

口腔 CT 基于液体体模测量颌骨密度的 QCT 方法

陈晓朝¹, 伏全海¹, 孙智勇², 康 雁¹

(1. 东北大学 中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省医疗器械检验所, 辽宁 沈阳 110179)

摘 要: 总结并分析了现有用于评估颌骨密度的四种最常用的方法及不足, 提出了用于口腔锥束 CT 的基于 K_2HPO_4 液体体模的定量 CT 方法, 并说明了具体的测量方法. 同时对 K_2HPO_4 液体体模进行了均匀性与线性度测试、稳定性测试以及与固体体模的对照测试. 测试结果表明在口腔锥束 CT 下基于 K_2HPO_4 液体体模的骨密度测量结果与常规 CT 下基于固体体模的测量结果等效. 同时液体体模制作成本低, 配置方便灵活, 该方法值得临床推广和使用.

关 键 词: 口腔锥束 CT; 定量 CT 方法; 颌骨密度; K_2HPO_4 液体体模; $Ca_5OH(PO)_4$ 固体体模

中图分类号: R 814.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)05-0636-05

QCT Method Based on Liquid Phantoms for Jaw Bone Density Measurement Using Oral CT

CHEN Xiao-zhao¹, FU Quan-hai¹, SUN Zhi-yong², KANG Yan¹

(1. School of Sino-Dutch Biomedical & Information Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Medical Device Test Institute, Shenyang 110179, China. Corresponding author: KANG Yan, professor, E-mail: kangyan@bmie.neu.edu.cn)

Abstract: The current four most commonly used methods to evaluate the jaw bone mineral density was summarized, and the shortage of these methods was analyzed. Quantitative computed tomography (QCT) method was proposed and used for oral cone beam CT (CBCT) based on K_2HPO_4 liquid phantoms, and specific measurement method was described. Meanwhile the K_2HPO_4 liquid phantoms uniformity, the linearity, and the stability were tested, and were contrasted with the solid phantoms. The test results showed that the CBCT bone density measurement results based on K_2HPO_4 liquid phantoms were equivalent with the results of the conventional CT based on solid phantoms. Meanwhile, in view of the low production costs, convenient and flexible configuration, this method was worthy of clinical promotion and application.

Key words: CBCT; QCT method; jaw bone mineral density; K_2HPO_4 liquid phantoms; $Ca_5OH(PO)_4$ solid phantoms

种植牙是迄今最理想的缺牙修复方式^[1-3], 其实施过程也相当复杂^[4]. 在种植牙之前, 首先需要患者对预种植部位进行放射线成像检查来进行多方面的评估, 包括牙床空间、牙槽骨硬度、植入角度和深度等^[5-6]. 其中, 种植区骨密度评估是取得牙种植术成功的关键步骤^[7].

1 现有颌骨密度测量方法

目前医生用于评估颌骨密度主要有 4 种方法:

1) 医生根据患者术前拍摄的牙部 X 光片, 通过观察颌骨部位的亮度, 来推测骨密度的高低, 对于经验不足的医生, 容易造成判断上的误差; 并且, X 光片是二维成像, 颌骨部位的亮度还叠加了

口腔中其他组织的影响,所以颌骨的亮度不能准确反映骨密度的高低,造成较大的误差,影响手术成功率.文献[8]提出一种在 X 光平片下利用参考杆帮助医生判断颌骨密度的方法,参考杆为医生提供了密度参照物,可以降低主观误差,但是这种方法是二维成像,受到口腔中其他组织的叠加影响.

2) 双能 X 射线骨密度测量法是当前骨密度测量的金标准,具有准确度高、辐射剂量低等优点,但它测量的是颌骨的平均密度,无法测量颌骨特定部位的密度^[9].

3) 螺旋 CT 可进行断层成像,空间分辨率高,在相应软件的辅助下,利用 CT 值评估骨密度.可排除口腔其他组织影像重叠的干扰^[9],对颌骨的任意区域进行测量.但螺旋 CT 检查导致患者受到的辐射剂量较大.

4) 口腔锥束 CT (CBCT) 已成为口腔医学领域较为成熟的三维成像设备. CBCT 较螺旋 CT 的辐射剂量有大幅度减小^[10],其图像质量可靠,三维体数据可以对骨骼结构的任一区域进行精确定位分析^[11],有利其在临床和研究中的应用.已证实 CBCT 所得图像的 CT 值可以反映骨密度^[9],Cha 以及 Marquezan 等研究证实 CBCT 图像的 CT 值与骨密度测量的金标准双能 X 射线减影法对于骨密度的测量值线性相关^[12-13].但是有研究表明 CBCT 用来评估骨密度并不准确^[14],这是由于 CBCT 特有的 X 射线锥束扫描成像等原因导致其图像的 CT 值不稳定,国内目前 CBCT 的相应标准也没有对 CT 值进行检定^[15].

现有方法中主要存在 4 个问题:第一,最常用的 X 光片为二维平面成像,由于人体其他组织以及金属等物质的叠加影响,误差较大,并且由医生通过观察判断骨密度,易受主观因素影响;第二,双能 X 射线骨密度测量法得到的是平均密度,不能测量颌骨特定部位的密度;第三,螺旋 CT 扫描造成病患接受较多的辐射剂量;第四, CBCT 成像质量可靠,辐射剂量小,但是 CT 值并不能确定骨密度的实际值. CBCT 将是未来口腔医学成像的主流趋势,为提高 CBCT 测量颌骨密度的稳定性和准确度,本文将基于 K_2HPO_4 液体体模的定量 CT 测量法引入到 CBCT 颌骨密度测量中来.

2 基于 CBCT 的定量 CT 测量方法

2.1 定量 CT 测量骨密度的原理

定量 CT (QCT) 即定量 X 射线计算机体层

摄影术,是 20 世纪 80 年代发明的利用常规 CT 进行 BMD 测量的技术^[16].可分别测量任何部位骨小梁和皮质骨单位体积内的骨矿含量,即体积密度, mg/cm^3 . 测量时,除计算机软件设定感兴趣区外,还需外加一个标准体模,同步扫描以校准机器的漂移,并将 CT 值换算成 BMD 值^[17].

2.2 液体体模

目前我国在利用定量 CT 方法进行骨密度测量时,主要使用两种类型的体模,即磷酸氢二钾 (K_2HPO_4) 溶液体模和注塑羟磷灰石 ($Ca_5OH(PO)_4$)^[18] 固体体模. 由于 K_2HPO_4 的水溶性很好,制作工艺简单,所以本文采用不同浓度的 K_2HPO_4 溶液制成等效骨体模.

K_2HPO_4 溶液的浓度采用对照固体的方法获取:在体模的各管道内装不同浓度的 K_2HPO_4 溶液,如图 1 所示,与作为参照标准的 $Ca_5OH(PO)_4$ 固体体模 (密度分别为 0, 50, 100, 200 mg/cm^3) 相同.

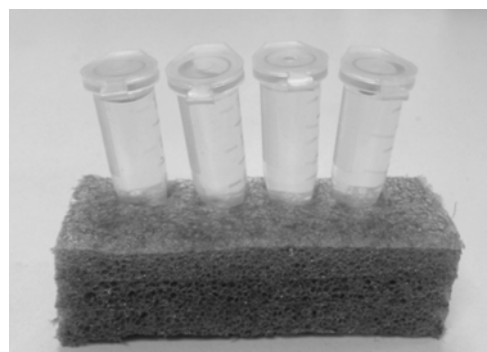


图 1 K_2HPO_4 液体体模
Fig. 1 K_2HPO_4 liquid phantoms

2.3 骨密度测量步骤

1) 如图 2 所示,计算 4 个液体体模区域的 CT 值 ($H1, H2, H3, H4$).

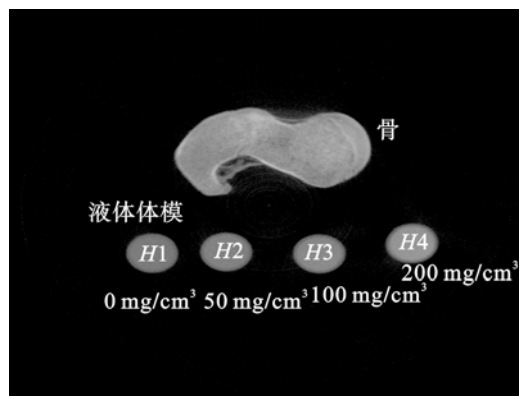


图 2 液体体模与骨组织在 CBCT 下扫描得到的图像
Fig. 2 The image obtained by CBCT scanning liquid phantoms and bone tissue

2) 利用最小二乘法计算体模的 CT 值 ($H1$,

H_2, H_3, H_4) 和体模质量浓度 ($0, 50, 100, 200 \text{ mg/cm}^3$) 的线性关系,即求出式(1)中的 k, ε :

$$H = k \times C_b + \varepsilon. \quad (1)$$

其中: H 表示 CT 值; k 表示拟合系数; C_b 表示待测颌骨密度; ε 表示偏移量.

3) 把感兴趣区域的 CT 值代入式(1)中,得出该区域的骨密度 C_b .

测量流程图如图 3 所示:

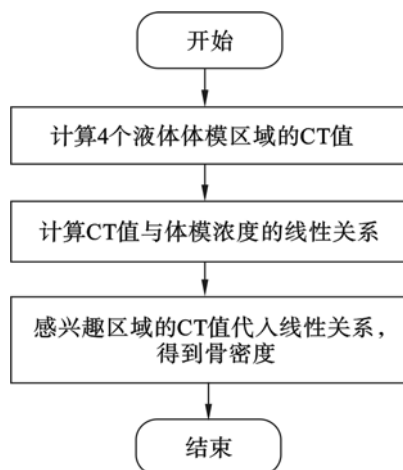


图 3 骨密度测量流程图

Fig. 3 Measuring bone mineral density flowchart

3 液体体模测试

3.1 均匀性与线性度测试

CBCT 采用沿纵向对液体体模进行扫描并重建,取带有体模的均匀分布的 10 个断面,分别测量 4 个模块的 CT 值均值 M ,标准差 S_D 以及变异系数 C_V ,测量结果如图 4 和表 1 所示.

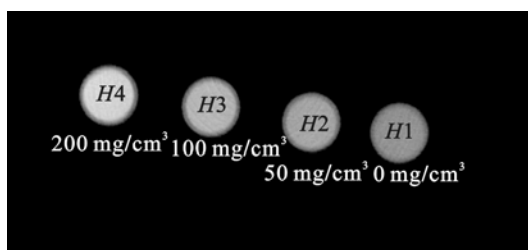


图 4 CBCT 扫描得到的 K_2HPO_4 液体体模图像

Fig. 4 K_2HPO_4 liquid phantoms scanned by CBCT

表 1 液体体模 4 个模块的均匀性测试结果

Table 1 Four liquid phantoms uniformity test results

体模质量浓度 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$	0	50	100	200
M	-16.2	94.0	197.6	405.0
S_D	0.62	1.50	1.78	1.83
$C_V/\%$	3.9	1.6	0.9	0.5

注:变异系数 $C_V = (S_D/M) \times 100\%$.

将上述 4 个模块测得的各层面的 CT 值均值进行线性回归(见图 5),得到液体体模的线性回归公式为 $y = 2.099x - 13.6$,线性相关系数 $R^2 = 0.9998$.

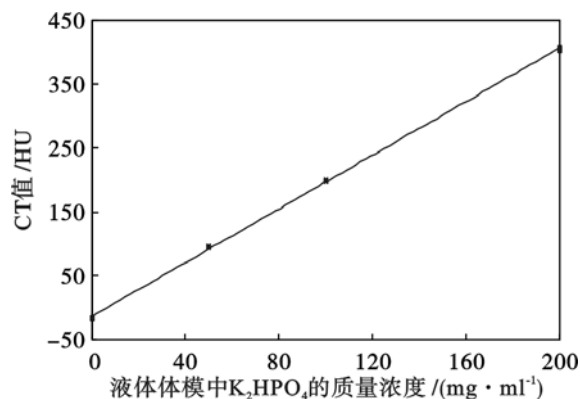


图 5 K_2HPO_4 液体体模浓度与 CT 值的线性拟合结果

Fig. 5 Linear fitting results of K_2HPO_4 liquid phantoms concentration and their CT value

CBCT 较常规 CT 其图像的 CT 值不稳定,并且图像分辨率低^[14]. 表 1 的测试结果表明在 CBCT 扫描下的液体体模不同层面之间具有良好的均匀性,相对变化不超过 3.9% (体模质量浓度为 0 mg/cm^3 的情况下),并且 CT 值与浓度的线性拟合度高,线性相关系数为 0.9998. 液体体模可良好地修正 CBCT 对测量骨密度的影响.

3.2 稳定性测试

目前配置时间最长的 K_2HPO_4 液体体模是 3 个月,3 个月后的液体体模观察不到气泡和沉淀. 采用相同的扫描条件,每个月都对体模再进行一次重复测量,将每次测量的数据与初始数据进行比较,做样本均数差别的显著性检验,各组 P 值均大于 0.05,表明 K_2HPO_4 液体体模各密度区域在 3 个月内不同时期 CT 值与初始值比较无显著差别. K_2HPO_4 液体体模成本低,配制方便,实际应用中可定期更换.

3.3 与固体体模的对照测试

本项测试使用的固体体模与质量控制体模(标称密度为 200 mg/cm^3)是四川大学华西骨质疏松研究中心等研制的 QCT 骨体模(称四川体模). 由于固体体模与质量控制体模体积较大,本项测试在常规 CT 下进行. 同时扫描 K_2HPO_4 液体体模, $Ca_5OH(PO)_4$ 固体体模以及质量控制体模,如图 6 所示. 取带有体模的均匀分布 10 个断面,分别测量液体体模与固体体模每个模块的 CT 值均值 M 与标准差 S_D ,见表 2. 将 CT 值与密度进行线性拟合,如图 7 所示,比较线性方程系数

a, b , 以及线性相关系数 R^2 , 见表 3, 表 4.

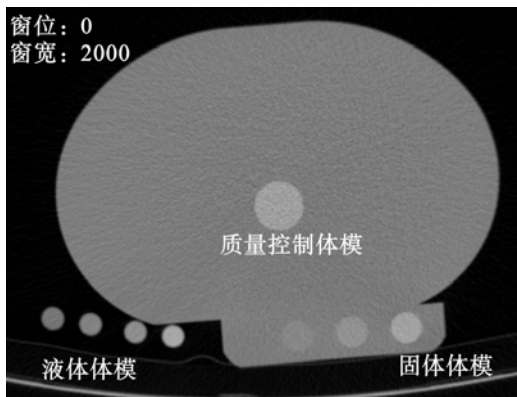


图 6 常规 CT 下同时扫描固体体模、液体体模与质量控制体模

Fig. 6 Liquid phantoms, solid phantoms and quality control phantom scanned by conventional CT at the same

表 2 对比液体体模和固体体模的 CT 值与标准差
Table 2 Comparison of the average of CT number and the standard deviation between liquid phantoms the solid phantoms

体模质量浓度 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$		0	50	100	200
M	液体	-35.8	38.4	113	248.1
	固体	-15.9	67.2	155.2	292.9
S_D	液体	7.8	7.2	3.2	2.2
	固体	2.5	2.5	4.4	3.2

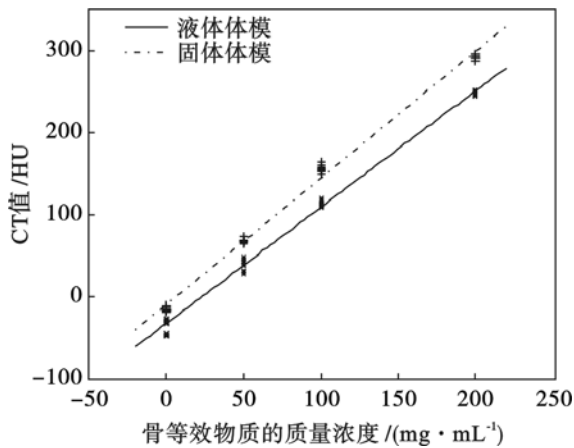


图 7 固体体模与液体体模的 CT 值与密度的线性拟合图
Fig. 7 Linear fitting figure of CT value and density of liquid phantoms and the solid phantoms

根据两种体模的拟合结果分别测量质量控制体模的骨密度, 结果见表 4.

表 4 的测量结果显示, 用 $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO})_4$ 固体体模测量质量控制体模的结果平均值为 $194.8 \text{ mg}/\text{cm}^3$, 小于实际值 2.7%, 准确度误差较

低; 用 K_2HPO_4 液体体模测量质量控制体模的结果平均值为 $228.3 \text{ mg}/\text{cm}^3$, 测量值大于实际值 14.2%.

表 3 对比液体体模和固体体模 CT 值的拟合系数与拟合度

Table 3 Comparison of the fitting coefficient and the degree of fitting between liquid phantoms and the solid phantoms

参数	液体体模	固体体模
拟合系数 a	1.42	1.54
拟合系数 b	-33.1	-10.2
R^2	0.999 4	0.998 1

注: 线性方程 $y = ax + b$.

表 4 对比液体体模和固体体模测量质量控制体模的结果
Table 4 Comparison of the result between liquid phantoms and the solid phantoms testing quality control phantom

参数	液体体模	固体体模
质量控制体模密度/ $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3})$	228.3	194.8
质量控制体模密度 S_D	3.8	1.4
变异系数 $C_v/\%$	1.9	0.7
准确度误差/ $\%$	14.2	-2.7
校正系数	0.88	1.03

注: 变异系数 $C_v = S_D/200$; 准确度误差是指测量值与真实值之间的差异, 准确度误差 = $((\text{均值} - 200)/200) \times 100\%$; 校正系数 = $200/\text{测量值}$.

4 结 语

在 CBCT 扫描得到的图像中, K_2HPO_4 液体体模具有良好的均匀性, 相对变化不超过 3.9%, 线性度高, 线性相关系数为 0.999 8. 其稳定性测量结果显示, 本文配置的液体体模在配置后 3 个月内不影响骨密度测量. 对照测试中, 液体体模与固体体模的均匀性无明显差别. 测量质量控制体模的结果显示液体体模的准确度误差较大, 为 14.2%. 但利用相关公式, 两者的测试结果可以互相换算.

现有的 $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO})_4$ 固体体模准确度误差小, 但体积大, 制作工艺复杂, 成本高. 虽有研究表明液体体模经过长时间放置后易产生气泡、沉淀以及变质而影响测量结果, 但其配制灵活方便, 并且制作成本低, 长时间使用溶液会出现沉淀变质等影响测量的情况, 可重新配制. 由于 CBCT 成像视野较小, 液体体模可在不影响测量的情况下采用较小的管道进行封装, 使用更灵活. 由于体模的等效性, 只要与被测物同时扫描, 可基本消除

CBCT 成像中 CT 值不稳定等问题,其测量结果与常规定量 CT 下的测量结果具有良好的可比性.综上所述,CBCT 下应用液体体模定量测量颌骨密度的方法值得推广和使用.

参考文献:

- [1] Nair M K, Nair U P. Digital and advanced imaging in endodontics; a review [J]. *Journal of Endodontics*, 2007, 33 (1): 1-6.
- [2] Danforth R A. Cone beam volume tomography; a new digital imaging option for dentistry [J]. *Journal of the California Dental Association*, 2003, 31 (11): 814-818.
- [3] Arnheiter C, Scarfe W C, Farman A G. Trends in maxillofacial cone-beam computed tomography usage [J]. *Oral Radiology*, 2006, 22 (2): 80-85.
- [4] Patel S, Dawood A, Ford T P, et al. The potential applications of cone beam computed tomography in the management of endodontic problems [J]. *International Endodontic Journal*, 2007, 40 (10): 818-830.
- [5] Greenstein G, Tarnow D. The mental foramen and nerve: clinical and anatomical factors related to dental implant placement; a literature review [J]. *Journal of Periodontology*, 2006, 77 (12): 1933-1943.
- [6] Tsuji Y, Muto T, Kawakami J, et al. Computed tomographic analysis of the position and course of the mandibular canal: relevance to the sagittal split ramus osteotomy [J]. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2005, 34 (3): 243-246.
- [7] 李凤波, 俞立英, 蔡意达, 等. 应用螺旋 CT 及 Simplant 软件测量种植区颌骨骨密度 [J]. *上海口腔医学*, 2009, 18 (1): 52-55.
(Li Feng-bo, Yu Li-ying, Cai Yi-da, et al. Jaw bone density assessments of implant sites using spiral CT and Simplant software [J]. *Shanghai Journal of Stomatology*, 2009, 18 (1): 52-55.)
- [8] 林协兴. 植牙用钻孔参考杆; 中国, 201020263844. 2 [P]. 2011-03-02.
(Lin Xie-xing. Drilling reference rod for implants; China, 201020263844. 2 [P]. 2011-03-02.)
- [9] 张真. 锥形束 CT 测量分析预种植区颌骨质量 [D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2010.
(Zhang Zhen. Alveolar bone deficiency assessments of pre-implant sites using cone beam CT [D]. Urumqi: Xinjiang Medical University, 2010.)
- [10] Palomo J M, Rao P S, Hans M G. Influence of CBCT exposure conditions on radiation dose [J]. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 2008, 105 (6): 773-782.
- [11] 曹安怡, 葛红珊. CBCT 在口腔颌面部骨组织评估中的应用 [J]. *南昌大学学报*, 2013, 53 (7): 95-98.
(Cao An-yi, Ge Hong-shan. Application of CBCT in assessment of oral maxillofacial bone tissue [J]. *Journal of Nanchang University*, 2013, 53 (7): 95-98.)
- [12] Cha J Y, Kil J K, Yoon T M, et al. Miniscrew stability evaluated with computerized tomography scanning [J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2010, 137 (1): 73-79.
- [13] Marquezan M, Souza M M G, Araújo M T S, et al. Is miniscrew primary stability influenced by bone density? [J]. *Brazilian Oral Research*, 2011, 25 (5): 427-432.
- [14] Timock A M, Cook V, McDonald T, et al. Accuracy and reliability of buccal bone height and thickness measurements from cone-beam computed tomography imaging [J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2011, 140 (5): 734-744.
- [15] 夏连季, 刘杨, 张志勇, 等. YY/T0795-2010 口腔 X 射线数字化体层摄影设备专用技术条件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
(Xia Lian-ji, Liu Yang, Zhang Zhi-yong, et al. YY/T0795-2010 particular specification for oral cavity X-ray equipment for digital tomography [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.)
- [16] Engelke K, Adams J E, Armbrrecht G, et al. Clinical use of quantitative computed tomography and peripheral quantitative computed tomography in the management of osteoporosis in adults; the 2007 ISCD official positions [J]. *Journal of Clinical Densitometry*, 2008, 11 (1): 123-162.
- [17] Kalender W A, Suess C. A new calibration phantom for quantitative computed tomography [J]. *Medical Physics*, 1987, 14 (5): 863-866.
- [18] Goodsitt M M. Conversion relations for quantitative CT bone mineral densities measured with solid and liquid calibration standards [J]. *Bone and Mineral*, 1992, 19 (2): 145-158.