Requisitos de Ambientes Virtuais Distribuídos de Larga Escala

Renata Cruz Teixeira — renata@gta.ufrj.br
Otto Carlos M. B. Duarte* — otto@gta.ufrj.br

Grupo de Teleinformática e Automação - GTA
COPPE/EE - Programa de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 68504 - CEP 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Resumo

Ambientes virtuais distribuídos demandam um grande volume de dados que deve ser trocado através do sistema de comunicação. As restrições da rede de computadores em atender a esta demanda tendem a limitar o número de participantes neste mundo. Este artigo discute os requisitos de um sistema distribuído de realidade virtual para suportar um grande número de usuários. São apresentadas técnicas que utilizam características da informação a ser distribuída para reduzir o volume de dados trocados, entre elas o *dead-reckoning*, a representação de multidões e a filtragem dos dados. Aliada a estas técnicas é discutida a utilização de protocolos multidestinatários e formas de alocação dos participantes do mundo em grupos multiponto. Além disto, são estudadas abordagens para mundos virtuais confiáveis e escaláveis.

Abstract

Distributed virtual environments need a large volume of data that must be exchanged through the communication system. Computer networks' constraints in serving this demand limit the number of participants in the virtual world. This paper discusses the requirements for virtual reality (VR) distributed systems to support a large number of users. Techniques that use the information characteristics are presented to reduce the volume of exchanged data, including dead-reckoning, crowd representation and data filtering. Together with these techniques, the paper discusses the utilization of multicast protocols and how to allocate the world's participants in multicast groups. In addition, approaches to scalable and reliable virtual worlds are studied.

*Este trabalho foi realizado com recursos da UFRJ, FUJB, PROTEM-CC, CNPq, CAPES e COFECUB.

1 Introdução

A Realidade Virtual (RV) oferece diferentes perspectivas à interação homem-máquina, utilizando uma combinação de tecnologias cujas interfaces com os usuários humanos podem dominar seus sentidos de forma que eles interajam intuitivamente com um ambiente imersivo e dinâmico gerado por computador. Diversas aplicações vêm sendo propostas para treinamento, visualização científica, entretenimento, arquitetura, medicina entre outras.

Sistemas distribuídos de RV possibilitam a interação de usuários geograficamente dispersos. Em redes locais o número de participantes do mundo virtual é limitado, mas em ambientes virtuais construídos sobre redes de longa distância o número de usuários potenciais é bastante elevado [1]. Devido a restrições tanto do sistema de comunicação quanto do sistema de RV, a maioria dos sistemas distribuídos de RV existentes não suportam um grande número de participantes [2].

As maiores limitações para o desenvolvimento de ambientes virtuais de larga escala são as restrições impostas pelo sistema de comunicação. Conforme o número de participantes cresce, aumentam também os requisitos de banda passante. Apesar do aumento considerável da capacidade de transmissão das redes de comunicação com surgimento de tecnologias como o modo de transferência assíncrono (ATM), a RV distribuída pode requerer uma banda passante enorme para suportar múltiplos usuários, áudio, vídeo e trocar em tempo real primitivas e modelos gráficos 3D [1]. Além disto, ainda não há uma vasta disponibilidade destas redes de alta velocidade para o usuário comum.

Portanto, um ambiente virtual deve considerar e tentar contornar as limitações impostas pela rede de comunicação de forma a ser escalável, possibilitando um grande número de participantes. Este artigo apresenta alternativas para a construção de mundos virtuais escaláveis. Para tal, pode-se explorar alguns aspectos conhecidos da informação a ser distribuída, reduzindo o volume de dados transmitido. São apresentadas técnicas de filtragens dos dados enviados, *dead-reckoning* [3] e formas para representação de multidões [4]. A fim de alcançar o objetivo de sistemas de RV de larga escala, uma alternativa é a utilização de comunicação multiponto [1, 2, 5, 6]. São discutidas diversas abordagens para o mapeamento das regiões do mundo virtual em grupos multiponto e a necessidade de confiabilidade nestes sistemas.

A seção 2 deste artigo apresenta algumas alternativas utilizadas pelos sistemas distribuídos de RV para otimizar o uso dos recursos do sistema de comunicação baseados em aspectos da informação distribuída. A seção 3 discute como empregar protocolos multidestinatários para tornar o ambiente virtual escalável e como pode ser realizada a divisão dos objetos do mundo virtual em grupos multiponto. A seção 4 apresenta algumas considerações para sistemas que precisem de confiabilidade. Na seção 5 são colocadas as considerações finais.

2 Aspectos da Informação Distribuída

Um mundo virtual é composto por objetos. Os objetos controlados por usuários são conhecidos como **avatares**, são imagens tri-dimensionais (que podem incluir também um vídeo) e servem como entrada padrão para a pessoa que o controla. Existem objetos controlados por simulações de computador que operam de forma relativamente autônoma, sendo chamados agentes ou robôs. Além destes dois tipos de objetos, há também objetos fixos que ajudam a compor o ambiente virtual.

As informações que descrevem um objeto são o estado deste objeto. Um sistema distribuído de RV é responsável por notificar o estado de um objeto a todos os participantes do ambiente virtual. Esta atualização permanente de estado permite que os usuários tenham uma visão consistente do mundo virtual.

Todos os participantes deverão receber as notificações referentes a todos os objetos do mundo, o que gera um volume muito grande de dados trafegando pela rede. Porém, se forem considerados alguns aspectos conhecidos da informação a ser distribuída, pode-se reduzir tanto a quantidade de informação enviada quanto a freqüência das notificações. Alguns sistemas distribuídos de RV aproveitam-se deste conhecimento para diminuir a necessidade de banda passante.

O NPSNET [2], sistema de simulação de treinamento militar, utiliza uma base de dados completamente replicada em todos os nós, eliminando a necessidade de transmissão dos objetos. O NPSNET reduz a freqüência de notificações de mudança de estado usando uma técnica para predição de movimentos chamada *dead-reckoning*. Além disto, os objetos do mundo virtual são divididos em classes espaciais, temporais e funcionais, de forma que os objetos só recebam informações de atualização daqueles objetos que pertencem à mesma classe que ele. Esta divisão em classes realiza uma filtragem nos dados que estão sendo enviados.

O MASSIVE [7] é um sistema distribuído de RV que suporta atividades colaborativas entre usuários com equipamentos heterogêneos. Introduz o conceito de **aura**, **focus** e **nimbus** para a interação espacial entre os objetos. Os objetos só trocam notificações quando há uma colisão de auras, ou seja, é feita uma filtragem dos dados de forma que apenas objetos que estão em um mesmo escopo espacial troquem informações. Está sendo desenvolvida uma nova versão do MASSIVE [4], com objetivo principal de ser escalável para um grande número de usuários. Neste novo sistema é considerado como representar multidões de forma a alcançar este objetivo.

O sistema do Grupo de Realidade Virtual da Universidade Federal de São Carlos [5] utiliza tanto o *dead-reckoning* quanto a filtragem de dados, feita através da divisão do mundo virtual em sub-áreas. O Spline [8], desenvolvido no *Mitsubishi Electric Research Labs* (MERL), incorpora uma filtragem baseada em regiões ou **locales**.

Estes e outros sistemas baseiam-se em técnicas como *dead-reckoning*, representação de multidões e filtragem dos dados para reduzir o tráfego na rede. Esta redução do tráfego é o primeiro passo na direção de sistemas distribuídos de RV escaláveis para um grande número de usuários. Estas técnicas são detalhadas a seguir.

2.1 *Dead-Reckoning*

O conceito de *dead-reckoning* [3] foi introduzido no sistema SimNet, desenvolvido no início dos anos 80 pelas forças armadas americanas. O termo é originado da navegação marítima e sugere que a posição atual de um objeto pode ser extrapolada de sua posição e sua velocidade anteriores.

Durante a simulação, um simulador calcula sua próxima posição e orientação baseadas em um algoritmo detalhado que leva em consideração diversos fatores, entre eles a posição e a velocidade anteriores, e os comandos do usuário. Ele calcula sua posição novamente, levando em consideração um número limitado de entradas. Se a diferença entre o primeiro cálculo detalhado e segundo mais limitado exceder um certo limiar, então o simulador envia mensagens contendo sua posição atualizada baseada no cálculo detalhado. Se a diferença entre os dois cálculos for menor que o limiar, o simulador não gera uma nova mensagem na rede. Desta forma, os objetos enviam mensagens somente quando necessário para manter a acurácia da simulação. Depois, usando o mesmo conjunto limitado de entradas, o simulador extrapola a posição de todos os usuários remotos na simulação. Como todos os simuladores seguem este procedimento, o número de mensagens na rede é reduzido drasticamente.

O *dead-reckoning* foi primeiramente utilizado para ambientes de simulações militares, onde o número de objetos é restrito e todos os simuladores possuem um banco de dados completo de objetos. Nesta situação, as informações que precisam ser enviadas para a atualização do objeto são a sua posição, sua velocidade e orientação. Portanto, além da freqüência de mensagens ser reduzida pela característica de predição do *dead-reckoning*, o volume de informação enviada por mensagem também diminui.

A idéia do *dead-reckoning* pode ser estendida para representar objetos mais complexos, que contêm articulações, como seres humanos. Além do vetor velocidade do objeto, pode-se transmitir uma informação de comportamento, no caso de seres humanos, andar, caminhar ou dançar. Estas informações são suficientes para que um objeto remoto possa ser simulado. No caso dos nós não possuirem um banco de dados com todos os objetos do mundo, o objeto seria enviado inicialmente e depois apenas as informações de movimento precisariam ser enviadas periodicamente.

2.2 Representação de Multidões

Aplicações como espetáculos, concertos, palestras e conferências têm o potencial de envolver um grande número de usuários. Porém, estes usuários participam como uma multidão. Uma multidão é uma abstração de um grupo de objetos que permite que estes objetos sejam tratados como um todo em algumas circunstâncias (para interação a distância) mas como indivíduos em outras (para interação entre membros) [4].

Benford *et al.* [4] apresentam uma proposta para gerenciamento de conhecimento e comunicação entre participantes de uma multidão. A estrutura para tratar multidões é baseada no modelo espacial de interação, proposto anteriormente pela equipe, e numa extensão para este modelo chamada **objeto mediador**. A qualidade da informação que é transmitida depende do nível de **conhecimento** que um observador tem do observado. Um objeto mediador é um objeto independente que afeta o conhecimento entre dois outros objetos.

As multidões são uma classe específica de objetos mediadores que suportam grupos de pessoas potencialmente grandes. As multidões devem ter efeito assimétrico no conhecimento. Vistos do lado de fora, indivíduos na multidão estão escondidos e são substituídos por uma visão agregada da multidão como um todo. Dentro da multidão, indivíduos podem interagir normalmente uns com os outros. Tipicamente, eles também vão ter conhecimento dos objetos fora da multidão individualmente.

A representação de multidões é uma noção importante para a construção de ambientes virtuais de larga escala. Como um grupo de objetos é representado por um único objeto multidão, as mensagens de atualização que seriam enviadas por cada um dos objetos do grupo vão ser substituídas por mensagens referentes a apenas um objeto. Isto diminui consideravelmente o tráfego na rede e possibilita um número bem maior de participantes.

2.3 Filtragem de Dados

Normalmente, um usuário não interage com todos os objetos de um mundo virtual ao mesmo tempo. A técnica de filtragem aproveita-se deste fato. Ela divide o mundo virtual, delimitando quais os objetos que estão no mesmo escopo do usuário em questão. Desta forma, são eliminadas as trocas de informações irrelevantes, ou seja, entre objetos que não estão interagindo.

Em geral, a filtragem pode ser espacial, temporal ou funcional [2]. A **filtragem espacial** agrupa objetos que compartilham a mesma região do mundo virtual. A **filtragem temporal** agrupa objetos que necessitam de taxas de atualização similares. A **filtragem funcional** agrupa objetos de uma mesma classe funcional, por exemplo, numa simulação militar, uma classe funcional seria o grupo de controle aério.

O tipo mais comum de filtragem é a espacial. Para este tipo de filtragem deve ser considerado se o espaço é aberto, por exemplo cidades, parques, praias, ou confinado, edificíos, escritórios [9]. No caso de espaços confinados pode ser utilizada a filtragem por oclusão, ou seja, se existir algum bloqueio entre dois objetos um não vai receber informações sobre o outro. No caso de espaços abertos pode ser usada tanto a filtragem por oclusão, quanto a filtragem por distância - que verifica a distância entre os objetos para saber se eles podem interagir e com que nível de detalhe.

A filtragem dos dados delimita o escopo de interação de um usuário, diminuindo o número de mensagens trocadas – apenas participantes do mesmo grupo trocam mensagens. Uma implementação interessante para a filtragem dos dados seria a utilização de grupos multiponto, pois pode ser feito um mapeamento direto entre os grupos da filtragem nos grupos multiponto. É importante ressaltar que mesmo que o número de participantes no mundo cresça, o número dentro de cada grupo mantém-se constante. Esta propriedade é essencial para a escalabilidade do ambiente.

3 Utilização de Protocolos Multidestinatários

Os protocolos multidestinatários permitem a transmissão de um pacote de dados para um conjunto de destinos em uma única operação. O termo multidestinatário considera tanto a comunicação ponto-a-multiponto, uma fonte e vários destinos, quanto multiponto-a-multiponto, várias fontes e vários destinos. Os protocolos multidestinatários podem ser utilizados em mundos virtuais com dois objetivos principais: restringir o número de participantes num mesmo escopo de recepção de mensagens, fazendo um mapeamento entre grupos de filtragem e grupos multiponto, e economizar banda passante.

Um grande benefício da comunicação multiponto é a diminuição do custo de envio da mensagem. Alguns sistemas podem suportar multiponto a nível de *hardware* de uma forma paralela. Nas redes em que os roteadores suportam multiponto, o custo para o transmissor de enviar um pacote multiponto é praticamente o mesmo de enviar um pacote ponto-a-ponto. A responsabilidade de copiar e difundir os pacotes é assumida pela rede que pode utilizar o paralelismo inerente à topologia da rede para buscar maior eficiência na comunicação multidestinatária. Isto faz com que um grande transmissor, com muitos receptores, não seja mais caro que um pequeno.

Outro beneficío do multiponto é a melhor utilização dos recursos da rede. Em redes que não utilizam multiponto o aumento na carga da rede é proporcional ao número de destinos. Com a transmissão multidestinatária, um determinado pacote só estará presente em um segmento de rede uma vez.

3.1 IP Multiponto e MBone

As comunicações multidestinatárias através da Internet foram possibilitadas com a extensão do IP para suportar multiponto, surgindo o protocolo IP multiponto [10]. O IP multiponto possibilita o envio de um datagrama IP para um grupo de *hosts*, um conjunto de um ou mais *hosts* identificados por um único endereço destino IP. A rede virtual dentro da Internet que utiliza o IP multiponto é conhecida como MBone (*Multicast Backbone*) [11].

O MBone é chamado de rede virtual porque compartilha o mesmo meio físico que a Internet. A propagação de mensagens com endereçamento de grupo entre subredes é feita por roteadores que suportam multiponto, chamados roteadores multiponto. Quando uma subrede com suporte a roteamento de grupo está isolada das outras por roteadores convencionais, há necessidade de utilização de "tunelamento". Desta forma, os pacotes IP multiponto são encapsulados dentro de pacotes IP convencionais.

A participação dos membros em um grupo de *hosts* é dinâmica, ou seja, os *hosts* podem aderir ou se desligar de um grupo a qualquer momento. Não existe nenhuma restrição em relação à localização ou ao número de membros de um grupo. Um *host* pode participar de um ou mais grupos ao mesmo tempo e não precisa ser membro de um grupo para enviar datagramas para ele.

O dinamismo da participação dos membros em grupos IP multiponto pode ser utilizado em ambientes virtuais em que os participantes estejam subdivididos em grupos multiponto. O sistema NPSNET baseia-se em MBone para possibilitar um grande número de usuários.

3.2 Abordagens para Alocação de Grupos Multiponto

O escopo de um receptor descreve os limites lógicos da informação que ele deseja obter. Este escopo pode ser visto como um filtro para as informações a serem recebidas. Na seção 2.3 foram apresentadas filtragens de dados e considerados três tipos de filtragens: funcional, temporal e espacial.

A filtragem de dados cria grupos de usuários segundo uma destas classificações. É importante notar que os usuários podem pertencer a mais de um grupo ao mesmo tempo. Esses grupos de usuários podem ser mapeados diretamente em grupos multiponto. Para filtragens funcionais e temporais estes grupos são praticamente estáticos e não há muitas opções para o mapeamento dos filtros em grupos multiponto. Porém, para filtragens espaciais existe um grande dinamismo nos grupos, devido a possibilidade de movimentação dos objetos pelo mundo. Além disto, a forma de alocar as regiões do mundo virtual pode variar desde um grupo por mundo até um grupo por fonte.

Dada a natureza do mundo virtual, análogo ao mundo real, dois fatores podem ser explorados para selecionar o escopo da informação e da interação:

- limitações de percepção e resolução – o campo de visão é limitado, além disto, objetos mais distantes devem ser vistos com menos detalhes;
- interferência entre objetos – uma sala ou uma caixa fechada separam os objetos que estão dentro dos que estão do lado de fora.

O primeiro fator sugere que a filtragem seja baseada na distância do observador, provavelmente considerando a direção em que o usuário está olhando. O segundo, introduz uma dependência direta do conteúdo do mundo virtual. Um escopo ideal para a filtragem deveria ignorar apenas os objetos que não poderiam ser percebidos ou influenciados em nenhuma situação e enxergá-los com qualidade reduzida somente quando esta redução fosse escondida por limitações dos dispositivos ou da própria percepção do usuário. Este escopo ideal não seria suficientemente reduzido e, portanto, os recursos devem ser alocados apenas para subconjuntos deste escopo.

Existem várias abordagens para realizar a alocação dos objetos do mundo virtual em grupos multiponto [6].

Um grupo por fonte

Esta abordagem possibilita que o escopo efetivo e o ideal coincidam. Assim, um usuário não entra em contato com fontes em que ele não esteja interessado só porque elas compartilham um mesmo grupo multiponto que fontes em que ele está interessado. Como resultado, o número de fontes é o mínimo possível para o escopo ideal em questão. As desvantagens desta abordagem são ter que considerar todas as fontes e observadores individualmente ao verificar interseções, além da necessidade de um grupo multiponto por fonte. Isto não seria escalável para sistemas grandes. O tratamento de grupos multiponto é mais custoso nos roteadores porque não existe uma organização hierárquica dos grupos multiponto atrelada às subredes como existe para endereços convencionais.

Um grupo por mundo

Esta alternativa elimina a filtragem dentro dos limites de um mundo, ou seja, todas as fontes enviam suas mensagens para um mesmo grupo multiponto e todos os observadores recebem seus pacotes através deste grupo. A adesão e desligamento do grupo ocorrem apenas quando as fontes e os observadores entram e saem do mundo. É necessário que os observadores possam tratar o tráfego gerado em excesso. Além disto, esta abordagem é melhor aplicada quando o tamanho do mundo é limitado.

Grupos baseados em localização

Nesta aboradagem o mundo é subdividido em áreas fixas, conforme ilustrado na figura 1.a. As fontes pertecem a um único grupo multiponto baseado em sua localização e trocam de grupo conforme atravessam seus limites. Os observadores monitoram cada grupo multiponto que se sobrepõe a seu escopo, o que pode mudar com a movimentação do observador. Desta forma, o escopo efetivo de um observador é estendido e ele é mantido informado de um número de fontes em que ele não está interessado. Tornando os grupos grandes possibilita a utilização de menos grupos multiponto, mas o escopo efetivo cresce para todos os usuários. Para usar esta abordagem deve ser possível pré-determinar um tamanho de área a ser utilizado de acordo com a aplicação em questão.

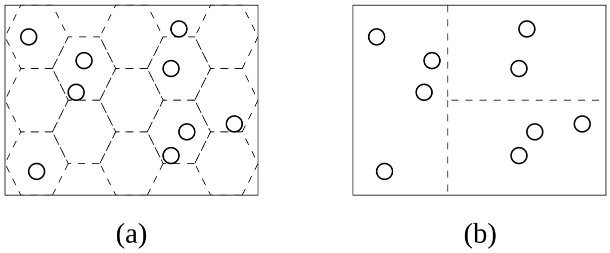

Figura 1: Alocação com grupos compartilhados.

Grupos associados ao conteúdo

Esta abordagem é similar a de divisão em áreas fixas descrita acima, com excessão de que os grupos são relacionados a organização espacial (a arquitetura) do mundo virtual. Por exemplo, na figura 1.b é representada a planta de um apartamento. A divisão dos objetos nos grupos multiponto segue a disposição dos cômodos, refletindo a tendência de que as interações dentro de um espaço fechado envolvam o conteúdo deste espaço. A descrição do mundo deve prover algumas diretivas explícitas para o sistema de comunicação sobre a possibilidade de uma região a ser utilizada como um grupo, enquanto a abordagem baseada em localização pode ser feita em um espaço arbitrário. Além disto, esta abordagem não pode ser utilizada quando não existe um conteúdo estruturado para o espaço.

Grupos dinâmicos

As duas abordagens de grupos compartilhados apresentadas anteriormente são estáticas e imutáveis. Esta abordagem final é dinâmica, respondendo a disposição de fontes e observadores no espaço. A figura 2 mostra um exemplo desta abordagem. O mundo começa com um único grupo multiponto (Grupo 1). Conforme a população aumenta este grupo vai sendo dividido em múltiplos grupos (Grupo 1 e Grupo 2), cada um cobrindo uma parte do espaço. Esta abordagem pode ser considerada um complemento para a abordagem de área fixa para mundos que são imprevisíveis e mutáveis. Com grupos dinâmicos, as descontinuidades são mais aparentes conforme novos grupos multiponto são adicionados ao escopo ou são feitas divisões e recombinações.

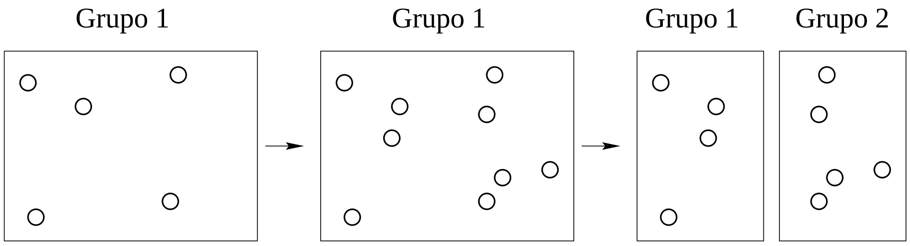

Figura 2: Alocação com grupos dinâmicos.

4 Confiabilidade

Os protocolos multidestinatários possibilitam que os mundos virtuais cresçam mantendo a carga nas fontes e otimizando a utilização dos recursos da rede de comunicação. Porém, estes protocolos não são escaláveis quando há necessidade de confiabilidade. Abordagens viáveis para oferecer multiponto confiável na Internet estão começando a surgir [12]. O problema do multiponto confiável em ambientes virtuais é relativo ao tamanho do mundo e seu crescimento, que torna o tratamento dos reconhecimentos (ACKs) um desafio conhecido como implosão de ACKs.

As duas abordagens mais populares para protocolos multidestinatários confiáveis atualmente são chamadas **orientada pelo transmissor** e **orientada pelo receptor**. Na abordagem orientada pelo transmissor, este mantém o estado de todos os receptores para quem ele deve enviar informação e de quem ele deve receber ACKs. A cada transmissão ou retransmissão da fonte é feita uma transmissão multiponto para todos os receptores, e para cada pacote recebido corretamente o receptor envia um ACK para o transmissor. Ao contrário, na abordagem orientada pelo receptor, cada receptor informa à fonte de que alguma informação está errada ou faltando. O transmissor faz a difusão multiponto de todos os pacotes, dando prioridade para retransmissões e o receptor envia um reconhecimento negativo (NACK) quando detecta um erro ou uma pacote perdido.

Towsley *et al.* [13] apresentam uma análise que fornece uma demonstração quantitativa da superioridade da abordagem orientadada ao receptor sobre a abordagem orientada ao transmissor. Os protocolos orientados ao transmissor possuem desempenho inferior a nível da escalabilidade alcançada em relação aos protocolos orientados ao receptor, especialmente quando neste último são utilizados esquemas de supressão de NACKs para evitar a sobrecarga da fonte com pedidos de retransmissão [12]. Portanto, para a construção de um ambiente virtual escalável e confiável deve-se utilizar protocolos multidestinatários orientados ao receptor e com supressão de NACKs.

5 Considerações Finais

Este artigo abordou os principais requisitos para a construção de ambientes virtuais distribuídos de larga escala, ressaltando as restrições do sistema de comunicação para estes ambientes. Foram estudadas formas de otimizar a utilização dos recursos da rede de computadores baseadas em aspectos conhecidos do mundo virtual sendo construído. O *dead-reckoning* permite que tanto o volume quanto a freqüência das informações enviadas sejam reduzidas através de uma predição de movimento dos objetos. A representação de multidões gera uma redução significativa no número de mensagens enviadas, representando um grupo de objetos - multidão - como um único objeto. A filtragem dos dados delimita um escopo para a troca de informação.

Estas técnicas aliadas a utilização de protocolos multidestinatários, com o mapeamento do escopo de filtragem a grupos multiponto, viabilizam o desenvolvimento de um mundo virtual escalável para um grande número de participantes. A divisão dos participantes do mundo em grupos multiponto deve ser otimizada considerando um compromisso entre o número de usuários por grupo e o número de grupos necessários. Nesta relação, a divisão dos grupos baseada em localização, associada ao conteúdo e dinâmica são as mais vantajosas. Algumas restrições podem surgir quando o sistema distribuído de RV necessita de confiabilidade. Porém, estas limitações podem ser transpostas com uma abordagem orientada a receptor para o protocolo multidestinatário.

Referências

[1] M. R. Macedonia e M. J. Zyda, "A taxonomy for networked virtual environment", *IEEE Multimedia*, vol. 4, no. 1, no. 1, 1997.

[2] M. R. Macedonia, M. J. Zyda, D. R. Pratt, D. P. Brutzman e P. T. Barham, "Exploiting reality with multicast groups", *IEEE Computer Graphics and Applications*, setembro 1995.

[3] K. Pimentel e B. Blau, "Teaching your system to share", *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 14, no. 1, janeiro 1994.

[4] S. Benford, C. Greenhalgh e D. Lloyd, "Crowded collaborative virtual environments", in *ACM Computer-Human Interface CHI'97*, 1997.

[5] R. B. de Araujo e C. Kirner, "Especificação e análise de um sistema distribuído de realidade virtual", in *XIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, 1996.

[6] C. Greenhalgh, "Spatial scope and multicast in large virtual environments", tech. rep., The University of Nottingham/Department of Computer Science, setembro 1996.

[7] C. Greenhalgh e S. Benford, "MASSIVE: a distributed virtual reality system incorporating spatial trading", in *Proceedings IEEE DCS'95*, Vancouver, Canada, 1995.

[8] J. W. Barrus, R. C. Waters e D. B. Anderson, "Locales: Supporting large multiuser virtual environments", *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 16, no. 6, pp. 50–57, novembro 1996.

[9] R. B. de Araujo e C. Kirner, "Análise dos requisitos de rede de um sistema distribuído de realidade virtual", in *XXIII Seminário Integrado de Software e Hardware*, 1996.

[10] S. Deering, *RFC 1112: Host Extensions for IP Multicasting*, agosto 1989.

[11] M. R. Macedonia e D. P. Brutzman, "MBone provides audio and video across the Internet", *IEEE Computer*, abril 1994.

[12] B. N. Levine e J. Garcia-Luna-Aceves, "A comparison of known classes of reliable multicast protocols", in *Proceedings International Conference on Network Protocols*, outubro 1996.

[13] D. Towsley, J. Kurose e S. Pingali, "A comparison of sender-initiated and receiver-iniciated reliable multicast protocol", *Performance Evaluation Review*, vol. 22, maio 1994.