

一种新的祛除彩色图像色彩分量相关性的方法 及其编码方案

柴玉梅^{1,2)} 王洁²⁾ 焉德军¹⁾ 刘向东^{1,2)}

¹⁾(大连民族学院非线性信息处理研究中心, 大连 116600) ²⁾(鞍山科技大学计算机科学与工程学院, 鞍山 114002)

摘要 为了能够较好地祛除彩色图像色彩分量的相关性,并能获得较好的恢复图像,基于图像色彩信息矩阵,提出了一种新的祛除彩色图像色彩分量相关性的方法,并利用该方法在新的色彩空间,针对新分量的不同性质对图像进行了量化编码。与 KLT 色彩空间类似,新色彩空间也充分利用了图像本身原始色彩分量的相关性,但却基于与 KLT 色彩空间变换不同的最优标准。通过对新色彩空间编码性能进行的实验分析结果表明,该方法较好地祛除了彩色图像色彩分量的相关性,且算法实现简单,具有较好的信噪比、压缩比,不仅恢复图像视觉效果良好,并且易于与其他的压缩、编码方法结合使用。

关键词 色彩分量相关性 色彩信息矩阵 特征方向

中图法分类号: TN919.8 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2004)05-0620-06

A New Approach to Decorrelating Color Components of Color Images and Corresponding Coder

CHAI Yu-mei^{1,2)}, WANG Jie²⁾, YAN De-jun¹⁾, LIU Xiang-dong^{1,2)}

¹⁾(The Research Institute of Nonlinear Information Technology, Dalian Nationalities University, Dalian 116600)

²⁾(School of Information Science & Engineering, Anshan Science and Technology University, Anshan 114002)

Abstract In order to dispel the correlation between color components of color images more efficiently and get the better color images compression results, in this paper, a new approach to decorrelate color components of color images is presented based on the color information matrix. A quantization and encoding scheme is provided in the new color space according to the characters of the new color components respectively. Similar to the KLT color space, the new color space is also data dependent which can take full advantage of the inherent correlation between color components of original images. It differs, however, from the KLT color space in the optimal standards. The KLT color space is optimal when the original color components of images have been centralized, while the new color space is optimal when the original color components of images have not been centralized. Many experiments are carried out to analyze the encoding performance in the new color space. The results show that the new approach can get rid of the correlation between color components of color images efficiently and is easily implemented. It also boasts of better signal to noise ratio and higher compression rates. The reconstructed image is visual comfort and the coder is easily combined with other compression and encoding methods.

Keywords image processing, correlation between color components, color information matrix, eigenvector

1 引言

随着信息网络化的发展,数字彩色图像作为最重要的信息之一被愈来愈广泛地使用,因而对彩色

图像的编码研究倍受人们的关注。有关彩色图像压缩编码的研究,很多都是基于对彩色图像的红(R)、绿(G)、蓝(B)3个分量来进行独立编码,这样不仅容易带来颜色的丢失和错乱,而且由于没有进一步挖掘彩色图像色彩分量之间的深层关系,从而导致

基金项目:国家自然科学基金项目(69974008);辽宁省自然科学基金项目(2001102099)

收稿日期:2003-06-10;改回日期:2003-12-19

其压缩比不高^[1]。实际上,大多数真彩色图像在RGB色彩空间中的3个分量之间存在着密切的相关性,这是由于色彩分量来源于同一物理模型,从而决定了图像不仅相邻像素存在相似性,而且每个像素的色彩分量之间也存在密切的相关性^[1,2],也就是说,彩色图像中包含了大量的色彩冗余信息。如果能减少或祛除这种相关性,则可大大节省真彩色图像的存储空间。祛除彩色图像在RGB色彩空间中的色彩分量相关性主要是通过色彩空间变换来将高度相关的RGB色彩空间变换到新的相关性不强的色彩空间。常用的色彩空间有用于图像通信的YUV色彩空间和基于正交变换的KLT色彩空间^[3~5]。其中,YUV色彩空间是用亮度分量Y和两个与色相及饱和度有关的分量U、V来表示每个像素的色彩,两个色彩空间变换关系为

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

其中,Y是主要分量,其在编码中比U、V分量重要。JPEG采用的就是YUV色彩空间^[6],但由于YUV色彩空间没有充分利用每个色彩图像的具体特点,因此其各分量间仍存在较强的相关性;另外,由于KLT变换对不同图像采用不同变换,即它是根据色彩图像R、G、B分量协方差矩阵的特征向量来构造色彩空间变换,因此,其色彩空间变换后的分量在中心化后,相关性是最弱的^[7,8]。由于在对图像进行变换编码时,常常需要直接对未中心化的色彩分量做处理,因此中心化过程限制了对新色彩分量进行进一步处理的方法选择。

本文利用图像色彩信息矩阵特征向量来构造色彩空间变换,由于其色彩空间变换后的分量在不经中心化处理时是相关性最弱的,从而就避免了对新分量做中心化所带来的影响。

2 色彩信息矩阵特征方向的计算

计算图像色彩信息矩阵的特征方向的目的是要通过该方向来直接祛除色彩分量间的相关性。以 $n \times n$ 的24bit真彩色图像 $A_{n \times n \times 3}$ 为例, $A_{n \times n \times 3}$ 的R、G、B色彩分量分别记作 A_R 、 A_G 和 A_B ,它们分别是 $n \times n$ 的矩阵,其元素的值域为 $[0, 255]$ 。计算色彩信息矩阵特征方向时,首先按逐行、逐列遍历的方式将图像每个像素R、G、B分量表示成如下矩阵

$$P = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \cdots & R_{1,n} & R_{2,1} & \cdots & R_{n,n} \\ G_{1,1} & G_{1,2} & \cdots & G_{1,n} & G_{2,1} & \cdots & G_{n,n} \\ B_{1,1} & B_{1,2} & \cdots & B_{1,n} & B_{2,1} & \cdots & B_{n,n} \end{bmatrix}_{3 \times n^2}$$

其中 $R_{i,j}$ 、 $G_{i,j}$ 和 $B_{i,j}$ 分别为 A_R 、 A_G 和 A_B 在 (i,j) 位置的色彩分量值。

定义 彩色图像的色彩信息矩阵定义为

$$X = PP^T \quad (1)$$

其中 P^T 代表 P 的转置。

显然,彩色图像色彩信息矩阵 X 是一个 3×3 的方阵,它的3个标准化的特征向量即是彩色图像色彩信息矩阵的特征方向。利用矩阵和统计知识可知,将彩色图像的R、G、B分量分别投影到这3个特征方向上而得到的新分量 $(\hat{R}_{1,1}, \hat{R}_{1,2}, \dots, \hat{R}_{n,n})$ 、 $(\hat{G}_{1,1}, \hat{G}_{1,2}, \dots, \hat{G}_{n,n})$ 、 $(\hat{B}_{1,1}, \hat{B}_{1,2}, \dots, \hat{B}_{n,n})$ 两两正交,说明相关性是最弱的。

3 彩色图像色彩特征方向编码与解码

3.1 彩色图像色彩特征方向编码

将彩色图像色彩信息矩阵 X 的3个标准化特征向量,按特征值绝对值从大到小的顺序排列组成的矩阵记为 $E_{3 \times 3}$, $E_{3 \times 3} = [e_1 \ e_2 \ e_3]$ 是一个正交矩阵。通过

$$\begin{bmatrix} \hat{R} \\ \hat{G} \\ \hat{B} \end{bmatrix} = E^T \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

即可将彩色图像每个像素的R、G、B分量投影到新色彩空间。将彩色图像新的色彩坐标矩阵记为 $\hat{A}_{n \times n \times 3}$,而与 $\hat{A}_{n \times n \times 3}$ 的 (i,j) 位置对应的3维向量为

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_{i,j} \\ \hat{G}_{i,j} \\ \hat{B}_{i,j} \end{bmatrix} = E^T \begin{bmatrix} R_{i,j} \\ G_{i,j} \\ B_{i,j} \end{bmatrix}。 \hat{A}_{n \times n \times 3} \text{的3个色彩分量分别用3}$$

个 $n \times n$ 的矩阵 $\hat{A}_R$ 、 $\hat{A}_G$ 和 $\hat{A}_B$ 来表示,但其元素值域不再是 $[0, 255]$,其中, $\hat{A}_R$ 含信息多, $\hat{A}_G$ 和 $\hat{A}_B$ 含信息少。 $\hat{A}_R$ 的元素值一定大于等于0,而 $\hat{A}_G$ 和 $\hat{A}_B$ 的元素值有正有负,且取值更集中,即方差变小了。这样就可以对不同的图像有针对性地为每个新色彩分量分配存储比特,以减少整个图像的存储空间。

具体选取分量存储比特数的方法如下: $\hat{A}_R$ 的最大值和 $\hat{A}_G$ 、 $\hat{A}_B$ 的绝对最大值乘以2,这3个指标理论上决定了在新色彩空间中3个分量所需的存储空间,但为了便于整型存储,实际量化时,还需做进一步处理。下面以色彩丰富的 256×256 的24bit真彩色Girl图像为例,通过式(1)得其色彩信息矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 500\,459\,516 & 353\,997\,787 & 3\,050\,753\,082 \\ 353\,997\,787 & 298\,184\,346 & 257\,157\,048 \\ 305\,075\,308 & 257\,157\,048 & 238\,265\,284 \end{bmatrix}$$

X 的 3 个特征方向矩阵为

$$E = \begin{bmatrix} 0.697\,0 & 0.709\,4 & -0.105\,0 \\ 0.539\,2 & -0.421\,8 & 0.728\,9 \\ 0.472\,8 & -0.564\,7 & -0.676\,5 \end{bmatrix}$$

其对应的特征值分别为 9.8127×10^8 、 0.4711×10^8 和 0.0853×10^8 。通过 $\hat{P}_{3 \times n^2} = E^T P$ 即可将图像从 RGB 空间变换到新色彩空间。这时,新色彩空间各分量不仅具有较弱的相关性,且 2 个含信息较少的方向分量取值相当集中,范围也较小;然后在新色彩空间对这 2 个分量进行量化编码时,可先限定量化阈值,再通过式(2)进行量化,设量化后分量为

$$\hat{x} = \begin{cases} M & x > M \\ x & |x| \leq M \\ -M & x < -M \end{cases} \quad (2)$$

其中, M 为阈值, x 为原分量值。然后用收缩变换将区间 $[-M, M]$ 变换到适合整型编码的较小区间,以使用较少的存储空间编码该分量。收缩变换的比例系数取为 $2^{k-1}/M$, 其中 $k = \max\{i \in N, 2^{i-1} \leq M\}$, 为编码该分量需要的比特数。实际编码时,可将这 2 个分量的限定阈值统一取作它们对应的分量向量的标准差,即 $\hat{P}_{3 \times n^2}$ 第 2、3 行的标准差为各自分量的阈值,但对新色彩空间第 1 分量的编码,只采用如上所述的收缩变换将其变换到比其小,且距其最近的 0 到 2 的整数幂的区间,而不进行阈值截取。

以 256×256 的 24bit 真彩色 Girl 图像为例,由于其 $\hat{P}_{3 \times n^2}$ 第 2、3 行的标准差为 26.248 2 和 11.367 0, $\hat{A}_R$ 的最大值为 403.842 0, 所以其色彩变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} \frac{2^8}{403.842} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2^5}{2 \times 26.248\,2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2^4}{2 \times 11.367\,0} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.697\,0 & 0.539\,2 & 0.472\,8 \\ 0.709\,4 & -0.421\,8 & -0.564\,7 \\ -0.105\,0 & 0.728\,9 & -0.676\,5 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 0.441\,8 & 0.341\,8 & 0.299\,7 \\ 0.432\,4 & -0.257\,1 & -0.344\,2 \\ -0.073\,9 & 0.513\,0 & -0.476\,1 \end{bmatrix}$$

新色彩分量的存储空间分别为 8 bit、5 bit 和 4 bit。可

通过下式计算来得到以下最后新色彩空间分量矩阵

$$Q_{3 \times n^2} = \text{round}(TP)$$

其中, $\text{round}(\cdot)$ 代表对矩阵的每个元素进行 4 舍 5 入取整。

3.2 图像的解码

图像解码可通过 T 的逆变换实现,即先计算 $\text{round}(T^{-1}Q_{3 \times n^2})$ 得到恢复图像的 R、G、B 色彩空间分量矩阵,然后将 $\text{round}(T^{-1}Q_{3 \times n^2})$ 逐行、逐列地表示成 $C_{n \times n \times 3}$, 即可得到恢复的彩色图像。

除了对新色彩空间第 2、3 分量进行量化时所引起的误差外,上述编码、解码方案最终误差都是由实际存储时对新分量采用整型存储的,及因计算舍入误差的影响造成的。由大量不同特性彩色图像的实验可知,量化误差和舍入误差对恢复彩色图像 R、G、B 分量的最终影响非常小,误差最大为 1,这是因为截取误差本身较小,且只发生在信息含量小的 2 个方向,而整个过程又受舍入误差影响较小的缘故。以 256×256 的 24bit 真彩色 Girl 图像为例,在整个色彩分量坐标的 $256 \times 256 \times 3$ 个值中,恢复过程中出现偏差的共有 56 208 个,约占 1/4 左右,可见,该方案恢复图像的信噪比很高。另外,如能充分利用新色彩空间分量坐标分布特点和在阈值的选取上更细致地考虑,则该方案在提高压缩比上还具潜力,同时该方案还可以方便地与其他压缩、编码方案联合使用,以进一步提高压缩能力。

4 实验结果与分析

本文选用 Girl、Lena、Airplane 和 Sailboat on lake 等真彩色图像进行了编码实验,并与 KLT 色彩空间的祛除色彩分量相关性的性能进行了比较。

4.1 不同色彩空间祛除色彩分量相关性性能比较

以 256×256 的 24bit 真彩色 Girl 图像为例,在本文构造的色彩空间和 KLT 色彩空间,对变换后的新色彩分量的取值范围、取值分布、均方差及均值等进行了比较。

从图 1、图 2 和图 3 易见,RGB 色彩空间 3 个色彩分量取值都比较分散,而新色彩空间和 KLT 色彩空间 2 个含信息少的分量都比较均匀地分布在 0 的左右,且取值相对集中,其定量性能比较见表 1。

从实验结果可见,采用新色彩空间和 KLT 色彩空间都可有效地祛除 RGB 色彩空间分量的相关性,并使变换后的 2、3 分量取值集中。从各分量取值

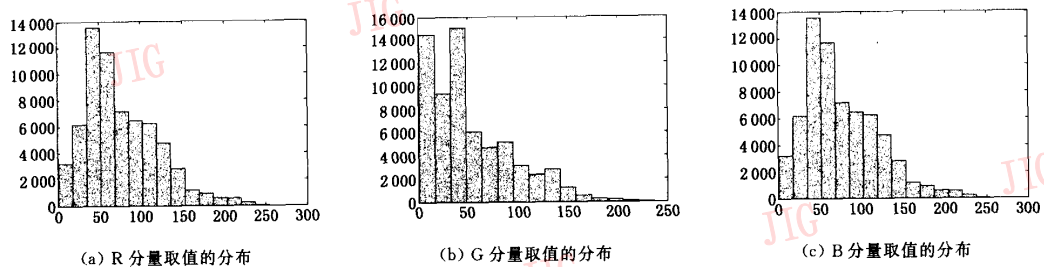


图 1 Girl 图像 RGB 分量取值分布

(图 1~图 3 横坐标为每个分量值,纵坐标为该分量值在对应区间的像素数)

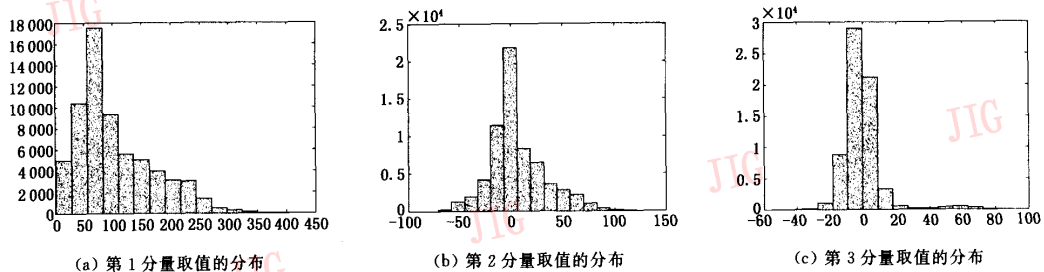


图 2 Girl 图像新色彩空间分量取值分布

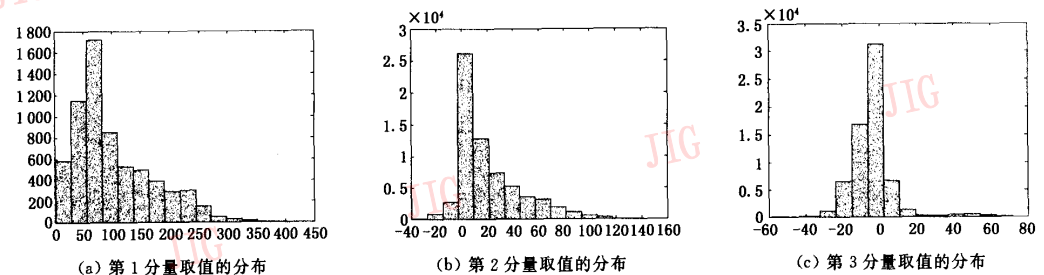


图 3 Girl 图像 KLT 色彩空间分量取值分布

表 1 不同彩色空间各分量分布					
	分量	最大值	最小值	均方差	均值
RGB 色彩空间	R	254	1	43.4366	75.8268
	G	237	1	42.2787	52.5592
	B	222	1	38.6201	46.3050
新色彩 空间	1	403.8420	1.7089	65.9361	103.0797
	2	121.4096	-71.4115	26.2482	5.4717
	3	81.5163	-55.0696	11.3670	-0.9758
KLT 色彩空间	1	404.9885	1.7295	66.5943	101.0677
	2	141.4455	-39.4188	24.5936	20.5977
	3	71.7335	-58.5486	11.2289	-4.1682

范围、均方差等指标看,新色彩空间和 KLT 色彩空间性能相差很小,只是本文提出的新色彩空间 2、3 分量分布在 0 的左右更加对称,而 KLT 色彩空间 2、3

分量取值均方差更小,但这些差别都很微不足道。这些差异与本文前面的分析是一致的,即在对变换后分量中心化后,KLT 色彩空间是祛除分量相关性性能最优的,而如不进行中心化,本文的方法则是最优的。

4.2 新色彩空间编码结果

采用本文色彩空间及编码方案的实验结果见图 4、表 2。

表 2 不同图像编码结果		
图像	压缩比	PSNR(dB)
Girl(256×256)	$\frac{8+5+4}{24}$	53.5688
Lena(512×512)	$\frac{8+5+4}{24}$	53.8520
Airplane (512×512)	$\frac{8+5+4}{24}$	53.6632
Sailboat on lake (512×512)	$\frac{8+5+4}{24}$	53.5456



(a) 原始 Girl 图像



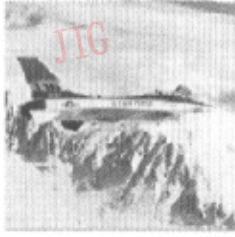
(b) 恢复 Girl 图像



(c) 原始 Lena 图像



(d) 恢复 Lena 图像



(e) 原始 Airplane 图像



(f) 恢复 Airplane 图像



(g) 原始 Sailboat on lake 图像



(h) 恢复 Sailboat on lake 图像

图 4 本文方案编码的几幅典型图像及恢复图像的比较

表 2 中,峰值信噪比

$$PSNR=10 \times \log_{10} \frac{255^2}{(MSE_R + MSE_G + MSE_B)/3}$$

MSE_R, MSE_G, MSE_B 分别为 3 个色彩分量的均方差,压缩比为每个像素新色彩分量的存储比特数除以 24。

从表 2 数据可以看出,该编码方案可有效地祛除色彩冗余信息,即可实现色彩的压缩存储,但由于不同图像 R、G、B 色彩冗余信息量的不同,从而导致了压缩比的不同。由于本文主要研究的是空间变换减少彩色信息冗余的能力,因此没有对量化编码时,为取得更好的压缩效果的最优阈值选取问题进行进一步讨论。

5 结 论

本文提出了一种新的可祛除彩色图像 RGB 色彩分量相关性的色彩空间,该空间基于与 KLT 空间不同的最优原则来进行变换,使得变换后的分量在不中心化时相关性最弱,在其基础上,利用色彩空间变换后分量的分布特性提出了一种基于祛除色彩相关性的图像编码方案,该方案不仅具有良好的压缩效果,信噪比高,而且在与其他压缩、编码方案联合使用时,还可以避免 KLT 色彩空间变换对后续压缩编码方案必须不受中心化影响的限制,以便于

多种编码方案联合使用。

参 考 文 献

- Comon P. Independent component analysis, a new concept? [J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287~314.
- Sander P V. Context-based color image compression [R]. 276r, Spring 2000 of Harvard University: Computer Science, Cambridge, NJ, USA, 1997: 1014~1024.
- Yamaguchi H. Efficient encoding of colored pictures in R. G. B components [J]. IEEE Transactions on Communication, 1984, 32(11): 1201~1209.
- 朱艳秋,陈贺新. 静止彩色图像压缩编码技术 [J]. 中国图象图形学报, 1997, 2(7): 484~485.
- Tanaka T, Yamashita Y. Image Coding Using Vector-Embedded Karhunen-Loeve Transform [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Kobe, Japan, 1999, 2: 482~486.
- Devereux V G. Limiting of YUV Digital Video Signals [R]. 1987STIN-8816924D, Corporation Kingswood, England; BBC (British Broad Casting) Research Department Report, 1987: 22.
- 朱艳秋,陈贺新,戴逸松. 彩色图像三维矩阵变换压缩编码 [J]. 电子学报, 1997, 2(7): 484~485.
- 陈宇拓,余英林. 利用色彩分量相关性的彩色图像压缩编码 [J]. 中国图象图形学报, 2001, 6A(2): 123~128.



柴玉梅 1978 年生, 2000 年获鞍山科技大学计算机工程学士学位, 鞍山科技大学计算机科学与工程系讲师, 现为大连民族学院硕士研究生。主要研究方向为图形、图像处理。



王洁 1974年生,1996年获鞍山科技大学计算机工程学学士学位,鞍山科技大学计算机科学与工程系讲师,现为大连民族学院硕士研究生。主要研究方向为图像处理与模式识别。



刘向东 1967年生,2000年获东北大学信息科学与工程学院博士学位,现为大连民族学院计算机科学与工程系教授。主要研究领域为混沌分形信号处理、计算机图形、图像学。



焉德军 1965年生,2000年获东北大学信息科学与工程学院博士学位,大连民族学院计算机科学与工程系副教授,现从事博士后研究。主要研究方向为信号与图像处理。

情系“至强” 后继“安腾”

2004年2月17日,Intel推出了32/64位的复合型“至强”处理器,于此同时,HP宣布与Intel结成了战略合作伙伴关系,不仅支持英特尔的“安腾”架构发展方向,而且继续开发英特尔Xeon™技术,准备在即将面市的HP工作站和服务器产品上采用最新Xeon技术成果,其中包括64位处理器、输入/输出、管理和内存架构,为HP客户带来最新的工业标准创新架构和强大性能。早在1994年,HP就开始与Intel合作研发高端开放式处理器。2001年5月29日,HP和Intel共同召开了基于IA-64架构的“安腾”处理器新闻发布会,随后推出首款基于IA-64“安腾”处理器的计算机产品——HP i2000,从而揭开了“安腾”处理器深入应用的序幕。“安腾”作为双方合作的一个重要成果受到了业界的瞩目。

为了满足工业标准的不断增长,HP与合作伙伴共同协作,向大中小企业客户提供了一系列工业标准解决方案。同样,作为HP标准化进程的一个环节,采用工业标准的英特尔处理器,使HP可以将注意力集中到研究开发→客户价值上。随着Intel 32/64位“至强”处理器的推出,目前HP针对Intel处理器的产品线,“安腾+至强”的产品格局已经非常明朗。“安腾”与32/64位“至强”已经分别应用在了目前不同档次的台式机型中,而随着系统与软件供应商不断向着64位的过渡,“安腾”终将成为未来的市场主流。

Intel通过32/64位复合型“至强”处理器的推出,完成了对自身产品线的补充与完善工作,从高端的“安腾”系列到中端的32/64位“至强”,再到奔腾IV,使得所有服务器以及工作站厂商都可以轻松应对自有产品的升级换代。而HP拥有一条针对Intel处理器的最为完整的服务器/工作站产品系列。2003年底,HP推出的三款Integrity中阶服务器都是基于“安腾Ⅱ”系列低、中、高端的全线产品。2004年2月,又推出一款新的入门级Integrity动能服务器HP rx1600,以此形成了全球唯一最为完整的基于“安腾Ⅱ”处理器的服务器产品线。工作站产品中,HP workstation zx2000以及zx6000都是基于“安腾Ⅱ”处理器的产品,HP Workstation zx2000同时支持三种主要操作系统及全系列图形解决方案,其不仅可以作为功能强大的桌边工作站使用,也可以作为图形计算结点装入机柜,用于运行大型的数据集。其价格与高性能IA-32工作站类似,但却具有64位工作站的所有优势,以及下一代Intel® Itanium® 2微型架构的优点,其中包括广泛的并行和令人惊叹的浮点性能。此外,HP还拥有采用32/64位复合型“至强”的HP Proliant,Integrity,NonStop服务器以及原有的基于32位“至强”的产品。HP Workstation xw8000和xw6000工作站都采用了Intel最新芯片技术的双“至强”处理器。低端产品中,HP Workstation xw4100以及xw3100是基于Intel 奔腾IV处理器的产品,xw3100以8000元的价格和优越的性能,其凭借着相当于传统工作站1/3的纤小体积,满足了对空间占用具有特殊要求的用户的使用需求。