

[19]中华人民共和国专利局

[51]Int.Cl<sup>6</sup>

G06T 11/00

A61B 5/00



# [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 97110281.3

[43]公开日 1998年2月11日

[11] 公开号 CN 1172999A

[22]申请日 97.4.10

[30]优先权

[32]96.4.10 [33]DE[31]19614223.7

[71]申请人 西门子公司

地址 联邦德国慕尼黑

[72]发明人 斯蒂芬·沙勒 托马斯·弗洛尔  
海因里希·沃尔施利格

[74]专利代理机构 柳沈知识产权律师事务所

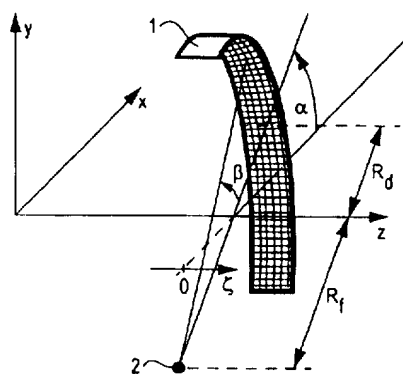
代理人 杨 梧

权利要求书 1 页 说明书 11 页 附图页数 4 页

[54]发明名称 计算机层析X射线摄影机的图像再现方法

[57]摘要

一种以螺旋方式工作的多行探测器—计算机层析 X 射线摄影机的图像再现方法，从而实现任意螺距的螺旋再现并改善棋盘式扫描模型中的 z-清晰度。本发明的基础是王氏再现算法。对该算法进行了新型的插补技术的扩展。



(BJ)第 1456 号



# 权 利 要 求 书

1. 一种以螺旋方式工作的多行探测器 - 计算机层析 X 射线摄影机的图像再现方法, 用于任意的螺距(每 360° 旋转与层宽有关的 z - 前移), 通过  
 5 由测得的直接射线扇形  $p(n, m, q, c = -1)$  产生互补的扇形  $p(n, m, q, c = 1)$  并通过在引入直接的以及互补的射线扇形的情况下接着进行的折曲的扇形 - 反射, 其中具体按如下步骤进行: 对每个投影角  $0 \leq \alpha_{n_0} < 2\pi$ , 通过按照  $\tilde{\beta} = -\beta$ ,  $\tilde{\alpha} + \tilde{\beta} = \alpha + \beta + \pi$  和  $\tilde{q} = q$  对相应直接射线的指数  $\tilde{n}$ ,  $\tilde{m}$ ,  $\tilde{q}$  的计算(指数  $\tilde{n}$  和  $\tilde{m}$  通常不是整数)获得互补射线  $p(n, m, q, c =$   
 10  $-1)$  并接着在  $n$  和  $m$  分别为整数的相邻的射线间进行插补, 最后将所有的互补射线重新分类至所谓的互补扇形(具有相同的  $\alpha$ 、但不同的  $\beta$  和  $q$  的互补射线的总称), 另外确定直接投影的  $z$  - 焦点位置和互补投影的可视焦点的  $z$  - 位置以及射线对应于垂直于  $z$  轴的平面的倾角  $\tau$ , 接着既对直接的, 又对互补的扇形进行加权和折积, 另外对再现体积的每个三维象素首先确定用指数

15

$$\hat{m}(x, y, z, n_0) = \frac{1}{\Delta\beta} \operatorname{atan} \left( \frac{-x \sin \alpha_{n_0} + y \cos \alpha_{n_0}}{R_f + x \cos \alpha_{n_0} + y \sin \alpha_{n_0}} \right) - 0.5 - A\Delta\tau,$$

表示的扇形中的位置, 然后确定所有相邻的( $m \approx \hat{m}$ )的、 $m$  为整数的射线在  $z$  向上与某观察的三维象素  $V(x, y, z)$  的间距, 其中选用的在该投影角度条件下用于求出对观察的三维象素的反射量值而采用的折曲投影的元, 应使对  
 20 某固定的  $m$  总是采用那些对观察的三维象素具有在  $z$  - 向上最短的距离的射线, 其中与已知的算法不同的是, 既采用了直接投影, 又采用了用于反射的互补投影; 通过在折曲投影的被捕捉到的元间的插补最后计算出反射量值。

# 说明书

## 计算机层析 X 射线摄影机 的图像再现方法

5

本发明涉及一种以螺旋方式工作的多行探测器 - 计算机层析 X 射线摄影机的图像再现方法。

已知的费尔特康普算法(参见: L.A.费尔特康普, L.C.达威斯, J.W.克  
10 莱斯, “实用锥形束算法”, J.Opt.Soc.Am.A/第一卷第六期/1984年6月)适用于根据多行探测器(MZD) - 计算机层析 X 射线摄影(CT)扫描器简单地旋转  
360° 所测得数据进行图像再现。由王氏等进行的该算法的推广应用(参见:  
G.王, T.H.林, P.C.程, D.M.施诺扎基, “普通锥形束图像再现算法”, 电气  
与电子工程师协会(IEEE)医学成像会刊, 第十二卷, 第三期, 1993年9月)  
实现了根据螺旋扫描的图像进行再现。但该算法有一些严重的局限性。

15

下面将对王氏等针对平面探测器所说明的再现算法就圆柱面状探测器的  
情况再次加以表述。图 1 示出 MZD - CT 扫描器的结构。多行探测器 1  
为圆柱表面状结构。它由多个平行的探测器行构成, 其中的每个探测器行由  
20 一系列探测器元件构成。该圆柱的半径是  $R_f + R_d$ , 这意味着, 焦点 2 位于圆柱轴上。  
焦点 2 表示焦点轨迹半径为  $R_f$  的螺旋轨迹。 $R_d$  是探测器 1 至旋转  
轴 Z 的间距。对投影角(带有 X 射线源和探测器的台架的旋转角)用  $\alpha$  标示。

20

$\beta_m$  和  $\zeta_{Det,q}$  表示某个探测器元件并随之表示来自射线锥体的某条射线。其中  
 $\beta_m$  是射线的扇形角并且  $q$  是有关探测器行的下标。用  $Z_F$  表示焦点的 Z 坐标,  
其中螺旋具有螺距 slope(斜率)并用下式表示:

$$Z_F = Z_{F,0} + n \Delta \alpha \cdot \text{slope} \quad (1)$$

25

$\Delta \alpha$  是连续投影间的投影角度增量。 $n$  是所观察的投影的序号。 $Z_{F,0}$  是螺旋  
的 Z - 起始位置。

$\zeta_{Det} = Z - Z_F$  表示射线上一点相对于焦点的轴向位置, 该射线在 x -  
y 平面的投影与焦点的距离正好是  $R_f + R_d$ 。此距离同时是有关探测器元件相  
对于焦点的 Z 位置的 Z 位置。下标为  $q$  的探测器行的  $\zeta_{Det}$  - 位置用下式求出

30

$$\zeta_{Det,q} = \left( q - \frac{N_{rows}}{2} + 0,5 + A Q \right) \Delta \zeta_{Det}, \quad q = 0 \dots (N_{rows} - 1). \quad (2)$$



5  $\Delta \zeta_{Det}$  是两个沿 Z 方向的探测器行的间距,  $N_{rows}$  是探测器行的数量, AQ 是所谓的沿  $\zeta$  方向的校整(Alignment). 我们也经常利用两个沿 Z 向的探测器行投影到旋转中心上的间距  $\Delta \zeta = \frac{R_f}{R_f + R_d} \Delta \zeta_{Det}$  及投影到该处的  $\zeta$  坐标  $\zeta = \frac{R_f}{R_f + R_d} \zeta_{Det}$ . 对取对数的衰减值, 即由探测器测出的经被测物的衰减系数的线性积分用  $p(\alpha_n, \beta_m, \zeta_{Det,q})$  或用缩写  $p(n, m, q)$  表示. 此时  $\alpha = n \Delta \alpha$ , 其中  $\Delta \alpha = \frac{2\pi}{N_{p, 2\pi}}$  和  $n = 0 \dots (N_p - 1)$  及

$$\beta_m = (m + 0,5 + AM)\Delta\beta, \quad m = -\frac{N}{2} \dots \left(\frac{N}{2} - 1\right). \quad (3)$$

10

$N_{p, 2\pi}$  是每  $2\pi$  即  $360^\circ$  旋转的投影数量,  $N_p$  是存在的投影总量.  $N$  是在一个探测器行上的通道数. 在这里我们出于简便起见取  $N$  为偶数.  $AM$  是扇形角的校整.

根据王氏等对圆柱面探测器所表述的再现方法包括下述步骤:

15

### 1、投影的加权和褶积

$$\bar{p}(n, m, q) = \frac{1}{R_f \Delta \beta} \sum_{m' = -N/2}^{N/2-1} g_{m-m'} \frac{R_f^2}{\sqrt{R_f^2 + \zeta_q^2}} \cos \beta_{m'} p(n, m', q). \quad (4)$$

20  $\cos \beta_{m'}$  是在扇形再现时所需的对行方向数据的余弦加权. 褶积仅沿投射行产生, 即对所有项不受  $q$  影响地进行运算. 褶积函数  $g_m$  在这里例如是已知的余切函数.

$$g_m = \frac{\Delta \beta}{4} \int_{(m-\frac{1}{2})\Delta\beta}^{(m+\frac{1}{2})\Delta\beta} g(\beta) d\beta = \frac{\Delta \beta}{4} \left[ \text{ctg} \left( \left( m + \frac{1}{2} \right) \Delta \beta \right) - \text{ctg} \left( \left( m - \frac{1}{2} \right) \Delta \beta \right) \right], \quad (5)$$

25

其中分布函数  $g(\beta)$  由

$$g(\beta) = 2\pi^2 \int |\omega| e^{i2\pi\omega \sin \beta} d\omega = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \begin{cases} \frac{1}{\epsilon^2}, & |\beta| \leq \epsilon \\ -\frac{1}{(\sin \beta)^2}, & |\beta| > \epsilon \end{cases}$$

30

决定.

### 2. 折曲的投影加权的反射



## 2. 折曲的投影加权的反射

与折曲相联系的反射的表达式如下:

$$f(x, y, z) = \frac{2}{\pi N_{P, 2\pi}} \quad (7)$$

$$5 \quad \sum_{n_0=0}^{N_{P, 2\pi}-1} \frac{R_f^2}{(R_f + x \cos \alpha_{n_0} + y \sin \alpha_{n_0})^2 + (-x \sin \alpha_{n_0} + y \cos \alpha_{n_0})^2} \cdot \hat{p}(\lambda(x, y, z, n_0) N_{P, 2\pi} + n_0, \hat{m}(x, y, z, n_0), \hat{q}(x, y, z, n_0))$$

$n_0$  是求和指数, 该指数进行  $360^\circ$  所有投影角的累加。在螺旋数据组通常有许多投影角  $\alpha_{n_0}$  相同的各种投影, 确切地说, 在每个螺旋“环”中有一个投影。因此为了对投影进行明确的表示, 除了由  $n_0$  确定的投影角外, 还需要给出含有投影的“环”的编号  $\lambda$ 。通常在再现体积中的一个三维象素在反射时位于多个  $n_0$  相同(即相同的投影角)的, 但  $\lambda$  不同的投影中。所以必须选择确定用于该三维象素反射的投影。该  $\lambda$  在王氏算法中是这样选择的, 即使所采用的投影在轴向上距所观察的三维象素的距离最短。

$$\frac{R_f^2}{(R_f + x \cos \alpha_{n_0} + y \sin \alpha_{n_0})^2 + (-x \sin \alpha_{n_0} + y \cos \alpha_{n_0})^2} \quad \text{是在对折积}$$

测量值反射时对扇形再现必要的, 所谓的  $1/r^2$  加权。

指数  $\hat{m}$  和  $\hat{q}$  由从焦点到探测器对再现体积的有待再现的三维象素  $V(x, y, z)$  的投影得出。投影到探测器的三维象素的坐标是  $\hat{\beta}$  和  $\hat{\zeta}_{Det}$ 。然后对指数  $\hat{m}$  和  $\hat{q}$  得出:

$$20 \quad \hat{m}(x, y, z, n_0) = \frac{1}{\Delta \beta} \underbrace{\operatorname{atan} \left( \frac{-x \sin \alpha_{n_0} + y \cos \alpha_{n_0}}{R_f + x \cos \alpha_{n_0} + y \sin \alpha_{n_0}} \right)}_{\hat{\beta}} - 0,5 - AM \quad (8)$$

$$25 \quad \hat{q}(x, y, z, n_0) = \frac{1}{\Delta \zeta_{Det}} \underbrace{\frac{R_f + R_d}{R_f + x \cos \alpha_{n_0} + y \sin \alpha_{n_0}} (z - z_f)}_{\hat{\zeta}_{Det}} + \frac{N_{rows}}{2} - 0,5 - AQ \quad (9)$$

$\hat{m}$  与  $z$  无关。由于从焦点向探测器对三维象素的投影通常并不是很精确地击中探测器元件的, 在计算公式(9)和(10)时一般得出的也是非整数的指数。所以在反射时在通常四个相邻的折曲投影元间进行插补(例如: 双线性插补)。

在采用王氏算法时必须保证再现体积的每个三维象素得到一个由  $360^\circ$

的所有方向  $\alpha = 0 \dots 2\pi$  的反射量值。对每个指数  $n_0$ ，如上所述，对每个三维象素分别选择螺旋的一个环，根据此环然后考虑相应投影角为  $\alpha_{n_0}$  的投影。对  $\lambda(n, y, z, n_0)$  的选择应使选出的投影总是在  $z$  向上距观察的三维象素最近。其情况如在图 2 中所示。在投影角  $\alpha_{n_0} = 0$  情况下反射时，对于三维象素  $V_1$  选用  $\lambda = 0$ ，而对于三维象素  $V_2$  选用  $\lambda = 1$ 。即对到三维象素  $V_1$  的反射采用左边的投影并且对到三维象素  $V_2$  的反射采用右边的投影，尽管对于两个三维象素两个投影都是可以的。

王氏算法的主要缺点在于，要求每个三维象素必须得到所有投影角的反射量值。这个要求制约了螺旋的螺距，该螺距被定义为台架每旋转  $2\pi$  即  $360^\circ$  沿  $z$  方向向前推移  $\Delta Z_{2\pi}$ ，根据投影到旋转中心的探测器行  $\Delta \zeta$  的行间隔进行标准化，

$$\text{螺距 (pitch)} = \frac{\Delta Z_{2\pi}}{\Delta \zeta} \quad (10)$$

图 2 示出此螺距的限制。在直径为  $D_B$  的影区边缘上的一个三维象素  $V$  必须获得来自各个方向  $\alpha = 0 \dots 2\pi$  的量值。为此螺距不得大于图 2 中所示的情况。即当射线(1)和(2)正好在影区边缘相交时的螺距是最大的。因此根据下式求出最大螺距

$$\text{螺距 } pitch_{max} = \frac{R_f - \frac{D_B}{2}}{R_f} (N_{rows} - 1). \quad (11)$$

对某台架 - 几何结构例如得出

( $R_f = 570\text{mm}$ ,  $R_d = 435\text{mm}$ ,  $D_B = 500\text{mm}$ ):

行	3	4	5	6	7
螺距 $(pitch)_{max}$	1.1228	1.6842	2.2456	2.8070	3.3684

当螺距大于此临界值时，在扫描图形中就会产生空白(见图 3 的阴影)。对于这些阴影的空白，在特定的投影角  $\alpha$  条件下没有在反射时可以向这些区提供量值的投影。因此对螺距值如此大的螺旋的再现，原来的王氏算法是不适用的。但用于 5 行 - 探测器的 2.25 的螺距对于实际有意义的应用又太小了。

另外一个缺点是，以投影方式进行反射。对每个投影角，采用在折曲投



影的元之间的插补方法求出在此投影角度情况下采取的投影对三维象素的附加量值。据此，在旋转中心处 z 向上的插补的有效距离约为  $\Delta\zeta = \Delta\zeta_{Det} \frac{R_f}{R_f + R_d}$

5 本发明的目的在于，提出一种在本说明书前言部分中所述方式的方法，使一方面可以克服王氏算法的螺距的限制，而又不会选取伴随有其它缺点的局部圆再现的途径，并且另一方面实现了提高 Z 对比度的带有较小有效距离的 Z 方向上的插补。

10 本发明的目的是这样实现的，即采用一种以螺旋方式工作的多行探测器 - 计算机层析 X 射线摄影机的图像再现方法，用于任意的螺距(每 360° 的与层宽有关的 z - 前移)，通过由测得的直接射线扇形  $p(n, m, q, c = 1)$  产生互补的扇形  $p(n, m, q, c = -1)$  并通过在引入直接的以及互补的射线扇形的情况下接着进行的折曲的扇形 - 反射，其中具体按如下步骤进行：对每个投影角  $0 \leq \alpha_{n_0} < 2\pi$ ，通过按照  $\tilde{\beta} = -\beta$ ， $\tilde{\alpha} + \tilde{\beta} = \alpha + \beta + \pi$  和  $\tilde{q} = q$  对相应直接射线的指数  $\tilde{n}$ ， $\tilde{m}$ ， $\tilde{q}$  的计算(指数  $\tilde{n}$  和  $\tilde{m}$  通常不是整数)获得互补射线  $p(n, m, q, c = -1)$  并接着在 n 和 m 分别为整数的相邻的射线间进行插补，最后将所有的互补射线重新分类至所谓的互补扇形(具有相同的  $\alpha$ 、但不同的  $\beta$  和  $q$  的互补射线的总称)，另外确定直接投影的 z - 焦点位置 and 互补投影的可视焦点的 z - 位置以及射线对应于垂直于 z 轴的平面的倾角  $\tau$ ，接着既对直接的，又对互补的扇形进行加权和折积，另外对再现体积的每个三维象素首先确定用指数

$$\hat{m}(x, y, z, n_0) = \frac{1}{\Delta\beta} \operatorname{atan} \left( \frac{-x \sin \alpha_{n_0} + y \cos \alpha_{n_0}}{R_f + x \cos \alpha_{n_0} + y \sin \alpha_{n_0}} \right) - 0.5 - AM,$$

25 表示的扇形中的位置，然后确定所有相邻的 ( $m \approx \hat{m}$ ) 的、m 为整数的射线在 z 向上与某观察的三维象素  $V(x, y, z)$  的间距，其中选用的在该投影角度条件下用于求出对观察的三维象素的反射量值而采用的折曲投影的元，应使对某固定的 m 总是采用那些对观察的三维象素具有在 z - 向上最短的距离的射线，其中与已知的算法不同的是，既采用了直接投影，又采用了用于反射的互补投影；通过在折曲投影的被捕捉到的元间的插补最后计算出反射量值。

下面将对照图 4 至 7 对本发明作进一步的说明，图中示出：

30 图 4 为依照本发明的多行探测器 - 计算机层析 X 射线摄影机的利用大螺距的螺旋扫描，

图 5 为在依照本发明进行多行探测器 - 计算机层析 X 射线摄影时通过在



与三维象素相邻的某投影的射线间的插补获得反射附加数据,

图 6 为图 5 的截面和采用王氏算法的插补,

图 7 为根据图 5 的截面和采用本发明算法的插补。

本发明的构思是, 图 3 中的空白可以用射线填充, 这些射线已经过在对  
5 面的聚焦位置(例如图 4 中的  $F^k$ )的测量。这些由对面聚焦点辐射出的射线被  
称作互补射线。与此相反, 那些由在瞬时投影角  $\alpha_{n0}$  条件下定位的焦点辐射  
出的射线被称作直接射线。

如果在投影角  $\alpha$  的条件下在特定的再现体积范围内(在图 4 中的空白)没  
有供反射用的投影, 则利用互补射线  $p^k(\alpha, \beta, \zeta_{\text{Det},q}) = p(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \zeta_{\text{Det},\tilde{q}})$

10 替代  $p(\alpha, \beta, \zeta_{\text{Det},q})$ , 所述互补射线满足如下条件:

$$\tilde{\beta} = -\beta, \quad (12)$$

$$\tilde{\alpha} + \tilde{\beta} = \alpha + \beta + \pi. \quad (13)$$

另外将下式代入

$$\tilde{q} = q \quad (14)$$

15 通过对所有的属于固定的  $\alpha$ 、但不同的  $\beta$  的互补射线的分组获得了所谓  
的互补扇形  $p^k(\alpha_n, \beta_m, \zeta_{\text{Det},q})$ 。一个直接扇形的所有的射线会聚到一个  
焦点-物理焦点, 而一个互补扇形的射线是由可视焦点辐射出的, 这些焦点  
在由下式表述

$$20 \quad r_{VF} = \begin{bmatrix} R_f \cos \alpha \\ R_f \sin \alpha \\ z_F^k(n, m, q) \end{bmatrix} \quad (15)$$

的  $z$  平行线上。  $Z_F^k$  是某可视焦点的  $Z$  坐标。值得一提的是, 通常这种投射  
的每条射线具有另一个在此线上的可视焦点。通过上述的重组焦点和探测器  
25 的作用做了置换。所以在式(2)中针对互补投影必须改变正负号。式(17)是对  
于两种投影都适用的公式。

通过对该互补射线的分组对直接测得的多行探测器的螺旋附加产生互  
补投射扇形的第二螺旋。然后在再现时对这些互补扇形进行与对直接扇形  
 $p(\alpha_n, \beta_m, \zeta_{\text{Det},q})$  同样的处理, 尤其是对该互补扇形也采用再现步骤(5)。

30 为简化符号, 我们下面对直接的, 还是互补的扇形都用  $p(n, m, q, c)$   
表示, 其中  $C = 1$  涉及的是直接扇形,  $C = -1$  涉及的是互补扇形。





为此公式(2)被改写成

$$\zeta_{Det.q} = c \cdot \left( q - \frac{N_{rows}}{2} + 0,5 + AQ \right) \Delta \zeta_{Det} \quad (16)$$

5 由于在实践中存在的是离散的投影, 所以造成在进行公式(13)和(14)计算时通常对  $\tilde{\alpha}$  和  $\tilde{\beta}$  没有事实存在的角位置。所以必须采用插补获得互补扇形。为此进行的步骤如下:

$$\alpha_{n_i}^k = n_i \Delta \alpha \quad (17)$$

$$\beta_{m_i}^k = (m_i + 0,5 + AM^k) \Delta \beta \quad (18)$$

10

是待计算的(下标 t: 靶)互补射线

$p(n_t, m_t, q_t, c = -1)$  和

$$\tilde{\alpha}_{\tilde{n}} = \tilde{n} \Delta \alpha \quad (19)$$

$$\tilde{\beta}_{\tilde{m}} = (\tilde{m} + 0,5 + AM) \Delta \beta \quad (20)$$

15

的参数和直接射线  $p(\tilde{n}, \tilde{m}, \tilde{q}, c = 1)$  的参数, 根据后者将计算出互补射线  $p(n_t, m_t, q_t, c = -1)$ 。

利用任意设定  $AM^k = AM$  由(13)和(14)得出:

20

$$\tilde{m} = -m_t - 1 - 2AM \quad (21)$$

$$\tilde{n} = n_t + (2m_t + 1 + 2AM) \frac{\Delta \beta}{\Delta \alpha} + \frac{\pi}{\Delta \alpha} \quad (22)$$

25

首先得出的是非整数  $\tilde{n}$  和  $\tilde{m}$ 。这时通过根据相邻( $n \approx \tilde{n}$ ,  $m \approx \tilde{m}$ )的, 其  $n$  和  $m$  为整数的射线  $p(n, m, q_t, 1)$  的插补, 例如通过四条相邻的射线间的双线性插补得出互补射线  $p(n_t, m_t, q_t, -1)$ 。

所产生的互补射线的  $z$  - 位置。

螺距斜率(slope) =  $\frac{dz_F}{d\alpha}$  的螺旋中的一条直接射线的  $z$  - 焦点位置由下式得出

30

$$z_F(n) = z_{F,0} + n \Delta \alpha \cdot slope \quad (23)$$



对于互补射线得出

$$z_F^k(n, m, q) = z_{F,0} + \tilde{n}\Delta\alpha \cdot slope + 2R_f \cos\tilde{\beta} \operatorname{tg} \tau_q. \quad (24)$$

5 其中  $\tau_q$  是对应于与  $z$  轴垂直平面的一条射线的倾角(所谓的锥角).

$$\operatorname{tg} \tau_q = \frac{\zeta_q}{R_f}. \quad (25)$$

有效。式(23)及(13)给定出  $\tilde{n}$  和  $\tilde{\beta}$ 。  $Z_F^K$  是可视焦点的  $Z$  位置。  $Z_F^K$  可以分为  
10 常数分量, 取决  $n$  的分量和取决于  $m$  的分量。用式(21)、(22)和(23)得出

$$\begin{aligned} z_F^k(n, m, q) = z_{F,0} + \left[ n + (2m + 1 + 2AM) \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} + \frac{\pi}{\Delta\alpha} \right] \Delta\alpha \cdot slope + & \quad (26) \\ 2R_f \cos[-(m + 0,5 + AM)\Delta\beta] \operatorname{tg} \tau_q = & \\ z_{F,0} + [(1 + 2AM)\Delta\beta + \pi] \cdot slope + & \quad (\text{常数}) \\ 2m\Delta\beta \cdot slope + 2R_f \cos[(m + 0,5 + AM)\Delta\beta] \operatorname{tg} \tau_q + & \quad (\text{取决于 } m) \\ n\Delta\alpha \cdot slope & \quad (\text{取决于 } n) \end{aligned}$$

15

取决于  $m$  的分量可以存储在计算机的表格中。

互补射线的倾角对应于相应的直接射线将改变其正负号, 这是因为由于  
20 焦点和探测器作用的调换, 其方向也做了改变之故:

$$\tau_q^k = -\tau_q. \quad (27)$$

产生的互补射线的指数

取直接投影作为指数  $\tilde{m} = -\frac{N}{2} \dots \left(\frac{N}{2} - 1\right)$ , 则由此产生的互补投  
25 影的指数由

$$a) \quad m = \left[ -\frac{N}{2} \dots \left(\frac{N}{2} - 1\right) \right] - 2AM, \quad (\text{根据 (22)})$$

$$b) \quad m \geq \frac{1}{2} \left[ -n \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta} - \frac{\pi}{\Delta\beta} - 1 - 2AM \right], \quad (\text{根据 (23)})$$

30

$$c) \quad m \leq \frac{1}{2} \left[ (N_P - 1 - n) \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta} - \frac{\pi}{\Delta\beta} - 1 - 2AM \right] \quad (\text{根据 (23)})$$



决定。

再现算法过程

在产生互补扇形  $p(n, m, q, c = -1)$  之后, 对直接和互补扇形依照

$$5 \quad \tilde{p}(n, m, q, c) = \frac{1}{R_f \Delta \beta} \sum_{m' = -\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} g_{m-m'} \frac{R_f^2}{\sqrt{R_f^2 + \zeta_q^2}} \cos \beta_{m'} p(n, m', q, c) \quad (28)$$

进行加权和折积。经折积的投影接着在投影角范围  $2\pi$ , 即  $n_0 = 0 \dots (N_p, 2\pi-1)$  被反射。为此对每个三维象素的每个  $n_0$  首先计算出

$$10 \quad \hat{m}(x, y, z, n_0) = \frac{1}{\Delta \beta} \operatorname{atan} \left( \frac{-x \sin \alpha_{n_0} + y \cos \alpha_{n_0}}{R_f + x \cos \alpha_{n_0} + y \sin \alpha_{n_0}} \right) - 0,5 - AM \quad (29)$$

通常得出一个非整数的  $\hat{m}$ 。对三维象素  $V(x, y, z)$  的附加数据通过利用指数  $m \approx \hat{m}$  在相邻射线间的插补计算出。与王氏算法不同的是, 在这里对每个  
15 投影角既考虑到直接扇形, 又考虑到互补扇形。在直接和互补扇形的所有的射线  $m \approx \hat{m}$  中, 将利用那些在  $z$  方向上对待再现的三维象素最近的射线。根据折积投影的相应的元, 通过插补获得对三维象素  $(x, y, z)$  的反射附加数据。图 6 和图 7 的比较明显地表明, 在采用王氏算法时  $z$  方向上实施的插补的有效距离大于采用上述方法的有效距离。在此介绍的方法可以在采用棋盘  
20 式扫描模型(如图 5)的情况下实现在  $z$  方向上的较高的对比度。另外在采用介绍的方法时没有提出适用于采用王氏算法的要求, 即再现体积的一个三维象素, 始终必须在至少一个直接扇形内。由于既引入了直接扇形, 又引入了互补扇形, 因而一方面加大了螺距并且另一方面提高了  $z$  的对比度。

通过采用所介绍的算法提高  $z$  - 对比度

25 王氏算法以投射方式工作, 即折曲的投影一个接一个地反射到再现体积中。对三维象素的附加数据通过在投射内不同元间的插补获得。因此在  $z$  向上必要的插补具有在旋转中心附近的有效距离约为  $\Delta \zeta = \Delta \zeta \operatorname{Det} \frac{R_f}{R_f + R_d}$ 。图 5 和 6 示出此情况。在这里所介绍的新的再现方法中, 通过与投影重叠的插补获得反射量值。既引入了直接扇形, 又引入了互补扇形。因此当沿  $z$  向进行  
30 相应扫描时可以捕捉到其距位于中点的三维象素的距离小于  $\Delta \zeta$  的测量射线。当通过根据与这些射线相应的折曲的投射元的插补获得反射量值时, 与



王氏算法相比将提高 Z - 对比度。为实际应用这一特性调整的螺距应使沿 z - 向产生一棋盘式扫描模型(交织扫描图), 在该模型中由分别相对的焦点位置辐射的射线在旋转中心附近相互交错(如图 5 所示)。

采用介绍的算法消除螺距的限制

- 5 在采用王氏算法时螺距受到下述要求的限制, 在所有投影角的条件下对每个三维象素至少有一个投影, 三维象素位于投影的射线锥体内。当增大螺距时在再现区内将产生空白(图 3 中的阴影), 这些空白是不能满足该要求的。但可以如图 4 中所示利用由相对的焦点位置辐射的射线。在这里介绍的算法采取此措施可以实现任意螺距时的再现。当投影没有覆盖所观察的三维象素
- 10 时, 可以替代直接投影采用互补投影。总体上讲总是可以利用直接投影的或互补投影的射线, 这些射线具有在 z 向上距观察的三维象素最短的距离。

双线性插补的特殊情况

另外我们还将稍加详细地叙述双线性插补的特殊情况。

- 15  $m_{lo} = \text{floor}(\hat{m})$  和  $m_{hi} = \text{ceil}(\hat{m})$  适用式(30)的  $\hat{m}$ 。对指数为  $(n_0 + \lambda N_{p, 2\pi}, m_{lo})$  和  $(n_0 + \lambda N_{p, 2\pi}, m_{hi})$  的直接和互补射线, 将计算出射线  $m = m_{lo}$  和  $m = m_{hi}$  与正为待处理的三维象素的间距  $d_z$ 。对于直接射线得出

$$d_z = z_f + t_g \tau_q \sqrt{(R_f + x \cos \alpha_{n_0} + y \sin \alpha_{n_0})^2 + (-x \sin \alpha_{n_0} + y \cos \alpha_{n_0})^2} - z \quad (30)$$

- 20 对于互补射线得出

$$d_z = z_f^k + t_g^k \tau_q^k \sqrt{(R_f + x \cos \alpha_{n_0} + y \sin \alpha_{n_0})^2 + (-x \sin \alpha_{n_0} + y \cos \alpha_{n_0})^2} - z \quad (31)$$

- 25 这时对指数  $(\lambda_{lo, down}, Q_{lo, down}, C_{lo, down})$  和  $(\lambda_{lo, up}, Q_{lo, up}, C_{lo, up})$  进行选择, 使所属的  $d_z$  在  $m = m_{lo}$  的所有可能的条件下具有负的或最小的正值。同样对  $(\lambda_{hi, down}, Q_{hi, down}, C_{hi, down})$  和  $(\lambda_{hi, up}, Q_{hi, up}, C_{hi, up})$  进行选择, 使所属的  $d_z$  在  $m \approx m_{hi}$  的所有可能的条件下具有负值或最小的正值。由下述四个值

$$\tilde{p}_{00} = \tilde{p}(n_0 + \lambda_{lo, down} N_{p, 2\pi}, m_{lo}, q_{lo, down}, c_{lo, down}), \quad (32)$$

$$\tilde{p}_{01} = \tilde{p}(n_0 + \lambda_{lo, up} N_{p, 2\pi}, m_{lo}, q_{lo, up}, c_{lo, up}), \quad (33)$$

- 30  $\tilde{p}_{10} = \tilde{p}(n_0 + \lambda_{hi, down} N_{p, 2\pi}, m_{hi}, q_{hi, down}, c_{hi, down}) \quad (34)$

$$\tilde{p}_{11} = \tilde{p}(n_0 + \lambda_{hi, up} N_{p, 2\pi}, m_{hi}, q_{hi, up}, c_{hi, up}) \quad (35)$$



最后通过双线性插补求出由投影角  $\alpha_{n0}$  至观察的三维象素的反射的附加数据。

5 该附加数据由下式得出

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{acc} = & \frac{m_{hi} - \hat{m}}{-d_z(\lambda_{lo, down}, q_{lo, down}, c_{lo, down}) + d_z(\lambda_{lo, up}, q_{lo, up}, c_{lo, up})} \\ & [d_z(\lambda_{lo, up}, q_{lo, up}, c_{lo, up})\tilde{p}_{00} - d_z(\lambda_{lo, down}, q_{lo, down}, c_{lo, down})\tilde{p}_{01}] \\ & + \frac{\hat{m} - m_{lo}}{-d_z(\lambda_{hi, down}, q_{hi, down}, c_{hi, down}) + d_z(\lambda_{hi, up}, q_{hi, up}, c_{hi, up})} \\ & [d_z(\lambda_{hi, up}, q_{hi, up}, c_{hi, up})\tilde{p}_{10} - d_z(\lambda_{hi, down}, q_{hi, down}, c_{hi, down})\tilde{p}_{11}] \end{aligned}$$

10

当所有的投影角  $\alpha_{n0}$  时的反射量值附加于所有的三维象素，则再现结束。

15 故所述方法适用于任意的螺距并且另外能够在棋盘式扫描图中提高 z - 对比度。

所述方法一方面可以实现任意螺距的螺旋再现并且另一方面改进了棋盘式扫描模型中的 z - 清晰度。

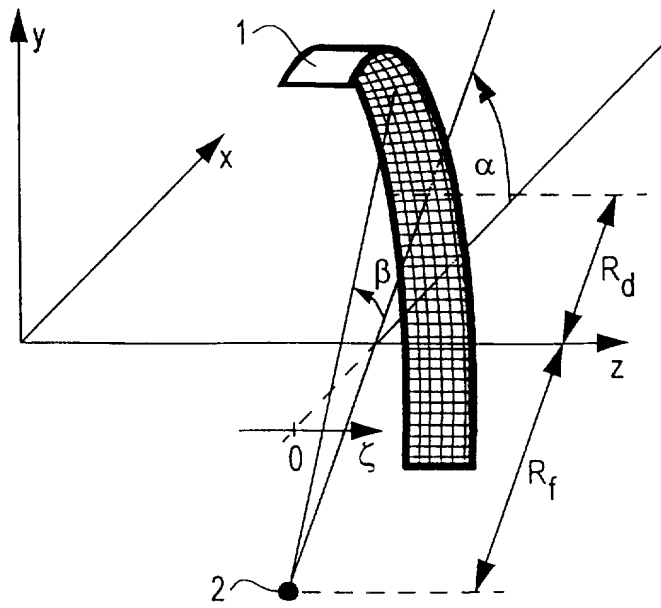


图 1

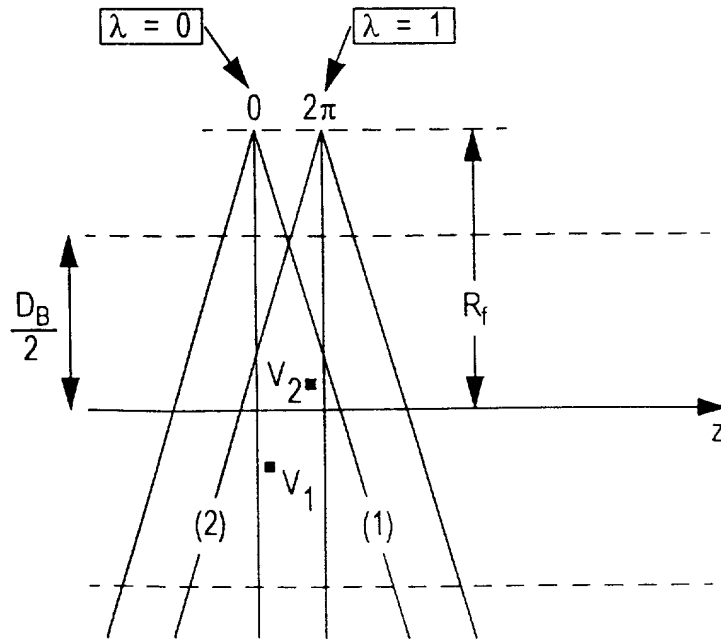


图 2

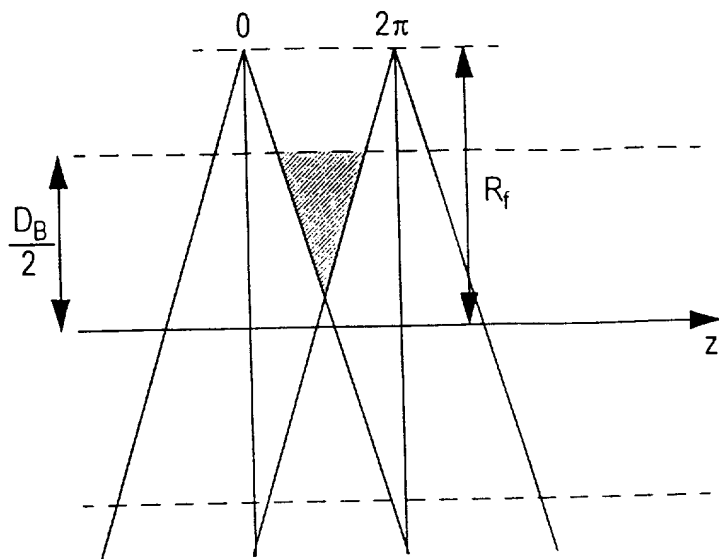


图 3

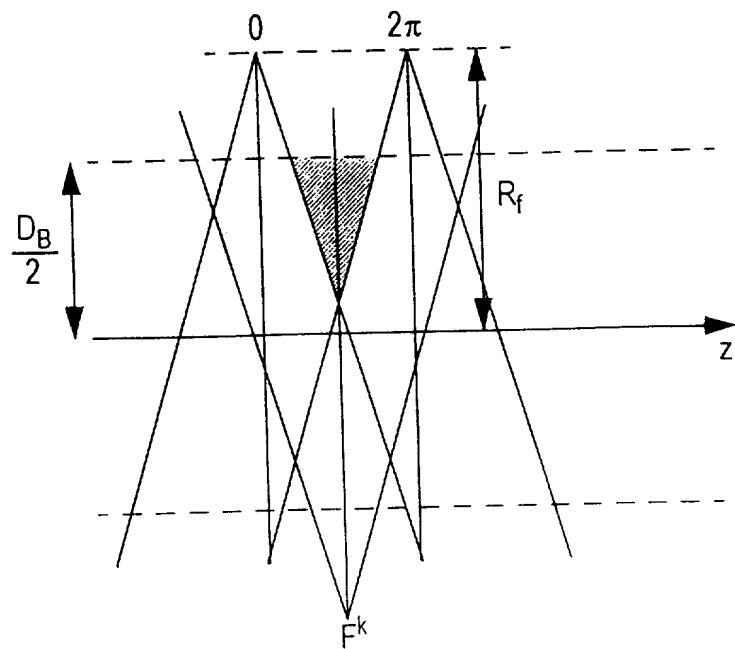


图 4

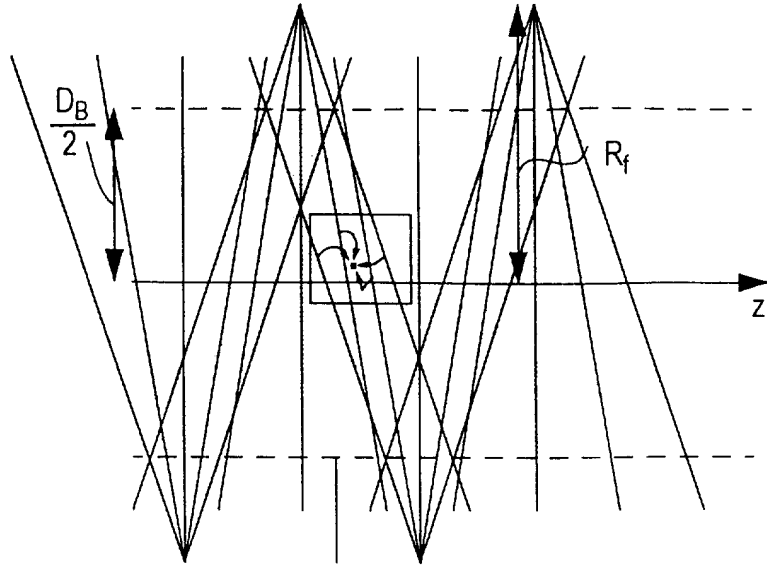


图 5

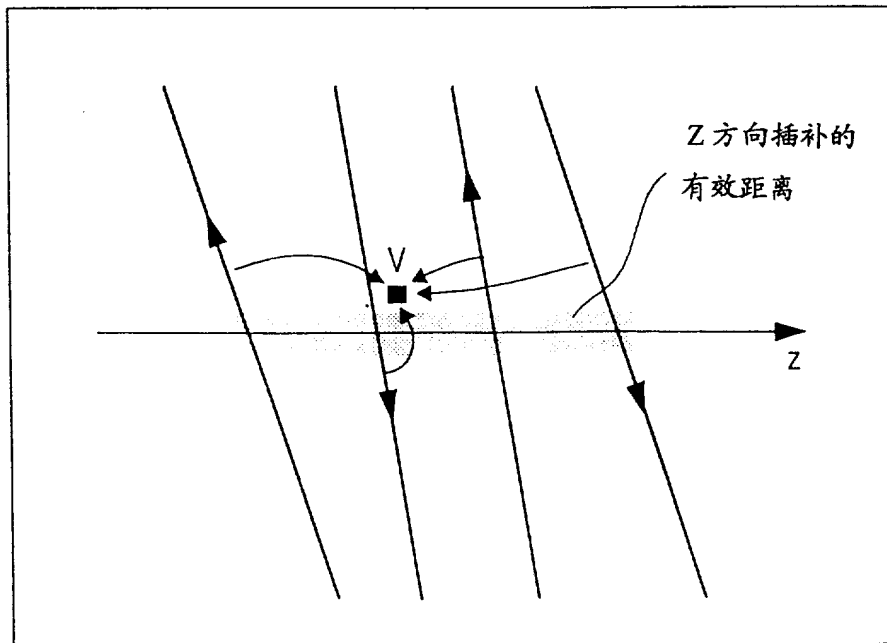


图 6



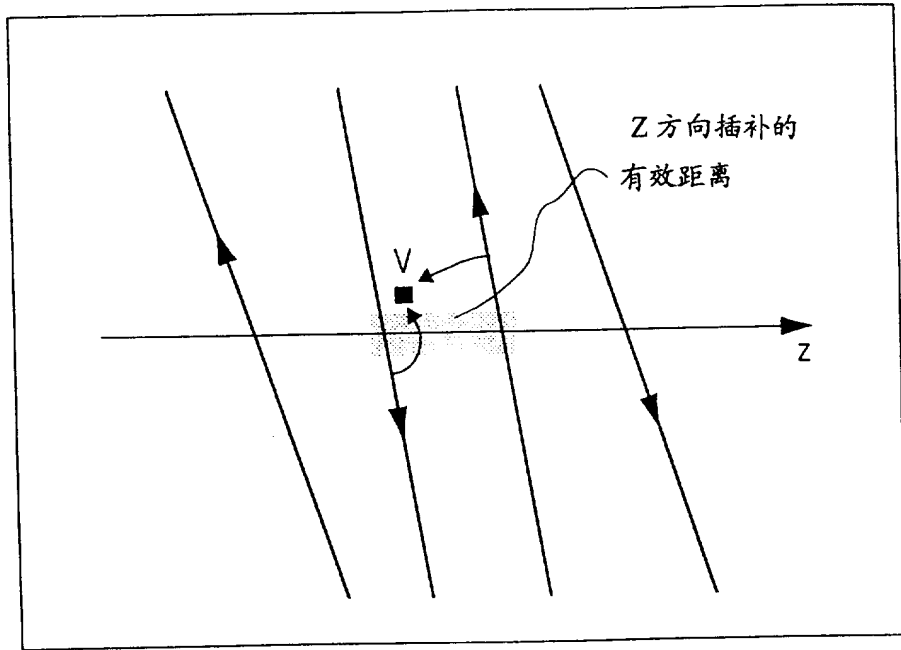


图 7