

# Modelos Foto-realistas para o Reflexo Pupilar à Luz e Deformação dos Padrões da Íris

Vitor F. Pamplona<sup>1</sup>, Manuel M. Oliveira<sup>1</sup>, Gladimir V. G. Baranoski<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Informática - UFRGS, Brasil

<sup>2</sup>Natural Phenomena Simulation Group - University of Waterloo, Canadá

{vfpamplona,oliveira}@inf.ufrgs.br, gvgbaran@curumin.math.uwaterloo.ca

**Abstract.** *We introduce a physiologically-based model for pupil light reflex (PLR) and an image-based model for iridal pattern deformation. Our time-dependent PLR model expresses the pupil diameter as a function of the environment lighting, naturally adapting the pupil diameter even to abrupt changes in lighting conditions. Since the parameters of our PLR model were derived from measured data, it correctly simulates the actual behavior of the human pupil. Another contribution of our work is a model for realist deformation of the iris pattern as a function of pupil size. Our models produce high-fidelity appearance effects and can be used to produce real-time predictive animations of the pupil and iris under variable lighting conditions. We assess the predictability and quality of our simulations through comparisons of modeled results against measured data derived from experiments. Combined, our models can bring facial animation to new photorealistic standards.*

**Resumo.** *Apresentamos um modelo fisiológico para o reflexo pupilar à luz (PLR) e um modelo para deformação dos padrões da íris. O modelo para PLR expressa o diâmetro pupilar em função da iluminação ambiental ao longo do tempo, simulando corretamente o comportamento da pupila humana para um indivíduo médio. O modelo é então adaptado para incluir diferenças individuais de sensibilidade à luz, hipus, modelos de latência e velocidade de dilatação e contração. Outra contribuição deste trabalho é um modelo para deformação realista dos padrões da íris em função da área pupilar. Após capturar imagens de íris de diversos voluntários durante diferentes estágios de dilatação, mapeamos as trajetórias das saliências e identificamos um comportamento médio. Demonstramos a eficácia e qualidade dos resultados obtidos comparando-os com fotografias e vídeos de íris reais. Os modelos aqui apresentados produzem animações foto-realistas e preditivas da pupila e da íris em tempo real.*

## 1. Introdução

Cenas de *close up* da face de personagens são comuns em jogos e filmes de animação. Animar faces humanas virtuais consiste em imitar uma realidade cheia de detalhes e comum aos nossos olhos. Mesmo sem refletir a respeito, nosso cérebro está acostumado a ver diversos movimentos voluntários e involuntários quando conversamos com uma pessoa ou a assistimos na TV. Grande parte da expressão de um personagem é dado pelos movimentos oculares e variações pupilares. São estes movimentos que, se realizados de forma coerente, prendem a atenção dos espectadores e transmitem o sentimento desejado pelo produtor da animação [Lee et al. 2002].



**Figura 1. Comparação de nove segundos entre os nossos modelos e um vídeo de uma íris humana. Na esquerda, um quadro da simulação, no centro um quadro do vídeo e, na direita, a comparação entre as pupilas real e simulada.**

*Walt Disney once said to his animation team that the audience watches the eyes and this is where the time and money must be spent if the character is to act convincingly [Watt and Watt 1992].*

O reflexo pupilar à luz (Pupillary Light Reflex - PLR) é o efeito responsável pela contração da pupila em ambientes iluminados e por sua dilatação em ambientes escuros. PLR é uma ação do sistema nervoso autônomo e, exceto pela influência de drogas, é o fator determinante do tamanho da pupila. Diferente do resto do corpo, a íris e a pupila humanas não podem ser manipuladas facilmente e é inviável reproduzir a iluminação de uma cena de animação no mundo real só para obter diâmetros pupilares realistas em diversas posições do personagem. Além disso, os sistemas de captura de movimento, comumente utilizados para dar movimentos realistas aos personagens, não podem ser utilizados na medida que não há meios de fixar marcadores na íris *in vivo*. Embora que o PLR e as deformações da íris possam ser animadas utilizando técnicas tradicionais de computação gráfica como, por exemplo, representações paramétricas controladas por curvas de velocidade genéricas, nós acreditamos que o uso de modelos fisiológicos, guiados por parâmetros com significado físico, possam tornar o processo preditível, automático e fácil, criando animações realistas e reproduzíveis (Figura 1). Assim, os artistas não gastariam seu tempo encontrando o melhor conjunto de parâmetros para que as curvas de velocidade pareçam ser realistas.

Nosso modelo para PLR (Seção 3) é uma equação temporal que retorna a área pupilar em função da iluminação ambiental. Ele combina uma equação diferencial com atraso, que define o caminho neural da PLR, com dados estáticos de experimentos científicos, que relacionam o diâmetro pupilar e a intensidade de luz do ambiente (Seção 2). A partir desta combinação, nós incrementamos o modelo com uma simulação de hipus<sup>1</sup> e de sensibilidade individual, e aplicamos modelos de latência<sup>2</sup> e de velocidade da movimentação pupilar<sup>3</sup>. Como a íris humana é uma camada fibro-muscular que apresenta padrões visíveis e estes são deformados de acordo com os movimentos pupilares, nós criamos um segundo modelo que indica o movimento de cada saliência da íris em função das mudanças na área pupilar (Seção 5). Para tal, analisamos o comportamento das estru-

<sup>1</sup>Hippus são pequenas variações pupilares orientadas pelo sistema nervoso autônomo que ocorrem mesmo estando num ambiente com intensidade de luz estável. Este efeito é normalmente associado ao estado emocional do indivíduo [Stark 1939].

<sup>2</sup>Latência é a diferença de tempo entre o estímulo de luz e o início do movimento pupilar [Link and Stark 1988].

<sup>3</sup>As velocidades de contração e dilatação da pupila são diferentes [Ellis 1981].

turas visíveis da íris a partir de um conjunto de fotografias e vídeos, obtidos durante um processo de dilatação pupilar induzido com cinco voluntários. Demonstramos a eficácia da nossa abordagem comparando os resultados dos nossos modelos contra fotografias e vídeos (Seção 4, Figura 1).

Segundo o Prof. Dr. Jacobo Melamed Cattan, oftalmologista do Hospital de Clínicas de Porto Alegre, membro da banca que julgou esta dissertação, a nossa contribuição é multidisciplinar. Nosso modelo fisiológico para PLR é o primeiro da literatura de computação, é um dos poucos modelos de PLR dinâmicos validados com seres humanos e também é o primeiro modelo capaz de simular variações individuais em termos de sensibilidade à luz de toda a literatura. O modelo de deformação é também o primeiro modelo devidamente validado em humanos para deformação dos padrões da íris.

Devido a restrições de espaço, este artigo não apresenta a derivação detalhada dos modelos propostos. Os trabalhos relacionados em computação gráfica se limitam a produção não preditiva de imagens estáticas de íris e pupilas e, por serem bem diferentes da abordagem aqui proposta, não serão relatados neste texto. O trabalho na íntegra [Pamplona 2008], o relatório técnico que apresenta a base biofísica para a dissertação [Pamplona 2007] e o vídeo do trabalho podem ser encontrados em [Pamplona 2009]. Para melhor compreensão, recomenda-se que o vídeo presente nesta página seja assistido. O artigo referente ao trabalho foi submetido ao ACM Transactions on Graphics<sup>4</sup>, foi aceito e, atualmente, encontra-se em estágio final de publicação. O estudante revisou a literatura, derivou o modelo de PLR, desenvolveu o modelo de deformação, implementou e validou ambos, e participou do processo de captura de imagens e vídeos de íris reais, que foi conduzido pelos orientadores.

## 2. Modelos Existentes Para PLR

Na literatura da biologia é possível encontrar modelos estáticos que relacionam diretamente a iluminação ambiental com a média da área pupilar de um conjunto de indivíduos. Estas medidas são tomadas em um ambiente com iluminação controlada, quando a pupila converge para um diâmetro estável após a alteração da iluminação. Estes modelos não descrevem o comportamento fora do estado de equilíbrio e, portanto, não servem para criar animações. Dentre eles, o modelo mais citado na literatura é o de Moon e Spencer [Moon and Spencer 1944], que é dado por:

$$D = 4.9 - 3 \tanh [0.4(\log_{10}(L_b) - 0.5)] \quad (1)$$

onde o diâmetro pupilar  $D$  varia de 2 a 8mm e o nível de luminosidade no ambiente  $L_b$  varia de  $10^5$  Blondels em dias ensolarados até  $10^{-5}$  Blondels em noites escuras.

Modelos teóricos para PLR, baseados em observações anatômicas e fisiológicas, são criados para expressar o relacionamento entre as diversas estruturas do corpo humano envolvidas no processo sem considerar dados experimentais. Longtin e Milton [Longtin and Milton 1989], por exemplo, definiram um modelo teórico para o caminho neural entre o estímulo de luz recebido pela retina até a reação da pupila:

$$\frac{dg}{dA} \frac{dA}{dt} + \alpha g(A) = \gamma \ln \left[ \frac{\phi(t - \tau)}{\bar{\phi}} \right], \text{ onde } g(A) = \sqrt[n]{\frac{\Lambda \theta^n}{A - \Lambda'} - \theta^n} \quad (2)$$

<sup>4</sup>ACM TOG é a revista com maior fator de impacto da computação gráfica com o índice 3.413, segundo o Journal Citation Reports 2007.

e  $\Lambda'$  e  $\Lambda + \Lambda'$  são as áreas mínima e máxima para a pupila,  $\theta$  é o valor de atividade muscular quando a pupila possui tamanho médio,  $\alpha$  e  $\gamma$  são fatores de proporcionalidade,  $t$  é o tempo,  $\tau$  é a latência,  $\phi$  é o nível de luz na retina definido como a iluminância em lumens/mm<sup>2</sup> multiplicado pela área da pupila em mm<sup>2</sup>, e  $\bar{\phi}$  é um limite inferior da luminância no qual variações abaixo dele não alteram a pupila.  $g(A)$  é uma função qualquer que representa o volume de atividade muscular necessário para manter a pupila com a área  $A$ . Longtin e Milton sugerem aquela definição para  $g(A)$  pois ela simula as propriedades elasto-mecânicas de músculos em geral. Note que, embora este modelo seja temporal, as constantes não representam unidades físicas como  $\theta$ , por exemplo. Valores incorretos para as constantes da equação podem facilmente criar comportamentos não realistas e a equação pode, inclusive, não convergir para uma solução.

### 3. Modelo Proposto para PLR

O nosso modelo combina o modelo teórico e temporal de Longtin e Milton (Equação 2) e o modelo experimental e estático de Moon e Spencer (Equação 1). Descreveremos nesta seção os passos gerais da derivação matemática para o leitor ter uma breve noção de como ele foi desenvolvido. Uma versão detalhada da derivação matemática pode ser encontrada em [Pamplona 2008].

#### 3.1. Derivação para Modelo Estático

Sob iluminação constante, a área pupilar no modelo de Longtin e Milton convergirá para um estado de equilíbrio onde:

$$\frac{dg}{dA} \frac{dA}{dt} = 0$$

Assumindo que não há ocorrência de hippus,  $\phi$  torna-se independente de tempo. Por manipulação algébrica trivial, podemos reescrever os modelos para:

$$\alpha g(A) = \gamma (\ln(\phi) - \ln(\bar{\phi})) \quad (3)$$

$$-2.3026 \operatorname{atanh} \left( \frac{D - 4.9}{3} \right) = 0.4(\ln(L_b) - 1.1513) \quad (4)$$

onde  $\operatorname{atanh}$  é o arco-tangente hiperbólico. Note a semelhança no formato das equações. Para que a solução da Equação 3 apresente valores de área pupilar comparáveis ao diâmetro pupilar utilizado na Equação 4, sob as mesmas condições de iluminação, tem-se:

$$-2.3026 \operatorname{atanh} \left( \frac{D - 4.9}{3} \right) \approx \alpha g(A) \quad (5)$$

$$0.4(\ln(L_b) - 1.1513) \approx \gamma (\ln(\phi) - \ln(\bar{\phi})) \quad (6)$$

Ajustando as duas equações, obtém-se:

$$0.4(\ln(L_b) - 1.1513) \approx 0.45 (\ln(\phi) - \ln(4.8118 \times 10^{-10})) - 5.2 \quad (7)$$

Podemos então substituir  $g(A)$  por  $M(D)$  e utilizar os valores das constantes do lado esquerdo da Equação 7 na Equação 3 e, assim, o modelo que prediz o diâmetro pupilar em condições de iluminação estável é expresso como:

$$M(D) = \operatorname{atanh} \left( \frac{D - 4.9}{3} \right) \quad (8)$$

$$2.3026 M(D) = 5.2 - 0.45 \ln \left[ \frac{\phi}{4.8118 \times 10^{-10}} \right] \quad (9)$$

### 3.2. Expandindo para o Modelo Dinâmico

Dado que o modelo estático é apenas um subcaso do modelo dinâmico, podemos efetuar a mesma troca da função atemporal  $g(a)$  pela  $M(D)$  e dar valor às constantes. Desta forma, o nosso modelo dinâmico torna-se:

$$\frac{dM}{dD} \frac{dD}{dt} + 2.3026 \operatorname{atanh} \left( \frac{D - 4.9}{3} \right) = 5.2 - 0.45 \ln \left[ \frac{\phi(t - \tau)}{4.8118 \times 10^{-10}} \right] \quad (10)$$

onde  $D$  e  $\phi$  são expressos em  $mm$  e  $lumens$ , respectivamente. A validação para esta expansão pode ser lida em [Pamplona 2008]. Para estimar a latência, nós utilizamos o modelo de Link e Stark [Link and Stark 1988] que resulta no valor de  $\tau$ .

### 3.3. Acrescentando Velocidades de Contração e Dilatação

Como a velocidade de contração é cerca de três vezes mais rápida do que a velocidade de (re)dilatação [Ellis 1981], nós aplicamos esta diferença no tamanho do passo da simulação numérica que resolve o modelo:

$$dt_c = \frac{T_c - T_p}{S} \quad dt_d = \frac{T_c - T_p}{3S} \quad (11)$$

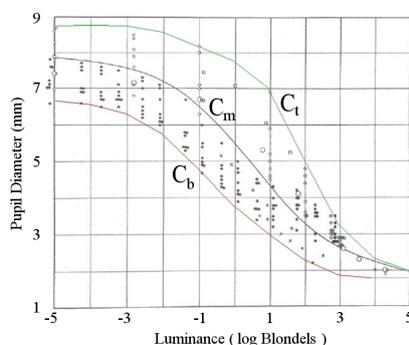
onde  $dt_c$  e  $dt_d$  são medidos em milissegundos,  $T_c$  e  $T_p$  são, respectivamente, os tempos de simulação do passo atual e anterior medido em  $ms$  e  $S$  é uma constante que afeta as velocidades no sentido de simular variações individuais na velocidade do movimento.

### 3.4. Simulando a Sensibilidade Individual

A fim de simular diferenças individuais para posterior comparação do modelo com humanos, nós criamos um intervalo de sensibilidade dado por curvas de diâmetro pupilar máximo e mínimo, mostradas na Figura 2. O diâmetro pupilar final é calculado através da Equação 12 escolhendo, para cada indivíduo, uma iso-curva  $r_I$  entre os limites máximo e mínimo:

$$D_{final} = C_b(D) + (C_t(D) - C_b(D))r_I \quad (12)$$

onde  $r_I \in [0, 1]$  representa a sensibilidade à luz do indivíduo e  $C_b(D)$  e  $C_t(D)$  retornam um diâmetro mínimo e máximo para um diâmetro  $D$  que foi calculado pela Equação 10.



**Figura 2. Dados originais de Moon e Spencer com as nossas curvas de limite mínimo e máximo. A curva  $C_m$  corresponde a Equação 9. O par de curvas  $C_b$  e  $C_t$  definem um envelope contendo as possíveis iso-curvas.**

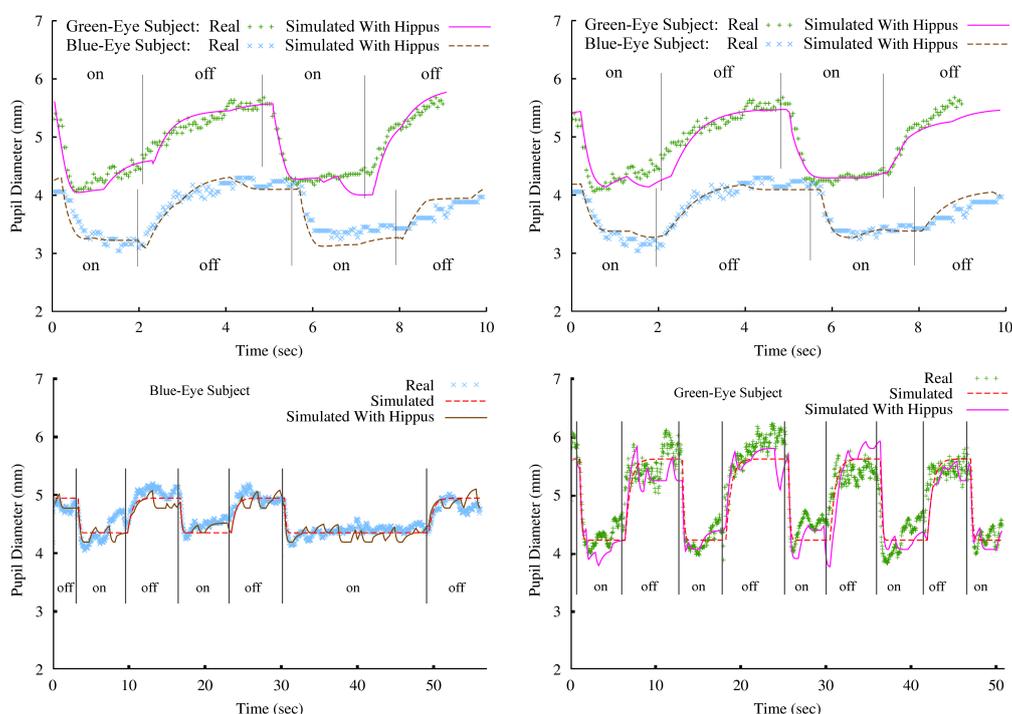
### 3.5. Simulando a Hippus

Para aproximar a hippus nós adicionamos variações na intensidade de luz na faixa de  $10^{-0.5}$  e  $10^{0.5}$  Blondels, com uma frequência de 0.05Hz a 0.3Hz, conforme sugerido por [Stark 1939]. Estas variações melhoram consideravelmente o realismo das animações.

## 4. Validação do Modelo de PLR

Pela derivação realizada, sabemos que o modelo converge para um tamanho de pupila de um indivíduo médio e, portanto, o modelo é realista quando não há variação de luz. Precisamos, então, validar o formato da convergência em si, ou seja, verificar se a animação da pupila dilatando ou contraindo é realista. Para tal, realizamos três experimentos. Em cada um deles, dois voluntários tinham suas íris filmadas enquanto as condições de iluminação se alteravam em intervalos de tempo pré-definidos. Nós medimos a intensidade luminosa do ambiente a cada variação e a aplicamos no nosso modelo.

A Figura 3 compara realidade e simulação. Os gráficos da parte superior mostram os dois primeiros experimentos que utilizaram lanternas como fonte de luz direta. No da esquerda a intensidade de luz foi estimada a cada variação pela inversa da Equação 1. No gráfico da direita, a intensidade de luz foi medida por um luxímetro. Os gráficos da parte de baixo mostram os resultados do terceiro experimento, onde uma lâmpada incandescente com dimmer foi utilizada como iluminação indireta. A descrição detalhada destes experimentos pode ser lida em [Pamplona 2008].



**Figura 3. Comparação entre os modelos e medições feitas em três experimentos com iluminação controlada. O '+' (verde) e o 'x' (azul) representam o diâmetro pupilar medido a partir de vídeos com um indivíduo de íris verdes e outro de íris azuis. As linhas sólidas e tracejadas representam o diâmetro pupilar estimado pelo nosso modelo. As linhas verticais delimitam os intervalos de luz ligada e desligada. Nos gráficos inferiores há duas simulações: com e sem hippus.**

## 5. Modelo Para Deformação dos Padrões da Íris

O modelo para deformação dos padrões da íris foi criado a partir de um conjunto de fotos capturadas durante um processo de dilatação pupilar induzido envolvendo cinco voluntários. As fotos mais nítidas foram separadas, ordenadas pelo tamanho da pupila e as características salientes das íris foram marcadas manualmente. A Figura 4 mostra um subconjunto dos pontos analisados para um dos voluntários. Note que os padrões movem-se radialmente e, desconsiderando as perturbações provocadas pelas estruturas vasculares das íris de cada indivíduo, o comportamento de cada saliência pode ser aproximado por uma linha reta. Além disso, as saliências permanecem em suas posições relativas a largura da pupila, caracterizando a invariância que define o nosso modelo.

A implementação do modelo é trivial para a computação gráfica, pois utiliza técnicas muito conhecidas como filtragem bilinear e mapeamento de texturas sobre um disco. O diâmetro exterior é fixo enquanto que o inferior é estimado pela Equação 10 de acordo com a luminância da cena. A Figura 5 mostra resultados produzidos pelo modelo de deformação proposto, comparando-os com fotografias de íris reais.

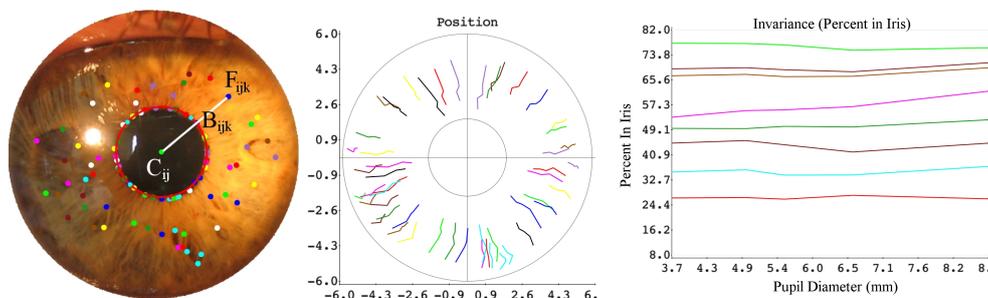


Figura 4. Esquerda: Fotografia tirada durante o processo de dilatação. Os pontos coloridos indicam as saliências analisadas. Centro: O comportamento de cada ponto analisado durante a dilatação da pupila. Direita: A posição em percentual relativo a largura da íris de um subconjunto das saliências.

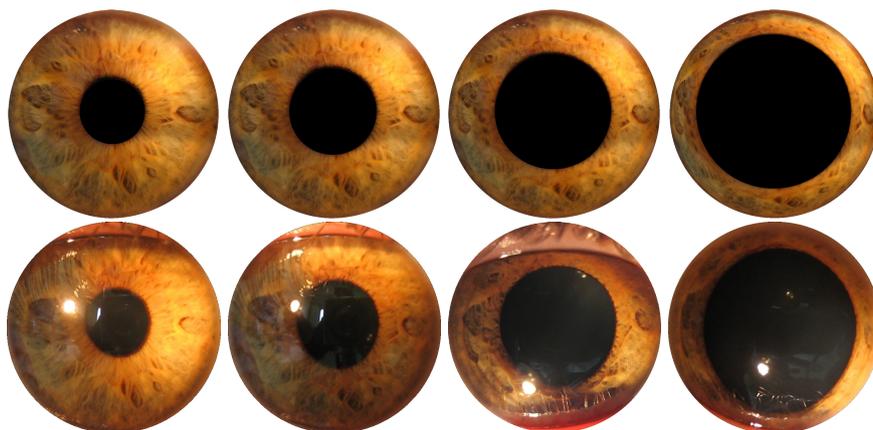


Figura 5. Comparação dos resultados produzidos contra fotografias. Cima: imagens produzidas usando o modelo de deformação de padrões para ambientes iluminados com 35.638, 3.102 e 71  $\text{lumens/mm}^2$ . A quarta imagem simula uma indução por medicamento. Baixo: fotografias tiradas em ambientes com as respectivas configurações da simulação.

## 6. Conclusões

Apresentamos novos modelos para síntese realista do comportamento da íris e pupila humanas. O modelo para PLR combina e amplia resultados teóricos com dados experimentais coletados por vários pesquisadores. O modelo resultante é expresso em termos de uma equação diferencial com atraso que descreve as mudanças no diâmetro pupilar em função da iluminação. Os modelos foram validados através de comparações dos resultados simulados com fotografias e vídeos capturados de íris humanas. O modelo fisiológico é o primeiro da literatura de computação gráfica a simular o PLR. É também o primeiro modelo prático na literatura a simular a dinâmica da pupila e íris em condições de iluminação não constantes e o primeiro modelo integrado em toda a literatura a considerar variabilidade individual usando equações gerais para latência e velocidade. O modelo para deformação é também o primeiro deste tipo validado em humanos. Nossos resultados devem encontrar aplicabilidade imediata em áreas que requerem animações faciais com alto nível de detalhe, como em cenas de *close up* em animações, por exemplo. Além disso, espera-se que os modelos propostos impactem áreas como biologia e oftalmologia, onde podem ser utilizados em simulações e diagnóstico de patologias.

## Agradecimentos

Manuel M. Oliveira agradece o apoio do CNPq (Processo 305613/2007-3) e da Microsoft Brasil. Gladimir V. G. Baranoski agradece ao NSERC-Canada (Grant 238337).

## Referências

- Ellis, C. J. (1981). The pupillary light reflex in normal subjects. *British Journal of Ophthalmology*, 65(11):754–759.
- Lee, S., Badler, J., and Badler, N. (2002). Eyes alive. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3):637–644.
- Link, N. and Stark, L. (1988). Latency of the pupillary response. *IEEE Trans. Bio. Eng.*, 35(3):214–218.
- Longtin, A. and Milton, J. G. (1989). Modelling autonomous oscillations in the human pupil light reflex using non-linear delay-differential equations. *Bulletin of Math. Bio.*, 51(5):605– 624.
- Moon, P. and Spencer, D. (1944). On the stiles-crawford effect. *J. Opt. Soc. Am.*, 34:319–329.
- Pamplona, V. F. (2007). Estudo sobre a íris humana para síntese de imagens fotorealísticas. Technical Report 1284, UFRGS. Instituto de Informática.
- Pamplona, V. F. (2008). Photorealistic models for pupil light reflex and iridal pattern deformation. Master's thesis, UFRGS, Porto Alegre, Brazil.
- Pamplona, V. F. (2009). Photorealistic models for pupil light reflex and iridal pattern deformation :: Vitor pamplona. Disponível em: <http://tinyurl.com/dknozq>. Visitado em: 26 Fev. 2009.
- Stark, L. W. (1939). Stability, oscillations, and noise in the human pupil servomechanism. *Proc. of the IRE*, 47(11):1925–1939.
- Watt, A. and Watt, M. (1992). *Advanced Animation and Rendering Techniques*. Addison-Wesley, New York.