

Zielposition wurde mit Positionierungsfehlern unter 0.01mm und Orientierung bis zu 0.06° zurückgewonnen. Auch mit dem LBR3 war identifiziert der Achsestabilitätsunterschied.

Schließlich stellt diese Studie fest, dass das LBR3 ausreichend ist, um dieses Verfahren zu bearbeiten. Der bewegliche Kiefer kann in Position gehalten werden, während der Chirurg seine Aufgaben durchführt und eine intuitive kraftfreie Koppelung für medizinische Roboter möglich ist, zeigt uns einen sicheren, sterilen, zuverlässigen und vorhersagbaren Methode, die an der Entwicklung der neuen medizinischen Roboter eingeschlossen sollte.

Weiteren Versuchen, zu der Nutzbarkeit dieser Methode sollten mit tatsächlichen Patienten gebildet werden. Zusätzlich, gibt es noch Leistungen Möglichkeiten durch die Verkleinerung in der Gesamtgröße des Kopplers und des Systems.

## 5.2 SUMMARY IN PORTUGUESE (SUMÁRIO)

O tema desta tese é a possibilidade de acoplar um braço robótico com uma ferramenta fixa no paciente, sem exercer força no mesmo, durante uma cirurgia ortognática assistida por robot.

Deformidades dentofaciais afligem uma considerável percentagem da população mundial, pelas quais muitos procuram tratamento. Os ortodontologistas podem corrigir a oclusão dental até certo ponto, no entanto uma cirurgia correctiva poderá ser necessária para corrigir o alinhamento dos maxilares. Em cirurgias envolvendo a reposição da maxila, é necessário determinar a correcta posição do maxilar superior em relação à base do crânio. Uma correcta reposição é extremamente importante, não apenas por razões estéticas, mas igualmente para corrigir a oclusão dental, que melhora a capacidade de mastigar.

A cirurgia ortognática é hoje um procedimento relativamente comum com um elevado grau de previsibilidade. Avanços técnicos como fixações rígidas, colheita de enxertos ósseos ou substitutos avançaram o sucesso cirúrgico. No entanto, apesar destes significativos avanços ainda há lugar para melhoramentos. Actualmente, a reposição da maxila é realizada com uma patilha de plástico. Esta patilha define a correcta posição da maxila em relação à intacta mandíbula, mas apenas no plano horizontal. O restabelecimento, perfuração e fixação da maxila no eixo vertical permanece uma tarefa difícil que é executada suportando a mandíbula numa posição estável manualmente, aproximando tanto quanto possível de uma situação “normal”. Deslocamentos verticais são medidos com uma régua e comparados com o plano pré-cirúrgico. Esta técnica convencional não tem assistência de métodos computacionais e portanto a principal fonte de erro é a patilha de plástico e o olho humano.

Por essa razão, novas técnicas foram desenvolvidas para trazer uma exacta implementação do plano pré-operatório. Sistemas de navegação e de realidade aumentada auxiliam na transferência do plano pré-operatório comparando o paciente *in-situ* com informação presente no ecrã do computador. No entanto, mesmo que um sistema de navegação para segmentos de osso conseguisse obter exactidões de ordem sub-milimétrica, a exactidão aplicada nas mãos do cirurgião estima-se ser de dois a quatro milímetros. Assim sendo, foi desenvolvido um sistema robótico para apoiar o cirurgião intra-operativamente e facilitar a exacta transferência do plano pré-operatório para a sala de operações, evitando erros dependentes do operador.

Esta abordagem robótica intercepta o método convencional ao gravar a transformação a ser executada (pré-operativamente); registar o paciente antes da separação da maxila; e finalmente ao apontar a correcta posição depois da fractura da maxila. Analisando estas intercepções é primariamente reconhecida a necessidade de colocar o robot longe do local de intervenção e apenas utilizá-lo em alturas específicas. Isto significa que é necessário acoplar e desacoplar o braço robótico repetidamente da ferramenta fixa no paciente. No entanto, os problemas associados com o acoplamento entre o robot e a ferramenta permanecem por resolver de uma maneira simples e intuitiva que minimiza qualquer risco para o paciente.

A conhecida magnitude de erros de exactidão dos sistemas de tracking levaram a forças de contacto a serem aplicadas na ferramenta durante o processo de acoplamento, e consequentemente no paciente. Estas forças levantam sérias preocupações com a segurança do paciente, em particular quando a maxila está móbil, onde forças descontroladas e imprevistas são naturalmente indesejadas. Adicionalmente, a utilização intuitiva é prejudicada com a utilização de equipamentos de tracking externos que necessitam de uma constante linha-de-vista para os, relativamente grandes, marcadores.

Neste estudo, a utilização de uma câmara inserida no próprio manipulador obteve uma melhor solução. O problema de acoplamento foi reduzido a um problema de posicionamento relativo do braço robótico / ferramenta móvel. A posição relativa é adquirida extraindo informação dos marcadores circulares na ferramenta, e a posição do robot é calculada para mover-se relativamente ao alvo. Como a câmara está colocada no próprio manipulador, e portanto próximo dos marcadores, é possível obter medidas mais exactas, o que por sua vez permite um acoplamento seguro e sem a aplicação de força no paciente. De modo a manter o registo e a transferência exacta do plano pré-operativo, é necessário uma correlação exacta das interfaces entre a ferramenta e o manipulador. O modo de controlo por força fornece o intuitivo domínio do braço robótico à medida que o cirurgião guia o braço robótico em direcção à ferramenta. Devido à natureza da sala de operações, este método foi melhorado com uma solução específica para manter a esterilidade.

No processamento de imagem a abordagem utilizada para seguir o alvo foi bem sucedida em determinar a correcta posição 3D e a orientação do alvo com uma margem de erro aceitável. O percurso que minimiza os erros de tracking foi investigado e detectou-se que era mínimo quando aproximando o alvo no eixo perpendicular do mesmo, indicado pelo vector normal do plano e passando no ponto central do alvo.

O acoplamento com força zero é obtido quando o robot é capaz de alcançar a ferramenta sem colidir. Para determinar a segurança do paciente efectuou-se a medição de forças no lado da ferramenta. Testes adicionais com o robot leve LBR3 (KUKA Roboter GmbH, Augsburg, Alemanha) permitiram recolher informação para uma situação cirúrgica realista, perfuração e fixação da maxila, tanto com um crânio de plástico, como com um cadáver suíno. Em repetidas experiências foi observado que é possível acoplar sem exercer força no paciente.

Assim que o robot está acoplado com a ferramenta, a próxima fase do procedimento cirúrgico consiste em manter a posição alvo enquanto o cirurgião perfura e fixa a maxila com parafusos e mini-placas.

Durante experiências laboratoriais, o LBR3 foi sujeito a forças aplicadas pelo cirurgião de modo a testar a sua estabilidade. Dependendo da quantidade de força exercida, a posição alvo pode alterar-se até 1,5mm. É notado um overshoot na posição aquando da libertação

da força aplicada. A posição alvo é recuperar com erros de posição inferiores a 0.01mm, e orientação até 0.06 graus. Igualmente identificada é a diferença de estabilidade entre eixos do LBR3.

Finalmente, este estudo conclui que o LBR3 é adequado para realizar esta tarefa. A maxila solta pode ser suportada na posição alvo enquanto o cirurgião efectua a sua tarefa, e um acoplamento intuitivo para robots médicos é possível, indicando desta forma um método a ser incluído em futuros robots médicos para obter um design seguro, fiável e previsível.

Deverão ser realizados mais testes para determinar a viabilidade deste método com pacientes reais. Adicionalmente, há ainda possíveis benefícios na redução da dimensão geral do protótipo e sistema.