JDCS
디지털콘텐츠학회논문지
Journal of Digital Contents Society
Vol. 20, No. 2, pp. 307-313, Feb. 2019

RGB 칼라 모델의 R 성분영상을 이용한 효과적인 색소침착 검출

박 기 홍 · 이 양 선*
목원대학교 융합컴퓨터미디어학부

Effective Pigmentation Detection using Component Image R of RGB Color Model

Ki-Hong Park · Yang Sun Lee*
Division of Convergence Computer & Media, Mokwon University, Daejeon 35349 Korea

[요 약]

본 논문에서는 RGB 칼라 모델의 R 성분영상을 이용한 색소침착 검출 방법을 제안하였다. 색소침착은 멜라닌의 양에 따라 결정되며, 피부영상에서 멜라닌은 620에서 720 nm의 파장을 갖는다. 멜라닌의 파장 범위는 CIE RGB 색 공간에서 원색간의 비를 결정 시 R의 파장과 동일함으로 RGB 칼라 모델의 R 성분영상을 이용한 멜라닌 추정이 효과적이다. 먼저 R 성분영상을 기하평균을 이용하여 정규화 한 후 멜라민 후보 영상을 획득하고, 임계 값 처리를 통해 색소침착 영역을 검출하였다. 실험 결과, 제안하는 방법이 CIE L*a*b* 칼라 모델의 L*-b* 평면을 이용하는 기존의 방법보다 효과적으로 검출됨을 보였다. 향후, 다양한 칼라 모델에서의 색소침착 검출과 다양한 조도 환경에서 색소침착 검출의 정확도를 향상시키는 연구를 계속하고자 한다.

[Abstract]

In this paper, we propose a method of pigmentation detection using a component image R of RGB color model. Pigmentation is determined by the amount of melanin, and the wavelength range of melanin in the skin image is 620 to 720 nm. The wavelength range of melanin is almost equal to the wavelength of R which is determined the ratio between primary colors in the CIE RGB color space. Therefore, melanin estimation using a component image R of the RGB color model is effective. First, a component image R was normalized using the geometric mean, and melamine candidate image was obtained. Then, the pigmentation regions were detected through threshold processing. Some experimental results show that the proposed method is effective than the conventional methods using the L*-b* plane of the CIE L*a*b* color model. In the future, we will continue to research the method of pigmentation detection in various color models, and improve the accuracy of pigmentation detection in various illumination environments.

색인어 : 색소침착 검출, 피부 질환 분석, 멜라닌, CIE L*a*b* 칼라 모델, RGB 칼라 모델

Key word : Pigmentation Detection, Skin Disease Analysis, Melanin, CIE L*a*b* Color Model, RGB Color Model

http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2019.20.2.307

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 26 January 2019; **Revised** 08 February 2019
Accepted 20 February 2019

***Corresponding Author; Yang Sun Lee**

Tel: +82-42-829-7638
E-mail: yslee48@gmail.com

Ⅰ. 서 론

최근 인구 고령화와 삶의 질 향상으로 질병 예방의 중요성과 피부 관리(skin care)에 대한 관심이 남녀노소 구분 없이 건강관리의 일환으로 인식되고 있다[1,2]. 대표적인 피부 질환들은 여드름, 색소침착, 기미, 잡티 등이 있으며, 얼굴영상에서 가장 관심을 갖는 질환은 여드름과 색소침착이라고 해도 과언이 아니다. 다양한 선행연구들에서는 피부영상에서 여드름과 색소침착 검출을 위해 전반적으로 *CIE* $L^*a^*b^*$ 칼라 모델을 적용하고 있으며[3-7], a^*와 b^* 성분영상들이 양의 값을 가질 때 각각 적색과 노란색에 치우친 색이라는 특징을 적용하고 있다[7].

본 논문에서는 색소침착 검출에 중점을 두고 있으며, 색소침착의 주요 원인인 멜라닌(melanin)의 파장과 *RGB* 칼라 모델의 R 성분영상의 파장간의 관계를 이용한 색소침착 검출 방법을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 색소침착의 정의, 선행연구들의 색소침착 검출 방법 및 주요 칼라 모델을 기술하고, 3장에서는 제안하는 색소침착 검출 방법을 설명한다. 4장에서는 기존의 방법과 제안하는 방법의 성능을 평가하고, 5장에서 결론과 향후 연구를 기술한다.

Ⅱ. 관련 연구

2-1 색소침착의 정의

색소침착은 피부색의 변화, 즉 피부 조직 내 색소의 양이 비정상적으로 변화함에 따라 발생하는 현상이며, 색소의 종류로는 멜라닌과 헤모글로빈(hemoglobin) 등이 있다. 피부색은 멜라닌의 양에 따라 결정되며, 멜라닌의 양이 많을수록 검은 피부색을 갖는다. 멜라닌은 태양으로부터 피부를 보호하기 위해 일정량 이상의 자외선을 흡수하여 인체를 보호하는 역할을 하며[8], 색소침착은 선행 연구 [9]에서 멜라닌에 의한 것이라고 정의하고 있다.

2-2 색소침착 검출을 위한 선행연구들

선행연구 [10, 11]에서는 *CIE* $L^*a^*b^*$ 칼라 모델의 L^*과 b^* 성분영상을 이용한 ITA(individual typology angle)를 식 1과 같이 정의하여 피부영상에서 색소침착 영역을 강조하였다.

$$ITA = \left[arctan\left(\frac{L^*-50}{b^*}\right)\right]\times\frac{180}{\pi}. \tag{1}$$

식 1에서 획득한 ITA는 각도(angle)를 나타내며, 피부 색소침착에 반비례한다[11]. 또한 특정 스펙트럼 밴드(spectral bands)에서 반사율(reflectance ratio) 측정을 기반으로 멜라닌 지수(MI, melanin index)와 홍반 지수(EI, erythema index)를 측정하는 다양한 연구가 수행되었으며[12], MI와 EI는 각각 식 2와 식 3에 의해 계산된다.

$$MI = log_{10}(R_{905nm}/R_{632nm})\times 1000. \tag{2}$$

$$EI = log_{10}(R_{632nm}/R_{546nm})\times 1000. \tag{3}$$

식 2와 식 3에서 R_λ는 파장 λ에서 측정된 광(light)을 의미한다. *RGB* 칼라 모델을 적용한 선행연구 [13]에서는 반사 값(reflectance values) 기반의 협대역(narrow-band) 파장에서 식 3의 MI와 동일한 공식을 식 4와 같이 제안하였으며, A_r과 R_r은 각각 R 성분영상에서의 흡광도 지수(absorbance index)와 반사율을 나타낸다.

$$A_r = 100\times log_{10}(1/R_r). \tag{4}$$

선행연구 [14]에서는 *HSV* 칼라 모델의 S 성분영상에서 임계값 $t^*(=0.1)$를 이용하여 색소침착 영역을 검출하였으며, 식 5를 이용하여 색소침착의 레벨을 정의하였다.

$$P_{score} = \sum_{i=1}^{N} R_i d_i. \tag{5}$$

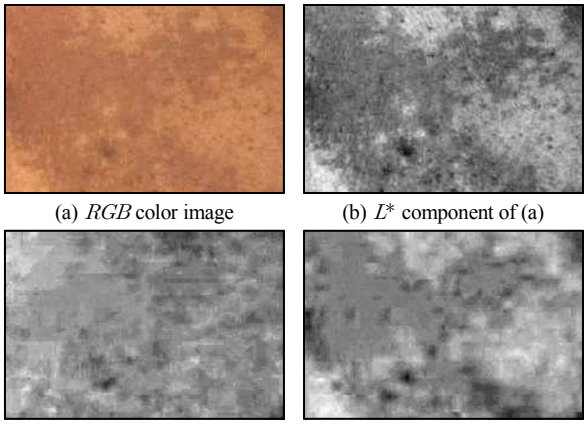
식 5에서 R_i과 d_i는 i번째 색소 레벨에 해당하는 착색영역의 비율과 가중치를 나타낸다.

2-3 색소침착 검출을 위한 칼라 모델

선행연구들 [5, 10-12]에서는 색소침착 검출을 위해 실제 빛의 파장과 비선형관계를 가지는 *CIE* $L^*a^*b^*$ 칼라 모델을 적용하고 있으며, *RGB* 칼라 모델에서 *CIE* $L^*a^*b^*$ 칼라 모델을 획득하는 방법은 식 7과 같다. 먼저 식 6을 이용하여 *RGB* 칼라 모델을 *CIE XYZ* 칼라 모델로 변환한 후 식 7과 같이 *CIE* $L^*a^*b^*$ 칼라 모델을 생성할 수 있다[15, 16].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212627 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \tag{6}$$

$$\begin{aligned} L^* &= 116\times f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - 16, \\ a^* &= 500\times\left\{f\left(\frac{X}{X_0}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_0}\right)\right\}, \\ b^* &= 200\times\left\{f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)\right\}, \\ where,\ f(t) &= \begin{cases} t^{\frac{1}{3}} & ,\text{if } t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3}\left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29} & ,otherwise \end{cases}. \end{aligned} \tag{7}$$

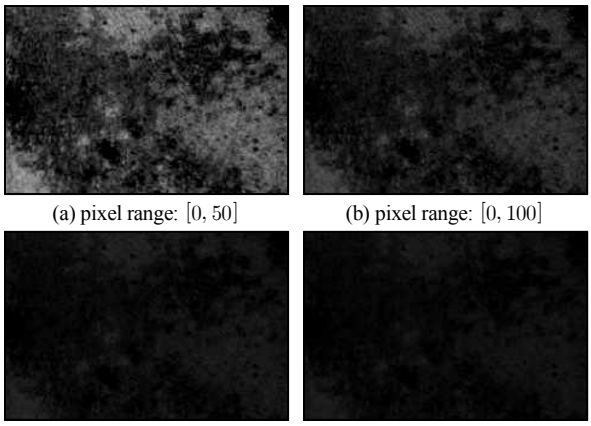


(a) RGB color image (b) L^* component of (a)

(c) a^* component of (a) (d) b^* component of (a)

그림 1. RGB 칼라 영상과 $CIE\ L^*a^*b^*$ 성분영상들
Fig. 1. RGB color image and component images of $CIE\ L^*a^*b^*$ color image

그림 1은 RGB 칼라 모델 기반의 칼라영상을 $CIE\ L^*a^*b^*$ 칼라 공간으로 변환한 각 성분영상들이며, 그림 2는 식 1에 의해 획득한 ITA 영상들로 강도(intensity)를 달리하여 보여주고 있다. 그림 3은 식 4에 의해 획득한 MI 영상이다.



(a) pixel range: $[0, 50]$ (b) pixel range: $[0, 100]$

(c) pixel range: $[0, 200]$ (d) pixel range: $[0, 255]$

그림 2. 식 1에 의해 획득한 그림 1(a)의 ITA 영상들
Fig. 2. ITA images of Fig. 1(a) obtained by (1)

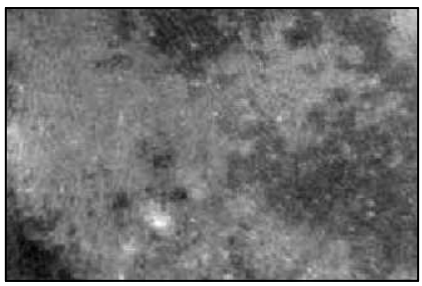


그림 3. 식 4에 의해 획득한 그림 1(a)의 MI 영상
Fig. 3. MI image of Fig. 1(a) obtained by (4)

표 1. 칼라 모델에서의 멜라닌과 헤모글로빈의 대응
Table 1. Melanin and hemoglobin correspondence in color model

Color Model	Correspondence	
	Component Image	Elements
RGB	R, G, B	Melanin and Hemoglobin
$CIE\ L^*a^*b^*$	L^*	Melanin
	a^*	Hemoglobin
	b^*	Melanin and Hemoglobin

Ⅲ. 제안하는 색소침착 검출

기존의 색소침착 검출을 위한 선행연구들에서는 전반적으로 $CIE\ L^*a^*b^*$ 칼라 모델을 적용하고 있으며, 표 1과 같이 멜라닌과 헤모글로빈을 $CIE\ L^*a^*b^*$ 칼라 모델의 각 성분영상들에 대응시키고 있다[11]. 특히, 선행연구 [17]에서는 색소침착의 주요 원인인 멜라닌의 농도가 식 8과 같이 620부터 $720nm$ 사이의 흡광도(absorbance) 파장에서 추정될 수 있음을 보여주고 있다. 식 9는 CIE 1931 표준관찰자(standard observer)의 색 대응 함수(CMF, color matching function)이며 [15], 그림 4와 같이 세 가지의 원색 R, G 및 B의 조합으로 해당 파장의 빛을 만들어 RGB 원색간의 비를 결정한다.

$$[Melanin] \propto Wavelength(620 \sim 720nm). \tag{8}$$

$$\{R, G, B\} = \int_0^\infty S(\lambda)\{\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)\}d\lambda. \tag{9}$$

식 8의 멜라닌에 해당되는 파장의 범위는 그림 4에서 보여주듯이 원색 $\bar{r}(\geq 600nm)$에서 추정될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 식 8과 식 9의 특징에 기인하여 RGB 칼라 모델의 R 성분영상을 기반으로 색소침착 검출 방법을 제안하며, 전체 흐름은 그림 5와 같다.

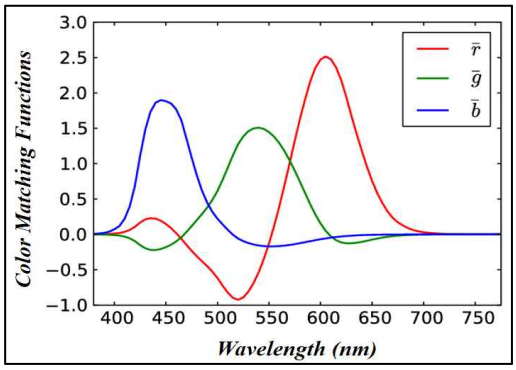


그림 4. CIE 1931 표준 관찰자의 색 대응 함수 [15]
Fig. 4. The CIE 1931 standard observer color matching functions [15]

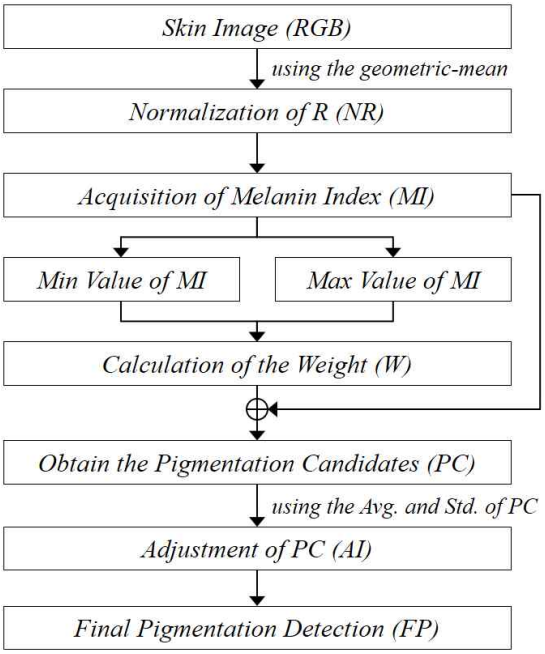


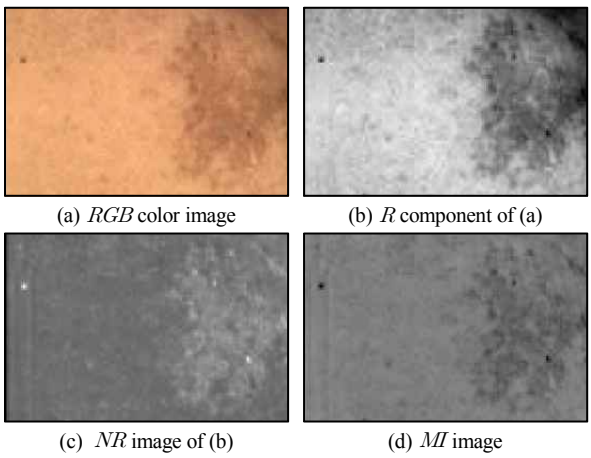
그림 5. 제안하는 색소침착 검출 블록도
Fig. 5. Block diagram of proposed pigmentation detection

먼저 RGB 칼라영상의 R 성분영상은 식 10과 같이 기하평균(geometric mean)에 의해 정규화 되고, 식 11의 흡광도 지수를 이용하여 NR 영상으로 부터 MI 영상을 획득하였다.

$$NR = R / R_p, \quad p = \sqrt[3]{R \times G \times B}. \tag{10}$$

$$MI = log_{10}(1/NR). \tag{11}$$

그림 6은 식 10과 식 11에 의해 획득한 결과영상들을 보이고 있다. 그림 6(b)는 RGB 칼라영상의 R 성분영상이며, 그림 6(c)는 기하평균 p에 의해 정규화 된 영상이다.



(a) RGB color image (b) R component of (a)

(c) NR image of (b) (d) MI image

그림 6. 식 10과 식 11에 의해 획득한 결과영상들
Fig. 6. Result images obtained by (10) and (11)

그림 6(d)는 식 11에 의해 획득한 MI 영상으로 그림 6(b)의 R 성분영상에 비해 화소의 범위가 축소됨을 보이고 있다. 이때 획득한 MI 영상의 최소값($minV$)과 최대값($maxV$)을 구하여 식 12와 같이 가중치를 계산한 후 식 13을 이용하여 색소침착 후보군 영상 PC를 획득한다.

$$\begin{aligned} W &= \frac{255}{maxV - minV}, \\ here, minV &= arg\ min(MI(x,y)), \\ maxV &= arg\ max(MI(x,y)). \end{aligned} \tag{12}$$

$$PC = (MI(x,y) - minV) \times W. \tag{13}$$

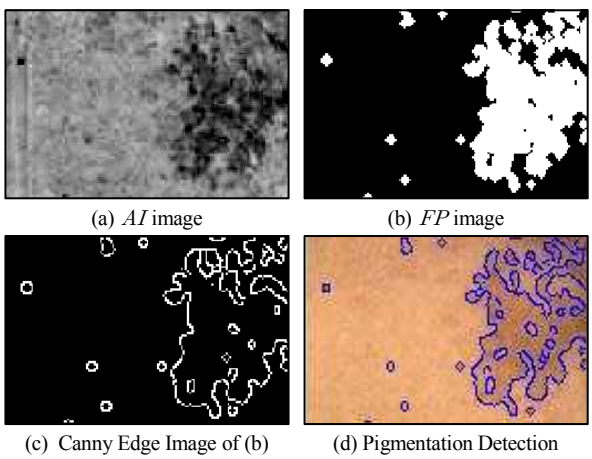
또한, PC의 밝기(intensity)를 평활화(equalization), 즉 새로운 값으로 매핑하기 위해 식 14의 평균(AVG)과 표준편차(STD)를 이용하여 식 15와 같이 밝기가 조정된 AI 영상을 획득하였다. 실제로 PC 영상의 클래스(class)는 double 형이며, 식 15에 의해 획득한 AI 영상은 그림 7(a)와 같이 uint8인 그레이스케일(gray-scale) 영상이다.

$$\begin{aligned} AVG &= arg\ avg(MI), \\ STD &= arg\ std(MI). \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} AI &= Adjust(MI, [LB, HB]), \\ here,\ LB &= AVG - 2 \times STD, \\ HB &= AVG + 2 \times STD. \end{aligned} \tag{15}$$

최종 색소침착 검출 영상은 식 16에 의해 획득되며, 임계값 T는 100의 값으로 처리하였다. 그림 7(b)에서 보여주고 있는 FP 영상은 침식(erosion)과 팽창(dilation) 연산을 통해 잡음(noise)이 제거되었으며, 그림 7(c)와 (d)는 Canny 기반의 에지를 추출한 영상과 원 영상(그림 6(a))에 매핑 한 결과영상이다.

$$FP(x,y) = \begin{cases} 0 & , if\ \ AI(x,y) < T \\ 1 & , otherwise \end{cases}. \tag{16}$$



(a) AI image (b) FP image

(c) Canny Edge Image of (b) (d) Pigmentation Detection

그림 7. 제안하는 색소침착 검출 결과영상들
Fig. 7. Result images of proposed pigmentation detection

Ⅳ. 실험 및 고찰

본 논문에서는 RGB 칼라영상의 R 성분영상을 이용한 색소침착 검출 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 색소침착의 주요 원인인 멜라닌의 스펙트럼 파장과 R 성분영상의 파장이 600에서 $720nm$ 사이의 유사범위에 있는 특징을 이용하였다. 기존의 방법에서는 $CIE\ L^*a^*b^*$ 칼라 모델을 적용하고 있으며, 식 1의 ITA에 의해 MI 영상이 획득된다. 또한 기존의 방법으로 획득한 MI 영상으로부터 색소침착 검출 과정은 제안하는 방법에서 적용한 식 14부터 식 16까지의 과정을 적용하였으며, 임계값 T는 제안하는 방법과 동일한 100으로 설정하였다. 최종 검출된 색소침착 후보군 영상에 포함된 잡음 제거는 침식과 팽창 연산의 형태학적 영상기법을 이용하였으며, 이때 마스크(mask)는 3×3 크기의 디스크(disk) 형태를 적용하였다.

그림 8은 기존의 방법 [10, 11]과 제안하는 방법의 색소침착 검출 결과들을 보이고 있다. 그림 8(b)는 색소침착이 포함된 피부영상에서 기존의 방법으로 검출된 영상들이며, 그림 8(c)는 제안하는 방법으로 검출된 결과영상들이다. 기존의 방법에서 이용한 b^* 성분영상의 값이 양수이면 노란색에 가까운 색을 나타내는데, 이는 L^*-b^* 평면상으로 이동될 때 그림 8(b, #4)과 같이 피부와 색소침착 영역의 구분이 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 실험 결과, 그림 8에서 보여주듯이 제안 방법이 기존의 방법보다 색소침착 검출이 효과적으로 수행됨을 보였다.

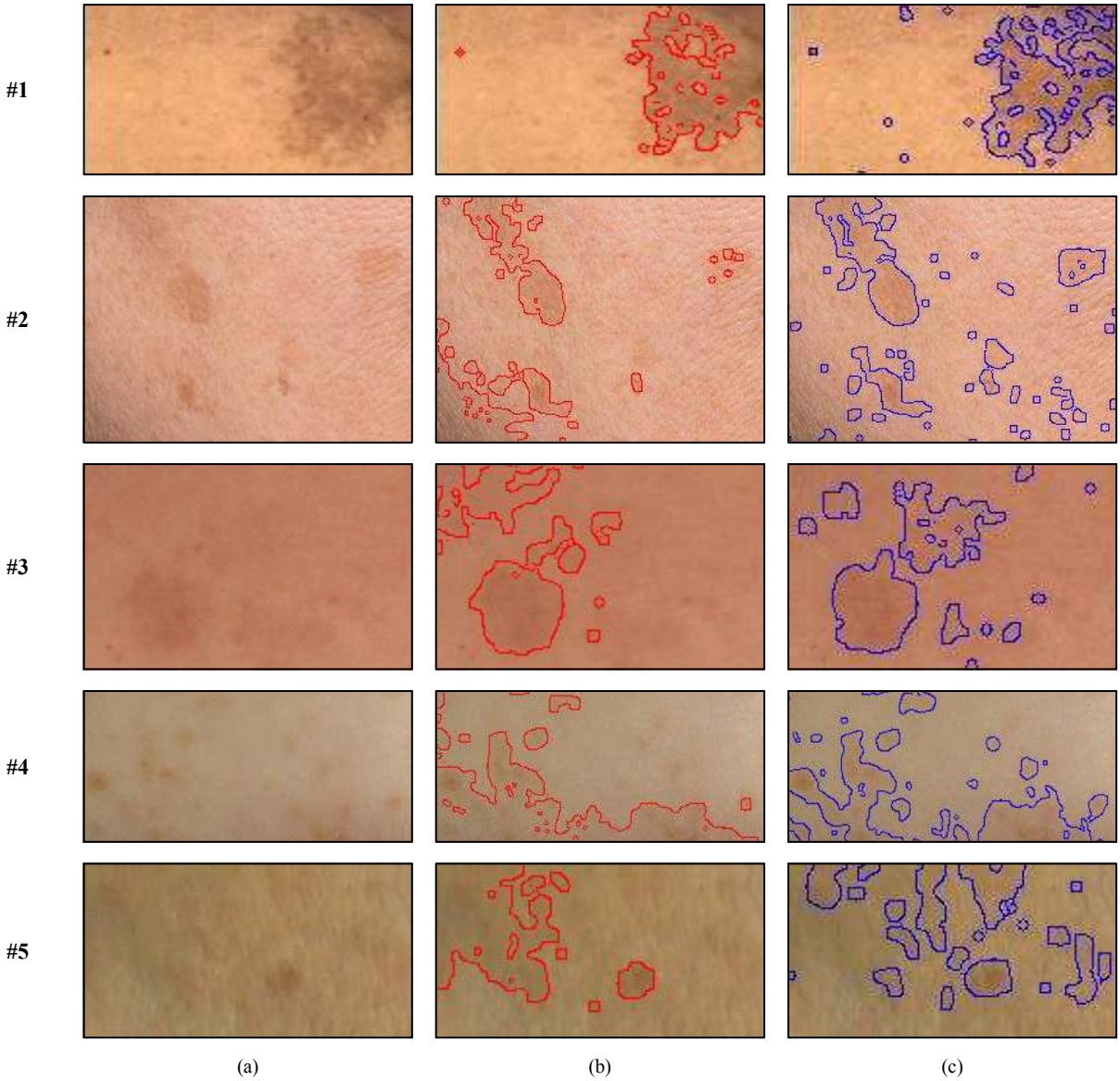


그림 8. 제안하는 방법과 [10, 11]의 색소침착 검출 비교; (a) 피부 영상들; (b) [10, 11] 방법의 결과들; (c) 제안하는 방법의 결과들
Fig. 8. Pigmentation detection comparison of proposed method and reference [10, 11]; (a) skin images; (b) results obtained by reference [10, 11]; (c) results of proposed method

Ⅴ. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 색소침착이 멜라닌의 양에 따라 결정됨에 따라 멜라닌에 대한 흡광도 파장이 620부터 720nm 사이에서 측정되는 특징을 이용하여 색소침착 검출 방법을 제안하였다. 제안 방법에서 적용한 RGB 칼라 모델은 $CIE\,RGB$ 색 공간에서 R의 파장이 600부터 720nm 사이에서 피크점(peak point)을 가지므로 R 성분영상을 이용한 멜라닌 추정이 효과적임을 알 수 있다. 따라서 이러한 특징을 기반으로 본 논문에서는 RGB 칼라 모델의 R 성분영상을 이용한 색소침착 검출 방법을 제안하였으며, 3장에서 기술하였다. 먼저 R 성분영상을 기하평균으로 정규화 한 후 멜라닌 검출을 위한 인덱스 영상 MI를 구한다. 획득한 MI영상의 밝기를 평활화하고, 임계값 100의 값으로 이진영상을 획득하여 최종 색소침착 영역을 검출하였다. 4장에서 $CIE\ L^*a^*b^*$ 칼라 모델의 L^*-b^* 평면을 이용하는 기존의 방법과 제안하는 방법의 색소침착 검출 결과를 비교하였으며, 실험 결과 제안하는 색소침착 검출 방법이 강인함을 보였다.

향후, $YCbCr$과 HSV 칼라 모델 기반의 색소침착 검출 연구와 다양한 조도 환경에서 검출의 정확도를 향상시키는 연구를 계속하고자 한다. 또한 색소침착 이외의 여드름, 기미, 잡티, 주름 등과 같은 피부 질환의 분석과 스마트폰을 이용한 피부분석 시스템을 구현하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2017년도 산학연협력 기술개발사업(No. C0563933)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

[1] J. D. Kim and J. E. Seol, “A Study on the State of Acne Awareness and Care,” *The Journal of the Korean Society of Knit Design*, Vol. 13, No. 2, pp. 1-9, June, 2015.

[2] Y. B. Kim, J. H. Baek and B. C. Ahn, “An Implementation of a Skin Care System for Android Phones,” in *Proceedings of International Conference on Embedded Systems, Cyber-physical Systems, & Applications*, pp. 57-61, 2016.

[3] H. S. Shin and Y. S. Park, “A Comparative Analysis on Complexion and Skin Color In 20s-30s and 40s-50s by Frequency of L*a*b Values,” *Journal of Korea Society of Color Studies*, Vol. 29, No. 2, pp. 103-113, May, 2015.

[4] S. Alaluf, D. Atkins, K. Barrett, M. Blount, N. Carter and A. Heath, “The impact of epidermal melanin on objective measurements of human skin colour,” *Journal of Pigment Cell Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 119-126, April, 2002.

[5] L. Duteil, K. Roussel and P. Bahadoran, “Skin Color and Pigmentation”, *Agache’s Measuring the Skin*, Springer, Cham Pub., pp. 1-14, 2016.

[6] Y. Lu, W. Dong, W. Wang, J. Ding, Q. Wang, A. Hui and A. Wang, “Optimal Synthesis of Environment-Friendly Iron Red Pigment from Natural Nanostructured Clay Minerals,” *Journal of Nanomaterials*, Vol. 8, No. 11, pp. 1-17(925), November, 2018.

[7] C. G. Woo, J. H. Kim, K. H. Park and Y. H. Kim, “Effective Acne Detection using Component Image a* of CIE L*a*b* Color Space,” *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 19, No. 7, pp. 1397-1403, July, 2018.

[8] Wikipedia, Melanin [Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Melanin.

[9] L. Yang, S. H. Lee, S. G. Kwon and K. R. Kwon, “Skin Pigmentation Detection Using Projection Transformed Block Coefficient,” *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 16, No. 9, pp. 1044-1056, September, 2013.

[10] A. Chardon, I. Cretoi and C. Hourseau, “Skin colour typology and suntanning pathways,” *International Journal of Cosmetic Science*, Vol. 13, No. 4, pp. 191–208, September, 1991.

[11] G. N. Stamatas, B. Z. Zmudzka, N. Kollias and J. Z. Beer, “Non-Invasive measurements of skin pigmentation in situ,” *Journal of Pigment Cell Research*, Vol. 17, No. 6, pp. 618–626, December, 2004.

[12] L. E. Dolotov, Y. P. Sinichkin, V. V. Tuchin, S. R. Utz, G. B. Altshuler and I. V. Yaroslavsky, “Design and evaluation of a novel portable erythema-melanin-meter,” *Journal of Lasers in Surgery and Medicine*, Vol. 34, No. 2, pp. 127–135, February, 2004.

[13] H. Takiwaki, S. Shirai, Y. Kanno, Y. Watanabe and S. Arase, “Quantification of erythema and pigmentation using a videomicroscope and a computer,” *British Journal of Dermatology*, Vol. 131, No. 1, pp. 85–92, August, 1994.

[14] J. S. Bae, J. H. Jeon, J. Y. Lee and J. O. Kim, “Skin Condition Estimation Using Mobile Handheld Camera,” *ETRI Journal*, Vol. 38, No. 4, pp. 776–786, August, 2016.

[15] Wikipedia, CIE 1931 color space[Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space.

[16] Wikipedia, CIELAB color space[Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/CIELAB_color_space.

[17] N. Kollias and A. Baqer, “On the assessment of melanin in human skin in vivo,” *Journal of Photochemistry and Photobiology*, vol. 43, No. 1, pp. 49 – 54, January, 1986.

박 기 홍(Ki-Hong Park)

2005년: 목원대학교 IT공학과 (공학석사)
2010년: 목원대학교 IT공학과 (공학박사)

2008년~2009년: 방재정보통신지역혁신센터 연구원
2010년~2012년: ㈜인코넥스 책임연구원
2012년~현 재: 목원대학교 융합컴퓨터미디어학부 교수
2014년~현 재: 안전문화운동추진 대전시연합회 생활안전 분과위원장
2015년~현 재: 안전모니터봉사단 대전시연합회 부회장
※관심분야 : 컴퓨터비전, 패턴인식, 영상코덱(H.26x), 항공응용기술, 방재응용기술 등

이 양 선(Yang Sun Lee)

2007년 : 목원대학교 대학원 IT공학과 (공학박사)
2012년 : Graduated School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology (공학박사)

2007년~2009년: ㈜휴메이트 기술연구소
2009년~2011년: 조선대학교 2단계 BK21사업팀 연구교수
2012년~현 재: 목원대학교 융합컴퓨터미디어학부 교수
※관심분야 : 재난안전, IT융합, 차량-IT, IoT, UWB, 전파성능분석, 디지털 무선통신 등