

DIGITAL IMAGE CORRELATION

I. Jandejsek¹, D. Vavřík¹

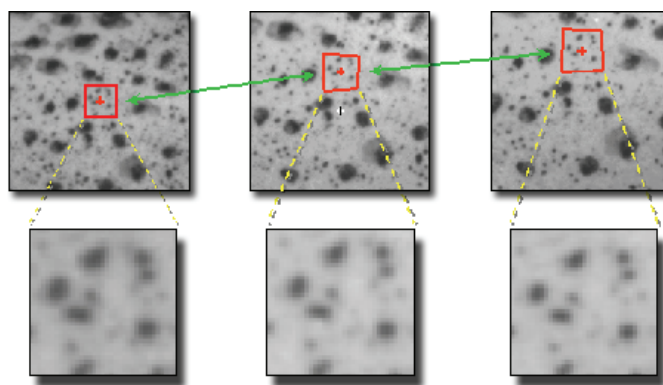
Summary: *This paper presents the optical Digital Image Correlation method for in-plane displacement field measurements. This method is based on tracing random structures, which are defined either by a sprayed pattern or by its own specimen surface structure. The displacements fields are obtained by measuring the mutual displacements of structure traced templates. The methodology for sub-pixel displacement measurements is presented.*

1. Úvod

Měření posunutí a gradientů posunutí (deformací) hrálo vždy významnou roli k určování charakteristik materiálových vlastností, jako jsou jeho pevnost, lomové charakteristiky či výpočet napětí.

V celé řadě případů jsou klasické metody, využívající tenzometry či extenzometry, obtížně použitelné, nebo nedávají dostatek údajů. V případě vzorků, které jsou například příliš malé, měkké nebo mastné, jsou typicky vhodné použít nekontaktní metody měření. Jednou z technik, v poslední době se rozvíjejících, která tyto problémy pokrývá je Digital Image Correlation (nazývá se také Digital Speckle Correlation). Její vývoj je v posledním desetiletí připisován jménům Sutton a Bruck, kteří jí k určování deformací poprvé využili [1].

V současnosti se používají dvě možné varianty Digital Image Correlation (DIC) a to dvourozměrná (2-D) a třírozměrná (3-D). 2-D DIC se používá k určování povrchových deformací plochých vzorků, 3-D DIC v případě tvarově složitých objektů. V následujícím textu budou popsány principy 2-D DIC.



Obr. 1: Sledování vzoru náhodné struktury [2].

¹ Ústav teoretické a aplikované mechaniky v.v.i., Prosecká 76, Praha 9, E-mail: jandejjs@itam.cas.cz

2. Princip DIC

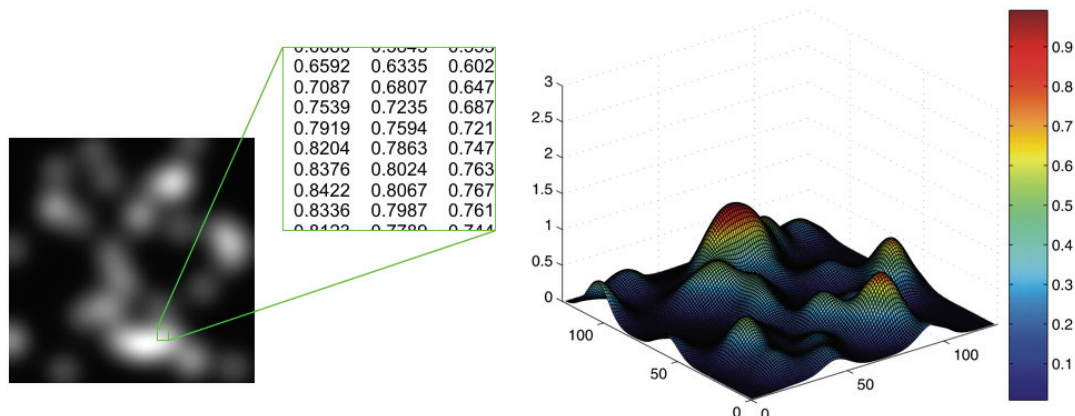
DIC je optická metoda, která pro měření povrchových deformací využívá sekvenci po sobě jdoucích obrázků. Metoda sleduje motivy (vzory) náhodné struktury, které se během deformace vůči sobě posouvají, viz. obr. 1. (Sledovaný vzor je v červeném rámečku).

Požadovaná struktura je nejčastěji vytvořena tak, že se vzorek stejnoměrně pokryje černou barvou a poté se lehkým nástřikem vytvoří vzor náhodně rozložených bílých skvrn. Postup je možný provést i inverzně tj. na bílý povrch černé skvrny jak je tomu na obr. 1. V některých případech je vlastní povrchová struktura vzorku natolik výrazná, že je možno použít tuto metodu bez výše uvedené úpravy [4].

Během experimentu je povrch vzorku snímán kamerou (pozn. v případě 3-D DIC dvěma kamerami). Pořízená sekvence obrázků je v digitalizované podobě uložena do počítače. Z této sekvence se na prvním obrázku, od kterého chceme posunutí a deformace počítat, nadefinuje pravidelná síť bodů v celočíselných hodnotách souřadnic X_n, Y_n . V okolí každého bodu je definována oblast (výřez obrázku) obsahující část náhodné struktury. Každá oblast musí obsahovat charakteristický motiv, aby jej bylo možno rozpoznat během jeho pohybu. Z takto získaných posunutí jednotlivých vzorů pak můžeme určit celkové rozložení vektorů posunutí v celém povrchu a následně spočítat složky tenzoru deformace.

3. Výpočetní algoritmus

V našem případě jsme k výpočtům využily prostředí MATLAB. Jednotlivé obrázky jsou reprezentovány maticí čísel, jejichž hodnoty udávají intenzitu barvy (nejčastěji škály šedé) jednotlivých pixelů obrázku viz. Obr 2. Zde je černá barva reprezentována nulou a bílá jedničkou. 3-D graf vpravo pak znázorňuje reprezentaci obrázku jako dvourozměrného signálu, kde na vodorovných osách jsou vyneseny souřadnice pixelů obrázku a na svislé intenzita. Celočíslná X souřadnice odpovídá sloupci obrázků v pixelové reprezentaci, celočíselná Y souřadnice pak řádku obrázku. Lokální maxima charakterizují polohu skvrn náhodné struktury, tato poloha x,y je obecně neceločíselná.



Obr. 2: Maticová reprezentace obrázku.

Systém MATLAB a jeho přídatné moduly, pro DIC nejdůležitější hlavně Image Processing toolbox, v současné době disponují řadou funkcí umožňující počítat a sestavovat algoritmy k výpočtu korelace, lišících se jak matematickým přístupem, tak složitostí a výpočetní náročností. Výběr daného matematického modelu závisí na konkrétních experimentálních

datech a požadované přesnosti výsledků. V následujícím odstavci podrobně rozeberme námi používaný postup, vycházející z přímé definice korelační funkce.

V počátečním obrázku vybereme vzor o velikosti $m \times n$ pixelů (výřez z obrázku) o souřadnicích X, Y který chceme sledovat. Rozměry vzoru mají v našem případě lichý počet pixelů, souřadnice X, Y pak představují střed vzoru. V následujícím obrázku tímto vzorem posunujeme v místě a okolí výchozí souřadnice X, Y . V každé poloze počítáme koeficient vzájemné korelace (1). Korelační koeficient je definován následujícím vztahem:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{m,n}^{(1)} - \bar{A}^{(1)}) (A_{m,n}^{(2)} - \bar{A}^{(2)})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (A_{m,n}^{(1)} - \bar{A}^{(1)})^2 \right) \left(\sum_m \sum_n (A_{m,n}^{(2)} - \bar{A}^{(2)})^2 \right)}} \quad (1)$$

Kde $A^{(1)}$ je sledovaný vzor počátečního obrázku, $A^{(2)}$ je obraz v následujícím obrázku vůči kterému počítáme vzájemnou korelaci.

Získáme tak matici korelačních koeficientů, která nám charakterizuje shodu vzoru a obrazu v závislosti na jejich vzájemné poloze (1 = totožnost, 0 = žádná shoda). Poloha koeficientu s maximální hodnotou této korelační matice nám udává novou celočíselnou polohu X', Y' , kde se daný vzor a obraz nejvíce shodují. Vektor posunutí pak získáme jako:

$$\vec{u} = [u, v] = [X' - X, Y' - Y] \quad (2)$$

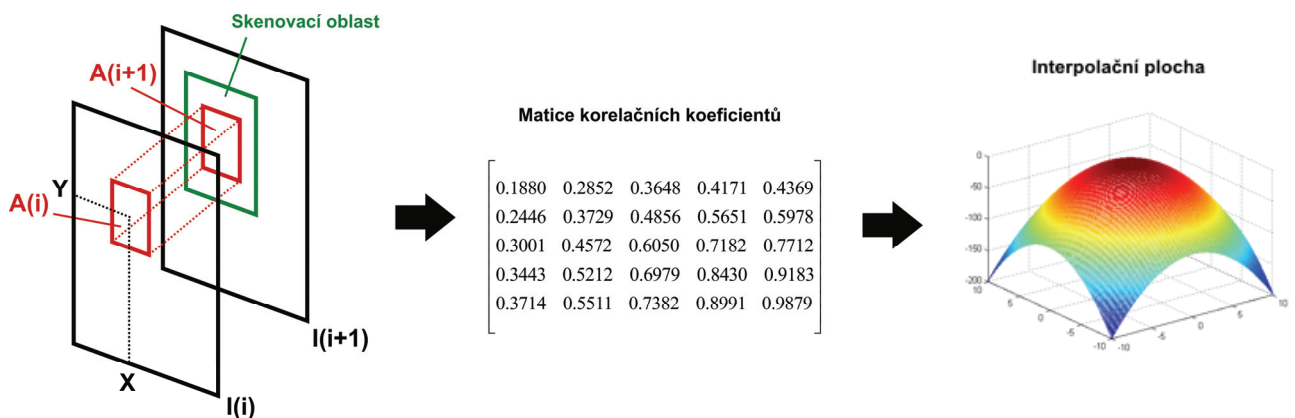
Takto získáme vektor posunutí avšak pouze s celo-pixelovou přesností. V případě potřeby subpixelové přesnosti musíme přistoupit k interpolaci dat matice korelačních koeficientů. Například tak, že okolí (3x3 pixely) polohy koeficientu s maximální hodnotou proložíme plochou, která může být reprezentována například dvourozměrnou funkcí druhého stupně $f(x, y)$ (polynomiální plochou) definovanou vztahem:

$$f(x, y) = a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 \quad (3)$$

Zpřesnění posuvu pak zjistíme z polohy x, y jejího maxima vůči poloze koeficientu s maximální hodnotou X', Y' . Celkový vektor posunutí nyní získáme jako:

$$\vec{u} = [u, v] = [(X' + x) - X, (Y' + y) - Y] \quad (4)$$

Kde složky vektoru posunutí jsou nyní obecně reálné hodnoty. Postup je schematicky znázorněn na obr. 3.



Obr. 3: Zjednodušené schéma výpočetního algoritmu.

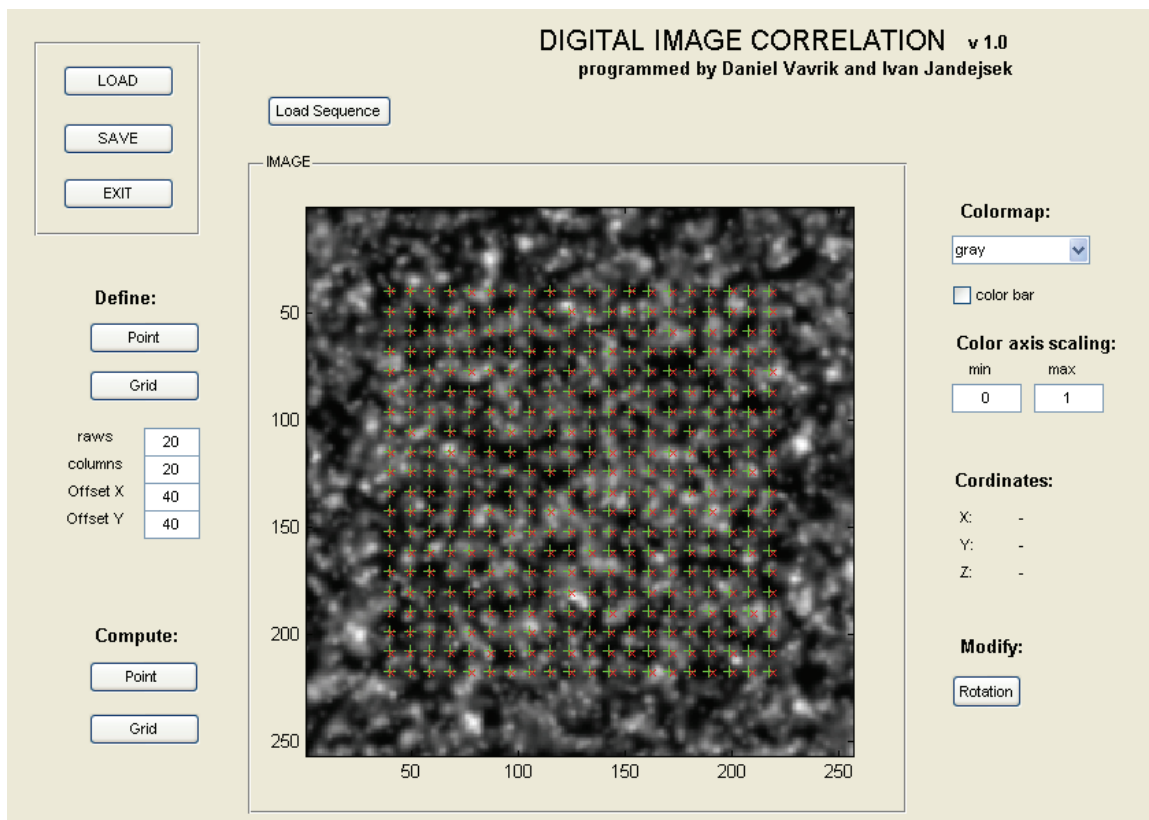
V případě malých deformací a neměnnosti sledovaného vzoru můžeme provádět korelaci stále k první původní masce. Při větších deformacích, kdy se může sledovaný vzor podstatně měnit nebo vyjždět ze skenovací oblasti musíme tuto masku aktualizovat. Krajní možností je masku aktualizovat v každém kroku, zde se ale projevuje nepříjemná kumulace chyby ze numerického zaokrouhlování v každém kroku. Optimálním řešením se pak jeví aktualizovat masku pouze v některém z následujících případů:

1. Maximum korelační matice klesne pod zvolenou mez.
2. Maximum korelační matice se ocitne příliš blízko okraje korelační matice.

V mnoha případech je také zapotřebí ošetřit tzv. vypínání „bodů“, tj. stav kdy danou oblast již nemá smysl sledovat. To se může stát například, když během experimentu dojde k nárůstu trhliny, nebo jinému ději, který má za následek destrukci pozorované struktury. Počítání korelace by v těchto místech ztrácelo opodstatnění. V našem algoritmu dojde k vypnutí „bodů“ v následujících případech:

1. Střední hodnota intenzit vzoru klesne pod zvolenou mez.
2. Rozptyl intenzit vzoru překročí zvolenou mez (nastane v místě nové trhliny, kdy je náhodná struktura příliš narušená).

Vysoká přesnost a robustnost tohoto postupu má za následek větší výpočetní náročnost, která značně roste s rostoucí velikostí matice korelačních koeficientů. Rychlejší a často používané algoritmy vedou přes různé lineární transformace, zejména pak konvoluci a rychlou fourierovu transformaci (FFT), kdy jsou obrázky převedeny do spektrální oblasti a korelace se zjišťuje v této oblasti. Nevýhodou tohoto přístupu je ale zase požadavek na vysoký kontrast obrázků s jasně ohraničenými motivy struktury.



Obr 4.: Navržený interface pro výpočet DIC.

4. Demonstrace a ověření algoritmu

Pro ověření výše navrženého algoritmu jsme vytvořily simulovanou sekvenci dvou obrázků o rozměrech 256×256 pixelů, z nichž jeden obrázek vznikl z druhého deformací ve směru x o 1% a ve směru y o 0.5%. Na takto simulované sekvenci byla vypočítána posunutí s přesností na jednu setinu pixelu s relativní chybou 0,2%. Chyba je patrně do jisté míry způsobena algoritmem, kterým MATLAB tuto transformaci počítá. Nutno také poznamenat, že při konkrétních aplikacích, kdy nás zajímá posunutí v délkové míře, by chyba závisela na velikosti oblasti kterou by daný obrázek ve skutečnosti zachycoval. Obr 4. ukazuje námi navržený interface pro výpočet DIC a výše zmíněný výpočet simulované sekvence. Je zde vidět původní nadefinovaná síť (zelené +) a nové polohy všech bodů (červené x).

5. Závěr

Navržený algoritmus DIC je funkční a velice robustní. Oproti rychlejším algoritmům využívající FFT neklade takové nároky na kvalitu sledované struktury. Je proto vhodný i k použití i u neoptických měření, například u měření pomocí rentgenu, kde získané obrázky jsou velice nekонтastní a struktura nejasně definovaná. viz.[3].

6. Poděkování

Práce vznikla za podpory projektu AV0Z20710524 Ministerstva školství, mládeže a tělovýchvy České republiky.

7. Literatura

- [1] Sutton, M.A., Bruck, H.A., McNeill, S.R. (1989), Determination of deformation using digital correlation with Newton Raphson method and partial differential correlations.
- [2] www.correlatedsolution.com
- [3] D. Vavrik, T. Holy, J. Jakubek, M. Jakubek, J. Valach (2007) Radiographic observation of strain field and consequent damage zone evolution. In Proceedings Experimental Mechanics, Svratka
- [4] J. Zhang, G. Jin, S. Ma, L. Meng (2003) Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement