

一种合成显示超声反射 CT 三维图像的方法*

熊伟 许克克

(中国科学院武汉物理研究所 武汉 430071)

1995 年 6 月 13 日收到

摘要 针对超声反射 CT 在无损伤检测中的应用, 本文提出了一种先投影被测物体轮廓作为背景, 然后在投影内部缺陷的过程中合成显示三维图像的方法, 对模拟 3 D 数据作处理, 实例表明, 该方法实用有效.

关键词 无损检测, 三维显示

Hybrid display of 3-D information from ultrasound reflection CT

Xiong Wei, Xu keke

(Wuhan Institutet of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract Aiming at the application of ultrasound reflection mode tomography in NDT, a method of 3-D display is presented in this paper. In this method the contour data and the inner volume data of a tested objcet are first treated and projected separately and then displayed synthetically. An example is given to show its effectiveness.

Key words Nondestructive testing, 3-D display

1 引言

反射式声 CT 是一种系统相对简单, 分辨率高的制式. 在无损伤评价方面, 它特别适用于圆截面部件(如转轴)的内部缺陷成像. 我们所在的研究组过去几年里开展了与此有关的工作, 获得了固体内部缺陷的截面像^[1-4].

近二三十年来, 人们从系列截面像来重建和显示 3 D 物体, 发展了大量的算法^[5-12], 它们已成功地应用在 X-CT, NMR 等医疗影像设备上. 目前, 这些算法可分为两大类^[11], 即基于表面的显示算法^[5-8](*Surface Rendering*, 以下简称 SR 算法)和基于体数据的显示算法^[9, 10](*Volume Rendering*, 以下简称 VR 算

法). SR 算法, 在二值分割原始灰度数基础上, 用各种面基元(三角形, 四边形, 立方体元的一个或几个面)构成物表面, 然后对它们予以显示. 所得图像常有走样. VR 算法, 对体数据分类, 赋予它们色彩和阻光度, 然后直接处理体数据, 合成显示最后图像, 该图像能显示原数据中较淡较弱的部分. 该方法占用较大存储空间, 计算量大^[9].

从适用性来说, 上述算法可以移植到反射式超声 CT 截面像的三维重建和显示中来. 考虑到声成像所处理的物体常相对简单(形状简单, 内部介质一般是均匀的, 内部缺陷相对孤

* 国家自然科学基金课题

立分散,且声阻抗明显区别于固体母材,界面反射系数大),完全照搬显得不尽合理.此外,在无损检测领域,除了缺陷本身的三维形状外,人们还关心它们自身的分布及其位置(处在被测物体内的什么位置),因而希望在同一帧三维图像中显示这几方面的信息.显示被测物体内部缺陷的方法可以使用三维剪裁(3D Clipping),从不同角度,用不同方式(水平、垂直、斜位、冠状剖切),交互式地一次或多次操作,理解内部结构.也可以将某些表面处理成透明的来观察.这两种方法互为补充,而后一种方法能较好地总体上理解缺陷的位置和分布.

本文针对反射式超声CT在无损检测中的应用的特点,提出了一种合成显示金属内部缺陷的三维图像的方法.我们在二值分割(Binary Segmentation)原始灰度数据基础上内插,获得了等分辨率的体数据后,将它们分类为内部缺陷和母材轮廓,首先淡化显示母材轮廓,区分内外表面,然后投影内部缺陷,同时根据表面取向合成显示透明的3D图像.在投影显示时不像SR算法那样用面基元构成表面,而是直接处理二值体数据,生成三维图像.实例表明,该方法简单,计算量较小,能够正确地显示出母材的内部结构.

2 合成显示算法

算法涉及两个方面:第一方面,由系列截面像来生成和显示三维物体;第二方面,对已得到的被测物体的三维轮廓像与内部缺陷三维像进行合成.

2.1 三维显示

我们仅对目标(被测物体或内部缺陷)的表面进行显示.在逐个截面分割出目标的边界后,把边界上的点 $P(\vec{r})$, $\vec{r}=[x, y, z]$,看成三维空间中的一个抽象点,存在一个虚拟的曲面元 $S(P)$ 经过 $P(\vec{r})$,所有边界上的这些面元的集合即自然形成目标的表面.直接将这此点 $P(\vec{r})$ 经明暗处理(Shading)后投影显示生成三维图像.

应用声学

明暗处理采用梯度法计算.此时,用三维空间任一点 $P(\vec{r})$ 处的三维梯度 \vec{G} 表示经过该点的虚拟曲面元 $S(P)$ 的法矢量, \vec{G} 用中心差分近似.对于 $B(x, y, z)$ 表示的体数据, \vec{G} 表示为

$$\begin{aligned} \vec{G} &= \nabla B(x_i, y_j, z_k) \\ &\approx \left[\frac{1}{2} [B(x_{i+1}, y_j, z_k) - B(x_{i-1}, y_j, z_k)] \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} [B(x_i, y_{j+1}, z_k) - B(x_i, y_{j-1}, z_k)] \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} [B(x_i, y_j, z_{k+1}) - B(x_i, y_j, z_{k-1})] \right] \end{aligned} \quad (1)$$

法矢量 $\vec{N} = \vec{G} / |\vec{G}|$.对于二值体数据,上述处理可简化.

照明模型选用Phong模型^[13],即

$$\begin{aligned} I(x, y, z) &= I_a + \frac{c_p}{k_1 + k_2 d(x, y, z)} \cdot \\ &\quad [k_d (\vec{N}(x, y, z) \vec{L}) \\ &\quad + k_s (\vec{N}(x, y, z) \vec{H})^n] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $I_a, c_p, k_1, k_2, k_d, k_s, n$ 均为常量,其它参量含义如下:

$\vec{N}(x, y, z)$ 为 (x, y, z) 点处的虚拟曲面的法矢量, \vec{L} 为规一化的光源矢量(由于采用平行光源,它为常量), $d(x, y, z)$ 是点 (x, y, z) 经几何变换后(如旋转变换)的位置 (x', y', z') 距像平面的距离, \vec{H} 为规一化的最大高光方向矢量(Maximum Highlight Vector),而 $\vec{H} = \frac{\vec{V} + \vec{L}}{|\vec{V} + \vec{L}|}$, \vec{V} 是规一化的观察方向矢量.

投影则可采用由后至前(简称BTF)或由前至后(简称FTB)的方法^[9, 11, 14].

2.2 透明图像合成

我们的目的是在最终的图像中反映出内部缺陷的三维形状、分布及其相对于被测物体的空间位置.思路是把原始数据分类为内部缺陷和母材轮廓,首先淡化显示母材轮廓(乘衰减因子 f),然后在投影内部缺陷的过程中,合成显示透明的三维图像.所用方法是简单的线性叠加^[15].假定观察方向矢量 \vec{V} (射线,Ray)按次序穿过两个表面上的点 P_1, P_2 , P_1 处的阻

光度为 t (从道理上说, 阻光度 t 除了受该点处的反射系数 r 及其邻域特性 C 的影响(局部因素)外, 还应是某个整体结构(拓扑结构) T_s (全局因素)的函数, 即阻光度可表示为 $t=t(r, C, T_s)$. 在文献[9]所示的 VR 算法中, 一个显式函数给出了阻光度的计算公式. 本文事先设定为一个常量), 灰度为 G_1 , P_2 处的灰度为 G_2 , 这样综合显示灰度为

$$G_s = tG_1 + (1 - t)G_2 \quad (3)$$

为了简化处理, 现假定被测物体的轮廓 (V_1) 是半透明的, 内部缺陷轮廓 (V_2) 不透明, 平行于原截面 ($Slice$) 的端面 (V_3) 完全透明, 被测物体内部均匀介质 (V_4) 完全透明. 对于我们所处理的形状简单、自身没有遮挡的、内部有缺陷的凸体, 我们只考虑被测物体轮廓 V_1 和 V_2 相互遮挡的情况(指对它们作透明处理), 被测物体轮廓 V_1 的不同部分间的相互遮挡采用消隐方法. 如果 V_1 上的点 P_1 和 V_2 上的点 P_2 经几何变换和投影变换后均落在视频缓冲区 G 的 (x^c, y^c) 处, 经判定, 当 P_1 离观察者较近, P_1 遮挡 P_2 , 为了突出缺陷 V_2 , 作透明处理(按公式(3)计算); 反之, 只显示 P_2 . 从 P_1 所处的曲面的朝向(所谓正面, 背面)可以判断 P_1 和 P_2 的次序.

对于一个封闭的不透明的空间曲面, 我们所见到的都是它的外表面. 当从其外表面的可见部分开一个窗 W , 我们能够, 且仅仅能够, 从 W 处看见曲面内表面的某部分(它随观察者的距离和角度变化). 前面, 我们将平行于原截面 ($Slice$) 的端面 (V_3) 看成完全透明(相当于开窗), 利用这一点, 在投影截面内被测物体(母材)轮廓 (V_1) 之前, 将各平行于原截面的可见端面 (V_3 中的可见部分) 中的母材区域也作相应的几何变换和投影变换进行定位, 它所覆盖的区域 SV_3 就是上述的窗口 W , 通过 W , 我们可见到未经遮挡的部分缺陷和部分被测物的内表面.

2.3 算法步骤

算法流程框图如图 1 所示. 算法分为数据准备、分类、投影合成三个步骤.

数据准备: 原始灰度数据经增强后, 交互式选定阈值(可借助直方图)二值分割、勾边、填充, 用基于形状的内插方法^[16], 进行层间插值, 得到等分辨率的二值体数据.

分类: 将体数据分类为截面内被测物体的轮廓 (V_1), 内部缺陷轮廓 (V_2), 平行于原截面 ($Slice$) 的端面 (V_3). V_3 处在截面间母材突出的地方, 可以通过异或算子在基于形状的内插过程中求得. V_3 中的可见部分 ($V_{3\text{visible}}$) 还需结合观察角度来确定, 它包括最前截面(截面数据作几何变换后, 离观察者最近的截面是最前截面, 即后述的 $Front$; 反之, 为最后截面, 即后述的 $Back$). V_1 的阻光度为 t ($0 < t < 1$).

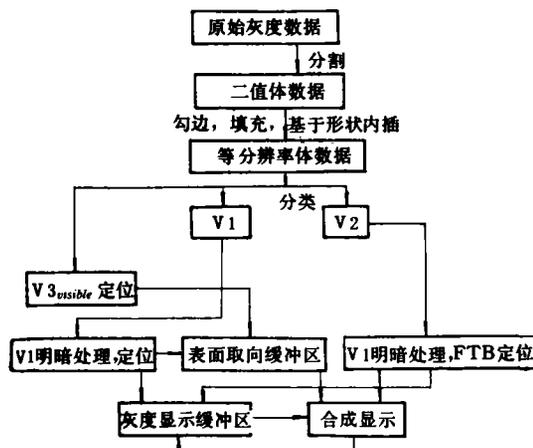


图 1 合成显示算法框图

投影合成: 设定两个同样大小的缓冲区 G 和 N , G 是灰度显示缓冲区, N 用来存放 V_1 内外表面取向标志, 其初始值均为 0. 首先, 将 $V_{3\text{visible}}$ 作几何变换, 仅仅定位于 N 中, N 中对应的点置 -1, 然后, 将 V_1 作明暗处理, 用公式(1), (2)计算.

得到浓淡灰度值后, 乘一个衰减小数 f , 再用 FTB 方法投影得到定位点并置入灰度缓冲区 G 中的相应位置. 设 (x^c, y^c) 是它所覆盖的区域中的任一点, 若 $N(x^c, y^c) = -1$, 其值不变, 若 $N(x^c, y^c) = 0$, 则置其为 1. 这一投影过程完成后, N 中值为 0 的点是不可见的点, 其它值的对应点是可见的. $N(x^c, y^c) = -1$ 的

点对应于 $V1$ 的内表面上的点, $N(x', y') = 1$ 的点对应于外表面。

最后, 在用 FTB 方法投影 $V2$ 的过程中合成显示透明的 3D 图像。所用明暗处理方法与前述相同, 模型一致, 位置对应。但这里不衰减。

假定 $V2$ 上的 $P2$ 点经几何变换后定位在 G 中的 (x', y') 处, 明暗处理后的值为 $G2$, 原来此处的值为 $G1$, 当 $G1 = 0$ 时, 将 $G2$ 写入 G 中的 (x', y') 处。当 $G1 > 0$ 时, 读 $N(x', y')$ (设为 m), 当 $m \leq 0$ 时, 将 $G2$ 写入 G 的 (x', y') 处, 当 $m = 1$ 时, 采用(3)式线性插值显示灰度 G_i 。

3 结果与讨论

本文所述方法适合于合成显示自身无遮挡的形状简单的凸体及其内部缺陷的三维图像。

在我们以往关于反射式超声 CT 的研究工作中, 曾经获得过一个如图 2 所示的金属铝圆柱的垂直于中心轴线的截面重建图像(截面直径 40 mm, 沿轴分布有直径分别为 1 mm, 2 mm, 3 mm 的三个圆孔(作为内部缺陷))^[4]。截面像被量化为 128×128 大小。我们利用上述算法来处理一个以此为基础的模拟三维数据体 V 。现假定 V 由相互间隔约为 2.19 mm(间隔受限于声束沿轴向的有限厚度, 采样本身应满足奈魁施特定律)的 $m(m > 2)$ 层截面像构成的(假定每个截面与图 2 所示一样)。为了得到

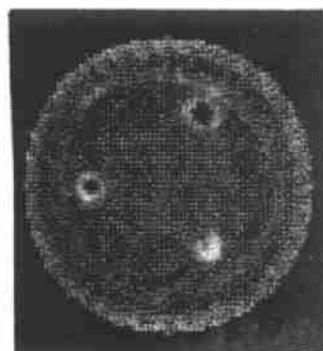


图 2 铝圆柱截面像大小 128×128

等分辨率体数据, 每相邻两层间用基于形状的插值方法等间隔内插 6 层截面数据。

在本工作的早期, 我们曾采用 SR 算法中边界轮廓法投影显示三维图像, 那里, 我们认为母材轮廓是不透明的, 并用 BF (Border Following) 算法跟踪边界, 用平面边界曲线的法线代替三维曲面法矢量, 所得图像如图 3 所示^[17]。



图 3 边界轮廓投影法所得三维图像
边界用 BF 跟踪算法得到, BTF 方法
消除该方法适合于正的柱体

本文所述方法, 仍采用二值分割, 但不象 SR 算法那样构成表面, 而是把体素 (Voxel) 当成空间的一个位置点 (Location), 经过该点的虚拟曲面的法矢量用三维空间梯度的方向矢量来代替, 直接投影该点, 构成三维图像。在 VR 算法中射线 (Ray) 经过的每一点都作透明处理, 逐点叠加合成 (Composition), 计算量很大。

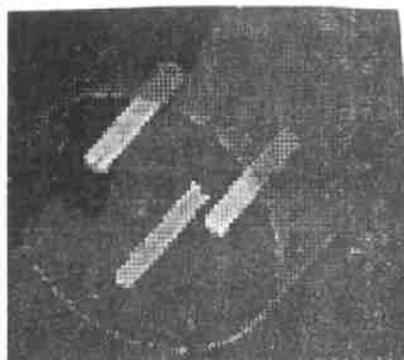


图 4 合成方法所得三维图像
 $f = 0.5, t = 0.25$

这里,我们仅对表面合成处理,计算相对简便.所得合成图像如图4所示.从图中可看出透明效果,本方法适合于简单形状物体的三维显示.

本方法在处理透明问题时,内部缺陷与母材的遮挡是采用线性叠加,获得透明效果,而母材自身的相互遮挡仅用简单的消隐处理.这样处理不影响我们对内部缺陷的位置和分布的正确理解.这种牺牲图像一致性求得计算简化的折衷办法在对整幅图像都有较高要求的场合并不合适.此时,需要采用复杂的合成方法^[9, 10, 15],将被测物体及其内部缺陷看作一个整体,用VR算法处理.

致谢 作者感谢研究组的同事们对本工作的帮助和支持.

参 考 文 献

[1] Lan C Q, Xiong W. *IEEE Transaction on Medical Imaging*, 1994, 13: 419—425.
[2] Lan C Q, Chen Y H. *Chinese Journal of Acoustics*, 1993, 12(1): 47—58.
[3] Xu K K, Lan C Q, Chen Y H. The 19th International Symposium on Acoustical Imaging, 1991.

[4] 兰从庆,许克克,李珑等.无损检测,1994,16(10): 271—274.
[5] Hermen G T, Liu H K. *Computer Graphics and Imaging Processing*, 1978, 7: 130—138.
[6] Ehud Artzy. *Computer Graphics and Image Processing*, 1979, 9: 196—198.
[7] Udupa J K. *Proceedings of The IEEE*, 1983, 71(3): 420—431.
[8] Lorensen W E, Cline H E. *Computer Graphics*, 1987, 21(4): 163—169.
[9] Levoy M. *IEEE Computer Graphics and Application*, 1988, 29—27.
[10] Drebin R A et al. *Computer Graphics*, 1988, 22(4): 65—74.
[11] Barillot C. *IEEE Engineering Medicine and Biology*, March 1993, 111—119.
[12] Tiede U, Hoehne K H, et al, *IEEE Computer Graphics & Applications*, March 1990, 41—53.
[13] Bui-Tuong P, CACM, June, 1975, 311—317.
[14] Frieder G, Gordon D, Reynolds R A, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Jan, 1985, 5(1): 52—60.
[15] Porter T, Duff T. *Computer Graphics (Proc. SIG-GRAPH)*, July 1984, 253—259.
[16] Raya S P, Udupa J K, *IEEE Transaction on Medical Imaging* 9, 1990, 32—42.
[17] 熊伟,许克克,湖北省声学学会94学术年会论文集, 34—36.

(上接第26页)

4 应用实例

南京大学声学研究所叶式公、章东使用JJZ-1000型($\phi 1$ mm PVDF压电元件)探针形高频微型水听器,研究声波在媒质中传播时的非线性现象.用2 MHz的PAT超声换能器,向水中发射超声脉冲.在距换能器14 cm的声轴上安置水听器接收超声信号,再加以频谱分析.使用10 V和316 V脉冲电压激励换能器,得到水听器输出信号频谱分别示于图7和图8中.由图可见,在316 V电压激励下,声场中出现了4、6、8、10、12和14 MHz的声压谐波

分量,明显地呈现出非线性现象.而在10 V电压激励时,声场中仅有2 MHz基频信号,频谱呈单峰状.

参 考 文 献

[1] Bacon D R. *IEEE Tran. On Sonics & Ultrasonics*, 1982, SU-29: 370—377.
[2] Lewin P A. *Ultrasonics*, 1981, 19: 213—216.
[3] Dunn F. *IEEE Tran. on Education*, 1991, 34: 266—268.
[4] IEC 1102(1991): Measurement and characterisation of ultrasonic field using hydrophone in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz.
[5] Show W D. *Proceedings 14th International Congress on Acoustics*, 1992, 4: L P-2.