

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
3 août 2006 (03.08.2006)

PCT

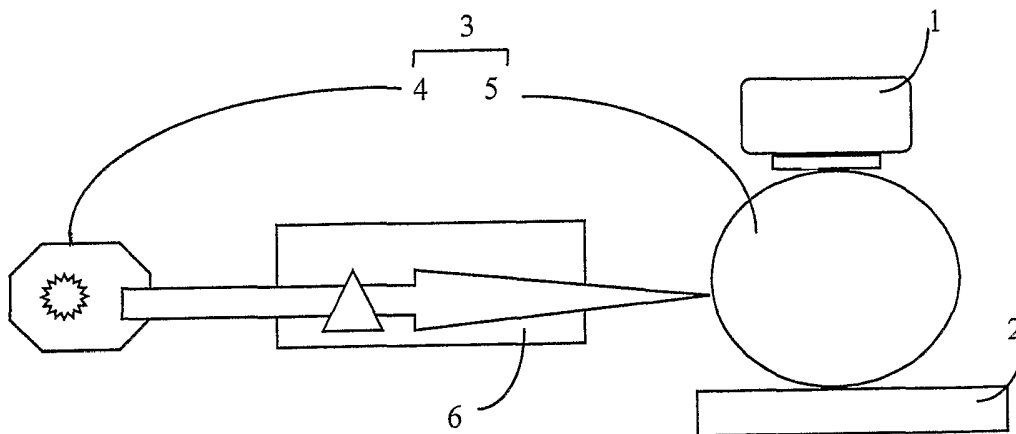
(10) Numéro de publication internationale  
WO 2006/079699 A2

- (51) Classification internationale des brevets : Non classée
- (21) Numéro de la demande internationale : PCT/FR2006/000098
- (22) Date de dépôt international : 25 janvier 2006 (25.01.2006)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité : 0500865 27 janvier 2005 (27.01.2005) FR
- (71) Déposant et
- (72) Inventeur : GUILLEMIN, Jean-Pierre [FR/FR]; 2A, rue Henri Barbusse, F-51100 REIMS (FR).
- (74) Mandataire : SAUVAGE, Renée; CABINET SAUVAGE, 65, boulevard Soult, F-75012 PARIS (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM),

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR COLORIMETRIC CALIBRATION OF AN IMAGE CAPTURING APPARATUS, CALIBRATED APPARATUS AND USE THEREOF IN COLORIMETRY

(54) Titre : PROCÉDE DE CALIBRATION COLORIMÉTRIQUE D'UN APPAREIL DE CAPTURE D'IMAGE, APPAREIL AINSI CALIBRE ET APPLICATION EN COLORIMÉTRIE



(57) Abstract: The invention concerns a method for colorimetric calibration of an image capturing apparatus, said method including the following steps: a) providing an apparatus (1), a constant illuminant (4), an monochromator (6) incrementable from one wavelength to another, and with a monochromatic screen whereof the reflectance is known through prior spectrophotometric measurement, said monochromator (6) being positioned such that it influences the flux reflected by the screen under the effect of an illuminant (4); b) under constant illuminant effect (4) and with a constant photographing parametering, capturing a series of images of said screen with said apparatus (1), for each incrementation of said monochromator (6); c) using said images, calculating coefficients of a transfer matrix defining each pixel of the sensor of the apparatus (1) thereby determining the two-dimensional colorimetric profile of the sensor; and d) storing said profile as calibration file.

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé de calibration colorimétrique d'un appareil de capture d'image, ledit procédé comprenant les étapes suivantes: a) la fourniture d'un appareil (1), d'un illuminant constant (4), d'un monochromateur incrémentable (6), d'une longueur d'onde à une autre, et d'un écran monochrome dont on connaît le facteur de réflexion par mesure préalable au

[Suite sur la page suivante]



WO 2006/079699 A2



européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

**Publiée :**

- *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

---

spectrophotomètre, ledit monochromateur (6) étant positionné de telle manière qu'il influence le flux réfléchi par l'écran sous un illuminant (4) ; b) sous l'illuminant constant (4) et avec un paramétrage de prise de vue constant, la prise d'une série d'images dudit écran par ledit appareil (1) , pour chaque incrémentation dudit monochromateur (6) ; c) à partir desdites images, le calcul des coefficients d'une matrice de transfert définissant chaque pixel du capteur de l'appareil (1) et déterminant ainsi le profil colorimétrique bidimensionnel spécifique du capteur ; et d) le stockage dudit profil sous la forme d'un fichier de calibration.

Procédé de calibration colorimétrique d'un appareil de capture d'image, appareil ainsi calibré et application en colorimétrie.

L'invention concerne un procédé de calibration  
5 colorimétrique d'un appareil de capture d'image, l'appareil de capture d'image ainsi calibré, un procédé de mesure de couleur à l'aide dudit appareil calibré et les programmes d'ordinateur adaptés à la mise en œuvre desdits procédés.

Dans un souci de simplification, il sera fait  
10 référence à un appareil photo numérique comme appareil de capture d'image, mais l'invention s'applique également à d'autres appareils de capture d'image tels que scanner ou caméra numérique (matricielle ou linéaire).

Les appareils photo numériques sont conçus pour  
15 acquérir des images colorées aptes à reproduire au mieux, lors de l'édition, la perception visuelle de la scène photographiée.

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a proposé un modèle mathématique, le CIECAM97 (remplacé  
20 depuis par le modèle CIECAM02), pour corriger les couleurs obtenues lors de l'acquisition de l'image aux fins de les restituer à identité visuelle constante, modèle adaptable au moyen employé pour la production de cette image et qui utilise les profils ICC (International Color Consortium).

L'imagerie numérique a donc aujourd'hui pour objectif  
25 d'éditer des images dans le respect de l'identité visuelle à l'original, au détriment de l'identité colorimétrique ponctuelle. L'image fournie par un appareil photo numérique, selon le format de transfert de cette image,  
30 compressée ou non, est livrée avec des couleurs ponctuelles corrigées de manière à permettre une certaine constance de l'identité perceptuelle.

Les appareils photo numériques sont donc inaptes à  
fournir une image capable d'être exploitée sur le plan de  
35 la couleur physique (par opposition à la couleur perçue obtenue à partir du modèle CIECAM).

Tout appareil photo numérique est pourvu d'un capteur et les capteurs des appareils photo numériques sont tous construits sur le même principe : ils sont composés d'une multiplicité de pixels constitués, chacun, d'au moins trois et plus généralement quatre photosites, chaque photosite formant filtre. Ainsi, un pixel pourra être constitué d'un photosite rouge R, de deux photosites verts G et d'un photosite bleu B. Ces filtres de couleurs différentes destinés à restituer l'image dans trois couleurs primaires constituent de facto un système trichromatique. Les pixels de l'image produite correspondent donc aux valeurs tristimulus des couleurs capturées dans le système RGB du capteur.

La conversion de l'expression RGB de chaque pixel dans un système normalisé XYZ est donc accessible et c'est sur ce principe que repose le système ICC qui permet de convertir les images d'un périphérique informatique donné pour pouvoir les transférer vers un autre périphérique. Ce système est utilisé depuis maintenant plus de 10 ans et on le qualifie de monodimensionnel. On entend par valeurs RGB, pour le transfert dans le système normalisé XYZ, les valeurs RGB linéarisées selon des méthodes connues.

Le système ICC, ainsi que les autres systèmes existants, traitent, cependant, tous les pixels d'une image avec le même algorithme en considérant *a priori* que les éléments de l'image sont spatialement uniformes. Cependant, un système d'acquisition ne peut avoir une réponse spatiale uniforme du fait d'une réfraction hétérogène du rayonnement générée par les systèmes optiques et de l'hétérogénéité des photosites.

Ni le système ICC, ni les appareils photo numériques ne sont donc conçus pour caractériser les couleurs de la prise de vue pour une utilisation colorimétrique. Ils sont conçus pour produire des images dans la meilleure qualité perceptuelle et ce, quel que soit le périphérique informatique utilisé.

Il existe, certes, depuis quelques années, des appareils photo numériques comportant des fonctions proches de la mesure des couleurs, mais qui se limitent à des besoins peu exigeants en précision. Les appareils photo  
5 numériques dits "multispectraux" en sont un exemple.

Par définition, une image colorée est une image multispectrale. Elle est, en fait, constituée d'au moins trois images, filtrées, chacune, dans une bande spectrale spécifique à l'une des trois couleurs primaires additives :  
10 le rouge, le vert et le bleu.

Cependant, on entend généralement par multispectral l'utilisation de plus de trois bandes de longueur d'onde. Pour obtenir une image par bande spectrale on dispose généralement d'une roue à filtres.

15 Cette technique est utilisée pour les photos spatiales capturées par satellite. Chaque image correspondant à une bande spécifique est stockée dans ce qu'on appelle un "cube image" (expression informatique qui désigne un ensemble d'images de mêmes dimensions, du même  
20 sujet, de même format, capturées de manières différentes, généralement au travers de filtres de tranches de longueur d'onde différentes). Un logiciel adapté à la recherche d'information spécifique exploite le cube image.

Le nombre de filtres utilisés peut dépasser la  
25 dizaine. On parle souvent d'imagerie hyperspectrale quand des parties du spectre exploré se situent en dehors du visible.

Ces photos prises depuis l'espace ne peuvent, et n'ont pas besoin, d'être exigeantes en matière de couleur.  
30 L'équipement utilisé a recours à des filtres optiques interférentiels pour limiter la largeur de bande spectrale de l'appareil photo à une gamme de longueurs d'onde désirée.

Ces dispositifs sont destinés à recueillir des  
35 informations colorimétriques de nature spectrale. Ils se distinguent donc de l'objet de la présente invention qui se

propose de caractériser les couleurs de manière tristimulaire.

Les unités de mesure des couleurs pour la caractérisation tristimulaire sont généralement définies  
5 par la CIE. Elles sont déduites par transformation linéaire des unités tristimulaires X, Y et Z, définies par la CIE en 1931 puis en 1964 sur la base des travaux caractérisant l'observateur standard moyen.

Une couleur, évaluée en valeurs tristimulus, est  
10 exprimée par les proportions du mélange virtuel de trois flux de couleur primaire susceptible de la reproduire à l'identique dans des conditions déterminées d'observation et d'éclairement. Les couleurs primaires doivent appartenir à un système trichromatique obéissant au principe de  
15 trivariance, c'est-à-dire être constituées des flux lumineux de trois rayonnements de couleur réels qui peuvent être arbitrairement choisis, sous la seule réserve qu'aucun d'eux ne puisse être reproduit par un mélange approprié des deux autres. Il existe donc une infinité de systèmes  
20 trichromatiques pouvant tous être liés les uns aux autres.

Quel que soit le système unitaire des primaires choisi, il existe toujours une matrice 3x3 de passage P permettant de passer d'un système à l'autre et une matrice de passage inverse  $P^{-1}$  permettant la transformation inverse.

25 R, G et B sont les valeurs des trois primaires recherchées exprimées dans un système RGB trivariant pour caractériser une couleur connue dans le système X, Y et Z.  $X_R$ ,  $Y_R$  et  $Z_R$  sont les valeurs tristimulus XYZ de la primaire rouge,  $X_gY_gZ_g$  de la primaire verte et  $X_bY_bZ_b$  de la primaire  
30 bleue. Ces 9 coefficients constituent les coefficients de la matrice 3x3.

Il suffit donc de caractériser une couleur dans le système XYZ pour l'évaluer dans tout autre système trichromatique. L'opération inverse est possible. Ces  
35 transferts impliquent la condition expresse de connaître avec précision les valeurs tristimulus XYZ de chacune des

primaires avec lesquelles il sera possible d'établir la matrice 3x3 de transfert.

Pour déterminer avec précision les valeurs tristimulus XYZ des primaires du système trichromatique du capteur d'un appareil photo numérique, il faut connaître avec précision les valeurs tristimulus des filtres, c'est-à-dire des photosites, composant le capteur.

Les valeurs tristimulus de ces primaires dépendent des conditions de prise de vue, et plus particulièrement de la nature qualitative et quantitative de l'éclairage de la scène photographiée. En effet, il s'agit d'un système additif, c'est-à-dire un mélange de flux lumineux, et s'agissant de filtres, la couleur transmise correspond au produit du facteur spectral de transmission du filtre par le facteur spectral énergétique du flux incident. Le profile ICC d'un appareil photo numérique, établi sur la base des couleurs primaires de l'appareil ne peut s'appliquer que dans des conditions de prise de vue strictement identiques à celles utilisées pour leur établissement.

En fait, tout se passe comme si l'appareil photo numérique changeait de capteur à chaque prise de vue. Car, pour évaluer la couleur perçue à la sortie du capteur, il faut ajouter au produit "facteur spectral de transmission de filtre par facteur spectral énergétique du flux incident" le facteur spectral de sensibilité du capteur, lequel varie avec l'intensité lumineuse d'excitation et la zone spatiale de l'image.

En conséquence, pour intégrer un appareil photo numérique à un dispositif de mesure de la couleur, il faut "calibrer colorimétriquement le capteur de façon bidimensionnelle" à chaque prise de vue dans le cas de conditions de prise de vue variables ou, pour une série de prises de vue, dans le cas de conditions de prise de vue constantes pour la série.

La calibration, ou l'acquisition de la connaissance des primaires d'un système additif de capture, ne peut s'obtenir que de deux façons :

- soit directement, en mesurant le facteur spectral de transmission des photosites du capteur, pour calculer les valeurs tristimulus des primaires qui sont les coefficients de la matrice,

- soit indirectement, en déduisant mathématiquement les coefficients de la matrice de transfert RGB vers XYZ à partir de la connaissance des valeurs RGB d'un échantillon de couleurs connues dans le système XYZ.

La méthode directe demeure la plus précise mais se trouve matériellement inapplicable car il faudrait être capable de mesurer le facteur spectral de transmission de chaque photosite du capteur qui sont au nombre de plusieurs millions [n fois le nombre de pixels, n étant le nombre de photosites (c'est-à-dire de filtres) par pixel] et d'une dimension de l'ordre du micron ( $\mu\text{m}$ ).

Pour contourner cette impossibilité, la présente invention apporte un procédé de calibration colorimétrique d'un appareil de capture d'image, incorporant un capteur comprenant une multiplicité de pixels, constitués chacun d'une série de photosites, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- a) la fourniture :

- d'un appareil de capture d'image,
- d'au moins un illuminant constant,
- d'un monochromateur incrémentable d'une longueur d'onde à une autre, et
- d'un écran monochrome dont on connaît le facteur de réflexion par mesure préalable au spectrophotomètre,

ledit monochromateur étant positionné de telle manière qu'il influence le flux réfléchi par ledit écran monochrome sous ledit au moins un illuminant ;

- b) sous le ou l'un desdits illuminants constants et avec un paramétrage de prise de vue constant, la prise

d'une série d'images dudit écran monochrome par ledit  
appareil de capture d'image pour chaque incrémentation  
dudit monochromateur et, le cas échéant, la répétition de  
l'opération, successivement, pour chacun des autres  
5 illuminants ;

- c) à partir desdites images, le calcul des  
coefficients d'une matrice de transfert définissant chaque  
pixel du capteur de l'appareil de capture d'image et  
déterminant ainsi le profil colorimétrique bidimensionnel  
10 spécifique du capteur ; et

- d) le stockage dudit profil colorimétrique  
bidimensionnel spécifique du capteur sous la forme d'un  
fichier de calibration.

Il est bien entendu que ce fichier de calibration est  
15 constitué par rapport au spectrophotomètre qui a servi à  
mesurer le facteur de réflexion de l'écran monochrome.

Par paramétrage de prise de vue constant, on entend  
la constance des paramètres photographiques tels que  
vitesse d'obturation, focale, sensibilité...

20 Chaque image, correspondant à une incrémentation du  
monochromateur, est capturée sous un format RAW, dans son  
état "brut de sortie du capteur", format dépendant des  
capacités du capteur. L'ensemble de ces images est stocké  
dans un cube image qui permet de calculer pour chaque pixel  
25 les valeurs tristimulus des trois primaires.

On rappellera, en tant que de besoin, que le format  
RAW spécifique du capteur est non standardisé et demeure la  
propriété du constructeur.

Il y a lieu de ne pas confondre le procédé selon  
30 l'invention avec le type de procédé décrit, par exemple,  
dans US 2002/001080.

En effet, le procédé connu en question, dont  
l'objectif est de rendre plus efficace et plus rapide  
l'obtention d'un cube image à partir de la prise de vue  
35 d'un échantillon sous plusieurs bandes spectrales  
adjacentes dans une région spectrale d'intérêt, passe par  
la calibration du spectre de l'illuminant : l'illuminant

est utilisé pour collecter, sous toutes les bandes de longueur d'onde, un cube spectral d'un échantillon, les données de ce cube image étant ensuite analysées pour déterminer la fonction du poids spectral, après quoi cette  
 5 fonction est programmée dans l'illuminant spectral de sorte que les images utilisant cette fonction de poids spectral peuvent être ensuite collectées directement depuis les échantillons.

Ce procédé connu ne porte donc pas sur la calibration  
 10 d'un appareil de capture d'image mais sur la calibration du spectre de l'illuminant.

Pour en revenir au procédé selon l'invention, le calcul des coefficients de la matrice de transfert de l'étape c) est effectué grâce aux valeurs tristimulus des  
 15 trois primaires de chaque pixel obtenues par la relation recommandée par la CIE (cette relation étant calculée à partir des valeurs des trois primaires linéarisées selon les méthodes connues):

$$20 \quad X = \sum_{\lambda} \alpha_{\lambda} \bar{X}_{(\lambda)} \tau_{(\lambda)} S_{(\lambda)} \Delta \lambda \quad \text{équation 1}$$

$$Y = \sum_{\lambda} \alpha_{\lambda} \bar{Y}_{(\lambda)} \tau_{(\lambda)} S_{(\lambda)} \Delta \lambda \quad \text{équation 2}$$

$$Z = \sum_{\lambda} \alpha_{\lambda} \bar{Z}_{(\lambda)} \tau_{(\lambda)} S_{(\lambda)} \Delta \lambda \quad \text{équation 3}$$

25

où :  $S(\lambda)$  est la répartition spectrale relative d'énergie de l'illuminant choisi ;

$\bar{X}_{(\lambda)}$ ,  $\bar{Y}_{(\lambda)}$ ,  $\bar{Z}_{(\lambda)}$  sont les composantes  
 30 trichromatiques spectrales définissant l'observateur de référence colorimétrique CIE-1931 2° ou CIE-1964 10°,

$\Delta \lambda$  est l'intervalle spectral correspondant à la largeur du spectre couverte par un filtre interférentiel correspondant à une position donnée du monochromateur  
 35 incrémentable,

$\tau_{(\lambda)}$  est le facteur spectral de transmission du filtre du photosite, et

$\alpha_s$  est le facteur de normalisation afférent à l'illuminant S

$$\alpha_s = \frac{100}{\sum_{(\lambda)} \bar{Y}_{(\lambda)} S_{(\lambda)} \Delta\lambda} \quad \text{équation 4}$$

5 A chaque incrémentation du monochromateur, le capteur renvoie :

$$\phi_{(\lambda)} = \tau_{(\lambda)} \cdot \rho_{(\lambda)} \cdot S_{(\lambda)} \cdot \Delta\lambda \quad \text{équation 5}$$

10 où:  $\phi_{(\lambda)}$  est le flux énergétique renvoyé à la sortie du photosite (équivalent à la valeur retournée dans le format RAW),

$\tau_{(\lambda)}$  est le facteur spectral de transmission du filtre du photosite (inconnu),

15  $\rho_{(\lambda)}$  est le facteur de réflexion de l'écran monochrome (connu par mesure avec un spectrophotomètre), et

$S_{(\lambda)}$  est la répartition spectrale relative d'énergie de l'illuminant choisi (connu).

Dans un premier mode de mise en oeuvre de  
20 l'invention, dit "direct", on calcule le facteur spectral de transmission dudit filtre  $\tau_{(\lambda)}$  de chaque photosite à partir de la relation 5 ci-dessus, l'écran monochrome étant nécessairement blanc.

Si l'écran monochrome est véritablement blanc, c'est-  
25 à-dire proche du diffuseur parfait, on considère que  $\rho_{(\lambda)} = 1$  et on peut donc calculer  $\tau_{(\lambda)}$  :

$$\tau_{(\lambda)} = \frac{\phi_{(\lambda)}}{S_{(\lambda)} \cdot \Delta\lambda} \quad \text{équation 6}$$

30 On considère que l'écran est véritablement blanc quand celui-ci présente un revêtement proche du réflecteur parfait tel que défini selon les recommandations de la CIE.

Si l'écran monochrome n'est pas véritablement blanc, la valeur réelle de  $\rho_{(\lambda)}$ , telle que mesurée au

spectrophotomètre, est utilisée dans l'équation 7 ci-dessous et on peut calculer  $\tau_{(\lambda)}$  :

$$\tau_{(\lambda)} = \frac{\phi_{(\lambda)}}{S_{(\lambda)} \cdot \rho_{(\lambda)} \cdot \Delta\lambda} \quad \text{équation 7}$$

5

En rassemblant ces facteurs de transmission pour l'ensemble des incréments du monochromateur, on en déduit le facteur spectral de transmission spécifique à chaque photosite. La connaissance de ce facteur spectral de transmission affecté à chaque photosite permet alors, en utilisant la relation recommandée par la CIE, de calculer pour chaque pixel les coefficients d'une matrice 3x3 de transfert des valeurs RGB du pixel repéré dans l'image vers les unités CIE-XYZ selon les équations 1, 2 et 3. Ces coefficients correspondent aux composantes tristimulus XYZ des filtres RGB des photosites du pixel.

Dans un second mode de calibration, dit "indirect", on dispose de plusieurs écrans colorés caractérisés, chacun, par leur facteur de réflexion  $0 < \rho_{(\lambda)} < 1$  que l'on mesure au spectrophotomètre. On calcule alors les valeurs tristimulus de chaque écran monochrome en utilisant les équations 1, 2 et 3 mais en remplaçant  $\tau_{(\lambda)}$  par le produit  $\rho_{(\lambda)} \cdot \phi_{(\lambda)}$ , où  $\phi_{(\lambda)}$  est le facteur spectral de transmission du filtre interférentiel correspondant à une position donnée du monochromateur incrémentable. On a accès, pour chaque incrémentation, aux valeurs RGB correspondantes inscrites dans le fichier RAW. Si on utilise  $N_i$  incréments avec  $N_e$  écrans monochromes, on dispose alors de  $N_i \cdot N_e$  données pour calculer la matrice de transfert par régression matricielle convergente.

Par rapport au mode de calibration "direct" décrit plus haut, le mode "indirect" présente l'avantage de rendre compte du coefficient de corrélation des filtres de chaque pixel du capteur avec les composantes trichromatiques spectrales de l'observateur de référence. En d'autres termes, il permet d'évaluer, pour chaque pixel, les

35

capacités du capteur à reproduire correctement les couleurs physiques et donc de réaliser une véritable cartographie bidimensionnelle de ses capacités colorimétriques.

La régression matricielle fonctionne d'autant mieux  
5 que le nombre d'images est important. Or, dans le cas de l'usage d'un écran blanc, ce nombre est limité par le nombre d'incrémentations possibles du monochromateur. Par conséquent, pour multiplier le nombre d'images, on utilise une série d'écrans monochromes, dont l'un pourra être blanc  
10 et dont les autres pourront avoir différentes nuances de gris et/ou être de couleurs variées. Le recours à un écran blanc, bien que préféré, n'est cependant pas absolument indispensable dans le cas de la calibration selon le mode indirect.

15 Que l'on procède selon le mode direct ou selon le mode indirect, on aboutit à une cartographie tristimulaire bidimensionnelle du capteur, par opposition au système monodimensionnel de l'art antérieur rappelé plus haut à propos de la conversion des images d'un périphérique donné  
20 pour transfert vers un autre périphérique.

Il est bien entendu que les calculs de l'une et l'autre méthode sont effectués par un programme d'ordinateur qui traite les informations contenues dans le cube image pour aboutir au profil colorimétrique  
25 bidimensionnel du capteur, lequel profil est enregistré sous la forme d'un fichier que l'on utilisera ultérieurement lors de l'application de l'appareil de capture d'image en colorimétrie. Quelle que soit la méthode retenue, le procédé de calibration selon l'invention est  
30 fait pixel par pixel et non sur la totalité de l'image comme dans l'art antérieur. Ce traitement ponctuel de l'image permet de la calibrer en palliant l'incontournable manque d'uniformité spatial généré par les composants optiques du système d'acquisition.

35 En outre, le procédé apporte une calibration colorimétrique supérieure à celles obtenues dans l'art antérieur car il prend en compte le manque d'homogénéité

des photosites qui constitue (et caractérise) les capteurs, ainsi que le manque éventuel d'homogénéité d'éclairage sur la totalité de la scène. Enfin, il autorise une traçabilité utile en appréciant l'écart type de chaque  
5 primaire sur l'échantillon de la totalité des pixels qui constituent l'image, ces écarts types pouvant être utilisés pour signaler une anomalie du photosite ou un défaut d'éclairage et, éventuellement, permettre une correction.

Dans de nombreux procédés de transfert, la  
10 calibration colorimétrique de l'image, pixel par pixel, contribuera à un meilleur rendu des couleurs.

Le procédé de calibration selon l'invention permet de concevoir un appareil de mesure des couleurs d'une nouvelle génération possédant, en plus des avantages cités, des  
15 capacités totalement distinctes des spectrophotomètres et des colorimètres tristimulus. En effet, en calibrant un appareil de capture d'image, successivement, sous différents illuminants connus à l'aide de prise de vue d'une série de couleurs de référence choisies pour leur  
20 saturation et tonalité proches des couleurs spectrales, il est possible d'approcher les capacités spectrales ponctuelles du capteur. En évaluant, de manière automatique, la balance des blancs de chaque prise de vue par les procédés connus utilisés par les appareils de  
25 capture d'image du marché, on dispose d'un colorimètre capable de mesurer les couleurs sous différents illuminants successifs alors que les appareils actuels sont mono illuminant. Cette dernière propriété permet de déterminer certains indices de métamérie des couleurs inaccessibles  
30 aux colorimètres tristimulus. Le procédé utilisant les valeurs en provenance du fichier RAW, on peut déduire les composantes tristimulus d'une même couleur sous différents illuminants successifs et, en conséquence, avoir accès à une certaine forme d'indice de métamérie.

35 Ainsi, un appareil de capture d'image calibré, c'est-à-dire associé au fichier de stockage du profil colorimétrique bidimensionnel spécifique du capteur dudit

appareil, pourra être utilisé pour évaluer des couleurs physiques dans une expression colorimétrique de référence, à condition :

- d'avoir accès aux informations brutes de sortie du capteur, c'est-à-dire à la lecture des fichiers RAW, et

- de vérifier que les filtres chromatiques du capteur sont dans une configuration spectrale obéissant au principe de trivariance.

La mesure de la couleur d'un échantillon coloré à l'aide d'un appareil de capture d'image calibré selon l'invention comprend les étapes suivantes :

- a) au moyen dudit appareil de capture d'image calibré, la prise d'une image dudit échantillon coloré, sous le ou l'un desdits illuminants et sous un paramétrage de prise de vue identiques à ceux du procédé qui a été utilisé pour la calibration dudit appareil, et, le cas échéant, la répétition de l'opération, successivement, pour chacun des autres illuminants ; et

- b) le calcul des valeurs tristimulus de l'échantillon à partir, d'une part, de l'image obtenue par ledit appareil de capture d'image et, d'autre part, du fichier de calibration associé audit appareil de capture d'image.

Le calcul des valeurs tristimulus de l'échantillon pourra se faire au moyen d'un programme d'ordinateur mettant en œuvre les formules connues.

Un appareil de capture d'image calibré, selon l'invention, pourra comprendre, en outre, un programme pour exécuter ledit calcul des valeurs tristimulus de l'échantillon.

L'appareil de capture d'image calibré selon l'invention fournira une image multitrstimulus certifiée colorimétriquement au-delà des capacités des matériels connus du marché.

Sous certaines conditions de prises de vue réalisées avec un paramétrage constant (sensibilité, ouverture, vitesse, focale, ...) et une intensité d'éclairement

constante, l'exploitation du cube image obtenu doit permettre :

- de rendre son autonomie à l'appareil de capture d'image, et

5 - d'évaluer les couleurs de façon indépendante de la nature qualitative de l'éclairage.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description détaillée suivante faite en référence aux dessins annexés dans lesquels :

10 - la figure 1 est un schéma du dispositif utilisé pour calibrer un appareil photo numérique, selon l'invention ; et

- la figure 2 est un schéma du procédé de calibration d'un appareil photo numérique, selon l'invention

15 Le dispositif utilisé pour calibrer un appareil photo numérique, représenté à la figure 1, comprend un appareil photo numérique 1, un écran blanc 2, un système d'éclairage 3 comprenant un illuminant 4 et une sphère intégrante 5 (sphère dont la surface interne est tapissée d'un  
20 revêtement blanc diffusant, proche du réflecteur parfait, recommandé par la CIE pour les géométries d'observation normalisées), ladite sphère intégrante 5 étant placée entre l'appareil photo numérique 1 et l'écran blanc 2, et un monochromateur 6 disposé entre l'illuminant 4 et la sphère  
25 intégrante 5. Le système d'éclairage 3, le paramétrage de prise de vue de l'appareil photo numérique 1, ainsi que la géométrie de l'écran blanc 2 sont constants.

Le système d'éclairage 3 peut être remplacé par un plafonnier ou tout autre moyen d'éclairage constant. De  
30 même, l'écran blanc 2 est représenté sous forme plate mais celui-ci peut avoir d'autres formes.

Le monochromateur 6 est un dispositif optique capable de fournir une radiation monochromatique à partir de la lumière blanche et peut donc être constitué d'un réseau de  
35 diffraction qui disperse la lumière blanche (la sélection se faisant à l'aide d'une fente), d'un prisme pivotant

devant une fente, d'une roue à filtres interférentiels ou d'une série de diodes.

La roue à filtres interférentiels est un mode de réalisation préféré et peut, alors, se situer aussi bien à la sortie de l'illuminant 4 que devant l'objectif de l'appareil photo numérique 1. Selon la position de la roue à filtres, les couleurs fluorescentes peuvent être ou ne pas être mesurables.

Le principe de ce dispositif de calibration est illustré à la figure 2. Le dispositif étant placé comme représenté à la figure 1, et le monochromateur est mis à zéro, l'étape A consiste à régler le monochromateur 6 selon une première incrémentation. A l'étape B, il est pris une image de l'écran blanc 2, coloré par la lumière monochromatique correspondant à cette première incrémentation. L'image obtenue est alors stockée, à l'étape C, dans un cube image. A l'étape D, on compare le nombre de prises de vue  $N_p$  au nombre d'incrémentations possibles  $N_i$  du monochromateur et si  $N_p < N_i$ , les étapes A à D sont répétées, avec un paramétrage de prise de vue constant de l'appareil photo numérique 1, jusqu'à ce qu'à l'issue d'une étape D, il soit constaté que le nombre de prises de vue est égal au nombre d'incrémentations possibles du monochromateur 6. Le cube image est alors complet et les images qui le constituent sont exploitées, à l'étape E par un programme d'ordinateur adapté à calculer le profil colorimétrique bidimensionnel du capteur de l'appareil photo numérique, soit par le procédé de calibration "direct", soit par le procédé de calibration "indirect", ces termes étant tels qu'explicités plus haut.

Dans le cas du procédé indirect, cependant, l'opération de calibrage comporte avantageusement, outre la prise d'une série de  $N_i$  images de l'écran blanc, où  $N_i$  est le nombre d'incrémentations du monochromateur, c'est-à-dire une série de  $N_{i_{\text{blanc}}}$  images, la prise d'autres séries d'images  $N_{i_{\text{gris}1}}$ ,  $N_{i_{\text{gris}2}}$ , etc.,  $N_{i_{\text{couleur}1}}$ ,  $N_{i_{\text{couleur}2}}$ , etc., avec autant de combinaisons "écran couleur"/"Ni incrémentsations

du monochromateur" qu'il y a d'écrans gris1, gris2, etc., couleur1, couleur2, etc.

Pour la réalisation de chaque série d'images, on substitue, à l'écran blanc 2, par exemple, un écran d'un certain gris, dit gris1, on remet à zéro le monochromateur 6 et l'on exécute la même opération que celle qui a été décrite à propos de l'écran blanc 2. On procède de même pour tout autre écran non blanc et, en fin d'exécution, on obtient un cube image qui incorpore les informations issues des images  $Ni_{\text{blanc}}$ ,  $Ni_{\text{gris1}}$ ,  $Ni_{\text{gris2}}$ , etc.,  $Ni_{\text{couleur1}}$ ,  $Ni_{\text{couleur2}}$ , etc.

Que l'on soit passé par la voie directe ou par la voie indirecte, à l'issue du procédé de calibration, l'appareil photo numérique 1 est "calibré", c'est-à-dire que l'on connaît le profil colorimétrique bidimensionnel de son capteur. Ce profil est stocké sous la forme d'un fichier sur tout support approprié, tel que sur un CD-ROM utilisable dans un lecteur, sur une carte intégrable à l'appareil photo numérique ou sur un serveur distant.

L'appareil photo numérique calibré, comme représenté à la figure 2, peut être utilisé en colorimétrie. Pour ce faire, on place l'appareil photo numérique calibré, c'est-à-dire associé au fichier définissant le profil colorimétrique bidimensionnel du capteur de l'appareil photo numérique, dans les mêmes conditions d'éclairage et de paramétrage de prise de vue que lors de sa calibration. Puis, on prend en photo un objet coloré dont on veut mesurer la couleur. L'image obtenue est traitée par un programme d'ordinateur sur la base des informations contenues dans le fichier associé à l'appareil de capture d'image et l'on obtient ainsi les valeurs trichromatiques de chaque pixel de l'image. Ces valeurs exprimées en écarts de couleur permettront un contrôle et une assurance qualité de la couleur.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de calibration colorimétrique d'un  
appareil de capture d'image, incorporant un capteur  
5 comprenant une multiplicité de pixels constitués chacun  
d'une série de photosites, ledit procédé comprenant les  
étapes suivantes :

- a) la fourniture

- d'un appareil de capture d'image (1),
- 10 • d'au moins un illuminant constant (4),
- d'un monochromateur incrémentable (6), d'une  
longueur d'onde à une autre, et

• d'un écran monochrome dont on connaît le facteur de  
réflexion par mesure préalable au spectrophotomètre,  
15 ledit monochromateur (6) étant positionné de telle  
manière qu'il influence le flux réfléchi par l'écran  
monochrome sous ledit au moins un illuminant (4) ;

- b) sous le ou l'un desdits illuminants constants  
(4) et avec un paramétrage de prise de vue constant, la  
20 prise d'une série d'images dudit écran monochrome par ledit  
appareil de capture (1), pour chaque incrémentation dudit  
monochromateur (6) et, le cas échéant, la répétition de  
l'opération, successivement, pour chacun des autres  
illuminants (4) ;

25 - c) à partir desdites images, le calcul des  
coefficients d'une matrice de transfert définissant chaque  
pixel du capteur de l'appareil de capture d'image (1) et  
déterminant ainsi le profil colorimétrique bidimensionnel  
spécifique du capteur ; et

30 - d) le stockage dudit profil colorimétrique  
bidimensionnel spécifique du capteur sous la forme d'un  
fichier de calibration.

2. Procédé de calibration selon la revendication 1,  
caractérisé en ce qu'il utilise un écran blanc (2) comme  
35 écran monochrome

3. Procédé de calibration selon la revendication 1 ou  
2, caractérisé en ce qu'il utilise successivement une série

d'écrans gris et/ou de couleurs variées, comme écran monochrome.

4. Procédé de calibration selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le calcul des coefficients de la matrice de transfert de l'étape c) est effectué grâce aux valeurs tristimulus des trois primaires de chaque pixel obtenues par la relation suivante :

$$X = \sum \lambda \alpha_s \bar{X}(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) \Delta \lambda$$

$$Y = \sum \lambda \alpha_s \bar{Y}(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) \Delta \lambda$$

$$Z = \sum \lambda \alpha_s \bar{Z}(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) \Delta \lambda$$

10

où :  $\tau(\lambda)$  est le facteur spectral de transmission du filtre du photosite,

$S(\lambda)$  est la répartition spectrale relative d'énergie de l'illuminant choisi,

15

$\bar{X}(\lambda)$ ,  $\bar{Y}(\lambda)$ ,  $\bar{Z}(\lambda)$  sont les composantes trichromatiques spectrales définissant l'observateur de référence colorimétrique CIE-1931 2° ou CIE-1964 10,

$\Delta \lambda$  est l'intervalle spectral correspondant à la largeur du spectre couverte par un filtre interférentiel correspondant à une position donnée du monochromateur  
20 incrémentable, et

$\alpha_s$  est le facteur de normalisation afférent à l'illuminant S.

25

$$\alpha_s = \frac{100}{\sum \lambda \bar{Y}(\lambda) S(\lambda) \Delta \lambda}$$

5. Procédé de calibration selon la revendication 4 quand elle dépend de la revendication 2, caractérisé en ce qu'on calcule  $\tau(\lambda)$  par la relation :

30

$$\tau(\lambda) = \frac{\phi(\lambda)}{\rho(\lambda) S(\lambda) \Delta \lambda}$$

où :  $\rho(\lambda)$  est le facteur de réflexion de l'écran monochrome et

$\phi(\lambda)$  est le flux énergétique renvoyé à la  
5 sortie du photosite.

6. Procédé de calibration selon la revendication 4 quand elle dépend de la revendication 3, caractérisé en ce qu'on utilise une série d'écrans monochromes différents les uns des autres, les étapes a et b étant répétées autant de  
10 fois qu'il y d'écrans différents, on calcule la relation de la revendication 4, pour chacun des écrans, en remplaçant  $\tau(\lambda)$  par le produit  $\rho(\lambda) \cdot \phi(\lambda)$ ,  $\phi(\lambda)$  étant le facteur spectral de transmission du filtre interférentiel, puis on effectue une méthode de régression matricielle convergente pour obtenir  
15 la matrice de transfert.

7. Appareil de capture d'image calibré, caractérisé en ce qu'il résulte de l'association d'un appareil de capture d'image (1) et d'un fichier de calibration tels que définis dans la revendication 1.

20 8. Appareil de capture d'image calibré selon la revendication 7, qui est un appareil photo numérique.

9. Appareil de capture d'image calibré selon la revendication 7, qui est un scanner.

10. Appareil de capture d'image calibré selon la  
25 revendication 7, qui est une caméra numérique.

11. Programme d'ordinateur directement chargeable dans la mémoire d'un ordinateur pour exécuter l'étape c) du procédé selon la revendication 1 lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

30 12. Procédé de mesure de la couleur d'un échantillon coloré à l'aide d'un appareil de capture d'image calibré selon l'une quelconque des revendications 7 à 10, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- a) au moyen dudit appareil de capture d'image  
35 calibré, la prise d'une image dudit échantillon coloré sous le ou l'un desdits illuminants et sous un paramétrage de prise de vue identiques à ceux du procédé, selon l'une

quelconque des revendications 1 à 6, qui a été utilisé pour la calibration dudit appareil et, le cas échéant, la répétition de l'opération, successivement, pour chacun des autres illuminants ; et

- 5           - b) le calcul des valeurs tristimulus de l'échantillon à partir, d'une part, de l'image obtenue par ledit appareil de capture d'image et, d'autre part, du fichier de calibration associé audit appareil.

10           13. Programme d'ordinateur directement chargeable dans la mémoire d'un ordinateur pour exécuter le calcul de l'étape b) du procédé selon la revendication 12 lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

15           14. Appareil de capture d'image calibré selon l'une quelconque des revendications 7 à 10, caractérisé en ce qu'il comprend, en outre, un programme pour exécuter le calcul de l'étape b) du procédé selon la revendication 12.

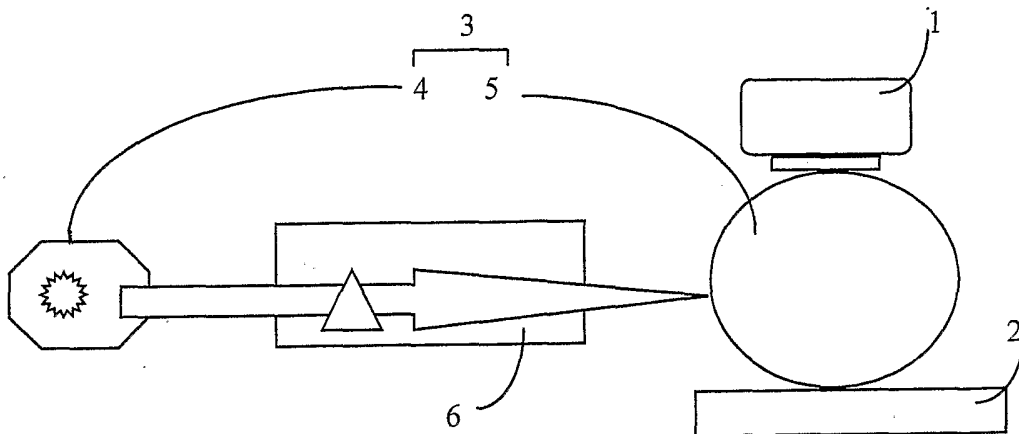


Figure 1

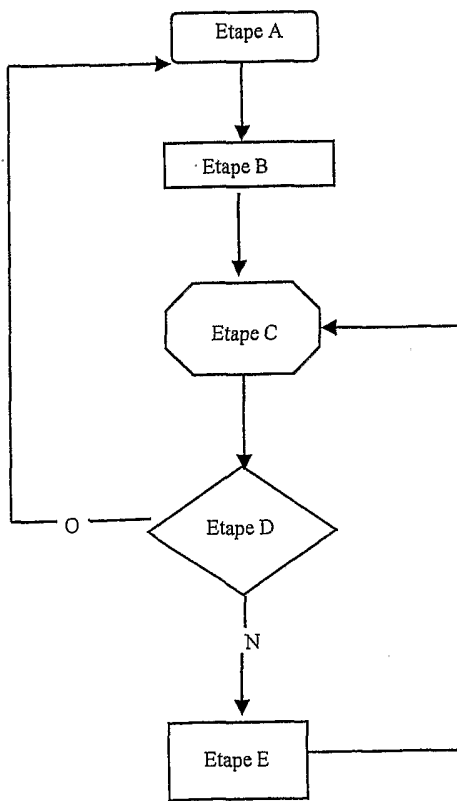


Figure 2