

Comparativo de Abordagens de Segmentação de Mão em Imagens de Preensão Palmar Obtidas com um Sistema de Visão Omnidirecional

Ivan C. Perissini, Dep. de Eng. Mecânica, Universidade de São Paulo, ivanperissini@gmail.com
Viviane C. R. Appel, Dep. de Eng. Mecânica, Universidade de São Paulo, vivianecroma@gmail.com
Matheus B. Rezende, Dep. de Eng. Mecânica, Universidade de São Paulo, matheus.rezende@usp.br
Leonardo M. Pedro, Dep. de Eng. Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, lmppedro@ufscar.br
Glauco A. P. Caurin, Dep. de Eng. Mecânica, Universidade de São Paulo, gcaurin@sc.usp.br

Resumo. A avaliação da preensão palmar é um desafio em aplicações clínicas e terapêuticas. Os dispositivos de aquisição convencionais apresentam dificuldades inerentes e restritivas para sua utilização e como alternativa é proposto um copo instrumentado com um sistema de visão omnidirecional capaz de capturar imagens da preensão da mão ao pegá-lo bem como efetuar aquisição de dados cinemáticos do movimento. O processamento das imagens para segmentação entre o objeto de interesse, a mão, e o fundo da cena, se mostra como etapa crítica para futuras explorações na extração de características que quantifiquem de forma inédita a preensão. Este artigo apresenta um comparativo entre 24 diferentes métodos de segmentação utilizando 102 imagens adquiridas em experimentos realizados com 51 crianças. As próximas etapas do trabalho também são apresentadas, assim como a potencialidade do dispositivo em diversas aplicações.

Palavras chave: Reabilitação de membro superior. Segmentação por cor. Detecção de pele. Espaço de cor.

1. INTRODUÇÃO

A preensão palmar é uma função dos membros superiores essencial para a realização de tarefas que requerem a pega de objetos ou ferramentas. Diversas doenças (hereditárias, congênitas ou adquiridas) podem levar à perda parcial e até mesmo total da função, comprometendo a realização de tarefas e, conseqüentemente, a qualidade de vida das pessoas acometidas. Intervenções cirúrgicas e tratamentos fisioterapêuticos são indicados para recuperar, mesmo que parcialmente, a função prejudicada (HENDRICKS et al., 2002). Neste contexto, faz-se necessário avaliar a qualidade da preensão com a finalidade de, em um primeiro momento, avaliar o déficit motor, e em um segundo momento avaliar o progresso de recuperação durante e após a intervenção (NOWAK et al., 2003).

Na avaliação da preensão palmar tem-se interesse em dois aspectos principais: i) a postura da mão na pega, ou seja, o recrutamento dos dedos e os ângulos das suas juntas; ii) a força aplicada e a distribuição de pressão ao longo da área de contato. No primeiro caso, existem dispositivos que permitem a medida da posição angular das juntas dos dedos durante a preensão, como é o caso dos rastreadores de movimento, que capturam com o auxílio de câmeras a posição espacial de marcadores posicionados estrategicamente sobre a mão, e das luvas instrumentadas, cuja tecnologia mais difundida é composta por sensores de deflexão angular posicionados sobre as articulações. As duas tecnologias mencionadas apresentam desvantagens e dificuldades no uso clínico (ZHOU; HU, 2008). O posicionamento dos marcadores sobre a mão do paciente requer tempo e experiência do terapeuta. As luvas não podem ser lavadas representando risco de contaminação. Como alternativa às tecnologias atuais disponíveis para a avaliação da preensão palmar, e na tentativa de solucionar os seus problemas na aplicação, temos proposto um objeto no formato cilíndrico mimetizando um copo de vidro e instrumentado com um sistema de visão omnidirecional e uma *inertial measurement unit* (IMU) (ROCHA et al., 2016). O sistema de aquisição de imagens, composto por uma câmera de alta definição e um espelho hiperbólico, captura imagens da preensão da mão durante o movimento de manipulação do dispositivo, para se obter a postura da preensão palmar e correlacionar com os dados cinemáticos como aceleração e orientação provenientes da IMU. Pretende-se também, a partir das imagens, estimar a área de contato. Para o processamento a fim de extrair as informações citadas, faz-se necessário um pré-processamento de segmentação da imagem, ou seja, a separação do objeto de interesse, a mão, do fundo da cena.

Este artigo apresenta um estudo comparativo de 24 métodos de segmentação de imagens dando continuidade ao trabalho preliminar (PERISSINI et al., 2017), no qual foram utilizadas abordagens de segmentação baseadas em cor, mais especificamente, em técnicas de detecção de pele. É importante apontar que diversos fatores podem influenciar na aparência da pele em imagens, como iluminação, cor de fundo, sombras, grupo étnico, características individuais como idade e sexo, postura e posicionamento do indivíduo, e características do sensor da câmera. É importante, portanto, controlar as condições do ambiente em que o experimento será realizado.

Existe um grande número de artigos que descrevem a significância da escolha do espaço de cores para o processo de segmentação (GARCÍA-MATEOS et al., 2015; TERRILLON; AKAMATSU, 1999; ZARIT et al., 1999). Vezhnevets et al. (2003) e Kakumanu et al. (2007) publicaram revisões relevantes relacionadas a métodos e técnicas de detecção de pixels de pele, enquanto Singh et al. (2003) demonstrou que melhores taxas de acerto foram obtidas com novos espaços de cores propostos, baseados na combinação de canais de modelos convencionais.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é fazer uma análise mais aprofundada de métodos de segmentação da mão, utilizando um número superior de espaços de cores e um espaço amostral de imagens maior. Um comparativo entre 24 diferentes abordagens é apresentado visando determinar quais fornecem os melhores desempenhos para segmentação da mão. Uma base de dados de 102 imagens de 51 crianças foram utilizadas no experimento, buscando determinar quais foram aquelas em que os algoritmos de classificação obtiveram melhor desempenho, e, desse modo, identificar as condições que levaram à detecção mais precisa. Para análise dos resultados foi utilizado o Índice *Youden* (YODEN, 1950), um indicativo preciso que faz uma correlação entre a taxa de acertos e de erros de cada abordagem para determinação da eficiência do método analisado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Procedimentos Éticos e Participantes

As imagens utilizadas neste estudo são parte do estudo observacional, de caráter transversal, com aprovação do Comitê de Ética em pesquisa com Humanos da Universidade Federal de São Carlos (parecer número 1.337.492). A coleta de dados foi realizada em uma escola particular da cidade de São Carlos, todos os responsáveis assinaram o Termo de Consentimento Livre e as crianças, o Termo de Assentimento. Crianças com desenvolvimento típico, hígdas, nascidas a termo, com idade entre 5 e 10 anos, não apresentavam histórico de atraso no desenvolvimento neuropsicomotor, patologias musculoesqueléticas e neurológicas que afetassem a função do membro superior, e comprometimento cognitivo que impedisse a compreensão da tarefa.

2.2 Modelos de cores

Segundo Gonzalez e Woods (2010) um modelo de cores, também chamado de espaço de cores ou ainda sistema de cores, é uma especificação de um sistema de coordenadas e um subespaço contido neste sistema onde cada cor é representada por um único ponto, cujo objetivo é padronizar a especificação das cores. O modelo do sistema de captura em questão é o RGB, mas por ser um espaço de cores sensível a variações de intensidade, muitos espaços têm sido propostos por transformações lineares e não-lineares do RGB para melhor uniformidade das cores e consequentemente um processamento de imagens coloridas mais robusto (SABER; TEKALP, 1998).

Nos experimentos deste estudo, foram utilizadas 15 transformações do sistema RGB, visando aumentar a discriminação entre pele e não pele. Entre elas foram selecionados espaços de cores comumente empregados em aplicações de visão computacional para segmentação de pele (SINGH et al., 2003; PHUNG et al., 2002; KAKUMANU et al., 2007; GOMEZ, 2002), modelos utilizados na agricultura (GARCÍA-MATEOS et al., 2015), também modelos propostos que combinam canais de modelos distintos e por último uma função de distância de cor. Em adição ao RGB, 7 espaços de cores fizeram parte do estudo: rgb, HSV, XYZ, YCrCb, Lab, Luv, TLS.

RGB é o espaço de cores mais comum, baseado na tricromática e em um modelo aditivo onde as cores são geradas pela combinação das três cores primárias: vermelho(R), verde(G) e azul(B) (GONZALEZ; WOODS, 2010). O modelo rgb normalizado (rgb), é obtido a partir dos valores RGB dividindo-se o valor de cada pixel pela respectiva soma ($R+G+B$). No sistema HSV os canais são formados pelas componentes *hue* (matiz), *saturation* (saturação) e *value* (valor). Esse sistema separa os aspectos acromáticos (v), dos aspectos cromáticos (H e s). À partir do modelo HSV foi proposta uma modificação onde o eixo *hue* foi rotacionado em 30° no sentido horário, pois a escala tem início e término em vermelho que corresponde ao tom de pele.

Definido pela Comissão Internacional em Iluminação (CIE) em 1931, o espaço de cor XYZ é um modelo biologicamente inspirado, em relação ao espaço de cor três-estímulos, que descreve a resposta de três tipos de fotorreceptores da retina humana. YCrCb é um espaço de cores muito utilizado em aplicações de detecção de pele, com bons resultados de discriminação. Este modelo consiste em separar o canal Y associado à luminosidade, e dois canais com informações de cor, Cr e Cb, que correspondem respectivamente aos canais R e B normalizados em intensidade.

Os modelos $L^*a^*b^*$ e $L^*u^*v^*$ foram definidos pelo CIE para aplicações industriais de cores. Os canais aqui foram definidos com o objetivo de se atingir representação de cor uniforme. Ambos os modelos consistem no canal luminosidade (L^*), o canal a é o eixo verde-vermelho, e o canal b é o eixo azul-amarelo. No modelo $L^*u^*v^*$, mas os canais u^* e v^* são definidos como transformações não-lineares de X e Y respectivamente.

TSL foi introduzido por Terrillon e Akamatsu (1999) com objetivo de auxiliar na detecção de pele e faces humanas.

Neste modelo T significa *tint* ou matiz e é o canal de cor predominante como o H nos modelos HSB e HLS, incluindo o branco na escala, S é o canal saturação e L o canal luminosidade, definido como Y no modelo XYZ. Como proposta adicional a função de distância de cor (*color distance*) foi utilizada. No caso, calculou-se a distância euclidiana entre cada pixel da imagem com uma referência da cor vermelha utilizando como base o espaço *Cielab-76*.

Além dos modelos de cor tradicionais, outras estratégias de segmentação baseadas em manipulações de canais de cor tradicionais e de outras aplicações de segmentação foram propostas e testadas. Um novo modelo baseado na formulação do espaço YCrCb, denominado CrCgCb foi utilizado. Para tanto o canal acromático do espaço original Y foi substituído por um canal cromático adicional, associado à cor verde (Cg) com a aplicação da equação $Cg = 1.211.(G - Y) + 0.5$.

Outras propostas foram inspiradas em índices vegetativos, a primeira foi a aplicação do índice *Excess Red* (ExR) (MEYER et al., 1999), as outras duas foram adaptações do índice *Excess Green* (ExG) (WOEBBECKE et al., 1995), para gerar destaque a cor vermelha ao invés da cor original verde e fazendo o uso dos modelos de cor RGB e CrCgCb, ao invés do rgb. Ao fim as operações realizadas para obtenção dos índices modificados, para o *Excess Green* com vermelho em RGB foi $2.R - G - B$ e para o *Excess Green* com vermelho em CrCgCb foi $2.Cr - Cg - Cb$.

2.3 Imagens do experimento

Para este estudo, 102 imagens do banco de dados foram inspecionadas de acordo com algumas características. Foram selecionadas imagens onde a posição de preensão foi feita adequadamente e no início do movimento do protocolo de beber água descrito em Rocha et al. (2016), momento em que a preensão é considerada estável. Gênero e idade das crianças participantes não foram levados em consideração.

3. SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto foi desenvolvido no *software Wolfram Mathematica 10.4*, que processa, avalia o desempenho de segmentação e gera as amostras de teste, preparando a imagem original para a campanha experimental. Subsequentemente, as amostras são manipuladas para gerar as configurações de teste e, por fim, avalia-se os resultados de cada abordagem comparando uma imagem referência tida com ideal. Uma explicação detalhada sobre cada uma de suas etapas pode ser encontrada em (PERISSINI et al., 2017). A seguir está uma descrição resumida do sistema com detalhes para o método de avaliação de resultados que foi alterado neste estudo.

As imagens base omnidirecionais são na etapa inicial planejadas, segundo algoritmo descrito por Grassi Junior e Okamoto Junior (2006), dentro de níveis aceitáveis de distorção. Para que a imagem final (amostra) contenha a região de interesse sem prejuízo da métrica de desempenho, 30% da sua parte inferior foi removido, levando-se em conta que a porção da imagem omnidirecional mais próxima ao centro do espelho é representada por poucos pixels com consequente baixa resolução na parte inferior da imagem transformada.

Em sequência, as 24 transformações propostas são aplicadas em cada amostra e a classificação é realizada, em alguns casos com valor de corte fixo definido manualmente, em outros pelo Método de Otsu (OTSU, 1979) e nos demais pelo K-médias. Na limiarização manual e por Otsu, o canal, ou combinações de canais, com maior poder discriminativo para detecção de pele é selecionado, já o algoritmo de agrupamento k-médias é configurado para particionamento em dois grupos (k=2), e aplicado para todos os canais. Então uma regra particular de classificação é aplicada resultando em imagens binárias de pele(1) e fundo(0). Esta imagem passa, então, por uma etapa de pós-processamento: filtro mediano, operação morfológica de erosão, rotulação das regiões, remoção de pequenas áreas, finalizando com uma dilatação com o mesmo elemento estruturante utilizado na erosão, preservando assim as dimensões originais. Ao fim desta etapa tem-se a imagem de teste, que equivale ao resultado de cada abordagem de classificação.

A última etapa realiza a avaliação das abordagens de segmentação, comparando a imagem resultante com sua respectiva imagem referência, gerada pela seleção manual de especialistas caracterizando a separação ideal da mão com o fundo. A métrica de desempenho adotada nesse estudo foi o Índice de *Youden* (YAUDEN, 1950), apresentado na Eq. (1), que considera as taxas de verdadeiro positivo (TP), verdadeiro negativo (TN), falso positivo (FP) e falso negativo (FN) ao final do processamento da imagem e, desse modo, faz um balanço entre a taxa de acertos e de erros da abordagem. Esse índice varia entre -1 e +1 (de modo equivalente, -100% e +100%) e quanto maior o resultado, melhor o desempenho do método em questão.

$$Youden = \frac{TP}{TP + TN} + \frac{TN}{TN + FP} - 1 \quad (1)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram utilizados neste estudo 24 abordagens para segmentação de mão, sendo 16 transformações de cores e 3 métodos de classificação (Otsu, k-médias e limiarização manual). Os métodos de avaliação da segmentação foram aplicadas para

todas as abordagens nas 102 imagens do estudo. As médias dos resultados, assim como o desvio padrão do erro e do índice de *Youden*, foram computadas, e podem ser observados na Tab. (1) organizada pelo índice *Youden* médio em ordem decrescente. É interessante notar que as abordagens mantiveram uma relação direta entre Índice de *Youden* e o erro (quanto maior o *Youden*, menor o erro, e vice-versa).

Tabela 1: Resultados dos desempenhos

Id	Método	Classificador	Média Erro	σ do Erro	Média <i>Youden</i>	σ <i>Youden</i>
5	Distância de cor (vermelho)	Otsu	1,63	0,91	96,41	2,34
17	Distância de cor (vermelho)	K-médias	1,65	0,92	96,38	2,37
16	HSV modificado	K-médias	2,10	1,72	95,61	3,49
4	H (HSV) modificado	Otsu	2,01	1,27	95,54	3,55
21	Proposto Excess Green com vermelho em RGB	Manual	2,32	2,21	95,37	3,77
19	TLS	K-médias	2,26	1,75	95,28	3,62
22	Proposto Excess Green com vermelho em CrCgCb	Manual	2,78	2,61	94,58	4,50
7	$u^* (L^*u^*v^*)$	Otsu	2,64	2,35	93,79	6,38
11	Cr (YCrCb)	Otsu	2,64	2,39	93,75	6,46
23	Proposto CrCgCb	K-médias	2,65	2,34	93,69	6,55
6	$(a^*) L^*a^*b^*$	Otsu	3,12	2,80	92,68	7,69
2	RGB	Manual	3,82	1,22	92,36	2,62
20	Y Cr Cb	K-médias	3,76	2,55	92,34	4,80
13	RGB	K-médias	3,97	2,75	91,89	5,02
1	Escala de cinza (RGB)	Otsu	4,07	2,67	91,75	4,94
14	Escala de cinza	K-médias	4,10	2,72	91,70	4,99
10	T (TSL)	Otsu	4,47	4,64	91,37	8,06
9	(r) rgb	Otsu	5,01	6,22	91,19	9,66
18	rgb	K-médias	5,23	6,39	90,80	9,95
8	X - Y (XYZ)	Otsu	4,38	2,78	90,32	6,63
3	H (HSB)	Otsu	7,77	11,61	85,63	19,60
24	Proposto Excess Red	Otsu	8,88	10,98	84,80	17,13
15	HSB	K-médias	8,76	14,49	84,46	23,45
12	Cr - Cb (Y Cb Cr)	Otsu	24,68	21,92	56,09	34,69

O estudo foi pertinente, apresentando grande variação nos resultados (Fig. 1), com respostas que variaram de valores insatisfatórios de segmentação próximos à 56% até segmentações quase completas com 96%, ambas no índice *Youden*.

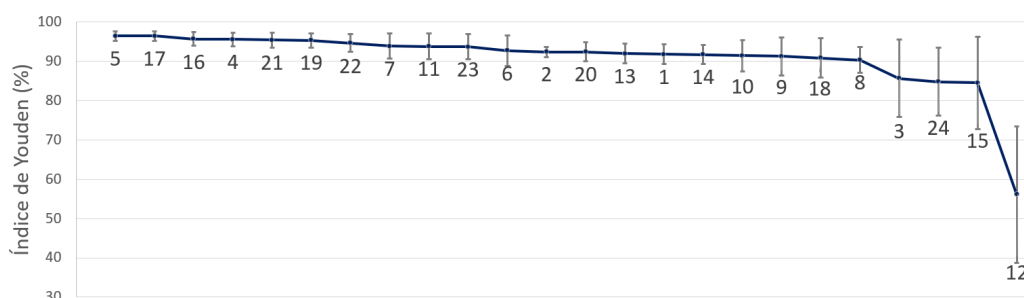


Figura 1: Desempenho médio de cada abordagem em relação ao índice de *Youden*

A binarização por Otsu na escala de cinza (abordagem 1) estabelece uma referência na análise de uma segmentação baseada apenas nos aspectos acromáticos das imagens. Portanto, resultados melhores ou superiores à esta referência demonstram a contribuição dos aspectos cromáticos na segmentação. Por outro lado, no contexto da cena e das características de controle estabelecidas para coleta de dados, os autores consideram que as abordagens com resultados piores que esta referência representam tentativas não válidas de segmentação por cor.

Análises comparativas com o modelo clássico HSV não apresentaram bons resultados, entretanto o HSV modificado apresentou bons valores independente do método de classificação, superado apenas pelas abordagens relacionadas à distância de cor com comprovada diferença estatística ($p < 0,05$).

Uma análise pertinente é a comparação do melhor resultado no estudo anterior (PERISSINI et al., 2017) referente ao modelo de cores YCrCb que foi superado neste estudo por algumas novas abordagens adotadas, sendo que as transformações baseadas em distância de cor, o HSV modificado, o proposto *Excess Green* com vermelho em RGB e TLS com K-médias apresentaram resultados significativamente melhores ($p < 0,05$).

Pode-se observar nos resultados que para determinados espaços de cores o classificador apresentou diferença marcante como no caso do TLS onde o método k-médias apresentou melhor desempenho devido à utilização de todos os canais para classificação. Entretanto para algumas abordagens o classificador não teve grande influência, como é o caso do rgb, HSV modificado e distância de cor. Neste último caso, as abordagens de classificação foram aplicadas em apenas um canal, o que justifica essa resposta. Neste contexto recomenda-se utilização do Otsu por possuir menor custo computacional.

As médias dos resultados do erro e índice *Youden* das 24 abordagens foram computadas para cada uma das 102 imagens. No geral os métodos tiveram bom desempenho, mas pode-se observar que tanto a transformação de cores como a forma de classificação tem grande impacto nos resultados. Fez-se uma análise buscando identificar quais imagens obtiveram os melhores e piores resultados médios. De modo geral, os melhores resultados vieram acompanhados de menor desvio padrão, o que mostra que a maior parte dos métodos obtiveram êxito na tarefa proposta de segmentar a mão. Em contraponto, as imagens com pior resultado tiveram desvio padrão elevado.

Ao avaliar as imagens com pior desempenho nota-se que em todos os casos o rosto está ligado à mão e os dedos aparecem separados, o que piora a resposta do pós-processamento, e além disso a mão ocupa a maior parte da imagem, o que pode dificultar o desempenho do classificador. Para algumas abordagens os ruídos levaram a grandes concentrações de buracos que ocasionaram a remoção de grandes porções de mão com casos extremos de não detecção da mão. A Fig. 2, que obteve o menor índice de *Youden* médio e o maior desvio padrão médio, demonstra os efeitos discutidos.

Observou-se que as imagens com as melhores médias possuem características similares, como rosto separado da mão, dedos próximos, fundo uniforme, tom de pele similar e proporção equilibrada entre fundo e mão. Estas condições podem ser observadas na imagem de melhor desempenho, conforme a Fig. 2.

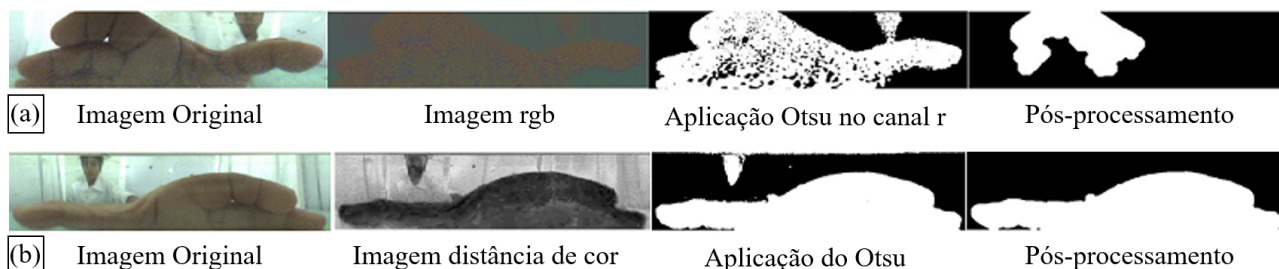


Figura 2: (a) Pior resultado, alta sensibilidade aos ruídos e baixo desempenho no Pós-processamento; (b) Melhor resultado, alta detecção dos tons de pele e remoção adequada da porção não mão

5. CONCLUSÕES

A partir da análise observou-se que algumas abordagens apresentaram ótimo desempenho. As abordagens relacionadas à distância de cor, HSV modificado, método proposto *Excess Green* com vermelho em RGB e TLS com K-médias merecem destaque pois, independentemente das condições particulares da imagem, obtiveram índice *Youden* elevado e baixo erro. Das abordagens clássicas de segmentação por cor, apenas o HSV foi considerado apto para a aplicação, desde que ocorra a modificação na matiz para que o início da escala seja diferente de tons de pele (vermelho).

Estes resultados atendem às expectativas do dispositivo SPMM pois apresentaram robustez e eficiência na tarefa da segmentação da mão, e superaram os resultados obtidos em estudos anteriores. Além disso, o número ampliado de amostras experimentais e de abordagens de segmentação da mão propostos neste estudo proporcionam maior confiança nesses resultados. Com relação à análise por imagens pode-se concluir que algumas condições da cena dificultaram os processos de segmentação para certas abordagens, diferenciando o desempenho e mostrando a importância da escolha do espaço de cor adequado. As características da cena mais desafiadoras mostram a importância do controle do ambiente e do procedimento de coleta de dados.

Este estudo é de grande importância e vem consolidar uma abordagem padrão para as novas avaliações de preensão palmar, no contexto da avaliação de reabilitação de membro superior. O processo de planificação das imagens omnidirecionais aliados às variações de condições da cena, e necessidade da segmentação apenas da mão, fomentaram as investigações que foram base para este estudo. Futuros trabalhos com processamento de imagem do dispositivo SPMM poderão utilizar como procedimento padrão as melhores abordagens de segmentação.

6. REFERÊNCIAS

- GARCÍA-MATEOS, G.; HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, J. L.; ESCARABAJAL-HENAREJOS, D.; JAÉN-TERRONES, S.; MOLINA-MARTÍNEZ, J. M. Study and comparison of color models for automatic image analysis in irrigation management applications. *Agricultural Water Management*, Elsevier B.V., v. 151, p. 158–166, 2015. ISSN 18732283.
- GOMEZ, G. On Selecting Colour Components for Skin Detection. *16th International Conference on Pattern Recognition*, v. 2, p. 20961, 2002. ISSN 10514651.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Book. *Processamento Digital de Imagens, tradução do original Digital Image Processing*. 3. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2010.
- GRASSI JUNIOR, V.; OKAMOTO JUNIOR, J. Development of an omnidirectional vision system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 28, n. 1, p. 58–68, 2006. ISSN 1678-5878.
- HENDRICKS, H. T.; LIMBEEK, J. van; GEURTS, A. C.; ZWARTS, M. J. Motor recovery after stroke: A systematic review of the literature. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, v. 83, n. 11, p. 1629–1637, 2002. ISSN 0003-9993.
- KAKUMANU, P.; MAKROGIANNIS, S.; BOURBAKIS, N. A survey of skin-color modeling and detection methods. *Pattern Recognition*, v. 40, n. 3, p. 1106 – 1122, 2007. ISSN 0031-3203.
- MEYER, G. E.; HINDMAN, T. W.; LAKSMI, K. Machine vision detection parameters for plant species identification. v. 3543, p. 327–336, 1999.
- NOWAK, D. A.; HERMSDÖRFER, J.; TOPKA, H. Deficits of predictive grip force control during object manipulation in acute stroke. *Journal of Neurology*, v. 250, n. 7, p. 850–860, Jul 2003. ISSN 1432-1459.
- OTSU, N. A thresholding selection method from gray-level histogram. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 9, n. 1, p. 62–66, 1979.
- PERISSINI, I. C.; APPEL, V. C. R.; CAURIN, G. A. P. Comparativo de técnicas para segmentação da mão em imagens de apreensão palmar. n. 2007, 2017.
- PHUNG, S. L.; BOUZERDOUM, a.; CHAI, D. A novel skin color model in ycbcr color space and its application to human face detection. *Proceedings. International Conference on Image Processing*, v. 1, p. 289–292, 2002. ISSN 1522-4880.
- ROCHA, A.; TUDELLA, E.; PEDRO, L.; APPEL, V.; SILVA, L.; CAURIN, G. A novel device for grasping assessment during functional tasks: preliminary results. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, v. 4, 2016.
- SABER, E.; TEKALP, A. Frontal-view face detection and facial feature extraction using color, shape and symmetry based cost functions. *Pattern Recognition Letters*, p. 1–16, 1998. ISSN 01678655.
- SINGH, S. K.; CHAUHAN, D. S.; VATSA, M.; SINGH, R. A robust skin color based face detection algorithm. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, v. 6, n. 4, p. 227–234, 2003. ISSN 15606686.
- TERRILLON, J.-C.; AKAMATSU, S. Comparative performance of different chrominance spaces for color segmentation and detection of human faces in complex scene images. *Vision Interface*, v. 99, p. 19–21, 1999.
- VEZHNEVETS, V.; SAZONOV, V.; ANDREEVA, A. A Survey on Pixel-Based Skin Color Detection Techniques. *Proceedings of GraphiCon 2003*, v. 85, n. 0896-6273 SB - IM, p. 85–92, 2003. ISSN 08966273.
- WOEBBECKE, D.; MEYER, G.; Von Bargen, K.; MORTENSEN, D. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*, v. 38, n. 1, p. 259–269, 1995. ISSN 0001-2351.
- YODEN, W. J. Index for rating diagnostic tests. *Cancer*, v. 3, n. 1, p. 32–35, 1950. ISSN 10970142.
- ZARIT, B.; SUPER, B.; QUEK, F. Comparison of five color models in skin pixel classification. *Proceedings International Workshop on Recognition, Analysis, and Tracking of Faces and Gestures in Real-Time Systems. In Conjunction with ICCV'99 (Cat. No.PR00378)*, p. 58–63, 1999.
- ZHOU, H.; HU, H. Human motion tracking for rehabilitation—a survey. *Biomedical Signal Processing and Control*, v. 3, n. 1, p. 1–18, 2008. ISSN 1746-8094.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à Royal Society (Projeto Newton Advanced Fellowship processo NA140231).

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.