

Analoge Bildverarbeitungsverfahren für integrierbare Echtzeit-Bildsysteme

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Doktorgrades
DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Lan Shi
aus Shaanxi (V.R. China)

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 10.03.2017

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel
Prof. Dr.-Ing. Klaus Helmreich
Prof. Dr.-Ing. Thomas Ußmüller

Berichte aus der Elektrotechnik

Lan Shi

**Analoge Bildverarbeitungsverfahren
für integrierbare Echtzeit-Bildsysteme**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5256-5

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Technische Elektronik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg im Rahmen des von der DFG (Deutschen Forschungsgemeinschaft) geförderten Forschungsprojekts GRK 1773 „Heterogene Bildsysteme“. Sie wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung von zahlreichen Personen. Daher möchte ich diese Gelegenheit nutzen, um meinen tiefen Dank zum Ausdruck zu bringen.

Zuallererst bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel für seine Unterstützung und sein bereits sehr früh in mich gesetztes Vertrauen. Des Weiteren gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Klaus Helmreich sowie Prof. Dr.-Ing. Thomas Ußmüller für die Übernahme des Koreferats und die damit einhergehende Arbeit und Mühe. Für das Zustandekommen der Kooperation haben sich besonders Prof. Dr.-Ing. Marc Stamminger sowie Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß eingesetzt.

Ich bedanke mich für die sehr gute Zusammenarbeit aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Lehrstuhls für Technische Elektronik. Besonders bedanke ich mich bei Christopher Söll und Dr.-Ing. Jürgen Röber. Ohne ihre allseitige Unterstützung und Beiträge bei der Schaltungstechnik könnten die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse alleine nicht überzeugen. Weiterhin möchte ich mich auch bei Dr.-Ing. Jürgen Seiler am Lehrstuhl für Multimediakommunikation bedanken. Er stand mir jederzeit bei Fragen zur Seite und gab mir wertvolle Tipps für das zielgerichtete Vorankommen bei der Doktorarbeit.

Auch bei Prof. Dr.-Ing. Dietmar Fey, Dr.-Ing. Marc Reichenbach und Benjamin Pfundt am Lehrstuhl für Rechnerarchitektur, Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Maier, Dr.-Ing. Christian Riess und Jennifer Maier am Lehrstuhl für Mustererkennung bedanke ich mich für die gemeinsam erfolgreiche Forschung. Meine Bachelor- und Masterarbeiter Andreas Voinea, David Hadlich und Juliane Balk haben einen hervorragenden Beitrag zu meiner Arbeit geleistet. Dafür bedanke ich mich herzlich.

Ich danke auch Dr.-Ing. Jasmin Walk und PD Dr. Susanne Greulich für ihre Mühen beim Korrekturlesen, um die Qualität dieser Arbeit zu verbessern.

Großer Dank gilt auch meinen Eltern und allen Freunden, die mir stets Mut zugesprochen und mich in meiner Arbeit bestärkt haben. Schließlich danke ich meinem Mann Patrick Schmidt, der mir die größte seelische Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit war.

Röttenbach, den 20. April 2017

Lan Shi

Kurzfassung

Heutzutage dominieren CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)-Bildsensoren nicht nur den klassischen Markt digitaler Foto-, Video- und Handykameras, sondern werden mit stetig steigendem Interesse auch in Bereichen wie der Automobilindustrie, der Robotik, der Sicherheits- und Medizintechnik sowie bei wissenschaftlichen Anwendungen eingesetzt. Vielfältige Signalverarbeitungsschaltungen können in CMOS-Bildsensoren integriert und Bildverarbeitungsverfahren können somit als integrierte Schaltung eingesetzt werden. CMOS-Bildsensoren können für die unterschiedlichen Einsatzzwecke mit Echtzeit-Bildverarbeitungsbedarf individuell entwickelt werden. In Bezug auf die Optimierung von Geschwindigkeit, Chipfläche, Energieverbrauch, Produktionskosten sowie Bildqualität ist ein kundenspezifisches analoges Schaltungsdesign vorteilhafter als ein digitales Schaltungsdesign.

Im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs GRK 1773 „Heterogene Bildsysteme“ sollen neue Hardware-Architekturen für Bildsysteme zur Verarbeitung, Erzeugung und Übertragung digitaler Bilder entwickelt werden, die sehr oft harten Anforderungen bezüglich Rechenleistung, Latenz, Durchsatz und Kosten unterliegen. Die vorliegende Doktorarbeit ist Teil dieses Forschungsprojekts. Es soll herausgefunden werden, inwieweit solche Berechnungen bereits im analogen Bereich implementiert werden können, d.h. vor der Digitalisierung. Die Konzepte für generische und effiziente Bildsensorarchitekturen und analoge Bildverarbeitungsverfahren, die für zukünftige, intelligente optische Sensoren mit zielorientierter Echtzeit-Bildverarbeitung einsetzbar sind, sollen entwickelt werden. Die Bildverarbeitungsverfahren sollen zur analogen Vor- oder digitalen Weiterverarbeitung eingesetzt werden.

In der vorliegenden Untersuchung wurden herkömmliche Sensorstrukturen und digitale Bildverarbeitungsverfahren zuerst hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit in der analogen Domäne untersucht. Die Komplexität der Bildverarbeitungsverfahren wurde auch in Bezug auf analog implementierbare Rechenoperatoren analysiert. Der herkömmliche sequentielle Datenzugriff beschränkt sich auf die analoge Signalspeicherung und macht eine Änderung der Sensorstruktur nötig. Hierfür wurden neuartige Bildsensorarchitekturen mit neuen Pixelstrukturen und Zugriffsverfahren auf Sensorsignale für analoge Bildverarbeitungsverfahren entwickelt. Gemäß dem Workflow des Bildgebungssystems wurden drei CMOS-basierte analoge Bildverarbeitungsverfahren mit entsprechenden Sensorstrukturen vorgestellt: eine kompakte Farbpixelstruktur für das direkte Auslesen von mehreren Farbinformationen jedes Pixels, ein analoger räumlicher Filter, der mithilfe einer zweidimensionalen Auslesemethode die Sensordaten im kleinen Cluster bearbeiten kann sowie ein analoger Tone-Mapping-Operator, der den Dynamikbereich des Sensors, von der fotografischen Umgebung abhängig, bearbeitet und nichtlinear transformiert.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Sensorstrukturen und analogen Bildverarbeitungsverfahren wurden modelliert und simuliert. Die Simulationsergebnisse sind im Vergleich zum digitalen Äquivalent in

Bezug auf Geschwindigkeit, Chip-Fläche, Energieverbrauch und Bildqualität verifiziert. Die entsprechenden analogen Schaltungen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts mit einem Projektpartner gestaltet und auf der Hardware-Ebene implementiert. In Zusammenarbeit mit weiteren Projektpartnern konnten die Flexibilität der analogen Bildverarbeitung in der 3D-Chip-Integration in Hinsicht auf heterogene Bildsysteme erweitert werden. Darüber hinaus ist der Einsatz der analogen Bildverarbeitung in der Industrieanwendung für die Optimierung von CT (Computertomographie)-Detektoren von großer Bedeutung.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Arbeit, dass Bildverarbeitungsverfahren in der analogen Domäne mit individuellen Sensorstrukturen und Schaltungsgestaltungen optimale Lösungen für Echtzeit-Bildsysteme sind.

Abstract

Nowadays CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) image sensors dominate not only the traditional market of digital still- and video-cameras as well as mobile phone-cameras, but they are also used more and more with an increasing interest in the areas of automobile industry, robotics, security, medical and scientific applications. Diverse signal processing circuits can be integrated into CMOS image sensors and therefore image processing methods can be build into the integrated circuit. CMOS image sensors can be developed individually for different applications of real-time image processing. In terms of optimization of the speed, chip area, power consumption, production costs and image quality, a customized analog circuit design is more advantageous than a digital circuit design.

As part of the research project of the graduate college GRK 1773 "Heterogeneous image systems" funded by the German Research Foundation, new hardware-architectures for image systems shall be developed for processing, generating and transmitting digital images, which have hard constraints on processor performance, latency, throughput and costs. This dissertation is part of this research project. It aims to demonstrate how such calculations can be implemented in the analog domain, that means before the digitization. The concepts for generic and efficient image sensor architectures and analog image processing methods which can be developed for future intelligent optical sensors with real-time image processing. The image processing methods should be applied for analog pre- or digital post-processing.

In this thesis, the conventional sensor structures and digital image processing techniques were first examined regarding the feasibility of implementation in the analog domain. The complexity of image processing methods were also analyzed for analog implementable arithmetic operators. The conventional sequential data-access is limited to analog signal storage and requires necessary adjustment of the sensor structure. For this purpose, new image sensor architectures with new pixel structures and new methods for accessing sensor signals for the analog image processing method were developed.

According to the work-flow of the imaging system, three CMOS based analog image processing methods with appropriate sensor structures were introduced: A compact colour pixel structure for direct reading of a plurality of colour information of each pixel, an analog spatial filter that can process the sensor data in the small cluster using a two-dimensional readout method, and an analog tone mapping operator that non-linearly transforms the dynamic range of the sensor, depending on the photographic environment.

The sensor-structures and analog image processing methods, introduced in this thesis, were modeled in a simulation and the simulation results were compared to the digital equivalent and verified in terms of speed, chip area, power consumption and picture quality. The analog circuits were designed with a

research partner in the same sub-project and implemented at a hardware level. In collaboration with other sub-projects, it is shown how analog image processing can be applied in 3D-chip integration to extend the flexibility with respect to heterogeneous imaging systems. Moreover, the analog image processing can optimize the CT (computed tomography)-detectors, having industrial applications in mind.

In summary, this work shows that image processing methods in the analog domain with individual sensor structures and circuit designs are optimized solutions for real-time image systems.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Ziel dieser Arbeit	3
1.3	Aufbau dieser Arbeit	4
2	Technische Grundlagen der digitalen Bildgebung	7
2.1	Arbeitsfluss der digitalen Bildgebung	7
2.2	Farbfilter	8
2.3	Bildsensoren	10
2.3.1	Der CCD-Sensor	10
2.3.2	Der CMOS-Sensor	11
2.3.3	CCD- vs. CMOS-Sensor	12
2.4	CMOS-Pixelstruktur	13
2.5	Eigenschaftsparameter von Pixeln	15
2.5.1	Füllfaktor	15
2.5.2	Dunkelstrom	16
2.5.3	Dynamikumfang	16
2.6	Adressierung	16
2.7	Auslesen	16
2.8	Belichtung	17
2.9	ADC	18
2.10	Digitale Bildverarbeitung	18
2.10.1	Farbrekonstruktion	19
2.10.2	Rauschunterdrückung	20
2.10.3	Kantendetektion	21
2.10.4	Helligkeitsanpassung	21
2.10.5	Sensor-Kontrollalgorithmen	21
2.10.6	Übertragung der Digitalbilder	21
3	Analoge Bildverarbeitung	23
3.1	Umsetzbarkeit der Bildverarbeitungsverfahren in der analogen Domäne	23
3.1.1	Datenzugriff und Speichern	23
3.1.2	Analoge Rechenoperationen	24
3.2	Auswahl der Bildverarbeitungsverfahren für die analoge Umsetzung	25
3.2.1	Punktoperationen	25

3.2.2	Nachbarschaftsoperationen	26
3.2.3	Globale Operationen	27
3.2.4	Farbrekonstruktion	28
3.3	Stand der Technik zur analogen Bildverarbeitung	28
3.4	Überblick über analoge Bildverarbeitungsverfahren	30
4	Kompakter Farbpixel	33
4.1	Technischer Hintergrund	34
4.1.1	Bayer-Filter-Sensor	34
4.1.2	3CCD-Sensor	37
4.1.3	Foveon-X3-Sensor	38
4.2	Kompakte Farbpixel	39
4.2.1	Aufbau des kompakten Farbpixels	39
4.2.2	Simulation des kompakten Farbpixels	41
4.2.3	Bewertung der Resultate	42
4.3	Diskussion der Struktur	46
5	Räumliche Filter	53
5.1	Technischer Hintergrund	54
5.1.1	Analoge Filter	54
5.2	Sensorstruktur für parallele Eingänge eines analogen Filters	55
5.2.1	2D-Datenzugriff	56
5.2.2	Schaltungsdesign	57
5.2.2.1	Das Pixellayout	58
5.2.2.2	Ausleseschaltungen	58
5.2.2.3	Chip des Bildsensors	60
5.2.3	Belichtungsmechanismus	61
5.3	Analoger Tiefpassfilter	63
5.3.1	Analoger Mittelwertfilter	63
5.3.2	Rauschreduktion mit analogen Tiefpassfiltern	64
5.3.2.1	Vergleich von analogen und digitalen Filtern	65
5.3.2.2	Vergleich von Mittelwertfilter und Binomialfilter	67
5.3.3	Filtergröße	69
5.3.4	Systemleistung	71
5.4	Analoger Hochpassfilter	71
5.4.1	Analoger Sobel-Filter	71
5.4.2	Schwelle	72
5.4.3	Bildsensor für Kantendetektion	73
5.4.4	Simulationsergebnis und Systemleistung	75
5.5	Integration in 3D-Chips	76
5.5.1	3D-Chips	76
5.5.2	Vergleich von analogen und digitalen räumlichen Filtern in 3D-Chips	78
6	Tone-Mapping	81
6.1	Technischer Hintergrund	81

6.2	Analoger TMO-Algorithmus	84
6.2.1	Durchschnittlicher Helligkeitswert $\bar{L}_w$	84
6.2.2	Angepasste Spannung U_a	85
6.2.3	Parameter L_{white}	85
6.2.4	Finaler Algorithmus	86
6.3	Simulation und Analyse der Ergebnisse	86
6.4	Anwendung in der Computertomographie	92
6.4.1	Das Sättigungsproblem	92
6.4.2	Simulation der 3D-Rekonstruktionsschritte	94
6.4.2.1	Projektionsrohdaten	94
6.4.2.2	Nichtlineare Transformation	95
6.4.2.3	3D-Rekonstruktion	97
6.4.3	Simulationsergebnisse	97
6.4.4	Eine universelle Lösung	99
7	Zusammenfassung und Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	105
	Abbildungsverzeichnis	113
	Tabellenverzeichnis	115