

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie = Revue technique suisse des mensurations, du génie rural et de la photogrammétrie

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik = Société suisse de la mensuration et du génie rural

Band: 61 (1963)

Heft: 12

Artikel: Développements mathématiques pour l'orientation numérique de vues aériennes quelconques dans un stéréorestituteur [suite et fin]

Autor: Bachmann, W.K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-218469>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie

Revue technique Suisse des Mensurations, du Génie rural et de Photogrammétrie

Herausgeber: Schweiz. Verein für Vermessungs-
wesen und Kulturtechnik; Schweiz. Kulturingenieurverein;
Schweiz. Gesellschaft für Photogrammetrie

Editeur: Société suisse des Mensurations et Améliorations
foncières; Société suisse des Ingénieurs du
Génie rural; Société suisse de Photogrammétrie

Nr. 12 · LXI. Jahrgang

Erscheint monatlich

15. Dezember 1963

Développements mathématiques pour l'orientation numérique de vues aériennes quelconques dans un stéréorestituteur

Par Dr W. K. Bachmann,
professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne

(Suite et fin)

Chapitre III

Programmes N° 403.45 et N° 404.1

Calcul de la déformation de l'image plastique avant et après l'orientation absolue

§ 1. Exposé du problème

Au chapitre I, nous avons entre autres calculé les coefficients de poids et de corrélation des éléments d'orientation κ_B , φ_B , ω_B , by_B , bz_B ainsi que l'erreur moyenne μ à craindre sur l'unité de poids. Nous en avons ensuite déduit au chapitre II les coefficients de poids et de corrélation des coordonnées X , Y , Z et les erreurs moyennes μ_x , μ_y , μ_z des n points observés.

Ce qui nous intéresse maintenant, ce sont les déformations vraies δx_i , δy_i , δz_i aux points P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) de l'image plastique, engendrées par les erreurs vraies $d\kappa_B$, $d\varphi_B$, $d\omega_B$, dby_B , dbz_B des éléments d'orientation relative. Elles seront données par des équations de la forme

$$\left. \begin{aligned} \delta x_i &= f_1(x_i, y_i, z_i; d\kappa_B, d\varphi_B, d\omega_B, dby_B, dbz_B) \\ \delta y_i &= f_2(\text{mêmes variables}) \\ \delta z_i &= f_3(\text{mêmes variables}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.1.1})$$

où f_1 , f_2 , f_3 désignent des fonctions connues des variables figurant entre parenthèses. Ces fonctions sont linéaires par rapport à $d\kappa_B$, $d\varphi_B$, $d\omega_B$,

dby_B, dbz_B . Par conséquent, ces déformations dépendent d'une part des coordonnées du point observé et d'autre part de la valeur des éléments d'orientation α_B, \dots, bz_B . Mais nous ne pouvons pas attribuer n'importe quelle valeur à $d\alpha_B, \dots, dbz_B$, car les parallaxes verticales doivent rester entre certaines limites. De plus, $d\alpha_B, \dots, dbz_B$ jouent le rôle de variables aléatoires qui sont *dépendantes*, ce qui complique singulièrement le problème. Mais nous pouvons essayer d'exprimer les variables dépendantes $d\alpha_B, \dots, dbz_B$ en fonction de 5 nouvelles variables aléatoires *indépendantes* T_1, T_2, \dots, T_5 . On y parvient moyennant une substitution linéaire qui sera indiquée au § 2. En désignant par $\mu_{T_1}, \dots, \mu_{T_5}$ les erreurs moyennes à craindre sur ces nouvelles variables, l'ellipsoïde d'erreur moyenne à 5 dimensions est défini par l'équation

$$\frac{T_1^2}{\mu^2 T_1} + \dots + \frac{T_5^2}{\mu^2 T_5} = 1 \quad (\text{III.1.2})$$

Si k_1, k_2, \dots, k_5 désignent 5 paramètres, non tous nuls, l'ellipsoïde d'erreur peut être représenté sous forme paramétrique par les équations

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 + k_4^2 + k_5^2}} \cdot \mu_{T_1} = \frac{k_1}{\sqrt{[k^2]}} \cdot \mu_{T_1} \\ &\vdots \\ T_5 &= \frac{k_5}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 + k_4^2 + k_5^2}} \cdot \mu_{T_5} = \frac{k_5}{\sqrt{[k^2]}} \cdot \mu_{T_5} \end{aligned} \quad (\text{III.1.3})$$

ce que l'on vérifie immédiatement en introduisant ces expressions dans (III.1.2).

§ 2. Introduction de variables indépendantes à la place de $\alpha_B, \varphi_B, \omega_B, by_B, bz_B$

Les unités pour les coefficients de poids et de corrélation précédemment calculés sont

$$\begin{aligned} &\text{Unités:} \\ \alpha, \varphi, \omega &: 1^{\text{gr}} \\ by, bz, \mu &: 1 \text{ mm} \end{aligned} \quad (\text{III.2.1})$$

Désignons les nouvelles variables par T_1, T_2, \dots, T_5 . Nous allons les introduire à l'aide de la substitution suivante:

$$\begin{aligned}
T_1 &= + d\chi_B \\
T_2 &= + d\chi_B + \alpha_2 d\varphi_B \\
T_3 &= + d\chi_B + \alpha_3 d\varphi_B + \beta_3 d\omega_B \\
T_4 &= + d\chi_B + \alpha_4 d\varphi_B + \beta_4 d\omega_B + \gamma_4 dby_B \\
T_5 &= + d\chi_B + \alpha_5 d\varphi_B + \beta_5 d\omega_B + \gamma_5 dby_B + \delta_5 dbz_B
\end{aligned}
\tag{III.2.2}$$

Puisque ces nouvelles variables sont par hypothèse indépendantes, nous devons avoir

$$Q_{T_i T_j} = 0 \quad \text{pour } i \neq j
\tag{III.2.3}$$

Ecrivons les conditions (III.2.3) à partir de la substitution (III.2.2); nous avons

$$\left. \begin{aligned}
Q_{T_1 T_2} &= 0 \\
Q_{T_1 T_3} &= 0 \\
Q_{T_1 T_4} &= 0 \\
Q_{T_1 T_5} &= 0
\end{aligned} \right\} \text{ donnent } \left\{ \begin{aligned}
Q_{\chi T_2} &= 0 \\
Q_{\chi T_3} &= 0 \\
Q_{\chi T_4} &= 0 \\
Q_{\chi T_5} &= 0
\end{aligned} \right.
\tag{III.2.4}$$

$$Q_{T_2 T_3} = (Q_{T_1} + \alpha_2 Q_{\varphi}) \cdot Q_{T_3} = Q_{T_1 T_3} + \alpha_2 Q_{\varphi T_3} \text{ d'où } Q_{\varphi T_3} = 0$$

On a donc maintenant les relations suivantes:

$$\left. \begin{aligned}
Q_{T_2 T_3} &= 0 \\
Q_{T_2 T_4} &= 0 \\
Q_{T_2 T_5} &= 0
\end{aligned} \right\} \text{ donnent } \left\{ \begin{aligned}
Q_{\varphi T_3} &= 0 \\
Q_{\varphi T_4} &= 0 \\
Q_{\varphi T_5} &= 0
\end{aligned} \right.
\tag{III.2.5}$$

et puis

$$\begin{aligned}
Q_{T_3 T_4} &= (Q_{\chi} + \alpha_3 Q_{\varphi} + \beta_3 Q_{\omega}) \cdot Q_{T_4} = 0 \\
&= Q_{\chi T_4} + \alpha_3 Q_{\varphi T_4} + \beta_3 Q_{\omega T_4} = 0 \text{ d'où } Q_{\omega T_4} = 0.
\end{aligned}$$

Nous avons donc

$$\left. \begin{aligned}
Q_{T_3 T_4} &= 0 \\
Q_{T_3 T_5} &= 0
\end{aligned} \right\} \text{ donnent } \left\{ \begin{aligned}
Q_{\omega T_4} &= 0 \\
Q_{\omega T_5} &= 0
\end{aligned} \right.
\tag{III.2.6}$$

et finalement

$$Q_{T_4 T_5} = 0 \quad \text{donne} \quad Q_{by T_5} = 0
\tag{III. 2.7}$$

Nous avons résumé les résultats obtenus au tableau (III.2.8) ci-après où les coefficients de corrélation indiqués par une croix doivent être nuls.

Q_{ij}	κ	φ	ω	by	bz
T_1					
T_2	×				
T_3	×	×			
T_4	×	×	×		
T_5	×	×	×	×	

(III.2.8)

Nous obtenons ainsi 10 conditions, et comme la substitution (III.2.2) comporte 10 paramètres, le problème peut être résolu. En appliquant de nouveau le calcul symbolique des coefficients de poids, les équations (III.2.8) donnent lieu au système (III.2.9) ci-après où les coefficients $\alpha_2, \dots, \delta_5$ figurant à la première ligne doivent être multipliés par les coefficients de poids et de corrélation indiqués au tableau.

Connaissant ainsi les coefficients $\alpha_2, \dots, \delta_5$ des équations (III.2.2), nous allons en déduire la matrice inverse, afin de pouvoir calculer $\kappa, \varphi, \omega, by, bz$ en fonction de T_1, \dots, T_5 . Cette matrice inverse est donnée par les équations (III.2.10) ci-après où tous les termes ε_{ij} situés au-dessus de la diagonale principale sont nuls.

$d\kappa_B^{gr}$	$= + \varepsilon_{11} T_1 + \varepsilon_{12} T_2 + \varepsilon_{13} T_3 + \varepsilon_{14} T_4 + \varepsilon_{15} T_5$	
$d\varphi_B^{gr}$	$= + \varepsilon_{21} T_1 + \varepsilon_{22} T_2 + \varepsilon_{23} T_3 + \varepsilon_{24} T_4 + \varepsilon_{25} T_5$	
$d\omega_B^{gr}$	$= + \varepsilon_{31} T_1 + \varepsilon_{32} T_2 + \varepsilon_{33} T_3 + \varepsilon_{34} T_4 + \varepsilon_{35} T_5$	(III.2.10)
dby_B^{mm}	$= + \varepsilon_{41} T_1 + \varepsilon_{42} T_2 + \varepsilon_{43} T_3 + \varepsilon_{44} T_4 + \varepsilon_{45} T_5$	
dbz_B^{mm}	$= + \varepsilon_{51} T_1 + \varepsilon_{52} T_2 + \varepsilon_{53} T_3 + \varepsilon_{54} T_4 + \varepsilon_{55} T_5$	

Nous avons ainsi tout ce qu'il nous faut pour passer des anciennes variables $\kappa_B, \varphi_B, \omega_B, by_B, bz_B$ aux nouvelles T_1, \dots, T_5 et vice versa. D'après (III.1.3), un ensemble de 5 valeurs k_1, \dots, k_5 , non toutes nulles, donne lieu à des valeurs bien déterminées de T_1, \dots, T_5 et par conséquent aussi de $d\kappa_B, d\varphi_B, d\omega_B, dby_B, dbz_B$; nous dirons qu'il définit *un état de l'image plastique*.

§ 3. Introduction de l'orientation absolue

Supposons qu'on calcule l'un quelconque des états en choisissant k_1, \dots, k_5 . On a dans ce cas affaire à des valeurs bien déterminées de $d\kappa_B, \dots, dbz_B$ qu'on a calculées à partir de T_1, \dots, T_5 . On peut dès lors calculer pour chacun des n points de l'image plastique les déformations $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$. Ce sont donc les *erreurs vraies* des coordonnées de ces points, exprimées en fonction des *erreurs vraies* $d\kappa_B, \dots, dbz_B$ des éléments de l'orientation relative. Mais ces déformations $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$ peuvent ensuite être éliminées partiellement par un changement convenable de l'orien-

(III.2.9)

	α_2	α_3	β_3	α_4	β_4	γ_4	α_5	β_5	γ_5	δ_5	1	
$Q_x T_2$	$Q_{x\varphi}$	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	Q_{xx}	$= 0$
$Q_x T_3$	\cdot	$Q_{x\varphi}$	$Q_{x\omega}$	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	Q_{xx}	$= 0$
$Q_\varphi T_3$	\cdot	$Q_{\varphi\varphi}$	$Q_{\varphi\omega}$	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{\varphi x}$	$= 0$
$Q_x T_4$	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{x\varphi}$	$Q_{x\omega}$	Q_{xby}	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	Q_{xx}	$= 0$
$Q_\varphi T_4$	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{\varphi\varphi}$	$Q_{\varphi\omega}$	$Q_{\varphi by}$	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{x\varphi}$	$= 0$
$Q_\omega T_4$	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{\omega\varphi}$	$Q_{\omega\omega}$	$Q_{\omega by}$	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{\omega x}$	$= 0$
$Q_x T_5$	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{x\varphi}$	$Q_{x\omega}$	Q_{xby}	Q_{xbz}	Q_{xx}	$= 0$
$Q_\varphi T_5$	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{\varphi\varphi}$	$Q_{\varphi\omega}$	$Q_{\varphi by}$	$Q_{\varphi bz}$	$Q_{\varphi x}$	$= 0$
$Q_\omega T_5$	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{\omega\varphi}$	$Q_{\omega\omega}$	$Q_{\omega by}$	$Q_{\omega bz}$	$Q_{\omega x}$	$= 0$
$Q_{by} T_5$	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	$Q_{by\varphi}$	$Q_{by\omega}$	$Q_{by by}$	$Q_{by bz}$	$Q_{by x}$	$= 0$

tation absolue de l'image plastique. Nous voulons maintenant voir quels doivent être

- a) le changement d'échelle,
- b) les rotations,
- c) les translations

à donner à l'image plastique pour que les déformations résiduelles totales deviennent aussi petites que possible. Suivant ce qu'on entend par «aussi petites que possible» on a affaire à différentes solutions. Nous allons choisir celle qui, à notre avis, correspond le mieux aux conditions pratiques, *en séparant la planimétrie de l'altimétrie*. Introduisons les désignations suivantes pour les n points de l'image plastique:

Coordonnées initiales des n points, rapportées à leur centre de gravité P_0' (x_0', y_0', z_0')				
<hr style="width: 20%; margin: auto;"/>				
Orientation relative correcte.				
Echelle des coordonnées 1 : 1 Unité: 1 cm				(III.3.1)
N° P_1	x_1'	y_1'	z_1'	
⋮				
N° P_n	x_n'	y_n'	z_n'	

Coordonnées variées des n points, rapportées à leur centre de gravité P_0'' (x_0'', y_0'', z_0'')				
<hr style="width: 20%; margin: auto;"/>				
Orientation relative entachée des erreurs vraies				
$d\alpha_B, d\varphi_B, d\omega_B, dby_B, dbz_B$				
Echelle des coordonnées 1 : 1 Unité: 1 cm				(III.3.2)
N° P_1	x_1''	y_1''	z_1''	
⋮				
N° P_n	x_n''	y_n''	z_n''	

Etant donné que les erreurs résiduelles ne peuvent être minima que si les deux centres de gravité P_0' et P_0'' sont en coïncidence – ce qui est un résultat bien connu – nous introduisons dans (III.3.1) et (III.3.2) directement les coordonnées réduites au centre de gravité correspondant. Pour simplifier la programmation, nous laissons dans cette phase les coordonnées variées fixes et nous appliquerons aux coordonnées initiales les transformations mathématiques correspondant à l'orientation absolue de l'image plastique. Nous allons considérer successivement l'orientation absolue en planimétrie, puis en altimétrie.

a) *Planimétrie*

Au point de vue de l'ajustage de la planimétrie, l'image plastique doit subir une rotation $d\alpha$ autour de l'axe vertical passant par le centre de gravité P_0' et une modification d'échelle. En introduisant les coordonnées polaires s et α (voir figure III.1), nous obtenons

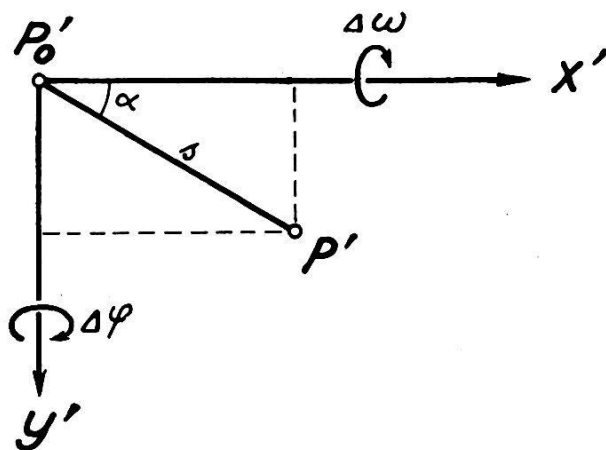


fig. III .1

$$\begin{aligned} x' &= s \cdot \cos \alpha & d_1 x' &= -s \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = -y' \cdot d\alpha \\ y' &= s \cdot \sin \alpha & d_1 y' &= +s \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = +x' \cdot d\alpha \end{aligned}$$

$\begin{aligned} d_1 x_i' &= -y_i' \cdot d\alpha \\ d_1 y_i' &= +x_i' \cdot d\alpha \end{aligned}$	(III.3.3)
--	-----------

Pour la modification de l'échelle, nous posons

$\begin{aligned} d_2 x_i' &= \lambda \cdot x_i' \\ d_2 y_i' &= \lambda \cdot y_i' \end{aligned}$	(III.3.4)
--	-----------

et les coordonnées transformées (x_i''', y_i''') après la rotation et la modification d'échelle sont ainsi

$\begin{aligned} x_i''' &= x_i' + \lambda \cdot x_i' - d\alpha \cdot y_i' \\ y_i''' &= y_i' + \lambda \cdot y_i' + d\alpha \cdot x_i' \end{aligned}$	(III.3.5)
--	-----------

Calculons maintenant les différences

$\begin{aligned} v_{x_i} &= x_i'' - x_i''' = -x_i' \cdot \lambda + y_i' \cdot d\alpha + (x_i'' - x_i') \\ v_{y_i} &= y_i'' - y_i''' = -y_i' \cdot \lambda - x_i' \cdot d\alpha + (y_i'' - y_i') \end{aligned}$	(III.3.6)
--	-----------

En posant

$$\boxed{x_i'' - x_i' = \varepsilon_{x_i} \quad y_i'' - y_i' = \varepsilon_{y_i}} \quad (\text{III.3.7})$$

les équations (III.3.6) deviennent

$$\boxed{\begin{aligned} v_{x_i} &= -x_i' \cdot \lambda + y_i' \cdot d\alpha + \varepsilon_{x_i} \\ v_{y_i} &= -y_i' \cdot \lambda - x_i' \cdot d\alpha + \varepsilon_{y_i} \end{aligned}} \quad (\text{III.3.8})$$

Nous devons maintenant calculer les termes absolus ε_{x_i} et ε_{y_i} . Comme nous avons dans la mémoire de la calculatrice les grandeurs x_i , y_i , δx_i , δy_i tandis que les coordonnées réduites aux centres de gravité P_0' et P_0'' nous manquent encore, nous procédons comme il suit:

1° Réduction au centre de gravité P_0'

X_i , Y_i = coordonnées initiales des n points

Centre de gravité P_0' (x_0' , y_0'):

$$\boxed{x_0' = \frac{1}{n} [x_i] \quad y_0' = \frac{1}{n} [y_i]} \quad (\text{III.3.9})$$

$$\boxed{\begin{aligned} x_i' &= x_i - x_0' \\ y_i' &= y_i - y_0' \end{aligned}}$$

Coordonnées réduites au centre de gravité P_0'

(III.3.10)

2° Réduction au centre de gravité P_0''

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i + \delta x_i \\ y_i + \delta y_i \end{array} \right\} \text{ coordonnées variées des } n \text{ points}$$

Centre de gravité P_0'' (x_0'' , y_0'')

$$\boxed{\begin{aligned} x_0'' &= \frac{1}{n} [x_i] + \frac{1}{n} [\delta x_i] \\ y_0'' &= \frac{1}{n} [y_i] + \frac{1}{n} [\delta y_i] \end{aligned}}$$

(III.3.11)

En posant maintenant

$$\boxed{\delta x_0 = \frac{1}{n} [\delta x_i] \quad \delta y_0 = \frac{1}{n} [\delta y_i]} \quad (\text{III.3.12})$$

et en tenant compte de (III.3.9), les équations (III.3.11) deviennent

$$\boxed{\begin{aligned} x_0'' &= x_0' + \delta x_0 \\ y_0'' &= y_0' + \delta y_0 \end{aligned}} \quad (\text{III.3.13})$$

et les coordonnées (x_i'', y_i'') , réduites au centre de gravité P_0'' , sont dès lors

$$\boxed{\begin{aligned} x_i'' &= (x_i + \delta x_i) - x_0'' = x_i - x_0' + \delta x_i - \delta x_0 \\ y_i'' &= (y_i + \delta y_i) - y_0'' = y_i - y_0' + \delta y_i - \delta y_0 \end{aligned}} \quad (\text{III.3.14})$$

En posant alors

$$\boxed{\begin{aligned} (\delta x_i)_{\text{réd.}} &= \delta x_i - \delta x_0 = \delta x_i - \frac{1}{n} [\delta x_i] \\ (\delta y_i)_{\text{réd.}} &= \delta y_i - \delta y_0 = \delta y_i - \frac{1}{n} [\delta y_i] \end{aligned}} \quad (\text{III.3.15})$$

Les équations (III.3.14) deviennent

$$\boxed{\begin{aligned} x_i'' &= x_i - x_0' + (\delta x_i)_{\text{réd.}} \\ y_i'' &= y_i - y_0' + (\delta y_i)_{\text{réd.}} \end{aligned}} \quad (\text{III.3.16})$$

En considérant maintenant les équations (III.3.7), (III.3.10) et (III.3.16), nous obtenons

$$\boxed{\varepsilon_{x_i} = x_i'' - x_i' = (\delta x_i)_{\text{réd.}} \quad \varepsilon_{y_i} = y_i'' - y_i' = (\delta y_i)_{\text{réd.}}} \quad (\text{III.3.17})$$

Les grandeurs ε_{x_i} et ε_{y_i} se calculent donc simplement par réduction des δx_i et δy_i ; nous les introduisons ensuite dans les équations (III.3.8).

Afin de pouvoir appliquer par analogie les formules de la méthode des moindres carrés aux équations (III.3.8), nous nous proposons de calculer les inconnues λ et $d\alpha$ de façon qu'on ait

$$\boxed{[v_{x_i} v_{x_i}] + [v_{y_i} v_{y_i}] = \text{minimum.}} \quad (\text{III.3.18})$$

Dans ces conditions, les relations (III.3.8) jouent le rôle d'équations aux erreurs donnant lieu aux équations normales suivantes:

$$\begin{cases} [x_i' x_i'] + [y_i' y_i'] \} \lambda - [x_i' \varepsilon_{x_i}] - [y_i' \varepsilon_{y_i}] = 0 \\ [x_i' x_i'] + [y_i' y_i'] \} d\alpha + [y_i' \varepsilon_{x_i}] - [x_i' \varepsilon_{y_i}] = 0 \end{cases} \quad (\text{III.3.19})$$

En introduisant ensuite ces valeurs de λ et de $d\alpha$ dans les équations (III.3.8), on trouve les valeurs de v_{x_i} et v_{y_i} pour $i = 1, 2, \dots, n$.

Finalement nous calculerons encore pour chaque état la valeur de

$$f_s = \sqrt{\frac{[v_{x_i} v_{x_i}] + [v_{y_i} v_{y_i}]}{n}} \quad (\text{III.3.20})$$

qui caractérise en quelque sorte la précision planimétrique de l'état calculé.

b) Altimétrie

Le changement d'échelle que nous venons d'introduire modifie naturellement aussi les altitudes. Il transforme les z_i' (voir équations III.3.1 et III.3.4) en

$$(1 + \lambda) z_i' = z_i'' + \lambda \cdot z_i' \quad (\text{III.3.21})$$

D'autre part, nous devons encore introduire les rotations $\Delta\omega$ et $\Delta\varphi$ autour des axes X' et Y' (voir figure III.1) ainsi que la translation verticale Δz . En tenant compte de toutes ces variations, la cote initiale z_i' devient z_i''' et nous avons

$$z_i''' = z_i' + \lambda \cdot z_i' + \Delta z - y_i' \cdot \Delta\omega + x_i' \cdot \Delta\varphi \quad (\text{III.3.22})$$

En posant maintenant

$$v_{z_i} = z_i'' - z_i''' \quad (\text{III.3.23})$$

nous obtenons

$$v_{z_i} = -\Delta z + y_i' \cdot \Delta\omega - x_i' \cdot \Delta\varphi + \{z_i'' - z_i' - \lambda \cdot z_i'\} \quad (\text{III.3.24})$$

Mais nous avons

$$\begin{aligned} \delta z_0 &= \frac{1}{n} [\delta z_i] \quad (\delta z_i)_{\text{réd.}} = \delta z_i - \delta z_0 \\ z_i'' - z_i' &= (\delta z_i)_{\text{réd.}} \end{aligned} \quad (\text{III.3.25})$$

et en posant

$$\boxed{\varepsilon_{z_i} = (\delta z_i)_{\text{réd.}} - \lambda \cdot z_i'} \quad (\text{III.3.26})$$

l'équation (III.3.24) devient

$$\boxed{v_{z_i} = -\Delta z + y_i' \cdot \Delta\omega - x_i' \cdot \Delta\varphi + \varepsilon_{z_i}} \quad (\text{III.3.27})$$

Comme précédemment nous interprétons maintenant les relations (III.3.27) comme équations aux erreurs (ce qui n'est rien d'autre qu'une convention) et les équations normales deviennent ainsi

$$\boxed{\begin{aligned} n \cdot \Delta z - [\varepsilon_{z_i}] &= 0 \\ + [y_i' y_i'] \cdot \Delta\omega - [y_i' x_i'] \cdot \Delta\varphi + [y_i' \cdot \varepsilon_{z_i}] &= 0 \\ - [y_i' x_i'] \cdot \Delta\omega + [x_i' x_i'] \cdot \Delta\varphi - [x_i' \cdot \varepsilon_{z_i}] &= 0 \\ \varepsilon_{z_i} &= (\delta z_i)_{\text{réd.}} - \lambda \cdot z_i' \end{aligned}} \quad (\text{III.3.28})$$

La résolution de ces trois équations nous donne alors

$$\boxed{\begin{aligned} \Delta &= [y_i' y_i'] \cdot [x_i' x_i'] - [y_i' x_i'] \cdot [y_i' x_i'] & (\text{III.3.29}) \\ \Delta\omega &= \frac{1}{\Delta} \left\{ -[x_i' x_i'] [y_i' \cdot \varepsilon_{z_i}] + [y_i' x_i'] \cdot [x_i' \cdot \varepsilon_{z_i}] \right\} & (\text{III.3.30}) \\ \Delta\varphi &= \frac{1}{\Delta} \left\{ +[y_i' y_i'] \cdot [x_i' \cdot \varepsilon_{z_i}] - [y_i' x_i'] \cdot [y_i' \cdot \varepsilon_{z_i}] \right\} & (\text{III.3.31}) \\ \Delta z &= + \frac{[\varepsilon_{z_i}]}{n} & (\text{III.3.32}) \end{aligned}}$$

Une fois la valeur des inconnues calculée, on obtient les v_{z_i} à l'aide des équations (III.3.27) et nous déterminons pour finir la moyenne quadratique

$$\boxed{f_z = \sqrt{\frac{[v_z v_z]}{n}}} \quad (\text{III.3.33})$$

pour chaque état.

§ 4. Influence des différentes variables d'orientation
sur la déformation de l'image plastique

Nous voulons maintenant étudier séparément l'influence de chacune des variables d'orientation sur la déformation de l'image plastique. Reprenons dans ce but les formules (III.2.10); en remarquant – comme déjà indiqué plus haut – que tous les coefficients au-dessus de la diagonale principale sont nuls, ces équations deviennent

$$\begin{aligned}
 dx_B^{gr} &= + \varepsilon_{11} T_1 \\
 d\varphi_B^{gr} &= + \varepsilon_{21} T_1 + \varepsilon_{22} T_2 \\
 d\omega_B^{gr} &= + \varepsilon_{31} T_1 + \varepsilon_{32} T_2 + \varepsilon_{33} T_3 \\
 (dby_B)_{mm} &= + \varepsilon_{41} T_1 + \varepsilon_{42} T_2 + \varepsilon_{43} T_3 + \varepsilon_{44} T_4 \\
 (dbz_B)_{mm} &= + \varepsilon_{51} T_1 + \varepsilon_{52} T_2 + \varepsilon_{53} T_3 + \varepsilon_{54} T_4 + \varepsilon_{55} T_5
 \end{aligned}
 \tag{III.4.1}$$

Exprimons alors les variables T_1, T_2, \dots, T_5 en fonction de k_1, k_2, \dots, k_5 en utilisant les formules (III.1.3)

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{k_1}{\sqrt{[k^2]}} \cdot \mu_{T_1} \\
 &\vdots \\
 T_5 &= \frac{k_5}{\sqrt{[k^2]}} \cdot \mu_{T_5}
 \end{aligned}
 \tag{III.1.3}$$

Les équations (III.4.1) deviennent ainsi, si l'on chasse le dénominateur $\sqrt{[k^2]}$: voir équations (III.4.2) et (III.4.3) page suivante.

Sachant que ce n'est que le rapport entre les grandeurs k_1, \dots, k_5 qui intervient effectivement dans le calcul de T_1, \dots, T_5 (voir les équations III.1.3) et par conséquent aussi dans celui de $dx, d\varphi, d\omega, dby, dbz$, nous pouvons choisir l'une d'elles arbitrairement. Nous en profitons pour donner aux équations (III.4.3) la forme des équations aux poids de la théorie des erreurs, ce qui a pour avantage de permettre d'utiliser à nouveau une partie déjà existante du programme.

Nous désignerons les solutions pour lesquelles une seule des différentielles $dx, d\varphi, d\omega, dby, dbz$ est différente de zéro par états fondamentaux, et nous aurons donc 5 de ces états à considérer. Désignons les membres de gauche des équations (III.4.3) par c_1, c_2, \dots, c_5 . Pour trouver les états fondamentaux, nous devons attribuer à ces constantes les valeurs indiquées au tableau (III.4.4), qui nous donne du reste aussi les valeurs correspondantes des k_i .

$$\begin{aligned}
& + \sqrt{[k^2]} \cdot dx^{gr} = + (\varepsilon_{11} \mu_{T_1}) \cdot k_1 \\
& + \sqrt{[k^2]} \cdot d\varphi^{gr} = + (\varepsilon_{21} \mu_{T_1}) \cdot k_1 + (\varepsilon_{22} \mu_{T_2}) \cdot k_2 \\
& + \sqrt{[k^2]} \cdot d\omega^{gr} = + (\varepsilon_{31} \mu_{T_1}) \cdot k_1 + (\varepsilon_{32} \mu_{T_2}) \cdot k_2 + (\varepsilon_{33} \mu_{T_3}) \cdot k_3 \\
& + \sqrt{[k^2]} \cdot dby_{mm} = + (\varepsilon_{41} \mu_{T_1}) \cdot k_1 + (\varepsilon_{42} \mu_{T_2}) \cdot k_2 + (\varepsilon_{43} \mu_{T_3}) \cdot k_3 + (\varepsilon_{44} \mu_{T_4}) \cdot k_4 \\
& + \sqrt{[k^2]} \cdot dbz_{mm} = + (\varepsilon_{51} \mu_{T_1}) \cdot k_1 + (\varepsilon_{52} \mu_{T_2}) \cdot k_2 + (\varepsilon_{53} \mu_{T_3}) \cdot k_3 + (\varepsilon_{54} \mu_{T_4}) \cdot k_4 + (\varepsilon_{55} \mu_{T_5}) \cdot k_5
\end{aligned}
\tag{III.4.2}$$

En divisant chacune de ces équations par le coefficient de la diagonale principale, nous obtenons

$$\begin{aligned}
\frac{\sqrt{[k^2]}}{(\varepsilon_{11} \mu_{T_1})} \cdot dx^{gr} &= + 1 \cdot k_1 \\
\frac{\sqrt{[k^2]}}{(\varepsilon_{22} \mu_{T_2})} \cdot d\varphi^{gr} &= + \frac{\varepsilon_{21} \mu_{T_1}}{\varepsilon_{22} \mu_{T_2}} \cdot k_1 + 1 \cdot k_2 \\
\frac{\sqrt{[k^2]}}{(\varepsilon_{33} \mu_{T_3})} \cdot d\omega^{gr} &= + \frac{\varepsilon_{31} \mu_{T_1}}{\varepsilon_{33} \mu_{T_3}} \cdot k_1 + \frac{\varepsilon_{32} \mu_{T_2}}{\varepsilon_{33} \mu_{T_3}} \cdot k_2 + 1 \cdot k_3 \\
\frac{\sqrt{[k^2]}}{(\varepsilon_{44} \mu_{T_4})} \cdot dby_{mm} &= + \frac{\varepsilon_{41} \mu_{T_1}}{\varepsilon_{44} \mu_{T_4}} \cdot k_1 + \frac{\varepsilon_{42} \mu_{T_2}}{\varepsilon_{44} \mu_{T_4}} \cdot k_2 + \frac{\varepsilon_{43} \mu_{T_3}}{\varepsilon_{44} \mu_{T_4}} \cdot k_3 + 1 \cdot k_4 \\
\frac{\sqrt{[k^2]}}{(\varepsilon_{55} \mu_{T_5})} \cdot dbz_{mm} &= + \frac{\varepsilon_{51} \mu_{T_1}}{\varepsilon_{55} \mu_{T_5}} \cdot k_1 + \frac{\varepsilon_{52} \mu_{T_2}}{\varepsilon_{55} \mu_{T_5}} \cdot k_2 + \frac{\varepsilon_{53} \mu_{T_3}}{\varepsilon_{55} \mu_{T_5}} \cdot k_3 + \frac{\varepsilon_{54} \mu_{T_4}}{\varepsilon_{55} \mu_{T_5}} \cdot k_4 + 1 \cdot k_5
\end{aligned}
\tag{III.4.3}$$

(III.4.4)

Etats fondamentaux	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
I	+ 1	0	0	0	0
II	0	+ 1	0	0	0
III	0	0	+ 1	0	0
IV	0	0	0	+ 1	0
V	0	0	0	0	+ 1
Etats fondamentaux					
I	$(k_1)_I$	$(k_2)_I$	$(k_3)_I$	$(k_4)_I$	$(k_5)_I$
II	$(k_1)_{II}$	$(k_2)_{II}$	$(k_3)_{II}$	$(k_4)_{II}$	$(k_5)_{II}$
III	$(k_1)_{III}$	$(k_2)_{III}$	$(k_3)_{III}$	$(k_4)_{III}$	$(k_5)_{III}$
IV	$(k_1)_{IV}$	$(k_2)_{IV}$	$(k_3)_{IV}$	$(k_4)_{IV}$	$(k_5)_{IV}$
V	$(k_1)_V$	$(k_2)_V$	$(k_3)_V$	$(k_4)_V$	$(k_5)_V$

Connaissant la valeur des paramètres pour les états fondamentaux, nous pouvons en déduire n'importe quel état moyennant une combinaison linéaire des états fondamentaux. En effet, si m_1, \dots, m_5 désignent 5 nouveaux paramètres, nous pouvons calculer les valeurs k_1, \dots, k_5 d'un état quelconque à l'aide des formules

$$\begin{aligned}
 k_1 &= m_1 (k_1)_I + m_2 (k_1)_{II} + \dots + m_5 (k_1)_V \\
 k_2 &= m_1 (k_2)_I + m_2 (k_2)_{II} + \dots + m_5 (k_2)_V \\
 &\vdots \\
 k_5 &= m_1 (k_5)_I + m_2 (k_5)_{II} + \dots + m_5 (k_5)_V
 \end{aligned}
 \tag{III.4.5}$$

où m_1, \dots, m_5 peuvent avoir des valeurs quelconques, non toutes nulles. Ici encore *seul le rapport* de ces différentes valeurs intervient effectivement dans le calcul des différentielles $d\alpha, \dots, dbz$. Les valeurs de m_1, \dots, m_5 définissent en quelque sorte l'importance de chacun des termes $d\alpha, \dots, dbz$ dans l'état à calculer. Ainsi, en prenant par exemple

$$m_1 = + 1 \quad m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 0$$

nous obtenons

$$d\alpha \neq 0 \quad d\varphi = d\omega = dby = dbz = 0,$$

ce qui nous donne l'état fondamental I. Si l'on choisit par contre

$$m_1 = + 1 \quad m_2 = + 1 \quad m_3 = m_4 = m_5 = 0,$$

on aura

$$d\alpha \neq 0 \quad d\varphi \neq 0 \quad d\omega = dby = dbz = 0$$

et ainsi de suite. Les valeurs de m_1, \dots, m_5 pour les différents états à calculer sont fournis à la calculatrice par une bande perforée.

§ 5. Exécution des calculs sur Zebra avec le programme N° 403.45

**Calcul de la déformation de l'image plastique
avant et après l'orientation absolue**

Manipulations

Résultats uniquement au téléscripneur

Le programme N° 403.45 utilise les résultats contenus dans la machine après le calcul avec le programme N° 401.4. Il faut donc toujours procéder comme il suit:

1° Effectuer les calculs préliminaires avec le programme N° 401.4.

2° Une fois les calculs avec le programme N° 401.4 terminés (Stop dynamique), *introduire le programme N° 403.45 par Clear et Start*. Dès que ce programme a été lu, la machine commence à calculer. Il faut alors choisir la position des clefs U1, U2 et U3.

3° *Choix de la position des clefs U1 et U2 pour l'impression.*

Normalement $U1 = 0 \quad U2 = 1$

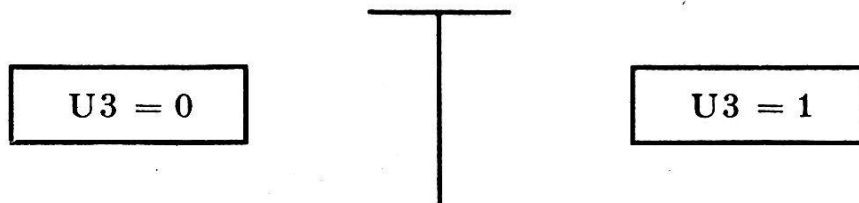
{ les résultats intermédiaires en virgule flottante ne sont pas imprimés.

Si $U1 = 1$ et $U2 = 0$ Impression des résultats intermédiaires.

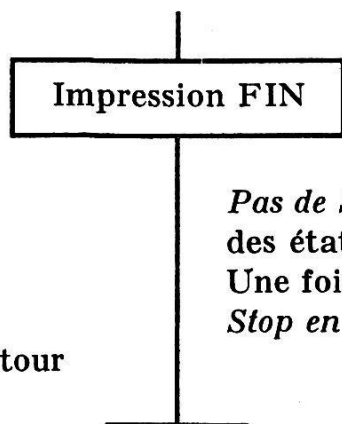
4° *Placer la bande des états sous le lecteur (pas de Start!)*

<i>Bande des états</i>	
	$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} + i = \text{Numéro d'ordre du 1er état à calculer} \\ + r = \text{Nombre d'états à calculer} \end{array} \right.$
	+ #
Etat 1	$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_5 \end{array} \right.$
	En passant d'un état au suivant, le numéro d'ordre augmente automatiquement d'une unité. Le nombre r des états à calculer n'est pas limité.
	+ #
Etat 2	$\left\{ \begin{array}{l} m_1' \\ m_2' \\ \vdots \\ m_5' \end{array} \right.$
	+ #
	⋮

5° Tout de suite après 4° choisir la position de U3.



La machine exécute tous les calculs préliminaires du programme N° 403.45. Les résultats sont imprimés ou non suivant la position des clefs U1 et U2; voir sous 3°. Une fois ces calculs préliminaires terminés



Stop dynamique en Q95z

Dial *i* Stop.
Dial *r* Lecture bande.
Calcul des *r* états puis retour en Q95z.

Pas de Stop. Lecture de la bande des états, calcul et impression. Une fois les *r* états calculés Stop en Q95z.

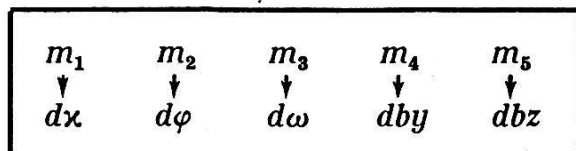
Remarques concernant la bande des états

Lorsqu'on a $U3 = 1$, la bande des états commence par

- + *i* = Numéro d'ordre du 1^{er} état à calculer
- + *r* = Nombre d'états à calculer
- + #

Si l'on a par contre $U3 = 0$, ces deux grandeurs sont introduites par Dial; voir plus haut.

La bande numérique des états permet d'influencer la valeur numérique des différentielles $d\chi, \dots, dbz$. Chacun des paramètres m_1, m_2, \dots, m_5 n'influence que l'une des variables $d\chi, d\varphi, d\omega, dby, dbz$, et l'association s'opère suivant le schéma



Les paramètres m_1, m_2, \dots, m_5 ne doivent pas tous être nuls. Si l'un d'eux est nul, la différentielle de la variable d'orientation qui lui est associée suivant le schéma ci-dessus est également nulle. Les paramètres m_1, \dots, m_5 peuvent être positifs ou négatifs. Il n'y a que leur rapport

qui intervient dans le calcul de dx, \dots, dbz ; leur valeur est uniquement limitée par le gabarit d'impression qui est

Gabarit d'impression des m_i
+ 1234.1

Le nombre r des états à calculer n'est pas limité.

§ 6. Combinaison des programmes N° 401.4 et N° 403.45

Programme N° 404.1

Afin de faciliter l'utilisation des programmes N° 401.4 et 403.45, nous les avons réunis en un seul qui porte le N° 404.1. Avec ce dernier les calculs s'effectuent comme il suit:

Calculs avec le programme N° 404.1

Bande numérique

Même préparation que pour le programme N° 400.10, mais la bande préliminaire et la bande principale doivent être réunies en une seule.

Manipulations

Sortie des résultats au télécriteur.

1° Introduction de la première partie du programme par *Clear et Start. Stop.*

2° Introduction de la bande numérique par *Start.*

3° Une fois la bande numérique complètement lue, placer la seconde partie du programme sous le lecteur (pas de *Start*) et choisir $U1 = 0$
 $U2 = 1$ $U3 = 1$.

4° Une fois la première partie des calculs terminée, la machine lit *automatiquement* la seconde partie du programme placée sous le lecteur. Exécution de la deuxième partie des calculs. Pendant l'exécution des calculs placer la bande des états sous le lecteur (pas de *Start*). Ces calculs étant terminés, la machine imprimera *FIN* et prendra *automatiquement* les r états les uns après les autres. Elle exécute tous les calculs et stoppe finalement en Q95z.

Remarque

Si l'on sait d'avance quels états on aura à calculer, on les ajoutera

avec $\left\{ \begin{array}{l} + i \\ + r \\ + \# \end{array} \right\}$ à la fin de la bande programme. Les opérations

mentionnées sous 3° étant alors faites, la suite est entièrement automatique.

§ 7. Exemple numérique

Nous donnons ci-après un exemple numérique calculé avec le programme N° 404.1. D'autres exemples et des conclusions d'ordre pratique sont indiqués dans [3].

§ 8. Liste des publications consultées

- [1] *W. K. Bachmann*, Calcul de la déformation de l'image plastique en photogrammétrie. Publication N° 19 de l'EPUL, 1951.
- [2] *W. K. Bachmann*, Théorie et compensation des triangulations aériennes. 1946, épuisé.
- [3] *W. K. Bachmann*, Méthode numérique d'orientation de vues aériennes quelconques dans un stéréorestituteur. Publication N° 76 EPUL, 1963.

Application de la théorie de l'équivalence en géodésie et en statique

Par *A. Ansermet*

Anmerkung der Redaktion

Das Problem der Äquivalenz ist von mehreren Autoren bereits vor Jahrzehnten in der Literatur behandelt worden. Dabei waren sie sich – wie es heute scheint – nicht bewußt, daß sie den Begriff der Äquivalenz in verschiedener Weise definieren, so daß jede Publikation eines einzelnen Autors für sich richtig, jedoch mit analogen Publikationen anderer Autoren nicht vergleichbar ist. – Es ist ein Verdienst von Professor Ansermet, im folgenden Artikel diesen Umstand aufzudecken und insbesondere im dritten Beispiel zu zeigen, daß bei Vorliegen von Nebenbedingungen die Zahl der frei wählbaren Variablen geringer ist als ohne diese Nebenbedingungen. Mag diese Tatsache auch selbstverständlich erscheinen, so wird sie doch von anderen Autoren nirgends erwähnt.

Professor Ansermet ist auf die Frage der Äquivalenz beim Studium statischer Probleme gestoßen. Das Problem der Äquivalenz wurde in den letzten Jahren in der geodätischen Literatur seltener als früher behandelt. Es dürfte beim Studium von Satellittriangulationen erneut eine Rolle spielen

F. Kobold

L'application de cette théorie, planimétriquement ou spatialement, avait donné lieu, dans notre numéro de mars 1960, à un article assez succinct (voir [4]). C'est un vaste problème susceptible d'être étendu aux systèmes hyperstatiques articulés («Stabfachwerke») en vue du calcul des ellipses et ellipsoïdes de déformation. Il y a en effet une corrélation étroite avec les compensations de mesures linéaires; c'est ce qu'un auteur exprima sous la forme: «Im dreidimensionalen Raum stimmen der einknotige, statisch beliebig unbestimmte Stabverband und der zugehörige überbestimmte Bogenschnitt völlig überein» ([2], p. 104). Ce ne sont plus les coordonnées des sommets d'un réseau qui varient, mais celles des nœuds d'un système; les côtés déviennent des barres, et grâce à la réalisation de l'équivalence on peut substituer à un système de n équations