



**Lesnická  
a dřevařská  
fakulta**

15. 11. 2012, Brno  
Připravil: Václav Sebera, Jan  
Tippner

Předmět: Zpracování obrazu pro  
úlohy dřevařského inženýrství

# Optické měření deformace metodou korelace digitálního obrazu

Mendelova  
univerzita  
v Brně



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

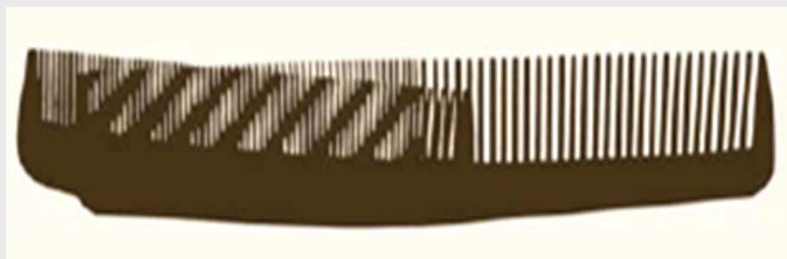
# Obsah

- Optické metody
  - Geometric Moiré
  - Moiré Interferometry
  - Speckle Methods
  - Holography
- Digital image correlation – DIC
  - 2D DIC
  - 3D DIC
  - Digital Volume Correlation – DVC
- Examples of the using FEM in Wood Science
- Conclusions



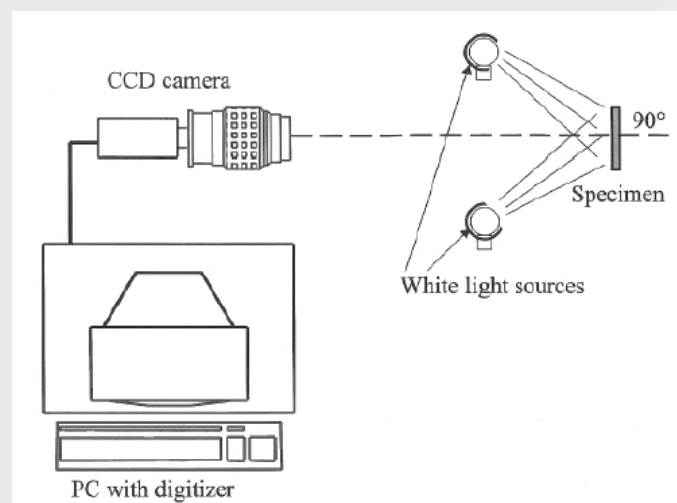
## Geometric Moiré

- Moiré vzory jsou běžně pozorovatelné
- Pásy se nazývají “Moiré Fringes”, které vyjadřují rozdíly mezi 2 “síty”
- Slovo je odvozeno ze skládaných hedvábných a mohérových látek --> zvýšení estetické kvality
- K vyjádření deformace povrchu



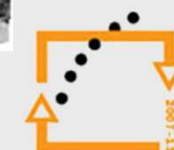
# Co je metoda digitální korelace

- Nekontaktní optická metoda měření
- Měření deformace objektů (posunutí, poměr. deformaci a zakřivení)
- Rozlišení (přesnost) je obecně udáváno na **0.02 pixelu**
- Tři druhy
  - **2D DIC** - měření na 2D rovinné ploše (in-plane)
  - **3D DIC** - stereoskopické měření na zakřivené ploše objektu, tj. "3D" (out-of-plane)
  - **DVC** - je schopno měřit deformaci i uvnitř tělesa - vyžaduje 3d snímek (eg. X-ray  $\mu$ CT, MRI)



# Milníky na cestě k DIC

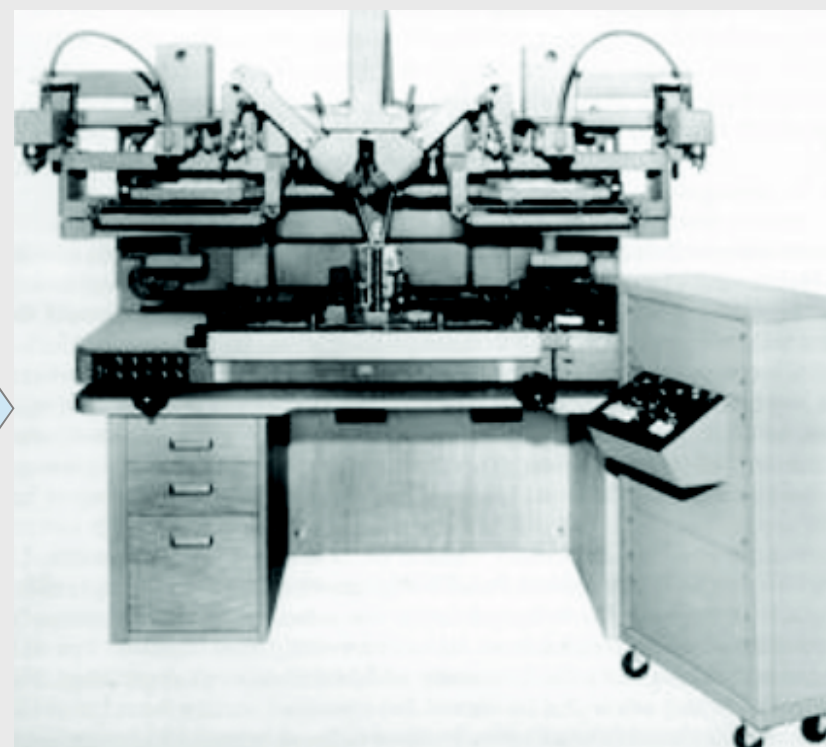
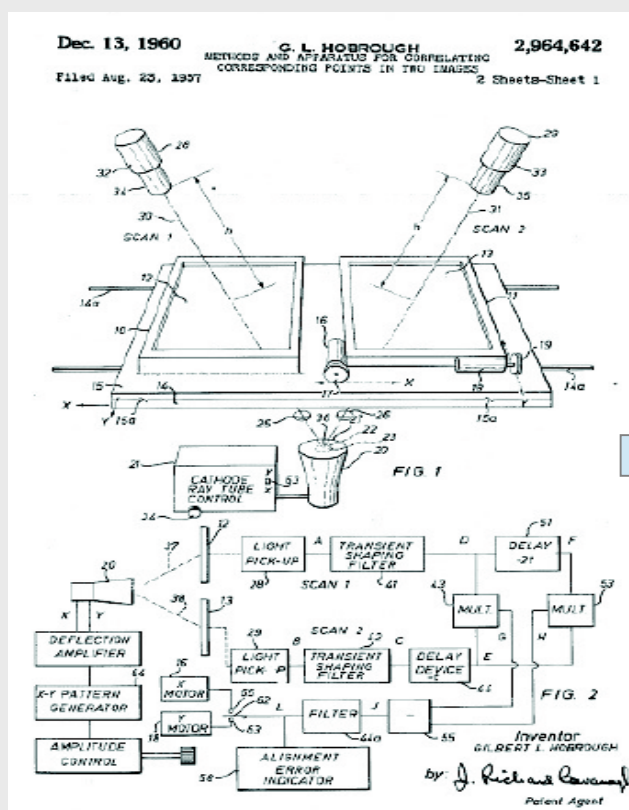
- **Heinrich Lambert** (1728-1777) – švýcarský fyzik, matematik. Dílo “The Free Perspective”
  - Základy matematiky perspektivy a snímání
- **Luis Daguerre** (1787-1851) – francouzský vědec, fyzik, vynálezce, otec fotografie ~ snímku (Daguerreotypu)
- Rozvoj **Fotogrametrie** (19. století) – ~ ze snímků se extrahují vlastnosti objektů
- Korelace snímků **Gilbert Hobrough (1960)** – připravil nástroj na korelaci průzkumných a geodetických/leteckých snímků za účelem přesnějšího vyhodnocení změn pozemních podmínek a jejich měření



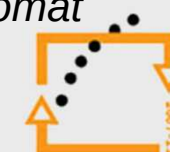


# Milníky na cestě k DIC

## • Gilbert Hobrough (1960)



Raytheon-Wild B8 Stereomat  
(1961)

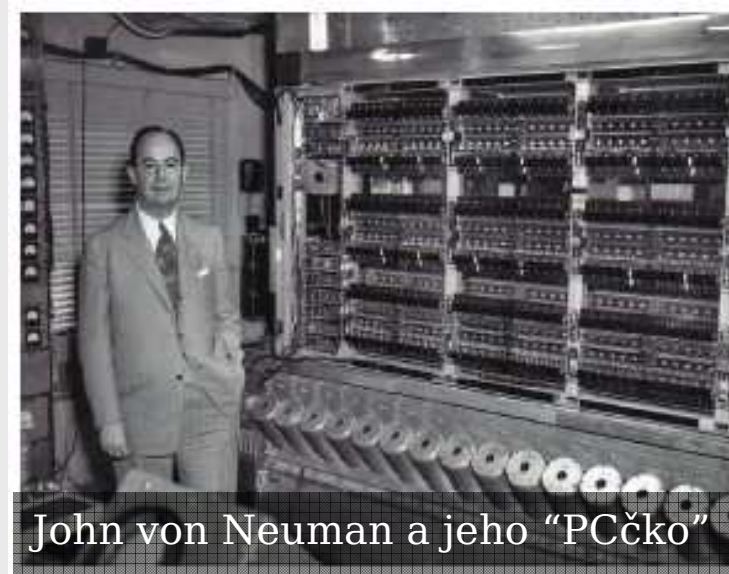


# Milníky na cestě k DIC

- 1. digitální snímky (~ 1921), pro média --> transfer data between Europe and USA
- Vynález **počítače** (1945-1946) – John von Neuman (János Neuman)
- vynález **čipů** (CMOS – 1967, CCD – 1969)
  - Nobelova cena za fyziku v 2009 udělan za objasnění principu a konstrukci CCD
- **Peters a Ranson** (1982): první použití DIC v analýze vlnového namáhání
- **Sutton** (1983) – vytvořil moderní implementaci 2D DIC



Bartlane cable – telegrafický tisk

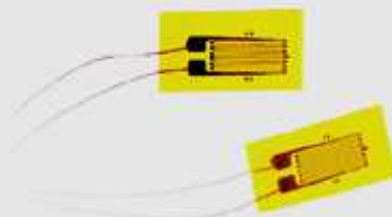


John von Neuman a jeho "PCčko"

# Techniky měření deformace

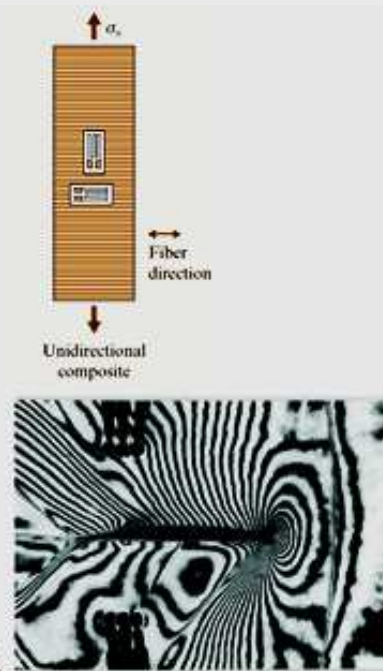
## • Tenzometry

- el. odporové
- Opticko-vláknové
- etc.



## • Interferometrické techniky

- Holografická interferometrie
- Metody "Speckle"
- Moiré





## 2D DIC - předpoklady

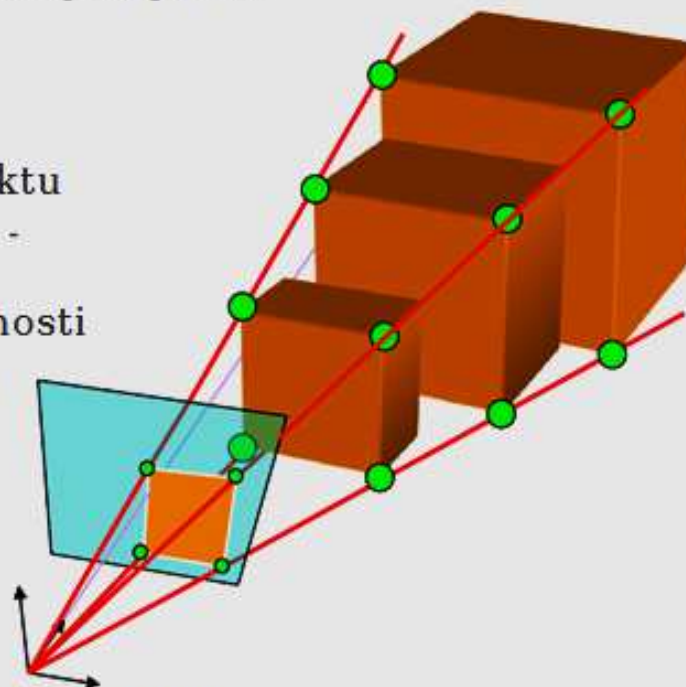
- Pohyb od/k kamery musí být 0, only in-plane

Proč?

- 200% izotropní deformace objektu  
produkuje stejný snímek jako by  
objekt přišel do poloviční vzdálenosti  
od kamery (senzoru, např. CCD)

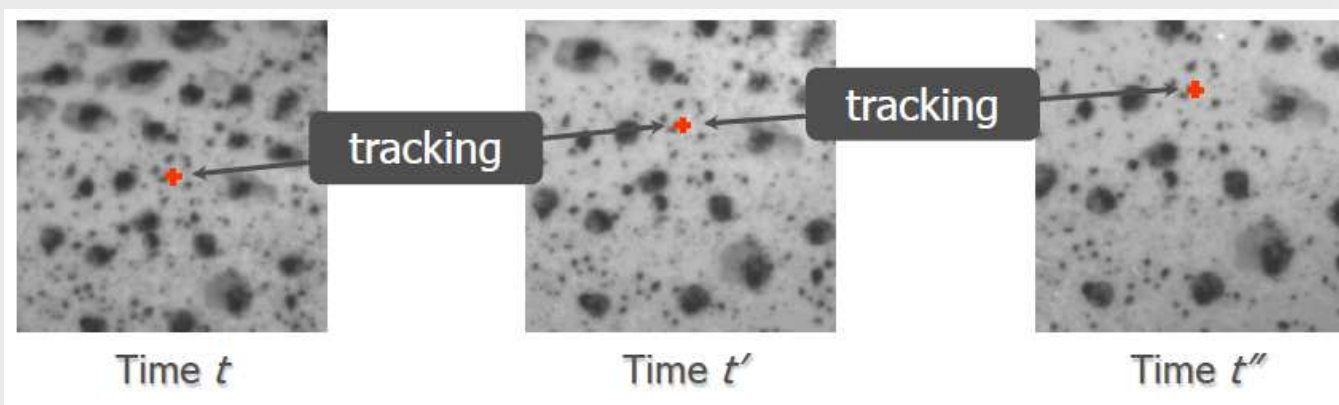
- Co je nutné dodržet

- **Planaritu** povrchu
- Povrch musí být **paralelně** k senzoru
- **Konstantní vzdálenost senzoru od objektu** během měření



## 2D DIC – jak to funguje

- Mějme bod *a* jeho "**podpis**" v nedeformovaném snímku
- **Hledání/trackování** tohoto bodu v deformovaných snímcích pomocí jeho "**podpisu**" způsobem, který maximalizuje **podobnostní funkci (korelaci)**

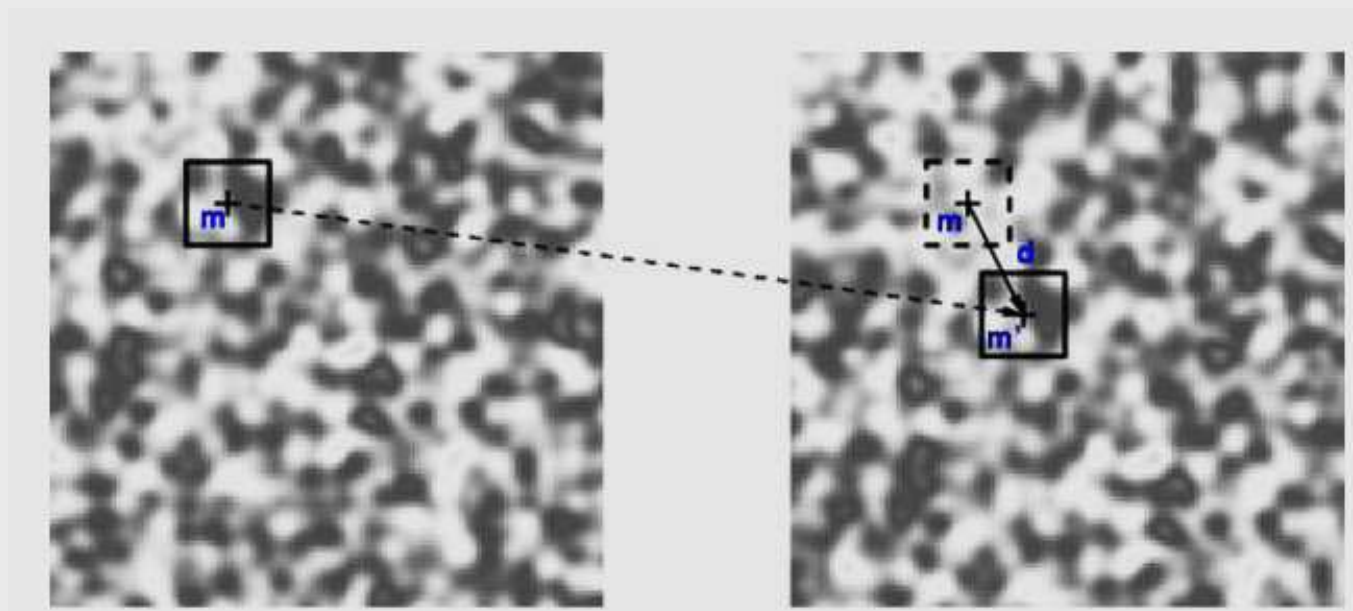


Deformation process



## 2D DIC – jak to funguje

- V **praxi** není jediná hodnota unikátním “**podpisem**” bodu, proto musíme použít celé okolí bodu
- Toto okolí bodu (hodnoty intenzit) nazýváme “**subset**”

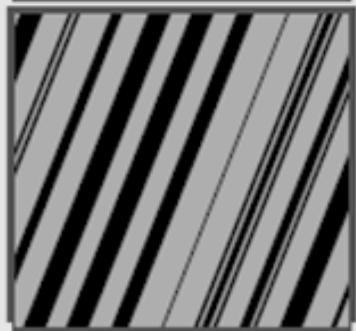


## 2D DIC – jak to funguje

- Unikátnost každého podpisu je garantována pokud má povrch **nerepetitivní, isotropní a vysoce kontrastní vzor** (patern)
- Tyto podmínky splňuje náhodný vzorec (speckle pattern)



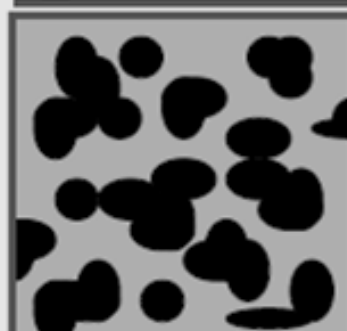
High contrast  
Repetitive  
Anisotropic



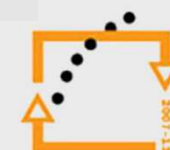
High contrast  
Non-repetitive  
Anisotropic



Low contrast  
Non-repetitive  
Isotropic



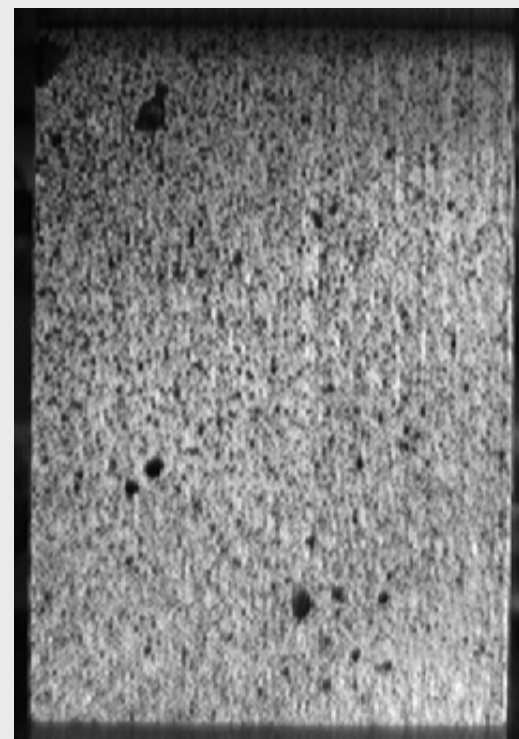
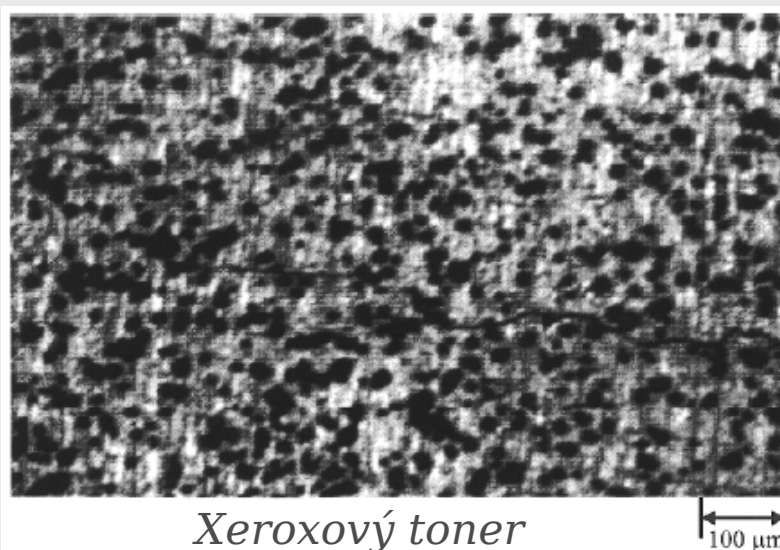
Low contrast  
Non-repetitive  
Isotropic





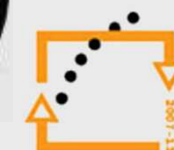
## 2D DIC – jak získat náhodný vzorec

- K získání unikátního paternu:
  - sprej (black and white)
  - Staré Xeroxové tonery
  - “Křídu a pepř” etc.



## 2D DIC – experimentální požadavky

- “určují předpoklady metody”
- Difuzní (inkoherentní) světlo, nejlépe monochromatické
- CCD or CMOS video/camera
  - Akvizice snímků
  - 8-bit je dostačující =  $2^8 = 256$  intenzit
  - 10-bit =  $2^{10} = 1024$  intenzit
- počítač – rychlost výpočtu závisí na rozlišení kamery, frekvenci akvizice, HW..., dobrý HDD je výhodou:
  - $1024 \times 1024 = 8,38$  MB (představte si zápis 10 snímků/s)



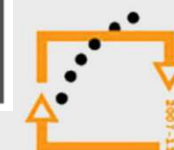
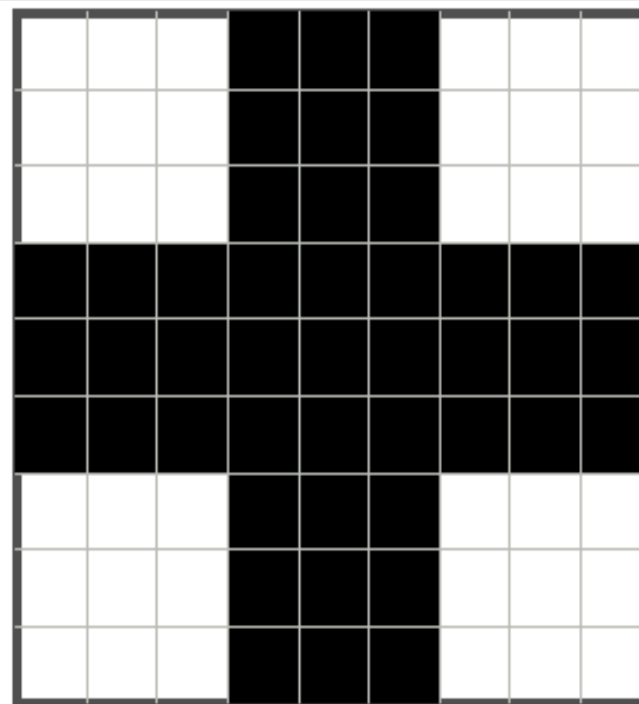
## 2D DIC – příklad

- Představme si binární snímek (0/100) ve tvaru kříže

Počítač vidí (v paměti)

|     |     |     |   |   |   |     |     |     |
|-----|-----|-----|---|---|---|-----|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   | 0   |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

My vidíme



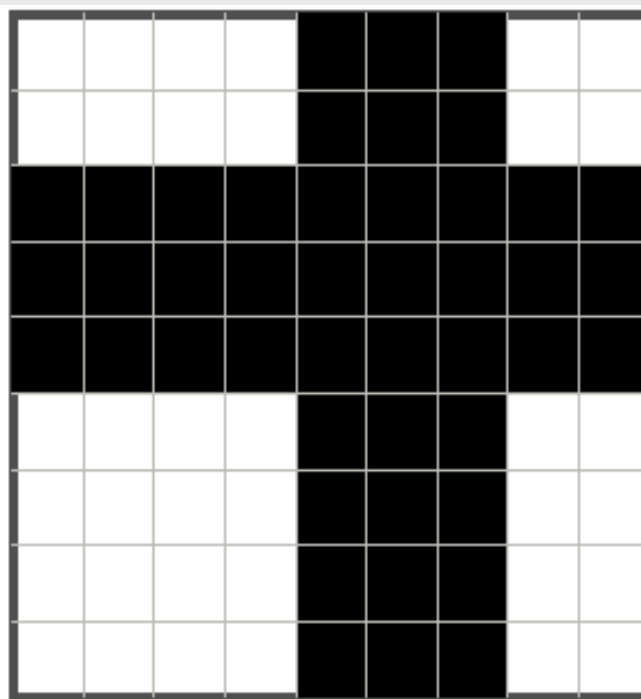
## 2D DIC – příklad

- Předpokládejte že se objekt posune nahoru a doprava

Počítač vidí (v paměti)

|     |     |     |     |   |   |   |     |     |
|-----|-----|-----|-----|---|---|---|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |

My vidíme





## 2D DIC – příklad

- Definujme si subset 5x5
- Cílem je najít kam se subset posunul (“matchingem”)

Před pohybem

|     |     |     |   |   |   |     |     |     |
|-----|-----|-----|---|---|---|-----|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   | 0   |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Subset

Po pohybu

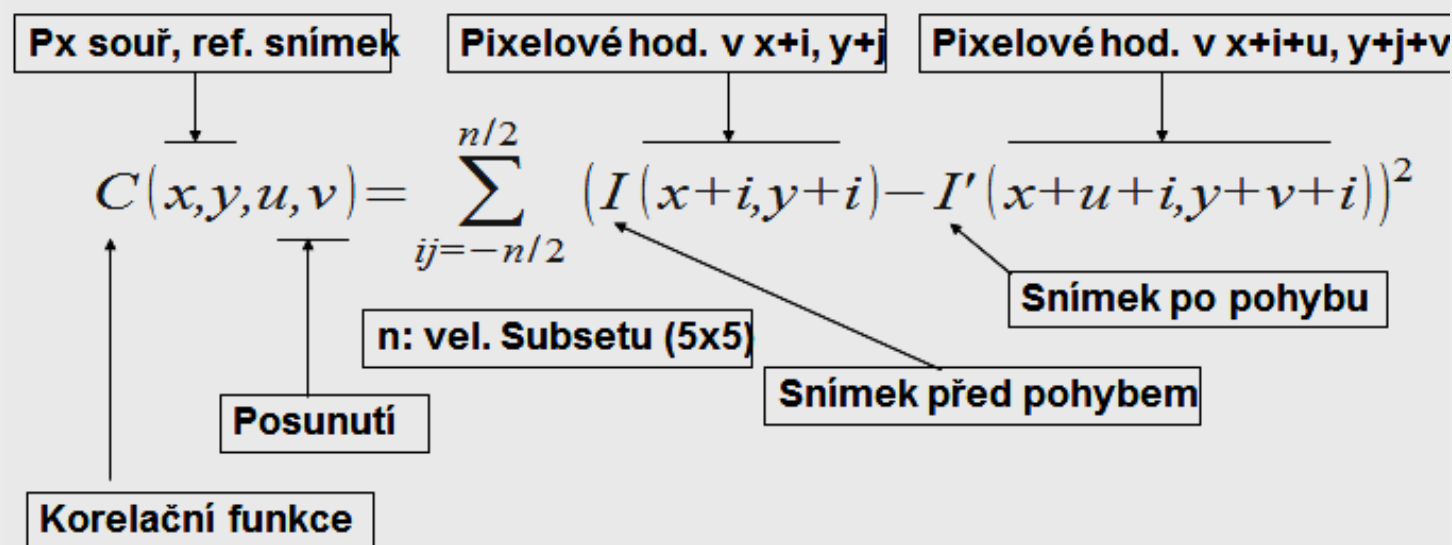
|     |     |     |     |   |   |   |     |     |
|-----|-----|-----|-----|---|---|---|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |

?



## 2D DIC – příklad

- **Řešení:** vypočítat všechny možné varianty (všechny lokace) a pro ně vypočítat **podobnostní skóre (korelační fce)** k získání optima
- Standardní korel. fce: **suma čtverců rozdílů (SSD)**
  - Nižší číslo --> větší podobnost

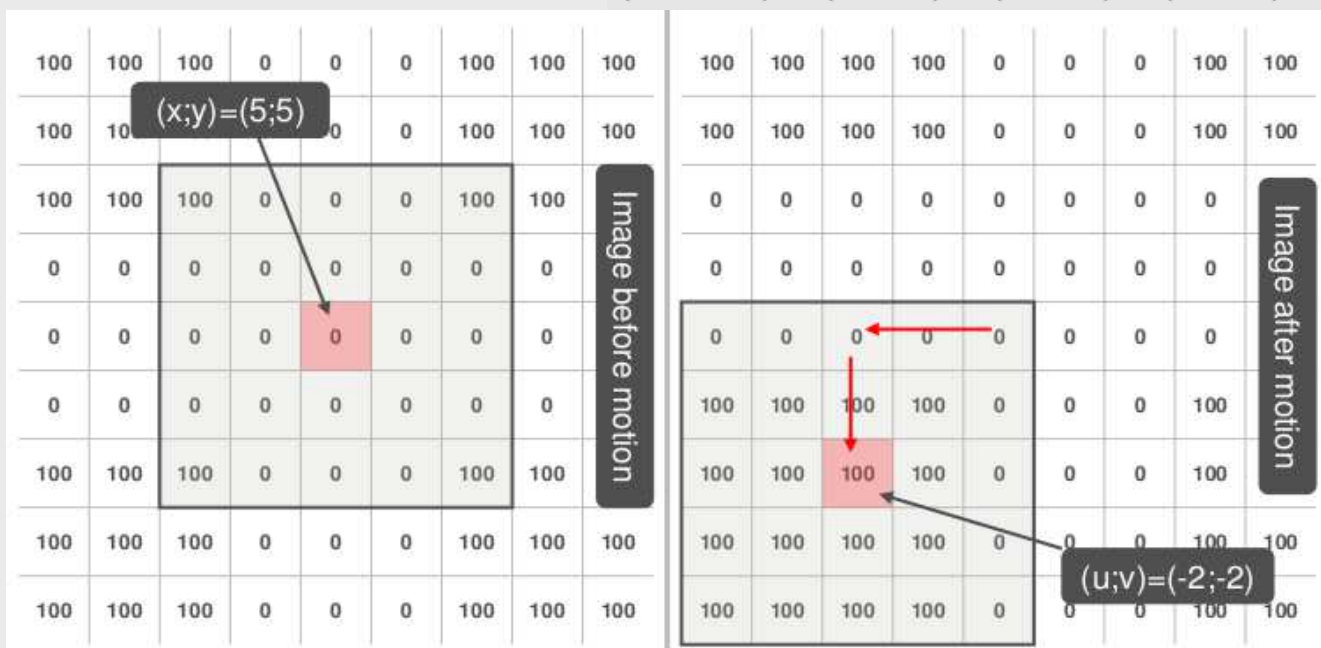


## 2D DIC – příklad

- Př.: subset v posunutí  $(u,v) = (-2;-2)$

$$C(5,5,-2,-2) = \sum_{ij=-2}^2 (I(5+i,5+i) - I(5-2+i,5-2+j))^2$$

$$\begin{aligned} & (100-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (100-0)^2 + \\ & (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-0)^2 + \\ & (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-0)^2 + \\ & (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-0)^2 + \\ & (100-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (100-0)^2 = 18 \end{aligned}$$



## 2D DIC – příklad

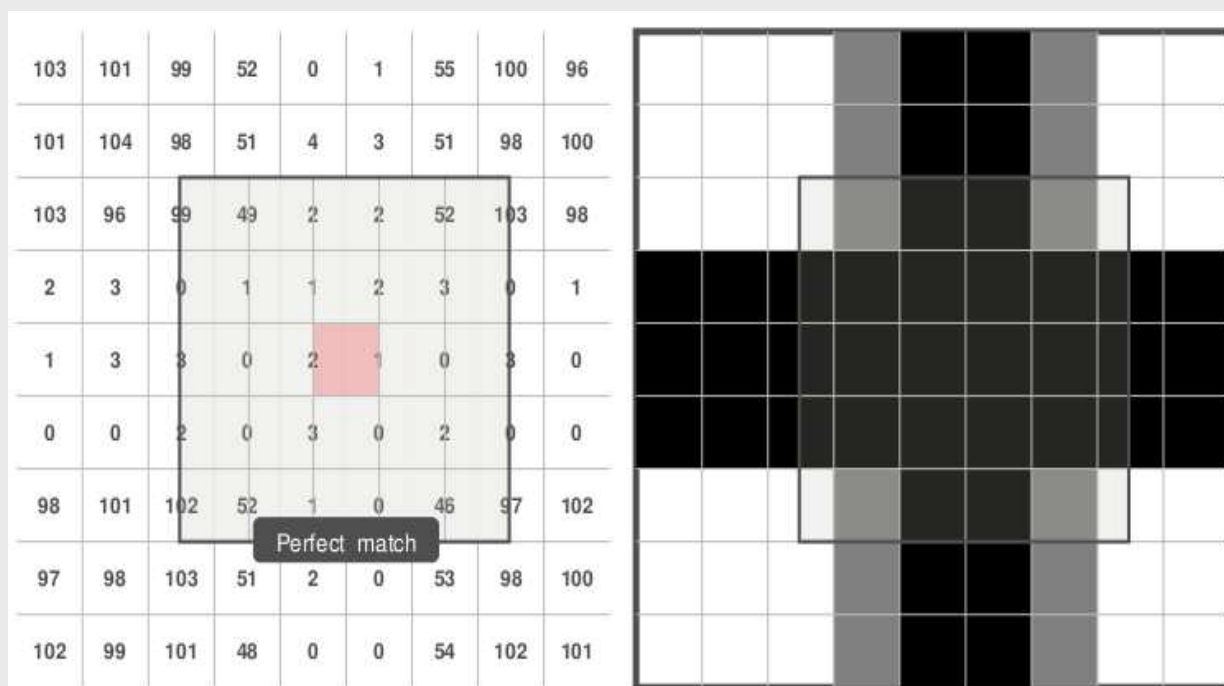
- **Př.:** subset v posunutí  $(u,v) = (1;1)$
- Lepší než pro  $(u,v)=(-2;-2) \rightarrow$  **Dokonalá shoda!**



## 2D DIC

### • Ve skutečnosti

- Snímky obsahují šum --> nikdy  $SSD = 0$  pro nejlepší shodu
- Subpixelový pohyb (mimo celá čísla), smyková deformace subsetu

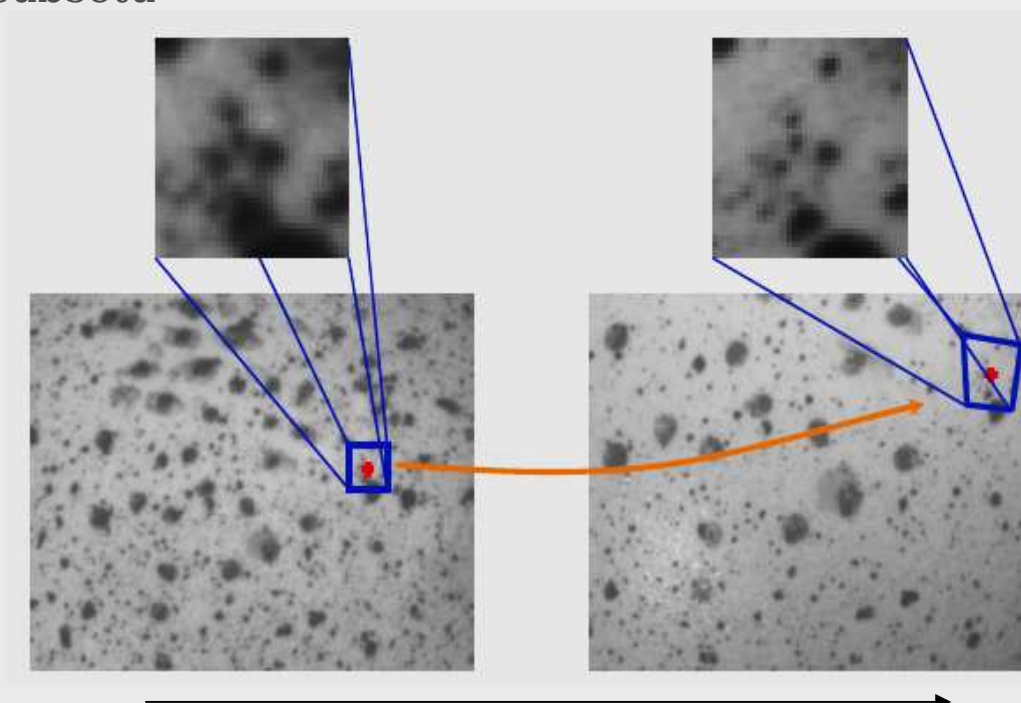




## 2D DIC

### • Ve skutečnosti

- Snímky obsahují šum --> nikdy  $SSD = 0$  pro nejlepší shodu
- Subpixelový pohyb (mimo celá čísla), smyková deformace subsetu

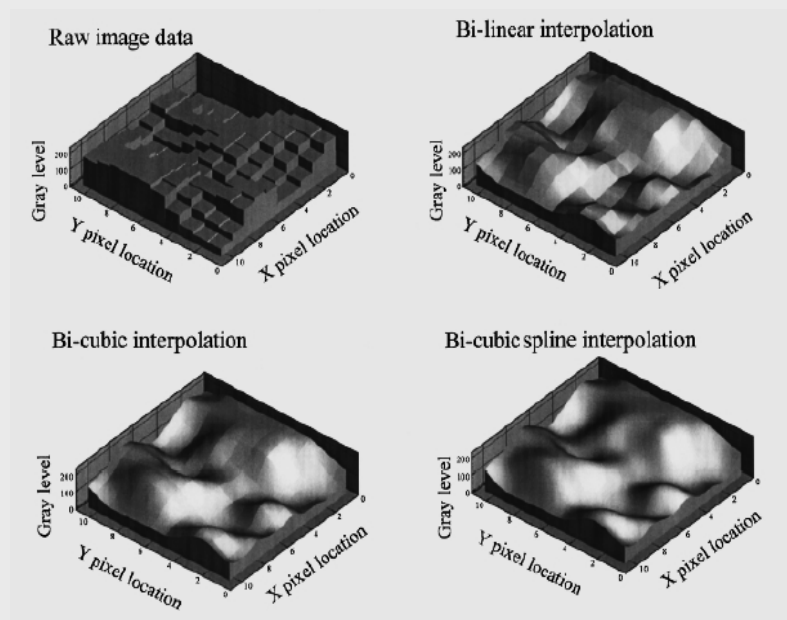


Deformation process

## 2D DIC

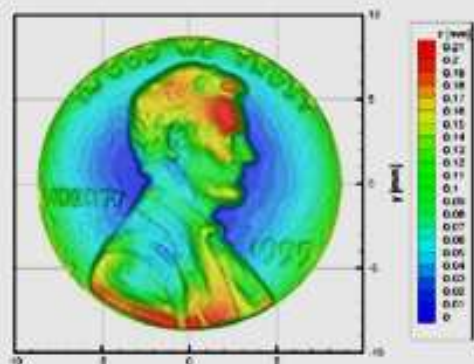
- DIC algoritmus musí být robustní
  - použití **subset tvarové funkce** k definici deformovaného subsetu
- Optimalizace potřebuje **spojité funkce** vs. snímky jsou **diskrétní**
  - Nezbytné rekonstruovat tuto spojitost --> pomocí interpolace

**B-splines jsou  
dobrou volbou**



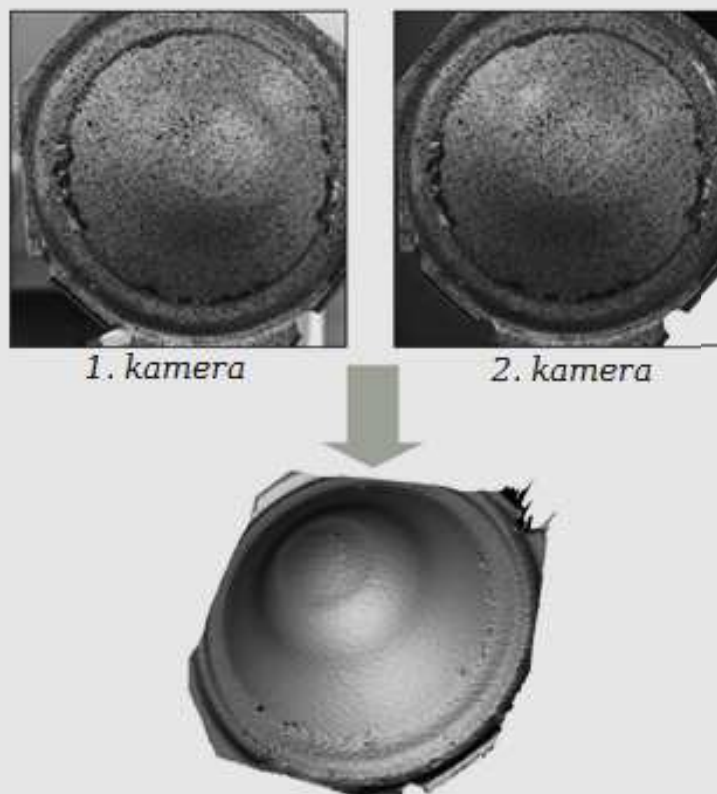
## 3D DIC – proč

- Získat posunutí a poměrnou deformaci na objektech jakéhokoli tvaru a pohybu.
- Velký rozsah měření:  $10^{-9}$  –  $10^2$  m



## 3D DIC – jak?

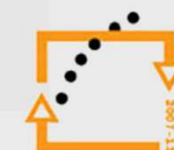
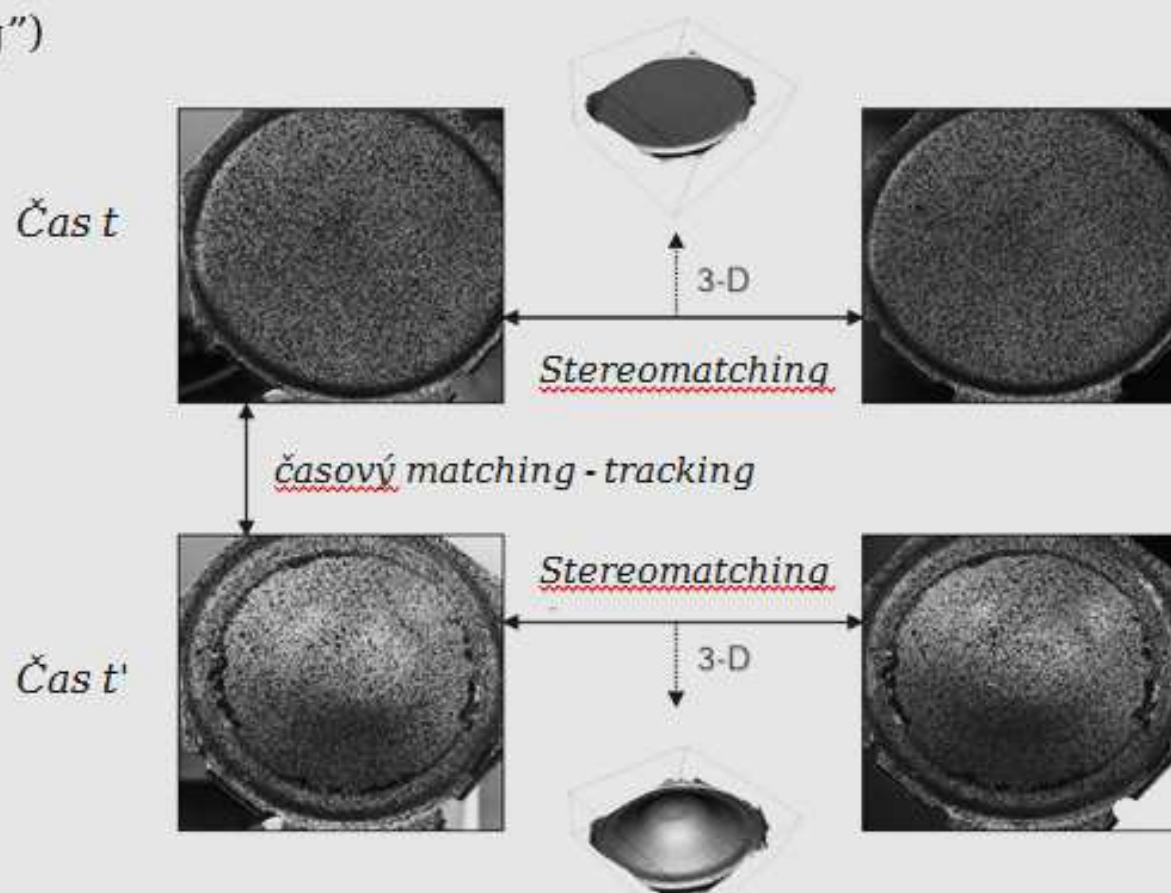
- Podobně lidskému zraku – dva snímací senzory poskytují dostatečnou informaci k tomu postihnout/vnímat v prostředí 3D objekty





## 3D DIC – jak?

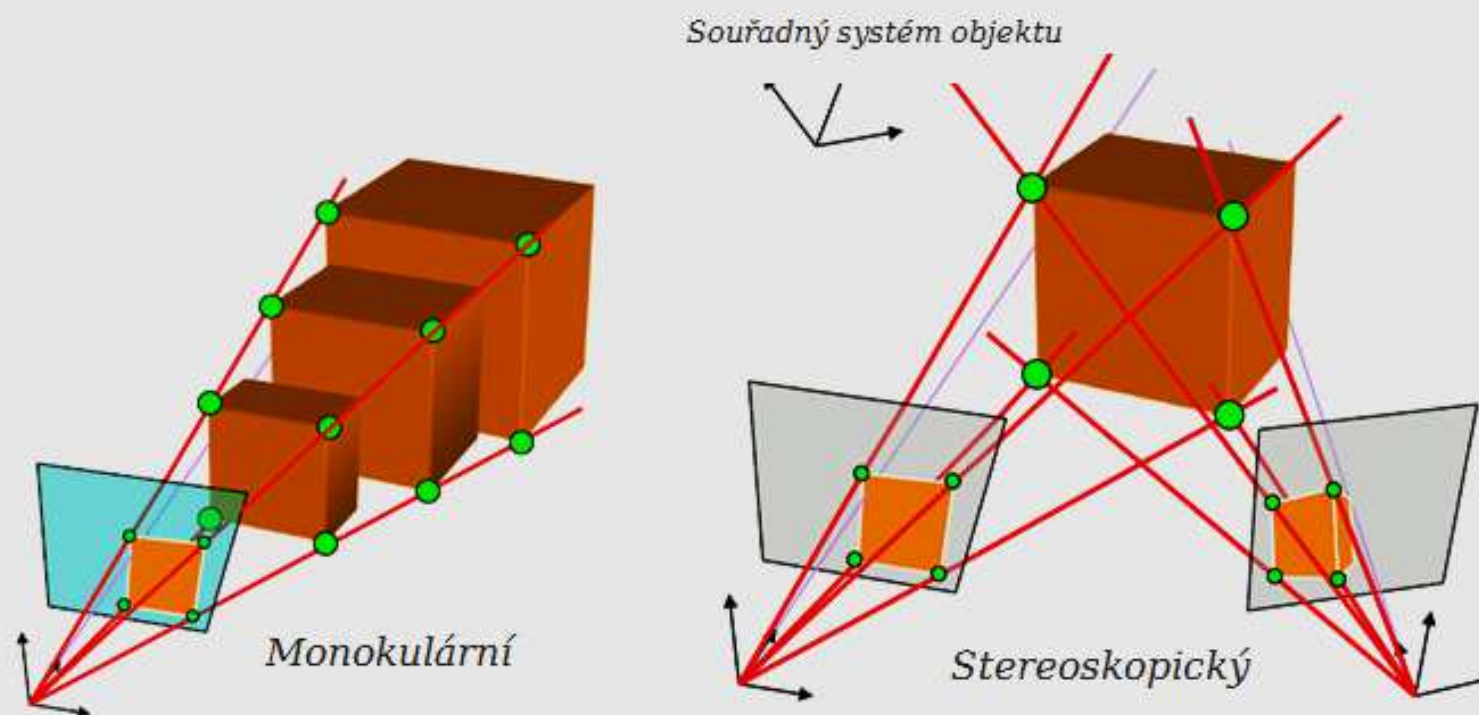
- 2 x korelace: 1. **Stereokorelační matching**; 2. časový matching (“tracking”)





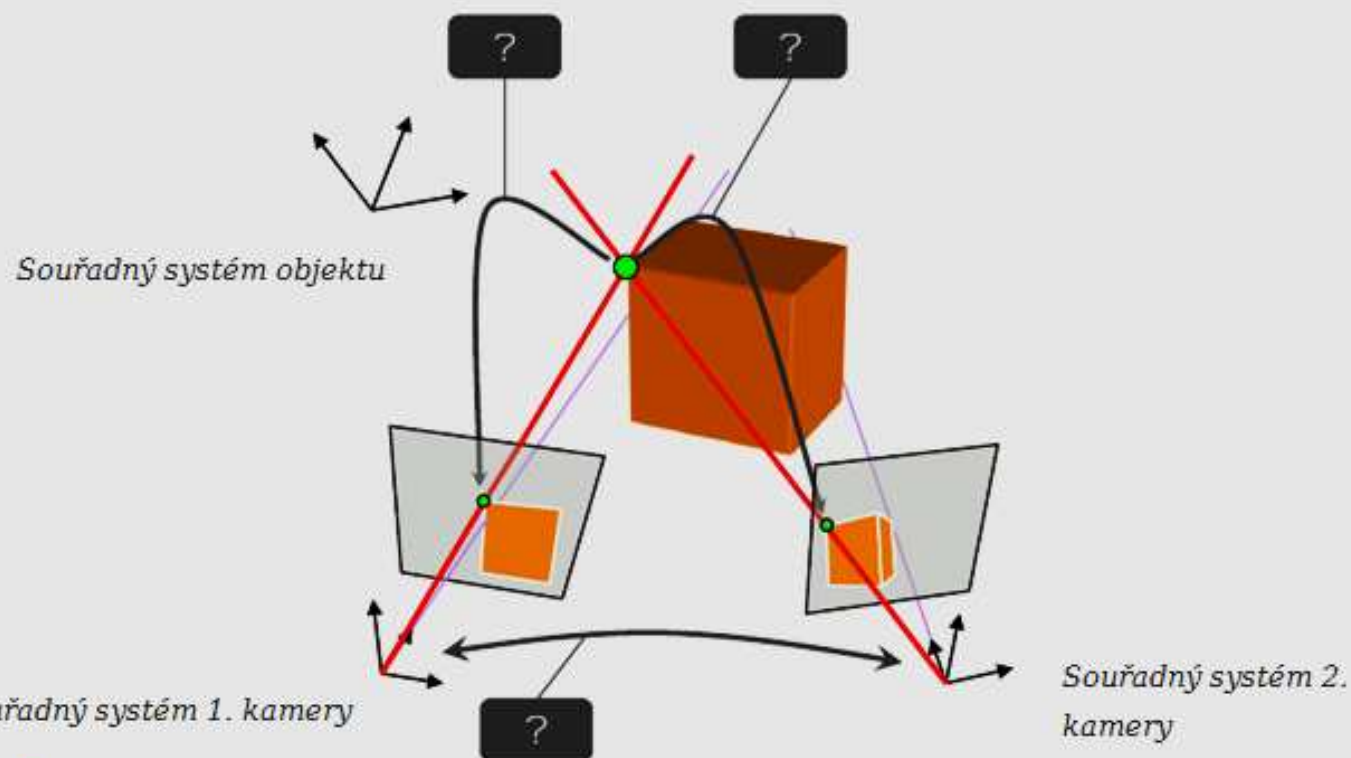
## 3D DIC – jak?

- Získání 3d struktury použitím 2 snímků se nazývá **stereotriangulace**



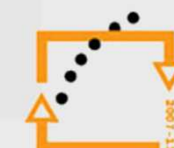
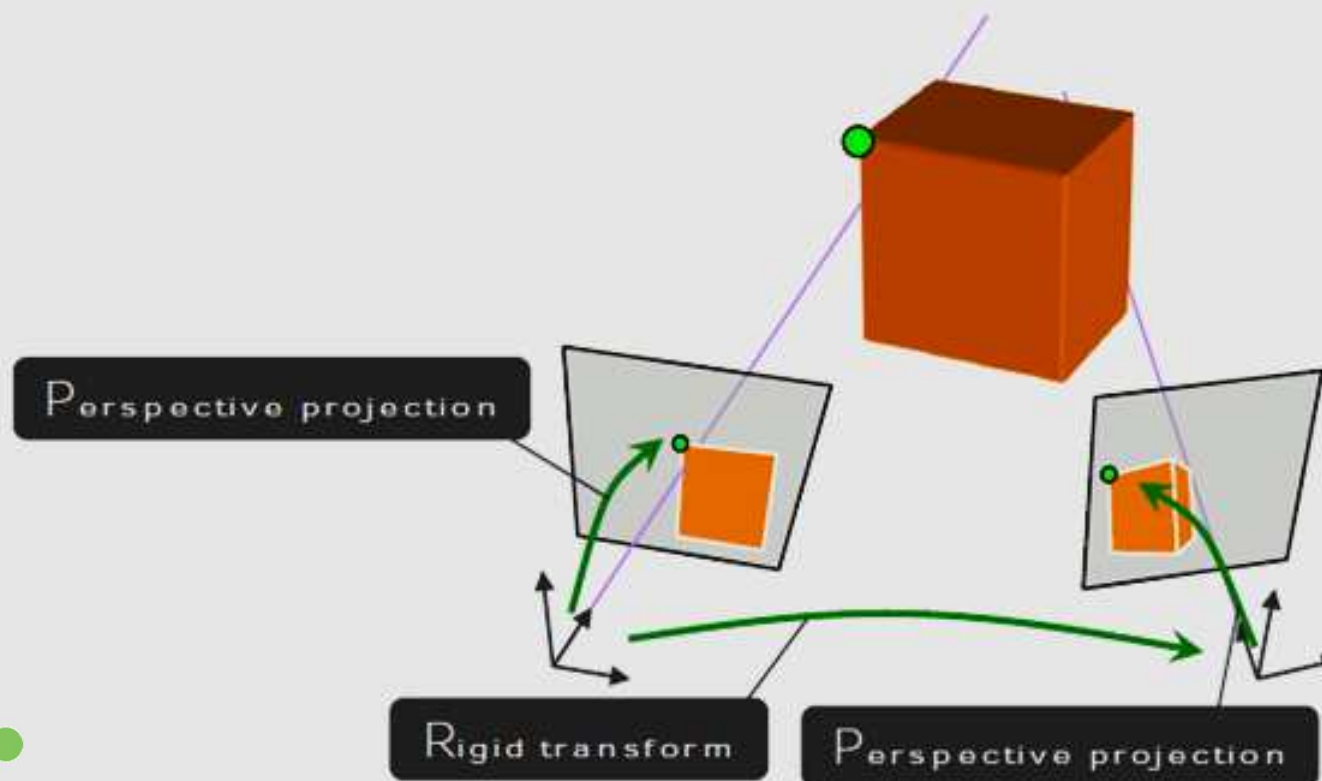
## 3D DIC – kalibrace

- **Stereotriangulace** vyžaduje výpočet průsečíků “optických paprsků”  
> nezbytné mít **společný souřadný systém** --> **kalibrace**



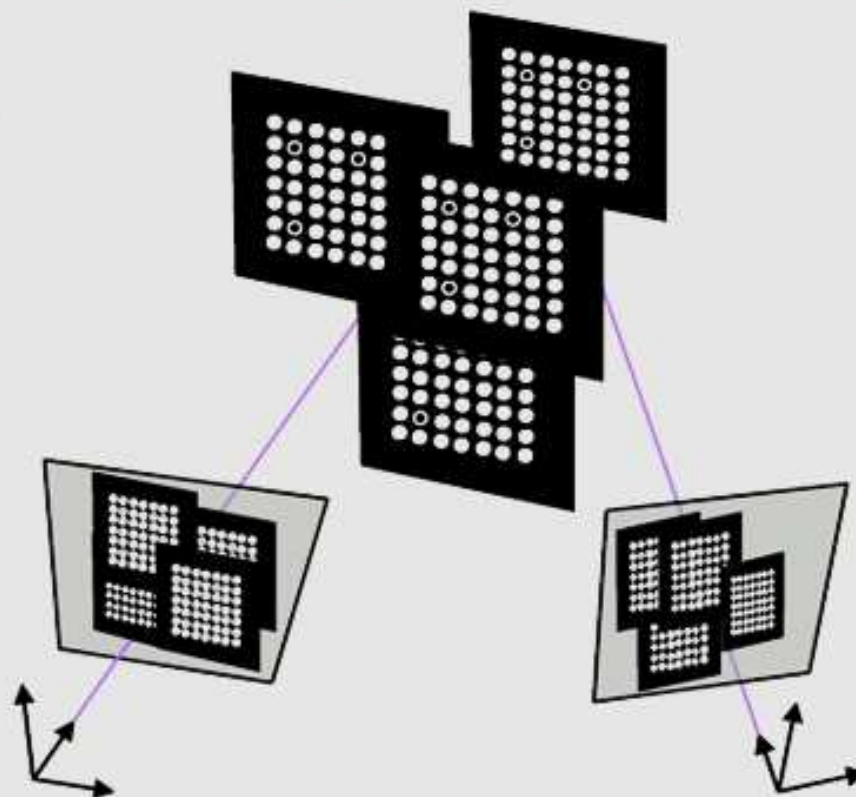
## 3D DIC – kalibrace

- Kalibrace DIC znamená získat 1 set **extrinsických** (“pohyb mezi kamerami”) a 2 sety **intrinsických** (2 projekce perspektiv)



## 3D DIC – kalibrace

- Kalibrace se provádí pomocí stereoskopického snímání kalibrační mřížky (gridu) v jejich různých pozicích --> výpočet ex. a in. parametrů



## 3D DIC – ex. a in. parametry

- **Kalibrace** se provádí pomocí stereoskopického snímání kalibrační mřížky (gridu) v jejich různých pozicích --> výpočet **ex.** a **in.** parametrů

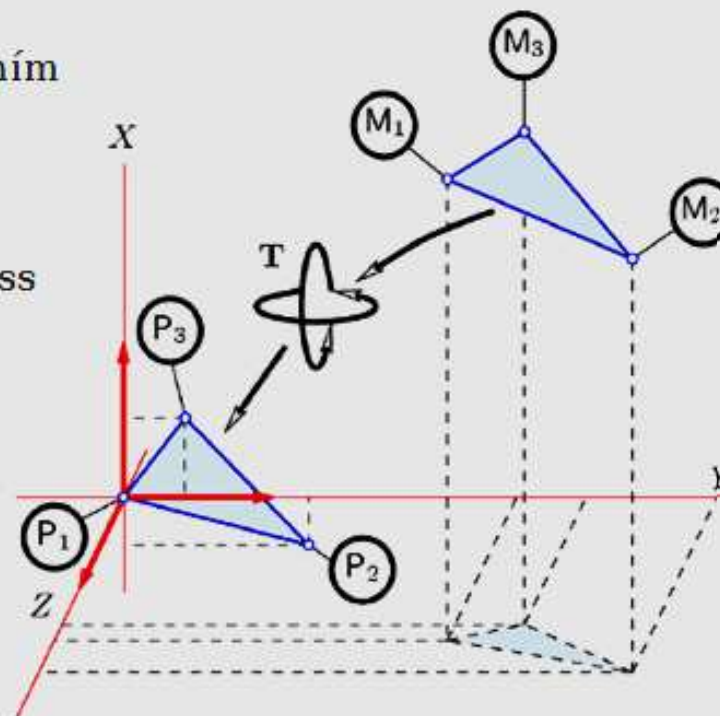
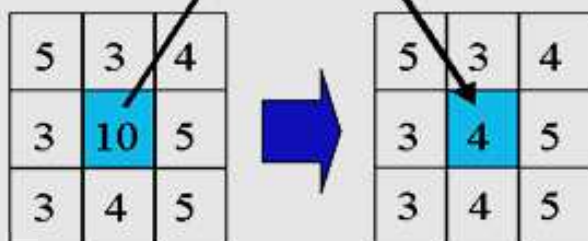




## 3D DIC – výpočet poměr. deformace

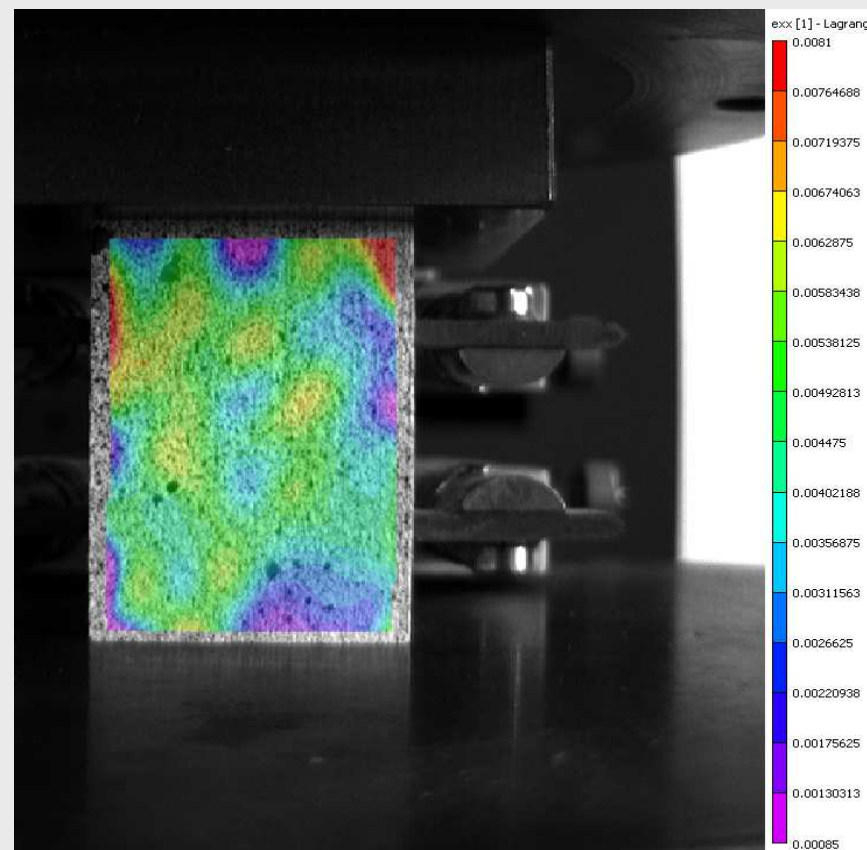
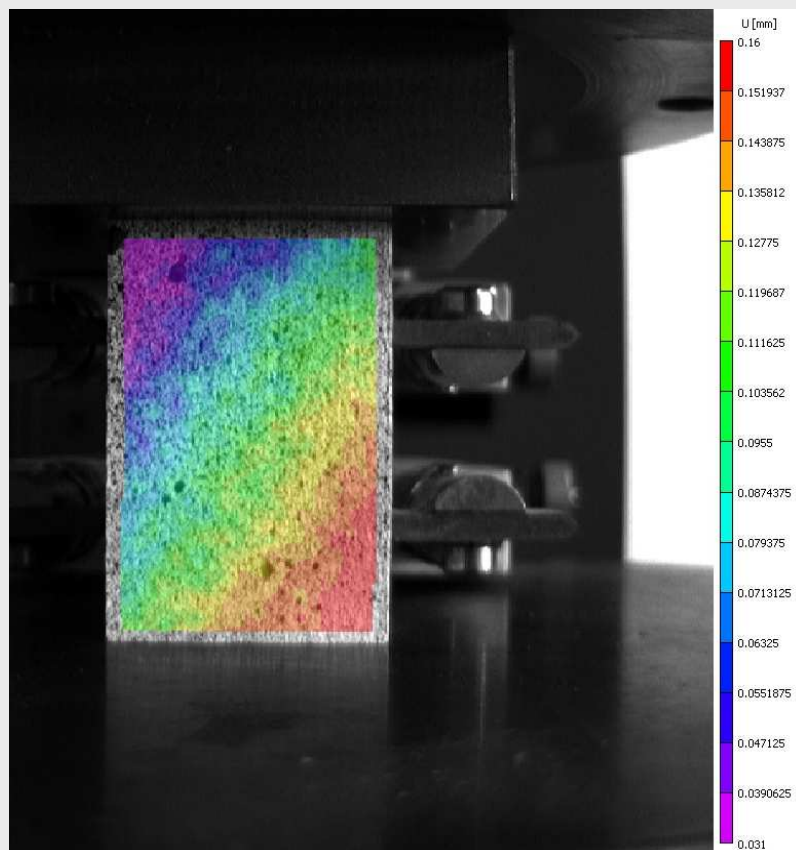
- Jakmile je systém **zkalibrován**, můžeme měřit posunutí a následně vypočítat **poměrnou deformaci**
- Pom. def. se počítají v triangulačním schématu – stejně jako v MKP
- **Pom. def.** je na trojúhelníku “šumová”noisy --> aplikace low-pass filtrů pro **vyhlazení** (Gaussův, medianový etc.)

Mediánový filtr 3, 3, 3, 4, 4, 5, 5, 5, 10



## 3D DIC – poměrná deformace

- Po výpočtu pom. def. je možné provést **post-processing**



# Digital volume correlation – “skutečné” DIC

- Princip DIC je aplikován na objemové data (voxely)
  - X-ray Computed Tomography (X-ray CT)
  - Magnetic Resonance Imaging (MRI)



před deformací



po deformaci

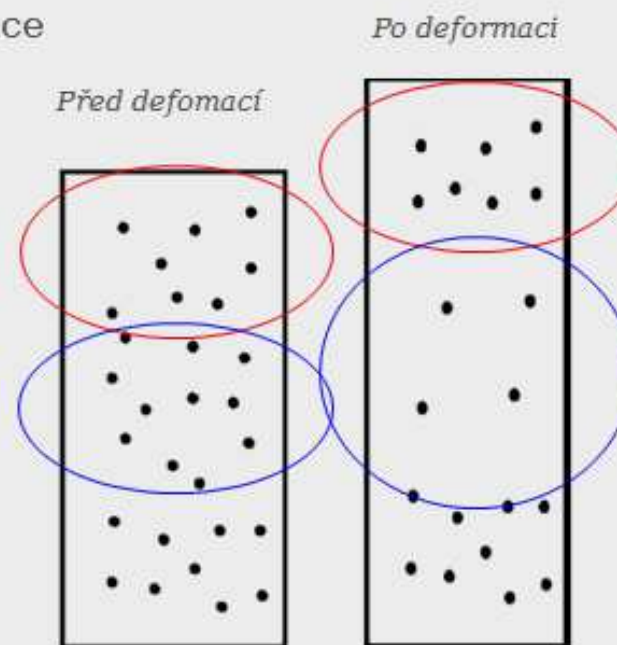
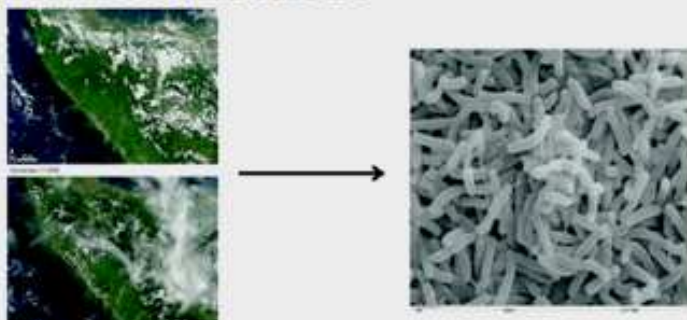


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



# Výhody DIC

- **Plně-polní, nekontaktní** (rovno stovkám standardních tenzometrů)
- **Lokální a globální** poměrné deformace
- **Eliminuje** mnoho optických komponent (laser, rozdělovače laserů, hranoly)
- **Nevyžaduje** vibro-izolační stůl
- **Jednoduchá** příprava vzorků
- **Multiměřítkovitost**



## DIC software

### Free/Open Source

- **Matlab DIC toolbox 2D**  
download from Mathworks
- **Moiré/Opticist 2/3D**

### Proprietární

- **Correlated Solution Inc.**
- **Dantec Dynamics**
- **GOM**
- **Lavision**

*Stojí za to si projít jejich stránky*





## DIC a Nauka o dřevě

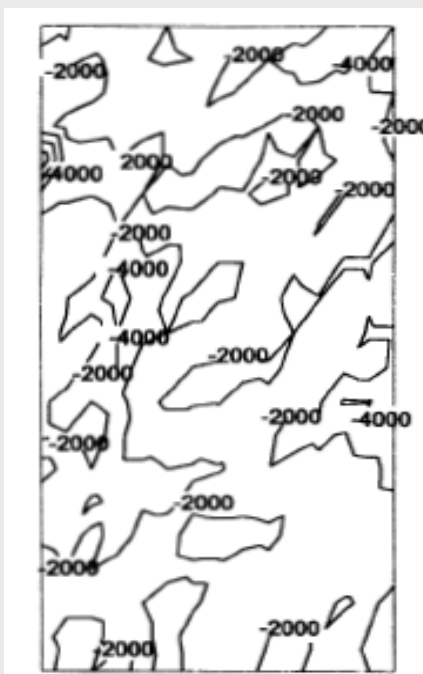
- DIC je vhodné pro NoD --> komplexní povaha dřeva a WBC
- Co můžeme v NoD s výhodou měřit pomocí DIC:
  - Standardní testování (**E** v tahu, tlaku, ohybu)
  - Sesychání a bobtnání (mechanosorpce)
  - Creep
  - Delaminaci (+ šíření trhliny)
  - Poissonova čísla
  - Vlastní frekvence (“Chladniho obrazce”)
  - Kolíkové a jiné spoje (kontaktní deformace)
  - Verifikace FE modelů
- Více než 80 vědeckých článků v oboru dřeva s použitím DIC



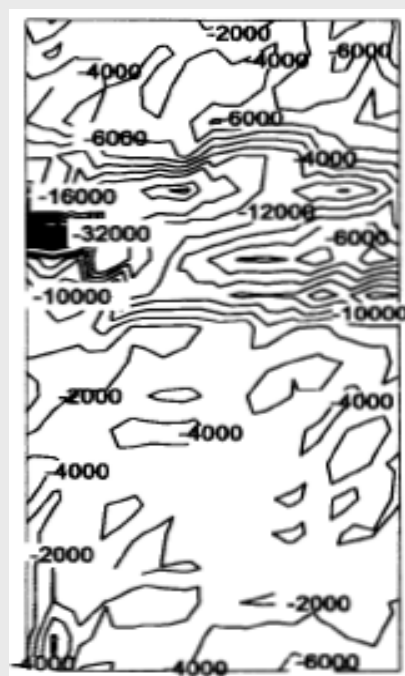
## DIC a Nauka o dřevě

- Zink et al. 1995

- Hodnotili pole poměrné deformace při tlakové zkoušce dřeva



9.2 kN

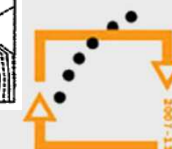
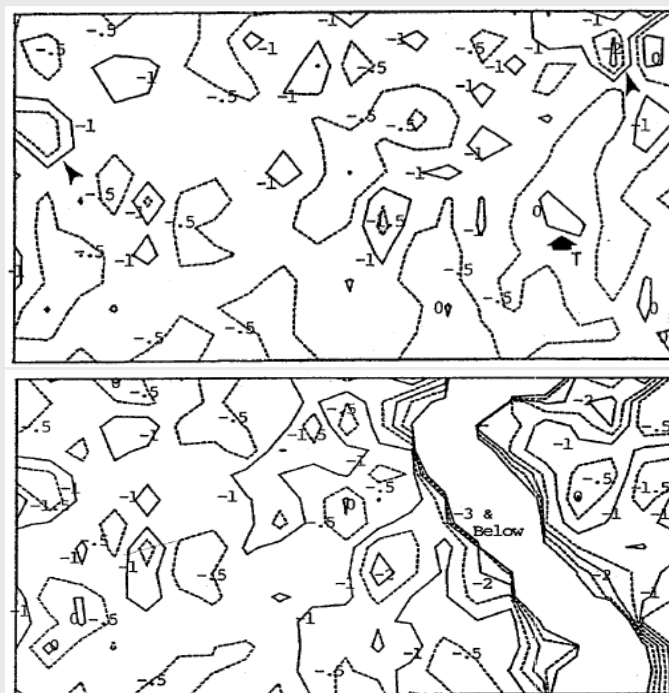
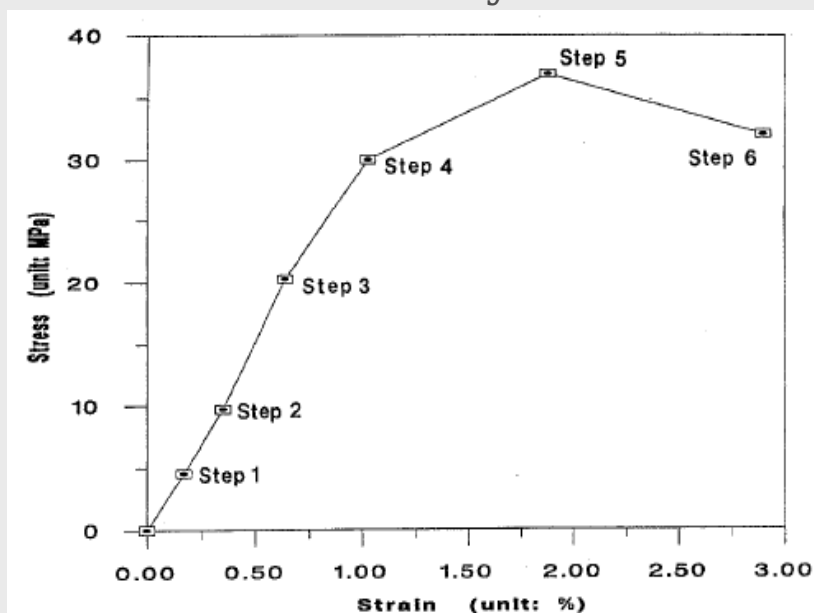


22 kN

# DIC a Nauka o dřevě

## • Choi et al. 1996

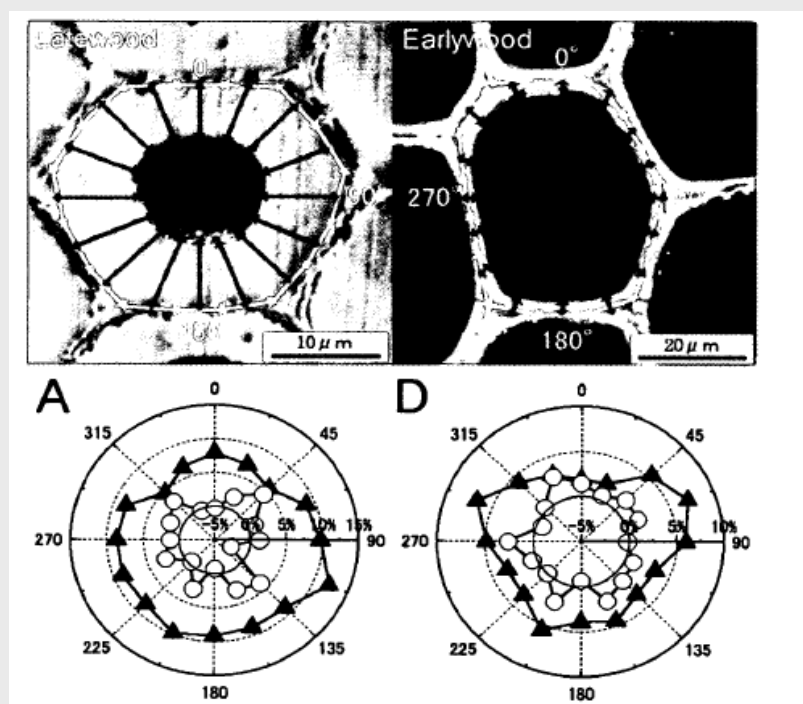
- použili DIC k hodnocení selhání během tlakové zkoušky



# DIC a Nauka o dřevě

## • Murata and Masuda 2001

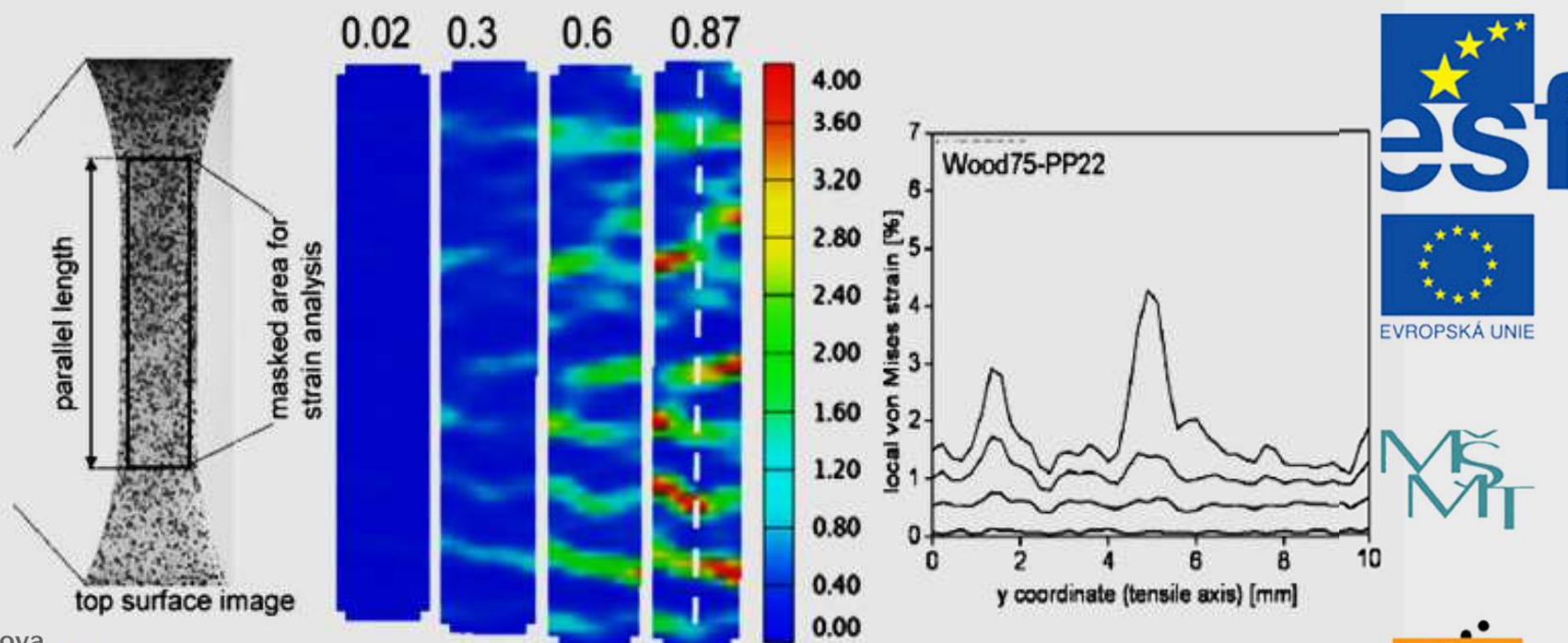
- Hodnotili bobtnání buňky dřeva jehličnanů použitím Konfokální skenovací laserové mikroskopie a DIC



# DIC a Nauka o dřevě

## • Godara et al. 2009

- Zkoumali vliv aditiv v dřevoplastech na jejich mechanické vlastnosti

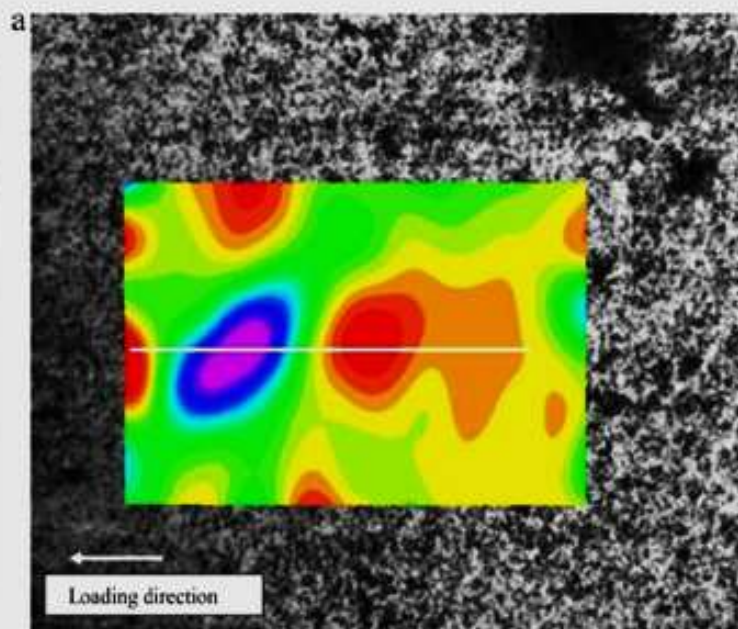
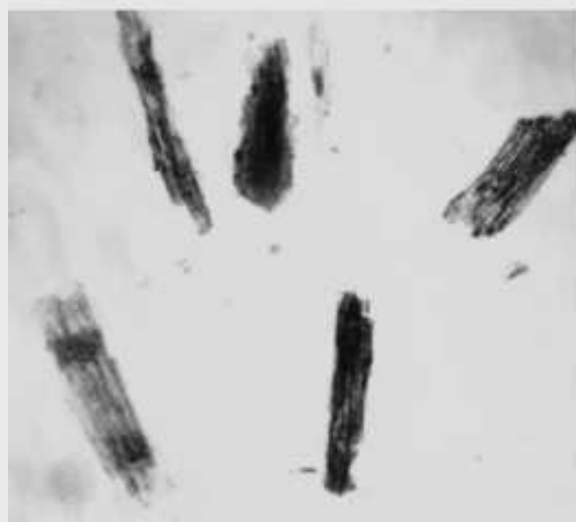




## DIC a Nauka o dřevě

### • Hussain et al. 2009

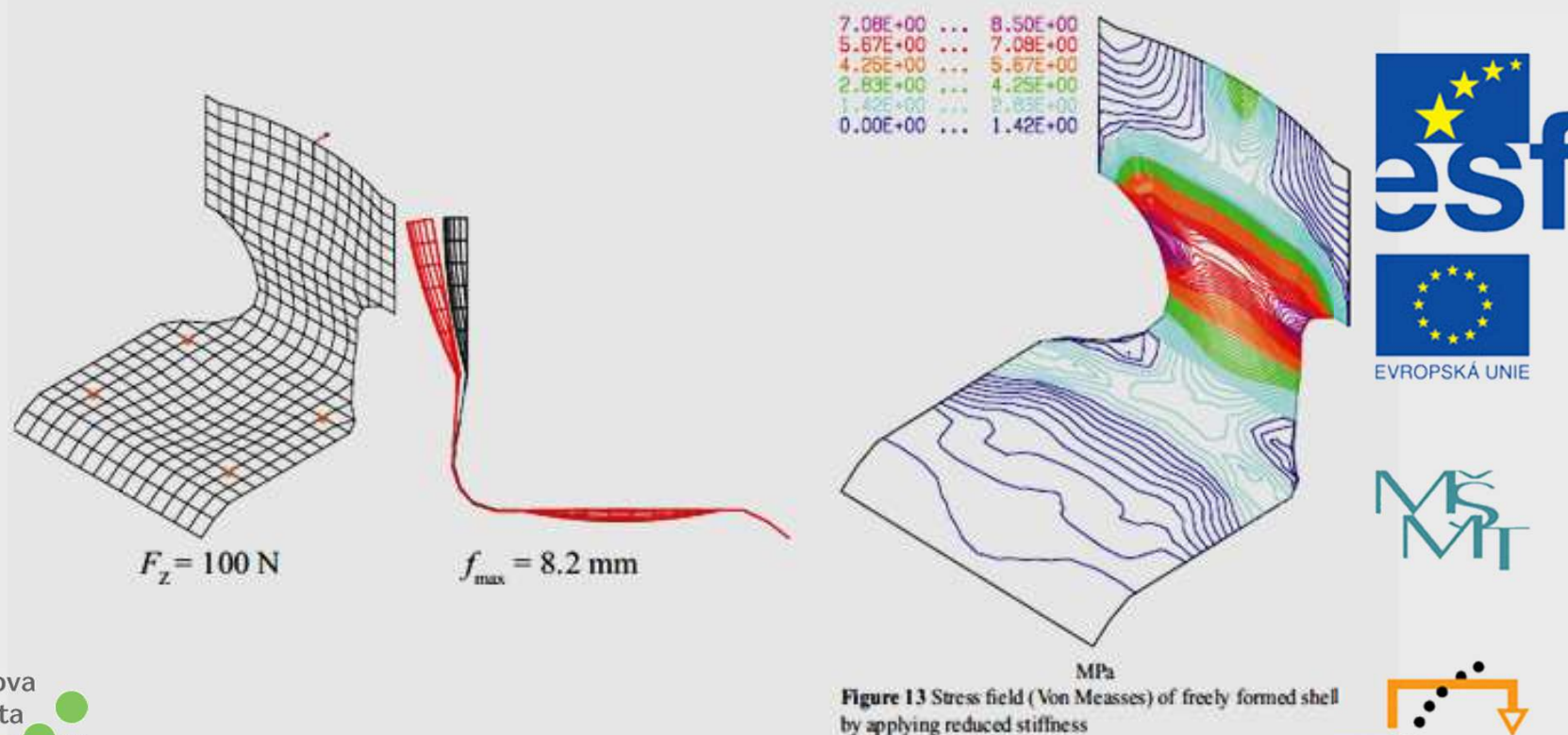
- zkoumali mikromechanické chování dřevitých vláken v polymerní matrici (HDPE) a snažili se odvozovat mechanické vlastnosti těchto částic



# DIC a Nauka o dřevě

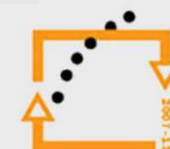
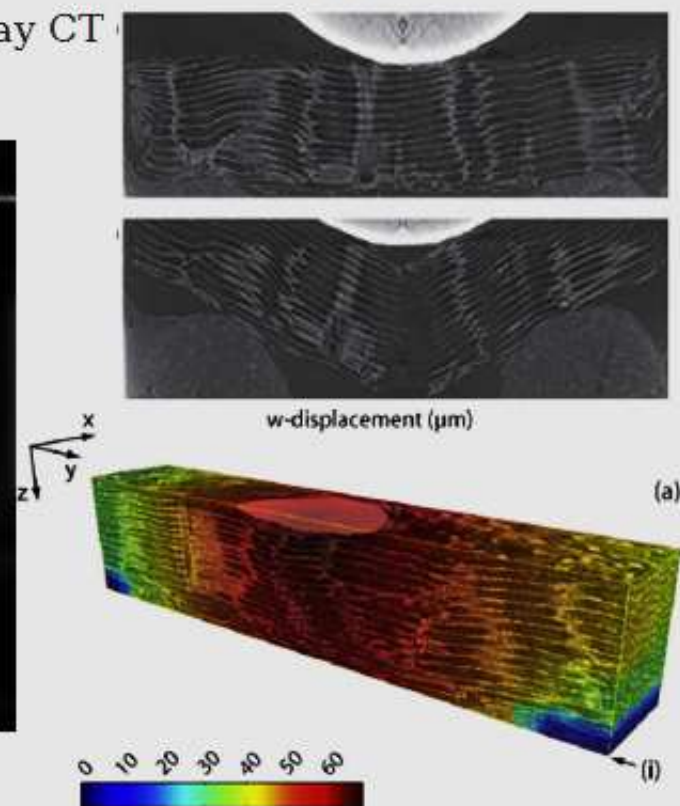
## • Nestorovic et al. 2011

- Zkoumali chování laminátové židle a porovnávali to s MKP modelem



## DIC a Nauka o dřevě

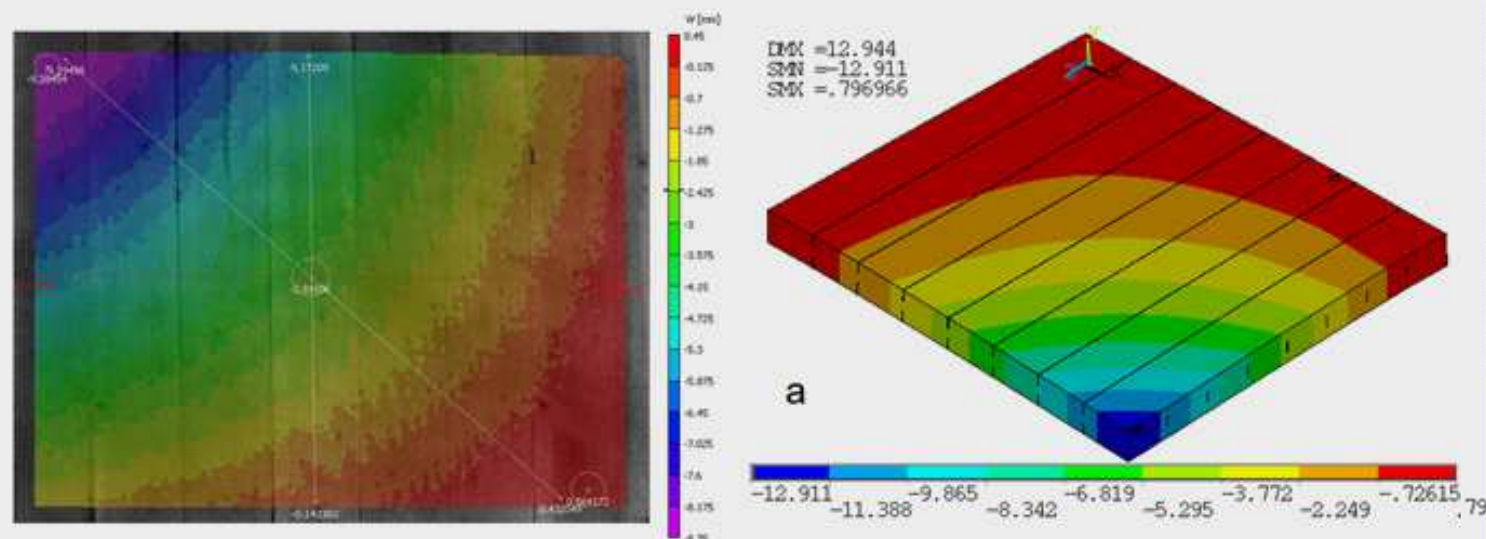
- **Forsberg et al. (2010)** provedli výpočet deformace pomocí DVC z dat mikroohybové zkoušky za pomoci X-ray CT





## DIC a Nauka o dřevě

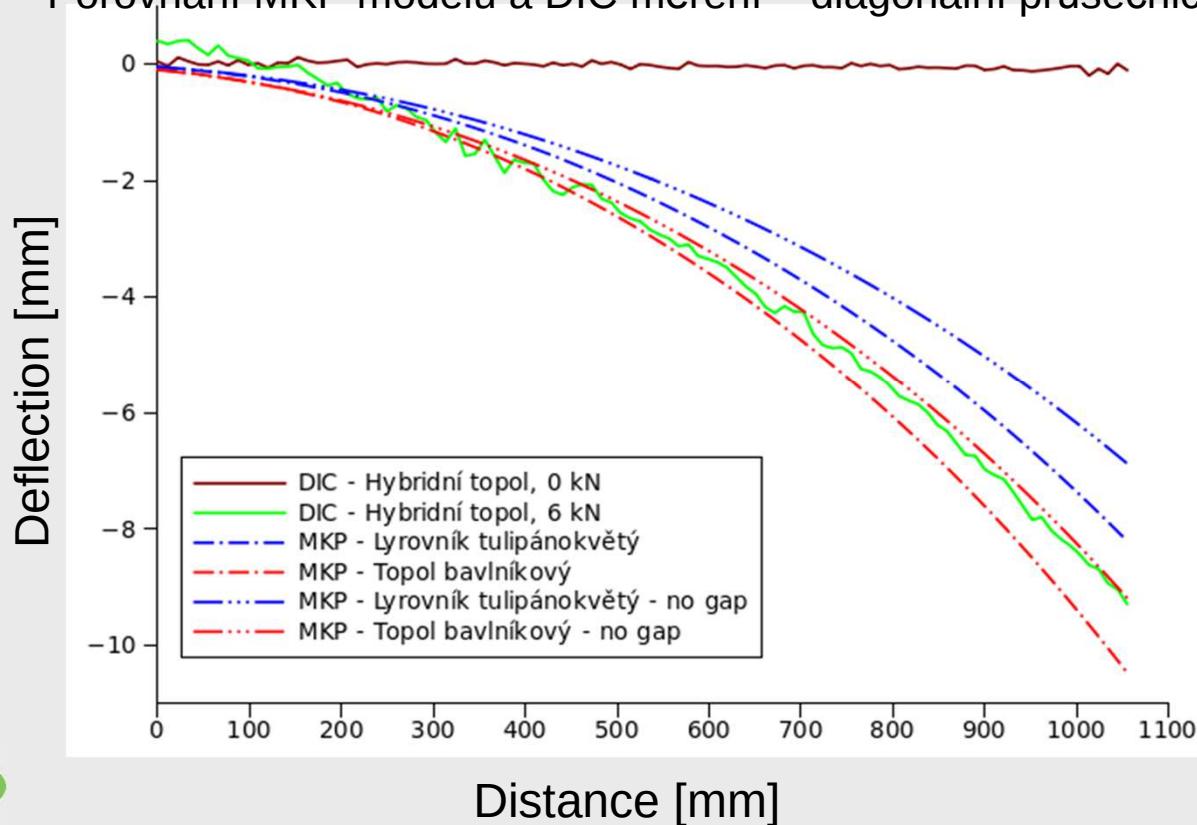
- Mendelu a OSU analyzovali a verifikovali MKP modely CLT, která byla zatížena smykovou zkouškou (ASTM 3044)



## DIC a Nauka o dřevě

- Posunutí namapované na průsečnice skrze panel CLT, nízká odchylka cca 4%

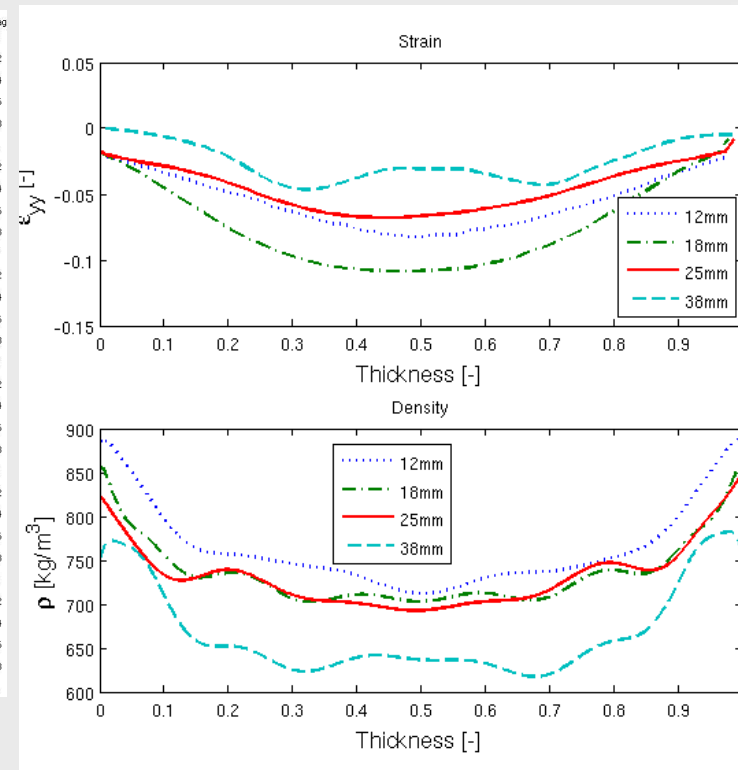
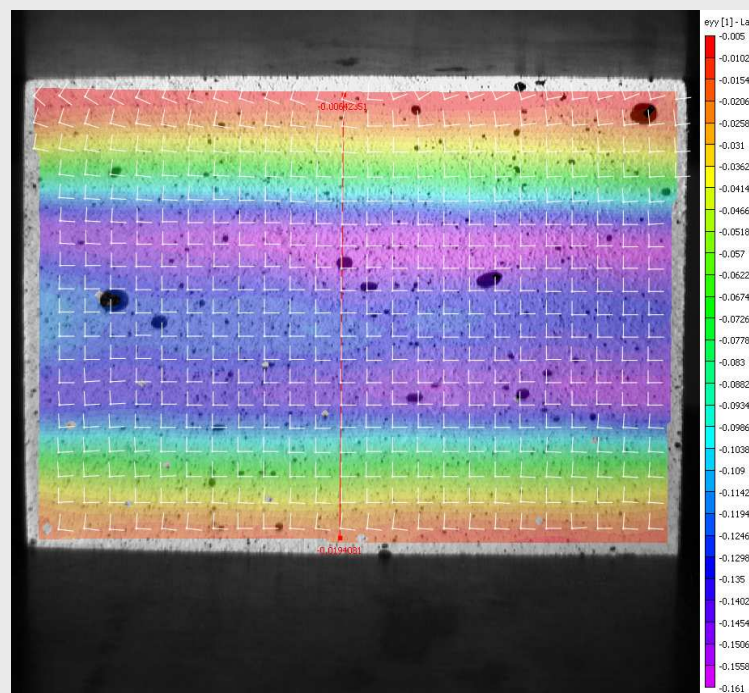
Porovnání MKP modelu a DIC měření – diagonální průsečnice





# DIC a Nauka o dřevě

- Mendelu: korelace hustotního profilu MDF s poměrnou deformací (nejvíce viditelné na tloušťce 38 mm)



## Závěr

- DIC má v UNoD nezastupitelné místo (**2 dekády používání**) z důvodů svých předností --> “začíná být *standardnem*”
- Relativně rychlé sestavení (viz cvičení)
  - Levné kamery a SW zadarmo
- Výhodné jako verifikace MKP modelů
- 3D systém je většinou vhodnější než 2D (pohyb out-of-plane se vyskytuje téměř vždy)



## Použitá literatura

- C. Kovalchick lecture on DIC, January 12, California Institute of Technology 2010
- Lecture from SEM 2009 Workshop on DIC: Overview of principles and Software by Correlated solutions Inc., University of South Carolina
- Sutton et al. Advances in Two-dimensional and Three-dimensional Computer Vision. 2000
- Springer Handbook of experimental mechanics, 2010
- Wikicommons
- And papers cited in slides

