



International Commission on Illumination
Commission Internationale de l'Eclairage
Internationale Beleuchtungskommission

ISBN 978-3-902842-57-2

TECHNICAL REPORT

Recommended Method for Evaluating the Performance of Colour-Difference Formulae

CIE 217:2016

UDC: 159.937.51
535.67
612.843.31
535.66

Descriptor: Perception of colour
Colour of objects
Colour vision
Colorimetry

THE INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION

The International Commission on Illumination (CIE) is an organization devoted to international co-operation and exchange of information among its member countries on all matters relating to the art and science of lighting. Its membership consists of the National Committees in about 40 countries.

The objectives of the CIE are:

1. To provide an international forum for the discussion of all matters relating to the science, technology and art in the fields of light and lighting and for the interchange of information in these fields between countries.
2. To develop basic standards and procedures of metrology in the fields of light and lighting.
3. To provide guidance in the application of principles and procedures in the development of international and national standards in the fields of light and lighting.
4. To prepare and publish standards, reports and other publications concerned with all matters relating to the science, technology and art in the fields of light and lighting.
5. To maintain liaison and technical interaction with other international organizations concerned with matters related to the science, technology, standardization and art in the fields of light and lighting.

The work of the CIE is carried out by Technical Committees, organized in seven Divisions. This work covers subjects ranging from fundamental matters to all types of lighting applications. The standards and technical reports developed by these international Divisions of the CIE are accepted throughout the world.

A plenary session is held every four years at which the work of the Divisions and Technical Committees is reported and reviewed, and plans are made for the future. The CIE is recognized as the authority on all aspects of light and lighting. As such it occupies an important position among international organizations.

LA COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) est une organisation qui se donne pour but la coopération internationale et l'échange d'informations entre les Pays membres sur toutes les questions relatives à l'art et à la science de l'éclairage. Elle est composée de Comités Nationaux représentant environ 40 pays.

Les objectifs de la CIE sont :

1. De constituer un centre d'étude international pour toute matière relevant de la science, de la technologie et de l'art de la lumière et de l'éclairage et pour l'échange entre pays d'informations dans ces domaines.
2. D'élaborer des normes et des méthodes de base pour la métrologie dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
3. De donner des directives pour l'application des principes et des méthodes d'élaboration de normes internationales et nationales dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
4. De préparer et publier des normes, rapports et autres textes, concernant toutes matières relatives à la science, la technologie et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
5. De maintenir une liaison et une collaboration technique avec les autres organisations internationales concernées par des sujets relatifs à la science, la technologie, la normalisation et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.

Les travaux de la CIE sont effectués par Comités Techniques, organisés en sept Divisions. Les sujets d'études s'étendent des questions fondamentales, à tous les types d'applications de l'éclairage. Les normes et les rapports techniques élaborés par ces Divisions Internationales de la CIE sont reconnus dans le monde entier.

Tous les quatre ans, une Session plénière passe en revue le travail des Divisions et des Comités Techniques, en fait rapport et établit les projets de travaux pour l'avenir. La CIE est reconnue comme la plus haute autorité en ce qui concerne tous les aspects de la lumière et de l'éclairage. Elle occupe comme telle une position importante parmi les organisations internationales.

DIE INTERNATIONALE BELEUCHTUNGSKOMMISSION

Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) ist eine Organisation, die sich der internationalen Zusammenarbeit und dem Austausch von Informationen zwischen ihren Mitgliedsländern bezüglich der Kunst und Wissenschaft der Lichttechnik widmet. Die Mitgliedschaft besteht aus den Nationalen Komitees in rund 40 Ländern.

Die Ziele der CIE sind:

1. Ein internationales Forum für Diskussionen aller Fragen auf dem Gebiet der Wissenschaft, Technik und Kunst der Lichttechnik und für den Informationsaustausch auf diesen Gebieten zwischen den einzelnen Ländern zu sein.
2. Grundnormen und Verfahren der Messtechnik auf dem Gebiet der Lichttechnik zu entwickeln.
3. Richtlinien für die Anwendung von Prinzipien und Vorgängen in der Entwicklung internationaler und nationaler Normen auf dem Gebiet der Lichttechnik zu erstellen.
4. Normen, Berichte und andere Publikationen zu erstellen und zu veröffentlichen, die alle Fragen auf dem Gebiet der Wissenschaft, Technik und Kunst der Lichttechnik betreffen.
5. Liaison und technische Zusammenarbeit mit anderen internationalen Organisationen zu unterhalten, die mit Fragen der Wissenschaft, Technik, Normung und Kunst auf dem Gebiet der Lichttechnik zu tun haben.

Die Arbeit der CIE wird durch Technische Komitees geleistet, die in sieben Divisionen organisiert sind. Diese Arbeit betrifft Gebiete mit grundlegendem Inhalt bis zu allen Arten der Lichtanwendung. Die Normen und Technischen Berichte, die von diesen international zusammengesetzten Divisionen ausgearbeitet werden, sind auf der ganzen Welt anerkannt.

Alle vier Jahre findet eine Session statt, in der die Arbeiten der Divisionen berichtet und überprüft werden, sowie neue Pläne für die Zukunft ausgearbeitet werden. Die CIE wird als höchste Autorität für alle Aspekte des Lichtes und der Beleuchtung angesehen. Auf diese Weise unterhält sie eine bedeutende Stellung unter den internationalen Organisationen.

Published by the

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE
CIE Central Bureau
Babenbergerstrasse 9, A-1010 Vienna, AUSTRIA
Tel: +43(1)714 31 87
e-mail: ciecb@cie.co.at
www.cie.co.at



ISBN 978-3-902842-57-2

International Commission on Illumination
Commission Internationale de l'Eclairage
Internationale Beleuchtungskommission

TECHNICAL REPORT

Recommended Method for Evaluating the Performance of Colour-Difference Formulae

CIE 217:2016

UDC: 159.937.51
535.67
612.843.31
535.66

Descriptor: Perception of colour
Colour of objects
Colour vision
Colorimetry

This Technical Report has been prepared by CIE Technical Committee 1-55 of Division 1 "Vision and Colour" and has been approved by the Board of Administration as well as by Division 1 of the Commission Internationale de l'Eclairage. The document reports on current knowledge and experience within the specific field of light and lighting described, and is intended to be used by the CIE membership and other interested parties. It should be noted, however, that the status of this document is advisory and not mandatory.

Ce rapport technique a été élaboré par le Comité Technique CIE 1-55 de la Division 1 "Vision et Couleur" et a été approuvé par le Bureau et Division 1 de la Commission Internationale de l'Eclairage. Le document expose les connaissances et l'expérience actuelles dans le domaine particulier de la lumière et de l'éclairage décrit ici. Il est destiné à être utilisé par les membres de la CIE et par tous les intéressés. Il faut cependant noter que ce document est indicatif et non obligatoire.

Dieser Technische Bericht ist vom Technischen Komitee CIE 1-55 der Division 1 "Sehen und Farbe" ausgearbeitet und vom Vorstand sowie Division 1 der Commission Internationale de l'Eclairage gebilligt worden. Das Dokument berichtet über den derzeitigen Stand des Wissens und Erfahrung in dem behandelten Gebiet von Licht und Beleuchtung; es ist zur Verwendung durch CIE-Mitglieder und durch andere Interessierte bestimmt. Es sollte jedoch beachtet werden, dass das Dokument eine Empfehlung und keine Vorschrift ist.

Any mention of organizations or products does not imply endorsement by the CIE. Whilst every care has been taken in the compilation of any lists, up to the time of going to press, these may not be comprehensive.

Toute mention d'organisme ou de produit n'implique pas une préférence de la CIE. Malgré le soin apporté à la compilation de tous les documents jusqu'à la mise sous presse, ce travail ne saurait être exhaustif.

Die Erwähnung von Organisationen oder Erzeugnissen bedeutet keine Billigung durch die CIE. Obgleich große Sorgfalt bei der Erstellung von Verzeichnissen bis zum Zeitpunkt der Drucklegung angewendet wurde, besteht die Möglichkeit, dass diese nicht vollständig sind.

The following members of TC 1-55 “Uniform Colour Space for Industrial Colour Difference Evaluation” took part in the preparation of this Technical Report. The committee comes under Division 1 “Colour and Vision”.

Authors:

Melgosa, M. (Chair 2005–2015)	Spain
Nobbs, J. (Chair 1999–2005)	United Kingdom
Alman, D.H.	USA
Berns, R.S.	USA
Carter, E.C.	USA
Cui, G.	China
Hirschler, R.	Hungary
Li, C.	China
Luo, M.R.	United Kingdom
Oleari, C.	Italy
Pointer, M.R.	United Kingdom
Richter, K.	Germany
Romero, J.	Spain
Sato, T.	Japan
Shamey, R.	USA
Vik, M.	Czech Republic
Witt, K.	Germany
Xin, J.H.	China
Xu, H.	China
Yaguchi, H.	Japan

Acknowledgement:

The committee would like to thank those who, although not members of the committee, contributed ideas and comments used in the preparation of this report: M.D. Fairchild, P.A. García, R. Huertas, R. Kuehni, D.C. Rich, B. Rigg, A. Robertson, G. Roesler (†).

CONTENTS

Summary	V
Résumé	V
Zusammenfassung	V
1 Introduction	1
2 Perceived and measured colour differences	1
3 Indices for testing colour-difference formulae	4
4 The standardized residual sum of squares (STRESS) index	7
5 Performance of different formulae for some visual datasets	9
6 Future work and conclusions	13
Annex A	14
References	18

RECOMMENDED METHOD FOR EVALUATING THE PERFORMANCE OF COLOUR-DIFFERENCE FORMULAE

Summary

A method is recommended to evaluate the strength of the relationship between visually-perceived colour differences in a given set of colour pairs and their corresponding predictions made by a colour-difference formula. This method is based on the Standardized Residual Sum of Squares (STRESS) index used in multidimensional scaling, and tests if two colour-difference formulae are or are not statistically significantly different. The same index can be also used to compute intra- and inter-observer variability in visual experiments. Beside important advances made in the field of colour-difference evaluation using reliable visual datasets currently available, the results achieved from the STRESS index indicate that it is not possible to recommend a more uniform colour space with a Euclidean colour-difference formula that is statistically significantly better than CIEDE2000.

METHODE RECOMMENDEE POUR EVALUATION DE FORMULES DE DIFFERENCE DE COULEUR

Résumé

Ce rapport technique recommande une méthode pour évaluer l'intensité de la relation entre les différences de couleur perçues visuellement (pour un ensemble donné de paires de couleurs) et leurs prédictions correspondantes réalisées avec une formule de différence de couleur. Cette méthode est basée sur l'indice STRESS (Standardized Residual Sum of Squares) utilisé dans le positionnement multidimensionnel, qui permet de tester si deux formules de différence de couleur sont ou ne sont pas statistiquement significativement différentes. Le même indice peut également être utilisé pour calculer la variabilité intra- et inter-observateurs lors des expériences visuelles. Outre les progrès importants réalisés dans le domaine de l'évaluation des différences de couleur en utilisant les ensembles de données visuelles fiables actuellement disponibles, les résultats obtenus à partir de l'indice STRESS indiquent qu'il est impossible de recommander un espace de couleur plus uniforme avec une formule de différence de couleur Euclidienne qui soit statistiquement significativement meilleure que CIEDE2000.

EMPFOHLENE METHODE ZUR BEWERTUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT VON FARBDIFFERENZFORMELN

Zusammenfassung

Es wird eine Methode empfohlen, um für einen gegebenen Satz von Farbpaaren die Stärke der Beziehung zwischen der visuell empfundenen Farbdifferenz und dem korrespondierenden Farbabstand mit einer Farbabstandsformel zu beurteilen. Die Methode basiert auf einem Index, der STRESS (Standardized Residual Sum of Squares) genannt wird. Er wird bei der multidimensionalen Skalierung benutzt und erlaubt zu testen, ob zwei Farbabstandsformeln statistisch signifikant unterschiedlich sind oder nicht. Der gleiche Index kann auch benutzt werden, um die Variabilität eines Beobachters oder zwischen Beobachtern in visuellen Experimenten zu berechnen. Neben den wichtigen Fortschritten, die auf dem Gebiet der Farbdifferenzbeurteilung mit geeigneten visuellen Datensätzen gemacht wurden, zeigen die Ergebnisse mit dem STRESS-Index an, dass es nicht möglich ist, einen gleichförmigeren Farbenraum mit einer euklidischen Farbabstandsformel zu definieren, die statistisch signifikant besser ist, als die Farbabstandsformel CIEDE2000.

1 Introduction

For a pair of colour samples, the magnitude of the visually-perceived colour difference between such samples, usually designated as ΔV , can be considered as much as the computed colour difference from objective instrumental colour measurements of the colour samples, usually designated as ΔE . While ΔV is the result of a subjective answer from a human observer, ΔE is an objective measurement provided by what is known as a “colour-difference formula”. A colour-difference formula can be defined as a mathematical equation providing a non-negative number ΔE from the numerical colour specifications of two colour samples. Most recent colour-difference formulae also incorporate other parameters related to the illuminating and viewing conditions of the samples, which are usually known in the literature as “parametric factors” (CIE, 1993).

Obviously, the result given by the human visual system (ΔV) is the most important part in the binomial $\Delta V-\Delta E$, and the goal of colour scientists is to achieve a colour-difference formula providing an accurate prediction of colour differences perceived by average observers, for any pair of colour samples under any illuminating/viewing conditions. Certainly, this is an ambitious goal, bearing in mind that currently the human visual system is not fully understood. However, important advances have been made in recent years (Melgosa et al., 2008; M. Huang et al., 2015), as will be described in this report. Note that we can also speak about perceived (ΔV) and computed (ΔE) colour differences in more complex situations than just two homogeneous colour samples, as in the case of colour differences between two complex images (CIE, 2011). In fact, colour-difference formulae are currently used as part of colour-quality control in many industries as well as in applications such as textiles (Kuo, 2010; P.-F. Li et al., 2014), printing (Liu et al., 2013; Z.J. Li and Meng, 2014), automobiles (Mirjalili et al., 2014; Melgosa et al., 2014), dentistry (Kim et al., 2009; Khashayar et al., 2014), food (Zhao et al., 2011; Salmerón et al., 2012), agriculture (Hauptmann et al., 2012; Gómez-Robledo et al., 2013), and medical imaging (Inoue et al., 2010; Jernigan, 2014).

This Technical Report mainly deals with methods to assess the performance or merit of different colour-difference formulae, proposing the use of the index known as the Standardized Residual Sum of Squares (STRESS) index. Among the main advantages of the STRESS index is that it can be used to test whether two colour-difference formulae are or are not statistically significantly different with respect to a given set of visual data, and also that it can be used to measure the intra- and inter-observer variability in the results from visual experiments (García et al., 2007; Melgosa et al., 2011). The results achieved by the most relevant colour-difference formulae currently employed in industrial applications are also provided, considering different visual datasets of object colours. Specifically, the structure of this Technical Report is as follows: in Clause 2, some background on the characteristics of visual colour-difference experiments, available colour-difference formulae, and reliable visual datasets is provided; Clause 3 considers how to measure the strength of the relationship between perceived and computed colour differences using indices proposed by different authors; Clause 4 proposes the use of the STRESS index in colour-difference evaluation; Clause 5 provides STRESS values for most relevant colour-difference formulae from the visual datasets adopted at the development of the last ISO/CIE recommended colour-difference formula, CIEDE2000 (Luo et al. 2001; CIE, 2001; ISO/CIE, 2014), and some other recent visual datasets proposed by different authors; and finally Clause 6 states the main conclusions, recommendations and suggestions for future work.

2 Perceived and measured colour differences

It is well known that experimental illuminating and viewing conditions (the so-called “parametric factors”) usually have an important effect on the magnitude of perceived colour differences (CIE, 1993). To avoid the spread of experimental results under many different experimental conditions, in 1995 the CIE, according to a paper of Witt (1995), proposed to analyse 17 “colour centres” well-distributed in colour space, under the set of visual conditions listed in Table 1. These are similar to those most usually found in industrial practice, which are usually designated in the literature as “reference conditions” (Witt, 1995):