1. 我們研發了一台根管治療手術輔助機器人DentiBot，他可以做即時的手術路徑規劃以及控制根管銼的行進與旋轉以完成根管治療
2. 以下是我的大綱
3. 首先從動機以及問題定義開始。
4. 近年來牙科手術機器人漸漸開始發展，根管治療是牙科其中一個重要手術，他的治療過於非常冗長，需要耗時至少2~3次的回診，甚至有時可以拖數個月才完成。他的手術過程大致可以分為三個 Opening 在牙齒開一個洞cleaning 清除根管內部牙髓filling封填清潔完的根管，可以看到cleaning是一項具高度重複率的往復運動，而這一步驟也正是造成手術如此冗長的原因，因為根管有時錯綜複雜，有直的有彎的，根管走向也非固定，一顆牙齒可能有1~4根根管。根管治療目前僅具有約80%的成功率，因此，好結果的根管治療需要靠醫生的專業以及長期累積下來的經驗，失敗就會需要再做一次根管治療，嚴重則整顆拔除。臺灣牙科學會統計台灣共計有一萬五千多名牙科，然而具有牙髓專科醫師資格的僅有200餘位，這都足以顯見根管治療的難度。對於牙醫來說，根管治療仍是一件錢少事多、吃力不討好的一項手術，高重複性的動作造成腰酸背痛，因此，我們有一台根管治療機器人對於牙醫來講絕對是莫大的幫助。
5. 而打造一台根管治療輔助機器人會遇到以下幾點挑戰。牙齒已經是很小，而根管會比牙齒還要細小可已來到0.28mm，越深入越可以小到0.1mm。第二點則是會缺少視覺回饋，如左圖所示會有一塊橡皮隔離障罩住並只露出感染的牙齒，或許可以拍攝到根管的入口但無法拍到根管內部走向。而最重要的是，必須要克服會造成根管治療失敗的兩大主因，第一個醫學術語不完全的根管製備，白話文就是沒有清乾淨 而第二個則是如右圖所示根管銼斷裂也是一個很嚴重的手術失誤
6. 因此，我們想要解決的問題可以列為以下兩大要點。第一點當然就是硬體上要先建造一台機器人。而第二點則是著重在耗費時間最長的Cleaning 這個步驟，其一是必須要能夠依照看不到的根管走向做即時的規劃手術路徑，最後則是要能夠預防file中文叫做根管銼斷裂
7. 再來是我們參考了一些目前現有的牙科手術機器人。
8. 首先是唯一一台的根管治療微型機器人，它有一整個專案規劃，想要包辦所有根管治療手術過程包含前面提到的開洞，清除牙髓以及封填。在手術前先利用2d影像建構3d模型並利用此模型進行術前手術路徑規劃，而該微型機器人也希望搭載手術器械更換以應付不同過程需要用到不同的工具，而最後則是因為微型馬達不足以提供開動時z軸運動方向需要的力量，該軸則採用液壓驅動。然而這個唯一一台用做根管治療的機器人，整個專案目前已經屬於過去式了
9. 至於其他牙科手術機器人主要用作正顎手術、矯正手術以及植牙手術。因為植牙手術是針對單一顆牙齒比較接近根管治療，考量的工作範圍以及機器人尺寸都會比較符合我們我所需，所以我們找了數篇用於植牙的機器人，這三篇分別來自日本韓國香港都有針對機構做特別設計。
10. 而講到最著名的植牙受數機器人則要講到這台商業化機器人YOMI，使用六軸機械手臂，手術路徑也是屬於術前規劃並在手術過程中限制住醫生拉動手機的鑽孔方向，這裡講的手機是醫學專業術語，也就是圖中手握的電子儀器。而patient tracking則是令用另外一個小手臂去連接裝在病患上的支架以得到位置資訊
11. 因為要打造一台機器人，所以我們也要先全面性想好未來整個專案的可能的走向。以下則是我們DentiBot的未來展望，第一點是希望讓醫生移動DentiBot到受感染的牙齒上方，然後DentiBot可以自己找到這開牙齒上所有的根管開口，並進行清除牙髓的動作，最後則是要讓DentiBot結束在鑽到末端，超過那個apex則會傷到病患造成後患。
12. 再來是我們所提出的解決方案
13. 所先是針對第一個問題，我們的機器人要建構成甚麼樣子
14. 那我們也跟那台商業植牙手術機器人，也採用六軸機械手臂作為主體以提供姿態的高自由度，而DentiBot還有額外搭配一顆六軸的force torque sensor提供力與力矩的資訊，末端則是修改牙科手機。因此整體是能符合工作範圍的。而系統整合的部分，網路協定採用EtherCAT串聯Real Time OS 以及所有設備，EtherCAT的傳輸速度比一般的TCP IP傳輸還要來的快。這些設備是一個疊一個，所以除了要讓本身動起來之外還要處裡搭配在一起時所造成的問題，三個設備會有這些右列這些系統整合的問題。對於機械手臂來說，因為他是主體，所以只有基本kinematics要做計算，F/T sensor的部分則是因為它會搭載在機械手臂上，當機械手臂有不同姿態時，即使未接觸到其他外力仍然會受到end effector的重力而影響其讀值，這裡的gravity compensation就是在解決這個問題使F/T sensor的讀值在任一姿態都能保持為0，而第二個reference frame changing則是指sensor的讀值是以sensor的座標來定義，如果今天是希望所得到的力與力矩值。，也就是1+1+1不等於3，系統整合總共有這些問題要解決
15. 再來是為了解決第二個問題，如何即時的校準手術的路徑，而我們提出的功能在正好能夠解決病人的移動問題。
16. Force guided alignment 是使用了 admittance control . admittance control 的概念是將整個機器人視為一個質量彈簧阻尼系統 以此可以得到f = ma+bv+ks這個公式，而因為我們不希望機器人有彈簧的特性，所以將k值去除以去掉震盪特性，經過laplace轉換就可以得到這個關係式，這裡的大M 與大B是一個6by6的對角矩陣，因此這裡的向量是如果是偵測到的力跟力矩，那麼輸出就是位置與選轉角度，但這裡就遇到一個問題，就是robot arm並沒有辦法接收這個command，所以我們退一個少乘一個積分讓他變成force 與velocity的關係式，如此一來就可以利用Jacobian去得到各軸的旋轉角度，而輸入各軸的旋轉角度也是最安全的command可以預先避免掉奇異點的問題。以這張圖下個結論，輸入是我的 desired command 減掉force的讀值後經過admittance control 得到速度，乘上Jacobian在乘上積分器就可以得到各軸的旋轉角度最後輸出給robot arm
17. 有了這個方法之後，有幾個很重要的功能出現了。第一個就是如左圖，醫生終於可以拉動這台輔助機器人到受感染的牙齒。第二個就是針對不同的根管情況，只要偵測到阻力往反方向移動校準姿態，因此能夠即時的進行手術路徑規劃。而這兩個模式有個地方要注意，如右圖所示 在拖動模式狀態下，sensor的讀值參考座標是A點，這樣醫生抓著G1 G2移動時會比較直觀。而手術路徑自動校準模式下則必須將讀值參考座標改至B點也就是tooltip
18. 所以現在dentibot可以偵測到力做相對應的運動了，但是要如何做motion planning 也就是要如何讓機器人動起來，要注意到的是前面提到我們做的是即時手術路徑規劃。所以輸入給robot arm的 command是無時無刻的，我們無法在下一個positioni command給robot arm，一但你下了那麼那一刻就不會有admittance control 的存在，所以就有了command的衝突，而解決方法就是將desired force的第三個元素給值，這第三個元素所影響的就是z軸移動位置，而z軸就是tool insertion的方向。就如影片所示，我們的motion planning不再以位置控制做絕對位置的控制，而是以此方式移動，再利用馬達encoder得到的即時位置資訊做相對位置的控制。
19. 再來就是第三個問題，如何避免根管銼file斷裂，這裡我們將會提出兩個控制方案。
20. 第一個提出的方法是反轉控制，這裡就要先講到器械斷裂的主要原因是他所受到的扭力太大，是被扭斷，他的材質讓它具有高度的彈性所以不會被折斷，而是被扭斷。所以想法很簡單遇到太大的阻力而使扭力變大時就給他反轉去釋放掉所受到的扭矩。而偵測轉矩扭力的方法有兩個 第一個就是很基本馬達的理論 透過量測到的馬達電流乘上一個轉矩常就可以得到轉矩。第二個就是神通廣大的六軸F/T sensor，而我們又能轉換sensor的參考座標到根管銼的tooltip，所以理所當然就可以得到z 軸也就是根管銼的torque。Flow chat所做的事情就是右邊影片所示，,motion planning 就是在模仿醫生鑽牙齒的往復運動，將一個跟管分成很多section 每個section至少重複戳十次當中遇到阻力就反轉90度釋放扭矩，然後直到最後一個section結束。這個功能的成果我們去年發表在CACS。而今年我們繼續思考著如何加強功能，因為這項功能僅僅是模仿了醫生戳的運動，所以並沒有改善花費時間很冗長的問題，可能有時不需要鑽的地方還是一直重複這個上下的動作。所以我們想要取消一直上下鑽的motion planning，是否能夠一直往下鑽同時又能避免受到的扭矩太大。所以進一步的提出了接下來的控制方案 file feedrate control
21. Feedrate 進給是 feed 行進速率與spingle speed旋轉速率的乘積，我們將spindle speed 固定一個值就能夠利用行進速度控制feedrate。也要注意到我們新提出的功能還是必須保有force-guided alinment 所以能控制行進速度就是我們前面講到如何讓機械手臂移動的這個fz參數。所以重點就是我們要控制行進速度，如果遇到大的torque 我們就放慢行進速度 遇到小的torque我們就加快行進速度。所以這個迴圈的目的就是要讓torque追到我們期望的torque，往下戳的時候控制前進的方向，一但Torque 大於期望的Torque就往回走。當然不能無限上綱 所以有個saturation 去限制住前進跟後退的最大速度。可以看到的是前進的最大速度會比後退還要來得大一點。所以右邊這個流程圖的左半邊就是feedrate control 而右半邊就是patient tracking，因為在病人移動時，我們就停止file 的旋轉，同時fz = 0 也就是robot arm 本身不會一直往下。就如同影片一樣，如果偵測到一個很大的受力時就判斷是病人移動了而且移動很快，那麼就停止鑽 。病人移動很小如果還可以接受就照鑽。所以file federate control 能夠將花費時間降低同時又能避免斷針
22. 而要注意到的是這個功能必非是取代了剛剛提到的反轉控制，。在實際時測中，我們發現只用file federate control 單獨作用會失敗，主要原因是鑽牙髓會有碎屑產生，所以很有可能是碎屑卡死造成torque飆升， federate control會無法應付時，實測發現卡死時加入 inverse rotation能夠有效脫離卡死狀態
23. 所以把所有功能加總再一起，我們提出了以下最終的演算法。這張圖前面這張圖 在疊一個inverse rotation control 上來
24. 接下來是實驗，
25. 我們實驗設計分為兩個，一個是功能測試force guided alignment ，那他的實驗指標當然就是要看追得好不好， admittance control 的input force 與實際的velocity 是否正確。一個實驗則是要驗證所有功能當加起來的最終演算法是否能夠符合兩個根管治療的成功要素，清潔的夠乾淨與避免file根管銼斷裂
26. 首先第一個實驗 使用motion capture system 去獲得四顆led的位置資訊， 這個史都華平台上面的三顆led的中心點就是代表根管位置，而這一顆則代表機器人的移動位置，可以注意到這樣的設置下在z軸方向本身就會有一個距離的差距，不過沒關係我們待會要看的是他們的相對運動。那這個史都華平台就是用來模擬病人移動，我們這裡讓史都華平台朝右上左下的方向進行移動一個15 \*15的正方形路徑，總共移動四次正方形，每次中間都會停留十秒鐘且每次會越移動越快分別為3~6mm/s。這個實驗就是驗證機器人在往下戳的同時，force guided alignment包含patient tracking是否有作用，因為我們是要看追得好不好而不是清除得好不好，所以這個實驗的根管是已經清除完畢的狀態，根管銼能夠沒有直接深入根管內部的，因此以當平台右上左然後要往下時就可能會脫針，當然因為一直往下戳所以有可能追的到平台移動速度。總共有三個小實驗，會越加越多功能進行測試，第一個實驗