

有限衍射超声三维成像及其表面重建方法

刘立庄 卞正中 李 彬

(西安交通大学生命科学与技术学院, 西安 710049)

摘要 为了正确快速地进行超声三维图像重建, 讨论了有限衍射波束三维脉冲回波成像新方法, 即使用有限衍射阵列声束一次发射成像, 不仅成像区域声束不会发生扩散, 而且可得到高信噪比、高帧率的超声三维图像。针对成像后由获取的数据归一化形成的空间散乱数据场, 提出了一种新的插值三维重建算法, 该算法从散乱数据场中自动提取边界, 首先构造出一个辅助曲面, 然后通过一种特殊的 Hermite 插值, 在数据点的矩形作用域集合内, 对辅助曲面进行变形, 进而得到最终的插值曲面。实验结果表明, 由于该算法无须三角剖分, 因而计算速度快, 且光顺效果好。

关键词 有限衍射阵列波束 脉冲回波成像 表面重建 Hermite 插值

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)07-0810-05

3D Ultrasonic Imaging with Limited Diffraction Array Beams and its Surface Reconstruction

LIU Li-zhuang, BIAN Zheng-zhong, LI Bin

(School of Life Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract In this paper, 3D pulse-echo imaging with limited diffraction array beams is presented. Because only one transmission is required to construct 3D images, and the entire transducer aperture is used and both the transmission and reception beams do not diverge over a large depth of interest. The images obtained with limited diffraction array beams have a higher SNR and high frame rate compared to images obtained with conventional focused beams. Data acquired is transformed into spatial scattered data by normalizing. A new algorithm of surface construction is proposed. An assistant surface is constructed on the base of boundary that being automatically extracted from the scattered data. In the aggregate of rectangle fields of data, the assistant surface is modified to get the final surface by a piecewise bicubic Hermite interpolation. In the experiment, computer simulation of the imaging method with limited diffraction array beams has been carried out. A plane wave is used. At the same time, a single surface is reconstructed with the new reconstruction method described in this paper. However, to confirm validity a sphere and a face data acquired by laser are used to reconstruct. Results show that the algorithm has run short time, good fairness, without triangulation.

Keywords limited diffraction array beams, pulse-echo imaging, surface construction, Hermite interpolation

1 引言

有限衍射波束^[1]是由 Stratton 在 1941 年最先提出, 他从各向同性的自由空间标量波动方程中推导出了 Bessel 解。1987 年, Durnin 等人又仔细研究了 Bessel 波束, 并用光学实验的方法近似产生了该波束, 并证明了与此解对应的波束具有近似的无衍射特

性^[2]。之后, Jianyulu 等人对其在声学中的应用做了大量研究^[3,4], 鉴于任何可物理实现的波束最终都要发生衍射, 他把该波束称为有限衍射波束。这种有限衍射波束的一个重要特征就是, 理论上该波束可以传播无限远的距离而不改变其横向轮廓, 在实际应用当中, 由有限孔径产生的有限衍射波束与球面聚焦声束相比, 由于具有更大的声场深度, 因此, 有限衍射波束在超声三维成像中具有良好的应用前景。

本文研究了基于有限衍射阵列波束的高速三维脉冲回波成像方法。鉴于该方法最终得到的数据可以由空间散乱数据的形式表达,因此本文提出了一种新的表面重建方法,即首先根据采样的空间散乱点来构造出辅助曲面的 4 个角点,然后由这 4 个角点插值出辅助曲面的 4 条边界曲线,最后通过这 4 条曲线构造出相应的辅助曲面。此时,即可得到对应于辅助曲面每一个数据点的 u, w 值以及点到曲面的距离。如果在 U, W 参数曲面上分别对实际数据点的 u 和 w 值进行排序,并构造出每一点的作用域,则每一个作用域均可用一种特殊的 Hermite 插值来构造出一个曲面片,并使数据点正好位于这个曲面片上。对于插值曲面上任意一点可由覆盖该点的所有曲面片插值累加得到。

2 理 论

2.1 限衍射阵列波束成像

有限衍射阵列波束可以由 X 波束推导出。有关 X 波束, Lu 和 Greenleaf 等人做了很多研究,其中适合高帧率成像的宽带有限衍射阵列波束^[5]具有以下表达式:

$$\Phi_A(\mathbf{r}, t) = \int_0^\infty B(k) \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(kr \sin \zeta) e^{in(\varphi - \theta)} \right] \times e^{-k(a_0 - i \cos \zeta(z - ct))} dk \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{r} = (r, \varphi, z)$ 代表柱坐标系下空间一点, t 表示时间, r 为半径, φ 是极角, z 为轴向距离, $k = \omega/c$ 表示角波数, $\omega = 2\pi f$ 是角频率, f 是瞬时频率, c 是声速, ζ 是 Axicon 角 ($0 \leq \zeta \leq \pi/2$), $c_1 = c/\cos \zeta$, $J_n(\cdot)$ 是 n 阶第 1 类贝塞尔函数, $B(k)$ 表示实际超声换能器的传输函数, a_0 是决定 X 波束高频分量衰减速度的常量。

得到有限衍射阵列波束后,就可以通过有限衍射阵列波束求出回波信号和三维图像之间的关系。理论推导有限衍射阵列波束是假设由无限大孔径产生,实际上,在一定声场深度使用有限孔径的换能器也能比较好地重建图像。

重建图像时,首先,在声速恒定的情况下,采用平面脉冲波激励二维宽带换能器,激励波有如下形式:

$$P(z - ct) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(k) e^{ik(z-ct)} dk \quad (2)$$

然后用同样的换能器阵列接收回波信号,并且在接收端,如果由 k_x, k_y 加权产生有限衍射阵列波束,那么位于点 (x, y, z) 处的响应可以写成

$$R_{k_x, k_y, \hat{k}_z}^{(\text{one})}(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r}) [P(z - ct) * \Phi_A(\mathbf{r}, t)] \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A(k) T_r(k) H(k)}{c} f(\mathbf{r}) \times e^{ik_x x + ik_y y + i\hat{k}_z z} e^{-i\omega t} dk \quad (3)$$

其中, $*$ 表示卷积, $\hat{k}_z = k_z + k$, (one) 代表单点。由于成像系统是一个线性系统,因此散射点的回波信号就是各个点的回波信号的线性叠加,即有下式:

$$R_{k_x, k_y, \hat{k}_z}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A(k) T_r(k) H(k)}{c} \left[\int f(\mathbf{r}) e^{ik_x x + ik_y y + i\hat{k}_z z} d\mathbf{r} \right] e^{-i\omega t} dk \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A(k) T_r(k) H(k)}{c} F(k_x, k_y, \hat{k}_z) e^{-i\omega t} dt \quad (4)$$

$$f(\mathbf{r}) = \frac{1}{2(\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y, \hat{k}_z) e^{-ik_x x - ik_y y - i\hat{k}_z z} dk_x dk_y d\hat{k}_z \quad (5)$$

V 是成像物体 $f(\mathbf{r})$ 体积; $H(k)$ 保证只取单边,即 k 取大于零的值, $A(k) T_r(k)$ 是阵列换能器的传输函数,可以取 Blackman 窗函数。

从式(4)接收信号的瞬时傅里叶变换(谱)可以得到

$$\tilde{R}_{k_x, k_y, \hat{k}_z}(\omega) = \frac{A(k) T_r(k) H(k)}{c^2} F(k_x, k_y, \hat{k}_z) \quad (6)$$

$$F_{\text{BL}}(k_x, k_y, \hat{k}_z) = A(k) T_r(k) F(k_x, k_y, \hat{k}_z) \\ = c^2 H(k) \tilde{R}_{k_x, k_y, \hat{k}_z}(\omega) \quad (7)$$

其中, F_{BL} 表示有限带宽,对式(7)求反变换,就可近似得到如下重建图像的函数:

$$f(\mathbf{r}) \approx \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \int_{k \geq \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} d\hat{k}_z F_{\text{BL}}(k_x, k_y, \hat{k}_z) e^{-ik_x x - ik_y y - i\hat{k}_z z} \quad (8)$$

2.2 重建算法

2.2.1 构造边界曲线

由散乱数据点构造曲面首先要确定曲面的边界。为了自动提取曲面边界和提高计算精度,本文提出了四角点构造边界曲线的算法。该方法主要分为如下两步:(1) 确定曲面的初始边界及初始边界点列;(2) 根据初始边界和点列从纯几何的角度上提取出边界曲线。

提取边界曲线时,首先根据曲面重心和曲面近似法矢确定出曲面的大致空间位置,其中曲面重心可以简单地使用所有数据点距离的平均值点,然后由此可以确定出曲面的 4 个角点,即将距离曲面重

心距离最远的数据点作为角点 P_1 , 角点 P_2 是距离曲面重心和角点 P_1 距离最远的数据点; 依次类推, 可以求出角点 P_3, P_4 (如图 1 所示)。曲面近似法矢 n 是在求出曲面角点的基础上由下式得到的

$$n = \frac{\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_3P_4}}{|\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_3P_4}|} \quad (9)$$

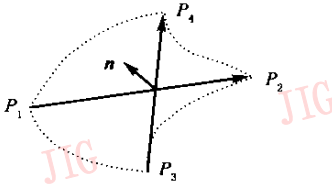


图 1 曲面大致空间位置

初始边界可由每两个相邻角点直接相连确定, 并保留与初始边界距离小于距离平均值的数据点作为初始边界点列, 同时对初始边界点列排序。这样初始边界及其点列中就不仅包括了边界点在的散乱点集, 且初始边界点列中也包含了许多导致边界曲线不光顺的数据点, 必须剔除。最后将边界点列映射到由曲面近似法矢以及重心所确定的平面上, 即形成一个二维点集 (如图 2 所示), 而在这些点集中还包含了凸点和凹点, 其判别的准则是

$$\theta = \cos^{-1}(\frac{((P_{i+1}-P_i) \times (P_{i+1}-P_{i+2})) \cdot n}{|((P_{i+1}-P_i) \times (P_{i+1}-P_{i+2}))|}) \quad (10)$$

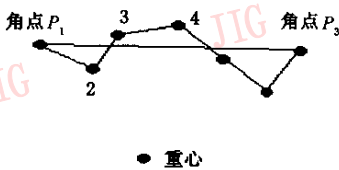


图 2

当 θ 角小于 90° 时, 则认为是凸点, 反之则是凹点 (i 表示边界点列的第 i 个数据点)。其中对于凸点可以完全保留, 而对于凹点则不能简单地完全去除, 为了符合实际的曲线几何特征, 应保留 $\cos^{-1}(\frac{((P_{i+1}-P_i) \times (P_{i+1}-P_{i+2})) \cdot n}{|((P_{i+1}-P_i) \times (P_{i+1}-P_{i+2}))|})$ 大于阈值角度的数据点。一般阈值角度至少应大于 90° , 但它的选择应考虑具体的曲面的几何特征和数据的密度。经过这样处理后的点集就基本属于曲面边界点集 (如图

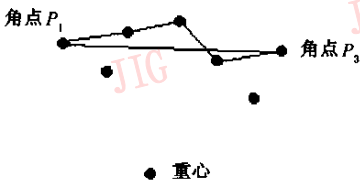


图 3

3 所示), 虽然进行插值的样条曲线也能够保证曲线的光顺性, 并符合原有曲面的边界性质, 但是仍然存在少数使曲线不光顺的数据点, 其可使用选点光顺法, 通过进一步处理边界来得到光顺的边界曲线。在上述处理过程中, 如果存在有距离初始边界较远的数据点, 那么可采用由角点和此点构成的圆弧来代替初始边界, 并重新确定初始点集; 也可采用以初始边界为中心的搜索法来确定初始边界。

2.2.2 构造辅助曲面

辅助曲面是指对由 4 条边界曲线所围成的封闭环进行填充而得到的曲面, 如图 4 所示曲线 1, 2, 3 和 4 表示曲面的边界, 即将曲线 1 沿曲线 2 和曲线 4 渐变到曲线 3 所形成的曲面。构造曲面时, 首先将 2 条对应的曲线, 如曲线 2, 4 等分为 n 等份; 然后建立曲线 1 首节点处的局部右手坐标系 T_1 , 并将坐标系 T_1 中 x_1 的方向设为曲线 1 首尾节点矢量的方向, 并标准化为 1。

$$x_1 = \frac{(f_1(1) - f_1(0))}{|f_1(1) - f_1(0)|}$$

$$d = f_1'(0)$$

$$y_1 = d \times x_1 / |d \times x_1|$$

$$z_1 = x_1 \times y_1$$

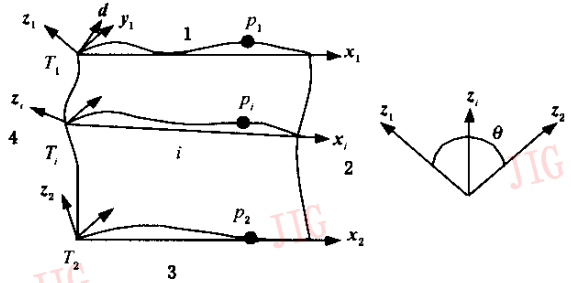


图 4 辅助曲面构造图

同理可得, 曲线 2 首节点处的局部右手坐标系 T_2 。

最后再构造出 $n-2$ 条渐变线, 设第 i 等份渐变曲线上一点 p_i 是曲线 1 上节点 p_1 渐变到曲线 3 上节点 p_2 的对应点。 $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_i$ 是 p_1, p_2, p_i 点在其局部坐标系中的坐标点。 T_1, T_2 是全局坐标系转换到坐标系 T_1, T_2 的转换矩阵, 用下式运算, 则可得到 \hat{p}_i 的值:

$$\hat{p}_1 = T_1 \cdot p_1$$

$$\hat{p}_2 = T_2 \cdot p_2$$

$$w = (\hat{p}_2 - \hat{p}_1) / (n - 1) \quad (11)$$

$$\hat{p}_i = w \cdot i + \hat{p}_1$$

其中, w 是 \hat{p}_1, \hat{p}_2 转变的权值向量。

T_i 坐标系的 x_i 坐标轴由曲线 2, 4 的第 i 等分点确定; z_i 坐标轴则由坐标轴 z_1 向 z_2 旋转 θ/i 角 ($\cos^{-1}(z_2, z_1)$, z_1 和 z_2 间的夹角) 得到。由此即可得到由坐标系 T_i 转换到全局坐标系的转换矩阵, 进而可得到全局坐标系下的 p_i 值: $p_i = T_i \cdot p_i$, T_i 为局部坐标系 T_i 转换到全局坐标系的转换矩阵。

类似可由曲线 1 和曲线 3 上的节点值得到渐变曲线 i 上每一个节点值, 这样即得到了第 i 等份处的渐变线。按照上述算法就可以得到曲线 1 沿曲线 2、曲线 4 渐变到曲线 3 的 $n-1$ 个渐变曲线。再将这 n 条曲线按弧长等分为 $m-1$ 段, 即构成一个 $n \times m$ 网格, 其重新参数化后构造出的一个样条曲面, 即是辅助曲面。它与实际数据曲面的几何特征有着较大的差异, 因其只是包含了实际数据曲面的边界特征。在构造辅助曲面时, 边界曲线的光顺性是保证曲面光顺性的关键因素之一, 而扭曲变形的辅助曲面将会造成最终插值曲面的变形。

2.2.3 构造插值曲面片

本文采用的基于 Hermite 插值的数据点作用域是由 u 的左右边界和 w 的上下边界组成的矩形作用域, 它的构造方法是: 设一数据点, 沿它的 U, W 方向分别搜寻其他的数据点, 并将距离最近的数据点作为它的边界。如果不存在其他的数据点, 则说明已经搜索到了定义域的边界, 若把这个数据点再加上一个增量作为边界, 即说明作用域扩展出了定义域范围。

由于构造参数平面上的作用域必须已知数据点对应在曲面上的 u, w 值以及数据点到曲面的距离 z 值, 这在散乱点测量中是很难得到, 因此, 本文在构造辅助曲面的基础上通过间接得到 u, w 和 z 值来构造作用域。

由辅助曲面的构造方法可知, 由于辅助曲面与实际测量曲面的几何特征并不完全相同, 因此, 本文采用数据点在辅助曲面上构造矩形网格, 即在辅助曲面上来构造数据点的作用域集合。通过 Hermite 插值可求出辅助曲面与数据点之间的 z 坐标变形量, 进而可矫正辅助曲面到最终的插值曲面。为了构造数据点的作用域, 应将所有数据点投影到辅助曲面来得到数据点的 u 及 w 值和数据点到辅助曲面之间的距离, 以便构造出整个作用域集合。

每一个作用域的插值曲面共由 4 张曲面片构成 (如图 5 所示)。对每一张曲面片, Hermite 插值不仅在数据点之间插值, 而且在其切矢之间插值^[6]。考虑在应用中, 由于数据点往往在局凸点和凹点上, 因此

数据点上的插值曲面片的切矢可设为零, 同时也保证了曲面 G^1 的连续。这样插值曲面 z 值在定义域的边界处会突然降为零, 为了使 z 值接近距离定义域边界处的数据点, 必须将作用域集合扩展到定义域之外。

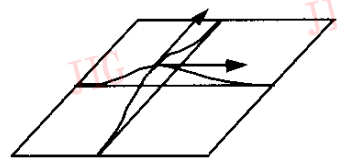


图 5 作用域上的插值曲面

Hermite 插值的基本形式见参考文献[7]。根据文中插值面片的构造方法, z 值推导如下:

$$z = \sum_{i=1}^n z_i (1 - 3t_1^2 + 2t_1^3)(1 - 3t_2^2 + 2t_2^3) \quad (12)$$

$$t_1 = \begin{cases} \frac{u - u_i}{u_{i_2} - u_i} & (u \geq u_i) \\ \frac{u_i - u}{u_{i_2} - u_i} & (u < u_i) \end{cases} \quad t_2 = \begin{cases} \frac{w - w_i}{w_{i_2} - w_i} & (w \geq w_i) \\ \frac{w_i - w}{w_{i_2} - w_i} & (w < w_i) \end{cases}$$

式中, z_i 为第 i 个数据点的 z 值; u_{i_1}, u_{i_2} 分别为作用域数据点 u 值的上界和下界; w_{i_1}, w_{i_2} 分别为作用域数据点 w 值的上界和下界。由此可知, 在单张曲面片上, 由于数据点的屏蔽作用, 致使与数据点重合的角点的 z 值和数据点的 z 值相同, 其余角点的 z 值均为 0, 因此作用域 z 值的叠加不会改变数据点上的 z 值。

由此就可以得到以下最终数据曲面 (参见图 6):

$$p(u, w) = z(u, w) \cdot n(u, w) + f(u, w) \quad (13)$$

其中, $n(u, w) = \frac{(\partial f(u, w) / \partial u) \times (\partial f(u, w) / \partial w)}{|(\partial f(u, w) / \partial u) \times (\partial f(u, w) / \partial w)|}$, $f(u, w)$ 是辅助曲面。

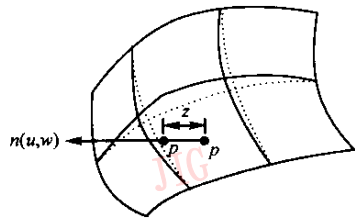
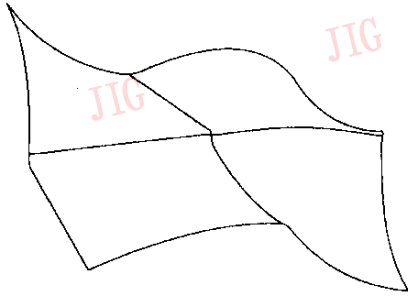


图 6 构造曲面

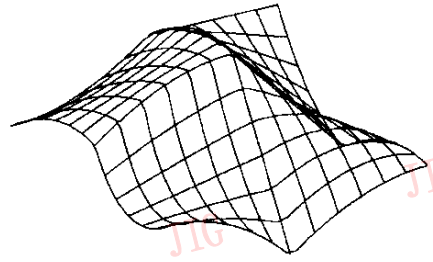
3 实验及结果

3.1 单张曲面

图 7 给出了单张曲面的重建效果。



(a) 辅助曲面



(b) 插值曲面

图7 单张曲面重建

3.2 有限衍射球体成像重建

实验采用的换能器是环形宽带二维阵列,直径 D 为 50 mm,中心频率为 2.5 MHz,带宽是中心频率的 81%,发射和接收传输函数由 Blackman 窗函数近似,在理想介质水中,声速为 1500m/s,中心频率处的波长为 0.6mm,成像物体是 8mm 实心球,换能器阵元距离在 x, y 方向都是 0.3mm,换能器发射端所有阵元都发射宽带脉冲平面波,回波接收用同一换能器来进行加权,以形成有限衍射波束。通过选择空间加权频率对 k_x, k_y ,可以得到目标函数的空间傅里叶变换(见式(4)), k_x, k_y, \hat{k}_z 由 k 决定, $k=2\pi f/c$ 。

为了计算方便, k_x, k_y 选择为单位矩形网格。接收信号的瞬时谱(式(6))由 FFT 计算每一对 k_x, k_y ,而使用最近邻域插值, \hat{k}_z 的目标函数的傅里叶变换则可以由下式得出:

$$\hat{k}_z = k + k_z = k + \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \quad (14)$$

这样,得到 k_x, k_y, \hat{k}_z 后,即可由 IFFT 计算出成像物体的像数据。

再对像数据进行归一化处理,即通过设定反射阈值 M 对像数据进行归一化。

$$f(r) = \begin{cases} 0 & 0 \leq f(r) < M \\ 1 & M \leq f(r) \end{cases} \quad (15)$$

这样,在得到 $f(r)$ 为 1 的像数据后,即可根据本文讨论的几何重建方法进行三维重建,其结果如图 8 所示。

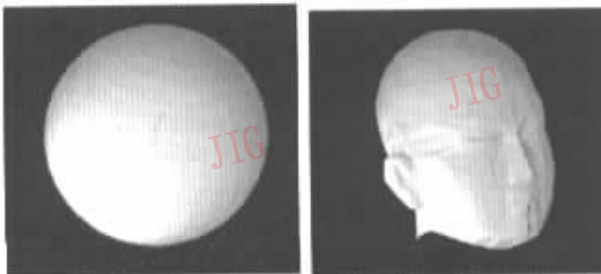


图8 球体重建图像

图9 人头重建图像

同时,为了验证本文算法对于复杂曲面的有效性,对激光采集的人头脸的散乱数据进行了重建,结果如图 9 所示。

从以上 3 个计算实例可以看出,该方法绘制的曲面不仅光顺性好,且计算效率高,同时对边界没有任何要求,即能够自动识别及生成。

参考文献

- 1 Stratton J A. Electromagnetic Theory[M]. New York: McGrawHill, 1941:356~363.
- 2 Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams (1): The scalar theory[J]. Journal Optical Society America, 1987,4(4): 651~654.
- 3 Lu J-y. Construction of limited diffraction beams with Bessel bases [DB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel2/3521/10601/00495816.pdf>, 2002-8-10.
- 4 Lu J-y. Designing limited diffraction beams[J]. IEEE Transactions Ultrasonics Ferroelectrics Frequng Control, 1997, 44(1):181~193.
- 5 Lu J-y. Diffraction-limited beams and their applications for ultrasonic imaging and tissue characterization[A]. In: F. L. Lizzi, Ed, Proceedings of SPIE New Developments in Ultrasonic Transducers and Transducer Systems[C], 1992:92~119.
- 6 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社,1994.
- 7 Fujio Yamaguchi. Curves and Surfaces in Computer Aided Geometric Design[M]. Tokyo, Japan: Nikkan Kogyo Shiinbun Co,1998.



刘立庄 1973 年生,西安交通大学生物医学工程系在读博士研究生。主要从事超声成像与三维可视化等方面的研究。

E-mail:ll_zhuang@sina.com

卞正中 1938 年生,西安交通大学生物医学工程系教授,博士生导师。主要研究领域医学信号的提取和处理、超声三维成像、远程医疗网。

李彬 1973 年生,西安交通大学机械工程系在读博士研究生。主要研究方向为逆向工程、CAD 等。