

# Guaiá

## Um mouse com três graus de liberdade

LUIZ ERNESTO MERKLE <sup>1</sup>  
SÉRGIO SCHEER <sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEFET-PR - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná  
CPGEI - Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial  
Av. 7 de setembro, 3165  
80230-901 Curitiba, PR, Brasil  
cefetpr@brfapesp.bitnet subject:Merkle

<sup>2</sup> UFPR - Universidade Federal do Paraná  
CESEC - Centro de Estudos em Engenharia Civil  
C.P. 19011 - Centro Politécnico  
81531-970 Curitiba, PR, Brasil  
sscheer@brufpr.bitnet

**Abstract.** This paper describes the development of a three degrees of freedom mouse called Guaiá. The mathematical grounds of the sensor device are described. This device senses the rotation of its body on the work surface where it is handled, and surpasses some deficiencies of common mouses. It is a candidate for utilization in low cost *virtual reality* systems, where a third degree of freedom is indicated for the control in 3D represented spaces; and for 2D painting systems, where the control of the brush can be enhanced with the controled rotation.

### 1 Introdução

O desenvolvimento do Guaiá foi o tema de uma dissertação de mestrado desenvolvida no CEFET-PR, e teve como principal objetivo o projeto e a prototipação de um *mouse* que captasse as rotações do mesmo no plano. Durante o processo, viu-se a necessidade e propôs-se uma abordagem uniforme [Merkle (1991)][Merkle-Scheer(1992)] de modo que os dispositivos atualmente utilizados em *realidades virtuais* fossem tratados da mesma maneira que os comuns. Tal ponto teve como elemento chave a rotação captada, que permite a utilização do mesmo no posicionamento de cursores em espaços 3D representados de uma maneira mais direta.

O dispositivo aqui proposto, denominado Guaiá por possuir oito codificadores (patas) e andar sobre um plano, busca facilitar o posicionamento de cursores em atividades interativas onde um terceiro grau de liberdade seja conveniente, e onde a utilização de dispositivos de seis graus de liberdade, ou mesmo de mesas digitalizadoras não sejam viáveis economicamente.

Não se tem a pretensão de concorrer diretamente com dispositivos de sensoreamento e representação para utilização em "realidade virtual" e onde o controle do posicionamento seja espacial. Pretende-se apenas oferecer: uma alternativa de baixo custo as a-

tividades que utilizem dispositivos de posicionamento no plano físico, para o controle do posicionamento em espaços representados; eliminar uma deficiência de *mouses* comuns, que não permitem rotação; e através do sensoreamento da rotação, e consequente controle do cursor, melhorar a qualidade da interação em sistemas de pintura.

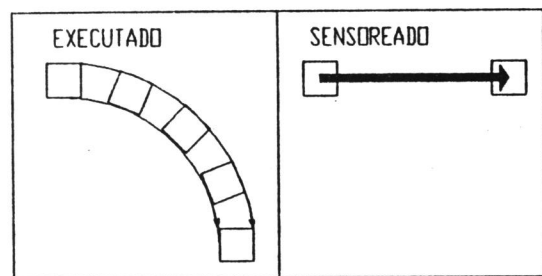


Figura 1: Movimento executado versus movimento sensoreado de um *mouse* eletromecânico.

Aqui são apresentadas as alternativas e deduzidas as equações que descrevem os movimentos que acionam os codificadores, e que possibilitam se obter sistemas de equações que permitem determinar a posição e a orientação do dispositivo.

## 2 Alternativas

As características que um dispositivo deve apresentar em um sistema devem ir de encontro as facilidades de utilização pelos usuários, aos custos de construção e manutenção e a outros fatores que permitam o funcionamento do sistema da melhor maneira possível.

A diferença básica no manuseio de um *mouse* e no de um cursor de mesa digitalizadora reside na impossibilidade do primeiro em manter uma compatibilidade entre as coordenadas sensoreadas e o centro do dispositivo quando há rotações. Tal característica, além de impossibilitar o uso de um *mouse* como digitalizador, ainda dificulta os movimentos do usuário (ver Figura 1). Por exemplo, ao se descrever um arco, um *mouse* exige que o pulso se mantenha em uma mesma orientação enquanto se rotacionam braço, e antebraço. Em uma mesa digitalizadora o mesmo arco pode ser realizado apenas com movimento do braço, sendo desnecessário os movimentos de translação do antebraço. Optou-se pelo desenvolvimento de *mouses*, em detrimento das mesas, por eles serem mais difundidos, mais portáteis, terem um custo bem mais baixo e uma construção bem mais simples, e pelo fato de uma vez desenvolvido e talvez comercializado, poderem competir com um espectro maior de dispositivos. Ressalva-se no entanto, que para utilização em sistemas de pintura, quanto maior o número de movimentos captados, mais a ferramenta e o dispositivo permitem uma melhor interação e uma possibilidade de desenvolvimento de trabalhos de melhor qualidade.

A posição de um objeto em um plano pode ser definida um par de coordenadas,  $\{x_1, y_1\}$ ,  $\{x_2, y_2\}$ , duas abscissas e duas ordenadas, ou de uma outra forma, por três valores,  $\{x_1, y_1, \theta_1\}$ , uma abscissa, uma ordenada e um ângulo.

Um segundo atributo a ser melhorado em dispositivos de posicionamento se refere ao fato de que para se posicionar um objeto no plano, são necessárias duas coordenadas e um ângulo. Embora alguns manches permitam tal controle, a grande parte dos dispositivos de entrada para tal finalidade não sensoria três variáveis de posição simultaneamente.

Daí várias alternativas para se captar a orientação do dispositivo foram levantadas. Dentre as que pareceram mais simples, estão as baseadas em tecnologias utilizadas em *mouses* eletromecânicos ou óticos. As alternativas baseadas em mesas digitalizadoras mecânicas, eletromagnéticas e sônicas não são discutidas aqui, embora tenham sido levantadas [Merkle (1991)].

Ao se testar a opção de *mouses* óticos, várias desvantagens foram levantadas. Inicialmente, o dispositivo exige uma superfície especial, e tal superfície

precisa ser tão extensa quanto o espaço a ser utilizado pelo usuário. A necessidade desta superfície aumenta o custo, e inviabiliza o mesmo para tarefas de digitalização de documentos, pois o mesmo ficaria entre o dispositivo e a superfície. Também, no *mouse* testado, observou-se que ao se rotacionar o dispositivo de um ângulo próximo de  $\pi/2$  rad o mesmo não apresentava mais uma saída compatível com os movimentos. Isto ocorre pois os sensores óticos funcionam em função de diferenças de reflexão na superfície, e uma vez que estas diferenças diminuem devido ao ângulo de incidência e reflexão dos feixes de luz o dispositivo não funciona corretamente.

Em se tratando de utilizar *mouses* baseados em rodas ou em esferas, optou-se pela utilização de duas esferas, pois assim o dispositivo proposto poderia ser difundido mais rapidamente. Além do que a maioria dos fabricantes de *mouses* pesquisados utiliza esferas. Entretanto em uma implementação industrial, seria interessante que uma empresa que constrói *mouses* baseados em rodas continuasse na mesma linha, adaptando o exposto aqui. Uma outra opção seria a utilização mista de esferas e rodas.

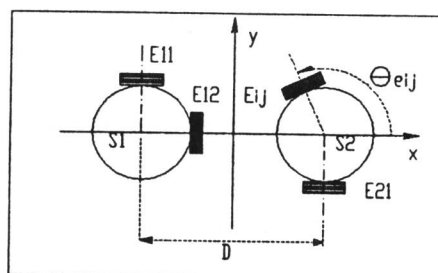


Figura 2: Exemplo de disposição física dos codificadores e notação utilizada.

O funcionamento do dispositivo baseado em tecnologia mecânica possui dois codificadores para captar os movimentos de translação do dispositivo e um terceiro ou quarto para detectar a rotação do dispositivo em função das diferenças detectadas entre estes e um dos outros (ver Figura 2). Na seqüência será visto que a adição de mais um codificador é interessante pois assim consegue-se dobrar a resolução do dispositivo com um incremento de custo baixo.

Uma das características importantes deste sensor é não necessitar de uma referência física para o seu funcionamento. Isto pode ser uma vantagem em termos de construção, pois não há necessidade de uma superfície, de altofalantes ou de antenas, por exemplo, e permite que se utilize o mesmo em sistemas de posicionamento de veículos móveis autoguiados. A desvantagem é que caso o contato mecânico

seja interrompido, ou os codificadores sejam submostrados é necessária uma calibração para que se mantenha uma compatibilidade entre as coordenadas atuais e coordenadas passadas e futuras.

Optou-se pela tecnologia empregada em *mouses* por vários fatores. Inicialmente pelo ineditismo. A proposição de um dispositivo tão portátil quanto um mouse, e que possibilita uma maior liberdade de movimento do usuário em conjunto com um posicionamento absoluto é bastante atraente. Segundo, tendo-se a disposição um *mouse* com orientação, os fabricantes de mesas sofrerão uma maior pressão para melhorarem de maneira mais significativa os seus equipamentos em vez de alterarem só a resolução. O contrário ocorreria com maior dificuldade, pois a influência de algo com o custo maior, mesas, sobre um de custo menor, *mouses* seria menor. Terceiro, com três variáveis simultaneamente controladas migra-se mais fácil para ambientes de "realidade virtual" a um custo bastante baixo e acessível.

O fator custo é significativo. Considerando o hardware necessário nas duas possibilidades, os baseados em *mouses* são bem mais baratos que os baseados em mesas. Isto tanto em termos de desenvolvimento quanto em termos de preço de venda. No caso do mouse, apenas uma esfera e dois codificadores a mais, na pior das possibilidades, são necessários. No caso de mesas, a multiplexação seria necessária, e no caso de se captar outros movimentos, mais modificações deveriam ser introduzidas.

### 3 Princípio de Funcionamento

O sensor de posicionamento escolhido como alternativa para ser desenvolvido e implementado está baseado na captação dos movimentos de duas esferas em contato permanente com uma superfície sobre a qual o conjunto é movimentado. A captação dos movimentos é feita por codificadores devidamente posicionados de modo que se possam captar duas direções de deslocamento e de modo que se minimizem os cálculos necessários para se calcular a nova posição.

Como cada esfera possui apenas um ponto de contato com a superfície, quando o movimento é tal que se faz uma rotação sobre este ponto, os codificadores da esfera em questão não são movimentados. O mesmo ocorre quando se utilizam rodas e o eixo de rotação está no mesmo ponto do cruzamento de retas direcionadas segundo as rodas. Com a inclusão de mais um ponto de contato para captação dos movimentos, através da utilização de mais uma esfera ou mais uma roda, se tem informações suficientes, conforme o posicionamento dos codificadores, para se detectar a rotação imposta ao dispositivo em função (numa primeira aproximação) das diferenças

de trajetória sensoreadas em cada ponto de contato.

Deste modo, para cada mudança de orientação devidamente calculada, os deslocamentos devem ser rotacionados antes de serem utilizados para se atualizar as coordenadas atuais do dispositivo. A se-

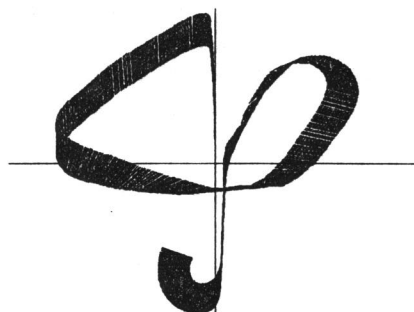


Figura 3: Orientação representada igual ao sensorado, resolução da translação menor (1 pixel  $\neq$  1 ponto/deslocamento).

guir, serão detalhadas a notação utilizada e as partes componentes de um dispositivo para se poder chegar ao sistema de equações que possibilita determinar os deslocamentos em função dos sinais captados nos sensores (ver Figura 4).

A formulação é feita de tal forma que se independe da utilização de esferas ou rodas para a captação dos movimentos. No caso de esferas, cada uma está acoplada a um ou mais codificadores. No caso de rodas, cada codificador está acoplado a apenas um. Os codificadores serão denominados  $E_{ij}$  e fornecem sinais que permitem detectar o sentido e a magnitude do deslocamento (caso amostrados e computados corretamente).

O movimento sensoreado é função da trajetória e do ângulo entre o sensor e a mesma. Considerando o raio da esfera ou da roda  $R_s$  e do codificador  $R_e$ , para cada deslocamento retilíneo  $DM$  do dispositivo (translação) os sensores são rotacionados de :

$$\theta_e = DM \cdot \cos(\theta_{Em}) / R_e \text{ [rad]}$$

onde  $\theta_{Em}$  é o ângulo formado entre o codificador e a trajetória.

Cada codificador possui um ângulo  $\theta_e$  mínimo em que é capaz de diferenciar um deslocamento angular. Tal ângulo é função do número de subdivisões  $N$  em que o círculo responsável pelo chaveamento é seccionado. Cada borda ascendente e descendente contém uma informação. Como se dispõe de duas seqüências (para se poder determinar o sentido) tem-se ao todo quatro vezes o número de subdivisões. Por exemplo, em um codificador comercial um número

de subdivisões  $N$  igual 36 e um raio do codificador  $R_e$  de 2,5mm. É possível assim diferenciar um ângulo de  $2.\pi/(N.4)$ , o que dá  $\pi/72$  rad ou 2,5 graus. A utilização de um fator de multiplicação mecânico através de um raio  $R_e$  isto fornece um deslocamento do dispositivo de  $R_e.2.\pi/(N.4)/\cos(\theta_{Em})$  ou neste caso 0.11mm. Ou uma resolução  $R$  de 9170 pontos por metro (232 pontos por polegada, dpi, ppi,...) quando o ângulo entre a trajetória e o codificador é de 0 ou  $\pi$  rad. Quando o ângulo da trajetória

é movimentado em função de uma trajetória é necessário primeiro especificar a notação utilizada para especificar cada ângulo de codificador e um sistema de coordenadas próprio do dispositivo. No caso de utilização de duas esferas para captação dos movimentos o sistema de coordenadas próprio tem o eixo das abcissas passando pelo centro de duas esferas e o eixo das ordenadas coincidente com a mediatriz destes mesmos dois pontos. O ângulo  $\theta_{Eij}$  de cada codificador  $Eij$  é determinado em sentido anti-horário e tem como referência o centro da esfera em que o mesmo está conectado e o eixo das abcissas. A distância entre as duas esferas é representada por  $D$  (ver Figura 2).

A trajetória do centro das coordenadas do dispositivo pode ser descrita por equações paramétricas, e fornece o movimento em coordenadas absolutas em  $X(t)$ ,  $Y(t)$  e  $\Phi(t)$ . Onde  $t$  é uma variável auxiliar e  $X$ ,  $Y$ , e  $\Phi$  representam a abscissa, a ordenada e o azimut do dispositivo.

Ao acúmulo dos movimentos de cada codificador em função de uma trajetória pode ser feito um comparativo com o trabalho realizado por uma força ao longo de um deslocamento. Considerando isto e a posição de cada codificador em uma esfera, tem-se a seguinte equação para a descrição do acúmulo dos movimentos dos sensores individuais em uma trajetória qualquer:

$$A_{ij}(t) = \int_{\alpha}^{\beta} [\cos(\pi - \theta_{Eij} - \theta(t)) \times (X'(t) \mp D\theta'(t) \sin(\theta(t))/2) + (\sin(\pi - \theta_{Eij} - \theta(t)) \times (Y'(t) \pm D\theta'(t) \cos(\theta(t))/2)] dt$$

Conforme a esfera, o sentido dos sinais em negrito mudam, pois em uma rotação, enquanto uma esfera fica mais positiva a outra fica mais negativa devido ao centro de rotação ter sido arbitrado em um ponto entre as duas. Observe os sinais  $\mp$  e  $\pm$  acima. A integral representa o somatório do produto escalar entre o vetor que descreve a posição do ponto de contato do sensor pela trajetória do centro da esfera. Decompondo-se os senos e cossenos, realizando as multiplicações, e integrando o que é possível, obtém-se :

$$A_{ij}(t) = \left\{ \int_{\alpha}^{\beta} \{ [\cos(\theta_{Eij}) \cdot \cos(\theta(t)) - \sin(\theta_{Eij}) \cdot \sin(\theta(t))] \cdot X'(t) + [\sin(\theta_{Eij}) \cdot \cos(\theta(t)) - \cos(\theta_{Eij}) \cdot \sin(\theta(t))] \cdot Y'(t) \} dt \pm D \cdot \sin(\theta_{Eij}) (\theta(\beta) - \theta(\alpha)) \right\} / R_{Eij}$$

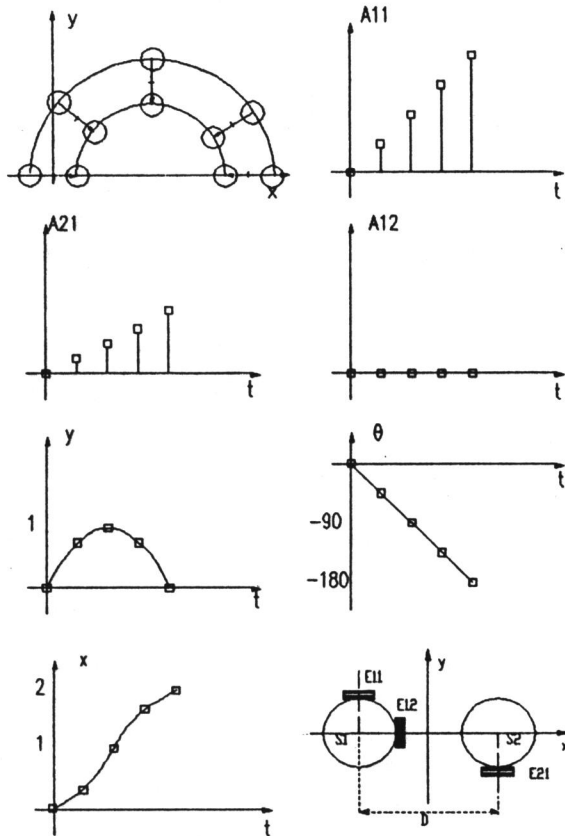


Figura 4: Trajetória em forma paramétrica e dados acumulados do movimento sensorado.

em relação ao codificador é da ordem de  $\pm\pi/2$  a resolução do codificador em questão é anulada. Como se utilizam dois codificadores em conjunto. Um para cada direção se tem uma resolução de:

$$R = (2.N1.\cos(\theta_{Em1})/\pi/R_{e1} + 2.N2.\cos(\theta_{Em2})/\pi/R_{e2}) \text{ [pontos/m]}$$

Tal característica permite concluir que um mouse comum possui uma resolução que é função da trajetória.

Para se determinar o quanto cada codificador

Observa-se que caso duas esferas possuam codificadores com ângulos teoricamente iguais, o único fator que muda das respectivas equações é o sinal da última parcela.

A derivada em relação a t das equações acima resultam na seguinte equação simplificada :

$$A'_{ij}(t) = \{[\cos(\theta_{Eij}) \cdot \cos(\theta(t)) - \sin(\theta_{Eij}) \cdot \sin(\theta(t))] \cdot X'(t) + [\sin(\theta_{Eij}) \cdot \cos(\theta(t)) - \cos(\theta_{Eij}) \cdot \sin(\theta(t))] \cdot Y'(t) \pm D \cdot \sin(\theta_{Eij}) (\theta'(t)) / 2\} / R_{Eij}$$

Como exposto acima, implementando-se o dispositivo com dois codificadores com ângulos  $\theta_E$  iguais, mas acoplados a esferas diferentes as equações só diferem no sinal da última parcela. Como as suas derivadas também a subtração de uma equação resultante de outra fornece o quanto o ângulo  $\theta(t)$  foi modificado entre dois pontos da trajetória:

$$\theta(\beta) - \theta(\alpha) = \frac{R_{E1j} \cdot (A_{1j}(\beta) - A_{1j}(\alpha))}{D \cdot \sin(\theta_E)} - \frac{R_{E2j} \cdot (A_{2j}(\beta) - A_{2j}(\alpha))}{D \cdot \sin(\theta_E)}$$

ou o diferencial da trajetória do azimute:

$$\theta'(t) = \frac{R_{E1j} \cdot (A'_{1j}(t) - R_{E2j} \cdot (A'_{2j}(t)))}{D \cdot \sin(\theta_E)}$$

Fazendo

$$K_{xij}(t) = \cos(\theta_{Eij}) \cdot \cos(\theta(t)) - \sin(\theta_{Eij}) \cdot \sin(\theta(t))$$

$$K_{yij}(t) = \sin(\theta_{Eij}) \cdot \cos(\theta(t)) - \cos(\theta_{Eij}) \cdot \sin(\theta(t))$$

obtem-se:

$$A'_{ij}(t) = K_{xij}(t) \cdot X'(t) + K_{yij}(t) \cdot Y'(t) \pm D \cdot \sin(\theta_{Eij}) (\theta'(t)) / (2R_{Eij})$$

Conhecendo-se várias medidas de  $A_{ij}(t)$  (fig. 4.11) pode-se interpolar numericamente valores de  $A_{ij}'(t)$  e se determinando  $\theta'(t)$  e  $\theta(t)$  pode-se chegar a  $X(t)$  e  $Y(t)$  em função de  $X'(t)$  e  $Y'(t)$  obtidos por meio da resolução dos sistemas de equações resultantes. No caso de se implementar o dispositivo sem ângulos iguais em sensores de esferas diferentes, a resolução do sistema exige um esforço computacional maior e deve ser numérica, mas as equações são as mesmas. Em uma implementação, recomenda-se que

os dois ângulos sejam os mais próximos possíveis, que se resolvam primeiro o sistema como acima, e então, caso a atividade requeira, e se tenha tempo para tal, se resolva o sistema por métodos numéricos considerando os dados iniciais obtidos por métodos algébricos. Os métodos numéricos também podem ser utilizados na determinação da derivada dos dados acumulados, uma vez que quanto maior a velocidade com que se movimenta o dispositivo, maior a quantidade de dados acumulados, caso não haja subamostragem e o canal de comunicação entre o sensor e o sistema que realiza o cálculo das coordenadas seja um fator limitante. Caso a resolução dos codificadores seja elevada e o sistema e suas interfaces permitam um cálculo onde não se precise interpolar as derivadas, calculando a coordenada diretamente a resolução numérica se torna mais simples. Entretanto o custo também se torna mais elevado. Embora não se tenha estimado detalhadamente tal alternativa, pela performance do dispositivo implementado, pode-se dizer que tal solução exigiria um hardware específico para processamento digital de sinais. Da determinação da trajetória do dispositivo

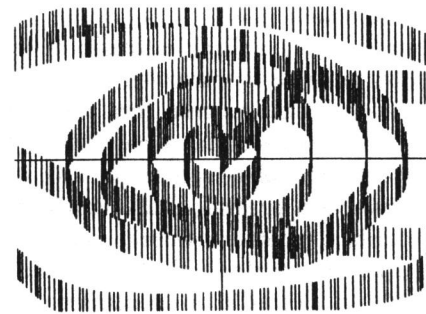


Figura 5: Orientação não representada, resolução da translação igual (1 pixel = 1 ponto/deslocamento).

em função das medidas feitas nos codificadores algumas conclusões podem ser obtidas:

- Bastam três codificadores devidamente posicionados para se ter um sistema de equações onde se possa determinar as três variáveis que descrevem a trajetória.
- Quanto maior a resolução dos codificadores e quanto menor forem as amostras acumuladas nos mesmos entre uma medida e outra, menos erros de interpolação ocorrerão e conseqüentemente mais confiável será a coordenada absoluta calculada.
- Quanto mais próximo de  $+\pi/2$  estiverem os ângulos dos codificadores das equações que serão

utilizadas para a determinação da orientação, melhor será a resolução da medida de ângulo.

- É interessante que todos os raios  $R_{Eij}$  sejam os mesmos ou que a resolução dos codificadores sejam as mesmas para se minimizar os erros devido a diferença dos mesmos.
- Com a adição de mais um codificador pode-se diminuir as diferenças de resolução nas várias direções em que o dispositivo pode ser manipulado.

#### 4 Prototipação

Na prototipação se construiu um hardware microcontrolado (8031, 12MHz) capaz de armazenar o quanto cada codificador foi movimentado e transmitir tal informação de modo serial (RS232), para a plataforma que vai utilizar o dispositivo.

Observou-se a necessidade de uma mecânica um pouco mais precisa que na manufatura de um *mouse* normal devido a diferença nos raios e orientação dos codificadores. Na construção utilizaram-se peças de *mouses* comuns. O algoritmo de cálculo teve que compensar tais deficiências de acordo com algumas medidas realizadas.

A plataforma da aplicação foi um microcomputador PC386 onde se desenvolveu um sistema simples de posicionamento na tela, com possibilidade de monitoração das coordenadas para aferição do dispositivo. No protótipo, observou-se que no caso de movimentos bruscos, a precisão e a acurácia diminuem devido a perda de contato esfera-codificador. Em uma produção em escala, seriam interessantes esferas mais leves ou alteração do mecanismo de fixação. Neste caso, o Guaiá poderia ser utilizado para tarefas de digitalização. Seria um concorrente barato de mesas digitalizadoras. A aplicação foi desenvolvida em três camadas hierárquicas, uma armazenava os dados captados da comunicação serial por interrupção, a segunda calculava a posição do dispositivo, e a terceira representava tal posição podendo ou não alterá-la. Exemplos de alguns desenhos realizados com o dispositivo podem ser vistos na (ver Figura 3,5,6).

#### 5 Aplicações e Conclusões

Como futuras aplicações pretende-se desenvolver um sistema de pintura e um sistema para controle de posicionamento em espaços 3D representados. Isto com a utilização simultânea de outros dispositivos interativos, de modo a se obter um melhor controle dos movimentos.

O dispositivo em si se mostrou viável economicamente, pois seu custo é da mesma ordem dos en-

contrados no mercado. Conseguiu-se implementá-lo com tecnologia de hardware já dominada pela maioria dos fabricantes, e utilizando o mesmo protocolo de alguns destes destinados a plataformas PC. Deste modo ele mantém a compatibilidade com hardwares softwares já existentes. Embora neste caso, onde não se tem um *driver* compatível, não se detete a rotação mas se tenha o dobro da resolução.

Poderia-se pensar em incluir o cálculo da posição no hardware do dispositivo antes de transmití-la a plataforma. Tal solução livraria esta dos cálculos mas aumentaria o preço final do dispositivo.

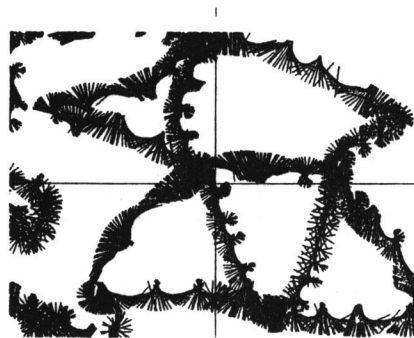


Figura 6: Orientação representada múltipla da sensoreada, resolução da translação menor ( 1 pixel  $\neq$  1 ponto/deslocamento).

Pode-se dizer, que os custos de modificação de sistemas interativos não são tão elevados, se comparados aos dos dispositivos normalmente identificados com o que se chama de *realidade virtual*. E que muitas coisas podem ser melhoradas, tornando acessíveis ao usuário comum facilidades que ferramentas comuns não possibilitam.

#### 6 Referências

- J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner e J. F. Hughes. *Computer Graphics, principles and practice*. Addison Wesley, 1990.
- L. E. Merkle. *Guaiá - Um dispositivo sensor de três graus de liberdade para posicionamento no plano*. Dissertação de Mestrado, CEFET-PR/CPGEI Curitiba, 1991.
- L. E. Merkle e S. Scheer. *Dispositivos Interativos - Uma classificação Independente de Aplicação*. Anais do VI SIBGRAPI 92. A sair. 1992.