



مدل های رنگی در پردازش تصویر

از ساختار تصویر دیجیتال تا RGB، HSV و CIELAB

۱	چکیده
۲	مقدمه
۳	۱. مبانی تصویر دیجیتال
۷	۲. سازوکار تشکیل رنگ در تصویر دیجیتال
۸	۳. انواع تصویر و مدل های رنگی
۱۷	۴. کاربرد مدل های رنگی در تصویربرداری پزشکی
۱۸	۵. مقایسه، مزایا و محدودیت ها
۱۹	۶. نکات مهم و کاربردی
۲۰	۷. جمع بندی
۲۱	پرسش های متداول
۲۲	منابع

چکیده

- رنگ یکی از بنیادی ترین مؤلفه های ادراک بصری انسان و یکی از پیچیده ترین ساختارهای قابل تحلیل در پردازش تصویر است.
- تصویر دیجیتال شبکه ای از پیکسل هاست. هر پیکسل در تصویر خاکستری یک مقدار و در تصویر رنگی سه مقدار دارد.
- ابعاد تصویر، عمق بیت و تعداد کانال ها اندازه ی اطلاعات و دقت نمایش شدت را تعیین می کنند.
- رنگ از برهم کنش نور، سطح جسم و آشکارساز شکل می گیرد. مدل رنگی تعیین می کند مقدارهای عددی چگونه سازمان دهی شوند.
- مدل های رنگی سه دسته دارند: افزایشی و کاهشی، روشنایی-کرومینانس و ادراکی.
- در تصویربرداری پزشکی هر مدل کاربرد خاصی دارد؛ برای مثال YCbCr برای فشرده سازی ویدئوی اندوسکوپی و CIELAB برای تحلیل رنگ بافت.

مقدمه

مدل های رنگی در پردازش تصویر مشخص می کنند رنگ هر پیکسل با چه مقدارهایی ذخیره، پردازش و مقایسه شود. انتخاب مدل مناسب، از بخش بندی اشیا تا فشرده سازی ویدئو، بر دقت نتیجه اثر می گذارد. این مقاله با تکیه بر منابع علمی معتبر، یک تحلیل جامع، عمیق و ساختاریافته از مفهوم تصویر، اجزای تصویر، انواع تصویر و مدل های رنگی ارائه می دهد. هدف این مقاله نه تنها معرفی مدل های رنگی، بلکه تشریح رفتار آن ها، بررسی نقاط قوت و ضعف، تحلیل ساختار هندسی و ریاضی و ارائه مثال های عملی و فرمول های دقیق است تا خواننده بتواند درک کاملی از نقش رنگ در پردازش تصویر به دست آورد. این مقاله تلاش می کند تا یک نگاه یکپارچه و چندلایه به رنگ ارائه دهد؛ نگاهی که از سطح نمایشگرها و سنسورها آغاز می شود، به ساختار ریاضی مدل ها می رسد و نهایتاً در ادراک انسان و کاربردهای عملی پایان می یابد.

۱. مبانی تصویر دیجیتال

تصویر چیست؟

تصویر در ساده ترین تعریف، نگاشتی دوبعدی از شدت نور است؛ اما این تعریف تنها سطح ماجراست. در پردازش دیجیتال، تصویر مجموعه ای از نقطه هاست که پیکسل (Pixel) نام دارند و هر کدام دارای اطلاعاتی چندلایه است که از فیزیک نور، ویژگی های سطح، رفتار سنسور، مدل های ریاضی و نهایتاً ادراک انسان تأثیر می پذیرد که از سطح جسم به آشکارساز رسیده است. رفتار پیکسل ها کیفیت، وضوح، رنگ، بافت و معنای تصویر را تعیین می کند.

نور موجی الکترومغناطیسی است که در بازه ی مرئی تقریباً بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر قرار دارد. هر طول موج رنگی متفاوت می سازد، اما تصویر دیجیتال طول موج ها را مستقیم ذخیره نمی کند. آشکارساز دوربین نور را به سیگنال الکتریکی و این سیگنال را به مقدار عددی تبدیل می کند. پس تصویر دیجیتال نمایشی عددی از واقعیت نوری است، نه خود واقعیت.

از دیدگاه ریاضی، تصویر خاکستری تابعی دو بعدی به شکل $I(x,y)$ است؛ (x,y) مختصات پیکسل و I شدت نور است. در تصویر رنگی، این تابع به بردار سه مؤلفه ای تعمیم می یابد:

$$I(x,y) = [R(x,y), G(x,y), B(x,y)]$$

این دیدگاه برای فهمیدن عملگرهای پردازش تصویر، مثل فیلتر، تبدیل و بخش بندی، لازم است.

پیکسل: واحد بنیادی تصویر

پیکسل کوچک ترین واحد قابل نمایش در تصویر دیجیتال است و شدت نور یا رنگ یک نقطه ی مشخص را نگه می دارد. پیکسل ها کنار هم شبکه ای دوبعدی می سازند که ساختار هندسی تصویر را تشکیل می دهد و تحلیل شکل، لبه، بافت و الگو را ممکن می کند.

در تصویر خاکستری، مقدار پیکسل بین ۰ و ۲۵۵ است. ۰ سیاهی مطلق و ۲۵۵ سفیدی کامل را نشان می دهد و سطح روشن تر مقدار بیشتری دارد. در تصویر رنگی، هر پیکسل سه مقدار (R, G, B) دارد و این سه مقدار با هم رنگ نهایی را می سازند. چند مثال:

- پیکسل $(۲۰, ۳۰, ۲۰۰)$ قرمز تیره است، چون مقدار قرمز بسیار بیشتر از سبز و آبی است.
- پیکسل $(۲۰, ۲۰۰, ۲۰)$ سبز روشن است.

- پیکسل (۲۰۰, ۲۰۰, ۲۰۰) خاکستری روشن است، چون هر سه مقدار برابرند. شدت پیکسل‌ها ساختار تصویر را نشان می‌دهد: در لبه‌ی تیز تغییر شدت ناگهانی است، در سطح صاف تدریجی است و در بافت پیچیده الگوهای تکرارشونده می‌سازد.

نمونه برداری و کوانتیده سازی

تصویر دیجیتال، برخلاف ظاهر ساده‌اش، یک ساختار چندلایه است که از اجزای مختلف تشکیل شده و هر جزء نقشی اساسی در شکل‌گیری معنا، کیفیت و قابلیت پردازش دارد. از دید پردازش سیگنال، تصویر دیجیتال سیگنالی گسسته و دوبعدی است که از دو فرایند به دست می‌آید: نمونه برداری مکانی (Sampling) و کوانتیده سازی شدت (Quantization). نمونه برداری تصویر پیوسته را به شبکه‌ای از پیکسل‌ها تبدیل می‌کند. کوانتیده سازی مقدارهای پیوسته‌ی شدت را به سطوح گسسته محدود می‌کند.

این دو فرایند محدودیت‌های اساسی کیفیت تصویر دیجیتال را تعیین می‌کنند.

ابعاد تصویر (رزولوشن)

رزولوشن تصویر یعنی تعداد پیکسل‌ها و معمولاً با دو عدد بیان می‌شود. در 1920×1080 ، عدد اول تعداد پیکسل‌های افقی و عدد دوم تعداد پیکسل‌های عمودی است. این مفهوم با وضوح فضایی (رزولوشن مکانی) سامانه‌ی تصویربرداری یکی نیست. هرچه تعداد پیکسل‌ها بیشتر باشد، تصویر جزئیات بیشتری دارد.

رزولوشن بالاتر یعنی:

- لبه‌ها واضح‌تر هستند.
 - بافت‌ها دقیق‌تر دیده می‌شوند.
 - رنگ‌ها طبیعی‌تر نمایش داده می‌شوند.
 - الگوریتم‌های پردازش تصویر عملکرد بهتری دارند.
- اما رزولوشن بالاتر هزینه‌ی محاسباتی بیشتری هم می‌خواهد.

از دیدگاه نظری، رزولوشن باید با فرکانس‌های مکانی صحنه و معیار نایکوئیست (Nyquist) انتخاب شود. اگر رزولوشن کمتر از حد لازم باشد، الیاسینگ (Aliasing) رخ می‌دهد و الگوهای تکرارشونده نادرست بازسازی می‌شوند. رزولوشن بسیار بالاتر از

نیاز هم بدون افزودن اطلاعات مفید، فقط حجم داده و زمان پردازش را زیاد می کند. در کاربردهای زمان واقعی، تعادل بین رزولوشن و سرعت پردازش کلیدی است.

عمق بیت

عمق بیت تعیین می کند هر پیکسل چند سطح شدت می تواند داشته باشد. تعداد سطوح از این رابطه به دست می آید که در آن n تعداد بیت است:

$$2^n$$

در تصویر ۸ بیتی هر پیکسل ۲۵۶ سطح شدت و در تصویر ۱۰ بیتی ۱۰۲۴ سطح شدت دارد. عمق بیت بیشتر باعث می شود:

- گرادیان ها نرم تر باشند.
- رنگ ها طبیعی تر باشند.
- نویز کوانتیده سازی کمتر دیده شود.
- پردازش دقیق تر باشد.

برای مثال، در تصاویر (HDR) معمولاً عمق بیت ۱۰ یا ۱۲ به کار می رود.

عمق بیت مستقیماً بر نسبت سیگنال به نویز کوانتیده سازی (Quantization Noise) اثر می گذارد. در تصویر ۸ بیتی، خطای کوانتیده سازی می تواند در نواحی با گرادیان ملایم به شکل نواربندی (Banding) دیده شود. در کاربردهای علمی و پزشکی معمولاً عمق بیت بالاتر (۱۲ تا ۱۶ بیت) استفاده می شود تا دقت اندازه گیری شدت نور حفظ شود.

کانال های تصویر

تصویر می تواند یک، سه یا چندین کانال داشته باشد:

- تصویر تک کاناله (خاکستری): هر پیکسل یک مقدار شدت دارد. برای پردازش لبه، تشخیص اشیا و تحلیل بافت به کار می رود و در تصاویر پزشکی، مثل تصویربرداری پرتو ایکس، توموگرافی کامپیوتری (CT) و MRI، مرجع اصلی است.
- تصویر سه کاناله (RGB): هر پیکسل سه مقدار دارد. برای نمایش و بینایی ماشین در کنار پردازش های رنگی استفاده می شود.

- تصویر چندکاناله: هر پیکسل بیش از سه مقدار دارد. برای تحلیل دقیق رنگ، تشخیص تغییر، بازسازی رنگ و پردازش تصاویر تحقیقاتی به کار می رود.

تصاویر چندکاناله دو دسته ی اصلی دارند: چندطیفی (Multispectral) با چند کانال گسسته در بازه های مشخص و فراطیفی (Hyperspectral) با ده ها تا صدها کانال پیوسته و باریک. در این تصاویر هر پیکسل «امضای طیفی» دارد که تشخیص مواد و ترکیبات شیمیایی را ممکن می کند. این ویژگی در سنجش از دور، کشاورزی دقیق، تشخیص ضایعات پوستی و کنترل کیفیت صنعتی کاربرد مهمی دارد.

در تصویر فراطیفی، هر پیکسل بردار طیفی چندبعدی است؛ برای مثال ممکن است ۱۰۰ کانال داشته باشد. تحلیل این بردارها به روش های کاهش بعد، مثل تحلیل مؤلفه های اصلی (Principal Component Analysis | PCA) و یادگیری ماشین نیاز دارد.

۲. سازوکار تشکیل رنگ در تصویر دیجیتال

رنگ چگونه شکل می گیرد؟

رنگ در پردازش تصویر فقط ویژگی ظاهری نیست. رنگ ساختاری چندلایه است که از فیزیک نور، رفتار سطح، ویژگی های آشکارساز و ادراک انسان تأثیر می پذیرد. مدل های رنگی این پدیده ی طبیعی را به داده های قابل پردازش تبدیل می کنند.

وقتی نور به سطح جسم می خورد، بخشی از آن جذب می شود، بخشی بازتاب می شود و بخشی پراکنده می شود. این رفتار به جنس سطح، زاویه ی تابش، شدت نور و ویژگی های محیط بستگی دارد. آشکارساز دوربین نور بازتاب شده را دریافت می کند و به سیگنال الکتریکی تبدیل می کند. سپس این سیگنال به مقدار عددی تبدیل می شود.

مدل های رنگی تعیین می کنند این مقدارهای عددی چگونه سازمان دهی شوند تا رنگ درست نمایش داده شود.

آشکارساز دوربین و آرایه ی بایر

در آشکارساز دوربین، هر پیکسل معمولاً فقط به یکی از کانال های قرمز، سبز یا آبی حساس است. آرایه ای از فیلترهای رنگی، معمولاً با الگوی بایر (Bayer)، روی آشکارساز قرار دارد.

تصویر RGB نهایی با الگوریتم های درون یابی (Demosaicing) از این داده های تک کاناله بازسازی می شود. این نکته برای فهمیدن منشأ نویز رنگی، خطاهای لبه و محدودیت تفکیک پذیری رنگی مهم است.

دسته بندی مدل های رنگی

هر مدل رنگی نگاه متفاوتی به رنگ دارد: بعضی بر ترکیب نور، بعضی بر جذب نور، بعضی بر ادراک انسان و بعضی بر ساختارهای ریاضی پیچیده استوارند. مدل های رنگی را می توان به سه دسته تقسیم کرد:

- مدل های افزایشی و کاهشی: RGB، CMY، CMYK
 - مدل های روشنایی-کرومینانس: YUV، YIQ، YCbCr
 - مدل های ادراکی: HSI، HSV، HSL، CIE XYZ، CIELAB
- در بخش بعد هر مدل با این الگو معرفی می شود: توضیح کلی، اجزاء، کاربردها و فرمول.

۳. انواع تصویر و مدل های رنگی

انواع تصویر:

تصویر باینری

تصویر باینری ساده ترین نوع تصویر است و هر پیکسل آن فقط دو مقدار دارد. اگر شدت پیکسل از آستانه T بیشتر باشد مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می گیرد:

$$I_{\text{binary}}(x, y) = 1 \text{ اگر } I(x, y) > T$$

$$I_{\text{binary}}(x, y) = 0 \text{ اگر } I(x, y) \leq T$$

این تصاویر برای بخش بندی، تشخیص لبه، ماسک گذاری، پردازش منطقی و تشخیص اشیای ساده استفاده می شوند. تصویر باینری معمولاً با آستانه گذاری روی تصویر خاکستری به دست می آید. در کاربردهای پیشرفته تر از آستانه گذاری تطبیقی (Adaptive Thresholding) استفاده می شود که در آن T به صورت محلی و بر اساس آمار همسایگی هر پیکسل تعیین می شود.

تصویر خاکستری

تصویر خاکستری تصویری تک کاناله است که شدت نور را نمایش می دهد و پایه ی بسیاری از الگوریتم های پردازش تصویر است. هر پیکسل مقداری بین ۰ و ۲۵۵ دارد. کاربردهای آن شامل تشخیص لبه، تحلیل بافت، تشخیص اشیای، پردازش پزشکی و تحلیل روشنایی است. تبدیل RGB به خاکستری معمولاً با این فرمول انجام می شود:

$$\text{Gray} = 0.299 R + 0.587 G + 0.114 B$$

این ضرایب بر اساس حساسیت طیفی چشم انسان انتخاب شده اند. در کاربردهای دقیق تر از تبدیل های مبتنی بر فضای رنگی CIE XYZ استفاده می شود که وابستگی طیفی دقیق تری دارد.

تصویر رنگی

تصویر رنگی معمولاً سه کانال (R, G, B) دارد و برای نمایش و پردازش رنگی استفاده می شود. تقریباً همه ی تصاویر دیجیتال رنگی از این ساختار پیروی می کنند. کاربردهای آن شامل تشخیص چهره، تشخیص اشیاء، بخش بندی رنگی، تحلیل کیفیت تصویر، بازسازی رنگ و بینایی ماشین است.

تصویر رنگی مشکلاتی هم دارد: حساسیت به نور، هم بستگی کانال ها، غیریکنواختی ادراکی و ناپایداری در شرایط نوری پیچیده. در شرایط نوری متغیر، کانال های RGB به صورت غیرخطی و وابسته به طیف منبع نور تغییر می کنند و الگوریتم های مبتنی بر RGB در محیط واقعی ناپایدار می شوند. به همین دلیل مدل های رنگی ادراکی توسعه یافتند.

تصویر چندطیفی و فراطیفی

در برخی کاربردهای پیشرفته، تصویر بیش از سه کانال دارد. این تصاویر برای تحلیل علمی، کشاورزی دقیق، سنجش از دور، تشخیص مواد و پردازش صنعتی استفاده می شوند. در این تصاویر، هر کانال یک طول موج خاص را نمایش می دهد. برای مثال، یک تصویر فراطیفی ممکن است ۱۰۰ کانال داشته باشد. در این تصاویر، هر پیکسل یک بردار طیفی چند بعدی است و تحلیل آن ها نیازمند روش های کاهش بعد (مانند PCA) و یادگیری ماشین است.

مدل های رنگی

مدل RGB

RGB یکی از بنیادی ترین مدل های رنگی دیجیتال است و بر ترکیب افزایشی نور استوار است. نور قرمز، سبز و آبی سه مؤلفه ی اصلی آن اند و ترکیبشان رنگ نهایی را می سازد. دلیل این انتخاب ساختار چشم انسان است: شبکیه سه نوع سلول مخروطی دارد که به طول موج های قرمز، سبز و آبی حساس اند. بنابراین RGB علاوه بر مدلی فنی، مدلی زیستی هم هست.

ساختار هندسی RGB مکعبی سه بعدی است. هر محور از ۰ تا ۲۵۵ مقدار می گیرد و هر نقطه ی داخل مکعب یک رنگ است. این مکعب بیش از شانزده میلیون رنگ ممکن دارد و هر رنگ با بردار (R, G, B) نمایش داده می شود.

کاربردهای RGB:

- نمایش تصویر در مانیتورها، دوربین ها و کارت های گرافیکی
- پردازش اولیه ی تصویر در بینایی ماشین

- گرافیک کامپیوتری و بازی ها

فاصله ی رنگی اقلیدسی در RGB از این رابطه به دست می آید:

$$d = \sqrt{[(R1 - R2)^2 + (G1 - G2)^2 + (B1 - B2)^2]}$$

این فاصله با ادراک انسان همخوانی دقیقی ندارد، اما در برخی الگوریتم های ساده ی طبقه بندی رنگ استفاده می شود.

مدل CMY و CMYK

(CMYK و CMY) Cyan-Magenta-Yellow مدل های کاهشی اند و بر جذب نور استوارند. این مدل ها زبان اصلی چاپ صنعتی، بسته بندی و طراحی گرافیک چاپی هستند. رنگ نهایی از میزان جذب نور توسط جوهرهای فیروزه ای، سرخابی و زرد به دست می آید.

اجزای مدل:

- C: فیروزه ای (Cyan)
- M: سرخابی (Magenta)
- Y: زرد (Yellow)
- K: مشکی (Key)

K برای تولید مشکی واقعی، افزایش کنتراست و کاهش مصرف جوهر ضروری است. کاربردهای این مدل ها:

- چاپ صنعتی و بسته بندی
- طراحی گرافیک چاپی
- کنترل کیفیت رنگ در چاپ

فرمول ها با فرض $R, G, B \in [0.1]$ ، تبدیل RGB به CMYK این طور است:

$$K = 1 - \max(R, G, B)$$

$$C = \frac{(1 - R - K)}{(1 - K)}$$

$$M = \frac{(1 - G - K)}{(1 - K)}$$

$$Y = \frac{1 - B - K}{1 - K}$$

مدل YUV و YIQ

YUV و YIQ برای تلویزیون و ویدئو طراحی شدند و بر یک اصل استوارند: چشم انسان به روشنایی بسیار حساس تر از رنگ است. بنابراین مؤلفه Y اطلاعات روشنایی را حمل می کند و مؤلفه های U و V (یا I و Q) اطلاعات رنگ را.

اجزای مدل:

- Y: روشنایی (Luma)
- U و V (یا I و Q): اطلاعات کرومینانس (رنگی)
- کاربردهای این مدل ها:
 - تلویزیون آنالوگ و دیجیتال
 - فشرده سازی ویدئو (MPEG، H.۲۶۴، HEVC)
 - پردازش ویدئو در زمان واقعی
 - تبدیل تقریبی RGB به YUV:

$$Y = 0.299 R + 0.587 G + 0.114 B$$

$$U = 0.493 (B - Y)$$

$$V = 0.877 (R - Y)$$

مدل YCbCr

YCbCr از مهم ترین مدل های رنگی در سامانه های دیجیتال، فشرده سازی تصویر و ویدئو، تلویزیون و دوربین های دیجیتال است. این مدل بر جداسازی روشنایی از اطلاعات رنگی استوار است.

اجزای مدل:

- Y: روشنایی ادراکی
- Cb: انحراف از آبی

- Cr: انحراف از قرمز

کاربردهای YCbCr:

- فشرده سازی JPEG و ویدئو (MPEG، H.264، HEVC)

- پردازش ویدئو در زمان واقعی

- دوربین های دیجیتال و تلفن های همراه

فرمول تبدیل RGB به YCbCr (استاندارد BT.601):

$$Y = 0.299 R + 0.587 G + 0.114 B$$

$$Cb = 128 - 0.168736 R - 0.331264 G + 0.5 B$$

$$Cr = 128 + 0.5 R - 0.418688 G - 0.081312 B$$

مدل HSI

HSI از نخستین تلاش ها برای نزدیک کردن نمایش رنگ به ادراک انسان بود. این مدل رنگ را به سه مؤلفه ی Hue، Saturation و Intensity تقسیم می کند. هدف، جداسازی «نوع رنگ» و «خلوص رنگ» از «روشنایی» است تا الگوریتم ها در برابر تغییر نور پایدارتر باشند.

اجزای مدل:

- Hue (نوع رنگ): زاویه روی دایره ی رنگی

- Saturation (خلوص رنگ): میزان خالص بودن رنگ

- Intensity (شدت نور): میانگین سه کانال RGB

کاربردهای HSI:

- بخش بندی رنگی تحت تغییرات نور

- تشخیص اشیا و چهره

- پردازش تصاویر پزشکی رنگی (اندوسکوپی، پاتولوژی دیجیتال)

فرمول ها با فرض $R, G, B \in [0.1]$:

$$I = \frac{R + G + B}{3}$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} \min(R, G, B)$$

$$H = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2} [(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right)$$

اگر $G < B$ باشد:

$$H = 360^\circ - H$$

مدل HSV

HSV یکی از پرکاربردترین مدل های رنگی در پردازش تصویر، گرافیک کامپیوتری و بینایی ماشین است. این مدل رنگ را به سه مؤلفه Hue، Saturation و Value تقسیم می کند تا نوع رنگ، خلوص رنگ و روشنایی جدا از هم تعریف شوند.

اجزای مدل:

- Hue: نوع رنگ
 - Saturation: خلوص رنگ
 - Value: روشنایی بر اساس بیشینه ی کانال های RGB
- کاربردهای HSV:

- بخش بندی رنگی در بینایی ماشین
 - تشخیص اشیا و ردیابی
 - انتخاب رنگ در نرم افزارهای گرافیکی
- Hue و Saturation در HSV مانند HSI تعریف می شود. Value این طور محاسبه می شوند:

$$V = \max(R, G, B)$$

مدل HSL

HSL رنگ را به سه مؤلفه Hue، Saturation و Lightness تقسیم می کند. تفاوتش با مدل های قبلی در تعریف مؤلفه ی Lightness است.

اجزای مدل:

- Hue: نوع رنگ
 - Saturation: خلوص رنگ
 - Lightness: میانگین بیشینه و کمینه ی RGB
- کاربردهای HSL:

- گرافیک کامپیوتری و انتخاب رنگ
 - برخی الگوریتم های بخش بندی رنگی
- فرمول Lightness:

$$L = \frac{V + m}{2}$$

$$m = \min(R, G, B) \text{ , } V = \max(R, G, B)$$

مدل CIE XYZ

CIE XYZ فضای رنگی خطی و دستگاه مستقل است که بر اندازه گیری ادراکی رنگ توسط چشم انسان ساخته شده است. این مدل اساس همه ی فضاهای رنگی استاندارد و علمی است و چارچوبی ریاضی برای نمایش رنگ بدون وابستگی به نمایشگر، دوربین یا چاپگر می دهد.

اجزای مدل:

- X، Y، Z: توابع وزنی ادراکی که پاسخ چشم انسان به طول موج های مختلف نور را مدل می کنند.
 - Y: روشنایی ادراکی
- کاربردهای CIE XYZ:
- پایه ی علمی برای تعریف فضاهای رنگی دیگر

- کالیبراسیون رنگ در نمایشگرها و چاپگرها
- تبدیل بین فضاهاى رنگى مختلف
- تبدیل RGB (خطی) به XYZ (برای فضای sRGB و نور D65):

$$X = 0.4124 R + 0.3576 G + 0.1805 B$$

$$Y = 0.2126 R + 0.7152 G + 0.0722 B$$

$$Z = 0.0193 R + 0.1192 G + 0.9505 B$$

مدل CIELAB

CIELAB فضای رنگی ادراکی و غیرخطی است که برای نمایش رنگ مطابق با دید انسان طراحی شده است. این مدل رنگ را به سه مؤلفه L^* ، a^* و b^* تقسیم می کند.

اجزای مدل:

- L^* : روشنایی ادراکی (۰ تا ۱۰۰)
- a^* : محور سبز-قرمز
- b^* : محور آبی-زرد
- کاربردهای CIELAB:
 - اندازه گیری دقیق اختلاف رنگ (ΔE)
 - کنترل کیفیت رنگ در چاپ، نساجی و صنایع رنگ
 - تبدیل XYZ به CIELAB:

$$L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

تابع f به این صورت تعریف می شود:

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & t > 0.008856 \\ 7.787 t + \frac{16}{116} & t \leq 0.008856 \end{cases}$$

معیار اختلاف رنگ:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

کاربرد مدل های رنگی در تصویربرداری پزشکی

۴. کاربرد مدل های رنگی در تصویربرداری پزشکی

مدل های رنگی در تصویربرداری پزشکی هم کاربرد دارند. جدول زیر کاربرد هر مدل را نشان می دهد.

مدل	کاربرد پزشکی	توضیح
RGB	تصاویر اندوسکوپی، درموسکوپی و میکروسکوپی رنگی	در تصاویر پرتو ایکس معمولاً فضای خاکستری به کار می رود. برخی سامانه های پیشرفته برای نمایش تفاوت های ظریف تضعیف پرتو از تصویر کاذب رنگ (False Color) استفاده می کنند.
CMYK	چاپ اطلس های آناتومی، تصاویر پاتولوژی و کتاب های تخصصی	تبدیل دقیق RGB به CMYK وفاداری رنگ را حفظ می کند.
YUV	فشرده سازی ویدئوی اندوسکوپی، لاپاراسکوپی، کولپوسکوپی و جراحی های کم تهاجمی	حجم داده بدون افت محسوس کیفیت ادراکی کم می شود. جزئیات روشنایی (Y) برای تشخیص لبه ی بافت ها و عروق حفظ می شود و Cr و Cb با نرخ نمونه برداری کمتر ذخیره می شوند.
HSI	پردازش تصاویر رنگی پزشکی (اندوسکوپی، پاتولوژی دیجیتال)	در تصاویر پرتو ایکس که ذاتاً خاکستری اند مستقیماً کاربرد ندارد. در تصاویر ترکیبی (CT یا MRI با تصاویر رنگی) و کاذب رنگ، Hue و Saturation نواحی خاص را برجسته می کنند.
HSV	تصاویر پوست، ضایعات و عروق	در تصاویر چندوجهی مثل PET و CT با رنگ کاذب، نواحی با متابولیسم بالا را از بافت عادی جدا می کند.
HSL	بصری سازی داده های پزشکی	ممکن است در نقشه های حرارتی روی تصاویر آناتومیک برای تنظیم کنتراست ادراکی استفاده شود.
CIE XYZ	مدیریت رنگ در چاپ تصاویر پاتولوژی، درماتولوژی و اطلس ها	به عنوان فضای واسطه، رنگ را بین دستگاه ها ثابت نگه می دارد. در برخی سامانه های تحلیل بافت، ویژگی های فضای XYZ وابستگی به دستگاه را کم می کنند.
CIELAB	تحلیل رنگ پوست، ضایعات و بافت؛ پاتولوژی دیجیتال	تفاوت رنگی نواحی سالم و بیمار را کمی می کند. در تصاویر ترکیبی مثل PET-CT یا MRI رنگی شده هم استفاده می شود.

۵. مقایسه، مزایا و محدودیت ها

مقایسه ی مدل های رنگی

جدول زیر مدل های رنگی را از نظر دسته، مؤلفه ها و کاربرد اصلی کنار هم می گذارد.

مدل	دسته	مؤلفه ها	کاربرد اصلی
RGB	افزایشی	R, G, B	نمایش تصویر و پردازش اولیه در بینایی ماشین
CMYK و CMY	کاهشی	C, M, Y (و K)	چاپ صنعتی، بسته بندی و طراحی گرافیک چاپی
YIQ و YUV	روشنایی-کرومینانس	Y, I, Q یا Y, U, V	تلویزیون و فشرده سازی ویدئو
YCbCr	روشنایی-کرومینانس	Y, Cb, Cr	JPEG، ویدئو و دوربین های دیجیتال
HSI	ادراکی	H, S, I	بخش بندی رنگی تحت تغییر نور و تشخیص اشیا
HSV	ادراکی	H, S, V	بخش بندی رنگی، ردیابی و انتخاب رنگ
HSL	ادراکی	H, S, L	گرافیک کامپیوتری و انتخاب رنگ
CIE XYZ	ادراکی (رنگ سنجی)	X, Y, Z	مبنای علمی فضاهاى رنگی و مدیریت رنگ
CIELAB	ادراکی	b*, a*, L*	اندازه گیری اختلاف رنگ و کنترل کیفیت رنگ

مزایا و محدودیت ها

این فهرست مزیت و محدودیت اصلی هر خانواده را نشان می دهد:

- RGB: ساده است و پایه ی نمایش دیجیتال. فاصله ی اقلیدسی RGB با ادراک انسان همخوانی دقیقی ندارد و الگوریتم های مبتنی بر آن به نور حساس اند.
- روشنایی-کرومینانس: چون چشم به روشنایی حساس تر است، اطلاعات رنگ را می توان با نرخ نمونه برداری کمتر ذخیره کرد.
- HSV، HSI، HSL: نوع رنگ و خلوص رنگ را از روشنایی جدا می کنند تا الگوریتم ها در برابر تغییر نور پایدارتر باشند.
- CIE XYZ: دستگاه مستقل است و رنگ را بدون وابستگی به نمایشگر، دوربین یا چاپگر توصیف می کند.
- CIELAB: اختلاف رنگ را با ΔE اندازه می گیرد و به دید انسان نزدیک تر است.

۶. نکات مهم و کاربردی

این نکته ها هنگام انتخاب مدل رنگی مهم اند:

- فاصله ی اقلیدسی در RGB را فقط در الگوریتم های ساده به کار ببرید و برای اختلاف رنگ ادراکی از ΔE در CIELAB استفاده کنید.
- برای بخش بندی رنگی تحت تغییر نور، مدل هایی را در نظر بگیرید که رنگ را از روشنایی جدا می کنند، مثل HSI و HSV.
- برای فشرده سازی تصویر و ویدئو از مدل های روشنایی-کرومینانس، مثل YCbCr، استفاده کنید.
- برای ثابت ماندن رنگ بین نمایشگر، دوربین و چاپگر، از فضای واسط CIE XYZ استفاده کنید.
- رزولوشن را با فرکانس های مکانی صحنه و معیار نایکوئیست انتخاب کنید. در کاربردهای علمی و پزشکی عمق بیت ۱۲ تا ۱۶ بیت معمول است.

۷. جمع بندی

تصویر دیجیتال شبکه ای از پیکسل هاست و رنگ آن از نور، سطح جسم و آشکارساز شکل می گیرد. مدل رنگی تعیین می کند این مقادیر چگونه سازمان دهی شوند: افزایشی و کاهشی، روشنایی-کرومینانس یا ادراکی. هیچ مدلی برای همه ی کاربردها بهترین نیست؛ RGB برای نمایش، CMYK برای چاپ، YCbCr برای فشرده سازی، HSV برای بخش بندی و CIELAB برای اندازه گیری اختلاف رنگ مناسب ترند.

در تصویربرداری پزشکی هم هر مدل کاربرد مشخصی دارد، از ویدئوی اندوسکوپی تا چاپ اطلس های آناتومی. برای ادامه، می توانید درباره ی وضوح فضایی (رزولوشن مکانی)، آشکارساز و تصویربرداری پرتو ایکس در واژه نامه ی مدرسه ی ایکس ری بخوانید.

پرسش های متداول

تفاوت RGB و CMYK چیست؟

RGB مدلی افزایشی است و رنگ را از ترکیب نور قرمز، سبز و آبی می سازد. CMYK مدلی کاهشی است و رنگ را از جذب نور توسط جوهرها به دست می آورد؛ به همین دلیل زبان اصلی چاپ است.

چرا مدل های HSI و HSV ساخته شدند؟

این مدل ها نوع رنگ و خلوص رنگ را از روشنایی جدا می کنند. هدف این است که الگوریتم ها در برابر تغییر نور پایدارتر باشند.

تبدیل RGB به خاکستری چگونه انجام می شود؟

معمولاً با رابطه ی $Gray = 0.299 R + 0.587 G + 0.114 B$. این ضرایب بر اساس حساسیت طیفی چشم انسان انتخاب شده اند.

عمق بیت چه اثری دارد؟

عمق بیت تعداد سطوح شدت هر پیکسل را تعیین می کند. عمق بیت بیشتر گرادیان ها را نرم تر می کند و نویز کوانتیده سازی را کم می کند.

چرا فاصله ی اقلیدسی در RGB برای مقایسه ی رنگ دقیق نیست؟

چون با ادراک انسان همخوانی دقیقی ندارد. برای اختلاف رنگ ادراکی از ΔE در CIELAB استفاده می شود.

منابع

• Digital Image Processing, 4th Edition

• docs.opencv.org

