

PolyMeCo – Uma Ferramenta de Análise e Comparação de Malhas Poligonais

Samuel Silva
IEETA – Univ. de Aveiro
Aveiro
sss@ieeta.pt

Joaquim Madeira
DET / IEETA – Univ. de Aveiro
Aveiro
jmadeira@det.ua.pt

Beatriz Sousa Santos
DET / IEETA – Univ. de Aveiro
Aveiro
bss@det.ua.pt

Sumário

A representação de modelos usando malhas poligonais é utilizada em diversos domínios. Por vezes, de forma a adequar uma determinada malha a uma aplicação particular, torna-se necessário processá-la (p.ex., para atenuar ruído), o que conduz a uma alteração das suas características (p.ex., número e/ou posição dos vértices). Qualquer operação de processamento introduz, assim, diferenças em relação à malha original que, de acordo com a aplicação a que o modelo se destina, deverão ser avaliadas.

Neste artigo é apresentada uma ferramenta, para análise e comparação das características de malhas poligonais, que procura ser inovadora na forma como permite visualizar e comparar os valores obtidos para diferentes números de mérito. Assim, é possível trabalhar em simultâneo com vários modelos e diversos números de mérito, e usar diferentes tipos de representações (p.ex., modelos coloridos ou histogramas) para visualizar propriedades intrínsecas de uma malha, ou a distribuição de uma medida de desvio de uma malha processada relativamente à original.

Palavras-chave

Malhas poligonais, Análise e Comparação, Visualização

1. INTRODUÇÃO

A representação de modelos usando malhas poligonais é utilizada em diferentes domínios de aplicação, desde a Visualização Médica até aos jogos por computador, passando pela Arqueologia e sistemas de Desenho Assistido por Computador. Nas diversas áreas, as malhas utilizadas devem, tanto quanto possível, adequar-se à aplicação a que se destinam. Nesse sentido, muitas vezes é necessário processá-las de modo a dar-lhes características mais apropriadas, por exemplo, para possibilitar um determinado grau de interactividade ou animar uma dada cena com uma qualidade aceitável. No entanto, ao modificar as características das malhas originais, diminuindo o seu número de faces (simplificação) ou modificando a posição dos seus vértices (por exemplo, filtragem de ruído), é introduzida uma diferença (erro ou desvio). Esta diferença deverá sempre ser avaliada no sentido de se perceber o seu impacto no âmbito da aplicação a que os modelos se destinam.

Existem diversas ferramentas que permitem a comparação das características de malhas poligonais relativamente a uma malha de referência [Cignoni98, Zhou01, Aspert02, Roy04], fornecendo quer dados numéricos (erro mínimo, médio, máximo e variância; distância de Hausdorff), quer informação acerca da distribuição do erro por representação de um modelo

colorido de acordo com o erro calculado em cada vértice. Em [Zhou01] foi também prestada atenção à forma como a informação relativa ao erro pode ser apresentada e são mostradas algumas alternativas de visualização.

A ferramenta apresentada neste artigo, PolyMeCo (“*Polygonal Mesh Comparison Tool*”), tem as seguintes características inovadoras:

- Ambiente integrado em que é possível trabalhar, em simultâneo, com diversos modelos e vários números de mérito (propriedades intrínsecas ou medidas de diferença).
- Comparação dos resultados do cálculo de diferentes números de mérito usando a) modelos 3D coloridos, sendo possível a utilização de uma escala de cor comum, b) representações estatísticas, como histogramas e diagramas de extremos e quartis (“*boxplots*”).
- Ajustamento da escala de cor de modo a esta ser usada para representar uma gama específica de valores, rejeitando, por exemplo, “*outliers*” que estejam presentes nos dados.
- Sonda que permite obter o valor do erro (ou outra propriedade) associado aos vértices e faces de uma malha (figura 3c).

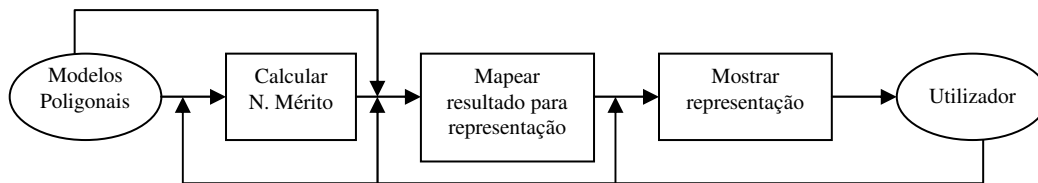


Figura 1 – Diagrama da sequência de operações envolvidas no cálculo e visualização de números de mérito associados a malhas poligonais

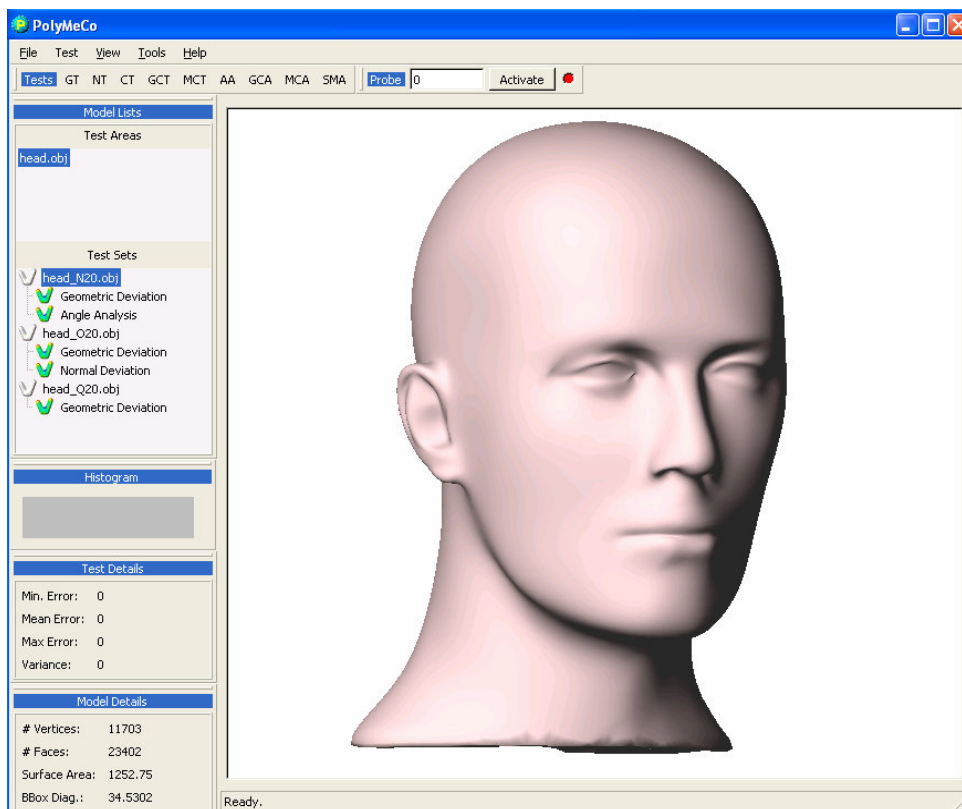


Figura 2 – A interface do PolyMeCo exibindo um modelo poligonal

Nas secções seguintes é feita uma apresentação das características e funcionalidades principais do PolyMeCo. Começa-se por dar uma ideia geral da arquitectura seguida, sendo depois feita uma descrição do tipo de números de mérito que esta ferramenta permite calcular, assim como das representações e modos de visualização disponíveis, no sentido de facilitar a compreensão e análise dos resultados obtidos. Finalmente, são apresentadas conclusões, sobre o trabalho já desenvolvido, e alguns objectivos para trabalho futuro.

2. POLYMECO

O PolyMeCo é uma ferramenta desenvolvida usando C++ e a biblioteca Fox Toolkit [Fox05], para plataformas Windows e Linux, que permite a análise e comparação das características de modelos representados usando malhas poligonais; esta representação é feita recorrendo às bibliotecas OpenMesh [Botsch02] e OpenGL. O processo de análise e comparação pode ser descrito pelo diagrama apresentado na figura 1. Assim, partindo de um

modelo poligonal, algumas das suas propriedades são descritas por números de mérito. Os valores obtidos pelo cálculo destes números de mérito são mapeados numa representação adequada. Depois deste mapeamento, essa representação é mostrada ao utilizador. Este pode alterar parâmetros ao longo de todo o processo de modo a, por exemplo, escolher o número de mérito desejado ou a representação a utilizar.

Com base nestas ideias, o PolyMeCo tem três módulos principais:

- **Números de mérito** – permite o cálculo de diversos números de mérito, i.e., diversas maneiras de medir e/ou comparar propriedades de malhas.
- **Representações** – proporciona formas de representar os resultados obtidos com os diferentes números de mérito.
- **Apresentação/Interacção** – permite visualizar e interagir com as diversas representações disponíveis.

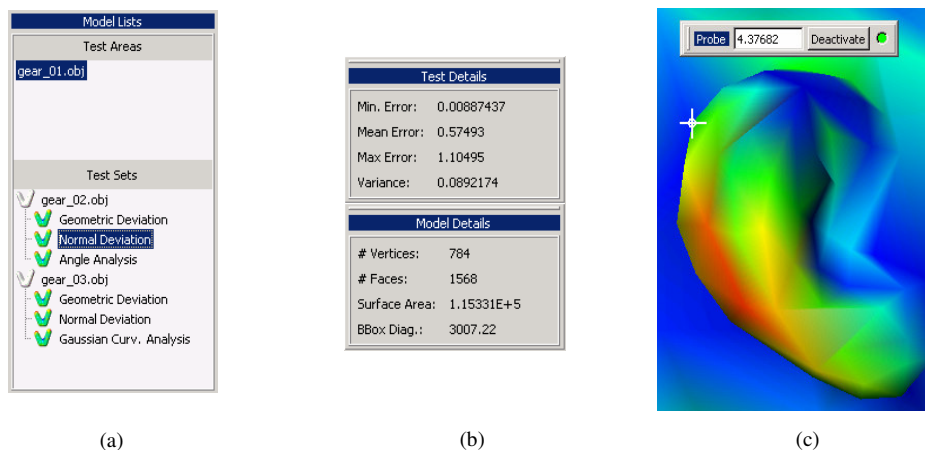


Figura 3 – Detalhes da interface.

Com o PolyMeCo é possível trabalhar com diversos modelos e resultados simultaneamente. Tome-se o seguinte exemplo: pretende-se comparar diversas versões simplificadas de um modelo com o seu original. Primeiro, efectua-se o carregamento do modelo original. De seguida, efectua-se o carregamento de todos os modelos simplificados, associando-os com o modelo original, i.e., quando for efectuada uma operação de comparação, estes serão comparados com o original. Finalmente, podem efectuar-se as comparações usando um número de mérito apropriado e os resultados aparecem associados a cada um dos modelos simplificados. Os modelos presentes, assim como todas as comparações efectuadas, ficam organizados numa estrutura em árvore que o utilizador pode utilizar para escolher o que pretende visualizar (figura 3a). Quando se pretender calcular o mesmo número de mérito para todos os modelos associados a um modelo original, o PolyMeCo permite efectuar essa operação rapidamente com apenas um comando. A figura 2 mostra a interface principal do PolyMeCo.

3. NÚMEROS DE MÉRITO

O PolyMeCo proporciona dois tipos de números de mérito: medidas de propriedades intrínsecas de uma malha poligonal, e medidas de diferenças (erro ou desvio) entre duas malhas. Estas últimas são obtidas habitualmente pela comparação de propriedades intrínsecas.

3.1 Propriedades Intrínsecas

Na versão actual do PolyMeCo, encontram-se disponíveis as seguintes propriedades intrínsecas:

Qualidade dos Triângulos – A qualidade dos triângulos é analisada medindo o menor ângulo (entre 0 e 60 graus) de cada triângulo que compõe a malha. Esta medida permite obter uma ideia geral sobre a forma de cada triângulo: se o menor ângulo for próximo de 60 graus então o triângulo está próximo de ser equilátero. Quando o menor ângulo é pequeno não é possível, usando esta métrica, saber se o triângulo a que este pertence é “achatado” (“flat”) ou “alongado” (“needle”). Nestas

situações uma análise mais elaborada pode ser efectuada usando os números de mérito descritos e analisados em [Pébay03].

Curvatura – É permitido o cálculo das curvaturas média e Gaussiana. A curvatura pode ser uma boa métrica para análise de malhas, já que se relaciona directamente com a forma da superfície que descreve. Alguns métodos têm sido propostos que permitem o cálculo da curvatura para malhas poligonais [Zhou01, Meyer02, Rusinkiewicz04]. A curvatura é aproximada calculando os seus valores para cada vértice. Os métodos descritos em [Zhou01] e [Meyer02] foram implementados, tendo o segundo sido escolhido, principalmente por proporcionar valores de curvatura mais próximos dos valores teóricos.

3.2 Medidas de Diferença

As medidas de diferença são obtidas comparando propriedades de duas malhas. Uma das malhas é considerada a referência, sendo a outra uma sua versão processada.

Na versão actual do PolyMeCo, encontram-se disponíveis as seguintes medidas de diferença:

Desvio geométrico – Permite a comparação de duas malhas através da medida das diferenças geométricas locais entre as suas superfícies. Quando se comparam malhas com diferente número de vértices (por exemplo, devido a uma simplificação) é necessário extrair pontos da superfície da malha processada de modo a permitir pontos comuns de comparação. Este tipo de “amostragem” da superfície da malha processada está disponível na ferramenta MeshDev [Roy04]. Nesse sentido, a versão deste teste apresentada no PolyMeCo é fortemente baseada na do MeshDev.

Desvio de normais – Permite medir qual é a variação das normais às faces entre dois modelos. A implementação desta medida de diferença, pelas razões já referidas anteriormente, é fortemente baseada na do MeshDev.

Desvio de curvatura – Permite a comparação das curvaturas média e Gaussiana entre duas malhas.



Figura 4 – Modelos coloridos de acordo com os resultados obtidos com diversos números de mérito: da esquerda para a direita, desvio geométrico, curvatura Gaussiana e qualidade dos triângulos.

4. REPRESENTAÇÕES

Existem diversas formas de representar os dados obtidos usando os diferentes números de mérito, de modo a poderem ser analisados. O PolyMeCo permite três tipos de representações:

- Valores numéricos
- Modelo tridimensional
- Representações estatísticas

4.1 Valores numéricos

Uma forma de apresentar a informação relacionada com as malhas ou os números de mérito calculados é simplesmente apresentando alguns valores numéricos que os caracterizem.

Os seguintes valores numéricos estão disponíveis:

Características da malha: número de vértices, número de faces, área da superfície e diagonal da “*bounding box*” (figura 3b).

Características dos Números de Mérito: valores mínimo, médio, máximo e variância (figura 3b).

4.2 Modelo Tridimensional

A análise e comparação das propriedades de uma malha podem ser efectuadas recorrendo a modelos tridimensionais: quer simplesmente pela sua representação geométrica, quer pela sobreposição da distribuição dos valores obtidos com um determinado número de mérito ao longo da superfície do modelo. Todos os modelos são apresentados, por omissão, usando uma projecção paralela ortogonal.

Visualização do modelo tridimensional – Uma possível forma de analisar algumas características de um modelo é através da inspecção da sua superfície. Os modelos podem ser visualizados usando sombreamento constante ou de Gouraud. É ainda possível visualizá-los em modo “*wireframe*” para, por exemplo, inspeccionar a distribuição dos vértices.

Modelo colorido – Perceber, para qualquer número de mérito, como os seus valores se distribuem ao longo da malha é bastante importante, uma vez que permite julgar quanto à sua importância local. Isto pode ser conseguido colorindo um modelo de acordo com os valores calculados para um determinado número de mérito. Na

versão actual, o PolyMeCo permite colorir os modelos usando uma escala de cor do tipo espectro da luz solar (do azul ao vermelho). Usando esta escala de cor, o valor 0 é representado usando a cor azul, sendo o valor máximo obtido para cada número de mérito representado usando vermelho. Apesar desta escala de cor não ser percebida como linear [Bergman95], é a escala usada, uma vez que se pretende fornecer, antes de mais, uma informação qualitativa com os modelos coloridos.

Se a distribuição mapeada pertencer a uma propriedade intrínseca, é sobreposta ao modelo para o qual foi calculada. Se pertencer a uma medida de diferença, é sobreposta ao modelo de referência usado. A figura 4 mostra alguns exemplos de modelos coloridos de acordo com os resultados obtidos com diversos números de mérito.

4.3 Representações estatísticas

Apesar de, através dos modelos coloridos, ser possível ter alguma ideia da distribuição dos valores de um número de mérito ao longo da malha, mostrando onde esses valores ocorrem, pode ser difícil obter uma ideia global, devido à impossibilidade de, por exemplo, visualizar toda a superfície do modelo em simultâneo. As representações estatísticas disponibilizadas podem ajudar a perceber e comparar melhor os resultados obtidos.

Histogramas – Ao representar os valores obtidos através de um número de mérito usando um histograma, permite-se ao utilizador obter informação complementar àquela dada pelo modelo colorido, uma vez que o histograma resume a forma como os valores de um número de mérito estão distribuídos.

Um problema que ocorre ao representar os valores obtidos através de um número de mérito (ou outro qualquer tipo de dados) usando uma escala de cor, é o facto da presença de “*outliers*” aumentar a gama da escala, não permitindo a distinção entre valores próximos. Tendo isto em conta, foi adicionada uma característica especial à representação do histograma que permite variar a gama de valores representada e a escala de cor utilizada. É possível, usando dois “*sliders*”, definir os limiares de saturação inferior e superior. Os valores abaixo do limiar inferior de saturação são representados a azul e os valores acima do limiar superior de saturação são representados a vermelho, o que deixa toda a escala

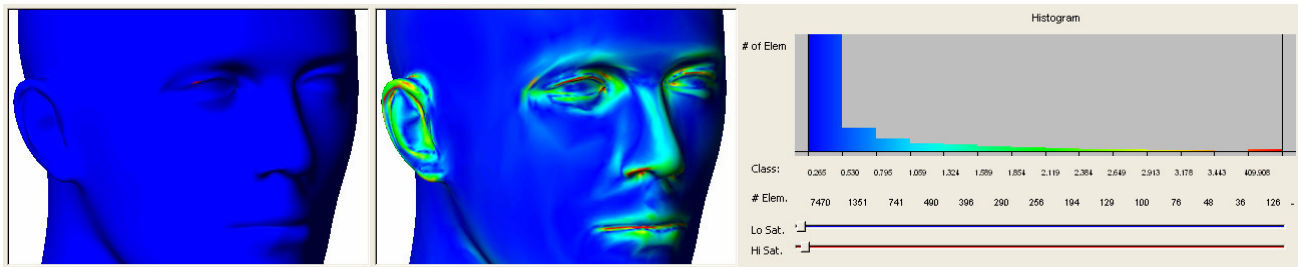


Figura 5 – À esquerda, modelo colorido de acordo com os resultados do cálculo da curvatura Gaussiana: a presença de valores de curvatura elevados não permite uma visualização da distribuição. Ao centro, modelo colorido após a redefinição da gama de valores representada pela escala de cor, o que permite visualizar melhor a incidência dos valores da curvatura. À direita, o histograma apresentando os *sliders* usados para modificar a gama de valores representados.

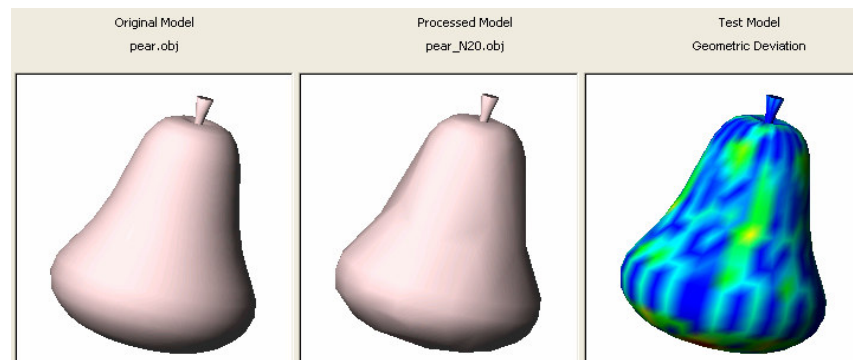


Figura 6 – Visualização em simultâneo do modelo original, do modelo processado e do modelo colorido de acordo com os resultados obtidos por uma medida de desvio geométrico

de cor (assim como todas as barras do histograma excepto a primeira e a última, que conterão os valores saturados) para representar a gama de valores entre os dois limiares.

Esta funcionalidade permite visualizar de forma mais clara a distribuição dos valores de um número de mérito quer no histograma, quer no modelo colorido, que é re-colorido de acordo com as variações da escala de cor. É ainda possível visualizar, por exemplo, onde é que os valores do número de mérito são maiores ou menores do que um determinado valor. A figura 5 apresenta (à esquerda) um modelo colorido de acordo com os valores de curvatura Gaussiana calculados. Note-se que não é possível perceber a distribuição dos valores, já que a presença de valores de curvatura muito elevados teve como consequência que todos os outros fossem representados com uma mesma cor. Através de uma mudança na gama de valores representados pela escala de cor, actuando sobre os “*sliders*”, tornou-se possível perceber um pouco melhor como a curvatura está distribuída (modelo ao centro).

Diagramas de extremos e quartis – Os diagramas de extremos e quartis são bastante úteis quando se pretende comparar conjuntos de dados. Através deste tipo de diagrama, diferenças de localização, gama e assimetrias são claramente visíveis. Um diagrama de extremos e quartis permite também averiguar da simetria do conjunto

de dados e verificar a presença de “*outliers*”. A detecção de “*outliers*” pode também dar algumas pistas sobre a forma como os “*sliders*” associados ao histograma podem ser ajustados, de modo a melhor visualizar os dados.

5. MODOS DE VISUALIZAÇÃO

No PolyMeCo tenta-se proporcionar ao utilizador diversas formas de alternar entre representações, ou de visualizar várias delas em simultâneo, de forma a permitir uma mais fácil análise e comparação dos números de mérito calculados.

Do ponto de vista da interacção, é possível manipular todos os modelos apresentados mudando a sua posição, orientação e tamanho (*pan, rotate, zoom*). Para além disso, quando vários modelos são apresentados em conjunto, é possível manipulá-los de uma forma sincronizada, i.e., manipular um dos modelos resulta na aplicação automática da mesma transformação a todos os outros modelos visíveis.

Quando um modelo colorido é visualizado, é possível utilizar uma sonda que permite ao utilizador obter o valor do número de mérito associado a um ponto particular da malha. Uma vez que os números de mérito só são calculados para locais específicos da malha (geralmente vértices, excepto para a qualidade dos triângulos),

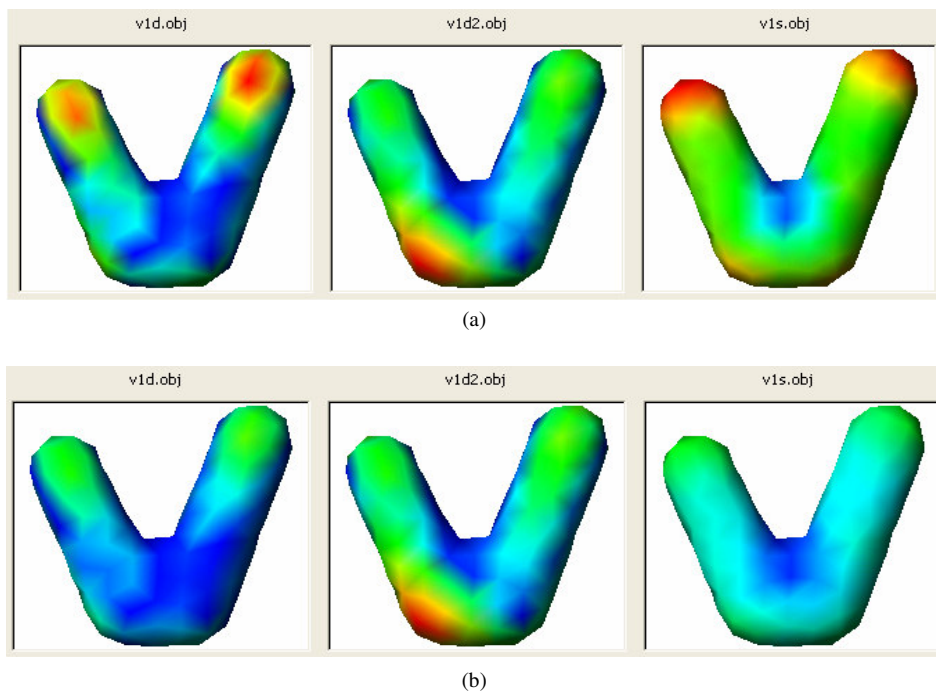


Figura 7 – Os resultados de um número de mérito calculado para diversos modelos são comparados lado-a-lado: a) usando escalas de cor individuais; b) usando uma escala de cor comum a todos os modelos

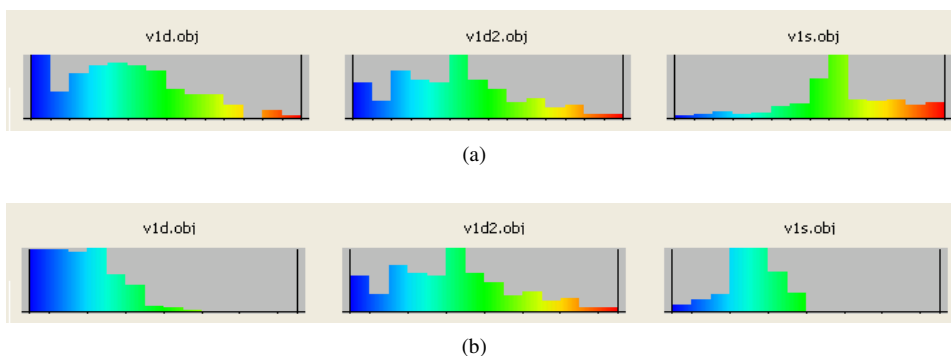


Figura 8 – Comparação de resultados usando histogramas: a) usando gamas de valores individuais; b) usando uma mesma gama de valores para todos os histogramas.

apenas os valores associados aos vértices ou faces serão fornecidos.

5.1 Modelo Colorido

Neste modo de visualização, é mostrado um modelo colorido de acordo com os valores obtidos com um dado número de mérito. Se o utilizador escolher também visualizar o modelo de referência ou o modelo para o qual o número de mérito foi calculado, estes aparecerão com a mesma posição, orientação e tamanho que o modelo colorido.

5.2 Modelo Original vs. Processado vs. Colorido

Este modo de visualização mostra o modelo original, o modelo processado e o modelo colorido de acordo com

os valores obtidos usando um dado número de mérito. Isto permite fazer uma comparação visual entre os modelos original e processado, nomeadamente nas zonas onde a incidência do erro (observada no modelo colorido) é maior. Apesar de o modelo colorido ser semelhante ao modelo original (quando se está a visualizar resultados de uma medida de diferença), a presença de cor pode mascarar algumas das suas características, razão pela qual o modelo original é também apresentado. A figura 6 mostra este modo de visualização.

5.3 Visualização de Resultados Lado-a-Lado

Neste modo de visualização é possível visualizar, lado-a-lado, os resultados de todos os números de mérito calculados para um mesmo modelo. Por exemplo, é possível visualizar, em simultâneo, os valores do desvio

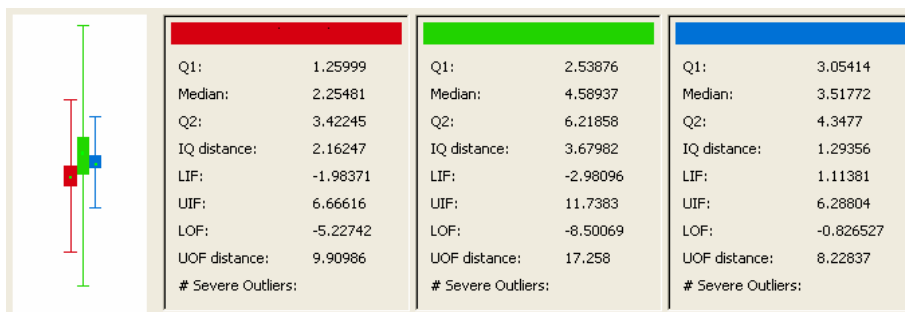


Figura 9 – Comparação de resultados usando diagramas de extremos e quartis.

geométrico e da curvatura Gaussiana e verificar se, por exemplo, o desvio geométrico é maior para as zonas onde a curvatura é também maior. Sendo assim, este modo de visualização pode ajudar o utilizador a encontrar semelhanças/relações no comportamento dos números de mérito e a ter uma ideia global das suas distribuições.

5.4 Comparação de Resultados Lado-a-Lado

Quando diversas versões processadas de um modelo são testadas, pode ser útil visualizar lado-a-lado os resultados obtidos com um mesmo número de mérito (por exemplo, os desvios geométricos para todos os modelos simplificados a partir de um mesmo modelo) de modo a comparar, por exemplo, as diferentes distribuições que resultam de cada tipo de processamento. No entanto, é necessário algum cuidado para comparar apenas dados que possam ser comparados. Primeiro, os resultados devem ser provenientes de um mesmo número de mérito, tendo o mesmo modelo como referência (no caso das medidas de diferença). Segundo, uma vez que todos os modelos coloridos usam a mesma escala de cor, representando 0 com azul e usando o vermelho para o valor máximo obtido em cada modelo, uma comparação directa de modelos coloridos apenas facultava informação sobre o grau de incidência dos valores do número de mérito ao longo dos modelos, mas não pode ser usada para decidir qual o modelo apresentando valores mais elevados desse número de mérito.

Apesar de os valores numéricos poderem ser usados nesse sentido, a comparação das distribuições dos valores dos números de mérito não é fácil de executar. Sendo assim, é necessário usar uma escala de cor comum a todos os modelos, usando o azul para representar 0 mas passando a cor vermelha a representar o máximo valor obtido entre todos os modelos comparados, usando esse número de mérito. A figura 7 mostra uma comparação entre os resultados obtidos para três modelos usando um mesmo número de mérito. Note-se que na figura 7a) algumas das regiões dos três modelos parecem ter o mesmo valor associado. Na figura 7b), usando uma escala de cor comum a todos os modelos, verifica-se que o modelo do centro é o que apresenta maiores valores do número de mérito usado.

A comparação é também possível usando histogramas, representados lado-a-lado e, mais uma vez, deve ter-se em atenção que a comparação directa só pode ser efectuada quando estes são desenhados para uma mesma gama de valores. Este tipo de comparação pode ser útil, por exemplo, quando se pretende comparar a qualidade dos triângulos entre duas malhas, uma vez que permite verificar facilmente em que sentido é que a distribuição da qualidade se deslocou. Na figura 8 são apresentados os histogramas correspondentes aos modelos apresentados na figura 7. Note-se como a utilização de uma mesma gama de valores para todos os modelos (figura 8b) facilita a análise dos dados.

Finalmente, a comparação pode ser efectuada usando diagramas de extremos e quartis, como se verifica na figura 9.

6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Neste artigo foi apresentada uma ferramenta que permite a análise e comparação das características de malhas poligonais. Esta ferramenta proporciona um ambiente onde é possível trabalhar com diversos modelos e resultados ao mesmo tempo, e onde estão disponíveis diversas representações para os diferentes números de mérito que é possível calcular. É também possível escolher de entre diversos modos de visualização que permitem, por exemplo, visualizar diversas representações em simultâneo ou comparar resultados. Quando se comparam resultados provenientes de um mesmo número de mérito usando modelos coloridos (histogramas), a opção de usar uma escala de cor (gama de valores) comum é bastante importante.

O PolyMeCo pode ainda ser bastante melhorado. Nesse sentido seria importante acrescentar outros números de mérito (por exemplo, ver [Pébay03]) e novas representações e modos de visualização. Para além disso, torna-se também importante acrescentar outras escalas de cor de modo a possibilitar uma melhor representação de resultados com sinal.

Seria também interessante adicionar a hipótese de armazenar o conteúdo da área de trabalho, nomeadamente os resultados e representações geradas. Esta opção pode tornar-se útil, por exemplo, em situações em que se trabalha com modelos mais complexos e os resultados

demoram algum tempo a ser obtidos, ou quando se pretende guardar resultados para uma futura análise.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Michel Röy por disponibilizar o código fonte do MeshDev.

O primeiro autor agradece à Unidade de Investigação 127/94 IEETA, da Universidade de Aveiro, a bolsa que tem permitido a realização do seu trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- [Aspert02] N. Aspert, D. Santa-Cruz, e T. Ebrahimi, “Mesh: Measuring Errors between Surfaces Using the Hausdorff Distance”, *Proc. IEEE Int. Conf. Multimedia and Expo 2002*, Lausanne, Suíça, pp. 705-708, 2002.
- [Bergman95] L. Bergman, B. E. Rogowitz, e L. A. Treimish, “A rule-based tool for assisting color map selection”, *Proc. IEEE Visualization '95*, pp. 118-125, 1995.
- [Botsch02] M. Botsch, S. Steinberg, S. Bischoff, e L. Kobbelt, “Openmesh - a Generic and Efficient Polygon Mesh Data Structure”, *Proc. 1st OpenSG Symp.*, Darmstadt, Germany, Jan. 2002.
- [Cignoni98] P. Cignoni, C. Rocchini, e R. Scopigno, “Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces”, *Computer Graphics Forum*, vol. 17, pp. 167-174, 1998.
- [Fox05] J. van der Zijp, “FOX TOOLKIT”, <http://www.fox-toolkit.org> (Abril 2005)
- [Meyer02] M. Meyer, M. Desbrun, P. Schröder, e A. H. Barr, “Discrete Differential-Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds”, in *Visualization and Mathematics III*, pp. 35-58, Springer-Verlag, 2003.
- [Pébay03] P. P. Pébay e T. J. Baker, “Analysis of Triangle Quality Measures”, *Mathematics of Computation*, vol. 72, pp. 1817-1839, 2003.
- [Roy04] M. Roy, S. Foufou, e F. Truchetet, “Mesh Comparison Using Attribute Deviation Metric”, *Int. Journal of Image and Graphics*, vol. 4(1), pp. 1-14, 2004.
- [Rusinkiewicz04] S. Rusinkiewicz, “Estimating Curvatures and Their Derivatives on Triangle Meshes”, *Proc. 2nd Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp. 486-493, 2004.
- [Zhou01] L. Zhou e A. Pang, “Metrics and Visualization Tools for Surface Mesh Comparison”, *Proc. SPIE 2001*, vol. 4302, *Visual Data Exploration and Analysis VIII*, pp. 99-110, 2001