

Charakterisierung & Optimierung der Farbproduktion eines topometrischen Messsystems

Matthias Westhäuser*, Dieter Dirksen*, Guido Bischoff*, Zoltan Böröcz*, Cornelia Denz**, Gert von Bally*

*Labor für Biophysik, WWU Münster

**Institut für Angewandte Physik, WWU Münster

m_west05@uni-muenster.de

Mit Methoden der Farbmeterik können Farbinformationen, die bei Aufnahmen mit Hilfe eines topometrischen Messsystems aufgezeichnet werden, qualitativ und quantitativ aufgewertet werden. Erreicht wird eine Farboptimierung durch eine Kalibrierung der CCD-Kamera, die Wahl eines geeigneten Debayer-Algorithmus und einer auf 3D-Daten basierenden Intensitätskorrektur des Bildes.

1 Einführung

3D-Messsysteme ermöglichen die räumliche Erfassung von farbigen Oberflächen mit Hilfe von CCD-Kameras [1]. Ist eine genaue Farbproduktion erwünscht, beispielsweise in den Anwendungsgebieten der Medizintechnik (Prothetik), Materialprüfung oder Archäologie, müssen Methoden der Farbmeterik angewendet werden, die sowohl physikalische als auch physiologische Aspekte der Farbwahrnehmung berücksichtigen.

Eine Optimierung der Farbproduktion lässt sich durch 2D-Methoden (Kalibrierung, Debayer-Algorithmus, Gamma-Einstellung der Kamera, etc.) und 3D-Methoden (orientierungs- und entfernungsabhängige Intensitätskorrektur) verwirklichen, die unabhängig voneinander durchgeführt werden können.

2 Topometrisches Messsystem



Abb. 1 Kopf des topometrischen Messsystems.

Das topometrische Messsystem (Abb. 1) besteht aus einem Videoprojektor (LCD) und mindestens zwei CCD-Kameras mit einer Auflösung von 1024x768 Pixeln, mit deren Hilfe das projizierte Streifenmuster sowie ein Weißlichtbild aufgenommen werden. Das System ist über das IEEE 1394-Interface mit einem PC verbunden.

3 Farbkalibrierung der CCD-Kameras

Vor der eigentlichen Kalibrierung werden die Referenzfarbwerte einer Farbkalibriertafel spektrophotometrisch im visuell gleichabständigen CIE-Lab*-

Farbraum bestimmt. In diesem dreidimensionalen Farbraum werden gleichzeitig auch die Farbstände zwischen Referenz- und Messdaten bestimmt; sie entsprechen dem euklidischen Abstand zweier Punkte.

Mit Hilfe eines numerischen Ausgleichsverfahrens (Polynomansatz, [2]) werden die sRGB-Daten des CCD-Kamerabildes direkt in den Lab*-Farbraum konvertiert, so dass der Farbabstand zu den Referenzwerten minimal wird. Es gilt:

$$\begin{pmatrix} v_{1,1} & \dots & v_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n,1} & \dots & v_{n,m} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_m \end{pmatrix}, \quad (1)$$

wobei sich die Koeffizientenmatrix aus den n gemessenen sRGB-Werten der CCD-Kamera zusammensetzt. Für einen Polynomansatz 2. Ordnung ($m = 10$) erhält man z.B. die einzelnen Untervektoren ($i = 1, 2, \dots, n$) der Matrix zu:

$$v_{i,1..m} = [1, R_i, G_i, B_i, R_i^2, G_i^2, B_i^2, R_i G_i, R_i B_i, G_i B_i] \quad (2)$$

Der Vektor auf der rechten Seite des Gleichungssystems (1) enthält die CIE-Lab* Luminanz-Koordinaten der Referenzwerte; die Gleichungen für die a- und b-Koordinaten ergeben sich analog.

Die durch die Lösung des Gleichungssystems erhaltenen Transformationskoeffizienten α_1 bis α_m können auf beliebige andere Farbbilder unter gleichen Beleuchtungs- und Aufnahmebedingungen angewendet werden.

Die Effektivität einer Farbkalibrierung wird durch viele Faktoren beeinflusst. Die wichtigsten sind dabei: Material- und Oberflächeneigenschaften der verwendeten Farbkalibriertafel, Anzahl und Diversität der Referenzfarben, Ordnung des Polynomansatzes, Intensität und Homogenität des projizierten Weißlichtbildes, Linearität des CCD-Eingangssignals (Gamma-Faktor) sowie das verwendete Debayer-Verfahren zur Farbinterpolation.

4 Debayer-Verfahren

Die einzelnen Pixel einer CCD-Kamera detektieren jeweils spektrale Teilbereiche des Lichtes in einer der Grundfarben Rot, Grün und Blau, wobei die Farbfilter über den Pixeln regelmäßig angeordnet sind (Bayer-Matrix). Das Resultat ist ein Grauwert für jeden Pixel. Um aus dem Graubild ein Farbbild zu erzeugen, können verschiedene Debayer-Verfahren zur Interpolation eingesetzt werden.

Die verschiedenen untersuchten Debayer-Verfahren beeinflussen messbar die Farbproduktion sowie den qualitativen Eindruck an Grenzflächen mit großen Farbunterschieden.

5 Intensitätskorrekturverfahren

Mit Hilfe der 3D-Daten des Messsystems (Kameraposition und Position der Lichtquelle relativ zum eingemessenen Gegenstand sind bekannt) kann eine orientierungs- und entfernungsabhängige Intensitätskorrektur der sRGB-Werte des aufgenommenen Objekts vorgenommen werden.

Zugrunde liegt die Annahme, dass das Objekt über eine diffus reflektierende Oberfläche verfügt, bei der Licht gleichmäßig in alle Raumwinkel abgestrahlt wird (Lambertscher Strahler) und der Videoprojektor als Punktlichtquelle angesehen werden kann.

Es wird ein Verfahren eingesetzt, das sowohl die Intensitätsunterschiede, die durch die reflexionsbedingte Neigung der Farbtafel bei der Kalibrierung hervorgerufen werden, als auch optional die Intensitätsunterschiede bei beliebigen 3D-Datensätzen korrigiert. Schattenwürfe werden dabei entfernt und man erhält ein homogen aufgeleuchtetes Objekt. Durch das Hinzufügen von virtuellen Lichtquellen können dann verschiedene Beleuchtungssituationen am Rechner nachgebildet werden.

6 Resultate

Mit Hilfe einer Farbkalibrierung konnten die durchschnittlichen und maximalen Farbabstände bei üblichen Messsituationen im Rahmen des Arbeitsbereiches eines topometrischen Messsystems mess- und wahrnehmbar verbessert werden. Tabelle 1 liefert einen Überblick über die Leistungsfähigkeit einer Kalibrierung mit einem Polynomansatz der 3. Ordnung.

Farbtafel	$\Delta E_{76,max}$ (vor Korrektur)	$\Delta E_{76,mittel}$ (v. K.)	$\Delta E_{76,max}$ (nach K.)	$\Delta E_{76,mittel}$ (n.K.)
Gretag	44,30	14,21	18,87	4,75
IT 8	54,47	17,52	20,34	4,15

Tab. 1 Farbabweichungen ΔE_{76} vor und nach einer Kalibrierung.

Weitere Verbesserungen der Farbabstände ließen sich durch Anwendung einer 3D-Intensitätskorrektur erzielen, wie in Tabelle 2 verdeutlicht wird.

Kalibrierung	$\Delta E_{94,max}$ (ohne Korrektur)	$\Delta E_{94,mittel}$ (o.K.)	$\Delta E_{94,max}$ (mit K.)	$\Delta E_{94,mittel}$ (m.K.)
Keine Kalibrierung	41,83	29,04	26,90	14,59
Kalibrierung 3. Ordnung	12,12	3,56	12,02	2,93

Tab. 2 Farbabweichungen ohne/mit Intensitätskorrektur.

Durch den Einsatz manueller Debayer-Algorithmen ließen sich die Farbabweichungen im Vergleich zum internen UYVY-Hardware-Modus nochmals senken (siehe Tabelle 3). Der beste Gesamtfarbeindruck entsteht bei Verwendung des „Edge Sensing 1 (Smooth Hue Transition, logarithmisch)“-Algorithmus.

Algorithmus	$\Delta E_{76,max}$	$\Delta E_{76,mittel}$	$\Delta E_{94,max}$	$\Delta E_{94,mittel}$
Hardware (UYVY)	23,12	4,83	13,55	2,93
Software (Hersteller)	21,19	3,54	12,73	2,37
Nearest Neighbor	21,18	3,57	12,72	2,39
Bilinear	21,09	3,57	12,72	2,38
Edge Sensing 1	21,13	3,65	12,78	2,46

Tab. 3 Farbabweichungen ΔE_{76} und ΔE_{94} in Abh. vom Interpolationsverfahren.

7 Zusammenfassung

Die Methoden der Farbmatrik erlauben es, die Farbproduktion der CCD-Kameras in einem topometrischen Messsystem mess- und wahrnehmbar zu optimieren. Das vorgestellte Kalibrierverfahren ist in der Lage, die durchschnittlichen Farbabstände zu Referenzfarben um etwa 2/3 zu senken. Unter Einbezug von 3D-Daten können weitere generelle Verbesserungen erzielt werden.

8 Danksagung

Diese Arbeiten wurden gefördert durch das Programm für „Innovative Medizinische Forschung“ (IMF) des Universitätsklinikums Münster und das Interreg IIIA Programm der Europäischen Union.

Literatur

- [1] G. Bischoff, D. Dirksen, „True color 3-d data acquisition for the analysis of facial structures“ in: *Biomedical Engineering* **50**(1), 50-51(2005)
- [2] J.Y. Hardeberg, „Acquisition and Reproduction of Color Images“ (Dissertation.com 2001)