

交互式动态体绘制及其加速算法

刘保权 周明全 耿国华

(西北大学计算机科学系, 西安 710069)

(中国科学院软件研究所计算机科学开放研究实验室, 北京 100080)

摘 要 体绘制三维成像法是一门新兴的 3D 采样数据场可视化技术, 在医学成像和科学可视化领域有着极为广泛的应用. 但由于 3D 数据量大, 其使用往往受到巨大计算开销的限制, 因此很多研究人员致力于静态体绘制加速算法的研究. 为解决医学图象三维可视化中三维体数据显示速度与成像质量问题, 因而提出了一种交互式动态体绘制算法, 即从任意的视点距离和视线方向进行动态绘制, 并在分析其算法复杂度的基础上, 提出一种新的加速算法, 同时使得动态体绘制过程几乎达到实时的效果. 经验证, 这种算法比标准算法快 4~5 倍.

关键词 直接体绘制 3D 非一致性几何变换 3D 数据场 科学可视化 加速算法

中图法分类号: TP391.4 R445-39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)03-0223-06

Interactive Dynamic Volume Rendering and Its Accelerating Algorithm

LIU Bao-quan, ZHOU Ming-quan, GENG Guo-hua

(Department of Computer Science, North West University, Xi'an 710069)

(Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Volume rendering 3D imaging is a new technique for visualizing 3D arrays of sampled data. It has wide applications in areas such as medical imaging and scientific visualization. But due to vast computing quantity of volumetric data sets, its application has been limited by its high computational expense. At present, many researchers are working hard to the foundation of accelerating algorithms. In order to resolve the rendering speed and imaging quality problem in 3D Visualization of medical image, this paper present a interactive dynamic volume rendering algorithm, which is a rendering method from arbitrary viewing point distance and by arbitrary viewing ray direction, and then, basing on analyzing its algorithm complicity, proposes a accelerating algorithm. It apply the six features of 3D nonuniform transformation, and use the simple beeline marching and parallelogram marching instead of time-consuming matrix multiplication. This makes the volume rendering reach to almost real time efficiency. This method is four to five times faster than the standard one.

Keywords Direct volume rendering, 3D nonuniform transformation, 3D volumetric data, Scientific visualization, Accelerating algorithm

0 引 言

早期的体数据可视化, 往往采用面绘制 (Surface Rendering) 方法, 即通过先抽取中间几何图元, 如等值面 (IsoSurface), 然后再由传统的计算机图形学技术来实现这些等值面的显示^[1], 虽然构

造等值面可通过等值线连接法和 MarchingCube 法两种途径来完成, 但由于引入了等值面这样的中介, 就引入了人为因素, 故影响了面绘制成像结果的准确性, 同时由于面绘制这种间接绘制方法主要利用了等值面的分布信息, 即它无法反映数据场中所包含的整体信息, 故影响了成像的完整性. 80 年代末, Drebin 和 Lewy 等提出了直接体绘制方法, 该方法

直接用 3D 数据矩阵来产生图象,它具有成象质量高、可显示三维数据场的全局分布、整体结构及便于并行处理等优点,由于其极高的准确性和分辨率,因而在医学、地质、能源等许多科学可视化领域都有广泛的应用前景,特别是在医学领域更具潜力,因其一般要求在不对人体造成伤害的前提下得到人体解剖器官内部的三维结构. 80 年代后期以来,国内外虽发表了很多体绘制技术原理和方法的文章,但大都只是在一个固定的视线方向上来研究体绘制算法,可是在实践应用中,常需要对 3D 数据场进行一系列 3D Nonuniform 几何变换(3D 平移及绕任意 3D 轴向,并以任意角度旋转,不等比 3D 缩放),使其能以不同视角、不同视线方向、不同的视点距离来对 3D 数据场进行多方位的三维成象,以便医生进行全方位的观察与诊断.

本文首先提出了一种交互式的动态多方位体绘制算法,同时给出该算法复杂度的分析,然后进一步提出一种改进的加速算法,该算法已在微机平台上实现,其加速性能已得到了实验验证.

1 交互式动态体绘制实现方法

该体绘制系统采用两个窗口,在第 1 个窗口中,用 OpenGL 技术显示了一个可交互式旋转缩放的 3D 虚拟体数据,在此窗口中,用户可用鼠标任意旋转 3D 虚拟体数据,并可设置不同的缩放因子,同时可根据此经过 3D 几何变换的虚拟体数据的当前 3D 位置来设置观察方向和视点距离;在第 2 个窗口中,显示了对应此观察角度的体绘制结果图象. 本算法采用透视投影模式的光线投射法,并以图象空间为序进行绘制.

这里引入如下两个坐标空间:

① 物体空间(Object space) 指 3D 体数据场所定义的空间. 在其中建立本地坐标系,即物体坐标系(Object coordinates).

② 观察空间(View space) 根据视点定义的空间^[2],在其中建立观察坐标系(Eye coordinates),即以视点位置为原点,观察者将假定从坐标原点向 Z 轴负方向看,视点前方为 Z 轴的负方向,向上为 Y 正方向,向右为 X 正方向(见图 1).

算法分为如下 4 个步骤(流程图如图 2 所示):

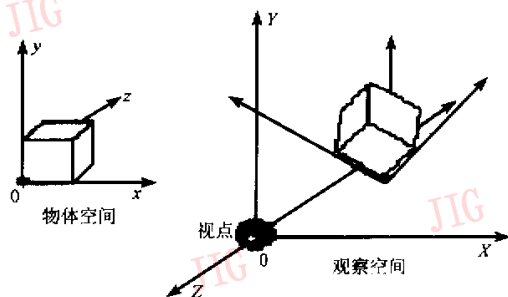


图 1 物体坐标系和观察坐标系

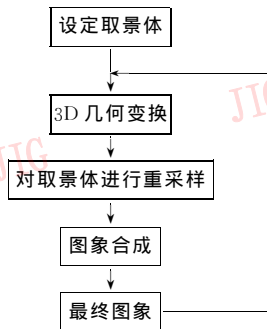


图 2 算法流程图

(1) 设定 3D 取景体 (Viewing Volume), 并建立观察坐标系 首先,运用 OpenGL 的透视投影法来设定 3D 取景体(见图 3),由图 3 可见,取景体为一个四棱台; l_{near} 为视点离近平面的距离, l_{far} 为视点离远平面的距离, W 为近平面的宽, H 为近平面的高, θ 为视角的大小;然后将 3D 数据场超出四棱台范围的部分剪裁掉,仅对落在四棱台内部的数据进行处理;最后,以此四棱台为观察空间建立观察坐标系,即以视点位置为原点,并以 Z 轴的负方向穿过两个底平面的中心^[3].

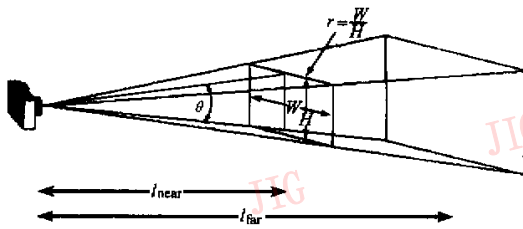


图 3 3D 取景体

(2) 对 3D 数据场进行一系列的 3D 几何变换,使之从物体坐标系变换到观察坐标系中^[2],即进行图 4 中的模视变换.

先从视点位置沿 Z 轴负方向平移到棱台中心,再经过用户的任意 3D 旋转;然后对体数据进行长、宽、高的不等比 3D 缩放;最后平移到 3D 体数据场

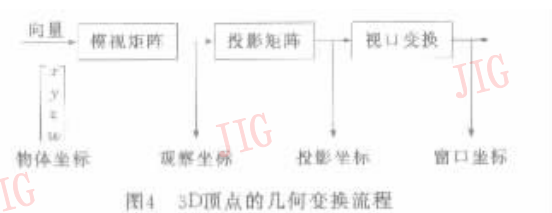


图4 3D顶点的几何变换流程

中心位置处。该步骤按先后次序共经历了4次变换,可用变换矩阵方式依次表达为: $T_D, R, S, T_{1/2}$ 。复合变换矩阵 $M = T_{1/2} \times S \times R \times T_D$ 。这样根据 M ,即可求出逆复合变换矩阵,即 M 的逆矩阵 M^{-1} 。设 P_o 为3D数据场中的点在物体坐标系中的坐标描述, P_e 为 P_o 变换到观察坐标系中对应的点,则有:

$$\begin{aligned} P_e &= M \times P_o \\ P_o &= M^{-1} \times P_e \end{aligned} \quad (1)$$

(3) 从视点发出射线对四棱台取景体进行3D重采样

首先,用逆变换计算四棱台中所有重采样点 P_e 在物体坐标系中的对应点 $P_o = M^{-1} \times P_e$,即将 P_e 的坐标描述,从观察坐标参考系变换到物体坐标系中;然后在物体坐标系中对每一点进行灰度插值,以得到采样点 P_o 的灰度值 $f(P_o)$ 。

(4) 用源衰减-反射模型来进行图象合成及光照计算,并生成最终图象^[4],再返回到步骤(2),以进行下一次绘制。对图象合成和光照计算分别说明如下:

① 图象合成 根据计算机成象中的前景遮挡效果,即可合成出最终成影面上的像素值,但要计算前景遮挡效果,就要给每一体素赋予不透明度值 α (或称为阻光度)。若 $\alpha = 1$,表示该体素完全不透明,它将完全遮挡其后的体素,即其后的所有体素对结果象素没有任何贡献;而 $\alpha = 0$,则表示该体素完全透明,它完全不遮挡其后的所有体素。另外, α 的取值范围应满足: $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

如图5所示,从视点沿某一象素点发出射线,根据前景遮挡效果,从后向前合成该射线上所有采样点的颜色值和不透明度值,以形成该象素点的最终颜色值 C 。设第 i 个体素的颜色值为 C_{now} ,不透明度值为 α_{now} ,进入第 i 个体素前的颜色值为 C_{in} ,其不透明度值为 α_{in} ,而经过第 i 个体素后的颜色值为 C_{out} ,其不透明度值为 α_{out} ,则有

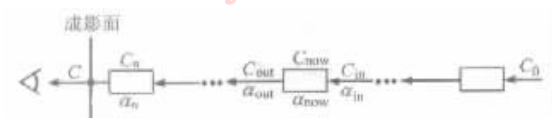


图5 图象合成算法示意图

$$C_{\text{out}} = C_{\text{in}}(1 - \alpha_{\text{now}}) + C_{\text{now}}\alpha_{\text{now}} \quad (2)$$

② 光照计算 计算机图形学中,光照计算一般应用于面绘制,为了增强图象的真实感^[1],本算法将光照计算公式加以修改,并应用到体绘制中。试验结果证明,光照计算效果可更加突出显示组织器官的边界面。一般在面绘制中,光照计算是基于面法向信息^[5]的,而在体绘制中,由于没有面的信息,因而必须求出等价法向,才能进行计算。本算法用各数据点的梯度矢量 G 来代替法向量,并用梯度矢量模 $|G|$ 的大小来表示该数据点位于器官边界的程度 ($|G|$ 为0,表示为内部点, $|G|$ 很大,则表示为边界点)。设三维数据场中某数据点的函数值为 $f(X_i, Y_j, Z_k)$ 表示,则梯度矢量 $G(x, y, z)$ 的计算公式为

$$\begin{aligned} G_x &= (f(X_{i+1}, Y_j, Z_k) - f(X_{i-1}, Y_j, Z_k)) / 2 \\ G_y &= (f(X_i, Y_{j+1}, Z_k) - f(X_i, Y_{j-1}, Z_k)) / 2 \\ G_z &= (f(X_i, Y_j, Z_{k+1}) - f(X_i, Y_j, Z_{k-1})) / 2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, G_i 表示取某一分量的运算。

为了增强绘制视觉效果的真实感,可在三维场景中加入多个光源,以对场景进行光照处理。此时生成的图象三维效果很强。此算法在光照模拟中首先将光线分为环境光、漫反射光和镜面反射光3种独立的成分,然后根据体绘制的特点,对面绘制中的照明计算加以修改,再分别对3种成分加以计算,并将所得结果相加,即得到场景总的光照效果。图6(b)为加上光照的绘制结果图象,图6(a)为未加光照计算生成的结果图象。由该两图比较可见,加入光照可使得体数据的三维层次信息表现得更加丰富。

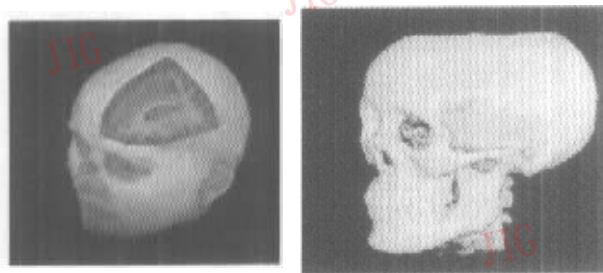


图6 用加速算法生成的结果图象

2 算法复杂度分析

纵观整个算法流程,最耗资源(时间、内存)的是第(3)步,即对取景体进行3D重采样处理。该算法首先要对取景体中的每一点进行如下矩阵变换乘法运算: $P_o = M^{-1} \times P_e$, 其中, M^{-1} 为 4×4 齐次矩阵,此步

计算需要 16 次乘法, 12 次加法^[5]; 其次, 在物体空间中, 对每一采样点进行灰度级插值, 以得到 P_0 点的灰度值, 如用三线性插值, 共需要 7 次乘法, 14 次加法^[6]. 试验用到的 CT 数据大小为 $256 \times 256 \times 69$, 这样总的运算量为 $(16+7) \times 256 \times 256 \times 69$ 次乘法, $(12+14) \times 256 \times 256 \times 69$ 次加法, 这正是耗时所在, 因为 CPU 对乘法的运算速度比加法慢得多, 所以应设法减少乘法的运算次数, 如对于灰度级插值, 可把三线性插值简化为最近邻插值, 这样虽然可减少运算量, 但生成的图象有明显的畸变走样. 笔者认为, 为保证图象质量, 应仍然采用三线性插值来实现灰度级插值, 为降低时耗, 应该用新的方法来替代最费时的矩阵乘法.

3 加速算法

由于平移和旋转都是刚体变换, 不会改变图元的形状和大小, 而不等比缩放是非刚体变换 (即非一致性变换), 将会改变图元的形状和大小, 因此本文首先分析图元经过一系列基本的三维几何变换后所具有的 6 个特性, 然后根据这 6 个特性, 提出更快的逆变换算法. 图元在一系列基本的 3D Nonuniform 几何变换过程中始终保持的 6 个特性 (以下符号, 带上标“'”的表示物体坐标系中的点, 不带上标的表示观察坐标系中的点) 为:

- ① 直线性保持不变, 即直线经变换后仍是直线, 而不会变成折线或曲线;
- ② 两条等长线段, 经变换后可能不再相等;
- ③ 两直线段的夹角大小可能会变;
- ④ 直线的平行性保持不变;
- ⑤ 直线段在长度上只能是均匀变化, 即线段 AB 上任一点 P , 经变换后得到的 P' , 其对 A' 和 B' 的相对距离不会改变, 即 $AP/PB = A'P'/P'B'$;
- ⑥ 正方形至少能变成普通的平行四边形, 即不会变成不规则四边形.

依据这 6 个特性可知, 在观察坐标系中, 3D 数据场经复合几何变换后, 再经 3D 剪裁, 即形成四棱台, 其逆变换回到物体空间后, 所得到的六面体形状为: 两个底面为普通平行四边形, 且互相平行, 但 4 条侧棱各不相等. 实验数据表明, 的确如此. 变换过程如图 7 所示.

根据光线投射算法, 变换过程就是首先在观察坐标系中, 向四棱台发出 $W \times H$ 根射线, 然后在每根射线上等距采样 $k = (l_{\text{far}} - l_{\text{near}})$ 个点 (即

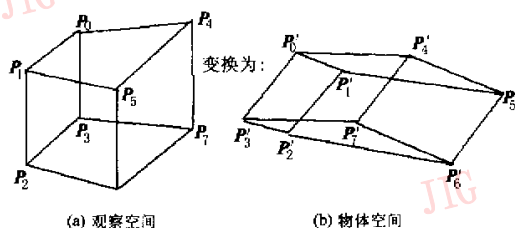


图7 四棱台逆变换回到物体空间

$P_i, z - P_{i+1}, z = 1$), 同时, 计算每一个采样点 P_i 在物体空间中的坐标描述 P'_i , 如图 8 所示.

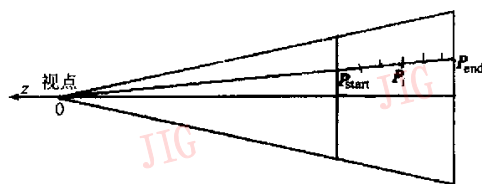


图8 每根射线上的光线投射

根据上述图元的 6 个变换特性可知, 因为直线段 $\overrightarrow{P_{\text{start}}P_{\text{end}}}$ 变换到物体坐标系中仍为直线段, 如将 P_{start} 到 P_{end} 之间的 k 个等间距采样点 P_i 变换到 P'_{start} 和 P'_{end} 之间 P'_i 时, P'_i 沿直线 $\overrightarrow{P'_{\text{start}}P'_{\text{end}}}$ 也呈等间距分布, 所以逆变换时, 只需计算出 P'_{start} 和 P'_{end} , 就可计算出在 $\overrightarrow{P'_{\text{start}}P'_{\text{end}}}$ 方向上的步进值

$$\begin{aligned} d_x &= (P'_{\text{end}}.x - P'_{\text{start}}.x) / k; \\ d_y &= (P'_{\text{end}}.y - P'_{\text{start}}.y) / k; \\ d_z &= (P'_{\text{end}}.z - P'_{\text{start}}.z) / k; \end{aligned} \quad (4)$$

进而就可得出 P'_{start} 和 P'_{end} 之间的所有 k 个采样点的物体坐标描述 $P'_i (1 \leq i \leq k)$

$$\begin{aligned} P'_i.x &= i \times d_x + P'_{\text{start}}.x; \\ P'_i.y &= i \times d_y + P'_{\text{start}}.y; \\ P'_i.z &= i \times d_z + P'_{\text{start}}.z; \end{aligned} \quad (5)$$

此逆变换法称为直线段步进法. 如用直线段步进法来代替矩阵乘法进行 3D 逆几何变换, 则 P'_{start} 和 P'_{end} 之间的每一个采样点不再需要费时的矩阵运算, 此直线段步进法的运算量仅为 3 次乘法、3 次加法, 与常规的矩阵乘法的 16 次乘法、12 次加法的运算量相比, 真是天壤之别.

4 进一步的加速算法

该算法为在两个底面平行四边形中运用平行四边形步进法的加速算法.

由于以上提出的加速算法,仍需要运用矩阵乘法把两个底面长方形上的 $2 \times W \times H$ 个采样点逆变换到物体坐标系中,可是仅其余的点用直线段步进法实现逆变换,计算量仍较大,因此需要进一步加速.同样根据 3D 几何变换的特性可知,两个长方形底面变换到物体空间中后,就成为两个平行四边形(如图 9 所示).

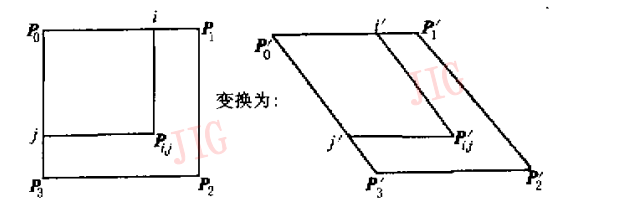


图 9 平行四边形步进法

若长方形中的一点 $P_{i,j}(0 \leq i \leq W, 0 \leq j \leq H)$ 变换为 $P'_{i,j}$, 则 $P'_{i,j}$ 在 i' 和 j' 两个方向上呈等间距分布. 根据 6 个特性中的特性⑤可得出下列公式:

在 $P_0P'_1$ 方向(i' 方向)上的步进值为

$$\begin{aligned}d_{x_i} &= (P'_1.x - P'_0.x)/W \\d_{y_i} &= (P'_1.y - P'_0.y)/W \\d_{z_i} &= (P'_1.z - P'_0.z)/W\end{aligned}\tag{6}$$

在 $P_0P'_3$ 方向(j' 方向)上的步进值为

$$\begin{aligned}d_{x_j} &= (P'_3.x - P'_0.x)/H \\d_{y_j} &= (P'_3.y - P'_0.y)/H \\d_{z_j} &= (P'_3.z - P'_0.z)/H\end{aligned}\tag{7}$$

所以可计算出平行四边形上的每一采样点 $P'_{i,j}$ 的物体坐标描述如下

$$\begin{aligned}P'_{i,j}.x &= i \times d_{x_i} + j \times d_{x_j} + P'_0.x \\P'_{i,j}.y &= i \times d_{y_i} + j \times d_{y_j} + P'_0.y \\P'_{i,j}.z &= i \times d_{z_i} + j \times d_{z_j} + P'_0.z\end{aligned}\tag{8}$$

此时每个平行四边形的步进值只用算一次,就可由式(8)算出此平行四边形上的任意采样点 $P'_{i,j}$ 的坐标值,其运算量为 6 次乘法 6 次加法.

整体上来看,对图 7 上各点只用对 $P'_0, P'_1, P'_3, P'_4, P'_5, P'_7$ 这 6 个点运用矩阵乘法,其余的采样点分为如下两类:一类是两个底面之间的所有采样点使用直线步进法(3 次乘法,3 次加法);另一类是两个底面上的所有采样点用平行四边形步进法(6 次乘法,6 次加法).

注意:平行四边形步进法同双线性插值不同,因为双线性插值是在直角坐标系中,对正交网格进行插值,而平行四边形步进法是在直角坐标系中对非正交

网格(即平行四边形)上的点进行快速坐标值计算.

5 实验结果

在微机(CPU:Pentium II 400,内存:192M)环境下,采用 Visual C++ 结合 OpenGL 进行编程,用本算法对 $256 \times 256 \times 69$ 规模的 CT 或 MRI 数据进行了实验,使用加速算法和未使用加速算法生成每帧图象的时间比较见表 1. 标准算法指参考文献[1]中阐明的公认算法.由于加速只是针对重采样中的 3D 逆几何变换进行,而并未改变光线投射的图象合成过程,因而使用加速算法和不使用加速算法所生成的图象,在质量上完全一致(见图 6).

表 1 使用不同算法生成每帧图象时间对比 单位:s

	标准算法	使用直线段步进法	使用直线段步进法和 平行四边形步进法
未加光照	4~6	1~2	0~1
加光照	7~8	2~3	1~2

6 结 论

本文提出了一种新的交互式动态体绘制加速算法,该算法充分利用了 3D 几何变换的 6 个特性,并采取透视投影模式的光线投射法和以图象空间为序的体绘制方法,还运用简便的直线段步进法和平行四边形步进法代替了复杂的矩阵乘法,本算法的特点是速度快,结果不仅使体绘制速度提高了 4~5 倍,并且成象质量高.另外,对于其他体绘制途径(如:以物体空间为序的平行投影模式光线投射法^[7]),这种加速算法也照样适用,因为这些方法在重采样时,也要用到 3D 逆几何变换^[1].

参 考 文 献

- 唐泽圣. 三维数据场可视化[M]. 北京:清华大学出版社,1999:7~78.
- 唐荣锡,汪嘉业,彭群生. 计算机图形学教程[M]. 北京:科学出版社,1990:78~117.
- Clayton Walnum. 3-D graphics programming with openGL[M]. Macmillan USA:Que Corporation, 1992:65~106.
- 石教英,蔡文立. 科学计算可视化算法与系统[M]. 北京:科学出版社,1996.
- Donald Hearn, Baker M P. Computer graphics [M]. New Jersey,USA:Prentice-Hall International Inc. 1996:302~352.
- Kenneth R C. Digital image processing[M]. New Jersey,USA: Prentice-Hall International Inc. 1996:117~119.

7 Philippe G L. Fast volume rendering using a shear-warp factorization of the view transporation[M]. Stanford University: Software Publishing Corp, September 1995:183~207.

刘保权 1975 年生,1998 年毕业于西
北大学计算机科学系,现为该系计算机软
件专业硕士生.主要研究领域为可视化技
术、计算机图形学、图象处理.

周明全 1954 年生,西北大学计算机
科学系教授,博士生导师.主要研究领域为
可视化技术、计算机图形学、图象处理.

耿国华 1955 年生,西北大学计算机
科学系教授.主要研究领域为算法分析与
设计、人工智能与信息系统、科学计算可
视化.

2002 年中韩日“国际遥感学术研讨会”

征 稿 启 事

2002 年中韩日“国际遥感学术研讨会(ISRS2002)”(第十八届“韩国遥感协会(KSRS)学术研讨会”、第十一届日韩“东亚环境遥感监测(EMSEA)学术年会”、第八届“KOMPSAT-1 应用交流会”、第五届中韩“空间信息技术促进可持续发展(SITASuD)学术研讨会”)将于 2002 年 11 月初在韩国举行,会期 3 天.中国科学技术部国家遥感中心(技术培训部)作为该会议中方组织单位,将选派中方专家组参加该次会议.为了提高论文质量,展示我国在 3S(遥感、GIS、GPS)技术应用领域的新进展,现公开征稿,欢迎广大遥感及其相关领域的人士踊跃投稿.

中方组委会将推荐优秀论文在会议论文集上发表,并筛选其中 5 篇在 Journal of KSRS 上发表.优秀论文作者将被邀请参加会议,免注册费.根据中韩空间信息技术合作协议,韩国电子通信部和韩国遥感协会将资助部分优秀论文作者参会(包括国际旅费和会议期间食宿费),需要争取该资助的作者,请在提交论文摘要时附上申请书.

1. 重要日期:

- * 2002 年 5 月 31 日前提交论文摘要(中英文)
- * 2002 年 6 月 15 日前通知入选作者提交论文全文
- * 2002 年 8 月 31 日前提交论文全文(英文)
- * 2002 年 9 月 15 日前发参会正式通知
- * 2002 年 10 月 20 日前后参会人员论文试讲

2. 论文主题:

3S 技术在气象资源、海洋资源、土地资源、矿产资源、水资源、生物资源等方面的调查与开发、国土资源规划管理、环境和灾害监测、城市规划等应用领域的新方法和新成果,以及 3S 技术在促进区域可持续发展中的应用,遥感图像处理等.

3. 提交方式:

以电子文档形式发往下面的 Email 地址(推荐)或邮寄,请写明作者的通讯地址、电话、传真及 Email 地址等.

4. 联系方式:

联系人:朱高龙先生 地址:北京大学遥感所(100871) 电话:010-62757394 Email:zhugaolong@water.pku.edu.cn