

Wahrnehmungsorientierte optische Inspektion von texturierten Oberflächen

Michael Grunwald¹ und Matthias O. Franz²

Abstract: Digital bedruckte Oberflächen müssen strengen funktionalen und ästhetischen Anforderungen genügen. Diese Eigenschaften werden im Rahmen der Qualitätsprüfung kontrolliert. Hierbei wirken sich Oberflächendefekte oftmals erst dann aus, wenn diese auch vom Menschen wahrgenommen werden. Aufgrund der hohen Produktionsgeschwindigkeit kann eine solche Bewertung der Sichtbarkeit von Defekten bisher nur außerhalb des Produktionsflusses durch manuelle – subjektiv geprägte – Inspektion erfolgen. Ziel des Projektes ist (1) die Modellierung von Texturen in einer Form, die an das menschliche visuelle System angepasst ist und (2) die automatisierte Beurteilung der Wahrnehmung von Texturfehlern. Im Rahmen des Projekts wurde ein prototypisches System zur Inline-Erfassung von texturierten Oberflächen entwickelt. Auf Basis von realen Aufnahmen industriell produzierter Holzdekore wurde eine repräsentative Texturdatenbank erstellt. Gezeigt werden erste Resultate im Bereich der Defektdetektion auf Basis von statistischen Merkmalen. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für die spätere wahrnehmungsorientierte Bewertung. Letztlich sollen die im Rahmen des Projekts erlangten Ergebnisse in einen prototypischen Aufbau zur Inspektion von digital bedruckten Dekoren einfließen.

Keywords: Texturmodell, Defektdetektion, wahrnehmungsorientierte optische Inspektion, Filterbank, Digitaldruck

1 Psychopysisches Texturmodell

Moderne digitale Drucktechnologien eröffnen den Herstellern von Dekoroberflächen völlig neuartige Möglichkeiten. In ihrer Funktion als Dekor müssen diese Oberflächen üblicherweise strengen funktionalen und ästhetischen Anforderungen genügen, die wiederum eine geeignete Inspektionstechnologie erfordern. Insbesondere sollte die Oberflächeninspektion zur Vermeidung von Übersortierung im industriellen Produktionsprozess nach Kriterien erfolgen, die der menschlichen Wahrnehmung entsprechen.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Systems zur Überwachung und Inspektion von texturierten Oberflächen unter Berücksichtigung der Wahrnehmung des Menschen. Die Basis für die Inspektion bildet ein bildgebendes System, welches innerhalb einer industriellen Produktionsumgebung die Information für eine nachfolgende menschlich inspirierte Beurteilung bereitstellen kann. Neben der Inline-Überwachung erlaubt ein solches System auch die Erfassung von Merkmalen, welche beispielsweise eine visuelle Änderung über

¹ HTWG Konstanz, Institut für Optische System, Brauneggerstr. 55, 78462 Konstanz, m.grunwald@htwg-konstanz.de

² HTWG Konstanz, Fakultät Informatik, Institut für Optische Systeme (AG Kognitive Systeme), Brauneggerstr. 55, 78462 Konstanz, mfranz@htwg-konstanz.de

die Zeit des Produktionsprozesses beschreiben. Rückgekoppelt können diese Prozessdaten zur Prozesssteuerung bzw. Optimierung genutzt werden. Zuletzt soll die Grundlage für eine visuelle Inspektion innerhalb des Produktionsprozesses gelegt werden, auch an Stellen, an denen ein Mensch aus Gründen der Sicherheit nicht inspizieren darf oder dies beispielsweise aufgrund der hohen Produktionsgeschwindigkeit nicht kann.

Die Entwicklung des Inspektionssystems erfordert die Bearbeitung folgender Forschungsfragen:

1. Um die Vielzahl der eingesetzten Dekortexturen mit einem entsprechenden Referenzobjekt vergleichen zu können und eine Aussage über die Ähnlichkeit zu treffen, müssen Texturen entsprechend modelliert bzw. in einer Form, die an das menschliche visuelle System angepasst ist, repräsentiert werden. Neben parametrisierbaren Modellen zur Beschreibung von Texturen soll die Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen untersucht werden.
2. Die Interaktion von Textur und Farbe in der menschlichen Wahrnehmung hat in der psychophysischen Forschung bisher nur wenig Beachtung gefunden. Diese Frage spielt aber für das Projekt eine zentrale Rolle, daher sollen hier erste grundlegende Untersuchungen im Bereich der Texturwahrnehmung unternommen werden. Die Ergebnisse sollen in ein psychophysisches Modell einfließen, mit dem die Sichtbarkeit von Texturfehlern beurteilt werden kann.

2 Verwandte Arbeiten

Die statistische Modellierung von Texturen hat eine lange Tradition in der Bildverarbeitung. Dementsprechend gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze in der Literatur. Allgemein können statistische Texturmodelle grob in zwei Klassen unterteilt werden: (1) Probabilistische Charakterisierung der statistischen Abhängigkeiten innerhalb lokaler Pixelnachbarschaften (Markov-Felder, engl. Markov Random Fields, MRFs) und (2) Anwendung von Filterbänken und anschließende Beschreibung der Filterantworten mit statistischen Kennzahlen. Die große Mehrheit der älteren Ansätze basieren auf MRFs [DJ89, Pa99]. Obwohl hier einige Erfolge erzielt wurden, haben sich MRFs nur als bedingt geeignet für komplexere Texturen erwiesen.

2.1 Filterbänke zur Modellierung von Texturen

Neuere Ansätze verwenden mehrheitlich Filterbänke zur Gewinnung statistischer Deskriptoren für Texturen. Filterbank-Modelle sind an frühe Prozesse des visuellen Systems von Säugetieren angelehnt und eignen sich daher auch zur systematischen Charakterisierung von Texturen im Rahmen psychophysischer Untersuchungen. Die gängigen Filterbank-Modelle wurden bisher nur theoretisch bzw. auf vordefinierten Texturdatenbanken untersucht. Eine Untersuchung ihrer Anwendbarkeit im Hinblick auf industrielle Dekore und die dort anfallenden Inspektionsaufgaben liegt bisher nicht vor.

2.2 Textur in der menschlichen Wahrnehmung

Bereits 1961 Julesz seine Hypothesen [Ju62] über die Bedeutung von Bildstatistiken für das menschliche visuelle System. Arbeiten von Tyler [Ty04a, Ty04b] weisen auf eine Unterscheidbarkeit von binären Texturen mit unterschiedlichen statistischen Eigenschaften höherer Ordnung hin, und Arbeiten von Victor und Kollegen haben gezeigt, dass sich die Detektierbarkeit von lokalen Korrelationen in binären Statistiken von deren Prävalenz in natürlichen Bildern vorhersagen [He14]. Die Anwendung von Filterbänken in psychophysischen Modellen zur Texturwahrnehmung sowie zur Beurteilung der Ähnlichkeit von Texturen wurde für Fragestellungen der optischen Oberflächeninspektion bisher noch nicht im Detail untersucht, vor allem nicht, wenn einfache Filtermodelle mit dem notwendigen, psychophysisch realistischen, nicht-linearen *gain control* kombiniert wird [Go13].

3 Forschungsplan

3.1 Oberflächeninspektion mit Texturmodellen

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, sollen verschiedene Filterbank-Texturmodelle aus der Literatur vergleichend untersucht [Ma89, Po96, PS00] und eigene Ansätze zu Filterbänken entwickelt werden. In einem Filterbank-Texturmodell wird eine bestimmte Dekortextur durch eine typische Häufigkeitsverteilung der einzelnen Filterantworten der Filterbank charakterisiert. Auf der Basis solcher charakteristischen Merkmale sollten sich sichtbare Oberflächendefekte als signifikante Abweichungen zu den Merkmalen des Referenzdekors zeigen.

Im nächsten Schritt werden signifikante Abweichungen in den Texturmerkmalen mit Methoden des maschinellen Lernens automatisch klassifiziert. Hierfür werden sowohl herkömmliche Supportvektormaschinen als auch neuere neuronale Ansätze aus dem Bereich *Deep Learning* zum Einsatz kommen [Sc15]. Zur allgemeinen Texturklassifikation soll ein Vorabtraining von neuronalen Netzen mithilfe von unüberwachten Lernmethoden, beispielsweise mit mehrschichtigen Autoencodern [Vi10], untersucht werden.

Für die Entwicklung und Analyse wird eine entsprechende große Anzahl an Trainings- und Testdaten benötigt. Um schnell eine entsprechende Anzahl an Testdekoren zur Verfügung zu haben, soll ein Defektmodell auf Basis von industriell produzierten Dekormustern zur Generierung synthetischer Daten entwickelt werden. Mithilfe eines prototypischen Aufbaus soll der trainierte Klassifikator mittels realen Dekortexturen verifiziert werden.

3.2 Psychophysische Untersuchung der Sichtbarkeit von Texturdefekten

Neben der Grundlage für die Klassifikation dient das zu entwickelnde Texturmodell als Basis für die Bestimmung der Ähnlichkeit bzw. der Sichtbarkeit von Defekten. Ziel ist es, die durch die Maschine detektierten Defekte um eine oder mehrere Kennzahlen zu

ergänzen, die die Sichtbarkeit der Defekte für menschliche Beobachter quantifizieren. Da der Raum der möglichen Veränderungen oder Abweichungen sehr hoch-dimensional ist – Helligkeit, Farbe, Geometrie – und anzunehmen ist, dass die Sichtbarkeit von Defekten auch von der "Grundtextur" abhängt, wird es notwendig sein, zwei getrennte Ansätze bei den psychophysischen Untersuchungen parallel zu untersuchen: (1) Explorativ: d.h. mit Hilfe von explorativen Methoden wie multi-dimensionaler Skalierung (MDS) wird versucht werden, ob eine geeignete niedrig-dimensionale Repräsentation von Texturen gefunden werden kann. (2) Modellbasiert: hier werden die Filteraktivitäten von einwandfreien und defekten Stimuli in einem Modell der frühen Sehverarbeitung [Go13] verglichen. Die dadurch gewonnenen Hypothesen über die Sichtbarkeit von Defekten können gezielt genutzt werden, um das Modell im Sinne eines generativen Modells zu verwenden, d.h. neue Stimuli werden generiert, um die Hypothesen über deren Wahrnehmungseigenschaften in sich anschließenden psychophysischen Experimenten zu testen.

4 Erste Ergebnisse

Im Allgemeinen sind ästhetische Digitaldruckfehler dadurch gekennzeichnet, dass an fehlerhaften Positionen keine oder unerwünscht Farbe aufgebracht wurde. Experimente mit industriell produzierten Dekoren zeigen, dass der Kontrast eines Fehlers – bezogen auf die Nachbarschaft innerhalb eines lokalen Bereiches und in Abhängigkeit von der Druckfarbe – mittels spektral schmalbandiger Beleuchtung im visuellen Wellenlängenbereich maximiert werden kann. Auf Basis dieser Voruntersuchung wurde eine geblitzte Beleuchtung für das prototypische Aufnahmesystem entwickelt. Für die Erfassung wird ein Verbund aus monochromatischen Kamerasystemen verwendet. Das System wurde mit dem Ziel der Integration in eine Digitaldrucklinie konzipiert und erlaubt die Erfassung von Objekten im Durchlauf. Hierbei wird jede Objektposition unter drei verschiedenen Beleuchtungsbedingungen aufgenommen. Die Auswertung dieser Farbkanäle bzw. deren Kombination ermöglicht die Zuordnung eines detektierten Fehlers zu einer Druckfarbe. Zudem werden die spektralen Kanäle zur Rekonstruktion eines Farbbildes verwendet, vgl. Abb. 1.

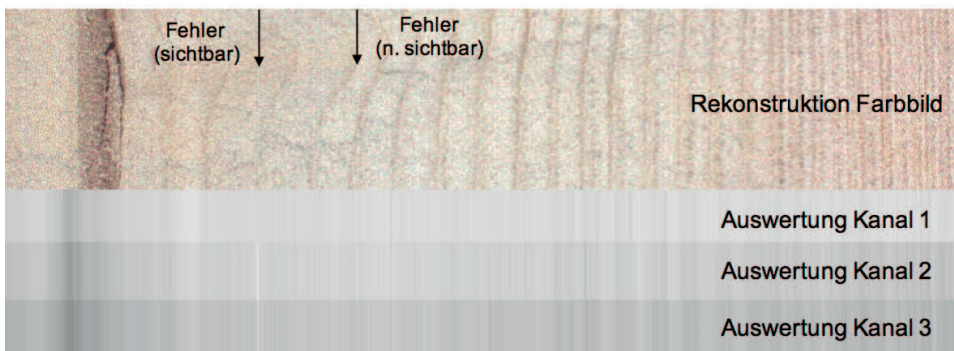


Abb. 1: Düsenfehler – typischer, im Single-Pass-Verfahren auftretender Fehlertyp.

4.1 Textur-Datenbank NWDDS

Um Filterbank-Texturmodelle vergleichend untersuchen und deren Anwendbarkeit auf industrielle Dekore überprüfen zu können, wurde initial eine repräsentative Dekordatenbank (NWDDS) erstellt. Als Basis für den Datensatz dienen Aufnahmen industriell produzierter Dekore. Für die Erfassung wurde das entwickelte Inline-Aufnahmesystem verwendet. Verteilt auf 40 Dekorklassen wurden 800 fehlerfreie Dekorausschnitte³ und 800 Ausschnitte mit markierten Defekten für den Datensatz ausgewählt. Um die Anzahl an Mustern pro Dekorklasse zu erhöhen und später die maximale Variabilität von Texturen einer Klasse untersuchen zu können, wurden pro Klassen weitere 20 Texturen synthetisch generiert (Texturanalyse und -synthese Methode nach [PS00]).

4.2 Filterbank-Texturmodell

Um Oberflächendefekte durch signifikante Abweichungen in Merkmalen erkennen zu können, wurden unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen und statistische Kennzahlen untersucht. Als Basis diente hierfür die Veröffentlichung *A Parametric Texture Model Based on Joint Statistics of Complex Wavelet Coefficients* von J. Portilla und E. P. Simoncelli, die die Beschreibung von charakteristischen Texturmerkmalen mittels 710 statistischen Parametern zeigt. Im Rahmen der Versuchsreihe „Synthese durch Analyse“ wurde die Anwendbarkeit dieses Modells für die industriellen produzierten Holzdekore des NWDDS Datensatzes untersucht. Wie in Abb. 2a & 2b gezeigt, kann eine visuelle Näherung nach wenigen Iterationen im Syntheseschritt erzielt werden.

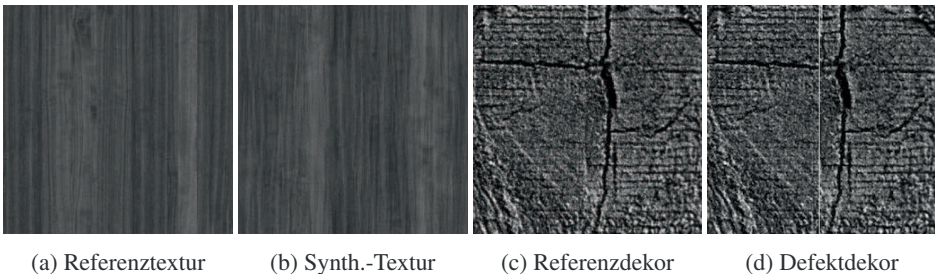


Abb. 2: Auf Basis der in (a) dargestellten Referenztextur wird das Ergebnis der angewandten Synthese durch Analyse Methode nach 12 Iterationsschritten in (b) visualisiert. In (c) bzw. (d) wird beispielhaft ein synthetisch generiertes Defektdekor, welches zur Charakterisierung von Defekten verwendet wurde, dargestellt.

Mit dem Ziel, den Einfluss von Defekten auf die Charakteristik einer gegebenen Referenztextur zu untersuchen, wurden synthetische Defektbilder mit vertikalen linienförmigen Defekten von unterschiedlicher Breite generiert, vgl. Abb. 2c & 2d. Die natürliche Varianz aus Produktionsprozess und Aufnahmesystem wurde durch additives Gaußsches Rauschen

³ Unter Dekorausschnitt werden die drei Aufnahmen der Einzelkanäle sowie das rekonstruierte Farbbild verstanden. Fehlerfrei bedeutet, dass die Aufnahmen keine erkennbaren Abweichungen zur jeweiligen digitalen Referenz aufweisen.

simuliert. Erste Resultate zeigen, dass die Anzahl der benötigten statistischen Merkmale zur Defekterkennung texturabhängig reduziert werden kann. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Defektregion, d.h. die räumliche Defektposition einschließlich deren Umgebung.

Literaturverzeichnis

- [DJ89] Dubes, R. C.; Jain, A. K.: Random field models in image analysis. *Journal of Applied Statistics*, 16(2):131–164, 1989.
- [Go13] Goris, R. L. T.; Putzeys, T.; Wagemans, J.; Wichmann, F. A.: A neural population model for pattern detection. *Psychological Review*, 120(3):472–496, 2013.
- [He14] Hermundstad, A. M.; Briguglio, J. J.; Conte, M. M.; Victor, J. D.; Balasubramanian, V.; Tkačik, G.: Variance predicts salience in central sensory processing. *eLife*, 3:1–28, 2014.
- [Ju62] Julesz, B.: Visual pattern discrimination. *Information Theory, IRE Transactions on*, 49:41–46, 1962.
- [Ma89] Mallat, S. G.: Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7):674–693, 1989.
- [Pa99] Paget, R. D.: Nonparametric Markov Random Field Models for Natural Texture Images. Dissertation, The University of Queensland, 1999.
- [Po96] Portilla, J.: Texture synthesis-by-analysis method based on a multiscale early-vision model. *Optical Engineering*, 35(8):2403, 1996.
- [PS00] Portilla, J; Simoncelli, E P: Aparametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients. *International Journal of Computer Vision*, 40(1):49–71, 2000.
- [Sc15] Schmidhuber, J: Deep Learning in Neural Networks: An Overview. *Neural Networks*, 61:85–117, 2015.
- [Ty04a] Tyler, C. W.: Beyond fourth-order texture discrimination: generation of extreme-order and statistically-balanced textures. *Vision Research*, 44(18):2187–2199, 2004.
- [Ty04b] Tyler, C. W.: Theory of texture discrimination of based on higher-order perturbations in individual texture samples. *Vision Research*, 44(18):2179–2186, 2004.
- [Vi10] Vincent, P.; Larochele, H.; Lajoie, I.; Bengio, Y.; Manzagol, P.-A.: Stacked denoising auto-encoders: learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion. *Journal of Machine Learning Research*, 11(3):3371–3408, 2010.