



FACULDADE DE MEDICINA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

TRABALHO FINAL DO 6º ANO MÉDICO COM VISTA À ATRIBUIÇÃO DO GRAU DE MESTRE NO ÂMBITO DO CICLO DE ESTUDOS DE MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA

MANUEL DE ALMEIDA FERREIRA GONÇALVES

***O ESTADO DA ARTE DA ROBÓTICA NA
NEUROCIRURGIA***

ARTIGO DE REVISÃO

ÁREA CIENTÍFICA DE NEUROCIRURGIA

TRABALHO REALIZADO SOB A ORIENTAÇÃO DE:

PROF. DOUTOR MARCOS BARBOSA

DR. RICARDO PEREIRA

MARÇO/2014

Índice

Resumo	3
Abstract	4
Lista de Abreviaturas	5
Introdução	6
Definição	6
Classificação	7
Componentes	7
Neurocirurgia	8
Objectivo	9
Materiais e Métodos	9
Resultados	10
Cirurgia Estereotáxica	11
NeuroMate	11
PathFinder	14
SurgiScope	15
Tabela 1	17
Microcirurgia	18
NeuRobot	19
Sistema de Mitsubishi e colaboradores	22
neuroArm	26
Tabela 2	32
Cirurgia Raquidiana	33

SpineAssist	33
Tabela 3	38
Radiocirurgia	38
CyberKnife	38
Tabela 4	42
Discussão e Conclusão	42
Referências	49

Manuel de Almeida Ferreira Gonçalves
Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra
manuel_goncalves@me.com

Resumo

Introdução: A cirurgia assistida pela robótica é uma tecnologia recente com grande potencial, particularmente na neurocirurgia. Os sistemas robotizados colmatam algumas das limitações próprias do ser humano, como o tremor fisiológico e a incapacidade de realizar movimentos precisos em microescala e, simultaneamente, beneficiam da capacidade de discernimento e adaptabilidade humanas inigualáveis. Na neurocirurgia, a estreita margem de erro e a necessidade de precisão e segurança na manipulação de estruturas delicadas, colocam um grande peso sobre as capacidades do cirurgião. **Objectivo:** revisão de alguns dos principais sistemas robotizados neurocirúrgicos utilizados actualmente, apresentando as suas vantagens e limitações actuais.

Materiais e Métodos: Revisão de artigos pesquisados através do motor de pesquisa da PubMed, com as palavras-chave *robotics*, *neurosurgery*, *haptics*, *NeuroMate*, *PathFinder*, *SurgiScope*, *NeuRobot*, *neuroArm*, *SpineAssist* e *CyberKnife*. Os estudos foram seleccionados por relevância de tema.

Resultados: É apresentado um conjunto de sistemas robotizados neurocirúrgicos representativo do estado da arte actual, com uma descrição breve dos seus componentes e características mecânicas, seguida de resultados de alguns estudos realizados com o respectivo sistema. São descritos sistemas desenhados para cirurgia estereotáxica (*NeuroMate*, *PathFinder* e *SurgiScope*), microcirurgia (*NeuRobot*, o sistema de *Mitsubishi et al.* e *neuroArm*), cirurgia raquidiana (*SpineAssist*) e radiocirurgia (*CyberKnife*).

Discussão e Conclusão: Os estudos sugerem que o desempenho destes sistemas é, geralmente, comparável ao das técnicas convencionais. O *outcome* deve ser sempre a primeira prioridade na escolha de novas tecnologias e técnicas. Assim, são necessários estudos controlados e aleatorizados que comparem directamente o *gold standard* actual e a cirurgia robótica no sentido de perceber qual é o seu verdadeiro grau de benefício, a despeito do custo. No entretanto, novos avanços, quer na correcção de falhas, quer na optimização das vantagens, poderão permitir que esta tecnologia promissora deixe, a médio prazo, de ter apenas o potencial de revolucionar a neurocirurgia, para poder fazê-lo todos os dias no bloco operatório.

Abstract

Introduction: *Robotic surgery is a promising cutting-edge technology, particularly in neurosurgery. Robotic systems balance out some limitations inherent to humans, such as hand tremor and the inability to execute precise microscale movements, and simultaneously benefit from the unmatched human judgment and adaptability. In neurosurgery, the slim margin for error and the need for precision and safety in handling delicate structures, places a heavy burden on the surgeon's abilities. Objective:* to review some of the leading neurosurgical robotic systems currently in use, as well as to highlight their present advantages and limitations.

Materials and Methods: *Studies were searched on the MEDLINE database through the PubMed search engine using the following keywords: robotics, neurosurgery, haptics, NeuroMate, PathFinder, SurgiScope, NeuRobot, neuroArm, SpineAssist, CyberKnife. Relevant publications were subsequently selected.*

Results: *An illustrative set of the current state-of-the-art neurosurgical robotic systems is presented, including a brief description of their components and mechanical features, followed by the findings of a few studies on each system. Systems designed for stereotactic surgery (NeuroMate, PathFinder, SurgiScope), microsurgery (NeuRobot, system by Mitsubishi et al., neuroArm), spinal surgery (SpineAssist) and radiosurgery (CyberKnife) are reported.*

Discussion and Conclusion: *Studies suggest performance is, in general, equivalent to that of conventional techniques. Patient outcome should always be paramount when implementing new technologies or methods. Therefore, randomized controlled trials directly comparing the current gold standard of treatment with robot-assisted surgery are mandatory in order to realize its true benefit, despite the expenses. Meanwhile, new progress, whether rectifying flaws, or honing assets, may, in the near future, turn the revolutionizing potential of this rising technology, into an operating room routine.*

Palavras-Chave/Keywords: *Robótica; neurocirurgia; robotics; neurosurgery; NeuroMate; PathFinder; SurgiScope; NeuRobot; neuroArm; SpineAssist; CyberKnife*

Lista de Abreviaturas:

CRW – Cosman-Roberts-Wells

CT – *computed tomography*

DBS – *deep brain stimulation*

DOF – *degrees-of-freedom*

iMRI – *intraoperative magnetic resonance imaging*

KTP – *potassium titanyl phosphate*

LINAC – *linear accelerator*

RAS – *robot-assisted surgery*

RCM – *remote center of motion*

SEEG – *stereoelectroencephalography*

ZD – Zamorano-Duchovny

Introdução

O avanço tecnológico nas últimas décadas tem sido marcante, particularmente na área biomédica. No caso da imagem médica permitiu a criação de tecnologias de localização e orientação espacial extremamente precisas, como a neuronavegação e estereotaxia *frameless*. Estas tecnologias vieram aproveitar ao máximo a cirurgia assistida por computador, permitindo um melhor planeamento e localização precisa de estruturas a intervencionar. Naturalmente o posicionamento e a actuação assistidos por computador foi o passo seguinte. Nasceu o conceito de cirurgia assistida pela robótica (*robot-assisted surgery*, RAS).

Definição

De acordo com a definição de Davies,⁽¹⁾ um sistema robotizado cirúrgico (ou simplesmente, sistema) é um manipulador controlado por computador equipado com sensores, que pode ser reprogramado para mover e posicionar instrumentos para executar uma variedade de tarefas cirúrgicas.

Classificação

De forma simplificada, os sistemas robotizados podem ser classificados como activos, passivos ou semi-activos.⁽²⁾ Os activos são mais independentes, recolhem e analisam informação do meio envolvente e autonomamente realizam as tarefas para que foram programados. Por outro lado, os passivos são totalmente controlados pelo cirurgião através de uma consola. Um sistema que assuma automaticamente uma posição fixa e que desta forma guie o cirurgião ao longo de um procedimento, é um exemplo de um sistema semi-activo.

Componentes

Seguindo a definição de Davies, um sistema é constituído por 3 componentes principais: sensores, manipulador e computador.⁽³⁾

Os sensores são vitais para o funcionamento do sistema e podem ser de vários tipos. Sensores posicionais para controlo interno, câmaras de vídeo e sensores de infravermelho ou de campo electromagnético,⁽⁴⁾ que fornecem informação visual ao cirurgião através da consola, sensores hápticos que transmitem, através dos controlos manuais, estímulos tácteis e cinestéticos, e sensores dedicados ao registo posicional no teatro operatório.

O manipulador é a parte executora, e inclui, principalmente, os efectores finais (instrumentos cirúrgicos), e os actuadores, que permitem o movimento das articulações. Estas definem o número de graus de liberdade (*degrees-of-freedom*, DOF) que o manipulador tem para movimentar e posicionar o effector final no espaço tridimensional.

O computador é o elemento que desempenha o papel de processar o enorme volume de dados inerente a todas estas funções.

Estas características estruturais dos sistemas robotizados proporcionam-lhes um conjunto de capacidades muito úteis para os cirurgiões. Simultaneamente, colmatam algumas das limitações próprias do ser humano,⁽⁵⁾ como o tremor fisiológico, a incapacidade de realizar movimentos precisos em microescala,⁽⁶⁾ limitações de memória e fadiga, e beneficiam da capacidade de discernimento e adaptabilidade humanas⁽⁵⁾ inigualáveis.

Assim, os sistemas robotizados conseguem eliminar o tremor através de filtros de software^(2, 5-9) podem reduzir movimentos a uma escala variável⁽²⁾ permitindo acções diminutas pelos efectores finais,⁽⁹⁾ processam grandes volumes de dados simultaneamente⁽⁵⁾ e podem realizar movimentos repetitivos⁽⁵⁻⁸⁾ e fixar instrumentos indefinidamente,^(5, 8, 9) para além de muitas outras funções.

Neurocirurgia

Este sinergismo entre homem e máquina tem particular interesse no campo da neurocirurgia, onde os avanços na área da imagem médica, das técnicas minimamente invasivas e na miniaturização dos instrumentos, assim como a estreita margem de erro, colocam um grande peso sobre a destreza, precisão e habilidade do cirurgião.⁽⁹⁾

Além disso, a RAS adapta-se bem à realidade neurocirúrgica. A rigidez do crânio⁽⁸⁾ facilita o processo de registo pré-operatório, e a necessidade de precisão e segurança na manipulação⁽⁸⁾ de

estruturas delicadas para evitar morbidade cirúrgica, são apenas duas questões que tornam a neurocirurgia assistida pela robótica uma linha de evolução natural.

Objectivo

Este trabalho tem como objectivo fazer uma revisão sobre os principais sistemas robotizados neurocirúrgicos utilizados actualmente, assim como alguns dos protótipos que estão a ser actualmente desenvolvidos, dar a conhecer as vantagens e as limitações actuais desta tecnologia, e perceber como poderá evoluir num futuro próximo.

Materiais e Métodos

A base de dados escolhida foi a MEDLINE, e a pesquisa foi feita através do motor de pesquisa da PubMed. Os termos de pesquisa utilizados foram: *robotics*, *neurosurgery*, *haptics*, *neuroArm* para artigos publicados desde 2008. Os estudos foram seleccionados por relevância de tema.

Subsequentemente foram escolhidos alguns artigos considerados importantes através de referências de artigos seleccionados originalmente. Foi ainda realizada uma outra pesquisa com os termos *robot*, *neurosurgery*, *NeuroMate*, *PathFinder*, *SurgiScope*, *NeuRobot*, *neuroArm*, *SpineAssist*, *CyberKnife*, após a selecção dos sistemas a apresentar.

Resultados

Kwoh e colegas foram os pioneiros na utilização de um sistema robotizado em cirurgia.⁽³⁾ Adaptaram um sistema industrial produzido pela Unimation, o PUMA 200, que tinha como função posicionar e alinhar a trajetória de uma cânula de biópsia estereotáxica.⁽³⁾

Seguiu-se o desenvolvimento de vários sistemas para cirurgia estereotáxica, um deles um precursor do NeuroMate por Benabid e colegas em 1987.⁽⁹⁾ Posteriormente, devido à necessidade de precisão e ao potencial impacto da deslocação de estruturas intracranianas durante o procedimento cirúrgico, surgiram sistemas compatíveis com a aquisição de imagem intraoperatória. O Minerva (Universidade de Lausanne, Suíça) foi criado com o propósito de operar no interior de um aparelho de tomografia computadorizada (CT, *computed tomography*), permitindo a aquisição de imagens intraoperatórias em tempo real.⁽⁹⁾ Subsequentemente foram criados sistemas compatíveis com ressonância magnética intraoperatória (iMRI, *intraoperative magnetic resonance imaging*) pelas Universidades de Harvard, Tokyo e Calgary.⁽⁹⁾

Mais recentemente, para além de novos sistemas de cirurgia estereotáxica como o NeuroMate e o PathFinder, também têm sido desenvolvidos sistemas com outras aplicações neurocirúrgicas, como a microcirurgia (ex: NeuRobot e neuroArm), cirurgia raquidiana (SpineAssist) e radiocirurgia (CyberKnife).

De seguida será feita uma apresentação mais detalhada sobre um conjunto de sistemas para estas aplicações.

Cirurgia Estereotáxica

Em cirurgia estereotáxica, os sistemas utilizados são geralmente do tipo semi-activo, em que o sistema é programado para alinhar o efector final com uma trajectória previamente planeada através de *software* apropriado. São sistemas guiados por imagem. É este o caso do NeuroMate,^(10, 11) PathFinder,⁽¹²⁾ e SurgiScope,⁽¹³⁾ que foram testados e utilizados primariamente como suporte para biópsia estereotáxica^(8, 12, 14, 15), colocação de eléctrodos de DBS (*deep brain stimulation*)^(8, 10, 16) e de SEEG (*stereoelectroencephalography*) para estudo de epilepsia.^(17, 18) Já foram também feitas experiências com o PathFinder quanto à sua utilização para segurar e alinhar com maior estabilidade e precisão o *drill* de trepanação.⁽¹⁹⁾ O SurgiScope tem também, para além do modo de biópsia, um modo em que funciona como um microscópio cirúrgico, que consegue posicionar automaticamente o eixo óptico em linha com a trajectória desejada.⁽¹³⁾

NeuroMate

O NeuroMate (Renishaw, Gloucestershire, Reino Unido) (Figura 1) inclui um braço robotizado com 5 DOF e *software* de posicionamento cinemático que permite um planeamento cirúrgico preciso, baseado em imagem pré-operatória (CT ou MRI), assim como a visualização de múltiplas trajectórias e de imagens tridimensionais.⁽²⁰⁾

O sistema pode ser utilizado com ou sem *frame*.^(10, 20) No modo *frameless*, o NeuroMate utiliza um sistema de registo inovador através de ultrassons.^(10, 20) Uma base é implantada no crânio, sendo depois ligada a um dispositivo em forma de hélice com marcadores visíveis em CT e MRI, para a aquisição de imagem pré-operatória. No bloco operatório, o sistema de ultrassons colhe os

dados posicionais deste dispositivo e o computador calcula a informação de registo necessária.^(10, 20)

No entanto, neste modo *frameless* o erro de posicionamento foi considerado substancialmente superior, embora aceitável, por Li e colaboradores⁽²⁰⁾ com um erro médio de 1,95 mm, comparado com um erro médio de 0,86 mm com *frame*. Neste último modo, o NeuroMate foi comparável aos testes com o sistema estereotáxico Zamorano-Duchovny (ZD) (erro médio de 1,17 mm).⁽²⁰⁾



Figura 1 - O NeuroMate num estudo de precisão em modelo (adaptado com autorização da revista).⁽¹⁰⁾

Num outro estudo, o NeuroMate foi utilizado em modo *frameless* em cirurgia de doenças do movimento, para implantação de eléctrodos de DBS em 111 doentes e em duas talamotomias, tendo obtido resultados comparáveis aos de estudos com estereotaxia com *frame* convencional.⁽¹⁰⁾

O NeuroMate facilitou a biópsia de lesões no tronco cerebral por via transcerebelosa, em parte devido à ausência de *frame*, o que permite um posicionamento mais fácil da cabeça do doente e menor desconforto, com uma taxa de complicações semelhante à da via transfrontal.⁽¹⁴⁾

Um estudo testou a capacidade do NeuroMate utilizar uma broca cirúrgica para cirurgia da base do crânio, com o auxílio de *software* baseado em imagem prévia, que permite estabelecer limites, evitando assim lesão de estruturas vizinhas.⁽¹¹⁾ No entanto, os autores reconhecem a necessidade de melhorar a precisão do sistema, tendo obtido desvios de 1 a 2 mm, em média, chegando a 3 mm.⁽¹¹⁾

Cardinale et al. realizaram, entre Setembro de 2009 e Julho de 2010, 26 procedimentos de SEEG com a introdução de 324 eléctrodos com o NeuroMate.⁽¹⁸⁾ A distância média entre o ponto de entrada cortical planeado e o real (calculada por CT ou O-arm no pós-operatório) foi de 0,73 mm, com distância interquartil de 0,48 – 1,02. Apenas em cerca de 4% (13 de 324) foi superior a 2 mm, sendo a distância máxima de 3,27 mm.⁽¹⁸⁾ O tempo operatório não foi superior ao da técnica convencional.⁽¹⁸⁾ Os autores afirmam não ter ocorrido nenhuma complicação major ou défice permanente decorrente desta nova técnica, com apenas uma parésia braquial transitória por pequena hemorragia.⁽¹⁸⁾

PathFinder

O PathFinder (Prosurgics, Reino Unido) tem uma base móvel, que se fixa ao apoio de cabeça de Mayfield, de forma a assegurar uma posição estável relativamente ao campo operatório.^(8, 12) O braço robotizado está dividido em três partes. Uma proximal, com capacidade de rotação de 180° no plano horizontal, uma porção intermédia que se move no plano vertical em 180°⁽⁸⁾, e uma distal que para além de se mover no plano vertical, também executa movimentos de extensão/flexão de 180° e rotação de 360°. A combinação de todos os movimentos possíveis resulta em 6 DOF (Figura 2).^(8, 12, 19) Esta porção distal segura o efector final. Para registo intra-operatório utiliza uma câmara com capacidade de detecção de marcadores radio-opacos com material reflector colados na cabeça do doente.^(8, 12) A comparação com a imagem de CT pré-operatória permite a localização dos marcadores, e quer esta, quer a de MRI, podem ser utilizadas para planeamento cirúrgico.⁽¹²⁾

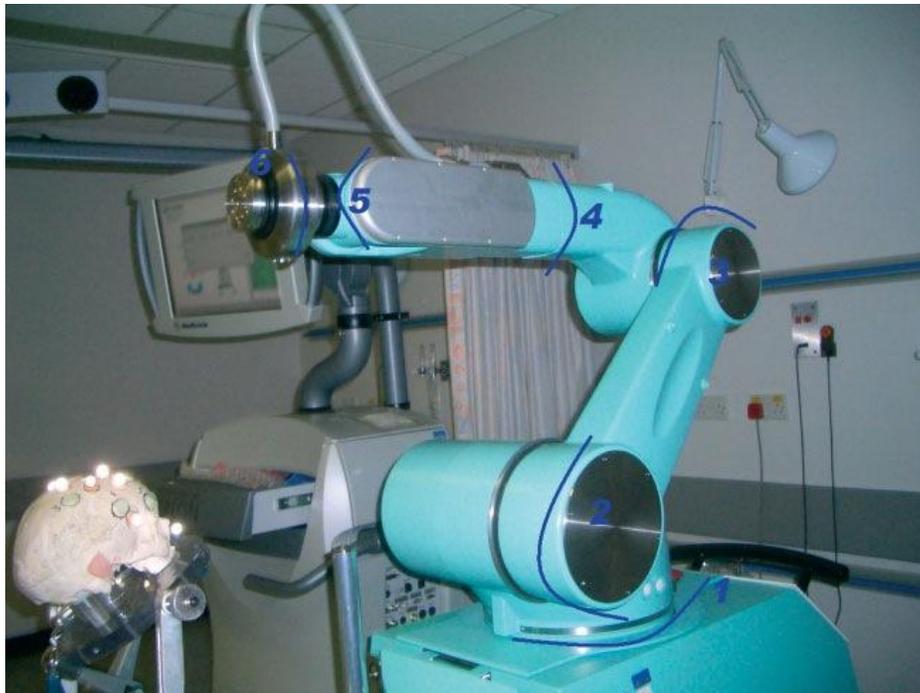


Figura 2 - Vista lateral do PathFinder, indicando os 6 DOFs (1-6) (adaptado com autorização do autor e da revista).⁽¹²⁾

Numa experiência com uma réplica de crânio que continha 10 alvos superficiais e 9 profundos, o PathFinder conseguiu atingir 17 em 19 alvos (89,5%), sendo que os 2 restantes foram atingidos após reposicionamento do sistema, sem necessidade de reaquisição de imagem ou replaneamento.⁽¹²⁾ Esta experiência foi também realizada com os sistemas estereotáxicos Cosman-Roberts-Wells (CRW) e ZD, assim como com o sistema Stealth Station de estereotaxia *frameless* guiada por imagem. Após comparação dos desempenhos, o PathFinder manteve uma precisão de 0,5 mm em qualquer posição dos alvos, sendo esta de 0,98 mm com os *frames* e de 1-2 mm em alvos superficiais e de 3-4,4 mm em alvos mais profundos com o Stealth Station.⁽¹²⁾

Num estudo com 37 doentes foram atingidos 140 alvos com o objectivo de determinar a precisão do PathFinder.⁽⁸⁾ O erro mínimo foi de zero e o máximo de 0,48 mm, com uma mediana de 0,31 mm. O sistema foi sempre consistente, sem desvios ou erros de reposicionamento.

O PathFinder foi também utilizado numa experiência com réplicas de crânio, com o objectivo de testar a sua capacidade de utilizar um craniótomo para trepanação,⁽¹⁹⁾ avaliando a precisão de execução da tarefa. A precisão média neste estudo foi de 0,34 mm, sendo que em profundidade a precisão foi exacta.

SurgiScope

O SurgiScope (ISIS - Intelligent Surgical Instruments & Systems, Saint Martin d'Hères, França) é um sistema com 7 DOF, com 2 modos de operação: microscópio e biópsia, tal como descrito anteriormente (Figura 3).⁽¹³⁾ O sistema está montado no tecto da sala de operações, com o

microscópio e outros instrumentos na extremidade inferior.⁽¹⁵⁾ O sistema de registo inclui marcadores posicionais colocados no escalpe antes da aquisição de imagem pré-operatória.^(13, 15, 21)

O SurgiScope foi utilizado para colocação de catéter intraventricular para criação de um reservatório ventricular para tratamento com quimioterapia em 11 doentes.⁽¹³⁾ Foi bem sucedido em todos os casos, sem registo de hemorragia devido à inserção do catéter. A distância média da ponta do catéter ao alvo (foramen de Monro) foi de $1,6 \pm 3$ mm, e o tempo médio de duração do procedimento foi de 42.8 ± 13.2 minutos.

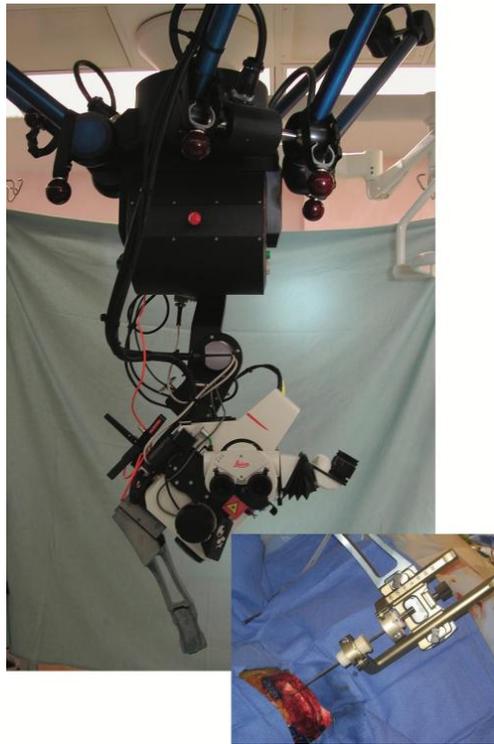


Figura 3 - À esquerda: Surgiscope com o braço de biópsia. À direita: Inserção de um guia para implantação de eléctrodo de profundidade (adaptado com autorização da revista).⁽²¹⁾

Num estudo que investigou a exequibilidade, capacidade diagnóstica e segurança de biópsia de lesões cerebrais do SurgiScope,⁽¹⁵⁾ que incluiu 41 doentes (50 alvos), o tempo médio de operação

foi de 44,6 minutos, sendo que houve um decréscimo significativo do tempo operatório ao longo do estudo, de uma média de 54,7 minutos na primeira metade do estudo, para 34,5 minutos, na segunda metade.⁽¹⁵⁾ A CT pós-operatória detectou que o procedimento resultou em hemorragia com mais de 1 cm em 4 doentes (8% dos alvos), embora estes estivessem assintomáticos. Um doente sofreu uma hemorragia intra-operatória que não resolveu espontaneamente, com necessidade de conversão imediata a craniotomia para evacuação. Esta complicação resultou em afasia motora e hemiparésia direita.⁽¹⁵⁾ A capacidade diagnóstica foi de 48 em 50 alvos (96%), embora num mesmo procedimento tenha sido possível uma biópsia diagnóstica num dos doentes com primeira biópsia não-diagnóstica, e no outro caso, um segundo procedimento permitiu um diagnóstico definitivo.⁽¹⁵⁾

Este sistema foi também utilizado com sucesso na implantação de eléctrodos de profundidade para a avaliação de 4 doentes com epilepsia medicamente intratável, num mesmo tempo operatório da colocação de eléctrodos de monitorização subdurais.⁽²¹⁾

Tabela 1 - Resumo dos sistemas utilizados em cirurgia estereotáxica, com designação do tipo de sistema, e aplicações, vantagens e limitações de cada um.

Sistemas	Tipo	Aplicações	Vantagens	Limitações
NeuroMate	Semi-activo	Biópsia, DBS, SEEG	Precisão, modo <i>frameless</i> , várias funcionalidades	Limitado a estereotaxia, custo elevado

PathFinder	Semi-activo	Biópsia	Precisão, <i>frameless</i>	Limitado a estereotaxia, poucas funções demonstradas, custo elevado
SurgiScope	Semi-activo	Biópsia, SEEG, microscópio cirúrgico, inserção de catéter ventricular	Precisão, <i>frameless</i> , várias funcionalidades, usado como microscópio noutras cirurgias	Utilização activa limitada a estereotaxia, custo elevado

Microcirurgia

Diferentemente da cirurgia estereotáxica, os sistemas utilizados em microcirurgia são do tipo passivo. São tipicamente controlados à distância através de uma consola,⁽²²⁻²⁴⁾ que pode apresentar um modo de *input* semelhante a instrumentos cirúrgicos, o que torna a tarefa mais intuitiva para o cirurgião. Desta forma, o cirurgião vai estar afastado do campo operatório durante o procedimento. A consola inclui um monitor⁽²³⁾ que transmite informação visual ao cirurgião, proveniente de uma câmara de vídeo incorporada no sistema. Muitas vezes é utilizado um sistema de visualização em 3 dimensões,^(23, 24) o que permite uma melhor percepção de profundidade.

Como o cirurgião perde o sentido táctil e cinestético neste tipo de cirurgia à distância, e como estas sensações são importantes para a prática cirúrgica, estão a ser feitos esforços no sentido de melhorar a tecnologia háptica, para que este tipo de sensações possa ser transmitido através dos controlos⁽²⁵⁾ (de forma mais natural) ou na forma de avisos visuais ou auditivos, por exemplo.⁽³⁾

Alguns dos sistemas que estão a ser desenvolvidos actualmente são o NeuRobot,⁽²²⁻²⁴⁾ o sistema de Mitsubishi et al.^(26, 27) e o neuroArm.^(25, 28, 29)

NeuRobot

O NeuRobot (Universidade de Shinshu, Japão) foi desenvolvido com o objectivo de realizar procedimentos microcirúrgicos sendo o menos invasivo possível,⁽²³⁾ particularmente em campos operatórios estreitos e profundos.⁽²⁴⁾ Para isso, foi criado um manipulador que consiste num tubo de 17 cm de comprimento⁽²²⁾ e 10 mm de diâmetro, através do qual passam 3 micromanipuladores, um endoscópio tridimensional e 5 pequenos canais para sucção ou irrigação (Figura 4).⁽²²⁻²⁴⁾

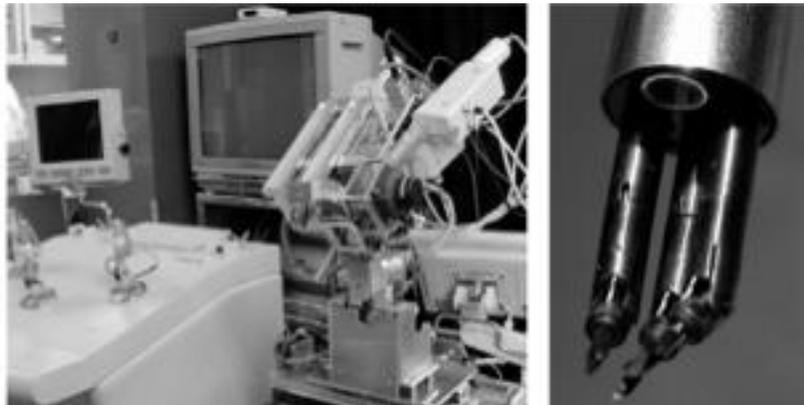


Figura 4 - À esquerda: Consola, monitor 3D e manipulador. À direita: Micromanipuladores (adaptado com autorização do autor e da revista).⁽²⁴⁾

Cada micromanipulador tem 1 mm de diâmetro e o endoscópio tem 4 mm.⁽²³⁾ Na parte distal de cada micromanipulador instala-se o instrumento cirúrgico, cada um com 1 mm de diâmetro, que pode ser de vários tipos: micropinça, laser KTP (*potassium titanyl phosphate*), coagulador monopolar, coagulador bipolar, gancho fino e dissector.^(23, 24) Cada micromanipulador tem 3

DOF: movimento vertical ao longo do eixo longitudinal, rotação em torno deste mesmo eixo e extensão/flexão da porção distal até 90°. ^(23, 24)

A base do manipulador tem 6 DOF: movimentos translacionais ao longos dos eixos x,y,z, movimentos rotacionais no plano horizontal (esquerda/direita), movimentos rotacionais no plano sagital (anterior/posterior) e movimento do manipulador ao longo do seu eixo longitudinal. ⁽²³⁾ A base é controlada a partir de um painel de controlo, em que é possível ajustar a sua posição manualmente através de setas direccionais, ou pela introdução de coordenadas, de acordo com o planeamento pré-operatório. ⁽²³⁾ O movimento mínimo dos micromanipuladores é de 0,02 mm, enquanto que o movimento mínimo da base do manipulador é de 0,1 mm. ^(23, 24)

A consola inclui os controlos dos micromanipuladores, que têm os mesmos 3 DOF que estes, sendo as acções realizadas pelo cirurgião através dos controlos correspondidas pelos micromanipuladores. ^(23, 24) Para além disto, o cirurgião também dispõe de um monitor de imagem tridimensional, que transmite as imagens captadas pelo endoscópio. ⁽²³⁾

O NeuRobot foi testado em vários procedimentos num cadáver. ⁽²³⁾ Foi utilizado para dissecação através da fissura Sílvia até expor, com sucesso, o nervo óptico e a artéria carótida interna; ⁽²³⁾ realizou uma fenestração do pavimento do terceiro ventrículo; ⁽²³⁾ e expôs o quiasma óptico e a artéria comunicante anterior adequadamente, por via interhemisférica. ⁽²³⁾

A sua primeira aplicação clínica foi na remoção, por via frontotemporal, de uma porção superficial de um meningioma atípico com 6 cm localizado na fossa média esquerda com

extensão ao seio cavernoso, sela turca e cavidade orbitária esquerdos e com uma porção infratentorial.⁽²²⁾ O sistema foi apenas utilizado após a abertura da dura, e durante um período de cerca de 30 minutos. Entre outras tarefas realizadas, removeu 4 fragmentos de tumor, cujo diâmetro máximo foi de 7 mm, com a utilização de laser KTP.⁽²²⁾ O resto do procedimento foi executado de forma convencional. Não se verificaram complicações devidas à utilização do sistema.⁽²²⁾

Num estudo com o objectivo de avaliar a exequibilidade do NeuRobot em neuroendoscopia, foram realizados quatro procedimentos intraventriculares em três cadáveres.⁽²⁴⁾ O primeiro foi uma fenestração do pavimento do terceiro ventrículo, através da abertura de um pequeno orifício com o auxílio de um par de micropinças. A rotação dos micromanipuladores, ao segurar as extremidades do orifício, permitiu o aumento do seu diâmetro de forma segura, até atingir 6 mm (Figura 5). A ventriculostomia foi feita em 35 s.⁽²⁴⁾ Posteriormente foi realizada uma fenestração do *septum pellucidum*, com o manipulador inserido no corno posterior do ventrículo lateral esquerdo, criando uma abertura de 10 mm, de forma semelhante à anterior. A septostomia foi realizada em 25 s.⁽²⁴⁾ Foi também realizada uma biópsia do tálamo. Os micromanipuladores atravessaram o foramen de Monro e utilizou-se o laser KTP para remover uma porção de 3 mm de tecido talâmico (duração de 115 s). O foramen de Monro ficou intacto, no entanto a passagem dos instrumentos causou uma lesão parcial da adesão intertalâmica.⁽²⁴⁾ O último procedimento foi uma biópsia do plexo coróide, que foi segurado com as micropinças e cortado com o laser KTP, com obtenção de uma amostra de 3 mm (duração de 110 s). Em nenhuma das situações foi necessário alterar a posição do manipulador durante o procedimento, nem qualquer intervenção manual.⁽²⁴⁾ O NeuRobot foi ainda utilizado no caso de um doente de 41 anos com hidrocefalia

obstrutiva por estenose do aqueduto de Sylvius devido a uma anomalia venosa de desenvolvimento. Foi realizada ventriculostomia do terceiro ventrículo de forma semelhante à descrita anteriormente. A cirurgia foi bem sucedida, com melhoria sintomática, e não existiram quaisquer complicações.⁽²⁴⁾

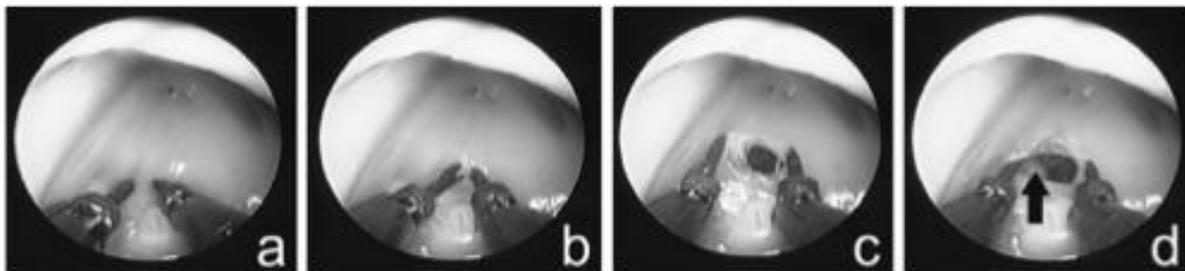


Figura 5 – Ventriculostomia: (a) Perfuração com micropinças; (b-d) Alargamento do orifício através da rotação das micropinças segurando as suas margens (adaptado com autorização do autor e da revista).⁽²⁴⁾

Sistema de Mitsubishi e colaboradores

O sistema desenvolvido por Mamoru Mitsubishi e colaboradores^(26, 27) (Universidade de Tokyo, Japão) é um sistema passivo, controlado à distância através de uma consola. A versão original foi criada com o objectivo de melhorar a destreza e a manobrabilidade em campos cirúrgicos profundos.⁽²⁷⁾ No entanto, devido a algumas dificuldades, como manipuladores demasiado grandes, e destreza não satisfatória,⁽²⁷⁾ a versão mais recente do sistema⁽²⁶⁾ já não é dirigida especificamente para campos profundos, mas continua a ser aperfeiçoada para a realização de tarefas microcirúrgicas mais finas, como a anastomose das artérias temporal superficial e cerebral média.

A parte efectora do sistema é constituída por 2 manipuladores (Figura 6), cada um suportado por uma base móvel, o que permite que seja posicionado de forma a interferir o mínimo possível com o restante equipamento. Devido ao risco de erros de posicionamento e à necessidade de precisão em microcirurgia, assim como ao problema da complexidade do controlo do movimento de todos os eixos simultaneamente em braços articulados, os autores preferiram utilizar uma configuração cartesiana. Desta forma, os movimentos de translação (x,y,z) são realizados pela base do manipulador, sendo mecanicamente separados dos movimentos de orientação angulares (α,β,γ) que são controlados por uma unidade em arco montada na base. Esta estrutura cria um centro de movimento remoto (*remote center of motion, RCM*) na ponta do effector final (pinça) (Figura 7). O volume de trabalho é o de um cubo de arestas de 150 mm, o que é adequado quer para manipulação fina, quer para certos movimentos grosseiros.⁽²⁶⁾

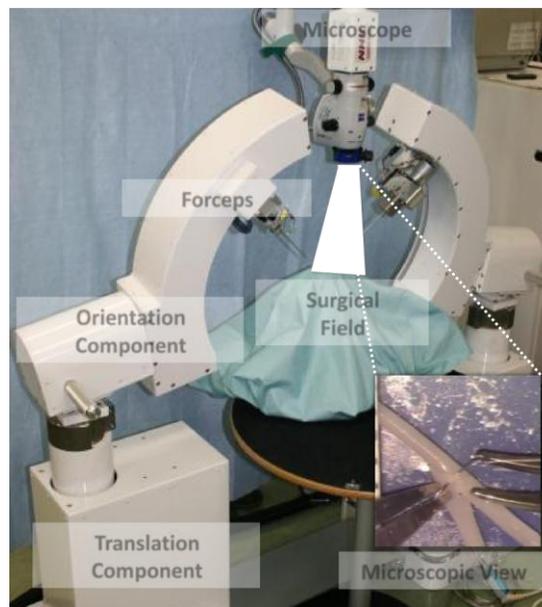


Figura 6 - Manipuladores (adaptado com autorização da revista).⁽²⁶⁾

O segmento do efector final que contacta com o campo operatório é uma pinça com um cabo de 130 mm de comprimento e 3,5 mm de diâmetro. Ainda só foi desenvolvida uma pinça curva e uma recta, embora os autores tenham intenção de desenvolver outros instrumentos.⁽²⁶⁾ Cada manipulador apresenta, portanto, 7 DOF, os 6 apresentados anteriormente, acrescentando a capacidade de agarrar da pinça.

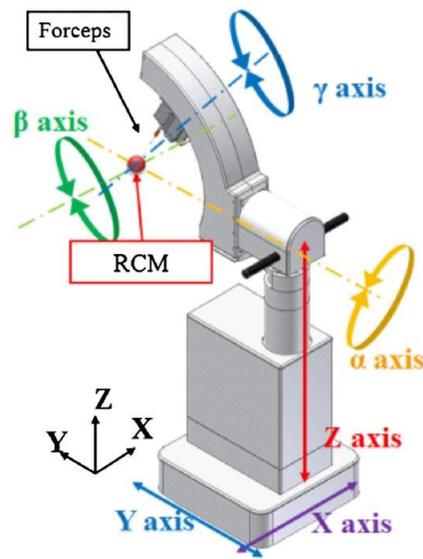


Figura 7 - Graus de liberdade do manipulador e RCM (adaptado com autorização da revista).⁽²⁶⁾

Os controladores bimanuais foram criados com o objectivo de se assemelharem e de serem utilizados como um par de pinças pelo operador. Têm também 7 DOF, e são suspensos por uma estrutura que permite o reconhecimento dos movimentos de translação e de orientação incutidos pelo cirurgião. Um pequeno motor permite que exista uma resistência que simula a abertura da pinça, e um sensor detecta esta acção (Figura 8).⁽²⁶⁾

Como o cirurgião está distanciado do campo operatório, é necessário que lhe seja transmitida uma imagem. Assim, é utilizado um microscópio equipado com uma câmara de vídeo estereoscópica de alta definição, que permite ao cirurgião uma visão tridimensional através de um ecrã.⁽²⁶⁾

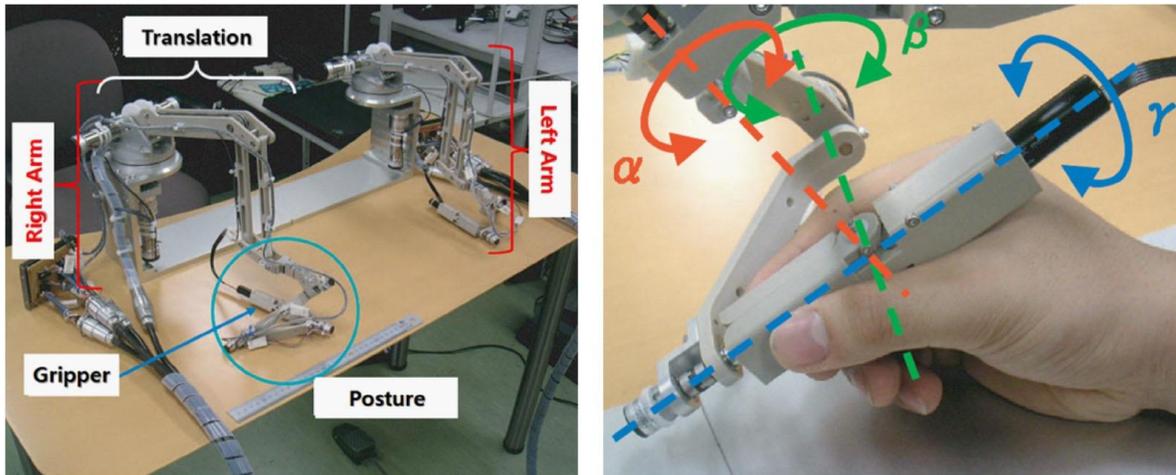


Figura 8 - Controladores bimanuais. À esquerda: vista geral. À direita: detalhe (adaptado com autorização da revista).⁽²⁶⁾

O desempenho do sistema foi testado através da anastomose término-terminal de um microvaso artificial com 0,3 mm de diâmetro (Figura 9) e de uma anastomose látero-terminal de um outro vaso com 0,5 mm de diâmetro. Ambas as experiências foram bem sucedidas, demonstrando a precisão e destreza do sistema. No entanto, o tempo de tarefa foi muito superior ao realizado manualmente.⁽²⁶⁾

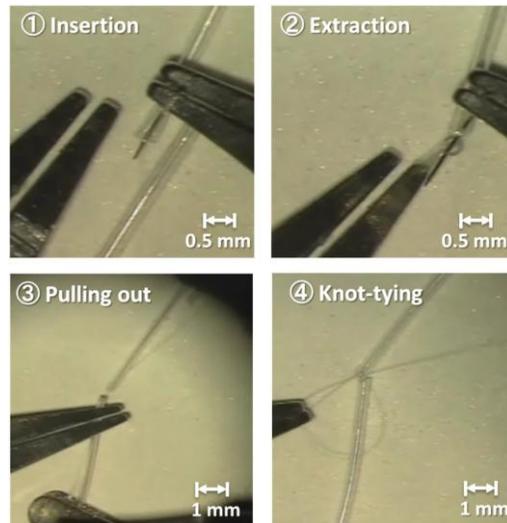


Figura 9 - Anastomose término-terminal de de microvasos artificiais com 0.3 mm de diâmetro (adaptado com autorização da revista).⁽²⁶⁾

neuroArm

O neuroArm (Universidade de Calgary, Alberta, Canadá) é um sistema passivo controlado à distância, que foi desenvolvido com o objectivo de possibilitar a aquisição de imagens de ressonância magnética em tempo real, assim como proporcionar ao cirurgião o máximo de informação sensorial possível.⁽²⁵⁾ Este sistema é capaz de realizar quer tarefas microcirúrgicas, quer estereotáxicas,^(25, 28) e foi desenhado de forma a poder ser assistido por um ajudante, tal como habitualmente acontece em cirurgia convencional (Figura 10).⁽²⁵⁾



Figura 10 - O neuroArm a operar em conjunto com um assistente (adaptado com autorização do autor e da revista).⁽²⁵⁾

Os manipuladores consistem em dois braços robotizados com 7 DOF que têm a capacidade de utilizar instrumentos especificamente desenhados para o neuroArm, assim como outros já existentes (Figura 11).^(25, 29) O cirurgião controla o sistema através de uma consola, que inclui vários monitores: com transmissão de imagens tridimensionais do campo operatório, transmissão de imagens de iMRI, e da posição dos manipuladores; assim como os controlos do sistema (Figura 12).^(25, 29) Os controlos manuais permitem o comando dos movimentos dos manipuladores, assim como a transmissão de *feedback* cinestético ao cirurgião.^(25, 29) Estes controlos têm a capacidade de transmitir informação posicional translacional e rotacional.^(25, 29)

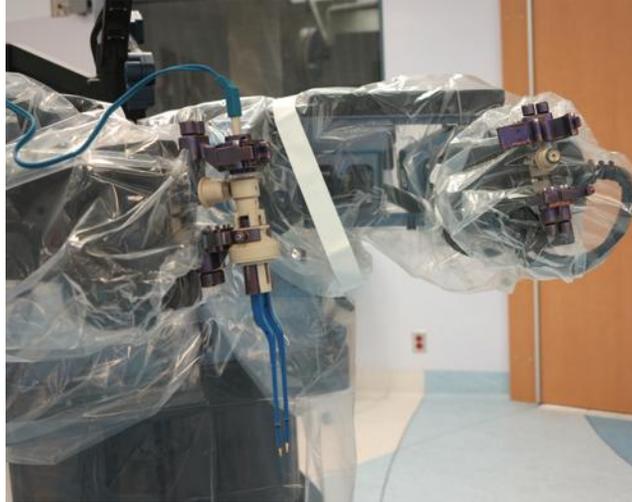


Figura 11 - Detalhe dos manipuladores, com pinça bipolar como efector final montada no manipulador direito (adaptado com autorização do autor e da revista).⁽²⁹⁾

Cada braço robotizado tem dois sensores cinestéticos que possibilitam a avaliação da força de interação entre o instrumento cirúrgico e o meio circundante. Esta força é subsequentemente replicada pelos controlos hápticos, transmitindo assim esta sensação ao cirurgião.⁽²⁵⁾

A segurança do doente é assegurada por numerosos sensores e avaliações automáticas de *software*,^(25, 28) que impedem movimentos inadvertidos e acções em áreas “proibidas”. Estas podem ser definidas previamente pelo cirurgião, de forma a que zonas e estruturas sensíveis nas imediações do campo operatório não possam ser lesadas durante o procedimento, quer por eventuais movimentos inapropriados do sistema que pudessem ter ultrapassado outros níveis de segurança, quer por acções inadvertidas do cirurgião que pudessem atingir estas áreas sensíveis.⁽²⁵⁾



Figura 12 – A imagem principal mostra a consola relativamente à sala de operações. A imagem da direita mostra os manipuladores a operar em conjunto com o cirurgião assistente (adaptado com autorização do autor e da revista).⁽²⁹⁾

Num estudo pré-clínico em ratos foi comparado o desempenho do neuroArm com a técnica convencional.⁽²⁸⁾ Dois neurocirurgiões especialistas realizaram cada um esplenectomia, nefrectomia bilateral e timectomia em 4 ratos com e sem o neuroArm. Como controlo de eventual viés, dois internos de neurocirurgia executaram o mesmo procedimento com técnica convencional apenas, para comparação com os resultados da técnica convencional dos especialistas.⁽²⁸⁾ Foram avaliados o tempo operatório, perdas sanguíneas, incidência de lesões térmicas e vasculares, e morte por erro cirúrgico.⁽²⁸⁾ Os cirurgiões foram significativamente mais rápidos por técnica convencional do que por técnica robótica (814 ± 54 s vs. 1047 ± 69 s; $p = 0,019$), enquanto que as perdas sanguíneas foram equivalentes ($1,43$ g [intervalo interquartil 0,45 - 2,72 g] vs. $0,525 \pm 0,16$ g; $p = 0,092$).⁽²⁸⁾ Na comparação entre os resultados por técnica convencional dos especialistas com os controlos (internos), estes últimos realizaram a tarefa num

intervalo de tempo significativamente mais curto (591 ± 50 s; $p = 0,009$). As perdas de sangue foram mais uma vez semelhantes (1,1 g [intervalo interquartil 0,37 - 1,82 g]; $p = 0,401$). No entanto, no grupo de controlo houve uma morte causada por lesão vascular.⁽²⁸⁾ Com estes resultados de controlo, os autores consideraram que não houve viés em favor do neuroArm pela parte dos especialistas.⁽²⁸⁾ As variáveis em estudo foram contabilizadas numa fórmula de desempenho⁽²⁸⁾ expressa em unidade de tempo. Comparando a pontuação de desempenho entre o grupo do neuroArm com o da técnica convencional, encontrou-se resultados equivalentes (1110 ± 82 s vs. 1075 ± 136 s). Na comparação deste último grupo com o grupo de controlo, obteve-se o mesmo resultado (1075 ± 136 s vs. 781 s [intervalo interquartil 665 - 878 s]; $p = 0,141$).⁽²⁸⁾

A precisão de localização do sistema de navegação do neuroArm foi comparada à de um sistema de navegação *frameless* correntemente utilizado, o VectorVision Sky Navigation System (BrainLAB), em dois cadáveres, com a avaliação do erro de localização de 4 alvos profundos.⁽²⁸⁾ Os erros de localização do neuroArm e do VectorVision foram de $4,35 \pm 1,68$ mm e $10,4 \pm 2,79$ mm, respectivamente. Apesar de aparentemente o neuroArm ter sido mais preciso na detecção dos alvos, isto não foi estatisticamente significativo ($p = 0,104$).⁽²⁸⁾

Subsequentemente, o neuroArm foi introduzido gradualmente na prática cirúrgica ao longo de 5 casos, o que provou ser útil para encontrar e resolver problemas menores que não tinham sido previstos, sem que houvesse risco para o doente, assim como familiarizar a equipa cirúrgica com o sistema.^(28, 29) Um destes problemas foi devido a uma falha mecânica de um motor durante um procedimento, que ao ocorrer, levou a um movimento inapropriado do manipulador. Isto activou o sistema de segurança que desligou de imediato a fonte de energia do manipulador em causa,

sem que tivesse sido causada qualquer lesão. De certa forma, esta falha permitiu demonstrar que o sistema de segurança é fiável.⁽²⁸⁾ No entanto, em consequência disto, foi realizada uma revisão de segurança.⁽²⁹⁾ Entre outras alterações de segurança adicionadas, foi introduzido um pedal que funciona como activador do sistema, sendo que apenas é possível ocorrer movimento dos manipuladores quando o cirurgião pressiona o pedal.⁽²⁹⁾

Posteriormente, este estudo foi continuado ao longo de mais 30 casos clínicos com utilização progressiva do sistema, num conjunto variado de patologias, dando oportunidade ao cirurgião de ganhar experiência no controlo do sistema em situações diferentes, conferindo-lhe mais confiança para utilizar o neuroArm cada vez mais extensivamente.⁽²⁹⁾ A conversão para cirurgia convencional foi necessária apenas num caso, por precaução, devido ao corredor cirúrgico ser demasiado estreito para que fosse possível que o sistema e o cirurgião assistente pudessem trabalhar em simultâneo.⁽²⁹⁾ No total dos 35 casos, o tempo médio no bloco operatório foi de cerca de 7 horas. O tempo de preparação, com aquisição de imagem, planeamento cirúrgico e registo intraoperatório, representou aproximadamente 2 horas do tempo total. O tempo desde a primeira incisão até ao encerramento foi de cerca de 4,5 horas, sendo o tempo de utilização médio do sistema de uma hora, o que tem relação com a introdução gradual na actividade cirúrgica. A preparação do sistema com colocação de protecções e instrumentos estéreis foi simples e demorou menos de 10 minutos, não tendo ocorrido nenhum episódio de infecção. A única complicação foi uma parésia transitória do nervo facial e o tempo médio de internamento foi de 3 dias.⁽²⁹⁾ A pontuação na escala de Karnofsky foi também avaliada no pré e pós-operatório, assim como às 12 semanas depois da intervenção cirúrgica. Os valores no pós-

operatório e às 12 semanas foram significativamente superiores do ponto de vista estatístico, do que no pré-operatório.⁽²⁹⁾

Apesar de o neuroArm ser capaz de realizar cirurgia estereotáxica, isto não foi testado em nenhum destes casos, devido aos manipuladores serem demasiado grandes para ambos operarem simultaneamente dentro do aparelho de ressonância magnética, uma questão que, os autores referem, irá ser ultrapassada no próximo modelo, cujos manipuladores serão 25% mais pequenos, entre outras modificações.⁽²⁹⁾

Tabela 2 - Resumo dos sistemas utilizados em microcirurgia, com designação do tipo de sistema, e aplicações, vantagens e limitações de cada um. (CE – cirurgia estereotáxica; elev – elevado; lig – ligeiro; peq – pequeno; TO – tempo operatório; VT – volume de trabalho)

Sistemas	Tipo	Aplicações	Vantagens	Limitações
NeuRobot	Passivo	Microcirurgia, ressecção tumoral, neuroendoscopia	Precisão, destreza, múltiplos instrumentos, tamanho reduzido	Tubo rígido, diâmetro lig elev, peq VT, falta de <i>feedback</i> sensorial, custo
				Poucos instrumentos desenvolvidos, peq VT, poucas funções demonstradas, TO elev, falta de <i>feedback</i> sensorial, custo
S. Mitsubishi et al.	Passivo	Microcirurgia, anastomose vascular	Precisão, destreza, controlos intuitivos	

neuroArm	Passivo	Microcirurgia,	Precisão, destreza,	
		ressecção tumoral,	controlos intuitivos,	TO elev, CE não
		CE	<i>feedback</i> cinestético,	demonstrada, dimensões
			compatível com iMRI,	consideráveis, custo
			segurança comprovada,	
			assistido por cirurgião	

Cirurgia Raquidiana

A principal área de desenvolvimento da robótica na cirurgia raquidiana é no aperfeiçoamento da cirurgia minimamente invasiva, nomeadamente na colocação de parafusos pediculares e translaminares de forma precisa. As técnicas minimamente invasivas convencionais já trouxeram benefício em termos de diminuição de perdas sanguíneas, infecção, estadia no hospital, custos, e de melhoria na recuperação pós-operatória e na precisão. No entanto, esta última é ainda afectada por alguns parâmetros como a qualidade do registo intraoperatório, da câmara de infravermelhos que detecta os marcadores posicionais, os movimentos livres da mão do cirurgião, e a possibilidade de movimento do doente, o que pode alterar o registo, causando falhas que podem ser grosseiras. Esta falta de fiabilidade tem limitado o uso de técnicas minimamente invasivas. Na tentativa de ultrapassar isto, foi desenvolvido um sistema robotizado, o SpineAssist, descrito adiante.⁽³⁰⁻³²⁾

SpineAssist

O SpineAssist (MAZOR Surgical Technologies, Ltd., Caesarea, Israel) é um sistema do tipo semi-activo, em que o manipulador posiciona instrumentos cirúrgicos em cirurgia raquidiana.⁽²⁷⁻

²⁹⁾ Foi desenvolvido com o objectivo de assistir na colocação de parafusos pediculares e translaminares por via percutânea de forma precisa.⁽³¹⁾

O manipulador tem uma forma cilíndrica, com 80 mm de altura, 50 mm de diâmetro e 250 g de peso.⁽³⁰⁻³²⁾ A este cilindro central liga-se um de três tipos de braços metálicos, de acordo com a posição do alvo, que contêm um suporte para uma cânula guia de instrumentos cirúrgicos. O manipulador tem 6 DOF.⁽³⁰⁻³²⁾ A consola do SpineAssist inclui *software* especialmente criado para este sistema, que permite o registo do sistema, auxilia o planeamento pré-operatório ao facilitar a determinação da melhor trajectória, e controla o SpineAssist.⁽³⁰⁻³²⁾

O SpineAssist pode ser fixado ao doente através dois métodos.^(31, 32) Um deles utiliza um grampo para se fixar a um processo espinhoso próximo do nível a ser intervencionado, o que requer apenas uma pequena incisão. O grampo liga-se a uma pequena armação que permite a montagem do SpineAssist numa de três posições, o que possibilita o acesso às vértebras adjacentes. O outro método é o *Hover-T frame*, que é fixado por um fio de Kirschner a um processo espinhoso e por 2 cravos de Steinmann às espinhas ilíacas póstero-superiores. A estes monta-se uma armação maior com 19 posições ao longo do seu eixo longitudinal sobre a qual se monta o SpineAssist ou acrescentos perpendiculares à armação para permitir acessos mais oblíquos (Figura 13). Este método habitualmente também não requer fluoroscopia.⁽³¹⁾

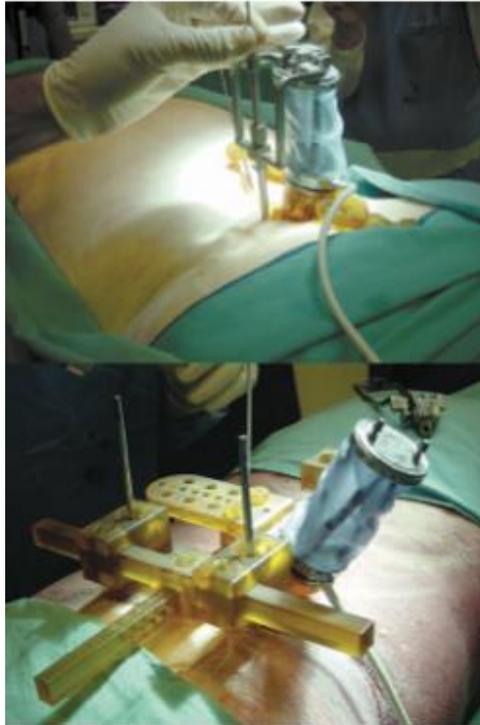


Figura 13 - Em cima: Colocação de parafuso pedicular, utilizando a fixação com *clamp*. Implantação de parafuso translaminar, com Hover-T *frame* (adaptado com autorização da revista).⁽³²⁾

Para o planeamento pré-operatório é necessária a aquisição de imagens de CT, que são importadas para o *software* do SpineAssist, onde é possível utilizar as imagens de reconstrução tridimensional para planear os pontos de entrada e trajectória óptimos, com possibilidade de escolher quais as dimensões mais adequadas dos parafusos e visualizar de forma facilitada a sua localização final em várias perspectivas.⁽³¹⁾ O registo intraoperatório é feito através de fluoroscopia, com e sem dispositivos de marcação, sendo estas imagens automaticamente correlacionadas com as de CT pré-operatória pelo *software* do SpineAssist. O cirurgião apenas tem de confirmar que as imagens pré e intraoperatórias estão bem alinhadas.⁽³¹⁾ O *software* sugere, então, as combinações de posições, braço metálico e parafusos mais apropriados para o

procedimento, e o cirurgião selecciona os que pretende.^(31, 32) Não é necessário qualquer controlo adicional por fluoroscopia durante o resto do procedimento.^(31, 32)

Numa experiência em 6 cadáveres, foram colocados 4 parafusos e 32 fios de Kirschner pediculares^(31, 32). Um destes últimos soltou-se após a cirurgia e não foi avaliado. A posição e desvio relativamente ao plano pré-operatório foi avaliado por CT pós-operatória. Dos 32 fios de Kirschner, 28 e 4 parafusos foram colocados com um desvio máximo de 1,5 mm, excepto um com um desvio lateral de 1,7 mm. Neste grupo, o desvio médio foi de $0,87 \pm 0,63$ mm.⁽³²⁾ Considerando apenas os 4 parafusos, o desvio médio foi de $1,03 \pm 0,59$ mm. Neste grupo foram também colocadas barras de fixação posterior, com um tempo total de procedimento de 30 minutos.^(31, 32) Os restantes 3 fios de Kirschner foram colocados todos com um desvio maior do que 4 mm.⁽³²⁾ Foi também realizada uma experiência em 4 cadáveres em que foi estudada a precisão da colocação de 19 fios de Kirschner translaminares.⁽³²⁾ Destes, um quebrou-se e outro dobrou-se durante a sua colocação. Noutra situação, houve ainda uma colisão com um fio de Kirschner já colocado contralateralmente no mesmo nível, o que resultou num desvio inferior de 6,5 mm no plano anteroposterior. Os restantes 16 foram inseridos com um desvio máximo de 1,5 mm, sendo o desvio médio de $0,82 \pm 0,65$ mm.⁽³²⁾

Lieberman et al. realizaram um estudo em 12 cadáveres, com o objectivo de avaliar a precisão do SpineAssist na colocação de parafusos pediculares, a exposição dos cirurgiões a radiação e o tempo de procedimento.⁽³⁰⁾ Foi criado um grupo de estudo e um de controlo. O grupo de estudo incluiu 15 cirurgiões que utilizaram o SpineAssist para a implantação percutânea de 197 parafusos em 10 cadáveres. O grupo de controlo incluiu 2 cirurgiões, com a colocação de 27

parafusos por via percutânea convencional em 2 cadáveres, com controlo fluoroscópico, e de 10 parafusos por via aberta num dos cadáveres, sem controlo radiológico.⁽³⁰⁾ A precisão foi determinada através da medição por CT pós-operatória, do desvio dos parafusos relativamente ao plano pré-operatório. 23 implantes foram excluídos da análise, visto que 9 destes tinham um diâmetro maior do que o pedículo, 8 foram colocados em pedículos hipoplásicos, e 6 por planeamento pré-operatório incorrecto.⁽³⁰⁾ O desvio médio no grupo de estudo foi de $1,1 \pm 0,4$ mm, enquanto que no grupo de controlo foi $2,6 \pm 0,7$ mm ($p < 0,0001$). Segundo os dados obtidos, isto representa uma precisão e consistência 58% e 43% maiores, respectivamente.⁽³⁰⁾

A radiação média por parafuso a que cada cirurgião foi exposto foi de 0,2 mrem ($2 \mu\text{Sv}$) no grupo de estudo, enquanto que no grupo de controlo foi de 10,1 mrem ($101 \mu\text{Sv}$) ($p < 0,001$), uma redução de 98,2% de exposição a radiação ionizante no grupo de estudo.⁽³⁰⁾ Isto está relacionado com o tempo de fluoroscopia por parafuso, que foi de 0,7 s no grupo de estudo e de 33 s no grupo de controlo, cuja diferença, no entanto, não é considerada estatisticamente significativa ($p = 0,063$).⁽³⁰⁾

O tempo operatório médio foi de 1,23 horas no grupo de estudo e de 1,98 horas no grupo de controlo. O tempo médio por parafuso foi de $4,05 \pm 1,08$ minutos vs $6,27 \pm 3,05$ minutos, nos grupos de estudo e controlo respectivamente. Esta diferença também não foi estatisticamente significativa ($p = 0,192$). Um cirurgião experiente com o uso do SpineAssist realizou o procedimento em 0,82 horas, com uma média de 2,75 minutos por parafuso.^(23, 30)

Tabela 3 - Resumo do SpineAssist, com designação do tipo de sistema, aplicações, vantagens e limitações.

Sistema	Tipo	Aplicações	Vantagens	Limitações
SpineAssist	Semi-activo	Inserção de parafusos pediculares e translaminares	Precisão, tamanho reduzido, pouco invasivo, menos radiação, menor tempo operatório	Poucas funcionalidades, custo elevado

Radiocirurgia

Apesar de ser uma técnica de radioterapia, a estreita relação entre a radiocirurgia cerebral e raquidiana e a neurocirurgia, torna relevante a inclusão desta área de aplicação da robótica neste trabalho.

CyberKnife

O CyberKnife (Accuray Incorporated, Sunnyvale, CA, EUA) foi criado nos anos 90 como uma alternativa *frameless* aos sistemas de radiocirurgia estereotáxica como o Gamma Knife e aceleradores lineares (LINACs) convencionais, que utilizam *frames* e colimadores estereotáxicos.⁽³³⁾ A versão actual, CyberKnife VSI System (Figura 14), é um sistema robotizado do tipo activo, utilizado a nível mundial no tratamento de lesões cerebrais (tumores, malformações arteriovenosas, nevralgia do trigémio), raquidianas, pulmonares, prostáticas, hepáticas, da cabeça e pescoço, entre outras.⁽³³⁾

O *hardware* executor inclui quatro partes principais. O manipulador, que posiciona um LINAC (efector final), um sistema de imagem por radiografia, e um sistema óptico de medição de movimento.⁽³³⁾ O manipulador é um braço robotizado com 6 DOFs, com uma precisão de movimentos de 0,12 mm, o que lhe permite uma grande flexibilidade e precisão no posicionamento do LINAC. Assim, o sistema pode alinhar o LINAC com o alvo, em vez de posicionar o alvo em linha com o LINAC.⁽³³⁾ Este tem capacidade de emitir uma dose de 1000cGy por minuto. Pode ser utilizado um de doze colimadores circulares com diâmetros que variam de 0,5 a 6 cm, que podem ser trocados manualmente ou de forma automática. Existe também um colimador que permite variar a abertura com tamanhos semelhantes aos anteriores, eliminando a necessidade de trocar de colimador durante o procedimento.⁽³³⁾

O sistema de imagem inclui duas fontes de raios-X posicionados no tecto, com detectores localizados no chão. Estes raios são emitidos a uma inclinação de 45° relativamente aos detectores respectivos, sendo todas as posições fixas e conhecidas, com calibração adequada.⁽³³⁾ Existem ainda três câmaras que detectam marcadores ópticos colocados no doente, permitindo a medição e controlo de eventuais movimentos.⁽³³⁾



Figura 14 - CyberKnife em 2010 (adaptado com autorização (The CyberKnife Robotic Radiosurgery System in 2010. Technology in cancer research & treatment, Volume 9, 433-52, 2010, Adenine Press; www.tcrt.org)).⁽³³⁾

O planeamento exige a obtenção de imagens tridimensionais (por exemplo, CT ou MRI) para a visualização do alvo e de eventuais órgãos em risco (isto é, tecidos que se pretende proteger de lesão radiológica iatrogénica). A partir daqui, é criado um modelo tridimensional do doente, com o qual se planeiam os vectores que representam a posição dos raios durante o tratamento. Com este sistema existe a vantagem de os raios não precisarem de ser coplanares nem isocêntricos, o que aumenta a flexibilidade na sua direcção e, conseqüentemente, na sua segurança para tecidos sensíveis.⁽³³⁾

O registo antes do início do procedimento é feito de forma automática, através do registo das imagens tridimensionais utilizadas durante o planeamento, com imagens obtidas no momento pelo sistema de imagem por radiografia instalado na sala de tratamento. Como a posição da mesa de tratamento é ajustável automaticamente de acordo com a informação de registo de imagem, a posição do doente pode também ser optimizada.⁽³³⁾

Durante o tratamento, o manipulador move e orienta o LINAC à volta do doente, seguindo uma trajectória optimizada, irradiando os alvos de acordo com o plano. São obtidas imagens para controlo e correcção posicionais habitualmente a cada 30 a 60 segundos.⁽³³⁾

Num estudo, o CyberKnife foi utilizado no tratamento de 333 doentes, com um total de 783 metástases cerebrais de origem variada, entre Agosto de 2005 e Outubro de 2008.⁽³⁴⁾ No final do estudo, 55% dos doentes tinha falecido, com taxas de sobrevivência de 69,4%, 50,2%, 36,3% e 27,7 % a 6, 12, 18 e 24 meses, respectivamente. A sobrevida mediana foi de 12,2 meses. A resposta ao tratamento, em termos de controlo local, e nos mesmos intervalos de tempo, foi de

98%, 95,2%, 92,1% e 86%, respectivamente, com recorrência local em apenas 25 casos. O controlo à distância foi de 78%, 64.7%, 55.9% e 52%, respectivamente.⁽³⁴⁾ Houve uma correlação estatisticamente significativa entre a sobrevivência de doentes com uma pontuação da escala de Karnofsky > 70 prévio à intervenção, e a dos doentes com pontuação < 70, sendo que os indivíduos com doença sistémica controlada e sem metástases extracranianas tiveram uma sobrevida mediana de 15,7 meses.⁽³⁴⁾

Relativamente a complicações, houve agravamento de sintomas prévios em 8 doentes, e 13 doentes desenvolveram cefaleia ou crises convulsivas. Surgiram lesões imagiológicas por radiação (edema) em 40 doentes, sem tradução clínica. Nenhum doente faleceu por complicações devidas ao tratamento. Durante o estudo, foram feitos 41 testes de precisão periódicos com um modelo. A precisão média do sistema foi de $0,48 \pm 0,22$ mm.⁽³⁴⁾

Um grupo fez uma comparação dosimétrica de dois sistemas de radiocirurgia, BrainLAB (acelerador linear isocêntrico) e CyberKnife.⁽³⁵⁾ O estudo incluiu 7 doentes com schwannoma do acústico unilateral com um volume máximo de $2,5 \text{ cm}^3$, com hipoacusia parcial. Foi realizado o planeamento do procedimento para os dois sistemas e as comparações foram feitas com os valores calculados no planeamento.

Foram comparados o índice de conformidade, a dose máxima para o tronco cerebral, os volumes para 2,5 Gy, 5 Gy e 10 Gy, dose média para a cóclea e dose média para o lobo temporal mesial.⁽³⁵⁾ Houve diferença estatisticamente significativa no volume de alta dose (10Gy) ($5,2 \text{ cm}^3$ vs $3,2 \text{ cm}^3$; $p = 0,017$; BrainLAB vs CyberKnife) e na dose média coclear (6,9 Gy vs 5,4 Gy; $p =$

0,001, respectivamente), tendo o valor da dose média temporal mesial sido de 2,6 Gy vs 1,7 Gy; $p = 0,07$, respectivamente. Não houve diferença estatisticamente significativa entre os índices de conformidade (0,53 vs 0,58, $p = 0,225$; BrainLAB e CyberKnife, respectivamente), nem para nenhum dos outros valores.⁽³⁵⁾

Tabela 4 - Resumo do CyberKnife, com designação do tipo de sistema, aplicações, vantagens e limitações.

Sistema	Tipo	Aplicações	Vantagens	Limitações
CyberKnife	Activo	Radiocirurgia	Precisão elevada, menor lesão de órgãos em risco, registo automático, <i>frameless</i>	Limitado a radiocirurgia, custo elevado

Discussão e Conclusão

Ao longo deste artigo foi apresentado um conjunto de sistemas utilizados em várias modalidades da área neurocirúrgica. No entanto, esta revisão não é, de todo, exaustiva, representando apenas uma parte dos sistemas actualmente em desenvolvimento. Permite, apesar disso, obter uma ideia geral do tipo de funcionamento, componentes, aplicações, vantagens e limitações dos sistemas robotizados neurocirúrgicos actuais.

De acordo com as descrições detalhadas dos vários sistemas, quer pelas características mecânicas que apresentam, quer pelo objectivo da criação dos sistemas, podemos constatar que o principal propósito da tecnologia robótica aplicada à cirurgia não é substituir o cirurgião na sala de operações, mas sim aproveitar as melhores características do homem e da máquina, e criar um

sinergismo que possa melhorar o desempenho do cirurgião, e conseqüentemente, um *outcome* mais favorável para o doente.

Os sistemas do tipo activo (Tabela 4), como o CyberKnife, são autónomos na realização das suas tarefas, sob supervisão, e seguem um plano de actuação de forma exacta. Isto é ideal para a radiocirurgia, onde não há contacto directo com o doente, e portanto não suscita tantas questões de segurança. Aproveita as vantagens da automação, relativamente à sua capacidade de executar trajectórias complexas à volta do doente, permitindo alinhar a fonte de radiação de forma extremamente precisa em vários pontos, o que vai levar a uma irradiação óptima do alvo, causando o mínimo de lesão possível a estruturas sensíveis. O facto de não necessitar de um *frame* é um importante avanço em termos de comodidade para o doente, sem prejuízo da qualidade do tratamento. Para além disto, o registo automático diminui a probabilidade de erro humano no processo, melhorando a fiabilidade do sistema.

Apesar de toda esta especificidade de funções simplificar o sistema e permitir que realize as suas tarefas de forma altamente especializada, não deixa de ser um pouco limitante o facto de ter sido desenhado para apenas realizar procedimentos radiocirúrgicos. Os estudos parecem ser favoráveis ao CyberKnife relativamente a outros sistemas de radiocirurgia quanto à dose radiológica aplicada a órgãos em risco, e a sua eficácia terapêutica parece ser pelo menos equivalente. É importante ter em consideração a relação custo/benefício no momento de escolher entre radiocirurgia robótica ou não-robótica, já que o CyberKnife, tal como todos os sistemas robotizados, representa um investimento inicial considerável.

No caso dos sistemas semi-activos (Tabelas 1 e 3), utilizados em cirurgia estereotáxica e raquidiana, o princípio de posicionamento e alinhamento preciso de instrumentos cirúrgicos é semelhante ao dos sistemas activos, sendo que, por outro lado, a utilização propriamente dita dos instrumentos é feita pelo cirurgião, havendo aqui uma partilha de funções. Em cirurgia estereotáxica, os sistemas robotizados são principalmente utilizados para biópsia, DBS e SEEG, sendo que o SurgiScope já foi usado na inserção de catéteres ventriculares, para além da sua função alternativa de microscópio cirúrgico robotizado. Esta última característica torna-o num sistema versátil, podendo ser usado noutras cirurgias, onde à partida não estaria indicado. Tal como o CyberKnife, estes sistemas não requerem *frame*, e portanto não são tão desconfortáveis para o doente, e permitem um tempo mais alargado para o planeamento pré-operatório, entre a aquisição de imagens e o procedimento. A precisão destes sistemas é comparável à de métodos com *frame* convencionais, sendo que alguns estudos sugerem que o PathFinder possa ser superior.

O SpineAssist tem um modo de funcionamento relativamente semelhante ao dos sistemas de cirurgia estereotáxica, na medida em que também posiciona e alinha instrumentos com precisão. A sua aplicação actual é na inserção de parafusos pediculares e translaminares de modo minimamente invasivo. Este é um dos poucos sistemas em que os estudos aparentemente revelam uma redução do tempo operatório, relativamente à cirurgia convencional. Para além disso, tem um tamanho reduzido, o que é útil, ao reduzir o impacto sobre a organização e disposição da sala e da equipa. Segundo os estudos apresentados, a precisão foi significativamente superior à dos métodos convencionais, assim como foi significativa a redução da dose de radiação pelo controlo fluoroscópico.

Apresentando esta precisão submilimétrica, estes sistemas estão altamente especializados em procedimentos do tipo estereotáxico, não sendo capazes de executar outro tipo de tarefas que requeiram algum grau de destreza. Isto torna a sua utilidade mais restrita. Enquanto que o NeuroMate e o SurgiScope já têm alguma experiência com outras aplicações, o PathFinder apenas foi testado para biópsia estereotáxica, não tendo sido ainda demonstrado noutros procedimentos. Mais uma vez, o custo poderá ser determinante na escolha entre sistemas robotizados e métodos mais convencionais até que as vantagens demonstrem ser significativas para o doente.

Os sistemas controlados à distância, a partir de uma consola com controladores manuais e monitores que transmitem informação sensorial ao cirurgião que opera afastado do campo operatório, são considerados passivos (Tabela 2). Estes são os sistemas que contactam de forma mais próxima com o doente, manipulando directamente os tecidos. Por esta razão, todos os seus movimentos são controlados pelo cirurgião, em vez de serem automatizados, e incluem sistemas de segurança altamente complexos. Assim, as principais aplicações são na área da microcirurgia, como a ressecção tumoral, a neuroendoscopia no caso do NeuRobot e a anastomose vascular no caso do sistema de Mitsubishi e colaboradores. Está previsto ainda que o neuroArm venha a ser capaz de realizar procedimentos estereotáxicos, o que seria importante em termos de versatilidade. As principais características deste grupo de sistemas que lhes permite este tipo de aplicações são a sua destreza de movimentos, a precisão inerente a sistemas robotizados, e a capacidade de manusear múltiplos tipos de instrumentos microcirúrgicos já existentes (no caso do neuroArm) ou desenhados especificamente para o sistema. Na ausência de instrumentos dedicados isto pode, no entanto, ser uma limitação. O tamanho reduzido do manipulador do

NeuRobot torna-o particularmente útil para procedimentos neuroendoscópicos. No entanto, num dos estudos apresentados, constatou-se que mesmo com as dimensões actuais, existe a possibilidade de lesões causadas pela passagem dos instrumentos. A pequena dimensão, aliada à rigidez do tubo do manipulador, apesar da destreza dos micromanipuladores, pode ainda restringir um pouco o volume de trabalho.

Estes sistemas, ao serem capazes de executar micromovimentos, ao diminuírem à escala o *input* do cirurgião, acabam por alongar substancialmente os tempos operatórios. Uma outra desvantagem tem a ver com as dimensões que ocupam junto ao doente, dificultando a presença de um assistente nas imediações do campo operatório. Isto não se verifica com o neuroArm, que foi desenhado com o intuito de ser assistido por um interno. O distanciamento do cirurgião relativamente ao campo operatório é também um problema, já que lhe retira sensações que lhe transmitem informação importante durante o procedimento e com as quais aprendeu a trabalhar. A informação visual mantém-se através de monitores de imagem tridimensional, mas outros sentidos como o tacto, ainda estão em falta na maioria dos casos. O neuroArm inclui já algum *feedback* cinestético transmitido aos controladores, no entanto é importante desenvolver a tecnologia háptica para que estes sistemas possam ser mais intuitivos e bem sucedidos. Em termos de informação visual, o neuroArm tem uma outra vantagem. É compatível com iMRI, pelo que é possível obter imagens intraoperatórias que o cirurgião tem ao seu dispor nos monitores da consola. Como seria de esperar, toda esta tecnologia tem um custo extremamente elevado.

O benefício para o doente em termos de *outcome*, deve ser sempre a primeira prioridade no desenvolvimento de novas tecnologias na área da medicina. Os estudos sugerem que o desempenho destes sistemas é, geralmente, comparável ao das técnicas convencionais. Assim, são necessários ainda mais estudos e de maior dimensão no sentido de perceber qual é o grau de benefício que a tecnologia robótica poderá trazer, a despeito do custo, em particular na neurocirurgia. Será particularmente importante a comparação directa em estudos controlados e aleatorizados entre casos tratados pelo *gold standard* actual e cirurgia robótica. Poder-se-á assim comparar directamente as relações custo/benefício e avaliar, com base na evidência, o verdadeiro impacto, grande ou pequeno, da robótica na neurocirurgia.

Existe ainda a possibilidade de utilizar as consolas para treino, já que eventualmente será possível gravar o que acontece durante a cirurgia, e assim recriar o mesmo ambiente numa realidade virtual. Isto é muito importante para o cirurgião ganhar experiência em certos casos e técnicas, sendo particularmente útil para os internos. Com a evolução da háptica, será possível, por exemplo, o interno aprender qual a força mais adequada a aplicar em determinada situação, obtendo *feedback* educativo através da consola, podendo assim aproveitar esta experiência na prática cirúrgica.⁽²⁵⁾ O potencial da simulação e realidade virtual na formação é considerável.

No entanto, a tecnologia deverá, e certamente irá, continuar a evoluir no sentido de corrigir erros e falhas, melhorar atributos recentes, como a tecnologia háptica, e aperfeiçoar e refinar a destreza e precisão que praticamente definem a razão de existência da robótica aplicada à cirurgia. Assim, é possível que esta tecnologia promissora deixe, a médio prazo, de ter apenas o potencial de revolucionar a neurocirurgia, para poder fazê-lo todos os dias no bloco operatório.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Doutor Marcos Barbosa pela orientação do trabalho, ao Dr. Ricardo Pereira pelas correcções, dicas e disponibilidade, e agradeço também a todos os outros que me apoiaram.

Referências

1. Davies B. A review of robotics in surgery. *Proc Inst Mech Eng H*. 2000;214(1):129-40.
2. Sekhar LN, Tariq F, Kim LJ, Pridgeon J, Hannaford B. Commentary: Virtual reality and robotics in neurosurgery. *Neurosurgery*. 2013 Jan;72 Suppl 1:1-6.
3. Ponnusamy K, Mohr C, Curet MJ. Clinical outcomes with robotic surgery. *Curr Probl Surg*. 2011 Sep;48(9):577-656.
4. Rosenow JM, Sootsman WK. Application accuracy of an electromagnetic field-based image guided navigation system. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2007;85(2-3):75-81.
5. Zamorano L, Li Q, Jain S, Kaur G. Robotics in neurosurgery: state of the art and future technological challenges. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS*. 2004;1(1):7-22.
6. Govindarajan A. Robot-Assisted Surgery : A Review. *University of Toronto Medical Journal*. 2001 Mar;78(2).
7. Alric M, Chapelle F, Lemaire JJ, Gogu G. Potential applications of medical and non-medical robots for neurosurgical applications. *Minimally invasive therapy & allied technologies : MITAT : official journal of the Society for Minimally Invasive Therapy*. 2009;18(4):193-216.
8. Eljamel MS. Robotic neurological surgery applications: accuracy and consistency or pure fantasy? *Stereotact Funct Neurosurg*. 2009;87(2):88-93.
9. McBeth PB, Louw DF, Rizun PR, Sutherland GR. Robotics in neurosurgery. *AM J Surg*. 2004 Oct;188(4A Suppl):68S-75S.
10. Varma TR, Eldridge P. Use of the NeuroMate stereotactic robot in a frameless mode for functional neurosurgery. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS*. 2006 Jun;2(2):107-13.
11. Xia T, Baird C, Jallo G, Hayes K, Nakajima N, Hata N, et al. An integrated system for planning, navigation and robotic assistance for skull base surgery. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS*. 2008;4(4):321-30.
12. Eljamel MS. Validation of the PathFinder neurosurgical robot using a phantom. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS*. 2007 Dec;3(4):372-7.

13. Lollis SS, Roberts DW. Robotic placement of a CNS ventricular reservoir for administration of chemotherapy. *British journal of neurosurgery*. 2009;23(5):516-20.
14. Bekelis K, Radwan TA, Desai A, Roberts DW. Frameless robotically targeted stereotactic brain biopsy: feasibility, diagnostic yield, and safety. *Journal of neurosurgery*. 2012;116(5):1002-6.
15. Haegelen C, Touzet G, Reyns N, Maurage CA, Ayachi M, Blond S. Stereotactic robot-guided biopsies of brain stem lesions: Experience with 15 cases. *Neuro-Chirurgie*. 2010;56(5):363-7.
16. Varma T, Eldridge P, Forster A, Fox S, Fletcher N, Steiger M, et al. Use of the NeuroMate stereotactic robot in a frameless mode for movement disorder surgery. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2003;80(1-4):132-5.
17. Abhinav K, Prakash S, Sandeman D. Use of robot-guided stereotactic placement of intracerebral electrodes for investigation of focal epilepsy: initial experience in the UK. *British journal of neurosurgery*. 2013 Oct;27(5):704-5.
18. Cardinale F, Miserocchi A, Moscato A, Cossu M, Castana L, Schiariti MP, et al. Talairach methodology in the multimodal imaging and robotics era. In: Scarabin J-M, editor. *Stereotaxy and Epilepsy Surgery*: John Libbey Eurotext. p. 245-72.
19. Brodie J, Eljamel S. Evaluation of a neurosurgical robotic system to make accurate burr holes. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS*. 2011 Mar;7(1):101-6.
20. Li QH, Zamorano L, Pandya A, Perez R, Gong J, Diaz F. The application accuracy of the NeuroMate robot-A quantitative comparison with frameless and frame-based surgical localization systems. *Computer aided surgery : official journal of the International Society for Computer Aided Surgery*. 2002;7(2):90-8.
21. Spire WJ, Jobst BC, Thadani VM, Williamson PD, Darcey TM, Roberts DW. Robotic image-guided depth electrode implantation in the evaluation of medically intractable epilepsy. *Neurosurgical focus*. 2008;25(3):E19.
22. Goto T, Hongo K, Kakizawa Y, Muraoka H, Miyairi Y, Tanaka Y, et al. Clinical application of robotic telemanipulation system in neurosurgery. Case report. *Journal of neurosurgery*. 2003;99(6):1082-4.
23. Hongo K, Kobayashi S, Kakizawa Y, Koyama J, Goto T, Okudera H, et al. NeuRobot: telecontrolled micromanipulator system for minimally invasive microneurosurgery-preliminary results. *Neurosurgery*. 2002;51(4):985-8; discussion 8.
24. Takasuna H, Goto T, Kakizawa Y, Miyahara T, Koyama J, Tanaka Y, et al. Use of a micromanipulator system (NeuRobot) in endoscopic neurosurgery. *J Clin Neurosci*. 2012 Nov;19(11):1553-7.

25. Sutherland GR, Wolfsberger S, Lama S, Zarei-nia K. The evolution of neuroArm. *Neurosurgery*. 2013;72 Suppl 1:27-32.
26. Mitsuishi M, Morita A, Sugita N, Sora S, Mochizuki R, Tanimoto K, et al. Master-slave robotic platform and its feasibility study for micro-neurosurgery. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS*. 2013;9(2):180-9.
27. Morita A, Sora S, Mitsuishi M, Warisawa S, Suruman K, Asai D, et al. Microsurgical robotic system for the deep surgical field: development of a prototype and feasibility studies in animal and cadaveric models. *Journal of neurosurgery*. 2005;103(2):320-7.
28. Pandya S, Motkoski JW, Serrano-Almeida C, Greer AD, Latour I, Sutherland GR. Advancing neurosurgery with image-guided robotics. *Journal of neurosurgery*. 2009;111(6):1141-9.
29. Sutherland GR, Lama S, Gan LS, Wolfsberger S, Zareinia K. Merging machines with microsurgery: clinical experience with neuroArm. *Journal of neurosurgery*. 2013;118(3):521-9.
30. Lieberman I, Hardenbrook M, Wang J, Guyer R. Assessment of pedicle screw placement accuracy, procedure time, and radiation exposure using a miniature robotic guidance system. *J Spinal Disord Tech*. 2012 Jul;25(5):241-8.
31. Lieberman IH, Togawa D, Kayanja MM, Reinhardt MK, Friedlander A, Knoller N, et al. Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement: Part I--Technical development and a test case result. *Neurosurgery*. 2006;59(3):641-50; discussion -50.
32. Togawa D, Kayanja MM, Reinhardt MK, Shoham M, Balter A, Friedlander A, et al. Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement: part 2--Evaluation of system accuracy. *Neurosurgery*. 2007;60(2 Suppl 1):ONS129-39; discussion ONS39.
33. Kilby W, Dooley JR, Kuduvalli G, Sayeh S, Maurer CR, Jr. The CyberKnife Robotic Radiosurgery System in 2010. *Technology in cancer research & treatment*. 2010;9(5):433-52.
34. Muacevic A, Kufeld M, Wowra B, Kreth FW, Tonn JC. Feasibility, safety, and outcome of frameless image-guided robotic radiosurgery for brain metastases. *Journal of neuro-oncology*. 2010;97(2):267-74.
35. Dutta D, Balaji Subramanian S, Murli V, Sudahar H, Gopalakrishna Kurup PG, Potharaju M. Dosimetric comparison of Linac-based (BrainLAB(R)) and robotic radiosurgery (CyberKnife (R)) stereotactic system plans for acoustic schwannoma. *Journal of neuro-oncology*. 2012;106(3):637-42.