

## Podsumowanie projektu EMRP IND53 LUMINAR Large volume metrology in industry

### Summary of the EMRP IND53 LUMINAR project Large volume metrology in industry

Mariusz Wiśniewski, Dariusz Czulek, Robert Szumski (Główny Urząd Miar)

W ramach międzynarodowego projektu LUMINAR opracowano szereg prototypowych przyrządów pomiarowych do pomiarów w dużych objętościach (LVM), nowych sposobów i oprogramowania do kompensacji wpływu czynników atmosferycznych oraz zniekształceń termicznych. Zbudowane przyrządy pomiarowe zostały pomyślnie przetestowane i zademonstrowane w laboratoriach i zakładach przemysłowych.

As part of the international LUMINAR project, a number of prototype measuring instruments for large volume metrology (LVM), new methods and software to compensate for atmospheric factors and thermal distortions were developed. Measuring instruments have been successfully tested and demonstrated in laboratories and industrial plants.

#### Wstęp

W wielu branżach przemysłowych wykorzystywane są duże obiekty, urządzenia czy instalacje, które, aby działać poprawnie, wymagają kontroli położenia, wymiarów lub kształtu kluczowych ich komponentów. Kontrola ta realizowana jest często na dużych przestrzeniach (rzędu setek m<sup>3</sup>), często w warunkach dalekich od laboratoryjnych. Zwiększenie dokładności pomiarów daje znaczne korzyści, takie jak np. lepsza dokładność wykonania skrzydła samolotu czy kadłuba, co zmniejsza ilość wymaganego nadmiaru materiału, obniżając masę i spalanie paliwa oraz umożliwia uzyskanie większej aerodynamiczności. Lepsza spójność pomiarowa zapewnia bardziej kompatybilne wymiary komponentów pochodzących od wielu producentów. We wszystkich tych scenariuszach pomiar nie jest wykonywany w laboratorium, ale w hali produkcyjnej (*in situ*) w niekontrolowanych warunkach środowiskowych, co go utrudnia.

Wymagania dotyczące dokładności pomiarów wykonywanych w halach produkcyjnych, wskazane przez potencjalnych użytkowników końcowych, wymagały rozwiązania kilku problemów:

- kompensacji rozszerzalności cieplnej konstrukcji,
- kompensacji błędów spowodowanych przez załamanie światła w powietrzu, które wpływa na wszystkie optyczne przyrządy pomiarowe stosowane w LVM,
- zapewnienie spójności pomiarowej z układem SI dla bezwzględnych systemów pomiaru odległości stosowanych w warunkach przemysłowych,
- możliwości mierzenia więcej niż jednej pozycji jednocześnie przy dużej szybkości przesyłania danych,

- dostępności rygorystycznej oceny niepewności w celu uniknięcia błędnych decyzji podczas produkcji.

#### Wyniki działania projektu

W projekcie LUMINAR [1] uczestniczyły National Physical Laboratory (NPL), Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Główny Urząd Miar (GUM), The University of Bath, University College London (UCL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Airbus Operations Limited, The University of Sheffield, SIOS Messtechnik GmbH. Każdy z partnerów projektu skoncentrował się na dziedzinie, w której ma najszerzą wiedzę, dzięki czemu możliwe było opracowanie równoległe wielu produktów w krótkim czasie. Badania przeprowadzone przez różne zespoły dostarczyły szerokie spektrum wyników, które spełniają wszystkie naukowe cele projektu badawczego.

#### Innowacyjne systemy pomiarowe

Pierwszym celem projektu było opracowanie innowacyjnych systemów pomiarowych, które wypełniają lukę między fotogrametrią a laser trackerami, pracując w objętości 10 m × 10 m × 5 m, z docelową niepewnością pomiaru 50 μm. Opracowano cztery systemy pomiarowe.

1. Prototypowy system opracowany przez INRIM, oparty na przecinających się płaszczyznach (InPlanT), który wykorzystuje dwie osie liniowe. Zapewniło to powtarzalność 45 μm w warunkach przemysłowych,



z wykorzystaniem dwóch osi pomiarowych symulujących obszar  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ .

2. Prototypowy system podobny do wideogrametrii, ale wykorzystujący sferyczne elementy i laserowe oświetlenie przez obiektyw. Został przetestowany w środowisku laboratoryjnym i uzyskano niepewność pomiaru  $100\ \mu\text{m}$  w zakresie  $3\text{ m}$ .
3. System z NPL oparty na skanowaniu częstotliwościowym w interferometrii rozbieżnej wiązki, który wykazał niepewność pomiaru  $50\ \mu\text{m}$  na małych ( $1\text{ m}^3$ ) objętościach [2, 3].
4. System o dłuższym zasięgu, ponownie wykorzystujący interferometrię ze skanowaniem częstotliwościowym (FSI), który zastosowano w 10-metrowych zakresach, w środowisku laboratoryjnym i przemysłowym. Testy wykazały osiągnięcie niepewności pomiaru na poziomie  $50\ \mu\text{m}$ .

## Wyznaczanie odległości bezwzględnej

Drugim celem projektu było opracowanie nowatorskich przyrządów do pomiarów odległości bezwzględnej, działających w zakresie dziesiątek metrów. Opracowane zostały dwa nowe systemy pomiarowe oraz ulepszono obiekt testowy.

1. Przenośny telemetr opracowany przez CNAM, oparty na tanich podzespołach, działających przy długości fali  $1550\text{ nm}$ , które mogą mierzyć w zakresie  $50\text{ m}$ , z rozdzielczością i niepewnością pomiaru około  $2\ \mu\text{m}$ , tolerancją na przerwanie wiązki i łatwą obsługą.
2. Interferometr śledzący z bezwzględnym wyznaczeniem odległości w oparciu o interferometrię o wielu długościach fal, opracowany przez PTB, uzyskujący bezwzględny pomiar odległości z odchyleniami standardowymi  $60\ \mu\text{m}$  na długości drogi  $40\text{ m}$ .
3. 50-metrowy komparator interferencyjny GUM został wzbogacony o dodatkowe czujniki temperatury, ciśnienia i wilgotności wraz z obwodami grzewczymi, do symulowania środowiska przemysłowego, aby umożliwić testowanie przyrządów zbudowanych w ramach projektu na skompensowanym interferometrze laserowym.

## Pomiar i kompensacja współczynnika załamania światła

Trzecim celem projektu było opracowanie metody kompensacji współczynników załamania światła w powietrzu w warunkach przemysłowych, z dokładnością  $10^{-7}$  dla objętości około  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 5\text{ m}$ . Trzy podejścia zostały pomyślnie opracowane i przetestowane.

1. Przenośny telemetr z CNAM, wyposażony w drugą długość fali równą  $785\text{ nm}$ , umożliwiającą

osiągnięcie niepewności pomiaru  $500\ \mu\text{m}$ , z kompensacją współczynnika załamania światła w zakresie  $50\text{ m}$ .

2. Interferometr śledzący z PTB miał dodatkowy zestaw długości fal i pomimo pewnych problemów optycznych wykazał zgodność z konwencjonalnym pomiarem współczynnika załamania w granicach  $5 \cdot 10^{-7}$  [4].
3. W UCL opracowano szereg narzędzi do fotogrametrii (obrazowanie wielospektralne, cyfrowa kamera aksjonometryczna, analiza refrakcji w MathCad, oprogramowanie do regulacji objętościowego refrakcji wiązki) i połączono je w system, który może wykonywać fotogrametryczną analizę obrazów z modelowaniem refrakcji i niestabilnością sygnału w szerokim zakresie.

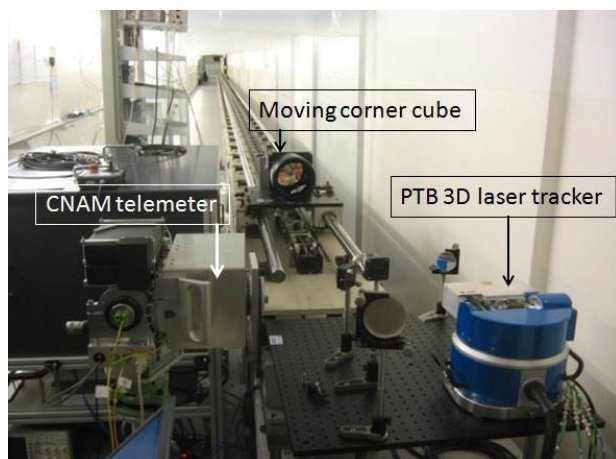
## Kompensacja efektów termicznych dla mierzonych obiektów

Czwartym celem projektu było opracowanie modelowania, by przewidywać zachowanie zespołów wieloskładnikowych (do  $5\text{ m}$ ) w środowiskach nieidealnych (z odchyleniem temperatury o  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ). Cel został osiągnięty przez Uniwersytet w Bath dzięki dwóm kluczowym pracom.

1. Opracowano i wdrożono hybrydowy program kompensacji termicznej. W tym schemacie dane z podzbioru pomiarów wymiarowych przekazywane są z powrotem do analizy modelu elementów skończonych wraz z danymi temperatury, aby iteracyjnie poprawić dokładność symulacji FEA. Model można następnie wykorzystać do kompensacji termicznej całego zespołu lub konstrukcji.
2. Zaprojektowany komponent lub zespół, typowy dla przemysłu lotniczego, został zaprojektowany jako przyrząd i wykorzystywany jako pierwszy etap techniki hybrydowej w środowisku laboratoryjnym. Technika ta osiągnęła dokładność lepszą niż wynikająca z teorii ekspansji liniowej i była lepsza niż pomiary śledzone za pomocą pojedynczych czujników laserowych.

## Testowanie i demonstracja możliwości systemów pomiarowych

Piątym celem projektu była weryfikacja i demonstracja możliwości opracowanych nowych technologii i zbudowanych przyrządów. Pomiary wykonane zostały w laboratoriach uczestników projektu oraz rzeczywistych środowiskach przemysłowych. Zaprezentowano praktyczne możliwości uzyskania spójności pomiarowej dla metrologii dużych objętości w środowiskach przemysłowych.



Rys. 1. Ława pomiarowa GUM o długości 50 m z urządzeniami pomiarowymi PTB i CNAM

Przeprowadzone zostały trzy działania pomiarowe.

1. Przeprowadzono porównanie wyników uzyskiwanych przez urządzenia opracowane przez PTB i CNAM na zmodernizowanym stanowisku pomiarowym GUM. Umożliwiło to sprawdzenie ostatecznej niepewności pomiaru nowych przyrządów (rys. 1).
2. System FSI opracowany przez NPL został przetestowany w PTB, co pozwoliło na ustalenie niepewności pomiaru dla tej metody we właściwym środowisku.
3. Testy przemysłowe wszystkich opracowanych przyrządów odbyły się w zakładach firmy Airbus (Filton) w Wielkiej Brytanii, w środowisku fabrycznym. Obejmowały pomiary na 45-metrowej przekątnej budynku (maksymalny zasięg dostępny w pomieszczeniu) i na 12-metrowej platformie testowej. Wszystkie przyrządy, które zostały dostarczone do Airbusa, były w stanie wykonać zadowalające pomiary w miejscu, w którym występowały duże gradienty temperatury, wibracje i hałas akustyczny.

## Podsumowanie

Projekt spełnił wszystkie techniczne i naukowe cele oraz przekroczył planowaną liczbę publikacji, prezentacji konferencyjnych i warsztatów. Ponadto badania zaowocowały pięcioma zgłoszeniami patentowymi. Przeprowadzone badania pozwoliły na stworzenie 10 całkowicie nowych przyrządów lub technik pomiarowych. Wyniki projektów zostały zaprezentowane społeczności użytkowników końcowych. Kilka wyników projektu jest już wykorzystywanych przez partnerów projektu. Wyniki te są rozwijane w ramach nowej współpracy badawczej. Niektóre produkty projektu będą rozwijane przez firmy metrologiczne i staną się produktami dostępnymi komercyjnie.

## Literatura

- [1] Strona www projektu LUMINAR: [www.emrp-luminar.eu](http://www.emrp-luminar.eu).
- [2] Hughes E. B., Warden M. S., A novel co-ordinate measurement system based on frequency scanning interferometry. *Journal of the CMSC*, 2013.
- [3] Warden M. S., Precision of frequency scanning interferometry distance measurements in the presence of noise. *Applied Optics*, vol. 53 (2014), s. 580-558.
- [4] Meiners-Hagen K., Meyer T., Prellinger G., Pöschle W., Dontsov D., Pollinger F.: Overcoming the refractivity limit in manufacturing environment. *Optics Express*, vol. 24 (2016), s. 24092-24101.

Artykuł jest tekstem referatu (z drobnymi zmianami redakcyjnymi), przedstawionego na XIII konferencji naukowo-technicznej PPM'18, która odbyła się w dniach od 4 do 6 czerwca 2018 roku w Szczyrku.