



# Czujniki przemieszczeń i kształtu wykorzystujące cyfrową korelację obrazu i oświetlenie strukturalne

## **Kierownik:**

Małgorzata Kujawińska

## **Wykonawcy:**

R. Sitnik, M. Malesa, G. Dymny

P. Błaszczyk, D. Szczepanek, K. Malowany, B. Siwek

Instytut Mikromechaniki i Fotoniki  
Politechniki Warszawskiej



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

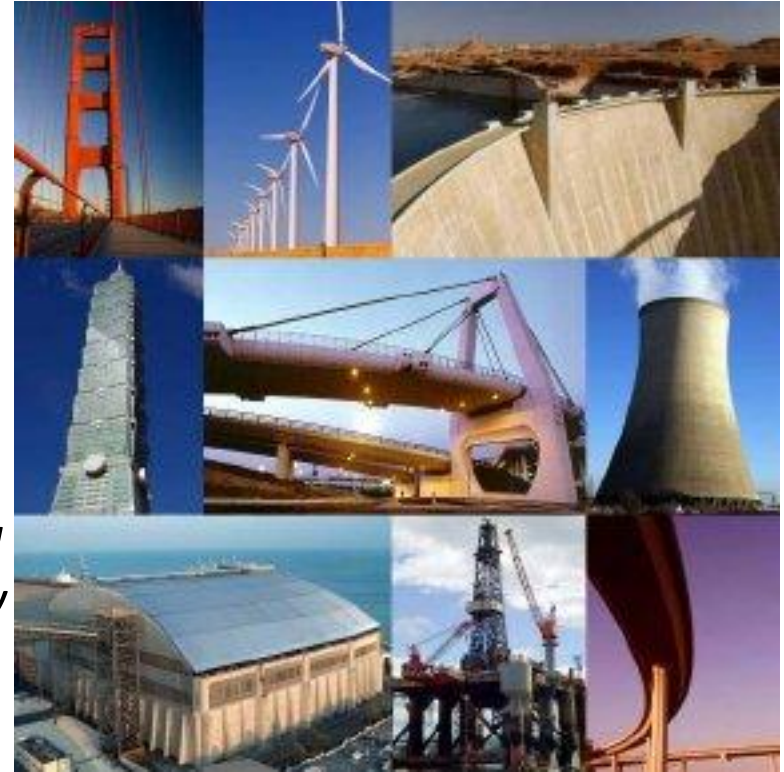


**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



Zapotrzebowanie rynku na wizyjne czujniki kształtu, deformacji i przemieszczeń umożliwiające szybką, ilościową ocenę stanu zdrowia konstrukcji inżynierskiej.

- ✓ *Dowolne warunki środowiska*
- ✓ *Różne gabaryty obiektów*
- ✓ *Różne wymagania dot. czułości pomiaru*
- ✓ *Pomiary jednokrotne i/lub rozłożone w czasie*
- ✓ *Prosta obsługa i interpretacja wyników*
- ✓ *Stosunkowo niewielki koszt czujników*



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO

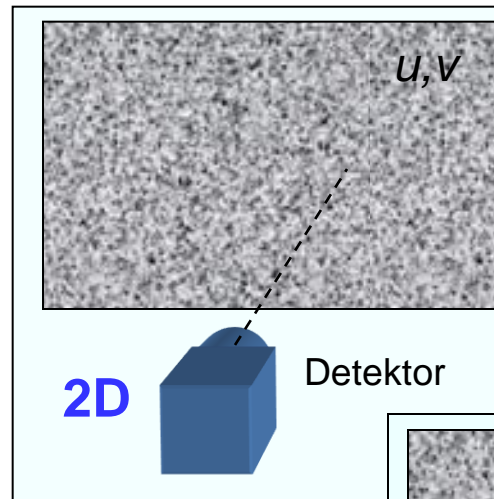


# Plan Prezentacji

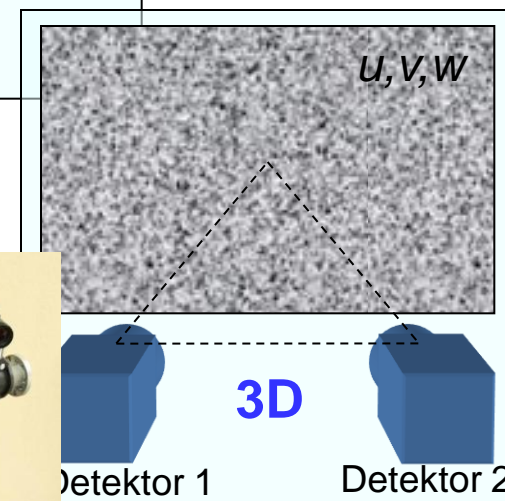
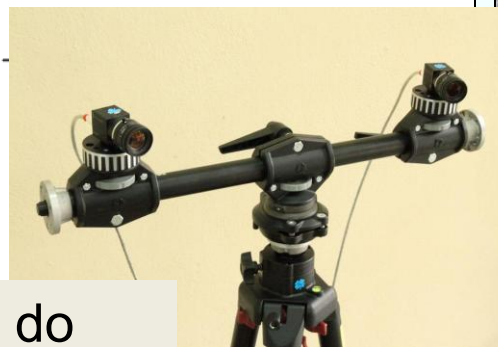
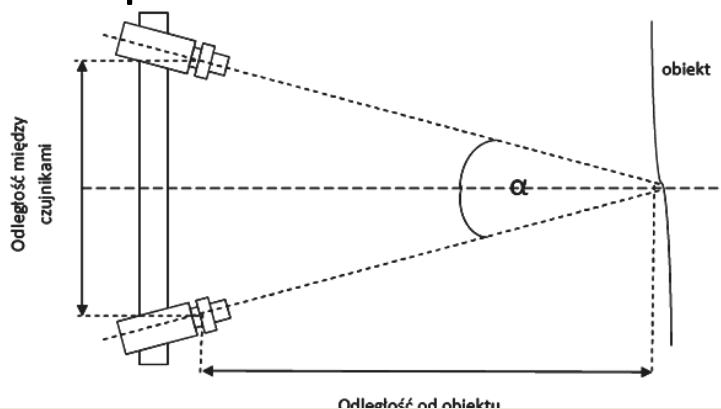
- Czujnik 2D i 3D cyfrowej korelacji obrazu (CKO)
- Czujnik hybrydowy CKO/termowizja
- Czujnik projekcji prążków do pomiaru kształtu i deformacji obiektów wielkogabarytowych
- Czujnik triangulacyjny do pomiaru kształtu szyn
- Podsumowanie

# Czujniki cyfrowej korelacji obrazów

## Pomiar przemieszczeń 2D



## Pomiar przemieszczeń 3D



Własny pakiet oprogramowania do  
2D i 3D CKO: **obecnie prace nad GUI**



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO





# Parametry czujników 2D i 3D CKO

Wymiary pola pomiarowego w trybie pomiarów lokalnych	od 20mm x 15mm do 2000mm x 1500mm	
Wymiary pola pomiarowego w trybie pomiarów globalnych	ograniczone głównie warunkami terenowymi w okolicy badanego obiektu I wymaganiami co do dokładności pomiaru	
Czułość systemu w układzie 2D – przemieszczenia w płaszczyźnie.	<b>0.05px</b> , aparat:18Mpx: od 0.0002mm do 0,02mm; kamera 2Mpx: od 0.0006mm do 0,06mm.	
Czułość systemu w układzie 3D – przem. pozapłaszczyznowe, kształt	w konfiguracji z kamerami AVT Stingray (2Mpx) i z kątem alfa równym 30°, czułość: od 0,0011mm do 0,11mm.	
Oczekiwana dokładność pomiarów rozłożonych w czasie	0.5piksela	
Oprogramowanie	Moduły: do kalibracji czujnika; do pomiarów przemieszczeń w płaszczyźnie, do pomiarów poza-płaszczyznowych oraz kształtu; podstawowe narzędzia do obróbki danych; skalowanie wyników z pikseli na mm;	
Masa pojedynczego czujnika	Ok.. 5kg	
Wymiary gabarytowe jednostki centralnej czujnika	280mmx200mmx80mm	
Komputer	Komputer jedнопłytkowy EBM-CN896	
Komunikacja z komputerem	komunikacja IP w trybie przewodowym, lub bezprzewodowym (WIFI)	
Funkcje dodatkowe	Możliwość: „powrotu do obiektu”, montażu w trudnych warunkach na placach budowy, zabezpieczenie czujnika przed wpływem warunków środowiska	
Odległość czujnika od obserwowanego obiektu	w trybie pomiarów lokalnych typowo <3m	w trybie pomiarów globalnych typowo >20m
Warunki pomiarowe	jednorodne, rozproszone oświetlenie, stabilność temperatury cz. $\pm 3^{\circ}\text{C}$ Przygotowanie pow. obiektu lub naturalna tekstura	

# Pomiary rozłożone w czasie

**Cel:** Uzyskanie spójnych pomiarów przemieszczeń w długim okresie czasu bez konieczności zostawiania czujnika przy obiekcie

Ten problem jest tożsamy z justowaniem układu współrzędnych czujnika do początkowego układu współrzędnych

## Założenia:

Kalibracja jest przeprowadzana względem punktu referencyjnego (punktu zamocowania wzorca referencyjnego)

Oprogramowanie nie jest czułe na pomiary przy zmiennym oświetleniu obiektu.

Uwaga: Dopuszczalna jest utrata informacji o liniowym przesunięciu obiektu

**2 etapowa procedura kalibracji: (1) k. geometryczna kamer  
(2) k. na obiekcie względem wzorca referencyjnego**



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

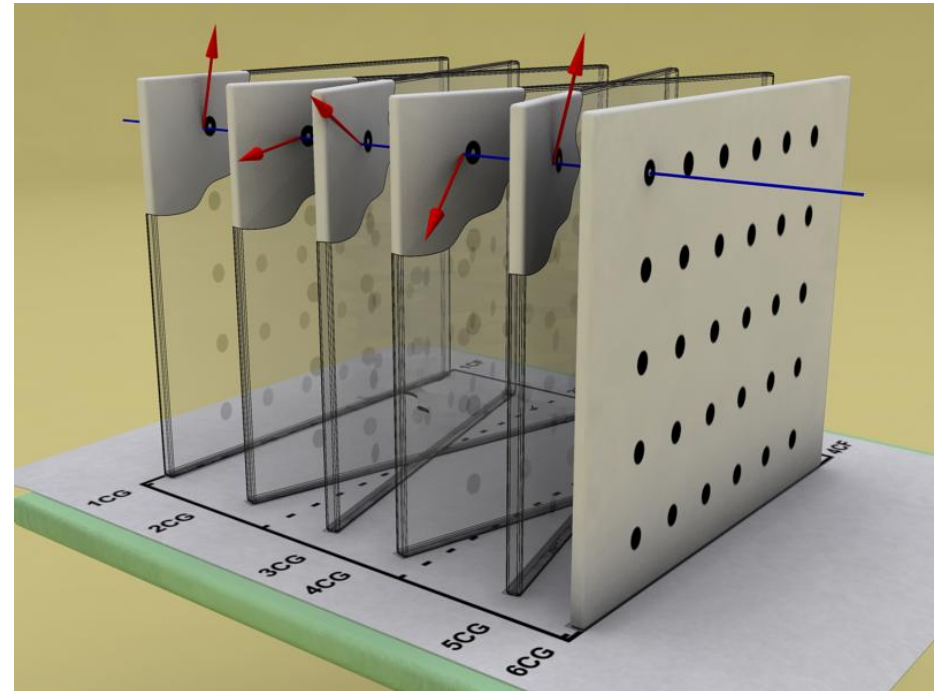


**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



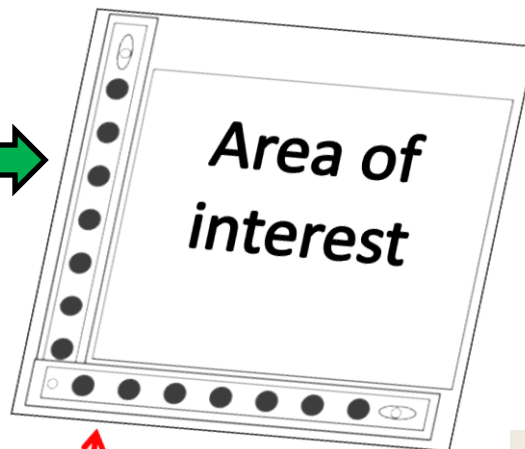
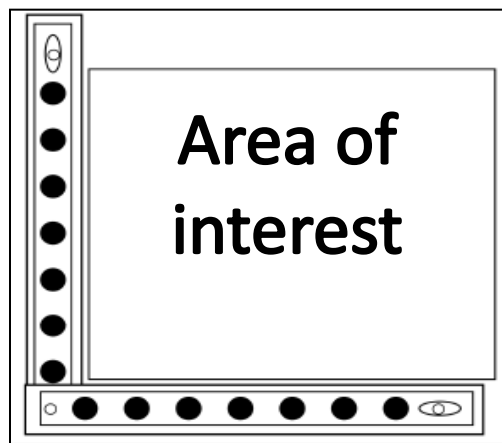
# Kalibracja geometryczna (kamer)

- Pobranie zestawu obrazów wzorca w różnych położeniach
- Dopasowanie zestawu wielomianów zapewniających transformację z układu współrzędnych wzorca do układu kamery
- **Wyznaczenie nowego zestawu współrzędnych 'x', 'y', 'z' reprezentujących każdy z pikseli kamery**



Kalibracja koryguje błędy pochodzące od aberracji obiektywów

# Kalibracja czujnika względem obiektu uzgodnienie układów współrzędnych



$$T_x, T_y, T_z$$

$$R_x, R_y, R_z$$

Wyznaczenie macierzy transformacji

$$\vec{[A_y B_y C_y]}$$

$$\vec{[A'_y B'_y C'_y]}$$

$$(X, Y, Z) \quad \vec{[A_x B_x C_x]}$$

$$(X', Y', Z') \quad \vec{[A'_x B'_x C'_x]}$$



II G NA Podstawowe oprogramowanie gotowe



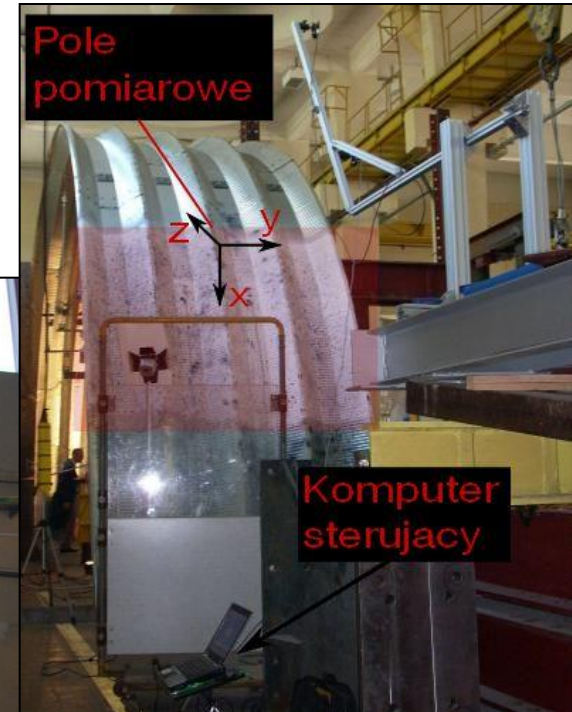
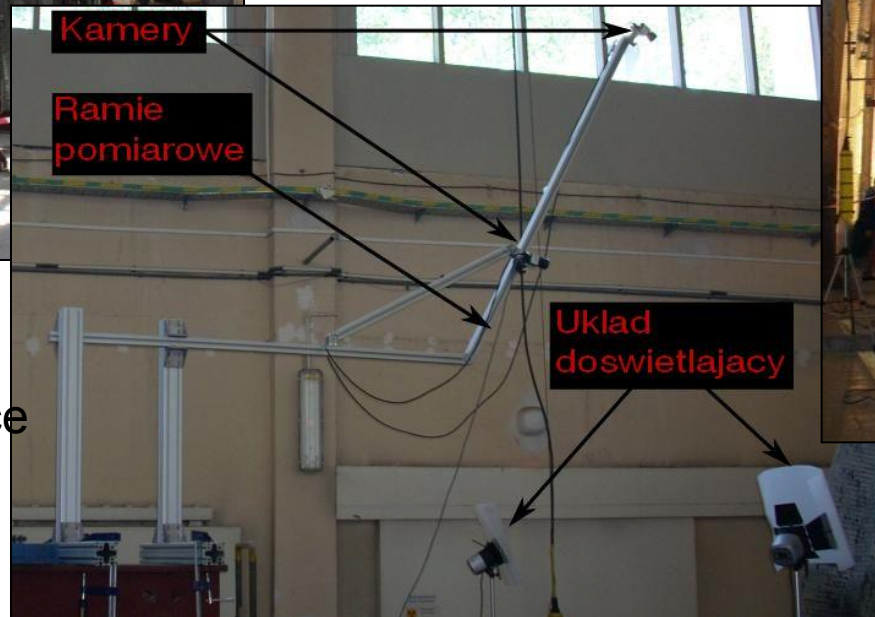
Optymalizacja i modyfikacje wzorców dla uzyskania oczekiwanej dokł.



# Pomiary hangaru z blachy samonośnej



sensor 3D DIC na rusztowaniu



*badany obiekt*

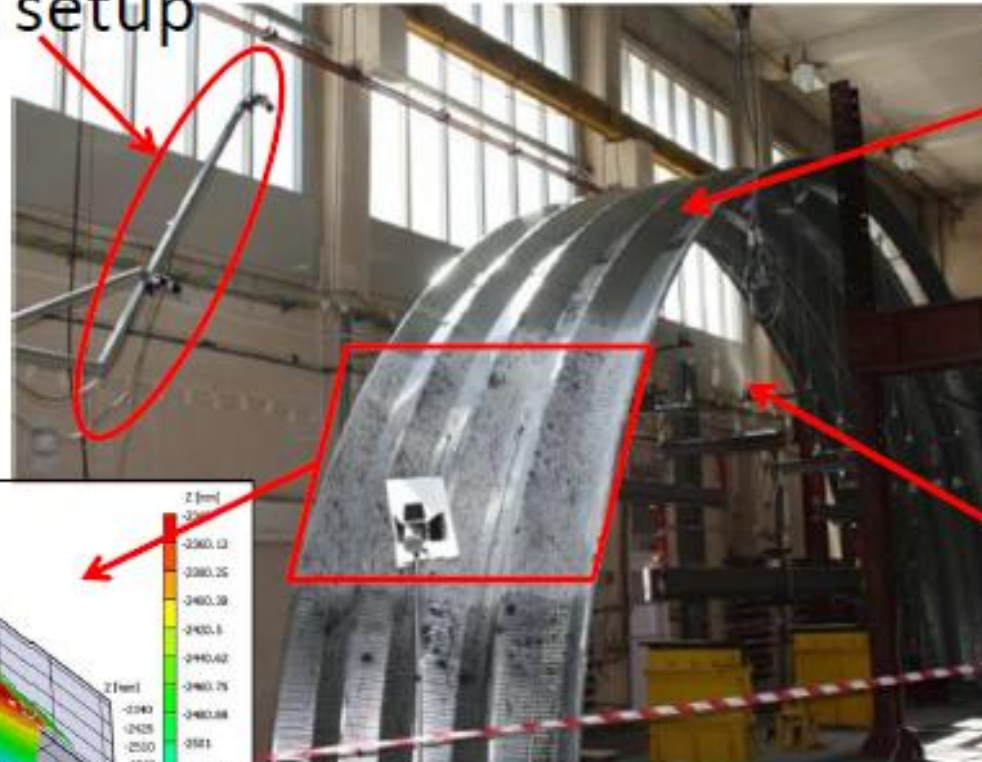
Obciążenie ściskające symulujące pokrycie grubą warstwą śniegu

*pole pom. 2mx2m oraz obrany układ współrzędnych*

# Pomiary hangaru - kształt

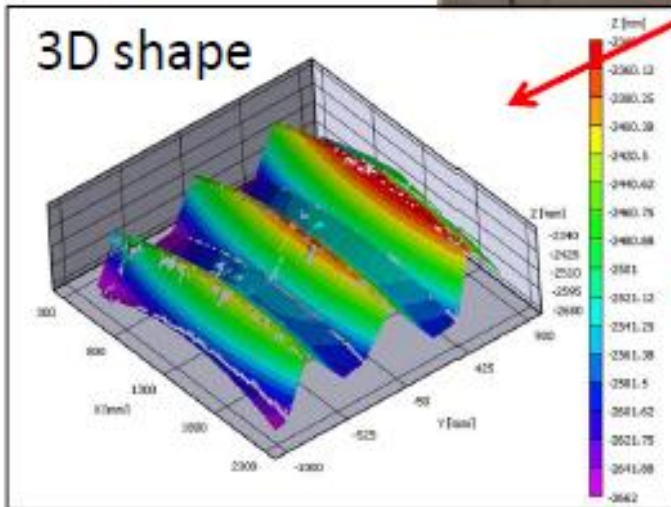
DIC setup

measured object



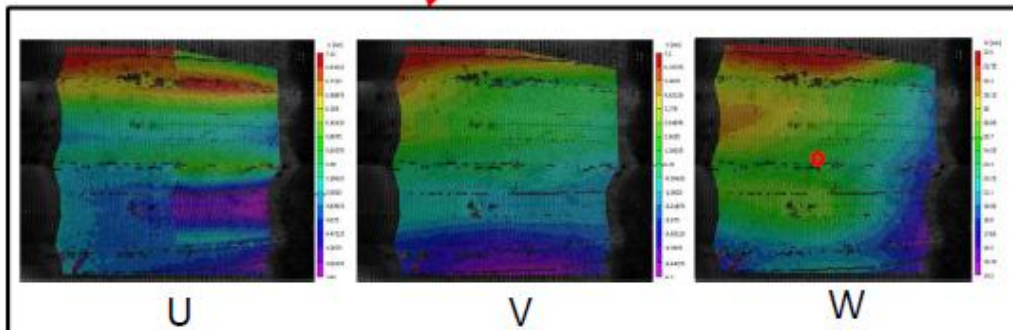
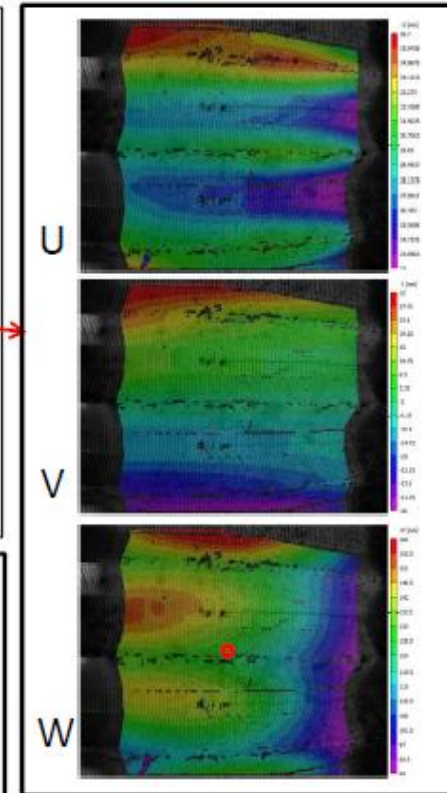
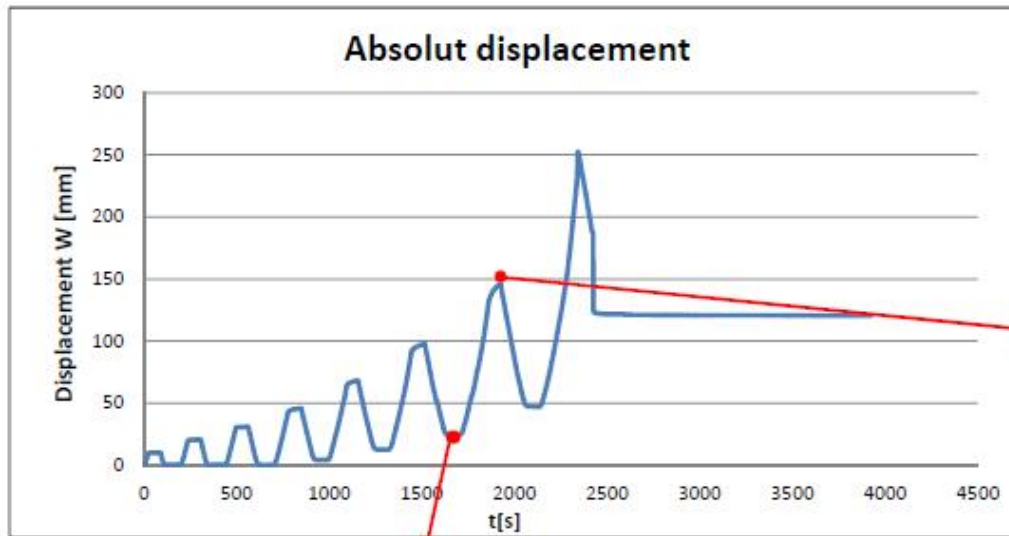
load

3D shape

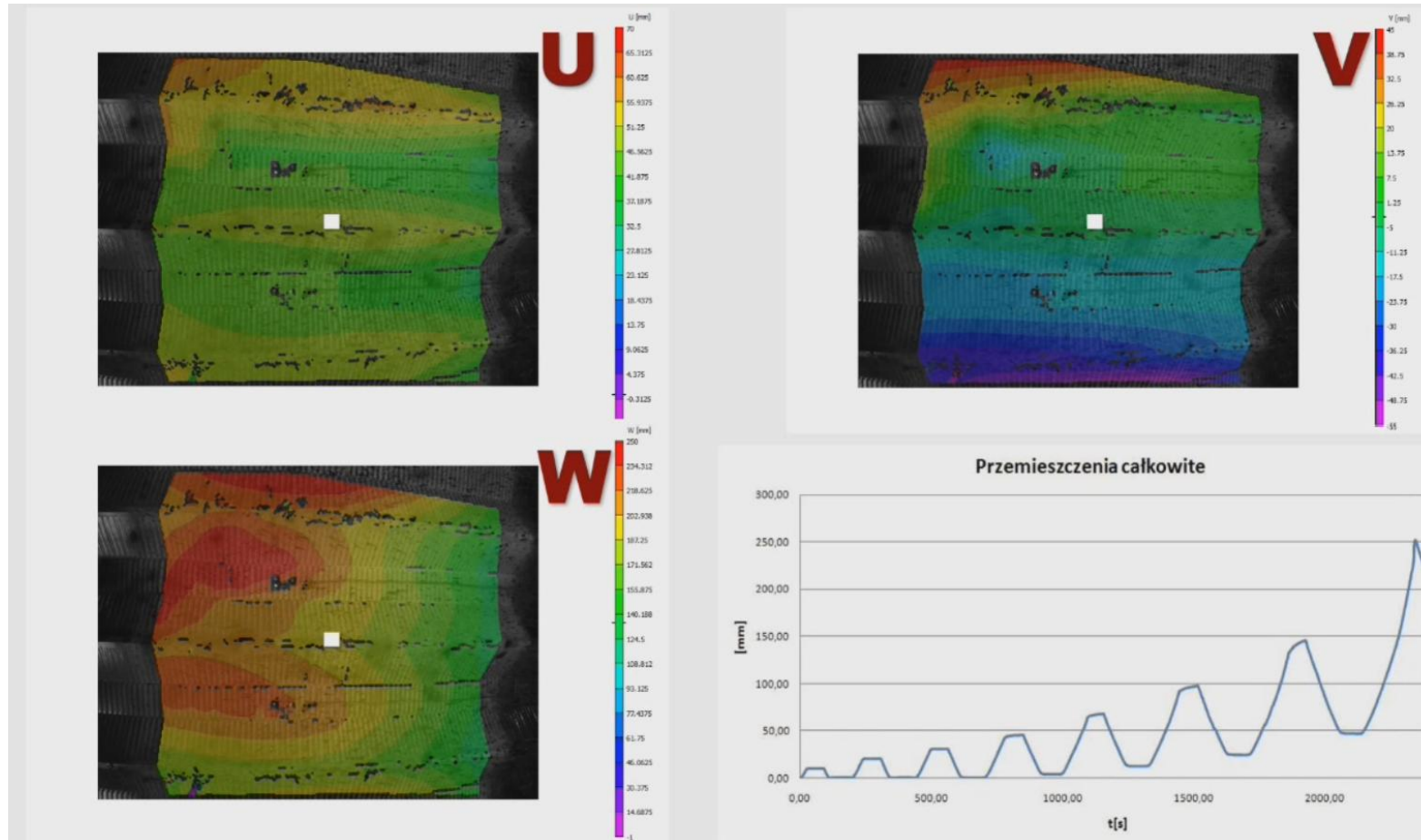


Pomiar kształtu przed obciążeniem obiektu

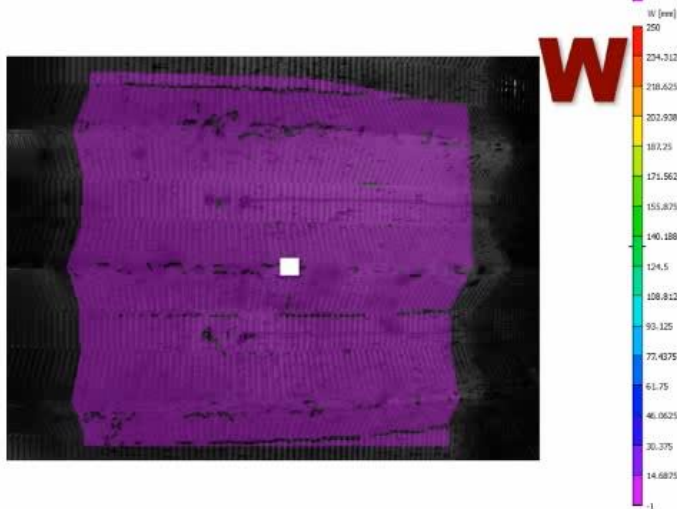
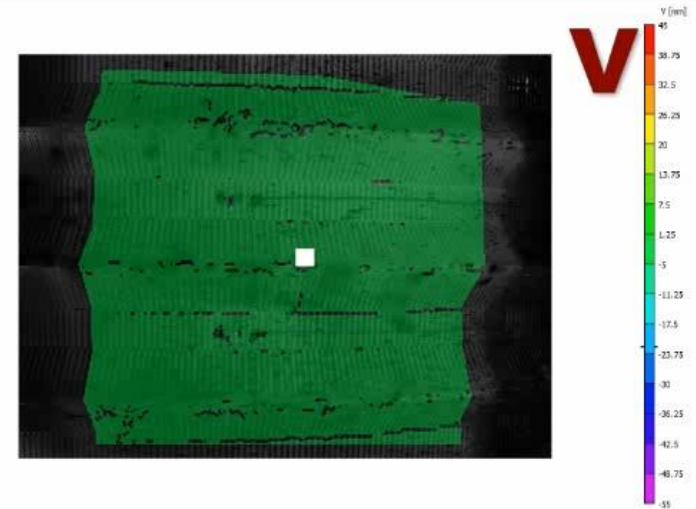
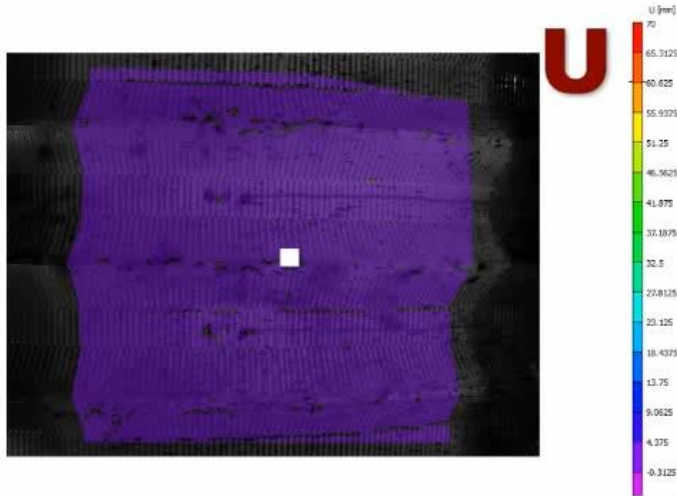
# Pomiary hangaru – przemieszczenia (u,v,w)



# Badania hangaru z blachy samonośnej

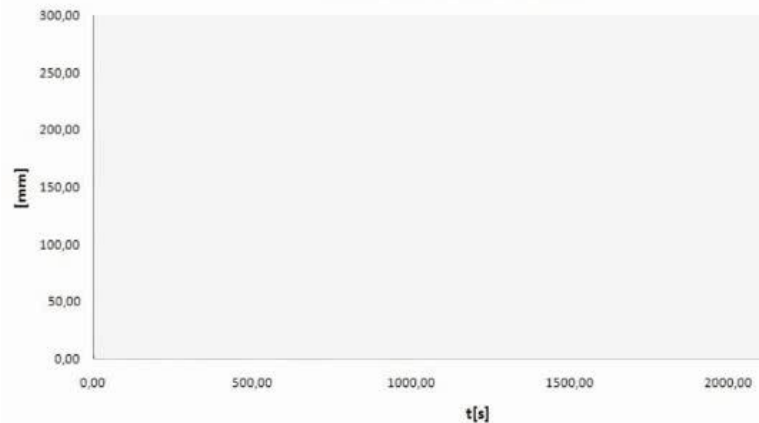


# Badania hangaru z blachy samonośnej



WinANI Video Comparison  
http://www.videocompare.com

Przemieszczenia całkowite





# Hybrydowy czujnik CKO/IR

Równoczesne pomiary:  
Zmian temperatury  
i pól przemieszczeń

<b>Wymiary pomiarowego pola</b>	od 200mm x 150mm do 4000mm x 3000mm
<b>Minimalna czułość systemu</b>	0.05 px (odpowiadający: od 0,006 mm do 0,12 mm) 0,1°C dla pomiarów termicznych
<b>Oprogramowanie –</b> (analiza wykonywana przez układ mikroprocesorowy ARM10 i/lub oprogramowanie zewnętrzne)	Oprogramowanie Therm2.16 do analizy termogramów, Oprogramowanie własne do analizy DIC, Oprogramowanie dedykowane do jednoczesnej analizy przemieszczeń/odkształceń i pól rozkładu temperatur /emisyjność
<b>Masa pojedynczego czujnika</b>	<2kg
<b>Wymiary gabarytowe czujnika</b>	175mmx155mmx75mm
<b>Komunikacja komputerem</b>	z Czujnik działa samodzielnie. Przenoszenie danych poprzez karty SD HC lub USB
<b>Warunki pomiarowe</b>	Zakres pomiarów termicznych od -20° do 120°C, korekcja emisyjności i temperatury otoczenia, pomiary zdalne z zastosowaniem pilota radiowego



Kamera IR V60

Zakres spektralny: 8µm-14µm  
Rozdzielczość: 640 x 480pixels  
Wbudowana kamera video 2Mpixel



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Współpraca z producentem kamery IR  
Vigo System S.A.

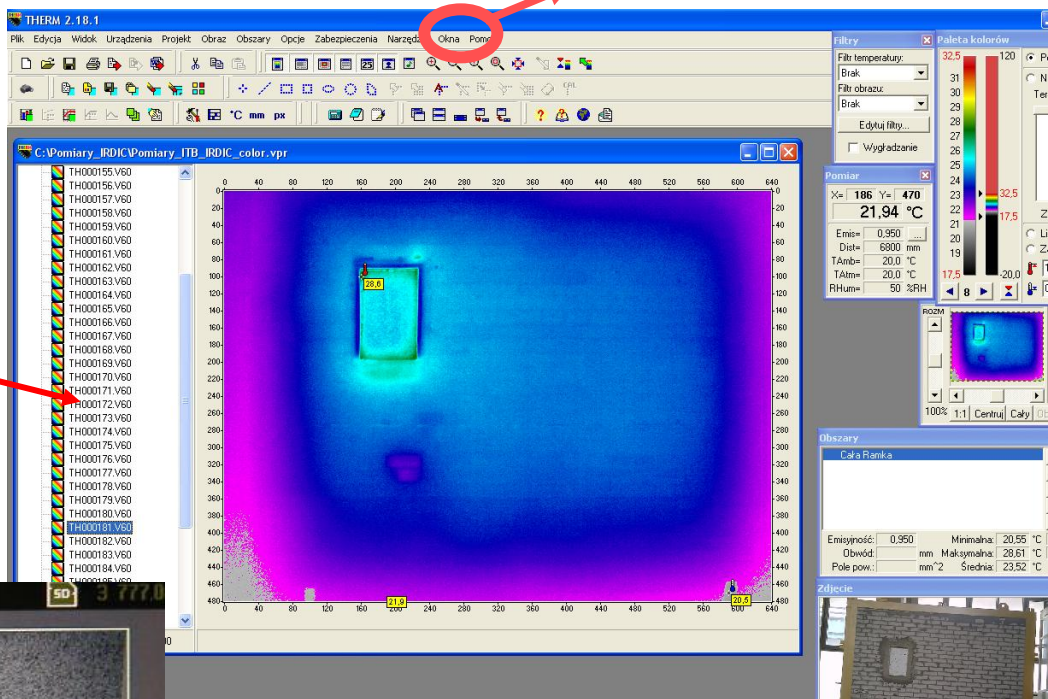


# Czujnik CKO/IR: analiza danych

CKO 2D

Zaprojektowany system integrujący analizę termalną i przemieszczeń na poziomie

- kamery IR
- komputera zewnętrznego



**Pomiar** | **Przeglądarka**

**Nowa seria pomiarowa**

Obraz referencyjny	TH00000
Kalibracja	TAK
Rozpocznij rejestrację	Wykonana
Ustawienia DIC 2D	Domyślne
Analiza DIC 2D	Brak

↑↓ - Ujźwierz OK - Zarejestruj  
←→ - Ustaw ESC - Ujźwierz

**Podgląd pliku**

Mazga: TH000013 Data: 2010-05-13 14:46

Otwórz  
Usuń  
Notałka głosowa  
Wyjście

← 13 / 64 →  
F1 - Przeglądarka

**Podgląd termogramów** 46.7 F3 915.5

TH000010	TH000011	TH000012	TH000013
TH000014	TH000015	TH000016	

TH000014 2008-09-27 18:40 324 KB



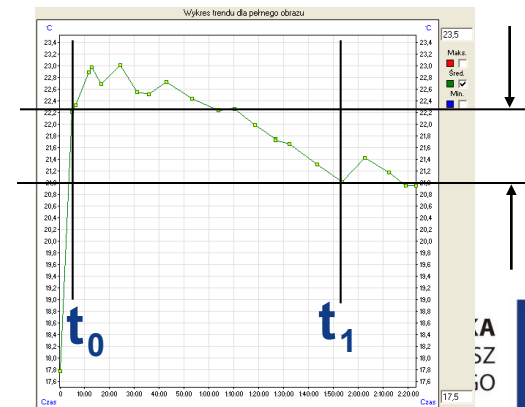
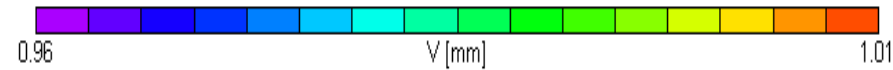
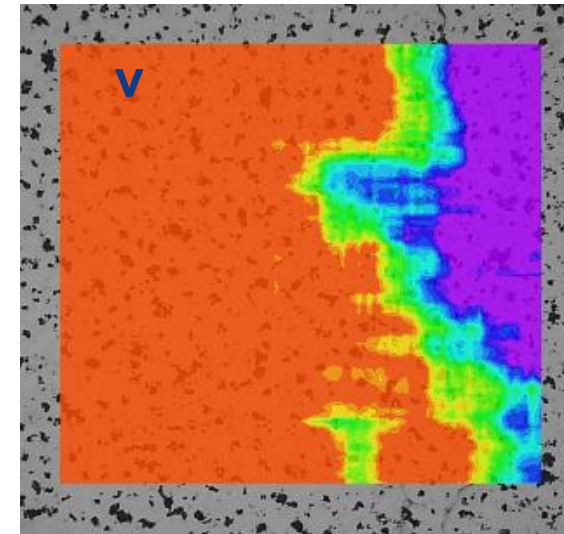
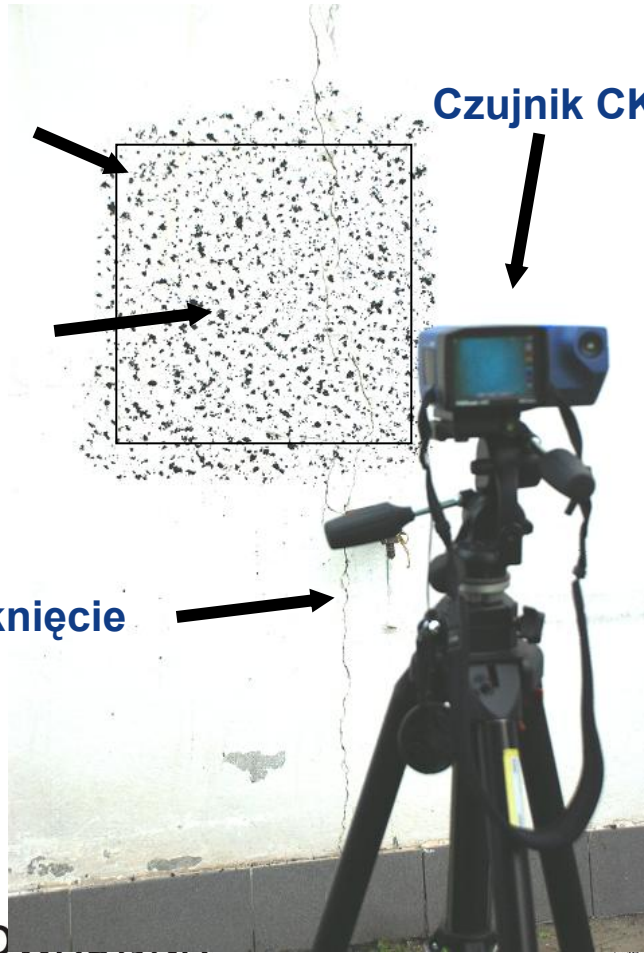
# Pomiary propagacji szczeliny w ścianie ogrzewanego budynku

FoV 1m x 1 m

Tekstura

Czujnik CKO/IR

pęknięcie



1.8°C



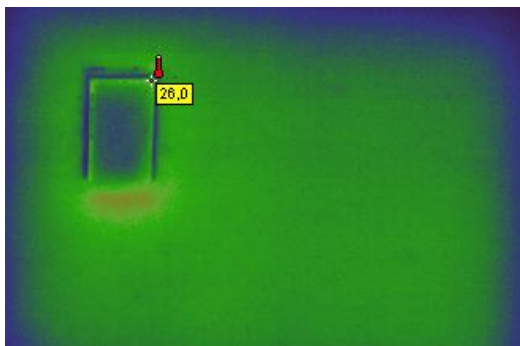
INNOWACYJNA  
GOSPODARKA  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



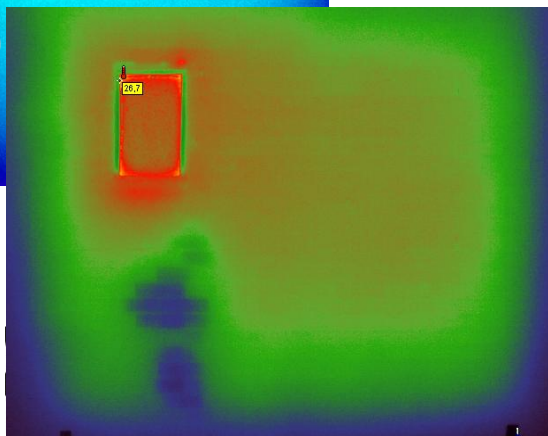


# Monitorowanie izolacji budynku w warunkach prób eksploatacyjnych

## Analiza termogramów

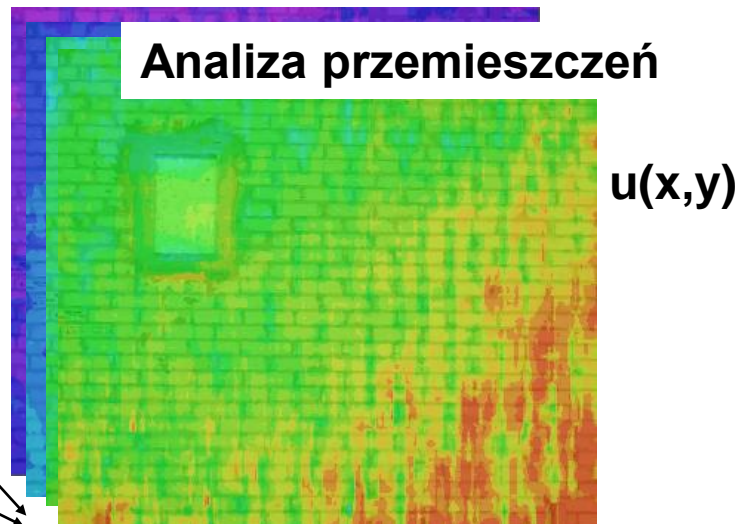


80 cykli grzania  
(+70°C – 3h)  
i polewania wodą  
(+13°C – 2h)

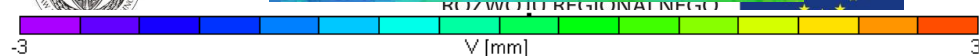
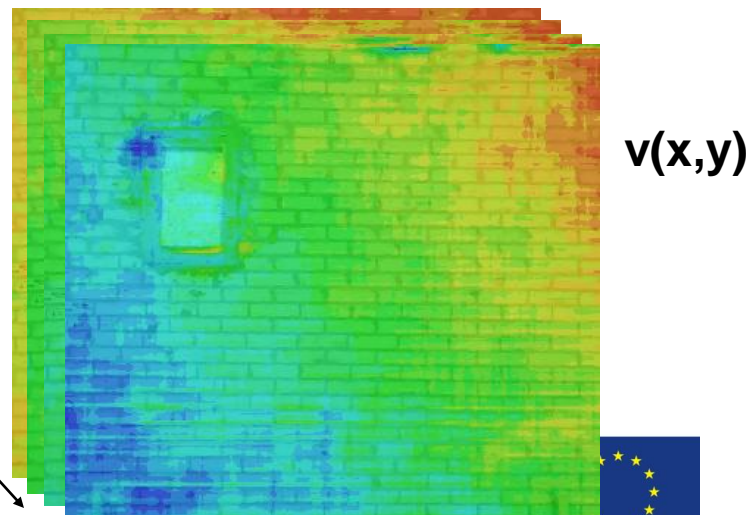


Wpływ wody penetrującej warstwę izolacji

## Analiza przemieszczeń



Analiza serii przemieszczeń

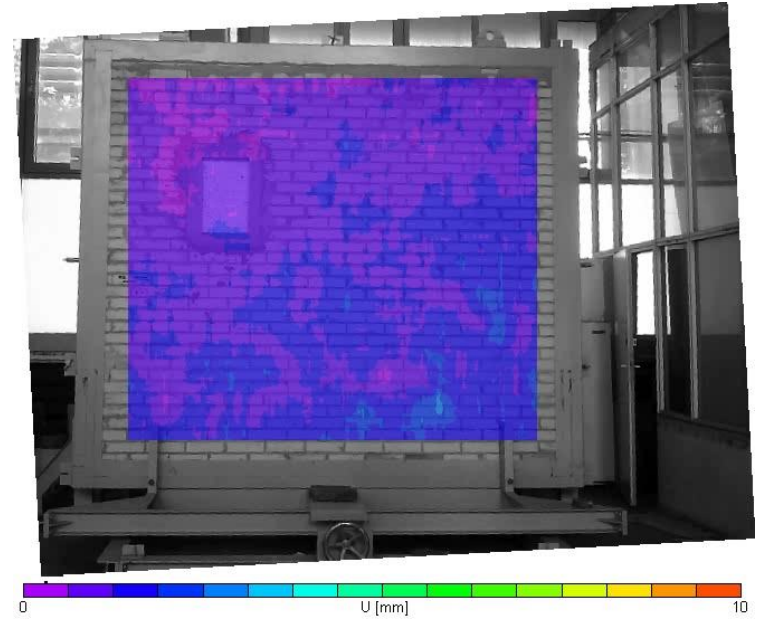
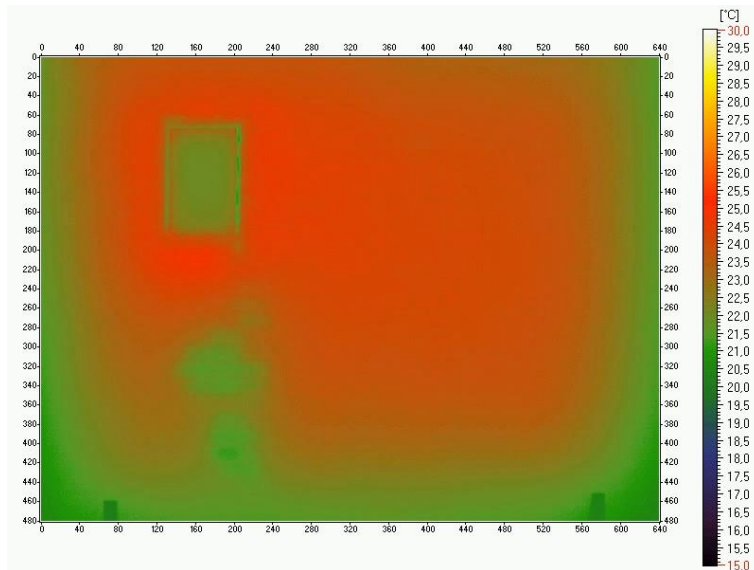




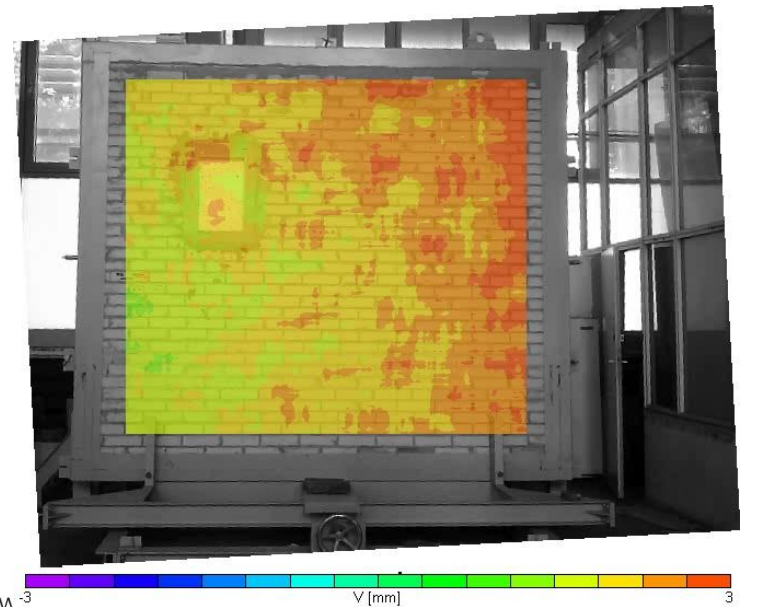
# Monitorowanie pól emisyjności i przemieszczeń

$u(x,y)$

$T(x,y)$



$v(x,y)$



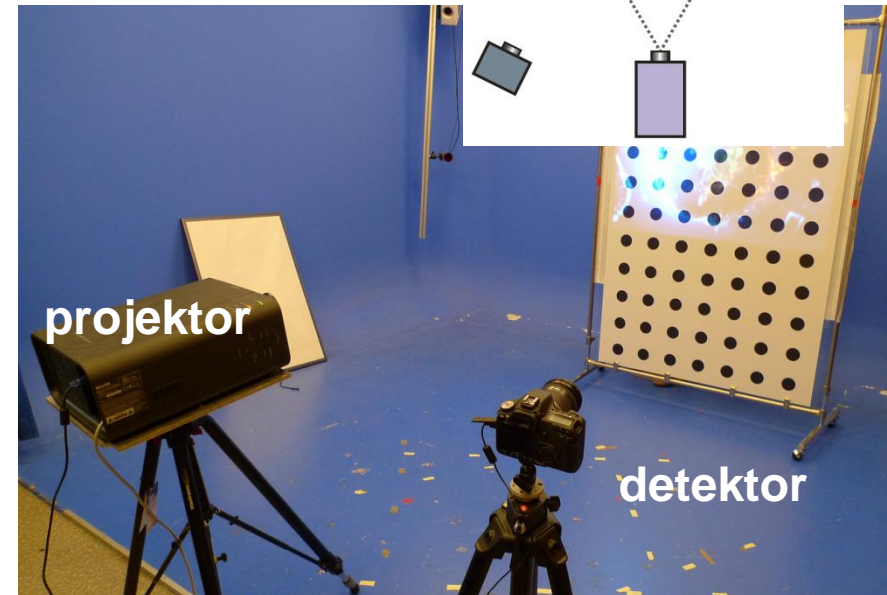
**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



# System projekcji prążków: pomiar kształtu i deformacji



<b>Wymiary objętości pomiarowej</b>	<b>20m x 15m x 8m</b>
<b>Oprogramowanie</b>	Moduły: do kalibracji czujnika, do pomiarów w trybie 3D (x, y, z); łączenia danych z wielu kierunków, łączenia danych z pom. wyk. w różnych chwilach czasowych;
<b>Czas pomiaru</b>	<b>5 minut</b>
<b>Masa pojedynczego czujnika</b>	<5kg dla modułu detektora; <25kg dla modułu projektora; <15kg dla modułu zewnętrznego zasilania
<b>Gabaryty czujnika</b>	m. proj.: 500mm x 400mm x 250mm m. det.: 200mm x 200mm x 200mm
<b>Odległość czujnika od obiektu</b>	od około 30m od czołowej powierzchni obudowy czujnika (dla max obj. pom)
<b>Warunki pomiarowe</b>	rozpraszająca powierzchnia obiektu badanego, stabilność temp. czujnika w zakresie 2deg na czas pomiaru.



Demonstrator systemu bez obudowy

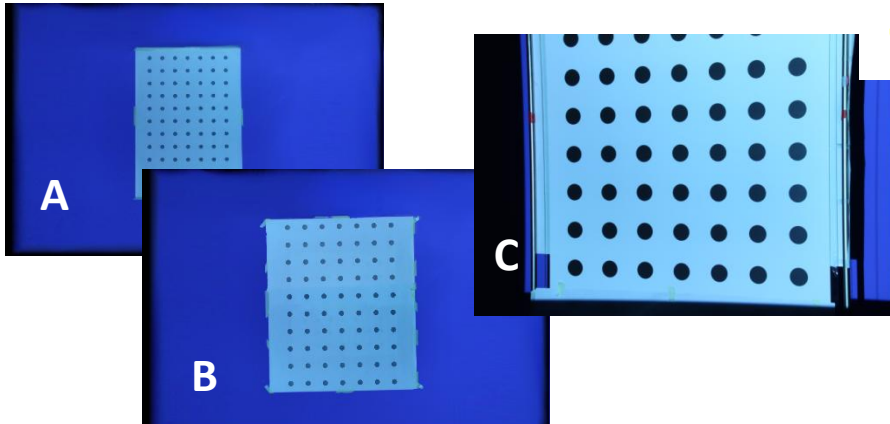
## Elementy nowości:

- *duża objętość pomiarowa,*
- *specjalna metoda kalibracji*

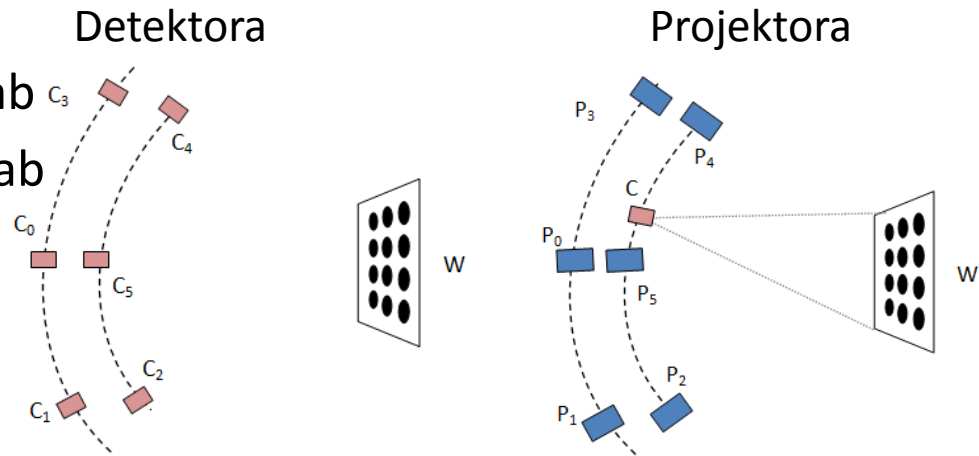
# Czujnik projekcji prążków- kalibracja

## Przebieg testów:

- ✓ kalibracja detektora KD(3 wzorce) Lab
- ✓ kalibracja projektora KP(3 wzorce) Lab
- ✓ kalibracja wzajemna KW(2 wzorce)
- ✓ Weryfikacja pomiarów (3 położenia)



## Ustawienie do kalibracji



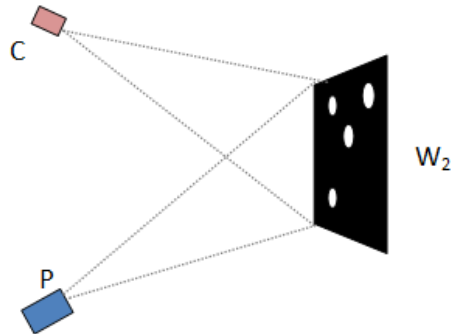
Badania  
Procedur  
kalibracyjnych

Na niepewność pomiaru bardziej wpływa wymiar wzorca KW, anizeli wzorca KD i KP

Oznaczenie wzorca	Powierzchnia wzorca*	Odległość między znacznikami	Wzorec: pow. detek. zapełniona w:
A	660mm x 1210mm	110 mm	~10%
B	840mm x 1260mm	140 mm	~20%
C	960mm x 1600mm	160 mm	~80%

# Czujnik projekcji prążków- kalibracja

## Ustawienie do kalibracji wzajemnej



Pomiar = akwizycja 27 obrazów:

- 4 obrazy prążkowe pionowe
- 9 obrazów z kodami Gray'a pionowymi;
- 4 obrazy prążkowe poziome z  $\delta=\pi/2$
- 9 obrazów z kodami Gray'a poziomymi;
- 1 obraz bez prążków.

Łączny czas rozstawienia systemu i kalibracji: ~60 minut

Uzyskana niepewność pomiaru (rozd. 1936 x 1288, PP 2m x 2,4m x 0,8 m): **2,8 mm**

Przewidywana niepewność pom. (rozd. 3456 x 2304 , PP 20m x 15m x 8m): **20 mm**

## Parametry wzorca:

Średnice sfer: 80mm

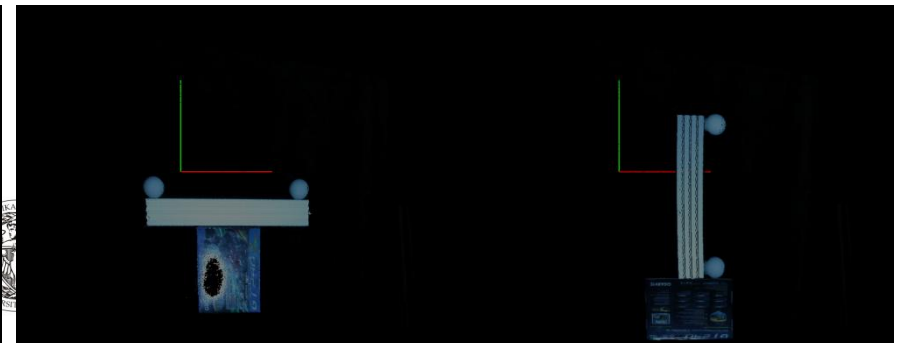
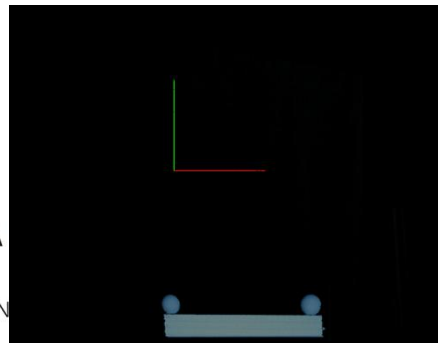
Odległość między

sferami: 495mm



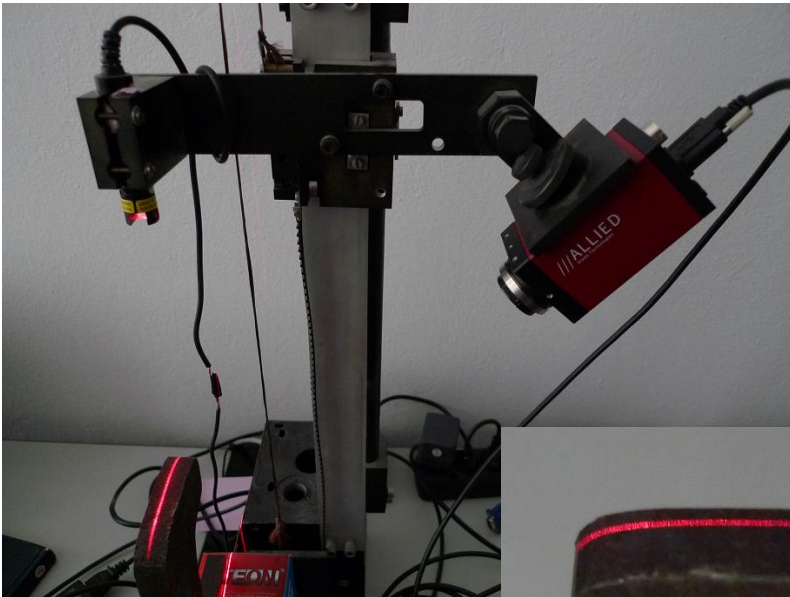
**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJN

## Ustawienia wzorca do weryfikacji:



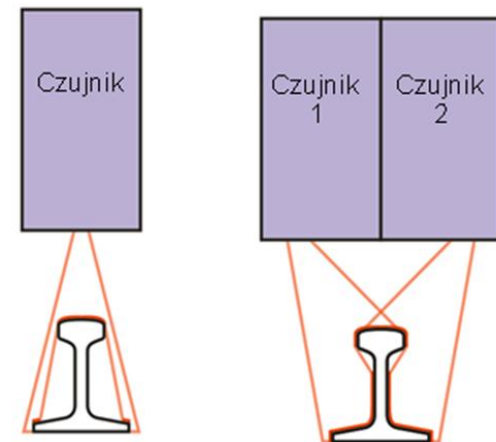
# Czujnik triangulacyjny

## Model lab. czujnika



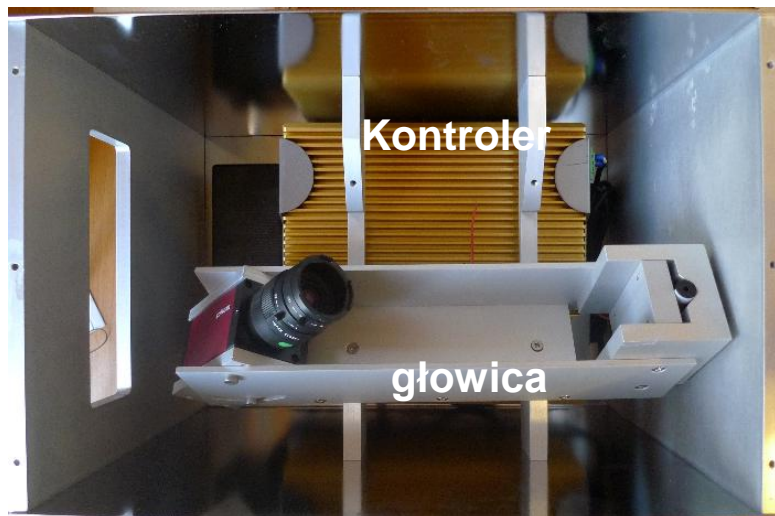
## Pomiar:

- ✓ zużycie pionowe
- ✓ zużycie boczne
- ✓ rozstaw torów
- ✓ względne nachylenie szyn
- ✓ Możliwość synchronizacji dowolnej liczby urządzeń



# Czujnik triangulacyjny

## Demonstrator czujnika



## Podstawowe parametry czujnika

<b>Min. czułość systemu triang.</b>	0.03mm, dla $\alpha = 45\text{deg}$ i max objętości pomiarowej
<b>Max. Obj. Pom.</b>	180mmx180mmx180mm
<b>Oprogramowanie wewnętrzne</b>	Moduły do kalibracji czujnika; moduł przekształcający obraz na dane (x,y)
<b>Oprogramowanie zewnętrzne</b>	Moduł wgrywanie kształtu szyn i obliczania odchyłek
<b>Masa czujnika</b>	ok.20kg
<b>Częst. pomiarów</b>	200Hz lub 400Hz
<b>Wymiary gabarytowe jednego czujnika</b>	400mm x 400mm x 200mm
<b>Komputer</b>	Core 2 Duo@2GHz, 2GB RAM
<b>Komunikacja z komputerem</b>	komunikacja IP w trybie przewodowym, lub bezprzewodowym (WIFI)



# System triangulacyjny – oprogramowanie

## Urządzenie triangulacyjne

## Komputer obliczeniowy

### Detektor

### Kontroler

### Analiza metrologiczna

### Analiza końcowa

Akwizycja obrazu  
Operacje LUT

Filtracja  
Morfologia  
Segmentacja  
Obliczanie kształtu

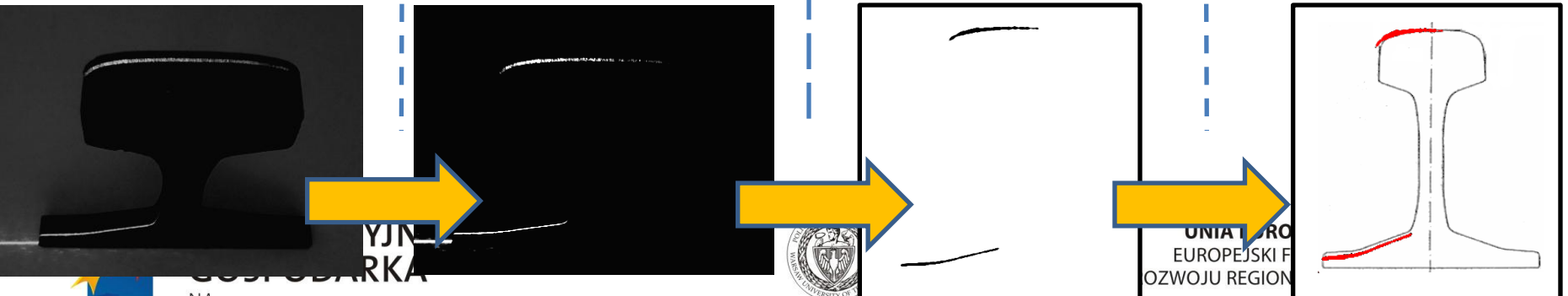
Dopasowanie  
profilu szyny (RMS)  
Obliczenie  
odległości punktów  
od profilu

Analiza zużycia na  
całej badanej  
długości szyny

Bitmapa 8-bit

Chmura  
punktów

Odchyłki  
kształtu



FireWire IEEE1394b

Gb LAN



# System triangulacyjny

Przyszłe prace (czujnik):

- Enkoder mierzący prędkość kół (*dla urządzeń ręcznych*)
- GPS (*położenie czujnika, prędkość*)
- Czujnik inercyjny (*dla przypadków zgubienia sygnału GPS np. tunele*)

Przyszłe prace (pom. funkcjonalne)

- I etap: Ręczne pomiary



- II etap: Automatyczne na wagonie pomiarowym (PLK)

- Przedstawiono konstrukcje i parametry czujników przemieszczeń w płaszczyźnie i poza- płaszczyznowych wykorzystujące metodę cyfrowej korelacji obrazu i termowizji oraz pokazano przykłady ich zastosowań
- Zaprezentowano nową metodę realizacji pomiarów rozłożonych w czasie
- Przedstawiono hybrydowy czujnik CKO/IR i jego zastaw.
- Przedstawiono konstrukcję, nową metodę kalibracji i parametry systemu projekcji prążków do pomiaru kształtu obiektów wielkogabarytowych
- Przedstawiono konstrukcje i parametry czujnika triangulacji laserowej do pomiarów kształtu szyn





## Zespół realizujący:

Małgorzata Kujawińska,  
R. Sitnik, M. Malesa, G. Dymny  
P. Błaszczyk, D. Szczepanek,  
K. Malowany, B. Siwek

## Współpraca:

Partnerzy Projektu MONIT  
Instytut Techniki Budowlanej  
Vigo System S.A.

**Dziękuję**



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO

