

# 基于单幅建筑物图像的太阳光方位角恢复

曹晶 曹迎春 潘金贵

(南京大学软件新技术国家重点实验室, 南京 210093)

**摘要** 在建筑规划和历史遗迹重建等领域,需要在重建的场景中添加、删除虚拟物体。能否获得图像拍摄时刻的光照信息,是决定最终合成图像的照片级真实感程度的重要因素之一。本文对基于单幅建筑物图像的光源方向检测技术进行了研究。把户外的太阳光看作为平行光,在建筑物坐标系中其方向可以用方位角和仰角表示。利用图像中建筑物表面阳光强度值的变化来确定方位角。在此基础上,可以利用建筑物表面突出部分与其阴影之间的关系来确定仰角。这项技术可以应用于大多数建筑物的重建系统中。

**关键词** 建筑物 太阳光 方位角 基于图像

**中图法分类号:** TP309 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)12-1480-06

## Retrieval the Tilt Angle of Solar Illumination from a Single Architectural Photograph

CAO Jing, CAO Ying-chun, PAN Jin-gui

(The State Key Laboratory for Novel Software Technology at Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract** When users want to plan the reconstructed virtual scenes, if we obtained the information of the lighting at the time when the images were taken, we can use the rendering technologies from computer graphics to obtain new synthesized photorealistic imageries. This paper presents techniques for recovering the tilt angle of solar illuminant from a single outdoor building image, which can be integrated to most current image-base architectural rebuilding systems. Solar illumination can be treated as parallel light. Its direction can be measured by tilt and slant angle in architectural coordinate system. To calculate the tilt angle, we utilize the changes of intensities from different wall surfaces. This idea comes from SFS (Shape from Shading) technique. On the basis of the calculated tilt angle, we can easily calculate the slant angle from images by using the bulges of the wall surface and their shadows.

**Keywords** architecture, solar illumination, tilt angle, image-based

## 1 引言

在建筑规划和历史遗迹重建等领域需要在重建的场景中添加、删除虚拟物体时,能否获得图像拍摄时刻的光照信息,是决定最终合成图像的照片级真实感程度的重要因素之一<sup>[1]</sup>。

对于户外的场景而言,起决定性作用的光照信息是太阳光的照射和大气漫反射<sup>[2]</sup>。一般认为太阳光是平行光。在基于单幅建筑物图像的光源方向检测研究中,太阳光在建筑物坐标系下可以由方位角(tilt angle) $\theta$ 和仰角(slant angle) $\varphi$ 表示,如图1所示。

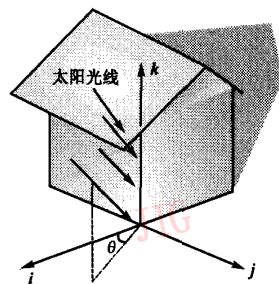


图1 太阳光方位角在建筑坐标系中的表示

目前尚未见有关通过单幅建筑物图像且不采用任何标定物体的光源(太阳)方位角度恢复技术的报

道。为此提出利用一幅建筑物图像,恢复出太阳光在建筑物坐标系中的方位角。

## 2 方位角度的计算

### 2.1 Lambertian 反射模型

一个符合 Lambert 法则的物体表面,在任意方向上观察都具有相同的亮度,这样一个理想的漫反射面被称为 Lambertian 反射模型。对大多数建筑物而言,观察其表面时,会感到表面上的任何部分在任意视角下都具有相同的亮度。这说明,Lambertian 反射模型对建筑物表面是一个比较好的近似。假设太阳光是平行光,且其对建筑物表面任意非阴影部分的点的辐射能量是常数,则从直观上讲,所研究的对象是一个符合 Lambert 法则的反射模型。对 Lambertian 反射模型而言,其 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) 为  $1/\pi$ 。据此,物体表面辐射度公式可以写为

$$L_1(\lambda) = \frac{E_0(\lambda)}{\pi} \cdot \rho(\lambda) \cdot \cos\langle N, S \rangle \quad (1)$$

其中,  $L_1(\lambda)$  表示物体表面波长为  $\lambda$  的辐射度,  $E_0(\lambda)$  表示物体表面接收到波长为  $\lambda$  的辐照度,  $\rho(\lambda)$  为物体表面此处的反射比,  $N$  为物体表面在此处的法向量,  $S$  为入射光的方向向量。

### 2.2 图像辐照度模型

物体反射出的光线穿过透镜,在底片上成像或者被量化为对应的光强度数值。图像辐照度描述了场景中物体的辐射度与其经过相机透镜后形成的对象平面的辐照度,这两者之间的关系。图像辐照度为

$$E_1(\lambda) = L_1(\lambda) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2}{f^2} \cdot \cos^4(\alpha) \quad (2)$$

其中,  $E_1(\lambda)$  表示像平面接收到波长为  $\lambda$  的辐照度,  $d$  指透镜的直径,  $f$  指焦距 (focal length),  $\alpha$  指从物体表面发射出的光线穿过透镜中心与光轴之间的夹角。

透镜直径非常小,如果选取的物体表面上的点比较接近,并且物体与相机的距离很远,就可以认为  $\cos(\alpha)$  是常数,因此  $\frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2}{f^2} \cdot \cos^4(\alpha)$  可以用常数  $k$  代替。这样图像辐照度公式可以表示为

$$E_1(\lambda) = k \cdot L_1(\lambda) \quad (3)$$

数码相机的成像传感器 (imaging sensor) 接受到场景中的辐照时,会将光信号转换为数字信号。需要指出的是,这是一个非线性的过程,需要进行 Gamma 校正。非线性带来的采样值偏移与采样值

本身相比是很小的,且现代的 CCD 图像传感器一般都具有良好的线性特性曲线,图像的灰度值 (intensity) 一般与光的强度值成比例关系,可以用来表示光的强度<sup>[3]</sup>。因此,很多系统都直接采用数字图像中的 R、G、B 分量来对物体表面的强度进行计算,并且能得到比较精确的结果。但是,当场景中某些部分的亮度过大,超出了采样取值的范围时,那么这些部分形成的采样值会失真,图像中这些点的像素值不能用作表示场景中物体表面的强度。文献 [4] 中提出了通过设置不同的曝光时间 (已知的) 得到多幅图片,并通过这些图片来获得物体表面辐射度的相对值。采用这种方法可以方便地处理在相机硬件进行采样时引入的非线性问题。

### 2.3 平行光方位角计算公式

将式 (1) 代入到式 (3) 中可以得到:

$$E_1(\lambda) = k \cdot \rho(\lambda) \cdot \frac{E_0(\lambda)}{\pi} \cdot \cos\langle N, S \rangle \quad (4)$$

因为太阳光是平行光,某个时刻,建筑物表面接受的辐照度  $E_0(\lambda)$  相同。设建筑物表面具有相同的反照率,则式 (4) 可以写成:

$$E_1(\lambda) = c(\lambda) \cdot \cos\langle N, S \rangle \quad (5)$$

这里,  $c(\lambda) = k \cdot \rho(\lambda) \cdot \frac{E_0(\lambda)}{\pi}$ 。

在世界坐标系中,设建筑物表面的法向量 (单位向量) 为  $N_1, N_2$  和  $N_3$ , 如图 2 所示 ( $N_1, N_2$  和  $N_3$  为图 1 中  $i, j$  和  $k$  在世界坐标系中的表示); 设入射光方向向量为  $S$  (单位向量)。

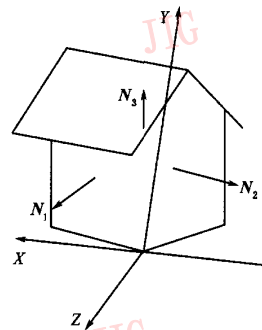


图 2 世界坐标系下的建筑物模型

根据式 (5) 可知,对法向量为  $N_1$  的平面和法向量为  $N_2$  的平面,图像对应点的灰度值分别为

$$\begin{cases} E_1^{(1)}(\lambda) = c(\lambda) \cdot (N_1^T \cdot S) \\ E_1^{(2)}(\lambda) = c(\lambda) \cdot (N_2^T \cdot S) \end{cases} \quad (6)$$

设光源方向  $S$  在建筑物坐标系中为  $S'$ 。  $S'$  可以由  $S$  经过如下变换得到 (设假想的世界坐标系位于建筑

物坐标系同一原点):

$$S' = M \cdot S \quad (7)$$

从图2可以看出:

$$M = [N_1, N_2, N_3]^T$$

且

$$S' = [N_1^T \cdot S, N_2^T \cdot S, N_3^T \cdot S]^T$$

因此:

$$|\tan(\theta)| = \frac{S'_y}{S'_x} = \frac{N_2^T \cdot S}{N_1^T \cdot S} \quad (8)$$

将式(6)带入式(8)中得到(这里假设物体表面具有相同的材质和颜色):

$$|\tan(\theta)| = \frac{E_1^{(2)}(\lambda)}{E_1^{(1)}(\lambda)} \quad (9)$$

考虑到采用式(9)的条件是建筑物墙壁的两面都有阳光照射到,因此  $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ , 所以可以将其写成:

$$\theta = \arctan\left(\frac{E_1^{(2)}(\lambda)}{E_1^{(1)}(\lambda)}\right) \quad (10)$$

式(10)是计算平行光方位角的计算公式。可以看到这里利用了建筑物表面相互垂直的性质,通过图像中像素的灰度值计算方位角。在实际应用中,采用R、G、B 3个波段上的值来计算 $\theta$ ,并将结果进行平均。

### 3 实际影响因素

式(10)给出了方位角的计算方法,采用了R、G、B 3个波段上的颜色向量(color vector)进行计算,在墙壁上选取的区域内得到颜色向量。在实际应用中需要考虑一些影响因素。下面就大气漫反射,粗糙物体表面的反射模型,物体表面具有不同材质和颜色等情况进行了讨论。

#### 3.1 大气漫反射

无论晴天或是阴天,大气漫反射总是存在的。可以认为物体表面每个点在任意方向上接收到大气漫反射的辐照度是一样的。因此,在选择被阳光照射的区域时,需要同时选取一块具有阴影的部分,这部分区域没有被阳光照射到,只接受大气漫反射。需要计算这块区域的颜色向量,并将其从被阳光照射区域的颜色向量中减去,以抵消大气漫反射的影响。

#### 3.2 周围物体的反射

由于建筑物周围不可避免地存在其他一些物体,阳光照射到这些物体上后形成的反射也会对建筑物表面的辐照度形成影响。尤其是在炎热的夏季,地面也会对建筑物墙壁的辐照度形成影响。但是相

对于太阳光对建筑物表面直接形成的辐照度,这些因素形成的影响相对来说较小。此外,当对阴影区域进行选择时,尽量选择与被照射到的区域相接近的阴影区域,这样可尽可能地抵消这些因素的影响。

#### 3.3 粗糙物体表面的反射模型

建筑物表面的灰度值在一定的范围内有变化,并不是一个理想的Lambertian模型,这是因为粗糙的物体表面并不是一个理想的平面,其上高低起伏的小面片的法向量偏离了平面的法向量。为此必须考虑物体表面的粗糙程度对Lambertian模型的影响。

文献[5]扩展了Lambertian模型,通过统计方法计算出一般的粗糙表面(被考虑的表面各项同性)平均漫反射的模型。粗糙物体表面可以用具有一定倾斜度(slope)的V-Cavities表示,而表面的粗糙程度表示了这些V-Cavities偏离表面平均法向量(区域法向量)的偏移程度。其中,法向量接近光源方向的面片接受到更多的光照,而法向量接近观察方向的面片向观察点提供更多的辐照度。因此,在图像中可以观察到物体表面的灰度值分布并不一致。文献[5]中提出了V-Cavities倾斜度分布为高斯分布的模型,并且在知道物体表面某个区域内倾斜度分布期望和标准偏差的条件下,可以统计出这个区域平均辐照度。这里借用这个高斯分布模型来对图像中建筑物表面灰度值进行统计分析。

设物体表面一个宏观区域的向量为 $N$ (区域法向量),其上小的面片的法向量与 $N$ 之间的夹角为 $\alpha$ 。设 $\alpha$ 服从期望为 $0^{[4]}$ ,标准差为 $\sigma$ 的高斯分布,如图3所示。这里并不列出具体的分布公式和辐照度计算公式,因为可以利用高斯分布的性质来得到所需要的结论:统计这个区域内灰度值的分布,其中出现概率最大的灰度值是法向量为 $Z$ 的面片的灰度值。而区域法向量也为 $Z$ ,那么就可以用区域内出现概率最大的灰度值来表示这个区域的灰度值。

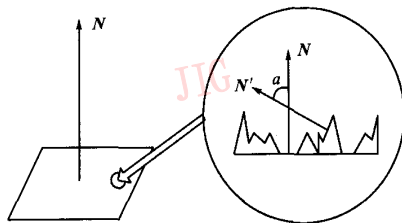


图3 粗糙的物体表面

图4~图7分别对图版I的图1~图4建筑物表面灰度值出现次数进行了统计,这里所使用的灰

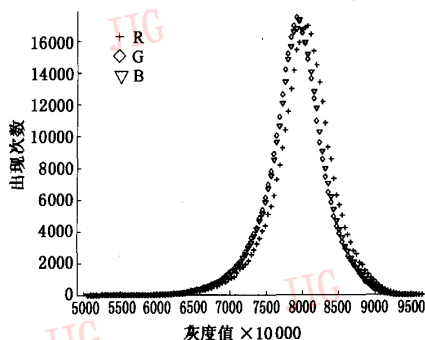


图 4 图版 I 图 1 中 R、G、B 分量分布的统计

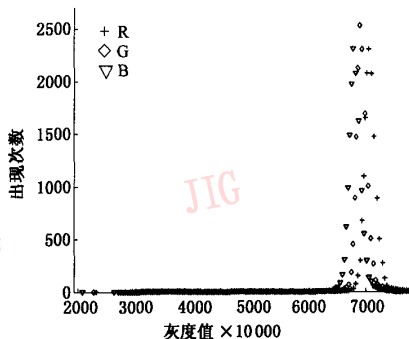


图 5 图版 I 图 2 中 R、G、B 分量分布的统计

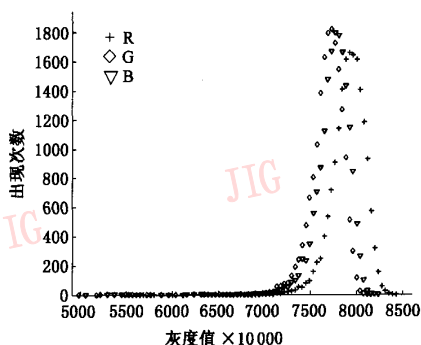


图 6 图版 I 图 3 中 R、G、B 分量分布的统计

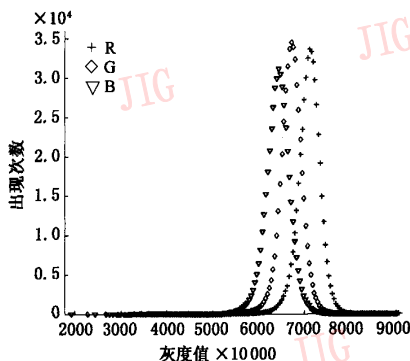


图 7 图版 I 图 4 中 R、G、B 分量分布的统计

度值是图像中 R、G、B 3 个分量分别与 256 相除的值。在每幅建筑物图像中用红色框包围了建筑物表面的区域,建筑物图像的标注中显示了选定区域内的像素数目。

图版 I 图 2 中建筑表面相对其他而言更为光滑,因此它的 R、G、B 分量分布的  $\sigma$  是比较小的,这也符合日常的生活经验。

### 3.4 不同反射比的区域

在建筑物表面有可能存在具有不同材质和颜色的区域,这样它们的反射比  $\rho(\lambda)$  是不一致的。假设建筑表面具有相同的反照率,这样就不能直接使用式(10)来计算方位角度。为此,采用文献[2]中对反照率进行标准化的方法。

设物体表面两块邻近的不同材质和颜色的区域  $C_i$  和  $C_j$ ,如果物体表面在这两块区域之间连续可微,那么可以认为在接近边界的地方  $C_i$  和  $C_j$  相邻区域的法向量相同(设为  $N_0$ ),并且接受到相同的辐照度。根据式(6)可得:

$$\begin{cases} E_i^{(i)}(\lambda) = k \cdot \rho_i(\lambda) \cdot \frac{E_0(\lambda)}{\pi} \cdot \cos\langle N_0, S \rangle \\ E_i^{(j)}(\lambda) = k \cdot \rho_j(\lambda) \cdot \frac{E_0(\lambda)}{\pi} \cdot \cos\langle N_0, S \rangle \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\rho_i(\lambda)$  和  $\rho_j(\lambda)$  分别表示区域  $C_i$  和  $C_j$  上物体表面的反照率。将式(11)的上式与下式相除得到区域  $C_i$  和  $C_j$  反照率比例为

$$R_{i,j}(\lambda) = \frac{\rho_i(\lambda)}{\rho_j(\lambda)} = \frac{E_i^{(i)}(\lambda)}{E_i^{(j)}(\lambda)} \quad (12)$$

如果采用的是两个具有不同材质和颜色的区域进行方位角的计算,设其中一个区域的灰度值为  $E_1^{(m)}(\lambda)$ ,另一个为  $E_1^{(n)}(\lambda)$ ,则式(9)可以写成:

$$\tan(\theta) = \frac{E_1^{(m)}(\lambda)}{\frac{E_1^{(n)}(\lambda)}{\rho_n(\lambda)}} = \frac{E_1^{(m)}(\lambda)}{E_1^{(n)}(\lambda)} R_{n,m}(\lambda) \quad (13)$$

在一个连续的物体表面上,可以通过式(12)得到任意两个区域之间的反照率比例。首先将物体表面划分成多个具有不同材质或颜色的区域  $C_1, C_2, \dots, C_n$ ,然后在每两个相邻区域中计算它们的反照率比例,如果将  $C_1, C_2, \dots, C_n$  抽象成点,那么它们就构成了一个连通图。选取某个区域  $C_i$  的反照率为基准,其他任意一个区域  $C_j$  都存在一条通路达到  $C_i$ ,则通过反照率比例的传递关系不难得到  $C_j$  与  $C_i$  之间的反照率比例。

在应用中计算比例值时,对每个颜色分量进行

计算,分别得到此分量上的反照率比例,可以通过表来存储这些值。在计算方位角时,对于某个平面,在选择区域内部按照不同材质和颜色划分成若干子区域(一定落于 $C_1, C_2, \dots, C_m$ 中),选取区域 $C_i (1 \leq i \leq m)$ 的反照率作为基准,可以得到这些子区域所在区域与区域 $C_i$ 的反照率比例,从而这些子区域的反照率可以用 $C_i$ 的反照率来表示。在计算方位角时,分别选取了相互垂直的表面上的区域。建筑物不同的表面上一般存在具有相同材质和颜色的区域,选取这个区域内的反照率为基准反照率。从而可以通过这个区域将两个表面上选择区域内不同的反照率联系起来,将所有区域的反照率用基准反照率表示。

#### 4 实验结果和讨论

在实验中,利用垂直于水平面的线段在水平地面的投影来实地测量太阳光的方位角度。实验结果中分别列出了实际测量的角度和通过程序计算出的角度。在建筑物表面多次选取不同区域进行计算,首先针对某一个建筑物在一天中不同的时刻进行了实验。表1列出了对图8进行实验的结果。

表1 图8的实验结果

	时间					
	9:05	9:55	10:35	11:30	13:30	14:40
方位角 测量值	73.00	63.07	50.13	12.57	29.46	12.73
	72.66	64.35	49.65	14.68	29.62	11.96
	69.42	62.32	50.12	12.19	22.38	9.74
方位角 计算值	70.70	63.10	51.13	13.60	25.22	10.48
	71.47	64.35	52.51	14.92	26.21	11.46
	72.91	65.81	54.54	15.13	28.92	12.25
	73.66	66.71	55.83	15.90	29.96	13.79

然后对几个比较高的建筑物进行了实验。表2列出了对图9进行实验的结果。

表2 图9的实验结果

	时间					
	8:50	10:45	15:05			
方位角 测量值	77.18	77.90	49.66	51.39	15.42	16.73
	75.47	77.81	48.78	49.23	12.97	13.78
方位角 计算值	78.15	79.18	50.44	51.78	14.03	14.69

通过实验可以看到,对于一般的建筑物而言,利用介绍的方法计算出的结果可以比较准确地逼近太阳光方位角的实际值,并且计算结果也相对稳定。



图8 一天中不同时刻拍摄的建筑物图像



图9 高大建筑物的图像

随着建筑装潢业的发展,在建筑物表面可能会涂有各种色彩的涂料,而且这些涂料对光的反射特性也各不相同。虽然这个问题已得到解决,然而,有些建筑物表面的涂料对光进行漫反射的同时也具有比较明显的镜面反射效果。当视点、太阳光方向和物体表面某些小面片的法向量构成镜面反射时,就可以观察到墙壁上某些部分具有明显的镜面反射。在本文提出的方法中并没有考虑到镜面反射的影响,分析这些表面的镜面反射将会增加本文方法适用的场合,并取得更稳定的结果,但这样可能需要利用从多个角度拍摄的图片,这也是今后进一步的研究方向。

#### 参考文献

- Shigeru Chiba, Kazunori Sato. Technology for creating a 3-dimensional scene from a 2-dimensional picture[A]. In: Japan Korea Computer Graphics Conference 2002 (JKCGC2002)[C], Kanazawa, Japan, 2002:175~181.
- Sato Y, Ikeuchi K. Reflectance analysis under solar illumination [R]. TR:CMU-CS-94-221, Carnegie Mellon University, 1994.
- Lee C, Breneman E J, Schlute C P. Modeling light reflection for computer color vision [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(4):402~409.
- Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from Photographs [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'97[C], Los Angeles, USA, 1997:369~379.
- Oren M, Nayar S K. Generalization of the lambertian model and implications for machine vision [J]. International Journal of Computer Vision, 1995, 14(3):227~251.



**曹 晶** 1979 年生。2000 年获得南京大学计算机科学与技术系学士学位。现为南京大学计算机系计算机应用专业硕士研究生。主要研究方向为计算机视觉和虚拟现实技术。

E-mail:a19886@motorola.com



**潘金贵** 1952 年生。教授、博士生导师。主要研究方向为多媒体信息处理技及应用。发表论文 130 余篇,出版著(译)作 10 余本。



**曹迎春** 1980 年生。2001 年获得南京大学计算机科学与技术系学士学位,现为南京大学计算机系软件与理论专业硕士研究生。主要研究方向为多媒体技术应用和分布式系统。

---

## 第二届中国(上海)国际多媒体技术与应用 展览会暨学术研讨会

由国际多媒体协会联盟、中国自然科学博物馆协会、中国图象图形学学会、上海市科委、上海市教委、上海世博集团等共同支持,上海市多媒体行业协会和上海科技会展有限公司共同主办的“第二届中国(上海)国际多媒体技术与应用展览会暨学术研讨会”将于 2005 年 9 月 26~28 日在上海世贸商城举行,展览范围:(1)多媒体展览展示;(2)多媒体技术;(3)多媒体数字内容;(4)多媒体网络。

咨询电话:021-52895151-135 021-62801503 62942980

展会网站:<http://www.multimediashanghai.com>

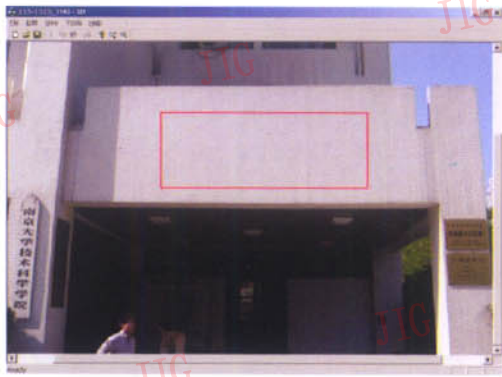


图1 南京大学计算机系正门(343×945)

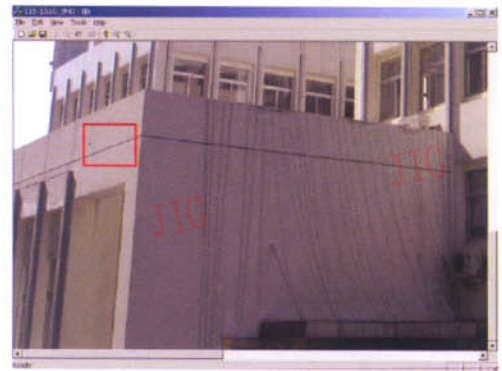


图2 南京大学田家炳楼一角(100×104)



图3 南京大学新教学楼(61×106)



图4 水泥路面(529×879)

夏学齐等：高光谱遥感图像的单体分析

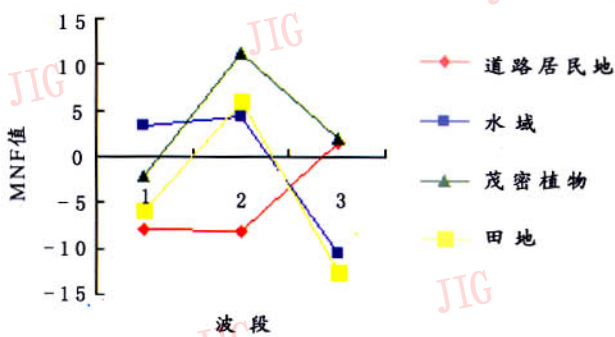


图1 导出的终端单元在MNF前3个波段的波谱

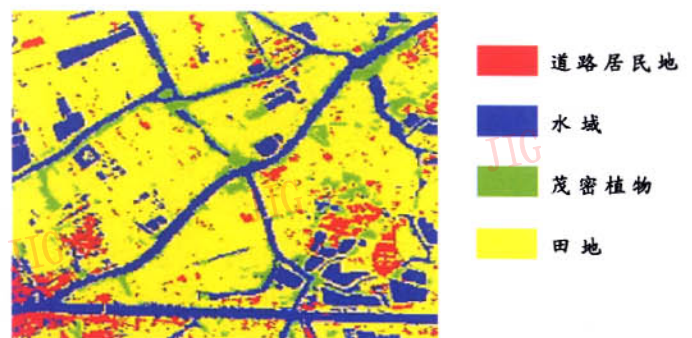


图2 波谱角度制图的结果