

Revisando sistematicamente técnicas e ferramentas utilizadas em simulação de palpação com retorno háptico

Systematically reviewing techniques and devices used in palpation simulation with haptic feedback

Mateus de Lara Ribeiro, Fátima L. S. Nunes
Laboratório de Aplicações de Informática em Saúde (LApIS)
Escola de Artes, Ciências e Humanidades
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil
{mateus.ribeiro, fatima.nunes}@usp.br

Abstract— Palpation exam is a procedure where a health professional presses a specific region of a patient's body with fingers in order to detect the presence of features and abnormalities under the skin. There is a growing trend to develop simulators capable of adding improvements and greater realism to training this type of procedure. This article presents the results of a systematic review conducted in order to assess the state-of-art of the simulation of the palpation procedure. Papers focusing on techniques and tools of simulation palpation with haptic feedback were analyzed. From the results obtained, it was concluded that despite being a new area, there are already many innovative papers that received positive reviews.

Keywords—palpation; simulation; haptics; force feedback; Systematic Review

Resumo: O exame de palpação é um procedimento no qual um profissional da saúde pressiona uma região específica do corpo de um paciente com os dedos a fim de detectar a presença ou ausência de características e anormalidades sob a pele. Existe uma demanda crescente por simuladores que sejam capazes de agregar melhorias e maior realismo ao treinamento deste tipo de procedimento. Este artigo apresenta os resultados de uma Revisão Sistemática realizada com o objetivo de avaliar o estado da arte da simulação de exame de palpação. Foram analisados artigos com foco em técnicas e ferramentas de simulação de exame de palpação com retorno háptico. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que apesar de ser uma área recente, já existem muitos trabalhos inovadores que receberam avaliações positivas.

Palavras-chaves—palpação; simulação; háptico; retorno de força; Revisão Sistemática

I. INTRODUÇÃO

A importância da sensação do toque é cada vez mais evidente no cotidiano, em grande parte, por conta da ascensão de aparelhos eletrônicos que empregam a interação natural usando o corpo humano, como *smartphones* e *tablets*, que também oferecem retorno tátil para o usuário. Isto é reiterado

por estudos recentes, que afirmam que a perda do senso de toque pode vir a ser catastrófica para o ser humano [25].

Uma das especialidades clínicas na qual o senso de toque é essencial é o exame de palpação. Nele, um profissional da medicina apalpa uma área de interesse com seus dedos em busca de pontos de referência sob a pele do paciente com finalidade sentir a presença de características anatômicas ou fisiológicas que possam indicar anomalias. Este exame pode ser feito para avaliação do paciente ou orientação para uma intervenção. Em treinamento virtual, palpação e resposta háptica requerem manipulação tátil direta com vários dedos e pontos de contato, o que consiste em uma tarefa desafiante a ser implementada, fazendo com que ela seja frequentemente ignorada. Quando incluída, tal manipulação usualmente é bastante simplificada.

Apesar de existirem várias ferramentas desenvolvidas ou em desenvolvimento objetivando simulação de palpação, ainda não foram encontrados na literatura artigos que revisem tais trabalhos com a finalidade de sistematizar métodos, técnicas e tecnologias empregados.

Revisões sistemáticas utilizam uma série de passos projetados e bem definidos de acordo com um protocolo previamente estabelecido e documentado. Visto que estas revisões podem ser auditadas, resultados mais confiáveis podem ser produzidos, tornando-as independentes dos revisores que as avaliaram inicialmente.

Este artigo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados de uma revisão sistemática para identificar o estado da arte na área de simulação de exame de palpação com retorno háptico. Neste contexto, foram inspecionados artigos com foco no desenvolvimento, uso e avaliação de técnicas e ferramentas que simulem o exame de palpação com retorno háptico em diversas áreas de aplicação dentro da medicina.

Além desta introdução, este artigo é dividido nas seguintes seções: a Seção II descreve a metodologia utilizada nesta revisão sistemática, a Seção III contém a descrição e análise

dos estudos revisados, a Seção IV discute os resultados encontrados, e por fim, na Seção V são relatadas as considerações finais deste trabalho.

II. METODOLOGIA

A Revisão Sistemática foi conduzida em três fases: i) planejamento, no qual as diretrizes de pesquisa foram baseadas num protocolo; ii) condução, que consistiu na execução da pesquisa e seleção de trabalhos de interesse de acordo com os critérios de inclusão e exclusão definidos no protocolo; iii) extração de dados, na qual os estudos selecionados foram investigados a fim de entender o estado da arte na área sendo investigada.

No protocolo definido para a etapa de planejamento, a seguinte questão de pesquisa foi especificada: "Quais são as técnicas e ferramentas existentes para simular exame de palpação com retorno háptico?"

Para responder a pergunta especificada, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: *force feedback*, *haptic feedback*, *haptics*, *palpation* e *simulation*, e as seguintes bases de dados: *IEEE Xplore*, *ACM Digital Library* e Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo (USP). Todos os estudos encontrados relacionados à área de pesquisa em questão foram considerados, independentemente do ano de publicação.

A revisão sistemática foi conduzida de Agosto de 2013 até Dezembro de 2013. A busca por materiais que tratavam de simulação de exame de palpação com retorno háptico retornou 152 trabalhos, dos quais 132 estavam na base de dados *IEEE Xplore*, 17 na base de dados *ACM Digital Library* e 3 na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP. Do total de trabalhos coletados, após aplicar os critérios de inclusão e exclusão, 22 artigos foram selecionados e analisados por completo, sendo 18 da base *IEEE Xplore* e quatro da *ACM Digital Library*. Os critérios utilizados para incluir um trabalho nesta revisão foram: (a) Trabalhos que apresentem técnicas ou ferramentas que simulem exame de palpação com retorno háptico; (b) Trabalhos que usem ou referenciem técnicas ou ferramentas que simulem exame de palpação com retorno háptico. Trabalhos que apresentem técnicas ou ferramentas que simulem exame de palpação sem retorno háptico foram excluídos.

De cada estudo, foram extraídos os seguintes atributos: técnica ou a ferramenta desenvolvida, área de aplicação, tipo de dispositivo tátil utilizado e algoritmo utilizado. Posteriormente, foi feita uma análise das principais tendências e dificuldades das respectivas áreas de aplicação, considerando os resultados e as avaliações realizadas, a fim de identificar possíveis oportunidades de pesquisas nessas áreas no que diz respeito ao desenvolvimento de simuladores de exame de palpação com retorno háptico.

III. RESULTADOS

A seguir, é apresentada uma síntese dos 22 artigos analisados. Cada um dos artigos foi analisado individualmente, dividido em categorias que são analisadas nas Seções III.A a III.C. A divisão em categorias considerou

tanto a área de aplicação do trabalho quanto o algoritmo utilizado na implementação da ferramenta. A Tabela I lista os artigos selecionados, considerando os atributos deles extraídos.

A Figura 1, que mostra um gráfico de quantidade de trabalhos no tempo, revela que as pesquisas na área de palpação com retorno háptico são recentes, sendo que a mais antiga foi conduzida no ano de 2000. O gráfico exhibe que há uma grande concentração dos trabalhos nos últimos cinco anos. Isto também expõe o fato de que existem muitos desafios a serem resolvidos numa área que, apesar de nova, tem muitos trabalhos promissores e apresenta uma tendência de crescimento.

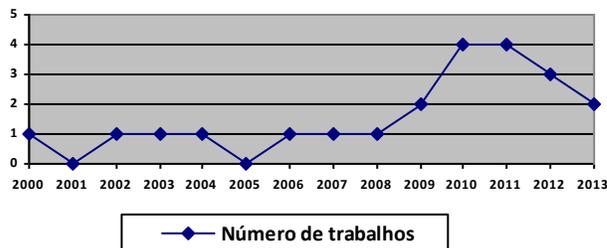


Figura 1. Gráfico de quantidade de trabalhos no tempo

A Figura 2 exhibe o gráfico com a porcentagem de trabalhos de cada tipo de dispositivo háptico. Verifica-se que os dispositivos *Phantom* foram adotados em 52% dos trabalhos analisados, evidenciando o seu prestígio na área de Realidade Virtual, assim como o seu excelente custo-benefício, discutido posteriormente neste trabalho.

Dispositivos hápticos utilizados

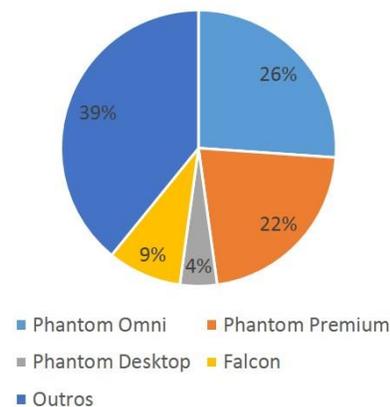


Figura 2. Gráfico de porcentagem de dispositivos hápticos utilizados nos trabalhos

A Figura 3 exhibe o gráfico com a porcentagem de trabalhos divididos por área de aplicação. É evidente que existe um grande interesse no desenvolvimento de trabalhos de simulação de palpação para procedimentos cirúrgicos. Este interesse é discutido posteriormente neste trabalho, assim como os demais aspectos que envolvem as escolhas das demais áreas de aplicação.



Figura 3. Gráfico de porcentagem de áreas de aplicação dos trabalhos

A. Áreas de aplicação

A revisão conduzida mostra que, nos últimos anos, em especial na última década, foram conduzidas várias pesquisas no sentido de oferecer retorno háptico aos simuladores de palpação.

1) Procedimentos cirúrgicos

Dez trabalhos estão contidos na área de procedimentos cirúrgicos. Esta área, em sua grande maioria, apresenta uma tendência crescente de desenvolvimento de recursos para auxílio em cirurgias minimamente invasivas. Este tipo de cirurgia está sendo cada vez mais adotado no campo médico, em vista das suas vantagens significativas em relação às cirurgias tradicionais.

Contudo, a maior dificuldade deste tipo de cirurgia reside no fato de que a percepção dos profissionais pode ficar comprometida, devido ao menor campo de visão do qual eles dispõem, coordenação inapropriada entre os olhos e as mãos e, acima de tudo, a limitação de retorno de força dos instrumentos médicos [9].

Assim, o investimento em simuladores que permitam ao futuro cirurgião praticar e desenvolver as competências necessárias para a realização das cirurgias antes de aplicá-las em pacientes reais, é cada vez mais encorajado e o resultado já é bastante visível, dado o vasto leque de trabalhos que almejam oferecer melhorias nesta área.

Um dos principais focos dos trabalhos analisados, como, por exemplo, os trabalhos [1] e [21], é desenvolver modelos de tecidos moles que aumentem o nível de realismo da palpação, aproveitando as características de tecidos reais, e adaptando-as, utilizando algoritmos como massa-mola e elementos finitos, os quais serão detalhados na Seção III.B.

Outro foco bastante perceptível dos trabalhos reside no âmbito do treinamento das cirurgias, pois a sua dificuldade de realização pode também prejudicar o aperfeiçoamento das competências necessárias para este procedimento. Um trabalho a ser evidenciado neste contexto é o [19], que desenvolveu um sistema de simulação cirúrgica com a função de treinamento que lida com o aspecto de herança, ou seja, permite que os praticantes sintam as sensações de cirurgiões experientes enquanto operam. Desta maneira, além de contar com o recurso do retorno de força, que por si só já oferece maior aprendizado ao usuário, este sistema estende esta

funcionalidade no sentido de retornar ao usuário a sensação correta, a qual é disponibilizada pela contribuição do profissional experiente.

2) Palpação para detecção de câncer

O exame de palpação é um dos principais meios de identificação de vários tipos de câncer e dispõe de uma incontestável taxa de sucesso na detecção e prevenção deles. Mesmo assim, muitos profissionais de medicina não têm plena confiança em suas habilidades para a condução deste exame, em grande parte por conta da ausência de treinamento, o qual eles gostariam de ter, caso lhes fosse oferecida a oportunidade [23].

O grande problema de simulação desses procedimentos reside na dificuldade de proceder com este treinamento, visto que muitos dos modelos atuais são restritos a determinados casos. Este cenário não reflete a realidade, uma vez que cada paciente tem determinadas particularidades, o que torna a sua simulação mais difícil.

Na revisão foram encontrados quatro trabalhos que desenvolveram ferramentas nesta área. Foi possível constatar que todos eles mostraram uma preocupação com a calibração dos parâmetros para detecção de tumores. Os trabalhos [6] e [7] têm foco no desenvolvimento e estudo de caso de um simulador de palpação da mama, utilizando realidade aumentada. Em [6] o foco da renderização estava numa reprodução fiel da força normal retornada ao longo da palpação. Esta reprodução foi alcançada com sucesso, visto que na avaliação realizada, as taxas de similaridade dos tumores físicos e virtuais foram semelhantes, e os participantes foram capazes de localizar o tumor na mesma quantidade de tempo.

McCreery *et al.* [13] desenvolveram um trabalho para avaliar a performance necessária exigida para que um sensor detecte e localize pequenos tumores no pulmão. Os resultados indicaram que a comparação entre forças de palpação revelam uma maior diferença na presença de um tumor, com um alcance de detecção de zero a dez Newtons e resolução de 0.1N. Com estas descobertas, os pesquisadores esperam aperfeiçoar os métodos de sensação tátil para localização de tumores no pulmão.

3) Radiologia intervencional

A palpação na radiologia intervencional tem um papel importante no propósito de tratar patologias como sangramento, tumores, bloqueio de artérias e aneurismas, constituindo uma alternativa efetiva para a cirurgia tradicional [10]. Contudo, conseguir acesso às veias e realizar a navegação de instrumentos dentro delas requer habilidades cujo treinamento constitui uma tarefa difícil.

A técnica *Seldinger* é o principal recurso utilizado para acessar uma veia ou artéria, e consiste em guiar uma agulha considerando o auxílio da sensação de toque do operador ou imagens de ultrassonografia. Há uma grande chance de complicações nesta técnica, visto que ela acessa veias doentes, as quais são mais sensíveis e suscetíveis a

TABLE I. SUMÁRIO DE TODOS OS ARTIGOS ANALISADOS

Artigo	Objetivo	Critério de inclusão	Área de aplicação	Dispositivo háptico	Algoritmo
[1]	Desenvolvimento de um modelo massa-mola não linear para simulação em tempo real de tecidos moles deformáveis e retorno de força para um operador humano	a	Procedimentos cirúrgicos	<i>Phantom Premium 1.5</i>	Massa-mola
[2]	Proposição de um modelo deformável baseado num processo de propagação de força sucessiva	a	Procedimentos cirúrgicos	<i>Phantom Desktop</i>	Massa-mola
[3]	Desenvolvimento de um ambiente de treinamento de palpação da artéria femoral e inserção de agulha, que são os passos iniciais de vários procedimentos intervencionais de radiologia	a	Radiologia intervencional	Dispositivo <i>Falcon</i> adaptado e <i>Phantom Omni</i> adaptado	Massa-mola
[4]	<i>Survey</i> que discute o papel dos recursos hápticos em aplicações de treinamento médico	b	Todas as áreas da medicina que utilizam dispositivos hápticos	Vários são mencionados	Não informado
[5]	Desenvolvimento de um aparato físico que oferece retorno háptico aos usuários na ponta do dedo durante a palpação de uma superfície externa e sensação de compressão em volta do dedo durante a inserção no corpo	a	Procedimento de toracostomia com tubo (inserção de tubo no tórax)	Dispositivo de compressão adaptado em um dispositivo <i>Phantom Omni</i> que oferece retorno háptico	Não informado
[6]	Exame do uso de aumento no contexto da palpação de tumor na mama, no sentido de melhorar o retorno de força de um seio de silicone com forças simuladas de tumores virtuais, através da introdução e avaliação de um algoritmo para oferecer estes aumentos	a	Palpação para detecção de câncer	<i>Phantom Premium 1.5</i>	Não informado
[7]	Estudo de caso de sistema previamente desenvolvido para palpação de tumor da mama	a	Palpação para detecção de câncer	<i>Phantom Premium 1.5</i>	Não informado
[8]	Desenvolvimento de um sistema de catéter que permite a percepção háptica de estruturas de tecido de movimento rápido, a fim de aumentar a informação háptica no procedimento de cateterização	a	Procedimento de inserção de cateter	Dispositivo próprio desenvolvido para o trabalho	Não informado
[9]	Neste trabalho são apresentados algoritmos computacionalmente eficientes para simulação em tempo real de procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos	a	Procedimentos cirúrgicos	<i>Phantom Omni</i>	Método de esferas finitas
[10]	Desenvolvimento de um simulador virtual da técnica de <i>Seldinger</i> composta de duas estações de trabalho: um pulso simulado é apalrado, num ambiente imersivo, para guiar a punção de agulha e dois dispositivos hápticos oferecem uma interface na qual numa agulha pode direcionar um fio-guia e um catéter dentro da veia, utilizando fluoroscopia virtual	a	Radiologia intervencional	<i>Workstation 1: Phantom Omni</i> para simulação da movimentação da seringa, <i>Workstation 2: Dispositivo háptico para manipulação da seringa dentro da artéria femoral e Vascular Simulation Platform</i> para cateterização	Método de elementos finitos, modelo massa-mola, simulação de inserção de seringa rígida tridimensional de Vidal
[11]	Desenvolvimento de um simulador de RV para educação na prática de exames ginecológicos, oferece visualização estereoscópica e retorno háptico para realizar a identificação de corpos malignos comumente encontrados neste tipo de exame	a	Ginecologia	<i>Phantom Omni</i>	Não informado
[12]	Desenvolvimento de um teleoperador cirúrgico com seis graus de liberdade	a	Procedimentos cirúrgicos	Sistema cirúrgico da Vinci	Não informado
[13]	Foram feitos experimentos conduzidos em pulmões suínos, utilizando tumores artificiais, para elucidar uma medida de sensor requerida para detectar a presença de um tumor	a	Palpação para detecção de câncer	Gamma: um dispositivo de 6 graus de liberdade	Não informado
[14]	Desenvolvimento de um sistema de treinamento de palpação mecânica para tratamento do músculo cardíaco e proposição de um modelo de sistema de mola, para simulação da sensação de palpação	a	Procedimentos cirúrgicos	Dispositivo de produção de sensação cinestésica <i>Linear Slider</i>	Massa-mola
[15]	Calibração de um instrumento de sensação tátil e sua integração com uma interface de visualização que permite o retorno de forças de palpação	a	Procedimentos cirúrgicos	<i>TactArray</i>	Não informado

Artigo	Objetivo	Critério de inclusão	Área de aplicação	Dispositivo háptico	Algoritmo
[16]	Investigação dos efeitos de retorno de força lateral na detecção e localização de nódulos embutidos em tecidos moles através de um sistema teleoperado	a	Palpação para detecção de câncer	TACTIP e dispositivo háptico <i>Falcon</i>	Não informado
[17]	Design e avaliação de um display tátil que reproduz retorno de pulsos na ponta do dedo do cirurgião	a	Procedimentos cirúrgicos	Display tátil pneumático de pulsos	Não informado
[18]	Apresentação de um método integrado de força tátil para localizar tumores de forma minimamente invasiva utilizando robôs	a	Procedimentos cirúrgicos	<i>Quanser Haptic Wand</i>	Não informado
[19]	Desenvolvimento de um sistema de simulação cirúrgica com a função de treinamento, que permite que os praticantes sintam as sensações de cirurgões experientes enquanto operam	a	Procedimentos cirúrgicos	<i>Phantom Premium 1.5</i>	Massa-mola
[20]	Apresentação de um algoritmo de interação para palpação com arrasto de tecido, que utiliza um algoritmo de força multi-objeto para suportar múltiplas camadas de anatomia e um algoritmo de força de pulso para simulação de um pulso arterial	a	Palpação arterial	<i>Phantom Omni</i> modificado	Método dos elementos finitos
[21]	Descreve os componentes necessários para a um retorno háptico realista, concentrando-se na modelagem de tecido orgânico mole e também apresenta um método para medir os parâmetros dos modelos elasto-mecânicos de tecidos vivos	a	Procedimentos cirúrgicos	Interface háptica de controle de impedância construída para o projeto	Método dos elementos finitos
[22]	Desenvolvimento de uma série de simulações hápticas do corpo humano, através do computador, de forma a auxiliar estudantes no aprendizado de técnicas de palpação	a	Medicina osteopática e fisioterapia	Dois dispositivos hápticos <i>Phantom Premium 3.0</i>	Algoritmo de renderização de múltiplos pontos

oferecer desconforto ao paciente caso ocorra algum erro por parte do profissional [10].

Portanto, com o objetivo de auxiliar no treinamento deste procedimento, Luboz *et al.* [10] desenvolveram um simulador para a técnica *Seldinger*. Este simulador utiliza duas estações de trabalho, sendo uma para palpação vascular, anestesia local e punção com agulha, enquanto a outra é utilizada para cateterização. O simulador dispõe de vários dispositivos hápticos com retorno de força, mais notadamente o *Phantom Omni* na primeira estação de trabalho para punção com agulha e outros dois na segunda estação de trabalho (um para manipulação da agulha, desenvolvido pelos autores para o trabalho e outro para cateterização, o dispositivo comercial *Vascular Simulation Platform*). Na avaliação realizada por profissionais da radiologia, esta ferramenta foi considerada realista e razoavelmente precisa.

Dentro desta área, outro trabalho notável foi o de Coles *et al.* [3], que consistiu na implementação do simulador *PalpSim*, cujo objetivo é treinar o procedimento de palpação femoral e inserção de agulha. A palpação femoral conta com um dispositivo *Falcon* adaptado que oferece cinco graus de liberdade, o qual é conectado a uma bandeja de silicone que permite a palpação com os dedos das mãos. É utilizado um dispositivo *Phantom Omni* adaptado para simular a inserção da ponta de uma agulha, oferecendo três graus de liberdade. Para aumentar o realismo, o sistema também oferece, por meio de recursos de realidade virtual, a representação do ambiente virtual do procedimento. A avaliação do dispositivo, realizada junto a especialistas da área, obteve resultados positivos, visto que os profissionais o consideraram capaz de reproduzir as sutilezas de uma palpação real.

4) Medicina osteopática e fisioterapia

Nesta área, foi desenvolvido o trabalho *Virtual Haptic Back* (VHB) [22] cujo propósito foi conceber um modelo

gráfico e háptico realista do dorso humano, que poderia ser utilizado para treinamento médico em palpação, como um passo rumo a uma modelagem mais compreensiva do corpo humano. Assim, objetivou-se adicionar um componente científico ao aprendizado da arte de diagnóstico palpatório.

No VHB, usando dois dispositivos hápticos *Phantom 3.0*, foi implementada a palpação utilizando as duas mãos, buscando simular a técnica utilizada por estes profissionais. Além disso, o usuário, por meio de um monitor, poderia visualizar o dorso humano com a vértebra e escápula, e com o auxílio de um algoritmo massa-mola, era fornecido o retorno visual de colisão e deformação dos objetos virtuais.

5) Ginecologia

Na área ginecológica, a palpação da vagina e do colo do útero é importante para detecção da presença de nódulos cancerígenos, por meio da busca destes indícios e da verificação da elasticidade do tecido [11]. O problema deste exame está relacionado tanto à rara ocorrência de certas patologias durante a residência médica dos estudantes, assim como a falta de prática dos leigos em relação às forças ou ao toque necessário a ser aplicado, mesmo com o auxílio de um profissional.

Com o objetivo de sanar estes problemas, iniciou-se o desenvolvimento do SITEG, sistema que conta com o dispositivo háptico *Phantom Omni* para retorno de força, resultante da interação com o ambiente virtual tridimensional [11]. Para a modelagem do ambiente virtual contendo objetos virtuais que representam a parte exterior, o duto vaginal, o colo e o espéculo utilizado no exame, foi utilizado o software *Blender*. Os autores ressaltam que um ponto positivo a ser destacado é que, ainda que um professor não tenha como avaliar as forças aplicadas pelo estudante no simulador, este pode armazenar estes dados, e utilizá-los para oferecer uma classificação do estudante e de seu diagnóstico.

6) *Toracostomia com tubo*

A toracostomia com tubo é a inserção de um tubo no espaço pleural para drenagem de líquido, sangue ou ar, com o objetivo de aliviar a pressão nos pulmões [5]. Os simuladores podem ser grandes aliados para o treinamento deste procedimento que, na maioria das ferramentas existentes, não conta com retorno tátil.

A fim de agregar este recurso a um simulador descrito em [5], foi criado um aparato físico que oferece retorno de força direcionado à ponta do dedo do usuário durante a palpação de uma superfície externa, assim como a sensação de compressão ao redor do dedo durante a inserção do mesmo no corpo. Cada componente de constrição é constituído de dois invólucros de *nylon* revestido com um silicone de elastômero, colocado sobre as partes superior e inferior do dedo. Além disso, o dispositivo comunica-se com um ambiente virtual implementado em H3D [5], que auxilia na interação do usuário e sua percepção do paciente virtual.

7) *Procedimento de cateterização*

Os cateteres são tubos, que permitem aos profissionais da medicina acessar o interior do corpo humano facilmente e de forma indolor, por meio de orifícios naturais e das veias. Ainda que eles permitam o transporte de fluidos e drogas, assim como o desenvolvimento de dispositivos e aquisição de medidas, eles não permitem que os clínicos confirmem as propriedades físicas do tecido interno, por conta do movimento do tecido e limitações de transmissão dos tubos.

A fim de preencher esta lacuna, o trabalho de Kesner & Howe [8], busca aumentar a informação tátil disponível para os médicos durante procedimentos de inserção de cateter, por meio da oferta de retorno háptico durante procedimentos de palpação. Este trabalho em particular, apresenta um sistema de cateter que permite a percepção háptica de estruturas intracardíacas de movimento rápido, e mostra a importância de retorno háptico e compensação de movimento para percepção das propriedades de movimentação dos tecidos. O dispositivo háptico utilizado, o qual oferece um grau de liberdade, permite que o usuário forneça a posição do cateter, enquanto oferece retorno de força para o usuário.

8) *Palpação arterial*

O trabalho de Ullrich & Kulen [20] foi concebido com o objetivo de oferecer um *framework* de simulação de palpação, por meio do desenvolvimento de um algoritmo de interação com arrasto de tecido. Este algoritmo divide-se em outros dois: o primeiro que lida com as forças aplicadas pelos objetos do ambiente, com a finalidade permitir múltiplas camadas de anatomia e o segundo que proporciona retorno de força do pulso, que tem o objetivo de simular o pulso arterial.

É utilizado o método de elementos finitos para simulação de tecidos moles. O simulador oferece interação com ambas as mãos por meio da combinação das técnicas supracitadas, para que uma das mãos possa proceder com a palpação e a outra possa realizar a inserção da agulha. A validação do simulador evidenciou que o mesmo foi considerado relevante, assim

como o algoritmo de interação para palpação proposto também teve sua plausibilidade médica comprovada.

B. *Algoritmos*

A maioria dos trabalhos revisados dispõe de algum recurso de visualização do procedimento realizado. Nesses trabalhos são utilizados diversos algoritmos para funcionalidades como detecção de colisão dos objetos virtuais, assim como a deformação que ocorre neles após a colisão. A seguir são detalhados os algoritmos encontrados ao longo da revisão, seus respectivos propósitos no contexto do trabalho em que foram aplicados, bem como considerações gerais a respeito da sua escolha. Vale ressaltar que alguns dos trabalhos consistiram no desenvolvimento de ferramentas, sem qualquer funcionalidade referente à representação virtual e, portanto, estes não serão considerados nesta seção.

1) *Massa-mola*

O algoritmo massa-mola é amplamente utilizado para modelagem de objetos deformáveis, visto que podem ser implementados facilmente e resolvidos em tempo real, além de possibilitarem a formação de geometrias complexas de forma clara [1]. Foi possível observar que o principal propósito da utilização deste algoritmo foi para modelagem de tecidos moles, ou seja, representando a pele humana, que deve ser deformada para proporcionar um retorno visual quando ocorre alguma colisão com objetos do ambiente virtual. Quando aliado ao retorno de força, este método oferece simulação da interação completa ao usuário.

De nove trabalhos que citaram algoritmos utilizados, quatro adotaram o algoritmo massa-mola para a modelagem nos trabalhos. Basafa & Sefati [1], em particular, utilizaram-no com o intuito de representar deformações de tecidos e calcular o retorno de força durante simulações em tempo real. Para isto, também foi conduzida uma calibragem dos parâmetros para adaptar as características do modelo desenvolvido às de tecidos reais. Para simulação do comportamento de força-deslocamento não-linear de órgãos de tecidos moles, as molas lineares foram substituídas por não-lineares, assim como foi acrescentada uma força de amortecimento a cada nó no modelo. Todos estes recursos foram utilizados para melhorar o realismo da simulação. A avaliação realizada comprovou esta melhoria, dado que os indivíduos do experimento caracterizaram-na como bastante realista e agregadora.

Choi, Sun & Heng [2] adotam a mesma técnica de modelagem, sendo que a deformação de tecidos é simulada como um processo de propagação de força entre os pontos de massa, ou seja, quando um estímulo é aplicado a um nó, a força é propagada do ponto de contato para os seus nós vizinhos por meio das molas interconectadas. Para implementar o mecanismo de propagação, uma lista de nós é criada, com base na busca em profundidade que arranja as camadas de nós na vizinhança, até o ponto de contato na ordem de profundidade crescente.

Segundo os autores, este modelo é uma alternativa computacionalmente eficiente e de fácil implementação, já que as formulações de matrizes e operações sobre elas não são

necessárias. A escalabilidade é alcançada por meio do controle de profundidade de penetração, que requer processamento extra para determinar a penetração ótima. A avaliação do modelo, feita por meio de um sistema com retorno háptico, comprovou a sua viabilidade na simulação de tecidos reais.

2) Método dos elementos finitos

Depois do algoritmo massa-mola, o método dos elementos finitos foi a técnica mais citada nos trabalhos, para proceder com a modelagem de tecidos moles deformáveis. Vuskovic, Kauer & Szekely [21] afirmam que este método é um meio comum e preciso de resolver problemas mecânicos contínuos de valores-limite, definidos por superfícies de contato e forças. Porém, os autores também atribuem sua maior desvantagem ao seu alto custo computacional, o que limita o seu uso a sistemas simples. Por outro lado, afirmam que com uma formulação apropriada e implementação usando algoritmos paralelos e escaláveis, em *hardware* também paralelo, o método pode ser aplicado a sistemas mais complexos.

No trabalho [21] é aplicado efetivamente o método de elementos finitos na descrição dos principais componentes necessários para um retorno de força realista nas cirurgias, concentrando-se na modelagem de tecido orgânico mole. Inicialmente, é feita a definição de equações mecânicas do material em questão, definindo sua relação tensão-deformação. Logo após, para a formulação do elemento, os autores utilizam uma abordagem Lagrangeana com interpolação de pressão. Em seguida, é feita a medição dos parâmetros dos materiais, ou seja, as constantes que regem os comportamentos de deformação deles. A fim de identificá-los, foi realizado um experimento de deformação, registrando as cargas aplicadas e as deformações resultantes, por meio de um dispositivo desenvolvido pelos próprios autores, que aplica pressão no material, capturando sua deformação ao longo do tempo. Os autores citam, ao final do trabalho, que o desejo é utilizar os valores encontrados na construção de um simulador de realidade virtual para procedimentos ginecológicos.

O trabalho [10] é o único exemplo que, além de utilizar o modelo massa-mola, também utiliza o método dos elementos finitos para a formulação da deformação da punção com agulha. Os autores utilizam os métodos em partes diferentes do simulador: na estação de trabalho que lida com a punção, é utilizado o método dos elementos finitos, enquanto na estação de trabalho na qual são realizadas a manipulação da agulha e a cateterização, é aplicado o método massa-mola. Os autores explicam que o método massa-mola, por ser computacionalmente mais eficiente, é aplicado na estação de trabalho mais complexa, enquanto na outra o método dos elementos finitos no contexto da punção com agulha é mais apropriado.

C. Dispositivos hápticos

Esta revisão tem como ponto principal reunir trabalhos que ofereçam retorno háptico nas simulações apresentadas. Portanto, com exceção de trabalhos que lidam especificamente com detalhes de renderização háptica, a seguir são descritos os principais dispositivos hápticos encontrados nos trabalhos.

1) Phantom

O dispositivo *Phantom*, em suas diversas versões, criado e é mantido pela empresa *Geomagic* (antiga *Sensable*) [24], aparece em doze trabalhos, e é um dos principais dispositivos comerciais disponíveis atualmente no mercado. As diferenças entre as versões estão nos recursos de interação, graus de liberdades, seu valor máximo de retorno de força, entre outras características.

A versão mais utilizada nos trabalhos é o *Phantom Omni* (atualmente chamado de *Geomagic Touch*) [24], com seis ocorrências. Por ter uma ferramenta semelhante a uma caneta *stylus* como principal instrumento de interação, este dispositivo é adotado como principal meio de simulação de procedimentos com agulha, visto que a estrutura é muito semelhante, como exemplificado em [11]. Grande parte da adesão dos pesquisadores a esta ferramenta também se deve à sua capacidade de adaptação simples e eficiente.

Em [3], a estrutura da caneta foi substituída pela ponta de uma seringa, a fim de acrescentar maior realismo à interação. Em [20], por sua vez, os pesquisadores adaptaram o dispositivo, acoplando à estrutura de interação um pequeno bloco de borracha esponjosa, para realizar a palpação com os dedos, juntamente com a manipulação da agulha através da interação tradicional oferecida pelo dispositivo.

O projeto *Virtual Haptic Back*, apresentado em [22], utiliza como principal meio de interação háptica o dispositivo *Phantom Premium 3.0*, que também tem uma estrutura semelhante a uma caneta para interação háptica. Para este projeto também foi feita uma adaptação no dispositivo a fim de permitir que os usuários pudessem interagir com o ambiente por meio das pontas dos dedos, ou seja, o ideal para treinamento do procedimento de palpação. O VHB utiliza dois dispositivos, de forma a condicionar o uso de ambas as mãos, o que reflete o ambiente real encontrado pelo profissional da área de medicina osteopática. Uma das principais vantagens deste dispositivo diz respeito ao seu retorno máximo de força, de 22N, melhorando o realismo oferecido ao usuário. Outra variação do dispositivo, o *Phantom Premium 1.5*, é utilizado nos trabalhos [1] e [19].

2) Falcon

O *Falcon* é um dispositivo háptico fabricado pela empresa americana *Novint* [25]. Este dispositivo foi originalmente concebido com o intuito de substituir o *mouse* em *video games* e outras aplicações. Contudo, ele também passou a ser explorado como um dispositivo háptico, dado que oferece três graus de liberdade e 9N de retorno máximo de força.

De acordo com Coles *et al.* [3], é o dispositivo comercial com três graus de liberdade com menor custo no mercado, e, por isso, foi adotado nos simuladores desenvolvidos em [3] e [16]. Em ambos os trabalhos, o dispositivo foi adaptado de alguma maneira, e foi utilizado em conjunto com outro dispositivo, por conta de ser um dispositivo bastante simples, o que justifica o seu baixo custo.

IV. DISCUSSÃO

A área de aplicação com maior quantidade de trabalhos é a de procedimentos cirúrgicos, especialmente na modalidade de cirurgias minimamente invasivas, que, conforme citado anteriormente, diminui consideravelmente o tempo de permanência do paciente no hospital, porém apresenta dificuldades em relação ao procedimento em si, que não oferece uma percepção háptica adequada aos cirurgiões.

Quatro dos trabalhos nesta área tiveram como principal objetivo melhorar os algoritmos de modelagem de objetos e renderização háptica, buscando, desta forma, amenizar a dificuldade de ausência de retorno háptico encontrada nas cirurgias minimamente invasivas.

A partir das avaliações que foram realizadas nestes trabalhos, a impressão geral foi de que os algoritmos desenvolvidos receberam uma validação satisfatória, visto que estão minimizando as principais dificuldades deste tipo de cirurgia.

Um ponto importante a ser ressaltado é o fato de que somente o trabalho [2] introduziu uma nova proposta de algoritmo de deformação. Isto se apresenta como uma oportunidade de pesquisa, porque a variação do algoritmo de deformação de tecidos moles com retorno háptico exige respostas rápidas em tempo real. Isso implica em vários desafios, visto que várias tarefas são realizadas simultaneamente como: cálculo das forças de retorno a partir da força imprimida pelo usuário (que em geral é um processo iterativo), renderização visual e háptica com realismo. Assim, é visível a lacuna em relação a um algoritmo de deformação que possa cumprir todas essas tarefas de forma eficiente, pois há necessidade de que os simuladores apresentem uma interação mais fluida, com uma maior dependência de técnicas de programação mais robustas e menos custosas.

O comentário final em relação aos próximos passos nos trabalhos pesquisados em geral, trata da manutenção dos esforços para aperfeiçoamento das técnicas de renderização, visando a minimizar continuamente o custo computacional.

Os trabalhos que introduziram novos simuladores, apesar de serem em sua maioria protótipos, tiveram avaliações conduzidas com resultados muito promissores no que concerne à capacidade do produto final. O trabalho [17], em particular, apresentou um índice de 96,3% de respostas corretas na avaliação realizada com o simulador de palpação para cirurgias, e apresentou como trabalho futuro a integração do *display* de pulso tátil ao console principal de um sistema cirúrgico robótico. Isto pode ser indício da capacidade de escalabilidade desses novos dispositivos, que aliados a outros equipamentos, podem resultar em um dispositivo ainda mais robusto do que imaginado inicialmente.

Em relação às demais áreas, ainda que a quantidade de trabalhos mostra-se mais ínfima, os avanços mostraram-se bastante otimistas, especialmente na área de treinamento. Machado & Moraes [11] e Tokuyasu *et al.* [19], por exemplo, apresentam sistemas que buscam proporcionar uma experiência completa de aprendizado em áreas completamente distintas, porém aproveitando conceitos e técnicas muito

semelhantes. Sendo assim, no contexto do exame de palpação, ainda que as áreas sejam distantes, elas podem compartilhar as novas descobertas e trabalhar em conjunto para criar simuladores cada vez mais completos.

Esta proximidade das áreas fica bastante perceptível em relação ao uso dos algoritmos explicitados ao longo desta revisão, assim como a adoção de dispositivos hápticos semelhantes para diferentes finalidades. O *Phantom Omni*, por exemplo, utilizado em vários trabalhos, além de seus recursos de última geração, também é favorecido pela sua acessibilidade em relação a preço e mobilidade, visto que a tecnologia háptica ainda é bastante cara e inacessível para determinadas instituições acadêmicas. Até por conta deste fator, alguns dos trabalhos apresentam novos dispositivos [22] ou adaptam dispositivos mais acessíveis às necessidades do projeto [16]. Conforme frisado anteriormente, este fato também é válido para o dispositivo *Falcon*, que, em meio a tantos dispositivos de custo alto, se destaca pelo seu baixo custo, apesar de ser relativamente limitado e contar com algumas adaptações nos trabalhos em que foi utilizado.

Na Tabela II, são apresentadas as características dos principais dispositivos hápticos adotados nos trabalhos, com ênfase na linha de equipamentos *Phantom* e *Falcon*, que foram as mais utilizadas. As informações evidenciam que a grande adesão a estes dispositivos se dá em razão do seu custo baixo, especialmente para os equipamentos *Phantom Omni* e *Falcon*, que também não deixam a desejar em relação a características como valor máximo de força retornada e grau de liberdade. Ainda assim, há outros recursos dos dispositivos que devem ser levados em conta, como, por exemplo, a amplitude do movimento que se pretende executar no simulador. Esta é uma peculiaridade que torna o equipamento mais robusto, e, por consequência, eleva o seu custo, como exibido na Tabela II. De qualquer forma, estas características nunca devem ser tomadas como critério isolado na escolha de um equipamento, visto que cada projeto tem suas nuances, o que faz com que os aspectos devam ser analisados em conjunto, a fim de que seja feita uma seleção plausível.

Ainda há uma lacuna existente, no que diz respeito à calibragem dos parâmetros ideais de retorno háptico. No trabalho [21], por exemplo, por meio da medição mecânica da deformação de materiais, buscou-se definir os parâmetros de retorno de força. Este é um começo muito promissor, para que todas as áreas possam se engajar em esforços conjuntos, a fim de oferecer um retorno de força cada vez mais realista às suas simulações.

Um ponto positivo a ser ressaltado, é a adoção de tecnologias semelhantes entre trabalhos de diferentes áreas, o que permite que todos visualizem as mesmas vantagens e desvantagens de certas técnicas, contribuindo com sua evolução. Por exemplo, trabalhos das áreas de procedimentos cirúrgicos, cateterização e palpação arterial empregaram esforços em pesquisas para melhorias na percepção de retorno háptico. As áreas de procedimentos cirúrgicos e radiologia, adotaram o método de elementos finitos para o desenvolvimento de ferramentas pertinentes a elas.

TABLE II. TABELA DE CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS HÁPTICOS

Dispositivo háptico	Fabricante	Amplitude de movimento	Movimento	Feedback de força	Força máxima	Preço	Trabalhos que empregam o dispositivo
<i>Geomagic Touch</i> (antigo <i>Phantom Omni</i>)	<i>Geomagic</i>	Movimento da mão girando no pulso	6 graus de liberdade	3 graus de liberdade	3.3 N	US\$ 3,900	[3], [5], [9], [10], [11], [20]
<i>Geomagic Touch X</i> (antigo <i>Phantom Desktop</i>)	<i>Geomagic</i>	Movimento da mão girando no pulso	6 graus de liberdade	3 graus de liberdade	7.9 N	€ 10.000	[2]
<i>Phantom Premium 1.5</i>	<i>Geomagic</i>	Movimento do antebraço girando no cotovelo	3 graus de liberdade com 3 graus adicionais opcionais	3 graus de liberdade	8.5 N	€ 22.727	[1], [6], [7], [19]
<i>Phantom Premium 3.0</i>	<i>Geomagic</i>	Movimento completo do braço girando no ombro	3 graus de liberdade com 3 graus adicionais opcionais	3 graus de liberdade	22 N	€ 50.909	[22]
<i>Falcon</i>	<i>Novint</i>	Movimento da mão girando no pulso	3 graus de liberdade	3 graus de liberdade	9 N	US\$ 250	[3], [16]

No concernente aos pontos de contato, observou-se que, ainda que alguns dos simuladores lidem com exames de palpação, eles apresentam somente um ponto de contato, o que é uma característica limitante por parte do dispositivo utilizado, como em Machado & Moraes [11]. O usuário dispõe de uma experiência menos realista, por conta do uso reduzido das mãos, assim como a concentração do retorno de força num único ponto da mão. Em consequência disso, o aprendizado também pode ser prejudicado em simuladores de treinamento. Um dispositivo háptico inadequado para um determinado sistema torna-se um obstáculo no sentido de não permitir que seja explorado o potencial completo do esforço computacional e de desenvolvimento empregado no projeto.

A fim de contornar este empecilho, é proposta a adoção de dispositivos mais adequados à proposta do exame de palpação, como as luvas de dados. Por meio de tecnologia mais avançada, elas oferecem mais pontos de contato, já que permitem tanto a interação quanto o retorno de força em todos os dedos e palma da mão. Evidentemente, a robustez que este dispositivo traz é acompanhada de um maior custo monetário, assim como um maior custo de trabalho, decorrente da necessidade do desenvolvimento de algoritmos mais complexos, a fim de acomodar o nível de realismo que este equipamento proporciona. Nos estudos analisados, observou-se que muitos autores adaptaram dispositivos que não eram diretamente relacionados aos seus trabalhos. Sendo assim, poderia ser encorajada uma discussão acerca da acessibilidade destes dispositivos, a fim de melhorar a qualidade dos trabalhos.

Em suma, todos esses pontos constituem várias linhas de pesquisa que podem ser exploradas. A área de visualização, em particular, foi pouco abordada nos trabalhos, sendo que em alguns deles, o dispositivo de visualização utilizado sequer era mencionado. Isto é preocupante, dado que o sentido da visão é tão essencial quanto o do toque para tornar a interação mais realista. Poderiam ser feitas pesquisas sobre formas de melhorar a interação, aproveitando-se de recursos tecnológicos cujo custo tem diminuído nos últimos anos, como monitores.

A área de paralelismo também quase não foi mencionada nos artigos selecionados, e sua importância para os

simuladores é incontestável, no sentido de oferecer soluções que permitam agregar cada vez mais recursos aos mesmos, sem deixar a desejar no realismo oferecido. Discussões de aperfeiçoamentos de técnicas de deformação que integrem os meios visual e háptico de forma eficiente são muito pertinentes. Tais discussões também permeiam a área de visualização, citada anteriormente, assim como a área de sensação de toque, bastante discutida ao longo deste trabalho.

V. CONCLUSÃO

Esta é uma revisão inicial e que deverá ser completada, com a inclusão de mais bases científicas e trabalhos. Mesmo assim, foi possível perceber que os estudos aqui revisados propiciaram uma visão global sobre a simulação de palpação com retorno háptico. Como pode ser visto, esta é uma área de pesquisa muito atual, com trabalhos bastante recentes. Acima de tudo, é notável o fato de que as avaliações nos artigos foram muito positivas e receptivas em relação aos trabalhos inovadores.

Algumas áreas exigem que o indivíduo passe por um treinamento virtual antes de realizar o procedimento real, como a área de aviação. Na simulação de procedimentos em Medicina não poderia ser diferente; quanto mais horas de treinamento adequadas, menores poderão ser os riscos aos pacientes. Todavia, para que este objetivo seja alcançado a ferramenta deve oferecer o realismo necessário para um aprendizado completo.

A palpação constitui um ato importante na detecção de muitas anomalias em exames reais, visto que muitos procedimentos médicos são frequentemente precedidos ou acompanhados pelo uso dela [20]. Mesmo em vista da importância desta técnica, a mesma continua sendo pouco explorada em procedimentos virtuais. Isto decorre do desafio que existe em reproduzir a sensação de tato com realismo, porque o tato em si é muito sensível a várias sensações [26].

Robles-De-La-Torre [26] relaciona a situação real de um indivíduo que sofre de ausência da sensação de tato a uma interface háptica que oferece retorno de força de baixa qualidade. Isto acaba por tornar impossível que os usuários de uma ferramenta de simulação cirúrgica, por exemplo, atinjam um nível de desempenho que se espera deste procedimento.

Desta forma, devem ser estudadas maneiras de melhorar o realismo, assim como as preocupações computacionais inerentes, como a eficiência de algoritmos de colisão e deformação, a precisão dos dispositivos hápticos, o paralelismo demandado por estes recursos, entre outras.

A maioria dos estudos conduzidos está na área de procedimentos cirúrgicos, com poucos estudos nas demais áreas, especialmente na área de detecção de câncer, a qual imaginou-se inicialmente que seria plenamente contemplada. De qualquer forma, a adoção de técnicas e ferramentas muito semelhantes entre as áreas oferece a perspectiva do desenvolvimento de mais trabalhos nesta área de aplicação.

Em relação aos dispositivos utilizados, foi possível concluir que os dispositivos da linha *Phantom* foram os mais adotados, em razão da sua confiabilidade e relação custo-benefício. Também concluiu-se que parece existir uma lacuna no que diz respeito à acessibilidade a estes dispositivos, visto que muitos foram adaptados para atender às necessidades dos respectivos trabalhos, enquanto existem dispositivos de maior custo que atenderiam a essas necessidades prontamente.

Na área de técnicas de programação, as que se destacaram nos trabalhos foram o método massa-mola e o método dos elementos finitos, utilizadas para deformação, por conta da sua eficiência na execução em tempo real. Entretanto, apenas um trabalho propôs uma nova abordagem para o algoritmo de deformação. Ou seja, existe uma lacuna nesta área, no sentido de apresentar novas pesquisas de algoritmos de deformação que sejam capazes de resolver os desafios de lidar com várias tarefas em tempo real, de maneira eficiente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processos 559931/2010-7 e 401745/2013-9, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) – Processo 2010/15691-0 e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia -- Medicina Assistida por Computação Científica (INCT-MACC), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

[1] E. Basafa, S. Sefati, A. Okamura. Assessing the quality of force feedback in soft tissue simulation. In Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE, pages 3451–3454, 2011.

[2] K.-S. Choi, H. Sun, P.-A. Heng. Interactive deformation of soft tissues with haptic feedback for medical learning. Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on, 7(4):358–363, 2003.

[3] T. Coles, N. John, D. Gould, D. Caldwell. Integrating haptics with augmented reality in a femoral palpation and needle insertion training simulation. Haptics, IEEE Transactions on, 4(3):199–209, 2011.

[4] T. Coles, D. Meglan, N. John. The role of haptics in medical training simulators: A survey of the state of the art. Haptics, IEEE Transactions on, 4(1):51–66, 2011.

[5] K. Everett, R. Exon, S. Rosales, G. Gerling. A virtual reality interface to provide point interaction and constriction to the finger. In Systems and Information Engineering Design Symposium, 2009. SIEDS '09., pages 203–207.

[6] S. Jeon, S. Choi, M. Harders. Rendering virtual tumors in real tissue mockups using haptic augmented reality. Haptics, IEEE Transactions on, 5(1):77–84, 2012.

[7] S. Jeon, B. Knoerlein, M. Harders, S. Choi. Haptic simulation of breast cancer palpation: A case study of haptic augmented reality. In Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2010 9th IEEE International Symposium on, pages 237–238, 2010.

[8] S. Kesner, R. Howe. Discriminating tissue stiffness with a haptic catheter: Feeling the inside of the beating heart. In World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE, pages 13–18, 2011.

[9] J. Kim, S. De, M. Srinivasan. Computationally efficient techniques for real time surgical simulation with force feedback. In Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2002. HAPTICS 2002. Proceedings. 10th Symposium on, pages 51–57.

[10] V. Luboz *et al.* Imagine seldinger: First simulator for seldinger technique and angiography training. Comput. Methods Prog. Biomed., 111(2):419–434, 2013.

[11] L. d. S. Machado, R. M. Moraes. Vr-based simulation for the learning of gynaecological examination. In Proceedings of the 16th International Conference on Advances in Artificial Reality and Tele-Existence, ICAT'06, pages 97–104, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2006.

[12] M. Mahvash *et al.* Force-feedback surgical teleoperator: Controller design and palpation experiments. In Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 2008. haptics 2008. symposium on, pages 465–471.

[13] G. McCreery, A. Trejos, R. Patel, M. Naish, R. Malthaner. Evaluation of force feedback requirements for minimally invasive lung tumour localization. In Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, pages 883–888.

[14] Y. Nakagawa, R. Oguro. Haptic force simulation for cardiac muscle palpation training system. In ICCAS-SICE, 2009, pages 3781–3787.

[15] M. Perri, A. Trejos, M. Naish, R. Patel, R. Malthaner. Initial evaluation of a tactile/kinesthetic force feedback system for minimally invasive tumor localization. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 15(6):925–931, 2010.

[16] C. Roke, A. Spiers, T. Pipe, C. Melhuish. The effects of laterotactile information on lump localization through a teletaction system. In World Haptics Conference (WHC), 2013, pages 365–370.

[17] L. Santos-Carreras, K. Leuenberger, P. Reïtornaz, R. Gassert, H. Bleuler. Design and psychophysical evaluation of a tactile pulse display for teleoperated artery palpation. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, pages 5060–5066, 2010.

[18] A. Talasaz, R. Patel. Remote palpation to localize tumors in robot-assisted minimally invasive approach. In Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on, pages 3719–3724, 2012.

[19] T. Tokuyasu, K. Yufu, T. Shuto, N. Abe, A. Marui. Development of an inheritance assist system for experiencing operation skills by using a haptic function of phantom. Artif. Life Robot., 15(2):195–198, 2010.

[20] S. Ullrich, T. Kuhlen. Haptic palpation for medical simulation in virtual environments. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 18(4):617–625, 2012.

[21] V. Vuskovic, M. Kauer, G. Szekely, M. Reidy. Realistic force feedback for virtual reality based diagnostic surgery simulators. In Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on, volume 2, pages 1592–1598 vol.2.

[22] R. L. Williams, II *et al.* The virtual haptic back for palpatory training. In Proceedings of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces, ICMI '04, pages 191–197, New York, NY, USA, 2004.

[23] J. Wiecha, P. Gann. Provider confidence in breast examination. Family practice research journal, v. 13, n. 1, p. 37, 1993.

[24] Geomagic (2014). Disponível em: <<http://www.geomagic.com/>> Acesso em: 01 fev. 2014.

[25] G. Robles-De-La-Torre. The importance of the sense of touch in virtual and real environments. Ieee Multimedia, 13(3), 24-30, 2006.

[26] Novint Falcon (2014). Disponível em: <<http://www.novint.com/index.php/novintfalcon>>. Acesso em: 02 fev. 2014.