

Analyse und Kompensation von longitudinalen Aberrationen

Johannes Brauers, Claude Seiler und Til Aach

Lehrstuhl für Bildverarbeitung,
RWTH Aachen University,
52056 Aachen

`Johannes.Brauers@1fb.rwth-aachen.de`

Zusammenfassung Multispektralkameras erlauben durch die Separation des elektromagnetischen Spektrums mit optischen Bandpassfiltern eine hohe Farbaufnahmetreue. Ein Multispektralbild wird aufgenommen, indem die auf einem Filterradd montierten Bandpassfilter nacheinander vor dem Sensor platziert werden und jeweils eine Graustufenaufnahme angefertigt wird. Anschließend werden die Bilder zu einem Multispektralbild oder einem RGB-Bild konvertiert. Da die Bandpassfilter jedoch unterschiedliche optischen Eigenschaften wie Dicke und Brechungsindex aufweisen, sowie gegenüber dem Sensor verkippt sein können, treten sowohl transversale (geometrische Verzerrungen) als auch longitudinale Aberrationen (Unschärfe, farbige Kanten) auf. In diesem Beitrag wird ein physikalisches Modell für die longitudinalen Aberrationen vorgestellt, sowie die resultierenden Störeffekte beschrieben. Darauf aufbauend wird ein Kompensationsalgorithmus präsentiert, mit dem die Bildqualität wesentlich verbessert wird. Weiterhin wird die Kalibration der Parameter des Algorithmus vorgestellt.

1 Einleitung

Im Hinblick auf Farbaufnahmegenauigkeit sind Multispektralkameras herkömmlichen 1-Chip RGB-Kameras deutlich überlegen, da letztere einen systematischen Farbfehler aufweisen [1]. Für die meisten Nutzer ist dies jedoch akzeptabel und die kleinen, günstigen und in Massenproduktion hergestellten RGB-Kameras sind daher weit verbreitet. Multispektralkameras sind eher in Bereichen wie der Druckindustrie [2], der Aufnahme von Gemälden [3], der Textilindustrie [4] und vielen anderen Anwendungen, in denen die Farbaufnahmequalität eine wichtige Rolle spielt, anzutreffen.

Auch wenn dieser Kameratyp [5] eine sehr gute Dämpfung im Stoppband, eine hohe Temperaturstabilität und – wenn die Filter zwischen Sensor und Optik platziert sind – geringe Größe aufweist, gibt es dabei ein paar kritische

Punkte zu berücksichtigen: Die Positionierung der optischen Filter im optischen Strahlengang verursacht Aberrationen, da die Filter unterschiedliche Dicken und Brechungsindizes aufweisen, sowie aufgrund von Toleranzen in der Herstellung nicht völlig koplanar zueinander ausgerichtet sind. Die *transversalen* Aberrationen, d.h. die Ablenkung der optischen Strahlen senkrecht zur optischen Achse, verursachen eine geometrische Verzeichnung der Spektralkanäle und werden in [6] diskutiert.

In diesem Beitrag werden die *longitudinalen* Aberrationen analysiert, die eine Unschärfe hervorrufen, und ein kombinierter Kompensationsalgorithmus für beide Aberrationen vorgestellt. Die Deconvolution mit der Berücksichtigung einer zusätzlichen geometrischen Unschärfe wurde bereits in [7] vorgestellt. Die dort verwendete, verschiebungsinvariante Punktantwort (PSF) ist jedoch nicht adäquat für unser Modell. Außerdem ist dort nur eine einfache Translation in einem Vorverarbeitungsschritt vorgesehen; sie ist damit vom eigentlichen Kompensationsalgorithmus entkoppelt. Ein Algorithmus im Ortsbereich wird in [8] vorgestellt, bei dem die Bildregistrierung mit einem über den Ort variierenden normalisierten LMS Filter durchgeführt wird. Das quadratische Abstandsmaß berücksichtigt jedoch die Helligkeitsveränderungen nicht, die bei Spektralauszügen zu erwarten sind. Die unkonventionelle, Zickzack-ähnliche Analyse des Bilds mit einer Hilbertkurve statt einer zeilenweisen Vorgehensweise ist ein weiterer kritischer Punkt. In [9] wird die gleiche Applikation wie bei diesem Beitrag angesprochen: Die Deconvolution von Multispektralbildern wird hier durch eine zirkuläre und verschiebungsinvariante PSF durchgeführt. Im folgenden Abschnitt wird jedoch gezeigt, dass diese Modellannahme nicht zutrifft.

Zunächst wird ein physikalisches Modell als Basis für die in Abschnitt 3 vorgestellten Kalibrations- und Kompensationsalgorithmen vorgestellt. Die Resultate werden in Abschnitt 4 diskutiert und in Abschnitt 5 mit einer Zusammenfassung abgeschlossen.

2 Physikalisches Modell

Ein vereinfachtes Modell des optischen Aufbaus ist in Abb. 1 zu sehen: Die Strahlen von neun Objektpunkten und deren Begrenzung durch die Blende an der Position $z = g = 70\text{mm}$ wurde berechnet. (In der Abbildung sind jedoch zur besseren Übersicht nur drei Objektpunkte gezeigt.) Ohne ein zusätzliches optisches Filter würden die Strahlen durch die ideale Linse so gebrochen werden, dass sie in exakt neun Punkten in der Bildebene zusammenfallen; nach der bekannten Formel für die dünne Linse gilt für den Bildabstand $b' = \frac{gf}{g-f} = 52.5\text{mm}$.

Mit dem zusätzlichen optischen Bandpassfilter werden die Strahlen gebrochen, wenn sie in das Filter eintreten und es wieder verlassen, was insgesamt

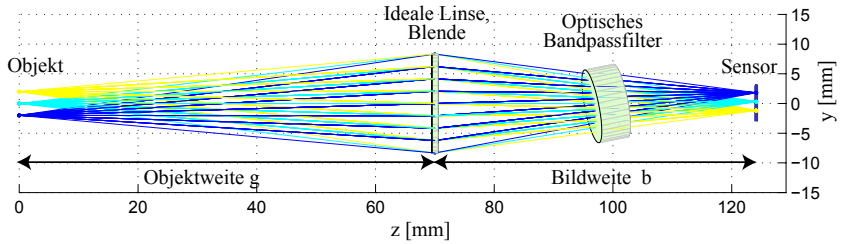


Abbildung 1. Raytracing von 3 Objektpunkten ($y=-2,0,2$ mm), $f=30$ mm, $g=70$ mm, $b=54.15$ mm, Filterdicke $d=5$ mm, Brechungsindex $n_2=1.45$, Filternormale $\mathbf{n} = [0.19, 0.19, 0.96]$, F-Zahl: $F=1.8$ ($r=8.33$ mm).

zu einer parallelen Verschiebung der Strahlen führt [10]. Die resultierenden transversalen Bildverzeichnungen, die Verschiebungen innerhalb der Bildebene beschreiben, wurden von den Autoren schon in [11] durch die Simulation der Hauptstrahlen in einer Lochkamera analysiert.

In diesem Beitrag wird ein Fächer von Strahlen für jedes Objekt berücksichtigt und daher die Fokussierungsaspekte eines echten Objektivs mit einbezogen. Genauer gesagt treffen die Strahlen nicht in genau einem Punkt auf sondern in einem Unschärfekreis, da sie durch das Filter parallel verschoben werden: In diesem speziellen Beispiel wurden 49 Strahlen für jeden Objektpunkt berechnet, die durch verschiedene Positionen in der runden Blende verlaufen. Ohne das optische Filter würden die 49 Strahlen in der vorliegenden Simulation exakt in einem Objektpunkt in der Bildebene auftreffen. Durch die Brechung an dem optischen Filter treffen die Strahlen jedoch an unterschiedlichen Stellen auf. Dies ist in Abb. 2 zu sehen, bei der jeder Kasten das Raytracing-Ergebnis in der Bildebene für jeweils einen Objektpunkt darstellt, d.h. jeder Punkt repräsentiert einen Strahl. Die Bildposition b wurde hinsichtlich der Größe des Unschärfe-Kreises optimiert; die Strahlen laufen jedoch auch nach der Optimierung nicht in einem Punkt zusammen.

Vier Schlussfolgerungen lassen sich aus Abb. 2 ableiten: Erstens stellt der Kern der unscharfen Punkte keinen typischen *Unschärfekreis* dar und weist keine Radialsymmetrie auf; der Hauptstrahl, der durch das Zentrum der Blende verläuft, wird vielmehr auf den Rand der Blende abgebildet (siehe Kreis in der Abbildung). Zweitens variiert der Faltungskern mit der Bildposition, was wiederum eine verschiebungsvariante PSF impliziert. Drittens rufen die unterschiedlichen Eigenschaften der optischen Filter (Dicke, Brechungsindex, Verkippungswinkel), eine unterschiedliche PSF für jedes Filter hervor. Viertens sind die Bildpunkte entlang der Verkippungsachse des optischen Filters verteilt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass jedes der sieben optischen Filter eine individuelle, ortsabhängige und unsymmetrische PSF aufweist.

Die longitudinalen Aberrationen (Unschärfe) werden daher durch eine ortsabhängige Faltung modelliert. Zusätzlich werden die transversalen Aberrationen, die eine geometrische Verschiebung hervorrufen, durch ein Verschiebungsvektorfeld berücksichtigt und es ergibt sich

$$\tilde{I}_c(x_0, y_0) = \sum_{x,y} h_c(x, y; x_0, y_0) \cdot I_c(x + d_{x,c}(x, y), y + d_{y,c}(x, y)) + n(x_0, y_0), \quad (1)$$

wobei I_c das Originalbild für jedes Spektralband c , \tilde{I}_c das verzerrte Bild, h_c die verschiebungsvariante Punktantwort für jedes Spektralband c und n additives Rauschen ist. Die Variablen x_0, y_0 und x und y kennzeichnen Bildkoordinaten. Die Terme $d_{x,c}$ und $d_{y,c}$ repräsentieren das Verschiebungsvektorfeld, dessen Modell und die Schätzung der Modellparameter in [6] beschrieben ist.

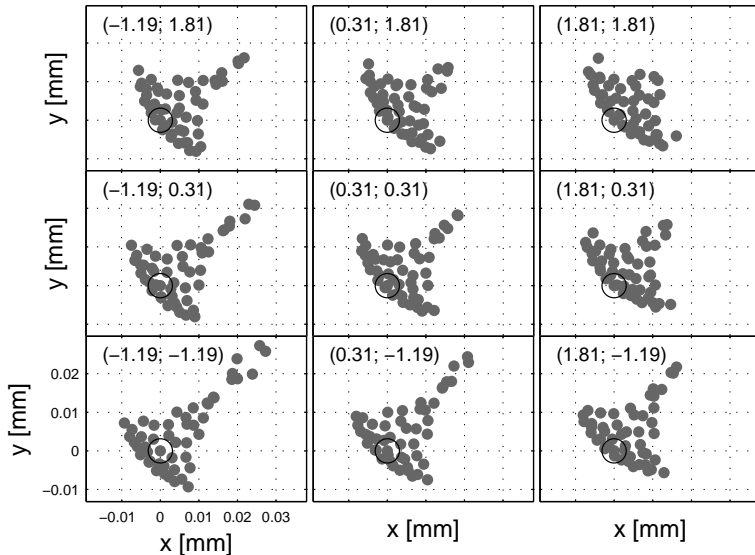


Abbildung 2. Punktdiagramm für 9 Objektpunkte; die Zahlen kennzeichnen die absolute Position der Hauptstrahlen (Kreise); die Position der Achsen ist relativ; der optische Aufbau ist in Abb. 1 zu sehen.

3 Kalibrations- und Kompensationsalgorithmus

3.1 Kalibration

Für die Bestimmung der ortsabhängigen PSF in Gl. (1) wird eine Graustufenvorlage mit Rauschen verwendet, die mit einem Laserdrucker ausgedruckt wurde. Da sich die Spektren der verschiedenen Vorlagenpositionen lediglich in ihrer Helligkeit, nicht jedoch in ihrer spektralen Zusammensetzung unterscheiden, variieren die resultierenden Graustufenbilder der Spektralbänder ebenfalls nur in ihrer Helligkeit und ihrer geometrischen Verzerrung, nicht jedoch bezüglich ihres spektralen Inhalts. Die Helligkeit kann einfach kompensiert werden – danach bleiben lediglich die Aberrationen zurück. Das erlaubt den Vergleich der Spektralbänder hinsichtlich ihrer Verzeichnung und der Unschärfe. Da immer ein Spektralband optimal fokussiert werden kann, wird es als Referenz-Spektralband gewählt und alle anderen Spektralbänder an dieses Band angepasst. Aus diesem Grund sind alle vorher erwähnten PSFs und OTFs (*optical transfer function*, OTF) relativ zu diesem Referenzband. Auch wenn die Kalibration nicht mit Bezug auf ein absolutes Referenzobjekt durchgeführt wird, wird der Aufwand durch dieses Verfahren deutlich reduziert.

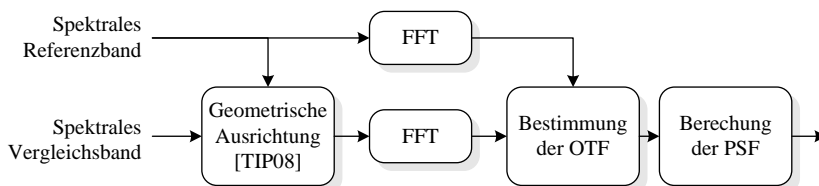


Abbildung 3. Der Kalibrationsalgorithmus.

Da das Modell des optischen Filters, das in Abschnitt 2 diskutiert wurde, die Kontinuität der Punktantwort sicherstellt, wird die *langsam* veränderliche PSF nur blockweise, und nicht für jedes Pixel berechnet, um den Rechenaufwand zu reduzieren. Durch die verwendete Überblendungstechnik (siehe unten) wird die PSF an Zwischenpositionen interpoliert. Der Kalibrationsalgorithmus ist in Abb. 3 illustriert: Die geometrische Ausrichtung wird vor der Schätzung der Punktantwort mit dem in [6] beschriebenen Verfahren durchgeführt. Kurz gesagt wird dabei das Referenz- und Vergleichsspektralband unter Verwendung einer affinen Transformation registriert und durch die geometrische Korrektur zur Übereinstimmung gebracht. Das Verschiebungsvektorfeld wird für die Korrektur später aufgenommener Bilder gespeichert. Nun

werden die Bildblöcke des Referenz- und Vergleichsblocks in den Frequenzbereich transformiert und die OTFs durch Division berechnet. Die OTF beschreibt den Zusammenhang zwischen Referenz- und Vergleichsspektralband. Hier wird eine relative Kalibration verwendet, da die Bestimmung einer absoluten PSF/OTF unterbestimmt ist und zu einer hohen Variabilität der geschätzten PSFs führen würde.

3.2 Kompensation

Zwei Schritte sind für die Kompensation der Aberrationen erforderlich: Zunächst werden die Spektralbänder durch das in der Kalibration ermittelte Verschiebungsvektorfeld in Übereinstimmung gebracht. Dann wird die Deconvolution blockweise auf den Bildern durchgeführt, wobei hier als Verfahren die Wiener Deconvolution [12] mit den vorher bestimmten PSFs zum Einsatz kommt. Um sowohl Blockartefakte als auch Leakage-Artefakte zu unterdrücken, werden die Bildblöcke in zwei größere Blöcke eingebettet. Die erste Erweiterung vergrößert den Block, um nachher eine Überblendung durchführen zu können: Die erweiterten Blöcke überlappen mit benachbarten Bildblöcken und eine Überblendung kann mit einer sanft ansteigenden Überblendungsfunktion durchgeführt werden. Auf diese Art wird die (langsam) veränderliche Punktantwort mit berücksichtigt. Die zweite Einbettung in einen wiederum größeren Block wird zur Vermeidung von Leakage-Artefakten genutzt, die normalerweise von unsymmetrischen Blöcken hervorgerufen werden. Zu diesem Zweck wird der erweiterte Rand mit einer Gauss-Funktion multipliziert. Die hier beschriebene Kompensation wird für alle Spektralbänder bis auf das Referenzband durchgeführt.

4 Resultate

Bei der Multispektralkamera der Autoren [11] werden sieben optische Bandpassfilter mit einem Durchmesser von 12.5 mm eingesetzt. Die Filter sind in einem Spektralbereich von 400 nm bis 700 nm in Schritten von 50 nm angeordnet, wobei die Bandbreite jeweils 40 nm beträgt. Die maximale physikalische Dicke der Filter beträgt 7 mm, der Brechungsindex ist jeweils 1.45 oder 2.05. Die interne Graustufenkamera ist eine Sony XCD-SX900 und besitzt eine Auflösung von 1280×960 Pixel, das Objektiv ist ein Nikkor AF-S DX 18-70mm.

Für die blockbasierte Bildverarbeitung werden Bildblöcke der Größe 160 × 192 Pixel eingesetzt, die einen guten Kompromiss zwischen Granularität und ausreichender Größe der Blöcke darstellen; außerdem werden dadurch abgeschnittene Blöcke am Bildrand vermieden. In Bezug auf die FFT-Größe

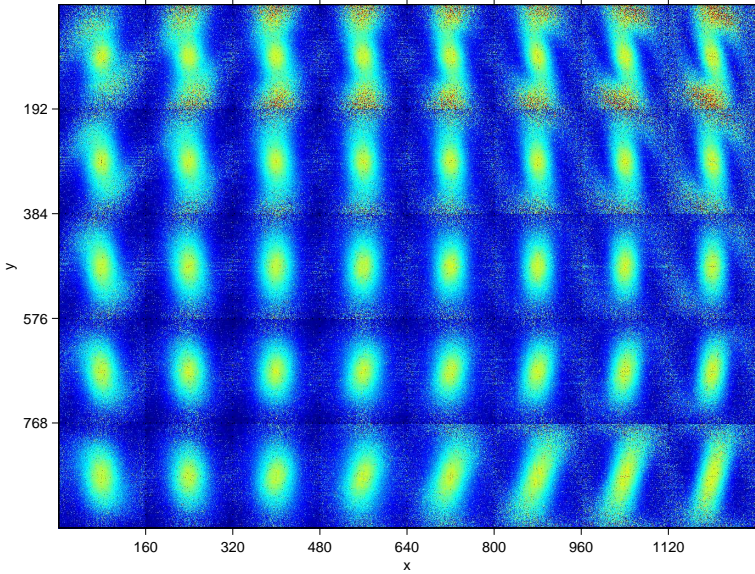


Abbildung 4. MTF von Bildblöcken für das $\lambda_{\text{sel}}=450\text{ nm}$ Spektralband in Bezug auf das $\lambda_{\text{ref}}=550\text{ nm}$ Spektralband; die Position der Bildblöcke ist an den Achsen notiert.

(Fast Fourier Transformation) ist die Blockgröße allerdings nicht optimal. Es wird eine dreieckförmige Funktion zur Überblendung der Blöcke verwendet; der linke und rechte Überlappungsbereich ist jeweils 80 Pixel breit, der obere und untere Überlappungsbereich 96 Pixel hoch. Um Leakage-Artefakte zu vermeiden, wird ein zusätzlicher Rand um das Bild verwendet, der die gleiche Größe wie der bei der Überblendung verwendete Rand aufweist. Edge-Tapering wird durch eine Gauss-Funktion mit $[\sigma_h, \sigma_v] = [12.5, 14.9]$ durchgeführt. Die (gefensterte) PSF-Größe ist 15×15 . Bei der Deconvolution ergab ein Signal- zu Rauschverhältnis von 0.07 gute Rekonstruktionsergebnisse.

Abb. 4 zeigt die Resultate der blockweisen MTF-Analyse für das Spektralband $\lambda_{\text{sel}}=400\text{ nm}$, die wiederum die Verschiebungsabhängigkeit der MTF bestätigt. Da die Spektralbänder vorher geometrisch ausgerichtet wurden ist das Maximum der PSF zentriert.

Abb. 5 stellt die Resultate der Kalibration und Kompensation für drei Spektralbänder mit variierenden PSFs dar. Die PSFs und MTFs wurden durch die blockweise Analyse, die in Abb. 4 gezeigt ist, bestimmt. Die Bilder in der zweiten Reihe der Abbildung wurden durch Deconvolution der Originalaus-

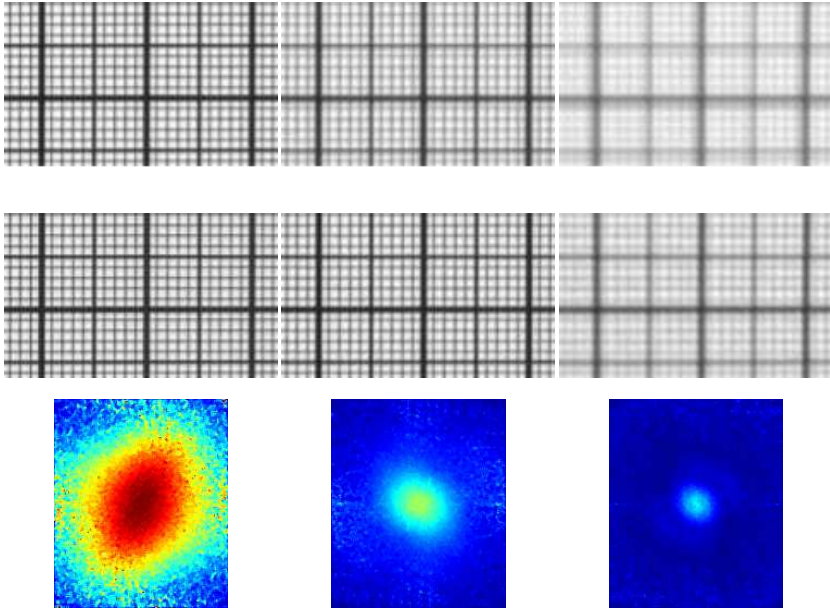


Abbildung 5. Von oben nach unten: Originalausschnitt, Ausschnitt mit Deconvolution, MTF ($\lambda_{\text{sel}}/\lambda_{\text{ref}}$); von links nach rechts: $\lambda_{\text{sel}}=500$ nm, 650 nm, 700 nm, $\lambda_{\text{ref}}=550$ nm.

schnitte (erste Reihe) mit den entsprechenden PSFs in der gleichen Spalte bestimmt.

Wie üblich bei der Visualisierung multispektraler Bilder wurden die Multispektralbilder unter der Verwendung einer linearen Transformation [13] und Gammakorrektur in den RGB Farbraum transformiert (erste Zeile von Abb. 6). Das linke Bild gibt das Ergebnis ohne Anwendung der geometrischen Korrekturen wieder und weist störende farbige Kanten hervorruft. Wenn die transversalen Aberrationen nach [6] korrigiert werden, d.h. die Spektralbänder registriert sind, können die wesentlichen Artefakte entfernt werden, ein gewisser farbiger Anteil in der eigentlich schwarz/weißen Vorlage verbleibt jedoch. Wenn der hier vorgestellte Algorithmus angewandt wird, verschwinden die Farbänderungen praktisch, das Bild ist schärfer und weist mehr Kontrast auf. Die Schnitte durch das Bild verdeutlichen diesen Sachverhalt nochmals. Die letzte Zeile von Abb. 6 zeigt die Unterschiede zwischen dem roten und grünen Farbkanal. Im idealen Fall – ohne Störungen – sollten keine Unterschiede zu sehen sein, da eine schwarz/weiße Vorlage aufgenommen wurde. Die verbleibenden Unterschiede deuten auf eine leichte Fehlregistrierung und auf Unterschiede in

der PSF hin. Die Zahl in der ersten Zeile jedes Differenzbilds zeigt jeweils die Varianz im Vergleich zur Leistung des Bilds an. Die Unterschiede zwischen den Farbkanälen können durch die Registrierung und die Deconvolution deutlich reduziert werden.

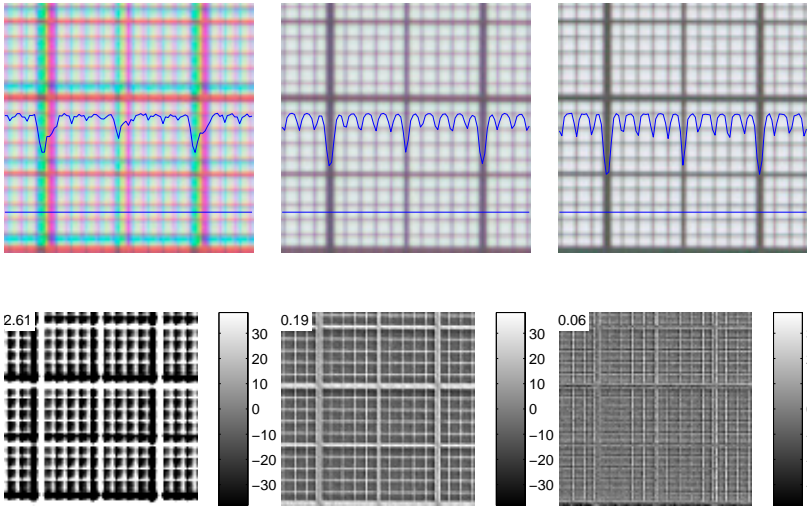


Abbildung 6. Oben: Ausschnitt von rekonstruierten RGB Bildern mit einem Schnitt durch das Bild (unregistriert, registriert, mit Deconvolution); unten: Unterschied zwischen rotem und grünem Farbkanal; die Zahlen spiegeln die Varianz in Bezug auf die Leistung des Bilds wieder.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine physikalische Erläuterung für die longitudinalen Aberrationen gegeben, die durch optische Bandpassfilter in einer Multi-spektralkamera hervorgerufen werden. Auf der Basis dieses Modells wurden die Aberrationen als verschiebungsabhängige, unsymmetrische, nicht-zentrierte Punktantworten modelliert. Der vorgestellte Kalibrationsalgorithmus erlaubt eine blockweise Bestimmung der PSF. Die Deconvolution wurde ebenfalls blockweise durchgeführt, wobei Blockartefakte durch Überblendung unterdrückt werden. Das resultierende Bild zeigt weniger Farbränder, ist schärfer und weist einen größeren Kontrast auf.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Vorhaben-Nr. AA5/2-1).

Literatur

1. Luther, R.: Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik. *Zeitschrift für technische Physik* **8** (1927) 540–558
2. Yamamoto, S., Tsumura, N., Nakaguchi, T., Miyake, Y.: Development of a multi-spectral scanner using led array for digital color proof. *Journal of Imaging Science and Technology (JIST)* **51** (2007) 61–69
3. Bochko, V., Tsumura, N., Miyake, Y.: Spectral color imaging system for estimating spectral reflectance of paint. *Journal of Imaging Science and Technology* **51** (2007) 70–78
4. Steen, D., Dupont, D.: Defining a practical method of ascertaining textile color acceptability. *Wiley's Color Research & Application* **27** (2002) 391–398
5. Hill, B., Vorhagen, F.W.: Multispectral image pick-up system (1991) U.S.Pat. 5,319,472, German Patent P 41 19 489.6.
6. Brauers, J., Schulte, N., Aach, T.: Multispectral filter-wheel cameras: Geometric distortion model and compensation algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing* **17** (2008) 2368–2380
7. Šroubek, F., Cristóbal, G., Flusser, J.: A unified approach to superresolution and multichannel blind deconvolution. *IEEE Transactions on Image Processing* **16** (2007) 2322–2332
8. Caner, G., Tekalp, A.M., Sharma, G., Heinzelman, W.: Local image registration by adaptive filtering. *IEEE Transactions on Image Processing* **15** (2006) 3053–3065
9. Mansouri, A., Marzani, F.S., Hardeberg, J.Y., Gouton, P.: Optical calibration of a multispectral imaging system based on interference filters. *SPIE Optical Engineering* **44** (2005) 027004.1–027004.12
10. Smith, W.J.: *Modern Optical Engineering*. McGraw-Hill (2000)
11. Brauers, J., Schulte, N., Aach, T.: Modeling and compensation of geometric distortions of multispectral cameras with optical bandpass filter wheels. In: 15th European Signal Processing Conference. Volume 15., Poznań, Poland (2007) 1902–1906
12. Gonzalez, R.C., Woods, R.E.: *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA (2006)
13. Helling, S., Seidel, E., Biehlig, W.: Algorithms for spectral color stimulus reconstruction with a seven-channel multispectral camera. In: IS&Ts Proc. 2nd European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision CGIV 2004. Volume 2., Aachen, Germany (2004) 254–258