Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft University of Applied Sciences

Institut für Angewandte Forschung (IAF)

Hochschule Karlsruhe
Technik und Wirtschaft

Modell- und Sensorintegration zum integrierten 3D Geomonitoring in moderner Datenkommunikationsstruktur mit Anwendung auf den Stuttgarter Fernsehturm

Prof. Dr.-Ing. Reiner Jäger[1], Dipl.-Ing. Lyudmila Gorokhova[1] und Dipl.-Ing. Eberhard Messmer [2]

[1] Karlsruhe University of Applied Sciences, [2] Vermessungsbüro Dipl.-Ing. E. Messmer, Schwaikheim

Motivation

Mit dem Begriff Geomonitoring verbinden sich vielfältige Aufgaben in Geoforschung, Frühwarnung bei Naturkatastrophen sowie der Überwachung baulicher Anlagen. Die im Geomonitoring FuE-Projekt GOCA (www.goca.info) erfolgten Entwicklungen neuer mathema tischer Modelle, Multisensorsysteme und Kommunikationsstrukturen werden entlang der Geomonitoringkette (Datenerfassung, Modellierung, Reporting und Alarmmanagement) vorgestellt. 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 Schwereraum im Gauß-Markov-Modell (GMM) einhergehen. Integrierte und quasi-integrierte 3D-Ausgleichung erweisen sich als Schlüsselmodelle zur parametrischen Integration aller Sensordatentypen im Geometrie -und Schwereraum (Gravimetrie, GNSS, Totalstationen, Nivellement, Laserscanner, algorithmisch angepasste Navigationssensoren, optische Sensordaten bis hin zu SAR/INSAR). Die Beobachtungsgleichungen für aktuelle Sensoren werden behandelt. Im Abschnitt integriertes 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 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.

Integrierte und Quasi-Integrierte 3D Ausgleichung

Das integrierte 3D Gauß-Markov Modell (GMM) mit dem funktionalen Modell und dem stochastischen Modell $\mathbf{C}_l$ der Beobachtungen **l** , mit $\mathbf{l} = \mathbf{l}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c}))$
wird in der geodätischen Netzausgleichung als sogenanntes fixes Randwertproblem formuliert. D.h. innerhalb des Anteils des Schwerepotentials W

$$W(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c}) = V(\mathbf{p}\,|\,r(x,y,z),\lambda'(x,y,z,\lambda_0,\theta_0),\theta'(x,y,z,\lambda_0,\theta_0)) + \tfrac{1}{2}\omega_E^2\cdot(x^2+y^2)$$

tritt die geozentrische 3D-Position $\mathbf{x}^T$=(x,y,z) nicht als freie Unbekannte auf. Mit **c** werden in dem aus Gravitationspotential V und Zentrifugalpotential Z zusammengesetzten Schwerepotential W die fixen Parameter der Erdmasse M, die Gravitationskonstante G, die große Halbachse a des Referenzellipsoids, die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation sowie die Position des Pols des Gravitationspotentials V bezeichnet. Bei der o.a. Kugelkappenrepräsentation (Adjusted Spherical Cap Harmonic (ASCH)) des Gravitationspotenzials V dem bei zentral in das betreffende Gebiet gelegten Pol λ_0,θ_0 und der zugehörigen verallgemeinerten Legendrefunktion lasssen sich mit einer auf den Zentriwinkel beschränkten Kugelkappe mit weitaus weniger SCHA-Parameter **p** als im Fall des globalen harmonischen Standardmodells (SH) hohe regionale Auflösungen des Schwerepotentials V erzielen. Darüber hinaus können globale Kugelfunktionsmodelle in regionale ASCH-Koeffizienten abgebildet und im GMM der auf W basierten integrierten 3D-Ausgleichung als direkte Beobachtungen $\mathbf{p} = (\mathbf{C}'_{n(k),m}, \mathbf{S}'_{n(k),m})$ eingeführt werden. Im Geomonitoring wird die strenge integrierte 3D-Modell jedoch nur bei Einbeziehung beobachteter Schwerewerte oder Lotrabweichungen **l** - z. B. im Fall großer Massenänderungen (Bergbau, Ölfelder) oder geodynamischer Netze - obligatorisch. Ansonsten kann das einfachere quasi-integrierte Modell verwendet werden.

Im quasi-integrierten Fall werden die Beobachtungen **l** des GMM parametrisiert nach

$$\bar{\mathbf{p}}(W(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c})) =: (\varphi(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c}),\lambda(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c}),N(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c})) \qquad \text{und} \qquad \mathbf{l} = \mathbf{l}(\mathbf{x},\mathbf{z},\bar{\mathbf{p}}(W(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c}))),\mathbf{C}_l$$

Die auf das Schwerefeld W bezogenen “geometrischen” Ersatzparameter sind dessen „horizontale“ Komponente (astr. Lotrichtungen in Breite $\varphi(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c})$ und Länge $\lambda(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c})$) bzw. dessen „vertikale“ Komponente,die Quasigeoidhöhe $N(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c})$. Es gilt hierfür:

$$\varphi(W(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c})) = \arctan\left(\frac{W_z}{\sqrt{W_x^2+W_y^2}}\right) \quad \lambda(W(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c})) = \arctan\left(\frac{W_y}{W_x}\right) \quad N(W(\mathbf{x},\mathbf{p},\mathbf{c})) = \frac{(W-U)_P}{\gamma_{h(x,y,z)-N}}$$

Mit U wird das Referenzschwerefeld (GRS80) und mit γ die zugehörige Referenzschwere im Telluroidpunkt (Höhe h-N) bezeichnet. Die auf das Schwerefeld bezogenen geometrischen Parameter des quasi-integrierten 3D-Modells werden punktweise als Unbekannte und zugleich wiederum als direkte Beobachtungen des GMM der quasi-integrierten 3D-Ausgleichung eingeführt. Für den für TPS-Beobachtungen (Richtungen, Zenitdistanzen und Schrägstrecken) – maßgeblichen Beobachtungsvektor gilt die nachfolgende Gleichung:

$$\mathbf{l}_{ij}^{i} = \begin{bmatrix}\Delta u\\ \Delta w\\ \Delta w\end{bmatrix}_{ij}^{i} = \mathbf{R}_e^i(\varphi_i,\lambda_i)\cdot\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\\ \Delta z\end{bmatrix}_{ij} - \begin{bmatrix}0\\ 0\\ i\end{bmatrix}^{i} + \mathbf{R}_e^i(\varphi_i,\lambda_i)\cdot\mathbf{R}_j^e(\varphi_j,\lambda_j)\cdot\begin{bmatrix}0\\ 0\\ t\end{bmatrix}$$

Davon ausgehend erhalten wir folgende Beobachtungsgleichungen für Schrägstrecken, Richtungen und Zenitdistanzen im quasi-integrierten 3D-Modell:

$$s_{ij} = \sqrt{\Delta u_{ij}^2+\Delta v_{ij}^2+\Delta w_{ij}^2} \qquad r_{ij} = \text{artcan}\left(\frac{\Delta v_{ij}}{\Delta u_{ij}}\right) - o \qquad z_{ij} = \text{artcan}\left(\frac{\sqrt{\Delta u_{ij}^2+\Delta v_{ij}^2}}{\Delta w_{ij}}\right) - \frac{s_{ij}}{2R}k$$

Durch zeilenweises Einsetzen der Komponenten der o.g. Grundgleichung in die Beobachtungsgleichungen werden die betreffenden nicht-linearen funktionalen GMM der TPS-Beobachtungen schließlich durch die globalen punktweisen Unbekannten im 3D-Geometrie- und Schwereraum des Netzes parametrisiert. Direkt im einheitlichen erdfesten geozentrisch-kartesischen Rechensystem (x,y,z) sind das funktionale GMM von 3D GNSS-Baselinebeobachtungen **b**. Diese und Nivellementbeobachtungen **l** lassen sich im quasi-integrierten 3D-Model wie folgt parametrisieren:

$$\mathbf{b}^T = (\Delta x_{ij},\Delta y_{ij},\Delta z_{ij}) \qquad \text{und} \qquad \Delta H_{ij} = (h(x,y,z)_j - N_j) - (h(x,y,z)_i - N_i)$$

Prof. Dr. Ing. Reiner Jäger – Projektleitung FuE Projekt GOCA
Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft (HSKA)
University of Applied Sciences - Institut für Angewandte Forschung (IAF)
Moltkestr. 30, D-76133 Karlsruhe
Tel.: ++ 49 721 925 2620; 2592 ; Fax: ++ 49 721 925 2597
Email: **reiner.jaeger@web.de**

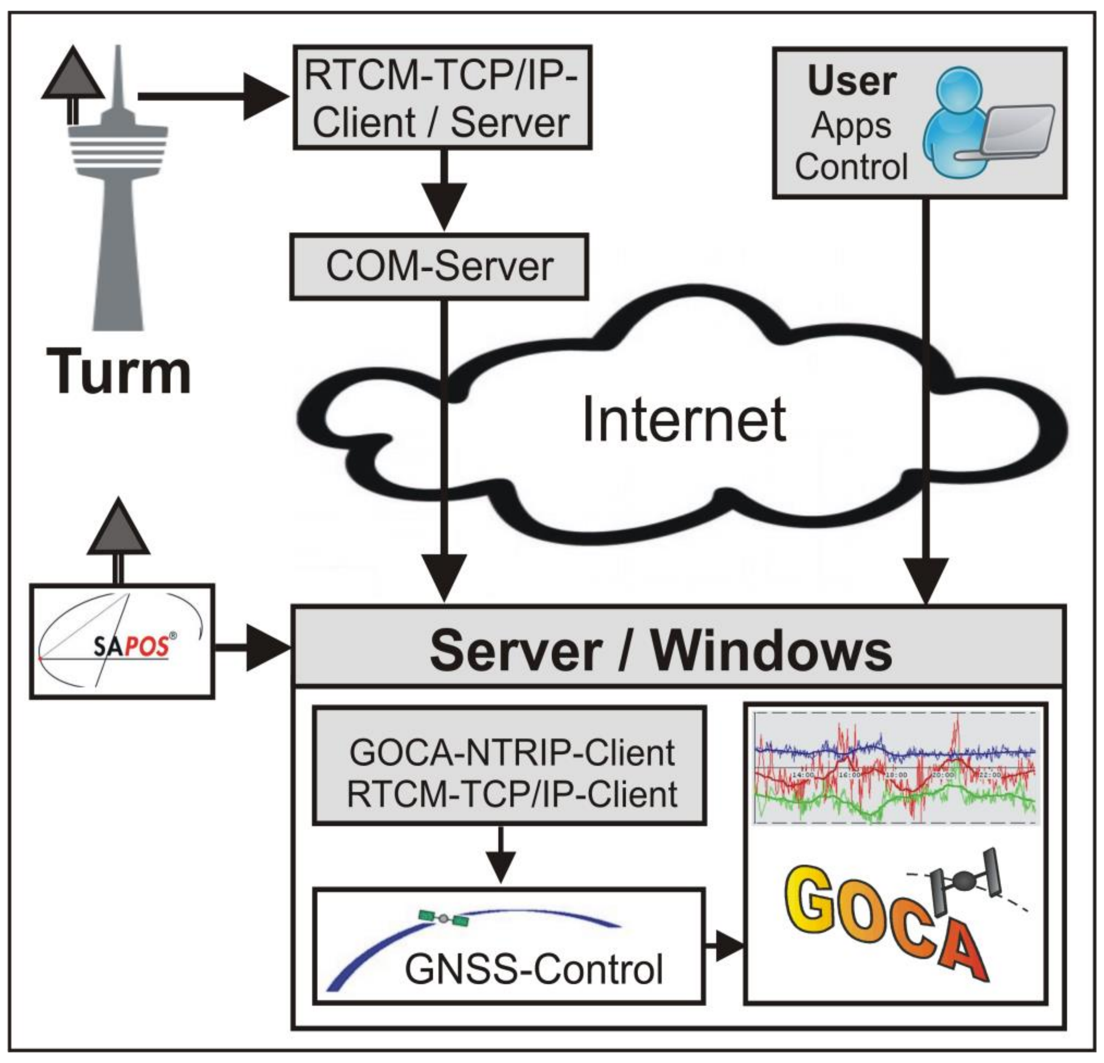
Neben den o.g. TPS-, GNSS- und Nivellementbeobachtungen sind die integrierte und quasi-integrierte 3D- Ausgleichung auch für die Sensor- bzw. Beobachtungskomponenten

- Pixel von Videotachymetern Laserscanner-Punktwolken
- Terrestrisches SAR sowie Satelliten-basiertes INSAR und
- GNSS/MEMS-Sensorik zum Structural Health Monitoring (SHM)

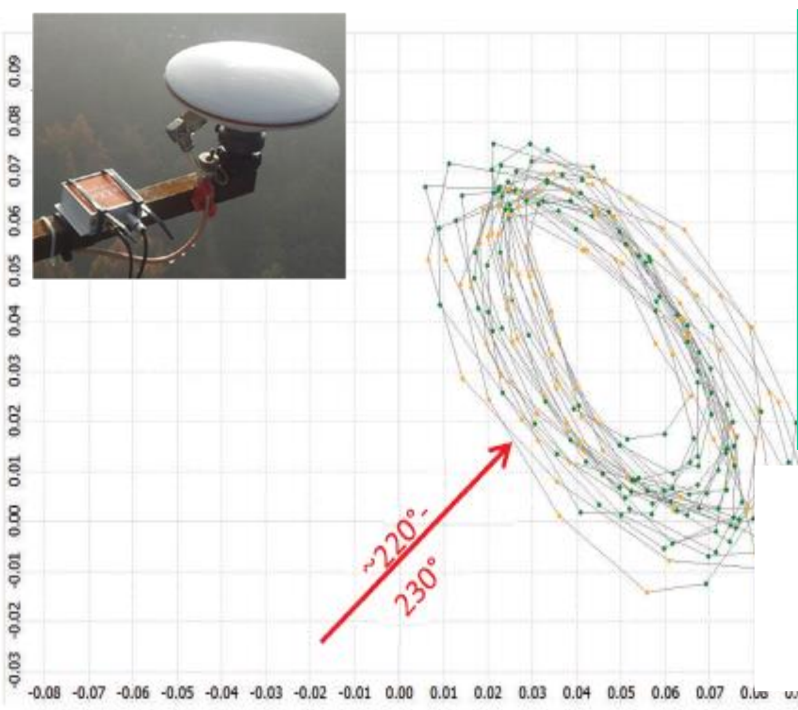
zwingend. Integrierte bzw. quasi-integrierte 3D-Ausgleichung sind daher die nachhaltigen Schlüsselmodelle des modernen multisensoriellen 3D Geo- und Structural Health Monitoring (SHM).

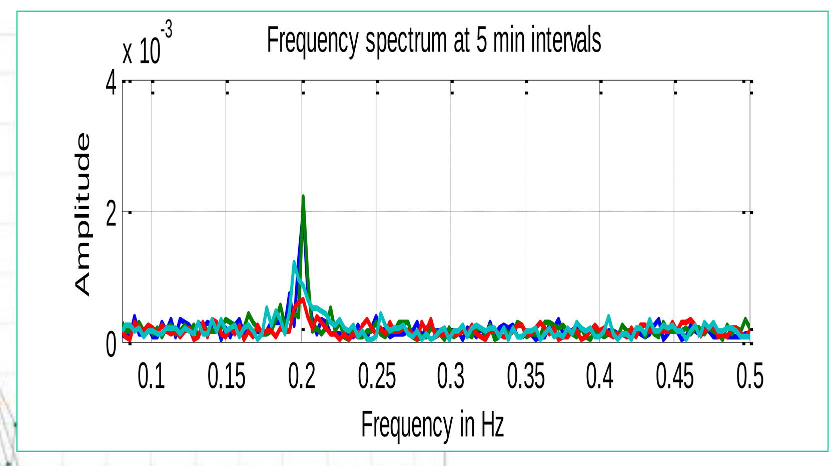
Fernsehturm Stuttgart als Referenzobjekt für SHM

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 (SHM)“ mit neuer IT-Infrastrukur. Hochschulseitig werden die FuE im Rahmen der Projekte GOCA und NAVKA des Labors für GNSS & Navigation der HS Karlsruhe wahrgenommen. Neben dem Ingenieurbüro für Angewandte 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



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





Links oben: GNSS/MEMS-Installation. Mitte: Horizontale windinduzierte Grundschwingung Umlaufdauer T= 5 sec = 1/ 0.2 Hz. Amplitude 6 cm. Oben: Frequenzspektrum, „Peak“ bei der Grundschwingung von 0.2 Hz

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

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

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 Schwingsgleichungen mit

$$\mathbf{K}(\mathbf{p}_K)\cdot\mathbf{u}(t) + \mathbf{C}(\mathbf{p}_C)\cdot\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{M}(\mathbf{p}_M)\cdot\ddot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{f}(t) \qquad \text{und} \qquad \mathbf{K}(\mathbf{p}_K)\cdot\mathbf{u}(t) + \mathbf{C}(\mathbf{p}_C)\cdot\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{M}(\mathbf{p}_M)\cdot\ddot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{0}$$

beim Structural Health Monitoring (SHM) über o.a. FEM-basierten Schwingsgleichungen (links, erzwungene gedämpfte Schwingung mit Anregung **f**(t), rechts gedämpftr freie Eigenschwingung) prinzipiell die Möglichkeit der Parametrisierung aller physikalischen Kenngrößen (Steifigkeitsmatrix **K**, Dämpfungs-matrix **C** und Massenmatirx **M**), während bei statischen SHM neben dem Knotenkraftvektor **f**(t) nur die Steifigkeitsmatrix **K** einer Parametrisierung zugänglich ist. Im Fall der o.a. Eigenschwingung erhalten wir so im Zeitbereich den Zusammenhang

$$\begin{bmatrix}\mathbf{u}_O(t+\Delta t)\\ \dot{\mathbf{u}}_O(t+\Delta t)\\ \ddot{\mathbf{u}}_O(t+\Delta t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\mathbf{I} & [\Delta t] & \left[\frac{1}{2}\Delta t^2\right]\\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & [\Delta t]\\ \mathbf{0} & [-\mathbf{M}(\mathbf{p}_M)^{-1}\cdot\mathbf{K}(\mathbf{p}_K)\cdot\Delta t] & [\mathbf{I}-\mathbf{M}(\mathbf{p}_M)^{-1}\cdot\mathbf{C}(\mathbf{p}_C)\cdot\Delta t]\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\mathbf{u}_O(k)\\ \dot{\mathbf{u}}_O(k)\\ \ddot{\mathbf{u}}_O(k)\end{bmatrix}$$

zwischen den Verschiebungen $\mathbf{u}_O$(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

$$\Delta\omega_i^2(\Delta\mathbf{p}_K,\Delta\mathbf{p}_M) = \boldsymbol{\varphi}_i^T\cdot[d\mathbf{K}(\Delta\mathbf{p}_K) - \omega_i^2\cdot d\mathbf{M}(\Delta\mathbf{p}_M)].\boldsymbol{\varphi}_i$$

$$\Delta\boldsymbol{\varphi}_i(\Delta\mathbf{p}_k,\Delta\mathbf{p}_M) = -\frac{\boldsymbol{\varphi}_i^T\cdot d\mathbf{M}(\Delta\mathbf{p}_M)\cdot\boldsymbol{\varphi}_i}{2} + \sum_{\substack{j=1,\\ j\neq i}}^{n}\frac{1}{\omega_i^2-\omega_j^2}\boldsymbol{\varphi}_i^T\cdot[d\mathbf{K}(\Delta\mathbf{p}_K) - d\mathbf{M}(\Delta\mathbf{p}_M)]\cdot\boldsymbol{\varphi}_j$$

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

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