

三维面形信息压缩的虚拟结构光编码算法

侯志凌 苏显渝 张启灿

(四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 通过对 Karpinsky 和 Zhang 提出的合成相移算法的研究, 消除了白噪声, 将相同参数条件下的面形重建精度提高了 1 倍。在虚拟结构光投影的基础上, 提出了两种用彩色图像压缩记录三维面形信息的算法; 双通道相位编码算法, 提高了压缩比; 三通道相位编码算法, 能够同时提高压缩比和面形重建精度。给出了算法面形重建精度的定量分析, 并指出 PNG 格式为较好的无损存储方式。

关键词 几何光学; 虚拟结构光编码; 条纹分析; 数据压缩; 三维测量; 相位测量轮廓术

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0510003

3D Shape Compression Based on Virtual Structural Light Encoding

Hou Zhiling Su Xianyu Zhang Qican

(*Opto-Electronics Department, School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*)

Abstract After studying the composite phase-shifting algorithm for 3D shape compression, two novel methods two-channel phase encoding algorithm and three-channel phase encoding algorithm are proposed. They can improve the compress ratio and the reconstruction quality by storing the 3D shape data into two or three channels of a 24 bit color image. Computer experiments and quantitative analysis provide a guide to achieve appropriate reconstruction quality and compression ratio.

Key words geometric optics; virtual structured light encoding; fringe analysis; data compression; 3D measurement; phase measuring profilometry

OCIS codes 100.3010; 100.2650; 100.6890

1 引 言

近年来, 工业制造、电影、游戏、医学整形和生物识别等行业对三维面形精确测量数据的需求迅速增加; 对于同样尺寸的被测物体, 用来记录其三维面形信息的数据量也在大幅增加。目前, 结构光测量^[1~3]、激光扫描^[4,5]和立体视觉^[6,7]等光学三维传感方法都能够非常便捷地获取精确的物体面形数据, 但三维面形数据往往仍以传统的单精度(每个 4B)或双精度(每个 8B)形式来存储。这种存储方式的好处是数值范围大、存储精度高, 但却是以增加数据存储空间大小为代价的。比如, 一个点云的三维坐标(x, y, z)至少需要 12B 来表示, 这还不包括坐

标点之间的连接关系; 而对于二维彩色图像上一个像素点来说, 3B(24 bit)就足以表示该点的红、绿、蓝通道的所有颜色信息。因此, 与相同像素大小的传统三维面形数据相比, 二维彩色图像所需存储空间至多是其 1/4。此外, 彩色图像存储中已有许多成熟的压缩方式, 能够进一步提高数据压缩比。

从这一思路出发, Karpinsky 和 Zhang 提出了一种将虚拟条纹投影与合成相移算法相结合的方法^[8], 先将三维面形数据编码为二维彩色条纹图, 再将二维彩色条纹图存储于各种 24 bit 彩色位图中, 能够获得较高的重建精度和压缩比。这一方法可以看作是虚拟结构光编码算法之一。

收稿日期: 2010-11-17; **收到修改稿日期:** 2010-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 侯志凌(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事光学三维传感方面的研究。E-mail: topgun1981_1@126.com

导师简介: 苏显渝(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学三维传感与机器视觉等方面的研究。

E-mail: xysu@scu.edu.cn

本文通过对该方法的研究发现,在精确编码的情况下,可以消除白噪声,并将面形重建的精度提高1倍。在虚拟条纹投影的基础上,提出了两种三维面形信息压缩的虚拟结构光编码算法,可以提高解码后的面形重建精度和数据压缩比,并对提高程度进行了定量分析和比较。

2 虚拟结构光编码原理

图1是虚拟条纹投影系统的原理图,它与相位测量轮廓术系统中的条纹投影系统相似^[9],投影仪和摄像机均设为远心光路。物体上任意一点的高度表示为

$$z = \frac{P\Delta\Phi}{2\pi W_x \sin \theta}, \quad (1)$$

式中 P 为投影条纹间距, θ 为投影角度, W_x 为摄像机拍摄的条纹图 X 方向上的窗口宽度;放置物体前后的相位差 $\Delta\Phi$ 可通过合成相移等算法、傅里叶变换轮廓术(FTP)和相位测量偏折术(PMD)^[2]等用在真实结构光投影中的算法以及本文提出的两种专门面向虚拟结构光投影的编码算法得到。

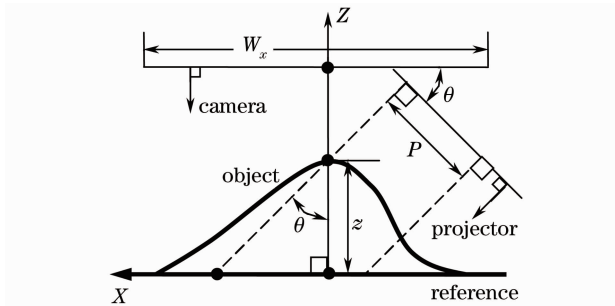


图1 虚拟条纹投影系统

Fig.1 Virtual fringe projection system

合成相移算法^[8],原理如图2所示。投影的两个色彩通道(R,G)编码为0~255之间的正弦、余弦条纹图[图2(a)],则虚拟摄像机拍摄到的彩色变形条纹中R,G通道的光强将为

$$I_r(x, y) = 255/2\{1 + \sin[\Phi(x, y)]\}, \quad (2)$$

$$I_g(x, y) = 255/2\{1 + \cos[\Phi(x, y)]\}. \quad (3)$$

通过对点计算,可以得到截断在 $(-\pi, \pi)$ ^[10]之间的截断相位[图2(b)]:

$$f_{\text{wrap}}(\Phi) = \arctan\left(\frac{I_r - 255/2}{I_g - 255/2}\right). \quad (4)$$

第三个通道(B)记录与截断相位跳变精确对准的阶梯图像,用来展开截断相位:

$$\Phi(x, y) = 2\pi I_b(x, y)/\Delta_{\text{gray}} + f_{\text{wrap}}(\Phi), \quad (5)$$

式中 Δ_{gray} 表示 B 通道相邻阶梯间的灰度差值,灰度

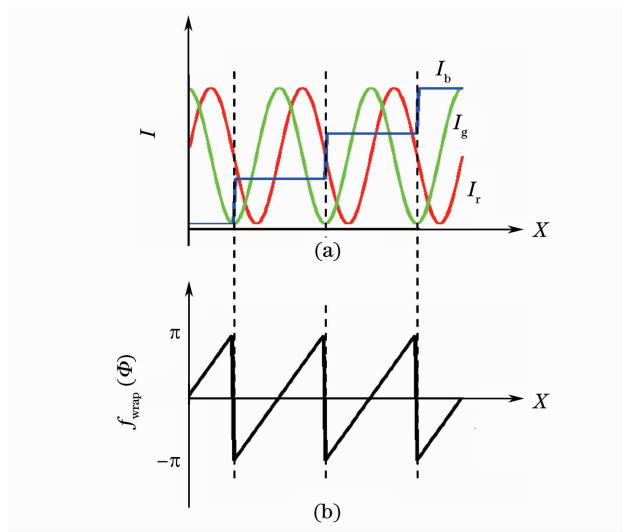


图2 合成相移算法。(a)编码方法,(b)通过R,G通道算得的截断相位

Fig.2 Composite phase-shifting algorithm. (a) encoding method, (b) truncated phase calculated by R and G channel

的跳变对应了截断相位的跳变。将放置半球前后的相位差 $\Delta\Phi$ 代入(1)式中即可得到半球的高度。

本文选用与文献[8]相同的原始物体,一个直径为1 mm的半球,并采用了同样的投影参数,结果如图3所示。全过程是由计算机数值运算进行的,尽管没有用到文献[8]中的滤波过程,仅依靠精确编码就消除了重建面形中的白噪声{文献[8]Fig.4(e)中的“毛刺”},得到的图3(b)中重建的面形表面非常平整。半球和重建面形之差的范围为 $\pm 2.13 \times 10^{-4}$ mm,是半球高度范围的0.042%;均方差为 0.81×10^{-4} mm,占半球高度范围的0.016%,还不到文献[8]中 1.68×10^{-4} mm的一半,重建精度提高1倍。半球三维面形坐标数据的大小为3.15 MB;而该算法得到的变形条纹图以无损24 bit位图存储时,BMP格式的文件大小为768 kB,PNG格式文件大小仅为147 kB。

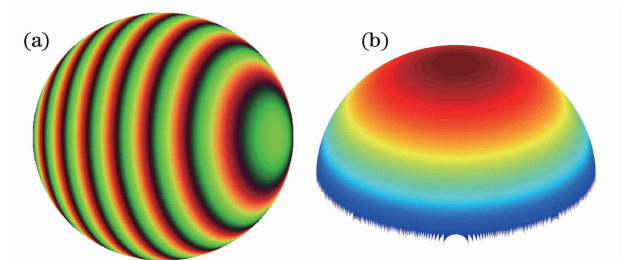


图3 (a)合成相移算法编码条纹,(b)重建的三维面形
Fig.3 (a) Fringe encoded by composite phase-shifting algorithm, (b) reconstructed 3D shape

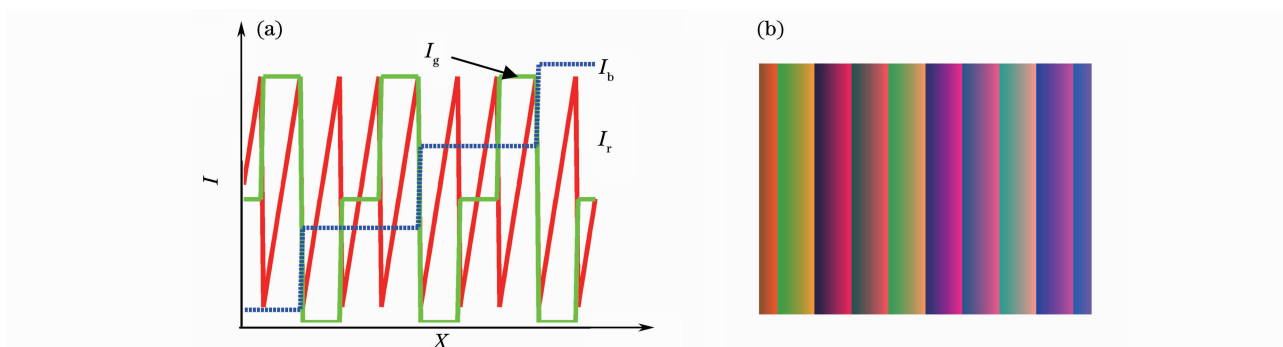


图 6 (a)三通道相位编码原理图,(b)编码条纹

Fig. 6 (a) Three-channel phase encoding algorithm, (b) corresponding fringe

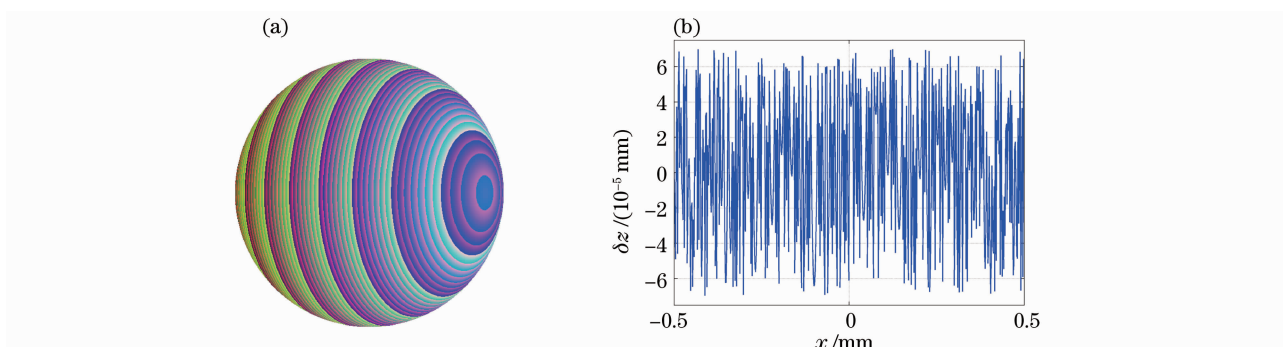


图 7 (a)三通道相位编码算法的变形条纹,(b)半球与重建面形中间行之间的差值

Fig. 7 (a) Deformed fringe encoded by three-channel phase encoding algorithm, (b) difference between the reconstructed 3D shape and the original object cross 256 rows

图 7 中重建面形与半球差值的范围为 $\pm 0.70 \times 10^{-4}$ mm,是半圆高度范围的 0.014%;均方差为 0.36×10^{-4} mm,为半圆高度范围的 0.007%。重建精度大致为双通道相位编码算法的 7 倍,是合成相移算法的 2 倍多。该变形条纹图的 BMP 格式文件大小

仍为 768 kB;PNG 格式文件为 90.9 kB,与双通道相位编码算法 54.3 kB 和合成相移算法 PNG 文件 147 kB 相比,是前者的 1.68 倍、后者的 0.61 倍。

为了便于比较,将这三种压缩算法的重建结果如表 1 所示。

表 1 三种压缩算法重建误差及压缩比比较

Table 1 Reconstruction errors and compression ratio of three compression algorithms

Algorithm	Reconstruction	BMP format		PNG format	
	error /%	Size /kB	Compression ratios	Size /kB	Compression ratios
Composite phase-shifting	0.042	768	1:4.00	147	1:20.8
Two-channel phase encoding	0.098	768	1:4.00	54.3	1:56.6
Three-channel phase encoding ($T=7$)	0.014	768	1:4.00	90.9	1:33.8

可以看出,这三种算法的重建误差都是很小的。以重建误差最大的双通道相位编码算法为例,图 8 给出了高度范围为 $0 \sim 110$ mm 人脸数据的重建结果,最大误差仅为 ± 0.04 mm,能够满足实际存储的要求。

通道相位编码算法和三通道相位编码算法,从本质上说,都是在虚拟结构光投影的基础上,先将物体的高度转化为相位的形式,然后用不同的颜色通道来分级存储物体的相位。因此,可将这三种三维面形信息压缩方式统称为“虚拟结构光编码算法”。

此类算法的整个过程都由计算机数值运算实现,因此误差只可能是彩色通道记录相位时四舍五入造成的。它们的重建误差可以通过以下方法得到:

4 压缩算法评价

4.1 三维面形重建精度

文献[8]中提出的合成相移算法、本文提出的双

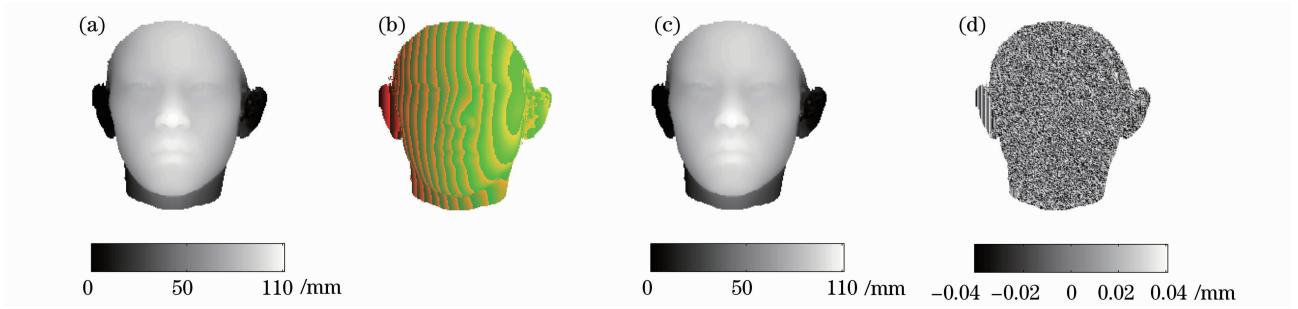


图 8 (a)原始人脸,(b)双通道编码变形条纹图,(c)重建人脸,(d)重建误差

Fig. 8 (a) Original 3D face, (b) two-channel phase encoding fringe, (c) reconstructed 3D face, (d) reconstruction error

1) 合成相移算法的误差

首先对高度计算(1)式两边求导,得到

$$dz = \frac{Pd\Delta\Phi}{2\pi W_x \sin \theta}, \quad (8)$$

又由于 $d\Delta\Phi = d\Phi = df_{\text{wrap}}(\Phi)$, 根据(2)~(4)式可得

$$d\Delta\Phi = (2/255) \times (dI_r \cos \Phi - dI_g \sin \Phi), \quad (9)$$

四舍五入造成 I_r 和 I_g 的误差最多为 ± 0.5 。结合(9)式,重建相位误差最大为

$$\delta\Delta\Phi_{\max} = \pm (2/255) \sin(\pi/4) = \pm \sqrt{2}/255, \quad (10)$$

代入(8)式得

$$\delta z_{\max} = \pm \frac{P}{2\pi W_x \sin \theta} \times \frac{\sqrt{2}}{255}, \quad (11)$$

将半球实验中的参数代入(11)式可得 $\delta z_{\max} \approx \pm 2.21 \times 10^{-4}$ mm, 实验结果为 $\pm 2.13 \times 10^{-4}$ mm, 在理论误差范围内。

2) 双通道相位编码算法的误差

对(6)式两边求导可得

$$d\Delta\Phi = 2\pi(dI_r)/255, \quad (12)$$

I_r 的四舍五入误差最大为 ± 0.5 , 与(8)式相结合, 可得

$$\delta z_{\max} = \pm \frac{0.5P}{255W_x \sin \theta}. \quad (13)$$

选用实验中的各项参数可得 $\delta z_{\max} \approx \pm 4.91 \times 10^{-4}$ mm, 实验结果为 $\pm 4.91 \times 10^{-4}$ mm, 与理论误差范围一致。

3) 三通道相位编码算法的误差

对(7)式两边求导可得

$$d\Delta\Phi = 2\pi(dI_r)/(255T), \quad (14)$$

I_r 的误差最大为 ± 0.5 , 与(8)式相结合, 可知

$$\delta z_{\max} = \pm \frac{P}{255TW_x \sin \theta}, \quad (15)$$

结合(13)式可知, 当其它参数相同时, 三通道相位编码算法的面形重建精度将是双通道相位编码算法的 T 倍。选用实验中的各项参数可得 $\delta z_{\max} \approx \pm 0.70 \times 10^{-4}$ mm, 实验结果为 $\pm 0.70 \times 10^{-4}$ mm, 与理论误差

范围一致。

从(11),(13)和(15)式可以看出, 要提高面形重建精度, 可以通过适当地减小投影条纹间距 P , 或增大窗口宽度 W_x 、加大投影入射角 θ 来实现, 这与各种基于条纹投影的三维面形测量术是一致的^[11]。当投影条纹间距 P 、窗口宽度 W_x 保持不变时, 可以令 $\theta = 90^\circ$ (即虚拟结构光能实现水平投影), 即 $\sin \theta = 1$, 面形重建精度将达到同等条件下最高。

需要注意的是, 用 24 bit 彩色图像记录时, 各通道实际上只能存储 0~255 的整数值。因此, 合成相位算法和双通道相位编码算法的重建精度最高为原始物体面形高度范围的 7.66×10^{-6} , 三通道相位编码算法最高为原始高度范围的 2.99×10^{-8} 。

4.2 图像存储压缩比

本文只比较了两种无损位图 BMP 和 PNG 格式文件的大小。BMP 格式图像除了色彩深度可选以外不采用其它任何压缩, R, G, B 值都占用固定位数的存储空间, 24 bit 存储时文件大小恒为三维面形单精度数据的 1/4; 而 PNG 格式使用了从 LZ77 派生的无损数据压缩算法, 色彩存储方式更为灵活, 相同色彩深度时所占存储空间要远小于 BMP 格式图像, 能进一步提高压缩比。而且 PNG 格式还支持 α 通道, 可以以同样像素大小来存储在 0~1 分布的数值。此外, 还可以利用 PNG 格式的图像注释的功能来存储三维面形的其它相关信息。因此在这两种无损存储格式中, PNG 格式更具优势。

文献[8]发现可以采用其它有损压缩方式进一步压缩图像大小, 但同时也发现相位阶梯通道(如 B 通道)需要采用无损的图像存储格式来储存。这是因为相位阶梯通道记录的是较大的相位跃变, 如果记录不准确将会对三维面形相位的重建带来很大误差, 不能用有损图像压缩格式来存储。实际应用中可以结合对文件大小和面形重建精度的要求, 采用合适的图像有损压缩方式来进一步压缩记录细化相

位信息的色彩通道,进一步提高数据压缩比。

5 结 论

就目前的光学三维面形测量仪器以及人脸数据库^[12]而言,最多使用三个通道就足以满足范围和精度的要求。“三维面形信息压缩的虚拟结构光编码算法”在三维数据存储、传输、加密和三维人脸数据库的建立中有广阔的应用前景。

本文通过对合成相移算法的分析,提出了两种新的虚拟结构光编码算法:双通道相位编码算法和三通道相位编码算法,提高了压缩比和面形重建精度。分别对信息压缩算法的两个重要指标:重建精度和压缩比进行了研究。对三种方法的面形重建误差都给出了定量的计算,为提高面形重建精度提供了理论依据。

参 考 文 献

- Mitsuo Takeda, Hideki Motoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **36**(22): 3977~3982
- Tang Yan, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 965~969
唐 燕, 苏显渝, 刘元坤 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 965~969
- Dou Yunfu, Su Xianyu, Chen Yanfei. A fast modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1858~1862
窦蕴甫, 苏显渝, 陈延非. 一种快速的调制度测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1858~1862
- Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology*[M]. Beijing: Science Press, 1998
金国藩, 李景镇. *激光测量学*[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- Ge Baozhen, Zhao Dan, Tian Qingguo *et al.*. Three-dimensional human face laser scanning based on three-line structured light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1594~1598
葛宝臻, 赵 丹, 田庆国 等. 三光带激光三维人脸扫描方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1594~1598
- Gu Zheng, Su Xianyu. An algorithm based on adaptive support weight and disparity adjustment for trinocular stereo matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 734~738
顾 征, 苏显渝. 三目自适应权值立体匹配和视差校准算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 734~738
- Di Hongwei, Chai Ying, Li Kui. A fast binocular vision stereo matching algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2180~2184
狄红卫, 柴 颖, 李 逵. 一种快速双目视觉立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2180~2184
- Nikolaus Karpinsky, Song Zhang. Composite phase-shifting algorithm for three-dimensional shape compression [J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49**(6): 063604
- Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1166
李 勇, 苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1166
- Dennis C. Ghiglia, Mark D. Pritt. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory Algorithm and Software*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998. 4~5
- Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics*[M]. Beijing: Science Press, 1999. 323~324
苏显渝, 李继陶. *信息光学*[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 323~324
- Yin Baocai, Sun Yanfeng, Wang Chengzhang *et al.*. BJUT-3D large scale 3D face data base and information processing[J]. *J. Computer Research and Development*, 2009, **46**(6): 1009~1018
尹宝才, 孙艳丰, 王成章 等. BJUT-3D 三维人脸数据库及其处理技术[J]. *计算机研究与发展*, 2009, **46**(6): 1009~1018