

## 多种子快速纹理合成

徐晓刚 于金辉 马利庄

(浙江大学CAD&CG国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要** 为避免纹理映射引起的接缝和扭曲,近几年人们提出了一些纹理合成方法,但大多数只能处理部分纹理,而且相当费时.为此,提出一种新的纹理合成算法.该算法在样图中选取多个种子,并将其预置到合成图中作为初始匹配点,然后通过螺旋状路径,在初始匹配点邻域搜索寻找新匹配点进行合成,以此循环,直至合成图充满为止.该方法大大加快了合成速度,与穷尽搜索法相比,合成速度平均可以提高360倍;特别是在亮度空间合成时,在合成图象质量与RGB空间结果基本相同的情况下,可以实现进一步加速.另外,该算法还可合成沿方向变化的纹理.对不同纹理进行合成实验,其结果令人满意.

**关键词** 纹理合成 多种子 匹配

**中图分类号:** TP391.41 **文章标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)10-0994-06

## Fast Texture Synthesis Using Multiple Seeds as Constraints

XU Xiao-gang, YU Jin-hui, MA Li-zhuang

(State Key Lab. of CAD/CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** To avoid noticeable seams between texture patches and minimize the stretch and distortion of the pattern when tiling a texture on surfaces, several texture synthesis methods have been proposed in the past few years, most of them however are time consuming and suitable only for part of textures. This paper presents a new approach for texture synthesis. The algorithm first selects multiple seeds from the sample image and puts them in the synthesized images as initial matching points, those points can be a line, a few lines or rectangle, the algorithm then searches for new matching points among the neighbors of the initial matching points along a spiral path and continues this process in a recursive manner until the synthesizing image is fully filled. Compared with the traditional approaches, the synthesizing process of our technique is dramatically speed up and reach to 360 quantitative grade, and the synthesizing speed can be accelerated further in the luminance space while retaining almost the same result as the image obtained in RGB space. In addition, our method can cope with the variation of the texture along different directions with ease. Experiments show that synthesizing results are quite satisfactory.

**Keywords** Texture synthesis, Multiple seeds, Marching

## 0 引言

纹理合成是当前计算机视觉和计算机图形学研究的热点之一,它在纹理填充、图象和视频的无损压缩以及图象前景的消除中都有着广泛的应用.一般地,纹理可以分为重复纹理(包含重复的纹元 texels)和随机纹理(没有显式的 texels).而在真实

世界中,大部分的纹理介于两者之间,很难用传统的方法进行区分.纹理合成可以简单地描述为如下过程:对于给定的有限纹理样本,合成与样本同样的纹理,这种合成在视觉上是相似而连续的.

关于纹理合成已经提出了多种算法,归纳起来,大致可分为如下几类:

(1) 物理仿真 通过对物理生成过程的仿真来生成某种特殊的纹理,如毛发、云雾等,它可以直接

基金项目:国家自然科学基金(60103024, 69973043, 60073024);留学回国人员科研启动基金

收稿日期:2001-04-09;改回日期:2002-01-28

在三维网格上进行生成,并避免了纹理映射带来的失真,代表性的有文献[1]、[2].

(2) Markov 随机场(MRF)模型 对于大多数的纹理,MRF 模型是一种很好的逼近模型,许多的算法都基于这一模型<sup>[3~6]</sup>,取得了较好的结果.MRF 模型认为,纹理具有局部统计特征,对一张纹理图,任取其中两小块纹理都是相似的.在以往的单种子合成算法中,在样图中,取一个点作为种子写到合成图中,然后从种子的邻点开始,在样图中移动匹配窗口,把误差最小的匹配点写入合成图中,如此循环直至填满合成图,得到新的纹理.若希望每次合成的纹理都有一定的变化,可设定匹配误差,在符合条件的点中随机选取一点,写到合成图中.因为每写一个点都需要在样图中从头到尾地匹配一遍,所以 MRF 算法的缺点是非常耗时,计算一小块纹理都需要耗费数小时.

(3) 特征匹配 有些算法把纹理当作一种特征集,通过在样本图中匹配特征的方法生成新的纹理图.Heeger 和 Bergen 提出了把随机噪声分层的方法,对随机性纹理取得了较好的效果,但对结构性纹理效果不理想<sup>[6]</sup>;Bonet 对结构纹理的合成取得了更好的效果<sup>[7]</sup>,但对结构不明显的纹理会造成人工痕迹.Efros 提出了非参数采样的算法<sup>[3]</sup>,其对许多纹理的合成取得了理想的结果.

大多数纹理合成方法都很费时,若原样图尺寸较大,所花费的时间就更多.Wei 等通过建立矢量树进行加速的纹理合成方法<sup>[5]</sup>,取得了较好的效果,但当原样图增大时,其搜索时间相应增加.Xu 等提出了块拼接的快速合成方法,但只适用于部分纹理<sup>[7]</sup>.

基于 Markov 随机场模型,提出多种子纹理合成算法,利用螺旋线状搜索方法来加速匹配过程.其优点是不仅能处理一般的纹理,还能根据方向性要求合成纹理,而且合成速度基本与原样图大小无关.与最新的文献[8]~文献[13]比较,该算法在可处理的纹理类型、合成速度、合成质量等指标方面仍具有优势.

## 1 纹理合成算法

文献[5]是一种典型的纹理合成算法,它是对文献[3]算法的一种改进,虽然同样基于 MRF 模型,但它却摒弃了文献[3]中的概率函数而直接采样,邻域采用 L 形状,如图所示 1.

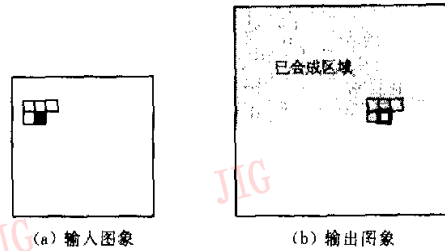


图 1 按扫描线顺序合成纹理

计算时,按照扫描线顺序,逐点进行采样合成.其算法如下:

(1) 用随机噪声初始化输出图象,对输出图象的每一个点,按照扫描线顺序查找.在输出图象中,取出当前点 L 形状的邻域,L-邻域的大小由人工给定.

(2) 在输入的样图中找出一块,使该点的 L-邻域与输出图象中 L-邻域的误差最小.

(3) 将该点拷贝放入输出图象中.

重复上述过程,最后得到合成图象.

由于每个匹配点都需要遍历输入图象中的各点后得到,因此该方法耗时多,合成时间与输入图象和 L-邻域的大小有关,在文献[5]中,采用了多分辨率合成的方法来降低邻域的采样范围,同时通过树结构的矢量量化方法进行加速搜索,取得了较好的加速效果,但同时却使算法的复杂度大大增加.

基于以上的思想<sup>[3,5]</sup>,提出一种新的纹理合成算法.与文献[3]、[5]相比,有以下不同:

(1) 采用多个种子 在合成纹理图象中采用多个种子进行预填充.多种子方法可以减少计算匹配点的数量,实现加速效果,同时,从每个种子点开始往邻域扩充,使算法实现并行计算.

(2) 采用多种形状的种子 种子可以根据纹理的不同,采用点,线,矩形等多种形状.多种种子的选择使纹理合成方法能够应用到更大的范围,如纹理沿不同方向变化.

(3) 采用螺旋线状搜索 与文献[3]、[5]的扫描线顺序搜索不同,采用螺旋线状搜索,搜索的初始位置为上一块的匹配位置,然后向邻域扩张.螺旋线状搜索方法可以大大提高合成的速度.

(4) 多种顺序合成纹理 文献[3]、[5]都采用了扫描线顺序来合成纹理,而该算法合成的顺序可以根据纹理的不同情况进行选择,一般对线状的种子沿种子线的方向进行合成;其他的可以选种子邻域的任一点开始,按螺旋线状顺序进行合成;也可以

从种子邻域的任一点开始,按其他顺序合成。

该算法可以简述如下:首先在原样图上进行反复采样,以随机或顺序方式把种子填到合成图中,然后从合成纹理画面上的预置种子位置开始,按照一定顺序,在样图中查找匹配点,每次合成一个点。具体为使匹配窗的中心与合成像素点重合,在样图上按螺旋线状顺序移动匹配窗,计算两匹配窗内图象的误差,若误差小于所设的门限,即把它写入合成图中。如此反复,直至填满合成图。

### 1.1 种子元与数量

种子元(以下简称种子)可以选取单一像素,也可以选取具有某种形状的像素集合。从计算方便考虑,一般采用 $N \times M$ 或 $N \times N$ 的矩形,有时根据需要也可以采用线状种子。种子数量则需要根据种子的形状、大小、合成纹理质量与合成速度综合考虑确定。

### 1.2 种子位置

种子位置的确定包括在样图中的采样位置以及在合成图中预置位置的确定。

对于一般的纹理,在样图中随机采样,然后随机写入合成图中。为避免前后写入的种子相互覆盖或粘连,而破坏合成效果,应使各种种子互有间隔一定距离。经过实验发现,选取 $\frac{w_i}{2} \leq d_i \leq w_i, \frac{h_i}{2} \leq d_h \leq h_i$ ,可以获得较理想的结果,这里 $d_i, d_h$ 分别为种子在水平方向和垂直方向的间隔距离, $w_i, h_i$ 分别为匹配窗的宽和高。

对于具有方向性的纹理,种子位置的选取要充分反映纹理沿某方向的变化信息,如纹理在垂直轴方向有明显变化,则沿垂直轴方向选取一些竖线作为种子,然后把它们顺序放置在合成纹理画面上,具体位置可以有少量随机扰动。

### 1.3 匹配窗

匹配窗一般为矩形,若匹配窗过大,不可避免地会造成计算量大,匹配窗过小,又不能准确合成纹理基元,所以匹配窗至少要覆盖纹理基元的大小。在实际应用中,要根据具体纹理确定。对于许多种纹理, $5 \times 5$ 大小的窗口就可以获得较理想的效果。对于某些纹理,可以用高斯函数对匹配窗内的各点进行加权,突出匹配窗中间点的信息。

### 1.4 螺旋线状匹配搜索

对文献[3]中的搜索匹配过程进行跟踪,发现在搜索到的匹配点中,其位置分布在上次合成匹配点邻域分布的概率较大,据此,在后续点的搜索过程

中,就不再从图象坐标零点开始,而是从前一点的匹配点的当前位置开始,由其邻域向外做螺旋线状搜索,若匹配误差小于设定的阈值,则搜索终止,把该点写至合成图中;若遍历了样图,仍未找到满足误差要求的点,则选取其中误差最小的点写入合成图中,如图2所示。与扫描线顺序的方法<sup>[3,5]</sup>相比,采用此搜索方式可以大大提高合成速度。螺旋线状搜索时,顺时针方向与逆时针方向获得的合成效果及耗时没有实质性的区别。

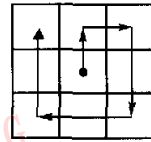


图2 螺旋线状搜索示意图

### 1.5 匹配合成算法

綜上述,匹配合成算法步骤如下:

- (1) 设定匹配窗宽、窗高、误差门限,搜索位置初始值置为种子点在原样图中的位置;
- (2) 是否填满合成图象?是,转第8步;否,转第3步;
- (3) 选取上一次匹配位置为开始搜索位置;
- (4) 计算匹配误差,并与门限比较,若大于门限,转第5步,若小于门限,转第7步;
- (5) 是否已遍历样图?是,选取误差最小点,转第7步;否,转第6步;
- (6) 选取当前搜索位置的邻点,转第4步;
- (7) 记录匹配点,写到合成图中,转第2步;
- (8) 结束。

### 1.6 后处理

对结构性纹理,合成后对各点进行扫描。若该点与其8邻域点有显著差异,则用其一邻域点覆盖该点,该处理可以消除由于种子安放不合理引起的噪声。

## 2 实验结果

用PC机(PⅢ550/256M)对一些纹理进行合成,图3中原图大小为 $64 \times 64$ pixels,合成图为 $128 \times 128$ pixels。可以看出,多种子纹理合成算法取得了理想的结果,速度也得到了很大地提高。表1列出图3中各纹理合成的一些实验数据,计算误差时在RGB空间进行。

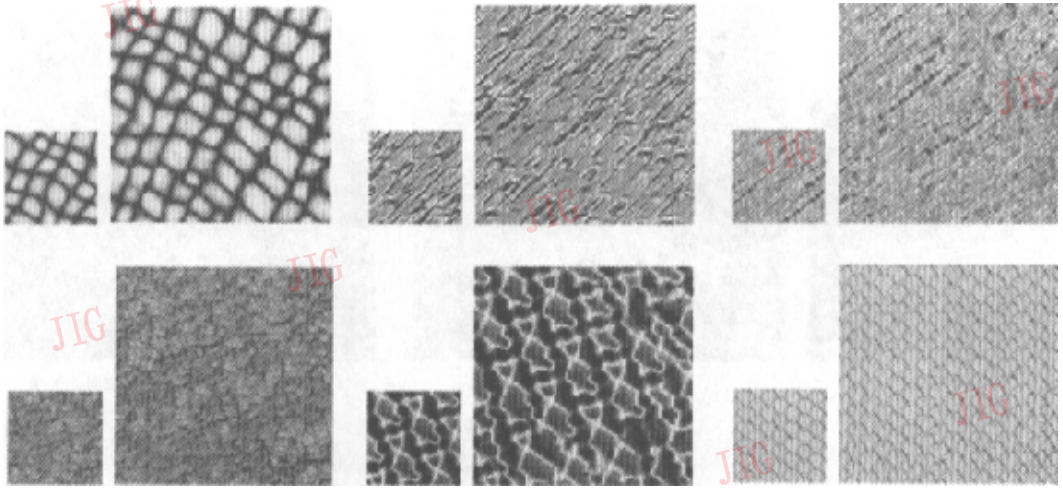
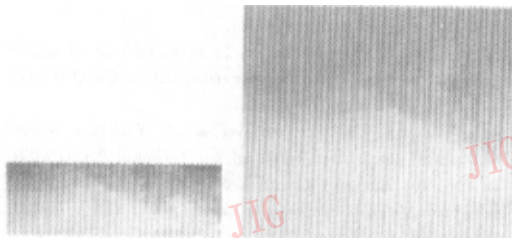


图 3 一般纹理合成,上边为原图,下边为合成图

表 1 合成纹理实验数据

	种子大小 (pixel)	种子数量	匹配窗大小 (pixel)	合成时间 (s)
图 3(a)	2×2	0	9×9	53
图 3(b)	3×3	60	5×5	20
图 3(c)	3×3	60	5×5	19
图 3(d)	2×2	50	9×9	61
图 3(e)	3×3	60	5×5	17
图 3(f)	2×2	60	5×5	22

图 4 是对国画云雾图的合成结果.因样本从上到下,从左到右都有亮度的变化,所以采用线性种子,调整采样间隔和种子块对,对合成结果的相似程度进行控制,合成结果令人满意.



(a) 国画云雾样本 (b) 云雾合成图

图 4 方向性纹理的合成

在实验中,发现该算法有以下规律:

(1) 对结构性纹理,采用多个点状或小矩形形状种子,按螺旋线状顺序合成,可以获得较好的合成效果,按其他顺序合成时则容易出现非连续点,视觉效果变差.另外,结构性纹理的种子不能过大,种子间

的间距也应适当扩大,否则合成效果会变差.

(2) 对非结构性或者说各向同性纹理,种子的形状、合成的顺序,对合成的结果影响不大.适当扩大种子大小,增加种子数量可以加速纹理合成.

(3) 在选择匹配误差时,可以选择误差阈值为  $k\sigma$ ,这里  $\sigma$  为输入样图的均方差, $k$  为由人工确定的浮点数.实际上,若  $k$  选得很小,则螺旋线状的匹配搜索会遍历输入样图中每个点,这时与文献[3]、[5]中按扫描线顺序搜索所耗的时间就差不多了.所以该算法比文献[3]、[5]算法更具有一般性,可以获得文献[3]、[5]中所有结果.对大多数纹理, $k$  取 2~6 可以获得较好的合成结果,速度也较快.

(4) 对方向性纹理,采用线状种子可以获得较好的合成结果,合成时,按种子线的方向顺序填写匹配点.种子的数量和匹配误差阈值的选择决定了合成图象与输入样图的相似程度.如在图 4 中,以多条垂直线作为种子,在水平和垂直方向,把它均匀分布到合成图中,先合成与种子线在同一线上的点,再按垂直方向合成邻近点.种子线若多,采样间隔小,则合成图与样图相似度高,反之,则相似度低.

(5) 计算匹配误差时,可以在 RGB 空间计算,也可以只计算匹配窗内各点的亮度误差,合成图象质量相差不大,如图 5 所示,但后者可以加快合成的速度.在图 3 的例子中,时间可以缩短 3~11s.图 5 中,原图大小为  $64 \times 64$ pixels,合成图为  $128 \times 128$ pixels,其他参数相同时,图 5(c)比图 5(b)快了 7s.

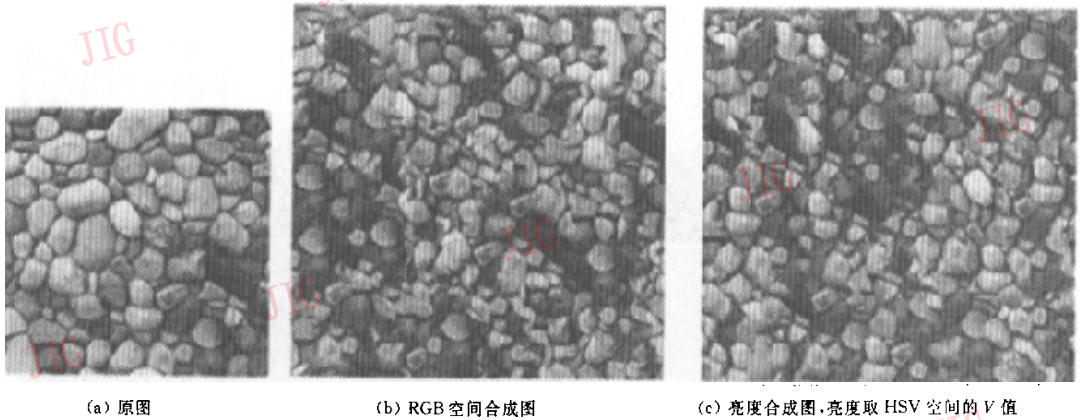


图5 不同空间纹理的合成

### 3 结论

采用多种子预填充以及螺旋状匹配搜索的纹理合成算法大大加快了纹理合成速度,合成速度比传统方法平均提高了360倍,且合成速度基本上与样图的尺寸无关,与文献[5]中复杂的加速方法相比,该算法简单,实现容易。此外,该方法将纹理合成的范围从一般纹理推广到有方向性的纹理,使纹理合成算法更具一般性。

在最新的文献[8]~文献[10]中,基于点匹配方法,在曲面上获得了很好合成结果。多种子纹理合成算法与文献[3]、[5]中的算法一样,也都是一种点匹配算法,因此可以推广到曲面的纹理合成。进一步将进行的是曲面纹理合成,视频纹理合成等方面的研究。

在非真实感绘制算法中,目前提出的方法大部分都需要建立各种笔刷数学模型,但这些模型均难以表现画家手绘独有艺术风格,采用多种子纹理合成算法可以很容易获得各种笔刷,且这些笔刷既与画家的手绘风格相似,又不是完全一致的拷贝,这就避免了数学建模的难题,使绘制结果更接近画家手绘的独有风格。在这方面已获得了初步的实验结果,相关论文将随后发表。

#### 参考文献

- 1 Witkin A, Kass M. Reaction-diffusion textures[J]. *Computer Graphics*. 1991, 25(7):299~308.
- 2 Dorsey J, Edelman A, Jensen W H *et al.* Modeling and rendering of weathered stone [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH 99*[C], Los Angeles, 1999, 225~234.
- 3 Efros Alexei A, Leung Thomas K. Texture synthesis by non-

parametric sampling [A]. In: *International Conference on Computer Vision*[C], Greece, IEEE press, 1999, 1033~1038.

- 4 De Bonet Jeremy S. Multiresolution sampling procedure for analysis and synthesis of texture images[A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH'97*[C], Los Angeles, 1997, 361~368.
- 5 Wei Li-Yi, Marc Levoy. Fast texture synthesis using tree structured vector quantization [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH'2000\_C*, New Orleans, 2000, 479~488.
- 6 Heeger D J, Bergen J R. Pyramid-based texture analysis/synthesis [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH'95* [C], Los Angeles, 1995, 229~238.
- 7 Xu Yingqing, Guo Baining, Shum Harry. Chaos mosaic: Fast and memory efficient texture synthesis[R]. Tech. Rep. MSR-TR-2000-32, Microsoft Research, 2000.
- 8 Turk Greg. Texture synthesis on surfaces[A]. *Proceedings of SIGGRAPH '2001*[C]. Los Angeles, 2001, 347~354.
- 9 Ying Lexing, Hertzmann Aaron, Biermann Henning *et al.* Texture and shape synthesis on surfaces [EB/OL]. <http://www.mrl.nyu.edu/~lexing>, May 2001.
- 10 Wei Li-Yi, Marc Levoy. Texture synthesis over arbitrary manifold surfaces [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '2001* [C]. Los Angeles, 2001, 355~363.
- 11 Efros Alexei A, Freeman William T. Image quilting for texture synthesis and transfer[A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '2001* [C]. Los Angeles, 2001, 341~347.
- 12 Liang Lin, Liu Ce, Xu Yingqing *et al.* Real-time texture synthesis by patch-based sampling[R]. Technical Report MSR-TR-2001-40, Microsoft Research, March 2001.
- 13 Ashikhmin Michael. Synthesizing natural textures[A]. In: *2001 ACM Symposium on Inter-active 3D Graphics* [C], NorthCarolina; Research Triangle Park, 2001, 217~226.



徐晓刚 1967年生,博士,副教授。目前研究方向为真实感和非真实感绘制技术、虚拟现实、图象处理、系统仿真等。



**于金辉** 1960 年生, 博士, 研究员, 研究方向为计算机辅助制作卡通动画、非真实感绘制技术、物体变形技术、计算机生成装饰物体、计算机书法、计算机美术、图象处理等。



**马利庄** 1963 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 国家杰出青年基金, 中国青年科技奖获得者, 国家“百千万人才工程”(第一、二层次)首批人选, 研究方向包括 CAD、CAGD、曲面重建及造型、计算机图形基础理论与算法、科学数据可视化。

## 第三届全国虚拟现实与可视化学术会议(CVRV'2003)

### 征文通知

由中国计算机学会虚拟现实与可视化技术专业委员会和中国图象图形学会虚拟现实专业委员会联合主办、国防科技大学承办的第三届全国虚拟现实与可视化技术及应用学术会议将于 2003 年 10 月 18~20 日在长沙/张家界举行。本次会议将集聚国内从事虚拟现实与可视化技术的研究人员和工程技术人员, 广泛开展学术交流、研究发展战略、推动成果转化、共同促进虚拟现实与可视化技术的发展与应用。本次大会的论文集将正式出版, 其中优秀论文将推荐到著名计算机刊物上发表。会议将邀请国内外著名专家作专题报告, 同时将举办科研成果和最新产品展示会, 为各研究开发单位及有关厂商展示自己的成果、产品提供场所。

#### 一、征文范围(包括但不限于)

建模技术	多媒体技术	分布式系统	虚拟制造	可视化地理信息系统
动画技术	人机交互技术	VRML 技术	人机工效	基于图象的视景生成技术
可视化技术	图形图象	空间化声音	网络技术	虚拟现实与可视化应用系统
遥操作技术	仿真技术	模式识别技术	VR 传感器技术	

#### 二、征文要求

- 1、论文未被其他会议、期刊录用或发表;
- 2、来稿一式三份, 并提交电子文档(word 格式)软盘, 同时接受电子投稿;
- 3、论文包含: 题目、中英文摘要、正文、参考文献等, 正式格式见论文录用通知;
- 4、投稿者请务必写清姓名、单位、通信地址、电话、及 E-mail 地址。

#### 三、重要日期

征文截止日期: 2003 年 5 月 15 日(收到); 录用通知日期: 2003 年 6 月 30 日(发出)

#### 四、会议网址

<http://vrlab.buaa.edu.cn/ccvrv2003>

#### 五、来稿联系方式(请注明 CCVRV2003 会议论文)

通信地址: 北京航空航天大学 6863 信箱 邮政编码: 100083  
 联系人: 吴 威 陈小武 电话: (010)82317109, 传真: (010)82317644  
 E-mail: ccvrv2003@vrlab.buaa.edu.cn