

# LEMe Wall: Desenvolvendo um Sistema de Multi-Projecção

Bruno Rodrigues de Araújo, Tiago Guerreiro, Ricardo Jota  
IMMI INESC-ID/ IST, Universidade Técnica de Lisboa  
Rua Alves Redol, 1000-029 Lisboa  
{brar, tjvg, rjc}@immi.inesc-id.pt

Joaquim A. Jorge, João M. Pereira  
Dep. Engª. Informática, IST/UTL  
Av. Rovisco Pais, 1000 Lisboa  
jorgej@acm.org

## Abstract

*Este artigo apresenta a LEMe Wall, um ambiente inteligente organizado em torno de um sistema de multi-projecção. Este é composto por três componentes essenciais: uma grelha de 4x3 projectores devidamente suportados, uma tela flexível que oferece o suporte para a visualização e um aglomerado de máquinas que controlam a projecção. O ambiente é complementado por um conjunto de sensores e actuadores que aumentam a imersão e naturalidade de interacção. Neste artigo são descritos os maiores desafios na construção deste sistema de multi-projecção bem como as opções tomadas ao longo do desenvolvimento do ambiente inteligente.*

## Keywords

*Ecrãs de larga escala, Multi-projecção, Retro-projecção, Calibração, Ambiente Inteligente.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os ecrãs de larga escala são uma tecnologia emergente que tem oferecido várias aplicações inovadoras na área de Computação Gráfica nos últimos cinco anos, sendo objecto de investigação em várias instituições [IGD-A4, Hereld00, Li00, PennState]. As potencialidades de visualização e interacção deste género de dispositivos apresentam-nos como sucessores à metáfora do tampo de secretária, que se mostra insuficiente, quando se procura visualizar imagens de alta resolução ou interagir de forma mais natural (semelhante à interacção entre humanos).

A realização de um ambiente imersivo sugere, automaticamente, um conjunto de mecanismos adicionais que potenciam as capacidades do mesmo, transformando a sala onde este se encontra num verdadeiro ambiente inteligente. Este ambiente, contempla, para além do ecrã, a presença de sensores e actuadores que rodeiam os utilizadores extrapolando a imersão para todos os níveis sensoriais, facilitando a interacção e gestão de dados. Este artigo apresenta os conceitos e tecnologias utilizadas, bem como os vários paradigmas existentes e decisões tomadas durante o processo de lançamento da sala de multi-projecção. Esta iniciativa apresenta grandes potencialidades e será fruto de inúmeros trabalhos de investigação, sendo este o seu enquadramento no projecto LEMe, o qual é descrito sumariamente em seguida.

### 1.1 Contexto

O LEMe é uma iniciativa conjunta do IST e de várias empresas do sector para a criação de uma massa crítica científica importante e de uma capacidade de formação de excelência dos alunos do Instituto Superior Técnico, campus do Tagus Park. O LEMe constitui um centro de projectos inovadores no Ensino e na Investigação e Desenvolvimento, enquadrando estudantes de licenciatura, pós-graduação e professores do IST em colaboração

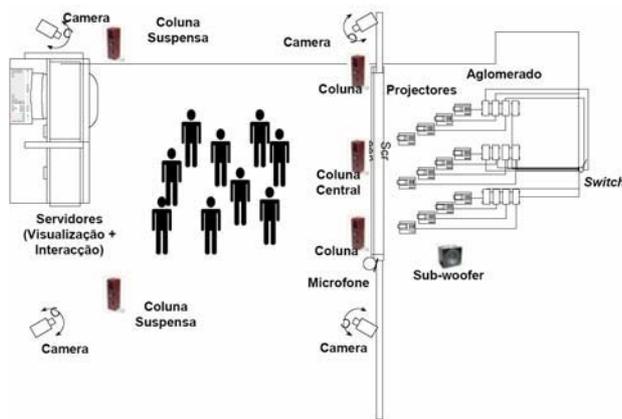
com investigadores e profissionais da indústria. É neste contexto que nasce o projecto da sala de multi-projecção, situada no IST-Tagus Park, onde se procura investigar ao nível mais avançado na área de ambientes imersivos inteligentes.

### 1.2 Abordagem Global

A dimensão e qualidade da imagem é o ponto inicial e essencial de discussão no lançamento de um ecrã de larga escala. O aumento da dimensão da imagem obtida através de um projector traduz-se na redução de qualidade da mesma, e num ecrã de grandes dimensões este problema aumenta, impossibilitando a utilização de uma projecção única. Os avanços na multi-projecção tornaram exequível a realização de imagens compostas, sendo o resultado final um mosaico de imagens. Adoptámos esta solução,



Figura 1: Evolução da sala do LEMe



**Figura 2: Dispositivos sala do LEMe**

tendo investido numa matriz de quatro por três (12 projectores), onde salvaguardamos a elevada qualidade da imagem, com uma relativamente reduzida área de projecção por cada projector. Esta solução apresenta contudo um conjunto de detalhes técnicos de calibração relacionados com a uniformidade da imagem final que tiveram que ser considerados. O sistema é de retro-projecção sendo esta característica obrigatória se queremos dispor de uma área para o utilizador, sem interferir com os volumes de projecção. A utilização de projecção frontal seria fruto de problemas em relação à geometria da imagem, composição do mosaico e nunca seria possível usufruir da área de interacção totalmente. A secção 2 descreve globalmente a infra-estrutura, apresentando os componentes essenciais ao sistema. A Calibração dos projectores tem especial relevância e é descrita na secção 3. A secção 4 foca-se na gestão dos componentes existentes na sala e a secção 5 apresenta as soluções para a visualização de imagem única. A interacção utilizador é contemplada na secção 6 e as conclusões ao artigo são apresentadas na secção 7.

## 2. DESCRIÇÃO DA INFRA-ESTRUTURA

O sistema de multi-projecção é composto por três elementos principais: uma tela que oferece o suporte físico para a visualização, uma estrutura contendo a matriz de projectores e um aglomerado de máquina de forma a controlar a projecção. O sistema de projecção é complementado por um sistema de som 5.1 e microfones para enfatizar a experiência imersiva, assim como possibilitar interacções baseadas no uso da voz quer seja através do reconhecimento de comandos discretos ou do uso de linguagem natural. Para suportar o desenvolvimento de novos mecanismos de interacção, um conjunto de cinco câmaras foi instalado e futuramente esta sala inteligente possuirá uma rede de sensores de pressão colocados no chão falso. A configuração da instalação é apresentada na Figura 2.

### 2.1 Ecrã

O ecrã cujas características são apresentadas na Tabela 1 é uma tela de material flexível que suporta retro-

projecção oferecendo um baixo ganho de 1.0 e uma boa distribuição deste em função do ângulo de incidência do utilizador em relação a tela, de forma a minimizar as variações de intensidade. Existem várias alternativas flexíveis ou rígidas, sendo relevante as características do material, tais como, o ganho, contraste, brilho entre outras. Optámos por uma configuração flexível tendo em conta a relação qualidade/custo. Apesar da qualidade ser menor e a tela estar sujeita a oscilações, o custo é bastante menor e obtém-se os resultados requeridos.

### 2.2 Matriz de Projectores

Os 12 projectores estão organizados numa estrutura formando uma matriz de 3 linhas de 4 projectores. Essa matriz de projectores (Figura 3) está colocada numa estrutura de alumínio modular oferecendo flexibilidade para futuras extensões da instalação assim como a estabilidade necessária para evitar turbulências na imagem durante a projecção. Cada um dos 12 projectores é suportado por uma base de alumínio especialmente concebida para permitir o controlo dos seis graus de liberdade com a alta precisão requerida para efeitos de calibração.

Os projectores (Tabela 1) são digitais (DLP) apresentando uma resolução nativa XGA. A escolha de projectores é um elemento essencial na realização de um ecrã de grandes dimensões e é uma das decisões mais difíceis de tomar devido à grande diversidade de marcas e modelos disponível. Comparado à tecnologia LCD, a tecnologia DLP apresenta melhor contraste e a imagem é menos sensível a degradações ao longo do tempo. O projector escolhido apresenta uma boa relação custo/qualidade nomeadamente dado a sua alta luminosidade e resolução.

<b>Tela flexível</b>	Drapper Cineplex
<b>Dimensões</b>	4,00 m x 2,25 m
<b>Ganho</b>	1.0
<b>Projectores</b>	HP VP 6120 (Tipo DLP)
<b>Luminosidade</b>	2000 Lumens
<b>Resolução</b>	1024 x 768
<b>Contraste</b>	2000 : 1
<b>Computadores</b>	HP wx 4100
<b>Processador</b>	Pentium 4 (FSB 800) 3.0 MHz
<b>Memória</b>	2 Gb RAM (PC 3200)
<b>Placa Grafica</b>	NV QuadroFX 3000,256 Mb
<b>Servidor</b>	HP wx 8000
<b>Processador</b>	Pentium 4 Xeon, 3.2 MHz
<b>Memória</b>	4 Gb RAM
<b>Placa Gráfica</b>	NV Quadro FX 3000,256 Mb

**Tabela 1: Características do material**



**Figura 3: Estrutura de suporte dos projectores**

### 2.3 Aglomerado de Computadores

dois sistemas: estações gráficas de memória partilhada tal como as SGI Onys2 ou um aglomerado de PC's. Optámos por um aglomerado de trezes PC's Linux; cujas características são apresentadas na Tabela 1 dado apresentar um custo mais atractivo, uma fácil manutenção e boas possibilidades de extensão para aumentar o desempenho computacional. O nosso aglomerado é formado por doze computadores dedicados para o controlo da visualização sendo cada computador ligado a um dos projectores da matriz de visualização. Estes computadores são organizados numa rede de um gigabit de forma a possibilitar uma inter-comunicação rápida e é controlada por um servidor responsável por dividir e coordenar a projecção individual. Para além dos computadores de visualização e do servidor existem igualmente dois computadores para gerir as câmaras instaladas na sala, assim como um computador para processamento de voz e som. O núcleo central das varias aplicações e demonstrações, existentes e futuras, estão instaladas no servidor que con-trola o aglomerado Linux



**Figura 4: Protótipo da base para um projector**

de visualização. A distribuição escolhida foi Gentoo de forma a compilar os vários módulos tendo em conta as características materiais de cada computador.

### 3. CALIBRAÇÃO

Um sistema de multi-projecção necessita de vários tipos de calibração e correcções de forma a produzir uma única imagem de alta resolução sem ser detectável o mosaico de imagens que a compõe. Os problemas de calibração deste tipo de projecção são descritos nesta secção tendo em conta as características da tela e dos projectores.

#### 3.1 Calibração geométrica do mosaico

A calibração geométrica contempla o alinhamento dos projectores entre eles, que requer alta precisão; no nosso sistema um pixel corresponde a um milímetro. Para esse efeito desenvolvemos um dispositivo que controla os seis graus de liberdade do projector. O dispositivo como se pode ver na Figura 4 é constituído por dois andares. O primeiro passo é garantir que o projector está horizontal de forma a não utilizar as funcionalidades de keystone dos projectores dado que distorce a linearidade dos pixels devido a ser digital. A horizontalidade é controlada pelo andar inferior do dispositivo que permite igualmente alinhar o paralelismo do projector com a tela. Quanto ao andar superior possibilita controlar as translações do projector de forma a emparelhar os vários mosaicos entre eles. O processo de calibração geométrica é moroso sendo necessário dedicar, em média, 2 horas por cada projector usando o dispositivo que oferece um controlo das translações da ordem de 0.1 mm a uma distância de projecção de 1,72 metros. Este processo de calibração é auxiliado por uma aplicação que é capaz de projectar vários padrões de grelhas e pelo uso de um nível óptico laser que projecta um linha horizontal ou vertical de forma a facilitar o alinhamento dos mosaicos. Existem abordagens [Raskar03,Brown02] que não necessitam de calibração geométrica, mas não possibilitam usar toda a resolução dos projectores para a imagem final, sendo destinados a configurações temporárias.

#### 3.2 Correção devido a sobreposição

Mesmo tendo em conta a alta precisão oferecida pelo dispositivo de suporte e a ferramenta usada para auxiliar a calibração, a justaposição homogénea de dois mosaicos revela-se impossível e a transição da luz nas arestas da própria imagem de cada projector não é completamente abrupta. Por esse motivo é necessário sobrepor ligeiramente os mosaicos. A sobreposição provoca luminosidades diferentes dado que na zona sobreposta podem incidir dois ou quatro projectores. A resolução desse problema não foi ainda implementada, mas existem uma solução denominada "edge-blending" que se baseia em corrigir as intensidades. Existem dois tipos de "edge blending": soluções físicas obstruindo o contorno do frustrum do projector [Li99, Hereld00, Stone01] ou soluções por software mais flexíveis e eficazes usando filtros na imagem contemplando as zonas de luminosidade [Surati99]. A segunda abordagem será seguida na nossa configuração.



**Figura 5: Problemas de brilho e de cor**

### 3.3 Correção de brilhos e cores

Como se pode verificar na Figura 5, existem dois tipos de problemas relacionados com cor e brilho a nível de um sistema de multi-projectção: problemas intra-projector e inter-projector. Um dos problemas intra-projector é a intensidade da luz do projector na tela ser variável num mesmo mosaico. Isto deve-se ao facto do projector ser uma fonte de luz pontual levando a que a incidência sejam diferentes ao longo do plano que é a tela. [Stone01] apresenta uma solução usando uma lente de Fresnel para cada mosaico, mas esta solução revela-se demasiado cara e não possibilita corrigir as arestas dado que a sobreposição não é possível. O uso de mapas de fotometria permite apresentar uma solução software sem custos adicionais [Majunder02].

Relativo aos problemas inter-projectores como se pode ver na Figura 5, a luminosidade e cor de dois projectores do mesmo modelo nunca é exactamente igual. Por esse motivo, é necessário aplicar correcções específicas a cada projector de forma a corrigir a distribuição de cores e o brilho na tela. Existem várias alternativas usando mapas de gama [Majunder04] de forma a apresentar uma imagem homogénea que tencionamos aplicar no nosso sistema de visualização de uma forma transparente para as aplicações. Métodos exactos aplicam a regra do mais fraco mas reduzem demasiado a intensidade final do projector. Um compromisso tem de ser implementado seguindo abordagens alternativas [Majunder05].

## 4. GESTÃO DE INFRA-ESTRUTURA

O servidor do aglomerado tem como função principal controlar os mecanismos de interacção e visualização existentes na sala. É através deste que os computadores e respectivos projectores são comandados e se torna possível uma utilização eficaz da sala. Para atingir o controlo centralizado foi necessário desenvolver uma ferramenta para a gestão dos dispositivos existentes que contempla os computadores do aglomerado e os projectores.

No que diz respeito à gestão dos computadores, a ferramenta desenvolvida contempla o ligar/desligar de todos os computadores do aglomerado (através da tecnologia Wake On Lan), lançar o gestor de janelas de cada máquina, bem como o lançamento de demonstrações e o acesso remoto aos sistemas de ficheiros dos constituintes do aglomerado. A ferramenta oferece também uma aplicação para auxílio à calibração referida na secção anterior. Esta baseia-se no desenho de grelhas para a calibração geométrica e padrões de cor para as calibrações das características inerentes ao projector.

O facto de termos um servidor que controla um aglomerado permite-nos utilizar esses computadores como canalizadores de informação para os projectores. Assim, é possível obter o ambiente de trabalho do servidor projectado no ecrã de larga escala. Para efectuar esta distribuição foi utilizado o [DMX], Distributed Multihead X, sistema que possibilita a qualquer servidor X a distribuição do ambiente de trabalho num ecrã de larga escala. Xdmx é um servidor proxy X que providencia suporte para vários ecrãs ligados a máquinas diferentes (em que cada um corre um servidor X típico). Quando o Xinerama é usado em conjunto com o Xdmx, as várias imagens das diferentes máquinas são apresentadas ao utilizador como um ecrã único. Para interagir com o ambiente de trabalho foi utilizado a aplicação [Synergy] que facilita a partilha de rato e teclado único entre vários computadores, sem necessidade de hardware adicional. Poderíamos ter optado pela solução hardware KVM mas seria um custo extra, sem vantagens adicionais.

## 5. VISUALIZAÇÃO

Existem varias soluções para apresentar uma imagem única num sistema de multi-projectção. Esse tipo de aplicações é responsável por dividir a janela de visualização em várias sub-janelas que serão associadas a cada projector. Dado que o sistema é controlado por um aglomerado de computadores, o servidor central coordena a visualização e efectua a distribuição dessa pelos computadores. Toda a configuração das sub-janelas é efectuada pelo servidor. No caso de aplicações interactivas como por exemplo animações, o servidor é responsável por sincronizar as trocas de frame buffer de cada computador de forma a evitar dessincronismos entre elementos do mosaico. Nos próximos parágrafos apresentamos e discutimos vários sistemas distribuídos de visualização testados na nossa tela.

### 5.1 Sistema CHROMIUM

Começámos por configurar uma solução baseada no Chromium [Humphreys02]. O sistema Chromium é uma camada de abstracção que substitui o controlador OpenGL oferecendo a possibilidade de distribuição da visualização para qualquer aplicação baseada na API OpenGL sem necessitar alterações na aplicação. Através da configuração do Chromium é possível definir o mosai-



**Figura 6: QuakeIII Arena no Chromium**

co atribuindo a cada computador as características da sua sub-janela. Em cada computador fica a correr um daemon que espera comandos OpenGL. Durante a execução do programa, as chamadas OpenGL do servidor são redireccionadas para cada um dos nós do aglomerado. Cada computador recebendo as chamadas de visualização é assim capaz de renderizar a sua sub-janela de OpenGL de uma forma autónoma. Sendo assim, o conjunto dos doze projectores é capaz de apresentar uma única imagem. Efectuámos a experiência com varias aplicações de forma a analisar o desempenho desta solução. Por exemplo com se pode ver na Figura 6, instalámos a jogo Quake dado que é baseado na API OpenGL e obtivemos um desempenho médio de 35 imagens por segundo. Este bom desempenho só é possível devido a optimização do uso do OpenGL por parte do jogo, que tem cuidado em minimizar o número de chamadas OpenGL e simplificar as geometrias das cenas. Notámos igualmente, que é necessário um longo período de carregamento superior a cinco minutos e em fases de jogo em que exista mais geometria, o desempenho reduz drasticamente para valores da ordem dos 10-15 imagens por segundo. Dado que cada nó é autónomo, não existe sincronização das imagens provocando desfasamento entre as imagens durante a interacção. Outra desvantagem desta solução é não tirar proveito do aglomerado para maximizar o processamento, limitando o desempenho gráfico às capacidades do servidor. A Figura 7 mostra outro exemplo com o Chromium usando o visualizador de imagens aéreas de multi-resolução da NCSA[TsBlaster], onde o desempenho é igualmente afectado devido ao carregamento de texturas.

## 5.2 Sistemas OPENSG e OpenSceneGraph

Ao contrário do Chromium, existem outras soluções tais como o [OpenSG] e [OpenScenegrph] que consistem em oferecer um grafo de cena distribuído. Este tipo de solução é fácil de configurar mas necessita que a aplicação esteja desenvolvida baseada no grafo de cena da solução. O princípio de funcionamento baseia-se na duplicação dos nós dos grafo de cena em cada um dos computadores do aglomerado, sendo cada computador responsável por renderizar o grafo de cena usando a definição local da sua sub-janela. O servidor central limita-se a sincronizar e transmitir as manipulações e alterações do grafo de cena, reduzindo o tráfego na sub-rede.



Figura 7: TsBlaster (NSCA) com Chromium



Figura 8: Demo usando o JINX

Esta abordagem é escalável a modelo mais complexos (ver Figura 1 em baixo) que a solução anterior e possibilita que cada mosaico aproveite ao máximo as suas características gráficas. Para além desta vantagem é possível estender essas soluções de forma a oferecer sincronização da troca de imagem. Uma das desvantagens é o controlo da aplicação continua centralizado, não possibilitando o aproveitamento de cada um dos nós para outros processamentos a não ser gráfico.

Neste momento estão a ser desenvolvidas novas demonstrações nomeadamente um visualizador de imagem assim como um visualizador genérico de cenas tridimensionais oferecendo navegação baseadas no OpenSG. Vários protótipos do grupo de IMMI do INESC-ID estão a ser adaptados usando a solução OpenSG nomeadamente o sistema GIDES [Jorge03] e aplicação Blobmaker [Araujo03]. O OpenSG foi a ferramenta escolhida para o desenvolvimento de futuras aplicações interactivas no âmbito da nossa sala.

## 5.3 Sistemas alternativos para CAVES

Foram testadas várias alternativas nomeadamente pacotes de distribuição de visualização para sistemas imersivos CAVE e realidade virtual, tais como a ferramenta SYZYGY [Schaeffer03] e JINX [Soares04] (Figura 8). Tal como os sistemas anteriores, estas soluções oferecem mecanismos de sincronização e distribuição assim como bibliotecas gráficas de gestão de grafo de cena e objectos baseados na API OpenGL. Os paradigmas seguidos são muito semelhantes ao anterior, sendo mais interessante o OpenSG e OpenScenegrph dado que esta ferramentas não se limitam a visualização mas oferecem outras funcionalidades para o desenvolvimento de aplicações.

## 6. INTERACÇÃO, APLICAÇÕES EXISTENTES

Para além do efeito de imersão atingido com o ecrã de larga escala, a sala do LEME pretende também oferecer ao utilizador um ambiente inteligente, sendo este objectivo atingido através de diversos mecanismos e modalidades. Os dispositivos tradicionais (WIMP) pressupõem a utilização individual e a posição fixa do indivíduo, para além de não oferecerem a naturalidade de interacção requerida. Deve ser possível ao utilizador andar pela sala enquanto interage com o sistema e visualiza os resultados no ecrã. Esta interacção deve-se aproximar da realizada

entre humanos e, devem, portanto, ser estudados todas as formas naturais de expressão do ser humano. Para esse efeito a sala encontra-se equipada com câmaras, colunas, microfones, aparelho de electromiografia, transmissores ultra-som e contempla a instalação de sensores de pressão, num futuro próximo. As câmaras serão utilizadas para tracking de movimentos para permitir ao utilizador a interacção através de gestos. Para detectar a posição dos utilizadores na sala, encontra-se em desenvolvimento um sistema baseado em transmissão de ultra-sons. Neste sistema, os utilizadores têm que ser equipados com um mini-transmissor que envia sincronamente sinais para um conjunto de receptores, estrategicamente colocados na sala. Através do tempo de transmissão para quatro receptores, é possível descobrir a posição de um utilizador, sendo o sistema escalável a mais utilizadores através do uso de janelas de tempo diferentes para cada um. A alternativa contemplada é através dos sensores de pressão que servem este objectivo bem como outros bastante interessantes. Os microfones adquiridos serão utilizados para interacção através da Fala. Esta comunicação é complementada por um sistema de reconhecimento de voz, bem como pelo sistema de som e aplicações TTS (Síntese de Fala). Para controlar aplicações e o próprio ambiente, contemplamos também o uso de PDAs, que funcionarão como controlo remoto. Encontra-se já aplicada na sala uma interacção através de um aparelho de electromiografia. O controlo das aplicações é efectuado através da monitorização do sinal miográfico do utilizador e associação de acções a determinadas contracções voluntárias. É possível, por exemplo, controlar o ponteiro do rato através de activações musculares.

Para resolver o problema da integração de aplicações heterogéneas (ex: LINUX vs WINDOWS) foi utilizado um sistema denominado OSGA (Open Software Group Architecture) que se baseia no XmlBlaster e comunica através de mensagens. Esta será a solução adoptada para a integração das diferentes aplicações de interacção a desenvolver na sala.

## 7. CONCLUSÕES

O lançamento de um novo laboratório contendo um sistema de multi-projecção apresenta inúmeros desafios devido à complexidade e novidade dos vários elementos que o compõem. Neste artigo apresentámos os primeiros passos na construção do nosso laboratório, descrevendo os principais problemas relacionados com um sistema de projecção de larga escala. Abordámos o tema da calibração de projectores e do controlo de um sistema de visualização por um aglomerado de computadores. Apresentámos igualmente a instalação de ferramentas de visualização distribuída, assim como paradigmas de interacção para este tipo de dispositivo, passo essencial para o desenvolvimento de futuras aplicações.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Hewlett-Packard e ao Engº Carlos Janicas o apoio dado na realização da LEMEWall. Este trabalho foi apoiado pela Comissão Europeia através do projecto IMPROVE (FP6-IST-2003-004785).

## REFERÊNCIAS

- [Araujo03] De Araujo B. and Jorge J., BlobMaker: Free-form modelling with variational implicit surfaces, Proceedings of 12º EPCG, Porto, Portugal, Oct 2003
- [Brown02] M. S. Brown, et al "A practical and flexible tiled display system", IEEE Pacific Graphics, 2002
- [DMX] <http://dmx.sourceforge.net/>
- [Hereld00] M. Hereld, et al., Introduction to Building Projection-based Tiled Display Systems, IEEE CGA, pages 22-28, Vol. 20, no. 4, Spring/Summer 2000
- [Humphreys02] G. Humphreys et al.: Chromium: a stream-processing framework for interactive rendering on clusters. Proc. of ACM SIGGRAPH 2002.
- [IGD A4] HeyeWall A4 IGD, Germany, <http://www.igd.fhg.de/igd-a4/projects37.html.en>
- [Jorge03] J. Jorge, N. Silva, T. Cardoso, Gides++, Proceedings of 12º EPCG, Porto, Portugal, Oct 2003
- [Li99] K. Li and Y. Chen, Optical Blending for Multi-Projector Display Wall System, Proc. 12th Lasers and Electro-Optics Society 1999 IEEE Press, N.J., Nov. 1999.
- [Li00] K. Li et al., Building and Using A Scalable Display Wall System, IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 20, no.4, pp. 29-37, July/August 2000
- [Majumder02] A. Majumder and R. Stevens. LAM: Luminance Attenuation Map for Photometric Uniformity Across Projection Based Displays. ACM VRST 2002
- [Majumder04] A. Majumder and R. Stevens. Color Non-Uniformity in Projection Based Displays: Analysis and Solutions. IEEE TVCG, Vol. 10, No. 2, 2004
- [Majumder05] A. Majumder and R. Stevens. Perceptual Photometric Seamlessness in Tiled Projection-Based Displays. ACM Transactions on Graphics, 24(1), Jan. 2005
- [OpenScenegraph] <http://www.openscenegraph.org>
- [OpenSG] <http://www.opensg.org/>
- [PennState] LionEyes Display Wall, PennState Univ., USA, <http://viz.aset.psu.edu/ga5in/DisplayWall.htm>
- [Raskar03] R. Raskar et al., iLamps: Geometrically aware and SelfConfiguring Projectors, ACM SIGGRAPH 2003.
- [Soares04] L. Soares, M. Zuffo: JINX: an X3D browser for VR immersive simulation based on clusters of commodity computers. Web3D 2004
- [Schaeffer03] B. Schaeffer, C. Goudeseune, Syzygy: Native PC Cluster VR, Proceedings of the IEEE VR 2003, March 2003. <http://www.isl.uiuc.edu/syzygy.htm>
- [Surati99] R. Surati, Scalable Self-Calibrating Display Technology for Seamless Large-Scale Displays. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1999
- [Synergy] <http://synergy2.sourceforge.net/index.html>
- [TsBlaster03] <http://brighton.ncsa.uiuc.edu/~prajlich/>