

CT值线性评价方法

杨克桢,林意群,余晓铿,卢广文,林木炎(第一军医大学生物医学工程系,广东广州510515)

摘要:目的 探讨CT设备的CT值线性的评价方法。方法 采用Catphan500体模,在相同扫描条件下对43台CT设备实施检测。对每台设备的检测结果做1、2阶曲线拟合,定义2阶拟合曲线的弯曲程度为CT值非线性度,计算拟合参数的2-范数来评价拟合品质,计算拟合直线的斜率及其拟合参数的2-范数来评价对比度标度和拟合品质。采用MATLAB6.1编程。结果 比较拟合参数的2-范数,表明2阶拟合曲线更符合母体分布规律;2阶拟合曲线的弯曲程度随直线拟合参数的2-范数的增长呈单调增长趋势,很好地反映了非线性度。结论 对检测结果分别做1、2阶曲线拟合,从而定义CT值非线性度和对比度标度是符合统计学原理的,达到了定量分析的目的。

关键词:CT值线性;CT值非线性度;对比度标度;评价方法

中图分类号:R443.8;R318.5 文献标识码:A 文章编号:1000-2588(2002)03-0241-03

Evaluation method of CT number linearity

YANGKe-cheng,LINYin-qun,YUXiao-e,LUGuang-wen,LINMu-yan

Department of Biomedical Engineering, First Military Medical University, Guangzhou 510515, China

Abstract Objective To explore the method for computed tomography (CT) number linearity evaluation. Methods The model CTP401 of Catphan500 phantom was adopted to test 43 sets of CT scanners under the same scanning conditions. 1- and 2-order curve fitting of the testing results of each scanner were performed, with the bending of the 2-order fitted curve defined as the degree of CT number non-linearity and the slope of the linear fitting as contrast scale. The 2-norms of the fitting coefficients were calculated for the purpose of fitting quality evaluation. MATLAB 6.1 was employed for programming. Results The 2-norm of the fitting coefficients of the 2-order fitting curve was approximately 1/10 of that of corresponding linear fitting, indicating that 2-order fitting accorded better to the parent population distribution pattern. The degree of the non-linearity was manifested by the bending of the 2-order fitting curve that increased monotonously with the 2-norm of the corresponding linear fitting. Conclusion It is statistically valid to define CT number non-linearity and contrast scale on the basis of 1 and 2-order fittings of the testing results, which will serve the purpose of quantitative analysis.

Key words CT number linearity; CT number non-linear degree; contrast scale; evaluation methods

理想的CT系统,物质的CT值与其对应的X射线衰减系数 μ 呈线性关系,称为CT值线性(CT number linearity),作为质量保证的重要参数,可反映设备的性能。受成像理论和设备本身条件的限制,实际应用中的CT系统的这两个参数之间并非理想的线性关系。对设备进行检测,一般采用专门的检测体模,扫描若干种已知X射线衰减系数的物质以得到相应的CT值,统计分析它们的相互关系并进行评价^[1-3]。检测中存在的主要问题是方法不一致,尤其在采用不同体模时缺乏统一的度量指标。本研究基于国际公认的Catphan500体模,从统计学的角度验证了2阶拟合曲线更符合物质的CT值与其对应的X射线衰减系数 m 的分布关系,在此基础上给出非线性度量指标,并通过大量的检测实践证明了该方法的科学性。

1 材料与方法

1.1 设备与工具

2000年度南京军区受检CT设备共43台;美国体模实验室生产的Catphan500体模一套,其中CTP401模块用于检测CT值线性,其四种目标物质分别为空气(air)、丙烯酸(acrylic)、低密度聚氯乙烯(LDPE)和聚四氟乙烯(teflon)。

1.2 原理

测量若干已知X射线衰减系数 μ 的物质,得到相应的CT值。由于体模的目标物质数目较少(4个),采用3阶曲线拟合将通过所有样本点,且度量线性度的指标不易给出,所以采用2阶曲线拟合。样本集为: $\{(CT_i, \mu_i), i=1,2,3,4\}$, i 分别代表空气、丙烯酸、低密度聚氯乙烯和聚四氟乙烯。拟合目标曲线为:

$$y = f(a, x) = a_1 x^2 + a_2 x + a_3 \quad (1)$$

参数数组 a 由以下公式求得:

$$a = V/y \quad (2)$$

其中, $y = [\mu_1 \mu_2 \mu_3 \mu_4]$, Vandermonde 矩阵:

收稿日期:2001-12-02

基金项目:总后“十五”计划青年基金(01Q072)

作者简介:杨克桢(1971-),男,福建闽清人,第一军医大学在读硕士研究生,E-mail:yangkch@fimmu.edu.cn

$$V = \begin{bmatrix} CT_1^2 & CT_1 & 1 \\ CT_2^2 & CT_2 & 1 \\ CT_3^2 & CT_3 & 1 \\ CT_4^2 & CT_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

拟合参数 a 的 2-范数:

$$\|r_2\| = \left(\sum_{i=1}^4 (y_i - f(a, x_i))^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

连接拟合曲线上两点 $(CT_1, f(a, CT_1))$ 和 $(CT_4, f(a, CT_4))$ 的直线方程记为:

$$y = \alpha b, \quad x = b_1 x + b_2 \quad (5)$$

定义: 拟合目标曲线 (1) 的弯曲程度为 CT 值非线性度:

$$\tau = \frac{\max(|y - y'|)}{f(a, CT_4) - f(a, CT_1)} \quad (6)$$

其中, $\max(|y - y'|)$ 为 $|y'| = |y - y| = |q(a, b, x)| = |a_1 x^2 + a_2 x + a_3 - (b_1 x + b_2)|$ 的极值。

1.3 方法

取标准头部扫描条件 (管电压一般设为 120kV, 使之具有可比性)。在成像区域取适当大小的感兴趣区 (ROI), 获得各物质的平均 CT 值, 得到样本集 $\{(CT_i, \mu_i), i=1, 2, 3, 4\}$ 。采用 MATLAB6.1 编程:

```
p2=polyfit(x,y,2)
[a,s]=polyfit(x,y,2)
xcurve=-1250:0.1:1250
p2curve=polyval(p2,xcurve)
y(1)=polyval(p2,x(1))
y(4)=polyval(p2,x(4))
m=(y(4)-y(1))/(x(4)-x(1))
aa=a-[0m-m^3 x(1)+y(1)]
d=abs(aa(3)-aa(2)^3 aa(2)/(4^3 aa(1)))
l=y(4)-y(1)
tau=d/l
```

其中, x 和 y 是样本集决定的数组, $x = [CT_{Air}, CT_{LDPE}, CT_{Acrylic}, CT_{Teflon}]$; $y = [0.177, 0.219, 0.374]$, 为各物质对应于 66keV 能量的 X 射线的衰减系数。拟合参数的 2-范数 $\|r_2\| = s.normr$ 。同理, 对该样本集做 1 阶 (直线) 拟合的程序如下:

```
p1=polyfit(x,y,1)
[b,p]=polyfit(x,y,1)
p1line=polyval(p1,xcurve)
```

定义拟合直线的斜率为对比度标度, 即 $b(1)$, 2-范数 $\|r_1\| = p.normr$ 。程序运行结果见图 1、2。

2 结果

2 阶拟合参数的 2-范数数值范围为 $0.06e-3 \sim 3.10e-3$, 比直线拟合参数的 2-范数 $\|r_1\|$ ($0.30e-2 \sim 2.97e-2$) 平均小一个数量级, 说明拟合的效果良好,

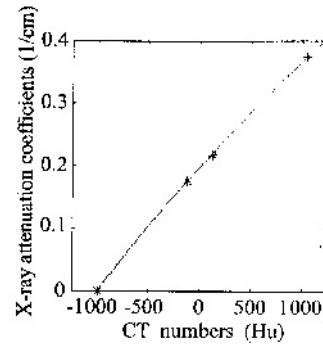


图 1 2 阶曲线拟合

Fig.1 Result of 2-order fitting of a set with MATLAB 6.1 CTnumbersof4targets:-1000,-114,125,1052;Fittingequation: $y = -1.4188e-008x^2 + 0.0001829x + 0.19719$;Non-lineardegree: $\tau = 0.039954$; 2-normoffittingcoefficients: $\|r_2\| = 0.014769$

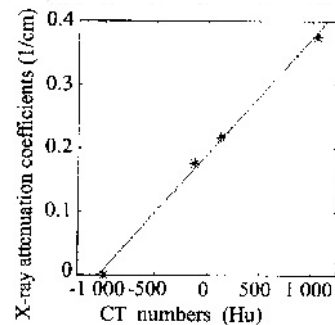


图 2 直线拟合

Fig.2 Result of linear fitting of a set with MATLAB 6.1 CTnumbersof4targets:-1000,-114,125,1052;Fittingequation: $y = 0.00018194x + 0.18964$;Contractscale: $= 0.00018194$;2-normoffittingcoefficients: $\|r_1\| = 0.014769$

更符合母体的分布规律。

非线性度 τ 数值范围为 $0.80\% \sim 8.06\%$, 结合对拟合曲线图形的直观观察发现: τ 越大, 曲线越弯曲; τ 越小, 曲线越近似于直线。同时, τ 随 $\|r_1\|$ 的增长呈单调递增关系, 而 $\|r_1\|$ 越大, 说明直线拟合的可信度越低, 反之则说明非线性度越大。因此, τ 反映了拟合曲线的线性度。

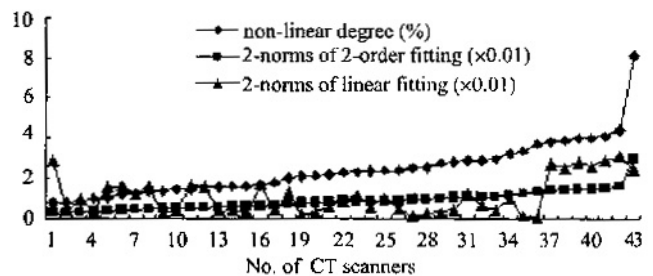


图 3 2 阶拟合曲线的非线性度、拟合参数的 2-范数与直线拟合参数的 2-范数的分布及相互关系

Fig.3 Distribution and interrelation of non-linear degrees and 2-norms of 2-order and linear fitting

3 讨论

3.1 关于扫描条件

物质的 X 射线衰减系数随着 X 射线能量的变化而变化,而 X 射线能量不但受管电压的影响,还与靶材料有直接关系,不同设备的球管采用的靶材料是不一样的。也就是说,不同设备的数组 $Y=[\mu_{Air} \mu_{LDPE} \mu_{Acrylic} \mu_{Teflon}]$ 是不同的。另一方面,探测器的品质和重建算法等软硬件因素也影响 CT 值线性度。近年出现的平板探测器阵列 (flat

paneldetectors,FPDs),具有结构紧凑、高效、宽动态范围等特点,有利于改善 CT 值线性^[5]。

举例来说,对一台 SIEMENS SOMATOM EMOTION 设备按前述方法进行检测,如采用不同算法重建,数据的分析结果将是明显不一样的。从表 1 中可看出,锐利 (sharp) 算法与平滑 (smooth) 算法的线性度和对比度标度差别显著。

3.2 关于对比度标度

表 1 一台 SIEMENS SOMATOM EMOTION 设备在不同算法下的检测和分析结果

Tab.1 Testing and analyzing results of a SIEMENS SOMATOM EMOTION scanner with different reconstruction algorithms

Algorithms	CTNumbersof4targets (Hu)				2-orderfitting		Linearfitting	
	Teflon	Air	LDPE	Acrylic	Non-linear degree (%)	2-norm ($\times 10^{-3}$)	Contrastscale ($\times 10^4$)	2-norm ($\times 10^2$)
VerySmooth	1050.2	-1022.7	-110.7	128.2	3.23	0.79	1.80	1.19
Smooth	1050.9	-1023.5	-110.4	128.3	3.21	0.75	1.80	1.19
MediumSmooth	1051.6	-1023.5	-110.8	128.1	3.25	0.76	1.80	1.19
Medium	1052.6	-1023.7	-111.4	127.9	3.28	0.80	1.80	1.21
ModerateSharp	1049.3	-1023.9	-111.1	127.7	3.20	0.77	1.80	1.18
MediumSharp	951.4	-996.0	-90.2	124.3	0.93	0.61	1.92	0.35
Sharp	954.5	-999.5	-90.0	123.9	0.93	0.79	1.92	0.35
VerySharp	952.6	-997.3	-89.5	123.7	0.93	0.82	1.92	0.35
UltraSharp	952.0	-996.2	-90.1	124.6	0.93	0.59	1.92	0.35

CT 值线性度 τ 与对比度标度 是两个相关的参数,只有在满足 CT 值线性的基础上,后者的讨论才有意义。假设规定 $\tau > 3$ 为不合格,对合格的 33 台设备的 与 进行比较分析,结果见图 4。从图中看出,二者之间没有明确的数值关系。所以,在应用质量检测中,这两项性能参数必须分别评价,且应将 CT 值线性度置于优先位置。

段分析,比如平滑算法,主要应用于软组织成像,CT 值在水附近的线性要求较高,是评价的重点。

对数据的处理,一种简便的方法是:理论推导四种物质在已知扫描条件下的理想 CT 值,记为数组 $A=[CT_1 CT_2 CT_3 CT_4]$,实际检测的 CT 值数组 $B=[CT_{Air} CT_{LDPE} CT_{Acrylic} CT_{Teflon}]$,考察它们之间的差别作为线性度的度量,对于判断设备的长期稳定性是一种简便易行的方法^[6]。

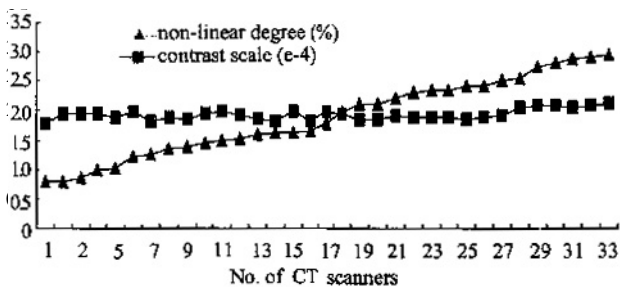


图 4 非线性度 $\tau < 3$ 的设备的对比度标度分布

Fig.4 Distribution of contrast scales of scanners with non-linear degree $\tau < 3$

3.3 关于检测方法和数据处理

采用 Catphan 体模检测 CT 值线性,从统计学的角度即用 4 个样本点反映母体的分布规律。如果增加目标物质的数目,即增大样本集的规模,拟合曲线的置信度将相应提高,而拟合方法类推;同时可以做分

参考文献:

[1] Maureemootook, WebbS, LeachMO, et al. Theperformance characteristics of a simulator-based CT scanner [J]. IEEE Trans Med Imaging, 1988, 7(2):91-8.

[2] GaNunPA. Understanding quality control [J]. Radiol Technol, 1993, 65(1):37-8.

[3] GoodenoughDJ, LevyJR, KasalesC. Development of phantoms for spiral CT [J]. Comput Med Imaging Graph, 1998, 22(3):247-55.

[4] WhiteDR, SpellerRD. The measurement of effective photon energy and "linearity" in computerized tomography [J]. Br J Radiol, 1980, 53(1):5-11.

[5] NingRL, ChenB, YuRF, et al. Flat detector-based cone-beam volume CT angiography imaging: system evaluation [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2000, 19(9):949-63.

[6] JosipN, KeithIP, RichardAS. Linearity and contrast scale control in computed tomography [J]. Med Phys, 1989, 16(1):110-3.