

Softwarebasierte Echtzeitverarbeitung von Videosignalen durch skalierbare Priority Processing Algorithmen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und
Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität
Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Stefan Schiemenz

geboren am 18. Januar 1974 in Cottbus

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. M. Wolff

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. C. Hentschel

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. U. E. Kraus

Tag der mündlichen Prüfung: 29.11.2012

Berichte aus der Elektrotechnik

Stefan Schiemenz

**Softwarebasierte Echtzeitverarbeitung
von Videosignalen durch skalierbare
Priority Processing Algorithmen**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Cottbus, BTU, Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1838-7

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

Für Christian, David und Leni Marie.

Kurzfassung

Priority Processing (PP) beschreibt die Modifikation der Bearbeitungsreihenfolge eines Algorithmus zur Signalverarbeitung in Abhängigkeit der Wichtigkeit. Für die Videosignalverarbeitung bedeutet das die vorrangige Bearbeitung für den Betrachter wichtiger Bildbereiche, während unwichtige Bereiche darauffolgend oder gar nicht verarbeitet werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit eines kontrollierten Abbruchs der Verarbeitung, so dass das bis dahin erreichte Ergebnis ausgegeben werden kann. Unter Berücksichtigung bestimmter Bedingungen wird auf diese Weise eine softwarebasierte Echtzeitverarbeitung von Videosignalen garantiert. Die Anwendung dieses Verarbeitungsprinzips hat den entscheidenden Vorteil, dass begrenzt verfügbare Plattformressourcen (Rechenzeit) gezielt so eingesetzt werden, dass zu jedem Zeitpunkt die bis dahin bestmögliche Qualität ausgegeben werden kann.

Das Prinzip des PP wird aus theoretischer Sicht definiert und seine Anwendung in Form eines universell anwendbaren Frameworks beschrieben. Auf diesem Framework basierend werden mit einem skalierbaren Deinterlacer und einem skalierbaren Algorithmus zur Bildvergrößerung zwei wichtige Algorithmen aus dem Bereich der Videosignalverarbeitung beispielhaft implementiert und experimentell untersucht. Es erfolgt eine Analyse und die Bewertung der erreichten Ausgabequalität in Bezug zur konsumierten Rechenzeit sowohl einzelner als auch in einem Gesamtsystem konkurrierender PP-Algorithmen.

Abstract

This thesis enables the principle of Priority Processing (PP). Priority Processing describes an efficient way for self-adapting video algorithms to the available platform resources. The processing will be ordered by the importance of the input picture content. Then, most important image parts are processed first, less important parts in a decreasing order. Furthermore the processing can be interrupted at any time and the image can be send to the next processing unit or can be output. The priority order depends on the visual perception, aiming at highest quality increase with the next portion of available resources.

The principle of PP is theoretically defined and described as an universally applicable framework. Based on this framework are implemented and tested experimentally two important algorithms from the field of video signal processing. These are a specially developed scalable deinterlacing algorithm with enhanced motion detection and a scalable up-scaling algorithm with non-linear peaking. Here, the output quality with respect to consumed computation time is analyzed and evaluated both for individual as well as for competing PP-algorithms.

Inhaltsverzeichnis

Symbole	ix
Abkürzungen	xiii
Vorwort	1
1. Einleitung	3
1.1. Videosignalverarbeitung: Hardware- vs. Softwarekomponenten	3
1.1.1. Signalverarbeitung durch spezialisierte Hardwarekomponenten	4
1.1.2. Signalverarbeitung durch programmierbare Komponenten	6
1.1.3. Gegenüberstellung	11
1.2. Zielstellung und durchgeführte Forschung	12
1.3. Gliederung der Dissertation	13
2. Softwarebasierte Echtzeitverarbeitung von Videosignalen	15
2.1. Grundlagen der Echtzeitverarbeitung	16
2.1.1. Basismodelle	17
2.1.2. Systementwurf	21
2.1.3. Schlussfolgerung	23
2.2. Methoden zur echtzeitbasierten Verarbeitung von Videosignalen	24
2.2.1. Anwendung des Prinzips der Mehrfach-Versionen	25
2.2.2. Anpassung an die Echtzeitvorgaben	27
2.2.3. Kritische Betrachtung	28
2.3. Priority Processing	30
2.3.1. Systemmodell	32
2.3.2. Prioritätsbasierte Signalverarbeitung	35
2.4. Steuerung von Priority Processing Algorithmen	39
2.4.1. Steuerkonzept	39
2.4.2. Erweiterung des Task-Modells	41
2.4.3. Ressourcenverteilung auf konkurrierende skalierbare Algorithmen	43

3. Skalierbares Deinterlacing	45
3.1. Deinterlacing	45
3.1.1. Grenzen des Deinterlacing	47
3.1.2. Grundlegende Algorithmen	48
3.2. Erweiterter bewegungsadaptiver Ansatz	53
3.2.1. Verbesserte Bewegungsdetektion	54
3.2.2. Bewegungsadaptive Interpolation	60
3.2.3. Kanten- und bewegungsadaptive Interpolation	66
3.2.4. Diskussion	69
3.3. Deinterlacing nach dem Prinzip des Priority Processing	70
3.3.1. Basisfunktion	71
3.3.2. Inhaltsanalyse und Bearbeitungsreihenfolge	72
3.3.3. Skalierbare Funktionen	74
3.4. Evaluation	75
3.4.1. Objektive Messung der Ausgabequalität	77
3.4.2. Subjektive Bewertung der Ausgabequalität	78
3.4.3. Ergebnisse und Vergleich	79
3.4.4. Messung der Verarbeitungszeit	84
3.5. Auswertung und Diskussion	87
3.5.1. Zeitverhalten	88
3.5.2. Ausgabequalität	90
3.5.3. Schlussfolgerung	91
4. Skalierbare Bildvergrößerung	93
4.1. Lineare Diamantskalierung mit nichtlinearer Kantenanschärfung	93
4.1.1. Prinzip der linearen Diamantskalierung	94
4.1.2. Diamantskalierung mit nichtlinearer Kantenanschärfung	98
4.1.3. Varianten zur Erzeugung harmonischer Frequenzanteile	103
4.1.4. Frequenzanalyse	107
4.1.5. Ableitungen diskreter Bildsignale	120
4.1.6. Diskussion	124
4.2. Bildskalierung nach dem Prinzip des Priority Processing	126
4.2.1. Verarbeitungssteuerung	128
4.2.2. Basisfunktion	128
4.2.3. Inhaltsanalyse und Bearbeitungsreihenfolge	130
4.2.4. Skalierbare Diamantfilterung	131
4.2.5. Skalierbare Kantenanschärfung	132

4.3. Evaluierung des Algorithmus	136
4.3.1. Objektive Messung der Gesamtqualität	136
4.3.2. Subjektive Bewertung	140
4.3.3. Ergebnisse und Vergleich	140
4.3.4. Messung der Verarbeitungszeit	148
4.4. Auswertung und Diskussion	150
4.4.1. Objektive Qualität	151
4.4.2. Zeitverhalten des PP-Algorithmus	152
4.4.3. Optimierungsansatz	156
5. Dynamische Ressourcenverteilung	159
5.1. Systemspezifische Mechanismen	159
5.1.1. Ressourcenzuweisung	160
5.1.2. Kontrollierter Abbruch der Verarbeitung	162
5.1.3. Überwachung	163
5.2. Festlegung der Ausführungsreihenfolge	166
5.2.1. Zyklische Zuweisung	167
5.2.2. Minimalwertbasierte Zuweisung	167
5.2.3. Anwendung von Strategien des Reinforcement Learning	168
5.3. Implementierung einer Priority Processing Applikation	171
5.3.1. Simulationsumgebung	171
5.3.2. Abbildung der Komponenten	172
5.3.3. Prioritätsbasiertes Scheduling	172
5.3.4. Spezifische Festlegungen	173
5.4. Experimente und Ergebnisse	175
5.4.1. Genauigkeit der gemessenen Zeitwerte	176
5.4.2. Performance der Mechanismen zum vorzeitigen Abbruch	176
5.4.3. Performance der Mechanismen zur Verteilung der Rechenzeit	180
5.5. Diskussion	185
6. Zusammenfassung	187
A. Abtastung im Orts- und Zeitbereich	191
A.1. Orthogonalraster in der Orts-Zeit-Ebene	192
A.2. Offsetraster in der Orts-Zeit-Ebene	194
B. Grundlagen zur Skalierung im Ortsbereich	197
B.1. Ideale Bildskalierung	198
B.2. Erweiterte Verfahren zur Bildinterpolation um den Faktor $L=2$	204

C. Berechnung der Spektralanteile der Varianten 2-5	211
D. Analyse des Dezimationsprozesses aus Abschnitt 4.3.1	217
E. Lernende Steuerung	221
E.1. Verwendeter Lernalgorithmus	221
E.2. Modifikationen der Belohnungsfunktion	223
E.3. Quellcode zum kontrollierten Abbruch der Signalverarbeitung	225
F. Details zum verwendeten Testmaterial	227
Literaturverzeichnis	237
Stichwortverzeichnis	249

Symbole

A	horizontale Kantenlänge eines Pixelblockes
AM	Aktivität eines Pixelblockes
C_B	Antwortzeit der Basisfunktion
C_O	Antwortzeit der skalierbaren Funktion
C_i	Antwortzeit einer Task i
D_B	relative Deadline der Basisfunktion
D_P	relative Deadline eines Prozesses
D_i	relative Deadline einer Task i
$D_s(\vec{x}, n)$	vertikal hochpassgefiltertes Pixel an Position (x,y) im Bild n
$D_t(\vec{x}, n)$	temporal hochpassgefiltertes Pixel an Position (x,y) im Bild n
D_{TB}	vertikal hochpassgefiltertes Signal (Teilbild)
D_{VB}	vertikal hochpassgefiltertes Signal (Vollbild)
$F(\vec{x}, n)$	Bildpunkt an Position (x,y) im Bild n
F_i	Verarbeitungsfortschritt eines skalierbaren Priority Processing Algorithmus i
$F_{D_{detail}}$	skaliertes Detailsignal (um den Faktor $2 \cdot \frac{L}{M}$)
F_{Deint}	Verarbeitungsfortschritt des Priority Processing Deinterlacers
$F_{HD_{detail}}$	skaliertes Detailsignal (um den Faktor $\frac{L}{M}$)
$F_{HD_{linear}}$	skaliertes Bildsignal (um den Faktor $\frac{L}{M}$)
$F_{H_{detail}}$	skaliertes Detailsignal mit höheren Harmonischen
$F_{TP_{detail}}$	skaliertes (angeschärftes) Detailsignal nach Tiefpassfilterung
F_{detail}	Detailsignal eines Bildes
F_{up}	Verarbeitungsfortschritt des Priority Processing Algorithmus zur Bildvergrößerung

L	Interpolationsfaktor
L_B	Verspätung der Basisfunktion
L_i	Verspätung einer Task i
M	Dezimationsfaktor
$MD(\vec{x}, n)$	errechneter Bewegungswert an Position (x,y) im Bild n
N	Anzahl der Blöcke (gesamt)
N_u	Anzahl der Blöcke (horizontal)
N_v	Anzahl der Blöcke (vertikal)
N_{slot}	Anzahl der verfügbaren Zeitschlitze
$P_{x,y}$	Interpolationsphase an der Blockposition (x,y)
$RF(s, a, s')$	Belohnungsfunktion
T_i	Periode einer Task i
U	Auslastungsfaktor
X	Bildbreite
Y	Bildhöhe
Δt_s	Zeitschlitz
α	Gewichtungswert (Überblendfaktor)
ϕ_i	Phase (auch Aktivierungszeit) einer Task i
$\sigma(t)$	Schrittfunktion o. Ablaufplan (Schedule)
τ_B	Basisfunktion (Basis-Task)
τ_E	Epilog-Task (Nachbearbeitung)
τ_O	skalierbare Funktion (optionale Task)
τ_i	unabhängige periodische Task i
$\varepsilon(x, y)$	Effekt der Verarbeitung an Position (x,y)
a_i	Aktivierungszeit einer Task i
a_t	ausgeführte Aktion zum Zeitpunkt t
d_i	absolute Deadline einer Task i
d_{min}	Interpolationswinkel
di_{min}	minimale Helligkeitsdifferenz zwischen zwei Pixeln
f_B	Bildfrequenz [Hz]
f_V	Teilbildfrequenz [Hz]

f_g	Grenzfrequenz des Basisbandes
f_i	Beendigungszeit einer Task i
f_s	Abtastfrequenz
f_t	temporale Frequenz
f_y	vertikale Ortsfrequenz
f_{Nyq}	(neue) Nyquistfrequenz nach einer Bildskalierung
k	Gewichtungsfaktor
m_{field}	detektierter Bewegungswert (Teilbildverzögert)
m_{frame}	detektierter Bewegungswert (Vollbildverzögert)
nd_{max}	Entfernung zum weitesten Nulldurchgang
nd_{min}	Entfernung zum nächstliegenden Nulldurchgang
r_t	Belohnung
s_i	Startzeit einer Task i
s_t	Systemzustand zum Zeitpunkt t
t	Zeit

Abkürzungen

$\frac{MOPS}{W}$	Mega Operations per Second per Watt
ADRC	Adaptive Dynamic Range Coding
API	Application Programmer Interface
AR	Adaptive Recursive deinterlacing
AVC	Advanced Video Coding
CIF	Common Intermediate Format
CPU	Central Processing Unit
CRT	Cathode Ray Tube
DS	Decision Scheduler
DVB-S2	Digital Video Broadcasting - Satellite2
EDDI	Edge Dependent Deinterlacing
EDI	Edge Dependent Interpolation
ELA	Edge dependent Line Averaging
FPGA	Field Programmable Gate Array
FR	Field Repetition
GOP	Group of Picture
GPP	General Purpose Processoren
HD	High Definition
HP	Hochpass

HVS	Human Visual System
LA	Line Averaging
LGD	Linear Gradient Descent
LMS	Least Mean Square
LUT	Look Up Table
MC	Motion Compensation
MOS	Mean Opinion Score
MPEG	Moving Picture Experts Group
MSD	Majority Selection Deinterlacer
MSE	Mean Square Error
MTI	Motion Trajectory Inconsistency
NTSC	National Television Systems Committee
PAL	Phase Alternation Line
PC	Pair Comparison
PiP	Picture-in-Picture
PP	Priority Processing
PPE	PowerPC Processing Element
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio
QoS	Quality of Service
RDTS	Read Time Stamp Counter
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RL	Reinforcement Learning
SARSA	State-Action-Reward-State-Action

SD	Standard Definition
SECAM	Séquentiel couleur à mémoire
SNR	Signal-Rauschabstand
SPE	Synergistic Processing Unit
SSMR	Single Stimulus with Multiple Repetition
SVA	skalierbaren Videoalgorithmus
TDL	Temporal Difference Learning
TP	Tiefpass
TSC	Time Stamp Counter