

# 利用小波进行多尺度地形生成方法的研究

张继贤 林宗坚

(中国测绘科学研究院, 北京 100039)

柳健 张钧 黄宸

(华中理工大学图象识别与人工智能研究所, 武汉 430074)

**摘要** 针对随机中点位移法难以生成符合 fBm 特征的三维地形之缺点, 本文把地形看成层次性随机统计过程, 提出了利用小波进行多尺度地形生成的新方法, 首先利用扩展的随机-相关法按给定的地形参数(均值、地形高程标准差、地形相关长度、地形粗糙度等)形成一定数量用来表示地形骨架的地形特征点, 然后与通过小波机制产生的多尺度地形局部细节信号相综合, 通过小波多尺度合成获得符合要求的具有任意细节水平的“真实”的三维地形。试验证明这一方法切实可行, 可作为随机中点位移法的改进。

**关键词** 地形, 生成, 小波, 地形骨架

## 1 引言

给定一定地形特征点或地形参数(例如平均高程、最大高程及其位置、最小高程及其位置、地形高程标准差、相关长度、地形粗糙度等)的条件下, 如何通过地形生成与仿真技术形成符合要求的“真实”地形, 现有的方法还没有解决。分数布朗运动(fBm)<sup>[1,2]</sup>为我们提供了一个可以很好描述一般地面形状的数学模型。在利用 fBm 模型生成地形时, 最常用的是随机中点位移法, 具有快速、自适应、递归细分的优点。然而, 这种方法仅在自相似参数下是精确的, 当时, 这种方法仅能提供一个近似的 fBm, 其产生的增量并不是一个静态过程。

作为对随机中点位移法的改进, Flandrin<sup>[3]</sup>, Stoksik<sup>[4]</sup>曾提出利用具有合适方差值的高斯随机变量作为输入信号, 通过小波合成 fBm 的方法。这一方法在用于地形的生成时, 存在如下缺点: 其一, 完全依靠输入的高斯随机变量(高斯噪声)进行合成, 没有充分顾及应当考虑的地形相关性等特征, 生成的地形具有不可控性; 其二, 如果选用小波的消失矩为  $R$ , 则至少要求有不小于  $2R \times 2R$  大小的初始数据点, 使算法复杂化, 而且对初始点的选取仍采用高斯随机变量。本文把地形看成是一个层次性的随机统计过程<sup>[5]</sup>, 提出了利用小波进行多尺度地形生成的

新方法, 首先形成一定数量的地形特征点, 然后与小波机制生成的多尺度地形局部细节信号相综合, 通过小波多尺度合成获得符合要求的具有任意细节水平的三维地形。

## 2 方法概述

图1为本文提出的小波多尺度地形生成方法与流程。由于地形表面的复杂性, 本文将地形应看作一个层次性的过程, 包括地形的控制性骨架过程和地形的局部细节两个过程。前者可通过一定数量的地形特征点或地形特征参数表示, 后者需通过大量的地形数据点实现。据此, 小波多尺度地形生成由3个过程来实现: 初始条件的确定、地形整体骨架的形成和地形局部细节的逐层产生。

初始条件的确定按照可能的已知条件分为两种情况: 给定一定数量的地形特征点或地形特征参数。在上述两种情况下, 一定数量的地形特征点已决定了地形的大致结构, 给出了地形的初始骨架, 可作为最初的地形近似信号供小波多尺度地形合成利用。对于一定数量随机分布的地形特征点, 需利用地形模型拟合为规则分布的地形特征点<sup>[5]</sup>。给定一定的地形特征参数是地形生成较常用状况, 这一生成过程需要首先按给定地形参数形成地形的初始骨架表示, 然后通过小波多尺度合成方法获得符合地形

细节水平的三维地形。所选用的地形特征参数包括有地形平均高程、最大高程及其位置、最小高程及其位置、地形高程的标准差、地形相关长度、地形粗糙度等,它们代表了一个地形的一般概况。地形粗糙度  $Q$  直接与 fBm 的自相似系数  $H$  或分形维数  $D$  相联系 ( $Q=2H=2(3-D)$ )。

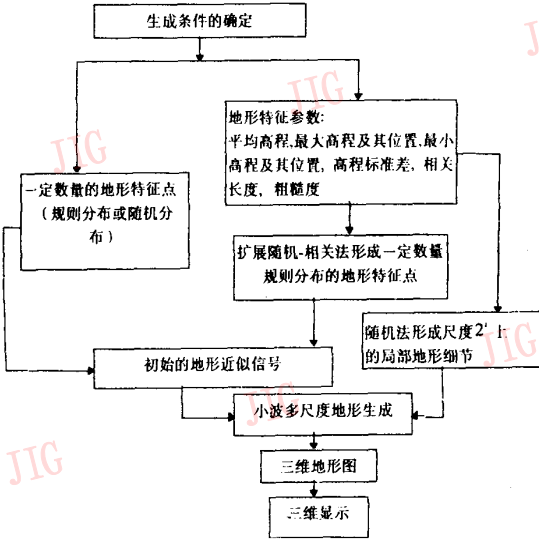


图1 小波多尺度地形生成方法框图

地形骨架的形成决定了地形的初始整体结构和特征,是地形生成过程中的控制环节所在,代表了地形的初始近似信号。其目的是在满足给定地形参数的条件下,自动形成一定数量的用于表示整体结构的地形特征点,利用本文发展的扩展随机-相关法实现之。地形局部细节的逐层形成决定了不同尺度水平上地形的局部结构和形状,在地形近似信号的基础上逐层产生,是地形生成过程中的一个关键环节,利用发展的小波多尺度地形生成方法实现。

### 3 扩展随机-相关法进行初始地形近似信号的产生

本文发展的扩展的随机-相关法是对已提出的随机-相关法的推广<sup>[6]</sup>。

如图2所示,设高程数字矩阵为  $\{H_{i,j}\}$ ,  $H_{i,j}$  与  $H_{i-1,j-1}, H_{i-1,j}, H_{i,j-1}$  满足关系

$$H_{i,j} = A_1 H_{i-1,j} + A_2 H_{i,j-1} + A_3 H_{i-1,j-1} + A_4 R_{i,j} \quad (1)$$

取  $E(H_{i,j})=0=E(R_{i,j})$  ( $E(H_{i,j})=m_H$  的情形可化为均值为零的情形)。

$$E(H_{i,j}^2) = \sigma_H^2, E(R_{i,j}^2) = \sigma_N^2,$$

$$E(H_{i,j}H_{i-1,j}) = E(H_{i,j}H_{i,j-1}) = \rho\sigma_H^2$$

$$E(H_{i,j}H_{i-1,j-1}) = \rho_1\sigma_H^2,$$

$$E(H_{i,j}H_{i,l}) = \rho^{\sqrt{(i-j)^2+(i-l)^2}}\sigma_H^2, SNR = \sigma_H/\sigma_N$$

由式(1)得:

$$E(H_{i,j}^2) = A_1\rho\sigma_H^2 + A_2\rho\sigma_H^2 + A_3\rho_1\sigma_H^2 + A_4^2\sigma_N^2$$

亦即  $SNR^2 = (A_1\rho + A_2\rho + A_3\rho_1)SNR^2 + A_4^2$  (2)

又由式(1)有:

$$E(H_{i,j}H_{i-1,j}) = A_1E(H_{i-1,j}^2) + A_2E(H_{i,j-1}H_{i-1,j}) + A_3E(H_{i-1,j-1}H_{i-1,j}) + A_4E(R_{i,j}H_{i-1,j})$$

$$E(H_{i,j}H_{i,j-1}) = A_1E(H_{i-1,j}H_{i,j-1}) + A_2E(H_{i,j-1}^2) + A_3E(H_{i-1,j}H_{i,j-1}) + A_4E(R_{i,j}H_{i,j-1})$$

$$E(H_{i,j}H_{i-1,j-1}) = A_1E(H_{i-1,j}H_{i-1,j-1}) + A_2E(H_{i,j-1}H_{i-1,j-1}) + A_3E(H_{i-1,j-1}^2) + A_4E(R_{i,j}H_{i-1,j-1})$$

得:  $A_1 = A_2 = \frac{\rho(1-\rho_1)}{1+\rho_1-2\rho^2}$  (3)

$$A_3 = (\rho_1 + \rho_1^2 - 2\rho^2)/(1 + \rho_1 - 2\rho^2)$$
 (4)

代入式(1)得

$$A_4 = \sqrt{\frac{(1-\rho_1)(1+\rho_1+\rho_1^2-2\rho^2)}{1+\rho_1-2\rho^2}} \times SNR$$
 (5)

若设  $\{H_{i,j}\}$  的协方差  $G_H(s) = \sigma_H^2 e^{-\frac{|s|}{\tau}}$ , 则

$$\rho = e^{-\frac{1}{\tau}}, \rho_1 = e^{-\frac{\sqrt{2}}{\tau}} (\tau \text{ 为相关长度})$$

利用式(1)~(5)即可获得一定数量规则分布的地形特征点。

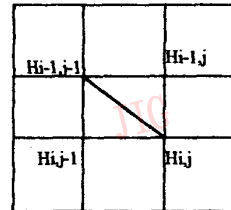


图2 一定数量规则分布二维数字矩阵的产生

### 4 小波多尺度地形生成

地形表面作为 fBm 过程,根据小波信号合成机制,利用小波分解结果可精确恢复(重建)出原有信号(如地形表面),这就意味着,如果我们能够知道小波分解系数的统计特性并能够容易地逼近它们,那么当把与小波分解系数具有相同的统计特征的信号作为输入信号,利用重建机制可进行信号合成。从这一观点上说,小波提供了地形生成的新途径,并能对现有生成方法提供新的解释和改进途径,例如,随机中点位移法可利用小波合成机制进行解释<sup>[3]</sup>。Flan-

drin(1992)已经证明:

(1) 同一尺度  $2^j$  上小波分解的细节信号序列  $d_j(i)$  和  $d_j(k)$  是自相似的和静态的,其协方差仅是增量  $(k-i)$  的函数。

(2) 对应于同一时间(空间位置)  $k=2^{j-1}l$ , 细节信号的尺度序列  $d_j(l)$  和  $d_j(k)$  是一个静态过程,其协方差仅是增量  $(j-i)$  的函数。

这样,利用小波方法合成 fBm,其非静态性仅表现在近似信号上而不表现在细节信号上,从而为地形生成带来了方便,这也正是小波多尺度地形合成的优越所在。

#### 4.1 小波多尺度地形合成方法

按照前述小波多尺度地形合成机制以及利用细节与近似信号通过小波合成公式进行原信号重建方法,在获得地形的近似信号和不同方向细节信号后,本文提出的小波多尺度地形合成采用重建公式(6):

$$f(x, y) = \sum_j \sum_m \sum_n \sum_{l=0}^3 [a_j(m, n) \phi_{j, m, n}(x, y) + d_j^l(m, n) \Psi_{j, m, n}^l(x, y)] \quad (6)$$

这是在获得尺度  $2^j$  上的地形细节和地形近似后对尺度  $2^{j-1}$  上地形表面的合成公式。其中  $j \in Z$ ,  $m \in Z$ ,  $l \in Z$ ,  $\{d_j^l(m, n)\}$  为生成的尺度为  $2^j$  方向为  $l$  上的相应于小波  $\Psi_{j, m, n}^l(x, y)$  的细节信号,  $\{a_j(m, n)\}$  为尺度  $2^j$  上的近似信号,  $\phi_{j, m, n}(x, y)$  为尺度函数,  $l=1, 2, 3$  分别代表  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  3 个方向,并有:

$$\phi_{j, m, n}(x, y) = 2^{-j} \phi(2^{-j}x - m, 2^{-j}y - n)$$

$$\Psi_{j, m, n}^l(x, y) = 2^{-j} \Psi^l(2^{-j}x - m, 2^{-j}y - n)$$

利用 Mallat 多分辨率计算方法<sup>[7,8]</sup>,式(6)可转化为多分辨率的递归计算:

$$a_j(m, n) = \sum_m \sum_n \sum_l [a_{j+1}(m', n') h(2m' - m, 2n' - n) + d_{j+1}^l(m', n') g^l(2m' - m, 2n' - n)] \quad (7)$$

其中  $h(m, n)$ ,  $g^l(m, n)$  分别是与尺度函数和小波函数相关的合成滤波器。

当通过扩展的随机一相关法获得地形骨架作为初始的地形近似信号后,选取合适的小波函数构成滤波器,按照小波系数的统计特征生成各尺度细节信号,利用式(7)生成相应尺度的地形,将生成的地形作为新的地形近似信号,重复上述过程直到满足要求的地形细节为止。这是一个多尺度的地形生成环节。

#### 4.2 地形细节的产生

上述小波多尺度地形生成过程中,获得满足要求的各尺度细节信号  $\{d_j^l(m, n), l=1, 2, 3\}$  是一个关键性的环节。如果细节信号之间不相关(亦即其协方差为零)或其相关性可忽略,那么只要能够产生具有正确方差的系数阵列,即可合成满足 fBm 的地形表面。具体实现时,采用随机点生成技术产生  $\{d_j^l(m, n)\}$  间具有合适方差的高斯随机变量,由高斯随机变量组成细节影像,利用式(11)递归形成地形表面,这里,确定构成细节影像的随机变量的方差是非常重要的。

对于 fBm,其小波分解系数的方差满足<sup>[3,4]</sup>:

$$\text{Var}(d_j(m, n)) = \frac{\sigma^2}{2} V_\Psi(H) (2^j)^{2H+2} \quad (8)$$

其中  $V_\Psi(H)$  是一个与小波有关的自相似系数  $H$  的函数。上式表明,随着分辨率的提高,小波系数的方差按  $2^{2H+2}$  减小。因此,地形生成中每一尺度  $j$  上的细节系数  $\{d_j^l(m, n)\}$  可通过其方差正比于  $2^{j(2H+2)}$  的高斯独立随机变量产生:

$$\text{Var}(d_j^l(m, n)) = \sigma^2 (2^j)^{2H+2} \propto (2^j)^{2H+2}$$

对这些细节影像的逆小波变换产生所需地形。

个别情况下,当小波系数间的相关不可忽略或已知时,可采用 Lewis<sup>[9]</sup> 或 Stoksik<sup>[4]</sup> 修改的随机中点位移法产生细节信号。

#### 4.3 小波函数的选取

Tewfik 和 Kim 已经证明, fBm 离散小波系数的自相关和互相关函数比 fBm 本身的自相关和互相关函数的衰减快得多,而且这一衰减决定于小波消失矩的大小。随着消失矩的增大,高阶小波系数之间的相关性按双曲型下降。一般说来,小波系数间的相关按照位置增量或时间增量(同一尺度)和尺度增量(不同尺度)快速衰减,以  $H=1/2$  的 Harr 基为例,其小波系数间具有零相关,这也正是我们能够在地形合成中忽略细节信号间相关性的原因。

就一维状况为例,取小波的消失矩为  $N$ ,则小波系数间的相关为:

$$E[d_j(i) d_k(l)] = O(|l - i|^{2(H-N)})$$

因此,选择的小波消失矩越大,则系数间的不相关越强。这样,选择具有较大消失矩的小波将有利于合成更精确的地形,尽管本文的方法并未对小波有这一特别要求。

## 5 试验与分析

利用本文发展的小波多尺度地形生成算法可以产生各种各样符合 fBm 特性的地形,为了说明小波分解系数间可忽略的程度,在本文的试验中,选取 Harr 基作为基本小波。图 3~6 给出了部分试验结果,其中图 3 为按表 1 给定的地形参数采用本文发展的扩展随机-相关生成技术生成的大小为  $16 \times 16$  个像素的基本地形骨架,作为尺度  $2^0$  上的地形近似;图 4 为对图 3 在尺度  $2^{-1}$  上进行小波地形合成的结果;图 5 为在尺度  $2^{-2}$  上进行小波合成时的近似和细节信号,从左到右,从上到下分别代表近似、水平方向细节、垂直方向细节和对角线方向细节信号;图 6 为在尺度  $2^{-2}$  上合成的地形,地形大小  $64 \times 64$  像素。表 1 给出了生成条件以及对生成地形图 4、图 6 进行统计分析得出的统计参数列表,比较可以看出,生成地形(图 6)的统计参数与给定参数具有相当好的吻合,证明小波多尺度地形生成方法是合理可行的。

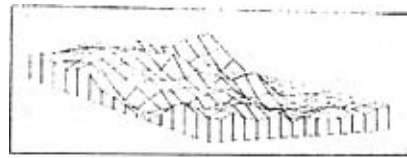


图 3 扩展随机-相关生成的地形骨架

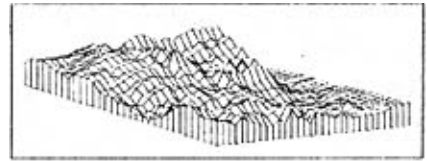


图 4 尺度  $2^{-1}$  上的合成地形

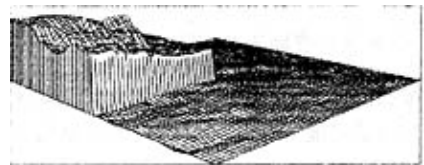


图 5 尺度上进行地形合成时的近似与细节信号

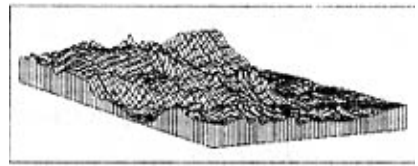


图 6 尺度上合成的地形

表 1 地形生成条件及生成的 3D 地形统计分析得出的参数值

	均值(m)	方差 ( $m^2$ )	最大高程 (m)及位置	最小高程 (m)及位置	相关长度 (格网)	粗糙度 (分数维)
初始条件	591.0	13 310.7	932.0 $x=3 \ y=3$	421 $x=12 \ y=11$	6.5	2.23
图 3	611.7	13 718.8	932.0 $x=3 \ y=3$	421 $x=12 \ y=11$	6.2	2.23
图 4	611.7	13 821.6	975.3 $x=6 \ y=7$	419.8 $x=22 \ y=23$	13.6	2.31
图 6	608.4	12 100.2	940.4 $x=12 \ y=12$	395.2 $x=44 \ y=47$	28.2	2.33

为了将本文的方法通过实际地形数据加以验证,选用一幅大小为  $128 \times 32$  个像素,地形分辨率为 200m 的真实地形数据,按下述 2 种方法进行试验:(1)对原始地形进行二次小波分解,利用分解的近似信号作为骨架,通过小波多尺度方法进行 2 次地形合成;(2)利用原始地形分析得出的统计参数,采用

扩展-随机相关法产生大小为  $32 \times 8$  的地形骨架作为初始近似,利用小波多尺度方法进行两次地形合成。表 2 为原始地形统计参数以及对生成地形进行统计分析得出的统计参数列表,可以看出,生成地形与原始地形的统计参数基本吻合,证明本文的方法能较好反映地形的真实过程。

表 2 原始地形及其生成地形统计参数

	均值(m)	方差(m <sup>2</sup> )	最大高程(m)及位置	最小高程(m)及位置	相关长度(格网)	粗糙度(分数维)
原始地形	342.0	3 191.6	693 $x=4 y=4$	258 $x=87 y=29$	28.4	2.45
原始地形近似 信号合成地形	342.0	3 087.7	684.6 $x=4 y=4$	262.2 $x=90 y=27$	28.8	2.45
原始地形统计 参数合成地形	342.6	2 960.2	677.3 $x=6 y=6$	252.2 $x=104 y=24$	31.0	2.54

参考文献

- 1 Barnsleg M et al. The Science of Fractal Images. H. Peitgen et al Eds, Springer-Verlag, 1990.
- 2 Mandelbrot B B, Ness J W V. Fractional Brownian Motion, Fractional Noises and Applications. SIAM Review, October 1968, 10 (4):422~437.
- 3 Flandrin P. Wavelet Analysis and Synthesis of Fractional Brownian Motion. IEEE Trans. on Information Theory, 1992,38(2):910~917.
- 4 Stoksik M A, Lane R G, Nguyen D T. Practical Synthesis of Accurate Fractal Images. Graphical Models and Image Processing. 1995,57(3):206~219.
- 5 张继贤,柳健,李德仁.地形生成技术与方法的研究.中国图象图形学报,1997,2(8,9).
- 6 Cannon M W, Carl J W. TERCOM Performance: Analysis and Simulation. AMRL TR-7-130(AD783804),1974.
- 7 Mallat S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. IEEE Trans. on PAMI, 1989, 11 (2): 674~692.
- 8 Mallat S G. Multifrequency Channel Decompositions of Images and

- Wavelet Models. IEEE Trans. on ASSP, 1989, 37(2):2091~2110.
- 9 Lewis J. Generalized Stochastic Subdivision. ACM Trans. on Graphics,1987,6(3):167~190.
- 10 Stollnitz E J, Derose T D, Salesin D H. Wavelets for Computer Graphics:A Primer,part1. IEEE Computer Graphics and Applications,1995,15(3):76~84.

**张继贤** 1965年生,毕业于武汉测绘科技大学摄影测量与遥感系,并于1994年获得博士学位。1995年2月至1997年4月在华中理工大学图象识别与人工智能研究所从事博士后研究工作。现为中国测绘科学研究院研究员,主要从事摄影测量与遥感、图象信息处理、地理数据处理与可视化、地图模式识别等方面的研究工作,已发表论文30余篇。



**林宗坚** 中国测绘科学研究院院长,教授,博士生导师。主要研究领域为摄影测量与遥感、图象图形学和3S集成。

**柳健** 华中理工大学教授,博士生导师。主要研究领域为图象处理,模式识别和计算机视觉。

A Wavelet Based Multiscale Synthesis Approach to Terrain Simulation

Zhang Jixian, Lin Zongjian

(Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039)

Liu Jian, Zhang Jun, Huang Chen

(Inst. for Pattern Recognition & AI, Huazhong Univ. of sci. and Tech, Wuhan 430074)

**Abstract** As an improvement and replacement of random midpoint displacement method for fBm process generation, a wavelet based multiscale synthesis approach to terrain simulation is proposed in this paper. This new method regards real terrain as a hierarchical and stochastic process, a generalized stochastic-relative method is presented to generate enough structural point according

to given topographic parameters such as average height, standard deviation, terrain relative length and terrain coarseness etc. for the representation of terrain sketch. Random variables with an appropriate variance proportional to are generated to get terrain details at each scale  $j$ . Then an iterative wavelet synthesis on these details and sketch points results in the simulated realistic 3D terrain with any fineness. Experimental results show it's effectively and reliable of this method.

**Keywords** Terrain, Simulation, Wavelet, Terrain sketch

## Adobe Photoshop 5.0 简体中文版面世

Adobe Photoshop 5.0 简体中文版于 10 月 14 日在中国推出,新版本增添多种新功能,让用户可以尽情发挥创意。Photoshop 由 Adobe Systems Inc. 发行,是全球销量第一的专业影像软件。

Photoshop 5.0 简体中文版充分考虑了各国用户及中国用户意见,加入了许多新功能,主要的包括“历史记录”(History Palette)、“可编辑文字层”(Editable Text Layers)、“专色版”(Spot-color channels)及“色彩管理”(Color Management)等,令用户可以专注创作,无需分心顾及技术问题。新软件是 Adobe 公司对中国用户一贯承诺的又一具体体现。

Adobe 公司北京办事处的产品专员朱建华先生表示:“中国用户的意见是形成 Photoshop 5.0 版的重要依据,从色彩修改到相片组合、从打印制作到网页设计,Photoshop 5.0 版都增加了出色的功能。”Adobe 公司北京办事处代表雷大卫(David Lehr)先生也就此补充:“Adobe Photoshop 小组的资深组员曾来华与中国用户进行讨论,以确保新版本能满足中国用户的需要。”

“历史记录”能满足 Adobe 用户的最大要求:可以一按鼠标便回到多步以前的模样。“历史记录”可以追踪用户所作的每步改变,甚至回到数小时前的工作,令设计人员可以更放心、自由的做各种尝试。Photoshop 5.0 软件加入了全新的“历史画笔”(History Brush),让用户可以在制作一个图像时,把过程中的不同版本结合起来,变成专有的设计。

另一项非常实用的新功能,是“磁力选择工具”(Magnetic Selection Tools)。有了“磁力绳套”(Magnetic Lasso),即使最复杂的图像,也可以很容易地把轮廓勾画好。此外,Photoshop 5.0 里的“分层效果”一定会受到网络及打印设计师的喜爱,因为这个功能简化了以往非常费时的一些特别效果的制作,例如阴影、光影及斜面等。现在,只要在某一层上按几下鼠标,便能达到这些效果,而且会跟随原图象的变动而自动更新。

“色彩管理”是令许多专业设计师头痛的问题,因为不同硬件所提供的颜色往往有所出入,令制成品的效果不一致。Photoshop 5.0 色彩管理引擎全面支持业界标准〈国际色彩协议〉(International Colour Consortium; 简称 ICC 为一标准器件简表,可为不同器件调制色彩提供通用的色彩基调),用户可以选择最合适的色彩管理流程,甚至综合几个不同取向,令输入输出颜色更加一致。

〈可编辑字体〉(Editable Type)功能设有一〈文字格式设定〉(Character Level Formatting)选项,让 Adobe 用户更准确控制编辑过程,用户可以完全控制文字直向或横向、混合多种字样、混合多种字型大小、间距、基线及字距。而最令人高兴的,是新〈文字工具〉(Type Tools)可以创制特别的字体层,不但保留所订格式特征,并可以随时进行修改。

总之,新版 Photoshop 在各方面均有所提升,是广大中国用户必不可缺的图像编辑制作工具,进一步显示其业界的领导地位。正如常州华文印制新科技有限公司总经理黄克俭所说:“Photoshop 是我们必备的工具,假如不用 Photoshop,可以说根本不可能有效制作图像。Photoshop 5.0 版我们已用了一段时间,觉得很稳定,升级计划也很完善。”

Photoshop 5.0 简体中文版定价人民币 8,500 元。目前,Adobe 公司在中国的代理商有:金豪(北京)电子系统公司、佳都国际(集团)有限公司、新龙光大电脑有限公司、远望泛讯有限公司、自动系统(中国)有限公司。