

Verfahren zur farbmetrischen Kalibrierung

Dietmar Kollhoff, Heiko Kempe; Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V., Langewiesener Str. 16, 98693 Ilmenau, Tel. 03677/663267

Zusammenfassung

Farbmetrische Kalibrierungen sind notwendig, wenn man die Farbwerte bestimmter Bildszenenelemente messen oder zur Entscheidungsfindung benutzen möchte. Ursachen von Farbabweichungen sind im wesentlichen Schwankungen der Szenenbeleuchtung und Toleranzen der zum Bildeinzug nötigen Elektronik. Durch eine lineare Farbmatrixierung kann eine Anpassung der aufgenommenen Farbwerte an absolute Farbnormale erreicht werden. Die Umstimmmatrizen können über die Bewertung von Farbabständen im RGB- oder CIELAB-Raum ermittelt werden. Bei einigen Anwendungen ist die Aufnahme eines Referenzfarbensatzes zu aufwendig. Hier wird ein zweistufiges Verfahren eingesetzt, das aus einmaliger absoluter Farbkalibrierung und regelmäßigem Unbuntabgleich besteht. In Simulationen kann gezeigt werden, daß dieses Verfahren zu Restfehlern führt, die nur unwesentlich größer als die Fehler beim Abgleich mit Testfarbenmethode sind.

1 Einleitung

In einem Farbbildverarbeitungssystem haben viele Komponenten Einfluß auf die Qualität der Farbaufnahme. Ein besonderes Problem stellen dabei die Vorgänge dar, die zu einer Veränderung der Farbwiedergabe bzw. Farberfassung führen. Dazu zählen Lampenalterung und Lampenwechsel, Änderung der Kameraparameter durch Alterung und Erwärmung, Kamerawechsel, Änderung der Kennlinie des AD-Wandlers des Color-Frame-Grabbers. Die Auswirkung all dieser Veränderungen können mittels einer Farbkalibrierung erfaßt und korrigiert werden.

Ein Anwendungsgebiet für die Farbkalibrierung stellt z.B. der Einsatz der Farbbildverarbeitung zur Inspektion von Hautarealen dar. Dort besteht eine Forderung darin, daß die aufgenommenen Körperfarben möglichst identisch zu ihren Originalfarben sind. Auf Grund der hohen Adaptionfähigkeit des menschlichen Auges werden beim Betrachten einzelner Aufnahmen Farbabweichungen weitestgehend toleriert. Will man allerdings zwei Aufnahmen vergleichen, welche zu verschiedenen Zeiten unter verschiedenen Bedingungen aufgenommen wurden, so werden sich Farbverstimnungen und Helligkeitsunterschiede als störend erweisen.

Diese Abweichungen der aufgenommenen Farbwerte \mathbf{f}_I , hervorgerufen durch den Einsatz verschiedener Kameras (unterschiedliche Aufnahmeorte) und insbesondere durch wechselnde Beleuchtungsverhältnisse, können mittels linearer Transformation korrigiert werden:

$$\begin{pmatrix} R_M \\ G_M \\ B_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_I \\ G_I \\ B_I \end{pmatrix}, \text{ oder } \mathbf{f}_M = \mathbf{M}\mathbf{f}_I \quad (1)$$

Die Aufgabe von Kalibrieralgorithmen besteht nun darin, die Elemente der Matrix \mathbf{M} so zu bestimmen, daß die Differenzen aller \mathbf{f}_M zu den jeweils zugehörigen Soll-Farbwerten \mathbf{f}_S möglichst

gering werden. Die lineare Korrektur besitzt den Vorteil, daß Hardwaremultiplizierer, wie sie auf handelsüblichen Color-Frame-Grabbern zu finden sind, genutzt werden können. Weitere, häufig verwendete Farbkorrekturverfahren beruhen auf nichtlinearen Korrekturen, z.B. mittels Polynomansatz oder Korrektur-LUT, z.B. /Wölker93/, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.

2 Absolute Farbkalibrierung mit Referenzfarbensatz

Die hier vorgestellten Verfahren beruhen auf einer absoluten Farbkalibrierung. Den Ausgangspunkt stellt ein Referenzfarbensatz dar, wobei die Farbwerte \mathbf{f}_s der einzelnen Referenzmuster bekannt sind. Bei unseren Untersuchungen wurde ein Referenzfarbensatz nach DIN 6169 verwendet. Es kann aber auch ein problemangepaßter Farbensatz zum Einsatz kommen. Mittels Kameraaufnahme werden unter den jeweils herrschenden Bedingungen die Ist-Farben \mathbf{f}_i ermittelt. Ein Optimierungskriterium ist die Minimierung der Fehlerquadratsumme im RGB-Farbraum über alle anz Referenzfarben:

$$\sum_{i=1}^{anz} ((\mathbf{f}_{s_i} - \mathbf{M}\mathbf{f}_{i_i})^T (\mathbf{f}_{s_i} - \mathbf{M}\mathbf{f}_{i_i})) \rightarrow \min \quad (2)$$

Die Summe wird dann minimal, wenn die ersten Ableitungen nach m_{ij} verschwinden /Lang84/. Vereint man nun Farbvektoren zu Farbmatrizen in folgender Weise: $\mathbf{F} = (\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_{anz})$, so ergibt sich als Lösung:

$$\mathbf{M} = \mathbf{F}_s^T \mathbf{F}_I (\mathbf{F}_I^T \mathbf{F}_I)^{-1} \quad (3)$$

Da das Farbabstandsempfinden der menschlichen Sinneswahrnehmung sich deutlich vom euklidischen Abstand im RGB-Farbraum unterscheidet, wurde zur Bewertung des eigentlichen Farbabstandes für Körperfarben der $L^*a^*b^*$ -Farbraum (DIN 6174) entwickelt. Die Farbwerte L^* , a^* und b^* werden über eine nichtlineare Transformation aus den XYZ-Werten berechnet:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \sqrt[3]{(Y/Y_n)} - 16 \\ a^* &= 500 \left[\sqrt[3]{(X/X_n)} - \sqrt[3]{(Y/Y_n)} \right] \\ b^* &= 200 \left[\sqrt[3]{(Y/Y_n)} - \sqrt[3]{(Z/Z_n)} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

mit X_n, Y_n, Z_n - Normfarbwerte des vollkommen mattweißen Körpers unter der beleuchtenden Lichtart. Da nun der Transformation von RGB nach $L^*a^*b^*$ nichtlineare Funktionen zu Grunde liegen, ist die Methode der kleinsten Fehlerquadrate nicht mehr explizit durchführbar. Realisiert wurde ein Gradientenabstiegsverfahren auf der Basis eines Gauß-Algorithmus zur Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme. Die Startwertbestimmung der Matrix \mathbf{M} geschieht mittels oben beschriebener Methode. Es ergibt sich die in Abb 1 gezeigte Struktur für das Berechnungsverfahren. Das lineare System ist so zu optimieren, daß der Fehler zwischen den korrigierten Istwerten L_m^*, a_m^*, b_m^* und den Sollwerten L_s^*, a_s^*, b_s^* für die gegebenen RGB-Vektoren minimal wird.

Die Experimente zeigen, daß mit diesem Ansatz sehr gute Ergebnisse bei der Farbkalibrierung und bei der Ähnlichkeit umgestimmter Aufnahmen unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen erreicht werden. Verglichen mit dem Optimieralgorithmus im RGB-Raum, konnte die Summe der

Farbabstände um bis zu 30 Prozent verringert werden. Sehr wichtig ist die geeignete Auswahl des Referenzfarbensatzes. Der Referenzfarbensatz nach DIN 6169 erwies sich wegen der gleichmäßigen Verteilung der Farbmuster über den gesamten Farbraum als sehr gut geeignet. Weiterhin zeigte sich die hohe Empfindlichkeit den Menschen in Bezug auf weiße Farbe. Deshalb mußte der Farbwert der weißen Referenzfarbe mit einem höheren Gewicht in die Rechnungen eingehen.

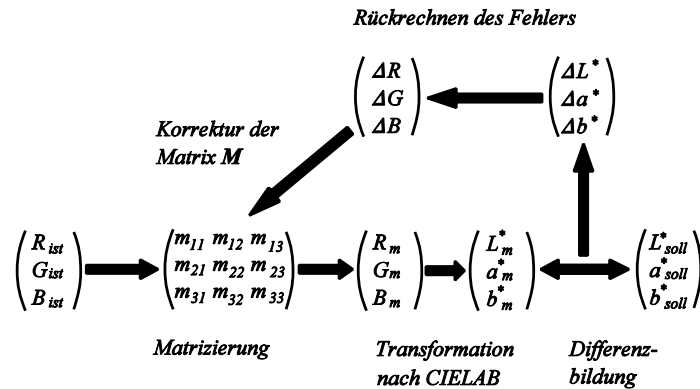


Abb. 1: Iterationsprozeß zur Ermittlung der Korrekturmatrix über den Farbabstand im CIELAB-Raum

Voraussetzung für eine erfolgreiche lineare Umstimmung ist ein vorhergehender Schwarzabgleich des AD-Wandlers zur Kompensation des Null-Offsets.

3 Zweistufige Kalibrierung

Ein weiteres realisiertes Kalibrierungsverfahren ist zweistufig aufgebaut und kommt überall dort zum Einsatz, wo die Beleuchtung nur wenig schwankt und die Aufnahme des kompletten Referenzfarbensatzes zu aufwendig ist. Dies ist meistens dann gegeben, wenn Kamera und Beleuchtungssystem eine Einheit bilden und außerhalb des Labors eingesetzt werden, wie z.B. in der Sprechstunde des Hautarztes. Die Forderung war, bei der "Vor-Ort-Kalibrierung" nur eine unbunte Farbe zu benötigen.

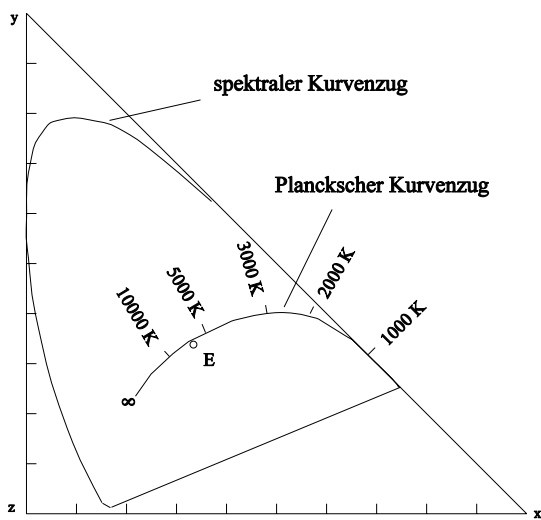


Abb. 2: Planckscher Kurvenzug im xy-Diagramm

Diese indirekte Testfarbenmethode geht von der Tatsache aus, daß sich bei Licht-arten, die zur Gruppe der Planckschen Strahler zählen, Farbverstimmungen determiniert verhalten /Rich81/. Mißt man z.B. die Farbwerte einer Halogenlampe bei verschiedenen Farbtemperaturen und trägt diese Werte im xy-Diagramm ein, so bilden sie einen Kurvenzug nahe dem des Planckschen Strahlers.

In einem ersten Schritt werden die Koeffizienten der zur Farbkorrektur notwendigen Trans-

formationsmatrix in oben beschriebener Art und Weise vom Systemhersteller ermittelt und gespeichert. Den zweiten Schritt stellt eine Helligkeitskalibrierung (Weißabgleich) dar, die regelmäßig vor Ort durchgeführt wird. Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein der für den Weißabgleich benötigten Testvorlage mit den zugehörigen Farbwerten. Die Umstimmung erfolgt dann mittels linearer Skalierung und der festen Korrekturmatrix. In der folgenden Abschätzung wird gezeigt, wie sich die Farbaufnahmefehler verhalten, wenn anstatt einer exakten farbmetrischen Kalibrierung lediglich ein Weißabgleich erfolgt.

Die Spektren der verwendeten 17 Testfarben (DIN 6169 Teil 6), die Spektralwerte der Lichtart D65 (DIN 5033 Teil 7) sowie die Norm-Spektralwertkurven (DIN 5033 Teil 2) lagen tabellarisch im Intervall von 380nm bis 765nm in Schritten zu 5nm vor. Die Spektralwerte der aufgeführten Temperaturstrahler wurden rechnerisch nach dem Planckschen Strahlungsgesetz (DIN 5031 Teil 8) ermittelt. Da zur Bildwiedergabe (Farbwiedergabe) Monitore zum Einsatz kommen, und deren Bildschirmphosphore sich an die EBU-Phosphore anlehnen (DIN 6169 Teil 6), bilden die Farbwerte der verwendeten Testfarben, aufgenommen unter der Lichtart D65 ($T_f=6504$ K), die Vergleichsreferenz bezüglich der Farbaufnahmefehler.

Zunächst soll gezeigt werden, wie der Fehler trotz Farbkalibrierung von der verwendeten Lichtart abhängt. Als Lichtquellen wurden Temperaturstrahler simuliert. Dafür wurden die Farbwerte R_{ist} , G_{ist} und B_{ist} der Farbmuster des Referenzfarbensatzes für verschiedene Farbtemperaturen berechnet. Anschließend wurden Korrekturmatrixen derart ermittelt, daß die Fehlerquadratsumme bezüglich der Farbwerte R_{D65} , G_{D65} und B_{D65} minimal wird. Als Fehlermaß ΔE wurde für jede Farbtemperatur die normierte Abstandssumme der optimal umgestimmten Farbwerte bezüglich der Farbwerte unter D65 gebildet.

$$\Delta E = \frac{1}{17} \sum_{i=1}^{17} \sqrt{(R_{D65i} - R_{opti})^2 + (G_{D65i} - G_{opti})^2 + (B_{D65i} - B_{opti})^2} \quad (5)$$

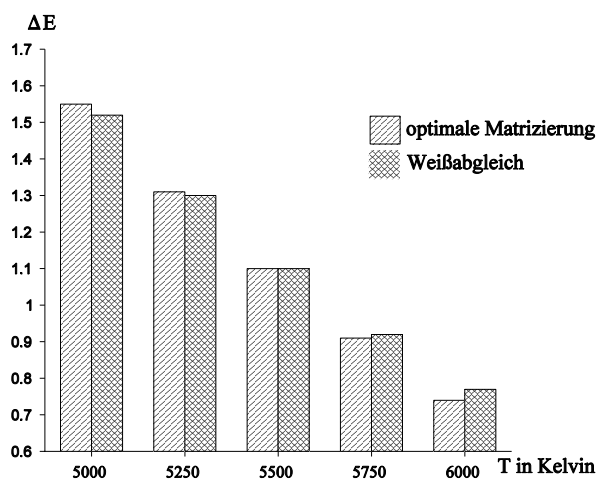


Abb. 3 Fehlervergleich zwischen der Testfarbenmethode und dem zweistufigen Verfahren mit Weißabgleich

Als nächstes wurde der Fehler berechnet, der sich aus dem zweistufigen Verfahren ergibt. Dazu wurde simuliert, daß der Aufnahmekanal nach Weiß abgeglichen wird und anschließend die Matrizierung mit den mittels Testfarbenmethode bestimmten Koeffizienten durchgeführt wird. Aus der Abb. 3 wird deutlich, daß die normierte Fehler-summe trotz Matrizierung mit fallender Farbtemperatur der verwendeten Lichtart stark zunimmt. Die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren dagegen sind bezogen auf den Gesamtfehler gering.

Damit konnte gezeigt werden, daß eine Vereinfachung der colorimetrischen Kalibrierung am Einsatzort möglich ist, in dem lediglich ein regelmäßiger Weißabgleich durchgeführt

wird und die Matrizierung mit einer einmalig bestimmten, auf die mittlere Farbtemperatur der verwendeten Lichtart bezogenen Korrekturmatrix erfolgt.

Literatur:

- /Lang84/ Lang, H.: Optimierung von Matrixkoeffizienten in Fernsehaufnahmegeräten. Fernseh- und Kinotechnik 38 (1984), S. 144-148
- /Rich81/ Richter, M.: Einführung in die Farbmeterik. 2. Auflage, Walter de Gruyter Berlin, 1981
- /Wölker93/ Wölker, W.: Ein Verfahren zur Farbraumanpassung CCD-basierter Bilderfassungssysteme. Mustererkennung 1993, Proceedings 15. DAGM-Symposium, S.749-756