فاعلية التكنولوجيا الرقمية الحديثة فى الترجمة اللونية للصورة السينمائية والتليفزيونية

The effectiveness of advanced digital technology in the color rendition of cinematic and television images

أ.م.د/ أحمد عبد العظيم محمود

أستاذ مساعد بقسم الفوتوغرافيا والسينما والتليفزيون - كلية الفنون التطبيقية – جامعة ٦ أكتوبر

Assist. Prof. Dr. Ahmed Abdel Azem Mahmoud

Assistant Professor, Department of Photography, cinema and Television

Faculty of Applied Arts - October 6 University

ahmedabdelazem.art@o6u.edu.eg

ملخص البحث

إن الترجمة اللونية الجيدة للصورة الرقمية تعتبر أحد أهم عوامل نجاح وسائل الإتصال المرئي بمختلف أنواعه وقد تناولت تكنولوجيا وعلوم الصورة الرقمية المتحركة اللون بشكل كبير منذ بداية ظهورها وحتى الآن حيث بدأت بدراسة وتحليل طبيعة الرؤية البشرية للون وكيفية تأثيره على العين ومدى الإختلاف بينها وبين عدسة الكاميرا فى الترجمة اللونية للموضوعات بمختلف ألوانها ، ومع التطور التكنولوجى الحادث فى الصورة الرقمية المتحركة وتحول اللون إلى الشكل الرقمي أصبحت الكاميرات الرقمية الحديثة قادرة على الترجمة اللونية بأعلى درجة ممكنة بفضل التطور فى أنظمة ووحدات الحساسية الخاصة بها والتى استطاعت نقل وترجمة ملايين الدرجات اللونية لتقديم مدى لونى عريض من خلال شاشات العرض التليفزيونى المختلفة ، والكاميرات الرقمية الحديثة لا تستطيع العمل بشكل جيد بدون توفير الإضاءة الجيدة القادرة على إعطاء الألوان المصورة المدى الطيفى والكمى المناسبين للحصول على الترجمة اللونية الدقيقة وبفضل التطور التكنولوجى فى أجهزة ومصادر الإضاءة الصناعية وبدراسة التوزيع الطيفى وعمق اللون ومؤشر تناسق الإضاءة التليفزيونية ظهرت العديد من المصادر الضوئية الحديثة القادرة على تجسيد اللون بدرجة كبيرة والذى أدى إلى الحصول على الترجمة اللونية الجيدة للصورة التليفزيونية المقدمة ، وبعد الحصول على الصورة التليفزيونية الملونة عالية الدقة هناك العديد من المراحل التى تمر بها الصورة ولكن أهمها على الإطلاق هى مرحلة تكنولوجيا البث التليفزيونى والتى تحولت من طرق البث التقليدية إلى البث الرقمى الذى يحمل العديد من المميزات التى من أهمها الحصول على أعلى درجة جودة وكذا أفضل ترجمة لونية ممكنة ، هذا بالإضافة إلى التطور الخاص بتكنولوجيا اللون فى الصورة السينمائية الرقمية والتى تميزت عن الفيديو التقليدى بدعمها لمجموعة واسعة وعالية الجودة من الألوان .

الكلمات المفتاحية :

الترجمة اللونية – درجة جودة الصورة – الإضاءة – عمق اللون – مؤشر التجسيد اللونى

Abstract:

Color rendition of the digital image is one of the most important factors for the success of the means of visual communication. The technology and sciences of the digital motion image have dealt with color greatly since its inception, as it began with studying the nature of human vision of color and the difference between it and the camera lens in Color rendition, With the technological development in the moving digital image, modern digital cameras have become capable of color rendition to the highest possible degree thanks to the development in their systems and sensors, which were able to transmit and translate millions of shades to provide a

wide color range through various TV screens. Modern digital cameras cannot work well without good lighting capable of giving the pictured colors the appropriate spectral and quantitative range to obtain accurate color rendition, Thanks to the technological development in lighting devices, and by studying the spectral distribution, color depth, and the TV lighting consistency index, many modern light sources have appeared capable of color rendering to a large extent, After obtaining the high-resolution color television image, there are many stages that the image goes through, but the most important one is television broadcasting technology, which has shifted from traditional to digital broadcasting, which carries many advantages, the most important one is obtaining the highest quality level as well as the best translation possible color, in addition to the development of color technology in the digital cinema, which distinguished from traditional video by supporting a wide range of high-quality colors.

Keywords:
color rendition - image quality - lighting - color depth - color rendering index

مقدمة

إن علوم وتكنولوجيا الصورة الرقمية بشتى أنواعها لا تتوقف عند حد معين ويسعى العلماء فى شتى بقاع الارض إلى المزيد من التطور التكنولوجى الذى يحقق أعلى درجات الجودة الممكنة للصورة المعروضة سواء على الجانب التقنى أو الفنى وإنه من الصعب تناول جميع مراحل تلك التطورات التكنولوجية الحديثة فى مجال الصورة المرئية المتحركة لذلك سوف نركز فى هذا البحث على أحد أهم عناصر الصورة الرقمية المتحركة وهو اللون وكيفية الحصول على الترجمة اللونية الجيدة فيها حيث أنه هناك العديد من العوامل التى تتحكم فى كيفية ظهور اللون بداية من طبيعة الرؤية البشرية للألوان والإضاءة المناسبة وأهمية التجسيد اللونى وكذلك الكاميرات التى تستطيع عمل الترجمة اللونية الجيدة وحتى تكنولوجيا عمليات البث الرقمى التى حلت محل البث التقليدى فى العديد من القنوات التليفزيونية هذا بالإضافة إلى تكنولوجيا الترجمة اللونية فى الصورة السينمائية الرقمية الحديثة .

مشكلة البحث

١- إختلاف الخصائص الطيفية لتحديد إشارات اللون الأولية للموضوعات المصورة المحددة بخصائص الإنعكاسات الطيفية وكيفية الوصول إلى أفضل رؤية لونية لها.

٢- كيفية تحقيق أعلى إستفادة ممكنة من الإنتقال إلى مستويات جديدة من جودة الصورة فى دقة التسليم اللونى للموضوعات المصورة.

٣- كيفية الحكم الكمى على دقة عرض اللون للكاميرات الرقمية الحديثة المختلفة.

٤- إعتماد بعض مديرى التصوير على درجة الحرارة اللونية لمصدر الإضاءة فقط فى الحصول على الترجمة اللونية الدقيقة للموضوع المصور والتغاضى عن أهمية مؤشر التجسيد اللونى لمصدر الإضاءة ومؤشر تناسق الإضاءة.

أهمية البحث

ترجع أهمية البحث إلى التعرف على العوامل والمؤثرات المختلفة التى تؤثر على الترجمة اللونية الجيدة للصورة الرقمية المتحركة وكيفية إختيار وإعداد الكاميرات ومصادر الإضاءة المختلفة للحصول على درجة ترجمة لونية ممكنة للموضوعات المصورة.

هدف البحث

إن الهدف الاساس للبحث هو الوقوف على آخر ما توصلت إليه التكنولوجيا الحديثة الخاصة بعلوم الصورة الرقمية المتحركة للحصول على أعلى درجة ترجمة لونية ممكنة وبالتالى الحصول على أعلى درجة جودة ممكنة للنهوض بالصورة التليفزيونية والصورة السينمائية الرقمية على الجانبين الفنى والتقنى.

منهج البحث

يتبع البحث المنهج الوصفى التحليلى القائم على تعريف ووصف وشرح بعض الدراسات المتعلقة بعلوم اللون ومصادر الإضاءة والفروق بين أنظمة الكاميرات الرقمية المستخدمة فى إنتاج الصورتين التليفزيونية والسينمائية الرقمية لمحاولة عرض أنسب الطرق للوصول إلى أعلى درجة ترجمة لونية ممكنة فى الصورة الرقمية المتحركة المقدمة.

التساؤلات البحثية

١- ماهى الفروق بين الخصائص الطيفية لأنظمة كاميرات SDTV و EDTV و HDTV و UHDTV

٢- هل هناك فرق فى دقة عرض اللون بين استخدام قياس الألوان فى CIE 1931 واستخدام قياس الالوان CIE 2006

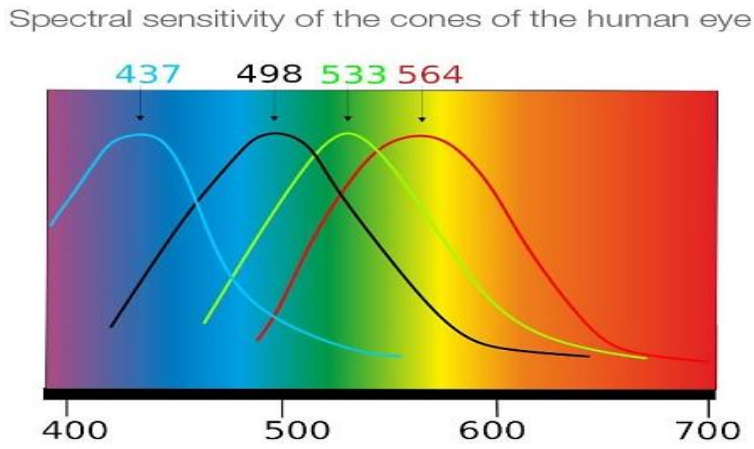
٣- ماهى أهم العوامل التى تؤدى إلى التشوه اللونى فى أنظمة التليفزيون والكاميرات الرقمية المختلفة .

٤- هل الألوان الثلاثة الأساسية تظهر بنفس المظهر للعين البشرية عند نفس النصوع النسبى .

٥- ما هى العلاقة بين التعريض الضوئى وعمق البت والترجمة اللونية فى الصورة الرقمية .

كيفية رؤية الألوان فى العين البشرية

إن اللون هو عبارة عن طيف مرئى للضوء يبدأ بالاحمر وينتهى بالبنفسجى ، والعين البشرية تمتلك آلية فريدة لادراك الألوان حيث تمتلك العين ثباتا طبيعيا لرؤية الأشياء تحت الإضاءات المختلفة وذلك نظرا لطبيعة تكوينها التشريحى حيث أن العين تحتوى على العديد من الخلايا المستقبلة للضوء والموزعة بكثافة فى الشبكية وتنقسم هذه الخلايا بشكل أساسي إلى فئتين الأولى تسمى الخلايا العمودية rods وهى الخلايا المسئولة عن التعرف على درجات الرماديات او إدراك التغييرات فى السطوع وهى خلايا حساسة جدا ولكنها لا تستطيع تمييز الألوان وتقدر بحوالى ١٢٠ مليون خلية ، والنوع الثانى من المستقبلات يسمى الخلايا المخروطية cones وهى الخلايا المسئولة عن إدراك اللون وتكون مابين ٤،٥ إلى ٦ مليون خلية ، وهناك ثلاثة أنواع من الخلايا المخروطية الشكل والتي تتوافق مع أطياف الطول الموجي الطويل والمتوسط والقصير ، وهي ما نسميه غالبًا الأحمر والأخضر والأزرق هذه الخلايا المستقبِلة للضوء تنتج استجابات إجهاد مختلفة للضوء من أطياف مختلفة وبالتالي تحصل على تصورات مختلفة للألوان ، وتقوم مستقبلات cones بالسماح للعقل البشرى باستقبال درجات الالوان من خلال ثلاثة أنواع الأول حساس للضوء الاحمر البرتقالى والثانى للأخضر والثالث للضوء الأزرق البنفسجى ، وعندما يتم تحفيز أحد تلك المستقبلات فإن العقل يدرك اللون المقابل له فإذا تم تحفيز مستقبل اللون الأخضر فإننا نرى اللون الاخضر وإذا تم تحفيز مستقبل اللون الاحمر البرتقالى فإننا سوف نرى اللون الأحمر وإذا تم تحفيزهما معا فإننا سوف نرى اللون الأصفر ، هذه العملية تشبه إلى حد ما طريقة عمل المرشحات وتستجيب العين البشرية فقط لترددات محددة وهى جزأ صغير ويتم تجاهل طيف الترددات الأخرى فلا تستطيع العين رؤيته كما يتضح فى شكل (١) .



شكل رقم (١) يوضح منحنى الحساسية الطيفية للخلايا المخروطية cones في العين البشرية

والعين البشرية لا تستطيع التفريق بين الأصفر الطيفى spectral yellow والمزيج بين الأحمر والاخضر ، ونظرا لهذه الإستجابة الفسيولوجية فإنه يمكن خداع العين لرؤية نطاق كامل للالوان المرئية من خلال التعديل المناسب لثلاثة ألوان فقط وهى الأحمر والأخضر والازرق ومن ثم تعارف على تسميتهم بالالوان الأساسية .

وتتميز العين البشرية بأنها متعددة الاستخدامات بشكل كبير في التكيف بين مصادر الضوء المختلفة حيث أنه إذا تابعت العين شخصًا يرتدي قميصًا أبيض من ضوء النهار إلى مكان مضاء بمصابيح التنجستن ، فإن قميصه لا يزال يبدو أبيض بالنسبة للعين على عكس الكاميرا التى تعكس الخصائص الطيفية الحقيقية للموضوعات المصورة لذلك يجب عمل التصحيحات اللونية لجعل اللون دقيقا للعين البشرية عند تصويره وهذه الدقة لا تعنى بالضرورة الواقع الحقيقى للمشهد المصور ، ولذلك فإن المصورون يفهمون سرعة الحاجة إلى تلوين مصادر الضوء الصحيحة باستخدام المواد الجيلاتينة والمرشحات للتعويض عن الاختلافات والمعروفة باسم اختلاف درجة حرارة اللون بين ضوء النهار ومصادر الإضاءة الصناعية المختلفة لكن في بعض الأحيان لا يكون ذلك

درجة جودة الصورة التليفزيونية وأثرها على الترجمة اللونية

منذ بداية ظهور الصورة التليفزيونية وتسعى التكنولوجيا الخاصة بإنتاج الصورة التليفزيونية إلى الحصول على أعلى درجة جودة ممكنة فى الصورة المعروضة فمنذ العقد الأول من القرن الحادي والعشرين أصبحت معظم كاميرات الفيديو الاحترافية عبارة عن كاميرات فيديو رقمية بدلاً من الكاميرات التناظرية .

وإشارة الفيديو هى عبارة عن تسلسل للصور المتغيرة تسمى الإطارات ويتم الحصول على الفيديو المستمر عن طريق تغيير الإطارات بطريقة أسرع تُعرف باسم معدل الإطارات ، هناك نوعان من أنماط المسح تقدمية ومتشابكة ، في المسح التقدمى يتم مسح كل إطار من معلومات الصورة ضوئيًا بالكامل لإنشاء إشارة فيديو وتُستخدم لشاشات العرض عالية الدقة ، في نمط المسح المتشابك تتم قراءة الأسطر الفردية والزوجية لكل صورة في مسحين منفصلين للحقول الفردية والزوجية على التوالي يتيح ذلك إعادة إنتاج جيدة لحركة المشهد بمعدل مجال منخفض نسبيًا.

هناك أنواع مختلفة من التلفزيون الرقمي والتي تشمل SDTV و EDTV و HDTV و UHDTV وما إلى ذلك ، SDTV تعني تلفزيون رقمي قياسي الوضوح الذي تبلغ نسبة أبعاده ٤: ٣ والصورة ٤٨٠ × ٦٤٠ بكسل مع مسح متشابك ، EDTV هي اختصار لـ Enhanced Definition Television الذي يستخدم المسح التدريجي ينشئ EDTV صورة عامة أكثر سلاسة ويمكن أن يكون لها نسبة عرض إلى ارتفاع ٤: ٣ أو ١٦: ٩.

يوفر التلفزيون عالي HDTV الوضوح دقة عالية بنسبة عرض إلى ارتفاع تبلغ ١٦:٩ تسمح نسبة العرض إلى الارتفاع هذه بمشاهدة أفلام سينمائية العادية و الأفلام ذات الشاشة الأعرض ، وهناك إصدارات مختلفة في HDTV كالتالى :

• (HDTV 720p): يتميز تنسيق HDTV هذا بدقة ٧٢٠ × ١٢٨٠ بكسل مع مسح تدريجي هذا التنسيق مثالي للبرمجة مع الكثير من الحركة نسبة العرض إلى الارتفاع ١٦: ٩.

• (HDTV 1080i): يتميز تنسيق HDTV هذا بدقة أكبر من ٧٢٠ بكسل وهي ١٠٨٠ × ١٩٢٠ بكسل ويستخدم المسح المتشابك نسبة العرض إلى الارتفاع هي نفسها ٧٢٠ بكسل وهي ١٦: ٩ .

• (HDTV 1080p): يستخدم تنسيق HDTV هذا دقة ١٠٨٠ × ١٩٢٠ بكسل ونسبة عرض إلى ارتفاع تبلغ ١٦: ٩ مع المسح التدريجي ، ولا يتم استخدام هذا التنسيق للبث بسبب متطلبات النطاق الترددي العالي وتنسيقات DVD عالية الدقة و Blu-ray الجديدة عالية الدقة قادرة على عرض صورة بدقة ١٠٨٠ بكسل.

يشتمل تلفزيون Ultra High Definition Television على تنسيق 4K UHD وتنسيق 8K UHD هذان نوعان من تنسيقات الفيديو الرقمي بنسبة عرض إلى ارتفاع تبلغ ١٦: ٩ ، وتم اقتراح هذه في البداية من قبل NHK Science and Technology Research Laboratories يتم تحديدها لاحقًا والموافقة عليها من قبل الاتحاد الدولي للاتصالات فيما يلي تنسيقات UHDTV المختلفة:

• 4K UHD أو UHDTV-1: دقة عرض ٣٨٤٠ × ٢١٦٠ بكسل ومن المعروف باسم ٢١٦٠p هذه الدقة هي ٤ مرات من ١٠٨٠ HDTV p.

• 8K UHD أو UHDTV-2: دقة عرض ٧٦٨٠ × ٤٣٢٠ بكسل يُعرف باسم ٤٣٢٠p هذه الدقة هي ١٦ مرة من ١٠٨٠ p HDTV.

والجدول التالى يوضح الفروق بين أنظمة UHDTV ، أنظمة HDTV

Features	HDTV	UHDTV
Full Form	High Definition Television	Ultra High Definition Television
Screen Resolution in pixels	1920 x 1080 1280 x 720	4096 x 2160 (4K UHDTV) 7680 x 4320 (8K UHDTV)
Aspect Ratio	16:9 16:9	16:9
Frame Rate i - Interlaced, p - Progressive	14p, 30p, 60i 14p, 30p, 60i	60p
Pixels per frame	2.1M	8.8M (4K UHDTV), 33M (8K UHDTV)
Megapixels per second	124	531 (4K UHDTV), 1991 (8K UHDTV)
Video Signal Bandwidth needed (Gbps)	3	16 (4K UHDTV), 60 (8K UHDTV)

جدول (١) يوضح الفروق بين أنظمة UHDTV ، أنظمة HDTV

وأدى التطور فى تكنولوجيا الصورة التليفزيونية إلى ظهور السينما الرقمية ، وكاميرا الأفلام الرقمية للتصوير السينمائي الرقمي هي كاميرا فيديو تلتقط اللقطات رقميًا بدلاً من كاميرا الأفلام المستخدمة من قبل ، وتقدم هذه الكاميرات عادةً بوحدات حساسية كبيرة الحجم نسبيًا ، ومعدلات إطارات قابلة للتحديد ، وخيارات تسجيل بنسب ضغط منخفضة أو في بعض الحالات بدون ضغط ، والقدرة على استخدام بصريات عالية الجودة.

وتحدد درجة جودة الصورة التليفزيونية بعدة عوامل وهى :

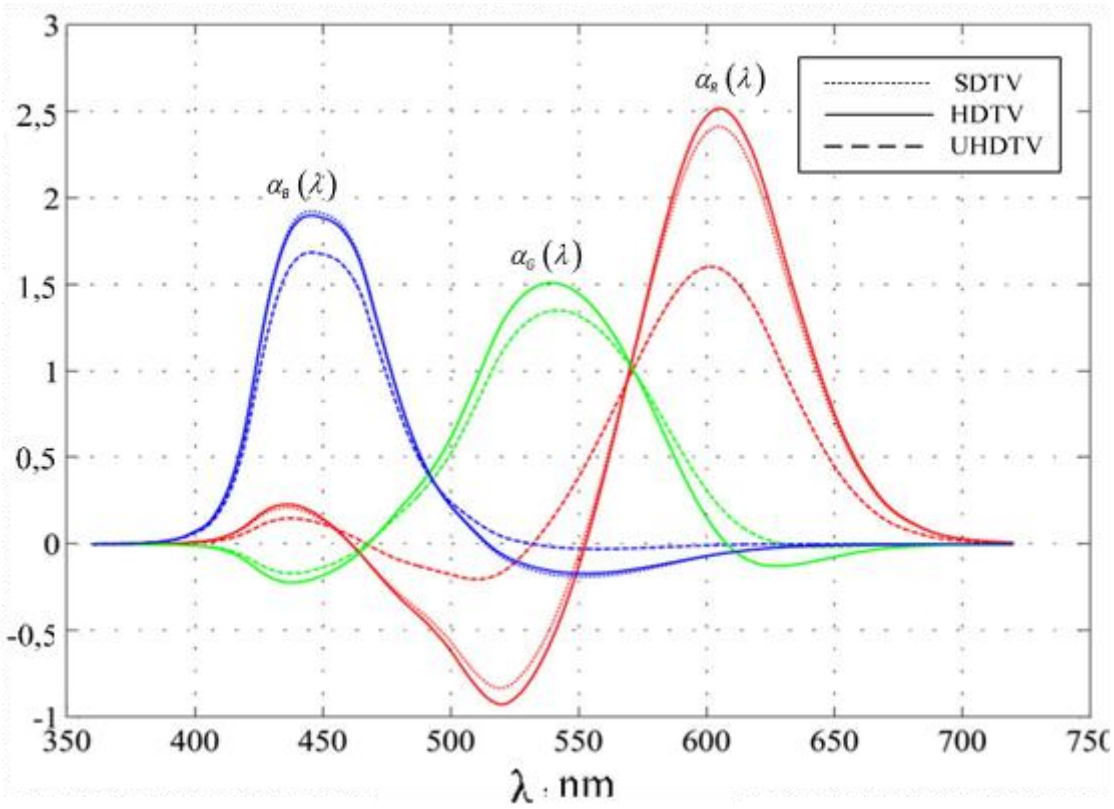
دقة عالية high resolution ، ضغط منخفض low compression ، تشغيل سلس smooth playback ، زمن انتقال منخفض low latency ، ودقة ألوان color accuracy .

يتم النظر في تقييم دقة اللون في أنظمة التلفزيون القياسية والعالية والفائقة الوضوح وفي التطبيقات ذات الصلة اعتمادًا على الخصائص الطيفية للكاميرات ، ويتم عرض نسب الحساب لتحديد الخصائص الطيفية للكاميرات ولتحديد إشارات اللون الأولية للموضوعات المحددة بخصائص الانعكاسية الطيفية بجداول قيم الخصائص الطيفية للكاميرات المثالية ، مما يوفر استنساخًا غير مشوه للألوان ، يتم توفير تقييم تشوه اللون في شكل تحولات نقاط اللون في مساحة ألوان موحدة CAM02-UCS ، بناءً على تنفيذ نموذج مظهر اللون CIECAM02 ، المعتمد من قبل CIE باعتباره النموذج الأكثر مثالية في السنوات القادمة يتم توفير تقييم عدم دقة إعادة إنتاج الألوان للكاميرات ، والتي تطبق قياس الألوان CIE 1931 (وهو أول روابط كمية محددة بين توزيعات الأطوال الموجية فى الطيف المرئى الكهرومغناطيسى والألوان المدركة من الناحية الفسيولوجية فى رؤية الألوان البصرية)، فيما يتعلق بالكاميرات التي تطبق قياس الألوان CIE 2006 ، يتضح أن الانتقال من استخدام قياس الألوان CIE 1931 إلى استخدام قياس الألوان CIE 2006 لن يؤدي إلى زيادة ملحوظة في دقة عرض اللون تم إجراء تقييم دقة عرض ألوان الكاميرات الحقيقية وتبين أن كاميرا SDTV "القياسية" ذات المصفوفة الخطية TECH 3355 مقارنة بالكاميرا المثالية فإنها توفر عمليًا استنساخًا غير مشوه للألوان ، السمة الرئيسية لتقدم أنظمة التلفزيون وتطبيقات الفيديو الأخرى هي الميل إلى الانتقال إلى مستويات جديدة من جودة الصورة وإنشاء وظائف أنظمة جديدة لذلك يتم احتلال دقة تسليم اللون اعتمادًا على الخصائص اللونية للأنظمة ككل ومكوناتها والتي تحدد جودة الصورة اللونية ، وعند الإشارة إلى الجودة اللونية يجب أن تستند إلى تقييم دقة اللون من خلال مسار الضوء إلى الضوء light-to-light path ، نظرًا لأن التشوه اللوني الرئيسي يحدث على جانبي الإرسال والاستقبال أي أنه ينشأ بسبب النقص المحتمل في التوزيع الطيفي لمصادر الإضاءة المستخدمة ، بسبب النقص المحتمل في الخصائص الطيفية للكاميرا وكذلك عدم الدقة اللونية التي أدخلها جهاز إعادة الانتاج التي قد تؤدي إلى معالجة الصور الرقمية في جانبي الإرسال والاستقبال .

إن أحد أهم العوامل المهمة هى خصائص الحساسية الطيفية غير الكافية لقنوات الكاميرا الأولية وهذا يعني أنه عند تقييم دقة اللون لا يمكن استخلاصه من الخصائص الطيفية لانعكاس الموضوعات في المشهد وتشغيل إحداثياتها اللونية فقط وهذا هو السبب في أن نركز على التوزيع الطيفي للكائنات ويقدم مقارنة بين التشوه اللونى للالوان المثالية color distortion of optimal colors وبين مثال للألوان الحقيقية كمجموعة من الوظائف الجاوسية Gaussian functions للطول الموجي للضوء (دالة جاوس هى دالة رياضية تستخدم فى مجال الإحصاء لتعبير عن التوزيع الطبيعى وفى مجال معالجة الإشارة) ويتضح أنه قد يكون هناك الانحراف عن metamerism (في قياس الألوان يعتبر metamerism مطابقة مدركة للألوان مع توزيعات طاقة طيفية مختلفة تسمى الألوان التي تتطابق بهذه الطريقة metamers) ويعرف metamerism أيضا بأنه ظهور مصادر الاضاءة التى تتألف من خليط من الأطوال الموجية المختلفة بنفس اللون ، لكي تكون قادرًا على الحكم الكمي على دقة عرض اللون لكاميرات التلفزيون من الضروري أن تكون قادرًا على مقارنة خصائص

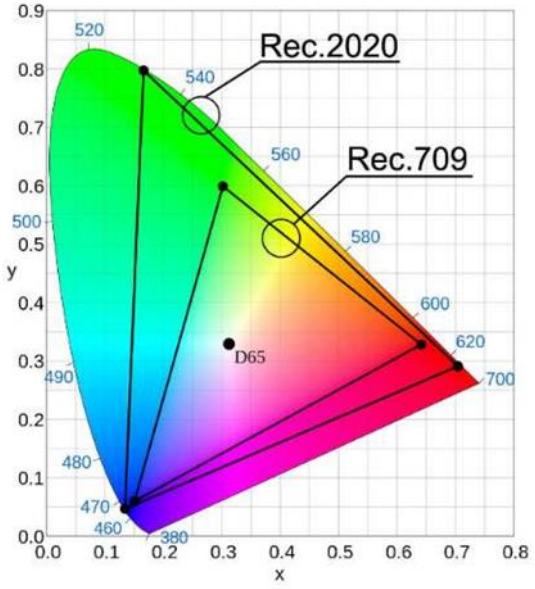
الكاميرات الحقيقية بخصائص الكاميرا المثالية ، والخصائص الطيفية للقنوات الأولية التي من شأنها أن توفر استنساخًا غير مشوه للألوان بغض النظر عن التوزيع الطيفي للكائنات.

وقد تم وضع القيم المحسوبة لخصائص الكاميرات المثالية SDTV و HDTV و UHDTV المقدمة بزيادات قدرها ٥ نانومتر هذه الخصائص تم حسابها مسبقًا من قبل مطوري وباحثين كاميرات التلفزيون واستخدمت في الإدراك المادي للخصائص الحقيقية للتقريب عن طريق إنشاء كاميرات نظام فصل الألوان فى جداول الخصائص الطيفية للكاميرات والشكل البيانى التالى يوضح الفروق بين الترجمة اللونية لهم



شكل بيانى يوضح الفروق بين الترجمة اللونية لأنظمة SDTV و HDTV و UHDTV

يُظهر التقييم المقدم لدقة إعادة إنتاج الألوان لـ "قياسي" كما هو محدد في كاميرا SDTV مقارنة بالكاميرا المثالية أنه مع نظام تصحيح الجاما مع 0,45□□□□ 1 عند جانب إرسال الاشارة ومع تحويل جاما الى 2,4□□□□ فإن استخدام الكاميرا بخصائص الكاميرا "القياسية" ذات المصفوفة الخطية يوفر عرضًا غير مشوه للون عمليًا و تقديم أفضل ألوان يحتوي نظام قياس ألوان colorimetry الخاص بنظام UHDTV على نطاق لوني أوسع من نظام HDTV لأن نقاط الألوان الأساسية الثلاثة الخاصة به يتم تعيينها بأطوال موجية تبلغ ٦٣٠ نانومتر و ٥٣٢ نانومتر و ٤٦٧ نانومتر على الموقع الطيفي لأن الحساسيات الطيفية المثالية محسوبة بالتحويل الخطي لوظائف مطابقة الألوان بناءً علىRec. 2020 وتكون الألوان الأساسية لها فصوص سلبية أقل من تلك الموجودة في Rec.709 كما يتضح فى شكل رقم (٢)



شكل رقم (٢) يوضح الفرق بين المنحنى الطيفى Rec. 2020 و Rec.709

وتعد كاميرات UHDTV أكثر ملاءمة لمحاكاة المواقع الطيفية المثالية باستخدام منشورات ثنائية اللون وبالتالي تم تصميم الحساسيات الطيفية لكاميرا UHDTV لتكون قريبة جدًا من المثالية لأن حساسيتها الطيفية يمكن اعتبارها نموذجية نحو إعادة إنتاج ألوان دقيقة ، وتعد قدرة كاميرا الفيديو على إعادة إنتاج تدرج سلس بين الألوان والظلال عاملاً مهمًا عند السعي لالتقاط صورا رقمية قادرة على الترجمة اللونية الأقرب إلى الواقع ويتم تحديد نطاق الألوان الممكنة التي يمكن لكاميرا الفيديو إلتقاطها من خلال عمق البت bit depth لتنسيق الملف المستخدم في التسجيل لذا يجب علينا التعرف على أهمية عمق البت.

عمق البت bit depth للكاميرات الرقمية

إن جميع كاميرات الفيديو الرقمى تسجل لقطاتها كملفات رقمية ثنائية وتتكون هذه الملفات من أجزاء من البيانات تعرف باسم bits ، والتي يمكن أن تكون إما واحد (1) أو صفر (0) وتتكون صور الفيديو من نقاط لونية تسمى وحدات البكسل pixels ويتم تحديد اللون الخاص لكل بكسل عن طريق مزج كميات مختلفة من الألوان الأحمر والأخضر والأزرق معًا ، ويشير عمق البت Bit depth إلى عدد البيانات وعدد bits المستخدمة لتسجيل قنوات الألوان لكل بكسل .

وبالتالى فإن فيديو 8-bit يعنى أن هناك ملفات فيديو مكونة من ٨ بت يمكن تخزين البيانات الخاصة بها فى شكل أرقام ثنائية (00000000 إلى 11111111) لكل قناة ملونة مما يعطي تباينًا يبلغ ٢٥٦ لونًا لكل قناة ويكون الجمع الناتج المكون من ٢٥٦ لونًا من كل من الأحمر والأخضر والأزرق (٢٥٦ × ٢٥٦ × ٢٥٦) هو ١٦،٧٧٧،٢١٦ لونًا ممكنًا في صورة فيديو 8-bit ، وبالمثل يقدم الفيديو 10-Bit ملفات فيديو مكونة من 10-Bit لتنتج ١،٠٧٣،٧٤١،٨٣٤ لونًا ممكنًا في صورة الفيديو ، كما ينتج الفيديو 12-Bit أكثر من ٦٨ بيليون لون كما يوضح شكل (٣).

هذا وتؤدي زيادة عمق البت أيضًا إلى زيادة حجم الملف حيث يتم تسجيل المزيد من البيانات في حين أن ملف فيديو 10-Bit قد يكون أكبر بنسبة ٢٠ في المائة من ملف 8-bit مكافئ فإن الأول سيعطي أربعة أضعاف مستويات الألوان لكل قناة

شكل (٣) يوضح عدد الألوان فى الانظمة التليفزيونية المختلفة

وجدير بالذكر أن غالبية شاشات وأجهزة التلفزيون وأجهزة العرض الموجودة حاليًا في السوق هي أجهزة 8-Bit ، وتتوفر شاشات فيديو 10-Bit، ولكنها تتطلب سعرًا مرتفعا نظرًا لمواصفاتها الأعلى ، توجد مجموعة محدودة من الشاشات ذات 12-Bit ، مثل الشاشات المرجعية من Dolby ، ولكنها مخصصة للتحرير الاحترافي المتميز ومجموعات تصنيف الألوان.
ومن دراسة طبيعة الرؤية البشرية وجد أن العين تستطيع أن تميز حوالي ١٠ ملايين لون فقط ، لذا في عالم تكون فيه معظم أجهزة العرض 8-Bit وتنتج بالفعل ١٦،٧ مليون لون يأتى السؤال لماذا نحتاج إلى ملفات فيديو ذات عمق بت أعلى؟ وللإجابة على ذلك علينا أن ندرك أنه في العديد من المواقف وفي العديد من التطبيقات ستكون تنسيقات الفيديو ٨ بت جيدة كما أن العمل مع فيديو 10-Bit أو 12-Bit يتطلب سعة تخزين بيانات أكبر وجهاز كمبيوتر أكثر قوة للتعامل مع اللقطات المصورة ومع ذلك فإن قيود 8-Bit الخاصة بوجود ٢٥٦ لونًا فقط لكل قناة لون يمكن أن تنتج نطاقًا لونيًا في مناطق التدرج اللوني مثل السماء الزرقاء بينما سيعطي النطاق الإضافي للظلال (١٠٢٤ مقابل ٢٥٦) في صورة 10-Bit أيضًا مزيدًا من خطوط العرض لتصحيح الإبرازات أو الظلال العميقة في مقطع فيديو منخفض التعريض ، بشكل عام توفر المعلومات الإضافية في لقطات ذات عمق بت أعلى نطاقًا أكبر بكثير لتصنيف الألوان مقارنةً بالمقطع 8-Bit ، حيث يمكن أن تبدأ جودة الصورة في التدهور بسرعة ، لذلك فإنه بمجرد أن تحصل على لقطات ذات 10-Bit متدرجة بالألوان فلن ترغب في العودة إلى ملفات 8-Bit .
يعمل النطاق اللوني المتزايد أيضًا على جعل ملفات الفيديو ذات معدل البت الأعلى أفضل بكثير عند تصوير لقطات شاشة خضراء (الكروما) أو العمل باستخدام المؤثرات الرقمية حيث أنه عادةً ما يتم إنتاج الصور التي تم إنشاؤها بواسطة

الكمبيوتر على أعماق بت أعلى لذلك عند تكوينها بفيديو 8-Bit ، يتم تقليل العناصر المولدة رقميًا إلى عمق بت أقل ويمكن أن تتأثر جودة الصورة.

عمق البت هو جانب واحد فقط من شكل ملف الفيديو حيث تعتمد جودة صورة الفيديوالمسجلة أيضًا على عوامل اخرى مثل عينات الألوان color sampling على سبيل المثال (٤: ٢: ٠) أو (٤: ٢: ٢) أو (٤: ٤: ٤) ومعدل البيانات التي يتم تسجيلها بها لذلك فإن فهم عمق البت سيمكنك من تقييم الكاميرا التي تختارها لوظيفة معينة بشكل أفضل.

نظرًا لدقة إعادة إنتاج الألوان ، فإن خصائص تجسيد اللون الأعلى مطلوبة في الإضاءة لإنتاجUHDTV لذا وجب الانتقال من الإضاءة التقليدية باستخدام المصابيح المتوهجة ومصابيح الفلورسنت إلى إضاءة الصمام الثنائي الباعث للضوء الأبيض (LED)بسبب فعاليتها العالية في الإضاءة بالتزامن مع الانتقال من HDTV إلى UHDTV

الإضاءة التليفزيونية

التلفزيون هو وسيلة لتغيير أنماط الضوء إلى إشارات كهربائية للتخزين أو الإرسال ثم إعادة إنشاء تلك الأنماط على الشاشة ومن أجل القيام بذلك بشكل جيد يجب تزويد كاميرا التلفزيون بمشاهد مضاءة بشكل صحيح وهناك ثلاثة اعتبارات مهمة تحدد مواصفات الصورة التليفزيونية وهي المستوى الكلى للإضاءة ونطاق التباين ودرجة حرارة اللون .

أولا : المستوى الكلى للإضاءة

يتم تحديد مستويات الإضاءة للتلفزيون بشكل عام عن طريق ضبط الضوء الساقط على الموضوعات المصورة ووحدة قياس الضوء الساقط هي شمعة / قدم ، وهي كمية الضوء التي تنتجها شمعة قياسية على مسافة قدم واحدة ، ويتم إجراء قياسات الإضاءة باستخدام جهاز قياس الضوء الساقط ، ولقياس الضوء الساقط الجيد للصورة التلفزيون يتم وضع الجهاز بالقرب من الموضوع المراد تصويره وتوجيهه نحو الكاميرا ، ويعتمد المستوى الأدنى المقبول للتلفزيون الملون على قدرة العدسة على نقل الضوء إلى الكاميرا وكذلك مدى حساسية وحدة الحساسية الخاصة بالكاميرا ومقدار عمق المجال الذي تحتاجه وللحصول على صور عالية الجودة نحتاج إلى ما بين خمسين ومائتي شمعة قدم.

ثانيا : نطاق التباين

يشير التباين إلى الاختلاف في السطوع من أكثر المناطق إظلاما إلى أكثرها إضاءة ، وإشارات الفيديو الرقمية الشائعة هي ٢٤ بت ملونة ، مع ثمانية بت لكل منها باللون الأحمر والأخضر والأزرق يسمح هذا المخطط لـ ٢٥٦ لونًا فرديًا من الظلام إلى الفاتح لكل لون ونظرًا لأن لون ٢٤ بت يسمح بأكثر من ستة عشر مليون لون ، فإن العدد المحدود من الظلال المتاحة لكل لون لا يمثل مشكلة عادةً ، على الرغم من أن خطوات النصوع قد تكون مرئية في المشاهد أحادية اللون ، وإذا كان هناك تباين ضئيل للغاية فستنتج العديد من أجهزة الاستقبال صورة مسطحة رمادية وإذا كان هناك تباين كبير جدًا فستفقد التفاصيل في أكثر أجزاء الصورة سطوعًا وظلامًا وستبدو الصورة قاسية جدًا.

ثالثا : درجة الحرارة اللونية لمصدر الإضاءة

كل مصدر ضوئى له لون مميز يرتبط هذا اللون بدرجة حرارته اللونية وتميل درجات حرارة اللون المنخفضة إلى اللون الأحمر أو البرتقالي بينما تميل درجات الحرارة المرتفعة إلى اللون الأخضر أو الأزرق ، وتُقاس درجات حرارة اللون بالدرجات كلفن .

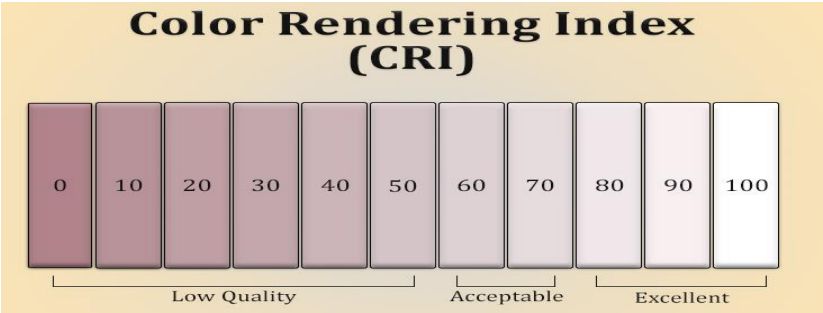
وبالنسبة للرؤية البشرية فإن العين تتذكر كيف يفترض أن تبدو الأشياء وتفسر اللون وفقًا لذلك بغض النظر عن درجة حرارة اللون لمصادر الإضاءة فتبدو الورقة البيضاء بيضاء سواء تم عرضها تحت مصباح متوهج أو ضوء الشمس ،

ويمكن للعين أيضًا ضبط "اللون الصحيح" عند وجود مصدرين للضوء بألوان مختلفة في نفس المشهد ، فضوء الشمس المتدفق إلى غرفة مضاءة أيضًا بواسطة المصابيح المتوهجة لا يجعل الأشياء التي تصطدم بها تبدو مزرقة ، وذلك على عكس كاميرات التلفزيون والتى يجب إعدادها لتقديم اللون بطريقة ترضي العين حيث تُستخدم مجموعة من الفلاتر والتعديلات الإلكترونية لتكييف الكاميرات الملونة مع كل حالة إضاءة جديدة ويمكن ضبط معظم الكاميرات تلقائيًا على درجات حرارة الألوان النموذجية ولكن لا يمكنهم حل التعارضات عند إضاءة عناصر الصورة الرئيسية بدرجات حرارة ألوان مختلفة ، ومع تطور التكنولوجيا الخاصة بالإضاءة والألوان فى الصورة الرقمية المتحركة ظهرت تقنية تسمى إضاءة الحالات الصلبة SOLID-STATE LIGHTING (SSL) وهي نوع من الإضاءة التي تستخدم الثنائيات الباعثة للضوء أشباه الموصلات (LED) ، أو الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (OLED) والتى تخلق ضوءًا مرئيًا مع تقليل توليد الحرارة وتبديد أقل للطاقة .

وقد أدى ظهور هذه التقنية إلى إعادة لتقييم جودة الألوان وظهور طريقة ألوان اختبار اللجنة الدولية للإضاءة International Commission on Illumination (CIE) ، والمعروفة باسم مؤشر تجسيد اللون color rendering index (CRI) ، وقبل أن نتعرف على مؤشر تجسيد اللون يجب ان نتعرف على التجسيد اللونى لمصدر الإضاءة ومدى أهميته فى الترجمة اللونية للصورة الرقمية المتحركة .

تجسيد اللون Color rendering

تجسيد اللون هو مصطلح عام لوصف قدرة مصدر الضوء على توفير معلومات اللون لمراقب بشري عندما تضيء الموضوعات بواسطة هذا المصدر ، ويعرف التجسيد اللونى أو الاداء اللونى Color rendering بأنه هوتأثير الإضاءة على المظهر اللوني للأشياء عن طريق المقارنة الواعية أو اللاواعية مع مظهرها اللوني تحت إضاءة مرجعية ، ومن هنا ظهر مصطلح مؤشر التجسيد اللونى color rendering index (CRI) والذى عرفته اللجنة الدولية للإضاءة (CIE) بأنه مقياس كمي لقدرة مصدر الضوء على الكشف عن ألوان الموضوعات المصورة المختلفة بأمانة مقارنة بمصدر ضوء مثالي أو طبيعي مثل جسم أسود مشع للمصادر ذات درجات الحرارة اللونية المترابطة أقل من ٥٠٠٠ كلفن ، ويتم التعبير عنه كتقييم من صفر إلى ١٠٠ في مؤشر تجسيد اللون (CRI) ، وعن طريقه نستطيع معرفة كيف يجعل مصدر الضوء لون كائن ما يظهر للعين البشرية وكيف يتم الكشف عن الاختلافات الدقيقة في ظلال الألوان ، و كلما زاد تصنيف CRI كانت قدرته على عرض الألوان أفضل كما يتضح فى شكل (٥) ، يُعرَّف المصدر المرجعي الجسم الأسود المشع على أنه يحتوي على CRI يبلغ ١٠٠ وهذا هو السبب في أن المصابيح المتوهجة لها هذا التصنيف لأنها في الواقع عبارة عن أجسام مشعة تقريبا .



شكل (٥) يوضح مؤشر التجسيد اللونى color rendering index (CRI)

ويفضل استخدام مصادر الضوء ذات CRI العالي في التطبيقات ذات الأهمية اللونية مثل الترجمة اللونية الدقيقة للموضوعات المصورة وكذا فى رعاية الأطفال حديثي الولادة أوالترميمات الفنية عالية الدقة ، وغالبًا ما يُطلق على القيمة التي يُشار إليها باسم "CRI" على منتجات الإضاءة المتاحة تجاريًا بشكل صحيح قيمة CIE Ra ، و "CRI" مصطلح عام و CIE Ra هو مؤشر تجسيد اللون القياسي الدولي .

ولا يشير CRI الخاص بمصدر الضوء إلى اللون الخاص بمصدر الإضاءة حيث يتم تقديم هذه المعلومة من خلال درجة الحرارة اللونية لمصدر الإضاءة Correlated Color Temperature (CCT) ، ولكن يحدد CRI عن طريق الطيف الخاص بمصدر الإضاءة التى يكون أعلاها فى المصادر ذات الخرج الطيفى المستمر وأدناها فى المصادر ذات الخرج الطيفى الغير مستمر والجدول رقم (٢) يوضح بعض المصادر الضوئية ودرجة حرارتها اللونية ومؤشر التجسيد اللونى الخاص بها .

Light source	CCT (K)	CRI
Low-pressure sodium (LPS/SOX)	1800	−44
Clear mercury-vapor	6410	17
High-pressure sodium (HPS/SON)	2100	24
Coated mercury-vapor	3600	49
Halophosphate warm-white fluorescent	2940	51
Halophosphate cool-white fluorescent	4230	64
Tri-phosphor warm-white fluorescent	2940	73
Halophosphate cool-daylight fluorescent	6430	76
"White" SON	2700	82
Standard LED Lamp	2700–5000	83
Quartz metal halide	4200	85
Tri-phosphor cool-white fluorescent	4080	89
High-CRI LED lamp (blue LED)	2700–5000	95
Ceramic discharge metal-halide lamp	5400	96
Ultra-high-CRI LED lamp (violet LED)	2700–5000	99
Incandescent/halogen bulb	3200	100

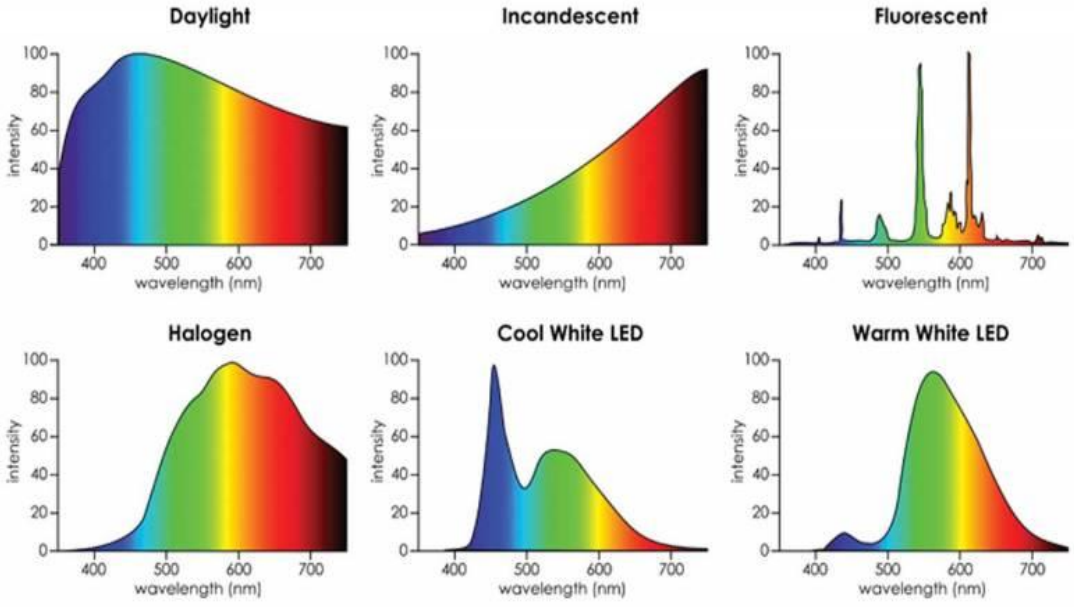
جدول رقم (٢) يوضح بعض المصادر الضونية ودرجة حرارتها اللونية ومؤشر التجسيد اللونى الخاص بها .

الإضاءة والتجسيد اللونى

في عام ١٩٤٨ تم وصف ضوء النهار بأنه المصدر المثالي للإضاءة لتقديم لون جيد لأنه يعرض مجموعة كبيرة ومتنوعة من الألوان كما أنه يجعل من السهل التمييز بين الظلال الطفيفة للألوان من حولنا لتبدو طبيعية .

وفي حوالي منتصف القرن العشرين اهتم علماء الألوان بتقييم قدرة الإضاءة الصناعية على إعادة إنتاج الألوان بدقة وحاول الباحثون الأوروبيون وصف الإضاءة بقياس توزيع الطاقة الطيفية Spectral Power Distribution (SPD) وهو عبارة عن رسم بياني يوضح قوة كل طول موجي من الضوء الناتج عن مصدر ضوء معين في نطاقات طيفية معينة ، بينما درس نظرائهم في أمريكا الشمالية التأثير اللوني للإضاءة على الموضوعات المرجعية ، وقامت CIE بتشكيل لجنة لدراسة الأمر ووافقت على اقتراح استخدام النهج الأخير والذي له ميزة عدم الحاجة إلى قياس الطيف الضوئي مع مجموعة من عيناتMunsell .

وجدير بالذكر أنه لا يمكن تقييم خصائص تجسيد اللون لمصدر الضوء بدقة عن طريق الفحص البصري لمصدر الضوء أو عن طريق الفحص السريع لتوزيع الطاقة الطيفية (SPD) لذلك يجب استخدام إجراء حساب مؤشر تجسيد اللون (CRI) وحاليًا مقياس تجسيد اللون الوحيد المعترف به (CIE 1986, 1995) وهو مستخدم عالميًا من قبل صناعة الإضاءة ، ومع ذلك تم اقتراح العديد من الطرق الأخرى لقياس خصائص عرض اللون لمصادر الضوء الكهربائية (Guo and Houser 2004). ، كل هذه الطرق بما في ذلك CRI ، لها قيود في توصيف الجوانب المختلفة لإدراك اللون المرتبط بتجسيد اللون على سبيل المثال ، الوضوح ، التمييز ، الطبيعة ، ويوضح الشكل رقم (٦) الفروق بين مصادر الإضاءة المختلفة و المنحنى الطيفى لها .



شكل (٦) يوضح الفروق الطيفية بين مصادر الإضاءة المختلفة .

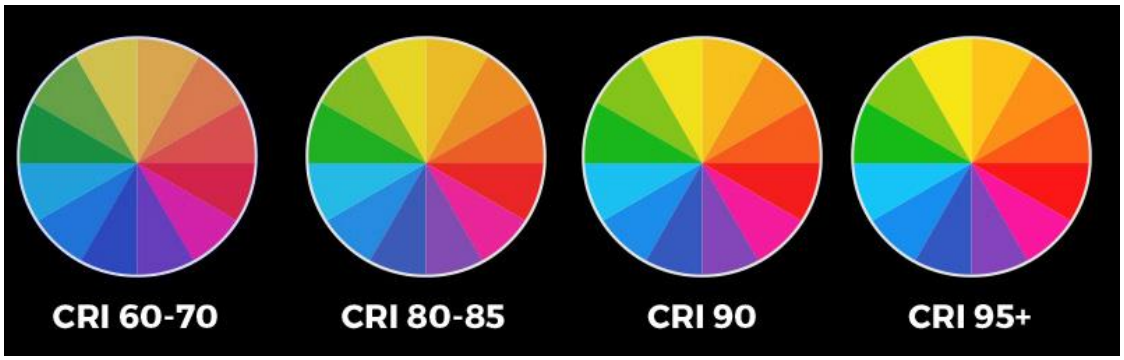
وقد تمت مناقشة ثلاثة مقاييس لعرض الألوان كل منها يؤكد على جانب مختلف قليلاً من عرض اللون وهى : مؤشر تجسيد اللون (CRI) ، مؤشر الطيف الكامل Full-spectrum index (FSI) ، ومنطقة التدرج اللوني Gamut area (GA) .

مؤشر تجسيد اللون (CRI) هو مقياس يستخدم على نطاق واسع لوصف دقة الألوان ويتم حسابه كمتوسط درجة على ٨ عينات ألوان (تسمى TCS أو عينات ألوان الاختبار) ، مع ٧ عينات ألوان إضافية لمقياس CRI (e) الممتد كل من هذه الدرجات تسمى Ri ، حيث تمثل i رقم TCS على سبيل المثال فإن R9 هي درجة لون أحمر غامق يشار إليها بشكل شائع وهي مؤشر مهم لجودة اللون للعديد من التطبيقات كما يتضح من جدول (٣) ، ومع تطوير مصادر ضوء جديدة وخاصة الصمامات الثنائية الباعثة للضوء (LED) ستكون هناك حاجة إلى أكثر من مقياس واحد لتقييم إمكانات عرض اللون لمصدر الضوء.

Test color samples			
Name	**Appr. Munsell**	**Appearance under daylight**	**Swatch**
TCS01	7,5 R 6/4	Light greyish red	
TCS02	5 Y 6/4	Dark greyish yellow	
TCS03	5 GY 6/8	Strong yellow green	
TCS04	2,5 G 6/6	Moderate yellowish green	
TCS05	10 BG 6/4	Light bluish green	
TCS06	5 PB 6/8	Light blue	
TCS07	2,5 P 6/8	Light violet	
TCS08	10 P 6/8	Light reddish purple	
TCS09	4,5 R 4/13	Strong red	
TCS10	5 Y 8/10	Strong yellow	
TCS11	4,5 G 5/8	Strong green	
TCS12	3 PB 3/11	Strong blue	
TCS13	5 YR 8/4	Light yellowish pink	
TCS14	5 GY 4/4	Moderate olive green (leaf)	

جدول رقم (٣) يوضح عينات اختبار الألوان

ويتراوح مؤشر تجسيد اللون (CRI) لمصابيح الفلورسنت من حوالي ٥٠ للأنواع الأساسية وحتى حوالي ٩٨ لأفضل نوع متعدد الفوسفور ، تحتوي مصابيح LED النموذجية على CRI يبلغ ٨٠ أو أكثر ، بينما يزعم بعض المصنّعين أن مصابيح LED الخاصة بهم قد حققت CRI حتى ٩٨ ، ويوضح ذلك سبب ظهور الموضوعات بألوان غير مشبعة وباهتة عند التصوير بالإضاءة البرتقالية الخاصة بالطرق والتى تحمل قيمة CRI ٢٠ ، ويوضح شكل (٧) تأثير تغيير قيمة CRI على الألوان المختلفة .



شكل (٧) يوضح تأثير تغيير قيمة CRI على الألوان .

وبشكل عام تتميز إضاءة LED البيضاء بتجسيد ألوان أقل من المصابيح المتوهجة بسبب توزيع الطاقة الطيفية الغير متساوى نظرًا لوجود مقايضة أساسية بين خاصية تجسيد اللون color-rendering property والفعالية الضوئية للإضاءة luminous efficacy of lighting وللتغلب على هذا العيب تقدمت إضاءة LED البيضاء في السنوات الأخيرة وقد تم تطوير العديد من مصابيح LED البيضاء حتى الآن وتم تصنيفها إلى أربعة أنواع كما هو موضح في الجدول رقم (٤)

Type	Source LEDs	Phosphors	Color rendering property	Luminous efficacy
1	Blue LED	Yellow phosphor	Low	Very high
2	Blue LED	Red and green phosphors	High	High
3	Near-ultraviolet LED	Red, green and blue phosphors	Very High	low
4	Red, green, blue LEDs	none	Low	Low

جدول رقم (٤) يوضح أنواع إضاءةLED

تُستخدم مصابيح LED البيضاء من النوع ٤ بشكل أساسي لإضاءة المسرح لتغيير لون السيكلوراما ، ولديها أداء ضعيف للون وفعالية مضيئة بسبب النطاق الترددي الضيق لكل من أطياف الانبعاث الثلاثة المكونة وكفاءة التحويل الكهروضوئية المنخفضة لمصابيح LED الخضراء لذلك استبعدنا النوع ٤ من مصابيح LED البيضاء في هذه الدراسة
تعتبر الأنواع ١ و ٢ و ٣ التي يشار إليها باسم إضاءة LED البيضاء المحولة من الفوسفور بمثابة الاتجاه السائد والاساسى لإضاءة LED البيضاء ، والنوع الاول هو الأكثر استخدامًا حاليًا في الأغراض الموجهة نحو فعالية الإضاءة مثل الإضاءة الخارجية ولكن تجسيد لونها أقل شأنا والنوع ٣ هو الأكثر فعالية في تحسين خصائص تجسيد اللون لمصدر الضوء ومع ذلك فإن كفاءتها المضيئة منخفضة ويقتصر استخدام هذا النوع على حالة تقييم اللون الدقيق مثل إضاءة المتاحف أو الاغراض الطبية فى المستشفيات ومن الصعب إنتاجه لأغراض الإنتاج التليفزيونى لقلة كفاءته الضوئية و في المقابل يمكن أن تحصل إضاءة LED البيضاء من النوع الثانى على فعالية إضاءة أعلى من إضاءة LED البيضاء من النوع الثالث ولها خصائص عرض ألوان أفضل من إضاءة LED البيضاء من النوع الاول لذلك فهى الاكثر شيوعا واستخداما فى الإضاءات التليفزيونية

إن إضاءة LED أعلى تكلفة من إضاءة التنجستين ولكنها بأى حال أقل تكلفة من إضاءة HMI Hydrargyrum Medium arc Iodide كما أنها تتفوق عليها من الناحية العملية من حيث عدم شراء لمبات بشكل دورى وعدم ارتفاع درجة حرارة المصدر الضوئى وعدم وجود زجاج قابل للكسر وعدم وجود وصلات كبيرة يمكن احتراقها نظرا للقدرة الكهربية العالية المطلوبة للتشغيل مما جعل إضاءات LED تقتحم وبقوة مجال العمل التليفزيونى والسينمائى .

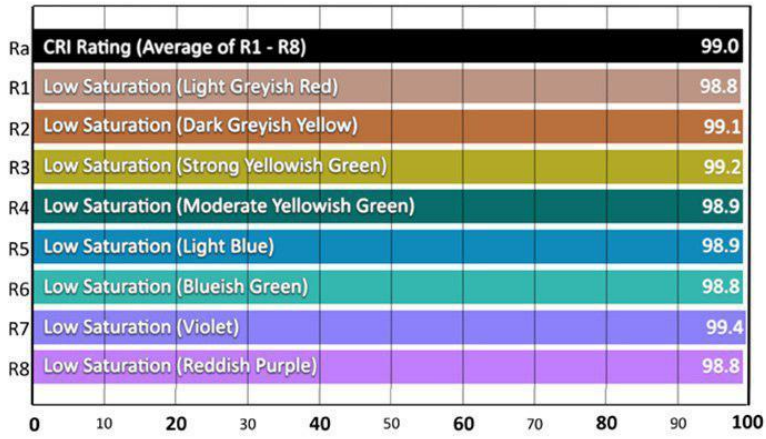
أتاحت التطورات في تقنية الفوسفور لمصابيح الفلورسنت ومصابيح التفريغ عالي الشدة (HID) التقدم بشكل كبير في تجسيد اللون ومن المفاهيم الخاطئة الشائعة أن جميع مصابيح الفلوريسنت محايدة أو باردة في مظهر اللون ولا تتمتع بقدرة جيدة جدًا على عرض الألوان يرجع هذا إلى حد كبير إلى حقيقة أن المصباح الفلوري "الأبيض البارد" كان معيار الصناعة تاريخياً حيث أنها تعطى درجة حرارة لونية ٤٢٠٠ كلفن وتصنيف سيئ.(62) CRI هذا ببساطة لم يعد هو الحال حيث أنه فيما يتعلق بالألوان توفر مجموعة متنوعة من مصابيح الفلورسنت (T12 ، T8 ، T5 ، إلخ) باستخدام تقنية الفوسفور الأرضية النادرة أداءً فائقًا للألوان (يصل إلى ٩٥) ومجموعة واسعة من خيارات درجة حرارة اللون من ٢٧٠٠ كلفن إلى ٥٠٠٠ كلفن وما فوق.

جدير بالذكر أنه على عكس العين البشرية فإن الكاميرات الملونة حساسة في الجزء القريب من الأشعة تحت الحمراء (IR) من الطيف يمكن أن يتسبب هذا في ظهور الصورة بشكل غير طبيعي عند استخدام كاميرا ملونة والتصوير بالضوء الأبيض ، مثل الضوء الطبيعي أو مصدر ضوء واسع النطاق ينبعث من الأشعة القريبة من الأشعة تحت الحمراء ، من الضروري حجب الضوء القريب من الأشعة تحت الحمراء للحصول على ألوان طبيعية وواقعية على عكس مرشحات تمرير الأشعة تحت الحمراء القريبة ، فإن مرشحات حجب الأشعة تحت الحمراء القريبة تحجب جميع الأطوال الموجية القريبة من الأشعة تحت الحمراء (وأحيانًا الحمراء) أو المحددة ، هذا مهم بشكل خاص في تطبيقات التصوير الملون لتحسين جودة الصورة يمكن أيضًا استخدام فلاتر كتلة الأشعة تحت الحمراء القريبة مع الكاميرا أحادية اللون لإصلاح المشكلات التي تسببها ظروف الإضاءة الساطعة للغاية ، مثل فحص المعادن المنصهرة ، هذا وقد نمت شعبية مصابيح LED مؤخرًا ، ويرجع ذلك أساسًا إلى خصائصها الموفرة للطاقة وإنتاج الضوء الساطع من حيث CRI لـ LED ، تنتج معظم مصابيح LED درجة من ٨٠ إلى ٩٠ على الرسم البياني على عكس الإضاءة الفلورية التي يمكن أن تخلق مظهرًا غير طبيعي فإن مصابيح LEDمناسبة بشكل أفضل للبيئات الداخلية بصرف النظر عن مؤشر تجسيد اللون يلعب عدد مخرجات اللومن أو الضوء الفعلي المنتج دورًا في الفعالية الإجمالية لمصباح .

الألوان والتجسيد اللونى

تعتمد أجهزة التليفزيون والكاميرات الرقمية والماسحات الضوئية وشاشات الكمبيوتر على النظام الجمعى للالوان (RGB) الذى يتم الحصول فيه على اللون الابيض عند دمج الثلاثة الوان الضوئية الاساسية ، بينما تعتمد طباعة الأوفست والطباعة الرقمية والدهانات والبلاستيك والنسيج والمطبوعات الفوتوغرافية على نظام الألوان الطرحي (CMY / CMYK) الذي يمزج فيه السيان والماجنتا والأصفر للحصول على الأسود ، ويمكن تحليل أى لون طيفى بإستخدام منشور لتحديد قيم الالوان الاساسية الثلاثة به (الأحمر والأخضر والازرق) وذلك فى النظام الجمعى additive color أو تحديد قيم الالوان المكملة (السيان والماجنتا والأصفر) فى النظام الطرحى لذلك فإن طبيعة اللون نفسه تؤثر على مؤشر التجسيد اللونى له عند تصويره وقد تم عمل عدة تصنيفات للألوان ومنهم التصنيف الموضح فى شكل (٨) .

ونلاحظ أن هذا التصنيف مقسم إلى ثمانية ألوان مختلفة من الممكن للضوء أن يملك تصنيف CRI جيد بالاعتماد على هذه الألوان الثمانية ولكنه يمكن أن يبقى له تصنيف منخفض خلف درجات اللون التي ينتجها ، وعلى سبيل المثال قد لا يكون له نتيجة مرتفعة للأحمر المشبع بعمق مما سوف يخفض من جودة عرض اللون الأحمر المشبع، بعض إضائات الـ LED يمكن أن تعرض اختلافات كبيرة في أجزاء مختلفة من طيف اللون عند المقارنة مع التغستين أو ضوء النهار لذا من الضروري النظر وراء الألوان الثمانية القياسية عند تحليل إضائات الـ LED بشكل خاص.

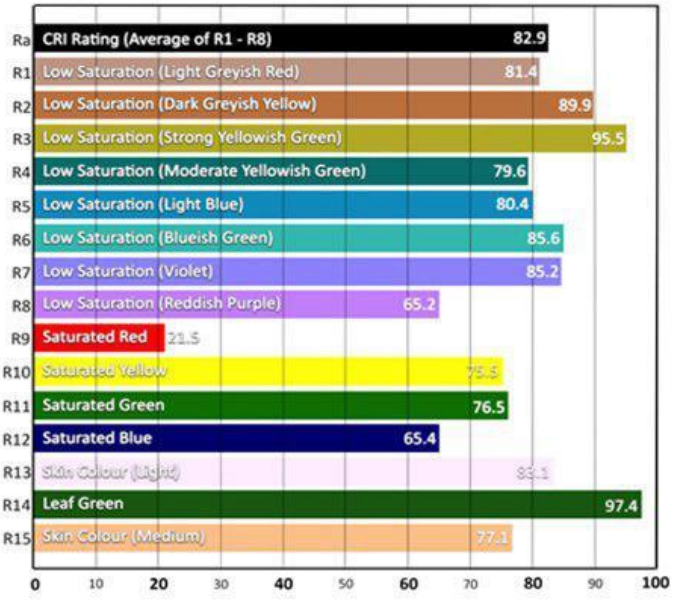


شكل (٨) يوضح بعض تصنيفات الالوان ومؤشر التجسيد اللونى لها

مؤشر تناسق الإضاءة التلفزيونية TLCI

مع تطور تكنولوجيا الصورة الرقمية المتحركة ظهرت العديد من المصطلحات المتعلقة بالترجمة اللونية ومنها مصطلح مؤشر تناسق الإضاءة التلفزيونية Television Lighting Consistency Index (TLCI) وهو تطوير على تصنيف CRIحيث يأخذ عينات أربع وعشرون لون وهو أكثر موثوقية في تحليل كيفية أداء عرض اللون في وحدة الحساسية الخاصة بالكاميرا ولقد كان المؤشر في البداية لكاميرات البث التلفزيوني ولا يستخدم كثيراً في صناعة الفيلم ، والفيديو وهو عبارة عن متوسط درجة فردي يصل إلى ١٠٠ يتم تحديده من خلال استجابة اللون التي قد تنتج عند استخدام كاميرا فيديو ولا يحتاج TLCI في النطاق ٨٥-١٠٠ إلى أي تصحيح للألوان ، وستحتاج النتيجة ٧٠-٨٥ إلى تصحيح بسيط ، بينما النتيجة ٥٠-٧٠ تحتاج إلى تصحيح ألوان معقد .

وتصنيف CRI الموسع أحياناً يشار له باسم Special CRI وهو الأكثر دقة ، حيث يضيف الوان R9-R15 إلى عينات CRIالقياسية – بما في ذلك الأكثر أهمية الأحمر المشبع R9 ولون البشرة R13 الخفيف ، ولون البشرة R15 المتوسط ، وهي كل الألوان التي يكون من الصعب إنتاجها بدرجة نقاء عالية ، والصورة التالية شكل (٩) تظهر مثال لمعدل CRI الموسع لضوء الشمس ، وإذا نظرنا إلى مصابيح الـ LED سوف نرى اختلاف كبير حيث يوجد عدة مناطق من طيف الألوان التي لا يعرضها هذا الضوء بشكل صحيح ، وهذا على الأرجح يُنتج ألوان غريبة من درجات لون البشرة و ألوان أخرى في الصورة وهي غير متوقعة وغير مرغوبة وغير قابلة للتصحيح ، وعلى الرغم من ان المُصنع ربما سيعطي تصنيف CRI لهذا الضوء يبلغ ٨٣ وهو ليس تصنيف ممتاز لكن للوهلة الأولى يجب على الأقل أن يقدم انتاج لائق لمعظم الألوان لذا فمجدداً إذاً كنت تود توفير المال عند شراء أو استئجار إضائات الـ LED أو هالوجين أو فلورسنت فابدأ دائماً بالتحقق من تصنيف CRI الموسع أو TLCI أو يجب استخدام مقياس ضوئي للتحقق من التصنيف بطريقة علمية دقيقة .



شكل (٩) يوضح معدل CRI الموسع لضوء الشمس

تكنولوجيا البث التليفزيونى والترجمة اللونية

إن الصورة التلفزيونة الملونة هى تقنية إرسال تلفزيوني يتضمن معلومات عن لون الصورة بحيث يمكن عرض صورة الفيديو بالألوان على جهاز التلفزيون وفي أبسط أشكاله يمكن إنشاء البث الملون عن طريق بث ثلاث صور أحادية اللون ، واحدة لكل منها بلون من الثلاثة ألوان الاساسية وهي الأحمر والأخضر والأزرق(RGB) وعند عرضها معًا أو في تتابع سريع ستندمج هذه الصور معًا لإنتاج صورة كاملة الألوان كما يراها العارض وسيتطلب ذلك ثلاثة أضعاف عدد الصور التي سيتم إرسالها في نفس الوقت وبالتالي زيادة كبيرة في مقدار عرض النطاق الترددي الراديوي Bandwidth المطلوب لإرسال إشارة كاملة وبالتالي زيادة الطيف الراديوي المطلوب وكانت الرغبة في الحفاظ على عرض النطاق الترددي أحد أكبرالتحديات التقنية لإدخال البث التلفزيوني الملون .

ولقد تغيرت تكنولوجيا التلفزيون بشكل كبير في أوائل القرن الحادي والعشرين حيث تم التركيز بشكل كبير على زيادة دقة الصورة وجودة الالوان بالإضافة إلى تغيير أبعاد جهاز استقبال التلفزيون لعرض صور على شاشة عريضة حيث تم إنشاء إرسال إشارات تلفزيونية مشفرة رقميًا لتقديم خدمة تفاعلية وبث برامج متعددة في مساحة القناة التي كان يشغلها برنامج واحد سابقًا ، وظهرت تكنولوجيا التلفزيون الرقمي للعرض العام في التسعينيات في الولايات المتحدة ، وفي يونيو ١٩٩٠ فاجأت شركة General Instrument Corporation (GI) الصناعة بإعلانها عن أول نظام تلفزيوني رقمي في العالم ، وفي غضون بضعة أشهر من إعلان شركة GI ، أعلنت كل من شركة Zenith Electronics Corporation ومركز David Sarnoff للأبحاث عن أنظمة HDTV الرقمية الخاصة بهما.في عام ١٩٩٣ ، شكلت هذه المختبرات وأربعة معامل تلفزيونية أخرى "تحالفًا كبيرًا" لتطوير HDTV القابل للتسويق وكانت العقبة الرئيسية أمام إنتاج التلفزيون الرقمي هي مشكلة النطاق الترددي لأنه حتى إشارة التلفزيون ذات الدقة القياسية (SDTV) بعد الرقمنة ، ستشغل أكثر من ١٠ أضعاف مساحة تردد الراديو مثل التلفزيون التناظري التقليدي ، والذي يتم بثه عادةً في قناة ستة ميجا هرتز ولكي يكون HDTVبديلاً عمليًا يجب ضغطه في حوالي ١ بالمائة من مساحته الأصلية تغلب فريق GI على المشكلة عن طريق إرسال التغييرات في الصورة فقط بمجرد وجود إطار كامل.

كيفية استخدام النطاق الترددي Bandwidth لتحديد أفضل صورة للفيديو

إن النطاق الترددي Bandwidth هو مصطلح واسع يصف bit-rate لقدرة الإرسال عبر نظام اتصالات الشبكة أى معدل تدفق البيانات الرقمية إلى الشاشة ويتم وصف عرض النطاق الترددي أيضًا على أنه القدرة الاستيعابية للقناة أو سرعة نقل البيانات لتلك القناة ويعتمد على ثلاثة عناصر وهى : الدقة Resolution - معدل التحديث Refresh rate - عامل عمق اللون (بت لكل بكسل) Color depth factor bits per pixel

مفهوم البت لكل بكسل bits per pixel (bpp)

يتم إنشاء كل بكسل لوني في صورة رقمية من خلال مجموعة من الألوان الأساسية الثلاثة: الأحمر والأخضر والأزرق وغالبًا ما يُشار إلى كل لون أساسي باسم قناة اللون color channel أو مكون اللون color component ، وله نطاق من قيم الكثافة المحددة بعمق البت bit depth الخاص به .

يتشير مصطلح (bpp) إلى مجموع عدد وحدات bit لكل قناة لون ، أي العدد الإجمالي الخاص بـbits المطلوبة لتشفير معلومات لون البكسل بمعنى أنه ستحتوي الصورة RGB غير المضغوطة بعمق ٨ بت لكل لون على ٢٤ بت أو ٢٤ بت لكل بكسل (٨ بت للأحمر ، و ٨ بت للأخضر ، و ٨ بت للأزرق) ، مع ظهور التلفزيون الملون أصبح من الضروري إضافة المعلومات اللونية إلى إشارة النصوع في إشارة واحدة

يقسم YCbCr الصورة إلى ٣ مكونات وهى :

- Y = black and white image (luminance)
- U / Cb = blue / green image (chrominance obtained by Y - Blue)
- V / Cr = yellow / red image (chrominance obtained by Y - Red)

تم اختراع مساحة اللون YUV كحل إذاعي لإرسال معلومات اللون عبر القنوات المصممة للإشارات أحادية اللون وفيها يتم دمج اللون في إشارة أحادية اللون من خلال الجمع بين إشارة أحادية اللون تسمى أيضًا السطوع أو الإضاءة ، ويتم تمثيلها بالرمز Y ، مع إشارتين من إشارات التلون تسمى أيضًا chroma ويتم تمثيلها بواسطة رموز UV أو CbCr ، يسمح هذا بتعريف الألوان الكاملة وجودة الصورة على الطرف المتلقي للإرسال.

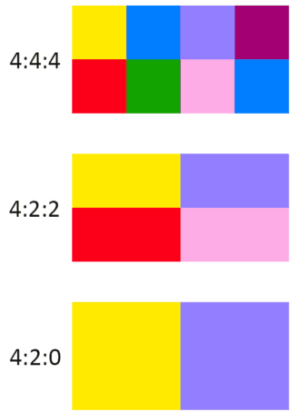
وعند الحديث عن إشارة الفيديو يستخدم العديد من الأشخاص مصطلح مساحة اللون color space وهى عبارة عن تمثيل رياضي لمجموعة من نماذج الألوان الشائعة RGB و YUV 4: 4: 4 و YUV 4: 2: 2 و YUV 4: 2: 0.

وبتطور التكنولوجيا الرقمية الخاصة بصناعة الصورة التليفزيونية بداية من SD و HD إلى 4K و 8K أدى ذلك إلى معدل إطارات أعلى ودقة أكثر وترجمة لونية أفضل ونطاق ديناميكي أعلى (HDR) مما يعني زيادة كبيرة في كمية البيانات التي سيتم نقلها على الشبكات وتساعد تقنية الضغط في إدارة المزيد من وحدات البكسل والمزيد من الجودة عبر نطاق ترددي محدود ويتحكم الضغط فى عمق الالوان بمعنى انه يشار ما هي مساحة اللون؟

يُشار عادةً إلى عمق الألوان الكامل Full color depth على أنه ٤: ٤: ٤ حيث يشير الرقم الأول إلى وجود أربع وحدات بكسل عرضية ، ويشير الرقم الثاني إلى وجود أربعة ألوان فريدة ، ويشير الرقم الثالث إلى وجود أربعة تغييرات في لون الصف الثاني ، وهذه الأرقام غير مرتبطة بحجم وحدات البكسل الفردية ويتلقى كل بكسل ثلاث إشارات أحدهم مكونات الإضاءة (السطوع) التي يمثلها Y ، ومكونان من مكونات اختلاف اللون يُعرفان باسم chroma الذي يمثله Cr (U) و Cb (V)، وفى نظام 8 bite فإن ٤:٤:٤ سيتطلب كل بكسل ثلاثة بايت من البيانات حيث يتم إرسال جميع المكونات الثلاثة

لكل بكسل ، وفي نظام ٤: ٢: ٢ سيحتوي كل بكسلين على أربعة بايت من البيانات أى كل بيكسل على ٢ بايت وينتج عن هذا متوسط ١ بايت لكل بكسل (تقليل عرض النطاق الترددي بنسبة ٣٣٪).

في ٤: ٢: ٠ سيكون لكل أربعة بكسل ستة بايت من البيانات يعطي هذا متوسط ١,٥ بايت لكل بكسل (تقليل عرض النطاق الترددي بنسبة ٥٠٪ . ويوضح الشكل رقم (١٠) الفرق بين الثلاثة أنظمة ، ٤: ٤: ٤ وفى حالة ٤:٤:٤ تكون البيانات غير مضغوطة وبالتالي توفر أفضل جودة للصورة بينما تضحي ٤: ٢: ٢ و ٤: ٢: ٠ بجودة الألوان من أجل معدل بيانات أقل .



شكل (١٠) يوضح الفروق بين معدلات البت الثلاثة المختلفة.

لذلك فى حالة استخدام ٤: ٤: ٤ ستحصل على أفضل جودة للصورة ، ولكن أعلى معدل بيانات بينما ٤: ٢: ٠ لديها أدنى جودة للصورة ، ولكن أيضًا متطلبات النطاق الترددي bandwidth الأصغر ، وتستخدم معظم محتويات الصورة التليفزيونية في الوقت الحاضر بما في ذلك البرامج التلفزيونية والأفلام ٤: ٢: ٠ عينات فرعية Chroma لأن الخسارة في الجودة الرسومية غير مرئية عمليًا خاصة عند 4K ، بينما يسمح ضغط النطاق الترددي بنقل أسهل للبيانات بما في ذلك التدفق السلس عبر خدمات مثل Netflix

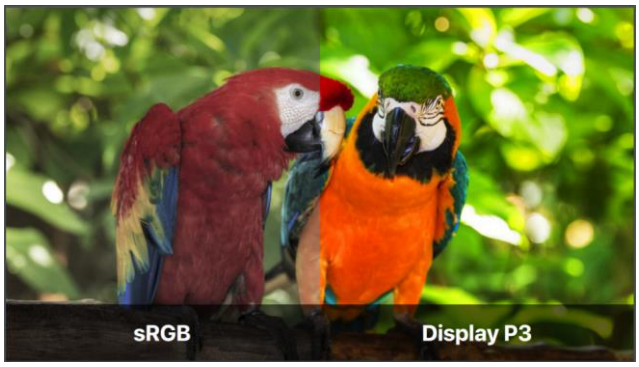
إذا تم تحليل الصورة التليفزيونية خلال بضع مئات من الثانية سنجد ما يقرب من ٢٠٠٠٠٠ بكسل ويجب أن تمر النبضات الكهربائية المقابلة للبكسل عبر القناة بمعدل عدة ملايين في الثانية علاوة على ذلك نظرًا لأن محتوى الصورة قد يختلف من إطار إلى إطار من لقطات قريبة بسيطة تحتوي على القليل من التفاصيل الدقيقة إلى مشاهد شاملة بعيدة حيث يتم تشغيل التفاصيل المحدودة للنظام فإن المعدل الفعلي لنقل معلومات الصورة يختلف بشكل كبير وبالتالي يجب أن تكون القناة التلفزيونية قادرة على معالجة المعلومات عبر نطاق مستمر من الترددات يبلغ عرضه عدة ملايين من الدورات وبالمقارنة فإن الأذن تكتفي بالصوت المنقول عبر قناة بعرض ١٠٠٠٠ دورة فقط .

الترجمة اللونية فى الصورة السينمائية الرقمية

إن أهم ما يميز السينما الرقمية عن الفيديو التقليدى هو دعمها لمجموعة واسعة وعالية الجودة من الألوان ، ولتحقيق أعلى مستوى من مجموعة السينما الرقمية أو مايسمى Digital Cinema Package (DCP) ، والتى هى عبارة عن مجموعة من الملفات الرقمية المستخدمة لتخزين ونقل الصوت والصورة ، ولتدفق البيانات للسينما الرقمية يجب معرفة بعض علوم اللون لتحقيق الترجمة اللونية الجيدة والوصول إلى التدرج اللونى المستهدف للسينما الرقمية وتقول الدراسات

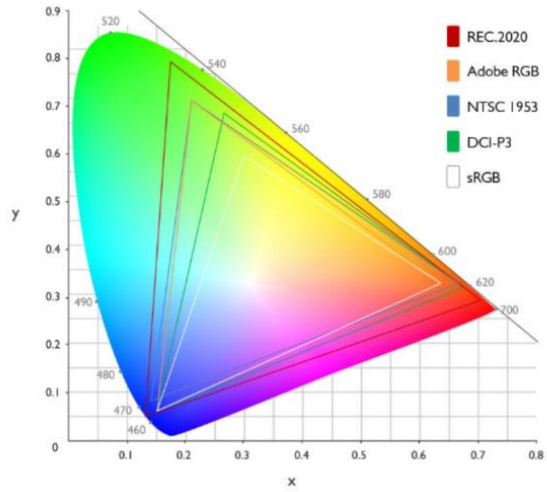
أن DCI-P3 هو التدرج اللونى المثالى الذى يمكن الوصول اليه فى السينما والسؤال الذى يطرح نفسه هنا هو ما المقصود ب DCI-P3

إن DCI-P3 والذى يطلق عليه أحيانا P3 أو شاشة P3 وهى عبارة عن البروتوكول الثالث للمساحة اللونية أو مجموعة من الألوان والتى تم إنشاؤها بواسطة مبادرات السينما الرقمية (DCI) وجمعية مهندسي الصور المتحركة والتليفزيون (SMPTE)في محاولة لتوحيد الألوان المستخدمة في صناعة الأفلام ، والجدير بالذكر أن شاشات الكمبيوتر المتقدمة وأجهزة التلفزيون وشاشات العرض الأخرى تستخدم شكلاً من أشكال DCI-P3 المعروفة باسم DCI-P3-D65 ، ولكنها تكتب اختصارا DCI-P3 ، ومعظم الوسائط المنزلية اليوم لا تزال تُصنع في مساحة ألوان sRGB الأصغر ، بينما DCI-P3 تقتصر على محتوى HDR أو أولئك الذين يحبون أن تبدو ألوانهم أكثر تشبعًا وتقول الأبحاث أن مساحة ألوان DCI-P3 أكبر بنسبة ٢٥٪ منsRGB كما يتضح فى شكل (١١)



شكل (١١) يوضح الفرق بين ألوان صورة DCI-P3 وصورة sRGB

ويتم تحديد مساحة اللون سواء كانت DCI-P3 أو sRGB أو Adobe RGB أو أي مساحة أخرى من خلال المثلث الخاص بها في المخطط اللوني CIE 1931 XY ، والذي أنشأته اللجنة الدولية للإضاءة (CIE) الموضح شكل (١٢)



شكل (١٢) يوضح المثلث الخاص بالمخطط اللونيCIE 1931 XY

يمثل المخطط اللوني CIE 1931 XY جميع الألوان التي يمكن للبشر رؤيتها بمثلثات مختلفة تحدد مساحات لونية معينة. تم تحديد DCI-P3-D65 (DCI-P3) في الرسم البياني باللون الأخضر .

نتائج البحث

١- هناك زيادة فى القيمة اللونية للون الاحمر عند الطول الموجى ٦٠٠ نانومتر فى نظامى SDTV و HDTV وتقل فى أنظمة UHDTV ، وتقارب فى القيمة اللونية للون الاخضر عند الطول الموجى ٥٤٠ للأنظمة الثلاثة وأعلاها فى HDTV ، تقارب فى القيمة اللونية للأزرق عند الطول الموجى ٤٥٠ وأعلاها فى SDTV

٢- لا توجد زيادة ملحوظة بالعين المجردة فى دقة عرض اللون بين استخدام قياس الألوان فى CIE 1931 واستخدام قياس الالوان CIE 2006

٣- يمكن حدوث التشوه اللونى نتيجة لعدة عوامل أهمها عمليتى الإرسال والإستقبال للإشارة التليفزيونية ، والنقص المحتمل فى التوزيع الطيفى لمصدر الإضاءة ، وعدم الدقة اللونية لأجهزة إعادة الإنتاج عند معالجة الصور الرقمية ، وكذا خصائص الحساسية الطيفية غيى الكافية لقنوات الكاميرا الاولية .

٤- دراسة خصائص الحساسية الطيفية للقنوات الأولية لكاميرات SDTV و HDTV و UHDTV المحددة من قبل الاتحاد الدولي للاتصالات هى أحد العوامل الرئيسية فى التأثير على جودة الصورة اللونية.

٥- لدراسة خصائص الحساسية الطيفية للقنوات الأولية للكاميرات المثالية التي توفر إعادة إنتاج لونية غير مشوهة ، تم تطبيق طريقة الحساب اللونية الموصى بها من قبل SMPTE 4 على أساس هذه الطريقة يتم تحديد الخصائص الطيفية للكاميرات المثالية والإشارات المقابلة للقنوات الأولية للألوان من خلال الانعكاس الطيفي من الموضوعات المصورة

٦- تقييم تشويه الألوان للكاميرا المثالية التي تنفذ قياس الألوان CIE 1931 ، فيما يتعلق بالكاميرا المثالية التي تنفذ قياس الألوان CIE 2006 ، يتم إجراؤها لمجموعتين من الألوان المحددة بواسطة خصائص الانعكاس الطيفي لكائنات الاختبار: مجموعة مدقق اللون Color Checker التي وجدت استخدامًا لتقييم جودة الصورة لمجموعة متنوعة من تطبيقات الفيديو ، على وجه الخصوص ، لتقييم خصائص كاميرات التلفزيون ،ومجموعة من الألوان اللونية المثلى التي تملأ منها الألوان الأساسية بشكل موحد مثلث RGB. أظهر التقييم أن خطأ عرض اللون لا يتجاوز حوالي ٢ من وحدات CIE ، أي أن مستواها أقل من مستوى خطأ أجهزة القياس اللوني وأقل من عتبة رؤية تغييرات اللون. لذلك ، يمكن توقع أن الانتقال إلى استخدام قياس الألوان CIE 2006 بدلاً من قياس الألوان CIE 1931 لن يؤدي إلى تحسن كبير في جودة عرض الألوان في التلفزيون والأنظمة الأخرى المماثلة

التوصيات

١- للحصول على أعلى ترجمة لونية ممكنة يجب إختيار الكاميرا الرقمية المناسبة لعمل ذلك من حيث درجة الجودة ومعدل الإطارات وعمق البت ودقة الحساسية الطيفية .

٢- يجب توحيد نوعية مصادر الإضاءة المستخدمة فى عملية التصوير من حيث درجة الحرارة اللونية ومؤشر التجسيد اللونى والشركة المنتجة للحصول على أعلى درجة ترجمة لونية ممكنة للموضوعات المصورة .

٣- يجب استخدام أجهزة القياس الخاصة بمصادر الإضاءة والتعرف على توصيف مصدر الإضاءة من حيث درجة حرارته اللونية ومؤشر التجسيد اللونى له قبل البدأ فى عملية التصوير .

٤- عند العمل بمستوى إضاءة منخفض يجب استخدام عمق بت أعلى لإظهار التفاصيل وبالتالى الحصول على ترجمة لونية جيدة .

المراجع والمواقع العلمية و الكتب

- James L. Moody, Jeff Ravitz," Lighting for Televised Live Events ", Routledge, May 30, 2021
- Jason Yang , Charles Pidgeon," Vision Facts: Questions about the Human Eye ",Universal-Publishers, Jul 16, 2018
- Alan Steinheimer Shaping Light for Video in the Age of LEDs:A Practical Guide to the Art and Craft of Lighting" Routledge, Sep 22, 2020
- Catherine Kellison, Dustin Morrow, Kacey Morrow," Producing for TV and Emerging Media", Routledge, Jul 26, 2020
- Edward R. Dougherty," Digital Image Processing Methods ", CRC Press, Aug 27, 2020
- David Stump, ASC,"Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows ", Routledge, Nov 19, 2021
- John Jackman,"Lighting for Digital Video and Television ", Routledge, Jun 10, 2020
- Michele Hilmes, Jason Jacobs," The Television History Book ", Bloomsbury Publishing, Mar 11, 2021

https://blog.csdn.net/matrix_space/article/details/107883977
https://www.colorcube.com/articles/basics/basics.htm
https://www.videomaker.com/article/c03/18602-understanding-cri-tlci-the-importance-of-color-rendition
https://www.youtube.com/watch?v=60ZQpsP5ux8
https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_cinematography...
https://www.newworldencyclopedia.org/entry/High-definition_television
https://en.wikipedia.org/wiki/Professional_video_camera
https://www.cnet.com/news/8k-tv-what-you-need-to-know-samsung-lg-sony-tcl/
https://www.samsung.com/levant/tvs/tv-buying-guide/what-is-8k-tv
https://setstream.io/image-quality/
https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_movie_camera
https://www.videomaker.com/article/c02/19251-understanding-bit-depth-and-color-rendition-for-video/
https://radyf.com/what-is-cri/
https://en.wikipedia.org/wiki/Color_rendering_index
https://simpledcp.com/digital-cinema-color/
https://en.wikipedia.org/wiki/4K_resolution
https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/lightsources/colorRendering.
https://en.wikipedia.org/wiki/Color_rendering_index
https://www.lightingdesignlab.com/resources/articles/articles-lighting-fundamentals/color-rendering
Appropriate indices for color rendition and ... - OSA Publishing
https://www.osapublishing.org › viewmedia
https://www.lightingdesignlab.com/resources/articles/articles-lighting-fundamentals/color-rendering

https://www.videomaker.com/article/c03/18602-understanding-cri-tlci-the-importance-of-color-rendition
https://www.energy.gov/eere/ssl/color-rendition
https://www.lumens.com/how-tos-and-advice/color-rendering-index.html
https://www.colorcube.com/articles/basics/basics.htm
https://midopt.com/solutions/color-imaging/natural-color-rendition/
https://www.westinghouselighting.com/lighting-education/color-rendering-index-cri.aspx
https://www.flexfireleds.com/color-rendering-index-cri-and-led-lighting-what-is-cri/
https://www.tomshardware.com/reference/what-is-dci-p3-color-a-basic-definition
https://www.matrox.com/en/video/media/guides-articles/introduction-color-spaces-video
https://www.lighting.philips.com/main/support/support/faqs/white-light-and-colour/what-is-the-spd-of-a-light-source
https://cinelight.com/blog/6_CCT-CRI-TLCI.html
https://www.intopix.com/blogs/post/How-to-define-the-compression-rate-according-to-bpp-or-bps
https://www.displayninja.com/chroma-subsampling/
https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000023004/graphics.html
https://www.britannica.com/technology/television-technology/Colour-television
https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Difference-between-HDTV-and-UHDTV.html
https://en.wikipedia.org/wiki/Metamerism_(color(
https://www.hisour.com/ar/cie-1931-color-space-24840/
https://www.researchgate.net/publication/281638438_SPECTRAL_CHARACTERISTICS_OF_THE_SDTV_HDTV_AND_UHDTV_CAMERAS/link/