

Sistema Automatizado para Avaliação do Comportamento Pupilar Humano baseado em Visão Computacional

Full Paper

Cleyton Rafael G. Silva

Universidade Federal de Goiás
cleytonrafael@inf.ufg.br

Eduardo N. R. Camilo

Fundação Banco de Olhos de Goiás
eduardonery@hotmail.com

Joyce Siqueira

Universidade Federal de Goiás
joycesi@inf.ufg.br

Cristhiane Gonçalves

Universidade Federal de Goiás
cristhiane.goncalves@ufg.br

Gustavo Teodoro Laureano

Universidade Federal de Goiás
gustavo@inf.ufg.br

Fábio Boaretti dos Santos

Engenheiro Elétrico
boaretti@gmail.com

Ronaldo Martins da Costa

Universidade Federal de Goiás
ronaldocosta@inf.ufg.br

Abstract

Analyzing human pupillary behavior is a non-invasive method for assessing neurological activity. Changes in this behavior correlate to various health conditions, such as: Parkinson's, Alzheimer's, autism and diabetes. In comparison to other methods of neurological evaluation, analyzing pupillary behavior is a simple and low-cost method that can be used as a complementary diagnosis. Therefore, the goal of this work is to develop a system to evaluate pupillary behavior in an automated way. The system consists of a portable recording device, called a pupillometer, and a software based on computer vision. The system is capable of stimulating, recording, measuring and extracting important features of the human pupillary behavior. The results demonstrate that the system is a fast and accurate solution, with 97.25% of accuracy in the segmentation and pupil measurement on the images.

Keywords:

Pupillary Behavior, Automated Pupillometry System, Computer Vision, Pupillometer.

Introdução

O comportamento pupilar humano tem sido um tema crescente em pesquisa científica, apresentando contribuições para biometria (da Costa e Gonzaga 2012) e principalmente para a área médica (Altay et al. 2016; Yamaji et al. 1997). Controlado pelo sistema nervoso autônomo, este comportamento busca fornecer uma visão mais precisa e garantir a integridade da retina (Purves et al. 2004). Por conta de sua direta relação com os sistemas neurológicos, seu exame é considerado um método não-invasivo e alternativo para avaliar atividade neurológica (Baltaci e Gokcay 2012), que quando anormal pode indicar doenças e distúrbios neurológicos, como: Parkinson (C.-A. Wang et al, 2016), Alzheimer (Fotiou et al, 2000), autismo (Martineau et al., 2011) e diabetes (Hayashi e Hayashi 2004).

Este comportamento é baseado em dois reflexos, contração e dilatação, denominados miose e midríase, ambos são reações involuntárias acionadas para gerenciar a quantidade de luz que entra nos olhos (Purves et al. 2004). O gerenciamento da luz entrante é feito alterando-se o tamanho da pupila. Na redução da luminosidade ocorre a dilatação, aumentando o tamanho da pupila e permitindo uma maior entrada de luz (C. A. Wang e Munoz, 2015). Quando há aumento no nível de luminosidade, o diâmetro pupilar é reduzido pela contração, permitindo que menos luz alcance a retina (Gable et al. 2015).

O comportamento pupilar pode ser avaliado ao medir-se o diâmetro das pupilas ao longo de um intervalo de tempo, onde estímulos visuais e/ou luminosos são utilizados para induzir os reflexos, processo conhecido como Pupilometria (Pinheiro et al. 2015). Para que este processo possa ser realizado, há dependência de dispositivos com câmeras infravermelho, vez que a dilatação só pode ser observada em condições de luminosidade baixa. Tais dispositivos, combinados com soluções de software baseadas em visão computacional, são responsáveis pela aquisição de imagens, processamento e extração de características, etapas essenciais para pesquisas envolvendo o monitoramento do comportamento pupilar.

Neste cenário, ferramentas automatizadas de pupilometria podem fornecer uma solução eficaz na extração de dados confiáveis para avaliações médicas. Estudos anteriores mostraram avanços, apresentando de equipamentos grandes e robustos (Nowak et al. 2014) até soluções feitas utilizando-se de materiais regulares, como uma estrutura de óculos comum com câmeras acopladas (Tsai et al. 2016). No entanto, as propostas nem sempre são viáveis ou são compostas por dispositivos portáteis com sistemas totalmente integrados e automáticos. Está falta de completude no processo e necessidade de trabalhos manuais, dificultam a viabilidade do uso desses sistemas na prática.

Tendo isso em vista, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema para avaliar o comportamento pupilar de forma automatizada. O sistema é composto por um dispositivo de gravação portátil, denominado pupilômetro, e um software baseado em visão computacional, integrados são capazes de estimular, gravar, medir e extrair características importantes do comportamento pupilar humano. A solução é denominada Sistema Automatizado de Pupilometria (SAP), e nos testes realizados se mostra confiável e eficiente, uma ferramenta adequada para a realização de investigações médicas e de pesquisa.

Materiais e Métodos

Os Materiais e Métodos estão separados de acordo com os estágios do Sistema Automatizado de Pupilometria (SAP). Primeira subseção, Aquisição de imagens, descreve os recursos do pupilômetro e seu modo de operação, funções do software, descrição dos participantes e o protocolo de pupilometria aplicado as gravações. Segunda, Segmentação & Identificação da pupila, apresenta o processamento de imagem para destacar a pupila e a medição do diâmetro pupilar e terceira, Comportamento pupilar, expõe o processo de extração de características realizado.

Aquisição de imagem

Pupilômetro

O dispositivo de gravação, pupilômetro, Figura 1, foi construído adaptando-se uma estrutura de óculos de realidade virtual, onde duas câmeras preto-e-branco sensíveis ao espectro infravermelho foram fixadas a duas placas de acrílico e por fim fixadas a uma placa de circuito impresso personalizada. As câmeras são Point Grey's mono firefly, modelo FMVU-03MTM-CS, com sensor CMOS (obturador global) e interface USB 2.0. O circuito impresso foi configurado para controlar cinco LEDs RGB e quatro LEDs infravermelhos (IRs) em cada lado. Infravermelhos fornecem a iluminação para condições de pouca luz, enquanto que RGBs são utilizados para estímulos.

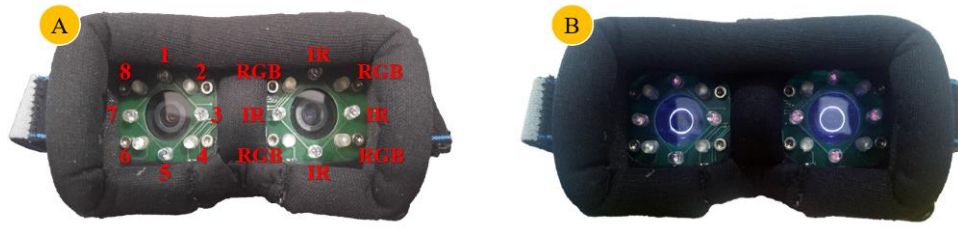


Figura 1– Pupilômetro: (A) Desligado, (B) Ligado.

Os LEDs infravermelhos foram dispostos em formato de losango, Figura 1 (A), enquanto quatro LEDs RGB foram dispostos em forma de quadrado, sendo que o quinto foi fixado abaixo da placa de acrílico, parte interna do dispositivo. Estes LEDs fixados na parte inferior das placas de acrílico servem para gerar condução de luz no material através dos círculos que foram previamente gravados por meio de ablação, gerando a exposição luminosa apenas dos círculos, como exposto na Figura 1 (B). Como se trata de um material de alta transparência, a captura de imagem não é afetada. Seu propósito é guiar o olhar do participante durante os experimentos e sua intensidade de iluminação é <1 lux, o que permitiu localizá-los sem desencadear reflexos pupilares (Brown, Khanani e Xu, 2004). Por fim, para evitar distrações este círculo é aceso apenas no lado não estimulado, conforme apresentado na seção seguinte.

Interface de Gravação

O sistema foi desenvolvido no Matlab® R2016b, usando-se as seguintes toolboxes: aquisição de imagem, processamento de imagem, computação paralela e Matlab GUI (interface gráfica do usuário). A primeira de duas janelas é dedicada aos procedimentos de filmagem, conforme Figura 2. Nesta parte do sistema, campos, botões e recursos permitem que: a pasta de destino e a identificação-ID do paciente seja informada, Figura 2-A; feed de vídeo de ambas as câmeras seja visualizado, Figura 2-B; procedimentos sejam escolhidos, Figura 2-C; temporizador de 10 minutos para adaptação ao escuro seja acionado e procedimentos sejam iniciados ou abortados, Figura 2-D. Vídeos são adquiridos em 30 frames por segundo com resolução de 640x480 pixels e exportados em arquivo AVI descompactado. O nome dos arquivos de vídeo gerados é formado pela identificação mais a letra 'D' ou 'E', à depender do lado filmado.

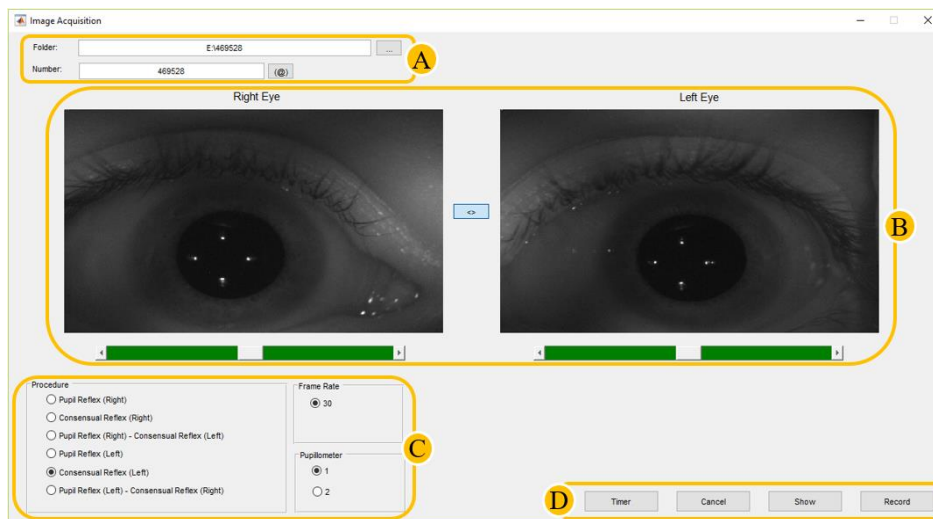


Figura 2 – Janela de Aquisição (SAP): (A) Preenchimento da pasta destino e ID do paciente, (B) Feed de vídeo de ambos os olhos, (C) Tipos de procedimento e (D) Botões: Timer, Cancelar, Visualizar e Gravar.

O sistema oferece seis modos de procedimento, Figura 3, separados pelo tipo de reflexo que se objetiva testar, o que corresponde a: qual lado deve ser filmado; qual lado deve ser estimulado, e por fim, em qual lado será aceso o círculo de orientação por meio do qual o olhar do paciente será fixado. Dessa forma, existem dois reflexos pupilares de interesse para cada lado, o direto, que é o resultado do comportamento do olho que está sendo estimulado, encontrado nas opções: 1, 2, 4 e 5, e o consensual, olho oposto ao estimulado, onde é esperado uma reação simétrica, avaliada nas opções: 2, 3, 5 e 6. Por meio deste reflexo consensual é possível identificar doenças no nervo óptico e/ou na retina (Bergamin et al. 2003), assim como traumas cerebrais (Purves et al. 2004), patologias onde os reflexos tendem a ser assimétricos.

Nº	Reflexo de Interesse	Olho Esquerdo	Olho Direito
1	RD (D)	OFF	  
2	RD (D) & RC (E)		  
3	RC (D)	 	
4	RD (E)	  	OFF
5	RD (E) & RC (D)	  	
6	RC (E)		 

 Filmagem  Estímulo de Luz  Círculo de Orientação

Figura 3 - Tipos de Procedimento (RD- Reflexo Direto, RC-Reflexo Consensual, (D)-Direito, (E)-Esquerdo).

Participantes

Todos os procedimentos experimentais foram revistos e aprovados pelo Comitê de Ética em projeto apresentado à plataforma Brasil, sob o número CAAE: 23723213.0.0000.5083. Quarenta voluntários foram recrutados e concordaram em participar desta pesquisa por meio da assinatura de um termo de consentimento livre e esclarecido. Detalhes e objetivo da pesquisa foram explicados a todos.

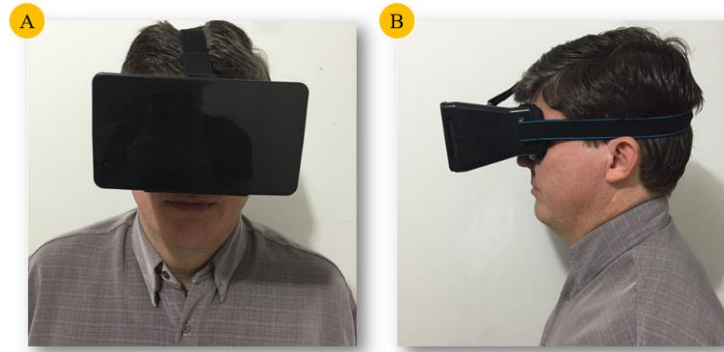


Figura 4 - Voluntário demonstrando o uso do pupilômetro: (A) Visão Frontal, (B) Visão Lateral.

Para os testes, o segundo modo de procedimento foi selecionado, reflexo direto direito e consensual esquerdo. Como o design do pupilômetro isola a maior parte da iluminação externa, o que é demonstrado na Figura 4, os LEDs infravermelhos são ligados no início da execução da janela de aquisição, Figura 2, permitindo que as pupilas sejam visualizadas. Do mesmo modo o círculo de orientação é acessado, lado direito, por meio do qual os voluntários foram aconselhados a fixarem o olhar. Por fim e orientados sobre o funcionamento do procedimento, aplicou-se o protocolo de pupilometria, conforme a seguir.

Protocolo de Pupilometria

O protocolo de pupilometria, Figura 5, foi projetado para contemplar três objetivos: um período de adaptação ao escuro de 10 minutos, para alcançar a máxima dilatação; estímulos em cores usadas em pesquisas médicas (Traustason et al. 2016) e de biometria (da Costa e Gonzaga 2012); e intervalos sem iluminação entre estímulos, para permitir a recuperação do tamanho pupilar. Todos esses objetivos foram combinados em 14:05 minutos de procedimento. O protocolo é baseado no método adaptado por Gracitelli et al. (2014), que foi readaptado para este trabalho ao adicionar-se as cores de estímulo: verde e branco, o que permite avaliar o comportamento pupilar sobre outras perspectivas e gerar dados além daqueles previstos no protocolo original.

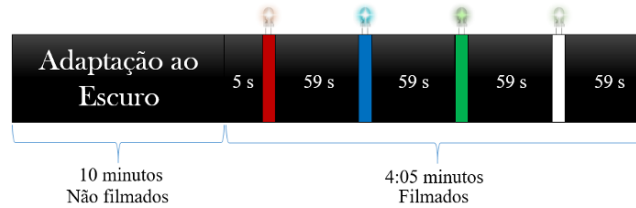


Figura 5 - Protocolo de Pupilometria.

Os procedimentos começam com adaptação da pupila em uma sala com as luzes apagadas, < 1 lux. Depois que o pupilômetro é colocado em posição, Figura 4, o software grava os primeiros cinco segundos para registrar a dilatação e continua com um ciclo de quatro estímulos. Cada estímulo tem duração de 1 segundo e ocorre a cada 59 segundos, na ordem de vermelho-azul-verde-branco. Todos os estímulos foram definidos em condição escotópica (100 lux). Intensidades foram verificadas por um luxímetro TASI-8721, com 4% rdg (pm) 10dgts (< 10.000 lux) de precisão, e LEDs infravermelhos foram ajustados considerando o limite para a exposição dos olhos (Allen 2012) para 04:05 minutos de filmagem.

Segmentação & Identificação da Pupila

Para que a identificação da pupila nos vídeos possa ser feita e seu diâmetro seja medido, todas as imagens precisam passar pelo processo de segmentação. Por meio deste processo a região pupilar pode ser isolada nos vídeos e medida. O resultado final é um sinal do diâmetro pupilar em função do tempo de filmagem, que representa o comportamento pupilar do indivíduo durante o procedimento. Este sinal por sua vez, dá origem a características importantes, usadas para avaliar o comportamento pupilar. Neste trabalho o processo de segmentação proposto é composto por seis etapas, conforme Figura 6.

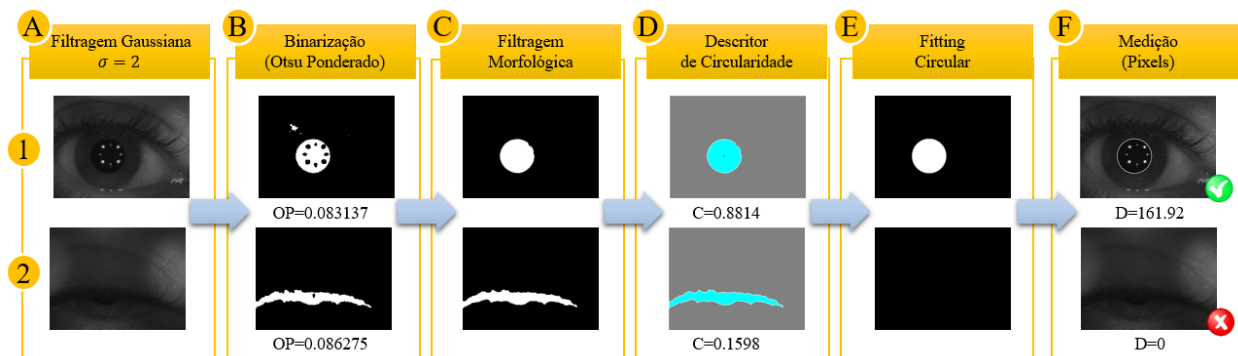


Figura 6 - Segmentação: (A) Filtragem Gaussiana; (B) Binarização (Otsu Ponderado); (C) Filtragem (Morfológica); (D) Descritor de Circularidade; (E) Fitting Circular e (F) Medição (Pixels).

Filtragem Gaussiana

A primeira etapa, Figura 6 (A), se encarrega de eliminar ruídos na imagem que possam causar interferência na segmentação. Ruídos, principalmente aleatórios, são comuns devido a fatores como o

processo de conversão de sinal e o tipo fonte de iluminação utilizada. Como a luminosidade infravermelho é mantida em baixa frequência para a aquisição das imagens da pupila, há uma grande incidência de ruído. Para que seus efeitos sejam minimizados, técnicas de suavização podem ser aplicadas (Russ 1989). Desse modo, nesta etapa as imagens são suavizadas utilizando-se um filtro rápido, gaussiano, com $\sigma = 2$ e janela de tamanho = 9. Tais parâmetros, definidos experimentalmente, permitem que a maior parte dos ruídos seja eliminada, contribuindo para os processos seguintes. O efeito final é uma imagem levemente borrada, onde detalhes de pequena dimensão, incluindo os ruídos, foram eliminados.

Binarização (Otsu Ponderado)

Por meio da binarização regiões na imagem podem ser destacadas em duas diferentes cores. Para que essa divisão possa ser feita um limiar que representa a intensidade que divide tais regiões precisa ser definido. Embora a pupila represente uma grande região escura e conectada na imagem, achar o limiar ideal não é uma tarefa trivial. Posição, cor das áreas adjacentes, estrutura facial, cor e intensidade dos estímulos e a proximidade com a câmera, são exemplos de situações onde as características da imagem podem mudar drasticamente, fazendo com que um mesmo valor de limiarização, não obtenha uma separação correta.

Neste cenário é importante que a abordagem se adapte a estas mudanças e realize a binarização por meio de limiares automáticos. Nesta etapa, uma abordagem similar a utilizada em (Abdullah 2014) é aplicada, ao utilizar-se de uma variação do método de otsu. Este método busca achar um limiar ótimo que separe os pixels que compõe o objeto daqueles do fundo da imagem, nesta pesquisa a pupila é o objeto, enquanto o restante da estrutura ocular e a pele representam o fundo, parte a ser eliminada para a realização da medição pupilar. Para que este valor ótimo seja calculado, a técnica realiza iteração para todos os limiares possíveis até encontrar aquele que minimize a soma das variâncias entre objeto e o fundo da imagem.

O método de otsu aplicado a uma imagem que contenham a estrutura do olho tende a separar a região da esclera, região branca, da pupila e da íris, regiões mais escuras. No entanto, para que o limiar calculado possa restringir a região pupilar da região da íris, um fator de ponderação de 2.5 é aplicado, ou seja, é aproveitado um pouco mais da metade do valor de limiar inicialmente calculado pelo método convencional. Esta ponderação do limiar de otsu (OP) se mostra eficiente e adaptativa, como pode ser visto nos valores e resultados expostos na Figura 6 (B). O fator de ponderação foi definido por meio de testes empíricos em imagens com diferentes iluminações, proximidades e estruturas oculares.

Filtragem Morfológica

Durante o procedimento de gravação e devido aos estímulos e a iluminação infravermelho, os vídeos possuem momentos com diferentes níveis de iluminação. A principal dificuldade é a presença de reflexo produzido pela córnea. Por este motivo parte da região pupilar não é capturada ou é extremamente comprometida, Figura 6 (A). O principal efeito é que após o processo de binarização a região isolada da pupila apresenta alguns furos e deformações. Para sobrepor este problema, operações morfológicas de abertura e fechamento são aplicadas na imagem para o preenchimento destas falhas, Figura 6 (C).

O processo de abertura consiste em um procedimento morfológico de erosão seguido de dilatação, enquanto o fechamento, dilatação seguida de erosão, onde a erosão busca eliminar pequenos conjuntos desconectados e abrir cavidades, e a dilatação aumentar e conectar conjuntos. Este intercambiar entre dois diferentes processos morfológicos, permite que a imagem seja restaurada sem que haja alteração no tamanho inicial do objeto, fator vital para a posterior medição da pupila. Nesta etapa é utilizada uma sequência de quatro ciclos de abertura sucedida de quinze de fechamento, definidas experimentalmente. A abertura busca eliminar pequenos ruídos remanescentes, enquanto que o fechamento recuperar as áreas pupilares afetadas ou faltantes. Em ambos os casos foi utilizado um elemento estruturante circular, que preserva as características circulares da pupila, vez que tende a replicar seu próprio formato.

Descritor de Circularidade

Assim que os objetos são isolados no processo anterior, há a possibilidade de que outros objetos sejam destacados, como: ruídos remanescentes, pupila com grande parte coberta pela pálpebra e/ou cílios, como pode ser visto na Figura 6 (C-2), pupila totalmente oclusa, ou ainda grandes regiões escuras além da pupila. Para reconhecer se há pupila ou detectar os momentos onde não existe possibilidade de medição, como nas ocorrências de piscada, um descritor de circularidade é utilizado para realizar esta separação.

O descritor, equação 1, permite calcular a circularidade dos objetos na imagem, por meio da área e perímetro (Russ 1989) dos objetos isolados no processo anterior. O valor resultante se aproxima de 1 a medida que a circularidade aumenta, sendo 1, um círculo perfeito. Ao considerar que a pupila não é um círculo perfeito e que em alguns momentos haverá deformações resultantes de reflexo, um limiar de 0.65 foi definido experimentalmente e se mostrou eficaz. Este valor permitiu separar imagens elegíveis para medição daquelas onde há ausência de região pupilar suficiente, como ilustrado na Figura 6 (D-2). Além disso se mostra capaz de distinguir qual objeto é a pupila, quando há mais de um objetivo destacado.

$$C = \frac{4\pi * \text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \quad (1)$$

Fitting Circular e Medição

Imagens que são identificadas com objetos circulares passam por uma última etapa antes de terem seu diâmetro medido. Como citado anteriormente a deformação do objeto na imagem pode ser severa, a depender da proximidade do olho da câmera, de reflexos e de oclusão causada pelas pálpebras. Então, para medir corretamente o diâmetro, mesmo em imagens cuja a pupila esteja parcialmente segmentada, um processo de fitting circular é aplicado, Figura 6 (E). Nesta etapa o fitting algébrico proposto por Pratt (2013) é utilizado. Com os valores de coordenada das fronteiras do objeto, o método calcula a circunferência que melhor se adapte a estes limites, completando as áreas pupilares parcialmente oclusas.

Este procedimento permite que uma simples e rápida operação seja aplicada ao objeto e que seu diâmetro aproximado seja calculado, Figura 6 (F). O diâmetro resultante, se mostra como uma boa aproximação do valor real e permite a estimação do diâmetro mesmo com pupilas parcialmente exibidas na imagem. Em pesquisas que buscam explorar os limites da íris, no qual há a importância de isolar o formato original da pupila, o método também se mostra eficiente. Nestes casos a etapa de fitting pode ser ignorada.

Comportamento Pupilar

Após o termino da segmentação de cada vídeo e a extração do diâmetro pupilar, um sinal composto por 7350 pontos é gerado, número equivalente a quantidade de frames. Os gaps presentes neste sinal e que são causados pelos frames onde a pupila não pode ser identificada são estimados por interpolação linear (Baltaci & Gokcay, 2012), em consonância com que é amplamente utilizado na literatura.

Extração de Características

Considerando, que os pontos de interesse nos diâmetros extraídos, são aqueles próximos aos estímulos, onde a pupila é induzida a reagir, o sinal total é decomposto pelo sistema em quatro partes. Como o momento que antecede cada estímulo é suficiente para a adaptação da pupila, os sinais decompostos e que retratam cada período, buscam enfatizar o processo de recuperação do tamanho pupilar após a estimulação da contração por meio dos LEDs RGB, conforme Figura 7.

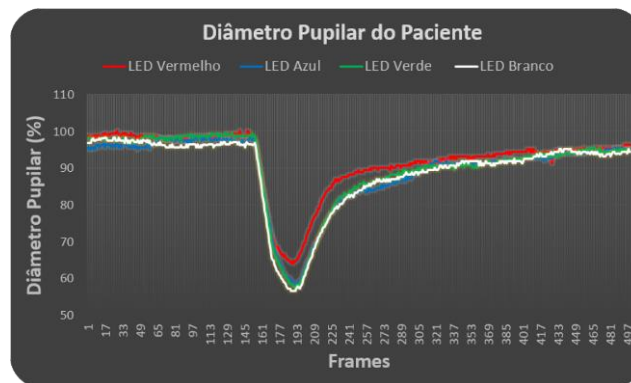


Figura 7 - Comportamento pupilar por cor de estímulo em intervalos de interesse.

Representando cinco segundos anteriores e dez posteriores à um segundo de estímulo, cada sinal representa 16 segundos e uma cor de estímulo, Figura 7. Por meio de cada um destes sinais, o sistema realiza o cálculo e extração de 8 características, totalizando 32 para cada indivíduo e procedimento, relevantes para compreensão de mudanças no comportamento pupilar humano (Adhikari, Zele e Feigl 2015; Pinheiro et al. 2015). Tais características são indicadas, separadamente, na Figura 8.

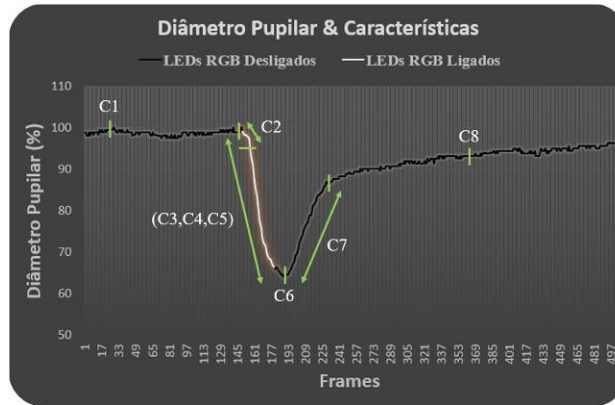


Figura 8 - Características: C1-Máxima Dilatação; C2-Latência; C3-Tempo para Máxima Contração; C4-Amplitude Relativa de Constrição; C5-Amplitude Absoluta de Constrição; C6-Máxima Contração; C7-Velocidade de Dilatação Pós-estímulo; C8-Teste dos 6 segundos.

C1. Máxima Dilatação: maior diâmetro pupilar registrado no intervalo, normalmente encontrado no período anterior ao início do estímulo.

C2. Latência: tempo gasto em segundos entre o início do estímulo e o começo do processo de contração, assim considerado como uma mudança de 10% no diâmetro.

C3. Tempo para Máxima Contração: tempo gasto em segundos entre o início do estímulo e o valor máximo de contração registrado.

C4. Amplitude Relativa de Constrição: valor percentual da diferença entre o maior e o menor diâmetro.

C5. Amplitude Absoluta de Constrição: valor absoluto da diferença entre o diâmetro pupilar anterior ao estímulo e o valor da máxima contração.

C6. Máxima Contração: menor diâmetro registrado no intervalo, normalmente encontrado durante o estímulo.

C7. Velocidade de Dilatação Pós-estímulo: tempo em segundos que o diâmetro pupilar leva após o estímulo para alcançar 85% do valor anterior.

C8. Teste dos 6 Segundos: diâmetro registrado 6 segundos após o termino do estímulo.

Resultados e Discussão

Nesta pesquisa, o experimento foi realizado com 40 voluntários. Em todos os casos os olhos foram filmados com o lado direito sendo alvo dos estímulos, modo 2. Como cada vídeo é gravado em 30 frames por segundo, são compostos de 7.350 frames cada, 14.700 quando ambos os olhos são filmados. O procedimento e sistema proposto foi capaz de extrair o comportamento pupilar por meio do diâmetro e calcular as características com sucesso em todos os 40 casos.

No total 588.000 frames foram processados. No final de cada processamento uma segunda tela exibe os resultados individuais de cada participante. Todos os dados são gerados automaticamente em Excel, incluindo: valores de diâmetro em pixels e em escala de porcentagem; todos os gráficos anteriormente exibidos, as características calculadas para cada cor de estímulo e um arquivo extra, com a comparação entre os lados esquerdo e direito, nas opções onde ambos os olhos são filmados.

Visando medir o desempenho e a eficácia do processo de segmentação do sistema, as imagens de cada participante foram separadas em cinco categorias, uma para os momentos sem estímulo e as outras para cada cor utilizada: vermelho, azul, verde e branco. Isto se justifica pelo fato de cada faixa do espectro alterar as características da imagem de maneira diferente. Após esta separação, duas imagens de cada período e de cada participante foram aleatoriamente selecionadas, totalizando 400 imagens teste.

Por meio da segmentação das imagens selecionadas, a velocidade média de processamento foi de 347.84 milissegundos. Foi utilizado um computador com processador Intel core i5 e 4Gb de memória RAM. Para o cálculo da acurácia, dividiu-se o número de segmentações corretas pelo número total de imagens. Por meio deste cálculo o percentual de sucesso da abordagem atingiu o valor de 97.25%.

Vale ressaltar que as imagens na qual o método não obteve sucesso foram aquelas cuja a pupila estava parcialmente oclusa pelos cílios ou pálpebra. Imagens no qual a pupila estava totalmente ou praticamente oclusa, foram eliminadas do teste e substituídas por uma nova imagem aleatória de mesma categoria. É importante enfatizar que o descritor de circularidade, nestes casos, permitiu que nos testes a oclusão pupilar fosse automaticamente identificada e descartada.

Conclusão

Neste artigo foi proposto um Sistema Automatizado de Pupilometria (SAP), cuja segmentação, essencial para este tipo de abordagem se mostra rápida e eficaz, atingindo um nível de acurácia de 97.25% nos testes. Este fator permitiu que o sistema fosse capaz de extrair 8 importantes características do comportamento pupilar em cada tipo de estímulo, totalizando 32 características relevantes para análises médicas. Todos os processos desde a aquisição a geração dos dados, foram realizados de forma automatizada, cumprindo com o objetivo principal de automatizar o processo de pupilometria.

Ao se considerar as piscadas um dos principais problemas na segmentação e principal causador de ruído nos dados, o uso do descritor de circularidade se mostrou capaz de removê-los em sua totalidade. Tendo isso em vista, o sistema é uma solução de pupilometria portátil e eficiente para práticas extensivas em investigações médicas e de pesquisa. Este sistema também representa um segmento de um sistema de informações em saúde maior, onde o objetivo é que hospitais se tornem postos de coleta de características pupilares de pacientes com doenças de origem neurológica e contribuam para o aumento da precisão de sistemas especializados em diagnósticos por computador. Como trabalhos futuros, o objetivo é implementar funções para permitir personalizar o protocolo de pupilometria, considerando o tempo, a cor e o intervalo entre estímulos, o que permitirá flexibilizar os procedimentos para um uso mais amplo.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo suporte fornecido que proporcionou a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Abdullah, M. 2014. “Fast and Accurate Pupil Isolation Based on Morphology and Active Contour,” *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 4(6).
- Adhikari, P., Zele, A. J., & Feigl, B. 2015. “The post-illumination pupil response (PIPR),” *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 56(6), 3838–3849.
- Allen, E. 2012. “Eye Safety for Proximity Sensing Using Infrared Light-Emitting Diodes Photobiological Effects of Application Note 1737 IEC-62471,” *Photobiological*, 1–11.
- Altay, Y., Altay, M. M., Demirok, G., Balta, O., & Bolu, H. 2016. “Measurements of Pupillary Diameter and Wavefront Aberrations in Pregnant Women,” Hindawi Publishing Corporation Scientifica. 1-5.
- Baltaci, S., & Gokcay, D. 2012. “Negative sentiment in scenarios elicit pupil dilation response,” In *Proceedings of the 14th ACM international conference on Multimodal interaction - ICMI '12* (p. 529). New York, New York, USA: ACM Press.
- Bergamin, O., Zimmerman, M. B., & Kardon, R. H. 2003. “Pupil light reflex in normal and diseased eyes,”

- Ophthalmology*, 110, 106–114.
- Brown, S. M., Khanani, A. M., & Xu, K. T. 2004. “Day to day variability of the dark-adapted pupil diameter,” *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 30(3), 639–44.
- da Costa, R. M., & Gonzaga, A. 2012. “Dynamic Features for Iris Recognition,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 42(4), 1072–1082.
- Fotiou, F., Fountoulakis, K. N., Tsolaki, M., Goulas, A., & Palikaras, A. 2000. “Changes in pupil reaction to light in Alzheimer ’ s disease patients: a preliminary report,” *International Journal of Psychophysiology*, 111–120.
- Gable, T. M., Kun, A. L., Walker, B. N., & Winton, R. J. 2015. “Comparing heart rate and pupil size as objective measures of workload in the driving context,” In *Adjunct Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI ’15* (pp. 20–25). New York, New York, USA: ACM Press.
- Gracitelli, C. P. B., Duque-Chica, G. L., Moura, A. L., Nagy, B. V., de Melo, G. R., Roizenblatt, M., ... Paranhos, A. 2014. “A positive association between intrinsically photosensitive retinal ganglion cells and retinal nerve fiber layer thinning in glaucoma,” *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 55(12), 7997–8005.
- Hayashi, K., & Hayashi, H. 2004. “Pupil size before and after phacoemulsification in nondiabetic and diabetic patients,” *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 30(12), 2543–50.
- Martineau, J., Hernandez, N., Hiebel, L., Roché, L., Metzger, A., & Bonnet-Brilhault, F. 2011. “Can pupil size and pupil responses during visual scanning contribute to the diagnosis of autism spectrum disorder in children?,” *Journal of Psychiatric Research*, 45(8), 1077–1082. “
- Nowak, W., Żarowska, A., Szul-Pietrzak, E., & Misiuk-Hojło, M. 2014. “System and measurement method for binocular pupillometry to study pupil size variability,” *BioMedical Engineering OnLine*, 13(1), 69.
- Pinheiro, H. M., Nery, E., Camilo, R., Oftalmologista, M., & Martins Da Costa, R. 2015. “Metodologia e Dispositivo Portátil para Avaliação do Reflexo Pupilar,” In *Proceedings of the Twenty-First Americas Conference on Information Systems, Puerto Rico*. 265-274.
- Pratt, V. 2013. “Direct Least-Squares Fitting of Algebraic Surfaces,” *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., Lamantia, A.-S., Mcnamara, J. O., & Willians, S. M. 2004. *Neuroscience, Sunderland* (Third Edit, Vol. 3). Massachusetts U.S.A.
- Russ, J. C. 1989. *Image analysis and signal processing in electron microscopy*, P. W. Hawkes, W. Owen Saxton, F. Peter Ottensmeyer and Azriel Rosenfeld (Editors). Published by Scanning Microscopy International, 1988, Chicago, IL, USA; ISSN 0892-953X. *X-Ray Spectrometry* (Vol. 18).
- Traustason, S., Brondsted, A. E., Sander, B., & Lund-Andersen, H. 2016. “Pupillary response to direct and consensual chromatic light stimuli,” *Acta Ophthalmologica*, 94(1), 65–69.
- Tsai, Y.-C., Yan, Y.-J., Ko, M.-L., Huang, T.-W., Chiou, J.-C., & Ou-Yang, M. 2016. “Design of synchronizing pupillometer for observing nerve conduction by pupillary responses,” In *2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings* (pp. 1–5). IEEE.
- Wang, C.-A., McInnis, H., Brien, D. C., Pari, G., & Munoz, D. P. 2016. “Disruption of pupil size modulation correlates with voluntary motor preparation deficits in Parkinson’s disease,” *Neuropsychologia*, 80, 176–84.
- Wang, C. A., & Munoz, D. P. 2015. “A circuit for pupil orienting responses: Implications for cognitive modulation of pupil size,” *Current Opinion in Neurobiology*, 33, 134–140.
- Yamaji, K., Hiratai, Y., & Usui, S. 1997. “The pupil as a possible monitor of the autonomic nervous system,” In *Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. “Magnificent Milestones and Emerging Opportunities in Medical Engineering”* (Cat. No.97CH36136), 6(C), 2777–2781.