

Sistema Biométrico Multimodal Baseado em Pupilometria Dinâmica

Vitor A. N. Yano^{*†}, Alessandro Zimmer[†],

^{*}Departamento de Comunicações

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP, Campinas (SP), Brasil

[†]Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), Brasil

E-mail: vitoryan@decom.fee.unicamp.br, zimmer@eletrica.ufpr.br

Abstract—Biometrics-based authentication is a method of personal identification that has some advantages over the password and object-based ones, mainly for the user, who doesn't need to carry or memorize anything. However, this kind of identification is also subject to problems. Besides the technology-related possibilities of fraud, most of the common used biometric features themselves can be faked. This paper proposes a multimodal biometric authentication method which incorporates the use of dynamic features of the human reflex and the iris pattern recognition for a better performance. A prototype system has been implemented and tested with 59 volunteers. Experimental results presented an Equal Error Rate (EER) of 2.44%.

Keywords—dynamic pupillometry; iris; biometrics.

I. INTRODUÇÃO

A identificação pessoal, problema relacionado à associação de uma identidade a um indivíduo, é necessária nas mais diversas áreas cotidianas, desde o envio de uma mensagem eletrônica até uma transferência bancária, passando por votações, prevenção de crimes, acesso a escritórios e registro de frequência. Hoje, a identificação é tão importante que, para alguns, um mecanismo de autenticação à prova de fraudes está entre as invenções mais necessárias da humanidade, sendo considerado o "Santo Graal" da segurança da informação [1].

Um sistema automático de identificação pode ser baseado em três tipos de elementos: o que o indivíduo possui, o que ele sabe, ou o que ele é [2]. Enquanto um objeto pode ser perdido, roubado ou mesmo reproduzido, e uma informação pode ser esquecida ou compartilhada, o uso de características biométricas dificulta a ocorrência de fraudes em sistemas automáticos de verificação de identidade.

Ainda assim, um sistema de identificação baseado em informações biométricas também pode ser fraudado. Além das possibilidades de ataque relacionadas à tecnologia de implementação, as próprias características biométricas podem ser falsificadas ou simuladas em muitos casos, seja pelo treinamento de um comportamento, pelo uso de imagens digitais de alta resolução [3] ou de próteses artificiais [4]. Em casos críticos, partes do corpo podem ser removidas de cadáveres ou mesmo de pessoas vivas [5].

Uma maneira de combater esse tipo de ataque é usando mais de uma biometria para identificação, em um chamado sistema biométrico multimodal. Embora esta técnica possa

dificultar muito a autenticação de um impostor, ainda não a impossibilita.

Outra técnica usada para evitar fraudes é a detecção de alguma evidência de que a amostra pertence a uma pessoa viva. Algumas informações usadas para esse fim são batimentos cardíacos, temperatura do corpo, resistividade e reflexão da pele. Entretanto, mesmo essas características podem ser simuladas por máquinas ou por materiais com propriedades similares às do corpo humano [6].

Dado o contexto apresentado, o objetivo do trabalho foi propor um sistema biométrico multimodal de autenticação que utiliza, em conjunto, características estáticas da textura da íris e características dinâmicas do reflexo pupilar¹.

II. ESTADO DA ARTE

A identificação através da íris apresenta diversas vantagens sobre outras formas de biometria. Além da grande variabilidade existente entre diferentes indivíduos, a textura da íris possui pouca dependência genética e quase não varia ao longo da vida [7]. O procedimento usado para captura das informações não é invasivo e, devido ao seu tamanho e complexidade, apresenta maior dificuldade de reprodução.

O método de identificação pelo padrão da íris proposto por Daugman [7] é o mais citado na literatura científica. Seu algoritmo é utilizado na maioria dos dispositivos comerciais que trabalham com essa tecnologia. É baseado na codificação da textura da íris por demodulação de fase usando wavelets de Gabor 2D. Cada indivíduo é representado por um vetor binário de 2048 bits, cuja identidade é verificada por uma comparação que utiliza a distância de Hamming entre vetores.

O problema do método de Daugman [7] está no fato de trabalhar apenas com imagens estáticas, o que pode permitir a autenticação de íris reproduzidas em imagens de alta resolução. Além disso, requer que uma grande área da textura esteja visível na amostra, de modo que a mesma é descartada se mais de 50% da íris for obstruída.

Na tentativa de desenvolver um sistema à prova de fraudes, Nishigaki e Arai [8] propõem o uso de informações biométricas dos movimentos sacádicos e do ponto cego do

¹Este trabalho se refere a uma dissertação de Mestrado. Sua versão completa encontra-se disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/27042>

olho. Como estas características estão relacionadas a reflexos humanos, que são movimentos involuntários e não podem ser treinados ou reproduzidos conscientemente, mesmo que a informação seja acessível a um impostor, não pode ser imitada, como ocorre com outras características dinâmicas, como a assinatura manuscrita, a voz ou o modo de caminhar. Experimentos levaram a 0% de taxa falsa aceitação (FAR) e 0% de falsa rejeição (FRR). Os autores, no entanto, alertam que ainda é necessário confirmar a singularidade e a permanência de tais primitivas biométricas.

Assim, a proposta de um método que utiliza informações do movimento pupilar para autenticação, em conjunto com a textura da íris, é original, e combina as vantagens de um sistema biométrico multimodal com a detecção de vida, além dos altos graus de singularidade e permanência da íris, em um processo não invasivo.

III. METODOLOGIA

Baseado em informações sobre o reflexo pupilar à luz, que se sabe apresentar características diferentes em cada pessoa [9], testes preliminares foram realizados a fim de testar sua variabilidade interclasse e intraclasse, constatando seu potencial uso como informação biométrica adicional viável e relevante. Após isso, foram definidos os métodos a serem utilizados em um sistema completo.

A Fig. 1 mostra a arquitetura do sistema proposto. Os métodos usados para pré-processamento e extração de primitivas foram baseados em algoritmos já usados em sistemas de reconhecimento pela íris e pupilometria dinâmica, técnica de medição do movimento pupilar utilizada para fins de avaliação do sistema nervoso autônomo [10]. No entanto, devido aos diferentes requisitos deste sistema, como menor tempo de processamento e preservação da informação visual da íris, os algoritmos foram adaptados com melhorias para esta aplicação.



Fig. 1. Arquitetura do sistema proposto

A. Aquisição do vídeo

Para obter características biométricas do reflexo pupilar à luz, uma amostra para este sistema corresponde a um vídeo que registra a contração e dilatação da pupila após um estímulo luminoso de intensidade e duração pré-definidas.

Para a obtenção da amostra, o indivíduo deve ser mantido sob iluminação constante, preferencialmente muito baixa, para estabilização do raio pupilar. A aquisição de imagens deve ser feita através de uma câmera sensível à radiação infravermelha, o que permite a captura mesmo na ausência de luz visível. Após o início da captura de dados, o *flash* deve ser disparado e a gravação deve continuar até que haja recuperação suficiente do raio da pupila.

B. Pré-processamento

Para permitir a extração de primitivas e reduzir a possibilidade de erros, o vídeo deve passar por ajustes de contraste e remoção de ruídos, correspondentes, majoritariamente, a reflexos especulares gerados pela forma de iluminação infravermelha usada para a captura das imagens. A Fig. 2 mostra exemplos de imagens contendo tais ruídos.

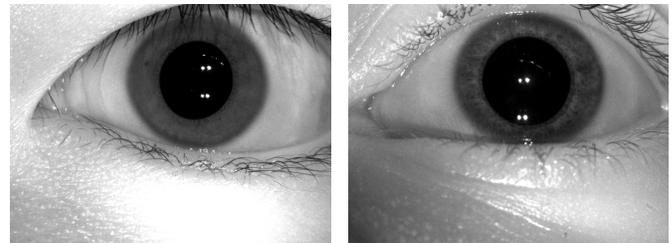


Fig. 2. Exemplos de reflexos especulares presentes em imagens da pupila

Como as regiões correspondentes aos reflexos especulares apresentam um alto brilho, os níveis de intensidade de cinza nestes pontos são elevados. No entanto, esse critério isoladamente não define a localização de um artefato, já que outras partes da imagem podem apresentar as mesmas características. Para determinar as posições dos reflexos sobre a pupila e a íris, é necessário considerar diferenças locais na imagem.

Assim, sendo $I(x, y)$ a intensidade do pixel localizado nas coordenadas (x, y) da imagem, considera-se este ponto pertencente a um artefato caso sua intensidade seja maior do que k vezes à dos pontos localizados a uma distância L à esquerda, à direita, acima e abaixo simultaneamente, ou seja, se a proposição q em (1) for verdadeira.

$$\begin{aligned}
 p_1 &: I(x, y) > kI(x + L, y) \\
 p_2 &: I(x, y) > kI(x - L, y) \\
 p_3 &: I(x, y) > kI(x, y + L) \\
 p_4 &: I(x, y) > kI(x, y - L) \\
 q &: p_1 \wedge p_2 \wedge p_3 \wedge p_4
 \end{aligned} \tag{1}$$

O parâmetro L é definido de acordo com o raio dos artefatos que se deseja eliminar. Um valor muito alto pode levar a detecções incorretas e alterações indesejadas na imagem,

enquanto um valor baixo pode reduzir a eficácia do método ao ignorar um ou mais reflexos. Já a relação k deve ser obtida por uma análise dos níveis de cinza dos reflexos e suas regiões próximas. Um valor baixo pode levar à identificação incorreta de artefatos, enquanto um valor elevado pode fazer com que alguns reflexos sejam ignorados.

A intensidade de cada pixel detectado como ruído, bem como a de seus vizinhos até uma distância L , são substituídos pelo valor mínimo de intensidade ente todos. Por fim, um filtro mediano é aplicado à imagem para remover eventuais bordas e resquícios dos reflexos especulares, conforme mostrado na Fig. 3.

É importante mencionar que o resultado da filtragem é usado apenas para a etapa de segmentação e extração de primitivas dinâmicas. Uma vez conhecida a localização, a extração da textura da íris é feita a partir da imagem original.

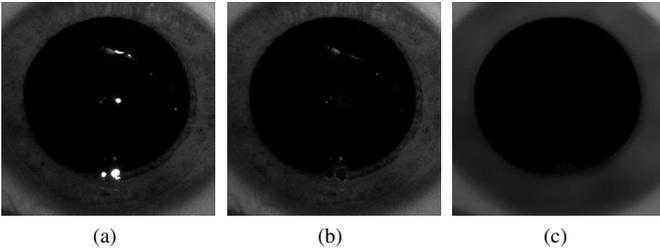


Fig. 3. Processo de remoção de reflexos especulares: (a) imagem original, (b) após substituição dos valores de alta intensidade relativa por baixas intensidades e (c) após aplicação de filtro mediano

C. Extração de primitivas dinâmicas

A extração de características do reflexo pupilar se dá a partir de um sinal de pupilometria dinâmica, isto é, da medição da variação do raio pupilar ao longo do tempo. Para isso, foi desenvolvido um método rápido de segmentação da pupila baseado em crescimento de regiões.

A partir da imagem pré-processada I , obtém-se a imagem I_{bin} através de um processo de limiarização invertida, conforme (2):

$$I_{bin}(x, y) = \begin{cases} 0, & I(x, y) > l \\ 1, & I(x, y) \leq l \end{cases} \quad (2)$$

onde l representa um valor de limiar, normalmente de aproximadamente 5% do valor de máxima intensidade.

A partir da imagem binária, estimam-se as coordenadas do centro da pupila (x_p, y_p) de modo análogo ao método de Ma et al [11], porém, por se tratar de uma imagem obtida por limiarização invertida, buscamos as máximas somas:

$$x_p = \arg \max_x \left(\sum_y I_{bin}(x, y) \right) \quad (3)$$

$$y_p = \arg \max_y \left(\sum_x I_{bin}(x, y) \right) \quad (4)$$

A binarização é feita por três razões: primeiro, para reduzir o tempo computacional, já que os somatórios de valores de

linhas e colunas resumem-se em contagens. Em segundo lugar, para impedir que uma região com grande incidência de valores altos, como as pálpebras, mascare os valores de somatório das respectivas colunas. Por fim, a diferenciação em dois níveis permite uma primeira verificação do tamanho da pupila, reduzindo a possibilidade de erros de segmentação.

Em alguns casos, regiões da imagem correspondentes aos cílios ou às bordas laterais também apresentam intensidades muito baixas e dimensão maior que a da pupila. Nestas situações, uma simples aplicação de (3) e (4) poderia levar a uma estimativa incorreta do centro da pupila.

O uso da limiarização invertida permite a obtenção de estimativas da largura e da altura da pupila que, por apresentar forma circular, devem ser muito próximas. Assim, uma maneira de testar se as coordenadas encontradas realmente pertencem ao interior da pupila é calcular a razão entre os somatórios máximos entre colunas e linhas (5), que deve ser aproximadamente unitária:

$$Q = \frac{\sum_y I_{bin}(x_p, y)}{\sum_x I_{bin}(x, y_p)} \quad (5)$$

Caso a relação Q seja maior que 20% além da unidade, descarta-se a coluna com maior somatório e busca-se o próximo valor máximo. Caso seja menor que 20% abaixo de 1, descarta-se a linha. Este procedimento é repetido até que nenhuma das condições citadas seja satisfeita.

As coordenadas (x_p, y_p) encontradas não precisam corresponder exatamente ao centro da pupila, desde que estejam no interior da mesma. Isto porque o ponto localizado nesta posição em I_{bin} é usado como semente para aplicação da técnica de crescimento de regiões [12].

A quantidade de pixels pertencentes à região segmentada corresponde à área A da pupila. Considerando a pupila como um círculo, as coordenadas de centro são aproximadas pelo centroide da região, e seu raio é obtido a partir da área A :

$$r_p = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (6)$$

A variação do raio pupilar ao longo do tempo compõe um sinal pupilométrico $r_p(t)$. Para evitar problemas causados pelo uso de imagens adquiridas em diferentes resoluções, o sinal é normalizado, dividindo-o pelo raio da íris r_i . A partir deste, as seguintes primitivas são então extraídas, conforme ilustrado na Fig. 4: tempo de latência t_L ; tempo de contração t_C ; tempo de recuperação t_R ; raio inicial da pupila r_0 ; raio mínimo para o estímulo aplicado r_{min} ; velocidade média de contração v_C ; velocidade média de recuperação v_R . As equações (7) a (14) definem como estes parâmetros são extraídos a partir do sinal.

$$r_0 = r_p(0) \quad (7)$$

$$r_{min} = \min(r_p(t)) \quad (8)$$

$$t_L = \arg \min_t \left(\frac{d^2 r_p(t)}{dt^2} \right) \quad (9)$$

$$t_C = \arg \min_t (r_p(t)) - t_L \quad (10)$$

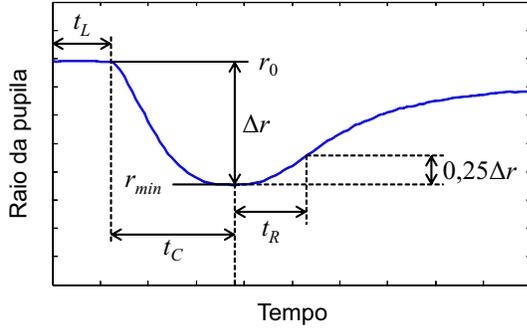


Fig. 4. Primitivas extraídas do sinal de pupilometria

$$\Delta r = r_0 - r_{min} \quad (11)$$

$$t_R = [\min(t) - t_C - t_L] \begin{cases} t > t_C + t_L \\ r_p(t) > 0,25\Delta r + r_{min} \end{cases} \quad (12)$$

$$v_C = \frac{\Delta r}{t_C} \quad (13)$$

$$v_R = \frac{0,25\Delta r}{t_R} \quad (14)$$

D. Extração de primitivas estáticas

Considerando a textura da íris uma característica biométrica estática, uma única imagem é usada para extrair suas primitivas. No sistema proposto, utiliza-se o quadro do vídeo em que a pupila apresenta menor raio.

Definindo o centro da pupila como origem de coordenadas polares na imagem original, $I(\rho, \theta)$ representa a intensidade de um pixel localizado a uma distância ρ por um ângulo θ .

Duas regiões laterais R (15) e L (16) têm suas coordenadas polares mapeadas em blocos retangulares I_R e I_L (Fig. 5). Para evitar uma possível interferência da borda da pupila, as regiões têm início a partir de um raio 20% maior que o raio da pupila. Considerando que nenhuma imagem possua uma íris com raio maior que um terço de sua altura h , utiliza-se este valor como limite máximo para as regiões.

$$R : \begin{cases} 1,2r_p < \rho < \frac{h}{3} \\ -\frac{\pi}{8} < \theta < \frac{\pi}{8} \end{cases} \quad (15)$$

$$L : \begin{cases} 1,2r_p < \rho < \frac{h}{3} \\ \frac{7\pi}{8} < \theta < \frac{9\pi}{8} \end{cases} \quad (16)$$

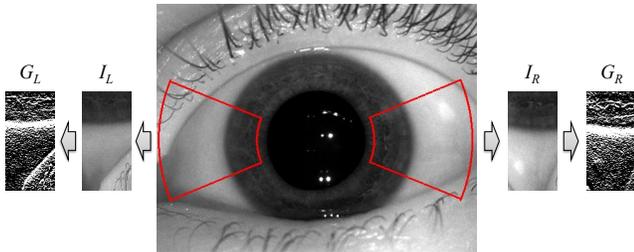


Fig. 5. Regiões da íris usadas para codificação

Para detecção da borda da íris, cada bloco é derivado em ρ , através da aplicação de um operador de Scharr [13] vertical, obtendo os blocos G_R e G_L . As bordas laterais da íris são determinadas pelas linhas que apresentam maior somatório de níveis de intensidade nestes blocos:

$$\rho_R = \arg \max_{\rho} \left(\sum_{\theta} G_R(\rho, \theta) \right) \quad (17)$$

$$\rho_L = \arg \max_{\rho} \left(\sum_{\theta} G_L(\rho, \theta) \right) \quad (18)$$

As coordenadas de centro da íris (x_i, y_i) e seu raio r_i são então calculados por (19), (20) e (21):

$$x_i = x_p + \frac{\rho_R - \rho_L}{2} \quad (19)$$

$$y_i = y_p \quad (20)$$

$$r_i = \frac{\rho_R + \rho_L}{2} \quad (21)$$

Para evitar interferências de pálpebras e cílios, apenas duas seções da íris são usadas para codificação, conforme ilustrado na Fig. 6. Embora existam métodos de se detectar e descartar especificamente tais artefatos, optou-se por uma forma menos custosa ao utilizar apenas esta faixa fixa. Isto porque maioria dos casos de obstrução ocorre nas partes superiores e inferiores da íris, raramente afetando as regiões laterais.

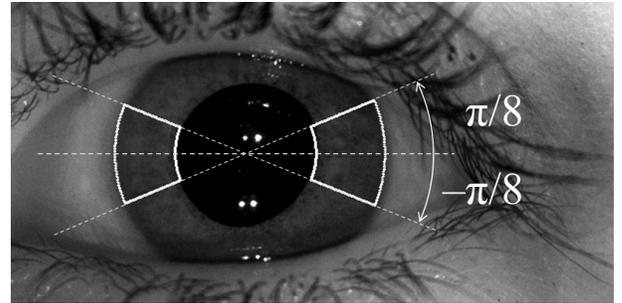


Fig. 6. Regiões da íris usadas para codificação

A extração de primitivas é realizada por codificação da textura usando wavelets de Gabor 2D, de modo similar ao método de Daugman [7], porém considerando apenas as regiões citadas.

E. Comparação

As comparações das características estáticas e dinâmicas são realizadas separadamente gerando duas pontuações de dissimilaridade D_{pupila} e D_{iris} . Enquanto os vetores de primitivas dinâmicas são comparados através da distância Euclidiana, a distância de Hamming é usada na comparação das primitivas, como no método de Daugman [7].

Como as pontuações geradas em ambos os subsistemas estão associadas a um grau de dissimilaridade entre vetores, a técnica utilizada para a fusão é baseada na combinação das

pontuações de ambas comparações. Baseado em observações da distribuição de valores das pontuações, é necessária ainda a aplicação de normalização logarítmica em D_{pupila} .

IV. EXPERIMENTOS

Para avaliar o desempenho do sistema, o projeto foi previamente aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa do Hospital de Clínicas da Universidade Federal do Paraná (CEP/HC-UFPR) e 59 voluntários foram recrutados para os experimentos. Deste total, 50 indivíduos tiveram imagens do reflexo pupilar à luz e da íris capturadas uma vez e os outros nove repetiram o teste cinco vezes cada, gerando 45 sequências de vídeo.

O processo de gravação dos vídeos e estimulação da pupila foi realizado por meio de um pupilômetro, desenvolvido em conjunto com o Grupo PET de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. O equipamento, montado em MDF, foi pintado externa e internamente de preto para evitar a reflexão da luz em suas paredes. Uma máscara de solda foi adaptada para melhor posicionamento do rosto do usuário em frente à câmera, minimizando a entrada de luz ambiente. Na Fig. 7 é possível observar a estrutura interna do pupilômetro e seu acabamento externo.



Fig. 7. Pupilômetro desenvolvido para captura dos vídeos

A iluminação interna foi provida por quatro LEDs infravermelhos, o que possibilitou a aquisição das imagens sem a estimulação constante da pupila. Foram realizados testes com iluminação de dois comprimentos de onda distintos: 850nm e 940nm. Embora apresente uma pequena incidência de componentes na faixa de luz visível, o primeiro caso foi escolhido por refletir maior riqueza de detalhes da textura da íris. Além disso, o sensor da câmera utilizada também apresenta maior eficiência para o menor comprimento de onda.

Além da iluminação infravermelha, foram dispostos seis LEDs brancos próximos à lente da câmera, usados para disparo de um pulso de luz para estimulação da pupila, com duração controlada por software. O controle do sistema de iluminação e estimulação foi realizado por um microcontrolador PIC18F4550. Um software foi desenvolvido para operacionalização do dispositivo através de uma interface gráfica em um computador. A comunicação com o dispositivo

foi realizada através da interface USB nativa do microcontrolador.

Para a captura das amostras, foi adotado um procedimento padrão. O indivíduo mantinha o rosto posicionado em contato com a máscara do pupilômetro durante dois minutos para estabilização do raio pupilar. Após a acomodação, iniciava-se a gravação do vídeo e o *flash* era disparado. As sequências de imagens foram registradas com uma resolução de 640 pixels de largura por 480 pixels de altura, à taxa de 60 quadros por segundo. A duração do estímulo luminoso foi de 500 microssegundos. A Fig. 8 mostra quadros de um dos vídeos adquiridos. Todas as outras amostras utilizadas neste artigo foram capturadas usando o pupilômetro desenvolvido.

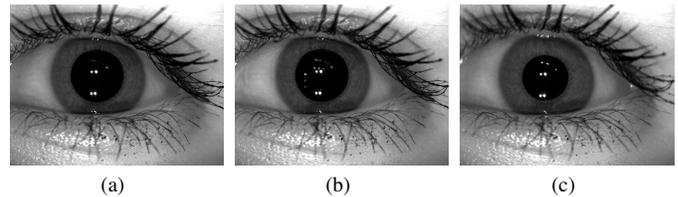


Fig. 8. Imagens adquiridas usando o pupilômetro desenvolvido: (a) antes, (b) durante e (c) após o disparo do estímulo luminoso

Cada um dos primeiros 50 vídeos capturados foram comparados a todos os outros para simular tentativas de autenticação de impostores, totalizando 1225 comparações. Os outros 45 vídeos foram comparados entre os pertencentes à mesma pessoa, equivalendo a 90 tentativas legítimas.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 9 mostra as três curvas ROC, usando apenas a classificação pelas primitivas do reflexo pupilar, pelas características da textura da íris e através do sistema multimodal proposto. A Tabela I apresenta as taxas de igual erro (EER) para os experimentos realizados nos três casos.

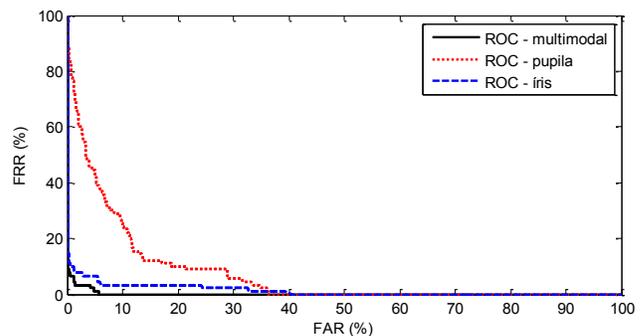


Fig. 9. Comparação entre as curvas ROC

Os resultados mostram que, embora as primitivas do reflexo pupilar apresentem baixa variabilidade para serem usadas isoladamente para autenticação, podem agregar informação às primitivas do padrão da íris.

As taxas de igual erro alcançadas são superiores a métodos tradicionais de reconhecimento pela íris [7], [14], porém uma

TABELA I
TAXA DE IGUAL ERRO (EER) PARA O SISTEMA PROPOSTO

Modalidade	EER
Dinâmica (reflexo pupilar)	13.88%
Estática (textura da íris)	5.47%
Multimodal (fusão)	2.44%

comparação mais adequada deveria considerar taxas de erro de cadastro (FTER) e de aquisição (FTAR), para os quais não há dados disponíveis. No sistema de Daugman [7], imagens com menos de 50% da área da íris visível são inválidas, enquanto o sistema proposto requer apenas 25% da textura.

Outra importante vantagem do método proposto é que este impede que qualquer íris sem vida seja autenticada. Daugman [7] propõe uma detecção de vida baseada na *hippus* da pupila, mas este sinal não pode ser associado a um indivíduo, o que permite que um vídeo, ou mesmo um impostor com lentes de contato seja apresentado à câmera. Em alguns casos, o sistema proposto não pode autenticar uma pessoa somente pelo reflexo pupilar, mas pode rejeitar um impostor com mais de 97% de acerto, mesmo que este utilize lentes de contato que reproduzam a textura da íris de outro indivíduo.

Como sistema multimodal, o uso de um único sensor para ambas as modalidades tem a vantagem de apresentar menor custo e ser mais conveniente para o usuário.

Resultados importantes relacionados ao método desenvolvido para extração de primitivas dinâmicas também foram obtidos. Poucos casos de segmentação incorreta da pupila foram verificados. Um algoritmo de detecção e correção de erros apontou 468 medições incorretas em 22.800 quadros, o que equivale a uma taxa aproximada de 97,94% de acertos, superior a outros métodos quando aplicados a vídeos de pupilometria dinâmica. Na comparação apresentada na Tabela II, todos os métodos foram executados sobre as mesmas bases de dados em um computador com CPU Intel® Core™ i5 64-bit 2.27GHz, 4GB de memória RAM e SO Microsoft® Windows™ 7 Home Premium.

TABELA II
TAXA DE ACERTOS DE MÉTODOS DE SEGMENTAÇÃO DA PUPILA

Método	Taxa de acertos	Tempo médio (ms)
Chavez [15]	93,55%	53,65
Yuan, Xu, Lin [16]	90,67%	74,72
Proposto	97,94%	38,30

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma nova abordagem para autenticação biométrica, usando reflexos humanos e a textura da íris. Um protótipo foi desenvolvido e testado, levando a resultados promissores. Algumas das principais contribuições e aspectos originais são:

- Aplicação de procedimentos de pupilometria em um sistema de autenticação;
- Novo método de segmentação da pupila e da íris para pupilometria;

- Combinação do uso de características dinâmicas da pupila com técnicas de identificação pela íris, aumentando a segurança do sistema.
- Proposta de um método simplificado para codificação da íris;
- Geração de base de dados de variação intraclasse e interclasse do reflexo pupilar.

A pesquisa foi realizada com apoio da CAPES e gerou a publicação² de 4 artigos em congressos internacionais, sendo um posteriormente publicado como capítulo de livro da série *Lecture Notes in Computer Science*, e 5 em congressos nacionais, sendo 1 convidado para publicação em versão estendida na revista *Learning and NonLinear Models*. Um pedido de patente (BR 10 2012 007637 3) referente ao método e sistema desenvolvidos foi depositado no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Davis. (2011) The holy grail of information security. [Online]. Available: <http://stateofsecurity.com/?p=1528>
- [2] S. G. Davies, "Touching big brother: how biometric technology will fuse flesh and machine," *Information Technology & People*, vol. 7, no. 4, pp. 38 – 47, 1994.
- [3] L. Thalheim, J. Krissler, and P. Ziegler, "Biometrische Zugangssicherungen auf die probe gestellt," *c't Magazin für Computertechnik*, vol. 11, pp. 114–123, May 2002.
- [4] T. Matsumoto, H. Matsumoto, K. Yamada, and S. Hoshino, "Impact of artificial "gummy" fingers on fingerprint systems," in *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques*, R. L. Van Renesse, Ed., vol. 4677, Society of Photo-optical Instrumentation Engineers. San Jose, California, USA: International Society for Optical Engineering, Jan. 2002.
- [5] J. Kent. (2005) Malaysia car thieves steal finger. [Online]. Available: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/4396831.stm>
- [6] B. Toth, "Biometric liveness detection," *Information Security Bulletin*, vol. 10, no. 8, pp. 291–297, Oct. 2005.
- [7] J. Daugman, "How iris recognition works," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 21 – 30, Jan. 2004.
- [8] M. Nishigaki and D. Arai, "A user authentication based on human reflexes using blind spot and saccade response," *Int. J. Biometrics*, vol. 1, no. 2, pp. 173–190, Aug. 2008.
- [9] V. F. Pamplona, M. M. Oliveira, and G. V. G. Baranoski, "Photorealistic models for pupil light reflex and iridal pattern deformation," *ACM Trans. Graph.*, vol. 28, no. 4, pp. 106:1–106:12, Sep. 2009.
- [10] F. Fotiou, K. N. Fountoulakis, A. Goulas, L. Alexopoulos, and A. Palikaras, "Automated standardized pupillometry with optical method for purposes of clinical practice and research," *Clinical Physiology*, vol. 20, no. 5, pp. 336–347, 2000.
- [11] L. Ma, T. Tan, Y. Wang, and D. Zhang, "Efficient iris recognition by characterizing key local variations," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 6, pp. 739 –750, June 2004.
- [12] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2006.
- [13] H. Schar, "Optimal filters for extended optical flow," in *Complex Motion*, ser. Lecture Notes in Computer Science, B. Jähne, R. Mester, E. Barth, and H. Schar, Eds. Springer Berlin / Heidelberg, 2007, vol. 3417, pp. 14–29.
- [14] R. Wildes, "Iris recognition: an emerging biometric technology," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 9, pp. 1348 –1363, Sep. 1997.
- [15] R. F. L. Chavez, "Uma proposta para melhoria na eficiência de um sistema de reconhecimento de íris humana," Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Feb 2007.
- [16] W. Yuan, Z. Lin, and L. Xu, "A novel and fast iris location algorithm based on the structure of human eyes," in *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*, vol. 2, 2006, pp. 10 388 –10 392.

²A lista completa pode ser encontrada na Seção 6.2 da dissertação original