

Optimierung der Farbproduktion eines 3D-Koordinatenmesssystems

D. Dirksen^{**}, G. Bischoff^{*}, Z. Böröcz^{*}, G. von Bally^{*}

^{*}Labor für Biophysik, Universität Münster

^{**}Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Universität Münster

E-mail: LBiophys@uni-muenster.de

Es werden verschiedene farbmetrische Ansätze zur Optimierung der Farbproduktion in einem 3D-Koordinatenmesssystem auf der Basis der Streifenprojektionstechnik vorgestellt und bewertet.

1 Einführung

Beim Einsatz von 3D-Koordinatenmesssystemen im medizinischen Umfeld – etwa zur Erfassung von Gesichtsoberflächen – erhöht die Einbeziehung von Farbinformationen die Akzeptanz derartiger Verfahren bei Behandlern und Patienten und liefert wichtige Zusatzinformationen beispielsweise für das Qualitätsmanagement bei chirurgischen Eingriffen [1]. Voraussetzung ist jedoch eine hinreichend gute Farbproduktion, die auch quantitativ evaluierbar ist. Zu diesem Zweck werden farbmetrische Kalibrierverfahren und die fotogrammetrische Integration hoch auflösender Digitalkameras untersucht.

2 Topometrisches System

Der topometrische Messkopf besteht aus zwei oder drei hochauflösenden Farb-CCD-Kameras (1024 X 768 Pixel) mit digitaler Schnittstelle (IEEE 1394) sowie einem Standard-Videoprojektor für die Streifenprojektion und kann mit einem Desktop- oder Notebookrechner gesteuert werden, wodurch ein kompaktes und mobiles 3-D-Koordinatenmesssystem entsteht (Abb. 1).



Abb. 1 Topometrischer Messkopf bestehend aus einem DLP-Videoprojektor für die Streifenprojektion und drei hochauflösenden Farb-CCD-Kameras für die Bilderfassung. Die Aufzeichnung erfolgt parallel mit den drei Kameras, wobei die Bilder der mittleren mit denen der äußeren jeweils als Stereopaare ausgewertet werden.

Das Messsystem erlaubt die Erfassung von bis zu 0,8 Millionen 3-D Koordinaten mit Farbinformationen in etwa zwei Sekunden.

3 Fotogrammetrische Kalibrierung und 3-D Koordinatenberechnung

Die fotogrammetrische Kalibrierung des Systems erfolgt mit einem von Zhang [2] vorgeschlagenen schnellen Algorithmus. Als Kalibrierobjekt dient dabei ein mit einem Drucker erstelltes Muster aus kreisförmigen Zielmarken, das auf einer Glasplatte angebracht und mehrmals in verschiedenen Orientierungen aufgenommen wird. Als Resultat erhält man die Parameter des zugrunde liegenden (zentralperspektivischen) Abbildungsmodells [3] wie die Brennweite f , die Lage (ξ_0, η_0) der optischen Achse in der Bildebene, Korrekturterme (ξ_v, η_v) für Verzerrungen sowie einen Translationsvektor (X_0, Y_0, Z_0) und eine Rotationsmatrix r_{ik} , die die Lage und die Orientierung der Kameras im Raum beschreiben.

$$\xi_i = \xi_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \xi_v \quad (1)$$

$$\eta_i = \eta_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \eta_v \quad (2)$$

Setzt man in den Gleichungen (1,2) die korrespondierenden Bildpunkte (ξ_i, η_i) aus mindestens zwei Bildern ein, lässt sich das resultierende Gleichungssystem nach den Objektkoordinaten (X, Y, Z) auflösen. Zur Automatisierung des Vorgangs wird eine Sequenz von Streifenmustern auf das Objekt projiziert, die in Verbindung mit einer geometrischen Randbedingung (Epi- oder Epipolargeometrie) die Identifizierung jedes Oberflächenpunktes erlaubt.

4 Farbproduktion

Eine quantitative Bewertung der Farbproduktion erfordert neben einer Beschreibung des Farbreizs als Produkt des Emissionsspektrums der Lichtquelle und des Reflektionsspektrums der Probe $S(\lambda)R(\lambda)$ auch die Einbeziehung der entsprechenden physiologischen Größen in Form der Empfind-

lichkeitskurven (Normspektralwertkurven) der drei Farbsektorarten der Retina. Durch Integration über die Wellenlänge lassen sich so die Farbmaßzahlen des CIE-XYZ-Farbraums ermitteln [4]:

$$X = \sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \quad Y, Z \text{ entspr.} \quad (3)$$

Für eine einfachere grafische Darstellung bietet sich die Projektion als Normfarbwertanteile (x, y) in eine Ebene an:

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (6)$$

Geht es um die Beschreibung von Farbdifferenzen, ist zu berücksichtigen, dass diese in verschiedenen Bereichen des XYZ-Farbraumes unterschiedlich wahrgenommen werden. In diesem Fall ist es vorteilhaft, den CIE-Lab-Farbraum zu verwenden, der visuell gleichabständig konzipiert wurde (zur Umrechnung siehe z.B. [5]). Wahrnehmungsbezogene Farbdifferenzen lassen sich dann berechnen als:

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (7)$$

Werte kleiner 1 liegen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle, $1 < \Delta E < 3$ beschreibt eine sehr gute Übereinstimmung u.s.w.

5 Ergebnisse und Diskussion

Zur Charakterisierung der zu reproduzierenden Farbwerte wurden zunächst an 10 Probanden (heller Hauttyp) an mehreren Stellen im Gesichtsbereich Farbvalenzen mit einem Spektrofotometer ermittelt. Die Resultate sind in Abb. 2 in der Norm-

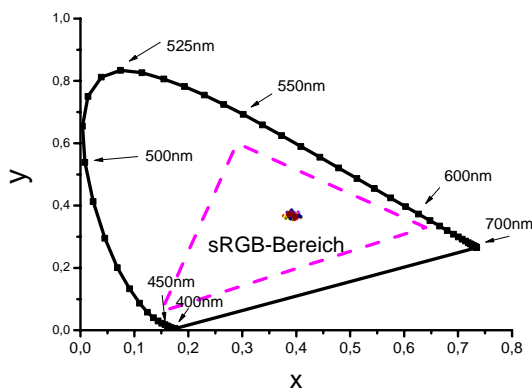


Abb. 2 Normfarbtabelle mit skizzierten sRGB-Farbraum, den Farbörtern einiger Spektralfarben sowie Farbvalenzen der Hautproben von 10 Probanden.

farbtabelle aufgetragen. Sie liegen alle innerhalb des verwendeten sRGB-Farbraums, überdecken allerdings auch nur 10 – 15 % des verfügbaren Wertebereichs pro Kanal.

Für die Optimierung der Farbproduktion wurden anhand einer Farbkalibriertafel verschiedene Lichtquellen evaluiert (Abb. 3). Zunächst wurde anhand einer Grautafel durch entsprechende Gewichtung der Farbanteile ein einfacher Weißabgleich durchgeführt (Abb. 3, WB). Eine deutliche Verbesserung ergab sich jedoch durch Anpassung der gemessenen RGB-Werte einer Farbtabelle mittels eines Ausgleichsverfahrens an deren im Lab-Raum vorliegenden Referenzwerte

$$[L, a, b] = f_i[r, g, b],$$

wobei f_i Polynome dritten Grades in r, g und b sind. Die Resultate sind in (Abb. 3, Cal) dargestellt.

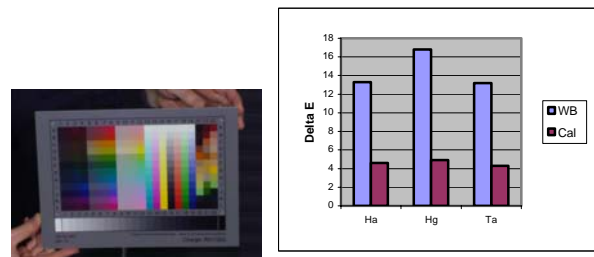


Abb. 3 Links: Farbkalibriertafel (IT8-Target). Rechts: Resultierende Farbabweichungen ΔE nach Weißabgleich (WB) und Kalibrierung (Ca) mit Halogenstrahler (Ha), Quecksilberhochdrucklampe (Hg) und Tageslicht (Ta) als Lichtquelle.

Eine weitere Verringerung der mittleren Farbabweichung auf $DE < 3$ ergab sich durch Einbindung der Texturen einer fotogrammetrisch orientierten SLR-Kamera (vgl. Gl. 1, 2) mit deutlich größerem Dynamikbereich (Abb. 4).

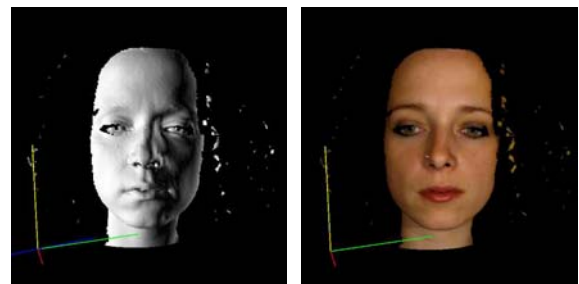


Abb. 4 3D-Modell. Links: nur Geometriedaten. Rechts: mit Texturen einer externen SLR-Kamera.

Literatur

- [1] J.G.K. Handschel, R.A. Depprich, D. Dirksen, C. Runte, A. Zimmermann, N.R. Kübler. Int J Oral Maxillofac Surg. (2005)
- [2] Z. Zhang. Microsoft Technical Report MSR-TR-98-71 (1998)
- [3] K. Kraus. Photogrammetrie, de Gruyter (2004)
- [4] G. Wyszecki, W.S. Stiles, *Color Science*. Wiley (2000)

Die Arbeiten wurden finanziell unterstützt von der Europäischen Union im Rahmen des Interreg IIIA-Programmes.