



FACULDADE DE MEDICINA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA – TRABALHO FINAL

HORÁCIO DE MELO RODRIGUES

***A Cirurgia Robótica e a Navegação por Computador na
Artroplastia do Joelho – O Presente e o Futuro***

ARTIGO DE REVISÃO

ÁREA CIENTÍFICA DE ORTOPEDIA

Trabalho realizado sob a orientação de:
Professor Doutor Fernando Manuel Pereira da Fonseca
Mestre João Pedro Moreira de Oliveira

MARÇO / 2018

A cirurgia robótica e a navegação assistida por computador na artroplastia do joelho –

O presente e o futuro

Horácio de Melo Rodrigues¹, Fernando Manuel Pereira Fonseca^{1,2} e João Pedro Moreira de Oliveira^{1,2}

1- Faculdade de Medicina, Universidade de Coimbra, Portugal

2- Serviço de Ortopedia, Centro Hospitalar e Universitário de Coimbra, Portugal

Contactos

Morada: Pólo III da Universidade de Coimbra, Faculdade de Medicina, Azinhaga de Santa

Comba, Celas, 3000-548 Coimbra, Portugal.

Email: hrodrigues20@gmail.com

Índice

| | |
|---|----|
| Resumo..... | 3 |
| Abstract | 5 |
| Lista de Abreviaturas | 7 |
| Introdução..... | 8 |
| Metodologia | 12 |
| Resultados e Discussão | 13 |
| 1 – Cirurgia navegada por computador | 13 |
| 2 – Sistemas robóticos activos..... | 19 |
| 2.1 – ROBODOC | 19 |
| 2.2 – CASPAR..... | 21 |
| 3 – Sistemas robóticos semiativos | 22 |
| 3.1 – Navio surgical system | 22 |
| 3.2 – MAKO RIO | 23 |
| 3.3 - Acrobot | 24 |
| 4 – Sistemas robóticos passivos..... | 26 |
| 4.1 – iBlock..... | 26 |
| 5 - Navegação por computador VS Cirurgia robótica | 27 |
| 6 - Perspetivas futuras..... | 28 |
| Conclusão | 30 |
| Agradecimentos..... | 31 |
| Referências bibliográficas | 32 |

Resumo

Nas últimas 4 décadas de artroplastia do joelho, foram desenvolvidos substancialmente os materiais utilizados, o desenho e os sistemas de instrumentação, com o intuito de melhorar a consistência da técnica, o desempenho funcional e a longevidade da prótese. Contudo, apesar desta evolução, estudos publicados sugerem que 15% a 20% dos doentes estão insatisfeitos com a artroplastia do joelho. Esta insatisfação e o facto de a técnica cirúrgica ser descrita como a causa mais frequente de falência da prótese do joelho deram origem a um aumento do interesse na cirurgia ortopédica assistida por computador. Os sistemas diferem quanto ao número de variáveis que controlam e estão divididos em sistemas de navegação, robóticos ativos, robóticos semiativos e robóticos passivos, consoante o grau de independência com que executam os procedimentos.

Elaborou-se uma revisão da literatura através de uma pesquisa na base de dados eletrónica Medline/Pubmed, utilizando combinações de termos “computer navigation”, “robotics”, “unicompartmental knee arthroplasty”, “total knee arthroplasty” e “soft tissue balancing”, não foi imposto limite temporal relativamente aos artigos seleccionados, contudo foi dada preferência aos artigos mais recentes de forma a analisar a evolução do estado da arte e com o objetivo de: (i) resumir e discutir os diferentes tipos de cirurgia ortopédica assistida por computador, (ii) avaliar os resultados destes sistemas na artroplastia do joelho, (iii) avaliar as vantagens e limitações dos diferentes sistemas e, por último, (iv) quais as perspetivas futuras.

Atendendo aos objetivos propostos, constatou-se que os sistemas de cirurgia assistida por computador melhoram a consistência e precisão da artroplastia do joelho, obtendo assim menor variação do eixo mecânico e a restauração da linha articular. Constatou-se ainda que, estudos recentes, encontraram uma associação entre a cirurgia navegada e a diminuição da taxa

de revisão na artroplastia total do joelho. Contudo, estes sistemas estão associados a um aumento do tempo cirúrgico e, no caso dos sistemas robóticos, os custos são ainda proibitivos.

No futuro, a artroplastia do joelho vai incluir um planeamento mais preciso e uma execução intraoperatória mais consistente e reprodutiva. O aumento da precisão juntamente com um equilíbrio ligamentar que será mais do que igualar os espaços em flexão e extensão, associado à personalização avançada das próteses do joelho, poderão ser a chave para mimetizar a cinemática do joelho normal. Tendo em conta a evolução tecnológica dos sistemas de cirurgia ortopédica assistida por computador e os resultados obtidos, é espectável que, num futuro próximo, tecnologias como a cirurgia navegada por computador e os sistemas robóticos semiativos venham a ter um papel tão importante na atividade diária do cirurgião como a fluoroscopia intraoperatória no tratamento da maioria das fraturas nos dias de hoje.

Palavras-chave: Navegação assistida por computador, robótica, artroplastia unicompartmental do joelho, artroplastia total do joelho, equilíbrio ligamentar.

Abstract

In the last 4 decades of knee arthroplasty, the materials used, the design and the instrumentation systems, have been developed in order to improve the consistency of the technique, the functional performance and the longevity of the prosthesis. However, despite this development, published studies suggest that 15% to 20% of patients are dissatisfied with knee arthroplasty. This dissatisfaction and the fact that the surgical technique is described as the most frequent cause of knee prosthesis failure has led to an increased interest in computer assisted orthopaedic surgery. The systems differ in the number of variables they control and are divided into navigation systems, active robotics, semi-active robotics and passive robotics, depending on the degree of independence in which they perform the procedures.

A review of the literature was done through a search on the electronic database Medline / Pubmed, using combinations of terms "computer navigation", "robotics", "unicompartmental knee arthroplasty", "total knee arthroplasty" and "soft tissue balancing", there was no temporal limitation on the articles selected, however, preference was given to the most recent ones in order to study the evolution of the state of the art and with the objective of: (i) summarizing and discussing the different types of computer assisted orthopaedic surgery, (ii) evaluating the results of these systems in knee arthroplasty, (iii) evaluating the advantages and disadvantages of the different systems and (iv) future perspectives.

Taking into account the proposed objectives, it was found that computer assisted surgery systems improve the consistency and precision of knee arthroplasty thus, obtaining less variation of the mechanical axis and restoration of the joint line. It was also observed that, recent studies, found an association between the surgery navigated and the reduction of the revision rate in total knee arthroplasty. Nevertheless, these systems are associated with increased surgical time and, in the case of robotic systems, costs are still prohibitive.

In the future, knee arthroplasty will include more precise planning and more consistent and reproducible intraoperative execution. Increasing precision along with a ligament balance that will be more than matching flexion and extension spaces associated with advanced knee prosthesis customization may be the key to mimic the normal knee kinematics. Given the technological evolution of computer assisted orthopaedic surgery systems and the results obtained, it is likely that, in the near future, technologies such as computer navigated surgery and semi-active robotic systems will play such an important role in the daily activity of the surgeon as the intraoperative fluoroscopy in the treatment of most fractures these days.

Keywords: computer navigation; robotics, unicompartmental knee arthroplasty, total knee arthroplasty, soft tissue balancing;

Lista de Abreviaturas

| | |
|-------|--|
| 3D | tridimensional |
| ATJ | artroplastia total do joelho |
| AKS | <i>American Knee Society</i> |
| AUJ | artroplastia unicompartmental do joelho |
| CAC | cirurgia assistida por computador |
| CNC | cirurgia navegada por computador |
| FDA | <i>Food and Drug Administration</i> |
| IKS | <i>International Knee Score</i> |
| OKS | <i>Oxford Knee Scores</i> |
| RM | ressonância magnética |
| SRA | sistemas robóticos ativos |
| TC | tomografia computadorizada |
| KSS | <i>Knee Society Scores</i> |
| WOMAC | <i>Western Ontario and McMaster Universities Arthritis</i> |

Introdução

Com o aumento da esperança média de vida tem-se verificado um incremento do número de doenças associadas à idade, tais como a osteoartrose e osteoporose. Deep K. e colaboradores, preveem que entre 2005 e 2030 haja um aumento de 40% na prevalência da osteoartrose. O risco de desenvolver artrose do joelho durante a vida é de 45%, sendo esta a indicação mais frequente para artroplastia do joelho.^[1,2] Estima-se que, nos Estados Unidos da América, entre 2005 e 2030, haja um aumento de 673% do número de artroplastias totais do joelho (ATJ) e um aumento de 601% da taxa de revisão destas mesmas artroplastias.^[3]

O objetivo principal da artroplastia do joelho é o alívio da dor, a melhoria da qualidade de vida do doente, restaurar a função e otimizar a longevidade da prótese. Revisões sistemáticas recentes reportaram uma taxa de sucesso a 10 anos de 91,5% ^[4] na artroplastia unicompartmental do joelho (AUJ) e de 95% ^[5] na ATJ. Nas últimas 4 décadas de artroplastia do joelho, foram desenvolvidos substancialmente os materiais utilizados, o desenho e os sistemas de instrumentação, com o intuito de melhorar a consistência da técnica, o desempenho funcional e a longevidade da prótese. Contudo, apesar desta evolução, estudos publicados sugerem que 15% a 20% dos doentes não estão satisfeitos com a artroplastia do joelho.^[6] Esta insatisfação e o facto de a técnica cirúrgica ser descrita como a causa mais frequente de falência da prótese do joelho,^[7] induziram um aumento do interesse na cirurgia ortopédica assistida por computador que, nas últimas 2 décadas, levaram à introdução de vários sistemas inovadores. Estes sistemas visam melhorar variáveis que demonstraram ter impacto no resultado final da artroplastia do joelho, como o eixo mecânico, alterações do nível da interlinha articular, equilíbrio ligamentar, a variabilidade existente entre cirurgiões e, por conseguinte, uma possível redução de doentes insatisfeitos.^[8]

F. Picard e colaboradores^[9] sugeriram 2 categorias para a Cirurgia ortopédica assistida por computador: sistemas de navegação (pré-operatórios e intraoperatórios) e sistemas robóticos (ativos, semiativos e passivos).

Os sistemas robóticos ativos (SRA) necessitam que o cirurgião realize a abordagem cirúrgica e prepare o sistema robótico de forma a que, após o SRA iniciar a cirurgia, complete-a sem que o cirurgião interfira. O primeiro SRA para realização de artroplastia surgiu em 1985, o sistema ROBODOC.^[10,11] Este sistema necessita da realização de uma TC e foi desenvolvido com o intuito de facilitar a preparação e implantação do componente femoral. O cirurgião, numa fase pré-operatória, elabora o plano cirúrgico através da utilização do software ORTHODOC que cria um modelo 3D virtual da anatomia do doente baseando-se na TC já realizada. Este plano é depois transferido para o ROBODOC que realiza a cirurgia. Tendo o cirurgião a função de monitorizar e, em caso de necessidade, pode ativar o botão de emergência que permite desligar o sistema em qualquer momento.

Os Sistemas Robóticos Semiativos, nos quais o cirurgião tem controlo sobre o processo cirúrgico, recebendo um feedback táctil ou sonoro por parte do robot de forma a restringir a ação dentro dos limites definidos pelo computador que se baseia no plano pré-operatório. Como exemplo temos o Robotic Arm Interactive Orthopaedic System (RIO) da Mako Stryker que, no pré-operatório, é realizada uma TC a partir da qual é criado um modelo 3D. Este modelo permite que o cirurgião estabeleça pré-operatoriamente a localização dos cortes ósseos, o tamanho e a posição da prótese. Apesar de recente, já demonstrou ser superior à artroplastia convencional e diminui o dano nos tecidos moles.^[12,13]

Os sistemas robóticos passivos monitorizam o procedimento cirúrgico e fornecem informação detalhada ao cirurgião, como por exemplo, o grau de precisão dos cortes ósseos. O

cirurgião continua a utilizar os instrumentos convencionais e pode ignorar as instruções do sistema. Como exemplo temos o iBlock da OMNIlife Science.

Este sistema robótico de pequenas dimensões tem como objetivo ser mais eficiente e rentável que os sistemas de grandes dimensões atualmente em uso. É um guia de corte ósseo femoral motorizado que, intra-operatóriamente e através de informação fornecida pelo cirurgião, cria um modelo ósseo 3D do doente. Depois de aplicado no fémur e após as medições e determinação dos cortes a realizar por parte do computador, este guia de corte ósseo motorizado move-se para permitir que o cirurgião realize cortes específicos.^[9,14]

Os sistemas de navegação, que exibem informação de orientação durante o procedimento cirúrgico, podem ser classificados em dois grupos, sistemas pré-operatórios e sistemas intraoperatórios que por sua vez se dividem em sistemas com ou sem imagem.

1 - Sistemas pré-operatórios

1.1 – Nos Sistemas pré-operatórios com imagem são realizados exames imagiológicos pré-operatórios, como a Tomografia Computadorizada (TC) ou a Ressonância Magnética (RM), para que o computador elabore um modelo tridimensional (3D) da anatomia específica do doente permitindo efetuar um estudo e planear a cirurgia. No início da cirurgia, o cirurgião utiliza a navegação ótica para registar anatomicamente o paciente que, de seguida, é associado ao modelo 3D já criado.

1.2 – Nos sistemas pré-operatórios sem imagem, o sistema baseia-se em modelos genéricos para se adaptar à geometria óssea de um doente em particular.

2 - Sistemas intraoperatórios

2.1 – Nos sistemas intraoperatórios com imagem utilizam, geralmente, a fluoroscopia.

2.2 – Nos sistemas intraoperatórios sem imagem baseiam-se em referências anatômicas obtidas durante o ato cirúrgico utilizando um acelerômetro ou o sistema ótico.

- No caso do sistema baseado no acelerômetro, consiste em 4 sensores descartáveis que são fixados aos guias de resseção e comunicam entre si por meio de radiofrequência. Estes sensores permitem a orientação nos planos coronal e sagital, sendo o resto do procedimento realizando como no método convencional.^[15]

- O sistema ótico utiliza a localização ótica, entre a sonda e os marcadores que são fixados ao fêmur e à tíbia através de um cravo de Steinmann, e os sensores óticos que estão ligados ao computador.

Metodologia

Para a realização da presente revisão da literatura foi feita uma pesquisa de artigos na base de dados eletrônica MedLine (Pubmed) através dos descritores MeSH relacionados com a questão de investigação, escritos nas línguas inglesa, portuguesa e espanhola, com o resumo disponível. Foram utilizadas combinações dos termos “computer navigation”, “robotics”, “unicompartmental knee arthroplasty”, “total knee arthroplasty” e “soft tissue balancing”. A partir da pesquisa, a seleção de artigos foi conduzida, primeiro, com base no título do artigo e, numa segunda fase, a leitura do resumo.

Com o objetivo de analisar com maior detalhe a evolução do estado da arte sobre a cirurgia assistida por computador não foi imposto limite temporal relativamente aos artigos selecionados, contudo, foi dada preferência aos artigos mais recentes.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos encontram-se organizados pelo tipo de cirurgia ortopédica assistida por computador, sendo eles, sistemas de navegação e sistemas robóticos (passivos, ativos e semiativos), seguidos de uma pequena comparação entre SNC e sistemas robóticos, terminando com algumas perspectivas futuras.

1 – Cirurgia navegada por computador

Ajudar os cirurgiões a alcançar de forma consistente o posicionamento da prótese, com redução de *outliers*, é a vantagem mais consistente relatada da navegação por computador em comparação com a instrumentação convencional. Vamos dar especial atenção a este sistema visto ser o mais utilizado, perfazendo já 30% das ATJ na Alemanha.^[16]

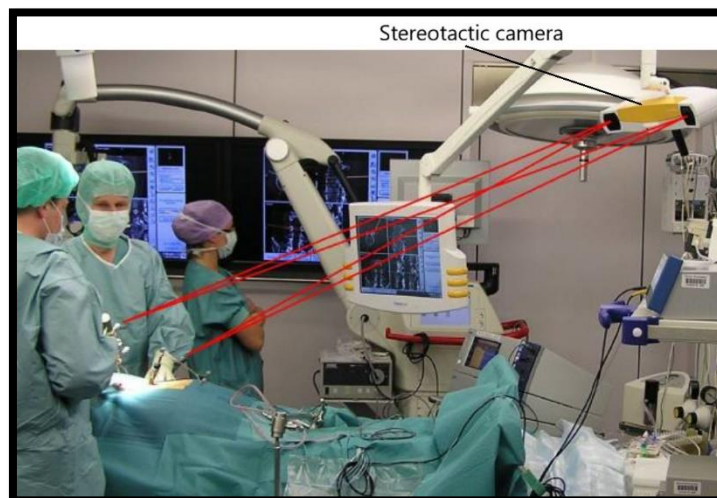


Figura 1: Sistema de Navegação por Computador. Adaptado de Mezger et al (2013).

O alinhamento dos componentes protésicos dentro de $\pm 3^\circ$ valgo/varo relativamente ao eixo mecânico neutro é reconhecido como fundamental para a longevidade da prótese.^[17] No entanto, ainda não é consensual que haja uma relação direta entre a manutenção dos 3° valgo/varo relativamente ao eixo mecânico neutro e a durabilidade da prótese a longo prazo após ATJ. Até que as inter-relações biomecânicas de orientação dos componentes nos planos

coronal, sagital e axial sejam melhor compreendidas a manutenção do angulo neutro continua a ser o *gold standard*.^[18]

Cip e colaboradores demonstraram um alinhamento mais preciso na ATJ navegada por computador (90%) em comparação com a ATJ convencional (81%) e uma melhoria no International Knee Score (IKS) ($p = 0.002$) num seguimento de 5 anos. Contudo não encontraram diferenças no Western Ontario and McMaster Universities Arthritis Index (WOMAC) score.^[18]

Na meta-análise de Mason e colaboradores reportaram que a artroplastia assistida por computador é superior à instrumentação tradicional para alinhamentos dentro de $\pm 2^\circ$ no eixo mecânico, plano coronal, inclinação tibial e posicionamento do componente femoral sagital. Não havendo diferença no alinhamento femoral sagital ou inclinação tibial quando a margem de erro foi aumentada para $\pm 3^\circ$. Para o alinhamento do eixo mecânico, este estudo encontrou alterações superiores a 3° que, nos doentes do grupo da cirurgia navegada por computador (CNC) ocorreram em apenas 9,0% versus 31,8% dos doentes do grupo da artroplastia convencional.^[19]

Hetaimish e colaboradores,^[20] também comparam o alinhamento obtido convencionalmente e por navegação, utilizando como *outliers* ângulos $>2^\circ$ e $>3^\circ$ relativamente ao eixo mecânico neutro. Este estudo reportou que 30.1% dos doentes submetidos cirurgia convencional tiveram um desvio do eixo mecânico maior que 3° enquanto que, na coorte de doentes tratados por navegação assistida por computador, apenas 12.8% tinha um desvio coronal maior que 3° . O risco relativo de produzir um desvio do eixo mecânico maior que 3° relativamente ao alinhamento neutro na CNC comparativamente com o procedimento convencional foi de 0.37 (95% IC, 0.24-0.58; $P < .00001$). Quando diminuído o limite de alinhamento para 2° , resultou que em 40,4% dos doentes operados com a técnica convencional apresentavam um desvio superior enquanto que, no grupo de doentes operados por CNC, só

20,0% apresentava um desvio superior a 2°. O risco relativo do desvio do eixo mecânico maior que 2° foi de 0,54 (95% IC, 0.42-0.69; $P < 0.004$).

Para avaliar os resultados clínicos, Blakeney e colaboradores,^[21] numa média de 46 meses (intervalo de 30-96 meses), descobriram uma tendência para melhores resultados no Oxford Knee Scores (OKS) no grupo navegado por computador e um OKS significativamente melhor quando o eixo mecânico estava dentro dos 3° valgo/varo ($p = 0,045$).

De forma a avaliar o tempo cirúrgico, os resultados clínicos, a taxa de revisão, a precisão e consistência da CNC na artroplastia do joelho, Baumbach e colaboradores, analisaram os resultados de um seguimento de 10 anos onde analisaram retrospectivamente uma série consecutiva de 217 casos e avaliaram 46 ATJ-Convencionais e 50 ATJ-CAS.^[22] Observaram que o grupo CNC teve, em média, um tempo cirúrgico de mais 22 minutos ($p < 0.0001$) e apresentavam um eixo mecânico dentro dos 3° valgo/varo em 78% dos casos enquanto que o grupo convencional em 58% dos casos. Nos 10 anos de seguimento, foram realizadas 19 revisões, das quais 8 por descolamento asséptico. Destes descolamentos, 7 ocorreram no grupo convencional e 1 no grupo da CNC, correspondendo a 87% de sucesso no grupo convencional e 98% no grupo CNC ($p=0.03$). Relativamente aos resultados do pós-operatório, os valores HSS e Knee Society Scores (KSS) não apresentaram diferenças entre os dois grupos ($p > 0.19$). Tendo os autores referido que os doentes submetidos a ATJ-CNC tiveram menos dor e concluído que a CNC melhora o posicionamento e reduz significativamente a o número de revisões a 10 anos.

Um outro estudo retrospectivo realizado por Steiger e colaboradores, utilizou a base de dados Australiana para avaliar o número de revisões realizadas na ATJ, com e sem a utilização da CNC, desde Janeiro de 2003 a Dezembro de 2012.^[23] Este ensaio concluiu que, de uma forma geral, a percentagem de revisões na ATJ durante esse período foi de 5.2% no grupo convencional comparativamente com 4.6% do grupo da CNC ($p = 0.15$). Esta diferença

aumentou quando comparadas artroplastias realizadas em doentes com menos de 65 anos de idade, onde obtiveram uma diminuição do número de revisões no grupo de CNC, 6.3% vs 7.87% ($p = 0.011$). Adicionalmente, quando avaliadas especificamente as revisões por descolamento asséptico nos doentes com menos de 65 anos, novamente, a CNC obteve significativamente menor taxa de revisão (1.6% vs 2.6%, $p = 0.001$). Finalmente, avaliaram as taxas de revisão *major* da coorte, sem limite de idade, tendo a CNC obtido uma diminuição da taxa de revisões *major* comparativamente com a cirurgia convencional (2.1 vs 2.7%, $p < 0.001$). O mesmo não se verificou na taxa de revisão *minor* de toda a coorte que obteve resultados semelhantes em ambos os grupos.

Outro potencial benefício da CNC na artroplastia é a mitigação da necessidade de violar o canal femoral, que pode diminuir as perdas hemáticas. Neste estudo, Licini and Meneghini^[24] demonstraram que nas ATJ realizadas com navegação assistida por computador, obtiveram menor débito no dreno ($p = 0.02$), menos alterações da hemoglobina ($p = 0.001$), e menor perda hemática estimada ($p = 0.001$). Propondo assim que, o facto de a CNC permitir a evicção da violação do canal femoral, culminará numa potencial menor perda hemática quando comparada com a ATJ convencional.

Curiosamente, nem todos os estudos demonstram benefício da CNC na artroplastia do joelho. Em 2013, Burnett and Barrack,^[25] realizaram uma revisão sistemática da ATJ-CNC versus ATJ-convencional, concluindo que a navegação melhora o alinhamento coronal, mas encontrou pouca evidência de melhoria nas restantes variáveis. Encontraram ainda aumento do tempo cirúrgico e complicações únicas, como maior risco de infeção e fraturas secundárias à furagem das corticais onde se aplicam os cravos de Steinmann para os orientadores do fémur e da tíbia. Aquando da realização do estudo, concluíram que não havia evidência científica que suportasse o uso da CNC em detrimento do método convencional. Contudo, as complicações referidas no estudo de Burnett and Barrack, para além de serem extremamente raras^[26],

atualmente, são passíveis de ser evitadas, recorrendo à cirurgia navegada por computador com recurso a um acelerómetro, deixando de ser necessário aplicar os cravos de Steinmann na tíbia e no fémur.



Figura 2: iASSIST® Knee Alignment Instrumentation 2. Adaptado de Nam et al (2013)

Os SNC baseados no acelerómetro possuem várias vantagens pois evitam a aplicação de cravos de marcação no fémur e na tíbia, reduzem os requisitos para registo da anatomia do doente, são equipamentos pequenos e eliminam a necessidade de manter um campo livre entre a câmara de infravermelhos e os *arrays* de referência. Num estudo retrospectivo onde foram comparados os sistemas SNC-ótico com o SNC-acelerómetro, Nam e colaboradores reportaram um alinhamento do eixo mecânico menor que 3° em 92.5% no caso dos SNC baseado em acelerómetro comparativamente com 86.3% nos SNC ótico. Porém, num seguimento de 6 meses, ambos os grupos obtiveram resultados clínicos semelhantes em termos de amplitude de movimento, função, dor e qualidade de vida. Os sistemas de navegação com acelerómetro, para além de apresentarem bons resultados quanto ao alinhamento do eixo mecânico, femoral e do componente tibial na ATJ, também reduzem o número de complicações, o tempo com o garrote e o tempo cirúrgico, quando comparados com o SNC ótico. A maior limitação dos SNC baseados no acelerómetro é o facto de, após ressecção femoral ou tibial, a precisão desta não pode ser avaliada como nos SNC óticos. Estes SNC sem imagem com o recurso ao acelerómetro, tais como o iASSIST, também não têm a capacidade de avaliar o equilíbrio

ligamentar, nem de estabelecer o tamanho dos componentes protésicos. No que trata a escolha do tamanho destes componentes, o iASSIST utiliza a técnica convencional, não tendo sido encontradas diferenças significativas entre grupos no que se trata de desvio da linha articular.

[27,28]

Quanto ao custo, utilizando o modelo de Markov, E. Novak e colaboradores concluíram que os sistemas de navegação por computador podem ser rentáveis se o custo adicional por cirurgia for inferior a 629\$ por caso. A rentabilidade destes sistemas aumenta quanto maior o número de cirurgias realizadas, quanto menos dispendiosa a tecnologia se torna e quanto menos revisões se realizarem. Para hospitais com elevado número de artroplastias (250 artroplastias por ano) é necessário diminuir o taxa de revisões em 2% por ano, durante 20 anos, para manter a rentabilidade enquanto que, nos hospitais com baixo número de artroplastias (25 artroplastias por ano), a taxa de revisões teria de descer 13%.^[29,30]

Sistemas robóticos

Os sistemas robóticos, para além da precisão e consistência cirúrgica, permitem efetuar um estudo 3D pré-operatório dos cortes ósseos através da realização de uma TC. Como exemplo de sistemas robóticos disponíveis temos: ROBODOC, CASPAR, MAKO-RIO, ACROBOT. Recentemente surgiram novos sistemas como o NAVIO e o iBlock, no entanto, a literatura existente para estes sistemas é escassa.

2 – Sistemas robóticos ativos

2.1 – ROBODOC

O ROBODOC foi utilizado pela primeira vez em 1992 na realização de uma artroplastia total da anca e, em Março de 2000, também passou a permitir a realização da ATJ. Apesar dos bons resultados a nível de alinhamento tibial e femoral, este sistema deixou de ser comercializado em 2005 por alegado aumento do risco de infeção, lesões das estruturas nervosas e problemas financeiros. Outro fator que levou ao insucesso foi o facto da Food and Drug Administration (FDA) não ter autorizado o uso destes sistemas nos USA, pedindo mais estudos que demonstrassem um claro benefício clínico. Contudo, em 2006, uma empresa Coreana, investiu no ROBODOC, e conseguiu obter autorização da FDA para a realização de artroplastias da anca.^[14]

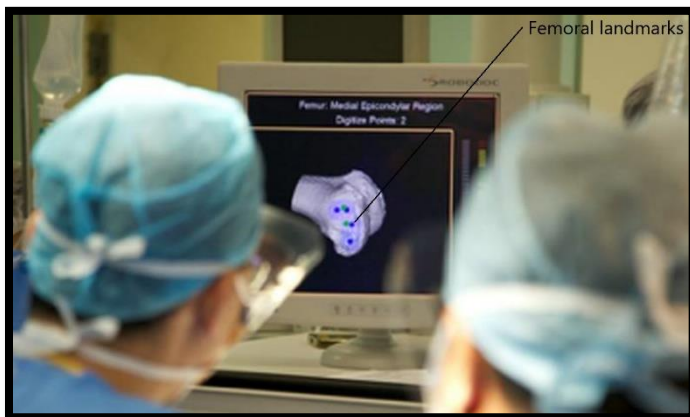


Figura 3: Sistema ROBODOC – Registo femoral. Adaptado de Liow et al (2017)



Figura 4: Sistema ROBODOC. Adaptado de Liow et al (2017)

A nível de resultados, o ROBODOC demonstrou, comparativamente com o sistema convencional, mais precisão e menor variação do eixo mecânico, mas aumentou o tempo cirúrgico em 25 minutos e não apresentou melhorias na satisfação dos doentes. Este sistema, apesar de não possuir tecnologia que lhe permita aferir o equilíbrio ligamentar do joelho ^[31],

apresentou bons resultados (94%) comparativamente com o método convencional (80%). Os autores do estudo argumentam que o resultado paradoxal se pode dever ao posicionamento preciso dos componentes protésicos. Os scores pós-operatórios para o grupo ROBODOC (HSS, 95.7; WOMAC, 28.9) e do grupo convencional (HSS, 94.7; WOMAC, 30) foram semelhantes e sugerem que ambas as técnicas têm resultados clínicos adequados. [32,33]

Um estudo prospetivo recrutou 27 doentes consecutivos que foram submetidos a ATJ com o sistema robótico ROBODOC. Neste estudo, Liow e colaboradores [31], para além de também observarem que este sistema consegue um alinhamento preciso e consistente, também concluíram que consegue diminuir a quantidade de osso necessário remover através da utilização de uma fresa, variando de 0.15-0.29 mm, enquanto que no método convencional é feito um corte ósseo com uma serra oscilante que remove entre 0.16-0.42 mm de osso. A utilização desta fresa permite a manutenção de uma temperatura máxima de 44–47°C, através da constante irrigação e controlo automático da velocidade de remoção. Na cirurgia convencional as temperaturas superiores são frequentemente encontradas durante a utilização da serra oscilante, resultando numa potencial lesão óssea e, por conseguinte, compromisso da fixação da prótese.

Este estudo também revelou uma falta de versatilidade intraoperatória nos procedimentos robóticos, podendo culminar na necessidade de abandonar o procedimento robótico para passar à cirurgia convencional, incorrendo em custos adicionais. Outros estudos descrevem uma taxa de abortamento de procedimentos robóticos que vai desde 1-22%. Liow e colaboradores, observaram uma taxa de abortamentos de 7.4% (2 casos); um por erro no reconhecimento do espaço cirúrgico e outro por falha no motor.

Outra limitação é o custo inicial necessário para o uso dos sistemas robóticos, como o ROBODOC, que são muito altos, tornando ainda mais difícil a implementação deste sistema.

Na Europa, em 2007, o custo deste sistema robótico era de 400,000€, somando-se ainda os custos de manutenção (calibragem e atualizações de software) que correspondem a uma despesa de 1,000€ por cirurgia.^[31]

2.2 – CASPAR

O Computer Assisted Surgical Planning and Robotics (CASPAR, Alemanha) foi outro SRA. Este sistema também foi inicialmente concebido para a cirurgia da anca (1997) e, posteriormente, foi adaptado para a ATJ (1999). Os primeiros estudos referentes a este sistema relataram um melhoramento do alinhamento tibiofemoral (dentro de 1°), comparativamente com o grupo da técnica convencional (dentro de 2.6°). Este sistema para além de aumentar o tempo e os custos da cirurgia, apresentava uma grande limitação, a necessidade de aplicação pré-operatória de parafusos bicorticais para serem utilizados como marcadores na sincronização da TC pré-operatório com a função robótica intraoperatória.^[34]

Contudo, o CASPAR já não se encontra no mercado. Este sistema robótico apresentou várias complicações técnicas e cirúrgicas que levavam à paragem do sistema, convertendo o procedimento numa artroplastia convencional. Um estudo que avaliou 100 artroplastias consecutivas, realizadas com o sistema CASPAR, relatou 22 procedimentos interrompidos pelo cirurgião. Estas complicações deveram-se a falhas no registo, problemas no campo cirúrgico do robot e lesão do tendão patelar. Os erros de registo são perigosos devido à proximidade das estruturas neurovasculares que podem ser lesadas e também porque pode levar a imprecisões na disseção óssea.^[35]

3 – Sistemas robóticos semiativos

Os sistemas NAVIO e MAKO oferecem uma potencial vantagem relativamente aos sistemas de navegação prévios visto que, para além de permitirem um estudo pré-operatório, possuem um sistema de disseção óssea mais preciso do que os sistemas de corte convencionais. Estes dois sistemas são uma fusão da navegação por computador com a robótica.

3.1 – Navio surgical system

O sistema cirúrgico Navio da Smith and Nephew Memphis cria, intra-operativamente, um modelo 3D a partir da anatomia do doente, permitindo que o cirurgião elabore um plano de resseção óssea e escolha o tamanho dos componentes protésicos antes de realizar a resseção. O sistema monitoriza constantemente o membro do doente através de um sistema de navegação por infravermelhos e fornece um *feedback* táctil ao cirurgião, controlando também a ferramenta de fresa através da retração ou paragem da broca, mantendo o cirurgião dentro dos limites definidos no plano pré-operatório.

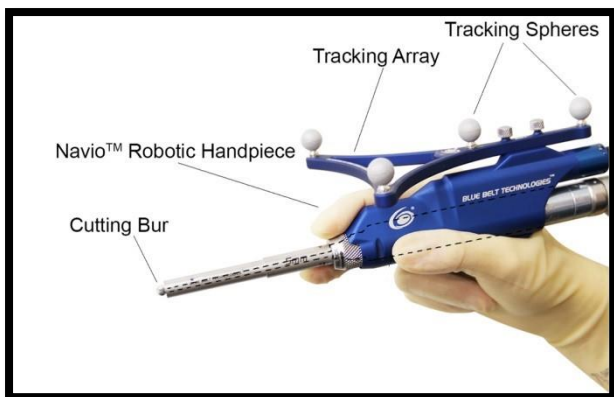


Figura 5: Navio robotic handpiece. Adaptado Lonner JH (2015)



Figura 6: Software de navegação do Navio. Adaptado de Lonner JH (2015)

O Navio tem-se vindo a revelar útil na AUJ que, em centros com reduzido número de artroplastias unicompartmentais, apresentem taxas de insucesso superiores a curto e médio prazo. Este sistema permite a preservação óssea e dos ligamentos, apresenta também benefícios

económicos como a redução do tempo de internamento hospitalar e de reabilitação, e redução dos períodos de convalescença.^[36]

Lonner e colaboradores^[36] efectuaram um estudo em 25 cadáveres que demonstrou uma ressecção óssea média de 1.3 mm e um desvio da prótese inferior a 2° na AUJ com o sistema Navio.

Apesar da AUJ envolver menor custo e ser funcionalmente superior à ATJ, este procedimento só corresponde a 8% de todas as artroplastias do joelho. A curva de aprendizagem e o facto de ser um procedimento muito diferente da ATJ foram indicados como o motivo principal.^[37] Logo, com a utilização de sistemas como o Navio, é possível reduzir a curva de aprendizagem, tornando a AUJ um procedimento possível em pequenos centros cirúrgicos.

3.2 – MAKO RIO

O Sistema MAKO Robotic Arm Interactive Orthopaedic (RIO) foi criado em 2004 e, tal como o ACROBOT e ao contrário do NAVIO, o plano cirúrgico resulta de uma TC pré-operatória. O facto de o MAKO fornecer, em tempo real, um feedback visual, táctil e auditório, permite otimizar a implantação da prótese, restaurando o alinhamento biomecânico e a mobilidade articular.



Figura 7: Mako RIO Robot system. Adaptado de R. Shenoy (2017)

Num estudo clínico prospetivo, randomizado e controlado, avaliaram a precisão do posicionamento protésico na artroplastia unicompartmental do joelho (AUJ) comparando o procedimento convencional com a CAC-Robótica (MAKO-RIO). No ensaio analisaram 139 doentes submetidos a AUJ, 62 por CAC-MAKO e 58 por método convencional. Realizaram uma TC 3 meses após a ATJ e avaliaram a precisão do posicionamento protésico nos planos axial, coronal e sagital. Bell SW e colaboradores^[38] concluíram que o sistema robótico MAKO-RIO apresentou uma média de erro de implantação significativamente mais baixa ($p < 0.01$) para todos os 3 parâmetros (sagital, coronal e axial) na tíbia e no fémur. A proporção de doentes com implantação dentro dos 2° da posição pretendida foi significativamente melhor na CAC-MAKO na componente femoral (plano sagital: 57% vs 26%; plano coronal: 70% vs 28%; plano axial: 53% vs 31%) e na componente tibial (plano sagital: 80% vs 22%; plano axial: 48% vs 19%).

Quanto aos scores de satisfação dos doentes, também foi demonstrado um incremento dos resultados e uma diminuição dos *outliers* na AUJ-MAKO. A 2 anos, 92% dos doentes indicaram estar muito satisfeitos com a artroplastia com o sistema MAKO.

3.3 - Acrobot

O sistema Acrobot (Active Constrain Robot) foi desenvolvido maioritariamente no Imperial College of London e necessitava de uma TC pré-operatória que, através de um software, permitia efetuar um plano cirúrgico preciso. Este plano cirúrgico era iniciado após um registo anatómico não invasivo, limitava a ação a uma região pré-determinada, permitindo que o cirurgião realizasse os cortes de forma segura. Este sistema serviu de base para sistemas como o MAKO.



Figura 8: Sistema Acrobot com ecran tátil. Adaptado de Barrett et al (2006)

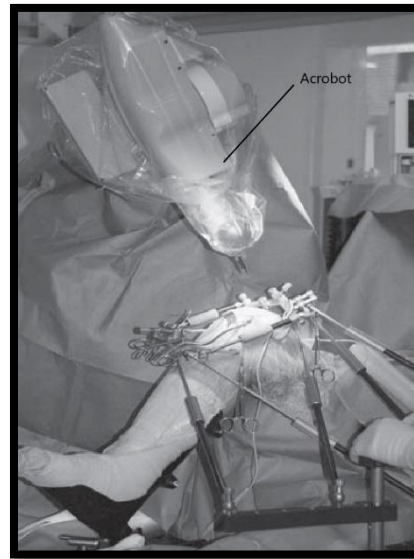


Figura 9: Acrobot system. Adaptado de B. L. Davies (2015)

Um estudo controlado e randomizado, confirmou que o Acrobot melhorou a precisão e a consistência de implantação da prótese na AUJ ^[39]. O grupo da AUJ-Acrobot que incluía 13 doentes, conseguiu um alinhamento no plano coronal dentro de 2° varo/valgo em todos os casos enquanto que só 6 dos 15 joelhos no grupo da AUJ-convencional se encontravam neste intervalo ($p = 0.001$). Este sistema também apresentou um aumento do tempo cirúrgico, mas o resultado clínico da American Knee Society (AKS) às 6 e 18 semanas, não apresentou alterações negativas. Todos os cirurgiões que realizaram a AUJ no grupo convencional, tinham realizado, anteriormente, pelo menos 10 AUJ, enquanto que no grupo do Acrobot, treinaram intensivamente em laboratório antes do estudo demonstrar que o sistema funciona satisfatoriamente.

Na ATJ, não é tão evidente, visto que muitos cirurgiões afirmam não ter dificuldades em atingir o alinhamento necessário através do método convencional. Contudo, todos os anos se realiza um grande número de revisões por erros no alinhamento. Logo, caso um Hospital

adquirir este sistema para a realização da AUJ, provavelmente, acabará por também o utilizar na ATJ de forma a diminuir os *outliers* e, assim, rentabilizar a aquisição.^[14]

As preocupações relativamente às quatro incisões extra na pele para introdução dos cravos de Steinmann, associadas ao aumento do tempo cirúrgico referido anteriormente, poderiam resultar, a curto prazo, numa má função. Estas preocupações revelaram-se infundadas.

O sistema Acrobot revelou ser preciso e consistente e o facto de permitir a criação de superfícies ósseas que podem ser trabalhadas por outros meios que não a serra oscilante, abriu caminho para novos implantes.

4 – Sistemas robóticos passivos

4.1 – iBlock

O iBlock da OMNIlife Science passou a chamar-se, recentemente, Apex Robotic Technology (ART), originalmente conhecido como Praxiteles antes de ter sido adquirido pela OMNIlife Science (USA) em 2010. Neste artigo utilizamos o nome mais presente na literatura publicada, o iBlock, que é um sistema robótico de pequenas dimensões utilizado em conjunto com um guia de corte tibial ajustável, o Nanoblock.

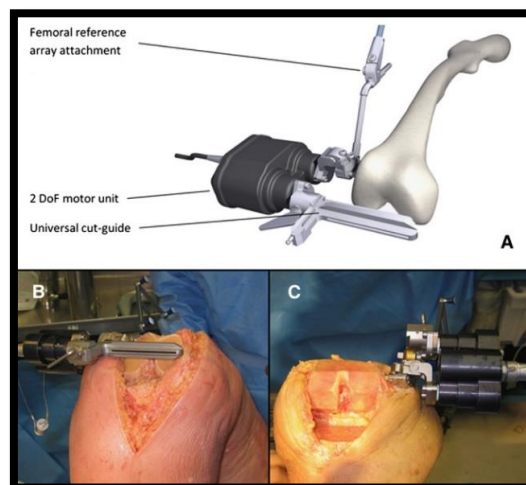


Figura 10: iBlock da OMNIlife Science. Adaptado de Koulalis D. (2011)

Este sistema é um guia de corte ósseo motorizado, de pequenas dimensões que, intra-operatoriamente e através de informação fornecida pelo cirurgião, cria um modelo ósseo 3D do doente. Depois de aplicado no fémur e após as medições e determinação dos cortes a realizar por parte do computador, este guia de corte ósseo motorizado move-se para permitir que o cirurgião realize cortes específicos. Os poucos estudos que existem deste sistema mostraram ser extremamente preciso, tendo sido demonstrado, no único estudo *in vivo* disponível, que um cirurgião conseguiu realizar os cortes ósseos mantendo o eixo mecânico dentro dos 3° nos primeiros 100 casos. ^[40]

Contudo, este sistema necessita de mais estudos e de mais desenvolvimento, antes de se poder avaliar a eficácia desta tecnologia. ^[14]

5 - Navegação por computador VS Cirurgia robótica

Atualmente há poucos estudos a comparar os sistemas de navegação por computador com os sistemas robóticos.

Um estudo retrospectivo analisou 81 doentes submetidos a ATJ, tendo sido utilizado o i-Block em 52 doentes e o SNC-Stryker nos restantes 29 doentes. Clark e Schmidt concluíram que a cirurgia robótica com o i-Block, quando comparada com a SNC, possui menor tempo cirúrgico (em média menos 9 minutos), um eixo mecânico de 0.5° varo/valgo e uma diminuição do tempo de internamento hospitalar. ^[41]

Koulalis e colaboradores efetuaram um estudo em cadáveres, dividindo-os em dois grupos, CNC e cirurgia robótica. Ambos os grupos utilizaram o sistema de navegação Praxim, tendo sido adicionando o i-Block ao grupo da cirurgia robótica. Comparando os dois grupos, a cirurgia robótica apresentou menor tempo cirúrgico (5.5 min vs 13.8 min, $p < 0.001$) e um

desvio médio dos cortes ósseos inferior nos planos coronal (0.55° vs 1.1°) e sagital (0.75° vs 2.0°).^[42]

6 - Perspetivas futuras

Como em qualquer inovação tecnológica, a cirurgia assistida por computador tem sido associada a algumas desvantagens. A mais frequentemente referida é a necessidade de realizar um TC pré-operatória na grande maioria dos sistemas de CAC, contudo, à medida que estes sistemas evoluem, a imagiologia também evolui, surgindo, por exemplo, radiografias de baixa dose de radiação que podem atenuar este problema num futuro próximo.

Apesar das vantagens que os sistemas assistidos por computador apresentam, ainda não obtiveram a aceitação geral dos cirurgiões. Ao contrário do que se pensa, problemas como a curva de aprendizagem ou oportunidades de treino/formação, não têm sido indicados como obstáculo à aceitação destas tecnologias. As barreiras são mais intrínsecas à própria tecnologia e incluem as falhas intra-operatórias, problemas com o registo intra-operatório, problemas de linha de visão e aumento do custo, do tempo cirúrgico e das taxas de infeção. Estas barreiras sugerem que, com a evolução da tecnologia, venha uma maior aceitação dos cirurgiões e, por conseguinte, a massificação destes sistemas e a redução do custo de aquisição.

No futuro é espectável que, por exemplo, a associação da TC ao uso de tecnologia como a impressora 3D para produção de próteses adaptadas à anatomia do doente, permitirá que o controlo de variáveis, como o alinhamento ligamentar seja mais do que igualar os espaços em flexão e extensão de forma a mimetizar um joelho normal.

Tendo em conta a evolução tecnológica dos sistemas de COAC e os resultados obtidos, também é espectável que, num futuro próximo, tecnologias como a cirurgia navegada por computador e os sistemas robóticos semiativos venham a ter um papel tão importante na

atividade diária do cirurgião como a fluoroscopia intraoperatória no tratamento da maioria das fraturas nos dias de hoje.

Conclusão

Cerca de duas décadas passaram desde a implantação dos primeiros sistemas robóticos e de navegação. Hoje, algumas destas tecnologias emergiram do laboratório para ser utilizadas de forma rotineira no bloco operatório e podem estar próximas de se tornarem o estado da arte para certos procedimentos ortopédicos. Atualmente um grande número de procedimentos utilizam sistemas de navegação nas artroplastias totais e parciais do joelho, tendo a maioria dos estudos demonstrado maior precisão e um aumento da consistência da técnica cirúrgica. Até há pouco tempo não haviam estudos que comprovassem melhorias da longevidade das próteses e dos resultados clínicos, relativamente à cirurgia convencional, contudo, recentemente surgiram estudos que atribuem, a médio-longo prazo, uma menor taxa de revisão nas artroplastias assistidas por computador.

O grande desafio na implementação da cirurgia assistida por computador está no custo inerente à compra e manutenção destes sistemas. Análises económicas demonstraram existir rentabilidade nos grandes centros cirúrgicos. A cirurgia navegada por computador tem demonstrado ser a mais rentável e diminuiu a curva de aprendizagem, permitindo que um cirurgião com pouca experiência cirúrgica obtenha resultados iguais ou superiores a cirurgiões com grande experiência cirúrgica. Logo, a obtenção de sistemas com boa relação custo/benefício garantirá o seu sucesso.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Manuel Pereira Fonseca e ao meu co-orientador, Mestre João Pedro Moreira de Oliveira, por todo o conhecimento transmitido, apoio e disponibilidade demonstrada no decorrer da realização deste trabalho.

À minha esposa, Bárbara Valladolid, e à minha família, pelo enorme sacrifício e altruísmo que demonstraram ao longo do meu percurso académico. A eles dedico este trabalho.

Referências bibliográficas

1. Otero-López A, Beaton-Comulada D. Clinical Considerations for the Use Lower Extremity Arthroplasty in the Elderly. *Phys Med Rehabil Clin N Am* 2017;28(4):795–810.
2. Deep K, Shankar S, Mahendra A. Computer assisted navigation in total knee and hip arthroplasty. *Sicot-J* 2017;3:50.
3. Kurtz S, Ong K, Lau E, Mowat F, Halpern M. Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. *J Bone Jt Surg - Ser A* 2007;89(4):780–5.
4. van der List JP, McDonald LS, Pearle AD. Systematic review of medial versus lateral survivorship in unicompartmental knee arthroplasty. *Knee* 2015;22(6):454–60.
5. Mont M, Pivec R, Issa K, Kapadia B, Maheshwari A, Harwin S. Long-Term Implant Survivorship of Cementless Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review of the Literature and Meta-Analysis. *J Knee Surg* 2013;27(5):369–76.
6. Keeney JA. Innovations in Total Knee Arthroplasty: Improved Technical Precision, But Unclear Clinical Benefits. *Orthopedics* 2016;39(4):217–20.
7. Schroer WC, Berend KR, Lombardi A V., Barnes CL, Bolognesi MP, Berend ME, et al. Why are total knees failing today? Etiology of total knee revision in 2010 and 2011. *J Arthroplasty* 2013;28(8 SUPPL):116–9.
8. Urish KL, Conditt M, Roche M, Rubash HE. Robotic Total Knee Arthroplasty: Surgical Assistant for a Customized Normal Kinematic Knee. *Orthopedics* 2016;39(5):e822–7.
9. Picard F, Moody J, Jaramaz B, DiGioia A, Nikou C, LaBarca RS. A Classification

- Proposal for Computer-Assisted Knee Systems. *Med Image Comput Comput Interv – MICCAI 2000 SE* - 119 2000;1935:1145–51.
10. Abhishek C RG. Robotics in Surgery - Past, Present and Future. *Adv Robot Autom* 2015;1(s2):1–2.
 11. Banks S a. Haptic robotics enable a systems approach to design of a minimally invasive modular knee arthroplasty. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 2009;38(2 Suppl):23–7.
 12. Hampp EL, Chughtai M, Scholl LY, Bhowmik-Stoker M, Jacofsky DJ, Mont MA. Robotic-Arm Assisted Total Knee Arthroplasty Demonstrated Improved Accuracy and Precision Compared to Manual Technique. *J Knee Surg* 2017;Submitted:283–7.
 13. Hampp EL, Bhowmik-Stoker M, Scholl LY, Otto JK, Jacofsky DJ, Mont MA. Robotic-Arm Assisted Total Knee Arthroplasty Demonstrated Soft Tissue Protection. *CAOS 2017 17th Annu Meet Int Soc Comput Assist Orthop Surgery Epic Ser Heal Sci* 2017;1(1):295–8.
 14. Davies BL, Rodriguez y Baena FM, Barrett ARW, Gomes MPSF, Harris SJ, Jakopec M, et al. Robotic control in knee joint replacement surgery. *Proc Inst Mech Eng Part H J Eng Med* 2007;221(1):71–80.
 15. Desseaux A, Graf P, Dubrana F, Marino R, Clavé A. Radiographic outcomes in the coronal plane with iASSIST™ versus optical navigation for total knee arthroplasty: A preliminary case-control study. *Orthop Traumatol Surg Res* 2016;102(3):363–8.
 16. Quack VM, Kathrein S, Tingart M, Christian L. Computer-assisted navigation in total knee arthroplasty : a review of literature. 2012;269–75.
 17. E Berend M, A Ritter M, B Meding J, M Faris P, Michael Keating E, Redelman R, et al. Tibial component failure mechanisms in total knee arthroplasty. 2004.

18. Cip J, Widemschek M, Luegmair M, Sheinkop MB, Benesch T, Martin A. Conventional versus computer-assisted technique for total knee arthroplasty: A minimum of 5-year follow-up of 200 patients in a prospective randomized comparative trial. *J Arthroplasty* 2014;29(9):1795–802.
19. Mason JB, Fehring TK, Estok R, Banel D, Fahrbach K. Meta-Analysis of Alignment Outcomes in Computer-Assisted Total Knee Arthroplasty Surgery. *J Arthroplasty* 2007;22(8):1097–106.
20. Hetaimish BM, Khan MM, Simunovic N, Al-Harbi HH, Bhandari M, Zalzal PK. Meta-Analysis of Navigation vs Conventional Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty* 2012;27(6):1177–82.
21. Blakeney WG, Khan RJK, Palmer JL. Functional outcomes following total knee arthroplasty: A randomised trial comparing computer-assisted surgery with conventional techniques. *Knee* 2014;21(2):364–8.
22. Baumbach JA, Willburger R, Haaker R, Dittrich M, Kohler S. 10-Year Survival of Navigated Versus Conventional TKAs: A Retrospective Study. *Orthopedics* 2016;39(3):S72–6.
23. De Steiger RN, Liu YL, Graves SE. Computer navigation for total knee arthroplasty reduces revision rate for patients less than sixty-five years of age. *J Bone Jt Surg - Am* Vol 2015;97(8):635–42.
24. Licini DJ, Meneghini RM. Modern abbreviated computer navigation of the femur reduces blood loss in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty* 2015;30(10):1729–32.
25. Burnett RSJ, Barrack RL. Computer-assisted total knee arthroplasty is currently of no proven clinical benefit: A systematic review knee. *Clin Orthop Relat Res*

- 2013;471(1):264–76.
26. Brown MJ, Matthews JR, Bayers-Thering MT, Phillips MJ, Krackow KA. Low Incidence of Postoperative Complications With Navigated Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty* 2017;32(7):2120–6.
 27. Goh GSH, Liow MHL, Lim WSR, Tay DKJ, Yeo SJ, Tan MH. Accelerometer-Based Navigation Is as Accurate as Optical Computer Navigation in Restoring the Joint Line and Mechanical Axis After Total Knee Arthroplasty. A Prospective Matched Study. *J Arthroplasty* 2016;31(1):92–7.
 28. Nam D, Weeks KD, Reinhardt KR, Nawabi DH, Cross MB, Mayman DJ. Accelerometer-Based, Portable Navigation vs Imageless, Large-Console Computer-Assisted Navigation in Total Knee Arthroplasty. A Comparison of Radiographic Results. *J Arthroplasty* 2013;28(2):255–61.
 29. Slover JD, Tosteson AN a, Bozic KJ, Rubash HE, Malchau H. Impact of hospital volume on the economic value of computer navigation for total knee replacement. *J Bone Joint Surg Am* 2008;90(7):1492–500.
 30. Novak EJ, Silverstein MD, Bozic KJ. The cost-effectiveness of computer-assisted navigation in total knee arthroplasty. *J Bone Jt Surg - Ser A* 2007;89(11):2389–97.
 31. Liow MHL, Chin PL, Tay KJD, Chia SL, Lo NN, Yeo SJ. Early experiences with robot-assisted total knee arthroplasty using the digiMatch™ ROBODOC® surgical system. *Singapore Med J* 2014;55(10):529–34.
 32. Song E-K, Seon J-K, Park S-J, Jung W Bin, Park H-W, Lee GW. Simultaneous bilateral total knee arthroplasty with robotic and conventional techniques: a prospective, randomized study. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc* 2011;19(7):1069–76.

33. Song EK, Seon JK, Yim JH, Netravali NA, Bargar WL. Robotic-assisted TKA reduces postoperative alignment outliers and improves gap balance compared to conventional TKA knee. *Clin Orthop Relat Res* 2013;471(1):118–26.
34. Siebert W, Mai S, Kober R, Heeckt PF. Technique and first clinical results of robot-assisted total knee replacement. *2002*;9:173–80.
35. Chun YS, Kim K Il, Cho YJ, Kim YH, Yoo MC, Rhyu KH. Causes and Patterns of Aborting a Robot-Assisted Arthroplasty. *J Arthroplasty* 2011;26(4):621–5.
36. Lonner JH, Smith JR, Picard F, Hamlin B, Rowe PJ, Riches PE. High Degree of Accuracy of a Novel Image-free Handheld Robot for Unicondylar Knee Arthroplasty in a Cadaveric Study. *Clin Orthop Relat Res* 2015;473(1):206–12.
37. Willis-Owen CA, Brust K, Alsop H, Miraldo M, Cobb JP. Unicondylar knee arthroplasty in the UK National Health Service: An analysis of candidacy, outcome and cost efficacy. *Knee* 2009;16(6):473–8.
38. Bell SW, Fracs T, Anthony I, Jones B, Fracs T, Maclean A, et al. Improved Accuracy of Component Positioning. *2016*;627–35.
39. Cobb J. Hands-on robotic unicompartmental knee replacement: A PROSPECTIVE, RANDOMISED CONTROLLED STUDY OF THE ACROBOT SYSTEM. *J Bone Jt Surg - Br Vol* 2006;88–B(2):188–97.
40. Koenig JA, Suero EM, Plaskos C. SURGICAL ACCURACY AND EFFICIENCY OF COMPUTER-NAVIGATED TKA WITH A ROBOTIC CUTTING GUIDE – REPORT ON THE FIRST 100 CASES. *Orthop Proc* 2012;94–B(SUPP_XLIV):103.
41. Clark TC, Schmidt FH. Robot-Assisted Navigation versus Computer-Assisted Navigation in Primary Total Knee Arthroplasty: Efficiency and Accuracy. *ISRN Orthop*

2013;2013:1–6.

42. Koulalis D, O’Loughlin PF, Plaskos C, Kendoff D, Cross MB, Pearle AD. Sequential versus automated cutting guides in computer-assisted total knee arthroplasty. *Knee* 2011;18(6):436–42.