

Optimierung der Farbbildverarbeitung digitaler Kameras durch spektrale Charakterisierung

Carsten Büttner*, Klaus Bobey**, Bernd Schlichting*

*Kappa opto-electronics GmbH, Gleichen

**Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Göttingen

<mailto:c.buettner@kappa.de>

Es wird ein schnelles indirektes Messverfahren zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Farbkameras vorgestellt. Diese wird mittels Optimierungsverfahren aus der Kamerareaktion auf einen methodisch ausgewählten Satz von breitbandigen Farbproben ermittelt. Auf Basis der Spektraldaten können modellbasiert optimale anwendungsspezifische Farbkorrekturen berechnet werden.

1 Einführung

In der Firma Kappa opto-electronics GmbH wurde ein neues Farbkameradesign konzipiert, um den steigenden Anforderungen in der Strukturauflösung, Bildwiederholrate und Farbtreue in der Bildreproduktion gerecht zu werden. Die Kameras basieren auf CCD-Vollbildsensoren mit Primärfarbfilerung im Bayer-Mosaik. Sie besitzen die Vorteile des kompakten und kostengünstigen Einchip-Designs und erzeugen dennoch eine sehr gute Strukturauflösung und spektrale Trennung durch die Primärfarbfilerung. Es wurde eine Eigenentwicklung der Farbsignalverarbeitung in der Kamera durchgeführt, die unter Nutzung einer flexiblen Hardwareplattform Möglichkeiten zur anwendungsspezifischen Optimierung bietet. Hierzu wurde ein anpassbarer Farbbildprozessor auf FPGA-Basis entwickelt, der die Rohdaten des Bildsensors zu reproduzierbaren Farbbildern in Echtzeit verarbeitet. Eine Kernfunktion in der Verarbeitungstrecke ist die Farbraumtransformation, die zur Konvertierung der sensorspezifischen Farbwerte in einen für die Anwendung geeigneten Zielfarbraum dient.

2 Optimale Farbkorrektur

Unser Ansatz einer flexiblen Anpassung an unterschiedliche Anwendungen basiert auf einer spektralen Modellierung des Anwendungssystems. Die spektrale Strahlungsverteilung der Lichtquelle geht als Messgröße in das Modell ein. Es können aber auch beispielsweise Normlichtarten verwendet werden ohne entsprechende Strahlungsquellen zur Verfügung zu haben. Auch die Farbproben gehen nur anhand ihrer spektralen Transmission oder Reflexion in das Modell ein. Somit können sowohl typische Testkarten wie ein Macbeth ColorChecker oder auch für die Anwendung charakteristische Objekte wie Haut- oder Gewebeproben verwendet werden. Die modellbasierte Optimierung setzt aber die Kenntnis der spektralen Empfindlichkeit der Kamera voraus, deren Bestimmung im Allgemeinen mit einem hohen Messaufwand verbunden ist.

3 Indirekte spektrale Charakterisierung

Um verschiedene Sensortypen (bzw. die entsprechenden Kameras) oder sogar jeden individuellen Sensor eines Typs vermessen zu können, entwickelten wir ein gut handhab- und schnell durchführbares Messverfahren, welches mit wenig Kalibrierungsaufwand stabile und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Zu diesem Zweck verfolgten wir den Ansatz eines indirekten Messverfahrens auf Basis spektral breitbandiger Farbproben. Dabei wird anhand der Sensorausgabedaten

$$r_k = t_{\text{integ}} \cdot s_k^T \cdot S \cdot B \quad (1)$$

als Reaktion eines Sensorkanals k auf einen Satz Farbproben (Farbprobenmatrix $C = S \cdot B$) ein Rückschluss auf die spektrale Empfindlichkeit s_k des Sensorkanals durchgeführt. Dabei enthält die Diagonalmatrix S das diskrete Spektrum der Strahlungsquelle und die Matrix B spaltenweise die Objektspektren.

Weitere Vorteile im Einsatz breitbandiger Farbproben gegenüber einer monochromatischen Messung liegen in der Nähe zu den typischen Anwendungsbedingungen, für die schließlich optimale Verarbeitungsparameter auf Basis dieser Messung ermittelt werden sollen. Nicht zuletzt sind auch die Kosten gegenüber einem monochromatischen Messaufbau wesentlich geringer.

4 Methode

In der Literatur wurden bereits einige mathematische Methoden zur indirekten spektralen Kamera-Charakterisierung vorgestellt (z. B. [1-3]). Dabei wurde bereits mehrfach gezeigt, dass auf Grund des Rauschens in den Kameradaten nur durch Berechnung der Pseudo-Inversen C^+ ohne Berücksichtigung von Nebenbedingungen kein brauchbares Ergebnis zu erzielen ist (z. B. [1-2]). Deshalb wurden zusätzliche Nebenbedingungen vorge-

schlagen und auch unterschiedliche mathematische Verfahren zur Lösungsbestimmung verwendet. Von den Autoren wird die quadratische Programmierung als das beste Werkzeug erachtet, da es sich durch die flexible Erweiterbarkeit mit zusätzlichen Nebenbedingungen bequem und zielführend einsetzen lässt.

Die Kriterien für die Zielfunktion können unter den gegebenen Rahmenbedingungen auf zwei wesentliche, den absoluten quadratischen Fehler für jede Farbprobe gegeben durch

$$d_j^2 = (r_{kj} - s_k^T \cdot C_j)^2 \quad \forall j \quad (2)$$

und die Glattheit der Spektralwertfunktion, gegeben durch das Quadrat der zweiten Differenzen an jeder spektralen Stützstelle, reduziert werden.

Die Güte des Ergebnisses wird durch den normierten euklidischen Abstand zwischen Kamerareaktion r_j und spektraler Rückrechnung $s^T \cdot C_j$ und den jeweiligen chromatischen Abstand im rg-Diagramm beurteilt.

Die hohe Güte in der Spektralschätzung erhält diese Methode durch die gezielte Auswahl eines beschränkten Satzes optimaler Farbproben auf Basis einer statistischen Auswertung von Lagrange-Multiplikatoren, welche zur Analyse des Optimierungsproblems verwendet werden.

5 Farbkameramessplatz

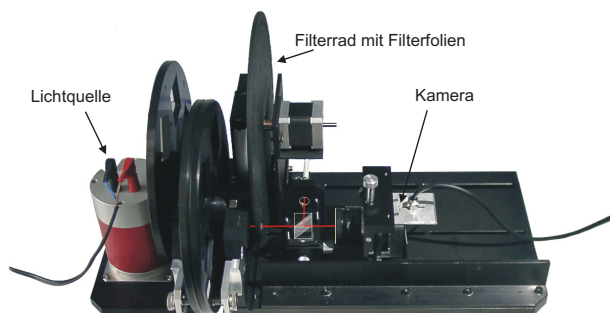


Abb. 1 Farbkameramessplatz

Für die praktische Umsetzung wurde der in Abb. 1 dargestellte Farbkameramessplatz konzipiert. Er besteht im Wesentlichen aus einer stabilen Wolfram-Halogen-Lichtquelle, verschiedenen Filtern zur spektralen Anpassung der Lichtquelle, einem schrittmotorgetriebenen Filterrad zur Aufnahme der ausgewählten Filterfolien und einem Strahlteiler, der die gleichzeitige spektrale Referenzmessung und Kamerabildaufnahme ermöglicht. Dieser wurde spektral charakterisiert und in den Berechnungen korrigiert. Anschließend kann mit den beschriebenen Methoden die Spektralschätzung für jede Kamera durchgeführt werden. In Abb. 2 sind die Messergebnisse für die Kamera DXc100 von Kappa dargestellt.

6 Ergebnisse

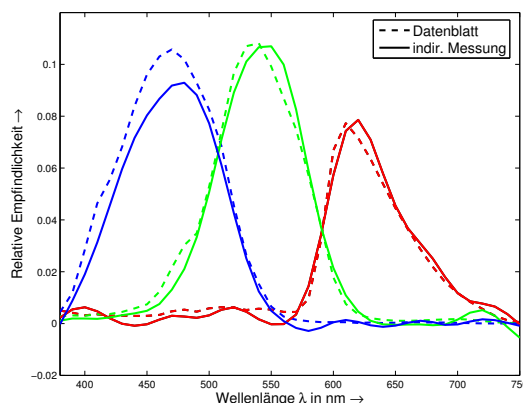


Abb. 2 Spektrale Empfindlichkeit DXc100 entsprechend Datenblatt und nach indirekter Messung

In der Praxis liefert die Messmethode auf Basis des linearen Modells in Bez. (1) nur gute Ergebnisse, wenn vorher eine Korrektur der Nichtlinearität der Kamerareaktionen durchgeführt wird. Die verwendeten Kameras weisen zwar nur ein geringfügig nichtlineares Verhalten auf, aber dies führt bereits zu erheblichen Fehlern in der Spektralschätzung. Die Bestimmung der Nichtlinearität wurde durch Variation der Integrationszeit durchgeführt und durch ein Polynom 7. Ordnung angenähert. Die verbleibenden Messunsicherheiten werden in erster Linie durch Rauschen verursacht. Deshalb wird zur Verbesserung des spektralen Schätzergebnisses das Signal-Rausch-Verhältnis in den Kamerareaktionen durch Anpassung der Integrationszeit t_{integ} für jede Farbprobe optimiert.

Mit den durch die beschriebene Messmethode gewonnenen Spektraldaten wurde die modellbasierte Vorhersagbarkeit der Kamerareaktionen geprüft. Beide Fehlerkriterien, die normierte RGB-Vektordifferenz und der Abstand der rg-Koordinaten, liefern durchschnittliche Abweichungen von etwa 5 Promille. Basierend auf diesen Ergebnissen können optimale anwendungsspezifische Farbkorrekturanpassungen für Kameras berechnet werden.

Literatur

- [1] K. Barnard und B. Funt: "Camera Characterization for Color Research" in Color Research and Application **27**(3): 153–164 (2002)
- [2] G. D. Finlayson, S. Hordley und P. M. Hubel: "Recovering Device Sensitivities with Quadratic Programming" in IS&T/SID Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications: 90-95 (1998)
- [3] D. Paulus, V. Hong, C. Idler, J. Hornegger und L. Csink: "Sensitivity Curve Approximation using linear Algebra" in 2nd European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision: 207–212 (2004)