VORLESUNGSSKRIPT / PHOTOGRAMMETRISCHE AUSWERTUNG

Wie ein Stereoautograph Gelände vermisst

Von zwei Glasplatten zu einem metrischen Geländepunkt

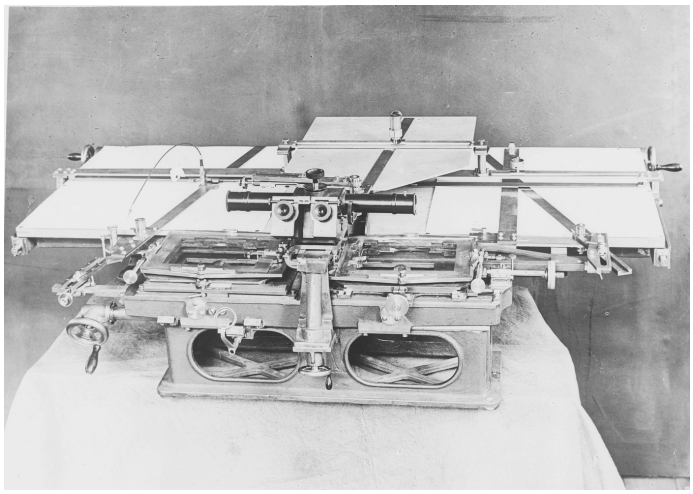


Abb. 1. Orel–Zeiss, Modell 1914. © swisstopo, 1926, Nr. 000-398-073, Ausschnitt.

Was geschieht zwischen Kamera und Zeichenstift?

Ein Vermesser fotografiert dieselbe Felskante von zwei Standorten. Ein Auswerter sieht durch das Doppelmikroskop einen räumlichen Hang. Er bringt die Messmarke auf die Kante. Bewegt er die Marke bei festgehaltener Höhe über die Oberfläche, zeichnet der gekoppelte Stift eine Höhenlinie. Dazwischen liegt ein räumlicher Vorwärtsschnitt. Das Instrument verkörpert dessen Geometrie durch verstellbare Lineale.

> Ein Foto liefert zu einem Bildpunkt eine Richtung. Der zweite Blick von einem bekannten Abstand liefert die Entfernung. Die Orientierung verbindet beide Richtungen mit einem gemeinsamen Koordinatensystem.

Eine Felskante begleitet die Rechnung

Unser lokales System verwendet X nach rechts, Y in Blickrichtung und Z nach oben. Zwei Kameras mit $c = 150\,\mathrm{mm}$ stehen $20\,\mathrm{m}$ auseinander. Im linken Bild liegt die Kante bei $(45, 15)\,\mathrm{mm}$, im rechten bei $(15, 15)\,\mathrm{mm}$. Am Ende ergibt sich $P = (30, 100, 10)\,\mathrm{m}$. Die Höhe beträgt $10\,\mathrm{m}$ über dem lokalen Nullniveau. Ein Bezug zum amtlichen Höhensystem verlangt einen vermessenen Anschluss.

Leseweg: Feld und Bilder S. 2–4 · Orientierung S. 5–7 · Vorwärtsschnitt und Instrument S. 8–10 · Ausgleichung und Gelände S. 11–14 · Praxisteil und Quellen S. 15–18.

LEHREINHEIT 01

Im Gelände beginnt die Orientierung

Standpunkte, Bilddeckung und geodätischer Anschluss

1 Zwei geeignete Standorte finden

Von beiden Enden der Standlinie muss dieselbe Oberfläche erkennbar sein. Im Gebirge kann ein Rücken die dahinterliegende Mulde im zweiten Bild verdecken. Man erkundet den gemeinsamen Sichtbereich, prüft nahe und ferne Ziele und plant für Lücken eine weitere Standlinie. Eine längere Basis verbessert bei gleichem Abstand den Schnittwinkel. Sie vergrößert auch die Unterschiede im Blick auf Kanten und abschattende Objekte. Das Feldprotokoll begründet den Kompromiss anhand der geforderten Genauigkeit (S. 12).

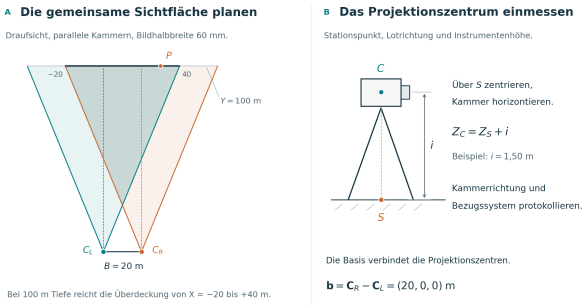


Abb. 2. Feldskizze. Die gemeinsame Bilddeckung begrenzt den auswertbaren Bereich. Die Instrumentenhöhe verbindet Stationsmarke und Projektionszentrum.

2 Die Zentren bestimmen

Stativ über dem vermarkten Punkt zentrieren, Instrument horizontieren, Instrumenten- und gegebenenfalls exzentrische Kammerhöhe messen. Die Koordinaten des Projektionszentrums ergeben sich aus dem Standpunkt zuzüglich der passend orientierten Exzentrizität. Horizontale Richtung zu einer bekannten Marke oder zum Gegenstandpunkt beobachten. Die Standlinie wird aus koordinierter Länge und Richtung gebildet. Aus einer gemessenen Schrägstrecke s und der Höhendifferenz ΔZ folgt $B_h = \sqrt{s^2 - \Delta Z^2}$. Der Normalfall des Beispiels hat $\Delta Z = 0$.

3 Die Aufnahme auslösen und dokumentieren

Phototheodolit nach dem vorgesehenen Azimut ausrichten, Libellen kontrollieren, Fokussierung bzw. kalibrierte Einstellung wählen, Platte einlegen, belichten. Aufnahmekennung, links/rechts, Zeit, Kammer, Objektiv, Fokus, Standpunkt, Richtung, Höhe und Besonderheiten am jeweiligen Standort notieren. Die negative Glasplatte zeigt ein invertiertes Projektionsbild. Bildmessungen beziehen sich später auf ein ausdrücklich orientiertes Bildkoordinatensystem.

4 Drei Arten von Punkten unterscheiden

Punktart	Beobachtung und Funktion
Passpunkt	Geländekoordinate wird unabhängig eingemessen, im Bild sicher identifiziert und zur Orientierung verwendet. Nah und fern, links und rechts, möglichst auch in verschiedenen Höhen verteilen.
Verknüpfungspunkt	Dieselbe Kante oder Zielmarke in mehreren Aufnahmen. Die Bildmessungen koppeln die Kameras. Die Objektkoordinate ist zunächst unbekannt.
Prüfpunkt	Referenzkoordinate vor der Ausgleichung zurückhalten. Nach dem Aufbau aus Bildern messen und mit der unabhängigen Referenz vergleichen.

Historische Feldpraxis und Passpunktverteilung: Finsterwalder [1], S. 113–119. Bild- und Passpunktanforderungen: USACE [3], Kap. 6 und 8.

LEHREINHEIT 02

Ein Bildpunkt bestimmt einen Strahl

Zentralprojektion und die innere Geometrie der Kammer

Für die ideale Kammer treffen sich die Abbildungsstrahlen in einem Projektionszentrum C. Eine ebene Bildfläche steht senkrecht zur optischen Bezugsachse. Der Lotfuß des Zentrums auf der Bildebene heißt Bildhauptpunkt H. Seine Koordinaten (x_H, y_H) beziehen sich auf das durch Marken oder Sensorlage definierte Bildsystem. Die kalibrierte Kamerakonstante $c > 0$ beschreibt den Bezugsabstand der Bildebene vom Zentrum für die gewählte Einstellung.

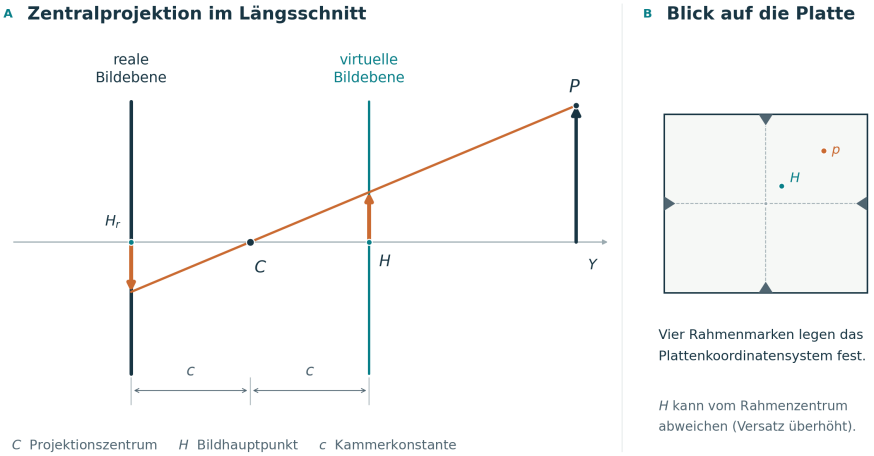


Abb. 3. Zentralprojektion. Die virtuelle Bildebene vor der Kammer macht die Bildkoordinaten anschaulich. Rahmenmarken definieren einen messbaren Bildbezug.

Warum darf man das Bild vor die Kamera legen?

Strahl und Gegenstrahl liegen auf derselben Geraden. Verschiebt man die bildseitige Projektion durch das Zentrum auf eine gleich weit entfernte Ebene vor der Kammer, wechseln die beiden transversalen Vorzeichen. Das Bild steht aufrecht. Wir rechnen auf dieser virtuellen Ebene mit x nach rechts und y nach oben. Die rechtshändige Kameraachse z_c zeigt nach hinten. Ein Punkt auf der virtuellen Ebene hat deshalb die dritte Koordinate $-c$.

$$\xi = x - x_H, \qquad \eta = y - y_H, \qquad \mathbf{r}_c = \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ -c \end{pmatrix}.$$

Skaliert man $\mathbf{r}_c$ mit einem positiven Faktor, bleibt seine Richtung erhalten. Deshalb lässt sich aus einer einzigen Projektion die Entfernung zum Objekt nicht bestimmen.

Beispiel links: $x_H = y_H = 0$, $\xi = 45\,\text{mm}$, $\eta = 15\,\text{mm}$. In lokalen Geländeachsen ist der Sehstrahl proportional zu $(45, 150, 15)$. Sowohl $(15, 50, 5)$ als auch $(30, 100, 10)\,\text{m}$ liegen darauf.

Projektionsmodell und Kamerakalibrierung: Luhmann [2], Kap. 4.

LEHREINHEIT 03

Aus einem Scan wird eine Bildmessung

Rahmenmarken einpassen, Hauptpunkt abziehen, Verzeichnung korrigieren

Vom Pixelraster zur metrischen Platte

Die Scanachsen u, v können andere Skalen, eine Drehung, Scherung und einen versetzten Ursprung haben. Häufig zählt v nach unten. Für jede in der Kalibrierung bekannte Rahmenmarke werden Scankoordinaten und metrische Sollkoordinaten zugeordnet. Drei nicht kollineare Marken bestimmen sechs affine Parameter. Zusätzliche Marken liefern eine Kontrolle.

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}.$$

Beispiel für eine ideale Scannerausrichtung mit $10\,\mu$m je Pixel: Der Rahmenursprung liege bei $(6000, 4500)$ Pixel. Mit $x_d = 0{,}010(u - 6000)$ und $y_d = -0{,}010(v - 4500)$ ergibt $(10500, 3000)$ genau $(45, 15)$ mm. Am historischen Gerät werden die Bildträger anhand ihrer Rahmenmarken mechanisch eingerichtet. Die Pixeltransformation beschreibt das entsprechende Vorgehen am Scan.

Von der gemessenen zur unverzeichneten Richtung

Nach Abzug des Hauptpunkts bezeichnen $\xi_d = x_d - x_H$ und $\eta_d = y_d - y_H$ die gemessenen, verzeichneten Werte. Es folgt beispielhaft ein Brown-artiges Vorwärtsmodell mit idealen Koordinaten ξ, η, Quadrat des Radius $r^2 = \xi^2 + \eta^2$ und $D = k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6$.

$$\begin{aligned} \xi_d &= \xi(1 + D) + 2p_1\xi\eta + p_2(r^2 + 2\xi^2), \\ \eta_d &= \eta(1 + D) + p_1(r^2 + 2\eta^2) + 2p_2\xi\eta. \end{aligned}$$

k_i modellieren radialsymmetrische Anteile, p_1, p_2 die dezentrierende Verzeichnung. Bei Bildwerten in Millimetern haben k_i die Einheiten mm^{-2i} und p_j die Einheit mm^{-1}. Für die Rückrechnung löst man die beiden Gleichungen iterativ nach ξ, η. Alternativ wird die verzeichnete Beobachtung direkt mit der vorwärts projizierten, ebenfalls verzeichneten Vorhersage verglichen. Im Zahlenbeispiel sind alle Verzeichnungsparameter null.

> Rahmenmarken übertragen das metrische Bezugssystem der Platte. Die Kammerkalibrierung liefert innere Parameter. Ein kleiner Anpassungsfehler an den Marken allein belegt keine korrekte Objektivkalibrierung.

Ein Betrag zur Einordnung

Bei $\xi = 45\,\mathrm{mm}$, $\eta = 15\,\mathrm{mm}$, $k_1 = 10^{-7}\,\mathrm{mm}^{-2}$ und sonst null ist $r^2 = 2250\,\mathrm{mm}^2$. Die Rohmessung läge bei $(45{,}010125; 15{,}003375)\,\mathrm{mm}$. Allein der radiale Anteil verschiebt die Abszisse um rund $10\,\mu$m. Ein Objektpunkt kann diese Verschiebung bei unbekannter Verzeichnung fälschlich als Tiefensignal übernehmen.

Die Zuordnung der Dezentrierungskoeffizienten gehört zur Modellkonvention. Gleichungen und Einheiten im Kalibrierprotokoll prüfen. Vgl. Luhmann [2], Kap. 4.

LEHREINHEIT 04

Wo steht die Kamera, wohin schaut sie?

Die äußere Orientierung eines Einzelbildes

Die äußere Orientierung besteht aus dem Projektionszentrum $\mathbf{C} = (X_C, Y_C, Z_C)^T$ und einer räumlichen Drehung mit drei Freiheitsgraden. Wir definieren Q als aktive Abbildung vom Kamerasystem in das lokale Objektsystem. Ihre Spalten sind die Kameraachsen in Objektkoordinaten. Die Transponierte $Q^T = Q^{-1}$ dreht Objektvektoren in die Kammer.

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = Q^T(\mathbf{X} - \mathbf{C}), \qquad \xi = -c\frac{U}{W}, \qquad \eta = -c\frac{V}{W}.$$

Diese Kollinearitätsgleichungen sagen aus, dass $\mathbf{q}$ ein Vielfaches von $(\xi, \eta, -c)^T$ ist. Für sichtbare Punkte gilt bei unserer Konvention $W < 0$. Für das ideale metrische Bild werden anschließend x_H, y_H addiert. Bei Rohmessungen erweitert man die Vorwärtsrechnung um die auf S. 4 definierte Verzeichnung.

Warum eine transponierte Matrix?

Im terrestrischen Normalfall sieht die Kamera horizontal nach $+Y$. Ihre Bildrechtsachse zeigt nach $+X$, Bildoben nach $+Z$, die dritte Kameraachse nach $-Y$. Das ergibt

$$Q_0 = R_X(90^\circ) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad Q_0^T(30, 100, 10)^T = (30, 10, -100)^T.$$

Damit erhält man im linken Bild $\xi = 45\,\text{mm}$ und $\eta = 15\,\text{mm}$. Zieht man zuerst $\mathbf{C}_R = (20, 0, 0)^T\,\text{m}$ ab, entsteht $(U, V, W) = (10, 10, -100)\,\text{m}$ und damit $(15, 15)\,\text{mm}$.

Drehwinkel und Drehsinn ausdrücklich festlegen

In diesem Skript gilt $Q = R_Z(\kappa)R_Y(\varphi)R_X(\omega)Q_0$ mit standardmäßigen rechtshändigen aktiven Drehungen um die festen lokalen Achsen. Matrizen wirken auf Spalten von rechts nach links. Die Winkel sind Abweichungen von Q_0. Andere photogrammetrische Konventionen vergeben dieselben Buchstaben mit anderer Drehrichtung oder Reihenfolge.

$$R_Z(\kappa) = \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Schwenkt die rechte Kamera um 5° nach rechts, ist $\kappa_R = -5^\circ$. Sie sieht denselben Punkt bei $(1{,}8604; 14{,}9267)\,\text{mm}$. Die beiden Rohabszissen darf man jetzt nicht mehr unmittelbar in die Normalfall-Tiefenformel einsetzen.

Geometrie eines Bildes und der Bildorientierung: Förstner und Wrobel [4], S. 455–545.

LEHREINHEIT 05

Wie passen die beiden Aufnahmen zusammen?

Relative Orientierung und die Rolle der Vertikalparallaxe

Die relative Orientierung rekonstruiert Lage und Drehung der rechten Kamera gegenüber der linken. Das erste Zentrum und seine Drehung definieren das Modellsystem. Die Länge der Modellbasis darf zunächst beispielsweise eins betragen. Es bleiben drei Drehwinkel sowie zwei Parameter für die Richtung des Basisvektors. Fünf homologe, geometrisch geeignete Punktpaare liefern im kalibrierten Minimalfall fünf Bedingungen. Mehrdeutigkeiten und schwache Punktverteilung verlangen zusätzliche Punkte und Kontrollen.

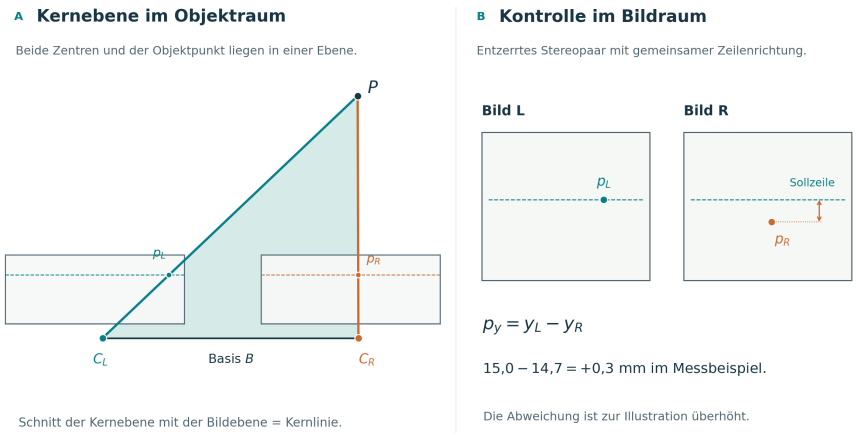


Abb. 4. Zentrum links, Zentrum rechts und Objektpunkt spannen eine Epipolarebene auf. Ihr Schnitt mit der rechten Bildebene begrenzt die Suche nach der korrespondierenden Messung.

Die Koplanaritätsbedingung

Für Punkt j seien $\mathbf{d}_{ij} = Q_i(\xi_{ij}, \eta_{ij}, -c_i)^T$ die beiden Richtungsvektoren und $\mathbf{b} = \mathbf{C}_R - \mathbf{C}_L$. Basis und beide Strahlen liegen in einer Ebene, falls

$$\mathbf{b}^T(\mathbf{d}_{Lj} \times \mathbf{d}_{Rj}) = 0.$$

Eine Skalierung von $\mathbf{b}$ ändert an der Nullbedingung nichts. Daher bleibt allein aus Bildmessungen der absolute Maßstab unbestimmt. Wiederholungen über verteilte Bildpunkte erlauben, Restabweichungen nach der Orientierung zu erkennen.

Wie man den Restfehler sieht

Nach der Rektifizierung auf parallele Bildachsen und horizontale Basis liegen homologe Bildpunkte idealerweise auf gleicher Zeile. Ihre Restdifferenz $p_y = \eta_L - \eta_R$ ist dann ein Maß für vertikale Fehlanpassung. In den originalen, verschwenkten Bildern kann $\eta_L - \eta_R$ selbst bei korrekter Orientierung ungleich null sein. Dort beurteilt man den Abstand zur zugehörigen Epipolarlinie.

Bildpaargeometrie: [4], S. 547–620. Für die rechnerische Orientierung siehe zudem [5], Einheit „Orientation of the Image Pair“.

LEHREINHEIT 06

Wie erhält das Modell Maßstab und Lage?

Absolute Orientierung und räumlicher Rückwärtsschnitt

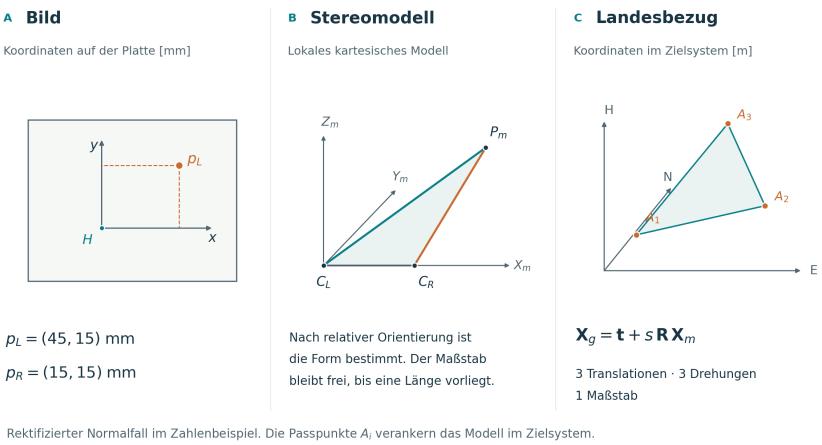


Abb. 5. Modell und Gelände werden mit einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation verbunden. Eine bekannte metrische Basis liefert bereits eine Maßstabsinformation.

Ein freies Modell an Passpunkte anschließen

Sind Bildpaar und Modell nur relativ orientiert, kann man alle Punkte und Kamerazentren gemeinsam verschieben, drehen und skalieren, ohne ihre Bildkoordinaten zu ändern. Eine siebenparametrige Ähnlichkeitstransformation führt die Modellkoordinaten $\mathbf{m}_j$ in das Zielsystem über:

$$\mathbf{X}_j = \mathbf{t} + sR\mathbf{m}_j, \qquad s > 0, \quad R^T R = I, \quad \det R = +1.$$

Drei nicht kollineare, in beiden Systemen dreidimensional bekannte Passpunkte genügen bei fehlerfreien Daten. Für reale Messungen bestimmt man die sieben Parameter überbestimmt und vergleicht Restabweichungen. Eine bekannte Basislänge beseitigt den Maßstabsfreiheitsgrad. Bekannte Zentren und Blickrichtungen können weitere Parameter schon beim Feldaufbau festlegen.

Vom Einzelbild auf die Kamerapose schließen

Beim räumlichen Rückwärtsschnitt sind Kamerakalibrierung und räumliche Passpunkte $\mathbf{X}_j$ bekannt. Gesucht sind die sechs Parameter $\mathbf{C}, \omega, \varphi, \kappa$ einer Kamera. Jeder Passpunkt liefert zwei Bildgleichungen. Drei geeignete Punkte bilden das theoretische P3P-Minimum und können mehrere Lösungen ergeben. Zusätzliche, räumlich und im Bild gut verteilte Passpunkte ermöglichen Auswahl und Prüfung. Man startet mit einer Näherung, projiziert die Passpunkte und minimiert die gewichteten Bildabweichungen (S. 11).

Rückwärtsschnitt: bekannte Objektpunkte → unbekannte Kamera. Vorwärtsschnitt: bekannte Kameras → unbekannter Objektpunkt. Relative und absolute Orientierung beschreiben einen alternativen Weg zum metrisch orientierten Bildpaar.

Methoden: [2], Abschn. 4.3.1 und 4.3.2, sowie [4], S. 455–620.

LEHREINHEIT 07

Aus zwei Bildmessungen wird ein Punkt

Der terrestrische Normalfall, vollständig durchgerechnet

Es gelten dieselbe Kamerakonstante, parallele horizontale Blickachsen, unverzeichnete und hauptpunktzentrierte Bildkoordinaten und die horizontale Basis B entlang $+X$. Ähnliche Dreiecke ergeben

$$\xi_L = c\frac{X}{Y}, \quad \xi_R = c\frac{X-B}{Y}, \qquad \eta_L = \eta_R = c\frac{Z}{Y}.$$

Subtrahiert man die zweite horizontale Gleichung von der ersten, verschwindet X. Die horizontale Parallaxe p_x misst daher die inverse Tiefe:

$$p_x = \xi_L - \xi_R = \frac{cB}{Y}, \quad Y = \frac{cB}{p_x}, \quad X = \frac{Y\xi_L}{c}, \quad Z = \frac{Y\eta_L}{c}.$$

Einsetzen mit Einheiten

$$p_x = 45 - 15 = 30\,\text{mm}, \quad Y = \frac{150\,\text{mm}\cdot 20\,\text{m}}{30\,\text{mm}} = 100\,\text{m}.$$

Damit sind $X = 100\cdot 45/150 = 30\,\text{m}$ und $Z = 100\cdot 15/150 = 10\,\text{m}$. Die beiden Rückprojektionen liefern wieder die beobachteten Bildpunkte. Die Größe Y ist die axiale Tiefe. Die Schrägentfernung links beträgt dagegen $\sqrt{30^2+100^2+10^2} = 104{,}881\,\text{m}$.

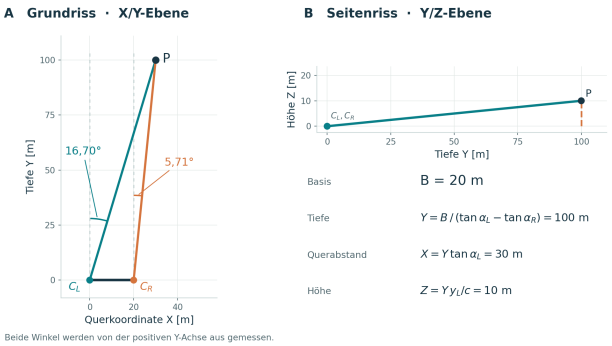


Abb. 6. Strahlenschnitt im Grund- und Aufriss. Der Schnittwinkel in der Draufsicht ist eine Projektion des räumlichen Schnittwinkels.

Drei verschiedene Winkel

Die horizontalen Richtungswinkel $\alpha_L = \arctan(45/150) = 16{,}699°$ und $\alpha_R = 5{,}711°$ unterscheiden sich um $10{,}989°$. Der räumliche Schnittwinkel der normierten Sehstrahlen beträgt $\arccos(\hat{\mathbf{d}}_L^T\hat{\mathbf{d}}_R) = 10{,}939°$. Der Höhenwinkel links ist $\arctan[10/\sqrt{30^2+100^2}] = 5{,}471°$. Das lokale Bildverhältnis $\eta/c = Z/Y$ beschreibt die Steigung in der Y–Z-Projektion.

Herleitung des Normalfalls: [1], S. 102 f., Abb. 42. Das Zahlenbeispiel ist eine eigene synthetische Konstruktion.

LEHREINHEIT 08

Wie rechnet ein Gestänge?

Das Funktionsprinzip des Orel–Zeiss-Stereoautographen

Zwei Richtungslineale übernehmen den Grundriss

Im vereinfachten Schema liegen die Drehpunkte zweier Lineale an den Modellstandorten. An der Brennweitenbrücke, im geometrischen Bezugsabstand c, verschieben die Bildabzissen die Enden der Lineale quer zur Ausgangsrichtung. Das linke Lineal nimmt deshalb die Steigung $X/Y = \xi_L/c$ an, das rechte die Steigung $(X - B)/Y = \xi_R/c$. Ihr geometrischer Schnitt liefert X, Y im Modellmaßstab. Die Richtungen werden mechanisch übertragen. In der gebauten Ausführung vermeidet das Zeiss-Parallelogramm einen unmittelbaren mechanischen Kreuzungspunkt.

Ein drittes Lineal setzt den Aufriss um

Die Entfernung Y liegt als Stellung der Entfernungsbrücke vor. Ein abgewinkeltes Höhenlineal überträgt das Verhältnis $Z/Y = \eta_L/c$. Seine Bewegung koppelt Höhenstellung, Bildordinate und Entfernung. Im vereinfachten Zahlenbeispiel gilt $\eta_L/c = 0{,}1$. Zur Tiefe von 100 m gehört am Punkt damit die Höhe 10 m.

Was stellen die Hände und der Fuß ein?

Der Auswerter verschiebt mit den Handrädern die Marke in der Lage. Konstruktiv stellt ein Rad die linke Bildabszisse ein, das andere verschiebt die Entfernungsbrücke und beeinflusst dadurch die Parallaxe. Die Fußspindel verändert die Höhe. Gestänge und Bildwagen bewegen sich gekoppelt, sodass beide Teilmarken den gewählten Modellpunkt repräsentieren. Eine angeschlossene Zeicheneinrichtung überträgt die Lage auf das Kartenblatt.

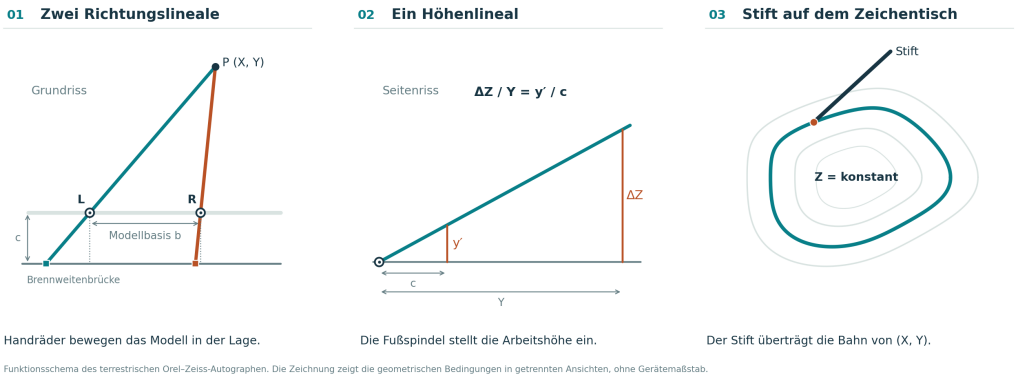


Abb. 7. Mechanisches Funktionsschema in drei Ansichten. Eigenzeichnung nach [1], S. 110–112. Richtungslineale, Höhenlineal und gekoppelte Bedienbewegungen.

Welche Voraussetzungen bringen die Feldmessungen mit?

Der frühe Normalfall setzt horizontale Blickachsen voraus. Spätere Ausführungen erlauben horizontale Verschwenkung und Konvergenz. Winkel und Basis aus dem Feld werden am Instrument eingestellt. Historisch konnte man bei der Auswertung zunächst an einem fernen Höhenpasspunkt die Horizontlage prüfen und anschließend Basis und Konvergenz mit nahen und fernen Lagepasspunkten verbessern. Die freie Sechsparameterpose auf S. 5 ist die allgemeinere mathematische Beschreibung.

Mechanik und Bedienung: [1], S. 109–113, Abb. 48; Orientierung an Passpunkten: S. 118 f. Archivfoto des Modells 1914 auf S. 1.

LEHREINHEIT 09

Wie findet die Hand eine Höhenlinie?

Stereoskopische Messmarke und kontinuierliche Kartierung

Das linke Auge sieht das linke Bild mit einer Teilmarke. Das rechte Auge sieht die rechte Ansicht mit der zweiten Teilmarke. Bei passendem Bilddetail entsteht ein räumlicher Eindruck. Die beiden Teilmarken verschmelzen ebenfalls zu einer scheinbar räumlichen Marke. Ihr stereoskopisch eingestellter Ort lässt sich relativ zum Gelände beurteilen.

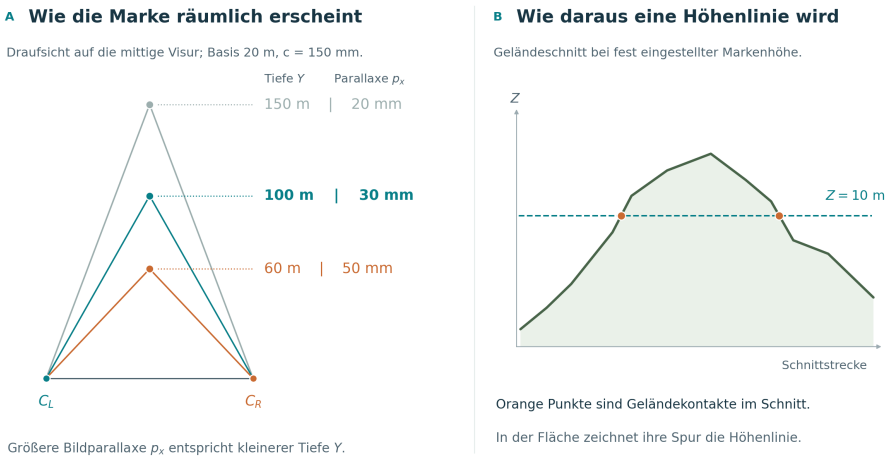


Abb. 8. Das Markenpaar entspricht einem definierten Modellpunkt. Bei festem Z suchen die Handräder jene Lage, an der diese Marke die sichtbare Geländeoberfläche berührt.

Von der Punktmessung zur Linie

1. Einen identifizierbaren Punkt in beiden Bildern aufsuchen. Linkes und rechtes Detail müssen dieselbe physische Stelle zeigen. Dachkante und dahinterliegender Hang bilden kein gültiges Punktpaar.
2. Messmarke in der Lage anfahren und die Höhe variieren, bis die Marke auf der Oberfläche sitzt. Position aus einer zweiten Anfahrrichtung kontrollieren. Bei unsicherer Textur eine zusätzliche Aufnahme oder eine direkte Messung heranziehen.
3. Für die Höhenlinie eine Sollhöhe einstellen. Die Höhe festhalten und die Lage so nachführen, dass die Marke gerade noch auf der Oberfläche liegt. Zu bergseitig erscheint sie bei ansteigendem Hang im Boden, zu talseitig schwebt sie darüber.
4. Den Zeichenstift während der Verfolgung aufliegen lassen. Bei Abschattung oder fehlender Deckung absetzen, Unterbrechung kennzeichnen und erst an der nächsten messbaren Stelle weiterführen.

Im terrestrischen Normalfall steuert horizontale Parallaxe die axiale Tiefe Y. Die Objekthöhe Z hängt zusätzlich von der Bildordinate ab. Bei einer schräg im Raum verlaufenden Höhenlinie variieren daher die Bildparallaxen, obwohl der Fuß auf konstanter Modellhöhe bleibt.

Direktes Ziehen von Schichtlinien am Orel–Zeiss: [1], S. 111. Stereokompilation und Geländekartierung: [3], Kap. 9.

LEHREINHEIT 10

Was tun bei windschiefen Strahlen?

Allgemeiner Vorwärtsschnitt und gewichtete Ausgleichung

Für beliebig orientierte und kalibrierte Bilder entsteht aus jeder Messung ein Einheitsvektor $\hat{\mathbf{d}}_i = Q_i(\xi_i, \eta_i, -c_i)^T / \|(\xi_i, \eta_i, -c_i)\|$. Auf seinem Strahl liegt $\mathbf{C}_i + \lambda_i \hat{\mathbf{d}}_i$ mit $\lambda_i > 0$. Bei Messfehlern werden zwei Strahlen im Raum meist windschief. Für eine Näherung bestimmt man ihre kürzeste Verbindung:

$$\min_{\lambda,\mu} \left\| [\hat{\mathbf{d}}_L, -\hat{\mathbf{d}}_R] \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \end{pmatrix} - (\mathbf{C}_R - \mathbf{C}_L) \right\|^2 .$$

Der Mittelpunkt der Verbindung liefert einen Startwert. Für eine statistische Schätzung wird der Punkt anschließend in alle Bilder zurückprojiziert. So lässt sich die Messgenauigkeit dort berücksichtigen, wo die Beobachtung tatsächlich stattgefunden hat.

Die Ausgleichungsformel aus der Linearisierung

$\boldsymbol{\ell}$ enthält alle Bildbeobachtungen, $\mathbf{f}(\boldsymbol{\theta})$ ihre Vorhersagen, W die Gewichtsmatrix. Mit $\mathbf{v} = \mathbf{f}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) - \boldsymbol{\ell}$ minimiert man $\mathbf{v}^T W \mathbf{v}$. Am Näherungswert $\boldsymbol{\theta}_0$ definiert man $A = \partial \mathbf{f} / \partial \boldsymbol{\theta}$ und $\mathbf{w} = \boldsymbol{\ell} - \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}_0)$. Aus $\mathbf{v} \approx A\Delta - \mathbf{w}$ folgen durch Nullsetzen der Ableitung

$$(A^T W A)\Delta = A^T W \mathbf{w}, \qquad \boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k + \Delta.$$

Nach jeder Verbesserung neu projizieren und linearisieren. Numerisch sind QR- oder SVD-Lösungen der gewichteten linearen Aufgabe zweckmäßig. Kleine Parameteränderungen, Zielwert und Residuen gemeinsam prüfen.

Eine nicht exakt passende Beobachtung

Im Normalfall ist $\mathbf{f} = (cX/Y, cZ/Y, c(X-B)/Y, cZ/Y)^T$. Mit vier gleich gewichteten Bildwerten $\boldsymbol{\ell} = (45{,}010; 15{,}010; 14{,}990; 14{,}990)\,\text{mm}$ ergibt sich:

Start $\boldsymbol{\theta}_0$	$(29; 98; 9)\,\text{m}$
Erster Schritt	$\Delta = (+0{,}96759; +1{,}89597; +0{,}97412)\,\text{m}$
Konvergierte Lösung	$\hat{P} = (29{,}98668; 99{,}93338; 9{,}99334)\,\text{m}$
Residuen $\mathbf{v}$	$(0; -0{,}010; 0; +0{,}010)\,\text{mm}$

Die beiden vertikalen Beobachtungen widersprechen sich um 0,020 mm. Bei gleicher Genauigkeit verteilt sich dieser Widerspruch hälftig. Vier skalare Beobachtungen minus drei geschätzte Parameter ergeben einen Freiheitsgrad.

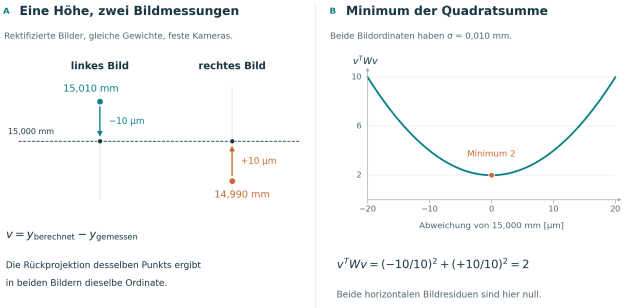


Abb. 9. Gleich genaue Beobachtungen teilen den vertikalen Widerspruch auf beide Residuen. Die gewichtete Quadratsumme erreicht ihr Minimum bei der gemeinsamen Bildordinate $15{,}000\,\text{mm}$.

Grundlagen zur Ausgleichung und Rückprojektion: [2], Abschn. 4.3, [4], S. 547–620 und 643–725.

LEHREINHEIT 11

Wie genau ist die Entfernung?

Unsicherheitsfortpflanzung und Aufnahmeplanung

Aus $Y = cB/p$ folgen $\partial Y/\partial p = -cB/p^2 = -Y^2/(cB)$ und die relative Änderung $\mathrm{d}Y/Y = \mathrm{d}c/c + \mathrm{d}B/B - \mathrm{d}p/p$. Bei festen Kameradaten und unabhängigen Bildabszissen mit gleicher Standardabweichung σ_x gilt

$$\sigma_p = \sqrt{2}\,\sigma_x, \qquad \sigma_Y \simeq \frac{Y^2}{cB}\,\sigma_p.$$

Für $\sigma_x = 0{,}010\,\mathrm{mm}$ beträgt $\sigma_p = 0{,}01414\,\mathrm{mm}$. Bei $Y = 100\,\mathrm{m}$ ergibt sich $\sigma_Y = 0{,}04714\,\mathrm{m}$. Bei $200\,\mathrm{m}$ steigt sie auf $0{,}18856\,\mathrm{m}$. Bei korrelierten Messungen gilt stattdessen $\sigma_p^2 = \sigma_L^2 + \sigma_R^2 - 2\,\mathrm{Cov}(\xi_L, \xi_R)$.

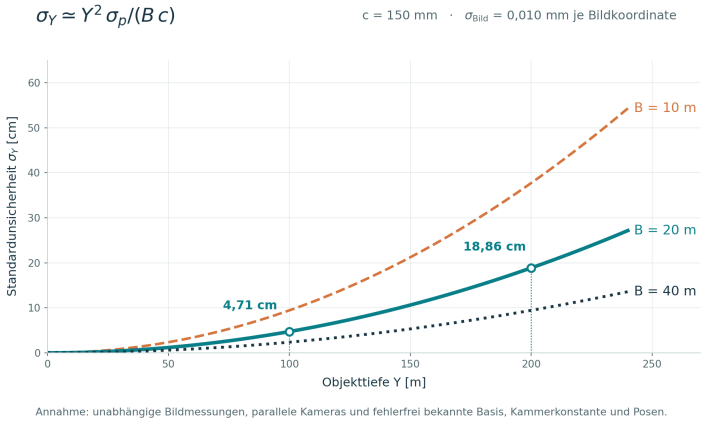


Abb. 10. Der Tiefenfehler wächst bei gleicher Bildmessgenauigkeit quadratisch mit der Entfernung. Eine größere Basis verbessert die Tiefenbestimmung, solange dieselbe Fläche sichtbar und identifizierbar bleibt.

Auch Querposition und Höhe sind unsicher

Für vier Beobachtungen und $\boldsymbol{\theta} = (X, Y, Z)$ besitzt die Jacobi-Matrix im Normalfall die Reihen

$$A = c\begin{pmatrix} 1/Y & -X/Y^2 & 0 \\ 0 & -Z/Y^2 & 1/Y \\ 1/Y & -(X-B)/Y^2 & 0 \\ 0 & -Z/Y^2 & 1/Y \end{pmatrix}.$$

Bei bekannter vollständiger Beobachtungskovarianz Σ_ℓ und vollem Rang ist $\Sigma_{\hat\theta} \simeq (A^T\Sigma_\ell^{-1}A)^{-1}$. Am idealen Beispiel folgen die Komponenten $\sigma_X = 10{,}54$, $\sigma_Y = 47{,}14$ und $\sigma_Z = 6{,}67\,\mathrm{mm}$. Diese Werte gelten bedingt auf fehlerfreie Basis, Kamerakonstante und Orientierung. Bei einer gemeinsam geschätzten Pose werden auch deren Unsicherheiten und Korrelationen fortgepflanzt.

Für relative Gewichte $W = Q_\ell^{-1}$ verwendet man $\hat\sigma_0^2 = \mathbf{v}^T W \mathbf{v}/(n-u)$ und multipliziert $(A^T W A)^{-1}$ mit diesem Faktor. Bei bekannter absoluter Σ_ℓ entfällt dieser zusätzliche Skalierungsfaktor.

LEHREINHEIT 12

Wenn die Kameras ebenfalls unbekannt sind

Bündelausgleichung in einem kontrollierten Zweibildverband

Für eine Beobachtung des Objekts j in Bild i lautet die Vorhersage $\boldsymbol{\pi}(\mathbf{C}_i, Q_i, \mathbf{X}_j, \boldsymbol{\gamma})$, wobei $\boldsymbol{\gamma}$ die inneren Parameter enthält. Jede Beobachtung verbindet genau eine Kamera mit genau einem Objektpunkt. Bei geeigneter Aufnahmegeometrie kann ein ganzer Verband gemeinsam ausgeglichen werden:

$$\min_{\mathbf{C}_i, Q_i, \mathbf{X}_j} \sum_{(i,j)} (\boldsymbol{\pi}_{ij} - \boldsymbol{\ell}_{ij})^T W_{ij} (\boldsymbol{\pi}_{ij} - \boldsymbol{\ell}_{ij}).$$

Die Summe gilt für unabhängige Beobachtungsblöcke. Bekannte Passpunkte dürfen exakt festgehalten werden, sofern dies der Genauigkeit genügt. Bei messbar unsicherer Referenz führt man die Passpunktkoordinaten als zusätzliche Beobachtungen mit eigener Kovarianz ein. Ebenso lassen sich terrestrische Richtungs-, Basis- oder Positionsmessungen gewichtet einbeziehen.

Warum das Datum festgelegt werden muss

Ein vollständig freier, kalibrierter Bildverband mit unbekannten Objektkoordinaten bleibt gegenüber einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation invariant. Ohne geeignete Datumsfestlegung fehlen sieben unabhängige Bedingungen. Passpunkte oder passende Datumsbedingungen legen den Bezug fest. Werden innere Parameter mitgeschätzt, braucht man zusätzliche geometrische Beobachtbarkeit. Ein einzelnes nahezu paralleles Paar ist beispielsweise für die Trennung von Kammerkonstante und Kameraposition schwach.

Ein kontrollierter Verband mit echten Freiheitsgraden

Das zweite Lehrbeispiel verwendet sechs exakt angenommene 3D-Passpunkte, zwei unbekannte Objektpunkte und zwei unbekannte Posen. Die innere Orientierung ist bekannt. Alle acht Punkte erscheinen in beiden Bildern. Es entstehen $2 \cdot 8 \cdot 2 = 32$ skalare Bildbeobachtungen und $2 \cdot 6 + 2 \cdot 3 = 18$ Unbekannte. Die Jacobi-Matrix hat Rang 18, die Redundanz beträgt 14. Die rechte Aufnahme ist gegenüber links um etwa 5° nach rechts geschwenkt.

Mit den Bilddaten auf S. 16 ergibt sich für die Felskante $\hat{P} = (29{,}99943; 100{,}00429; 10{,}00380)\,\mathrm{m}$. Der RMS der Bildresiduen ist 0,00374 mm. Einheitsgewichtet beträgt die empirische Standardabweichung $\sqrt{\sum v_i^2/14} = 0{,}00565\,\mathrm{mm}$. Der Unterschied der beiden Kennzahlen folgt aus den Nennern 32 und 14.

Der separate Prüfpunkt mit Referenz $(8, 95, 11)\,\mathrm{m}$ wird nach der Orientierung allein aus seinen beiden Bildmessungen geschnitten. Die Differenz beträgt $(-0{,}00226; +0{,}03191; +0{,}00603)\,\mathrm{m}$. Ein einzelner Prüfpunkt beurteilt die lokale Abweichung. Für eine flächenweite Genauigkeitsangabe sind räumlich verteilte, unabhängige Prüfpunkte erforderlich.

Bündel und Datum: [4], S. 643–725. Alle Messwerte und Ergebnisse beider Lehrbeispiele sind synthetisch.

LEHREINHEIT 13

Aus Punkten entsteht eine Oberfläche

Bruchkanten, Dreiecke und die kartierte Höhenlinie

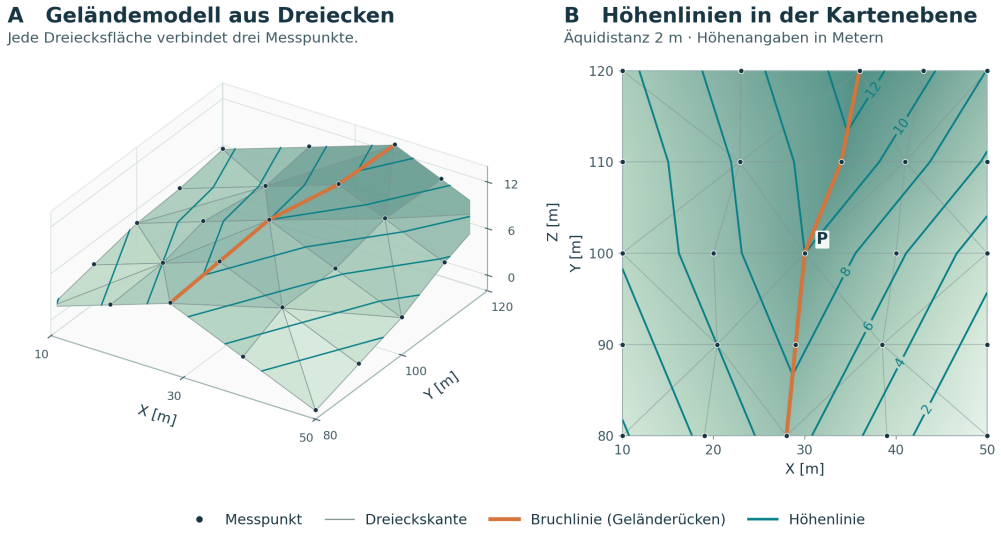


Abb. 11. Die gleichen 25 Stützpunkte bilden ein Dreiecksnetz mit 32 Flächen und eine daraus interpolierte Höhenlinienkarte. Die vorgegebene Kammlinie verläuft entlang der Dreieckskanten. P liegt auf der 10-m-Linie.

Was wird tatsächlich gemessen?

Der Auswerter misst markante Stützpunkte und verfolgt Bruchkanten wie Kamm, Böschungsoberkante oder Gewässersohle. Ein TIN (Triangulated Irregular Network) verbindet Nachbarpunkte zu Dreiecken. Eine als Zwangskante eingebrachte Bruchlinie verhindert, dass Flächen über einen tatsächlichen Geländewechsel hinweg verbunden werden. Innerhalb jedes Dreiecks wird die Höhe linear interpoliert. Zusätzliche Dreiecke erhöhen die Auflösung nur dort, wo zusätzliche Messungen die Form stützen.

Wie schneidet eine Höhenebene eine Dreieckskante?

Für eine Kante von A nach B mit $Z_A \neq Z_B$ und eine Sollhöhe h setzt man

$$t = \frac{h - Z_A}{Z_B - Z_A}, \quad S = A + t(B - A), \quad 0 \leq t \leq 1.$$

Die gemessene Kammkante $A = (28, 80, 7)$ nach $B = (29, 90, 8{,}5)\,\mathrm{m}$ trifft $h = 8\,\mathrm{m}$ bei $t = 2/3$. Daher liegt $S = (28{,}667; 86{,}667; 8{,}000)\,\mathrm{m}$. Ein zweiter Schnitt mit einer anderen Kante desselben Dreiecks definiert das Liniensegment. Man verbindet Segmente über gemeinsame Dreieckskanten. Für genau auf der Ebene liegende Kanten und Stützpunkte ist eine konsistente Regel nötig, damit Segmente nicht doppelt gezählt werden.

Was kann die fertige Fläche darstellen?

Ein Höhenmodell mit einem Z je (X, Y) ist eine 2,5D-Fläche. Ein Überhang erfordert ein echtes räumliches Netz und Bilder aus weiteren Blickrichtungen. Ein Geländemodell benötigt sichtbare Bodenpunkte. Wo nur Baumkronen erkennbar sind, misst man zunächst die Oberfläche der Vegetation. Fehlende Information als Lücke oder gesonderte Interpolation kennzeichnen.

Digitale Geländemodelle und Bruchkanten: [3], Abschn. 9-11 und 10-7e. Oberflächenrekonstruktion: [4], S. 727–766.

LEHREINHEIT 14

Ein reales Bildpaar aus den Schweizer Alpen

Standlinie Piz Boval N.O., 25. Juli 1935



Abb. 12. Links und rechts derselbe Hang, aufgenommen von zwei Kamerastandorten. Quelle und markierte Bildausschnitte siehe [6]. Die markierte Korrespondenz dient zur visuellen Orientierung.

Der Aufnahmebogen dokumentiert für die Standlinie eine Stationsdistanz von 402 m, Standhöhen von 2699 und 2715 m sowie eine Kamerakonstante von 161 mm. Die horizontalen Blickrichtungen waren parallel verschwenkt. Der Archivfall veranschaulicht, weshalb das Feldbuch für die geometrische Rekonstruktion ebenso wichtig ist wie die Bildplatte.

Lesen Sie die Bilder wie ein Auswerter

Suchen Sie zuerst denselben Gipfel und die darunterliegende Geländekante. Vergleichen Sie anschließend einen nahen Felsblock mit einer fernen Gratlinie. Die Verschiebung zwischen den Bildern hängt von der Tiefe ab. Ein hoher Bildkontrast verbessert die Zielansprache nur, wenn auf beiden Bildern dieselbe physische Stelle sichtbar ist. Bei einer Silhouette kann sich die sichtbare Kontur mit dem Standpunkt ändern.

Welche Daten fehlen für eine Rechnung an den Ausschnitten?

Für eine metrische Auswertung braucht man die Zuordnung der originalen Rahmenmarken zu kalibrierten Plattenkoordinaten, die genaue Aufnahmeorientierung, die Definition der Stationsdistanz und den Bezug zwischen Stationsmarken und Projektionszentren. Die hier verkleinerten Bildausschnitte sind Anschauungsmaterial. Die Differenz ihrer Bildschirmkoordinaten taugt ohne diese Information nicht als metrische Bildparallaxe.

Ein zweites Beispiel aus der Umgebung von Jena

Ein Kursbericht von 1913 beschreibt eine Geländeübung bei Zwätzen mit rund 300 m Basis und dem Maßstab 1:25 000. In solchen Übungen wurden Stationswahl, geodätische Messung, Plattenaufnahme und Auswertung als zusammenhängender Vorgang gelehrt. Ein weiteres dokumentiertes Beispiel am Nanga Parbat zeigt eine Standlinie von 436,07 m, Objektdistanzen von etwa 1,3 bis 7 km und eine Endkarte im Maßstab 1:50 000 mit 50 m Äquidistanz.

Quellen: swisstopo [6]; Lüdemann [7], S. 955; Finsterwalder [1], S. 117, Abb. 51.

LEHREINHEIT 15

Messblatt für eine eigene Bündelrechnung

Sechs Passpunkte, zwei unbekannte Punkte, ein unabhängiger Prüfpunkt

Die Tabelle enthält die metrischen Koordinaten der Passpunkte und idealisiert kalibrierte, mit synthetischem Messrauschen versehene Bildmessungen. Die Objektkoordinaten von P und T sind zu schätzen. K wird vollständig aus der Orientierung herausgehalten. $c = 150\,\text{mm}$, $x_H = y_H = 0$, keine Verzeichnung. Die Bildkoordinaten sind hier auf 0,0001 mm gerundet, die Auswertung auf S. 13 verwendete die ungerundeten Werte.

	Gelände [m]			Bild L [mm]		Bild R [mm]	
ID	X	Y	Z	ξ	η	ξ	η
G1	−16	80	−3	−29,9970	−5,6354	−83,9238	−5,8875
G2	35	85	17	61,7722	30,0094	13,1531	29,6562
G3	−22	130	16	−25,4041	18,4485	−63,3781	19,0643
G4	38	140	−4	40,7156	−4,2889	6,1061	−4,2558
G5	4	100	23	5,9998	34,4915	−37,6546	35,1199
G6	20	113	−13	26,5575	−17,2489	−13,1180	−17,3189
P	–	–	–	45,0007	15,0113	1,8646	14,9310
T	–	–	–	12,0047	7,1914	−25,2790	7,2744
K	8	95	11	12,6265	17,3603	−32,4229	17,6409

So lässt sich die Schätzung nachbauen

Den Parametervektor aus den Posen beider Bilder und den Koordinatentripeln P und T zusammensetzen. G1–G6 festhalten. Als Startwerte eignen sich die idealen Zentren $(0, 0, 0)$ und $(20, 0, 0)\,\text{m}$ sowie Winkeltripel $(0, 0, 0)°$ und $(0, 0, -5)°$. Für P und T liefern $(30, 100, 10)$ und $(10, 125, 6)\,\text{m}$ gute Näherungen. Für jede Bildmessung die Gleichungen von S. 5 auswerten. Bildabweichungen mit $\sigma = 0{,}010\,\text{mm}$ gewichten und iterativ minimieren. Trigonometrische Funktionen erwarten dabei üblicherweise Radiant.

Werte für die Gegenprobe

Die geschätzten Zentren lauten links $(-0{,}0220; 0{,}0150; -0{,}0070)$ und für das rechte $(19{,}9975; 0{,}0071; 0{,}0036)\,\text{m}$. Die zugehörigen Winkel in der Konvention von S. 5 sind $(0{,}00654; 0{,}01343; -0{,}01130)°$ und $(-0{,}00172; 0{,}00566; -4{,}99913)°$. Für T erhält man $(10{,}01060; 125{,}04518; 5{,}99993)\,\text{m}$.

> Die unabhängige Kontrolle folgt erst jetzt: Die ermittelten Kameraposen festhalten und ausschließlich die drei Koordinaten von K aus seinen vier Bildwerten schätzen. Das Ergebnis mit der Referenz in der letzten Tabellenzeile vergleichen.

G1–G6 sind in diesem Beispiel als exakt angenommen. Zufällige Bildmessfehler und gerundete Tabellenwerte erklären kleine Abweichungen gegenüber einer idealen synthetischen Projektion.

LEHREINHEIT 16

Den ganzen Messweg überprüfen

Vier kurze Aufgaben mit begründeten Lösungen

A Dieselbe Marke steht plötzlich näher

Eine zweite Marke liegt bei $(45, 15)$ und $(7{,}5; 15)\,\mathrm{mm}$, wieder im Normalfall. Berechnen Sie ihre Position. Bleibt der Höhenwinkel links gleich?

$p = 37{,}5\,\mathrm{mm}$, also $Y = 80\,\mathrm{m}$, $X = 24\,\mathrm{m}$, $Z = 8\,\mathrm{m}$. Der linke Strahl ist derselbe, daher bleiben linker Azimut und linker Höhenwinkel gleich. Das rechte Bild unterscheidet die beiden Positionen.

B Ein schräg gerichtetes rechtes Bild

Die rechte Kamera wurde horizontal um 5° nach rechts geschwenkt. Sie misst $(1{,}8604; 14{,}9267)\,\mathrm{mm}$. Warum ergäbe die Normalformel eine falsche Tiefe?

Die Bildabszissen beziehen sich auf verschiedene Kamerarichtungen. $150 \cdot 20/(45 - 1{,}8604) = 69{,}54\,\mathrm{m}$. Dieser Wert verletzt die Voraussetzungen der Herleitung. Der korrekt nach Q_R gedrehte rechte Strahl trifft den linken weiterhin bei $(30, 100, 10)\,\mathrm{m}$.

C Ein relatives Modell in eine Karte einpassen

Die Modellbasis misst zwei Einheiten, $P_M = (3, 10, 1)^T$. Die Feldbasis misst 20 m. Man dreht das Modell um $+8°$ um Z und verschiebt es um $(500000, 5600000, 250)^T\,\mathrm{m}$. Welche Kartenkoordinate erhält P?

Der Maßstab ist $s = 10\,\mathrm{m}$ je Modelleinh. Mit $\mathbf{X} = \mathbf{t} + 10 R_Z(8°) P_M$ folgt $(500015{,}791; 5600103{,}202; 260{,}000)\,\mathrm{m}$. Es handelt sich um einen didaktisch gewählten Kartenanschluss ohne benanntes amtliches Bezugssystem.

D Eine Karte auf unabhängigen Punkten prüfen

Drei vereinfachte Höhenprüfungen liefern Abweichungen $+0{,}03$, $-0{,}04$ und $+0{,}02\,\mathrm{m}$ (Karte minus Referenz). Welche beiden Zahlen sollten getrennt ausgewiesen werden?

Mittlere Abweichung $\overline{\Delta Z} = +0{,}0033\,\mathrm{m}$. Quadratischer Mittelwert $\mathrm{RMSE}_Z = \sqrt{(0{,}03^2 + 0{,}04^2 + 0{,}02^2)/3} = 0{,}0311\,\mathrm{m}$. Die erste Größe zeigt eine mittlere Richtung, die zweite schließt Streuung und systematische Anteile ein. Für eine belastbare Flächenaussage zusätzlich Anzahl, Verteilung und Qualität der Referenz angeben.

Zum Vorführen im 3D-Modell: Normalfall herstellen, P auf seinem linken Strahl bewegen und die Veränderung der rechten Bildabszisse beobachten. Anschließend die Wirkung einer geänderten Basis an derselben Objektposition vergleichen.

LEHREINHEIT 17

Von der Kontrolle zur fertigen Karte

Messkette und kommentierte Quellen

Das Ergebnis an fünf Stellen wiedererkennen

Feldbuch	$\mathbf{C}_L = (0,0,0)$, $\mathbf{C}_R = (20,0,0)\,\mathrm{m}$, parallele horizontale Blickrichtungen und dokumentierte Kammer.
Bildmessung	Für P ergeben Hauptpunktbezug und Kalibrierung links $(45,15)$ und rechts $(15,15)\,\mathrm{mm}$.
Schnitt	$p = 30\,\mathrm{mm}$ führt zu $Y = 100\,\mathrm{m}$, $X = 30\,\mathrm{m}$, $Z = 10\,\mathrm{m}$. Eine Rückprojektion schließt die Rechenkette.
Gerät und Karte	Bei eingestellter Höhe $Z = 10\,\mathrm{m}$ berührt die Marke die Felskante in $(30,100)\,\mathrm{m}$. Auf einem nach lokalen Achsen ausgerichteten Blatt 1:1000 liegt der Punkt relativ zum Ursprung bei $(30,100)\,\mathrm{mm}$.
Qualität	Zustand der Bilder, Passpunktreste, unabhängige Prüfabweichungen, Geländeabdeckung, Höhenbezug und interpolierte Bereiche dokumentieren.

Literatur und Bildnachweise

[1] R. Finsterwalder (1952). *Photogrammetrie*, 2. Auflage. Besonders S. 101–120, Abb. 42, 48, 50 und 51. Historische Normalfallgeometrie, Feldaufnahme und Orel–Zeiss-Gestänge. Kapitel „Terrestrische Stereophotogrammetrie“.

[2] T. Luhmann (2010). *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. DGK, Reihe C, Nr. 645, Kap. 4. Volltext der Deutschen Geodätischen Kommission.

[3] U.S. Army Corps of Engineers (2002). *Photogrammetric Mapping*, EM 1110-1-1000, Kap. 6, 8, 9 und 10. Passpunkte, Stereokompilation und Geländemodelle. Handbuch.

[4] W. Förstner und B. P. Wrobel (2016). *Photogrammetric Computer Vision*. Einzelbild, Bildpaar, Bündelausgleichung und Oberflächenrekonstruktion, S. 455–620 und 643–766. Buch und Kapitelübersicht.

[5] C. Stachniss, Universität Bonn. *Photogrammetry I & II*. Vorlesungen zu räumlichem Vorwärtsschnitt, Bildpaarorientierung und Bündelausgleichung. Kursseite.

[6] Bundesamt für Landestopografie swisstopo. Orel–Zeiss, technische Aufnahme 000-398-073 (1926), und Forno-Bernina, Piz Boval N.O. (1935), Aufnahmen 000-365-609 und 000-365-617. Geräteaufnahme; Originales Stationsblatt.

[7] Lüdemann (1913). *V. Ferienlehrgang in Stereophotogrammetrie*. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 36, insbesondere S. 952 und 955. Digitalisat des Heftes.

Die technischen Lehrgrafiken, Messbeispiele und Aufgaben wurden für diese Vorlesung erstellt.