

Digitale Objekterfassung

Nahbereich: *Structure from Motion*

Modul 3 / WS 1

Prof. Dr. Mona Hess und Dr. des. Maria Chizhova

Kontakt: Mona.Hess@uni-bamberg.de

Twitter: @Mona3Dimaging



Institut für Archäologische
Wissenschaften,
Denkmalwissenschaften
und Kunstgeschichte



Inhalt der Vorlesung

- Orientierungsverfahren
- Auswerteverfahren
- SfM



Rest der Vorlesung vom
29.10.2019

SfM – was ist das?

- Structure from Motion (SfM) – das Verfahren der 3D Objektrekonstruktion anhand von vielen Bildern
- „Motion“ – die Analogie zur menschlichen Geometrieinterpretation vom Objekt „in Bewegung“

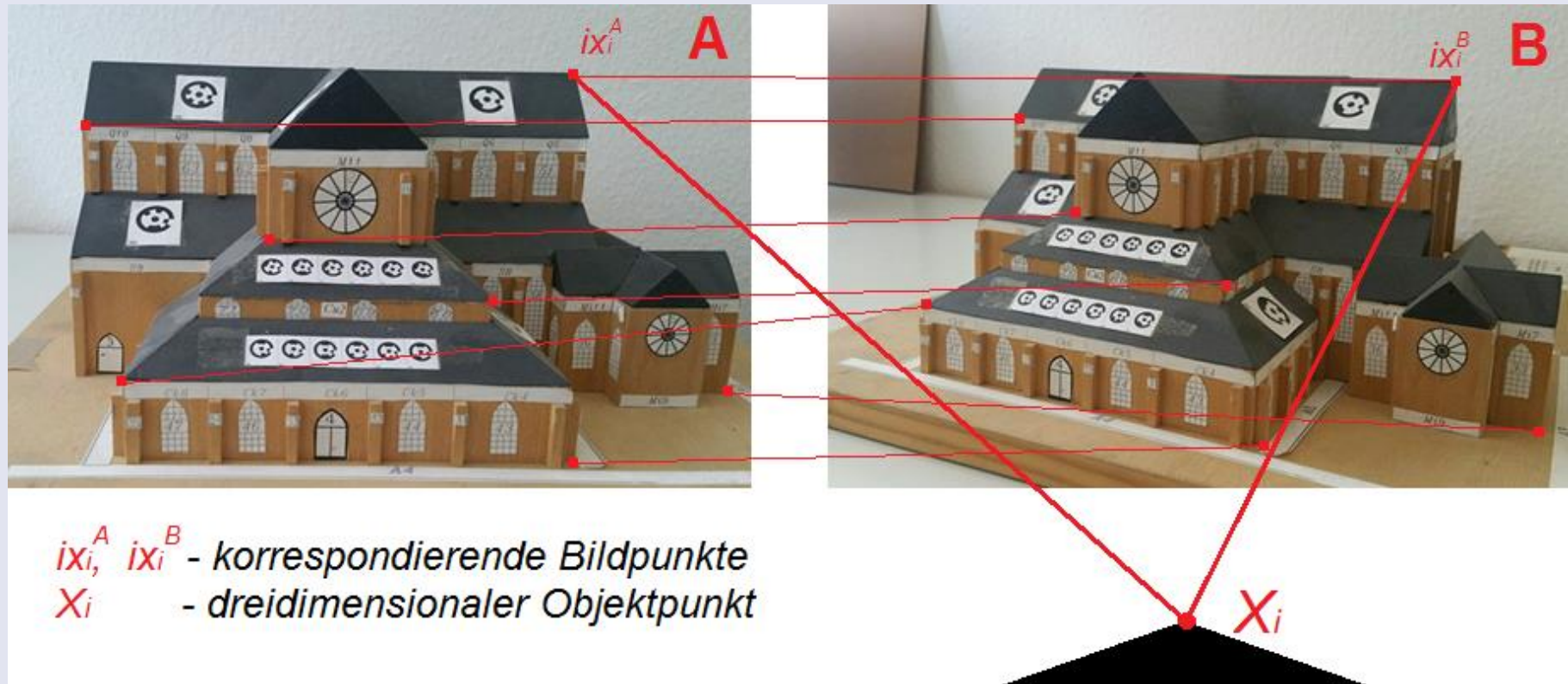


SfM - Algorithmus



Aufgabendefinition

- Aufgabe: Rekonstruktion von einem 3D Objekt von den aufeinander gehenden Bildpaaren
- Bedingungen:
 - es gibt min.1 Bildpaar (Bild A und Bild B);
 - es gibt die endliche Anzahl von korrespondierenden Punkten, die auf den beiden Bildern einander zustimmen.
- Bezeichnungen:
 - Punktbilder: auf dem Bild A – ix_i^A , auf dem Bild B – ix_i^B
 - Räumlicher Objektpunkt vom Punktpaar: X_i



Extraktion von korrespondierenden Punkten

- Korrespondierende Punkte im Bild – Merkmale:
 - Pixel-Intensität,
 - Richtung des Pixel-Gradients,
 - Farbe vom Pixel
- Alle diese Merkmale – low-level features
- Algorithmen:
 - SIFT (Scale Invariant Feature Transform)

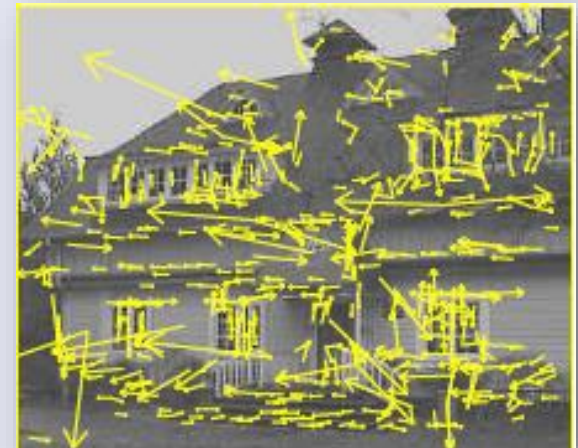
(Lowe, D. G. (2004) 'Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints', *International Journal of Computer Vision*, 60(2), pp. 91–110. doi: [10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94](https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94))

- SURF (Speeded Up Robust Features)

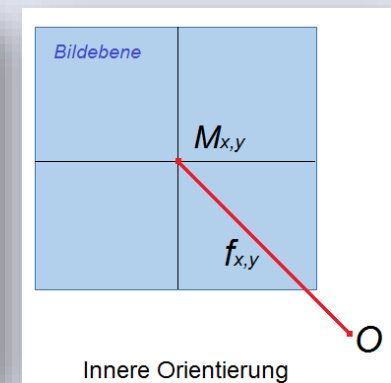
(<http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/>) (Bay, H., Tuytelaars, T. and Gool, L. V. (2006) 'SURF: Speeded Up Robust Features', in *Computer Vision – ECCV 2006. European Conference on Computer Vision*, Springer, Berlin, Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), pp. 404–417. doi: [10.1007/11744023_32](https://doi.org/10.1007/11744023_32))

SIFT und SURF für die Punktsuche

- Aufgabe: die Punkte ix_i^A und ix_i^B müssen im Bild gefunden werden
- Punkte = Merkmale
- Lösung – SURF und SIFT Algorithmen
- SURF und SIFT:
 - Algorithmen für die Extraktion lokaler Merkmale im Bild:
- Schritte:
 - Extrema im Multiskalenraum detektieren
 - Keypoints lokalisieren
 - Orientierung der Keypoints bestimmen
 - Deskriptoren für Keypoints erstellen



- Wie kann man Informationen über die **Koordinaten** und **Kameraposition** von den Korrespondenzpunkten ix_i^A und ix_i^B ableiten?
- Wir brauchen: ein mathematisches Modell der Kamera



Mathematisches Kameramodell

$$x = K \cdot [R|t] \cdot \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix}$$

- Kameramodell:
- X - 3D-Punkt im Raum;
- x - Punktkoordinaten im Bild in homogenen Koordinaten $i\mathbf{x} = \left(\frac{x_x}{x_z}, \frac{x_y}{x_z} \right)$
- äußere Orientierungsparameter der Kamera:
 - R - Rotationsmatrix 3x3 (R^{-1} bedeutet die Kamerarotation im Raum)
 - t - Translationsvektor
- $[R|t]$ - Transformationsmatrix (Übergang vom Raumkoordinaten- zum Bildkoordinatensystem, damit wird die Kameraposition im Bild bestimmt);
- K - die Kameramatrix (Kalibrierungsmatrix, innere Orientierungsparameter).
 - c_x, c_y - Brennweite (in Pixel);
 - M_x, M_y - optischer Mittelpunkt der Kamera;

Modellvorteile und -Nachteile

- **Vorteil:** Geradengeometrie im Raum und im Bild bleibt (die Punkte, die im Raum auf einer Gerade liegen, werden auch im Bild auf einer Gerade liegen)
- **Nachteil:** nicht robust (in der Realität werden die geraden Linien durch die Verzeichnung (Distorsion) falsch abgebildet)

- Lösung

- Entzerrung
- Punktnormalisierung

$$ix = D(K \cdot [R|t] \cdot \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix})$$

$$ix = \left(\frac{x_x}{x_z}, \frac{x_y}{x_z} \right)$$



Mit Verzeichnis



Ohne Verzeichnis

Punktenormalisierung

- **Normalisierung:** vereinfacht *wesentlich* die weiteren Berechnungen, die durch die Verzeichnung verhindert werden

- Vorher muss bekannt sein:
 - innere Orientierung;
 - die Punktkoordinaten im Bild.

$$ix = D \left(K \cdot [R|t] \cdot \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} \right)$$

$$InvD(ix) = K \cdot [R|t] \cdot \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix}$$

- Was passiert:
 - Unbekannte $[R|t]$ und X müssen noch bestimmt werden
 - Bekannte D und K könnten mit einem Parameter ersetzt – normalisierte Punkte
 - So wird die Formel vereinfacht 😊

$$K^{-1} \cdot InvD(ix) = [R|t] \cdot \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$nx = K^{-1} \cdot InvD(ix)$$

$$nx = [R|t] \cdot \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix}$$

Essentielle und Fundamentalmatrix

- **Ziel:** Verbindung von den korrespondierenden Punkte in den Bildern
- **Idee:**
 - im ersten Bild – A – wird ein Punkt ausgewählt, der die Abbildung von einem beliebigen Objektpunkt ist;
 - im zweiten Bild – B – wird die Abbildung von *demselben* Objektpunkt berechnet.
- **Fundamentalmatrix:** beschreibt ein System von n linear unabhängigen Lösungen
 - Dimension: 3×3
 - mit *nicht* normalisierten Punkten
- **Essentielle Matrix:**
 - Dimension: 3×3
 - mit normalisierten Punkten

Korrespondenzberechnung

- Bedingungen:
 - alle Berechnungen werden relativ zum 1. Bild (Bild A) gemacht:

- $R_A = I$ (I ist eine Einheitsmatrix)

- $t_A = (0; 0; 0)$

- $[R|t]$ - Matrix des 2. Bildes (B)

- Verschiebung und

- Drehung relativ zum Bild A

$$I_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{cases} x_i^A = K \cdot \begin{pmatrix} X_i \\ 1 \end{pmatrix} \\ x_i^B = K \cdot [R|t] \begin{pmatrix} X_i \\ 1 \end{pmatrix} \end{cases}$$

- Formel der Korrespondenzberechnung

- Mit Fundamentalmatrix

$$(x_i^B)^T \cdot F \cdot x_i^A = 0$$

- Mit essentieller Matrix

$$(nx_i^B)^T \cdot E \cdot nx_i^A = 0$$

- Korrespondenz zwischen

- essentieller und Fundamentalmatrix

$$E = K^T \cdot F \cdot K$$

Berechnung essentieller Matrix

Lösungsansätze

- 8-Punkten-Algorithmus
- 7-Punkten-Algorithmus

$$(nx_i^B)^T \cdot E \cdot nx_i^A = 0$$

$$E_{11} \cdot nx_x^A \cdot nx_x^B + E_{12} \cdot nx_y^A \cdot nx_x^B + E_{13} \cdot nx_x^B + E_{21} \cdot nx_x^A \cdot nx_y^B + E_{22} \cdot nx_y^A \cdot nx_x^B + E_{23} \cdot nx_y^B + E_{31} \cdot nx_x^A + E_{32} \cdot nx_y^A + E_{33} = 0$$

Genommen werden die Paaren der korrespondierenden Punkten (7 oder 8).

Ablauf:

$$e = (E_{11} E_{12} E_{13} E_{21} E_{22} E_{23} E_{31} E_{32} E_{33})$$

- In der Korrespondenzformel über essentielle Matrix werden die Elemente nx durch eine Matrix M und Elemente der essentiellen Matrix E durch Vektor e ersetzt

$$M = \begin{pmatrix} nx_{1x}^A \cdot nx_{1x}^B & nx_{1y}^A \cdot nx_{1x}^B \\ nx_{2x}^A \cdot nx_{2x}^B & nx_{2y}^A \cdot nx_{2x}^B \\ \dots & \dots \end{pmatrix}$$

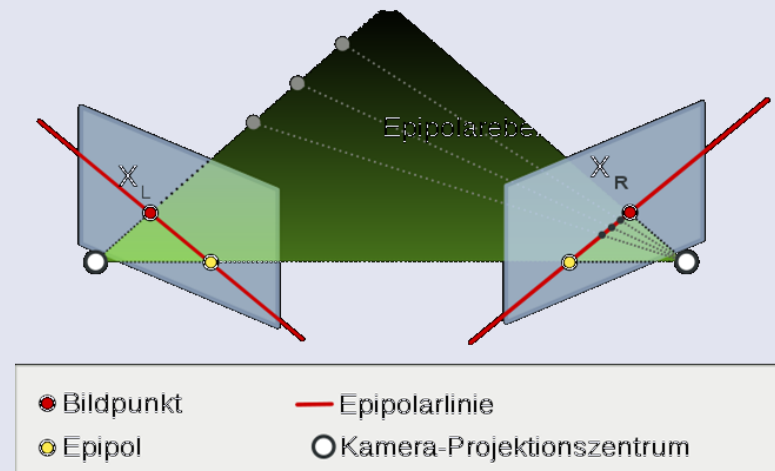
- M -Elemente sind bekannt (normierte Bildkoordinaten)
- e -Elemente – zu bestimmen
- Gleichungslösung: Singularzerlegung der M -Matrix

$$M \cdot e = 0$$

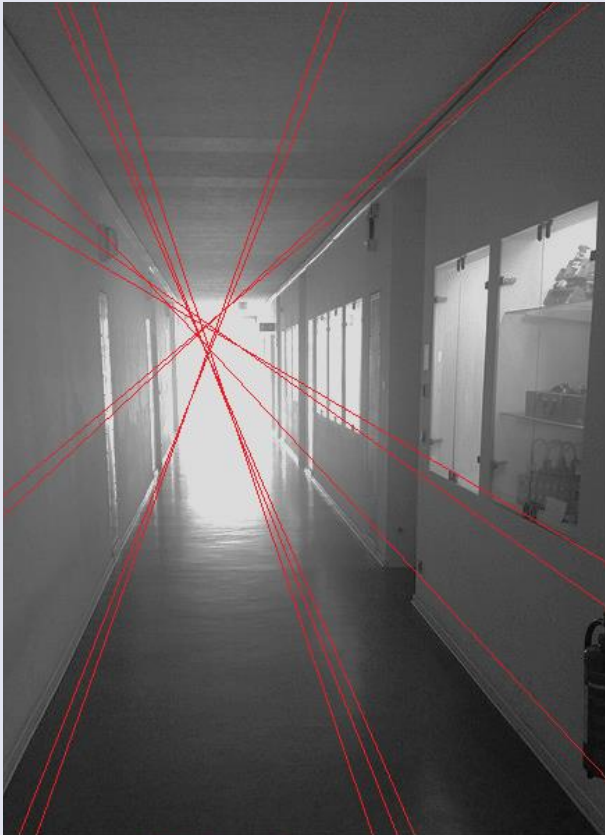
Ergebnis: 1 oder 3 Lösungen ([R|t]-Matrizen)

Korrektur der essentiellen und Fundamentalmatrizen

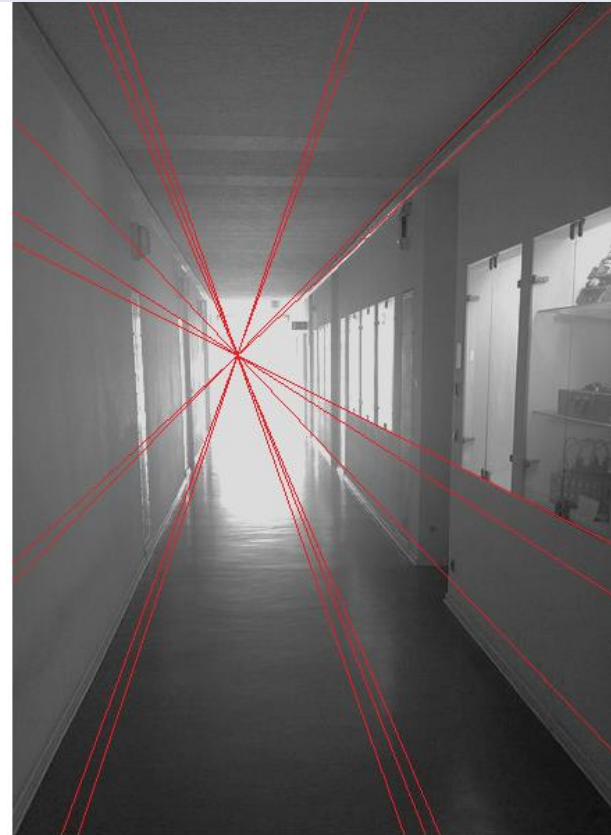
- Alle Messungen haben die Fehler – sie müssen optimiert werden.
- Ausgangssituation:
- Ein Strahl l vom Bild A wird im Bild B als eine Gerade im Idealfall abgebildet.
- Solch ein Strahl gilt als *Epipolarlinie*
- Folgende Bedingung sollte geprüft und erfüllt werden (sonst Optimierung):



$$l = F \cdot ix_i^A \quad l_x \cdot ix + l_y \cdot iy + l_z = 0$$



Nicht korrekt



Korrekt

Beispiel der Epipolarlinien, die von der richtigen Fundamentalmatrix (rechts) und mit den Fehlern (links) abgeleitet wurden.

Ableitung der Kameraposition $[R|t]$

- Von der Korrespondenzformel gilt:

$$\begin{cases} x_i^A = K \cdot \begin{pmatrix} X_i \\ 1 \end{pmatrix} \\ x_i^B = K \cdot [R|t] \begin{pmatrix} X_i \\ 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad \begin{cases} x_i^A = \begin{pmatrix} X_i \\ 1 \end{pmatrix} \\ (nx_i^B)^T = [R|t] \begin{pmatrix} X_i \\ 1 \end{pmatrix} \end{cases}$$

- Die Transformationsparameter werden von essentiellen oder Fundamentalmatrix
 - $[R|t] = F$
 - $[R|t] = E$
- Von allen Lösungen wird eine ausgewählt, die weniger Fehler hat.

Berechnung der Punktkoordinaten im Raum

- Die Ausgabe: den Punkt X mit den Koordinaten $X = (X_x; X_y; X_z)$ zu finden
- Jetzt nur die Formeln....

$$\begin{cases} nx^A = [R^A | t^A] \cdot \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} \\ nx^B = [R^B | t^B] \cdot \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} \\ nx^C = [R^C | t^C] \cdot \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} \\ \dots \end{cases} \quad T = \begin{pmatrix} (nx_x^A \cdot R_{31}^A - R_{11}^A) & (nx_x^A \cdot R_{32}^A - R_{12}^A) & (nx_x^A \cdot R_{33}^A - R_{13}^A) & (nx_x^A \cdot t_z^A - t_x^A) \\ (nx_y^A \cdot R_{31}^A - R_{21}^A) & (nx_y^A \cdot R_{32}^A - R_{22}^A) & (nx_y^A \cdot R_{33}^A - R_{23}^A) & (nx_y^A \cdot t_z^A - t_y^A) \\ (nx_x^B \cdot R_{31}^B - R_{11}^B) & (nx_x^B \cdot R_{32}^B - R_{12}^B) & (nx_x^B \cdot R_{33}^B - R_{13}^B) & (nx_x^B \cdot t_z^B - t_x^B) \\ (nx_y^B \cdot R_{31}^B - R_{21}^B) & (nx_y^B \cdot R_{32}^B - R_{22}^B) & (nx_y^B \cdot R_{33}^B - R_{23}^B) & (nx_y^B \cdot t_z^B - t_y^B) \\ (nx_x^C \cdot R_{31}^C - R_{11}^C) & (nx_x^C \cdot R_{32}^C - R_{12}^C) & (nx_x^C \cdot R_{33}^C - R_{13}^C) & (nx_x^C \cdot t_z^C - t_x^C) \\ (nx_y^C \cdot R_{31}^C - R_{21}^C) & (nx_y^C \cdot R_{32}^C - R_{22}^C) & (nx_y^C \cdot R_{33}^C - R_{23}^C) & (nx_y^C \cdot t_z^C - t_y^C) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_x \\ X_y \\ X_z \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

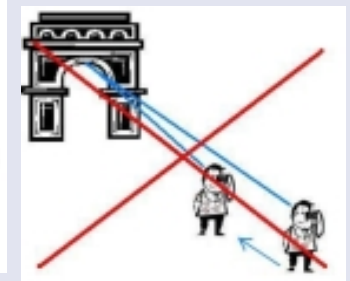
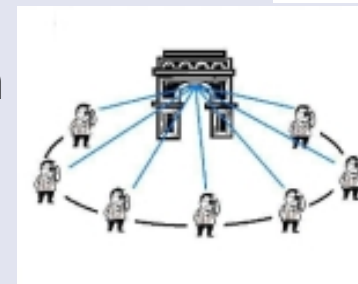
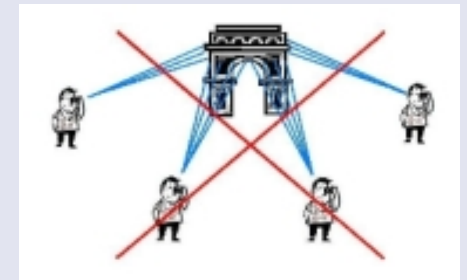
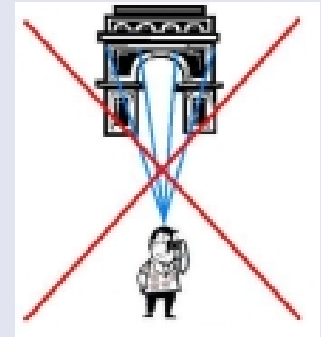
SfM – Kurze Darstellung

1. im ersten Bild (Bild A) werden die Merkmalpunkte gefunden;
2. die homogenen Punkte werden in beiden Bildern gefunden;
3. die essentielle (oder auch Fundamental-) Matrix werden berechnet;
4. man bekommt entweder 1 oder 3 Lösungen (davon 4 oder 12 mögliche $[R|t]$ -Matrizen);
5. da die Kameraposition schon bekannt ist, werden die Koordinaten der Raumpunkte für jede mögliche Matrix betrachtet;
6. mithilfe der Kostenfunktion wird die beste Matrix ausgewählt.



Was sollten wir bei der Aufnahme berücksichtigen?

- Man braucht Merkmale, die später gematcht werden.
 - Objekt muss Textur haben (nicht monochrome Objekte)
 - Am besten unterschiedliche Formen darstellen
- Die Merkmale müssen in beiden Bildern sicher auftauchen (unabhängig von Belichtung o.a.)
- Die Fotos müssen von unterschiedlichen Position aufgenommen werden
- Die Fotos müssen sich überlappen! (ca. 60%)
- Die Fotos müssen in logischer Reihenfolge sein
- Alle Teile des Objektes müssen sichtbar in Fotos sein



Die Fotos...

- Die Beleuchtung sollte so flach und stumpf wie möglich sein (wie ein „heller, aber bewölkter Tag,,)
- Die Bilder sollten so scharf wie möglich sein.
- Stativ + Fernbedienung?
- Große Tiefenschärfe
- Kleine Öffnung, bis zur Beugungsgrenze
- ISO – je niedriger, desto besser
- Aufnahme in Roh-/Höchstqualität
- Konvertieren vor der Auswertung (in tiff?)

Woran sollten wir noch denken

- Feste Brennweite? 50mm Objektiv empfohlen, kein Zoom (mindestens Brennweite fixieren)
 - Oder minimale "Gruppen" von Einstellungen, d.h. eine Einstellung in Entfernung, eine Einstellung für Detailaufnahmen.
 - Prüfen Sie, ob die Brennweite in der EXIF-Info steht.
 - Manuelle Belichtungseinstellungen
 - Bildverarbeitung
 - Farbkalibrierung
 - Kontrast?
 - Kamerakalibrierung?
 - Maßstab
 - Schärfefilter?
-

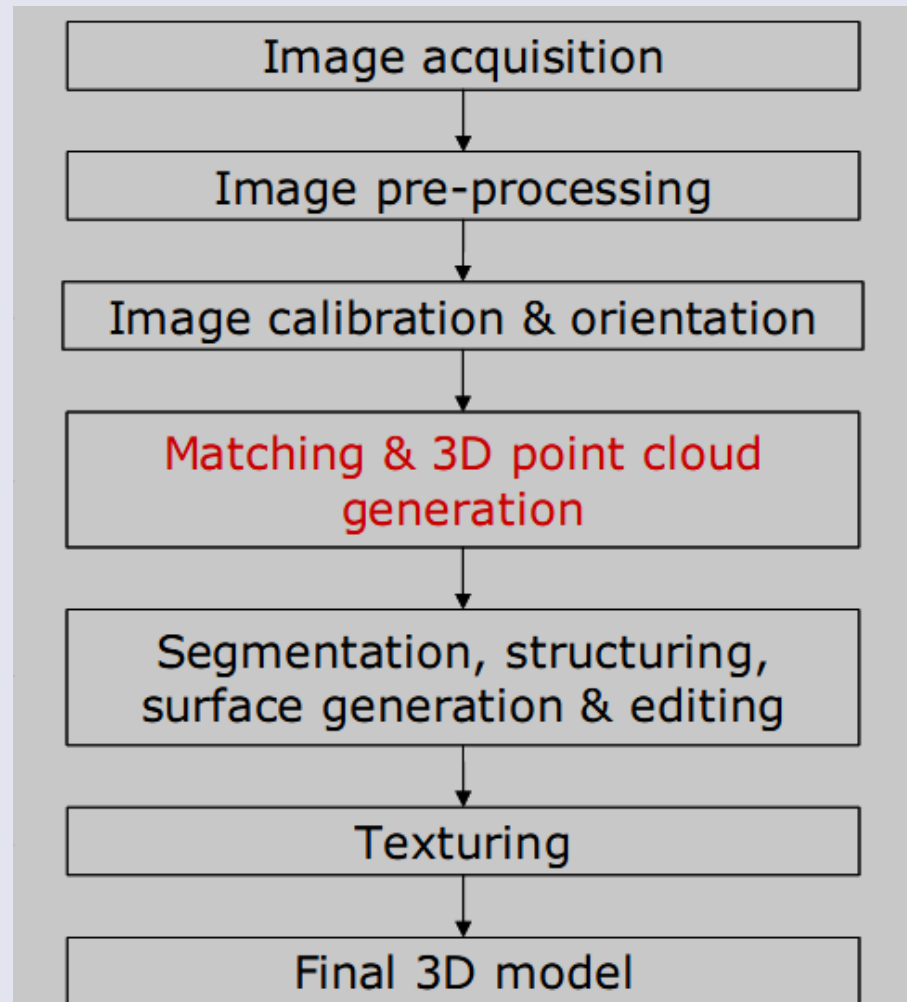
Andere Aspekte/ Other thoughts...

- Was ist das gewünschte Ergebnis?
- Jedes Objekt ist anders: Experimentieren und Anpassen
- Würden mehr Fotos bei geringerer Auflösung zu besseren Ergebnissen führen?
- Modelle müssen möglicherweise bearbeitet werden.....
- Wie wird es dargestellt?
- Wie erfasst man die Basislänge? Skalierung?

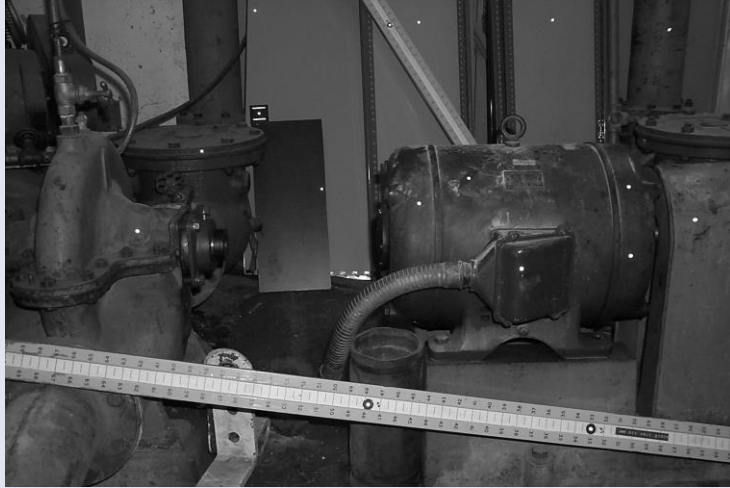
Praktische Anwendung von SfM und Photogrammetrie

Vorbereitung auf praktische Übung

Photogrammetric reconstruction pipeline



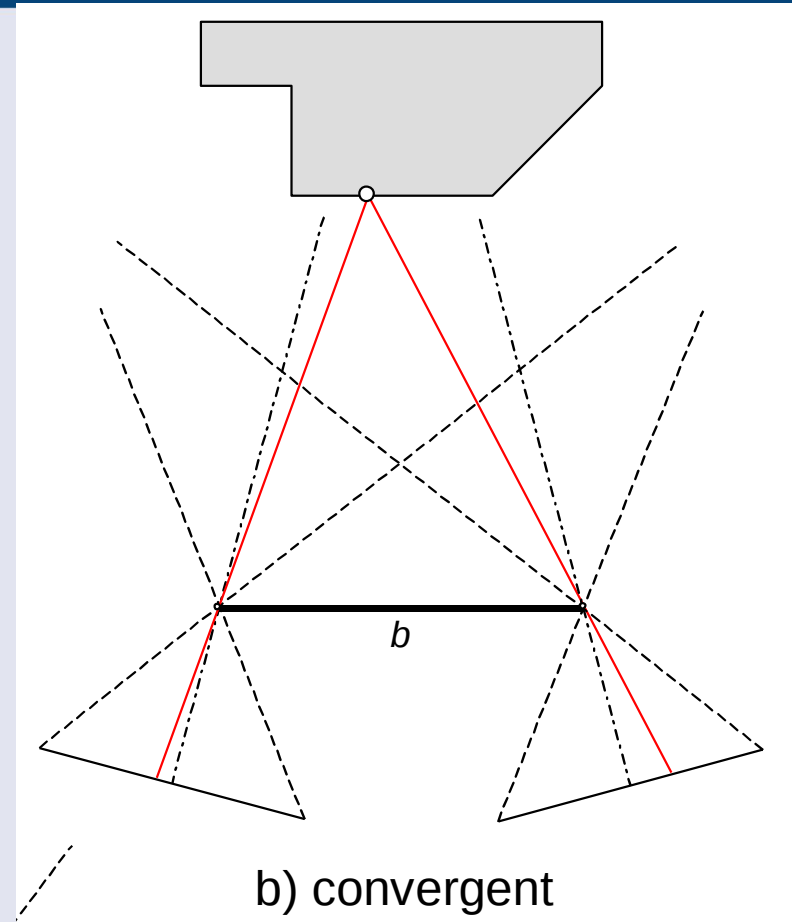
Single Stereopair



Left image

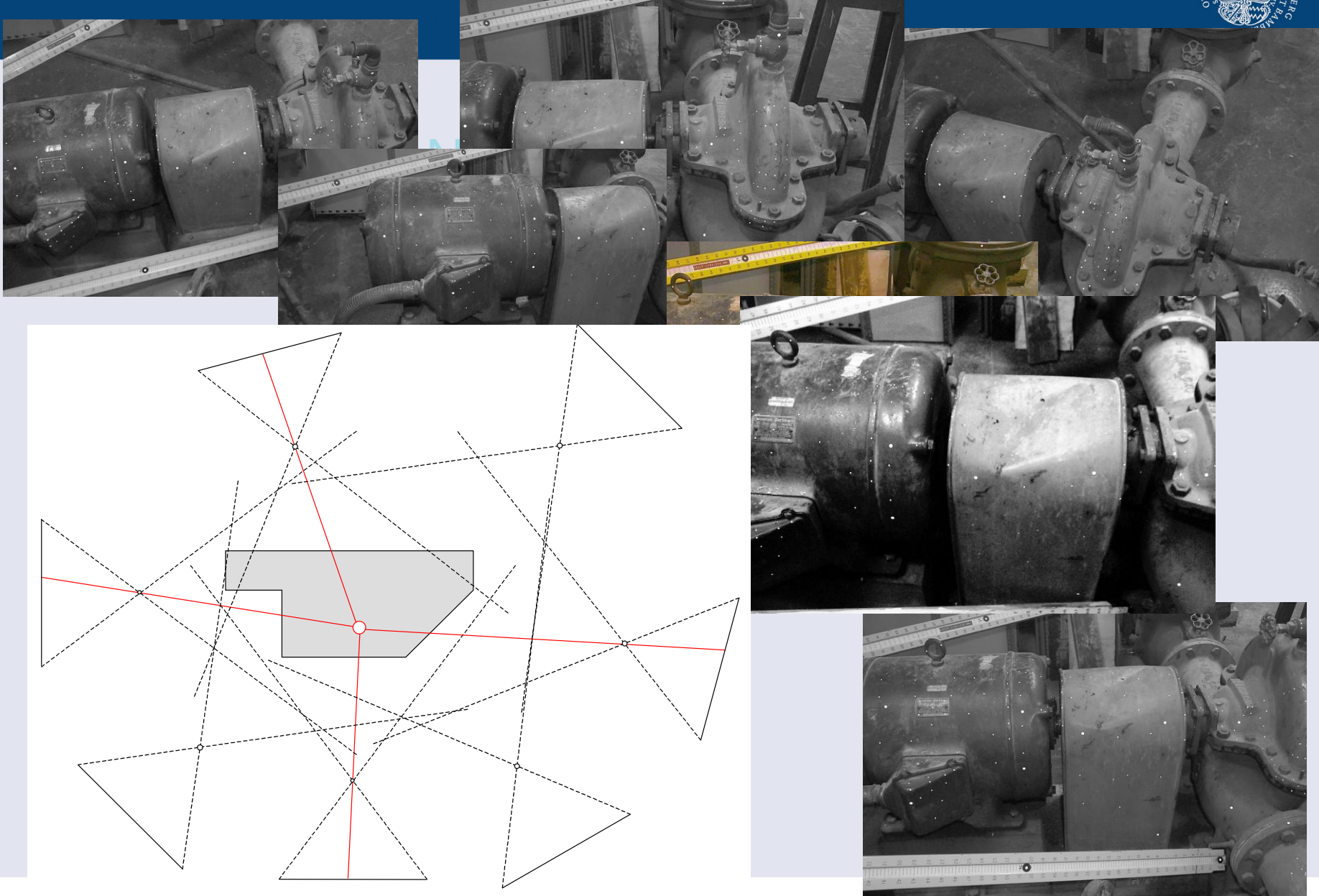


Right image

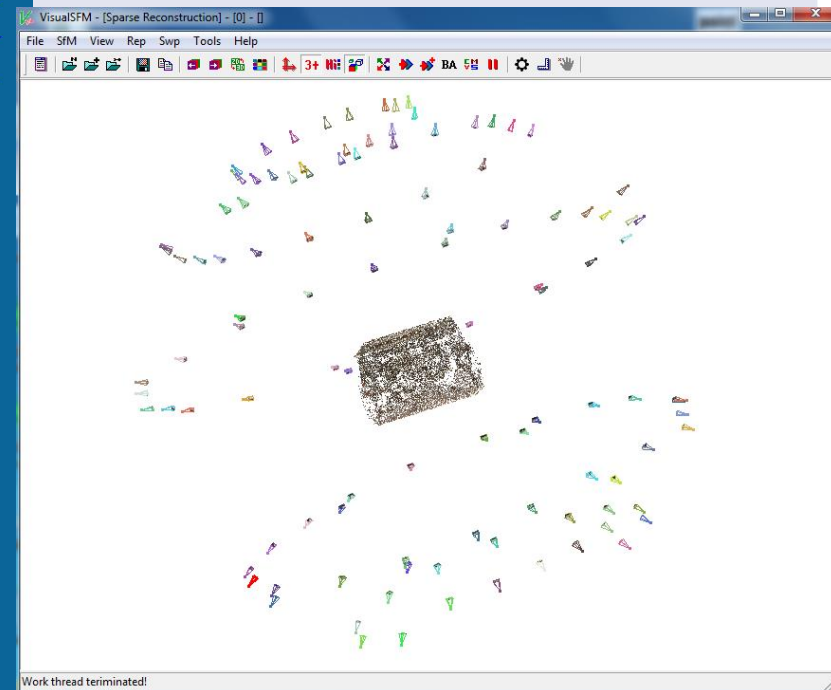


An imaging network: 3D from many images

Universität Bamberg

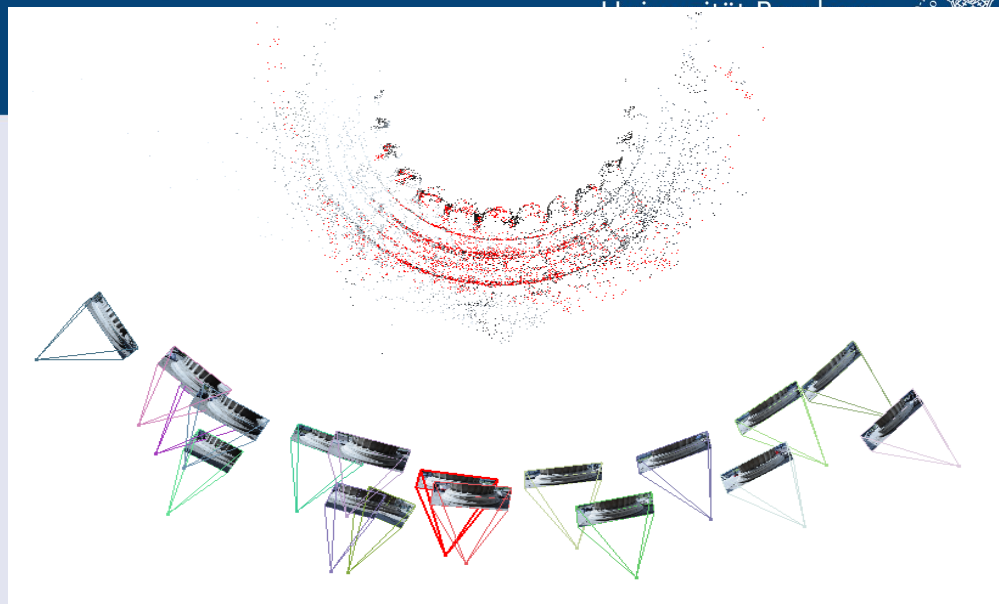


Beispiele



MacDonald, L., Hindmarch, J., Robson, S., & Terras, M. (2014). [Modelling the appearance of heritage metallic surfaces](#). ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5, 371-377. ISPRS. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-371-2014

Hess, M., Toschi, I., Nocerino, E., Menna, F., Sargeant, B., Macdonald, L., . . . Robson, S. (2015). [Improving automated 3D reconstruction methods via vision metrology](#). SPIE Optical Metrology Proceedings.



Beispiel Photogrammetrie aus den 2000ern



The Westminster Retable is a large (959 mm by 3330 mm), mid-thirteenth-century altarpiece constructed from English and German oak and painted in linseed oil. It was painted, around 1260, for the high altar of Westminster Abbey.

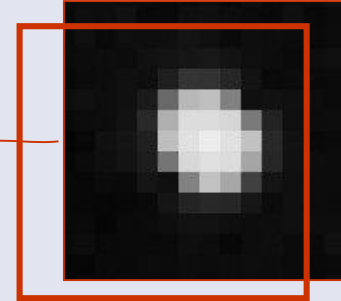
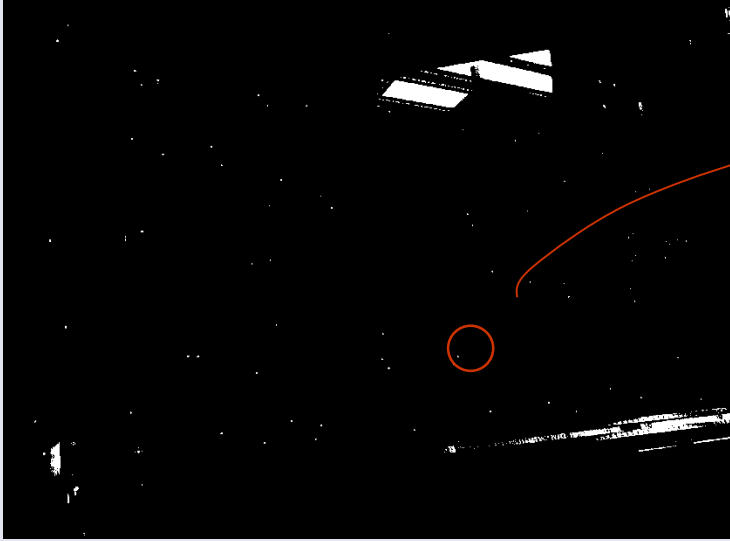
The Westminster Retable is a work of art occupying a central position in late thirteenth century painting in Europe. It is 3.4m long, 1m high and about 0.1m thick and consists of an oak support which carries numerous decorative and structural features and materials including: wood carvings, paintings, glass, dowels, metal, stone and vellum. During the restoration process it is necessary to conduct environmental response monitoring and mechanical deformation checking to ensure the integrity of the Retable. A multi-image digital photogrammetric system has been chosen for this purpose since it offers a periodic method of non-contact recording.

[Mehr Informationen zum Projekt:](#)

- [Hamilton Kerr Institute + UCL <http://www.hki.fitzmuseum.cam.ac.uk/projects/retable>](http://www.hki.fitzmuseum.cam.ac.uk/projects/retable)
- <https://www.semanticscholar.org/paper/Periodic-photogrammetric-monitoring-and-surface-of-Robson-Bucklow/19358bab3c3c9647ac25e38ae9ad52876e3951ae>
- https://www.researchgate.net/publication/228739514_Periodic_photogrammetric_monitoring_and_surface_reconstruction_of_a_historical_wood_panel_painting_for_restoration_purposes

Westminster Retable (2002-2004)

Universität Bamberg



Retro
reflective
target image

108 images

483 3D measurement locations
each location precise to
0.15mm



Figure 5: Epochs 3 to 4 (Reetable in upright position in supporting cradle). A horizontal support could therefore be constructed that would accommodate the degree of deformation that the Retable would encounter due to change in orientation and changes in humidity. The support distributed tensions so that new cracks should not nucleate and existing cracks should not significantly propagate. Comparison of several photographic surveys of the Retable, undertaken during its treatment, indicated that no visible damage has been caused by its change of orientation.

supporting boards.



Figure 5: Epochs 3 to 4 (Reetable in upright position in

Figure 6: Deformation between Epochs 4 and 5 (Reetable rotated into a horizontal plane)

was 0.13mm

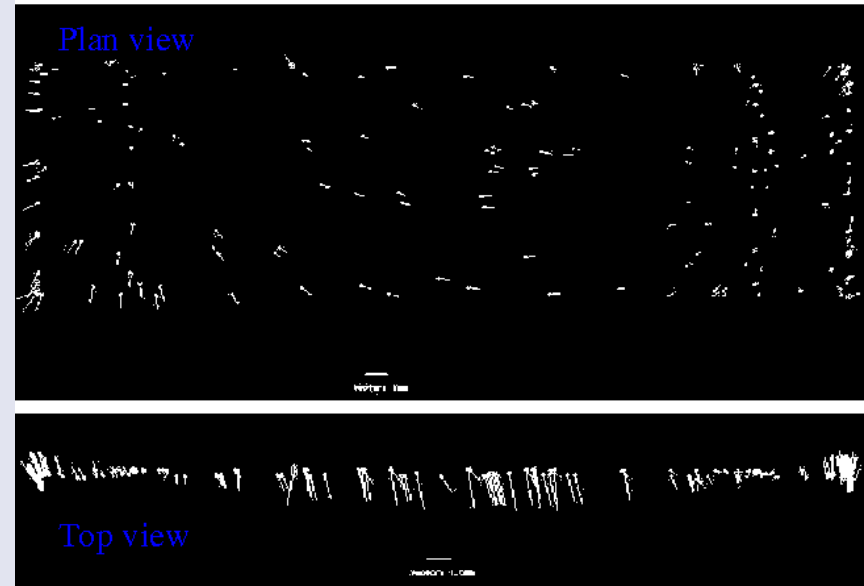


Figure 6: Deformation between Epochs 4 and 5 (Reetable rotated

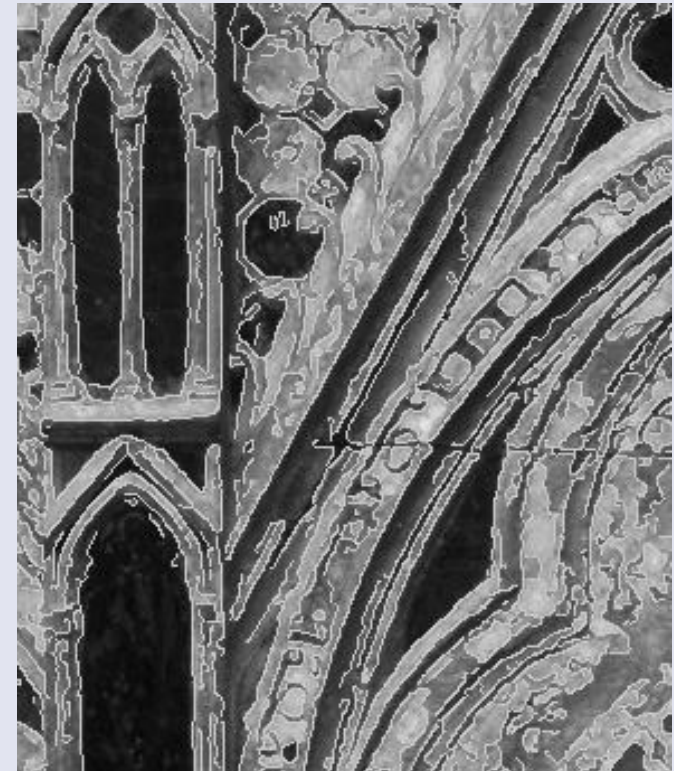
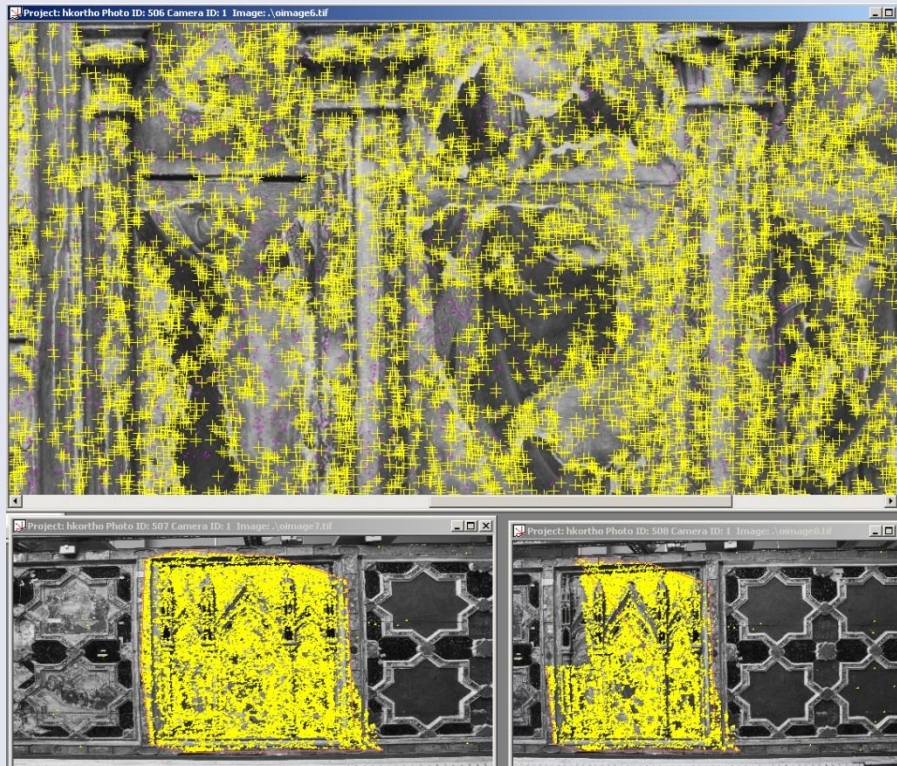
Westminster Retable (2002-2004)

Surface measurement

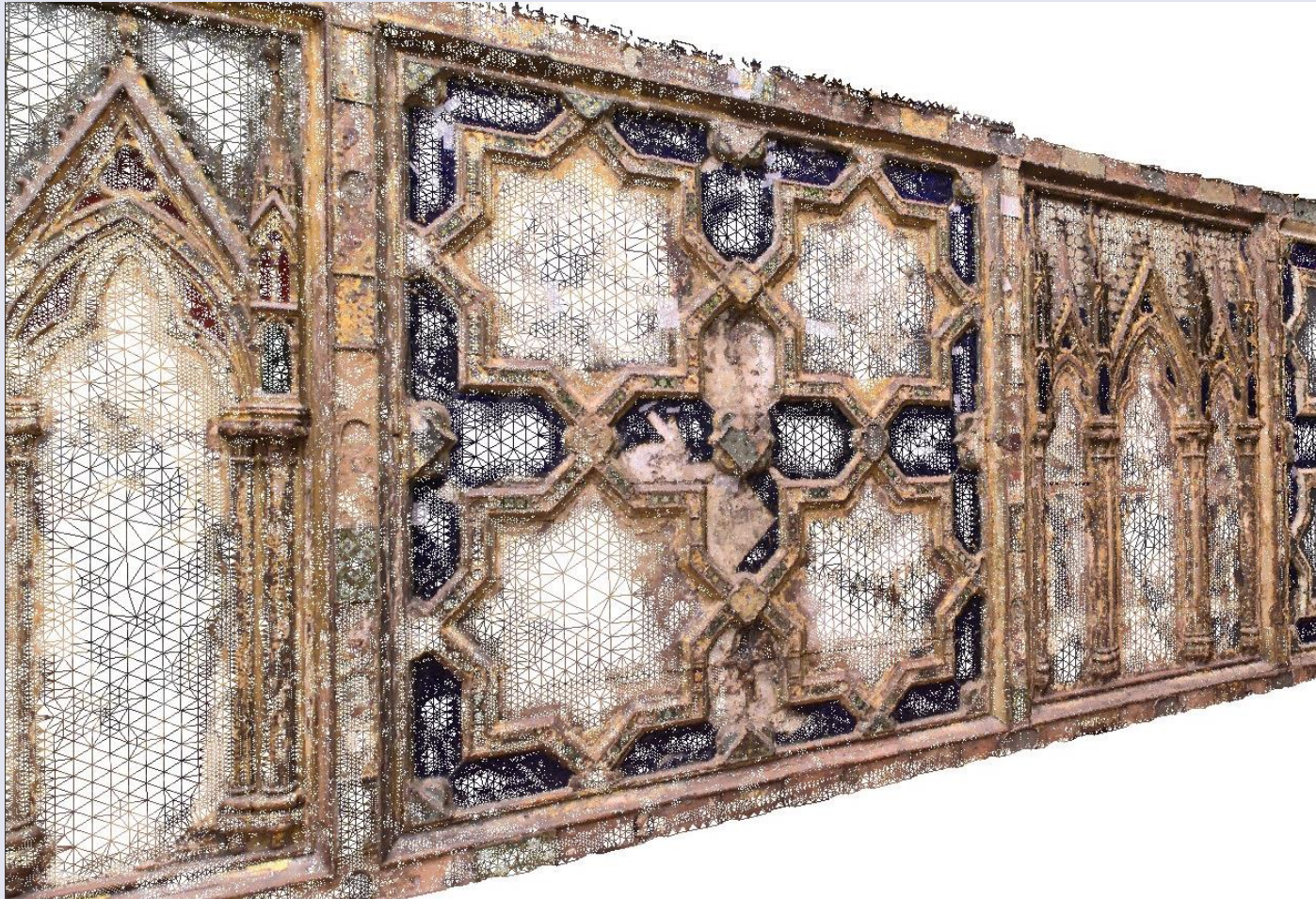
Universität Bamberg



- Aim: produce a realistic and measurable representation of the Retable for the art conservator by producing a 3D model and draping imagery over it
- Lots of different image processing algorithms can be used to find features such as points, edges, patches and to match them between images. The 3D image network then allows us to compute a point cloud



Multiphoto matching and inclusion of edge information



Output triangle model: (colour from photogrammetric imagery)

Vorher-Nachher Dokumentation durch Photogrammetrie



BEFORE CONSERVATION



DURING CONSERVATION



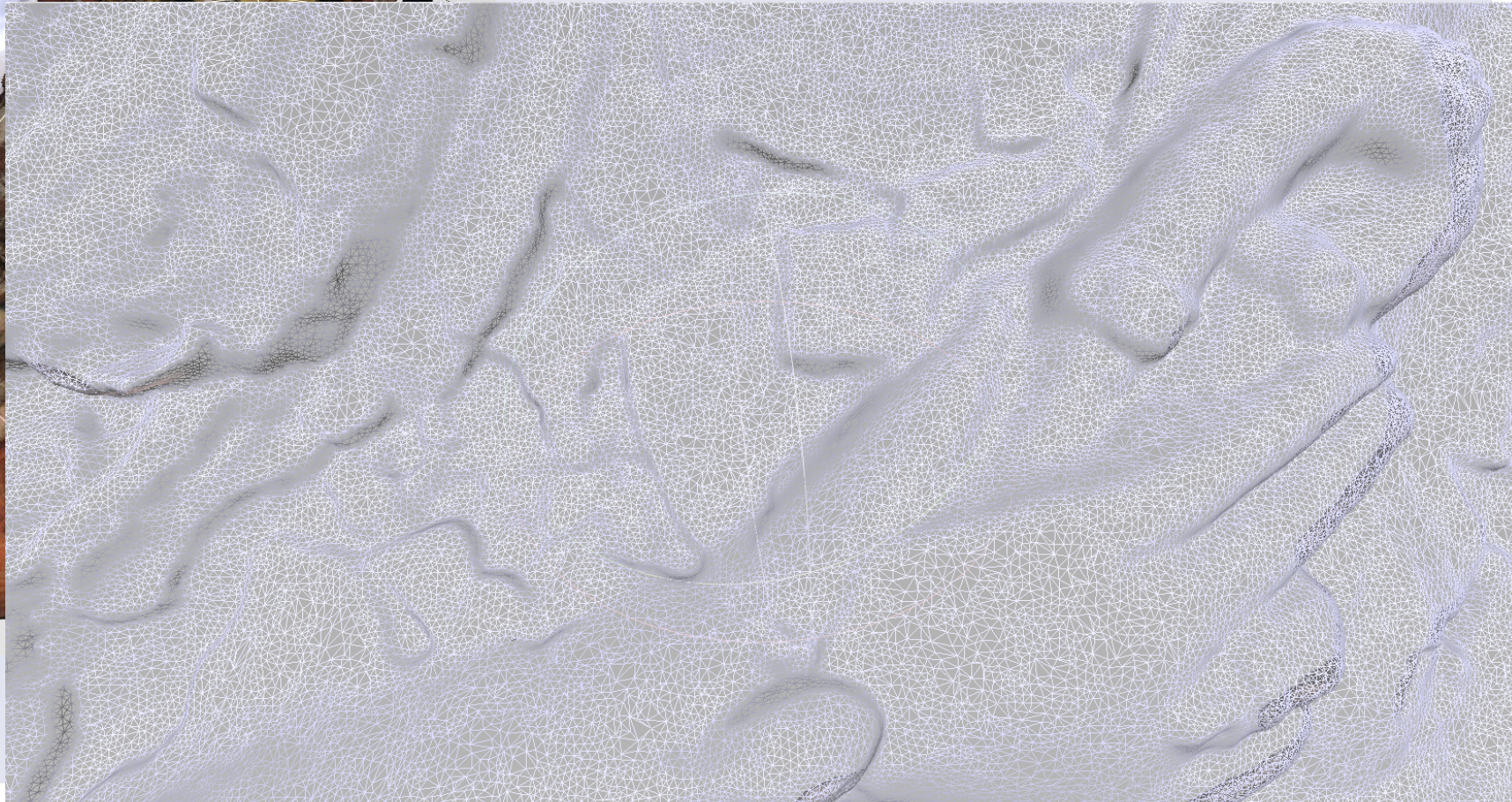
AFTER CONSERVATION

3D acquisition via photogrammetry

Universität Bamberg

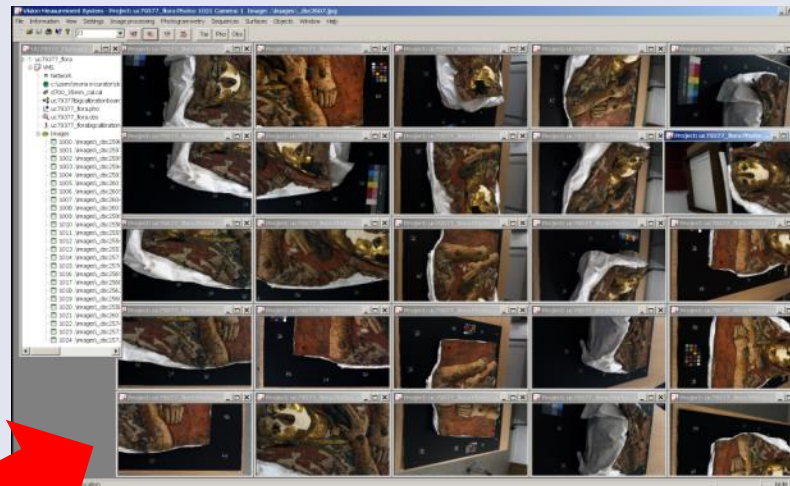


Polygon Model with texture
370,000 polygons, 50 Mb

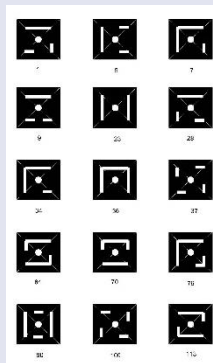
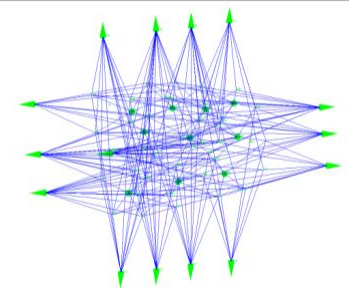


3D acquisition via photogrammetry

Universität Bamberg



network geometry of
photogrammetry



Coded photogrammetry
targets

Polygon Model with
texture
500,000 polygons,
40 Mb



CMVS



IND



Point clouds from different photogrammetric processes

Kleine Geschichte vom Pferd

The Black Horse Mark Wallinger



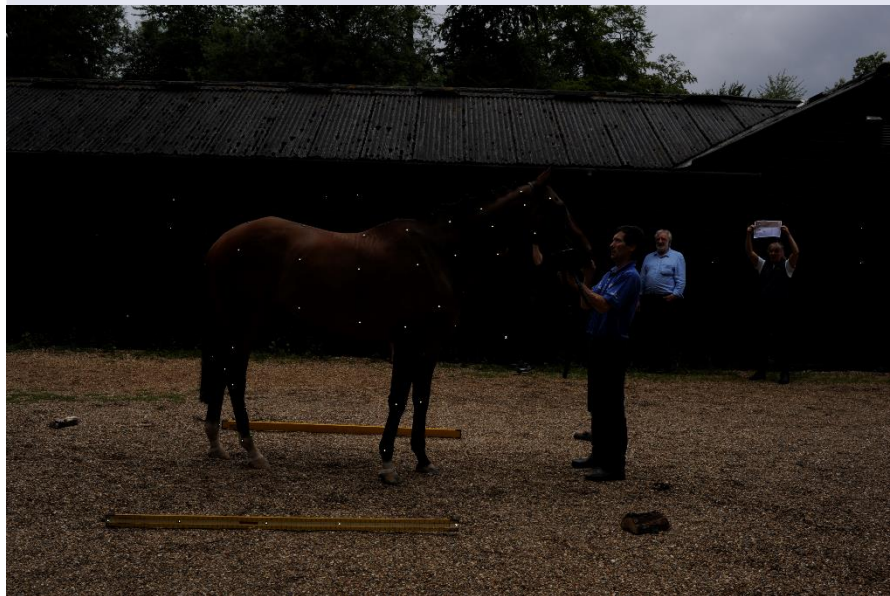
Angel of the North / Horse of the South



<http://www.antonygormley.com/projects/item-view/id/211>

Horse of the South – Project Martin Wallinger







Horse of the South – Project Martin Wallinger

Angel of the south, with wings clipped, lands in London amid financial storm

Mark Wallinger's giant horse sculpture intended for Ebbsfleet is unveiled as monument in miniature outside British Council

Mark Brown, arts correspondent

Tuesday 5 March 2013 15:19 GMT



Holding his horse: Mark Wallinger on the Mall. Photograph: David Levene

It was meant to be the 50-metre-tall "angel of the south": a stupendous white horse towering over redeveloped land in Kent. But Mark Wallinger's wildly ambitious sculpture has been delayed repeatedly because of a lack of money. And



The White Horse is the work of Turner prize-winning artist Mark Wallinger, and is a scaled-down version of a proposed 50m-high (164ft) sculpture to be erected in the countryside of Kent (which would be visible from the Eurostar).

Funding for the full-size horse has so far proved to be a victim of the recession, although if it does get the go-ahead, it would stand more than twice the height of Antony Gormley's Angel of the North statue, and cost up to £15m to complete.

Wallinger hopes that the mini-me marble and resin version in The Mall will help "prod" funding for the bigger version.

The life-sized sculpture was made by scanning a horse named Rivera Red – partly owned by Wallinger – in a white light scanner, with the resulting scan being moulded into a robust resin, marble and steel structure.

<https://www.theguardian.com/artanddesign/2013/mar/05/angel-south-london-mark-wallinger-ebbsfleet>

<http://www.urban75.org/blog/do-not-climb-on-mark-wallingers-white-horse-on-the-mall-london/>

Martin Wallinger



Black Horse in the City of London

The Black Horse
Mark Wallinger



<https://www.sculptureinthecity.org.uk/artworks/the-black-horse/>

Black Horse in the City of London

ABOUT THE ARTWORK

The sculpture was made with the help of advanced technology, scanning a racehorse, part owned by the artist, named Rivera Red. The horse is a subject with deep emotional and historical meaning. As the artist notes, 'people still have an atavistic love of horses.' Though bent to our will the thoroughbred represents unfathomable instincts. The thoroughbred could perhaps stand as an exemplar of this country's identity and our relationship with the natural world. It was first developed at the beginning of the 18th century in England, when native mares were crossbred with imported Arabian stallions. Every racehorse in the world is descended from these animals.

Year: 2015

Copyright Mark Wallinger, Courtesy the artist and Hauser & Wirth, Photo: © Nick Turpin

Material	Dimensions
Bronze, resin, stainless steel	196 x 273 x 67 cm

Literatur

- Dasselbe wie letztes Mal.
- Toschi, I. et al. (2015): Improving automated 3D reconstruction methods via vision metrology. In: SPIE Optical Metrology. Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII. S. 95280H-95280H-15. Online unter: <http://discovery.ucl.ac.uk/1468410/>.
- 3D MODELS FOR ALL 2017
- C. Santagati – M. L. Turco – M. M. Bocconcino – V. Donato – M. Galizia, 3D MODELS FOR ALL: LOW-COST ACQUISITION THROUGH MOBILE DEVICES IN COMPARISON WITH IMAGE BASED TECHNIQUES. POTENTIALITIES AND WEAKNESSES IN CULTURAL HERITAGE DOMAIN, in: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2-W8 ISPRS TC <<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/xlii-2-w8/221/2017/>> (6. Juli 2018), DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-221-2017>
- Chapter 3.4, Case study 7: Historic England, Photogrammetric Applications for Cultural Heritage | Historic England HEAG066 (2017), <<https://historicengland.org.uk/images-books/publications/photogrammetric-applications-for-cultural-heritage/>> (9. Februar 2018)
- Software
 - Snavely, N. (2010): Bundler - Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections. <http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/>
 - W. Changchang, VisualSFM : A Visual Structure from Motion System (2014), <<http://ccwu.me/vsfm/>> (5. November 2014)
-