



Integriertes Geomonitoring mit innovativer Sensorik, IT und Modellbildung am Referenzobjekt Fernsehturm Stuttgart

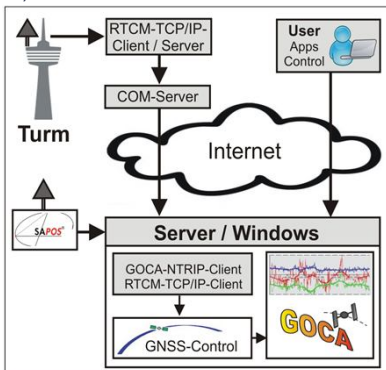
Reiner Jäger, FuE Projektleiter und Lyudmila Gorokhova, Wiss.Mitarbeiterin

Motivation

Mit dem Begriff Geomonitoring verbinden sich vielfältige Aufgaben in Geoforschung, Frühwarnung bei Naturkatastrophen sowie der Überwachung baulicher Anlagen. Im Geomonitoring FuE-Projekt GOCA (www.goca.info) erfolgen Entwicklungen neuer mathematischer Modelle, Multisensorsysteme und Kommunikationsstrukturen entlang der Geomonitoringkette (Datenerfassung, Modellierung, Reporting und Alarmmanagement). Einen ersten Schwerpunkt bilden die mathematischen Modelle der integrierten sowie der quasi-integrierten 3D-Ausgleichung, welche mit der gemeinsamen Parametrisierung von Sensordaten im Geometrie- und Schwererum im Gauß-Markov-Modell (GMM) einhergehen. Integrierte und quasi-integrierte 3D-Ausgleichung erweisen sich als Schlüsselmodelle zur parametrischen Integration aller Sensordatentypen im Geometrie- und Schwererum (Gravimetrie, GNSS, Totalstationen, Nivellement, Laserscanner, algorithmisch angepasste Navigationsensoren, optische Sensordaten bis hin zu SAR/INSAR). Beim integrierten 3D Geomonitoring (auch „Systemanalyse“, „Structural Health Monitoring (SHM)“) liegt der Fokus auf Finite-Element-Modelle (FEM) zur gemeinsamen Parametrisierung physikalischer und geometrischer Parameter. FEM sind der Schlüssel zur Beantwortung der Frage, ob sich ein Monitoringobjekt in einem „gesunden“ oder einem als Gefährdung einzustufenden physikalischen Zustand befindet. Für Bauwerksschwingungen (Brücken, Türme) führen sie auf inverse Eigenwert-/Vektor-Probleme, d.h. die Aufgabe, von den Änderungen der spektralen Eigenschaften des allgemeinen Eigenwertproblems auf Änderungen im physikalischen Zustand zu schließen. Der Fernsehturm Stuttgart wird bei den FuE als Referenzobjekt für die o.g. innovativen Methoden zur Früherkennung von Gefährdungspotenzialen von Strukturen (SHM) durch neue Algorithmen, Sensorsysteme und Informationstechnologien vorgestellt. Letzteres umfasst ein allgemeines Internet-basiertes Server-Client zum integrierten Geomonitoring von Objekten.

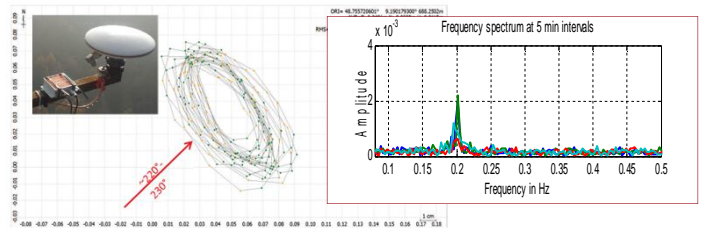
Fernsehturm Stuttgart Referenzobjekt für SHM

Nach den o.g. erfolgreichen Tests in 2015-16 startete in 2017 das FuE-Projekt „Der Stuttgarter Fernsehturm als Referenzobjekt für FuE und Erprobung innovativer Sensorsysteme, mathematischer Modelle, Algorithmen, Software und IT zur Früherkennung von Schäden und Gefährdungspotenzialen baulicher Anlagen „Structural Health Monitoring (SHM)“ mit neuer IT-Infrastruktur.



Links: IT-Struktur zum serverbasierten SH-Monitoring mit GNSS- und MEMS-Sensorik. **Rechts:** Stuttgarter Fernsehturm, Gesamthöhe ca. 217 m.

Hochschuleseitig werden die FuE im Rahmen der Projekte GOCA und NAVKA des Labors für GNSS & Navigation der HS Karlsruhe wahrgenommen. Neben dem Ingenieurbüro für An-gewandte Geodäsie, Photogrammetrie und Geoinformatik E. Messmer, Schwaikheim sind weitere Partner des FuE Konsortiums der SWR B.W. als Eigentümer des Fernsehturms, das Landesamt für Geobasisinformation und Landentwicklung (LGL) Karlsruhe als Dienstleister zum Raumbezug über SAPOS GNSS-Korrekturen sowie der B.W. IT-Dienstleister LF.NET.



Links oben: GNSS/MEMS-Installation. **Mitte:** Horizontale windinduzierte Grundschwingung, Umlaufdauer $T = 5 \text{ sec} = 1/0.2 \text{ Hz}$. **Amplitude 6 cm.** **Oben:** Frequenzspektrum, „Peak“ bei der Grundschwingung von 0.2 Hz bei der FFT-Analyse der Zeitreihe

Bei der Integration von GNSS-Daten mit den Daten von MEMS- sowie optischen Sensoren (Beschleunigungsmesser, Gyroskope, Kameras) sind wie - in der Multisensornavigation - auch im Geomonitoring insgesamt 15 Zustandsparameter $y(t)$ bei der Zustandsschätzung zu modellieren. Es gilt:

$$y(t) = [x^e \ y^e \ z^e \ | \ v_x^e \ v_y^e \ v_z^e \ | \ r^e \ p^e \ y^e \ | \ \dot{x}^e \ \dot{y}^e \ \dot{z}^e \ | \ \omega_{eb,x}^b \ \omega_{eb,y}^b \ \omega_{eb,z}^b]^T$$

Allerdings kann im Gegensatz zur Navigation in diesem Fall - über die Einführung von Ungleichungen zum Zustandsraum $y(t)$ - mit einer zugleich robusten SIMPLEX-basierten L1-Norm Parameterschätzung die Datenfusion essentiell stabilisiert werden. Bei der sensorischen Abtastung von Objekten in dynamischer Zustandsform liefern die FEM-basierten Schwinggleichungen mit $K(p_k) \cdot u(t) + C(p_c) \cdot \dot{u}(t) + M(p_m) \cdot \ddot{u}(t) = f(t)$ und $K(p_k) \cdot u(t) + C(p_c) \cdot \dot{u}(t) + M(p_m) \cdot \ddot{u}(t) = 0$ beim Structural Health Monitoring (SHM) über o.a. FEM-basierten Schwinggleichungen (links, erzwungene gedämpfte Schwingung mit Anregung $f(t)$, rechts gedämpfte freie Eigenschwingung) prinzipiell die Möglichkeit der Parametrisierung aller physikalischen Kenngrößen (Steifigkeitsmatrix K , Dämpfungsmatrix C und Massenmatrix M). Bei der statischen SHM ist, neben dem Knotenkraftvektor $f(t)$ nur die Steifigkeitsmatrix K einer Parametrisierung zugänglich. Im Fall der o.a. Eigenschwingung erhalten wir so im Zeitbereich den Zusammenhang

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \\ \ddot{u}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & I \cdot [\Delta t] & \frac{1}{2} I \cdot [\Delta t]^2 \\ 0 & I & I \cdot [\Delta t] \\ 0 & [-M(p_M)^{-1} \cdot K(p_K) \cdot \Delta t] & [I - M(p_M)^{-1} \cdot C(p_C) \cdot \Delta t] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t - \Delta t) \\ \dot{u}(t - \Delta t) \\ \ddot{u}(t - \Delta t) \end{bmatrix}$$

zwischen den Verschiebungen $u_C(t)$ und deren zeitlichen Ableitungen und den parametrisierten Matrizen (K, C, M) als Ausgangsbeziehung der Zustandsschätzung. Im spektralen Bereich erhalten wir unter Parametrisierung von Änderungen in den physikalische Parametern in Funktion von Änderungen in der Spektral- und Modalmatrix im Fall einer (ungedämpften) strukturellen Eigenschwingung

$$\Delta \omega_i^2(\Delta p_K, \Delta p_M) = u_i^T \cdot [dK(\Delta p_K) - \omega_i^2 \cdot dM(\Delta p_M)] \cdot u_i$$

$$\Delta u_i(\Delta p_K, \Delta p_M) = -\frac{u_i^T \cdot dM(\Delta p_M) \cdot u_i}{2} \cdot u_i + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\omega_j^2 - \omega_i^2} u_j^T \cdot [dK(\Delta p_K) - dM(\Delta p_M)] \cdot u_j \cdot u_j$$

als Ausgangsbeziehungen zur Lösung des betreffenden sog. inversen Eigenwertprobleme, d.h. dem Schluß von den Änderungen in den o.g. Eigenschwingungscharakterista (Spektral- und Modalmatrix) auf die Änderungen des Structural Health Zustands beim Geomonitoring.

