

Um Dispositivo Óptico para Rastreamento em Aplicações de Realidade Virtual

Romano José Magacho da Silva, Alberto Barbosa Raposo, Marcelo Gattass

Tecgraf – Grupo de Tecnologias em Computação Gráfica

Departamento de Informática – PUC-Rio

R. Marquês de S. Vicente, 225 – 22453-900 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

{romano, abraposo, mgattass}@tecgraf.puc-rio.br

Abstract. *Virtual reality (VR) systems require interaction devices that do not obstruct the immersive characteristics of the application. With the diffusion of digital cameras, the optical capture of users' movements was established as a new research area. This paper presents the implementation of an optical device for user interaction in a tool for developing VR applications. The presented optical device is composed of a sphere covered with retro reflexive material, being tracked by four cameras with infrared sensors. The device is capable of providing the sphere position with three degrees of freedom to the VR application.*

Resumo. *Os sistemas de realidade virtual (RV) requerem dispositivos de interação que não obstruam o caráter imersivo da aplicação. Com a difusão das câmeras digitais, a captura óptica do movimento do usuário se firmou como uma nova área de pesquisa. Este artigo apresenta a implementação de um dispositivo óptico para interação em uma ferramenta de desenvolvimento de aplicações em RV. O dispositivo óptico apresentado é composto por uma esfera revestida de material retro-reflexivo rastreada por quatro câmeras com sensores infravermelhos. O dispositivo é capaz de fornecer a posição da esfera com três graus de liberdade para a aplicação de RV.*

1. Introdução

Com o desenvolvimento das tecnologias de RV, diversos tipos de dispositivos de interação e de saída foram surgindo. Existe uma categoria de dispositivos de interação que está se destacando devido a crescente disponibilidade de câmeras digitais. Este tipo de dispositivo óptico utiliza a imagem capturada por um conjunto de câmeras digitais para rastrear a posição de um ou mais objetos e, com isso, fornecer dados de posicionamento e orientação para os sistemas de RV.

Uma vantagem desse tipo de dispositivo é a mobilidade que ele provê ao usuário, tanto pela não existência de cabos, quanto pela capacidade de fornecer informações redundantes utilizando mais de uma câmera, sendo menos suscetível à oclusão de uma delas. Outra vantagem é a imunidade a interferências externas, sejam elétricas ou eletromagnéticas.

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um dispositivo óptico de rastreamento para ambientes de RV. Este dispositivo é composto por quatro câmeras com emissores e filtros infravermelhos. O objeto a ser rastreado é uma esfera coberta com material retro-reflexivo. A fim de se empregar o dispositivo em ambientes virtuais, foi necessário integrá-lo a uma biblioteca de abstração.

A seção 2 apresenta uma revisão das tecnologias utilizadas em dispositivos de rastreamento. A seção 3 apresenta o processamento necessário para rastreamento óptico de um objeto e a sua utilização como um dispositivo de RV. A seção 4 apresenta os principais detalhes da implementação e os resultados obtidos.

2. Tecnologias de Rastreamento

Uma das conseqüências do advento da RV foi a necessidade de se redefinir o paradigma de interação humano-computador. O sistema tradicional mouse-teclado-monitor foi substituído por dispositivos que permitiram maior imersão do usuário no ambiente virtual e o manuseio de todas as potencialidades dessa tecnologia. O modo como os participantes interagem com o sistema de RV influencia enormemente suas experiências no ambiente virtual, facilitando seu uso, aumentando a sensação de imersão e ampliando a variedade de ações que podem ser tomadas pelo usuário.

Um importante dispositivo de interação é o rastreador de posição, que pode ser utilizado para acompanhar a posição do corpo e os movimentos do usuário, assim como a posição de outros objetos sendo por ele utilizados. Existe uma variedade de dispositivos de rastreamento, cada um utilizando uma tecnologia diferente, entre eles, os eletromagnéticos, mecânicos, acústicos, inerciais e ópticos. Ao analisar as tecnologias utilizadas pelos rastreadores, três fatores devem ser levados em consideração: precisão e velocidade de resposta do sensor; interferência do meio; restrições (fios, conexões mecânicas, etc.):

2.1. Rastreadores Eletromagnéticos

Os rastreadores eletromagnéticos utilizam campos magnéticos para medir posição e orientação. O sistema é composto por transmissor e receptor em forma de bobina. Um sensor unidimensional para estimar a posição no eixo Z, por exemplo, é composto por uma única bobina transmissora orientada na direção Z. Quando uma corrente é aplicada à bobina, um campo magnético é gerado. No receptor, o campo induz uma voltagem máxima proporcional à intensidade do campo magnético medido em uma bobina orientada na mesma direção do campo. A voltagem induzida fornece a distância do transmissor ao receptor, assim como a diferença de alinhamento entre os eixos.

São sistemas bastante precisos, cerca de 1-2 mm para posição e 0.1° para orientação. A velocidade de captura de dados é de 100-200 medidas/segundo. Um dos seus problemas é a interferência do meio: a presença de metais e o próprio tubo de raios catódicos do monitor podem causar interferência eletromagnética. Há também a restrição de possuírem pequeno espaço de utilização devido ao alcance do campo magnético gerado. O receptor deve estar cerca de 1-3 metros do transmissor, não havendo necessidade de linha de visada desobstruída. Exemplos são o FasTrack da Polhemus e o Flock of Birds da Ascension.

2.2. Rastreadores Mecânicos

Os rastreadores mecânicos medem ângulos e distâncias entre juntas. Dada uma posição conhecida, todas as outras podem ser determinadas pela relação entre as juntas. Os rastreadores podem estar presos ao chão ou anexos ao corpo do usuário, usualmente na forma de um exoesqueleto. As rotações e as distâncias podem ser medidas por engrenagens, potenciômetros ou sensores de dobra.

Uma vantagem dos sistemas mecânicos é a facilidade de adição da funcionalidade de *force feedback*. Esse tipo de dispositivo restringe o movimento do usuário aplicando uma força contrária ao seu movimento. Por serem mecânicos, possuem alta precisão (0.1° de rotação). A latência média é de 200 ms. Também não sofrem interferência do meio.

Suas maiores restrições são a própria arquitetura, que pode restringir o movimento do usuário, caso o mesmo seja preso ao chão ou possua muitas juntas. São exemplos dessa tecnologia o Phantom da Sensable Technologies e a mão mecânica da EXOS.

2.3. Rastreadores Acústicos

Rastreadores acústicos utilizam, tipicamente, ondas sonoras ultra-sônicas para medir distância. Os métodos mais usados são o cálculo do tempo de voo e a coerência de fase. Em ambos, o objetivo é converter tempo em distância. Um único par transmissor/receptor fornece a distância do objeto em relação a um ponto fixo.

Em relação à precisão e velocidade, existe um atraso inerente à espera do sinal. Esse atraso é intensificado devido à baixa velocidade de propagação do som. As interferências do meio também são fatores limitantes para essa tecnologia, devido às propriedades do som. O som deve percorrer um caminho sem obstrução entre os alto-falantes e os microfones. O desempenho é degradado em ambiente ruidoso.

Devido às restrições de interferência, a distância média entre receptor e transmissor são alguns metros, contudo, sistemas mais precisos podem cobrir áreas de até 40x30m. Exemplos de dispositivos acústicos são o Logitech Tracker, com alcance médio de 15 metros e o FarReach da Infusion Systems, com alcance de 12 metros.

2.4. Rastreadores Inerciais

Utilizam magnetômetros passivos, acelerômetros e girômetros. Os magnetômetros passivos medem o campo magnético do ambiente (geralmente da Terra) e fornecem medidas angulares. Os girômetros fornecem medida angular e os acelerômetros fornecem medidas lineares, sendo necessária a integração a leitura para obter a velocidade e a posição. Devido à etapa de integração, o erro obtido a cada passo tende a aumentar. A utilização de filtros de correção e outros sensores ajuda a diminuir esse erro.

Não estão sujeitos à interferências do meio, pois o sistema é autocontido, ou seja, descarta a necessidade de um ponto externo para obtenção de dados. Não há também limitação física para o espaço de trabalho, sendo o mesmo limitado somente pela conexão entre o dispositivo e o computador. O 3D-Bird da Ascension Technology e o Intertrax2 da InterSense são exemplos de dispositivos com essa tecnologia.

2.5. Rastreadores Ópticos

O princípio de funcionamento dos dispositivos de rastreamento óptico é baseado na análise da projeção bidimensional de uma imagem ou na determinação dos ângulos de feixes da varredura para calcular a posição e orientação de um dado objeto. Os sensores ópticos são geralmente câmeras (por exemplo, CCD), um detector 4Q ou um diodo de efeito lateral. Um CCD é um conjunto de detectores recebendo imagens no plano focal da câmera. Um detector 4Q é um componente plano capaz de gerar sinais especificando o centro do feixe de luz que incide em sua superfície. Um diodo de efeito lateral é um componente que gera um sinal proporcional à posição da luz incidente em um eixo.

Quando o sensor utilizado é uma câmera, técnicas de visão computacional devem ser utilizadas para determinar a posição do objeto. Se somente uma câmera for utilizada, é possível determinar um segmento de reta que passa pelo objeto detectado e pelo centro de projeção da câmera. Utilizando mais de uma câmera, pode-se determinar a posição e orientação do objeto.

A velocidade de captura de um dispositivo óptico depende muito do sensor empregado. Uma câmera padrão NTSC consegue capturar imagens a taxas de 30 quadros por segundo, limitando a amostragem, enquanto câmeras digitais podem capturar 200 a 1000 quadros por segundo. A precisão dos dados depende das técnicas de visão computacional empregadas: calibração de câmera, extração de informação da imagem e utilização de filtro para evitar trepidação.

Estão sujeitos a interferências do meio, pois o laser e outros emissores podem refletir em objetos próximos atrapalhando a medição. A câmera também deve estar sempre enxergando o objeto sendo rastreado e o emissor de luz não pode estar obstruído. Uma solução com três ou quatro câmeras oferece redundância e permite que uma ou duas sejam bloqueadas antes do sistema deixar de funcionar.

Existem muitos equipamentos ópticos utilizados em captura de movimento [Sturman 1994], porém poucos em RV. Alguns exemplos de dispositivos usados em RV são o DragonFly [Stefani et al. 2003], o LaserBird da Ascension Technology, e o que foi desenvolvido neste trabalho, descrito a seguir.

3. O Algoritmo de Rastreamento Óptico

Em RV e RA (realidade aumentada), o processo de acompanhamento das coordenadas de um objeto em tempo real chama-se rastreamento. Os itens mais comuns a serem rastreados são os capacetes de RV e dispositivos manuais de interação tri-dimensional. Em muitos casos, a posição e a orientação do objeto devem ser recuperados, dando origem a sistemas de rastreamento com seis graus de liberdade.

O rastreamento óptico pode oferecer vantagens sobre métodos magnéticos ou mecânicos. Ele permite que sejam utilizados dispositivos sem fio, facilitando a mobilidade do usuário, permite que múltiplos objetos sejam rastreados, oferece pouca sensibilidade a interferências externas, e pode ser utilizado com câmeras digitais convencionais, tornando-se um produto de fácil acesso. A maioria dos sistemas ópticos utiliza objetos cobertos por materiais retro-reflexivos e receptores com filtros infravermelhos.

A abordagem mais simples em rastreamento de dispositivos de interação é a utilização de somente um marcador (geralmente esférico). Utilizando mais de uma câmera, essa abordagem permite que apenas 3 graus de liberdade (posição) sejam recuperados. Outra abordagem existente é a utilização de marcadores com uma posição tri-dimensional conhecida. Utilizando propriedades projetivas invariantes, apresentadas em [van Lier and Mulder 2003], é possível comparar a posição dos pontos da imagem com padrões em uma base de dados. O padrão que melhor representa o padrão do modelo é escolhido. É possível determinar a posição e a orientação do dispositivo utilizando imagens de mais de uma câmera.

O dispositivo desenvolvido é composto por apenas uma esfera. Ela será rastreada por quatro câmeras a fim de prover redundância. Com apenas uma câmera, é possível determinar um segmento de reta que parte da sua posição e intercepta a imagem no ponto detectado. Com duas câmeras é possível determinar a interseção entre dois segmentos e estabelecer a posição da esfera no espaço. Com mais de duas câmeras, o resultado pode ser estabelecido com mais precisão, além do sistema permitir que a visão de algumas câmeras seja bloqueada em algum momento, provendo maior mobilidade ao usuário.

3.1. Pré-processamento

A etapa inicial no processo de rastreamento do dispositivo é um pré-processamento na imagem a fim de se encontrar os objetos sendo rastreados mais facilmente. A primeira etapa do pré-processamento é a aplicação de um filtro digital para eliminação de pequenos detalhes e ruído que existam na imagem. Um filtro adequado para esta tarefa é o filtro de suavização Gaussiano.

A etapa seguinte do pré-processamento é a transformação da imagem em tons de cinza em uma imagem binária, com uma operação de *threshold* binário. Após essa etapa, a imagem está pronta para que possam ser extraídos os marcadores para calibração. Como os objetos envolvidos nessa implementação são esferas, logo, um mecanismo de extração de elipses deve ser executado. Para isso, é necessária a separação das componentes conexas.

Depois de identificadas as componentes conexas, detectam-se quais dos conjuntos de *pixels* são elipses [Russ 1995], a fim de remover possíveis erros na imagem, como a mão do usuário, ou outro objeto que pode vir a surgir. A posição dos marcadores pode ser aproximada pelos centros das elipses encontradas.

De posse das elipses, é necessária uma etapa da identificação dos objetos para associação da sua posição na imagem com sua posição no padrão de calibração. No desenvolvimento do dispositivo óptico, a identificação foi feita manualmente, pois a mesma era executada uma única vez para a mesma configuração de câmeras. Para o rastreamento do objeto, uma única esfera foi utilizada, logo não houve necessidade de identificação.

3.2. Calibração de Câmera

Calibrar uma câmera é encontrar seus parâmetros intrínsecos (distância focal, os coeficientes de distorção da lente, fator de escala) e extrínsecos (matrizes R e T que transforma um ponto em coordenadas do mundo para coordenadas da câmera). A partir desses parâmetros, é possível obter uma matriz de transformação que leva os pontos do mundo tridimensional para

o plano da imagem gerada por aquela câmera. Existem diversas técnicas de calibração de câmeras descritas na literatura, sendo o algoritmo utilizado no dispositivo desenvolvido o proposto em [Tsai 1987], esquematizado na Figura 1.

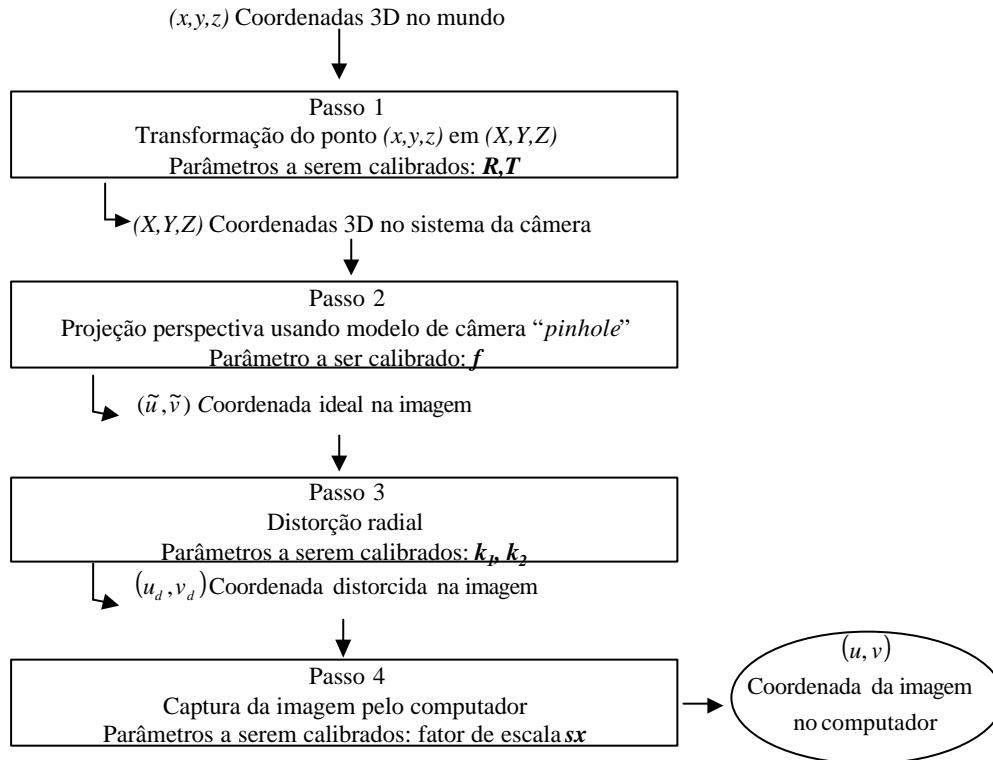


Figura 1: Transformação de coordenadas do mundo em coordenadas da imagem no computador.

3.3. Posicionamento da esfera rastreada

A partir das matrizes R e T obtidas pela calibração de uma câmera, é possível determinar a posição tridimensional da esfera no plano $z = 0$. Com essa posição, calcula-se um raio que parte da posição da câmera e intercepta o plano, passando pelo centro da esfera.

A fim de determinar a posição real da esfera, é necessário que haja no mínimo duas câmeras acompanhando-na. De posse do raio que parte das duas câmeras, é possível encontrar a interseção entre elas. Porém, devido a erros provenientes da extração do centro da esfera e do próprio método Tsai, a interseção pode ser nula. Logo, o ponto mais próximo entre os dois segmentos de reta deve ser encontrado.

A posição do centro da esfera é obtida no ponto médio do vetor de menor comprimento entre os dois segmentos de reta. Quando existem n câmeras capturando, o mesmo algoritmo pode ser aplicado para uma combinação dois a dois dos n segmentos de reta. Com o conjunto de pontos equidistantes obtidos, pode-se calcular o centro da esfera através da média da posição dos pontos ou descartando os pontos mais distantes.

3.4. Filtro de Kalman

Um filtro de Kalman [Kalman 1960], [Welch and Bishop 2001] tem como idéia básica a predição e a correção de predição de um evento. A predição é feita a partir de valores passados e a correção de predição utiliza medições provenientes da observação de um fenômeno. O filtro de Kalman foi utilizado para estimar o movimento sendo realizado pela esfera rastreada, eliminando as “trepidações” obtidas pelos erros da calibração.

3.5. Algoritmo Proposto

O algoritmo proposto [Silva 2004] é composto de duas etapas: calibração e rastreamento, que elas possuem alguns procedimentos em comum. Ambas as etapas trabalham com a imagem segmentada, logo, as quatro primeiras tarefas são iguais:

- a) Captura da imagem pela câmera;
- b) Aplicação de filtro gaussiano;
- c) Inversão da imagem;
- d) Segmentação.

A partir desse momento, a imagem segmentada será utilizada pela etapa de calibração, que é feita uma única vez para cada uma das quatro câmeras utilizadas:

- a) Detecção das elipses;
- b) Identificação dos pontos de calibração (etapa manual);
- c) Calibração da câmera;
- d) Gravação dos arquivos de calibração;

Como a etapa de calibração é feita somente uma vez, os arquivos que armazenam as informações das câmeras calibradas serão utilizados posteriormente para recuperação da posição de cada câmera. A etapa de rastreamento possui as seguintes tarefas:

- e) Para cada câmera:
 - e.1) Detecção e determinação do centro da esfera sendo rastreada;
 - e.2) Conversão do centro da esfera em coordenadas da imagem para coordenadas do mundo;
 - e.3) Definição do segmento de reta r_i , que passa pela posição da câmera e pelo centro da esfera obtido por essa câmera;
- f) Para cada par de segmentos de reta i e j :
 - f.1) Cálculo do ponto P_{ij} mais próximo entre as retas i e j ;
- g) Determinação da média das posições dos pontos P_{ij} .

A média encontrada é o centro da esfera sendo rastreada. Na próxima seção, serão vistos detalhes da implementação e os resultados obtidos.

4. Implementação e resultados

A configuração do local de uso da esfera está ilustrado na Figura 2. As quatro câmeras com emissores infravermelhos foram colocadas nos cantos de uma sala, e a esfera é manipulada sobre uma mesa no centro da sala..

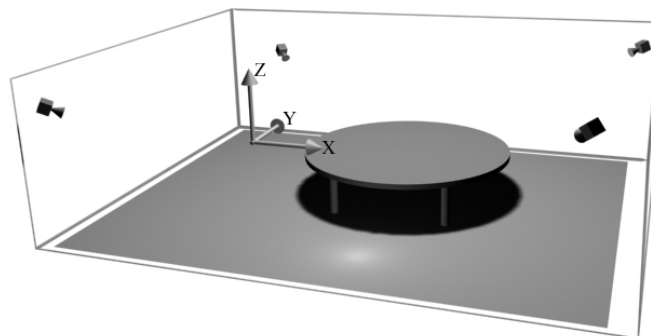


Figura 2: Modelo esquemático do local de testes.

As ferramentas utilizadas para o desenvolvimento foram o OpenCV [Intel 2004], o OpenSceneGraph [OpenSceneGraph 2004] e a biblioteca Qt [Trolltech 2004]. A implementação gerou dois produtos de software. O primeiro foi um programa para calibração das câmeras e o segundo foi um plugin para o dispositivo no ViRAL (*Virtual Reality Abstraction Layer*), um *framework* de RV desenvolvido internamente para facilitar a construção de aplicações interativas. Além desses dois produtos, foi desenvolvida uma cena no ViRAL, para se utilizar o dispositivo óptico para controle de objetos em um grafo de cena.

No programa de calibração é possível selecionar qual câmera será calibrada. No caso do local esquematizado na Figura 2 foi utilizada a imagem obtida através de um equipamento que combina o sinal de quatro câmeras, sincroniza-os e envia um único sinal para a placa de captura do computador, recuperando as imagens das quatro câmeras de uma só vez.

Depois de escolhida a câmera e os filtros necessários aplicados, um padrão (Figura 3i) é utilizado para calibração. O sistema não identifica automaticamente as esferas, ou seja, ele não associa a esfera da imagem à sua correspondente no mundo real. Para isso, o usuário deve manualmente identificá-las (Figura 3ii). Depois das câmeras calibradas, o padrão é removido do alcance de visão das câmeras e a esfera retro-reflexiva começa a ser rastreada.

O dispositivo óptico foi integrado ao ViRAL através de um plugin de dispositivo, que passa a disponibilizar o uso do dispositivo para qualquer aplicação que utilize o ViRAL. A Figura 4 mostra a sua interface de configuração. Para ilustrar o uso do dispositivo, foi criada uma cena simples no ViRAL, onde um dispositivo (um mouse 3D) controla a posição e a orientação do usuário e o dispositivo óptico movimenta a esfera da cena. A Figura 5 ilustra três etapas da movimentação de uma esfera com o dispositivo óptico.

4.1. Testes

O primeiro teste foi feito com a esfera parada a uma distância de aproximadamente 12cm sobre a mesa, utilizando diversas combinações de câmeras. A calibração prévia das câmeras foi feita com 10 pontos e sem a utilização do filtro de Kalman.

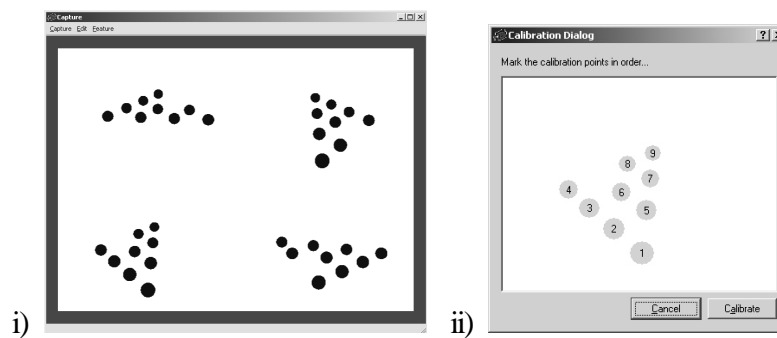


Figura 3: (i) Padrão de calibração; (ii) identificação das esferas.

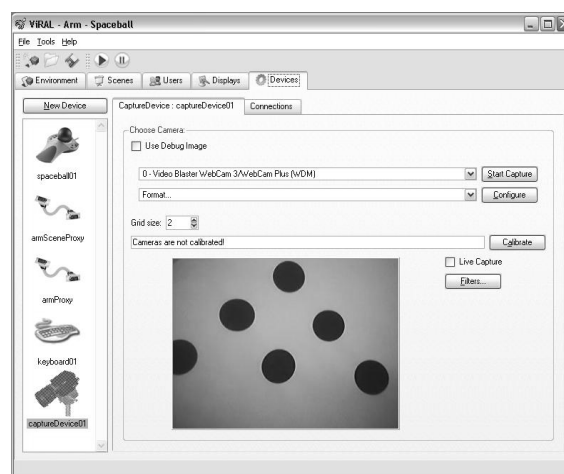


Figura 4: Interface de configuração do plugin do dispositivo óptico.

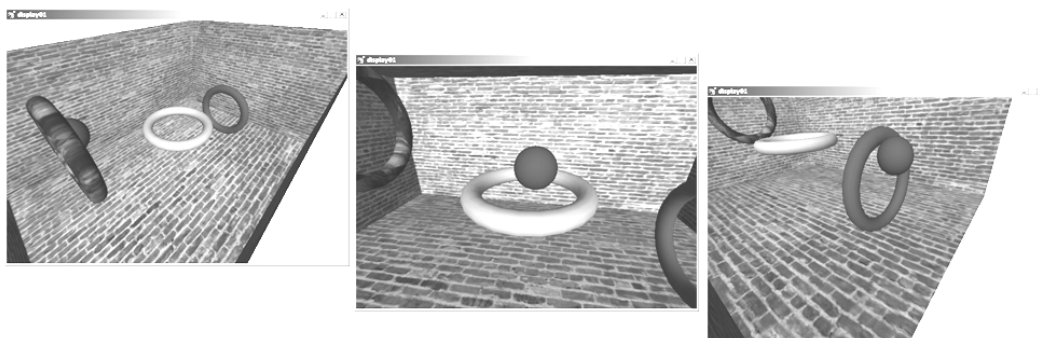


Figura 5: Execução da cena no ViRAL, controlada pelo dispositivo óptico.

O que se nota na Figura 6 é que, quando a configuração de câmeras é mantida, o movimento fica bastante estável. Porém, quando a configuração se modifica, ou seja, uma câmera deixa de localizar o objeto, existe um salto na sua posição. Isso se deve ao fato do fraco resultado da calibração obtida pelo método Tsai. O uso do filtro de Kalman, em um segundo teste, suaviza o movimento quando a posição medida se desvia da sua rota normal, porém mantendo a mesma velocidade da medição.

Em [Szenberg 2001] é mostrado que o método de Tsai não apresenta bons resultados quando o número de pontos de calibração é pequeno. Para resolver esse

problema, é utilizada uma homografia (transformação projetiva planar), na qual é definido um mapeamento 2D para 2D, de um plano contido no mundo real para o plano da imagem, para estimar uma quantidade maior de pontos para serem utilizados no Tsai. Seguindo essa solução, no teste seguinte foram usados 121 pontos para calibração, ao invés dos 10 pontos anteriores, e o resultado obtido foi bem melhor (Figura 7).

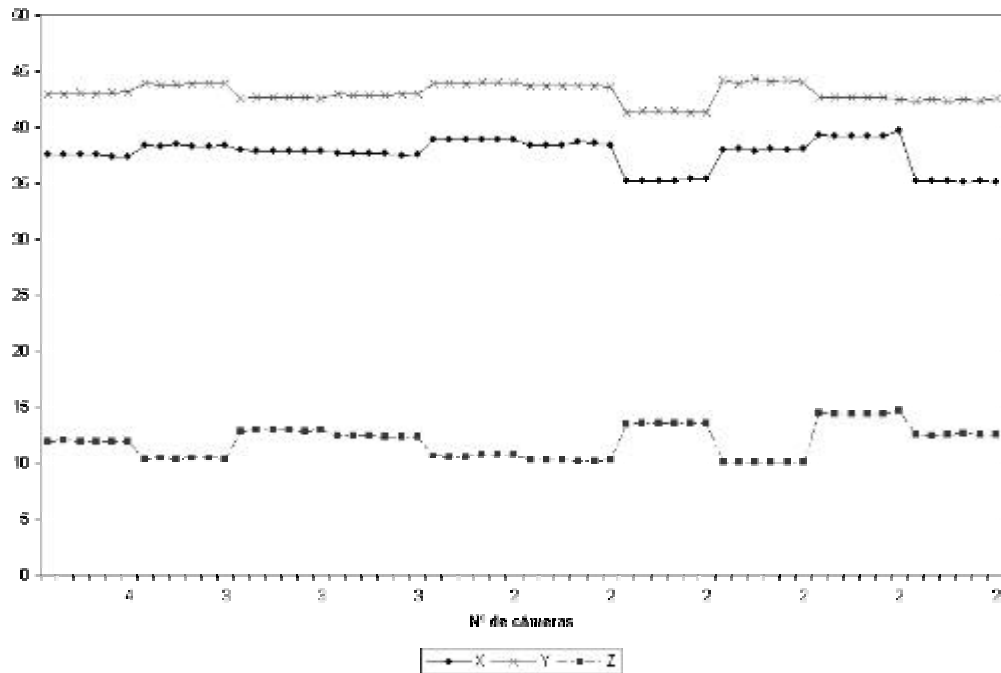


Figura 6: Esfera em $Z = 12\text{cm}$, calibração com 10 pontos sem filtro de Kalman.

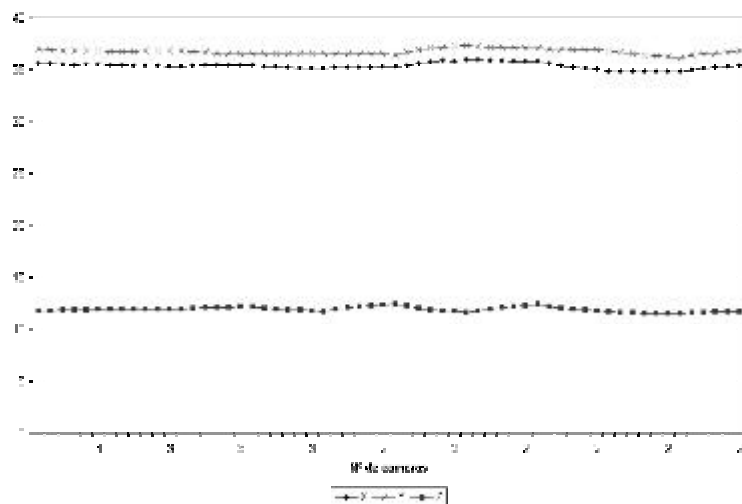


Figura 7: Esfera em $Z = 12\text{cm}$, calibração com 121 pontos, com filtro de Kalman.

A **Erro! Auto-referência de indicador não válida.** apresenta a posição média e o desvio padrão das coordenadas para os testes. Pelo resultado apresentado, podemos observar uma diferença significativa no desvio padrão quando comparamos a cota Z do teste 3 em relação ao teste 1. Isso mostra uma limitação do método Tsai quando poucos pontos são utilizados.

Tabela 1: Posição média e desvio padrão dos testes.

		X	Y	Z
Teste 1 (10 pontos, sem Kalman)	Média	37,64939	43,07366	11,89308
	σ	1,342049	0,791235	1,453631
Teste 2 (10 pontos, com Kalman)	Média	37,63999	43,07322	11,91327
	σ	1,022192	0,58011	1,047162
Teste 3 (121 pontos, com Kalman)	Média	35,35106	36,78472	11,92138
	σ	0,319098	0,259508	0,223056

Foi realizado também um teste utilizando as quatro câmeras com a esfera em movimento: primeiro na direção -X e depois Y, como ilustra a Figura 8i. O resultado com o filtro de Kalman habilitado é mostrado na Figura 8ii. O gráfico ilustra o movimento esperado, sendo que o filtro de Kalman fez com que o movimento descrevesse uma trajetória mais suave.

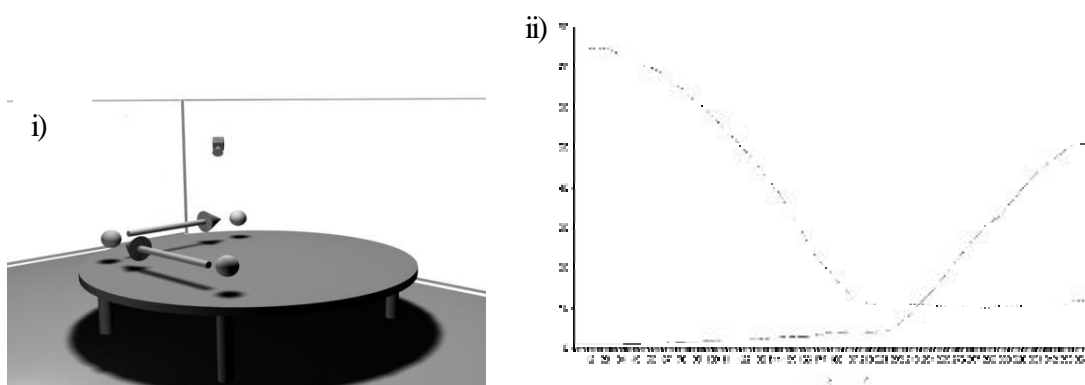


Figura 8: (i) Esquemático do movimento da esfera; (ii) esfera se movimentando em X e depois em Y.

5. Conclusão

O primeiro resultado deste trabalho foi a criação de um dispositivo óptico utilizando equipamentos de baixo custo, como câmeras e placas de captura. Pelos resultados obtidos, podemos concluir que o sistema foi bastante preciso ao determinar a posição da esfera, principalmente na ocorrência de oclusão de uma das câmeras. Isso permite que o usuário se movimente sem restrições pelo ambiente de RV.

A precisão alcançada pelo sistema pode ser melhorada utilizando-se câmeras de melhor qualidade e resolução. Neste trabalho foram utilizadas câmeras analógicas com baixa resolução. É possível melhorar também a precisão aumentando o número de pontos e a área de calibração das câmeras, usando, eventualmente, um modelo de calibração tridimensional.

Uma limitação desse sistema é a necessidade de se utilizar duas ou mais câmeras com sensores infravermelhos. Essas câmeras não funcionam quando colocadas em ambiente com luz incandescente, tornando seu uso exclusivo em salas fechadas. Já está em andamento uma opção por reconhecimento da esfera escura sobre um fundo claro.

Outra limitação é quanto ao número de graus de liberdade, pois esse dispositivo fornece apenas 3 graus. Uma continuidade natural deste trabalho é a criação de um dispositivo capaz de gerar 6 graus de liberdade, permitindo a detecção da rotação do dispositivo e não apenas sua translação no espaço.

O segundo resultado do trabalho foi a integração deste dispositivo no ViRAL. Ele foi desenvolvido como *plugin* para o ViRAL, permitindo seu reuso em futuras aplicações de RV.

Agradecimentos

A pesquisa em Realidade Virtual do Tecgraf/PUC-Rio é apoiada primordialmente pelo CENPES/PETROBRAS, pela FINEP e RNP. Alberto Raposo é bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq, processo no 305015/02-8.

Referências

- Intel Open Source Computer Vision Library (2004). Intel Research <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv>
- Kalman, R. E. (1960) “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”. Transactions of the ASME--Journal of Basic Engineering, vol. 82, Series D: 35-45.
- OpenSceneGraph - The High Performance Open Source Graphics Toolkit (2004) <http://www.openscenegraph.org>.
- Russ, J. C. The Image Processing Handbook. CRC Press, 2nd ed., 1995.
- Silva, R. J. M. (2004) “Integração de um Dispositivo Óptico de Rastreamento a uma Ferramenta de Realidade Virtual”. Dissertação de Mestrado – Depto. de Informática, PUC-Rio.
- Stefani, O., Hoffmann, H. and Rauschenbach, J. (2003) “Design of Interaction Devices for Optical Tracking in Immersive Environments”, In: Human-Centred Computing: Cognitive, Social and Ergonomic Aspects, Volume 3 of the Proceedings of HCI International.
- Sturman, D. (1994) “A Brief History of Motion Capture for Computer Character Animation. Character Motion Systems”, SIGGRAPH Course 9.
- Szenberg, F. (2001) “Acompanhamento de Cenas com Calibração Automática de Câmeras”. Tese de Doutorado – Depto. de Informática, PUC-Rio.
- Trolltech (2004) Qt - The multi-platform C++ GUI/API. <http://www.trolltech.org/>
- Tsai, R. Y. (1987) “A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses”, IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3(4): 323-344.
- van Liere, R. and Mulder, J. D. (2003) “Optical tracking using projective invariant marker pattern properties”, IEEE Virtual Reality.
- Welch, G. and Bishop, G. (2001) “An Introduction to the Kalman Filter”, SIGGRAPH Course 8.