

Motion Analysis by Non-Contacting Camera/Computer Measurement System - A New Tool for Dynamic Field Testing of Wind Turbines

First results from application of the new system in the assessment of a large WEC's tower movement at DEWI's Test Station

Análisis de movimiento mediante cámara de no-contacto/Sistema de medición por ordenador – Una nueva herramienta para pruebas dinámicas de campo para aerogeneradores

Primeros resultados en la aplicación del nuevo sistema en el estudio del movimiento de la torre en grandes aerogeneradores, en el campo de pruebas de DEWI.

E. Hans Furnée, Johan van Baarlen, TU-Delft, The Netherlands, E.H.Furnee@tn.tudelft.nl;
Holger Söker, DEWI

SUMMARY:

The project "3-D Motion Analysis in Full Scale Wind Turbines", carried out within the EU's CRAFT/JOULE research program (JOR3-CT97-7002), addresses crucial technical aspects in the assessment and testing of new designs and developments in the next generation of wind energy converters (WEC). These are characterised by increasing size and increasingly flexible structures. Modern WEC towers featuring flexibility by design may serve as a valid example for this trend. The increase in flexibility, however, emphasises the need for exact assessment of tower bending modes and amplitudes, as an expression of deformation under load variations. This article presents a novel minimally-invasive assessment method by interior, through-tower, bottom-up opto-electronic observation.

RESUMEN:

El proyecto "Análisis del movimiento en 3D en aerogeneradores a escala completa", llevado a cabo dentro del programa de investigación de la UE CRAFT/JOULE (JOR3-CT97-7002), apunta aspectos técnicos esenciales en el análisis y valoración de nuevos diseños y desarrollos dentro de la nueva generación de aerogeneradores. Estos se caracterizan por un aumento de tamaño y mayor flexibilidad en sus estructuras. Las torres de los aerogeneradores modernos caracterizadas por la flexibilidad de su diseño son un claro ejemplo de esta tendencia. El aumento de flexibilidad acentúa, sin embargo, la necesidad de un análisis exacto de los modos y amplitudes de flexión de la torre, como una expresión de la deformación bajo variaciones de carga. Este artículo presenta un método de análisis primerizo y mínimamente invasivo, consistente en una observación opto-electrónica interior desde la base, a lo largo de la torre.



Fig. 1: TW1.5s at DEWI Test Site

Introducción

Junto al campo de pruebas de DEWI cerca de Wilhelmshaven, Tacke Windenergie GmbH ha erigido su TW1.5s, una moderna línea de producción de aerogeneradores de 1.5 MW, con 70 m de diámetro de rotor, tres aspas y 83 m de altura de torre. Dentro del programa regular de medidas de carga llevado a cabo por DEWI, esta turbina se ha equipado con una implementación muy moderna de la instrumentación "clásica" de caracterización de la sensibilidad mecánica mediante galgas de esfuerzo. Los sistemas de medida de DEWI con galgas de esfuerzos se extienden al buje y a la base de las aspas con un subsistema DSP (Digital Signal Processor). Este sistema está colocado dentro del buje y conectado por radio a otro subsistema, un PC altamente equipado situado en el suelo. Para sincronizar los dos subsistemas se utilizan radio relojes.

Esta topología es considerada la más adecuada para estudios basados en el Análisis de Movimiento en 3D con cámara, por comparación con

Introduction

Adjacent to DEWI's Test Site near Wilhelmshaven, Tacke Windenergie GmbH have erected their TW1.5s, a modern production-line 1.5 MW wind turbine with 70 m rotor diameter, 3 blades and 83 m tower height (Fig. 1). Within the regular load measurement programme, carried out by DEWI, this WEC has been equipped with a most up-to-date implementation of the 'classical' instrumentation featuring mechanical sensing by strain gauges, assessment of electrical power characteristics, and anemometry. The DEWI strain gauge measurement systems extend into the hub and rotor blade roots with a DSP (Digital Signal Processor) subsystem located inside the hub and radio networked to a further extensively equipped ground subsystem and an on-site PC. Radio clock modules are used for synchronising the two subsystems.

This situation is deemed most adequate for evaluations of the camera-based 3-D Motion Analysis system by comparison of the acquired motion data with the 'classic' data. In the present phase of the project, TU-Delft and DEWI decided to focus on a primary investigation of tower motion under varying loads. Among its modern features, the TACKE TW1.5s has a particular flexible-design, slender steel tower. Already visually, the tower exhibits appreciable bending movement in operation and thus underlines the need for an exact assessment of the tower bending modes and amplitudes.

Technical Approach

State of the art in electro-optical motion measurement systems, as originally developed at the TU Delft, and applied in areas like medicine, rehabilitation and sports [1, 2, 3], is to use reflective targets or markers placed on the object under study. The camera based motion analysis thus removes the physical sensors (i.e. strain gauges, accelerometers) and wiring from the observed component and instead uses a set of passive optical markers. These are sub-millimetre thin stickers of commercial retro-reflective sheet, glued at strategic points on to the surfaces of the component to be analysed (Fig. 3). Under stroboscopic infra-red illumination these markers stand out contrastingly against the background structures and are observed by CCD cameras (Fig. 2). The camera signals are fed into a video-based co-ordinate processor which in real-time extracts the x,y co-ordinates of estimated midpoints of the markers as imaged (signal processing based on PRIMAS Precision Motion Analysis System, TU-Delft). The co-ordinate processor then feeds x,y data into a PC host. The system acquires the marker co-ordinates in real time at 30 images per second.

los datos de movimiento obtenidos con el método "clásico". En esa fase del proyecto, TU-Delft y DEWI decidieron concentrarse en una primera investigación del movimiento de la torre bajo cargas variables. Dentro de sus modernas características, el Tacke TW1.5s tiene un diseño particularmente flexible con una delgada torre de acero. Durante la inspección visual en operación se aprecia un movimiento de flexión considerable, lo que subraya la necesidad de un análisis exacto de las amplitudes y modos de flexión de la torre.

Aproximación técnica

Lo último en sistemas electro-ópticos de medida de movimiento, originalmente desarrollados por el TU Delft y aplicado en áreas como la medicina, rehabilitación y deportes [1, 2, 3], consiste en usar tarjetas o marcadores colocados en el objeto bajo estudio. De este modo, el análisis de movimiento basado en la cámara, elimina los sensores físicos (galgas de esfuerzo, acelerómetros) y cableado del elemento bajo estudio, y en vez de ello, utiliza un conjunto de marcadores ópticos pasivos. Consisten en finas láminas de menos de 1 mm de material retro-reflectivo, pegados en puntos estratégicos de la superficie de los componentes a analizar (Fig.3). Bajo iluminación infrarroja estroboscópica los marcadores contrastan con las estructuras del fondo y son observadas con cámaras CCD (Fig. 2). Las señales de la cámara se almacenan en un procesador coordinado en base de vídeo que en tiempo real extrae las coordenadas x,y de puntos medios estimados de los marcadores como imagen (procesamiento de señal basado en PRIMAS, "Precision Motion Analysis System, TU-Delft). Entonces, el procesador de coordenadas almacena los datos x, y en un PC. El sistema adquiere las coordenadas del marcador en tiempo real a 30 imágenes por segundo.



Fig.2: CCD Camera & IR Flasher

In-Field Application: Tower observation inside from bottom-up

The TW1.5s tower is equipped with hatches of some 70x70 cm in the interior bottom, intermediate and top platforms. These hatches, designed for hoisting tools and spares, are put to a new use and permit the observation of top and intermediate levels motion by a camera at tower floor, which points upward looking through the successive hatches. The top hatch is closed and at the inside carries the retroreflective markers, and also at each of the intermediate levels markers are stuck to the platform bottom, near to the four hatch edges. As imaged by the camera, the marker pattern consists of four squares of four markers each, the smallest square representing the top level (Fig. 3). With a vertically well aligned camera, the four squares are at rest concentric, and their relative motion represents the tower movement at the four levels.



Fig. 3: Markers – Flashphoto from bottom to top

In this set-up a single camera can basically measure full 2-D motion: translation and rotation, at the various platform levels. This is called 2½-D by the fact that more than one level is observed. An extra benefit of the set-up: since the complete measuring chain is interior to the tower the arrangement is inherently weather-proof.

Several tests were run with the following sequence, under wind force (10-15m/s):

- WEC in stopped condition, exhibiting a characteristic sway motion
- WEC start-up
- WEC in normal operation at rated power
- WEC shut down

Results of one 830 s test run are presented in Figure 4 through 6.

Figure 4 gives the time graphs of the X and Y excursions (computed from the quad markers per platform) at the levels 78, 54 and 28 m.

Aplicación de campo: Observación interna de la torre desde la base

La torre TW1.5s está equipada con compuertas de 70x70 cm en las plataformas de la base, interiores y cima de la torre. Esas compuertas, diseñadas para alzar herramientas y repuestos, adquieren una nueva utilidad y permiten la observación del movimiento de los niveles medios y superior con una cámara en el suelo de la torre, que apunta hacia arriba a las sucesivas compuertas. La última compuerta está cerrada y contiene en su interior marcadores retro-reflectivos. En cada uno de los niveles intermedios, los marcadores están pegados a la base de la plataforma, a cada una de las cuatro esquinas de la compuerta. Visto por la cámara, el modelo del sistema consiste en cuatro cuadrados con cuatro marcadores cada uno; el cuadrado más pequeño representa el nivel superior (Fig. 3). Con una cámara vertical bien alineada, los cuatro cuadrados tienden a ser concéntricos, y su movimiento relativo representa el movimiento de la torre en los cuatro niveles.

En este sistema, una sola cámara puede básicamente medir un movimiento completo en 2D: traslación y rotación, en los diferentes niveles. A esto se le llama 2½-D por el hecho de que se controla más de un nivel. Un beneficio extra de esta distribución: ya que la cadena completa de medida se realiza en el interior de la torre, el sistema es inherentemente resistente al agua.

Se realizaron diferentes pruebas dentro de la siguiente secuencia, bajo un esfuerzo de viento (10-15 m/s)

- Aerogenerador parado, mostrando un característico movimiento de vaivén.
- Arranque del aerogenerador
- Aerogenerador en operación a potencia nominal
- Parada del aerogenerador

Las figuras 4 a 6 muestran los resultados de una prueba de 830s.

La Fig. 4 muestra la variación temporal de las coordenadas X e Y (computada para la cuatripleta de marcadores por plataforma) a las alturas de 78, 54 y 28 m.

En la Figura 5, el movimiento medido ópticamente al nivel de 54 m, y la “clásica” galga de esfuerzo (flexión de la base de la torre) se representan frente al tiempo. Para mostrar la cercanía de las señales dinámicas, ambas señales han sido escaladas y normalizadas.

Por último, la Fig. 6 muestra la variación horizontal instantánea en los diferentes niveles; “instantáneas” de la flexión de la torre en una (X-) dirección.

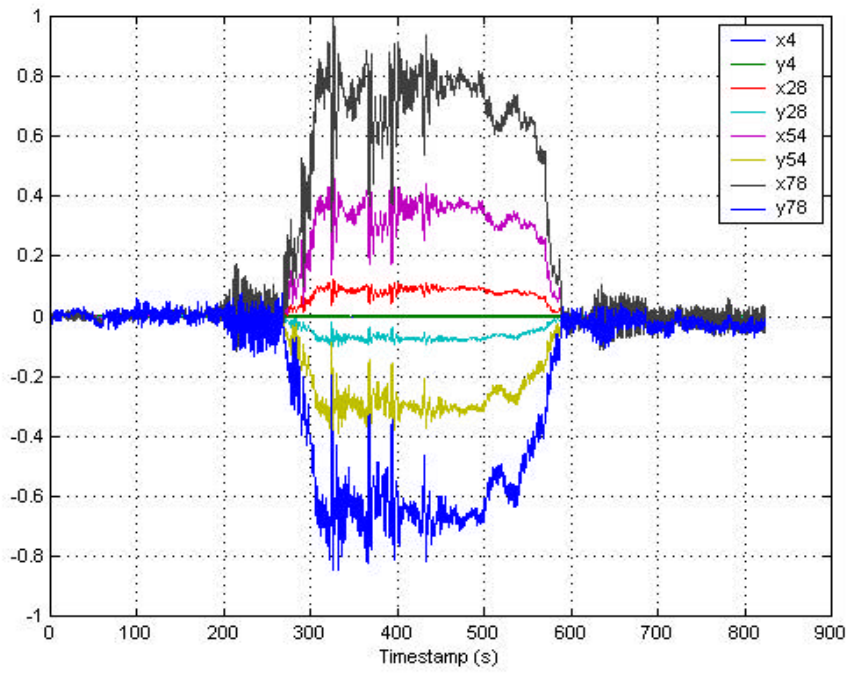
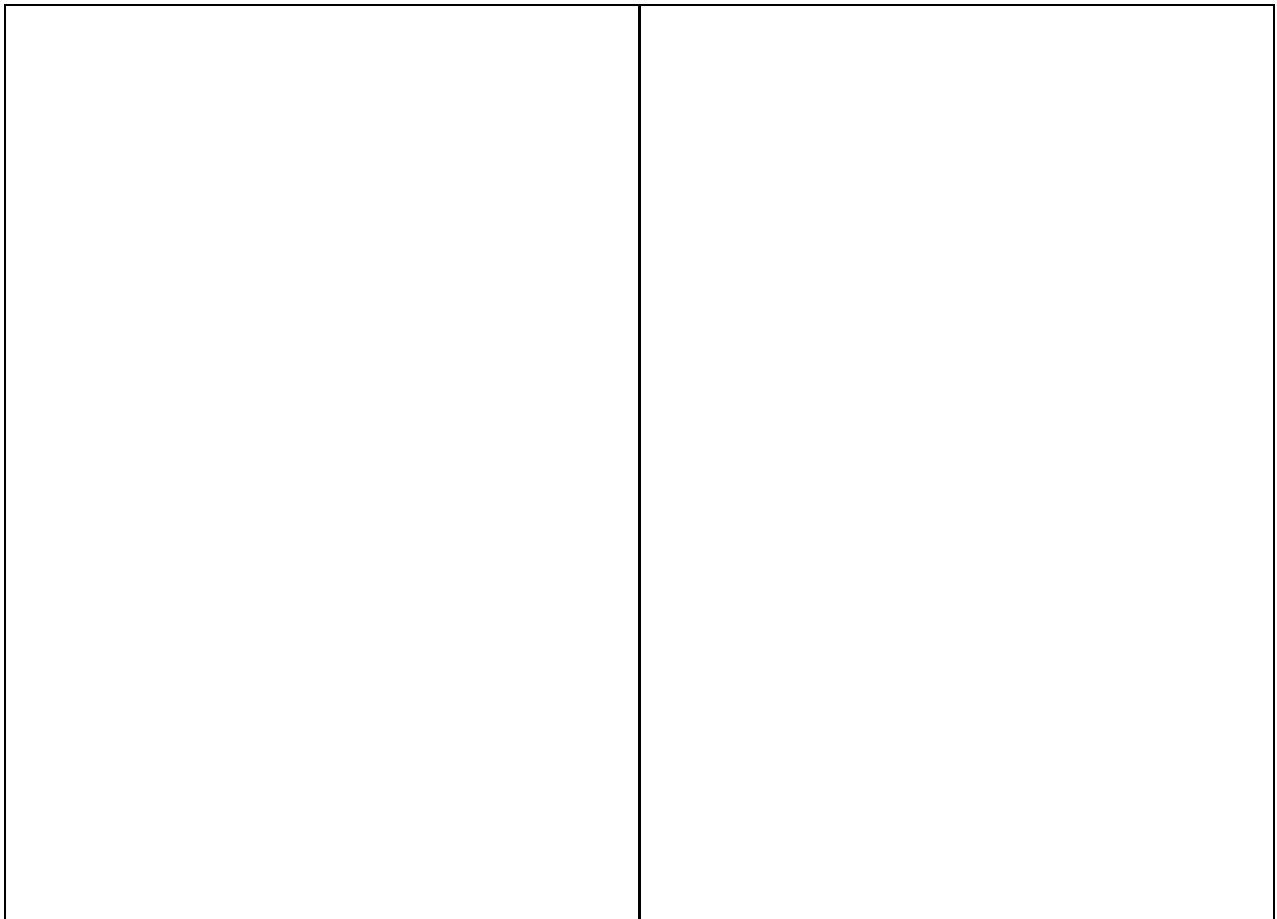


Fig. 4: Time histories of the X and Y excursions
Fig. 4: Variación temporal de las coordenadas x e y



In Figure 5 the optically measured motion at the 54 m level, and the “classical” strain gauge (tower base bending) signal are plotted versus time. To outline the close matching of the signal's dynamics, the optical and strain gauge signals were normalised and scaled.

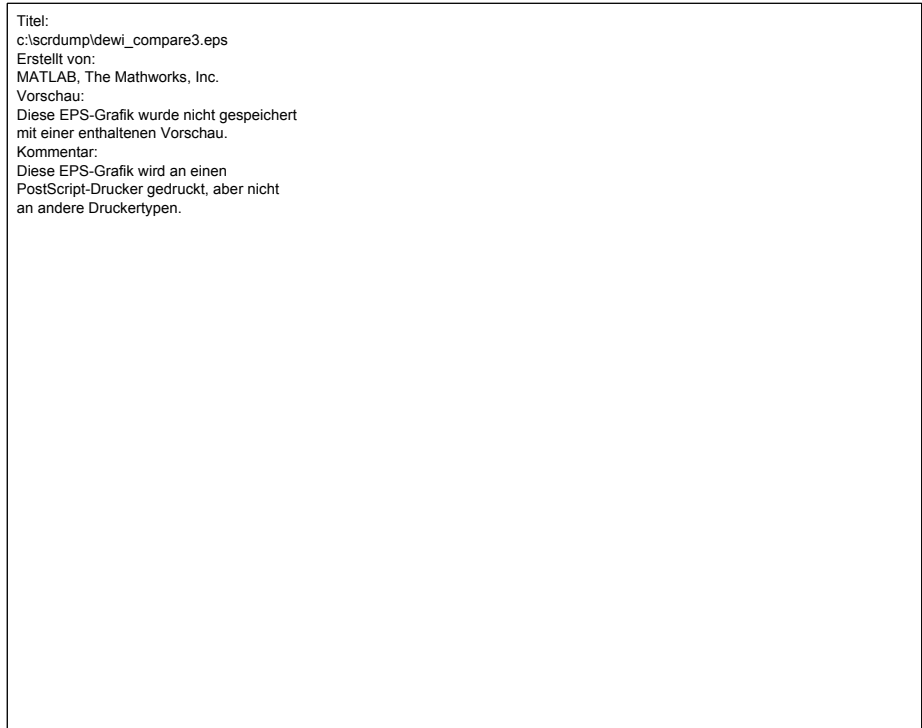


Fig. 5: *Optically measured motion and strain gauge signal*
 Fig. 5: *Señales de movimiento medido ópticamente y de galga de esfuerzo*

Finally Figure 6 shows the instantaneous horizontal excursions at the different platform levels-‘snapshots’ of the tower bending in one (X-) direction.

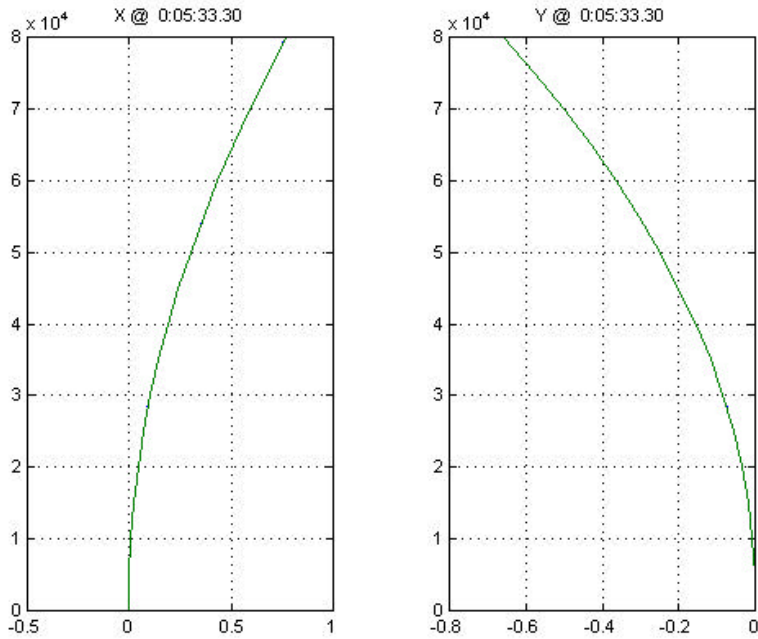


Fig. 6: *Instantaneous horizontal excursions at the different platform levels. Note: horizontal scale is amplified with respect to vertical*
 Fig. 6: *Variación horizontal instantánea en los diferentes niveles. Nota: Escala horizontal fue ampliificada con respecto a la escala vertical*

Perspective

By implication, this remote camera/computer method can be applied to otherwise unprepared structural prototypes as well as to standard production samples. This shall benefit the penetration of an encompassing test and verification programme in wind turbine design and validation.

Perspectiva

Por inferencia, este método de cámara remota/ordenador puede ser utilizado para otros prototipos no preparados estructuralmente así como para normalizar muestras de producción. Esto debe beneficiar la entrada en un programa de pruebas y verificación para validación y diseño de aerogeneradores.

References / Referencias

- [1] Furnée, E.H. Hybrid Instrumentation in Prosthetics Research. In: Digest of the 7th International Conference on Medical and Biological Engineering. 1967. Stockholm. p.446.
- [2] Furnée, E.H.; Jobbágy, A.; Sabel, J.C.; van Veenendaal, H.L.J.; Martin, F.; Andriessen, D.W.G. Marker-referred movement measurement with grey-scale coordinate extraction for high-resolution real-time 3D at 100 Hz. In: Ultrahigh- and High-speed Photography and Image-based Motion Measurement. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. San Diego CA 28-30 July 1997. Vol. 3173 pp 357-369.
- [3] Furnée, H. Real-time Motion Capture Systems. In: (Paul Allard ea. editors) Three-dimensional Analysis of Human Locomotion. John Wiley & Sons. 1997. ISBN 0471.96949.4. pp 85-108.