



Lesnická
a dřevařská
fakulta

Předmět: Nedestruktivní testování
dřeva

*Optické nedestruktivní metody – historie,
klasifikace a představení nejpoužívanějších metod;
Metoda korelace digitálního obrazu (DIC) a její
aplikace ve dřevařství*

Mendelova
univerzita
v Brně



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Obsah

- Optické metody
 - Geometric Moiré
 - Moiré Interferometry
 - Speckle Methods
 - Digital image correlation - DIC
 - 2D DIC
 - 3D DIC
 - Digital Volume Correlation - DVC
 - Příklady použití DIC v nauce o dřevě
 - Závěr
- } Full-field methods



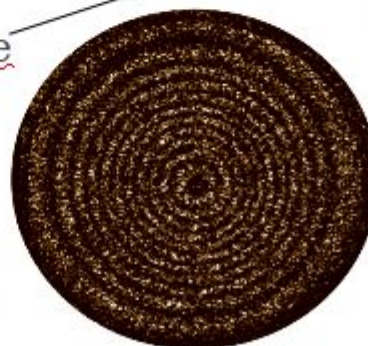
Techniky měření deformace

- “Příčník”
- Extenzometry
- Tenzometry

- el. odporové
- Opticko-vláknové
- etc.

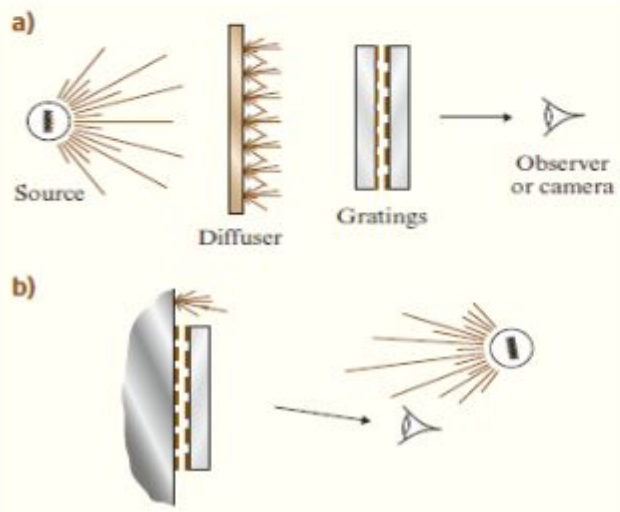


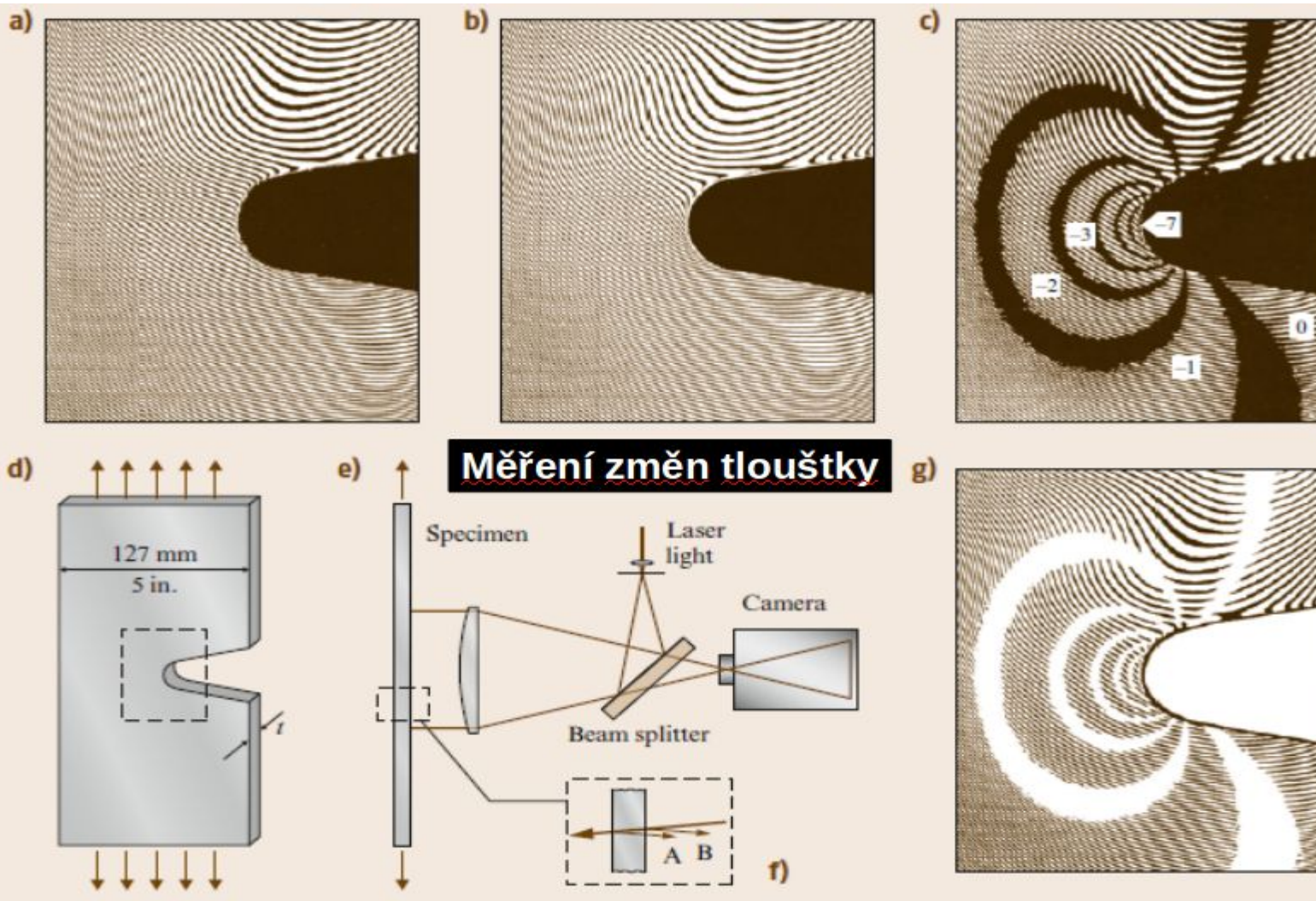
- Optické techniky
- Holografická Interferometrie
- Metody “Speckle”
- Moiré



Geometric Moiré

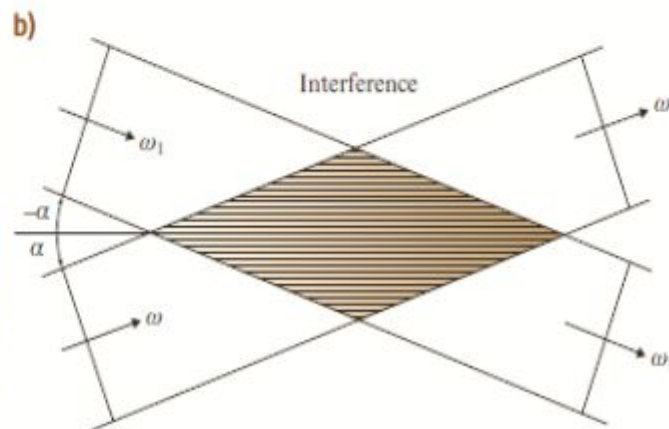
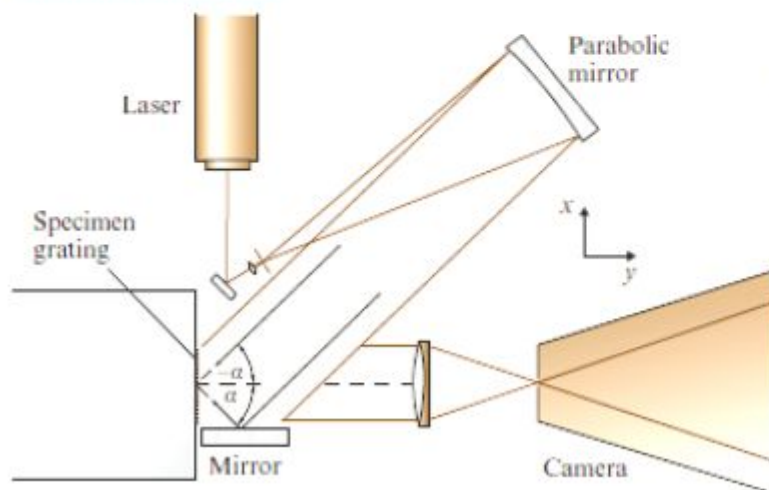
- Moiré vzory jsou běžně pozorovatelné
- Pásky se nazývají "Moiré Fringes", ty vyjadřují rozdíly mezi 2 "sítí"
- Slovo je odvozeno ze skládaných hedvábných a mohérových látek
--> zvýšení estetické kvality
- 2 druhy: a) transmisní, b) reflexní
- Měření 2d i 3d posunutí (pom. def.)





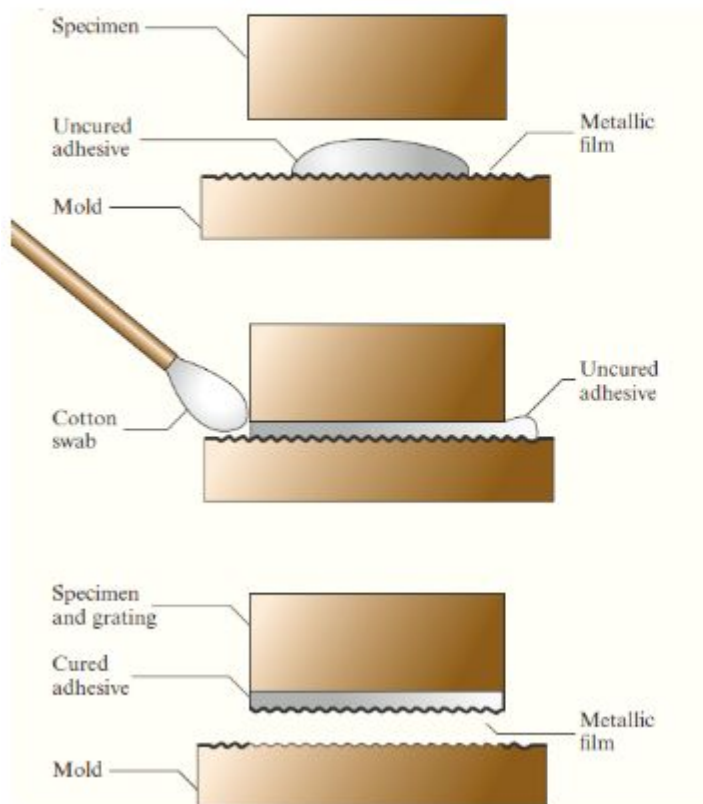
Moiré Interferometry

- Dokonalejší Moiré metoda, měření in-plane/out-of-plane posunutí/poměrné deformace
- Frekvence čar až $2400/\text{mm} = 0.417 \mu\text{m}$ (mikroskopické MI dosahují přesnosti až v nm) --> měření velmi malých deformací
- Fringes vznikají interakcí reálného vzoru s virtuálním či 2 virtuálních interferencí

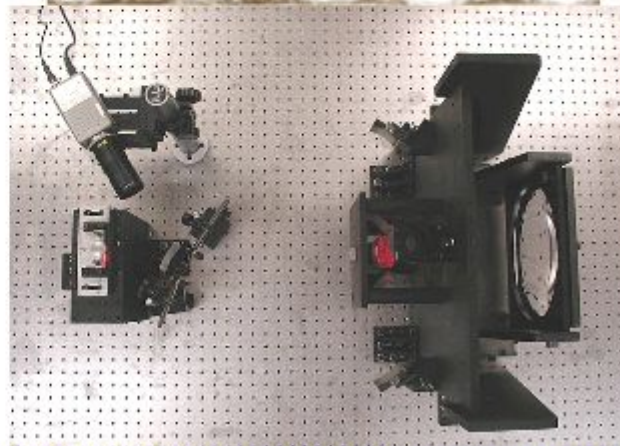
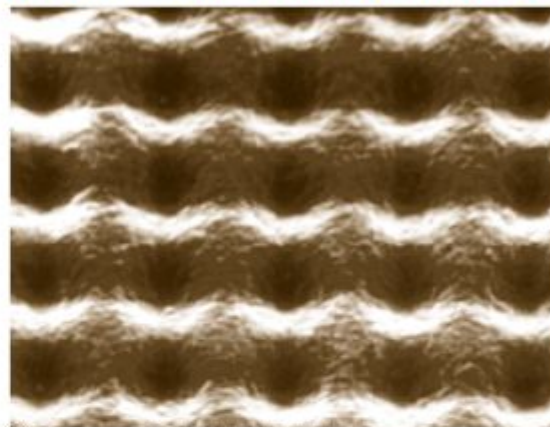


Moiré Interferometry

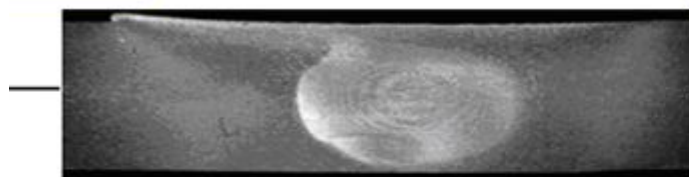
Způsob nanášení vzoru



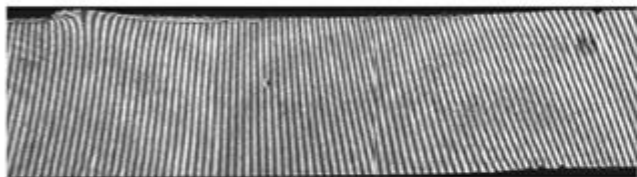
Mikrofotografie naneseného vzoru



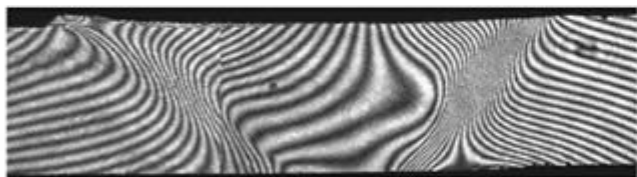
Moiré Interferometry



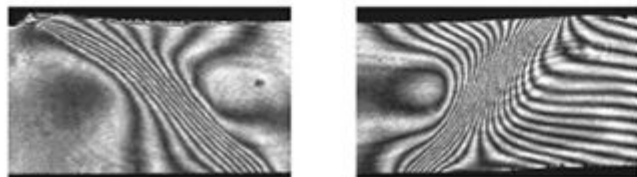
(a) microstructure of the weld area



(b) axial strain at 100 MPa

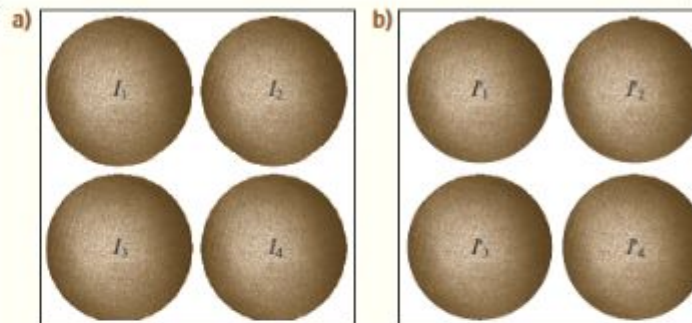


(c) axial strain at 220 MPa

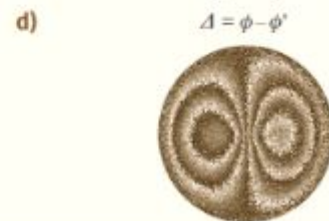
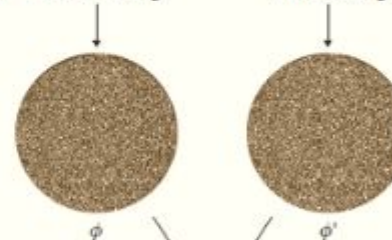


(d) residual plastic strain on unload

Tensile
Load

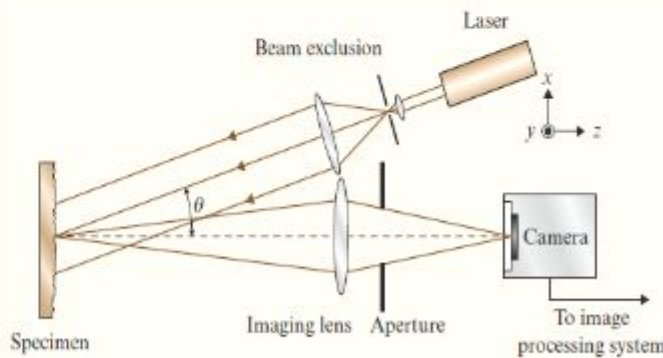
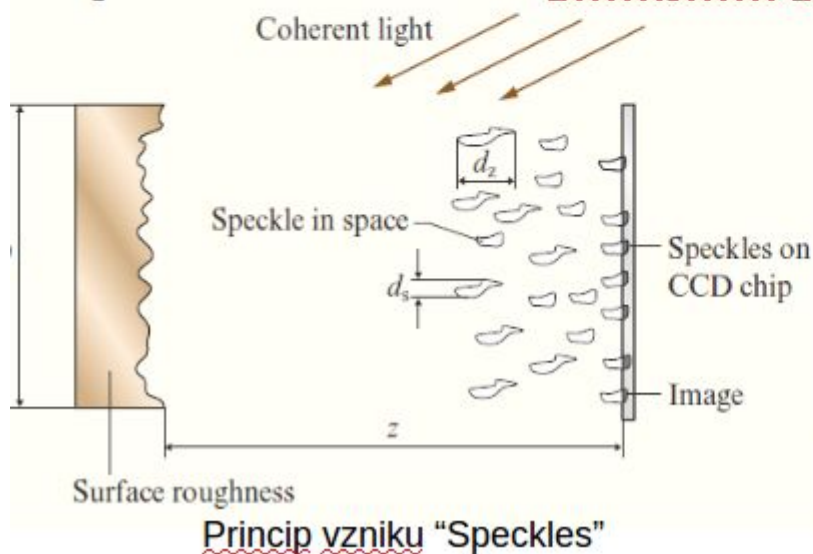


c) Before loading After loading



Metody "Speckle"

- Speckle princip znám již od Newtona, rozvoj principu metody cca před 100 lety
- Dopadající koherentní světlo odráží "náhodně uspořádané" vlnění (wavelets --> speckles)
- Speckle interferometry (vč. ESPI) + Shearography
- Speckle correlation --> principiální předchůdce DIC



Metody "Speckle"

- Inspekce v laboratoři a in situ

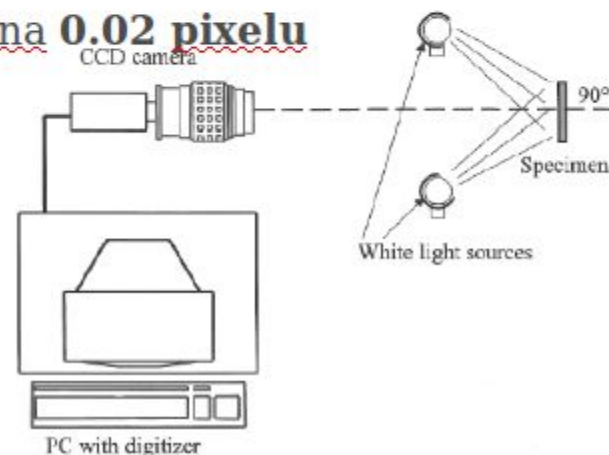
Speckle interferogram

→||← 24 mas



Co je metoda digitální korelace

- Nekontaktní optická metoda měření
- Měření deformace objektů (posunutí, poměr, deformaci a zakřivení)
- 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 μ CT, MRI)
- Rozlišení (přesnost) je obecně udáváno na 0.02 pixelu



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



Letecké snímky



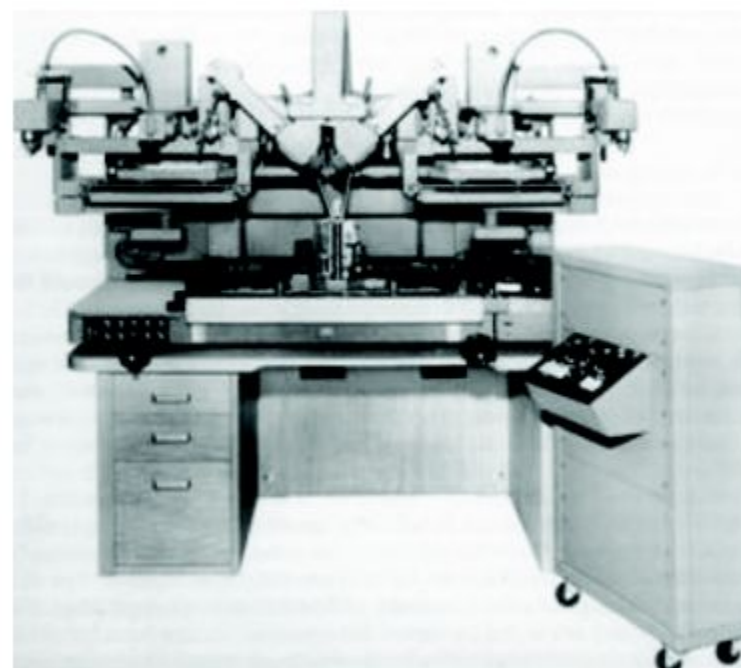
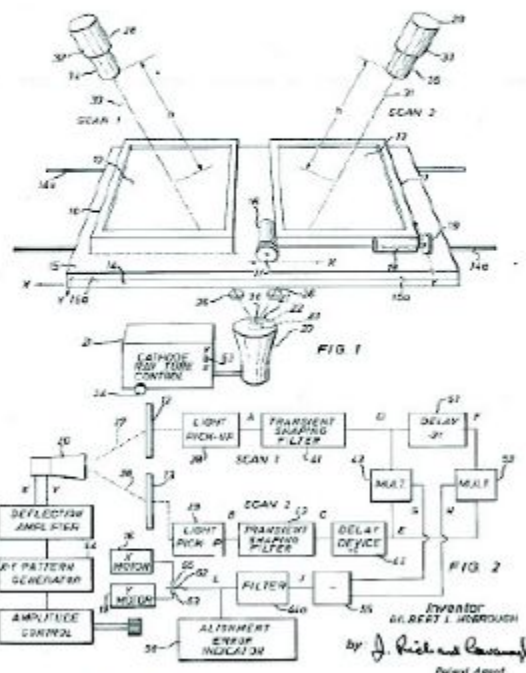
EVROPSKÁ UNIE



Milníky na cestě k DIC

• Gilbert Hobrough (1960)

Dec. 13, 1960
G. L. HOBROUGH 2,964,642
METHODS AND APPARATUS FOR CORRELATING
CORRESPONDING POINTS IN TWO IMAGES
Filed Aug. 20, 1957 2 Sheets-Sheet 1



Raytheon-Wild B8 Stereomat (1961)

Hobroughův patent analogové implementace
stereo korelace snímků

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 udělaná za objasnění principu a konstrukci CCD
- **Peters a Ranson** (1982): první použití DIC v analýze vlnového namáhání
- **Sutton** (1983) - vytvořil moderní implementaci 2D DIC



2D DIC - předpoklady

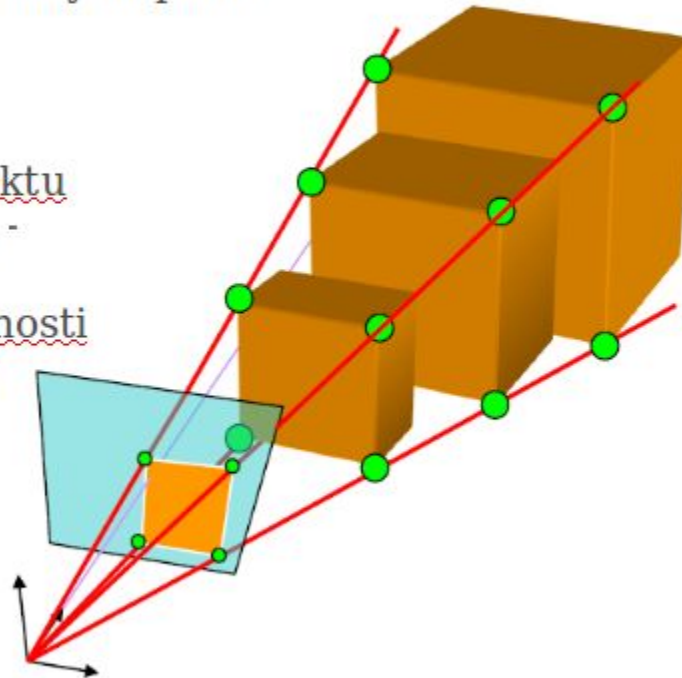
- Pohyb od/k kameře musí být 0, only in-plane

Proč?

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

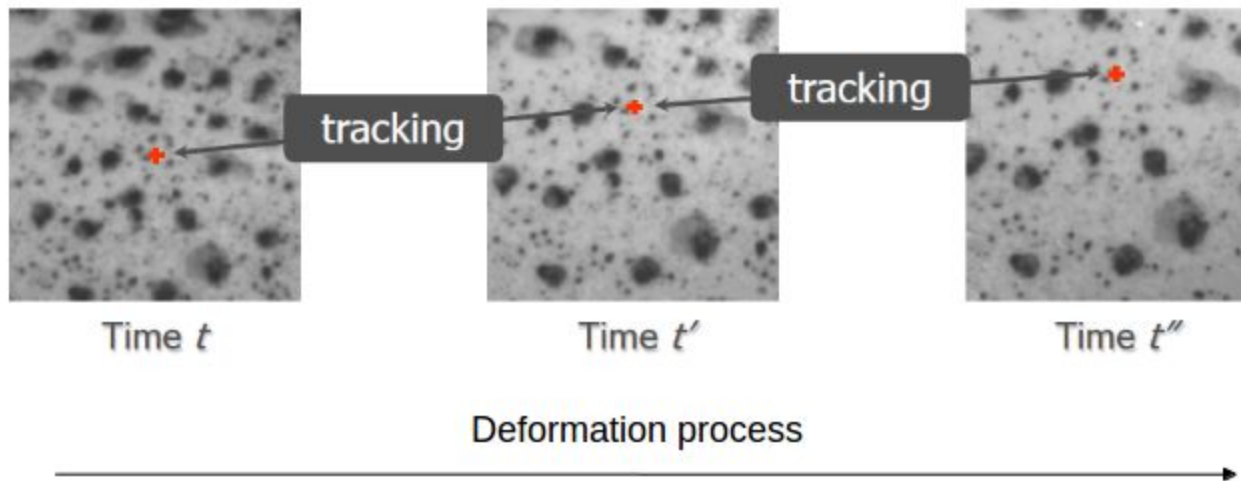
- Co je nutné dodržet

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



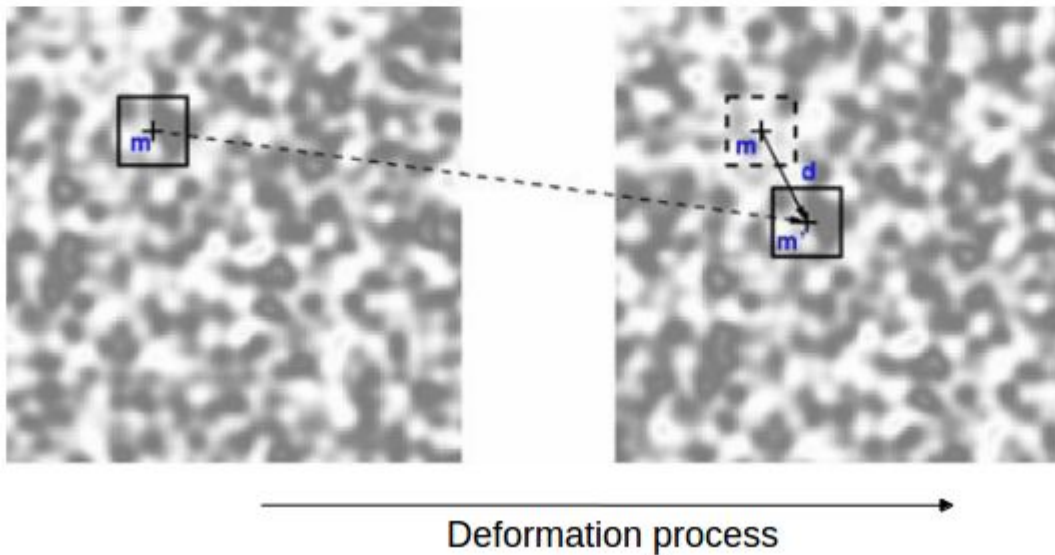
2D DIC - jak to funguje

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



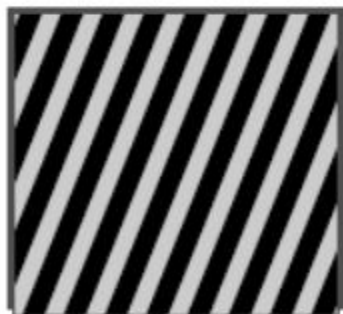
2D DIC - jak to funguje

- 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

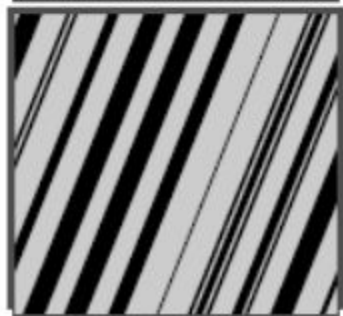
- Unikátnost každého podpisu je garantována pokud má povrch nerepetitivní, isotropní a vysoce kontrastní vzor (patern)
- Tyto podmínky splňuje náhodný vzorec (speckle pattern)



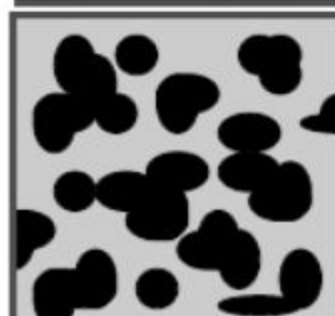
High contrast
Repetitive
Anisotropic



Low contrast
Non-repetitive
Isotropic



High contrast
Non-repetitive
Anisotropic



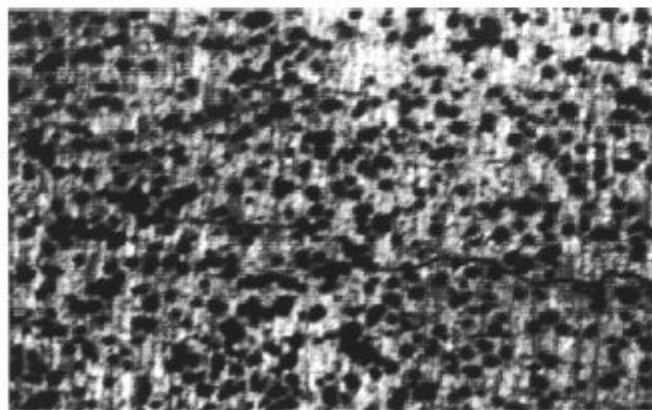
High contrast
Non-repetitive
Isotropic



2D DIC - jak získat náhodný vzorec

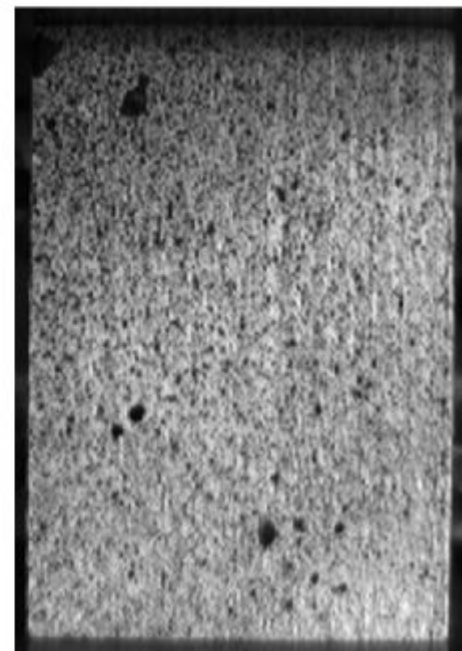
- K získání unikátního paternu:

- sprej (black and white)
- Staré Xeroxové tonery
- “Křídu a pepř” etc.



Xeroxový toner

100 µm



Bílý a černý sprej



2D DIC - experimentální požadavky

- “určují předpoklady metody”
- Difuzní (inkohherentní) 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)



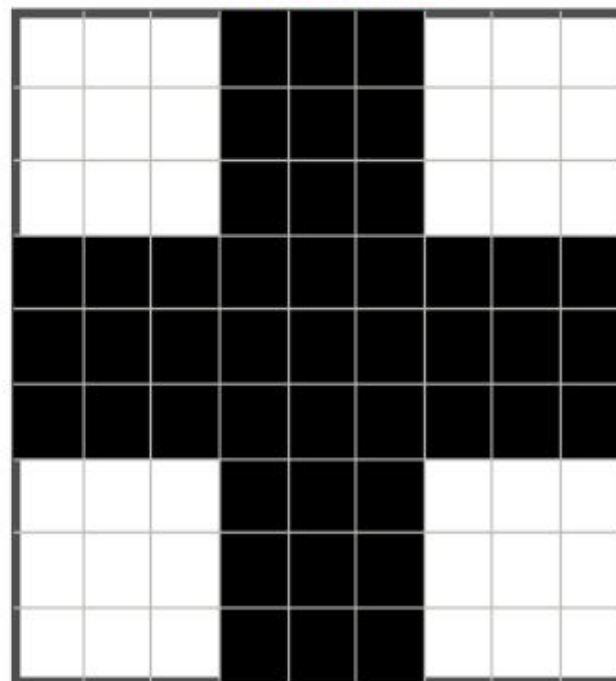
2D DIC - příklad

- 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



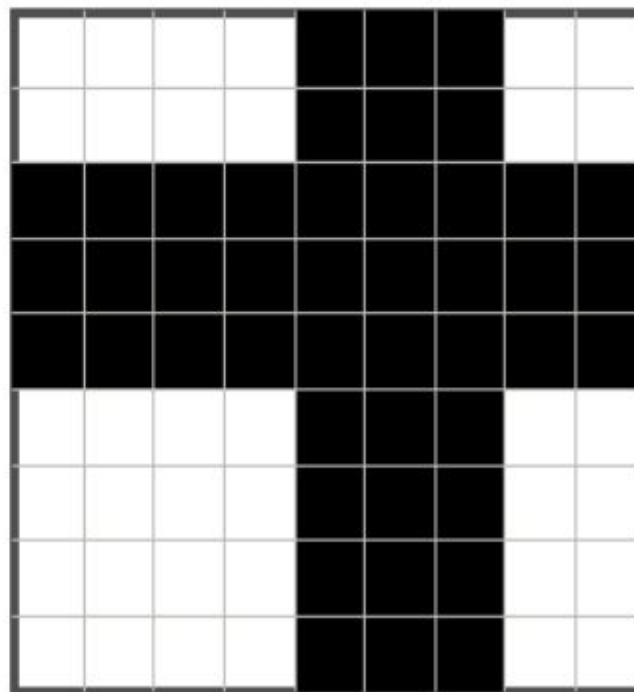
2D DIC - příklad

- Předpokládejte že se objekt posune nahoru a doprava

Počítač vidí (v paměti)

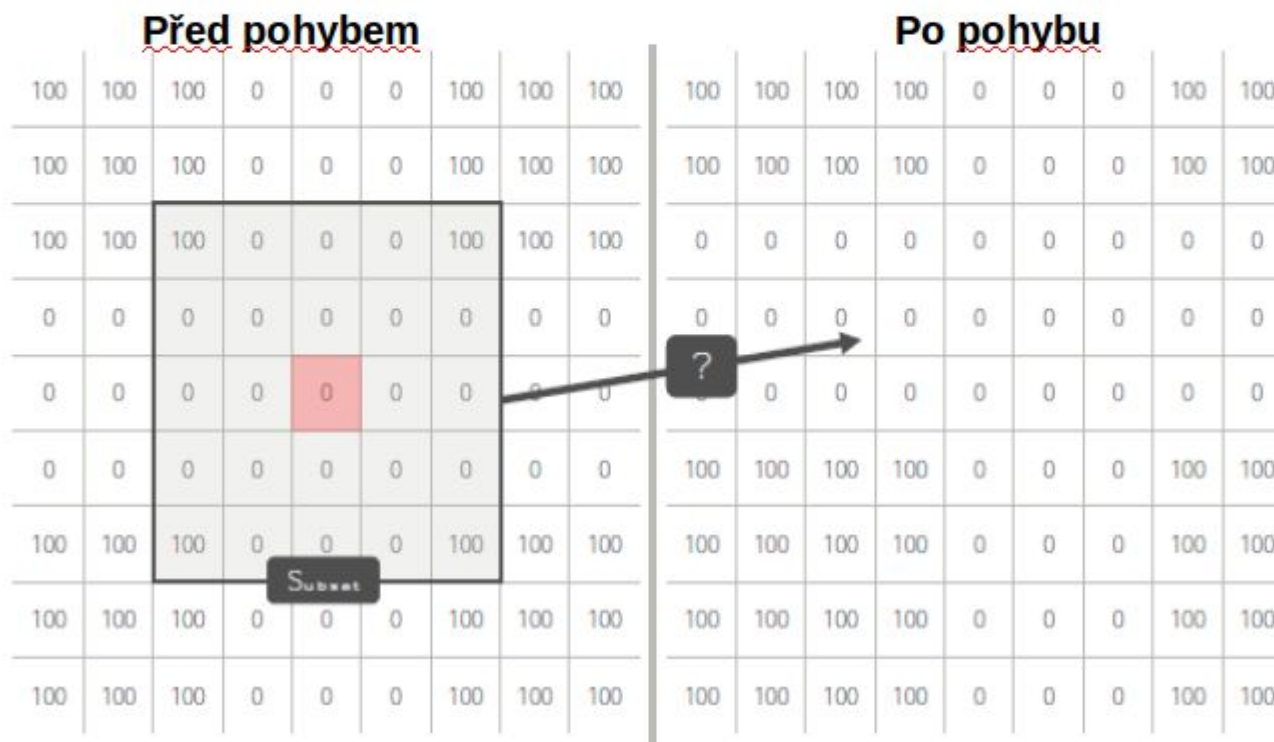
100	100	100	100	0	0	0	100	100
100	100	100	100	0	0	0	100	100
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	100	100	100	0	0	0	100	100
100	100	100	100	0	0	0	100	100
100	100	100	100	0	0	0	100	100
100	100	100	100	0	0	0	100	100

My vidíme



2D DIC - příklad

- Definujeme si subset 5x5
- Cílem je najít kam se subset posunul ("matching")



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

$$C(x, y, u, v) = \sum_{ij=-n/2}^{n/2} (I(x+i, y+j) - I'(x+u+i, y+v+j))^2$$

Diagram illustrating the components of the 2D DIC formula:

- Px souř, ref. snímek** points to x, y in the formula.
- Pixelové hod. v $x+i, y+j$** points to $I(x+i, y+j)$ in the formula.
- Pixelové hod. v $x+i+u, y+j+v$** points to $I'(x+u+i, y+v+j)$ in the formula.
- Snímek po pohybu** points to I' in the formula.
- Snímek před pohybem** points to I in the formula.
- n: vel. Subsetu (5x5)** points to the summation limits $ij=-n/2$ to $n/2$.
- Posunutí** points to u, v in the formula.
- Korelační funkce** points to the entire formula $C(x, y, u, v)$.

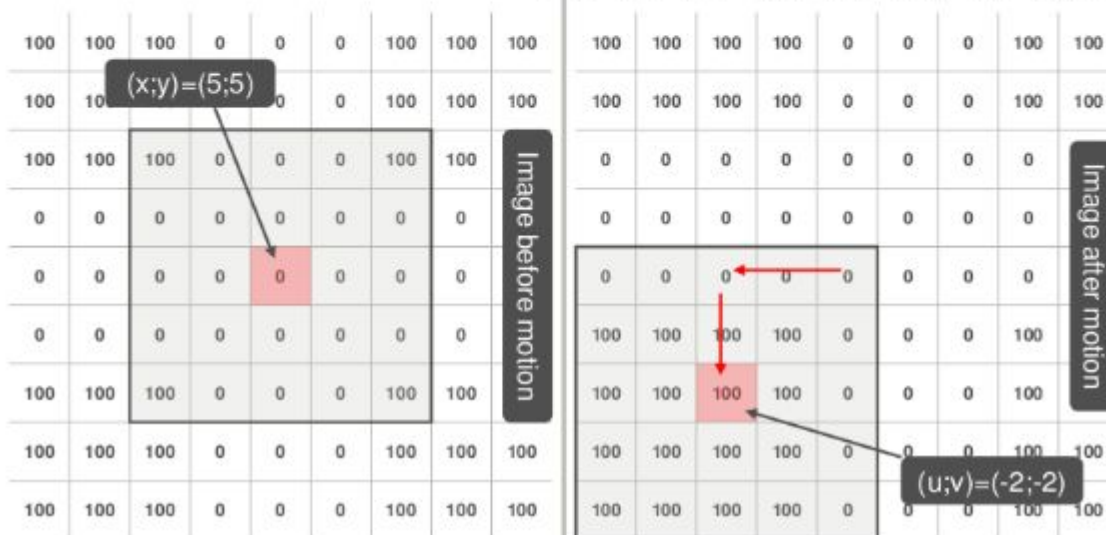


2D DIC - příklad

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

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

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

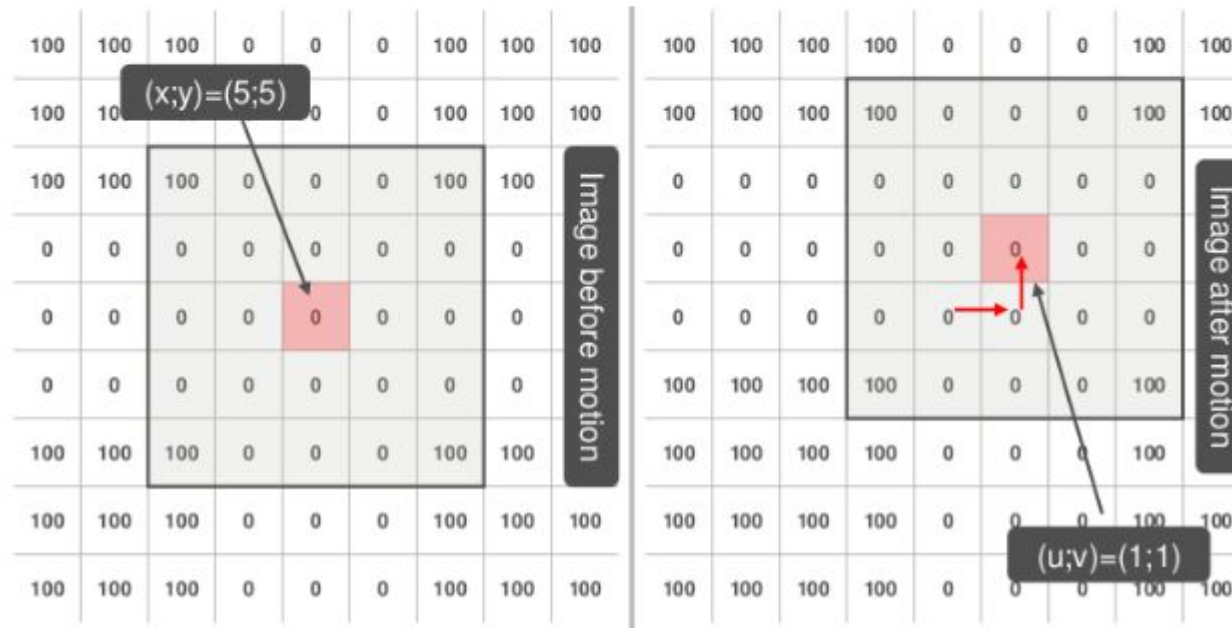


2D DIC - příklad

- Pr.: subset v posunutí $(u,v) = (1;1)$

$$C(5,5,1,1)=0$$

- Lepší než pro $(u,v)=(-2;-2) \rightarrow$ Dokonalá shoda!



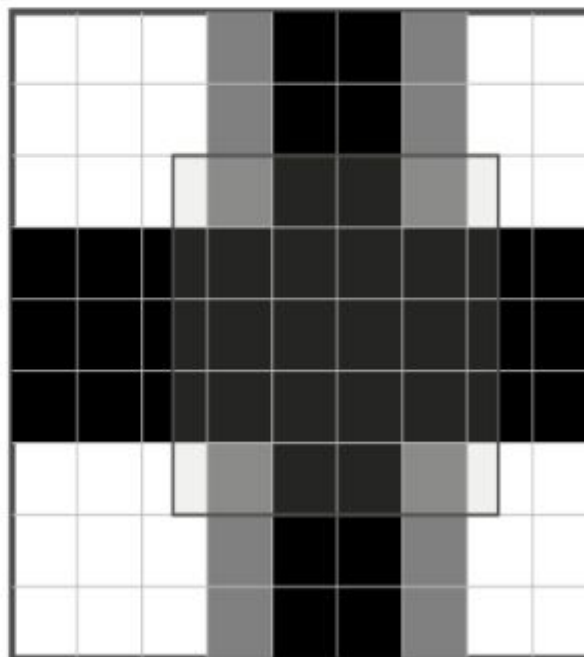
2D DIC

• Ve skutečnosti

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

103	101	99	52	0	1	55	100	96
101	104	98	51	4	3	51	98	100
103	96	99	49	2	2	52	103	98
2	3	0	1	1	2	3	0	1
1	3	3	0	2	1	0	3	0
0	0	2	0	3	0	2	0	0
98	101	102	52	1	0	46	97	102
97	98	103	51	2	0	53	98	100
102	99	101	48	0	0	54	102	101

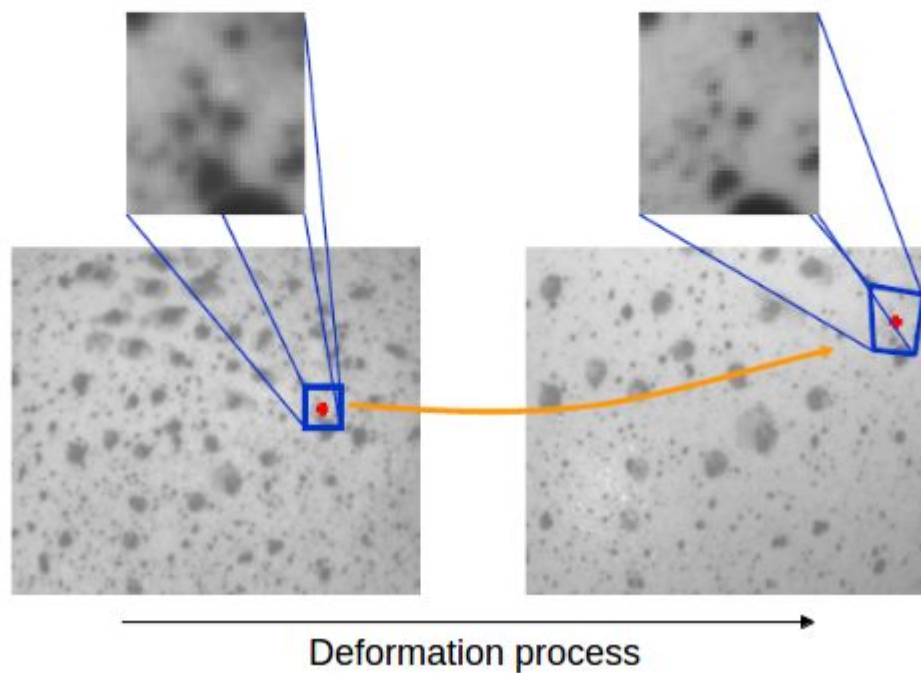
Perfect match



2D DIC

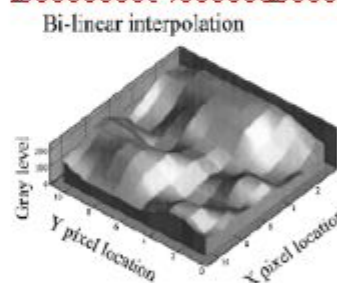
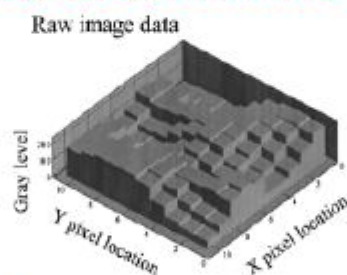
- Ve skutečnosti

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

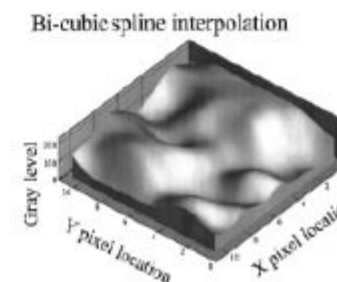
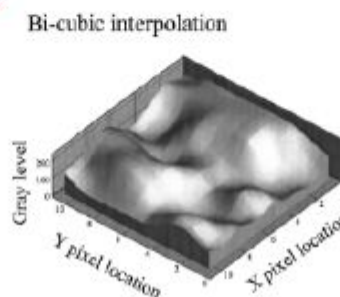


2D DIC

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

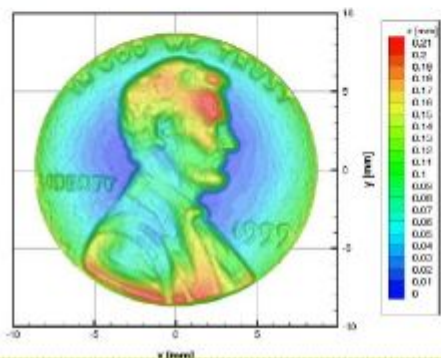


**B-splines jsou dobrou
volbou**



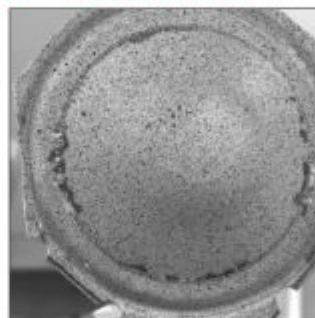
3D DIC - proč?

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

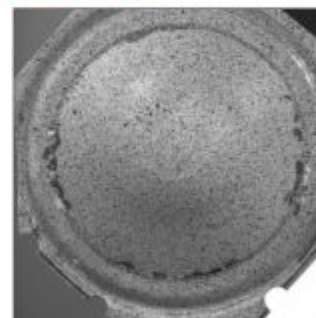


3D DIC - jak?

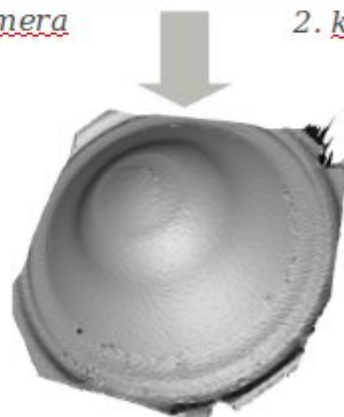
- Podobně lidskému zraku - dva snímací senzory poskytují dostatečnou informaci k tomu postihnout/vnímat v prostředí 3D objekty



1. kamera

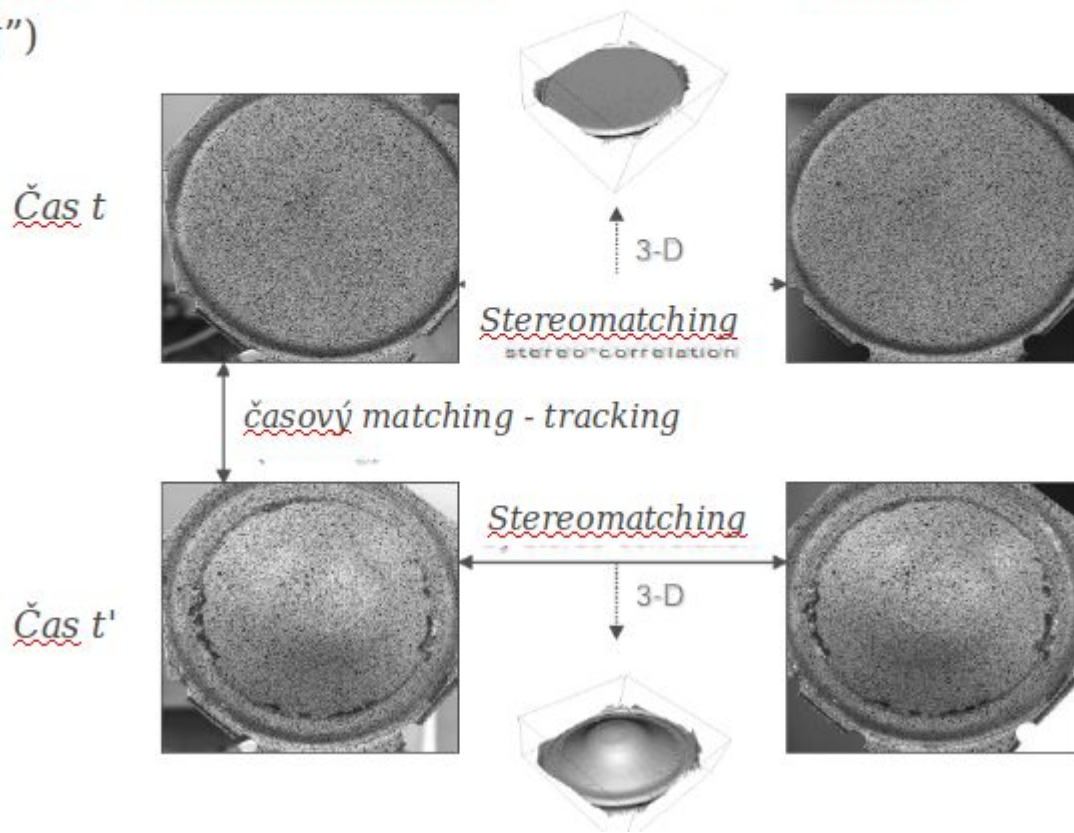


2. kamera



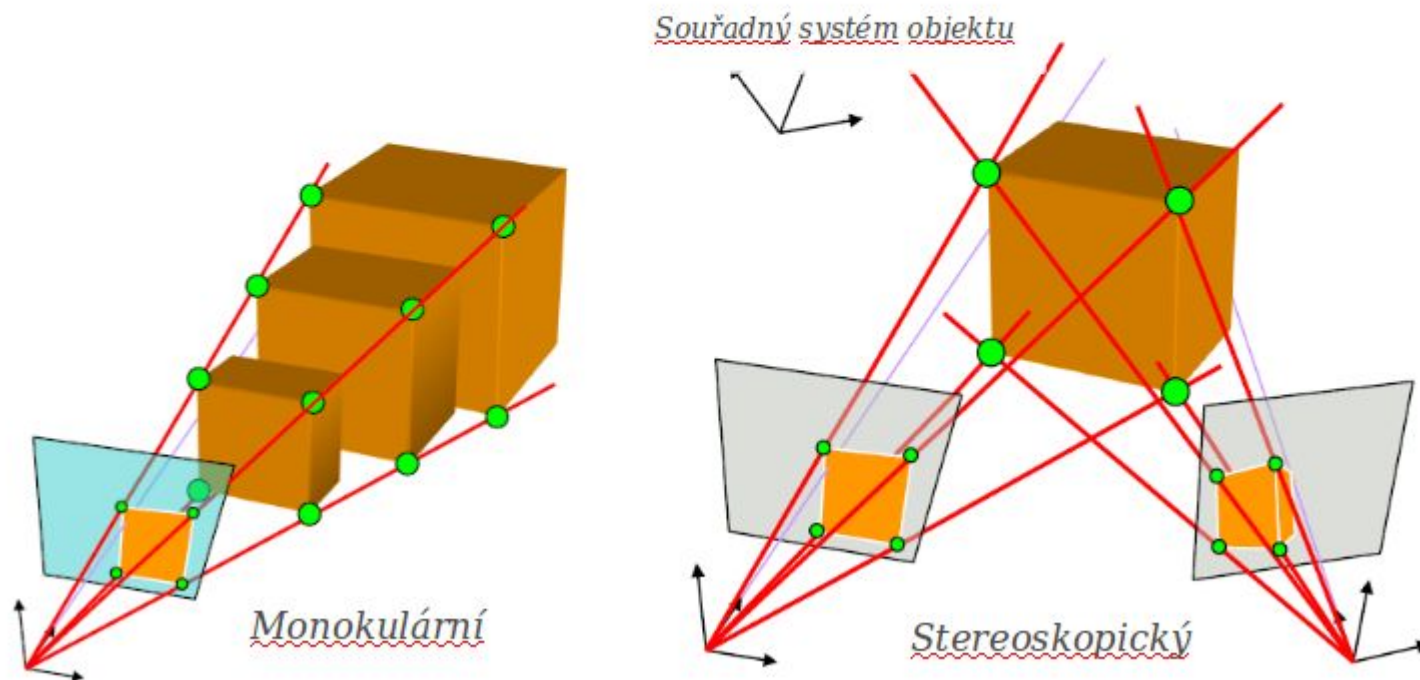
3D DIC - jak?

- 2 x korelace: 1. Stereokorelační matching; 2. časový matching ("tracking")



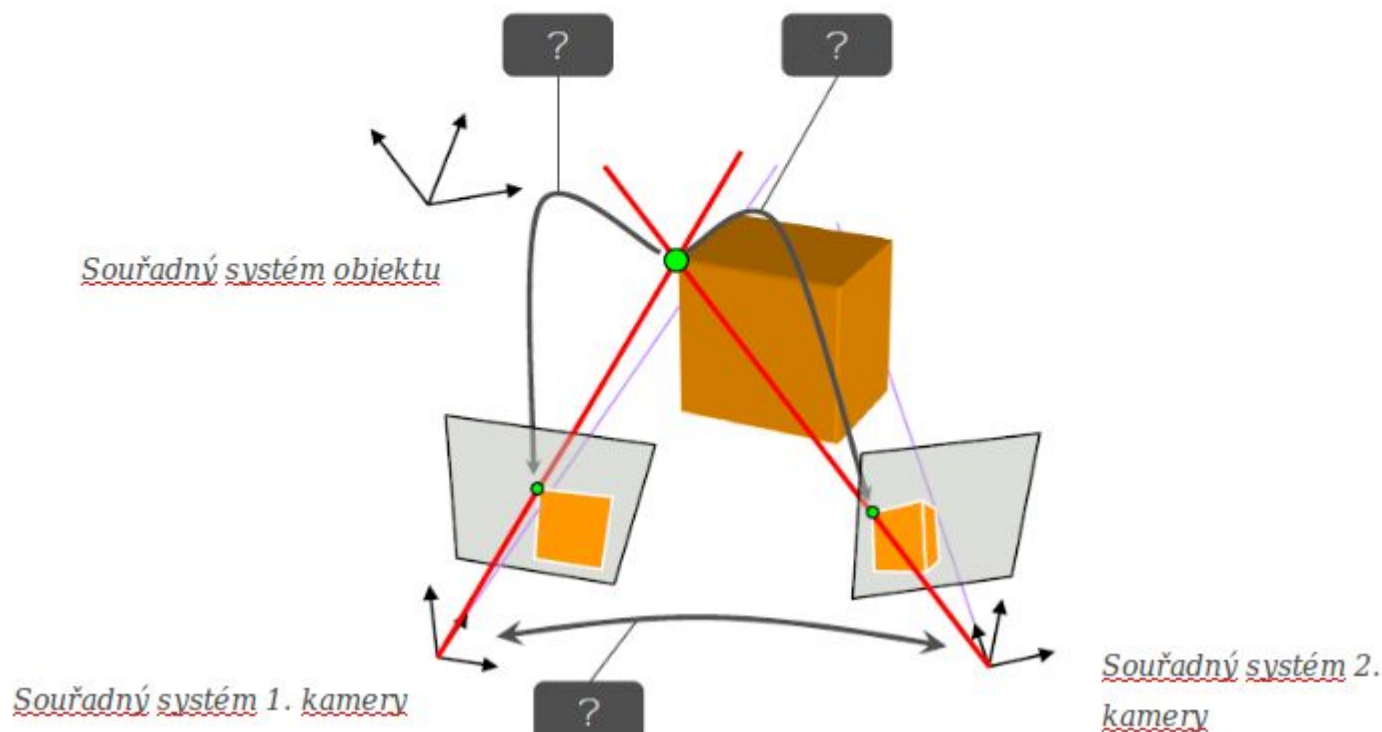
3D DIC - how?

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



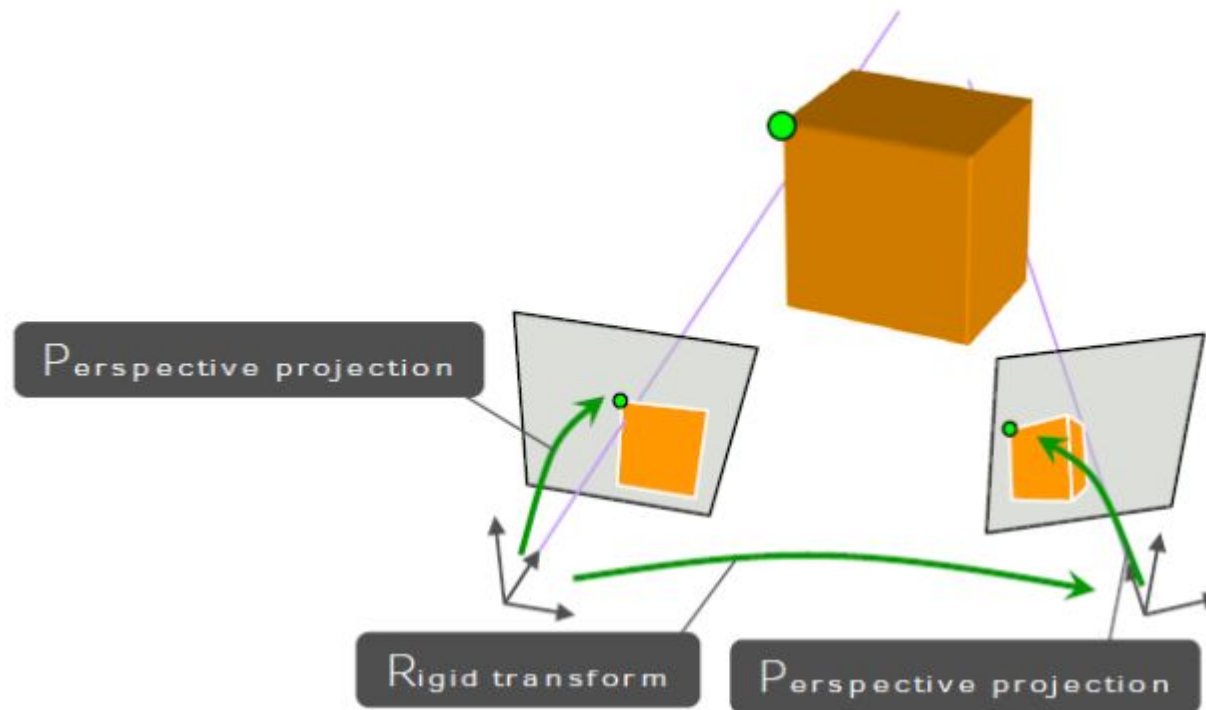
3D DIC - kalibrace

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



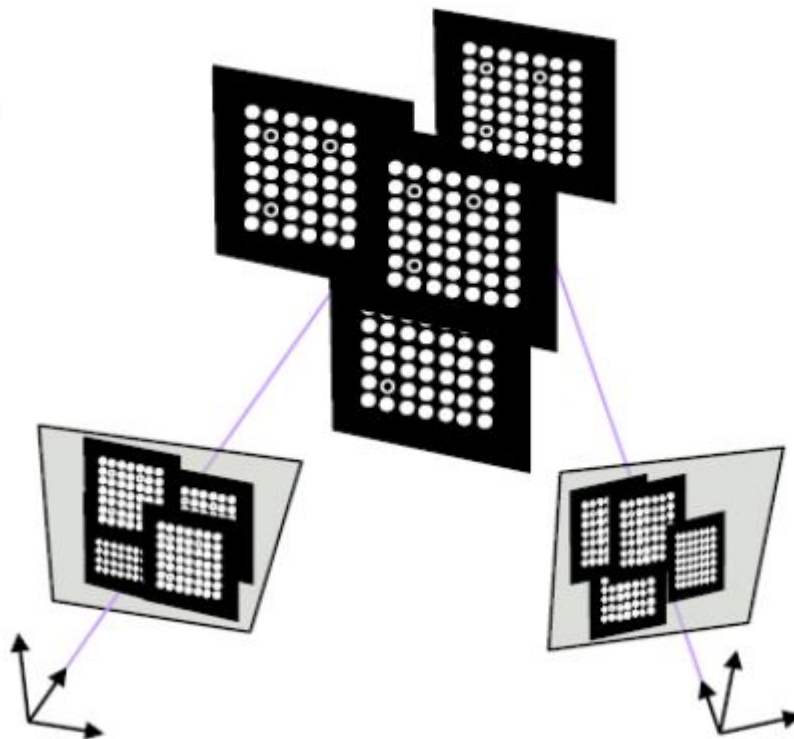
3D DIC - kalibrace

- 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 - výpočet pom. deformace

• Jakmile je systém zkalibrován, můžeme měřit posunutí a následně vypočítat poměrnou deformaci

• Pom. def. se počítají v triangulačním schématu - stejně jako v **MKP**

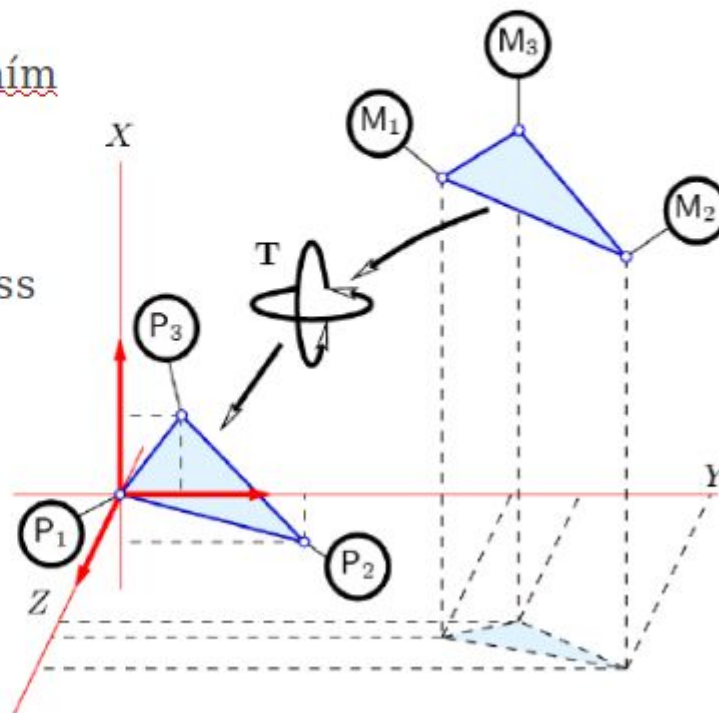
• Pom. def. je na trojúhelníku "šumová"noisy --> aplikace low-pass filtrů pro vyhlazení (Gaussův, medianový etc.)

3, 3, 3, 4, 4, 5, 5, 5, 10
Medianový filtr

5	3	4
3	10	5
3	4	5

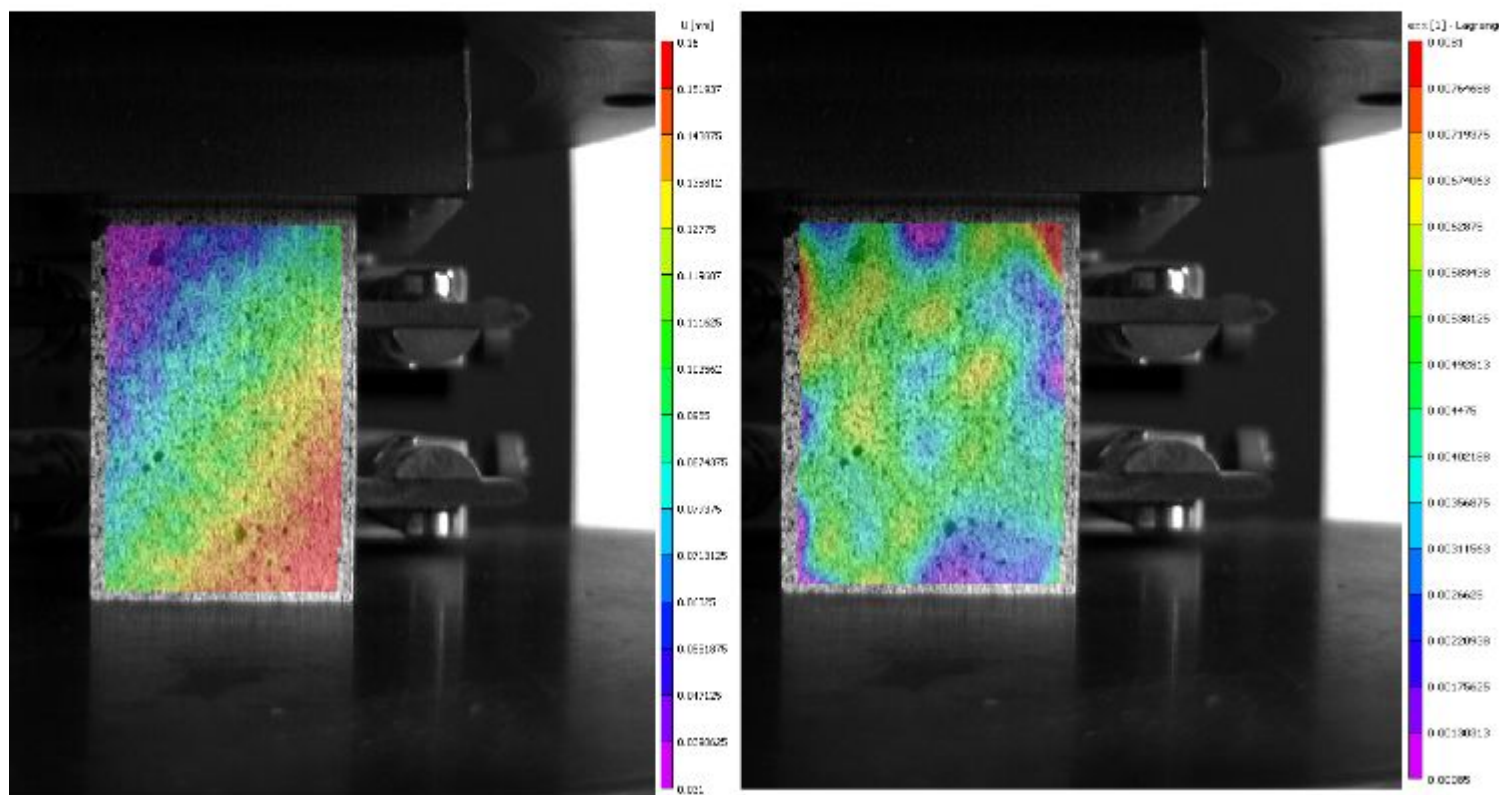
➔

5	3	4
3	4	5
3	4	5



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

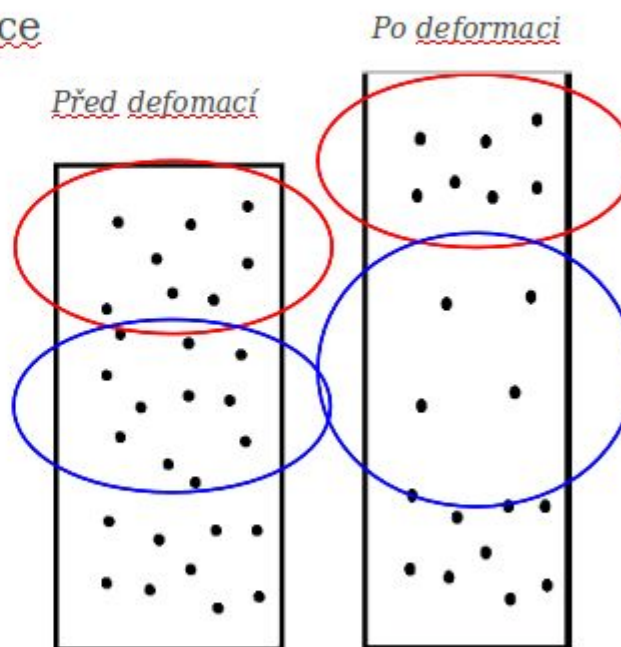
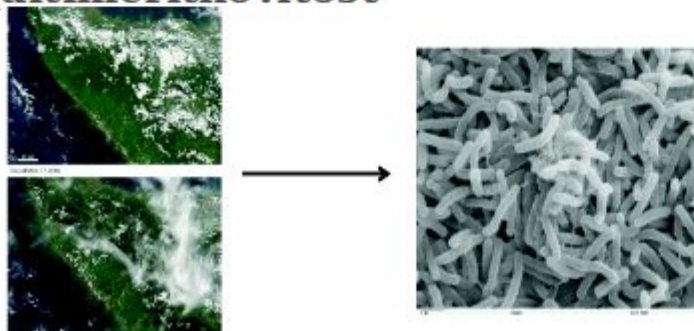


po deformaci



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 proйт jejich stránky



Otázky?

