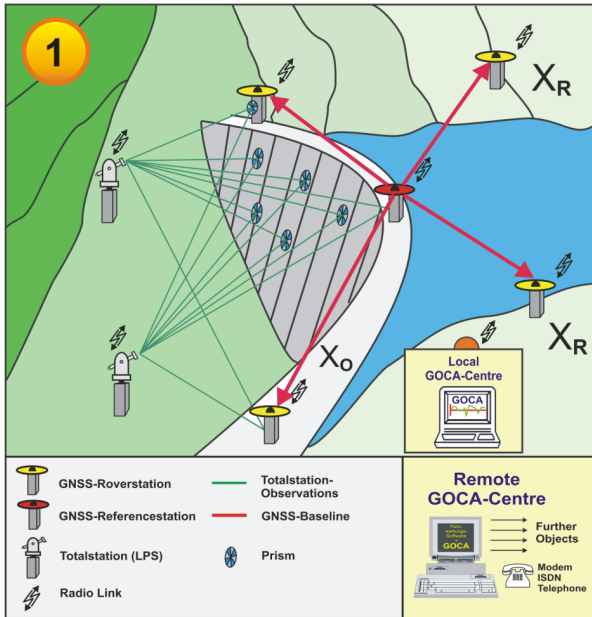




GOCA GNSS/LPS/LS Online Control and Alarm System



University of Applied Sciences Karlsruhe, Germany



Zielsetzung und Anwendungsspektrum: GOCA befasst sich unter Einsatz des globalen Satellitennavigationssystems (GNSS), d.h. GPS/GLONASS/GALILEO-Empfänger als erste, sowie lokaler terrestrischer Positionierungssysteme (LPS) als weitere Sensorkomponente mit der Echtzeitüberwachung von Bewegungen der Erdoberfläche. Neben dem Einsatz im Naturkatastrophenschutz (Hangrutschungsüberwachung, Bergbau, Hochwassermonitoring, etc.) ist GOCA auch in der Onlineüberwachung und Alarmierung sicherheitsempfindlicher Bauwerke (z.B. Dämme (Abb. 1), Schleusen, Brücken) und geotechnischer Anlagen (z.B. Deponien, Tunnel) einsetzbar.

GOCA Input-Schnittstelle (GKA-Schnittstelle): Die GOCA-Software übernimmt die von der Sensorsteuerungs- und Kommunikationssoftware (z.B. MONITOR@Trimble-GeoNav, Spider@Leica-Geosystems) zur Verfügung gestellten GNSS- und LPS-Sensordaten. Die GKA-Schnittstelle ist offen und kann bezüglich beliebiger Hardwaredaten bedient werden. Ein vollständiger GOCA-Datensatz „gka-String“ beinhaltet: 1. Kennung für Sensortyp, 2. Aufzeichnungszeitpunkt und 3. Sensordaten (z.B. GPS-Vektor ΔX und Kovarianz-Matrix C_x).

GOCA Systemanalyse und Schnittstellen: Sowohl die über die Ausgleichungsstufe 2 kontinuierlich erfassten Objektpunktzeitreihen $x_o(t)$ als auch die aus den Parameterschätzungen der Deformationsanalyse in Stufe 3 resultierenden Zustandsgrößen stehen als allgemeine Online- oder Postprocessing-Schnittstelle für den Forschungs- und Entwicklungsbereich der Systemanalyse-orientierten Deformationsanalyse (z.B. auf Basis von FEM-Modellen) zur Verfügung.

GOCA - Deformationsanalyse: Die grafikunterstützte und fernwartungsfähige Software GOCA (Abbildung 2) realisiert unter dreidimensionaler Ausgleichung der über die o.g. Hardwareneutrale Dateninputschnittstelle übermittelten hybriden Beobachtungsdaten I (GPS-Rohdaten, GNSS-Baselines, Totalstationsdaten, Nivellier- und Schlauchwaagenbeobachtungen) eines Sensorarrays eine klassische Deformationsanalyse. Bei Unterteilung der Arraykonfiguration in einen Stabil-

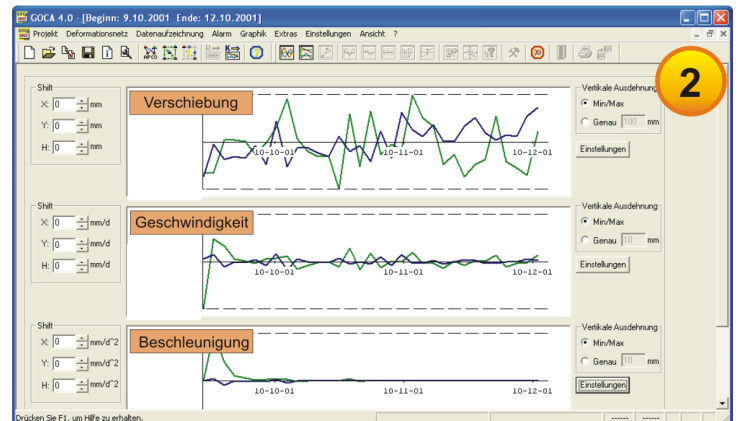
und einen Objektbereich umfasst diese eine online, near-online oder als Auswertung im Postprocessing durchzuführende Parameterschätzung in drei Stufen.

Stufe 1: Initialisierung des dreidimensionalen Referenzpunktrahmens x_r und der Kovarianzmatrix $C_{x,r}$ in strenger Kleinsten Quadrate Netzausgleichung von GNSS- und LPS-Daten (Strecken, Richtungen, Zenitdistanzen) im Datum der Referenzpunkte. Die Qualitätssicherung erfolgt mittels Datasnooping und Varianzkomponentenschätzung. Für aufeinander folgende Abtastungen ergeben sich hierbei die in Formeltabelle (2) angegebenen Beobachtungsgleichungen.

Mit der Kongruenz des Referenzpunktfeldes zwischen den Epochen ergeben sich die Koordinaten der Referenzpunkte und der auf das Referenzpunktfeld x_r georeferenzierten Objektpunkte. Die Referenzpunktfeldkongruenz wird statistisch analysiert und kann in diesem Kontext auch zur Deformationsintegrität von GNSS-Referenzstationsnetzen wie SAPOS und Ascos in Ansatz gebracht werden.

Stufe 2: Fortlaufende online Ausgleichung inklusive Datasnooping der GNSS-Baselines und der LPS-Daten im GOCA-Array unter dreidimensionaler Georeferenzierung der Objektpunkt-Einzelpositionen im Datum der Referenzpunkte. Die Formeltabelle 2 beschreibt exemplarisch die LPS-Richtungsbeobachtung einer Totalstation sowie den LPS-Höhenunterschied (Totalstationsbeobachtungen, Nivelliere oder Schlauchwaagen) zum Zeitpunkt t_k .

Stufe 3: Deformationsanalyse basierend auf den aus Stufe 2 hervorgehenden Objektpunktpositionen x_o und ihren Kovarianzmatrizen $C_{x,o}$. Dabei sind auf der Basis der einheitlichen M-Schätzung (Formelab. 3) unterschiedliche Parameterschätzmethoden realisiert, um aus den „ungenauen“ Einzelpositionen der Objektpunktzeitreihen eine Schätzung und statistische Bewertung (Signifikanznachweis) „genauer“ geometrischer Zustandsgrößen in der Form von **Objektpunktverschiebungen**, **geschwindigkeiten** und **beschleunigungen** zu erhalten. Neben der klassischen Kleinsten Quadrate Schätzung dienen robuste Schätzverfahren der Elimination von groben Fehlern. Als mathematische Modelle der Deformationsanalyse sind im online, near-online und Postprocessing Modus realisiert: **Verschiebungsschätzung** bzgl. Initialisierung (Epoche 2 zyklisch), **Verschiebungsschätzung** bzgl. definierter Epoche 1 (Epoche 2 zyklisch), **dynamische Verschiebungsschätzung** mit zyklischen Epochen 1 und 2, **Gleitender Mittelwert** und **Kalmanfilterung**. Darüber hinaus sind für Postprocessing-Anwendungen **Polynombasierte Trendschätzungen**, **Spline-Schätzungen** und **Sprungerkennung** implementiert.



Alarmierung: Basierend auf den Online-Deformationsanalysefunktionen Verschiebungsschätzung, Gleitender Mittelwert und Kalmanfilterung der Stufe 3 erfolgt die Alarmierung. Die aktuelle Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung wird dafür kontinuierlich mit den kritischen Werten verglichen. Bei Überschreitung der Grenzwerte, vorgegebener Wahrscheinlichkeiten oder auch bei signifikanter Veränderung des Parametervektors wird ein entsprechender Alarm-String erzeugt. Über das Modul GOCA-Alarm (Abb. 3) werden die Alarme den jeweiligen Verantwortlichen zugeteilt. Diese können dann per SMS oder über eine Werksirene informiert werden.

GOCA - Mathematisches Modell Ausgleichungsstufe 1

$$I_i + v_i = A_{Ri} \cdot x_{Ri} + A_{Oi} \cdot x_{Oi} \text{ und } C_i$$

$$I_j + v_j = A_{Rj} \cdot x_{Rj} + A_{Oj} \cdot x_{Oj} \text{ und } C_j$$

GOCA - Funktionale Modelle für LPS-Daten - Ausgleichungsstufen 1 und 2

$\tau_{ij}^k = \arctan\left(\frac{\Delta y_{ij}^k}{\Delta x_{ij}^k}\right) - \alpha$ LPS Richtungsbeobachtung τ_{ij}^k . Totalstation zur Zeit t_k zwischen Array-Punkten i und j. Lageposition $(\tilde{x}, \tilde{y})_j$ der Punkte $x_o(k)$ als wesentliche Unbekannte. Orientierung α als Hilfsunbekannte.

$\Delta H_{ij}^k = \Delta h_{ij}^k + \dots$ LPS Höhendifferenz-Beobachtung ΔH_{ij}^k . Totalstationen, Nivelliere und Schlauchwaagen. Zeit t_k zwischen Array-Punkten i und j. Ellipsoidische Höhenunterschiede Δh_{ij}^k der Punkte $x_o(k)$ als wesentliche Unbekannte.

$A \cdot \Delta y_{init} + B \cdot \Delta x_{init} + \Delta m \cdot \Delta h$ Lokale Datumparameter A, B und ein Messstabsfaktor Δm als Hilfsunbekannte.

GOCA - M-Schätzer - Stufe 3 (Deformationsparameterschätzung)

Prinzip: $\hat{x} = \arg \min_{\hat{x}} \sum_{i=1}^n \rho(\bar{v}_i) = \arg \min_{\hat{x}} \sum_{i=1}^n \rho((C_i^{-1} \cdot A_i \cdot \hat{x} - (C_i^{-1} \cdot l_i))_i) = \min |x|$ and $v = C_i^{-1} \cdot \bar{v}$

$\rho(\bar{v}_i) = v_i^2$ **Kleinstes Quadrate Schätzung (L2-Norm)** $\rho(\bar{v}_i) = |\bar{v}_i|$ **Robuste L1-Norm** $\rho(\bar{v}_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} v_i^2 & |v_i| \leq k \\ k |v_i| & |v_i| > k \end{cases}$ **Robuster Huber-Schätzer**

GOCA-Alarm

Alarm-Dialog der Alarmierungssoftware GOCA-Alarm. Alarmmanagement über Adressbuch und Zuweisung der entsprechenden Alarme an die verantwortliche Person. Alarmierung erfolgt über Werksirene oder per SMS.

3

Kalmanfilter kinematisches Modell

$$\bar{y}_{k+1} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{k+1} \\ \hat{\dot{x}}_{k+1} \\ \hat{\ddot{x}}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t_{k+1} & \frac{1}{2} \Delta t_{k+1}^2 \\ 0 & 1 & \Delta t_{k+1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{\dot{x}}_k \\ \hat{\ddot{x}}_k \end{bmatrix} = T \cdot \hat{y}_k$$

Zustandsvektor \bar{y}_{k+1} zum Zeitpunkt t_{k+1} mit Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung und kinematisches Modell $T \cdot \hat{y}_k$ mit der Annahme $\hat{\ddot{x}}_k = konst.$ über Δt .

Kalmanfilter Algorithmus

$$\bar{y}_{k+1} = T \cdot \hat{y}_k + S \cdot a$$

$$\hat{a}_{k+1} = (I - A_k) \cdot \bar{y}_{k+1}$$

$$\hat{y}_{k+1} = \bar{y}_{k+1} + K \hat{a}_{k+1}$$

Vorhersage des Zustandsvektors \bar{y}_{k+1} unter Einführung eines Systemrauschens C_w im stochastischen Modell. Berechnung der Innovation \hat{a}_{k+1} mit ihrer Kovarianzmatrix D aus den Messwerten l und der Vorhersage \bar{y}_{k+1} . Schätzen der Kalman-Gewichtsmatrix K um den optimalen Systemzustand \hat{y}_{k+1} zu erhalten.

$$C_{\bar{y},k+1} = T C_{\bar{y},k} T^T + S C_w S^T$$

$$D = Q_{\bar{y},k+1} + A_k Q_{\bar{y},k} A_k^T$$

$$K = Q_{\bar{y},k+1} A_k^T D^{-1}$$

$$Q_{\bar{y},k+1} = Q_{\bar{y},k} - K D K^T$$

5

GOCA-Team Karlsruhe - Projektleitung

Prof. Dr. Ing. Reiner Jäger

Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft

Studiengang Vermessung und Geomatik

Institut für angewandte Forschung (IaF)

Moltkestr. 30, D-76133 Karlsruhe

Tel.: ++ 49 721 925 2620 ; Fax: ++ 49 721 925 2591

Email: reiner.jaeger@goca.info



Vorhersage und Kalmanfilterung: Grundlage für die Vorhersage der Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung ist ein kinematisches Modell (Formeltabelle 4), das unter der Annahme einer konstanten Objektbeschleunigung über einen kurzen Zeitraum den zukünftigen Zustandsvektor berechnet. Der in Stufe 3 als robuster M-Schätzer realisierte Kalmanfilter (Formeltabelle 5) korrigiert dann unter Zuhilfenahme von aktuellen Messungen die Vorhersage und schätzt diese optimal. Da das Deformationsmodell von einer konstanten Objektbeschleunigung ausgeht, was nicht immer der Wirklichkeit entspricht, können die Störbeschleunigungen modelliert werden. Dies äußert sich im stochastischen Modell. Überschreitet der prädierte Zustandsvektor bestimmte kritische Werte kann alarmiert werden bevor tatsächlich ein kritischer Zustand erreicht wird.

GOCA Homepage: <http://www.goca.info>