

Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching

Heiko Hirschmüller und Tilman Bucher

Institut für Robotik und Mechatronik



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Inhalt

- Stereorekonstruktion bei DLR-RM
- Semi-Global Matching (SGM)
- Anwendung auf DGPF Testdaten



Stereorekonstruktion bei DLR-RM



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

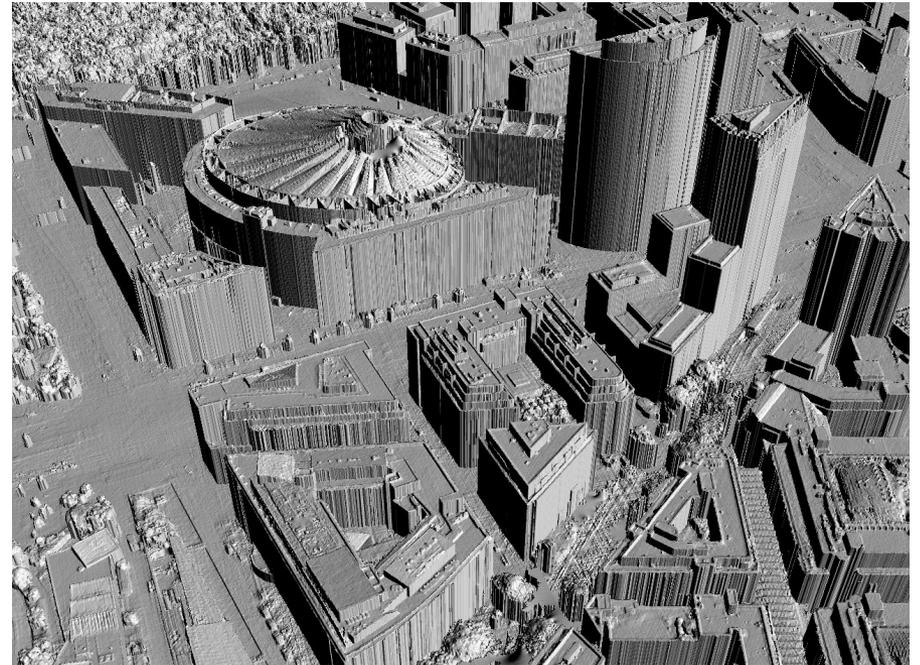
2.5D Rekonstruktion aus Luft- und Satellitendaten

- Zeilenkameras: MFC (DLR-RM), HRSC (DLR-PF), ADS 40 (Leica)
- Matrixkameras: UltraCam-D, -X, -Xp (Vexcel), DMC (Intergraph/ZI)
- Satellit: WorldView (DG), Quickbird (DG), HRSC Mars Express

Beispiel: Texturiert (UC-D, 7 cm/Pixel)

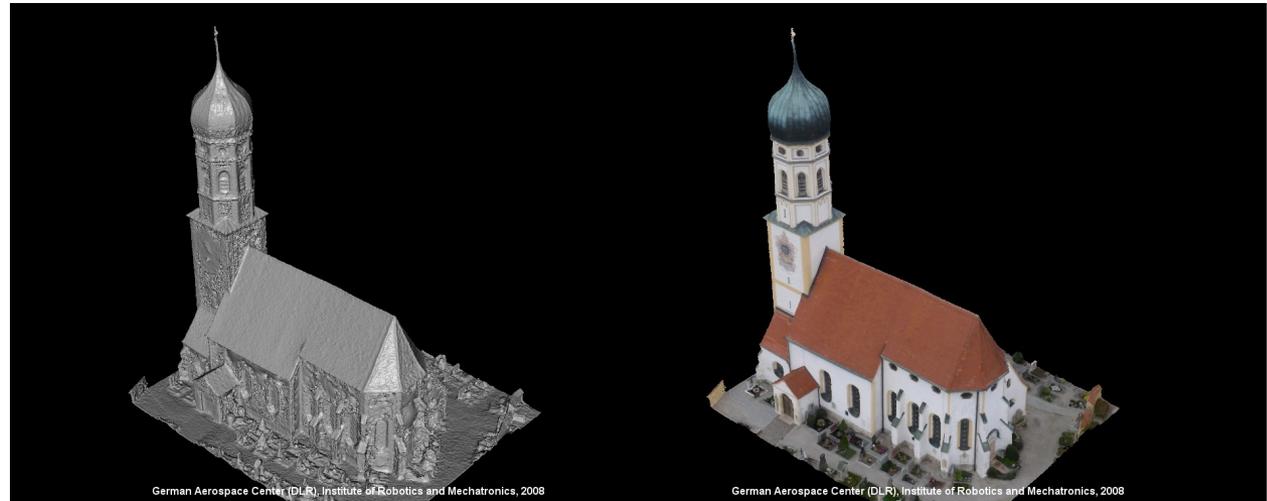


Beispiel: Untexturiert (UC-D, 7 cm/Pixel)



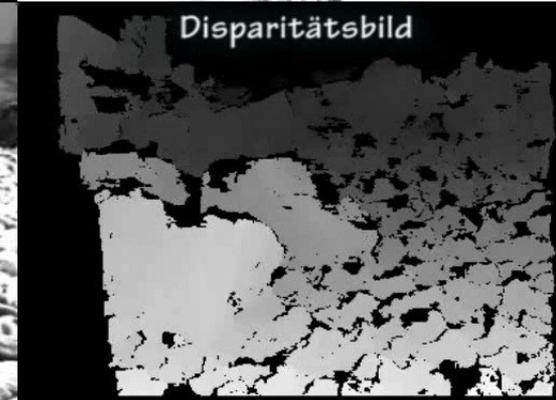
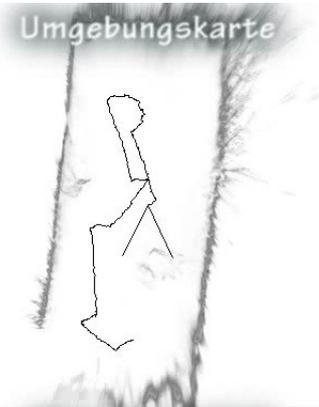
3D Rekonstruktion aus Multicopter Bildern

- Octocopter: AscTec Falcon 8
- Im Dez. 2008, autonomer Flug per GPS
- Bilder: 60 x 10 MPixel in Kreis um Kirche
- 3D Rekonstruktion mit 3 cm/Pixel



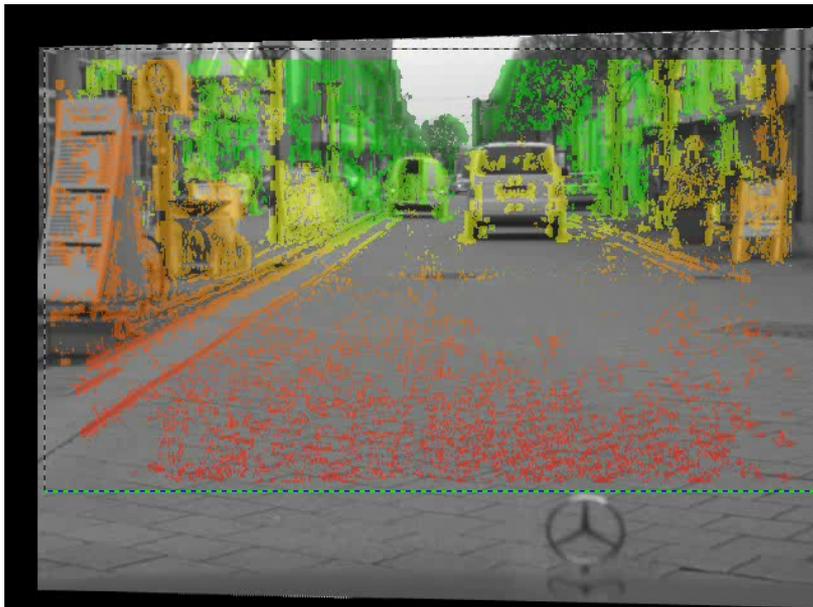
Umgebungsmodellierung und Navigation

- Mobile Robotik z.B. DLR-Krabbler (Görner, Chilian & Hirschmüller, i-SAIRAS 2010)
- Synchronisierte Stereo-Kamera
- VGA Auflösung
- SGM auf GPU (Ernst & Hirschmüller, ISVC 2008)
- In Echtzeit:
 - Stereo matching,
 - 6 DoF visuelle Odometrie,
 - 2.5 D Kartenerstellung und
 - Navigation

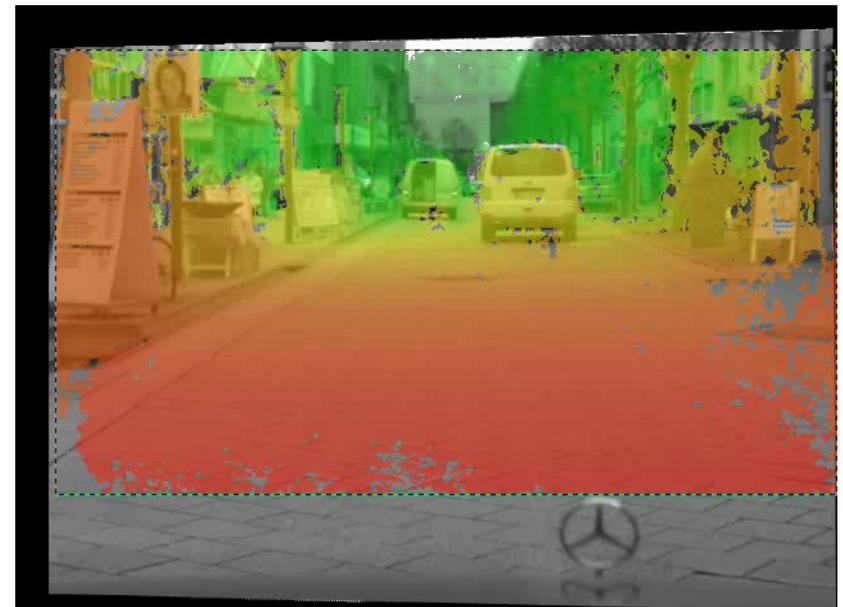


Tiefenbilder für Fahrerassistenzsysteme

- Kooperation mit Daimler AG bezüglich Semi-Global Matching
- Daimler hat eine eigene FPGA Implementierung von SGM mit 25 Bildern/s
- Bilder mit 12 Bit radiometrischer Tiefe



Korrelationsbasiertes Stereo



Semi-global matching

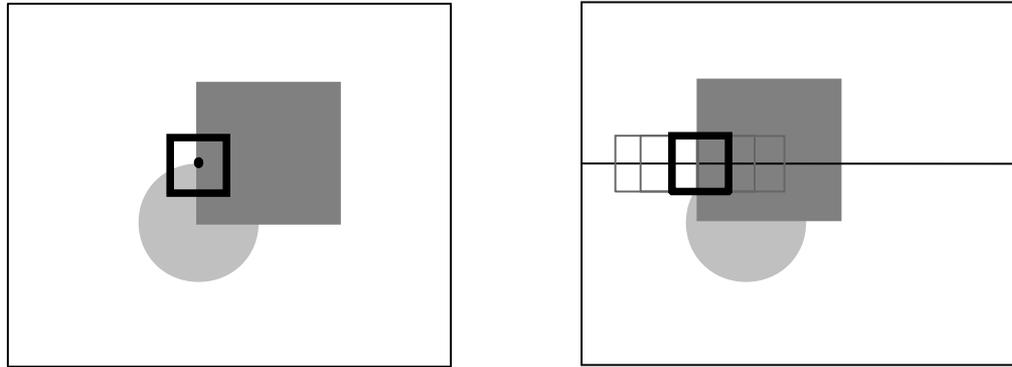
(Bildmaterial von Daimler AG)



Semi-Global Matching (SGM)



Lokale Methoden: Korrelation



- Matching von (quadratischen) Fenstern
- Dadurch implizite Annahme das Disparität (Tiefe) im Fenster konstant ist
- Disparitätsänderungen im Fenster (z.B. an Kanten) führen zu Fehlern!
- D.h. unscharfe, ausgefranste Kanten und Verlust kleiner Objekte
- Vordergrundobjekte werden meist vergrößert (Hirschmüller et al., IJCV 2002)

Prinzip globale Stereoverfahren (1)

- Pixelweises Matching, z.B. durch absolute Differenzen

$$C(\mathbf{p}, D_p) = |L(\mathbf{p}) - R(\mathbf{p}-D_p)|$$

- Pixelweises Matching ist natürlich absolut nicht eindeutig
- Deshalb zusätzlich Kosten für Disparitätssprünge (q ist Pixel neben p)

$$P T[D_p \neq D_q]$$

- Kosten für das ganze Bild durch Summe über alle Pixel

$$E(D) = \sum_p (C(\mathbf{p}, D_p) + \sum_{q \in N_p} P T[D_p \neq D_q])$$

- Keine implizite Annahme konstanter Disparität!
- Disparität kann sich von jedem Pixel zum nächsten ändern und so exakt an Kanten anpassen

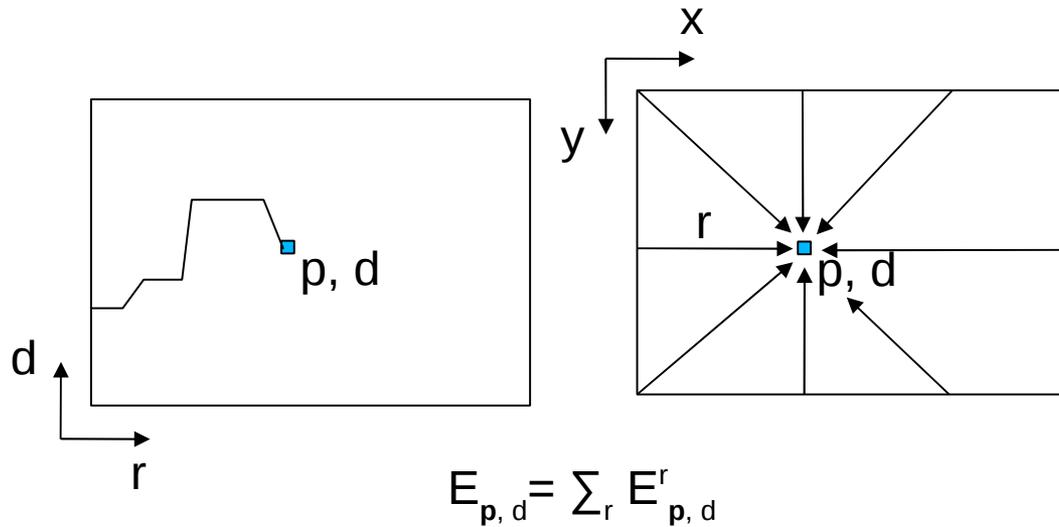
Prinzip globale Stereoverfahren (2)

$$E(D) = \sum_p (C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P T[D_p \neq D_q])$$

- Kostenfunktion wird Kantenerhaltend genannt, wenn Kosten unabhängig von der Größe der Disparitätssprünge
- Durch Glattheitsterm sind alle Pixel des Bildes (global) miteinander verknüpft
- Ziel: Finden des Disparitätsbildes D welches $E(D)$ minimiert
- **Aber:** NP Problem für Klasse der kantenerhaltenden Kostenfunktionen (Boykov et al., TPAMI 2001)!

Semi-Global Matching

$$E(D) = \sum_p (C_{BT}(\mathbf{p}, D_p) + \sum_{q \in N_p} (P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + P_2 T[|D_p - D_q| > 1]))$$



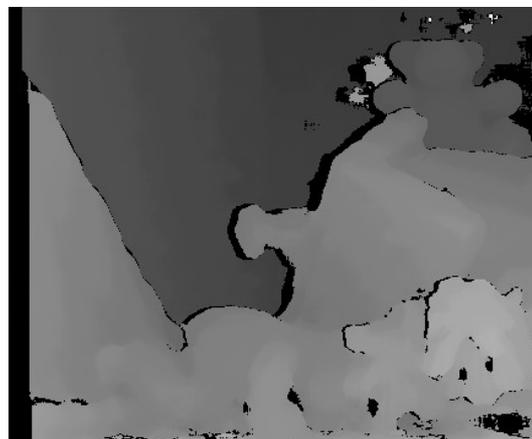
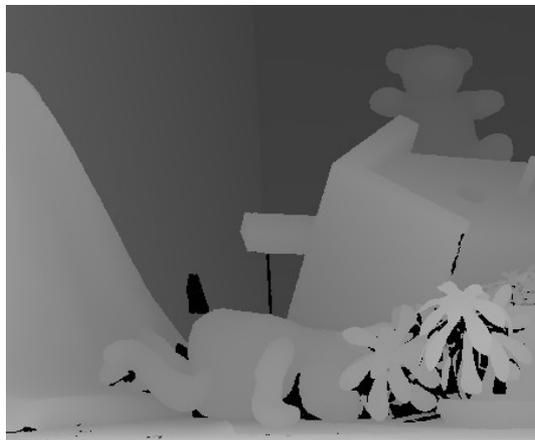
- Disparität für \mathbf{p} : $\min_d E_{p,d}$
- Zusätzlich L/R-Check, Sub-Pixel Estimation, Filter, ...
- Hirschmüller (CVPR 2005 & TPAMI 2008)

Vergleich Korrelation gegen SGM

Ground Truth

MWMF [63ms]

SGM [1.06s]





Welches Matchingkriterium?

- Bilder haben radiometrische Unterschiede, durch:
Eventuell fehlende radiometrische Kalibrierung, nicht diffuse Reflektion, Änderung der Beleuchtung, Rauschen, etc.
- Untersuchung von 15 verschiedenen Matchingkosten an Bildern mit realen radiometrischen Unterschieden bekannter Disparität (Hirschmüller & Scharstein, TPAMI 2009)
- Am besten war Census (Zabih & Woodfill, ECCV 1994)



Anwendung auf DGPF Testdaten

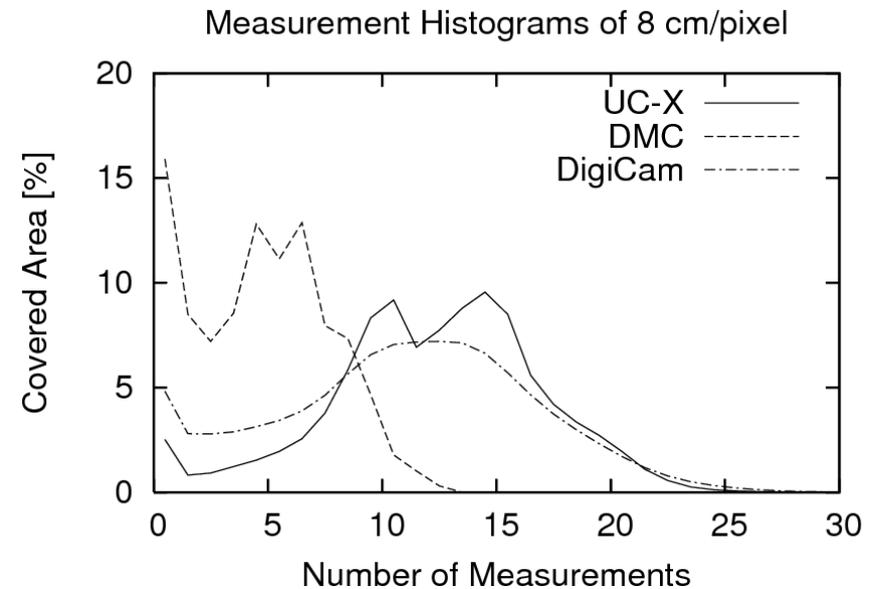
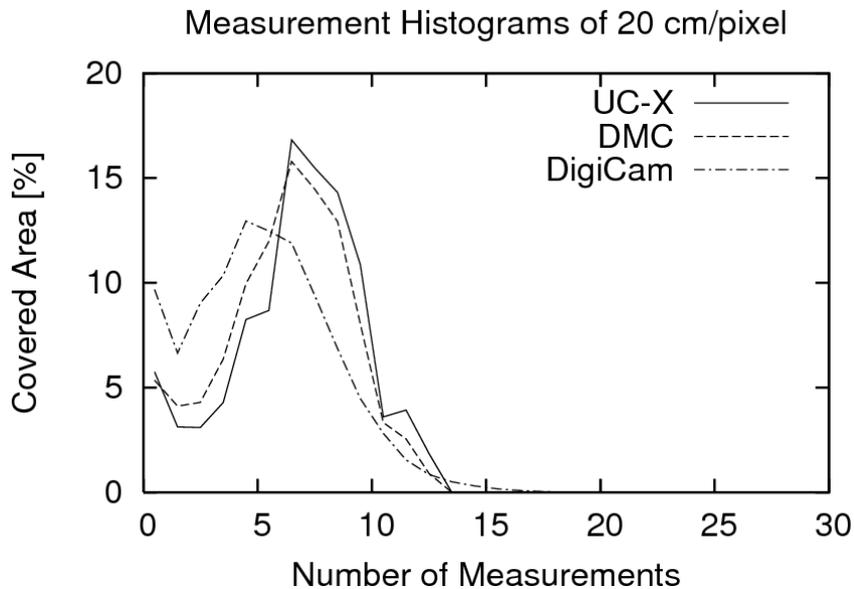
DGPF Daten von Vaihingen/Enz 2008 (Cramer, PFG 2010)

- Untersucht wurden in 8 cm/Pixel und 20 cm/Pixel:
UltraCam-X (Vexcel), DMC (Interpgraph/ZI) und Quattro DigiCam (IGI)
- Orientierungsdaten wurde übernommen wie geliefert
- Vergleich zu ALS 50 (Leica) Laserdaten
- Nicht untersucht wurden:
ADS 40 (Leica Geosystems) => wegen fehlenden Level 1 PAN Kanälen
JAS 150 (Jena-Optronic) => wegen Konvertierungsproblem der Orientierungen



- SGM Prozessierung mit Standardparametern
- Matching gegen alle Bilder mit > 50 % Überlappung

Anzahl der Paarweisen Rekonstruktionen pro Fläche

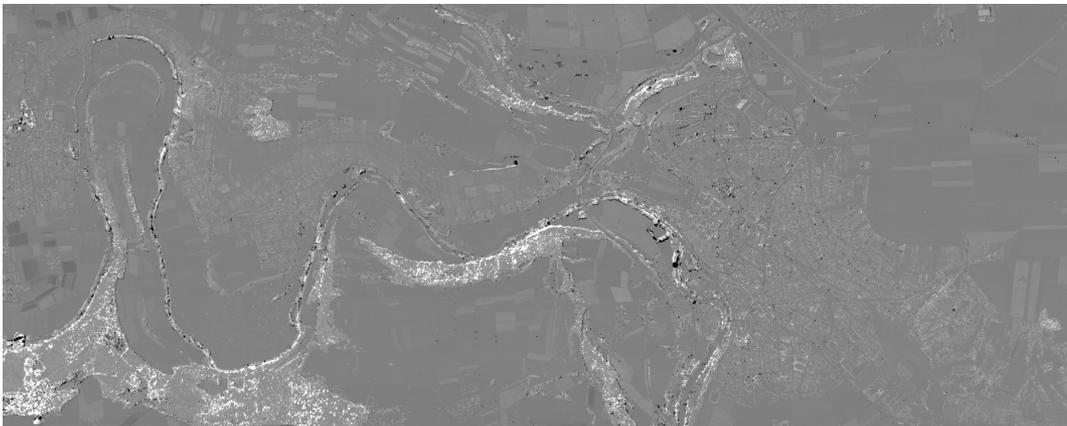


- Überlappung von nur ca. 60/70
- Ausnahmen sind 8 cm UC-X und Quattro DigiCam mit Überlappung 80/70
- Öffnungswinkel: UC-X 55°, DMC 69°, Quattro DigiCam 2x33°

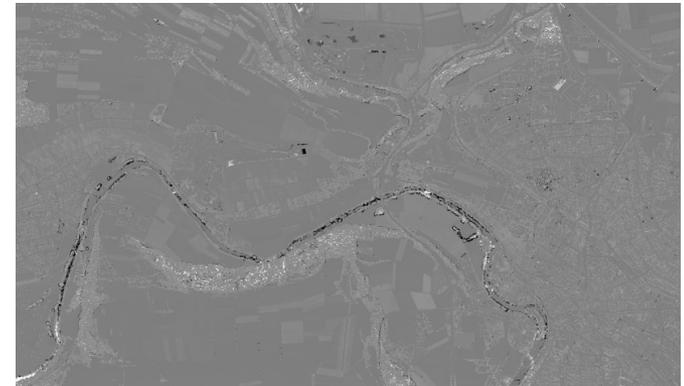
Differenz UltraCam-X gegen ALS 50

- Größte Unterschiede in Vegetation (Bäume und Vegetation)
- Unterschiede durch:
 - Zeitdifferenz (ca. 3 Wochen)
 - Unterschiedliches Meßprinzip (Triangulation gegenüber Entfernungsmessung)

20 cm/Pixel UC-X – ALS 50



8 cm/Pixel UC-X – ALS 50

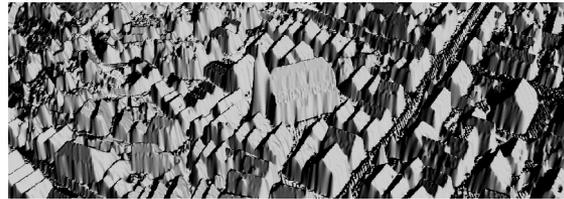


- Stereomodel höher => Hell, Lasermodel höher => Dunkel

Rekonstruktion mit 20 cm/Pixel

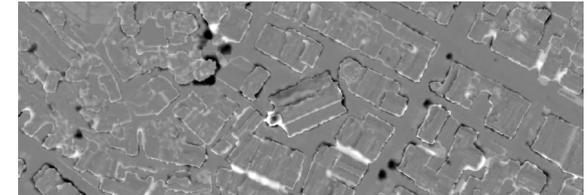
- Lasermodel hat schräge Häuserwände gegenüber Stereo
- Stereo könnte besser sein bei höherer Überlappung bzw. geringeren Winkeln

ALS 50

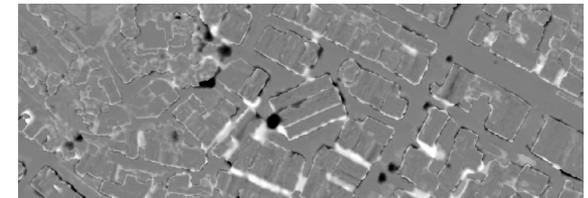


Differenz gegen ALS 50

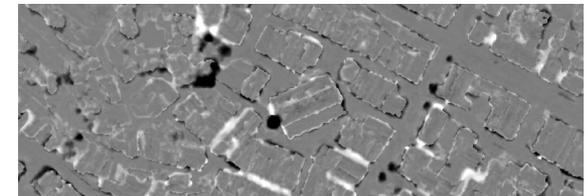
UltraCam-X



DMC



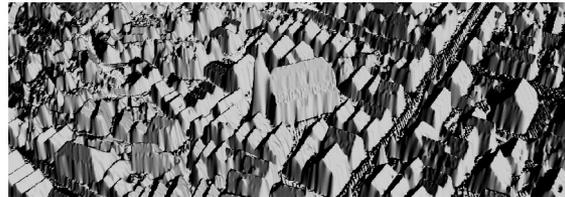
Quattro DigiCam



Rekonstruktion mit 8 cm/Pixel

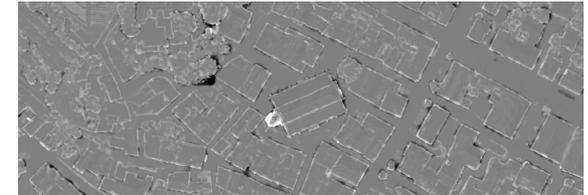
- DSM von allen Kameras deutlich exakter und detaillierter als Lasermodell

ALS 50

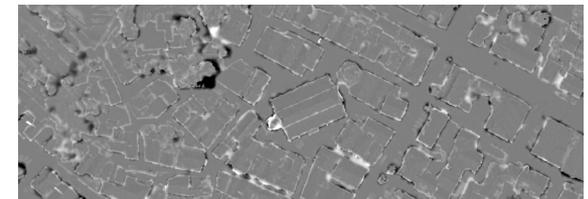


Differenz gegen ALS 50

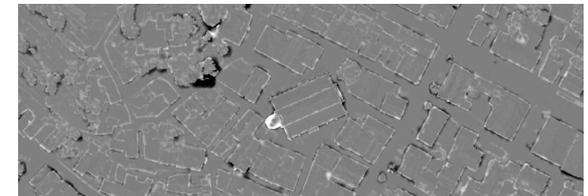
UltraCam-X



DMC



Quattro DigiCam



Vergrößerung: UltraCam-X, 20 cm/Pixel und 8 cm/Pixel

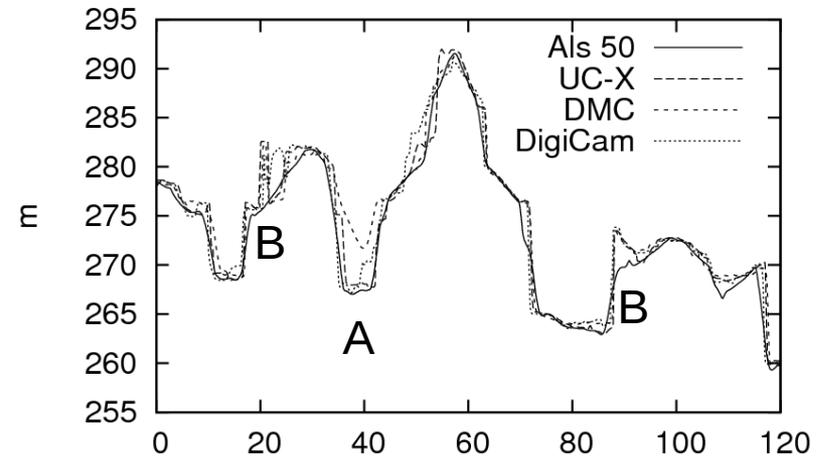


Vergleich von Profilen

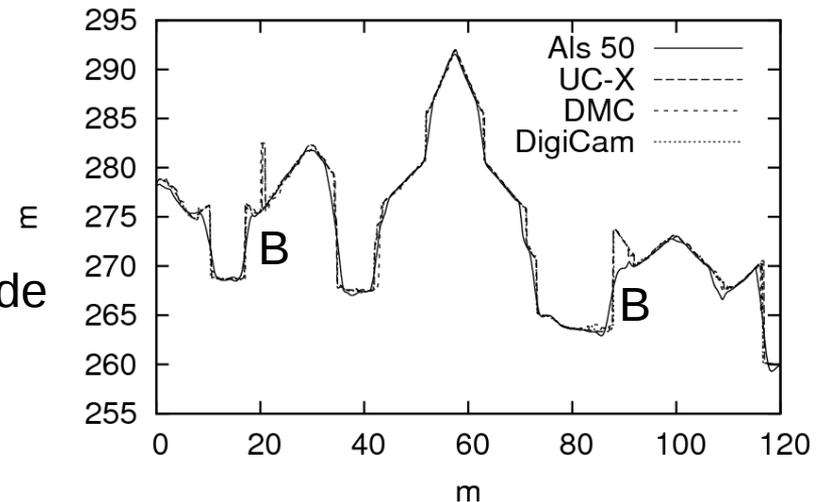


- A: Zu steil um Boden zu triangulieren
- B: Reale Details nicht im Lasermodell
- Generell: Lasermodell hat schräge Wände
- 8 cm Modelle sehen viel exakter aus

Profiles of 20 cm/pixel datasets



Profiles of 8 cm/pixel datasets



Statistische Auswertung an 110 Punkten

- RMS meist deutlich unter $\frac{1}{2}$ GSD

Camera	GSD [cm/pixel]	RMS [cm]	Mean [cm]	Min [cm]	Max [cm]
ALS	25	8,9	1,8	-7,1	56,6
UltraCam-X	20	12,5	-9,6	-23,7	14
DMC	20	9,7	1,7	-20,8	28,4
Quattro DigiCAM	20	6,2	0,3	-22,9	13,2
UltraCam-X	8	5,1	-2,6	-10,4	5,9
DMC	8	3,2	-0,1	-7,2	6,4
Quattro DigiCAM	8	2,6	-0,3	-7,3	5,4

Rechenzeiten

- Zeiten für Matching abhängig von Anzahl der Pixel und realen Höhenunterschieden

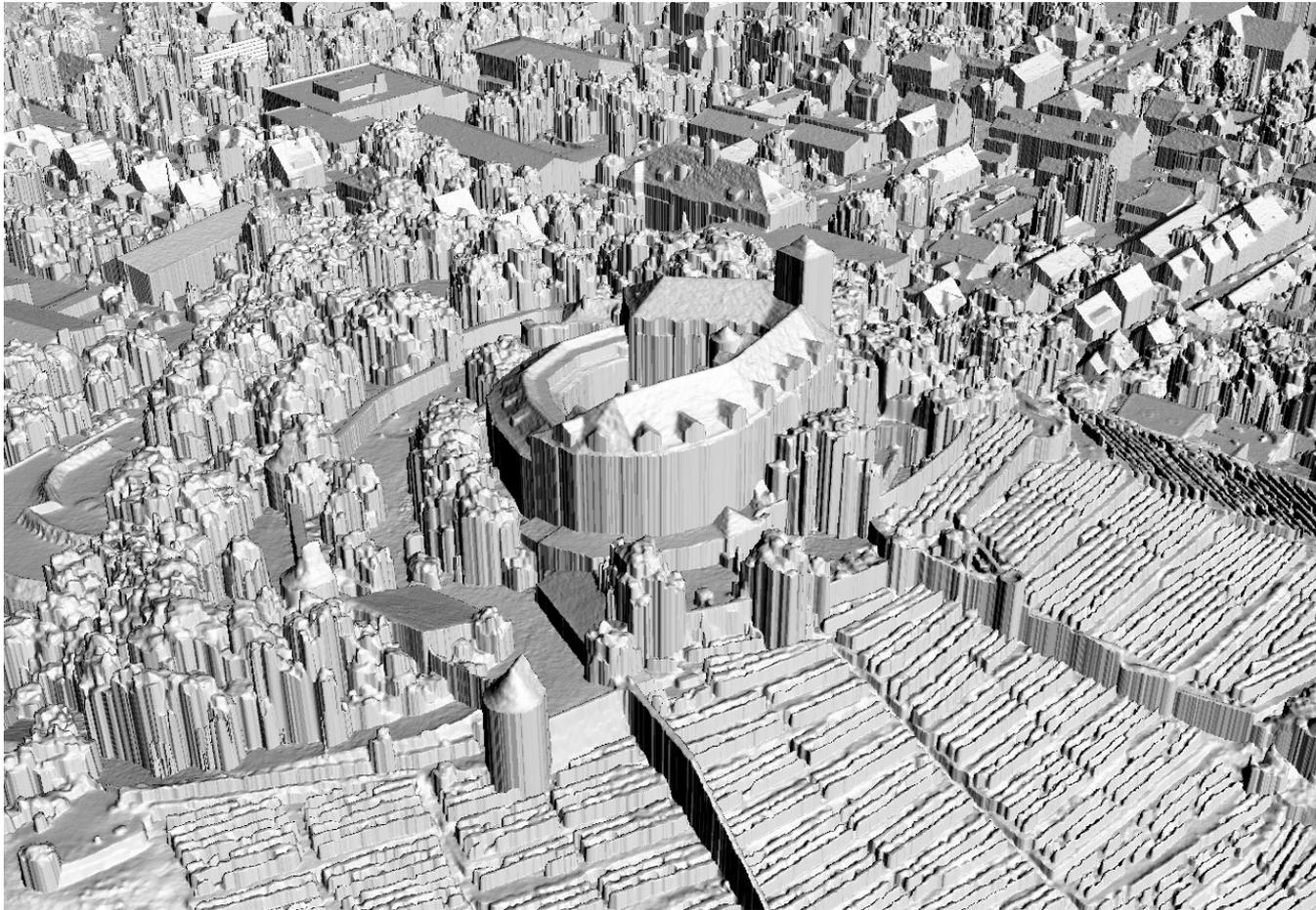
Camera	Ground Sampl. Dist. [cm/pixel]	Number of images	Image Resolution [MPixel]	Matching on 128 CPU cores [hours]	DSM creation on one CPU core [hours]	Ortho image on one CPU core [hours]
UltraCam-X	20	52	136	1.9	0.9	1.2
DMC	20	60	106	1.9	0.7	1.3
Quattro DigiCAM	20	188 / 4	4 x 39	21.0	0.7	1.9
UltraCam-X	8	215	136	15.0	3.3	7.4
DMC	8	136	106	7.7	1.9	3.7
Quattro DigiCAM	8	784 / 4	4 x 39	224.0	3.6	10.8



Schlußfolgerungen

- Alle getesteten Kameras verwendbar für sehr gute DSM's mit SGM
- 20 cm Stereodaten vergleichbar mit 25 cm Laserdaten
- 8 cm Stereodaten weitaus detailreicher und exakter als Laserdaten
- Überlappung ist Hauptfaktor für Qualitätsverbesserungen (sollte 80/70 sein)
- Kleinerer Öffnungswinkel wie bei UC-X (55°) besser als größerer wie bei DMC (69°), kann aber durch höhere Überlappung kompensiert werden
- Radiometrische Tiefe beim Matching sollte 12 Bit sein

Beispiel: UltraCam-X, 8 cm/Pixel



Beispiel: UltraCam-X, 8 cm/Pixel

