

Tópicos Especiais em Computação Gráfica

Realidade Virtual

Tato e Força

Márcio Serolli Pinho

Faculdade de Informática – PUCRS

5. Percepção e Geração de Tato, Força e Movimento

As sensações ditas *haptic* são um assunto bastante complexo que inclui mecanismos diferentes como percepção de tato, percepção de calor ou de frio, percepção de força, percepção de movimento e percepção de vibrações.

A língua inglesa possui a palavra *haptic* que expressa todas estas percepções em uma palavra apenas. Como em português não temos uma tradução para esta palavra, neste trabalho adotar-se-á algumas vezes a expressão em inglês a fim de dar maior fluência ao texto.

A percepção tátil depende da sensibilidade cutânea. Esta sensibilidade inclui a capacidade do ser humano de detectar estímulos mecânicos e térmicos na superfície da pele. Esta detecção é feita através de receptores existentes na pele.

As percepções de força e de movimento estão intimamente relacionadas. Sua detecção é produzida por receptores nos músculos, juntas e tendões. Também chamada de percepção cinestésica, esta percepção descreve a sensação que uma pessoa tem sobre sua mão quando a faz viajar através do ar ou quando sente um sopro sobre ela.

A percepção de força depende da sensibilidade à oposição muscular que é capaz de resistir a forças mecânicas aplicadas sobre o corpo. Esta percepção, por sua vez, descreve a sensação que se tem quando se pressiona uma porta para tentar abri-la, ou quando se aperta uma fruta para avaliar se está madura ou não.

5.4 Aspectos anatomo-fisiológicos

A sensação de tato é o resultado de uma cadeia de eventos de que inicia com um estímulo (calor, pressão, vibração, etc) aplicado sobre o corpo. A partir do estímulo, os **receptores** existentes na pele produzem descargas elétricas (chamadas de **ação potencial**) que são injetadas em um nervo chamado de **nervo aferente**. A partir disto um grupo de neurônios chamados de **segunda-ordem** conduzem o sinal à medula espinhal e esta ao tálamo, no cérebro. No cérebro, os neurônios de **terceira-ordem** completam o caminho fazendo o sinal chegar ao córtex cerebral onde as sensações são registradas [Seow, 1988].

5.4.1 Sensibilidade do tato

No que se refere à pressão, o ser humano é capaz de identificar diferenças de forças aplicadas sobre a pele com maior ou menor sensibilidade dependendo da área de contato do atuador e da região do corpo onde o atuador está tocando a pele. Shimoga e Tan [Shimoga, 1993 e Tan, 1994] apresentam estudos bastante interessantes sobre a chamada *Just-Noticable-Difference* (JND), ou as diferenças de tato que uma pessoa é capaz de perceber sobre a pele em termos de intensidade de pressão e de distância mínima entre dois pontos de toque. A tabela 2.1 mostra a pressão, em Newtons a partir da qual o usuário percebe o toque em dois pontos do antebraço. Pela análise da tabela, nota-se que a pressão JND diminui à medida que a área de contato aumenta, ou seja, somos mais sensíveis a mudanças de pressão se a área de contato for maior. No experimento a pressão exercida por unidade de área (cm^2) foi mantida constante em 1.8 N/cm^2 , ou seja, quando a área aumentava, a pressão também subia.

Outro aspecto importante a ser analisado na sensibilidade ao tato é a capacidade que uma pessoa tem de determinar sobre quantos pontos a pele está sendo pressionada, dependendo da região do corpo e da distância entre estes pontos de pressão. Esta característica, a JND entre dois pontos de pressão, pode ser chamada de “**resolução linear da sensibilidade da pele**”.

Tabela 5.1– Pressão média JND em relação à área de contato [Tan, 1994]

Local do Corpo	Área de Contato (cm^2)		
	1,27	5,06	20,27
	Pressão JND		
Cotovelo	0,167	0,062	0,040
Cotovelo (dorso)	0,113	0,052	0,033
Pulso (dorso)	0,188	0,044	---
Média	0,156	0,053	0,037

Sherrick [Sherrick, 1986] desenvolveu experimentos onde se aplicavam sobre o dedo indicador de uma pessoa dois pontos de pressão. Para isto foram usados aparatos semelhantes a agulhas de tricô. A menor distância a partir da qual os usuários foram capazes de detectar a existência de dois pontos de pressão foi de 2,5 mm.

Em outro experimento, [Shimoga, 1993] mostrou que a capacidade de determinar a existência de dois pontos de pressão varia de acordo com a parte do corpo que está sendo pressionada, segundo ele a palma da mão tem um JND de 11 mm. Seow [Seow, 1988] mostrou que a coxa, por sua vez, tem um JND de 67 mm.

Este aspecto é importante pois algumas tecnologias de geração de tato em ambientes virtuais utilizam matrizes de pequenos pinos que tocam a pele para dar a sensação de toque.

Outro exemplo de estudo de sensibilidade ao tato é o experimento de Sherrick [Sherrick, 1986] no qual foi demonstrado que uma pessoa é capaz de detectar um peso de 5 mg sobre o lábio superior ou sobre o nariz, mas precisa de pelo menos 355 mg para sentir algo nos dedos dos pés.

Recentemente Amemiya [Amemiya, 1999] demonstrou que a sensibilidade ao toque e a JND dependem também do tipo de “atuador” (metálico, jato de ar, etc) usado para gerar o estímulo.

5.4.2 Receptores de tato

Dependendo da magnitude, da localização ou tipo do estímulo sobre a pele, este dispara uma resposta de um ou mais receptores especializados. Os termo-receptores respondem a mudanças de temperatura, os mecano-receptores a ações mecânicas como pressão, vibração e deslizamentos.

O papel mais importante no processo de percepção tátil é desempenhado pela pele sem pelos com a que recobre a palma das mãos e a parte interna do dedos. As pontas dos dedos, por exemplo, possuem a maior concentração de receptores especializados de todo o corpo, chegando em algumas pessoas ao ponto de que, os nervos ligados a estes receptores, ocupem mais de 25% da superfície do córtex cerebral. Segundo [Shreeve, 1993] esta distribuição é dinâmica de forma que em caso de acidente e perda da sensibilidade em algum dedo, os espaços que ficarem “livres” no córtex cerebral passarão a ser usados pelos receptores localizados nos dedos que continuam sadios.

A pele humana tem quatro tipos de receptores¹. As **terminações nervosas livres**, os **Corpúsculos de Meissner**, os **Discos de Merkel** e os **Corpúsculos de Paccini**.

As **terminações nervosas livres** estão localizadas próximas à superfície da pele (com o sem pelos) e respondem ao toque, à pressão e à dor.

Os **Corpúsculos de Meissner**, que respondem por quase 40% dos receptores táteis das mãos, ficam localizados logo abaixo da epiderme, em especial na ponta dos dedos. Alojados em concavidades internas da epiderme, estes receptores sofrem deslocamentos de sua posição original quando que a pele se deforma. Por este motivo este são os receptores que melhor detectam o movimento dos dedos sobre uma superfície e a velocidade deste movimento. Estes corpúsculos são os principais responsáveis pela “leitura” da textura de uma superfície.

Os **Discos de Merkel** formam 25% dos receptores das mãos. Localizados abaixo da epiderme, respondem principalmente à pressão mas podem responder à vibração.

Os **Corpúsculos de Paccini** são os maiores receptores da pele correspondem a 13% dos receptores das mãos. São os receptores mais sensíveis e mais profundos. Localizados na camada derme, os corpúsculos são capazes de detectar pressão (toque) e vibração. Segundo Srinivasan [Srinivasan,1990] aponta, a sensibilidade destes receptores é tanta que eles são capazes de captarem um mudança de até 0,06 micron na estrutura de uma superfície. Entretanto, por seu tamanho, a pessoa não consegue precisar o local exato onde ocorreu o toque.

A pele com pelos possui um quinto tipo de receptor chamado de **Folículo Piloso**. Estes receptores são os principais responsáveis pela detecção do movimento sobre a superfície da pele. Sua estrutura anatômica é semelhante a de uma mola enrolada na base dos pelos. A existência destes receptores explica porque é mais fácil sentir o movimento do ar (sopro ou vento, por exemplo) sobre o dorso (onde há pelos) do que sobre a palma da mão.

¹ As definições apresentadas nesta seção foram obtidas em [Burdea, 1992 e Shimoga, 1993]

5.5 Sensações Proprioceptivas e de Movimento

A propriocepção refere-se à consciência ou percepção que cada pessoa tem de seu próprio corpo e da posição relativa de suas partes a cada instante de tempo. A noção da posição das partes móveis do corpo humano diz respeito ao ângulo das várias juntas que as compõem. A detecção destes ângulos é dada, naturalmente, por sensores localizados dentro das juntas e dos músculos. Entretanto a pele desempenha um papel importantíssimo nesta detecção, pois, via de regra, ocorrem mudanças nas condições da pele sempre que uma articulação se move.

Todas juntas estas informações são usadas para determinar se as partes móveis do corpo estão paradas ou se movendo e ainda para determinar se estão ou não dentro de sua faixa de operação segura (que não cause risco nem dor).

O sentido da propriocepção é muito útil na detecção da forma e da maciez dos objetos. Por exemplo, mesmo que não tivéssemos tato nas pontas dos dedos, ao pegarmos uma caixa de fósforos temos que curvar os dedos de uma maneira, ao pegarmos uma bola de futebol, a curvatura (dos dedos e dos braços) será diferente. Isto pode informar ao cérebro as diferenças na forma dos dois objetos.

No caso do uso da propriocepção para detectar a maciez (ou dureza) imagine-se uma pessoa pegando uma esponja e uma maçã. Se aplicar a mesma força a ambas, perceberá claramente a diferença entre elas pois na primeira os dedos irão se curvar, alterando de forma significativa o ângulo das juntas, o que já não ocorrerá com a maçã.

Na verdade, segundo Aukstakalnis [Aukstakalnis, 1992], não há como separar as sensações táteis das sensações proprioceptivas na identificação da forma e da dureza de um objeto. Num exemplo simples, imagine-se uma pessoa apertando com toda sua força um bola de bilhar. Os receptores mecânicos da pele estarão identificando uma grande pressão enquanto os sensores nos músculos, tendões e juntas estarão detectando aplicação de uma grande força.

5.6 Dispositivos geradores de tato

Há várias tecnologias envolvidas na geração de tato ou na criação dos chamados “*tactile displays*” ou monitores táteis.

Tipicamente estes geradores de tato consistem de aparatos que tocam as pontas dos dedos de forma a provocar alguma sensação de pressão, calor ou vibração. As configurações mais comuns destes equipamentos são descritas a seguir.

Os **atuadores pneumáticos** utilizam pequenas bolsas de ar sob os dedos. Estas bolsas ao inflarem provocam pressão sobre os dedos dando a sensação de que o usuário tocou em algum objeto. São simples de serem implementados, porém o resultado na identificação da forma do objeto não é de muita qualidade. A pressão é criada nas pontas dos dedos em geral por jatos de ar ou por anéis ou bolsas de ar que são inflados de acordo com a simulação desejada no mundo virtual.

Os **eletrodos** que produzem descargas elétricas controladas a fim de estimular seletivamente os receptores da pele podem dar ótimos resultados, mas são difíceis de serem implementados [Asamura, 1998 e Kajimoto, 1999].

Os **atuadores vibratórios** dão a impressão de tato pela produção de vibrações sobre a pele. Estas vibrações podem ser produzidas por dispositivos como micro alto-falantes ou por materiais piezoelétricos [Ikei, 1997].

As **matrizes bidimensionais de pontos** que tocam a pele com o intuito de produzir uma sensação de pressão que reproduza a forma de um objeto. Cada um destes pinos pode ser visto como um estimulador tátil ou um *tactor*. Este é o tipo de monitor tátil mais usado na atualidade. Na Figura 5.1 pode-se observar um exemplo de uma matriz de ponto colocada sobre a ponta do dedo do usuário.

A implementação destes *tactors* pode ser feita, também, com jatos de ar [Amemiya, 1999].

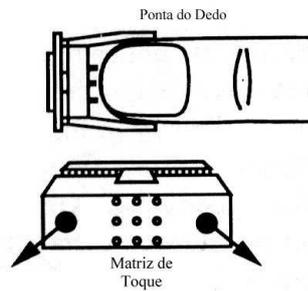


Figura 5.1 – Matriz de pontos sobre a ponta do dedo

5.7 Geradores de textura e geometria

O tipo mais comum de atuador para a geração de geometria ou textura é baseado em uma matriz de pinos que toca o dedo do usuário. Estes pinos podem ser de fato pinos metálicos dispostos sobre uma superfície (Figura 5.2) ou jatos de ar, ou estímulos elétricos.

Nestes aparatos uma matriz de pontos é presa sobre no dedo do usuário de forma que este possa sentir um toque quando algum pino sofrer uma elevação. A idéia é rastrear o movimento do dedo e dependendo de sua posição, reproduzir nos pinos a região de contato com o objeto virtual. Na Figura 5.3 [Burdea, 1996] pode-se observar a configuração dos pinos quando o usuário toca o objeto virtual. À medida que o dedo do usuário desloca-se para a direita, sobre o objeto virtual, o ponto de contato da borda do objeto com o dedo vai ficando mais próximo da ponta deste dedo. Por este motivo, no instante T0, os pinos da linha 1 estão erguidos e, no instante T1, os pinos da linha 2 estão erguidos.

Um exemplo da aplicação desta tecnologia é o “**multimodal mouse**” [Akamatsu, 1994]. Este dispositivo, adaptado ao botão esquerdo de um mouse, gera através de apenas um pino a sensação de que o dedo está passando sobre as bordas de uma folha de papel ou botão reais sempre que o mouse passa na borda de uma janela ou por um botão representados na tela.

Uma versão mais sofisticada deste dispositivo é o “*TouchSense Mouse*”, também conhecido por “*FeelIt Mouse*”. Este dispositivo é capaz de produzir sensações características nas principais tarefas de interação como por exemplo, pequenas vibrações

ao passar o mouse sobre uma borda de janela, peso ao executar-se o *dragging* de um ícone e força contrária ao movimento durante o redimensionamento de uma janela.

Recentemente a empresa Logitech lançou o *iFeel*, um *mouse* que vibra de várias formas diferentes dependendo de que objeto (janela, ícone, menu) está sob o *mouse* na tela (<http://www.logitech.com/ifeel>).

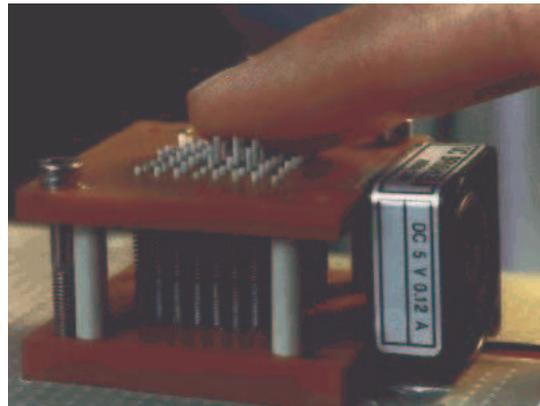


Figura 5.2 – Matriz de pinos atuadores

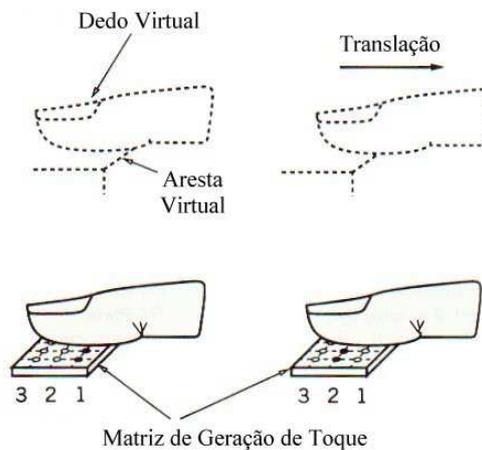


Figura 5.3 – Toque em objeto virtual – Adaptado de [Burdea, 1992]

Outra forma de implementar as matrizes de pinos, desenvolvida pelo **Advanced Robotics Research Center**, é usada na luva Teletact (Figura 5.4). Nela a matriz de toque é criada através de minúsculas bolsas de ar dispostas em uma luva, que são capazes de inflar e esvaziar rapidamente. Além destes atuadores o aparato é composto de outra luva equipada com sensores de pressão. Usando esta segunda luva o usuário pega objetos

num processo de treinamento do sistema que registra as pressões sobre cada dedo. De posse destes dados, posteriormente, a primeira luva pode ser usada para simular o toque em um objeto virtual inflando corretamente as bolsas de ar existentes[Burdea, 1994].

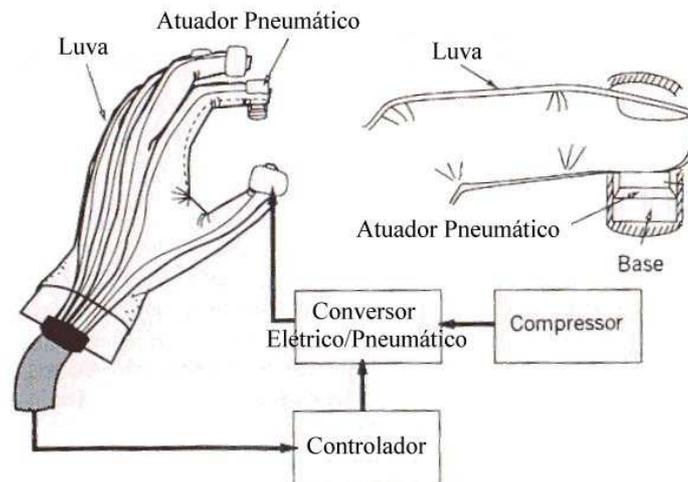


Figura 5.4 – Luva Teletact – Adaptado de [Burdea, 1992]

5.8 Dispositivos de geração de força

Os dispositivos geradores de força, segundo Burdea [Burdea, 1996] podem ser classificados em portáteis e fixos (ou não portáteis) de acordo com a possibilidade ou não que o usuário tem de carregá-los junto ao corpo sem muita dificuldade.

5.9 Dispositivos fixos de geração de força

Os **dispositivos fixos** são aqueles que ficam sobre uma mesa ou presos a uma parede e possuem um manipulador através do qual o usuário o utiliza. Existem duas categorias destes dispositivos, aqueles baseados em *joysticks* e aqueles baseados em cabos.

Os *joysticks* dividem-se em esféricos e cartesianos. Os **joysticks esféricos** são aqueles encontrados tradicionalmente no mercado de equipamentos para jogos. Estes equipamentos são ditos “esféricos” pois possuem na base de seu manipulador uma esfera a partir da qual são lidos os movimentos (Figura 5.5). A adaptação destes equipamentos para dar-lhes capacidade de força é feita acoplando-se motores ou eixos à esfera da base do manipulador. Atualmente já há no mercado de equipamentos domésticos alguns *joysticks* com estas características como o **SideWider Pro** da Microsoft.

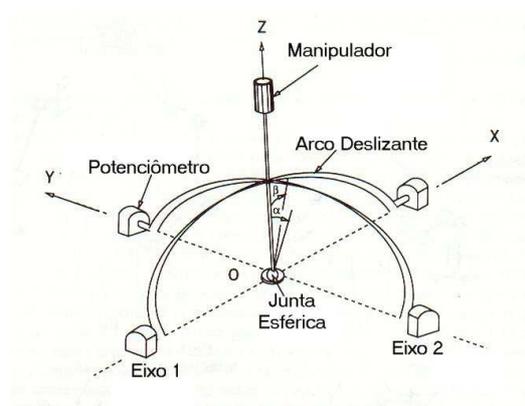


Figura 5.5 - Joystick esférico – Adaptado de [Burdea, 1992]

Os **joysticks cartesianos** têm dois ou três eixos ortogonais entre si e um mecanismo de trilhos sobre estes eixos. O funcionamento é bastante semelhante ao de um *plotter* tradicional. O controle de força e de movimento é feito por motores que deslocam (ou impedem o deslocamento) cada um dos eixos sobre os trilhos dos outros eixos. Um exemplo de joystick cartesiano com gerador de força é o “**Excalibur- The Linear Haptic Display**” (Figura 5.6) criado pelo **BioRobotics Lab** da Universidade de Washington [Adams, 1998].

Os **joysticks baseados em caneta** permitem a interação em um ambiente virtual através de um dispositivo como canetas e apontadores. No caso de simulações de cirurgia, pode-se usar um bisturi no lugar da caneta. Desta família de dispositivos de geração de força, o mais conhecido de todos é sem dúvida, o **Personal Haptic Interface Mechanism**, ou **PHANTOM** (Figura 5.7), como é mais conhecido [Massie, 1994]. Criado no MIT, este dispositivo, atualmente produzido e comercializado pela empresa **Sensable**², possui uma área de trabalho de 8 x 17 x 25 cm. A força máxima exercida pode chegar a picos de até 10 N, entretanto, a força contínua que pode ser suportada sem aquecimento é de apenas 1,5 N.

² O custo atual deste equipamento é de US\$ 20.000,00.



Figura 5.6 – Joystick Excalibur



Figura 5.7 - PHANTOM

Nos **dispositivos baseados em cabos** a força é exercida por meio de cabos que sustentam um pequeno objeto que o usuário pode segurar com os dedos. Este objeto pode ser uma caneta, um cubo, uma pequena esfera ou um outro objeto qualquer que possa ser usado como manipulador (Figura 5.8).



Figura 5.8 – Dispositivos de força com cabos

O mais conhecido dispositivo desta categoria é o *Space Interface Device for Artificial Reality – SPIDAR* [Ishii, 1994a, Cai, 1997; Seahak, 1998], criado pela *Universidade de Tokyo*. Conforme pode ser visto na Figura 5.9, o aparato possui quatro cabos que passam por polias presas a quatro vértices opostos de duas faces opostas de um cubo. Nestes vértices, mais precisamente nas polias, são ligados motores que controlam o comprimento de cada cabo. A posição espacial do ponto onde estão ligadas as outras extremidades dos cabos é dada pelas seguintes equações (onde l_i é o comprimento de cada cabo):

$$\begin{aligned} x &= (l_o^2 + l_1^2 - l_2^2 - l_3^2) / 8a \\ y &= (l_o^2 - l_1^2 + l_2^2 - l_3^2) / 8a \\ z &= (l_o^2 - l_1^2 - l_2^2 + l_3^2) / 8a \end{aligned}$$

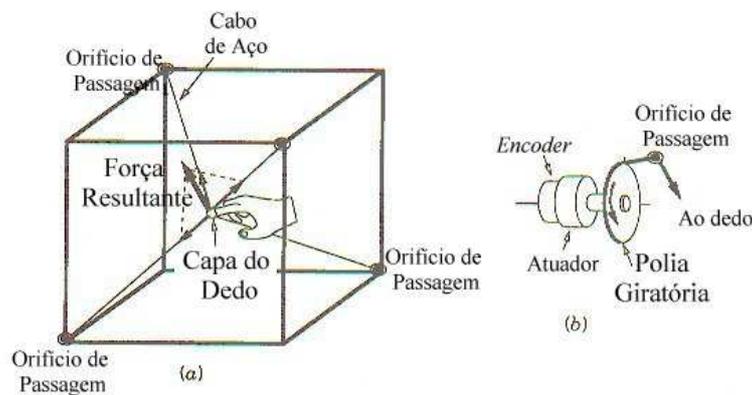


Figura 5.9 – Arquitetura do SPIDAR

Versões mais recentes do SPIDAR possuem atuadores para as duas mãos. Na versão de dois dedos [Ishii, 1994b], em geral o indicador e o polegar, o volume de trabalho é de uma esfera de 30 cm de diâmetro e o usuário consegue pegar, confortavelmente, objetos virtuais de até 5 cm de aresta. Na versão de duas mãos [Walairacht, 2000] (4 dedos para cada mão), o usuário consegue manipular objetos do tamanho de uma bola de basquete (Figura 5.10).

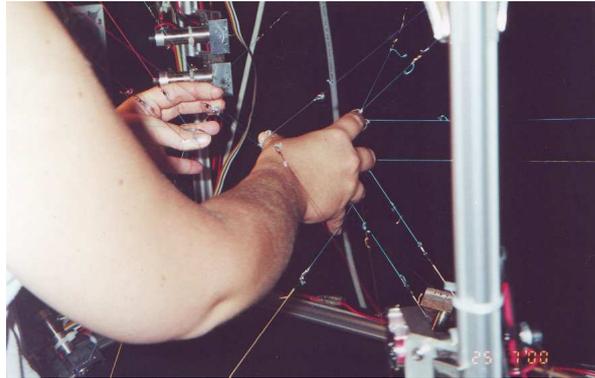


Figura 5.10 - Spidar 8

5.10 Dispositivos portáteis de geração de força

Estes dispositivos costumam ficar presos ao corpo (braços, pernas ou mãos) controlando os movimentos do usuário. Podem ser de dois tipos, os “*arm exoskeletons*” e os “*hand masters*” (ou “*hand exoskeletons*”) de acordo com a parte do corpo sobre a qual atuam.

5.10.1 Esqueletos externos de braços

Os esqueletos externos portáteis de braço são estruturas mecânicas que rastreiam o movimento do braço do usuário e aplicam forças de acordo com os requisitos da simulação em curso. Os principais exemplos desta classe de equipamentos são apresentados a seguir.

O **Glad-in-Art** cujo nome completo é “*Glove-like Advanced Interface for Control of Manipulative and Exploratory Procedures in Artificial Realities*”, foi um projeto que criou um braço mecânico de cinco juntas, capaz de produzir uma força contínua de até 10 N. O **Exos Force Arm Master** (Figura 5.11) produzido pela **Exos Inc.**, é um braço mecânico que utiliza três motores para controlar o movimento do ombro, um para o cotovelo e um para o antebraço.

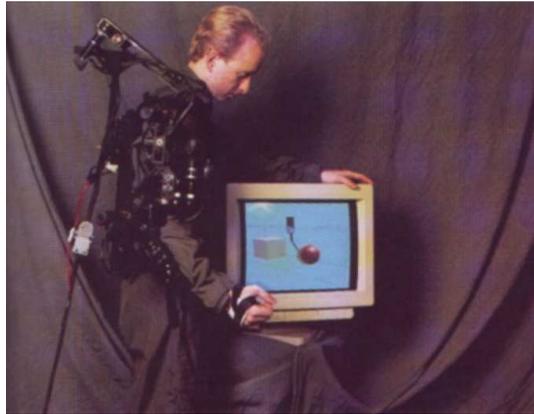


Figura 5.11 – Exos Force Arm Master

5.10.2 Esqueletos externos de mãos

Os esqueletos externos de mãos são estruturas mecânicas que medem o movimento dos dedos e aplicam forças sobre estas partes do corpo. A diferença destes dispositivos para os dispositivos não portáteis que atuam sobre as mãos é que nos primeiros todo o mecanismo é preso na mão do usuário que conseqüentemente tem de suportar seu peso, porém fica mais livre para executar seu movimentos.

A aplicação da força sobre os dedos pode ser feita de várias formas. A forma mais utilizada é um conjunto de cabos que tracionam os dedos impedindo que eles se fechem. Na Figura 5.12 pode-se observar a tecnologia de cabos usada na construção do “**Tsukuba Hand Master**” [Iwata, 1992]. Outro exemplo é a “**CyberForce**” (Figura 5.13) fabricado pela empresa americana Virtual Technology (<http://www.virtex.com>).

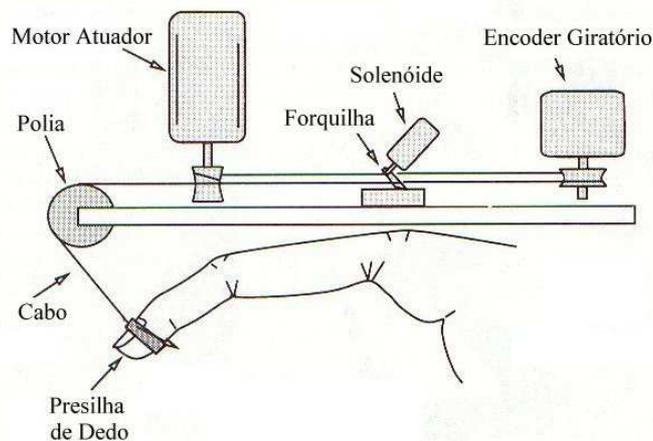


Figura 5.12 - Construção do “Tsukuba Hand Master” – Adaptado de [Burdea, 1992]

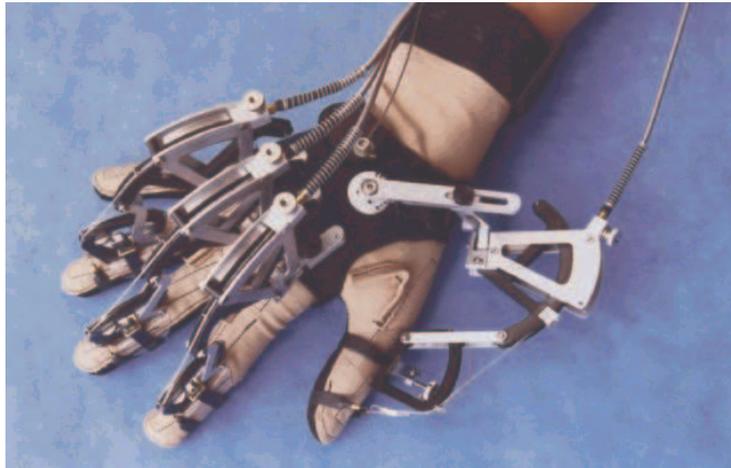


Figura 5.13 - CyberForce

Uma outra tecnologia bem mais simples de ser montada, pois não requer o uso de cabos, polias engrenagens e outros materiais sensíveis, é o uso de pistões ou cilindros de ar comprimido para limitar o movimento dos dedos. O principal exemplo deste tipo de tecnologia é a **Rutgres Master** (Figura 5.14) [Burdea, 1992a e Gomez, 1995]. O problema desta tecnologia é o fato de que por operarem na parte interna da mão os cilindros acabam limitando demais os movimentos dos dedos, em especial na manipulação de pequenos objetos.

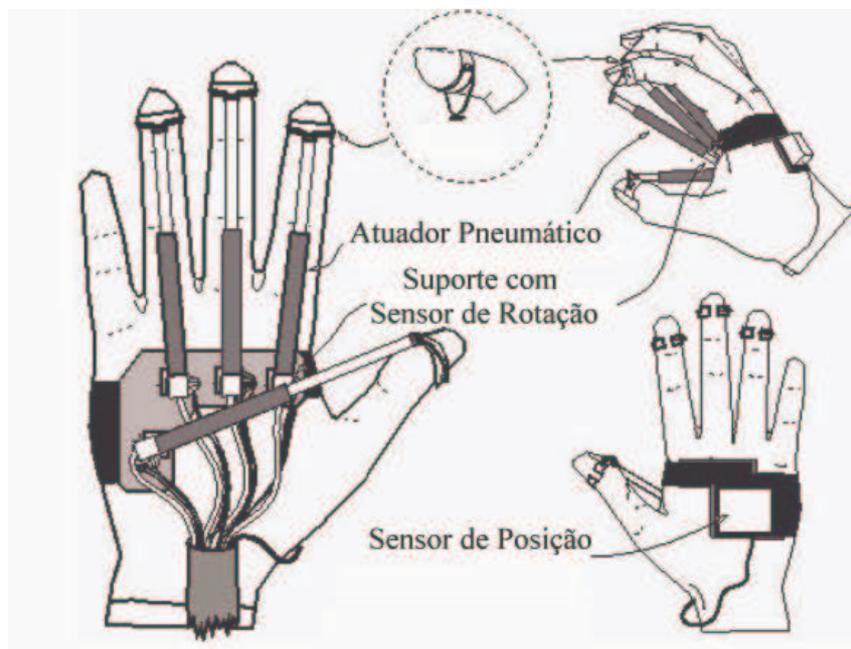


Figura 5.14 - Rutgres Master Hand Master – Adaptado de [Burdea, 1992]

