



中國醫藥大學
牙醫學系碩士班
碩士學位論文

矯正前後骨密度的變化

Research on the bone density change during
orthodontic treatment

指導教授：許瑞廷 博士

共同指導教授：余建宏 博士

研究生：張馨文

中華民國九十九年六月

中文摘要

齒顎矯正利用牙齒的移動來達到改變咬合及牙齒排列的目的。矯正的機制、力量大小、方向、牙周支持組織中骨密度和骨重塑的過程都會影響牙齒移動方向和距離。在過去的研究中，已經發現骨密度會影響矯正的速度，並且由傳統的組織切片證明在矯正牙齒移動的方向上的壓力側會造成骨密度吸收，相反方向的張力側會造成骨沉積的現象。由最新的有限元素分析法也可以從電腦中模擬矯正期間骨頭和牙周韌帶的變化。但對於真實人體上的骨生理並沒有實際的臨床人體試驗數據。在牙科用電腦斷層掃描的發明下，減少了斷層掃描影像的輻射劑量，以方便利用影像來做判讀及分析的工作。因此本實驗可以利用降低輻射的牙科用電腦斷層掃描影像實際運用在真實人體身上來探討微觀下骨頭在矯正前後的密度變化。本實驗就是利用牙科用電腦斷層掃描影像來探討牙根周圍骨密度在矯正前後變化的情形與牙齒移動方向的相關性。

本實驗利用牙科用電腦斷層掃描儀器(i-CAT)照射八位中國醫藥大學矯正科患者口內上顎右上犬齒到左上犬齒六顆前牙在矯正前和單純 leveling and alignment 七個月後牙根周圍骨密度，並用 Mimics 軟體將測量的六顆前牙每顆牙分成上、中、下三段，每一段又分成頰、顎、近心、遠心面，分別記錄，再比較前後兩次測量結果分析牙根周圍骨密度改變情形，與牙齒移動方向的相關性。

本實驗結果發現在矯正七個月後牙根周圍骨密度會降低。並且有 57% 的牙齒在牙齒移動的壓力側方向上的骨密度改變量會大於其他面，此結論符合矯正壓力側會造成骨吸收的理論。

Abstract

In orthodontic theory, the ideal occlusion can be achieved by bone remodeling during orthodontic treatment. In the previous studies, most of them are histological studies on animal or human bone blocks. In the recent years, Finite Element Method (FEM) has adopted to show the details of bone remodeling during orthodontic treatment, however, none of them can exactly prove the real bone biology in the human body. In this study, we used dental cone beam computed tomography (CBCT) to evaluate the bone biology during orthodontic treatment. The most advantage of CBCT is that its radiation dose is much less than that of computed tomography. Therefore, we can get the bone density data in 7 months to analyze the bone density variations during orthodontic treatment. The purposes of this study were (a) to measure the variations of bone density before and after the orthodontic leveling and alignment, and (b) to find the correlation between the bone density and direction of tooth movement. Eight patients were selected from the Department of Orthodontics, China Medical University Hospital, Taiwan in this study. Six upper anterior teeth from canine to canine were chosen, and each tooth was divided into three levels (coronal, middle, apex) and four parts (buccal, palatal, mesial, and distal). The above data were collected before and after the orthodontic treatment by CBCT machine (i-CAT), and were further detected via the Mimics software approach.

The results indicated that (1) the bone density around these teeth decreased during orthodontic treatment, and (2) the reducing amount of the bone density were more obviously on the direction of tooth movement in almost 57% of the observed teeth. The discoveries of this study coincided with “the pressure-tension theory”, which stated the bone resorption mainly occurred at the pressured side.

致謝

經過三年的研究所生涯確實讓自己長進不少。首先要先感謝指導教授余建宏博士給了一個這麼有趣的論文題目，讓我能在這次的論文研究中找到新鮮的題材和結果。還要感謝另一個指導教授許瑞廷博士，因為有他的幫忙，讓我能在迷惘的時候得到最有幫助的解答，尤其在基礎研究部分，只要是我不懂的地方，他都會細心的教導，並且花了很長的時間跟著我一起修改中文和英文論文。也謝謝所有幫我們研究所上課的老師們，黃恆立老師、蕭裕源老師、張哲壽老師.....等等，有他們專業的教導，讓我可以順利的完成論文的寫作。此外，還要謝謝我的口試委員張銀祐老師，以及國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學研究所的黃上然同學，解答我對醫學影像軟體的疑惑；更要感謝所有受試者的配合。最後要感謝我的爸爸張進發博士和媽媽黃秋菊女士，是他們的鼓勵讓我繼續進入研究所攻讀喜歡的矯正牙醫學科。還有我的先生吳禕凡醫師和弟弟張益銘博士，總是在我失意的時候聽我訴苦給我力量。最後對於曾經幫助我的所有人致上最大的感謝之意。

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	XIII
表目錄.....	X

第一章 前言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.2.1 矯正造成牙齒移動的時間分期.....	3
1.2.1.1 依牙齒移動速率分期.....	3
1.2.1.2 依矯正施力期間分期.....	3
1.2.2 矯正造成牙齒移動的機制.....	4
1.2.2.1 The pressure-tension theory.....	5
1.2.2.2 The bone-bending theory.....	5
1.2.2.3 Bioelectric signals in orthodontic tooth movement.....	6
1.2.2.4 牙齒移動之生化反應機制.....	6
1.2.3 矯正期間齒槽骨周圍組織的變化.....	8
1.2.3.1 骨重塑的機制.....	9
1.2.3.2 牙根重塑.....	10
1.2.3.3 牙周韌帶重塑.....	10
1.2.4 齒槽骨骨質的分類.....	11
1.2.5 牙齒移動與牙根周圍骨密度及施力大小的關係.....	12

1.2.5.1 牙根周圍骨密度對牙齒移動的影響.....	12
1.2.5.2 施力力量大小對牙齒移動的影響.....	13
1.2.6 骨密度的測量方式.....	14
1.2.6.1 雙能量電子吸收儀.....	14
1.2.6.2 超音波.....	14
1.2.6.3 電腦斷層掃描.....	15
1.2.6.4 牙科用電腦斷層掃描(CBCT)	15
1.2.7 CBCT 的優缺點與在牙科之應用	16
1.2.7.1 CBCT 的優點	16
1.2.7.2 CBCT 對金屬影像散射程度比較	17
1.2.7.3 CBCT 的精準度探討	17
1.2.7.4 CBCT 與 CT 的輻射劑量比較	17
1.2.7.5 CBCT 在牙科的應用	19
1.3 研究動機及目的.....	19
第二章 研究材料與方法.....	21
2.1 研究流程概述.....	21
2.2 材料.....	22
2.2.1 病患的來源和條件.....	22
2.2.2 病患電腦斷層掃描影像取得之標準化.....	23
2.3 矯正器和矯正線的介紹.....	23
2.4 CBCT 儀器(i-CAT)掃描參數設定	24
2.5 牙根周圍骨密度測量方式	24
2.6 CBCT 準確度驗證.....	36
2.6.1 儀器精準度驗證.....	36

2.6.1.1 標準假體於矯正前與矯正後之驗證.....	36
2.6.1.2 對照組前後驗證.....	37
2.6.2 量測軟體驗證.....	37
2.6.3 組內差異驗證.....	37
2.6.4 組間差異驗證.....	37
2.7 統計分析	37
第三章 結果.....	39
3.1 患者矯正前後齒顎排列差異.....	39
3.2 患者矯正前後牙根周圍骨密度的改變率.....	41
3.3 患者矯正前牙根周圍分區骨密度.....	46
3.4 患者矯正後牙根周圍分區骨密度.....	50
3.5 患者矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向間關係	53
第四章 討論.....	56
4.1 CBCT 與其他測量骨量工具及方法的探討	56
4.2 假體物選擇與量測方式準確度之探討.....	57
4.2.1 標準假體的選擇.....	57
4.2.2 比較沒有做矯正者的生理與矯正者的不同.....	57
4.3 矯正後牙根周圍骨密度會變低之可能性探討.....	57
4.4 牙齒移動方向與周圍骨密度影響相關性之探討.....	59
4.4.1 pressure and tension theory vs Melsen 提出之理論	59
4.4.2 牙根分上、中、下三段與 pressure and tension theory 之相關性.....	60
4.4.3 牙根分類、顎、近心、遠心四面與 pressure and tension theory 之相關性	

.....	60
4.4.4 矯正後牙根周圍骨密度有增加情形之探討.....	61
4.4.5 不同牙齒與 pressure and tension theory 之相關性.....	62
4.5 本研究之限制.....	62
4.5.1 樣本數量的限制.....	62
4.5.2 單牙根的限制.....	63
4.5.3 骨重塑過程的限制.....	63
4.5.4 目前尚無追蹤樣本的限制.....	63
第五章 結論與未來展望.....	64
5.1 結論.....	64
5.2 未來展望.....	64
參考文獻.....	65



圖目錄

圖 1-1 矯正、牙齒與牙周支持組織(齒槽骨的關係)	1
圖 1-2 牙齒移動與齒槽骨壓力側吸收，張力側沉積	8
圖 1-3 LEKHOLM AND ZARB 骨密度的分類.....	11
圖 1-4 MICRO CT 下牙根被吸收的情形	13
圖 2-1 照射 CBCT 影像的時間	21
圖 2-2 流程圖.....	22
圖 2-3 病人照射 CONE BEAM CT 時的頭部位置	23
圖 2-4 重新定位之設定.....	25
圖 2-5 重新定位完成.....	25
圖 2-6 測量部位定義.....	26
圖 2-7 牙根周圍定義	27
圖 2-8 紅色為頰側 藍色為顎側 粉紅色為近心側 綠色為遠心側.....	28
圖 2-9 利用軟體 RESLICE PROJECT 將牙齒重新定位.....	28
圖 2-10 找出牙根尖點做一連線並設定參數	29
圖 2-11 利用 THRESHOLDING 的功能框住牙根，排除牙周韌帶.....	29
圖 2-12 利用 CROP MASK 框住想要測量的牙根.....	30
圖 2-13 利用 EDIT MASK 中的 ERASE 擦去不接近牙周韌帶的部分	30
圖 2-14 利用 EDIT MASK 中的 DRAW 填補牙周韌帶空缺，控制只有 1PIXEL 的體積	31
圖 2-15 利用 CAVITY FILL 填滿內層	31
圖 2-16 利用 MORPHOLOGY OPERATIONS 中 DILATE 3 個 PIXEL	32
圖 2-17 利用 BOOLEAN OPERATIONS 得到待量測的牙根周圍骨範圍	32
圖 2-18 排除非海綿骨 HU 值範圍以下的組織或是空氣	33
圖 2-19 找出欲測量的牙根周圍是否有密度小於海綿骨的組織或空氣	33

圖 2-20 找出 HU 範圍在-1024 到 148 間的密度區塊.....	34
圖 2-21 得到可以確定是牙根周圍有海綿骨密度以上的骨頭範圍	34
圖 2-22 利用 CROP MASK 功能將牙根周圍分成四份	35
圖 2-23 將牙根分成頰側、顎側、近心側、遠心側以不同顏色標示	35
圖 2-24 完成並記錄	36
圖 3-1 PATIENT #1 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後.....	39
圖 3-2 PATIENT #2 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後.....	39
圖 3-3 PATIENT #3 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後.....	39
圖 3-4 PATIENT #4 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後.....	40
圖 3-5 PATIENT #5 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後.....	40
圖 3-6 PATIENT #6 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後.....	40
圖 3-7 PATIENT #7 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後.....	40
圖 3-8 PATIENT #8 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後.....	41
圖 3-9 PATIENT #1 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率.....	41
圖 3-10 PATIENT #2 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率.....	42
圖 3-11 PATIENT #3 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率.....	42
圖 3-12 PATIENT #4 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率.....	43
圖 3-13 PATIENT #5 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率.....	43
圖 3-14 PATIENT #6 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率.....	44
圖 3-15 PATIENT #7 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率.....	44
圖 3-16 PATIENT #8 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率.....	45
圖 4-1 矯正前後剖面圖與矯正前後依骨性不動點之疊影	61
圖 4-2 牙齒移動量改變不大之矯正前後齒顎排列差異	62

表目錄

表 1-1 CBCT 與 CT 輻射劑量之比較.....	18
表 3-1 PATIENT #1 矯正前牙根周圍分區骨密度.....	46
表 3-2 PATIENT #2 矯正前牙根周圍分區骨密度.....	46
表 3-3 PATIENT #3 矯正前牙根周圍分區骨密度.....	47
表 3-4 PATIENT #4 矯正前牙根周圍分區骨密度.....	47
表 3-5 PATIENT #5 矯正前牙根周圍分區骨密度.....	48
表 3-6 PATIENT #6 矯正前牙根周圍分區骨密度.....	48
表 3-7 PATIENT #7 矯正前牙根周圍分區骨密度.....	49
表 3-8 PATIENT #8 矯正前牙根周圍分區骨密度.....	49
表 3-9 PATIENT #1 矯正後牙根周圍分區骨密度.....	50
表 3-10 PATIENT #2 矯正後牙根周圍分區骨密度.....	50
表 3-11 PATIENT #3 矯正後牙根周圍分區骨密度.....	51
表 3-12 PATIENT #4 矯正後牙根周圍分區骨密度.....	51
表 3-13 PATIENT #5 矯正後牙根周圍分區骨密度.....	51
表 3-14 PATIENT #6 矯正後牙根周圍分區骨密度.....	52
表 3-15 PATIENT #7 矯正後牙根周圍分區骨密度.....	52
表 3-16 PATIENT #8 矯正後牙根周圍分區骨密度.....	52
表 3-17 PATIENT #1 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向	53
表 3-18 PATIENT #2 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向	53
表 3-19 PATIENT #3 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向	54
表 3-20 PATIENT #4 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向	

.....	54
表 3-21 PATIENT #5 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向	
.....	54
表 3-22 PATIENT #6 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向	
.....	55
表 3-23 PATIENT #7 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向	
.....	55
表 3-24 PATIENT #8 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向	
.....	55
表 4-1 牙根分段符合比率.....	60



第一章 前言

1.1 研究背景

隨著時代的進步，現代人對於牙科治療，不再只是牙痛了才求診，除了定期的洗牙，口腔檢查保健，以及牙周病蛀牙等等的治療，越來越多人對於牙齒的整齊美觀有著更大的重視，也因此，許多關於改善牙齒美觀的牙科治療，需求量大增。許多牙齒排列不整齊、咬合不正影響咀嚼功能等問題，都可以藉由齒顎矯正解決，甚至能對於臉型上的不完美處進行美化的修正，所以齒顎矯正在美容牙科中，已廣為大眾所接受。齒顎矯正利用牙齒的移動來達到改變咬合及牙齒排列的目的，於是矯正的機制和施予的力量大小、牙周支持組織的骨密度和骨重塑都會影響牙齒移動的方向和距離。

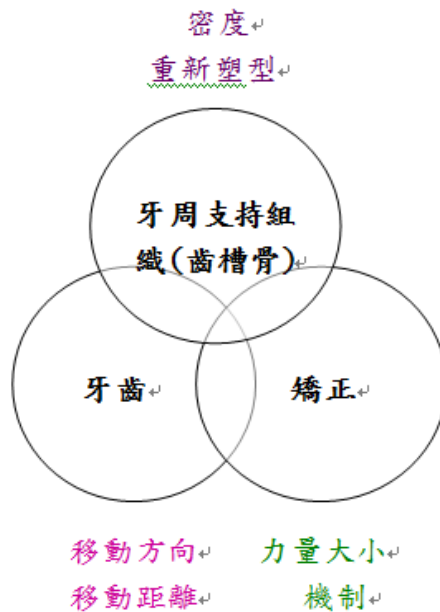


圖 1-1 矯正、牙齒與牙周支持組織(齒槽骨的關係)

就臨床而言，能直接真實測量的骨生理機制就是骨密度的變化。傳統的觀念得知矯正會造成骨頭的吸收一開始大多是利用動物的組織切片(Wainwright 1973)。有了斷層掃描之後，也有學者利用斷層掃描的影像來作為植牙區骨密度

的評估(Norton and Gamble 2001)。由於科技的進步，牙科用電腦斷層掃描影像(Cone Beam CT)已經越來越被廣泛使用(Sukovic 2003; Guerrero et al., 2006)，牙科用電腦斷層掃描影像(Cone Beam CT)最大的優點除了劑量低(Tsiklakis et al., 2005)，在長度與體積的測量也是精準的(Mischkowski et al., 2007)，另外 HU 這種影像單位在現今也廣泛被利用來測量骨密度(Aranyarachkul et al., 2005; Loubele et al., 2006; I. TURKYILMAZ 2007; Turkyilmaz et al., 2007)。於是我們可以利用牙科用電腦斷層掃描影像(Cone Beam CT)來作為測量骨密度的工具，藉此觀察真實人體在矯正前後骨頭密度的改變。

1.2 文獻回顧

矯正造成的牙齒移動簡單說是因為矯正力量使牙齒周圍組織產生 Remodeling。因為力量會造成牙周韌帶的血管通透性和血流變化的改變，造成許多重要的分子合成和釋放，例如神經傳導物質 neurotransmitters、cytokines、成長因子(growth factors)、colony-stimulating factors、arachidonic acid metabolites..... 等等。這些分子會產生許多細胞性的反應並且提供組織沉積或吸收的良好環境。(Krishnan and Davidovitch 2006)

這些 Remodeling 的組織包含牙髓組織、牙周韌帶 PDL、齒槽骨和牙齦。當受到不同程度、不同頻率和不同作用時間的力量，還有牙周韌帶的生理反應等等都會使得在矯正過程造成牙齒的移動會有巨觀上和微觀上不同的變化，當然骨質的密度會影響給矯正力之後的作用，也會影響微觀下生理的反應快慢，所以骨質密度也是影響牙齒移動快慢的重要因素。

在臨床上量測骨密度的方法有很多，從雙能量電子吸收儀(Dual-Energy X-ray Absorptiometry; DEXA)、超音波、電腦斷層掃描和牙科用電腦斷層掃描(Cone Beam Computer Tomography ; CBCT)都是很好的量測工具。但因為儀器的精準

度、費用和對病人暴露在輻射劑量安全的考量，本次實驗使用牙科用電腦斷層掃描(CBCT)來探討骨密度在矯正前後的變化。

1.2.1 矯正造成牙齒移動的時間分期

1.2.1.1 依牙齒移動速率分期

1962年Burstone主張如果將牙齒移動的速率跟時間作關係圖，會發現有牙齒移動會有三個不同時期。(Burstone and Tanne 1986)

Initial phase :

當施予牙齒一個力量時會產生立即性的快速移動。這是因為牙周韌帶空間被擠壓造成的牙齒移動。

Lag phase :

接著牙齒移動會經過一個很緩慢或是甚至不移動的時期。這是因為牙周韌帶在受到壓力後會產生透明變型(hyalinization)，這是因為細胞壞死在顯微鏡下呈現透明，故稱作hyalinization區，這區壞死的組織在還沒有被清除前，牙齒都是不會移動的。

Postlag phase :

當壞死區被清除後，牙齒便會產生快速的移動。

1.2.1.2 依矯正施力期間分期

1990s兩位學者(Pilon et al., 1996; van Leeuwen et al., 1999)在利用狗做的研究，依牙齒移動的時間和位移量的關係將牙齒移動分成四個時期。

第一個時期：發生在第24小時到第2天。

這段時間代表牙齒一開始在齒槽骨內移動。因為牙周韌帶內的纖維在張力側被伸張或壓力側被壓縮時會產生透明壞死區，而osteoclast(蝕骨細胞)和osteoblast

progenitors(成骨細胞先驅細胞)和一些免疫蛋白球數量會增加。

第二個時期：發生在第20到第30天。

壓力側的牙周韌帶纖維會產生變形，導致血流停止而產生壞死區，牙齒移動也會停止。Phagocytic cells如macrophages, foreign body giant cells和蝕骨細胞從底下沒有受傷的牙周韌帶間或是從受傷的牙周韌帶附近的齒槽骨骨髓區將壞死組織清除。

在牙周韌帶的張力側，骨表面一層停止活動的成骨細胞會變大而且分泌新的骨質(osteoid)，新的成骨細胞先驅細胞也會從牙周韌帶微血管附近的pericytes補充，這些成骨細胞先驅細胞會增生也會沿著骨頭和牙周韌帶間相連的Sharpe's fiber移動到骨表面。同時受張力側的牙周韌帶成纖維細胞fibroblasts也會增加和重整附近的基質。

第三及第四時期：出現在施予矯正力後40天，是加速期和線性期。

這兩個時期發生在將壞死組織移除後，牙齒移動速度會加快。這時壓力側的纖維還沒有適當的排列，骨表面也相當不規則，這代表之前的吸收仍在進行。在張力側會發現骨頭的沉積，因為成骨細胞仍是有活性的(檢測成骨細胞內有alkaline phosphatase)

這些都跟Burstone所提出的三個時期吻合。也就是說：

- 第一個時期相當於Initial phase
- 第二個時期相當於Lag phase
- 第三第四個時期相當於Postlag phase

有學者甚至指出壞死區偶爾還可以在這個時期被見到，尤其是在給比較大矯正力量的牙齒周圍，這代表壞死組織的形成和移除在矯正治療過程中是持續進行，而非一個時期。(von Bohl et al., 2004)

1.2.2 矯正造成牙齒移動的機制

1.2.2.1 The pressure-tension theory

Sandstedt (1904)(Sandstedt 1904), Oppenheim (1911), and Schwarz (1932)(Schwarz 1932)在傳統的組織學研究下提出The pressure-tension theory (壓力-張力的理論)。這些學者假設牙齒移動會在牙周韌帶的空間內產生壓力側和張力側，在壓力側牙周韌帶會因為牙周韌帶內的血管收縮，細胞的複製降低而產生組織的破壞，也會造成纖維的產量減少；在張力側，牙周韌帶的纖維會伸張而產生細胞的複製增加。

The pressure-tension theory這理論主要是建立在牙周韌帶的組織學研究上。假設牙周韌帶的寬度會改變細胞的數量和增加細胞的活性。Schwarz說矯正給的力量不應該超過牙根表面微血管網的血壓(約20-25 g/cm²)，如果超過這個壓力，會造成組織的壞死，在附近的骨髓腔產生下蝕性吸收(undermining resorption)。這種透明變化產生的第一個現象就是細胞內會出現pyknotic nuclei，接著細胞壞死後會出現無細胞區，當macrophages, foreign body giant cells, 和osteoclasts從未受傷的鄰近區域近到這塊壞死區，這些細胞會馬上吸收壞死區下面的骨頭和壞死的組織，這就是所謂的下蝕性吸收(undermining resorption)。

1.2.2.2 The bone-bending theory

Baumrind 根據 Pascal's law 的原理在1969年提出了” bone-bending theory”(Baumrind 1969)。他提到牙周韌帶是一種continuous hydrostatic system，當受到力之後會將力量平均的傳到各個地方。矯正力量造成齒槽骨的偏斜通常伴隨著牙周韌帶的伸張。

Farrar在1988年第一個提出當矯正裝置被啟動後，傳到牙齒的矯正力會被傳導到接近施力處的每個組織。這力量造成骨頭、牙齒和牙周韌帶中固體的結構彎折。然而骨頭又比其他組織來的有彈性，因此彎曲的程度越大。這種骨彎曲的過程會產生骨頭的turnover並且使細胞和非有機的碎片產生renewal。這個過程會因為骨頭在變形的位置中加快反應。這在以下的幾點可以發現：

- 一. 在en-masse的牙齒移動下，因為要使比較多的牙齒骨頭彎折所以移動速度比較慢。
- 二. 在有拔牙空間下牙齒移動會比較快。
- 三. 在小孩子因為骨頭鈣化程度比較少所以骨頭比較軟，比較容易彎折下牙齒移動會比骨頭鈣化程度高的大人快。

1.2.2.3 Bioelectric signals in orthodontic tooth movement

1962年, Bassett and Becker假設在接受到外力的組織會產生 電位能(electric potentials)。這些電位能可能會使分子帶電而與某些特定的細胞膜作用或是這些游離的離子會穿過細胞膜(Bassett and Becker 1962)。

Zengo(Zengo et al., 1973)等人在受到壓力的狗齒槽骨進行體內與體外實驗來量測電位能，發現在受到矯正力使骨頭產生concave處會產生負電位，這比較容易使成骨母細胞產生活性。而另一側convex突出側(壓力側)是產生正電或是中性電位，而使蝕骨母細胞增加活性。

綜合這些學者的發現，矯正力造成的骨頭彎曲會產生生物電能 (piezoelectricity and streaming potentials)，有可能是提供細胞反應的第一個信號。

1.2.2.4 牙齒移動之生化反應機制

在基礎生物學和臨床觀察的研究下，Mostafa(Mostafa et al., 1983)等人提出了一個牙齒移動的假說。其中包含了兩種方式下會造成牙齒移動。

- 第一種路徑比較偏向生理反應，因為合併正常的骨頭成長和重整。
- 第二種路徑比較偏向因為矯正造成的局部發炎反應。

第一種路徑下，矯正力會產生壓力和張力使骨頭彎曲，產生組織的生物電能極化(bioelectric polarization)進而使骨頭產生重塑。因為prostaglandin synthesis的間接證據以及電信號的產生，所以Mostafa等人說明這種現象會因為壓電的過程

(piezoelectric processes)使細胞膜極化，進而產生細胞間的信號，導致細胞增生、分化和活性的改變。

當齒槽骨受到力量產生concave and convex sides會有不同的帶電效應，於是正電或中性的基質(matrix)會促進蝕骨細胞的活性；負電則會使成骨母細胞增加活性。

第二種路徑：說明矯正造成的牙齒移動是一種受力後的發炎反應造成的。因為矯正力會增加血管通透性和細胞的浸潤，引發一連串牙齒組織和牙齒周邊組織的發炎反應。

Lymphocytes, monocytes和macrophages等免疫蛋白會進入發炎的血管，增加prostaglandin的釋放和水解酵素的分泌。Prostaglandin和一些繼生物質會增加細胞cAMP濃度而增加蝕骨細胞的活性。水解酵素像是collagenase會分解一些細胞外間質。

最近Jones(Jones et al., 1991)等人發現牙齒周圍組織當受到不管力量大小的矯正力後都會發生組織發炎反應。於是產生以下反應。

1. 受到壓力側的牙周韌帶的組織液會跑到張力側
2. 慢慢的力量會傳到牙齒周圍組織的細胞和細胞外間質
3. 受到壓力的細胞會因為力量藉由cytoskeleton傳到細胞核內產生一些特別的基因活化。
4. 從牙齒周圍組織的神經末梢釋放出來一些會止痛或是影響血管的神經性胜肽
5. 這些影響血管的神經性胜肽會跟受到壓力的牙齒周邊組織的內皮細胞作用。
6. 之後循環的免疫球蛋白會附著在被活化的內皮細胞上
7. 血漿會從擴張的血管滲透
8. 接著這些免疫球蛋白會從血管跑到血管外的空隙
9. 免疫球蛋白會和成並且釋放信號如(cytokines, growth factors, and CSFs)等進入受到壓力的牙齒周圍組織

10. 這些信號分子會與牙齒周圍組織產生交互作用

於是這些產生交互作用的細胞便參與了牙齒周圍組織的重塑過程。

也就是說，近年來的研究因為儀器進步和之前學者的努力，已經能更深入更細微的生理反應，發現牙齒移動路徑其實與一些基因、神經傳導物、信號分子等等生物性分子的生化反應有關，因為這些訊號的交互作用來產生牙齒周圍組織重塑。

1.2.3 矯正期間齒槽骨周圍組織的變化

關於骨重塑的機制，簡單的說，當一個矯正力量施予牙齒的時候，會造成牙齒周圍的牙周韌帶產生壓擠，此時血流減少進而發生蝕骨細胞，成骨細胞的分化，於是在壓力側產生骨吸收的現象，張力側產生骨沉積的現象。牙齒因為骨重整的變化而產生移動。但是更仔細的探討內部發生的情形，將牽涉得很廣泛，包含：基因的調節、蝕骨細胞與成骨細胞的分化與功能、神經傳導物的調節、內分泌的調節等等。(Masella and Meister 2006)

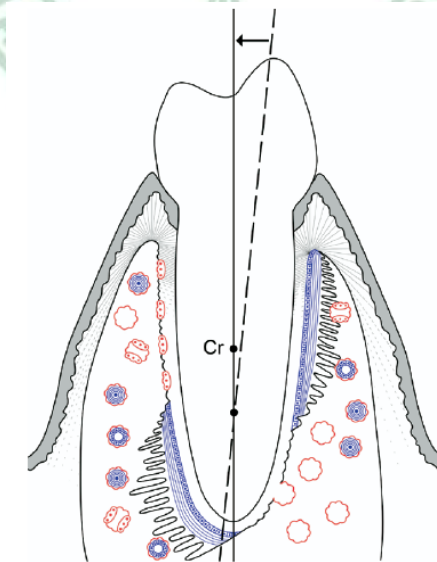


圖 1-2 牙齒移動與齒槽骨壓力側吸收，張力側沉積

(Cr=The center of resistance) (Roberts et al., 2006)

1.2.3.1 骨重塑的機制

Forst說Remodeling是指鈣化組織內部產生的交替變化但不會改變整體外觀的一種生理性名詞和反應(Epker and Frost 1965) (Frost 1969)。這是一種分解代謝(catabolic)和合成代謝(anabolic)的系列過程，也就是一種修補或重新生成年老或受傷鈣化組織的反應。換句話說，這種骨吸收和骨生成的反應是一種為了維持鈣離子恆定的生理反應。

這種Remodeling生理反應在1960s早期由Frost HM這位學者提出。其定義是指細胞產生活化(Activation)->吸收(Resorption)->新的骨細胞沉積(Formation)的連續過程。

Frost 不但建立了我們現代骨頭Remodeling的生理概念，還發展了histomorphometric method(動力組織型態學方法)，也就是利用四環黴素標記在人體內來解釋人體內骨生理機制。根據Weinmann and Sicher 的理論：Modeling是指骨頭在成長的時候會因為外力或是環境而使形狀產生改變，而Frost HM的Remodeling是一種終生骨頭的替換和維持，並且不會改變外型。之後牙科也在Forst提的理論下開始了骨的研究。Harold Frost, MD (1922-2004) 破解了骨生理，可以說是現代骨生理學之父。

綜合來說，骨頭吸收是由一系列蝕骨細胞將骨頭內的礦物質或有機物質移除的過程(Hill 1998)。一旦蝕骨細胞分化後，骨頭表面的成骨細胞會產生許多酵素來幫助蝕骨細胞移除化組織。而成骨細胞也會將骨頭表面未鈣化的類骨物質(osteoid)給移除。

骨的形成包含了從一開始的間質細胞分化成成骨細胞的先驅細胞，在成熟為成骨細胞，這些成骨細胞會持續分泌並將類骨物質(osteoid)並將類骨物質鈣化直到將吸收的骨空洞給填滿(Meikle et al., 1992)。

成骨細胞最後會被鈣化的間質給包圍而成為骨細胞，這些成為骨細胞的成骨細胞會失去它們alkaline phosphatase的活性，但維持高濃度的鈣離子(Eriksen et al.,

1986)。

1.2.3.2 牙根重塑

牙齒的牙釉質(enamel)、牙本質(dentin)、以及無細胞牙骨質(acellular cementum)是由從上皮層衍生而來的鈣化組織。它們終其一生很容易受到磨耗，但是在牙齒發育完成後都沒有Remodeling的能力。不過牙根周圍的細胞牙骨質(cellular cementum)是一種修補功能的組織，可以幫助維持牙齒的功能，它跟齒槽骨在組織型態很類似，但是結構卻是差異很大(Keeling et al., 1993)。

牙根吸收與牙骨質修補的過程與骨重塑的機制有幾點類似的地方。

- 一. 都有細胞產生活化(Activation)->吸收(Resorption)->新的骨細胞沉積(Formation)的連續過程。
- 二. 會因為受傷或是力量的增加起始整個過程。

而Kimura和Attal等人(Attal et al., 2001)提出造成牙根吸收的蝕齒細胞(odontoclast)與骨整合的蝕骨細胞(osteoclasts)有類似的先驅細胞。

1.2.3.3 牙周韌帶重塑

證據說明牙周韌帶也會進行纖維的重整，當新的骨頭沉積，新形成的纖維也會附著在齒槽骨上。

Rygh and Brudvik(Rygh and Brudvik 1995)觀察了老鼠下顎的組織切片，發現在牙周韌帶的張力側會增加血管通透性，並且在切片上可以看到這些擴張的血管會增加的牙周韌帶空間。而在壓力側，牙周韌帶會變窄並且使齒槽骨產生變形。當新的骨頭沉積，新形成的纖維也會附著在齒槽骨上，牙周韌帶也會進行纖維的重塑。

1.2.4 齒槽骨骨質的分類

對矯正醫師來說，骨密度是一個重要的結構因子，與骨頭重新塑型的速度有關，例如 1996 年 Rober 這位學者就發現下顎牙齒的移動速度與骨頭的密度有關 (Roberts et al., 1996)。於是骨密度的判定對牙科來說是不可或缺的。

在牙科齒槽骨密度的分類上，最常用的就是 Lekholm and Zarb 根據皮質骨和疏鬆骨在放射影像上的量將骨密度分成四種類型。(Zarb and Zarb 1985)

- 型 1：幾乎全部都是由均質的緻密骨組成
- 型 2：一層厚的緻密骨中間圍繞密度較高的疏鬆骨
- 型 3：一層薄的緻密骨中間圍繞密度較高的疏鬆骨
- 型 4：一層薄的緻密骨中間圍繞密度較低的疏鬆骨



圖 1-3 Lekholm and Zarb 骨密度的分類

由左到右分別為 type1 到 type4(Zarb and Zarb 1985)

而 Misch 把骨密度依照植體放置前鑽針鑽的手感來將骨密度分分成四種 (Misch 1990)

- D1：骨頭相似於橡樹或楓樹
- D2：骨頭相似於雲杉或白松木
- D3：骨頭相似於美熱帶輕木材
- D4：骨頭相似於聚苯乙烯

除此之外，也有學者依照這兩種分類法做些微改良，成為不同的分類法。

Thruhlar RS(Truhlar et al., 1997)等人在 1997 年也以之前 Lekholm and Zarb 的

分類法為基礎加以改變成另一種利用在種植植體時鑽骨頭時的感覺來將骨密度做分類，並且發現 type2 和 type3 的骨頭比 type1 或 type 4 來的常出現，而 type3 的骨頭比較常出現在上顎骨，type2 的骨頭比較常出現在下顎骨，而骨密度依次在下顎前牙區、下顎後牙區、上顎前牙區、上顎後牙區越來越低。

Trisi P 等人在 1999 年(Trisi and Rao 1999)也根據 Misch 的分類將種植植體時鑽骨頭的感覺與骨切片下骨的組織結構做比較，發現 D1 的骨密度最低，D4 的骨密度最高，而 D3 和 D4 的骨密度是很相近的。

CT 測量出來的骨密度與常用的 Lekholm and Zarb 分類很相近(Norton and Gamble 2001; Shahlaie et al., 2003; Aranyarachkul et al., 2005)但是 type2 與 type3 不太好分。(Aranyarachkul et al., 2005)CBCT 量測出來的骨密度和 CT 量測出來的骨密度有很高的相關性很高。

1.2.5 牙齒移動與牙根周圍骨密度及施力大小的關係

1.2.5.1 牙根周圍骨密度對牙齒移動的影響

早在 1985 年 Eriksen EF, Mosekilde L, Melsen F 就發現皮質骨需要大約 29 天去產生約 200 ~ 250 微米的一個吸收空洞(resorption cavity)，約 134 天去填滿這個吸收空洞，所以整個過程總共需要約 163 天(五個半月)(Eriksen et al., 1986)；而人的疏鬆骨,在整個吸收和填滿吸收空洞的過程大約需要 151 天(約五個月)(Eriksen et al., 1985)。所以緻密的皮質骨需要比較長的時間來移動牙齒。

另外Midgett等人(Midgett et al., 1981)和Wainwright等人(Wainwright 1973)在很早的時候就發現：牙齒移動在緻密的骨頭中移動的速度比較慢。牙齒在海綿骨移動的速度比在皮質骨要快上一半的時間。

Sidiropoulou-Chatzigiannis 等人在 2007年發現骨質疏鬆症的患者因為骨吸收和骨生成的速率會加快，但是兩者的關係不對等，造成骨吸收的比例較多，於是骨密度降低，矯正過程中牙齒的移動速度會比正常人還快。

(Sidiropoulou-Chatziannis et al., 2007)

1.2.5.2 施力力量大小對牙齒移動的影響

所謂的最適當力量”optimal force”在1932年Schwarz(Schwarz 1932)定義為”改變組織壓力的力量最接近於微血管血壓的力量，以避免在壓迫到牙周韌帶時微血管產生閉合狀態。

在目前的觀念裡，optimum force是指力量產生牙齒最大的移動速率而又對牙根或牙周韌帶和齒槽骨產生最小不可回復性的傷害(Krishnan and Davidovitch 2006)，如果施予的力量大於牙根或牙周韌帶和齒槽骨能承受的力量，往往會造成牙根的吸收。

這個證據早在 1972 年就有學者發現牙齒在緻密的骨頭內移動需要更大或更久的力量供應，結果也更容易產生牙根吸收(Rygh and Reitan 1972)。而在現今科學的發達，從顯微斷層掃描(micro CT)的影像更可以發現牙根吸收的情形(Harris et al., 2006)。

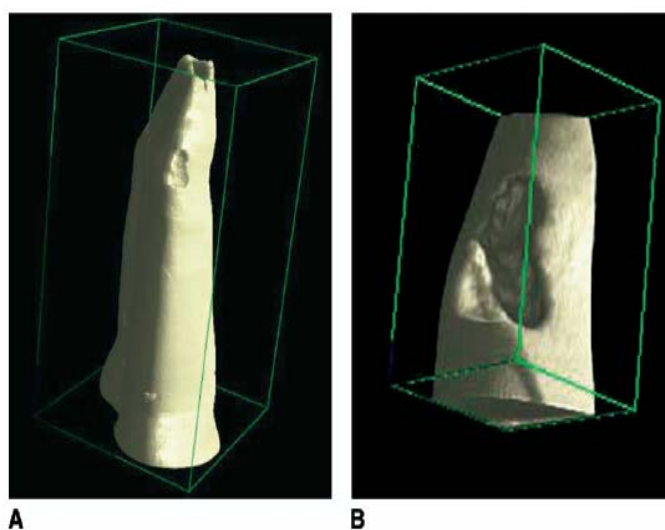


圖 1-4 Micro CT 下牙根被吸收的情形(Harris et al., 2006)

1.2.6 骨密度的測量方式

所謂的骨密度最基本的定義就是 bone mineral density (BMD)，也就是利用 X-ray，超音波或電腦斷層掃描來量測身體裡面有多少礦物質(如鈣)，量出來的單位為 g/cm^2 。BMD 值大的代表骨頭的強度較大，BMD 值小的(如骨質疏鬆)代表骨頭比較脆弱，容易骨折。

一般來說，可以用來測骨頭密度的有雙能量電子吸收儀(Dual-energy X-ray absorptiometry 簡稱 DEXA)，超音波(ultrasound)，電腦斷層掃描(computed tomography, CT)，還有牙科用電腦斷層掃描(cone beam computed tomography, CBCT)。

在以上這幾種測量方式有些影像不夠清楚；有得太具侵略性或是輻射劑量太高，並不很適合在臨床上做為常規的使用。而目前最能總和其優缺點的就是CBCT。

1.2.6.1 雙能量電子吸收儀

DEXA的原理是利用兩個不同的X-ray光束來量測脊椎骨或髖骨的骨密度。當骨頭密度較高，緻密的骨頭擋住x-ray射線而減少吸收。DEXA的優點在於X-ray的劑量小，測量時間短。在牙科領域上已經有學者利用DEXA來測量齒槽骨密度。

但是事實上DEXA在牙科的應用比較少，因為3D影像會投影成2D影像，再顏面骨的測量上很容易因為頭骨或是脊椎的投射而影響判斷。在2000年Becker(Becker et al., 2000)等人利用DEXA來探測牙科植體的失敗與骨質疏鬆的探討，認為DEXA還是比較適合周邊骨的測量，不適合用來測量牙科植體的位置。

1.2.6.2 超音波

超音波是利用音波來測量 BMD，通常量測的地方是腳後跟。超音波的優點是快速、無痛，而且沒有任何輻射劑量的考量。但是它通常是用來當作前線的測量，當發現骨密度較低時，還是需要利用其他測量工具做更進一步判斷，加上超

音波不能用來區分是因為骨折還是因為骨質疏鬆而造成骨密度降低，於是在骨質疏鬆的診斷上，越來越多人質疑超音波的可靠性。

在牙科的應用上也比較少，但是1980年的學者也曾有利用超音波進行研究。
(Kardos and Simpson 1980)

1.2.6.3 電腦斷層掃描

1980年Hounsfield(Hounsfield 1980)發現X光射線開始了斷層掃描的紀元。斷層掃描在一般骨質疏鬆的量測上比較少用，原因是因為費用較高，時間較久，而且重點使有較多輻射劑量的問題。但是在牙科植體的應用來說，卻是非常重要的。

Schwarz et al. (Schwarz MS 1987; Schwarz MS 1987)等人在1987年開始將電腦斷層的概念應用在牙科植體的術前診斷上，之後利用斷層掃描來做為牙科植體術前診斷得運用便開始越來越廣 (Cann 1988; Hvid et al., 1989)

電腦斷層掃描量測出來的並不是真正的骨密度 BMD，而是將影像上的灰階值代表骨密度的多寡。單位是 HU。但是在 1995 年 Kalender(Kalender et al., 1995)已經證明 HU 和 BMD 有線性關係。2002 年 Peter Homolka 等學者也已經發現 CT number 和骨密度以及植體所入所需用的扭力大小成線性關係(Homolka et al., 2002)。換句話來說，現在越來越多學者利用電腦斷層影像作為牙科研究的工具，也越來越多人利用 HU 值代表骨密度。HU 值的灰階值雖然代表 HU 是一個範圍值，但是其實更能在臨床並沒有絕對的數字，於是更能在臨床上應用(de Oliveira et al., 2008)

1.2.6.4 牙科用電腦斷層掃描(CBCT)

CBCT 是近年來在牙科應用上重要的發明，因為傳統的電腦斷層不論是儀器的費用或是輻射劑量的考量，都是使用上的缺點。在牙科的治療計畫訂定上，我們需要精準的量測，但又希望患者不要接受太大的輻射劑量，於是 CBCT 發明

後，越來越多的研究利用 CBCT。CBCT 的原理跟 CT 類似，單位也是 HU。CBCT 有別於傳統斷層掃描影像，它是一種請掃描者利用坐的方式來照射頭部有關的電腦斷層造影，而在 X-ray 光束的設計也由傳統的扇形變成了柱狀。所以 CBCT 在掃射後的影像是”體積”而非傳統 CT 的”面積”，而照射出的影像，更能利用後續的軟體轉換成 3D 影像，方便在更精準的定位。Aranyarachkul 等人 (Aranyarachkul et al., 2005) 利用傳統 CT 和 CBCT 發現這兩種方法都可以測量骨密度，只是測出來的數字是利用影像上的灰階值來代表骨密度。在 CBCT 與 CT 利用 HU 來測量骨密度的量化以有先前的研究證明，並且發現 CBCT 和 CT 所測得的 HU 值與組織切片所測得得密度和厚度都有相似的關係。

1.2.7 CBCT 的優缺點與在牙科之應用

1.2.7.1 CBCT 的優點

在進行醫療的放射線檢查我們希望能得到夠多的資訊，又能遵守 ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 的原則，讓病患曝露在放射線下的劑量越低越好，因此 CBCT 提供了上下顎骨 3D 和剖面的影像，並且在照射的硬體機器上，不論體積、金錢、重量以及複雜性都比同等級的傳統 CT 來的小，更重要的，CBCT 可以提供比傳統 CT 影像更低的輻射劑量 (Guerrero et al., 2006)。

在矯正方面，CBCT 可以利用照射頭部來顯示出牙齒與骨頭 3D 立體相關位置，對於診斷出正確的牙根位置，對於牙科矯正植體放置位置的評估幫助很大，也可以用來分析矯正前後的變化。清楚的影像以及 3D 的好處，可以減少傳統在矯正病人在側顱片影像上因為人體立體的影像在 3D 轉成 2D 時，左右兩邊不對稱的疊影下產生判讀困難的問題 (Bergersen 1980; Ahlqvist et al., 1983)。在數位化以及影像學的進步上，一組的 CBCT 影像可以切換成傳統矯正科診斷所需要的側顱影像 (cepho) 和環口影像 (pano) (Swennen and Schutyser 2006; Kim et al., 2007)，如此一來未來可以利用一組 3D 電腦斷層掃描影像 (Cone Beam CT) 來取代

側顛影像(cepho)和環口影像(pano)。

1.2.7.2 CBCT 對金屬影像散射程度比較

人的牙齒有時候會有假牙或是銀粉等金屬物質的鑲復物，如果會干擾影像和密度的判讀會使結果產生誤差。但是 Christof Holberg 等人(Holberg et al., 2005)在 2005 發現 CBCT 在金屬物體產生的散射影響遠小於傳統的 CT 影像。在 CBCT 中的影像模糊比較是因為照射過程中因呼吸等小移動而產生。由這點來看 CBCT 可以幫助我們在有矯正器或任何鑲復物的口腔進行更精準的分析。

1.2.7.3 CBCT 的精準度探討

比較 CBCT(i-CAT)和數位側顛影像在 TMJ 三個平面上的影像，發現 CBCT 比數位側顛影像對於這三個平面上的直線距離的量測上有更精準的結果，並且在不同觀察者也能得到比較一致的結果(Hilgers et al., 2005)

Kobayashi 等人(Kobayashi et al., 2004)利用 CBCT 和 CT 來測量大體下顎骨體上的距離，發現 CBCT 測得的影像距離與真實的距離的平均誤差約 0.22mm 而 CT 測得的影像距離與真實的距離的平均誤差約 0.36mm，顯示出 CBCT 測得的距離較 CT 準確。

Mischkowski(Mischkowski et al., 2007)在 2007 年的研究卻認為 Multidetector row CT 還是比 CBCT 有更精準的影像提供更準確的測量，但是兩者的差異並不會影響在臨床上的應用。

1.2.7.4 CBCT 與 CT 的輻射劑量比較

2005 年 Kostas Tsiklakis(Tsiklakis et al., 2005)發現利用 CBCT 照射顛顏骨可以減少器官接受到的輻射劑量(absorbed dose and effective dose)。若能加上鉛板隔離輻射，更能減低甲狀腺和頸椎所受到的輻射。通常來說，顏面部的 CBCT 影像會

比傳統的CT影像照射減少六倍到八倍的有效輻射劑量(effective dose)。但是CBCT影像會比傳統的環顱影像高上三倍到七倍，這與比較不同的器官和使用不同的軟體等等有關。

在最近的2008的研究中(Hirsch et al., 2008)發現拿傳統的測顱全口X光片和常用的兩種CBCT(一種為本次實驗所用機種)和兩種CT的輻射劑量，發現在比較的位置上以傳統的側顱或全口X光片最低，約10.4 μSv ，以multi-slice CT最高，約 (429.7 μSv)。

Maria Eugenia Guerrero 等學者(Guerrero et al., 2006)在 2006 年在綜合比較其他學者的文獻後做成了綜合的表格，發現 CBCT 照射後的輻射劑量換算成背景輻射天數大約是 6-12 天，傳統的環顱影像大約 0.5 到 2 天。傳統 CT 的輻射劑量少了約 30 多天左右。

表 1-1 CBCT 與 CT 輻射劑量之比較 (GUERRERO ET AL., 2006)

Imaging technique	Equivalent natural radiation estimations (days)
CT mandible + maxilla	38
CT mandible	33
CT maxilla	26
Cone beam CT	6-12
Panoramic radiograph	0.5-2

2006年的研究(Ludlow et al., 2006)比較三種不同廠牌同一視野大小的CBCT輻射劑量：CB Mercuray, NewTom 3G 和i-CAT，發現三者的輻射劑量都大於傳統牙科使用的環顱X光片，以New Tom3G最低，i-CAT次之，CB Mercuray最高。

三者的輻射劑量值分別在(E_{1990} , $E_{2005 \text{ draft}}$)的標準下測得的數值分別為(45 mSv, 59 mSv), i-CAT (135 mSv, 193 mSv) and CB Mercuray (477 mSv, 558 mSv)皆比傳統的環顱X光片(6.3 mSv, 13.3 mSv)高上四到四十二倍。如果要減低劑量，需

要減小FOV(Field-of-view)、mA和KV值。

1.2.7.5 CBCT在牙科的應用

CBCT 影像在牙科使用的範圍很廣，主要有用在口腔外科的手術前的評估、手術模板的建立、阻生齒的評估、病灶區域大小的分析、牙科植體放置位置的評估、顛顎關節的檢查……等 (Aranyarachkul et al., 2005; Loubele et al., 2006; Fullmer et al., 2007; I . TURKYILMAZ 2007; Liu et al., 2007; Turkyilmaz et al., 2007)，在根管治療科也被用來分析牙根型態與數目(Matherne et al., 2008)，而在矯正科中，CBCT 影像可以用來做為矯正前三維方向的分析(Hwang et al., 2006)，加上軟體影像重組的進步，電腦斷層造射出的影像可以加以重整成立體的臉部骨骼(Grayson et al., 1988; Fuhrmann et al., 1995)，更能清楚診斷，以避免二維方向的側顛片和環顛片分析會因為骨頭左右兩邊不對稱造成的影像誤差(Bergersen 1980; Ahlqvist et al., 1983)、矯正植體放置位置的評估(King et al., 2007; Park et al., 2008)、矯正植體的手術模板，(Kim et al., 2007)牙根的角度，牙根與骨頭的關係等等以利訂定矯正計畫，以及可以觀察矯正前後的變化等等(Macchi et al., 2006)。

1.3 研究動機及目的

矯正前後的變化可以由巨觀的顏面改變與牙齒移動來觀察，但對於齒槽骨骨密度的改變並不十分清楚，而傳統的觀測法是利用組織切片或是利用 FEM 等工程的方式處理，在臨床上並沒有實際的觀測法，缺乏臨床人體的實驗數據，在CBCT的發明減少了CT影像的輻射劑量，進而可以利用影像來做判讀及分析的工作。因此本實驗可以探討微觀下骨頭在矯正前後的密度變化。

於是本實驗的目的主要就是利用 CBCT 影像來探討牙根周圍骨密度在矯正前後變化的情形與牙齒移動方向的相關性。由於矯正過程牽涉很多力學的機制，

不同情形會使用不同機制，於是為了將機制單純化，本實驗主要探討矯正前和單純 leveling and alignment 七個月後牙根周圍骨密度改變的情形，與牙齒移動方向的相關性。



第二章 研究材料與方法

2.1 研究流程概述

選取八位中國醫藥大學齒顎矯正科患者在接受矯正治療前、單純 leveling and alignment 七個月後各取得一次 Cone Beam CT 影像。評估兩次影像中牙根附近骨頭密度的變化。

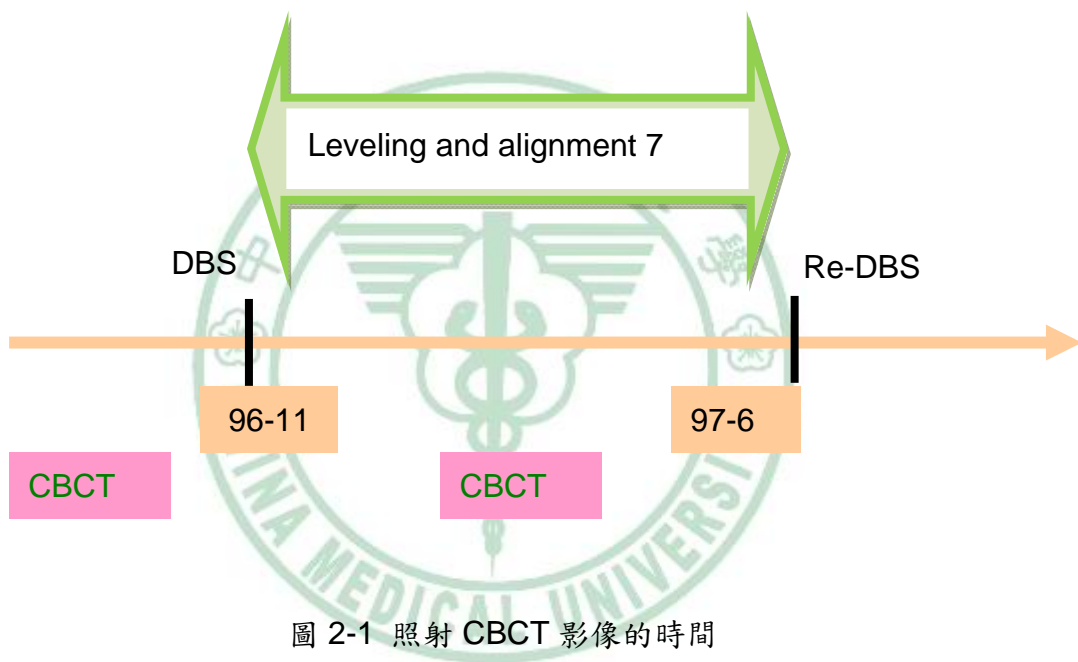


圖 2-1 照射 CBCT 影像的時間

由 CBCT 儀器:i-CAT 取的 CBCT 影像，原始檔案經由軟體：Mimics 做分析，測量前後影像骨密度的改變。

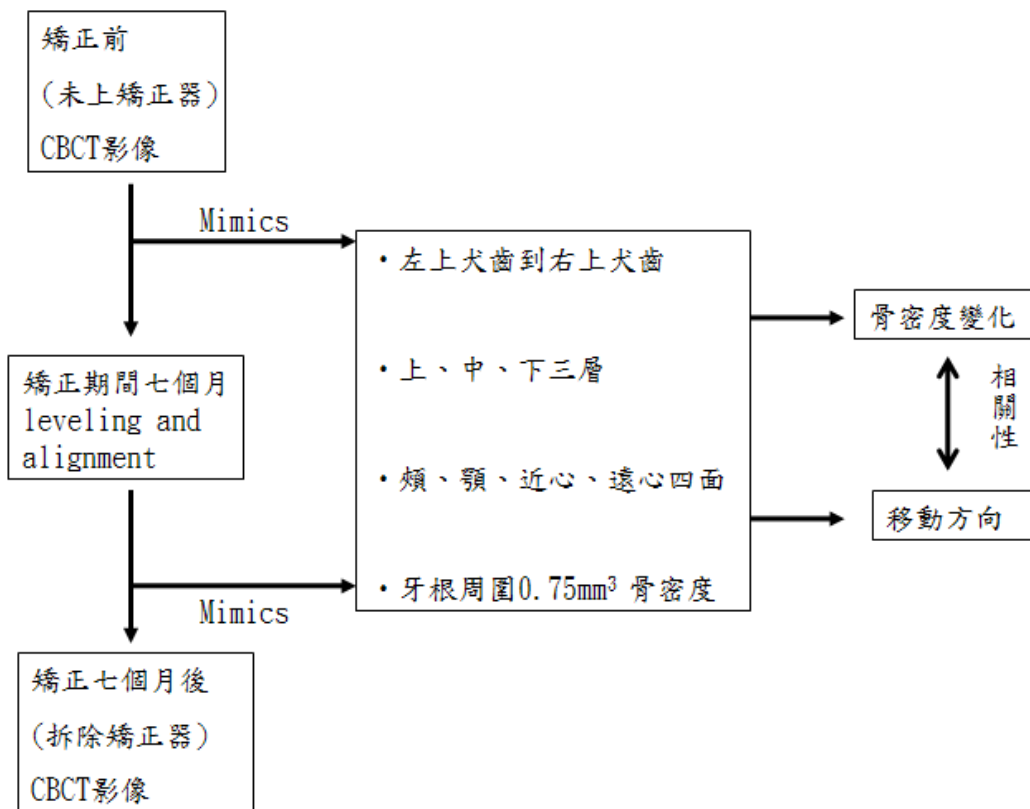


圖 2-2 流程圖

2.2 材料

2.2.1 病患的來源和條件

實驗對象選取八位中國醫藥大學齒顎矯正科患者。此八位患者年齡介於 20-25 歲左右。口內上顎前牙區沒有假牙，齒列擁擠程度小於 8mm，可以接受不拔牙治療。患者身體健康，沒有家族病史、特殊疾病或長期服用藥物。沒有顛顎關節問題。

2.2.2 病患電腦斷層掃描影像取得之標準化

患者坐直，眉間到鼻尖連線重疊於儀器指示之中線，即垂直於地面，咬合平面平行地面，並將頭部固定。口內位置使用矽膠印模材和拋棄式牙托印製個人化咬合最緊密的中心咬點(central occlusion)處，照射影像時請病人咬緊客製化咬合記錄板。

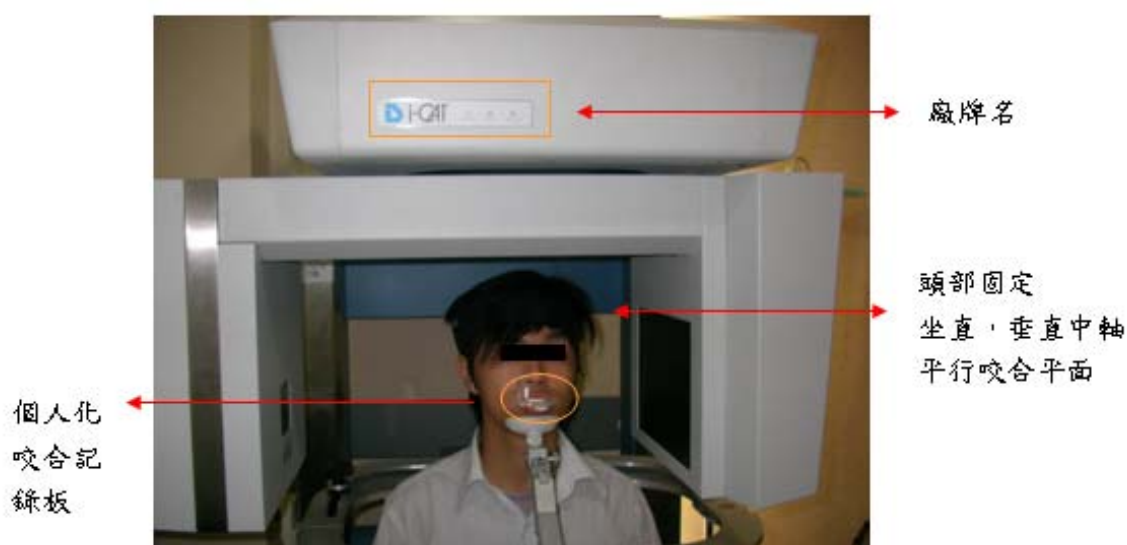


圖 2-3 病人照射 Cone Beam CT 時的頭部位置

2.3 矯正器和矯正線的介紹

矯正器：

前牙兩側犬齒間所使用的是 Preadjusted Brackets, Esther II , Roth type , 0.018 slot 透明樹脂矯正器 (Tomy company, Tokyo, Japan)

兩側小白齒至大白齒區域使用的矯正器是金屬矯正器：Preadjusted Brackets, Micro-arch, Roth type , 0.018 slot 金屬矯正器 (Tomy company, Tokyo, Japan)。

矯正線：

在矯正治療所使用的主線為改良型超彈性鈦鎳合金線，日本 L&H TITAN Nickel Titanium wire (Tomy company, Tokyo,Japan)，其規格為 0.016x0.022 inch，Accu Form。

2.4 CBCT 儀器(i-CAT)掃瞄參數設定

Cone Beam CT影像由台灣台中元易影像中心協助照射，儀器廠牌名稱為 i-CAT(Imaging Sciences International,Hatfield, USA)

本次實驗將電壓值設在 120KV，電流值為 47 mA，切片間距為 0.25mm，每一 Voxel 尺寸為 0.25 mm^3 ，影像像素為 640 X 640。

2.5 牙根周圍骨密度測量方式

本次實驗所用分析軟體為專業之醫學影像軟體 Mimics。比較牙根上(C)中(M)下(A)段周圍骨密度在矯正前與單純 leveling and alignment 七個月後的骨密度的改變。

重新定位(Reslice)

將患者的 cone beam CT 影像利用 mimics 影像軟體開啟後，選取要測量的牙齒找出牙冠正中點和牙根尖點畫一直線，以此直線設定視野框大小為寬 20mm，高 20mm，每一層切面為 0.25mm 做重新定位。切出來的影像即為之後單顆牙齒測量的影像。

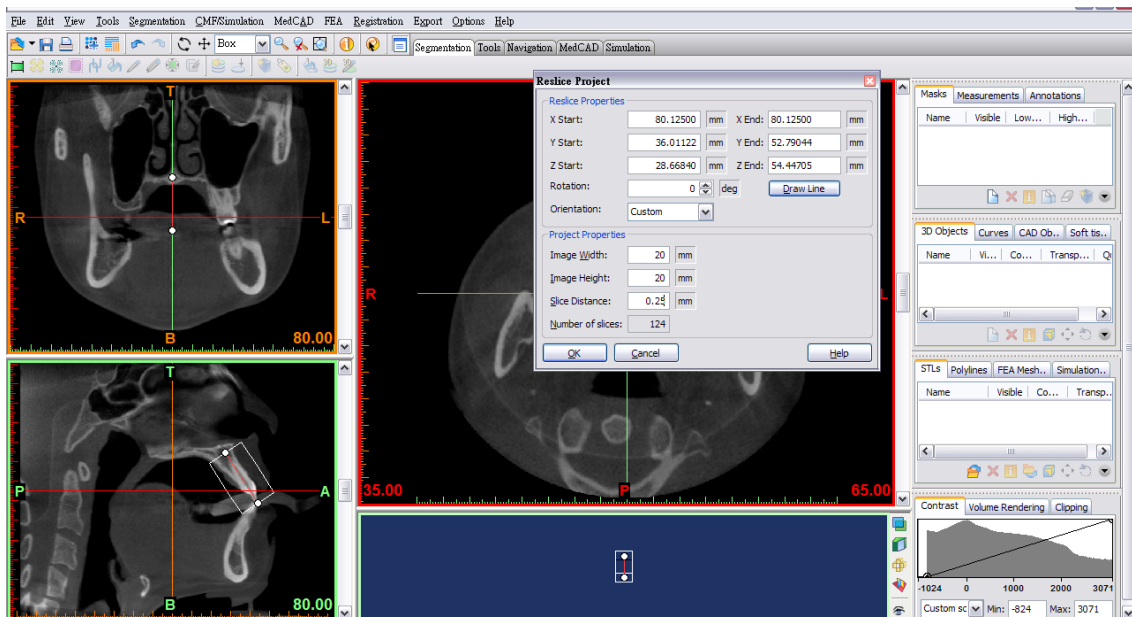


圖 2-4 重新定位之設定

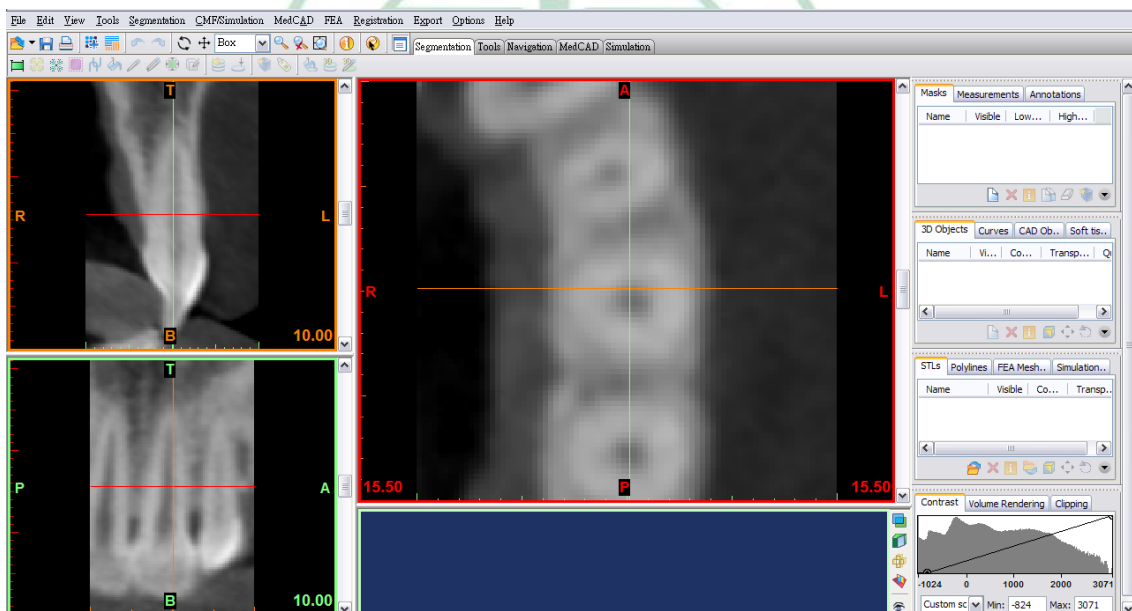


圖 2-5 重新定位完成

牙根上(Coronal)中(Middle)下(Apex)段之定義

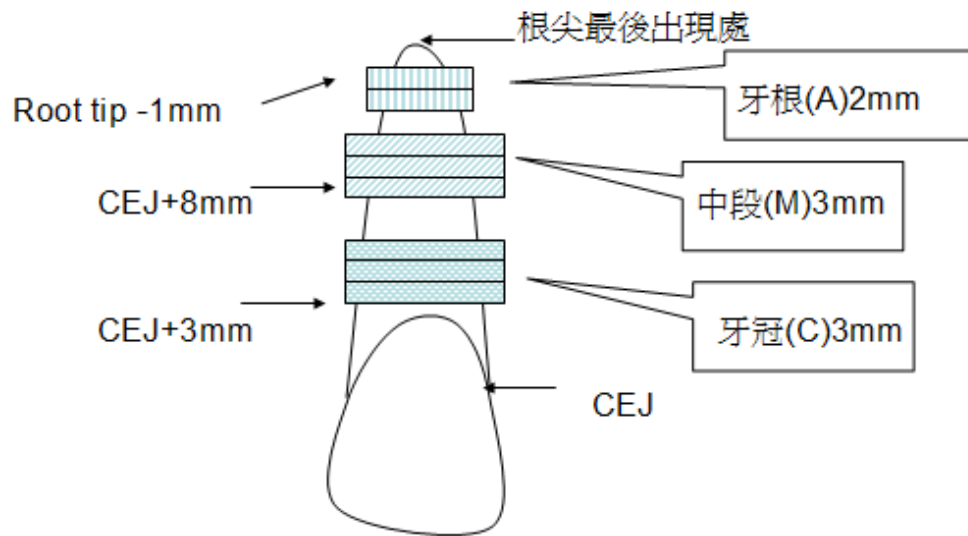


圖 2-6 測量部位定義

上段(Coronal ; C):

將牙齒以頰舌側(buccal-lingual)方向面上找出頰側象牙值與牙本質交界(CEJ)為基準往牙根方向 3.0mm 處開始的 3mm 定義為上段，也就是的第一、第五、第七個 0.25mm 切面上測量到的數值做為平均後的稱做 C(coronal)處。

中段(Middle ; M):

將牙齒以頰舌側(buccal-lingual)方向面上找出頰側象牙值與牙本質交界(CEJ)為基準往牙根方向 8.0mm 處開始的 3mm 定義為中段，也就是的第一、第五、第七個 0.25mm 切面上測量到的數值做為平均後的稱做 M(middle)處。

下段(Apex ; A):

將牙齒以頰舌側(buccal-lingual)方向面上找出牙根出現的最後一個切面，以此切面為基準往咬合面方向移動 1.0mm 處開始的 2mm 定義為下段，也就是的牙

根間最後出現處第五、第七個 0.25mm 切面上測量到的數值做為平均後的稱做 A(Apex)處。

欲量測牙根周圍骨密度的範圍

利用 Thresholding 的功能在牙根剖面上設定 HU 範圍找出牙根附近似 PDL 約 1~2 pixel 的範圍，使能出現最靠近牙根周圍一圈，填滿內層後將外圈往外擴張 3 pixel,擴張出的減去填滿內層的即定義為牙根周圍骨頭的部分。又為了避免因為骨頭較薄圈到 HU 值在海綿骨以下的組織或空氣，故將在 mimic 軟體內設定為海綿骨 HU 值最低的 HU=148 以下扣除。

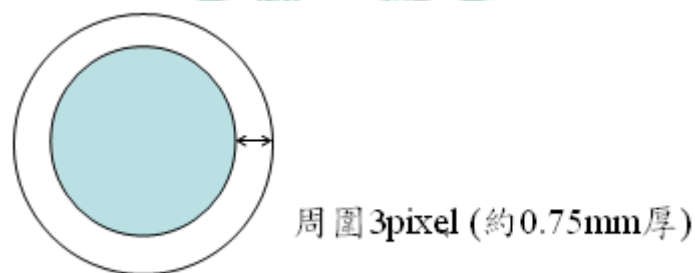


圖 2-7 牙根周圍定義

牙根周圍方向性之定義

頰側(Buccal ; B)：牙齒經重新切面後，依一般牙科對牙齒面的定義，靠近臉頰的面為頰側。

顎側(Palatal ; P)：牙齒經重新切面後，依一般牙科對牙齒面的定義，靠近硬顎的面為顎側。

近心側(Middle ; M)：牙齒經重新切面後，依一般牙科對牙齒面的定義，靠近人體中線的面為近心側。

遠心側(Distal ; D)：牙齒經重新切面後，依一般牙科對牙齒面的定義，遠離人體中線面為遠心側。

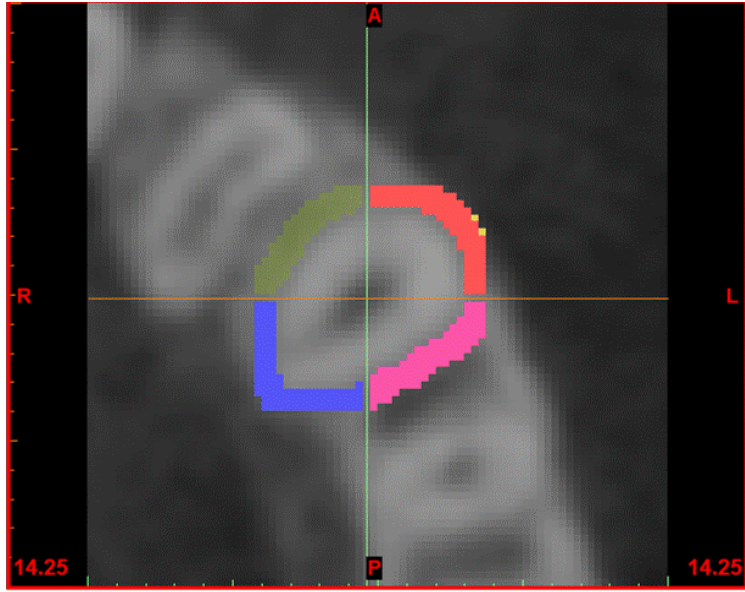


圖 2-8 紅色為頰側、藍色為顎側、粉紅色為近心側、綠色為遠心側。

利用 Mimics 量測牙根周圍骨密度步驟

Step 1. 開啟檔案利用軟體 reslice project 將牙齒重新定位

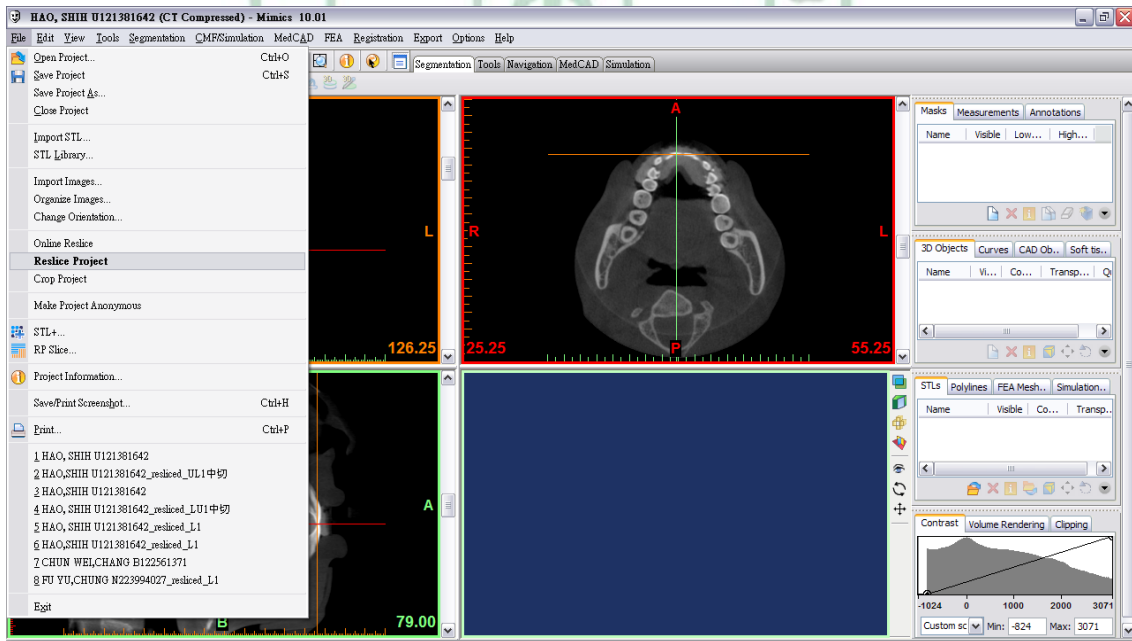


圖 2-9 利用軟體 reslice project 將牙齒重新定位

Step 2. 找出右上正中門牙牙冠正中點與最低點。

Step 3. 找出右上正中門牙牙根尖點做一連線，並改變範圍參數為以此為中軸，

左右各 2mm 距離的範圍，每 0.25mm 一個切面。

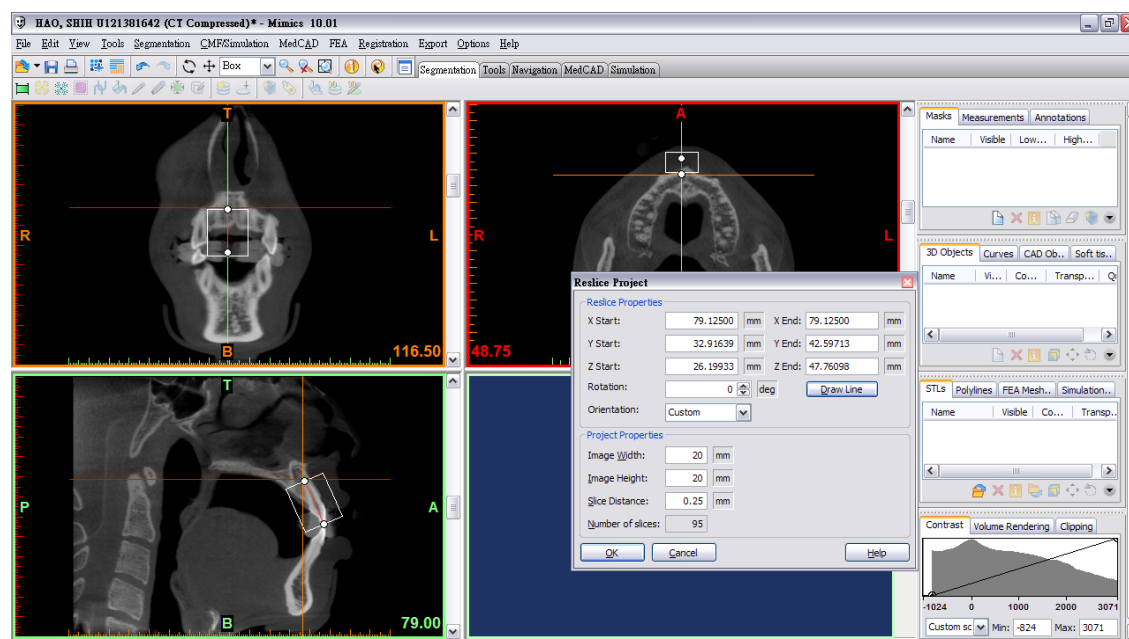


圖 2-10 找出牙根尖點做一連線並設定參數

Step 4. 找出 CEJ 的高度定成 0mm，定義牙根上中下及牙根尖段。

Step 5. CEJ 往牙根尖方向 3.0mm、4.0mm、5.0mm 處定義為牙根上段(C)

Step 6. 利用軟體工具 Thresholding 的功能找出牙根附近似 PDL 約 1~2 pixel 的範圍，其目的在於框住牙根，排除牙周韌帶(PDL)的密度干擾

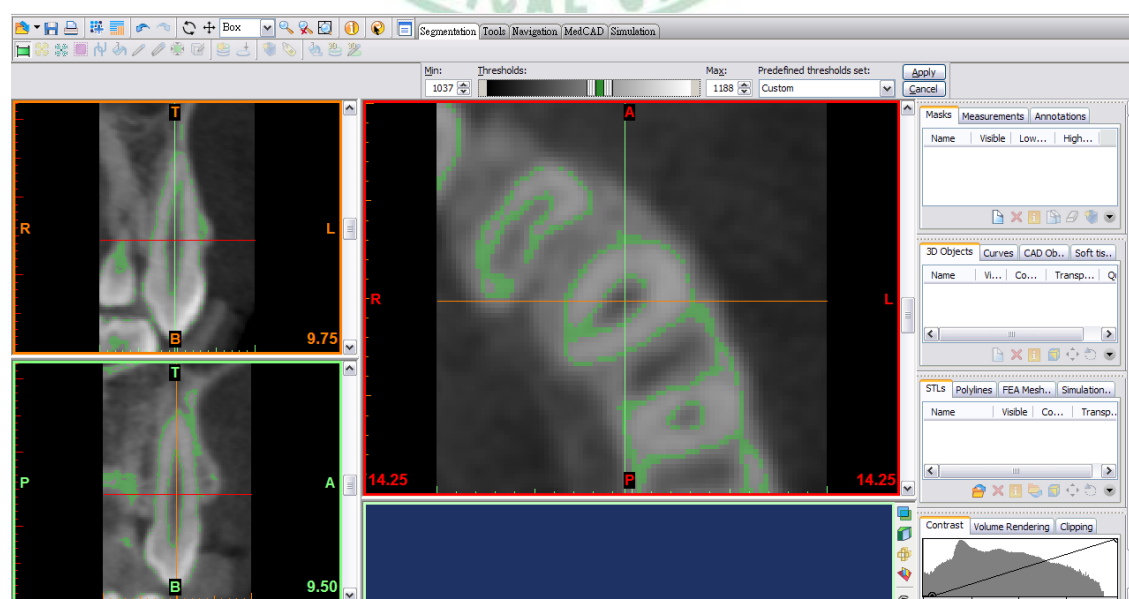


圖 2-11 利用 Thresholding 的功能框住牙根，排除牙周韌帶

Step 7. 利用軟體工具 Crop mask 框住想要測量的牙根，將範圍定在量測的切面 (0.25mm)上，大小略大於牙根周圍 3 pixel 以上

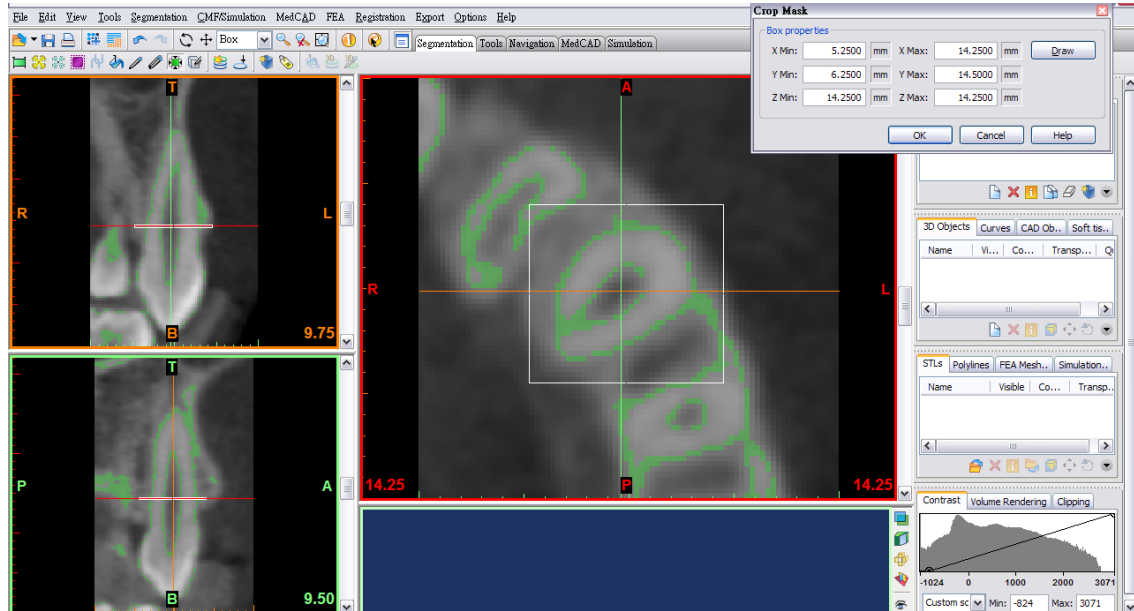


圖 2-12 利用 Crop mask 框住想要測量的牙根

Step 8. 利用軟體工具 Edit mask 中的 Erase 擦去不接近牙周韌帶的部分，再用 Draw 填補可能的牙周韌帶空缺使控制只有 1pixel 近似牙周韌帶的體積

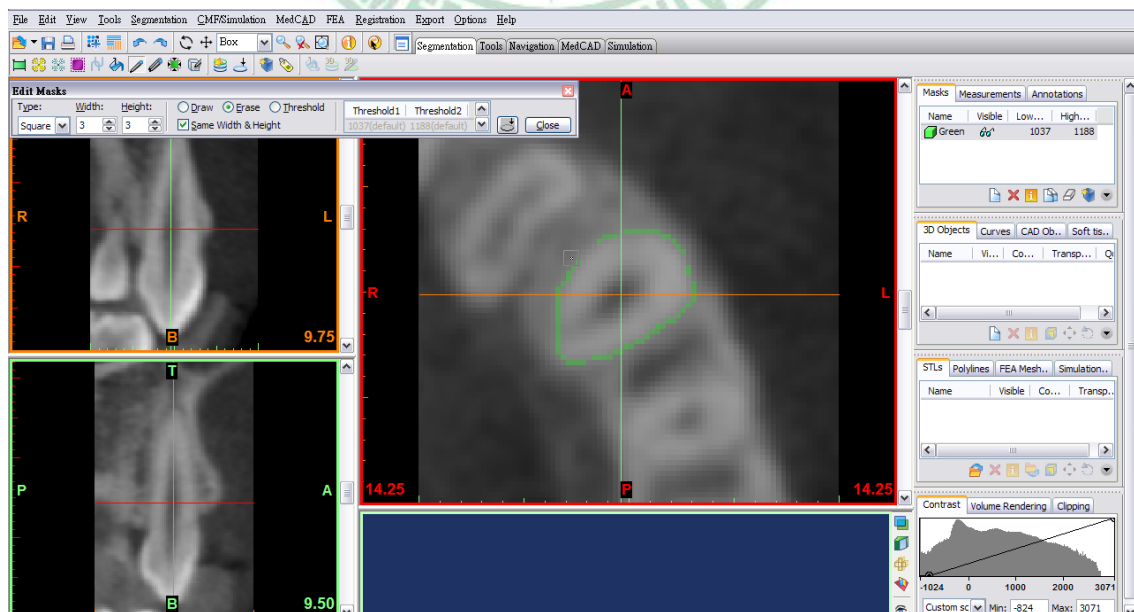


圖 2-13 利用 Edit mask 中的 Erase 擦去不接近牙周韌帶的部分

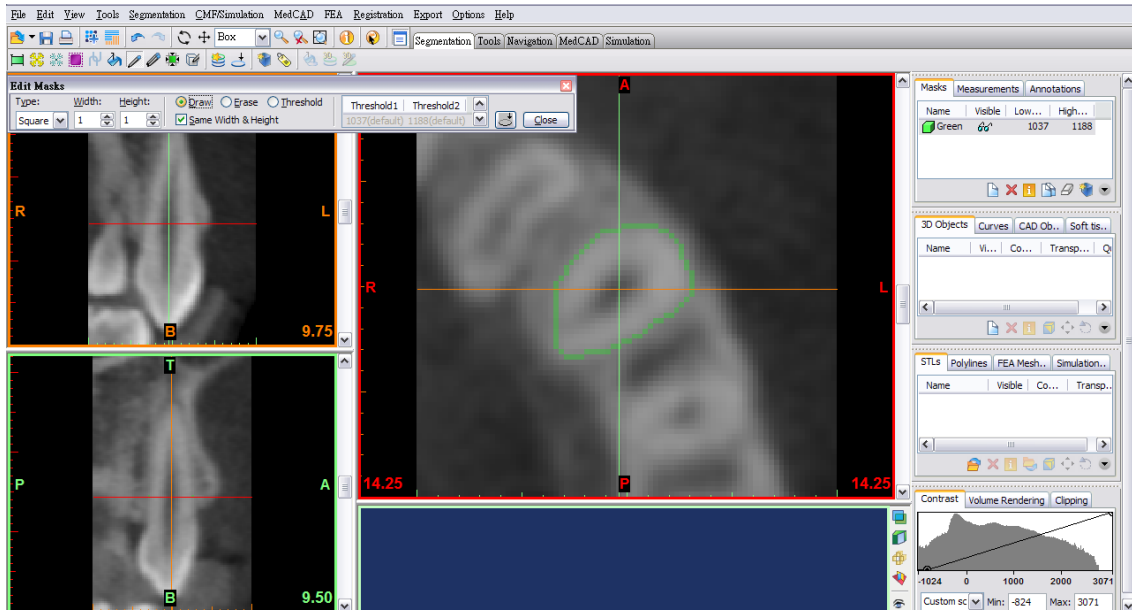


圖 2-14 利用 Edit mask 中的 Draw 填補牙周韌帶空缺，控制只有 1pixel 的體積

Step 9. 利用軟體工具 Cavity Fill 填滿內層

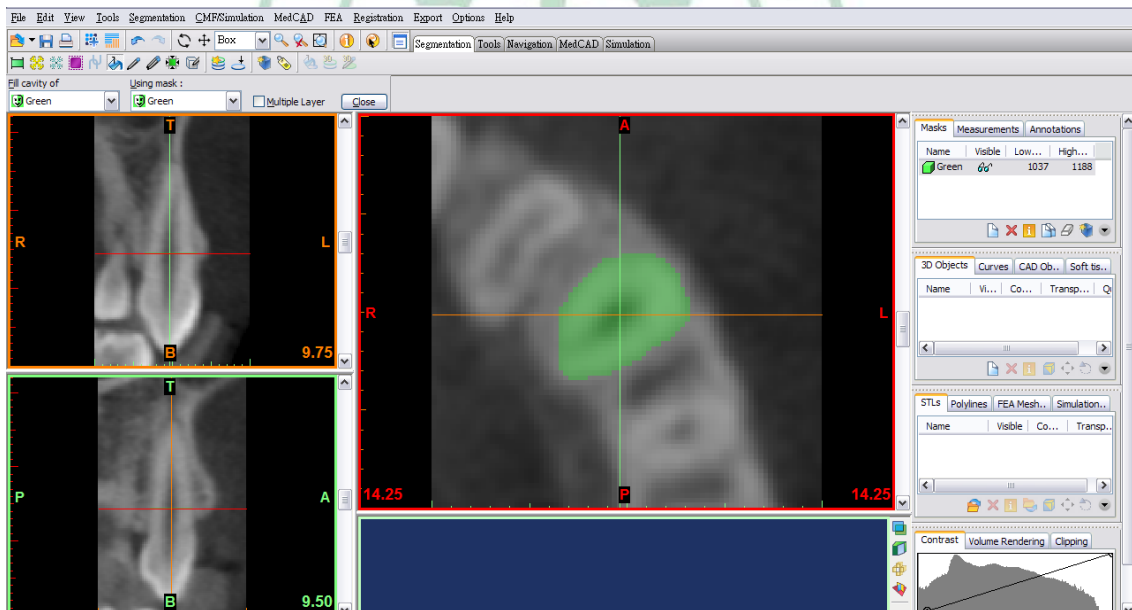


圖 2-15 利用 Cavity Fill 填滿內層

Step 10. 利用軟體工具 Morphology Operations 中選取 dilate 3 number of pixel

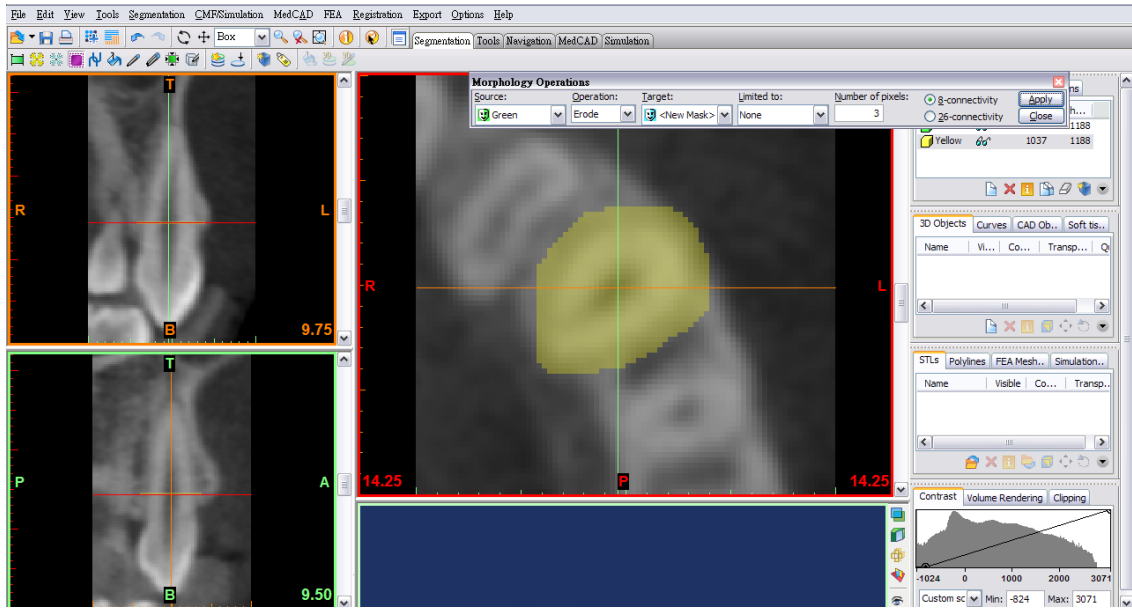


圖 2-16 利用 Morphology Operations 中 Dilate 3 個 pixel

Step 11. 利用軟體工具 Boolean Operations 的 MaskA(外圈擴大的) minus MaskB(內層填滿的)，目的在於得到一個在牙根周圍排除牙周韌帶(1 pixel)後的 3 pixel 的骨頭範圍，即是本實驗待量測的牙根周圍骨範圍

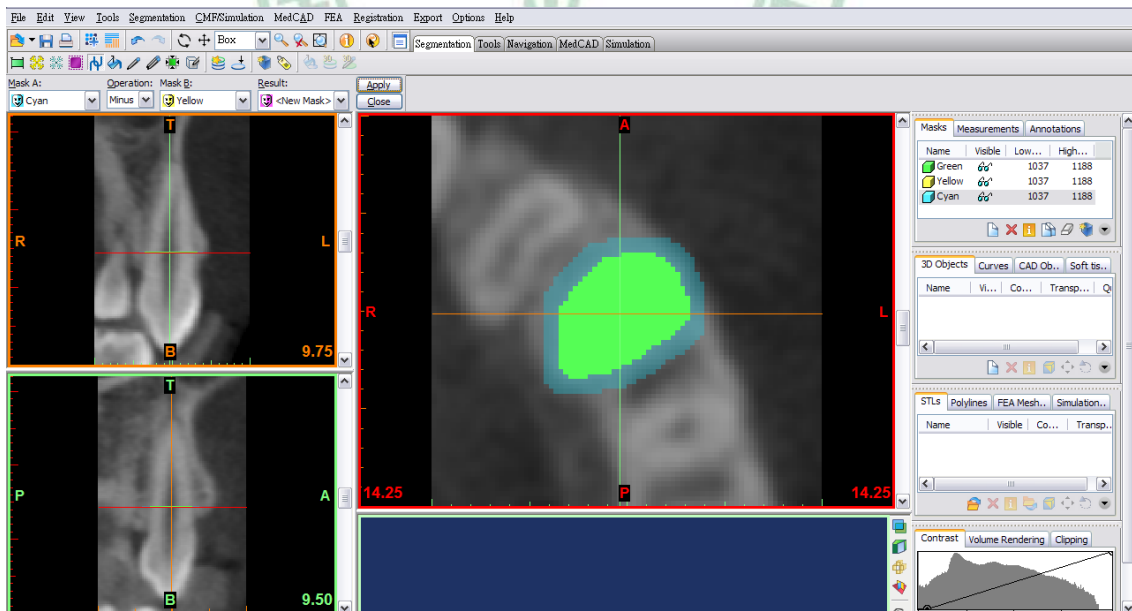


圖 2-17 利用 Boolean Operations 得到待量測的牙根周圍骨範圍

Step 12. 利用軟體工具 Thresholding 產生一個新的 mask，將 HU 值定義在-1024

到 148 之間，目的在於排除可能圈出不想量測到的非海綿骨 HU 值範圍以下的組織或是空氣

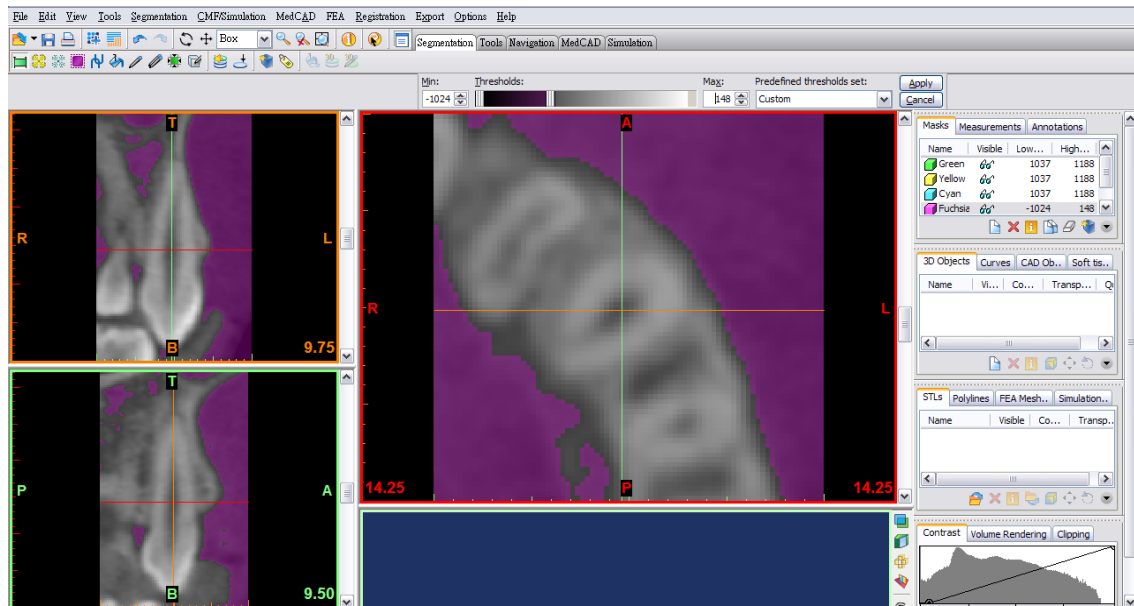


圖 2-18 排除非海綿骨 HU 值範圍以下的組織或是空氣

Step 13. 利用軟體工具 Boolean Operations 中的 Intersect 功能，將欲量測的牙根周圍骨密度(步驟 16)與在 HU 範圍在-1024 到 148 之間做一連結的動作，目的在於找出欲測量的牙根周圍是否有密度小於海綿骨的組織或空氣

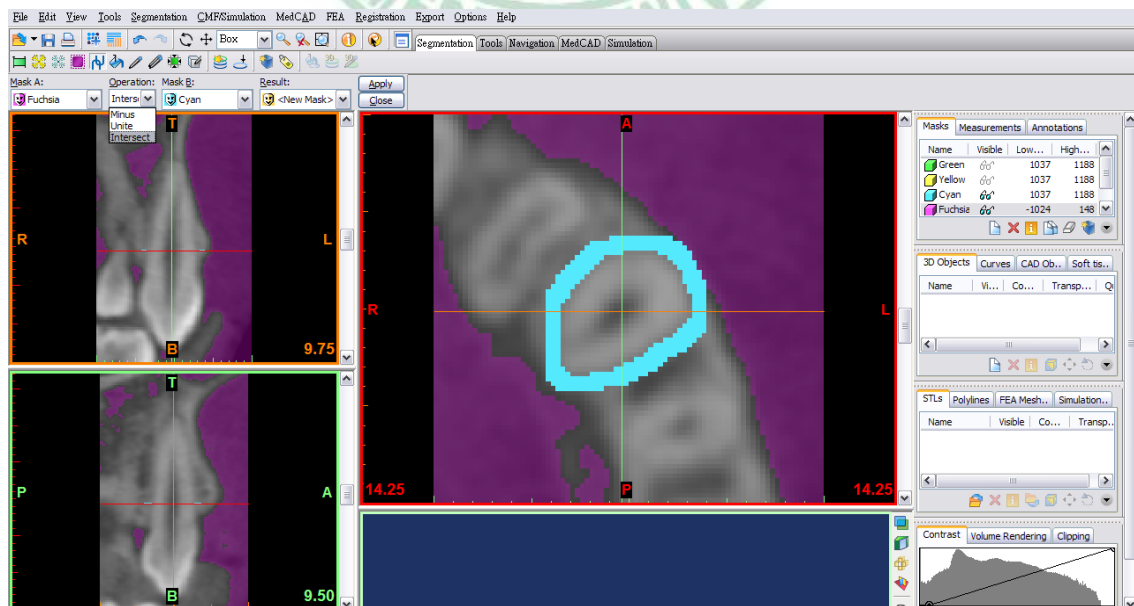


圖 2-19 找出欲測量的牙根周圍是否有密度小於海綿骨的組織或空氣

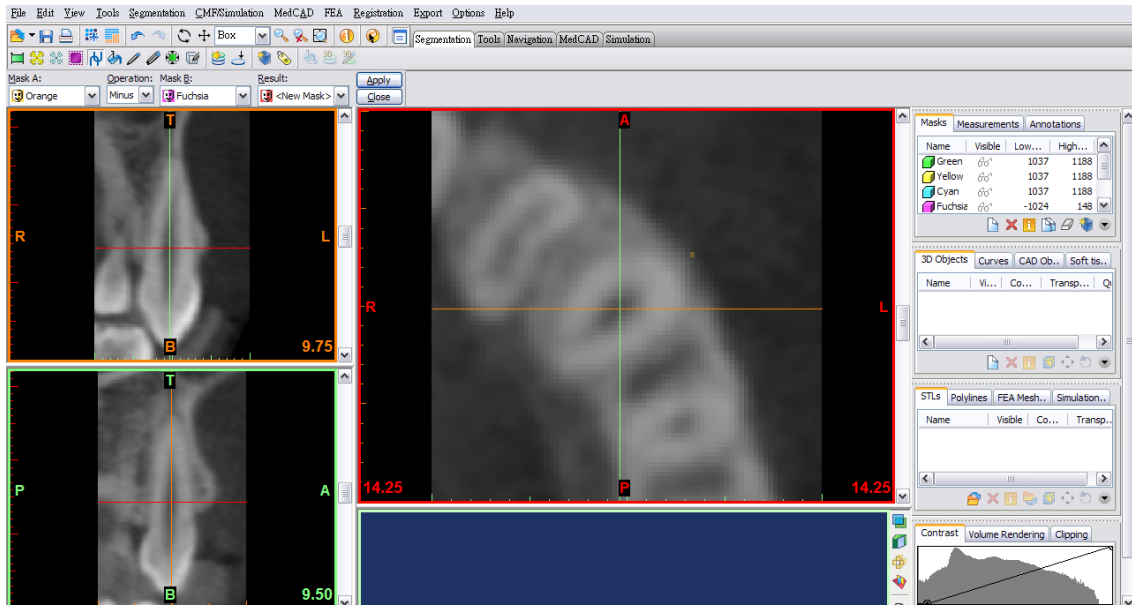


圖 2-20 找出 HU 範圍在-1024 到 148 間的密度區塊

Step 14. 利用軟體工具 Boolean Operations 中的 minus 功能，將欲測量的牙根周圍骨密度範圍減去不想列入計算的組織或空氣(步驟 18)，得到的範圍可以確定是牙根周圍有海綿骨密度以上的骨頭範圍

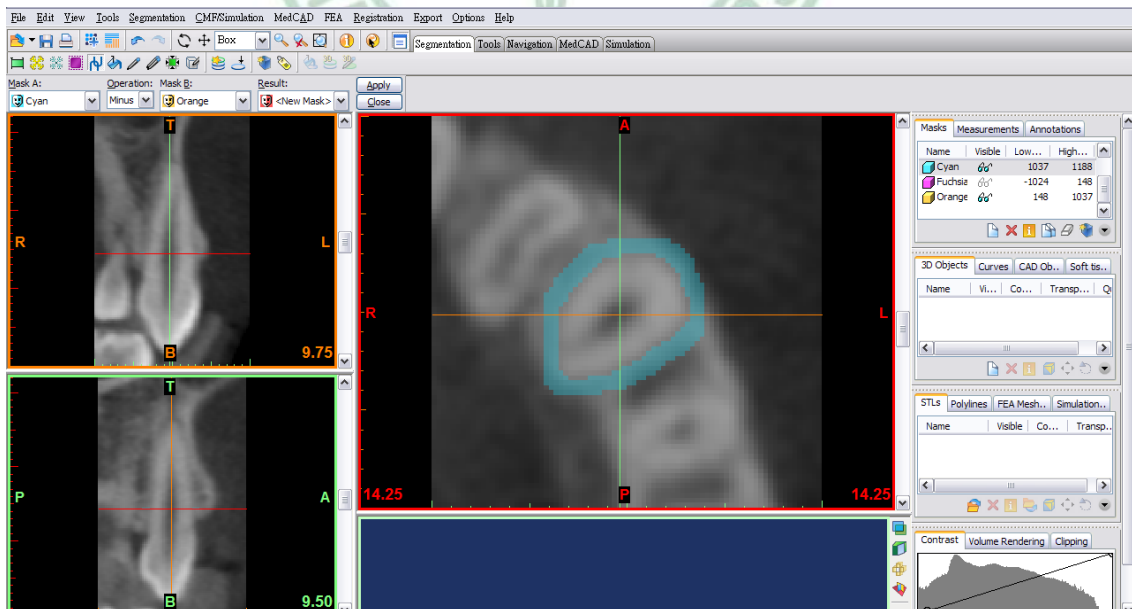


圖 2-21 得到可以確定是牙根周圍有海綿骨密度以上的骨頭範圍

Step 15. 將此範圍重新複製成四份，再利用軟體工具 Crop Mask 功能將此四份分別選取在頰側、顎側、近心側、遠心側的範圍做為計算

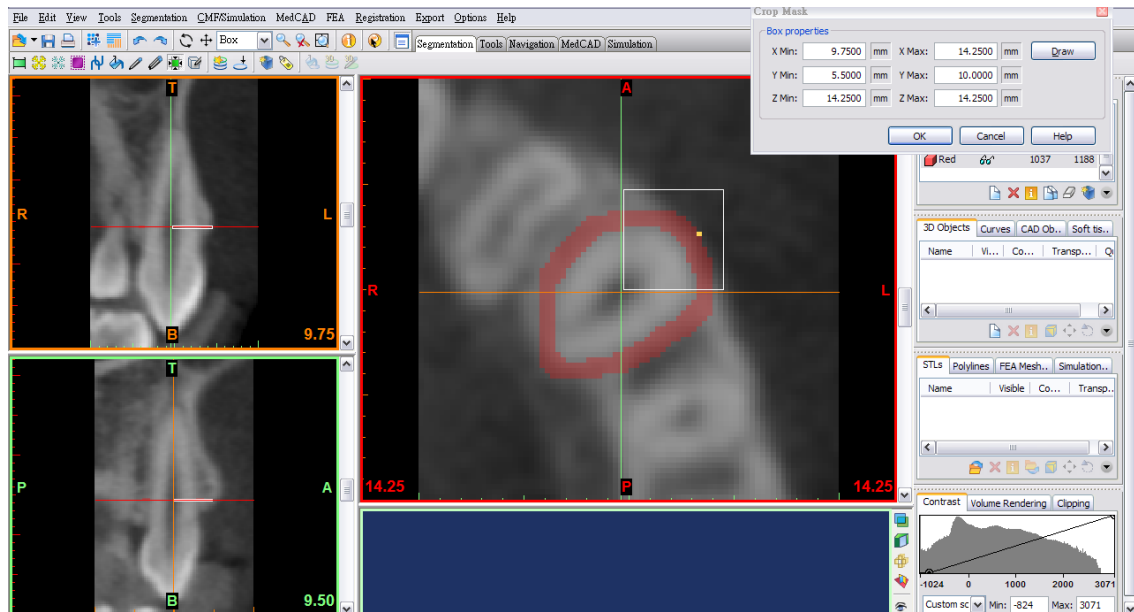


圖 2-22 利用 Crop Mask 功能將牙根周圍分成四份

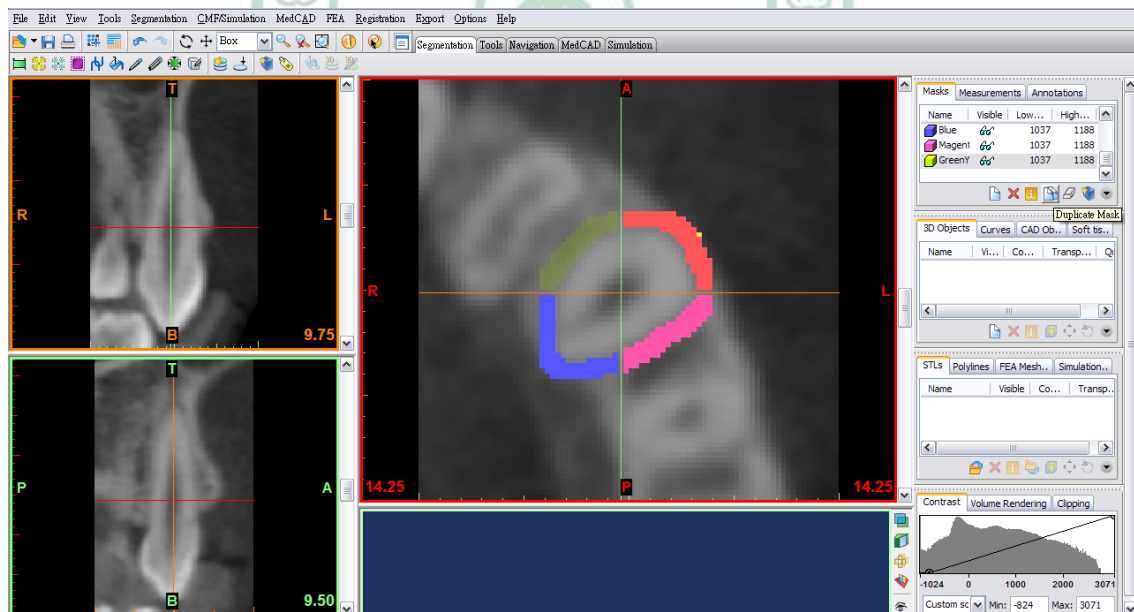


圖 2-23 將牙根分成頰側、顎側、近心側、遠心側以不同顏色標示

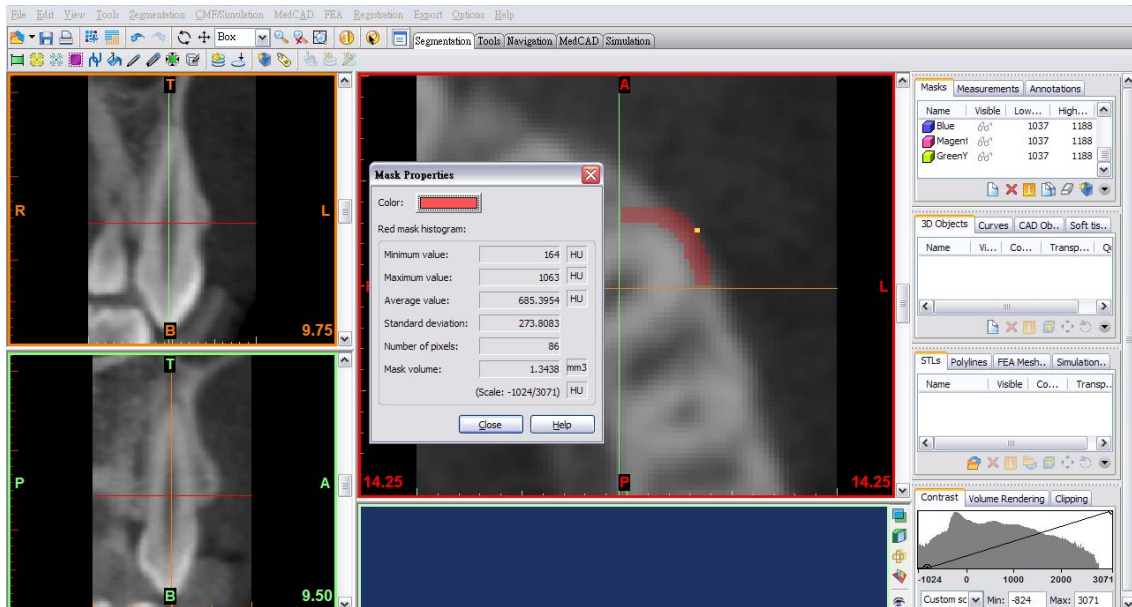


圖 2-24 完成並記錄

Step 16. CEJ 往牙根尖方向 8.0mm、9.0mm、10.0mm 處定義為牙根中段(M)，並重複步驟 5 到步驟 15

Step 17. 牙根尖最後出現的切面往咬合面方向第 2.0mm、3.0mm 處定義為牙根下段(A)，並重複步驟 5 到步驟 15

Step 18. 利用軟體測量每層骨密度(HU)的平均定義為每段的骨密度(HU)

2.6 CBCT 準確度驗證

2.6.1 儀器精準度驗證

2.6.1.1 標準假體於矯正前與矯正後之驗證

在兩次不同的時間將矯正用口腔保護黏蠟、鋁、壓克力和去離子水來當作校正標準體進行 CBCT 掃描，得到的 HU 幾乎一樣。利用 Intraclass correction coefficient 的統計結果為 0.99，代表儀器使用不會因不同時間而有不同結果。

2.6.1.2 對照組前後驗證

在沒有做矯正者間隔七個月後的 CBCT 影像中，上顎右上犬齒到左上犬齒共六顆牙的牙根周圍骨頭密度來看，牙根周圍骨密度在前後間隔七個月測量變化量為-2.57%，此數據遠遠小於矯正者的牙根周圍骨密度改變量：-19.8%，代表骨密度在沒有矯正者身上差異不大，實驗者骨密度改變是因為矯正的因素。

2.6.2 測量軟體驗證

將待測牙齒利用軟體進行重切兩次之後作比較，發現兩次切出來測量的數值間相關係數很高，使用 Intraclass correlation coefficient 的統計結果為 0.95，代表軟體可信賴，骨密度不會因為重切而改變數值。

2.6.3 組內差異驗證

同觀測者測同一受試者五次之校正，使用 Intraclass correlation coefficient 的統計結果為 0.98，代表同一影像不會因為不同次測量而有誤差。

2.6.4 組間差異驗證

不同觀測者(三位觀測者)測同一受試者兩次之校正，使用 Intraclass correlation coefficient 的統計結果為 0.94，代表同一影像不會因為不同觀測者而有誤差。

所以藉由以上三種量測方法之可信度測試，發現儀器精確度值得信任，人為誤差可以忽略。

2.7 統計分析

本實驗主要探討八位中國醫藥大學矯正科患者口內上顎右上犬齒到左上犬齒六顆前牙在矯正前和單純 leveling and alignment 七個月後牙根周圍骨密度改變量，以及改變量與牙根分層移動方向的比例是否接近 the pressure-tension theory，也就是牙根往壓力側移動並且造成骨密度降低。因此本實驗利用牙根周圍骨密度改變量最大量的方向與牙根移動方向的符合比例最為統計結果。



第三章 結果

3.1 患者矯正前後齒顎排列差異

經由七個月單純排整齊的矯正效果，可以發現上下顎的牙齒分別排整齊，但對於上下間的調整，還需之後利用其他矯正輔助工具如顎間橡皮筋的輔助，將牙齒上下關係對正。



圖 3-1 PATIENT #1 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後

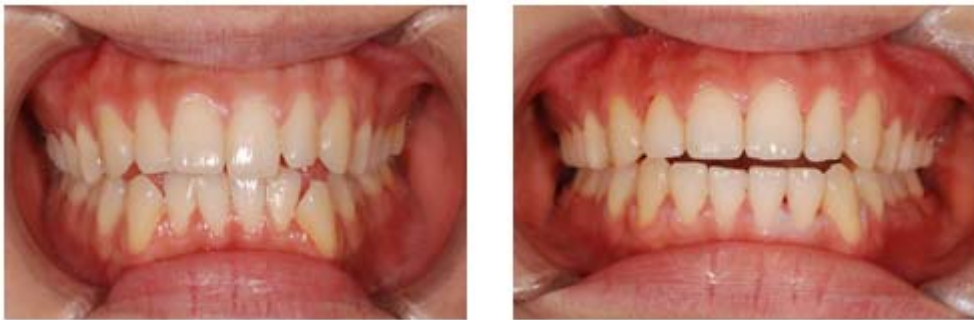


圖 3-2 PATIENT #2 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後



圖 3-3 PATIENT #3 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後



圖 3-4 PATIENT #4 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後



圖 3-5 PATIENT #5 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後



圖 3-6 PATIENT #6 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後



圖 3-7 PATIENT #7 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後



圖 3-8 PATIENT #8 矯正前後齒顎排列差異。左：矯正前，右：矯正後

3.2 患者矯正前後牙根周圍骨密度的改變率

由長條圖可知矯正前後骨密度幾乎呈現降低的情形。因為個人齒列與骨密度的差異，下降的幅度每個人或每顆牙不盡相同。其中患者#7 因為左上側門齒有金屬牙釘，因此此牙不列入實驗樣本。

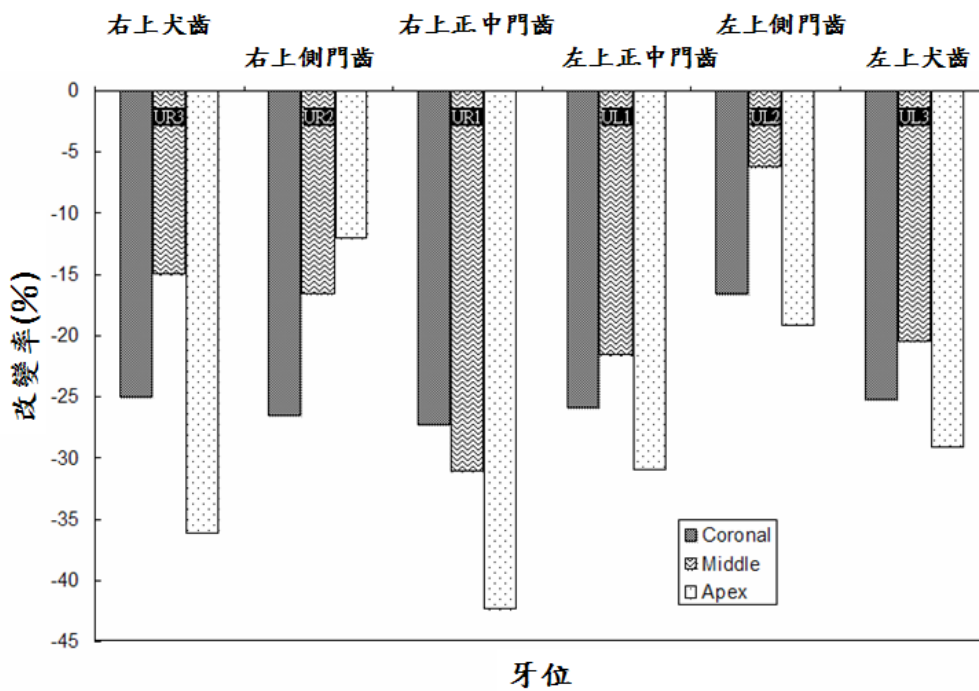


圖 3-9 PATIENT #1 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率

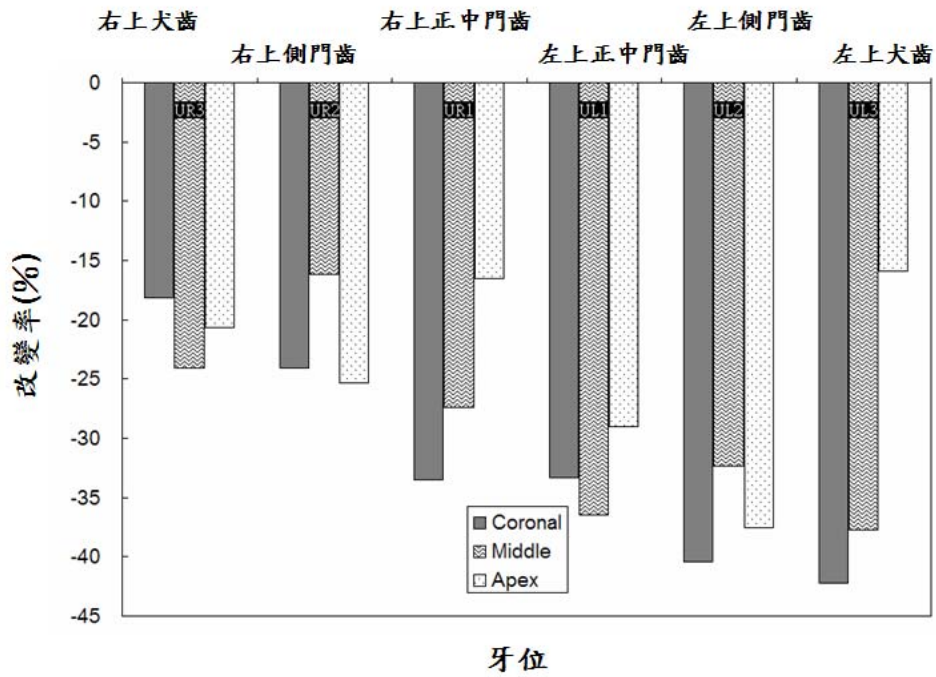


圖 3-10 PATIENT #2 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率

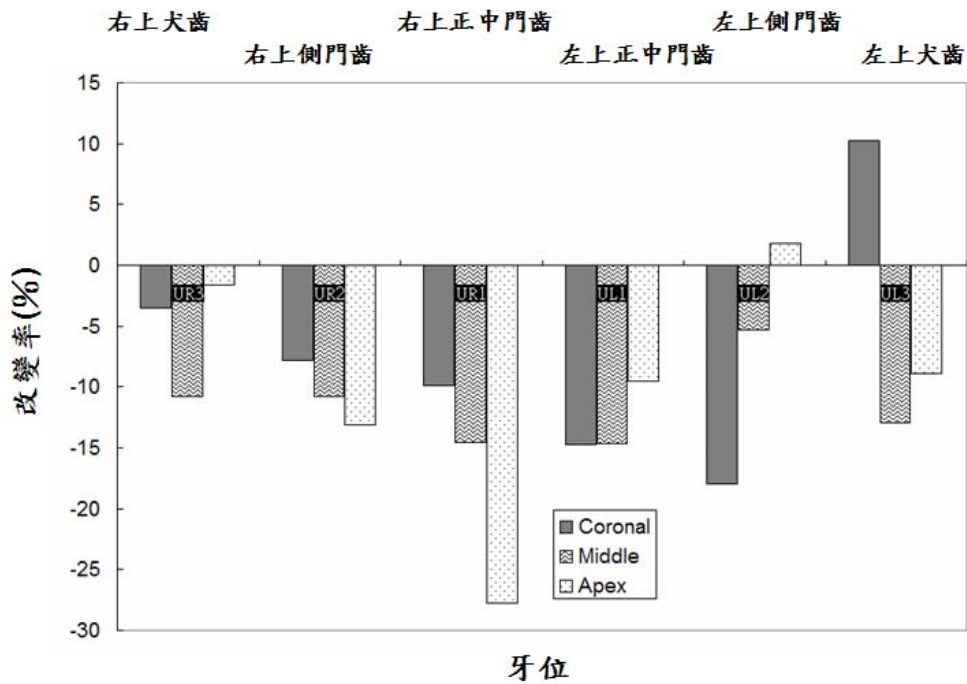


圖 3-11 PATIENT #3 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率

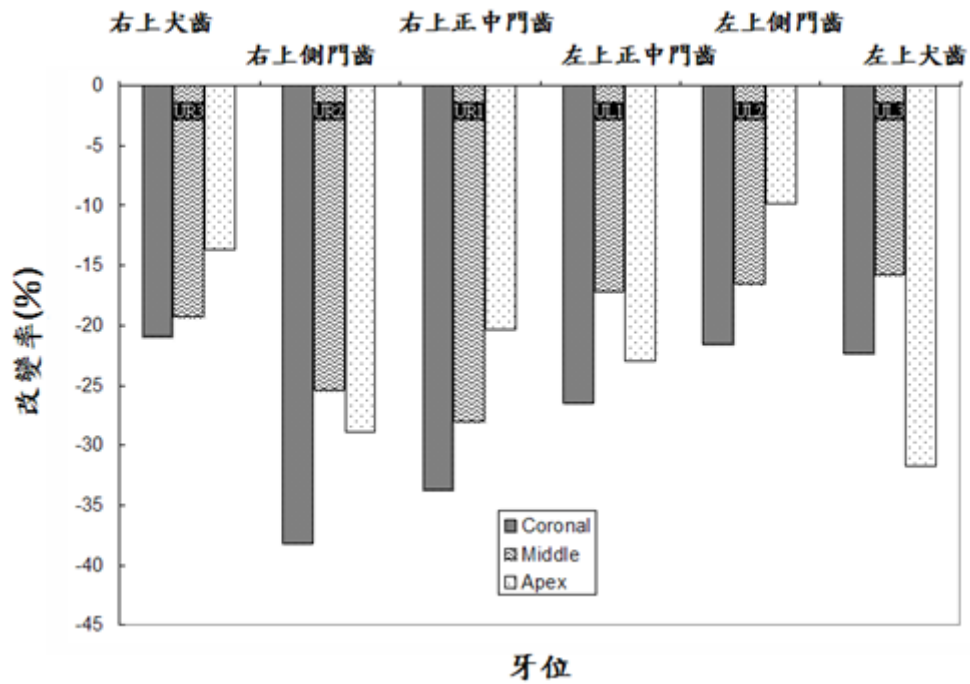


圖 3-12 PATIENT #4 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率

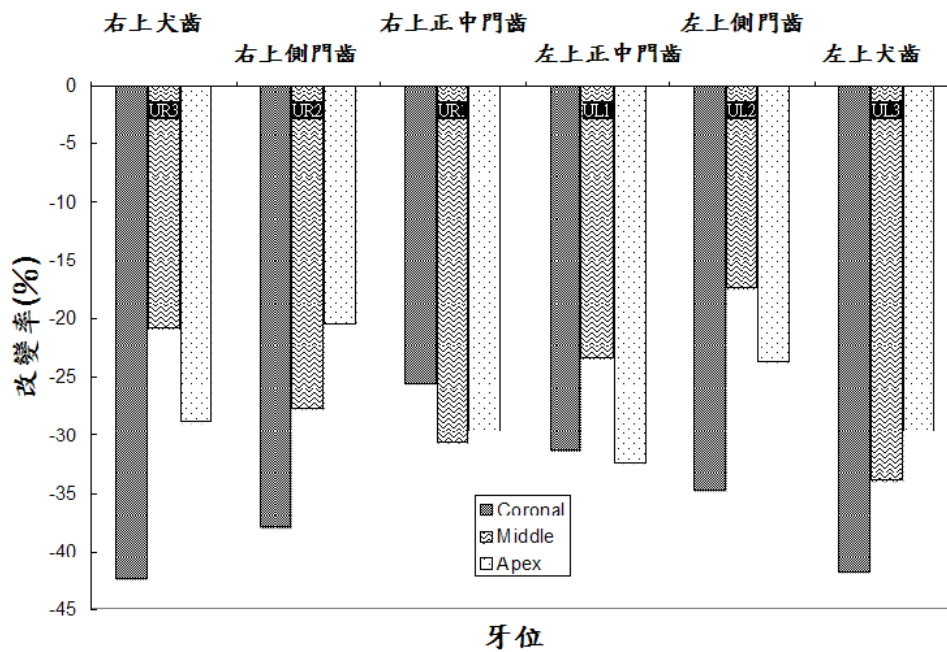


圖 3-13 PATIENT #5 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率

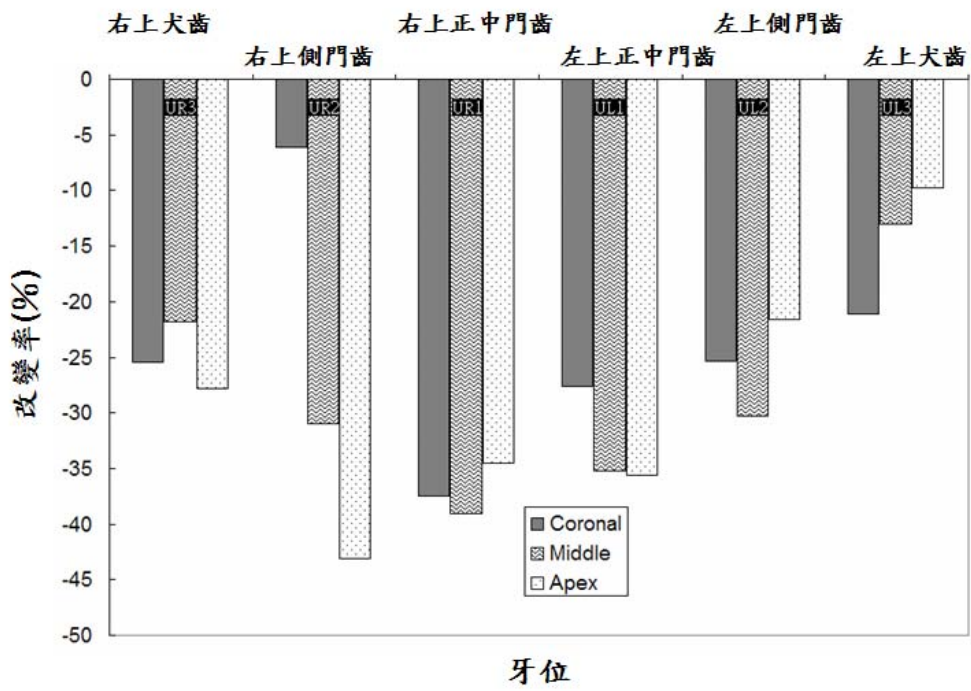


圖 3-14 PATIENT #6 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率

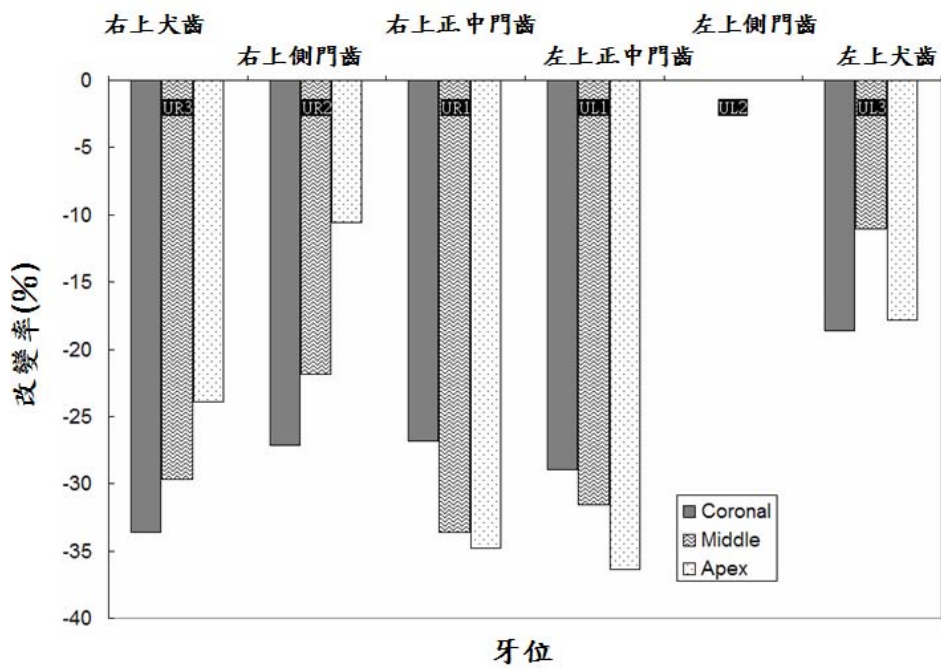


圖 3-15 PATIENT #7 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率

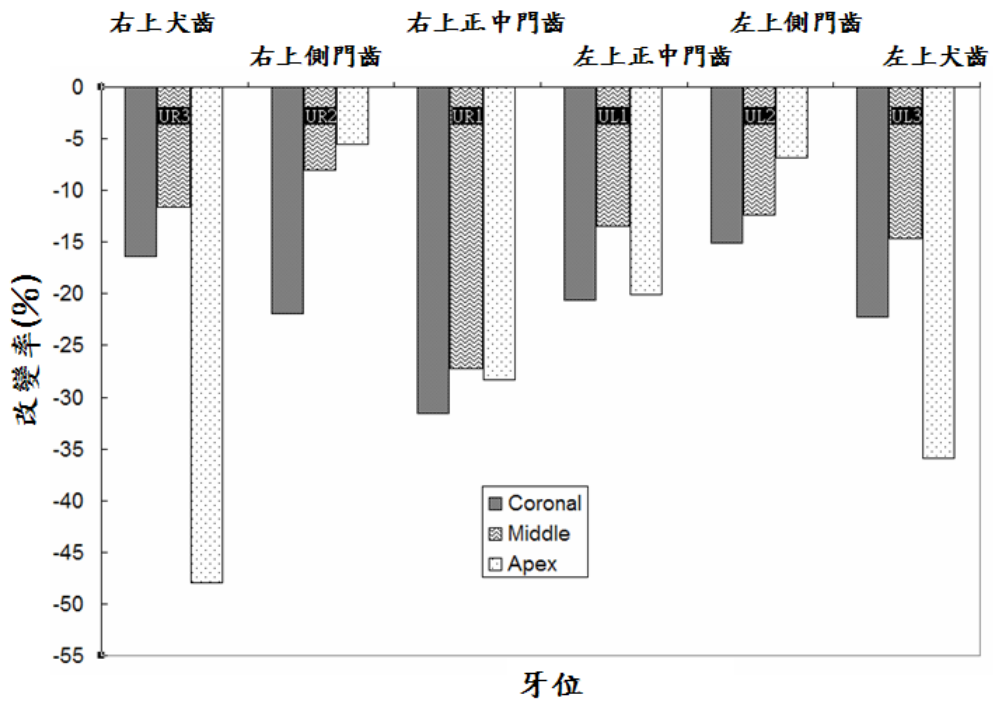


圖 3-16 PATIENT #8 矯正前後牙根周圍骨密度的改變率



3.3 患者矯正前牙根周圍分區骨密度

表 3-1 PATIENT #1 矯正前牙根周圍分區骨密度(UNIT: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	559.2	847.0	905.8	852.2
		Middle	543.4	726.5	824.5	728.2
		Apex	967.6	1050.6	1302.1	1166.8
右上側門齒	UR2	Coronal	823.2	997.9	957.8	905.0
		Middle	676.8	551.7	856.6	776.6
		Apex	827.3	509.3	933.1	763.8
右上正中門齒	UR1	Coronal	808.5	951.3	1042.3	988.6
		Middle	730.7	779.8	980.8	926.5
		Apex	882.4	873.9	1000.6	1035.3
左上正中門齒	UL1	Coronal	826.5	998.5	986.8	1038.6
		Middle	767.4	769.1	832.2	833.9
		Apex	914.1	961.9	1037.9	1001.0
左上側門齒	UL2	Coronal	724.9	815.6	810.3	891.6
		Middle	540.9	561.2	781.4	738.7
		Apex	839.6	509.6	793.1	781.8
左上犬齒	UL3	Coronal	544.9	734.2	905.0	595.7
		Middle	565.9	743.2	999.1	782.0
		Apex	1200.9	917.2	1124.8	1104.2

表 3-2 PATIENT #2 矯正前牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	793.2	890.1	899.0	898.5
		Middle	683.2	971.0	904.1	805.2
		Apex	551.4	848.3	800.1	1006.7
右上側門齒	UR2	Coronal	891.2	914.0	984.4	924.9
		Middle	674.5	934.4	924.7	816.2
		Apex	701.9	827.5	855.0	966.1
右上正中門齒	UR1	Coronal	992.0	1174.9	1050.1	1047.6
		Middle	737.1	936.5	871.1	886.0
		Apex	628.8	745.2	660.9	819.9
左上正中門齒	UL1	Coronal	915.3	1025.8	1051.8	1017.3
		Middle	798.8	875.3	920.8	924.9
		Apex	711.0	812.8	876.1	1002.7
左上側門齒	UL2	Coronal	736.6	966.8	749.2	625.6
		Middle	643.6	778.8	741.3	591.6
		Apex	566.4	721.4	788.8	807.0
左上犬齒	UL3	Coronal	667.0	806.3	726.1	797.8
		Middle	630.7	908.5	836.6	760.5
		Apex	684.4	681.9	969.5	878.1

表 3-3 PATIENT #3 矯正前牙根周圍分區骨密度(UNIT: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	678.4	789.5	991.7	686.6
		Middle	822.9	1186.5	1095.9	1056.2
		Apex	659.8	944.3	1044.4	1022.2
右上側門齒	UR2	Coronal	873.8	1183.8	1135.4	1081.9
		Middle	796.7	1120.0	1068.6	1005.7
		Apex	847.3	1028.6	1092.7	1177.7
右上正中門齒	UR1	Coronal	1056.0	1243.4	1186.0	1247.7
		Middle	1050.1	1074.9	1144.3	1174.1
		Apex	1018.5	1033.9	1042.8	1141.1
左上正中門齒	UL1	Coronal	1049.1	1200.8	1254.4	1210.6
		Middle	937.1	1066.4	1130.6	1087.4
		Apex	933.9	986.8	1057.6	1147.8
左上側門齒	UL2	Coronal	896.7	1134.9	1049.0	1037.6
		Middle	655.0	1015.0	904.0	936.3
		Apex	594.9	842.4	982.7	928.3
左上犬齒	UL3	Coronal	639.6	736.6	944.6	676.6
		Middle	1014.0	1143.3	1079.9	1067.7
		Apex	649.9	999.7	828.0	868.4

表 3-4 PATIENT #4 矯正前牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	632.3	800.7	796.2	709.5
		Middle	627.4	744.4	870.5	690.9
		Apex	539.4	724.1	876.1	934.6
右上側門齒	UR2	Coronal	939.2	1164.4	1168.7	1122.8
		Middle	676.2	847.2	948.1	953.4
		Apex	691.8	712.3	954.2	965.0
右上正中門齒	UR1	Coronal	911.5	1194.2	1166.1	1156.1
		Middle	1000.9	846.2	1035.5	1022.1
		Apex	820.2	711.1	748.8	1064.3
左上正中門齒	UL1	Coronal	883.5	1076.1	1079.1	1032.7
		Middle	671.7	786.5	919.3	875.4
		Apex	683.3	931.8	1014.3	1085.3
左上側門齒	UL2	Coronal	893.8	1025.3	954.3	1024.9
		Middle	737.7	732.9	825.4	894.0
		Apex	768.7	536.9	775.8	828.0
左上犬齒	UL3	Coronal	653.7	947.9	847.9	919.5
		Middle	618.0	814.8	945.0	695.2
		Apex	558.0	949.6	1023.2	931.1

表 3-5 PATIENT #5 矯正前牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	677.3	862.5	895.5	867.3
		Middle	770.1	744.1	834.9	577.7
		Apex	710.2	740.9	928.6	947.5
右上側門齒	UR2	Coronal	896.5	756.0	1056.2	849.9
		Middle	849.2	912.2	904.9	797.4
		Apex	606.4	596.5	818.4	789.2
右上正中門齒	UR1	Coronal	920.1	1081.8	1101.4	1151.0
		Middle	1002.2	1088.9	966.5	954.5
		Apex	839.3	847.6	721.7	781.7
左上正中門齒	UL1	Coronal	1030.2	1084.5	1059.9	1075.1
		Middle	1047.5	939.4	940.3	820.1
		Apex	1017.1	797.9	761.9	741.1
左上側門齒	UL2	Coronal	715.6	839.3	939.0	801.8
		Middle	763.0	844.0	805.6	551.1
		Apex	720.6	619.5	800.0	556.8
左上犬齒	UL3	Coronal	491.8	680.2	797.7	668.8
		Middle	689.6	739.4	691.0	694.7
		Apex	734.7	677.9	980.3	895.4

表 3-6 PATIENT #6 矯正前牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	855.9	822.6	917.5	725.7
		Middle	761.4	860.0	812.2	550.5
		Apex	483.4	760.4	998.7	943.6
右上側門齒	UR2	Coronal	804.1	1079.3	1034.2	988.9
		Middle	745.1	714.6	871.2	859.9
		Apex	619.2	778.1	940.1	872.4
右上正中門齒	UR1	Coronal	1042.5	1089.2	1087.5	1132.6
		Middle	965.6	1073.1	1108.1	1038.7
		Apex	1005.5	969.7	1023.7	1055.6
左上正中門齒	UL1	Coronal	875.8	1155.5	1136.0	1141.6
		Middle	813.4	916.3	983.6	912.4
		Apex	832.2	978.1	1014.3	1025.0
左上側門齒	UL2	Coronal	728.3	898.4	931.2	786.3
		Middle	796.2	719.1	791.1	628.7
		Apex	536.7	770.0	814.8	688.3
左上犬齒	UL3	Coronal	839.7	820.9	707.3	695.2
		Middle	508.9	625.1	716.3	614.6
		Apex	465.2	652.6	807.6	713.0

表 3-7 PATIENT #7 矯正前牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal	
7	右上犬齒	UR3	Coronal	655.6	846.9	794.7	739.0
		Middle	611.0	866.6	783.0	848.0	
		Apex	667.2	647.4	681.5	645.9	
	右上側門齒	UR2	Coronal	568.1	805.9	987.5	809.2
			Middle	500.2	823.0	836.2	693.9
			Apex	452.4	638.6	682.9	684.9
	右上正中門齒	UR1	Coronal	782.4	849.6	900.8	960.1
			Middle	839.6	892.3	892.7	915.3
			Apex	904.7	938.6	929.5	955.4
左上正中門齒	UL1	Coronal	767.6	950.3	950.3	927.8	
		Middle	756.4	922.8	934.4	901.0	
		Apex	824.4	818.7	929.0	942.2	
左上側門齒	UL2	Coronal	X	X	X	X	
		Middle	X	X	X	X	
		Apex	X	X	X	X	
左上犬齒	UL3	Coronal	469.2	682.1	678.2	624.0	
		Middle	544.4	647.4	754.4	579.6	
		Apex	590.7	710.1	852.4	820.9	

表 3-8 PATIENT #8 矯正前牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal	
8	右上犬齒	UR3	Coronal	675.0	802.0	898.3	732.6
			Middle	631.3	787.8	749.0	573.9
			Apex	1134.2	888.8	1120.8	887.5
	右上側門齒	UR2	Coronal	756.5	1040.4	778.1	791.9
			Middle	755.4	583.4	805.0	470.6
			Apex	1002.9	456.7	837.0	501.8
	右上正中門齒	UR1	Coronal	848.0	1095.9	1094.1	1026.8
			Middle	928.7	780.6	828.9	823.3
			Apex	906.9	705.3	712.6	858.8
	左上正中門齒	UL1	Coronal	775.4	1040.0	1012.8	928.3
			Middle	742.6	776.3	843.4	745.1
			Apex	883.6	756.5	829.7	983.3
	左上側門齒	UL2	Coronal	699.3	868.4	758.8	642.7
			Middle	607.0	826.5	750.9	535.9
			Apex	854.2	585.2	902.8	435.8
左上犬齒	UL3	Coronal	611.1	813.8	720.7	673.8	
		Middle	552.0	561.1	714.4	515.9	
		Apex	902.0	770.6	1095.2	760.2	

3.4 患者矯正後牙根周圍分區骨密度

表 3-9 PATIENT #1 矯正後牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	516.1	619.5	583.1	582.2
		Middle	512.9	568.5	637.2	580.2
		Apex	622.5	676.9	764.2	789.5
右上側門齒	UR2	Coronal	590.4	740.7	742.9	637.1
		Middle	551.8	504.3	650.4	636.5
		Apex	732.7	516.4	707.7	650.3
右上正中門齒	UR1	Coronal	588.9	725.5	719.7	705.9
		Middle	533.8	497.8	608.5	702.8
		Apex	566.4	450.9	512.2	650.9
左上正中門齒	UL1	Coronal	565.0	761.5	780.3	744.3
		Middle	557.1	592.8	616.1	733.6
		Apex	604.9	660.1	632.2	797.2
左上側門齒	UL2	Coronal	567.0	696.5	634.4	785.3
		Middle	606.4	505.4	575.2	737.2
		Apex	531.3	486.4	579.1	653.5
左上犬齒	UL3	Coronal	426.7	579.6	553.2	467.6
		Middle	523.0	540.9	737.6	614.2
		Apex	721.5	646.7	852.0	840.8

表 3-10 PATIENT #2 矯正後牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	631.9	713.8	773.7	708.5
		Middle	563.8	695.7	714.1	567.7
		Apex	527.2	544.2	657.0	719.6
右上側門齒	UR2	Coronal	721.6	663.9	683.0	744.7
		Middle	625.2	771.4	671.2	712.0
		Apex	670.9	515.0	562.7	717.9
右上正中門齒	UR1	Coronal	623.9	708.4	708.1	789.7
		Middle	480.3	714.9	648.7	659.5
		Apex	503.4	589.3	618.4	667.2
左上正中門齒	UL1	Coronal	533.4	710.9	734.6	681.5
		Middle	461.0	752.2	563.4	633.1
		Apex	496.6	570.6	648.2	695.0
左上側門齒	UL2	Coronal	517.7	489.5	399.1	385.2
		Middle	556.1	548.8	409.4	343.4
		Apex	462.0	389.6	523.7	375.4
左上犬齒	UL3	Coronal	417.6	416.6	408.0	467.1
		Middle	446.8	525.0	480.8	476.5
		Apex	537.9	621.2	736.1	790.0

表 3-11 PATIENT #3 矯正後牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	640.4	751.8	878.3	712.4
		Middle	738.3	1017.6	964.2	984.4
		Apex	608.6	942.8	1088.6	984.5
右上側門齒	UR2	Coronal	890.6	995.3	1034.9	932.5
		Middle	788.9	869.3	1006.1	853.8
		Apex	829.6	758.3	1084.9	900.9
右上正中門齒	UR1	Coronal	913.9	1055.8	1180.0	1097.0
		Middle	859.5	897.6	1036.1	1004.0
		Apex	720.7	670.8	813.6	853.9
左上正中門齒	UL1	Coronal	843.0	995.7	1126.3	1064.7
		Middle	771.1	858.3	968.1	1004.2
		Apex	820.4	873.9	968.7	1076.2
左上側門齒	UL2	Coronal	645.0	905.3	950.9	893.4
		Middle	600.3	930.8	793.3	978.2
		Apex	628.7	860.8	801.8	1089.4
左上犬齒	UL3	Coronal	724.6	790.7	872.5	837.8
		Middle	818.5	984.5	980.3	972.1
		Apex	461.9	997.0	816.0	832.5

表 3-12 PATIENT #4 矯正後牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	574.5	595.3	551.0	570.0
		Middle	531.2	597.8	653.1	568.8
		Apex	562.1	554.8	759.6	723.1
右上側門齒	UR2	Coronal	618.7	733.5	649.8	698.0
		Middle	540.6	659.9	620.9	689.8
		Apex	489.5	541.1	689.0	629.0
右上正中門齒	UR1	Coronal	619.0	771.0	732.8	800.8
		Middle	690.9	616.7	705.6	759.2
		Apex	676.1	610.3	559.8	755.4
左上正中門齒	UL1	Coronal	615.1	776.5	809.9	788.7
		Middle	652.2	611.9	639.3	758.4
		Apex	783.8	579.4	611.9	743.7
左上側門齒	UL2	Coronal	725.4	778.3	725.9	819.1
		Middle	534.0	602.9	731.0	798.5
		Apex	564.9	531.8	755.1	711.4
左上犬齒	UL3	Coronal	544.8	732.9	606.4	714.5
		Middle	545.3	671.1	671.1	650.5
		Apex	459.6	553.4	642.2	641.4

表 3-13 PATIENT #5 矯正後牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	460.7	437.1	482.5	502.8
		Middle	588.6	577.8	653.0	467.2
		Apex	487.4	584.4	631.6	650.9
右上側門齒	UR2	Coronal	642.6	420.9	667.6	466.8
		Middle	699.4	645.4	595.1	580.6
		Apex	703.3	457.2	422.7	566.5
右上正中門齒	UR1	Coronal	639.8	855.7	808.9	846.1
		Middle	667.3	724.7	682.6	701.8
		Apex	528.5	538.7	547.3	614.0
左上正中門齒	UL1	Coronal	647.5	759.3	789.8	719.7
		Middle	804.3	715.9	766.0	587.9
		Apex	717.5	484.5	566.4	479.8
左上側門齒	UL2	Coronal	494.0	576.4	614.1	460.8
		Middle	671.4	577.4	667.3	500.0
		Apex	673.3	394.4	488.0	467.4
左上犬齒	UL3	Coronal	362.9	312.9	455.2	371.2
		Middle	505.9	453.5	424.6	443.8
		Apex	520.4	419.0	575.9	798.7

表 3-14 PATIENT #6 矯正後牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	575.4	589.4	637.6	558.2
		Middle	579.8	606.1	639.8	474.8
		Apex	468.1	527.7	603.6	582.5
右上側門齒	UR2	Coronal	573.6	588.9	608.0	542.2
		Middle	469.8	555.3	567.8	582.3
		Apex	403.8	414.0	450.3	517.3
右上正中門齒	UR1	Coronal	600.8	716.4	747.1	660.4
		Middle	618.5	628.5	697.9	603.8
		Apex	706.1	609.1	613.4	728.2
左上正中門齒	UL1	Coronal	721.6	803.7	786.1	776.0
		Middle	515.5	577.5	645.4	597.4
		Apex	547.3	632.3	638.1	666.4
左上側門齒	UL2	Coronal	595.7	666.7	598.7	573.1
		Middle	529.6	481.9	564.9	457.5
		Apex	459.2	592.4	593.6	536.4
左上犬齒	UL3	Coronal	713.7	547.3	526.4	610.9
		Middle	479.3	521.7	622.5	512.2
		Apex	462.3	645.4	665.4	569.9

表 3-15 PATIENT #7 矯正後牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	487.2	508.8	548.8	450.8
		Middle	466.3	558.5	575.8	566.1
		Apex	599.1	434.0	543.1	431.7
右上側門齒	UR2	Coronal	462.3	487.2	705.2	616.5
		Middle	425.6	588.1	593.3	589.0
		Apex	422.1	686.7	533.9	530.0
右上正中門齒	UR1	Coronal	578.1	555.7	738.5	685.4
		Middle	516.1	567.6	679.4	588.3
		Apex	564.4	569.9	659.2	641.7
左上正中門齒	UL1	Coronal	564.6	554.8	765.1	667.5
		Middle	505.3	596.8	703.9	594.0
		Apex	476.4	500.3	659.3	608.6
左上側門齒	UL2	Coronal	X	X	X	X
		Middle	X	X	X	X
		Apex	X	X	X	X
左上犬齒	UL3	Coronal	447.9	494.1	511.5	508.6
		Middle	500.1	528.6	597.4	586.8
		Apex	419.7	663.9	572.0	778.6

表 3-16 PATIENT #8 矯正後牙根周圍分區骨密度(unit: HU)

牙齒	Tooth	Portion	Buccal	Palatal	Mesial	Distal
右上犬齒	UR3	Coronal	581.7	662.5	663.4	585.4
		Middle	572.7	639.1	617.1	568.8
		Apex	558.7	426.1	711.1	420.0
右上側門齒	UR2	Coronal	618.2	802.9	609.8	589.1
		Middle	615.2	524.1	672.4	525.0
		Apex	804.6	449.1	757.9	510.2
右上正中門齒	UR1	Coronal	589.2	766.7	733.4	688.3
		Middle	641.8	599.2	589.1	608.9
		Apex	572.8	512.6	555.9	619.7
左上正中門齒	UL1	Coronal	611.3	805.0	799.2	755.5
		Middle	609.5	682.9	739.8	648.4
		Apex	610.3	630.7	718.4	788.9
左上側門齒	UL2	Coronal	546.7	658.5	581.5	700.8
		Middle	533.1	658.7	599.9	546.3
		Apex	750.8	572.5	750.7	436.8
左上犬齒	UL3	Coronal	534.5	558.7	554.0	518.6
		Middle	504.1	448.9	614.1	416.8
		Apex	592.7	496.7	808.6	399.1

3.5 患者矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向間關係

將八位受試者矯正前後牙齒移動方向分類分層紀錄，並與各層骨密度前後變化量作比較，發現總共有 57.4%符合"牙齒移動方向跟矯正前後骨密度改變量最大的方向為同方向"，表示矯正的牙齒移動符合"The pressure and tension"理論。也就是說，壓力側牙根周圍骨密度會改變最大，也就是產生骨吸收，並且牙根會朝此方向移動。

表 3-17 PATIENT #1 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向

牙齒	Tooth	Portion	牙根周圍(不同位置)骨密度改變量					最大骨密度 改變位置	牙齒移動 方向	
			Buccal	Palatal	Mesial	Distal	average			
1	右上犬齒	UR3	Coronal	-7.7	-26.9	-35.6	-31.7	-25.5	M	M
		Middle	-5.6	-21.7	-22.7	-20.3	-17.6	M	B	
		Apex	-35.7	-35.6	-41.3	-32.3	-36.2	M	M	
	右上側門齒	UR2	Coronal	-28.3	-25.8	-22.4	-29.6	-26.5	D	B
		Middle	-18.5	-8.6	-24.1	-18.0	-17.3	M	M	
		Apex	-11.4	1.4	-24.2	-14.9	-12.3	M	M	
	右上正中門齒	UR1	Coronal	-27.2	-23.7	-31.0	-28.6	-27.6	M	B
		Middle	-26.9	-36.2	-38.0	-24.1	-31.3	M	M	
		Apex	-35.8	-48.4	-48.8	-37.1	-42.5	M	M	
	左上正中門齒	UL1	Coronal	-31.6	-23.7	-20.9	-28.3	-26.2	B	B
		Middle	-27.4	-22.9	-26.0	-12.0	-22.1	B	B	
		Apex	-33.8	-31.4	-39.1	-20.4	-31.2	M	M	
左上側門齒	UL2	Coronal	-21.8	-14.6	-21.7	-11.9	-17.5	B	B	
	Middle	12.1	-9.9	-26.4	-0.2	-6.1	M	M		
	Apex	-36.7	-4.6	-27.0	-16.4	-21.2	B	B		
左上犬齒	UL3	Coronal	-21.7	-21.1	-38.9	-21.5	-25.8	M	B	
	Middle	-7.6	-27.2	-26.2	-21.5	-20.6	P	M		
	Apex	-39.9	-29.5	-24.3	-23.9	-29.4	B	B		

表 3-18 PATIENT #2 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向

牙齒	Tooth	Portion	牙根周圍(不同位置)骨密度改變量					最大骨密度 改變位置	牙齒移動 方向	
			Buccal	Palatal	Mesial	Distal	average			
2	右上犬齒	UR3	Coronal	-20.3	-19.8	-13.9	-21.1	-18.8	D	B
		Middle	-17.5	-28.4	-21.0	-29.5	-24.1	D	B	
		Apex	-4.4	-35.8	-17.9	-28.5	-21.7	P	P	
	右上側門齒	UR2	Coronal	-19.0	-27.4	-30.6	-19.5	-24.1	M	M
		Middle	-7.3	-17.4	-27.4	-12.8	-16.2	M	M	
		Apex	-4.4	-37.8	-34.2	-25.7	-25.5	P	P	
	右上正中門齒	UR1	Coronal	-37.1	-39.7	-32.6	-24.6	-33.5	P	D
		Middle	-34.8	-23.7	-25.5	-25.6	-27.4	B	D	
		Apex	-19.9	-20.9	-6.4	-18.6	-16.5	P	P	
左上正中門齒	UL1	Coronal	-41.7	-30.7	-30.2	-33.0	-33.9	B	B	
	Middle	-42.3	-14.1	-38.8	-31.5	-31.7	B	B		
	Apex	-30.2	-29.8	-26.0	-30.7	-29.2	D	D		
左上側門齒	UL2	Coronal	-29.7	-49.4	-46.7	-38.4	-41.1	P	M	
	Middle	-13.6	-29.5	-44.8	-42.0	-32.5	M	M		
	Apex	-18.4	-46.0	-33.6	-53.5	-37.9	D	D		
左上犬齒	UL3	Coronal	-37.4	-48.3	-43.8	-41.5	-42.7	P	M	
	Middle	-29.2	-42.2	-42.5	-37.3	-37.8	M	M		
	Apex	-21.4	-8.9	-24.1	-10.0	-16.1	M	D		

表 3-19 PATIENT #3 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向

	牙齒	Tooth	Portion	牙根周圍(不同位置)骨密度改變量					最大骨密度 改變位置	牙齒移動 方向
				Buccal	Palatal	Mesial	Distal	average		
3	右上犬齒	UR3	Coronal	-5.6	-4.8	-11.4	3.8	-4.5	M	M
			Middle	-10.3	-14.2	-12.0	-6.8	-10.8	P	P
			Apex	-7.8	-0.2	4.2	-3.7	-1.8	B	M
	右上側門齒	UR2	Coronal	1.9	-15.9	-8.9	-13.8	-9.2	P	P
			Middle	-1.0	-22.4	-5.8	-15.1	-11.1	P	P
			Apex	-2.1	-26.3	-0.7	-23.5	-13.1	P	P
	右上正中門齒	UR1	Coronal	-13.5	-15.1	-0.5	-12.1	-10.3	P	P
			Middle	-18.2	-16.5	-9.5	-14.5	-14.6	B	M
			Apex	-29.2	-35.1	-22.0	-25.2	-27.9	P	P
	左上正中門齒	UL1	Coronal	-19.6	-17.1	-10.2	-12.1	-14.7	B	P
			Middle	-17.7	-19.5	-14.4	-7.7	-14.8	P	P
			Apex	-12.2	-11.4	-8.4	-6.2	-9.6	B	P
	左上側門齒	UL2	Coronal	-28.1	-20.2	-9.4	-13.9	-17.9	B	P
			Middle	-8.4	-8.3	-12.2	4.5	-6.1	M	M
			Apex	5.7	2.2	-18.4	17.3	1.7	M	P
	左上犬齒	UL3	Coronal	13.3	7.4	-7.6	23.8	9.2	D	D
			Middle	-19.3	-13.9	-9.2	-9.0	-12.8	B	B
			Apex	-28.9	-0.3	-1.4	-4.1	-8.7	B	D

表 3-20 PATIENT #4 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向

	牙齒	Tooth	Portion	牙根周圍(不同位置)骨密度改變量					最大骨密度 改變位置	牙齒移動 方向
				Buccal	Palatal	Mesial	Distal	average		
4	右上犬齒	UR3	Coronal	-9.1	-25.7	-30.8	-19.7	-21.3	M	P
			Middle	-15.3	-19.7	-25.0	-17.7	-19.4	M	D
			Apex	4.2	-23.4	-13.3	-22.6	-13.8	P	P
	右上側門齒	UR2	Coronal	-34.1	-37.0	-44.4	-37.8	-38.3	M	M
			Middle	-20.1	-22.1	-34.5	-27.6	-26.1	M	M
			Apex	-29.2	-24.0	-27.8	-34.8	-29.0	D	M
	右上正中門齒	UR1	Coronal	-32.1	-35.4	-37.2	-30.7	-33.9	M	M
			Middle	-31.0	-27.1	-31.9	-25.7	-28.9	M	M
			Apex	-17.6	-14.2	-25.2	-29.0	-21.5	D	P
	左上正中門齒	UL1	Coronal	-30.4	-27.8	-24.9	-23.6	-26.7	B	B
			Middle	-2.9	-22.2	-30.5	-13.4	-17.2	M	M
			Apex	14.7	-37.8	-39.7	-31.5	-23.6	M	M
	左上側門齒	UL2	Coronal	-18.8	-24.1	-23.9	-20.1	-21.7	P	M
			Middle	-27.6	-17.7	-11.4	-10.7	-16.9	B	M
			Apex	-26.5	-0.9	-2.7	-14.1	-11.1	B	M
	左上犬齒	UL3	Coronal	-16.7	-22.7	-28.5	-22.3	-22.5	M	P
			Middle	-11.8	-17.6	-29.0	-6.4	-16.2	M	P
			Apex	-17.6	-41.7	-37.2	-31.1	-31.9	P	P

表 3-21 PATIENT #5 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向

	牙齒	Tooth	Portion	牙根周圍(不同位置)骨密度改變量					最大骨密度 改變位置	牙齒移動 方向
				Buccal	Palatal	Mesial	Distal	average		
5	右上犬齒	UR3	Coronal	-32.0	-49.3	-46.1	-42.0	-42.4	P	M
			Middle	-23.6	-22.3	-21.8	-19.1	-21.7	B	B
			Apex	-31.4	-21.1	-32.0	-31.3	-28.9	M	B
	右上側門齒	UR2	Coronal	-28.3	-44.3	-36.8	-45.1	-38.6	D	B
			Middle	-17.6	-29.2	-34.2	-27.2	-27.1	M	M
			Apex	16.0	-23.3	-48.4	-28.2	-21.0	M	M
	右上正中門齒	UR1	Coronal	-30.5	-20.9	-26.6	-26.5	-26.1	B	B
			Middle	-33.4	-33.4	-29.4	-26.5	-30.7	BP	B
			Apex	-37.0	-36.4	-24.2	-21.4	-29.8	B	B
	左上正中門齒	UL1	Coronal	-37.1	-30.0	-25.5	-33.1	-31.4	B	B
			Middle	-23.2	-23.8	-18.5	-28.3	-23.5	D	B
			Apex	-29.5	-39.3	-25.7	-35.3	-32.4	P	D
	左上側門齒	UL2	Coronal	-31.0	-31.3	-34.6	-42.5	-34.9	D	D
			Middle	-12.0	-31.6	-17.2	-9.3	-17.5	P	M
			Apex	-6.6	-36.3	-39.0	-16.1	-24.5	M	M
	左上犬齒	UL3	Coronal	-26.2	-54.0	-42.9	-44.5	-41.9	P	B
			Middle	-26.6	-38.7	-38.6	-36.1	-35.0	P	B
			Apex	-29.2	-38.2	-41.3	-10.8	-29.9	M	B

表 3-22 PATIENT #6 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向

	牙齒	Tooth	Portion	牙根周圍(不同位置)骨密度改變量					最大骨密度 改變位置	牙齒移動 方向
				Buccal	Palatal	Mesial	Distal	average		
6	右上犬齒	UR3	Coronal	-32.8	-28.3	-30.5	-23.1	-28.7	B	M
			Middle	-23.9	-29.5	-21.2	-13.8	-22.1	P	P
			Apex	-3.2	-30.6	-39.6	-38.3	-27.9	M	M
	右上側門齒	UR2	Coronal	-28.7	-45.4	-41.2	-45.2	-40.1	P	M
			Middle	-36.9	-22.3	-34.8	-32.3	-31.6	B	M
			Apex	-34.8	-46.8	-52.1	-40.7	-43.6	M	M
	右上正中門齒	UR1	Coronal	-42.4	-34.2	-31.3	-41.7	-37.4	B	B
			Middle	-35.9	-41.4	-37.0	-41.9	-39.1	D	M
			Apex	-29.8	-37.2	-40.1	-31.0	-34.5	M	M
	左上正中門齒	UL1	Coronal	-17.6	-30.4	-30.8	-32.0	-27.7	D	D
			Middle	-36.6	-37.0	-34.4	-34.5	-35.6	P	P
			Apex	-34.2	-35.3	-37.1	-35.0	-35.4	M	M
	左上側門齒	UL2	Coronal	-18.2	-25.8	-35.7	-27.1	-26.7	M	D
			Middle	-33.5	-33.0	-28.6	-27.2	-30.6	B	D
			Apex	-14.4	-23.1	-27.1	-22.1	-21.7	M	P
	左上犬齒	UL3	Coronal	-15.0	-33.3	-25.6	-12.1	-21.5	P	P
			Middle	-5.8	-16.5	-13.1	-16.7	-13.0	D	D
			Apex	-0.6	-1.1	-17.6	-20.1	-9.8	D	M

表 3-23 PATIENT #7 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向

	牙齒	Tooth	Portion	牙根周圍(不同位置)骨密度改變量					最大骨密度 改變位置	牙齒移動 方向
				Buccal	Palatal	Mesial	Distal	average		
7	右上犬齒	UR3	Coronal	-25.7	-39.9	-30.9	-39.0	-33.9	P	B
			Middle	-23.7	-35.6	-26.5	-33.2	-29.7	P	D
			Apex	-10.2	-33.0	-20.3	-33.2	-24.2	D	D
	右上側門齒	UR2	Coronal	-18.6	-39.5	-28.6	-23.8	-27.6	P	P
			Middle	-14.9	-28.5	-29.0	-15.1	-21.9	M	M
			Apex	-6.7	7.5	-21.8	-22.6	-10.9	D	D
	右上正中門齒	UR1	Coronal	-26.1	-34.6	-18.0	-28.6	-26.8	P	P
			Middle	-38.5	-36.4	-23.9	-35.7	-33.6	B	B
			Apex	-37.6	-39.3	-29.1	-32.8	-34.7	P	B
	左上正中門齒	UL1	Coronal	-26.4	-41.6	-19.5	-28.1	-28.9	P	P
			Middle	-33.2	-35.3	-24.7	-34.1	-31.8	P	P
			Apex	-42.2	-38.9	-29.0	-35.4	-36.4	B	D
	左上側門齒	UL2	Coronal	X	X	X	X	X	X	X
			Middle	X	X	X	X	X	X	X
			Apex	X	X	X	X	X	X	X
	左上犬齒	UL3	Coronal	-4.5	-27.6	-24.6	-18.5	-18.8	P	M
			Middle	-8.1	-18.4	-20.8	1.2	-11.5	M	M
			Apex	-28.9	-6.5	-32.9	-5.2	-18.4	M	M

表 3-24 PATIENT #8 矯正前後牙根周圍分區骨密度改變量與矯正後牙齒移動方向

	牙齒	Tooth	Portion	牙根周圍(不同位置)骨密度改變量					最大骨密度 改變位置	牙齒移動 方向
				Buccal	Palatal	Mesial	Distal	average		
8	右上犬齒	UR3	Coronal	-13.8	-17.4	-26.1	-20.1	-19.4	M	D
			Middle	-9.3	-18.9	-17.6	-0.9	-11.7	P	D
			Apex	-50.7	-52.1	-36.6	-52.7	-48.0	D	D
	右上側門齒	UR2	Coronal	-18.3	-22.8	-21.6	-25.6	-22.1	D	D
			Middle	-18.6	-10.2	-16.5	11.6	-8.4	B	D
			Apex	-19.8	-1.7	-9.5	1.7	-7.3	B	B
	右上正中門齒	UR1	Coronal	-30.5	-30.0	-33.0	-33.0	-31.6	MD	D
			Middle	-30.9	-23.2	-28.9	-26.0	-27.3	B	B
			Apex	-36.8	-27.3	-22.0	-27.8	-28.5	B	B
	左上正中門齒	UL1	Coronal	-21.2	-22.6	-21.1	-18.6	-20.9	P	B
			Middle	-17.9	-12.0	-12.3	-13.0	-13.8	B	B
			Apex	-30.9	-16.6	-13.4	-19.8	-20.2	B	B
	左上側門齒	UL2	Coronal	-21.8	-24.2	-23.4	9.0	-15.1	P	M
			Middle	-12.2	-20.3	-20.1	1.9	-12.7	P	M
			Apex	-12.1	-2.2	-16.8	0.2	-7.7	M	B
	左上犬齒	UL3	Coronal	-12.5	-31.4	-23.1	-23.0	-22.5	P	M
			Middle	-8.7	-20.0	-14.0	-19.2	-15.5	P	P
			Apex	-34.3	-35.5	-26.2	-47.5	-35.9	D	M

第四章 討論

4.1 CBCT 與其他測量骨量工具及方法的探討

骨量包含結構的特性和物質的特性(Ito 2005)。物質的特性像是骨頭的礦質化需要利用同位素放射斷層掃描(synchrotron radiation CT)、高解析度 X 光機(microradiography with high spatial and density resolution)，這些都是屬於侵入性的測試。

而結構的特性可以使用 X 光或是 CT 甚至是核磁共振攝影(Magnetic Resonance Imaging ; MRI)，這些都是非侵入性的，但卻已經足以提供臨床上的資訊。

我們的實驗發現牙根周圍骨頭結構變疏鬆而使影像亮度變低。雖然不能實際的得知內部確實的生理反應，但在臨床實驗中，已經是得到最小傷害與最多資訊了。

依不同的對象，如大體或是活體所測得的結果也不同。在比較利用大體或是真實人體的 CT 值來看，發現在大體上側的 CT 值(Shahlaie et al., 2003; Fanuscu and Chang 2004)比真實人體(Norton and Gamble 2001; Turkyilmaz et al., 2007)上的還要高，推測可能是因為在骨頭生理活性不同的差距造成。

我們在本實驗人體觀察出來的牙根周圍骨密度數值大約是 842.9 HU。而骨密度這個數據利用不同影像工具，如 CT 或 CBCT 測得的結果不同。有人主張 CT 測出來的數值較大(Aranyarachkul, 2005)，但也有人比較後發現用 CT 測得的數據較低。

目前使用 CBCT 等斷層掃描影像主要是在討論植牙區的骨密度，所以大多是無牙區的骨頭。而在矯正上的探討骨密度方面也是大多探討矯正用植體應該打在哪個區塊會有較好的結果。因此多為探討比較常放置骨釘的位置如後牙區兩個牙齒牙根間、midpalatal line、等等的骨密度，或是討論各區塊的骨頭厚度。

本實驗主要在研究矯正過程中牙根周圍骨密度的變化，所探討的區域是有牙區，而非無牙脊的植牙區。並且十分接近牙根，不可能用來當作放置骨釘的位置。

所以無法將得到的數值做絕對比較。

4.2 假體物選擇與量測方式準確度之探討

4.2.1 標準假體的選擇

在本實驗中，使用矯正用口腔保護黏蠟、鋁、壓克力和去離子水來當作校正標準體。其中矯正用口腔保護黏蠟、鋁、壓克力的選取主要原因是因為材料取得的方便。而去離子水則是為了方便之後使人重複實驗可以測試的校正方式。

再來是因為在 CBCT 影像中，骨密度的範圍大約是在 600~1200 HU 左右，而矯正用口腔保護黏蠟為 60HU，鋁為 1900 HU，壓克力為 600 HU，而去離子水為 330 HU，都在骨密度的密度範圍之外，所以此密度範圍當作標準體可以涵蓋整個骨密度範圍。

4.2.2 比較沒有做矯正者的生理與矯正者的不同

在沒有做矯正者間隔七個月後的 CBCT 影像中，上顎右上犬齒到左上犬齒共六顆牙的牙根周圍骨頭密度來看，整體牙根不分段和不分面的平均值前為：1134 後為：1114，前後兩次測量相差-2.57%，此數據遠遠小於矯正者的牙根周圍骨密度改變量：-19.8%。

由牙根的分段分面來比較，會發現有的段或面會增加有的則會減少，這種正或負的骨密度改變是因為在一般沒有施予矯正力下，人的正常骨生理反應持續進行所產生的。

4.3 矯正後牙根周圍骨密度會變低之可能性探討

本實驗結果發現矯正會使牙根周圍骨密度降低。回顧之前的文獻，發現許多文獻已經證明在矯正期間壓力側和張力側會有骨頭的吸收和生成。並且由牙齒移

動後的組織切片染色後的骨量沉積可以獲得直接的證明。但在關於”密度”的研究中是比較缺乏的。但推測有可能的原因是因為飲食習慣的改變或是因為鈣離子等營養素攝取不足。

有學者發現(Mavropoulos et al., 2005; Sidiropoulou-Chatzigiannis et al., 2007)軟食因為沒有咬合力的刺激，所以骨密度都偏低。有帶咬合板的區塊因為將咬合墊高會對軟組織造成伸張作用，於是 BMD 較高。而從我們的實驗推測：戴上矯正器使牙齒移動過程會使牙齒有痠軟不易使力的情形而可能導致飲食習慣的改變，從病患的經驗中會減少食用硬食的機會，於是使骨密度降低。而本實驗無咬合板的裝置無法與之前的研究相比，但是也許之後可能使用到的顎間橡皮筋會達到與咬合板相同的結果，不過這部份需要再進一步的實驗證明。

另外有學者(Midgett, 1981)由低鈣實驗的狗身上得知低鈣飲食會使骨密度降低，並且發現牙齒移動較快。或許在矯正者身上會因為矯正器的影響而導致飲食攝取方式改變，導致一些營養素的缺乏，而間接使骨密度降低。降低的程度又與個人的飲食習慣或身體能量的供需平衡有關，因此反應在實驗結果上會發現每個人的骨密度降低程度都不相同。

由本實驗觀察出來的結果發現在牙齒的壓力與張力測骨密度都有明顯的減少。這也許是因為在骨吸收和骨生成的初期，骨分解成密度較低的小塊，而骨生成的早期因為未成熟的 woven bone 鈣化還不夠完全，所以也是呈現密度較低的影像。

但也有可能是因為之前提出的張力壓力理論是屬於局部比較明顯的反應，但再三度空間的牙根來說，因為牙根的不對稱以及個人獨特的生理反應，並不能一概而論。過去我們利用組織切片來研究骨生理，時代進步，我們開始將工程加入醫療的研究，開始了FEM的年代。近年來有很多利用FEM模擬骨頭和牙周韌帶來觀察牙齒移動的反應。

這個發現也可以由(Cattaneo et al., 2005)FEM 的模擬發現並不能直接以受力方向將牙根分成張力或壓力側，矯正力量對於牙根受力的整個系統來說是很複雜

的。於是從我們的 CBCT 影像來看，我們可以推測可能是因為牙根周圍骨頭結構變疏鬆而使影像亮度變低。雖然不能實際的得知內部確實的生理反應，但在臨床人體實驗中，已經是得到最小侵犯性與最豐富研究資訊的方法。

4.4 牙齒移動方向與周圍骨密度影響相關性之探討

4.4.1 Pressure and tension theory vs Melsen 提出之理論

在矯正造成牙齒移動的理論當中，最常被提及的就是廣為流傳以至成為現在矯正基本觀念的就是前面幾個理論 The pressure-tension theory, The bone-bending theory 和 piezoelectricity (bioelectric signals) theory。所以綜合這些學者的發現：在壓力張力理論中，因為受壓迫的 PDL 改變血流量而改變化學環境。如在壓力側的含氧量減少、張力側含氧量增加，造成其他代謝產物相對的改變。這種化學變化會直接或刺激或釋放出其他生物活化劑來發會作用，然後刺激細胞分化及活性強調的是化學信號。而 The bone-bending theory 和 piezoelectricity (bioelectric signals) theory 合併來說明矯正力造成的骨頭彎曲會產生生物電能，這有可能是提供細胞反應的第一個信號。

近年來由於科技的進步，後來的學者 Melsen(Melsen 1999; Melsen et al., 2007) 利用 Finet Element Model 模擬 PDL、骨頭和牙齒在矯正過程中的變化而研究提出新的理論：

- 不能簡單歸類壓力側和張力側
- 張力和壓力是有可能同時存在的
- 張力側的效應會比壓力側還重要

並且在 2001 年提出(Melsen 2001)PDL 纖維伸張產生的力量，會產生骨頭重塑與牙齒移動。

由本次的實驗發現，在矯正力的作用下，牙根周圍骨密度大部分會呈現密度降低的情形。並且發現，與牙齒移動的方向合併考量，呈現在牙齒移動方向上的

壓力側大約有 57.4%會與骨密度吸收最多的一側吻合。這種關係符合傳統的 the pressure and tension theory 這個觀點。

而本實驗雖然不能證明是否是由牙周韌帶的血流改變或是纖維拉扯所導致壓力側吸收張力側沉積的理論。但卻能利用新的方式來間接證明原始的理論，在真實人體中找出矯正前後牙根周圍骨密度的變化，有別於先前使用體外得骨切片或是用現代工程手法的 FEM 模擬，寄望能更真實的呈現骨生理在矯正過程中的變化。雖然發現不管壓力側或張力側都是造成骨密度降低的情形，但比較起來還是符合在牙齒移動方向上的壓力側造成的骨密度吸收較大的現象，與之前學者作的研究結果相符合。

4.4.2 牙根分上、中、下三段與 Pressure and tension theory 之相關性

若以牙根分段來看。Coronal(C)、Middle(M)、Apex(A)三層的牙根移動方向與骨密度降低最多的方向來看是差不多的，其中 Coronal(C)層符合的比例較少，這可能是因為 Coronal(C)層附近的骨頭是皮質骨，骨質較硬的關係。但其他兩層有大於一半是符合 The pressure-tension theory。

表 4-1 牙根分段符合比率

	Coronal(%)	Middle(%)	Apex(%)
符合	23(48.9%)	29(61.7%)	30(63.8%)
不符合	24(51.1%)	18(38.3%)	17(36.2%)

4.4.3 牙根分頰、顎、近心、遠心四面與 pressure and tension 理論之相關性

若以牙根分面來看矯正前後骨密度的改變會發現大部分牙齒移動方向的那一面，也就是所謂的壓力側骨密度會改變最多，而不是移動方向的其他面骨密度改變量會比較少，這個符合率有 57.4%，也就是說有本實驗有五成以上的比率符

合牙齒移動的壓力側骨密度改變量最大。也就是符合 the pressure and tension theory 的壓力側造成骨吸收的現象。

4.4.4 矯正後牙根周圍骨密度有增加情形之探討

本實驗發現骨密度有些會有增加的情形，而且大都出現在犬齒。檢視此情形的牙齒前後比較圖發現會有密度增加的犬齒其移動量都不大，推測可能牙根位置穩定後，骨頭會慢慢開始增加使骨密度增加。於是我們推測矯正期間骨密度會變得酥鬆使牙齒移動，當牙齒移動到最後的位置，骨頭會慢慢開始修復及沉積使骨密度增加。因此本實驗希望後續能有矯正後維持一段時間後的 CBCT 影像，以期能完整追蹤矯正後牙根周圍骨密度是否會恢復成一開始的情形。

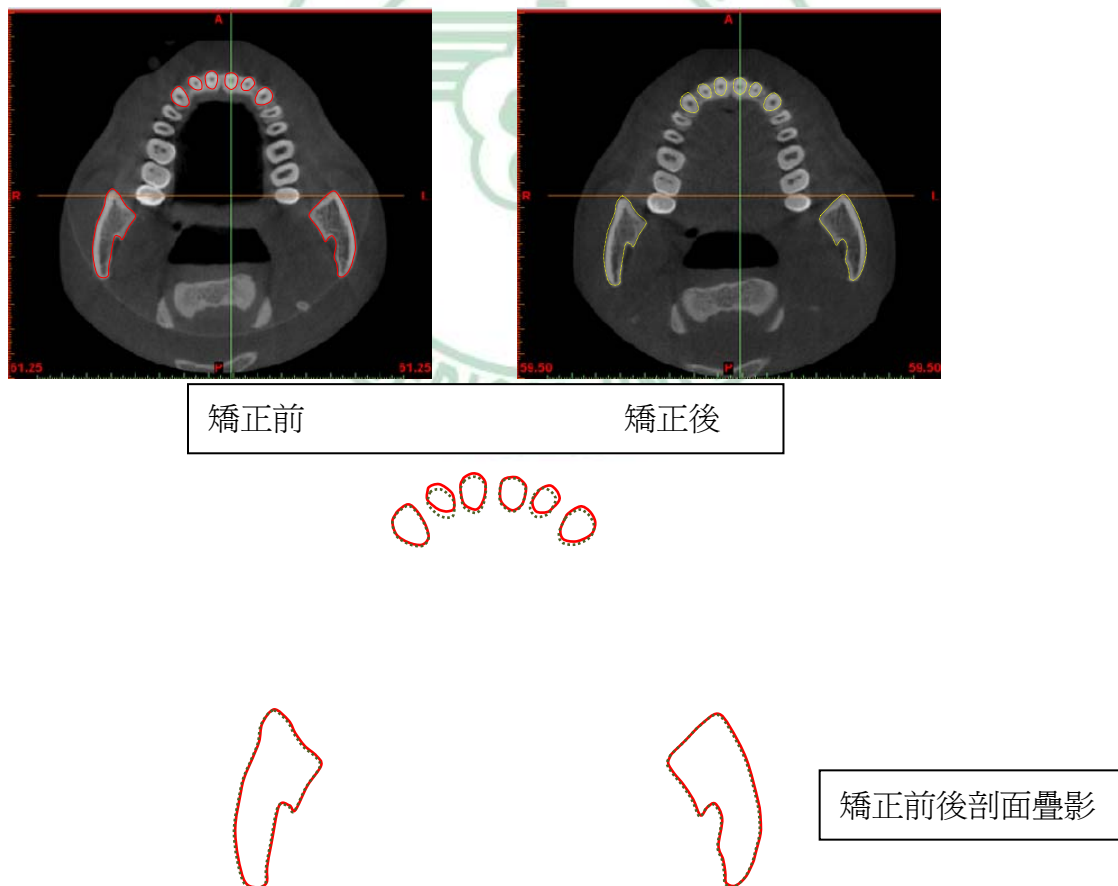


圖 4-1 矯正前後剖面圖與矯正前後依骨性不動點之疊影

4.4.5 不同牙齒與 Pressure and tension theory 之相關性

本實驗中比較正中門齒、側門齒和犬齒對於牙齒移動的壓力側方向上骨密度改變最多的符合率來看，犬齒符合率最低，正中門齒符合率最高。推測可能的原因在於

1. 以牙根表面積來看，犬齒的表面積最大，所以以相同綁紮力量來說，犬齒的平均受力較小，於是壓力側骨密度降低的效應相較於其他方向來說差別不大，因此壓力側的方向骨密度降低不會特別顯著而降低了符合率。加上有些因為移動量不大而有骨密度增加的情形，而造成符合率降低。
2. 以矯正線往外擴張的方向來看，正中門齒相較於側門齒和犬齒接受到較單純往外擴張的力，而較接近轉角的側門齒和犬齒受力較複雜，加上矯正器的位置略有偏差，得到的牙齒移動可能不是單純的往外，甚至牙根是旋轉(rotation)的移動情形較正中門齒來的多，也因此判讀牙根的移動方向時有可能會出現相反方向的情形而降低了符合率。



圖 4-2 牙齒移動量改變不大之矯正前後齒顎排列差異

4.5 本研究之限制

4.5.1 樣本數量的限制

本實驗為了能將金屬產生的散射變因控制到最小，因此必須在過程中將矯正器拆除，照射完 CBCT 後再將矯正器黏回。所進行的步驟繁雜，加上條件篩選嚴格為不拔牙的年輕族群(20~25 歲)，又必須在 leveling and alignment 的過程連續七個月不能加以其他矯正輔助工具(如顎間橡皮筋、彈力鍊等等)，所以整個矯正過程會比原本來的漫長，因此所收集到的臨床資料只有八位，在討論上比較難做統計。

4.5.2 單牙根的限制

本實驗主要是先設立一個方法和流程，礙於一些軟體的關係，我們只能先探討單牙根的牙齒(犬齒、正中和側門齒)。等到現有的瓶頸突破，期望能多加上後牙多牙根的牙齒來探討，並且能將實驗對象擴展到拔牙的病例，以期更能了解牙齒在拔牙區的移動和骨反應。

4.5.3 骨重塑過程的限制

本實驗是以真實的人體做實驗，與傳統使用動物實驗後的切片或是斷層掃描影像並不能相提並論。主要是因為個體間的差異太大，且無法嚴格控管各人的行為，加上雖然使用了輻射劑量大幅降低的 CBCT，但基於輻射安全考量，還是無法太密集的照射。所以得到的資料可能是片段式的骨生理而非一連串的骨生理。

4.5.4 目前尚無追蹤樣本的限制

由於在這七個月中，單純將牙齒排整後還需要時間利用其他矯正輔助工具(如顎間橡皮筋、彈力鍊等等)確實將咬合以及剩下需要微調的工作完成。所以短時間內並沒有辦法收集到全部完整的追蹤資料，無法繼續探討是否在矯正完成後，骨密度是否會慢慢增加回復到之前還沒有做矯正前的骨密度。

第五章 結論與未來展望

5.1 結論

本實驗利用 CBCT 測量並分析在進行七個月單純 leveling and alignment 矯正治療前後的上顎單牙根前牙區的牙根周圍骨密度改變，以及與牙齒移動方向的相關性。本實驗得到以下結論：

1. 基本上矯正七個月會造成牙根周圍骨密度降低
2. 有 57%符合 pressure and tension 理論；矯正牙齒往壓力測移動的部分會造成骨密度改變量最大。

5.2 未來展望

CBCT 在牙科的應用上將會是一個新的趨勢。目前期待有更完整更符合矯正醫師需要評估的影像軟體出現，以補足在本實驗上對軟體使用上的問題。同時希望能在這些患者的矯正治療完成後，能有後續的追蹤報告，以俾能將整個實驗更完整呈現矯正過程中以及矯正後骨密度的變化，在真實的人體上說明骨生理。

參考文獻

- Ahlqvist, J., Eliasson, S. and Welander, U., 1983. The cephalometric projection. Part II. Principles of image distortion in cephalography. *Dentomaxillofac Radiol* 12, 101-8.
- Aranyarachkul, P., Caruso, J., Gantes, B., Schulz, E., Riggs, M., Dus, I., Yamada, J.M. and Crigger, M., 2005. Bone density assessments of dental implant sites: 2. Quantitative cone-beam computerized tomography. *Int J Oral Maxillofac Implants* 20, 416-24.
- Attal, U., Blaushild, N., Brin, I. and Steigman, S., 2001. Histomorphometric study of the periodontal vasculature during and after experimental tipping of the rat incisor. *Arch Oral Biol* 46, 891-900.
- Bassett, C.A. and Becker, R.O., 1962. Generation of electric potentials by bone in response to mechanical stress. *Science* 137, 1063-4.
- Baumrind, S., 1969. A reconsideration of the propriety of the "pressure-tension" hypothesis. *American journal of orthodontics* 55, 12.
- Becker, W., Hujoel, P.P., Becker, B.E. and Willingham, H., 2000. Osteoporosis and implant failure: an exploratory case-control study. *J Periodontol* 71, 625-31.
- Bergersen, E.O., 1980. Enlargement and distortion in cephalometric radiography: compensation tables for linear measurements. *Angle Orthod* 50, 230-44.
- Burstone, C.J. and Tanne, K., 1986. [Biomechanical basis of tooth movement]. *Nippon Kyosei Shika Gakkai Zasshi* 45, 541-51.
- Cann, C.E., 1988. Quantitative CT for determination of bone mineral density: a review. *Radiology* 166, 509-22.
- Cattaneo, P.M., Dalstra, M. and Melsen, B. (2005). The finite element method: a tool to study orthodontic tooth movement, International and American Associations for Dental Research. **84**: 428-433.
- de Oliveira, R.C., Leles, C.R., Normanha, L.M., Lindh, C. and Ribeiro-Rotta, R.F.,

2008. Assessments of trabecular bone density at implant sites on CT images. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 105, 231-8.
- Epker, B.N. and Frost, H.M., 1965. A histological study of remodeling at the periosteal, haversian canal, cortical endosteal, and trabecular endosteal surfaces in human rib. *Anat Rec* 152, 129-35.
- Eriksen, E.F., Mosekilde, L. and Melsen, F., 1985. Trabecular bone remodeling and bone balance in hyperthyroidism. *Bone* 6, 421-8.
- Eriksen, E.F., Mosekilde, L. and Melsen, F., 1986. Trabecular bone remodeling and balance in primary hyperparathyroidism. *Bone* 7, 213-21.
- Fanuscu, M.I. and Chang, T.L., 2004. Three-dimensional morphometric analysis of human cadaver bone: microstructural data from maxilla and mandible. *Clin Oral Implants Res* 15, 213-8.
- Frost, H.M., 1969. Tetracycline-based histological analysis of bone remodeling. *Calcif Tissue Res* 3, 211-37.
- Fuhrmann, R.A., Schnappauf, A. and Diedrich, P.R., 1995. Three-dimensional imaging of craniomaxillofacial structures with a standard personal computer. *Dentomaxillofac Radiol* 24, 260-3.
- Fullmer, J.M., Scarfe, W.C., Kushner, G.M., Alpert, B. and Farman, A.G., 2007. Cone beam computed tomographic findings in refractory chronic suppurative osteomyelitis of the mandible. *Br J Oral Maxillofac Surg* 45, 364-71.
- Grayson, B., Cutting, C., Bookstein, F.L., Kim, H. and McCarthy, J.G., 1988. The three-dimensional cephalogram: theory, technique, and clinical application. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 94, 327-37.
- Guerrero, M.E., Jacobs, R., Loubele, M., Schutyser, F., Suetens, P. and van Steenberghe, D., 2006. State-of-the-art on cone beam CT imaging for preoperative planning of implant placement. *Clin Oral Investig* 10, 1-7.
- Harris, D.A., Jones, A.S. and Darendeliler, M.A., 2006. Physical properties of root

cementum: part 8. Volumetric analysis of root resorption craters after application of controlled intrusive light and heavy orthodontic forces: a microcomputed tomography scan study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 130, 639-47.

Hilgers, M.L., Scarfe, W.C., Scheetz, J.P. and Farman, A.G., 2005. Accuracy of linear temporomandibular joint measurements with cone beam computed tomography and digital cephalometric radiography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 128, 803-11.

Hill, P.A., 1998. Bone remodelling. *Br J Orthod* 25, 101-7.

Hirsch, E., Wolf, U., Heinicke, F. and Silva, M.A., 2008. Dosimetry of the cone beam computed tomography Veraviewepocs 3D compared with the 3D Accuitomo in different fields of view. *Dentomaxillofac Radiol* 37, 268-73.

Holberg, C., Steinhauser, S., Geis, P. and Rudzki-Janson, I., 2005. Cone-beam computed tomography in orthodontics: benefits and limitations. *J Orofac Orthop* 66, 434-44.

Homolka, P., Beer, A., Birkfellner, W., Nowotny, R., Gahleitner, A., Tschabitscher, M. and Bergmann, H. (2002). Bone Mineral Density Measurement with Dental Quantitative CT Prior to Dental Implant Placement in Cadaver Mandibles: Pilot Study 1, *RSNA*. 224: 247-252.

Hounsfield, G.N., 1980. Nobel Award address. *Computed medical imaging. Med Phys* 7, 283-90.

Hvid, I., Bentzen, S.M., Linde, F., Mosekilde, L. and Pongsoipetch, B., 1989. X-ray quantitative computed tomography: the relations to physical properties of proximal tibial trabecular bone specimens. *J Biomech* 22, 837-44.

Hwang, H.S., Hwang, C.H., Lee, K.H. and Kang, B.C., 2006. Maxillofacial 3-dimensional image analysis for the diagnosis of facial asymmetry. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 130, 779-85.

- Ito, M., 2005. [Can bone quality be assessed non-invasively?--Imaging--]. *Clin Calcium* 15, 951-7.
- Jones, D.B., Nolte, H., Scholubbers, J.G., Turner, E. and Veltel, D., 1991. Biochemical signal transduction of mechanical strain in osteoblast-like cells. *Biomaterials* 12, 101-10.
- Kalender, W.A., Felsenberg, D., Genant, H.K., Fischer, M., Dequeker, J. and Reeve, J., 1995. The European Spine Phantom--a tool for standardization and quality control in spinal bone mineral measurements by DXA and QCT. *Eur J Radiol* 20, 83-92.
- Kardos, T.B. and Simpson, L.O., 1980. A new periodontal membrane biology based upon thixotropic concepts. *Am J Orthod* 77, 508-15.
- Keeling, S.D., King, G.J., McCoy, E.A. and Valdez, M., 1993. Serum and alveolar bone phosphatase changes reflect bone turnover during orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 103, 320-6.
- Kim, S.H., Choi, Y.S., Hwang, E.H., Chung, K.R., Kook, Y.A. and Nelson, G., 2007. Surgical positioning of orthodontic mini-implants with guides fabricated on models replicated with cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 131, S82-9.
- King, G.J., Latta, L., Rutenberg, J., Ossi, A. and Keeling, S.D., 1997. Alveolar bone turnover and tooth movement in male rats after removal of orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 111, 266-75.
- King, K.S., Lam, E.W., Faulkner, M.G., Heo, G. and Major, P.W., 2007. Vertical bone volume in the paramedian palate of adolescents: a computed tomography study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 132, 783-8.
- Kobayashi, K., Shimoda, S., Nakagawa, Y. and Yamamoto, A., 2004. Accuracy in measurement of distance using limited cone-beam computerized tomography. *Int J Oral Maxillofac Implants* 19, 228-31.

- Krishnan, V. and Davidovitch, Z., 2006. Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 129, 469 e1-32.
- Liu, D.G., Zhang, W.L., Zhang, Z.Y., Wu, Y.T. and Ma, X.C., 2007. Three-dimensional evaluations of supernumerary teeth using cone-beam computed tomography for 487 cases. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 103, 403-11.
- Loubele, M., Maes, F., Schutyser, F., Marchal, G., Jacobs, R. and Suetens, P., 2006. Assessment of bone segmentation quality of cone-beam CT versus multislice spiral CT: a pilot study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 102, 225-34.
- Ludlow, J.B., Davies-Ludlow, L.E., Brooks, S.L. and Howerton, W.B., 2006. Dosimetry of 3 CBCT devices for oral and maxillofacial radiology: CB Mercuray, NewTom 3G and i-CAT. *Dentomaxillofac Radiol* 35, 219-26.
- Macchi, A., Carrafiello, G., Cacciafesta, V. and Norcini, A., 2006. Three-dimensional digital modeling and setup. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 129, 605-10.
- Masella, R.S. and Meister, M., 2006. Current concepts in the biology of orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 129, 458-68.
- Matherne, R.P., Angelopoulos, C., Kulild, J.C. and Tira, D., 2008. Use of cone-beam computed tomography to identify root canal systems in vitro. *J Endod* 34, 87-9.
- Mavropoulos, A., Ammann, P., Bresin, A. and Kiliaridis, S., 2005. Masticatory demands induce region-specific changes in mandibular bone density in growing rats. *Angle Orthod* 75, 625-30.
- Meikle, M.C., Bord, S., Hembry, R.M., Compston, J., Croucher, P.I. and Reynolds, J.J., 1992. Human osteoblasts in culture synthesize collagenase and other matrix metalloproteinases in response to osteotropic hormones and cytokines.

- J Cell Sci 103 (Pt 4), 1093-9.
- Melsen, B., 1999. Biological reaction of alveolar bone to orthodontic tooth movement. Angle Orthod 69, 151-8.
- Melsen, B., 2001. Tissue reaction to orthodontic tooth movement--a new paradigm. Eur J Orthod 23, 671-81.
- Melsen, B., Cattaneo, P.M., Dalstra, M. and Kraft, D.C. (2007). The importance of force levels in relation to tooth movement, Elsevier.
- Midgett, R.J., Shaye, R. and Fruge, J.F., Jr., 1981. The effect of altered bone metabolism on orthodontic tooth movement. Am J Orthod 80, 256-62.
- Misch, C.E., 1990. Density of bone: effect on treatment plans, surgical approach, healing, and progressive boen loading. Int J Oral Implantol 6, 23-31.
- Mischkowski, R.A., Pulsfort, R., Ritter, L., Neugebauer, J., Brochhagen, H.G., Keeve, E. and Zoller, J.E., 2007. Geometric accuracy of a newly developed cone-beam device for maxillofacial imaging. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 104, 551-9.
- Mostafa, Y.A., Weeks-Dybvig, M. and Osdoby, P., 1983. Orchestration of tooth movement. Am J Orthod 83, 245-50.
- Norton, M.R. and Gamble, C., 2001. Bone classification: an objective scale of bone density using the computerized tomography scan. Clin Oral Implants Res 12, 79-84.
- Park, H.S., Lee, Y.J., Jeong, S.H. and Kwon, T.G., 2008. Density of the alveolar and basal bones of the maxilla and the mandible. Am J Orthod Dentofacial Orthop 133, 30-7.
- Pilon, J.J., Kuijpers-Jagtman, A.M. and Maltha, J.C., 1996. Magnitude of orthodontic forces and rate of bodily tooth movement. An experimental study. Am J Orthod Dentofacial Orthop 110, 16-23.
- Roberts, W.E., Arbuckle, G.R. and Analoui, M., 1996. Rate of mesial translation of

- mandibular molars using implant-anchored mechanics. *Angle Orthod* 66, 331-8.
- Rygh, P. and Reitan, K., 1972. Ultrastructural changes in the periodontal ligament incident to orthodontic tooth movement. *Trans Eur Orthod Soc*, 393-405.
- Sandstedt, C. (1904). Einige Beitrage zur theorie der Zahnregulierung.
- Schwarz MS, R.S., Rhodes ML, Chafetz N., 1987. Computed tomography: Part I. Preoperative assessment of the mandible for endosseous implant surgery. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2, 137-141.
- Schwarz MS, R.S., Rhodes ML, Chafetz N., 1987. Computed tomography: Part II. Preoperative assessment of the maxilla for endosseous implant surgery. *Int J Oral Maxillofac Implants* 10, 1-7.
- Shahlaie, M., Gantes, B., Schulz, E., Riggs, M. and Crigger, M., 2003. Bone density assessments of dental implant sites: 1. Quantitative computed tomography. *Int J Oral Maxillofac Implants* 18, 224-31.
- Sidiropoulou-Chatzigiannis, S., Kourtidou, M. and Tsalikis, L., 2007. The effect of osteoporosis on periodontal status, alveolar bone and orthodontic tooth movement. A literature review. *J Int Acad Periodontol* 9, 77-84.
- Silva, M.A., Wolf, U., Heinicke, F., Bumann, A., Visser, H. and Hirsch, E., 2008. Cone-beam computed tomography for routine orthodontic treatment planning: a radiation dose evaluation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 133, 640 e1-5.
- Sukovic, P., 2003. Cone beam computed tomography in craniofacial imaging. *Orthod Craniofac Res* 6 Suppl 1, 31-6; discussion 179-82.
- Swennen, G.R. and Schutyser, F., 2006. Three-dimensional cephalometry: spiral multi-slice vs cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 130, 410-6.
- Trisi, P. and Rao, W., 1999. Bone classification: clinical-histomorphometric

- comparison. *Clin Oral Implants Res* 10, 1-7.
- Truhlar, R.S., Orenstein, I.H., Morris, H.F. and Ochi, S., 1997. Distribution of bone quality in patients receiving endosseous dental implants. *J Oral Maxillofac Surg* 55, 38-45.
- Tsiklakis, K., Donta, C., Gavala, S., Karayianni, K., Kamenopoulou, V. and Hourdakis, C.J., 2005. Dose reduction in maxillofacial imaging using low dose Cone Beam CT. *Eur J Radiol* 56, 413-7.
- Turkyilmaz, I., Tozum, T.F. and Tumer, C., 2007. Bone density assessments of oral implant sites using computerized tomography. *J Oral Rehabil* 34, 267-72.
- van Leeuwen, E.J., Maltha, J.C. and Kuijpers-Jagtman, A.M., 1999. Tooth movement with light continuous and discontinuous forces in beagle dogs. *Eur J Oral Sci* 107, 468-74.
- von Bohl, M., Maltha, J.C., Von Den Hoff, J.W. and Kuijpers-Jagtman, A.M., 2004. Focal hyalinization during experimental tooth movement in beagle dogs. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 125, 615-23.
- Wainwright, W.M., 1973. Faciolingual tooth movement: its influence on the root and cortical plate. *Am J Orthod* 64, 278-302.
- Zarb, G.A. and Zarb, F.L., 1985. Tissue integrated dental prostheses. *Quintessence Int* 16, 39-42.
- Zengo, A.N., Pawluk, R.J. and Bassett, C.A., 1973. Stress-induced bioelectric potentials in the dentoalveolar complex. *Am J Orthod* 64, 17-27.