



بررسی عملکرد و اثبات روش ضربی اصلاح نایکنواختی تابش در توصیف رنگی دوربین دیجیتالی

علیرضا محمودی نهاوندی^{۱*}، مهدی صفی^۲

۱- دانشجوی دکترا، گروه پژوهشی نمایش رنگ و پردازش تصاویر رنگی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴
۲- استادیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴
تاریخ دریافت: ۹۲/۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۲/۹/۱۷ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۳/۶/۲۰

چکیده

اخیراً دوربین‌های دیجیتالی رنگی به عنوان ادوات جایگزین برای اندازه‌گیری ظاهر رنگی اجسام مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. با این وجود، استفاده از این دوربین‌ها نیازمند تنظیمات و مهیا نمودن شرایط اولیه است. یکی از مهم‌ترین تنظیمات، کیفیت نورپردازی است که به دلیل نایکنواختی باعث بروز مشکلات فراوان در اندازه‌گیری‌ها خواهد شد. اگرچه در مقالات متعدد از روش تصحیح ضربی برای تصحیح نایکنواختی‌های تابش استفاده شده است، ولی تاکنون در هیچ یک از کارهای انجام شده دلیلی برای اثبات صحت عملکرد این روش ارائه نشده است. در پژوهش حاضر با استفاده از مدل خطی دوربین اثباتی برای مدل تصحیح ضربی ارائه شده است. همچنین اثر روش‌های مختلف تصحیح نایکنواختی تابش، از جمله تصحیح ضربی و جمع‌ی توسط کارت سفید، مقایسه شد و تاثیر تصحیح‌های انجام شده بر روی نتایج حاصل از توصیف کالریمتریک دوربین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تصحیح روی توصیف کالریمتریک دوربین نشان داد که استفاده از روش تصحیح ضربی نتایج مطلوب‌تری را نسبت به روش دیگر ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: دوربین دیجیتال، توصیف کالریمتریک، اصلاح نایکنواختی تابش، اندازه‌گیری رنگ.

Investigating and Proving of Multiplicative Lighting Correction in Color Characterization of Digital Camera

A. Mahmoudi Nahavandi^{*1}, M. Saffi²

¹ Color Imaging and Color Image Processing Department, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

² Color Physics Department, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

Received: 14-04-2013

Accepted: 08-12-2013

Available online: 11-09-2014

Abstract

Digital color cameras are being taken attention for color appearance measurement. However, exploiting these devices needs some device calibrations. One of the most important tunings is the quality of lighting. Inhomogeneous lighting may cause some difficulties in measurements. Although the multiplicative inhomogeneity correction method has been used in many papers, none of them has ever rationalized this method. In this paper multiplicative inhomogeneity correction has been proved using linear model of camera. Moreover the effect of two correction methods including multiplicative and additive methods on the result of characterization of camera has been studied. The results showed that multiplicative correction method gives a better performance comparing other methods. Also, a proof has been given for efficiency of multiplicative correction method. *J. Color Sci. Tech.* 8(2014), 109-115©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Digital camera, Colorimetric characterization, Lighting inhomogeneity correction, Color measurement.

۱- مقدمه

انحرافات از خطی بودن در این وسایل دیده می‌شود. بنابراین برای انجام هرگونه تصحیح یکنواختی تابش، حسگر بایستی خطی شود. معمولاً فرض می‌شود که یک رابطه توانی بین سیگنال‌های واقعی دوربین با آنچه که دوربین به دلیل خطا و نویز ارائه می‌دهد وجود دارد (رابطه ۱).

$$a'_{i(x,y)} = (a_{i(x,y)})^p \quad (1)$$

در رابطه ۱، $a_{i(x,y)}$ پاسخ ظاهری کانال i -ام دوربین در پیکسل (x,y) است. p ثابت توانی و $a'_{i(x,y)}$ پاسخ تبدیل شده دوربین که یک ارتباط خطی با ورودی کانال‌ها دارد، می‌باشد [۳]. معمولاً برای انجام این کار مقدار سیگنال سیاه^۹ حسگر را نیز در نظر گرفته و عملیات خطی‌سازی با استفاده از رابطه ۲ انجام می‌شود. منظور از سیگنال سیاه، سیگنالی است که دوربین پس از گذاشتن درپوش لنز و بدون ورود هیچ نور خارجی، تولید می‌کند.

$$\text{MeanReflectance} = k_{\text{gain},i} (e_i - e_{d,i})^{\gamma} \quad (2)$$

در رابطه ۲، $K_{\text{gain},i}$ برای مقداری ثابت برای کانال i -ام دوربین می‌باشد. e_i سیگنال تولید شده از کانال i -ام و $e_{d,i}$ سیگنال سیاه کانال مذکور می‌باشد. به عبارت دیگر $a_{i(x,y)} = K_{\text{gain},i} \times e_{i(x,y)}$ می‌باشد. γ نیز مقدار ثابت توانی خطی‌سازی می‌باشد. معمولاً بدست آوردن γ با استفاده از یک مجموعه نمونه خاکستری انجام می‌شود و در سمت چپ رابطه ۲ میانگین انعکاس نمونه‌های خاکستری قرار داده می‌شود. خطی بودن معمولاً به عنوان پیش‌فرض استفاده از دوربین در رنگ‌سنجی است و در صورت وجود انحرافات از خطی بودن، خطی‌سازی دوربین انجام می‌شود [۳].

روش‌های متنوعی برای تصحیح نایکنواختی تابش از قبیل فیلترینگ خطی^{۱۰}، فیلترینگ همومورفیک^{۱۱}، فیلترینگ مورفولوژیکی^{۱۲}، حداقل‌سازی آنتروپی^{۱۳} و برازش مدل روشنایی^{۱۴} برای اصلاح نایکنواختی تابش استفاده شده‌اند. این مدل‌ها به ترتیب براساس استفاده از فیلترینگ پایین‌گذر، لگاریتم فیلترینگ پایین‌گذر، کوچک بودن ابعاد نمونه‌ها از تغییرات روشنایی پس‌زمینه، حداقل بودن میزان آنتروپی یک پس‌زمینه هموزن و استفاده از یک مدل بر مبنای آموزش براساس نقاط انتخابی هستند [۵]. در مقالات منتشر شده در حوزه تصویرپردازی رنگی معمولاً تصحیح نایکنواختی نوری با استفاده از تصحیح ضربی انجام می‌شود [۳-۶]. این روش شباهت بسیاری به روش برازش مدل روشنایی دارد. اساس کار اصلاح ضربی بر این اساس

اندازه‌گیری رنگ به صورت صحیح در صنایع مختلف مانند پوشش، نساجی، خودرو، پوست، بافت‌های بدن، دندان و نقاشی‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در موارد متعددی نیاز به تجهیزاتی است که اطلاعات را به صورت غیرتماسی و با دقت مکانی بالا اندازه بگیرد. اگرچه یک اسپکتروفوتومتر می‌تواند به راحتی به منظور پیشگویی رنگ یک سطح تحت هر منبع نوری به کار رود، این وسایل نمی‌توانند اطلاعات مربوط به هر نقطه را به تنهایی اندازه‌گیری کنند. در صورت انجام یک کالیبراسیون و توصیف اولیه، استفاده از یک اسکنر و یا دوربین دیجیتال، امکان تخمین مقادیر محرکه‌های جسم را تحت یک منبع نوری مشخص به صورت صحیح و با دقت مکانی بالا فراهم می‌آورد [۱]. در هر حال استفاده از این ادوات نوظهور با مشکلاتی همراه است. در اسکنرها به علت مسطح بودن محل اسکن کردن نمونه، در صورت وجود انحنا قسمت‌های دور از نشمین نمونه تاریک‌تر از قسمت‌های دیگر اسکن خواهند شد. در نتیجه امکان اندازه‌گیری نمونه‌های غیر مسطح با اسکنرها وجود ندارد. در دوربین‌های دیجیتالی، مشکلات نورپردازی^۱، پدیده سایه روشن لنز^۲، مشکلات عدم تطبیق مکانی بین کانال‌های دوربین^۳ از جمله خطاهایی هستند که می‌توانند دقت اطلاعات رسیده از دوربین را دچار مشکل سازند. همچنین انواع نویزهای تاریکی^۴، خطای برخورد فتون‌ها به حسگر^۵ باعث می‌شوند که حسگر رفتار خطی از خود نشان ندهد و اندازه‌گیری را با مشکل مواجه کند [۲-۴].

یکی از نکات قابل توجه هنگام کار با دوربین اطمینان از تولید سیگنال یکسان برای یک نمونه با یک مجموعه تنظیمات نورپردازی^۶ است. عموماً به دلایل مختلف از قبیل بلوکه شدن توسط عوامل خارجی، عدسی‌های متعدد به کار رفته در ترکیب لنز دوربین، درب‌های لنز^۷، مقدار بازشدگی دیافراگم لنز، کم شدن مقدار عبور لنز در اثر تغییر در زاویه تابش (متناسب با توان چهارم کسینوس زاویه تابش)، رفتار متفاوت عبور اپتیکی ناهمسان قسمت‌های مختلف لنز، تفاوت زاویه‌ای نور رسیده به پیکسل‌های حسگر و همچنین نایکنواختی تابش، پاسخ دوربین در نقاط مختلف حسگر آن برای یک تابش با لومینانس یکسان متفاوت خواهد بود [۲].

حسگرهای بر پایه CCD عموماً خطی هستند. به عبارتی بین پاسخ خروجی دوربین و انرژی رسیده به حسگر آن ارتباط خطی وجود دارد. اما به دلایل متعددی از قبیل نویز ضربه و نور منحرف شده^۸

- 1- Lighting
- 2- Vignetting
- 3- Inter-channel registration
- 4- Dark current
- 5- Shot noise
- 6- Exposure
- 7- Lens hoods
- 8- Stray light

- 9- Dark signals
- 10- Linear filtering
- 11- Homomorphic filtering
- 12- Morphological filtering
- 13- Entropy minimisation
- 14- Fitting a shading model

مشابه روش تصحیح ضریبی، با این تفاوت که مقدار نوسانات سیگنال دوربین با افزودن اختلاف منطقه‌ای کارت سفید از بیشینه سیگنال سفید جبران خواهد شد، پیشنهاد گردید. این روش در رابطه ۴ ارائه شده است.

$$a_{Ci(x,y)} = (a_{W,max} - a_{Wi(x,y)}) + a_{i(x,y)} - a_{Bi(x,y)} \quad (4)$$

در رابطه ۴، $a_{W,max}$ بیشترین مقدار سیگنال دوربین برای کارت سفید است.

دو روش تصحیح ضریبی و جمعی (روش پیشنهاد شده در کار حاضر) برای اصلاح نایکنواختی تابش در توصیف دوربین‌های دیجیتال با یکدیگر مقایسه شدند. همچنین با توجه به اهمیت موضوع نایکنواختی تابش، تاثیر روش‌های فوق بر نتایج توصیف دوربین بررسی شد و نهایتاً اثباتی برای درستی روش بهتر ارائه گردید.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

در تحقیق حاضر، از یک دوربین دیجیتال Canon مدل D500 به منظور تصویربرداری استفاده شد. برای تامین شرایط نورپردازی از یک کابینت نوری ساخته شده در گروه پژوهشی نمایش رنگ و پردازش تصاویر رنگی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش استفاده شد. منبع نوری مورد استفاده منبع نوری التهایبی (CIE A) بود.

۲-۲- روش کار

استفاده از منبع نوری التهایبی به دلیل یکنواختی و نرمی شکل منحنی تابش و همچنین عدم وجود هرگونه نوسانات زمانی در کمیت نور تولید شده بوده است. برای به دست آوردن مقدار جریان سیاه دوربین ابتدا سیستم تنظیم خودکار لنز خاموش شد و یک تصویر بدون برداشتن در پوش لنز گرفته شد. به منظور اجتناب از انجام هرگونه تصحیح توسط خود دوربین و یا نرم‌افزار دوربین، داده‌ها به فرمت خام ذخیره^۲ شد. برای استخراج داده‌های خام از دوربین از نرم‌افزار Imatest 3.8 master استفاده شد. این نرم‌افزار به گونه‌ای تنظیم شد که داده‌ها به صورت خطی، ۴۸ بیتی، بدون اعمال هرگونه تصحیح گاما و بدون نسبت دادن هرگونه فضا رنگ به اطلاعات، به صورت فایل تصویری Tiff استخراج شوند. نمونه‌های Xrite color checker SG به عنوان هدف‌های رنگی انتخاب شدند. اطلاعات انعکاسی نمونه‌های ذکر شده توسط اسپکترومتر Il Gretag Mcbeth اندازه‌گیری شد و مختصات رنگی نمونه‌های تحت مشاهده کننده D65/2⁰ به دست آمدند. بررسی‌های اولیه نشان دادند که داده‌های دوربین مورد استفاده کاملاً خطی است. بنابراین در محاسبات، هیچگونه خطی‌سازی بر روی اطلاعات دوربین انجام نشد.

است که مقدار سیگنال رسیده به دوربین به سیگنال یک سفید ایده‌آل یکنواخت تقسیم شده و مقدار تصحیح شده به عنوان مقدار سیگنال دستگاه محسوب می‌گردد. اساس این تصحیح در رابطه ۳ نمایش داده شده است.

$$a_{i(x,y)}^c = \frac{(a_{W,average} - a_{B,average}) \times (a_{i(x,y)} - a_{Bi(x,y)})}{(a_{Wi(x,y)} - a_{Bi(x,y)})} \quad (3)$$

در رابطه ۳، $a_{W,average}$ ، $a_{B,average}$ ، $a_{Wi(x,y)}$ ، $a_{Bi(x,y)}$ و $a_{i(x,y)}$ به ترتیب میانگین سیگنال دوربین برای کارت سفید، میانگین سیگنال سیاه دوربین، مقدار سیگنال کارت سفید برای پیکسل (x,y) در کانال i -ام، مقدار سیگنال سیاه برای برای پیکسل (x,y) در کانال i -ام، مقدار سیگنال دوربین برای پیکسل (x,y) در کانال i -ام و سیگنال تصحیح شده دوربین برای پیکسل (x,y) در کانال i -ام می‌باشند. روش کار معمولاً این چنین است که ابتدا یک سفید (و یا خاکستری) هموژن مانند کارت خاکستری Xrite [۷] در جلوی دوربین قرار گرفته و یک تصویر گرفته می‌شود. سپس رابطه ۳ در مورد تصویر گرفته شده اعمال می‌گردد. نتیجه این کار حصول یک ضریب اصلاح کننده

$$\frac{(a_{W,average} - a_{B,average})}{(a_{Wi(x,y)} - a_{Bi(x,y)})} \text{ و یک بایاس } \frac{(a_{W,average} - a_{B,average})}{(a_{Wi(x,y)} - a_{Bi(x,y)})}$$

برای تک تک پیکسل‌ها می‌باشد. در مرحله بعد بدون اینکه دوربین حرکتی کند نمونه اصلی را در جلوی دوربین قرار داده و تصویر گرفته می‌شود. ضرایب و بایاس‌های اصلاحی محاسبه شده برای کارت سفید توسط رابطه ۳، همان ضرایب و بایاس‌های مورد نیاز برای اصلاح نایکنواختی تابش برای نمونه مدنظر هستند. برای توجیه کار انجام شده در رابطه ۳ می‌توان این‌گونه عنوان نمود:

در صورتی که منبع نوری کاملاً یکنواخت بوده و سطح نمونه مورد تصویربرداری کاملاً یکنواخت باشد، می‌بایست مقدار سیگنال برای تمام پیکسل‌ها یکسان باشد. در این صورت مقدار $\frac{(a_{W,average} - a_{B,average})}{(a_{Wi(x,y)} - a_{Bi(x,y)})}$ برای تمام پیکسل‌ها برابر ۱ خواهد بود. اما معمولاً مشاهده می‌گردد که مقدار سیگنال‌های وسط تصویر بیشتر از حاشیه تصویر است. کار انجام شده توسط رابطه ۳ به این صورت است که تلاش می‌کند که ضریب ضریبی اصلاح کننده سیگنال برای یک سفید را برای سیگنال تولید شده توسط دوربین، به کار برد. اگرچه تاکنون مقالات این روش را به عنوان روش مناسب برای تصحیح نایکنواختی نوری پذیرفته‌اند اما تا آنجایی که نویسندگان این مقاله مطلعند، تاکنون به دلیل انتخاب این روش برای انجام تصحیح نایکنواختی تابش اشاره‌ای نشده است.

در پژوهش حاضر با استفاده از مدل خطی دوربین اثباتی برای مدل تصحیح ضریبی ارائه شده است. در ادامه روش تصحیح دیگری

2- Raw image

1- Bias

ب: انجام توصیف کالریمتریک با انجام تصحیح جمعی (روش پیشنهادی)

ج: انجام توصیف کالریمتریک با انجام تصحیح ضربی

نتایج حاصل از توصیف رنگی بدون انجام هیچ‌گونه تصحیح در نایکنواختی تابش در جدول ۱ گزارش شده است. دیده می‌شود که خطای توصیف رنگی با کاهش درصد نمونه‌های آزمایش از ۴۰ به ۱۰ درصد باعث بهبود میانگین خطا شده است که البته این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد. چرا که کاهش درصد نمونه‌های آزمایش به منزله افزایش نمونه‌های آموزش بوده که باعث برآزش بیشتر مدل به داده‌ها شده است. همچنین دیده می‌شود که افزایش درجه آزادی رگرسیون باعث بهبود نتایج شده است به گونه‌ای که بهترین نتایج برای داده‌های با نوع رگرسیون نوع ۵ حاصل شده است.

در جدول ۲ نتایج حاصل از تصحیح جمعی ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد که بیشینه خطای به دست آمده بسیار بزرگ است. علت این پدیده در ادامه توضیح داده خواهد شد. همچنین دیده می‌شود که پس از این تصحیح همچنان مقدار کمینه خطا کاهش یافته است. دلیل این موضوع این است در نمودار SG لکه رنگ‌های مشابه در کنار هم قرار گرفته‌اند. این امکان وجود دارد که برای برخی از لکه رنگ‌ها به علت یکنواختی خوب تابش در ناحیه قرارگیری این لکه رنگ‌ها، هیچ‌گونه تصحیح یکنواختی انجام نگرفته و در نتیجه خطای آزمایش کم باشد. باز هم مشاهده می‌شود که استفاده از رگرسیون نوع ۵ بهترین نتایج را نسبت به روش‌های دیگر تولید نموده است.

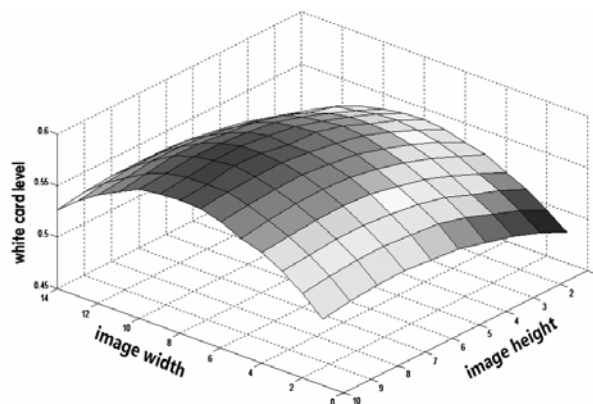
در جدول ۳ نتایج حاصل از تصحیح ضربی ارائه گردیده است. ملاحظه می‌گردد که تقریباً در تمامی حالات نسبت به تصحیح جمعی و بدون تصحیح نتایج، بهبود پیدا کرده است و باز بهترین نتایج در رگرسیون نوع پنجم به دست آمده است.

به منظور توجیه کارایی بهتر مدل تصحیح ضربی از مدل دوربین کمک گرفته شد. خطی بودن مدل دوربین تاکنون توسط مقالات متعددی فرض شده است. همچنین طراحی‌ها و کاربری‌های متنوعی از مدل خطی استخراج شده است [۱۴-۱۰]. رابطه ۵ این مدل را نمایش می‌دهد.

$$a_{i(x,y)} = \int E_{(x,y)}(\lambda) R_{(x,y)}(\lambda) S_{i(x,y)}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

در رابطه ۵، λ طول موج، E مقدار انرژی تابیده شده به نمونه، $R_{(x,y)}$ انعکاس نمونه در نقطه $S_{i(x,y)}$ حساسیت حسگر i ام و $a_{i(x,y)}$ سیگنال کانال i ام دوربین است. در عمل در صورت خطی بودن دوربین، به دلیل وجود خطای سیگنال سیاه رابطه ۵ به صورت رابطه ۶ خواهد آمد.

$$a_{i(x,y)} - a_{B i(x,y)} = \int E_{(x,y)}(\lambda) R_{(x,y)}(\lambda) S_{i(x,y)}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$



شکل ۱: توزیع شدتی کاغذ سفید.

محورهای image width و image height به ترتیب عرض و طول تصویر (منطقه‌بندی شده) است و محور white card level مقدار سیگنال رسیده به حسگر دوربین را نمایش می‌دهد. داده‌های دوربین به بازه [۰، ۱] مقیاس شده‌اند.

تصویر ناشی از نورپردازی انجام شده روی کارت سفید در شکل ۱ نمایش داده شده است. بدیهی است که به دلیل یکنواختی سطح و همچنین به دلیل عدم استفاده از هرگونه تصحیح، نایکنواختی ایجاد شده در تصویر کارت سفید به دلیل نایکنواختی‌های ایجاد شده در اثر لنز و نورپردازی است [۴]. شکل ۱ مقدار این نایکنواختی را در نقاط مختلف یک کاغذ سفید عکاسی نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که وسط تصویر روشن‌تر و اطراف کاملاً تیره هستند به گونه‌ای که مقدار سیگنال از ۰،۶ در وسط به ۰،۵ در کناره‌ها تقلیل یافته است.

برای ارزیابی کارایی روش‌های تصحیح، خطای توصیف رنگی دوربین معیار قرار داده شد. به منظور انجام توصیف رنگی دوربین از روش‌های رگرسیون چندجمله‌ای [۸، ۳] استفاده شد. در توصیف از نسبت‌های مختلف آموزش (۹۰، ۸۰، ۷۰ و ۶۰ درصد نمونه‌ها) و آزمایش (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد نمونه‌ها) استفاده شد. انتخاب نمونه‌های آموزش به صورت تصادفی انجام شد و نتیجه بر روی نمونه‌های آزمایش کنترل شد. نهایتاً از ۱۰ بار اجرا میانگین گرفته شد. به دلیل عدم دسترسی به صفحه خاکستری استاندارد، از یک کاغذ چاپ عکس گلاسه سفید به عنوان جایگزین استفاده شد. به منظور اطمینان از یکنواختی سطح کاغذ انعکاس ۱۵ نقطه مختلف این کاغذ توسط اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد. مقدار عدم اطمینان در سطح ۹۵ درصد برای مختصات رنگی کاغذ $L^* = 96,21 \pm 0,19$ ، $a^* = 1,29 \pm 0,09$ و $b^* = -5,6310 \pm 0,35$ مشاهده می‌شود که کاغذ مورد استفاده یکنواختی قابل قبولی را داراست.

۳- نتایج و بحث

توصیف رنگی دوربین با استفاده از روش رگرسیون چند جمله‌ای [۹] به شرح زیر بررسی شد:

الف: انجام توصیف رنگی بدون انجام هیچ‌گونه تصحیح

$$E(\lambda)_{(x,y)} = K_{(x,y)} E(\lambda)_{\max} \quad (7)$$

لازم به ذکر است که در صورت خطی نبودن دوربین می‌توان مجدداً رابطه ۶ را برای سیگنال خطی شده نوشت. در صورتی که نایکنواختی تابش تنها از حیث شدت باشد می‌توان رابطه ۷ را نوشت:

جدول ۱: نتایج توصیف دوربین بدون استفاده از تصحیح.

انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون*
۴,۶۵	۳,۴۹	۰,۱۴	۲۴,۵۷	۱	۳,۱۸	۲,۸۸	۰,۱۴	۱۰,۴۷	۱
۲,۴۶	۲,۵۷	۰,۰۶	۱۲,۳۷	۲	۳,۳۶	۳,۱۳	۰,۳۱	۱۲,۲۳	۲
۳,۲۶	۳,۰۴	۰,۰۷	۱۵,۴۷	۳	۲,۸۴	۲,۸۶	۰,۲۷	۱۰,۵۶	۳
۲,۹۹	۲,۶۸	۰,۱۱	۱۶,۱۶	۴	۲,۳۶	۲,۵	۰,۲۴	۸,۷۱	۴
۲,۴۵	۲,۶۹	۰,۰۸	۱۰,۸۵	۵	۲	۲,۴۱	۰,۲۲	۷	۵

انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون*
۳,۸۲	۳,۳	۰,۰۶	۲۰,۲۱	۱	۳,۰۳	۳,۲۶	۰,۰۹	۱۱,۵۵	۱
۲,۹۵	۲,۶۵	۰,۰۸	۱۶,۷۳	۲	۲,۶۷	۲,۶۷	۰,۱۴	۱۱,۹	۲
۳,۳	۳,۰۶	۰,۰۹	۱۷,۵۸	۳	۳,۵۵	۳,۲۴	۰,۱۳	۱۵,۴۶	۳
۳,۴۴	۲,۹۱	۰,۰۵	۲۱,۵۶	۴	۳,۲۸	۲,۸۱	۰,۱۱	۱۴,۶۵	۴
۳,۷۷	۳,۱۴	۰,۰۸	۲۰,۰۷	۵	۲,۱۵	۲,۵۱	۰,۱۳	۸,۶۹	۵

*انواع مختلف رگرسیون عبارتند از :

1. [R G B RG RB GB]
2. [R G B RG RB GB RGB 1]
3. [R G B RG RB GB R² G² B²]
4. [R G B RG RB GB R² G² B² RGB 1]
5. [R G B RG RB GB R² G² B² R³ G³ B³ R² G² B² R² G² B² R² G² B² RGB 1]

جدول ۲: نتایج توصیف دوربین با استفاده از تصحیح جمعی.

انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون*
۷۶,۳۲	۳۵,۴۶	۰,۱۴	۳۷۸,۳۱	۱	۵۵,۳۱	۳۰,۸۱	۰,۴	۱۹۴,۰۳	۱
۴۲,۱	۲۱,۸۱	۰,۳۲	۲۰۰,۳۳	۲	۴۳,۵۲	۲۴,۴۷	۰,۹۳	۱۵۵,۰۹	۲
۳۲,۴۴	۱۷,۸۵	۰,۱۴	۱۵۴,۱۱	۳	۲۷,۵۷	۱۶,۸۳	۰,۲۹	۹۶,۰۷	۳
۳۷,۳۴	۱۹,۰۵	۰,۲۱	۱۷۹,۵	۴	۳۰,۳۶	۱۶,۷۵	۰,۳۵	۱۰۸,۰۲	۴
۳,۵۳	۳,۵۱	۰,۰۸	۱۷,۱۴	۵	۲,۳	۲,۶۹	۰,۲۴	۷,۹۸	۵

انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون*
۵۹,۳۷	۲۸,۷۱	۰,۱۱	۳۴۶,۰۱	۱	۵۵,۷۷	۲۷,۷۲	۰,۰۹	۲۵۸,۶	۱
۵۵,۲۸	۲۷,۲۳	۰,۲۳	۲۸۲,۱۹	۲	۵۴,۸۱	۲۹,۰۸	۰,۷	۲۴۵,۲۶	۲
۳۴,۹۱	۱۷,۲۵	۰,۱۲	۱۹۹,۰۴	۳	۳۷,۷۳	۲۰,۲۴	۰,۲۱	۱۶۱,۵۳	۳
۳۶,۹	۱۸,۱۶	۰,۱	۱۸۵,۴۳	۴	۳۰,۸۸	۱۴,۹۸	۰,۳۲	۱۴۲,۰۷	۴
۵,۸۶	۴,۰۶	۰,۱	۳۰,۳۱	۵	۳,۱۱	۳,۲۴	۰,۱۷	۱۳,۶۷	۵

جدول ۳: نتایج توصیف دوربین با استفاده از تصحیح ضربی.

انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون*
۳,۶۲	۲,۶۶	۰,۰۷	۱۷,۰۱	۱	۳,۴۴	۳,۰۳	۰,۱۴	۱۱,۳۵	۱
۳,۱۴	۲,۳۳	۰,۰۴	۱۷	۲	۲,۰۶	۲,۱۲	۰,۱۳	۶,۸	۲
۳,۰۷	۲,۴۴	۰,۰۵	۱۱,۶۵	۳	۲,۵	۲,۳۱	۰,۱۹	۸,۷۸	۳
۲,۱۲	۱,۹۶	۰,۰۵	۹,۰۱	۴	۲,۱۵	۲,۰۱	۰,۱۴	۷,۰۵	۴
۱,۶۶	۱,۵۷	۰,۰۵	۷,۳۷	۵	۱,۵۶	۱,۵	۰,۱۱	۵,۵۲	۵

انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نوع رگرسیون*
۳,۳۵	۲,۵۶	۰,۰۴	۱۶,۴۷	۱	۳,۷۱	۲,۶۷	۰,۱۲	۱۶,۲۱	۱
۲,۵۴	۲,۰۲	۰,۰۳	۱۴,۰۸	۲	۲,۴۷	۲,۱۴	۰,۰۳	۱۰,۰۵	۲
۳,۲۳	۲,۴۹	۰,۰۳	۱۳,۲۷	۳	۳,۲۳	۲,۶۳	۰,۰۴	۱۱,۶۴	۳
۲,۱۷	۱,۹	۰,۰۴	۱۰,۰۱	۴	۱,۹۱	۱,۸۴	۰,۰۸	۷,۶۳	۴
۱,۸۸	۱,۵۸	۰,۰۳	۸,۷۱	۵	۱,۹۷	۱,۶۵	۰,۰۵	۷,۸۲	۵

ساده‌سازی می‌توان رابطه ۱۰ را به دست آورد.

$$\frac{\int R(\lambda)_{S,1} S(\lambda)_i E(\lambda)_{\max}}{\int R(\lambda)_{W,1} S(\lambda)_i E(\lambda)_{\max}} = \frac{\int R(\lambda)_{S,2} S(\lambda)_i E(\lambda)_{\max}}{\int R(\lambda)_{W,2} S(\lambda)_i E(\lambda)_{\max}} \quad (10)$$

چون کارت سفید مورد استفاده یکنواخت است بنابراین $R(\lambda)_{W,2} = R(\lambda)_{W,1}$ می‌باشد. همچنین چون مساله حاضر برای یک جسم یکنواخت است بنابراین $R(\lambda)_{S,2} = R(\lambda)_{S,1}$ می‌باشد. بنابراین دیده می‌شود رابطه ۱۰ همواره صحیح خواهد بود. نکته حائز اهمیت این است که در صورتی که که از ضریب و بایاس محاسبه شده برای کانال i-ام برای هر کانال j-ام نیز استفاده شود، در این صورت باز هم رابطه ۸ همواره برقرار خواهد بود. لازم به ذکر است که می‌توان مسیر طی شده در روابط ۸ و ۹ و ۱۰ را برعکس طی نمود و بدین ترتیب رابطه ۳ اثبات خواهد شد.

برقراری رابطه ۸ به این معنی است که تصحیح انجام شده برای نایکنواختی تابش موجود، مقدار سیگنال دوربین را برای هر دو نقطه دلخواه از نمونه یکنواخت، یکسان خواهد نمود. یکسانی پاسخ دوربین برای نمونه یکنواخت هدف نهایی تصحیح خواهد بود.

در صورتی که نتیجه ناشی از انجام تصحیح رابطه ۳ را برای همان دونقطه ۱ و ۲ نوشته شود، پس از ساده‌سازی به رابطه ۱۱ می‌رسیم.

$$a_{i,1} = a_{i,2} \quad (11)$$

فرض می‌شود که یک جسم یکنواخت در جلوی دوربین قرار داده شده است. در این صورت می‌بایست که نتیجه اعمال تصحیح ضربی مقدار پاسخ دوربین برای هر دو نقطه دلخواه، پاسخ یکسانی را تولید نماید. در حقیقت نتیجه اعمال تصحیح نایکنواختی تابش می‌باید که منجر به پاسخ یکسان دوربین به روی دونقطه متفاوت از یک نمونه هموژن گردد.

با نوشتن رابطه ۳ را برای نقاط دلخواه ۱ و ۲ روی نمونه یکنواخت یاد شده و برابر قرار دادن پاسخ دوربین برای این دو نمونه خواهیم داشت:

$$\frac{(a_{W, average} - a_{B, average}) \times (a_{i,1} - a_{B i,1})}{(a_{W i,1} - a_{B i,1})} = \quad (8)$$

$$\frac{(a_{W, average} - a_{B, average}) \times (a_{i,2} - a_{B i,2})}{(a_{W i,2} - a_{B i,2})}$$

$$\frac{(a_{W, average} - a_{B, average}) \times (K_1 \int R(\lambda)_{S,1} S(\lambda)_i E(\lambda)_{\max})}{(K_1 \int R(\lambda)_{W,1} S(\lambda)_i E(\lambda)_{\max})} = \quad (9)$$

$$\frac{(a_{W, average} - a_{B, average}) \times (K_2 \int R(\lambda)_{S,2} S(\lambda)_i E(\lambda)_{\max})}{(K_2 \int R(\lambda)_{W,2} S(\lambda)_i E(\lambda)_{\max})}$$

که در رابطه ۹ منظور از $R(\lambda)_{S,1}$ ، $R(\lambda)_{S,2}$ ، $R(\lambda)_{W,1}$ و $R(\lambda)_{W,2}$ ، به ترتیب مقدار انعکاس نمونه رنگی مورد آزمایش در نقطه ۱ و در نقطه ۲ مقدار انعکاس کارت سفید در نقاط ۱ و ۲ می‌باشد. پس از

برابر خواهد بود." با تصحیح انجام شده، برقرار شده و در عین حال تصحیح انجام شده قابلیت اجرایی داشته باشد. قطعاً هر رابطه دیگری که به جای رابطه ۳ نوشته شود و گزاره شرطی اشاره شده پس از اصلاح توسط این رابطه برقرار گردد، در صورتی که مصداق فیزیکی داشته باشد، قابل جایگزینی با رابطه ۳ خواهد بود و می‌تواند در صورت صحت عملکرد، به عنوان روش جایگزین تصحیح نایکنواختی تابش مورد استفاده قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

مشکل نورپردازی از جمله مسائل مهم در استفاده از دوربین دیجیتال در علم رنگ است. برای غلبه بر این مشکل، کالیبره کردن سیستم نورپردازی و دوربین با استفاده از یک سفید یکنواخت می‌تواند راه‌گشا باشد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که استفاده از تصحیح ضریبی نایکنواختی تابش نتایج بسیار مطلوبی نسبت به تصحیح جمعی ارائه می‌دهد. استفاده از تصحیح ضریبی با استفاده از مدل خطی دوربین کاملاً قابل اثبات بوده و کاربری آن را در حل مشکل نایکنواختی دوربین توجیه می‌کند. البته می‌بایست توجه داشت که در استفاده از این مدل، دوربین می‌باید خطی شده باشد.

رابطه ۱۱ به این معنی است که بایستی مقدار پاسخ دوربین در کانال i -ام برای نقاط دلخواه ۱ و ۲ قبل از انجام هرگونه تصحیح برابر باشد که البته لزوماً صحیح نیست.

لازم به ذکر است که در صورتی روابط ۶ تا ۱۰ صحیح هستند که دوربین کاملاً خطی باشد و از مدل ارائه شده در رابطه ۶ کاملاً پیروی کند. همان‌گونه که عنوان شد مقدار حداکثر خطای توصیف برای روش تصحیح جمعی نایکنواختی تابش بسیار زیاد است. علت این پدیده را می‌توان به عدم انطباق این روش تصحیح نایکنواختی تابش با مدل دوربین نسبت داد.

به اعتقاد نویسندگان، اگرچه از نظر ریاضی در معادله ۳ جایگذاری هر ترکیب دیگری از ضرایب $a_{B,average}$ ، $a_{W,average}$ ، $a_{W_i(x,y)}$ ، $a_{B_i(x,y)}$ مقدور است، اما نکته حائز اهمیت این است که عبارات مورد استفاده می‌باید عینیت فیزیکی داشته باشد و از نظر فیزیکی معنی‌دار باشند. به بیان دیگر قرار دادن هر تصحیح که منجر به یکسان شدن مقدار سیگنال دستگاه برای دو نقطه - که در مکان‌های متفاوتی از تصویر قرار دارند اما انعکاس برابری دارند- شود، اگرچه شرط مورد نیاز را تامین می‌کند اما ممکن است که تصحیح ریاضی انجام شده از نظر فیزیکی بی‌معنی باشد. به عبارت دیگر می‌باید که گزاره شرطی "به ازای هر دو نقطه با انعکاس یکسان روی نمونه اگر تصحیح ارائه شده در رابطه ۳ انجام شود، آنگاه مقدار سیگنال این دو نقطه پس از تصحیح

۵- مراجع

1. N. Du-Yong, J. P. Allebach, A subspace matching color filter design methodology for a multispectral imaging system. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(2006), 2631-2643.
2. Y. Zheng, S. Lin, Ch. Kambhamettu, J. Yu, Sing Bing Kang Single-Image Vignetting Correction *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(2009), 14.
3. Jon y, H., Acquisition and reproduction of colour images: colorimetric and multispectral approaches, in PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Telecommunications 1999.
4. EOS REBEL Tli EOS 500D, Canon, Editor 2009, Canon Inc.: JAPAN.
5. D. Tomazevic, B. L. F Pernus, Comparative evaluation of retrospective shading correction methods. *J. Microsc.* 208(2002), 212-223.
6. Cheung, V., et al., Characterization of trichromatic color cameras by using a new multispectral imaging technique. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 22(2005), 1231-40.
7. Day, D.C., Filter Selection for Spectral Estimation Using a Trichromatic Camera, in Chester F. Carlson Center for Imaging Science of the College of Science 2001, Rochester Institute of Technology. p. 197.
8. G. Hong, M. R. Luo, P. A. Rhodes, A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling. *Color Res. Appl.* 26(2001), 76-84.
9. J. Y. Hardeberg, Acquisition and reproduction of colour images: colorimetric and multispectral approaches., 1999., Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications: Paris, France. 240.
10. V. C. Yi-Fan Chou, Ch. Li, M. Ronnier Luo, San-Liang Lee. Reflectance recovery using localised weighted method. in CGIV 2012 -- Sixth European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and MCS/10 Vision 12th International Symposium on Multispectral Colour Science. 2012. Amsterdam, the Netherlands: IS&T.
11. V. Babaei, S. H. Amirshahi, F. Agahian, Using weighted pseudo-inverse method for reconstruction of reflectance spectra and analyzing the dataset in terms of normality. *Color Res. Appl.* 36(2011), 295-305.
12. V. Heikkinen, R. Lenz, T. Jetsu, J. Parkkinen, M. Hauta-Kasari, T. Jääskeläinen, Evaluation and unification of some methods for estimating reflectance spectra from RGB images. *J. Opt. Soc. Am. A.* 25(2008), 2444-2458.
13. Zhao, Y. and R.S. Berns, Image-based spectral reflectance reconstruction using the matrix R method. *Color Res. Appl.* 32(2007), 343-351.
14. Valero, E.M., et al., Recovering spectral data from natural scenes with an RGB digital camera and colored filters. *Color Res. Appl.* 32(2007), 352-360.