3 070 ~ 3 078.

8 Kindstedt P S, Rowney M, Roupas P. Technology, biochemistry and functionality of pasta filata/pizza cheese[M] // Law B A. Technology of cheese making. Sheffield, UK: Academic Press, 1999: 193 ~ 221.

9 黄伟坤. 食品检验与分析[M]. 北京:轻工业出版社,1989.

10 McMahon D J, Fife R L, Oberg C J. Water partitioning in Mozzarella cheese and its relationship to cheese meltability[J]. Journal of Dairy Science, 1999, 82(7): 1 361 ~ 1 369.

11 Drake M A, Gerard P D. Relationship between instrumental and sensory measurements of cheese texture[J]. Journal of Texture Studies, 1999, 30(4): 451 ~ 476.

12 郭媛,郭慧媛,王芳,等. 堆叠 pH 值对 Mozzarella 干酪熔化特性的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(3):156 ~ 160.
Guo Yuan, Guo Huiyuan, Wang Fang, et al. Effect of milling pH value on Mozzarella cheese meltability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):156 ~ 160. (in Chinese)

13 Cheng L J, Augustin M A, McKinnon I R, et al. The effect of mineral salt addition on Mozzarella cheese-making[J]. Australian Journal of Dairy Technology, 1997, 52(8): 8 ~ 14.

14 Pastorino J, Hansen C L, McMahon D J. Effect of sodium citrate on structure-function relationships of cheddar cheese[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(10): 3 113 ~ 3 121.

15 Rudan M A, Barbanoa D M. A model of Mozzarella cheese melting and browning during pizza baking[J]. Journal of Dairy Science, 1998, 81(8): 2 312 ~ 2 319.

16 Lucey J A, Johnson M E, Horne D S. Invited review: perspectives on the basis of the rheology and textural properties of cheese[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(9): 2 725 ~ 2 743.

17 Kindstedt P S, Kiely L J, Gilmore J A. Variation in composition and functional properties within brine salted Mozzarella cheese [J]. Journal of Dairy Science, 1992, 75(11): 2 913 ~ 2 921.


(上接第 167 页)


7 应义斌. 水果形状的傅里叶描述子研究[J]. 生物数学学报,2001,16(2):234 ~ 240.
Ying Yibin. Fourier descriptor of fruit shape[J]. Journal of Biomathematics, 2001,16(2):234 ~ 240. (in chinese)

8 Zahn C T, Roskies R Z. Fourier descriptors for plane closed curves[J]. IEEE Transactions on Computers, 1972, C-21(3): 269 ~ 281.

9 Frank P Kuhl, Charles R Giardina. Elliptic Fourier features of a closed contour[J]. Computer Graphics and Image Processing,1982,18(3):236 ~ 258.

10 汪业衡,张翔. 椭圆傅里叶级数展开法和椭圆光波导的截止频率[J]. 光学学报,2000,20(2):204 ~ 213.
Wang Yeheng, Zhang Xiang. Elliptical fourier series expansion method and cutoff frequencies of elliptical optical waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2000,20(2):204 ~ 213. (in chinese)

11 余少波,鞠发平,肖英明. 物体识别不变性方法比较分析(Ⅱ)-统计方法[J]. 海军工程学院学报,1993,62(1):8 ~ 15.
Yu Shaobo, Ju Faping, Xiao Yingming. Comparison and analysis of invariants recognition (Ⅱ)-algebraical method[J]. Journal of Naval Academy of Engineering,1993,62(1): 8 ~ 15. (in Chinese)