

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Lösungsansatz	5
1.4	Aufbau der Arbeit	11
2	Stand der Forschung	13
2.1	Bildverarbeitung auf Eingebetteten Systemen	13
2.1.1	Entwurfsumgebungen	13
2.1.2	Echtzeitbetriebssysteme	14
2.1.3	HW/SW-CoDesign	14
2.2	Bildverarbeitungsalgorithmen	17
2.2.1	Merkmalsextraktionen	17
2.2.2	Pose-Estimation	18
2.2.3	Structure-From-Motion	20
2.3	Trackingsysteme	21
2.3.1	Offline AR-Systeme	22
2.3.2	Online AR-Systeme	23
2.3.2.1	Markerbasierte AR-Systeme	23
2.3.2.2	Modellbasierte AR-Systeme	24
2.3.2.3	Inkrementelle AR-Systeme	25
2.3.2.4	Hybride AR-Systeme	26
2.3.3	Robotik	26
2.3.4	Einordnung von VisiTrack	27
3	Entwurf von VisiTrack	29
3.1	Anforderungen	29
3.2	Architektur	30
3.3	Entwurfsmethode	31
3.3.1	Modellierungssprachen	32

3.3.2	Datenfluss-Modelle	33
3.3.2.1	Datenflussgraphen (DFG)	33
3.3.2.2	Synchrone Datenflussgraphen (SDF)	34
3.3.2.3	Multi-Dimensional SDF (MD-SDF)	38
3.3.2.4	Processing Graph Methode (PGM)	39
3.3.2.5	Weitere Datenfluss-Modelle	39
3.4	Entwurfsablauf	39
3.5	Werkzeugunterstützung für RealTime-Systeme	42
3.6	Werkzeugunterstützung für Bildverarbeitungssysteme	44
3.7	VisiTrack	46
3.7.1	Funktionale Anforderungen	46
3.7.2	Temporale Anforderungen	47
3.7.3	Architektur	47
3.7.4	Modellierungssprache	48
3.7.5	Entwurfsablauf	49
4	Synchrone Datenflussgraphen für die Bildverarbeitung (CV-SDF)	51
4.1	Tokendatentypen	52
4.1.1	Beispiele für Token-Datentypen	54
4.1.1.1	Zeilenbasierte Token-Datentypen	54
4.1.1.2	8x8-Blöcke	55
4.2	Einschränkungen von SDF	55
4.2.1	Zugriffe auf benachbarte Pixeldaten	55
4.2.2	Zugriff auf Daten von vorherigen Bildern	56
4.3	StructuredBuffers	56
4.3.1	Rückführung auf SDF	57
4.3.1.1	Zugriffsintervall	58
4.3.1.2	Lösungsansatz	60
4.3.1.3	Aktor <i>SB1</i>	60
4.3.1.4	Aktor <i>SB2</i>	62
4.3.1.5	Puffergrößen	63
4.3.2	Anlaufaktivierungen	63
4.4	Entwurfsrichtlinien	66
4.4.1	Pixeloperatoren	68
4.4.2	Lokale Operatoren	68
4.4.3	Bildoperatoren	69
4.4.4	Globale Daten	72

5	Robuste Repräsentation der Bild- und Weltmerkmale	75
5.1	Definition 2D-Merkmal	75
5.2	Messfehler	76
5.3	Repräsentationen	78
5.3.1	Definition	78
5.3.2	Direkte Repräsentation	79
5.3.3	Probability Density Functions	79
5.3.3.1	Geometrische Interpretation	81
5.3.4	AS-PDFs	81
5.3.5	Geometrische Momente	82
5.3.5.1	Kartesische Momentdefinition	82
5.3.5.2	Momente 0. Ordnung	83
5.3.5.3	Momente 1. Ordnung	83
5.3.5.4	Zentralmomente	83
5.3.5.5	Momente 2. Ordnung	84
5.3.5.6	Verschmelzen von Regionen	85
5.3.5.7	PDFs	87
5.4	Attribute	87
5.5	Ähnlichkeitsmaße	87
5.5.1	Geometrische Momente	88
5.5.2	Attribute	88
6	Merkmalsextraktion und -verfolgung	89
6.1	Anforderungen	89
6.2	Vorverarbeitung	90
6.2.1	Gauß-Filter	90
6.2.2	Radiale Entzerrung	91
6.3	Segmentierung	94
6.3.1	Region-Growing	94
6.3.2	Region-Merging	95
6.3.3	2D-Verfolgung	99
6.3.4	Ähnlichkeitsmaß der Attribute	100
6.3.5	Gütewert	101
6.3.5.1	Farbvarianz	102
6.3.5.2	Dichte	103
6.3.5.3	Trackingvarianz	103
6.3.6	CV-SDF Modell	103
6.4	Kantenextraktion	105
6.4.1	Algorithmus	105

6.4.2	Sobel-Filter	106
6.4.3	Non-Maxima Eliminierung	108
6.4.4	Vektorisierung	109
6.4.5	2D-Verfolgung	112
6.4.6	Ähnlichkeitsmaß der Attribute	114
6.4.7	Gütwert	115
6.4.7.1	Geradlinigkeit	115
6.4.7.2	Varianz der Attribute	115
6.4.7.3	Varianz des Trackings	116
6.4.8	CV-SDF Modell	116
6.5	Punktextraktion und -verfolgung	117
6.5.1	Registration	118
6.5.2	Kanade-Lucas-Tomasi-Tracker (KLT)	118
6.5.2.1	KLT-Registration	119
6.5.2.2	KLT-Feature-Selector	120
6.5.2.3	KLT-Feature-Tracker	120
6.5.2.4	Gütwert	121
6.5.2.5	CV-SDF Modell	122
6.6	Gesamtmodell	124
7	Merkmalsauswahl	125
7.1	Auswahl der besten Merkmale	125
7.2	Geometrische Verteilung	126
7.3	Merkmalstypen	129
8	Berechnung der Kameraorientierung	131
8.1	Kameramodelle	131
8.1.1	Begriffe	132
8.1.2	Lochkamera	133
8.1.3	Digitale Kamera	134
8.1.4	Endliche Projektive Kamera	134
8.1.5	Innere und Äußere Orientierung	135
8.1.6	Kameraanatomie	135
8.1.6.1	Kamerazentrum	136
8.1.7	Rückprojektion	136
8.2	Bestimmung der Projektionsmatrix	136
8.2.1	Direkte, lineare Berechnung	136
8.2.1.1	Eindeutige Lösung	137
8.2.1.2	Überbestimmte Lösung	137

8.2.1.3	Degenerierte Konfigurationen	138
8.2.1.4	Normalisierung	138
8.2.1.5	Linienkorrespondenzen	138
8.2.1.6	Flächenkorrespondenzen	138
8.2.2	Gold-Standard-Algorithmus	139
8.2.3	Weitere iterative Verfahren	139
8.3	SDF-Realisierung	140
9	Triangulation der Weltmerkmale	143
9.1	Zwei Aufnahmen	144
9.1.1	Lineare Triangulation	144
9.1.2	Iterative Triangulation	144
9.1.3	Nicht-Iterative Triangulation	145
9.2	N Aufnahmen	145
9.2.1	Lineare Triangulation	145
9.2.2	Bundle-Adjustment	145
9.3	AS-PDFs	145
9.3.1	1-Aufnahme	146
9.3.2	N -Aufnahmen	148
9.3.3	SDF Modell	149
10	CV-SDF-Graph für VisiTrack	151
10.1	Schedule	153
11	Realisierung	155
11.1	1. Prototyp	155
11.2	Rapid-Prototyping mit Ptolemy-II	156
11.2.1	Modell des StructuredBuffers	156
11.2.2	Instantiierung eines StructuredBuffers	157
11.2.3	Schedule	158
11.2.4	Simulation	160
11.2.5	Codegenerierung	160
11.2.6	Beispiel Kantenextraktion	161
11.3	Visualisierung	161
11.4	Implementierung	163
11.5	Weitere Anwendungsfelder	164
11.5.1	AR-PDA	164
11.5.2	ARSoccer	167
11.5.3	RoboCup	168

12 Tests	171
12.1 Synthetische Szene	171
12.1.1 Merkmalsextraktionen	172
12.1.2 3D-Approximierungen mittels PDFs	173
12.1.3 Kameraposition mittels approximierter Merkmale	175
12.2 Reale Szene	176
12.2.1 Probleme	179
13 Zusammenfassung und Ausblick	183
A Implementierungen ausgewählter Aktoren	185
A.1 StructuredBuffer: SB1	185
A.2 StructuredBuffer: SB2	189
Literaturverzeichnis	195

Abbildungsverzeichnis

1.1	Mobile Geräte	1
1.2	Die zwei Phasen des Systems	7
1.3	Trackingsequenz	8
1.4	Architektur des Gesamtsystems	9
3.1	Achsen des Entwurfsprozess	29
3.2	Phasen des Entwurfs	32
3.3	Beispiel eines einfachen SDF-Graphen	35
3.4	Wasserfallmodell	40
3.5	Spiralmodell	41
3.6	V-Modell	41
3.7	Datenflussgraphen mit MATLAB/Simulink	42
3.8	Datenflussgraphen mit Ptolemy-II	43
3.9	Grafische Programmierumgebung Cantata aus dem Khoros Projekt	44
3.10	Grafische Programmierumgebung von WiT	45
3.11	Grafische Programmierumgebung NeatVision	45
3.12	Ein- und Ausgangsdaten des VisiTrack-Systems	46
4.1	Einfacher SDF-Graph	51
4.2	Latenz von traditionellen Bildverarbeitungsprogrammen im Vergleich mit CV-SDF	53
4.3	Beispiele für Token-Datentypen	54
4.4	Beispielgraph mit einer Kante mit StructuredBuffer	56
4.5	StructuredBuffer	58
4.6	Intervall mit $c = 1, n_1 = -2, n_2 = 2, f = 0$	58
4.7	Intervall mit $c = 1, n_1 = -2, n_2 = 2, f = 1$	59
4.8	Größen des Zugriffsintervalls	59
4.9	Realisierung eines StructuredBuffers mittels zweier SDF-Aktoren	60
4.10	SB1-Aktor zur Generierung der zukünftigen und aktuellen Token	61
4.11	SB2-Aktor zum Zusammenfügen des Zugriffsintervalls	62

4.12	Beispiel einer Berechnung der Anlaufaktivierungen eines CV-SDF Graphen	65
4.13	Realisierung eines Pixeloperators als CV-SDF-Aktor	68
4.14	3x3-Filter-Referenzen auf benachbarte Zeilen	69
4.15	CV-SDF-Aktor eines lokalen Operators	69
4.16	Naive Realisierung eines Bildoperators	70
4.17	Speicheroptimierte Realisierung eines Bildoperators	70
4.18	Speicher- und latenzoptimierte Realisierung eines Bildoperators	71
4.19	Einfacher Zugriff auf ein globales Feld	72
4.20	Erweiterter Zugriff auf ein globales Feld	73
5.1	Probability Density Functions	80
5.2	Orientierung einer Region	84
6.1	Anwendung des Gauß-Filters	90
6.2	3x3-Gauß-Filterkern	91
6.3	Gauß-Filter als CV-SDF-Aktor	91
6.4	Beispiel einer radialen Verzeichnung	92
6.5	Radiale Entzerrung	93
6.6	CV-SDF-Aktor zur Radialen Entzerrung	93
6.7	Region-Growing-Aktor	95
6.8	Segmentierte Zeile	95
6.9	Vollständige Pixelnachbarschaft eines Eingabepixels	96
6.10	Beispiel der Region-Merging Heuristik	97
6.11	Region-Merging-Aktor	98
6.12	Zeilenabstände für das Region-Tracking	100
6.13	Region-Tracking-Aktor	101
6.14	Beispiel der Region-Tracking Heuristik	102
6.15	Segmentierungsalgorithmus als CV-SDF Graph	104
6.16	Horizontaler und vertikaler Kern des Sobel-Filters	106
6.17	Quantisierung des Sobel-Gradienten	106
6.18	Sobel-Filter-Aktor	107
6.19	Beispielbild und Anwendung des Sobel-Filters	108
6.20	Ergebnis der Non-Maxima-Eliminierung des Beispielbildes	109
6.21	Non-Maxima-Elimination-Aktor	109
6.22	Beispiel der Kantenvektorisierung	110
6.23	Definition von Nachbarpixeln	111
6.24	Aktor der Kanten-Vektorisierung	112
6.25	Ergebnis der Vektorisierung des Beispielbildes	113

6.26	Heuristik zur Kantenverfolgung an einer Beispielpkante	113
6.27	Aktor zur 2D-Kantenverfolgung	114
6.28	CV-SDF-Graph der Kantenextraktion und -verfolgung	116
6.29	Ergebnis des KLT-Trackers einer Beispielsequenz	122
6.30	CV-SDF-Modell des KLT-Trackers	123
6.31	Hierarchisches CV-SDF-Modell aller Merkmalsextraktionen	124
7.1	Selector-Aktor	126
7.2	Aufteilung eines Bildes in 12 Zonen	127
7.3	SDF-Graph der Merkmalsauswahl	128
8.1	Kamerageometrie	132
8.2	Geometrie einer Lochkamera	133
8.3	Realisierung des DLT-Algorithmus zur Projektionsmatrixbestimmung mittels SDF-Aktoren	141
9.1	Drei windschiefe Geraden	143
9.2	Rückprojektion eines punktförmigen 2D-Merkmals als 3D-PDF	146
9.3	Eigenvektoren der 2D- und 3D-PDF	147
9.4	Zwei 3D-PDFs eines 2D-Merkmals aus zwei unterschiedlichen Kame- rapositionen	149
9.5	Zusammengefasstes 3D-PDF der beiden einzelnen Aufnahmen	149
9.6	Nahe beieinander liegende Kamerapositionen	150
9.7	SDF-Graph der 3D-Triangulation	150
10.1	Hierarchisches CV-SDF-Modell von VisiTrack	151
11.1	Interne Realisierung eines StructuredBuffers als hierarchischer SDF- Aktor mit Ptolemy-II	157
11.2	Verwendung eines Structured-Buffers mit Ptolemy-II	158
11.3	Modellierung des Kantenextraktion mit Ptolemy-II	161
11.4	Visualisierung der PDFs während einer Kamerafahrt	162
11.5	Funktionsweise des AR-PDA Systems	165
11.6	ARSoccer	167
11.7	Kantentracking beim ARSoccer	168
11.8	Ein Spieler der <i>PaderKicker</i> -Mannschaft	168
12.1	Küchenszene	171
12.2	Punktextraktionen der Küchensequenz	172
12.3	Kantenextraktionen der Küchensequenz	173
12.4	Fehler in der Positionsabschätzung eines Punktes der Küchensequenz	174

12.5	Größe des Ellipsoiden der AS-PDF Approximation	175
12.6	Fehler in der Positionsabschätzung der Kamera der Küchensequenz .	176
12.7	Extrahierte Punktmerkmale der realen Küchenszene	177
12.8	Kantenextraktion der letzten Aufnahme der realen Küchensequenz . .	178
12.9	Punktextraktion der realen Küchensequenz	179
12.10	Kantenextraktion der realen Küchensequenz	180
12.11	Fehler in der Orientierungsberechnung	181
12.12	Augmentierung eines künstlichen Würfels	181

Listings

6.1	Pseudo-Algorithmus des Gauß-Filter-Aktors	91
6.2	Pseudo-Algorithmus des Distortion-Correction-Aktors	94
6.3	Pseudo-Algorithmus des Region-Growing-Aktors	96
6.4	Pseudo-Algorithmus des Region-Merging-Aktors	98
6.5	Pseudo-Algorithmus des Region-Tracking-Aktors	100
6.6	Pseudo-Algorithmus des horizontalen bzw. vertikalen Filter-Aktors . . .	107
6.7	Pseudo-Algorithmus des Non-Maxima-Elimination-Aktors	109
6.8	Pseudo-Algorithmus des Vektorisierungs-Aktors	112
6.9	Pseudo-Algorithmus des Edge-Tracking-Aktors	114
6.10	Pseudo-Algorithmus des KLT-Feature-Selectors	120
6.11	Pseudo-Algorithmus des KLT-Feature-Trackers	121
8.1	DLT-Algorithmus zur Berechnung der Projektionsmatrix P	139
A.1	Implementierung des SB1-Aktors eines Structured-Buffers in Ptolemy II	185
A.2	Implementierung des SB2-Aktors eines Structured-Buffers in Ptolemy II	189