

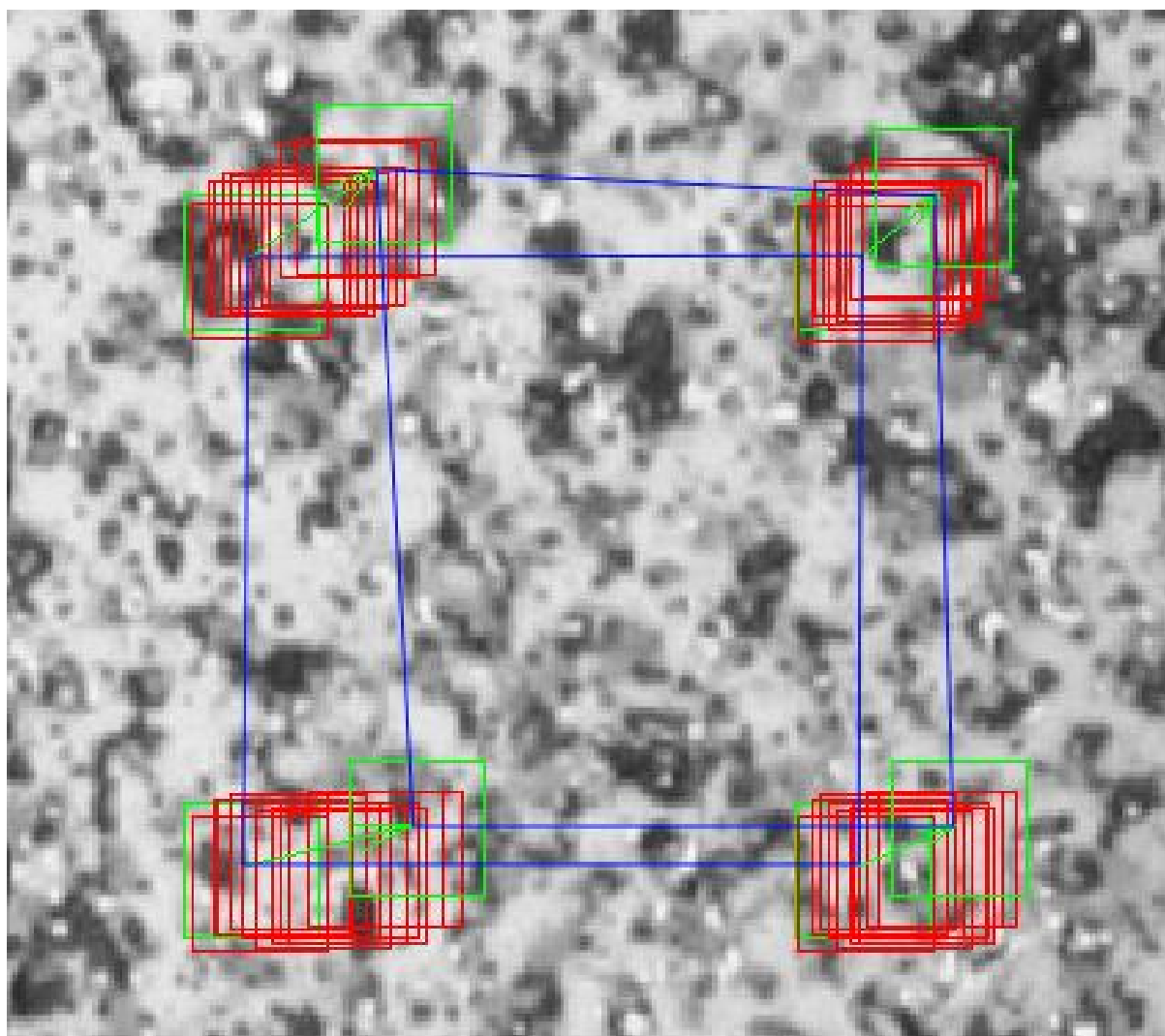
VLIV SEKVENCIÁLNOSTI ZÁZNAMU NA PŘESNOST MĚŘENÍ POSUNUTÍ METODOU KORELACE OBRAZŮ

J. Jahoda, J. Valach

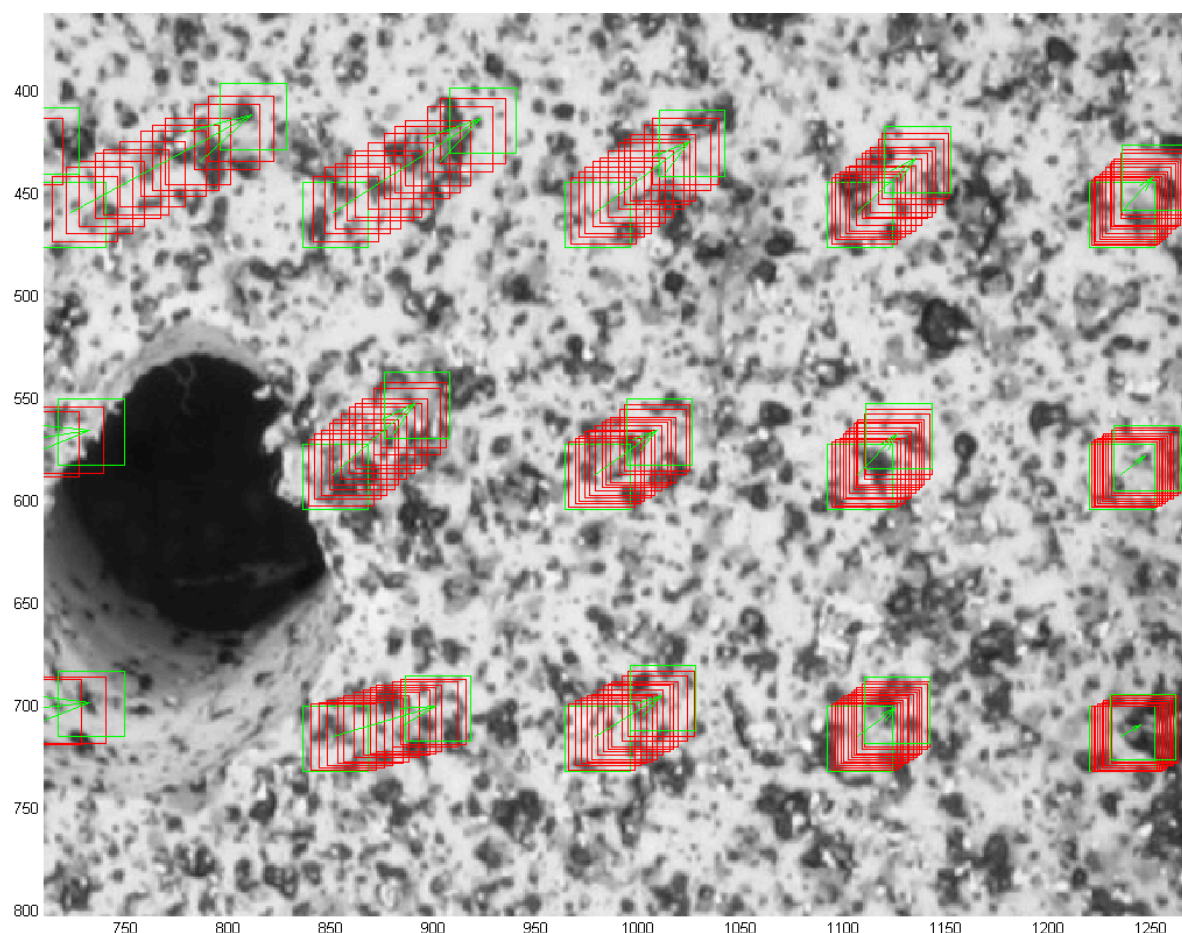
Fakulta dopravní, ČVUT, Praha

ÚTAM AV ČR, v.v.i., Praha

Abstrakt: Tento příspěvek seznamuje s použitím optické metody korelace obrazů pro měření přetvoření na povrchu tělesa. Detailně srovnává dvě techniky záznamu téhož experimentu – první aplikuje metodu korelace obrazů na dvojici obrazů zaznamenávajících první (výchozí) a poslední (konečný) stav tělesa v průběhu deformace a druhá technika provádí postupnou aplikaci korelace na sekvenci obrazů pořízených mezi prvním a posledním. Diskuze výsledků dospívá k závěru, že v případě studia značných deformací (jednotky procent) tělesa je za spolehlivější třeba považovat přístup založený na postupném zpracování sekvence obrazů.



Obrázek 1 Povrch tělesa nastříkaný kontrastním dvoubarevným sprejem. Nejmenší tečky v obrázku mají průměr cca 0.1mm. Z množiny disjunktních subsetů souvisle pokrývajících plochu vzorku jsou vybrány čtyři, jejichž středy ve výchozím obraze tvořily vrcholy čtverce (zelené rámečky a velký modrý čtverec). Jejich pohyb provázející postupnou deformaci tělesa byl zaznamenán sekvencí snímků (červené rámečky, jejichž chaotická složka pohybu je odstranitelným důsledkem posunů fotoaparátu – stav po odstranění je patrný na Obrázku 2) od výchozího až po konečný stav (další zelený rámeček). Velikost posunutí každého z vybraných subsetů mezi počátečním a konečným stavem vyjadřuje zelená šipka. Nerovnoměrnost deformace, kterou těleso podstoupilo, je ilustrována změnou modrého čtverce na obecný čtyřúhelník vzniklý spojením středů subsetů v konečných polohách (opět modrou čarou).



Obrázek 2 Ilustrace nerovnoměrného rozdělení posunů na povrchu tělesa prostřednictvím vybraných subsetů i se znázorněním rozkladu celkového přetvoření do sekvence mezistavů. Výrazná změna délky vektorů posunutí v sousedství otvoru a v oblastech “plného” materiálu výmluvně dokumentuje část deformace, kterou na sebe strhává oslabená část tělesa.

Korelace obrazů je efektivní metoda obrazové analýzy umožňující plně automatizované spárování identických míst ve scéně zaznamenané na minimálně dvou obrazech. Korelace obrazů získávaných současně dvěma kamerami nabízí třírozměrnou rekonstrukci obrazového pole, což z ní činí jeden z možných přístupů ke strojovému vidění, zatímco korelace obrazů těžké scény zaznamenané různých časech je jádrem mnoha variant optických metod měření deformací a posunutí odvozených ze srovnání obrazu tělesa před a po aplikaci zatížení vnějšími silami, které jsou základem studia mechanických vlastností těles a materiálů [1]. Spolehlivost a jednoduchost převedení teoretického základu do programového kódu činí z korelace obrazů populární metodu, která je srdcem mnoha optických měřících systémů s počítačovou podporou zpracování dat.

Základním problémem automatizace optických metod měření deformace je nalezení objektů (a bodů na jejich povrchu) v obraze a identifikace těchto objektů v obrazech pořízených z odlišných pohledů nebo v různých časech. Algoritmická snadnost automatizace nalézání odpovídajících míst na předmětech odlišuje korelačně založené metody od jiných optických metod – například od široké třídy optických metod využívajících ke zjišťování informací o posunutí a přetvoření objektů v zorném poli pravidelnou mřížku nebo síť značek. Tyto metody jsou zatíženy určitým stupněm nejistoty, zda vedly opravdu ke správnému přiřazení odpovídajících značek v sekvenci snímků z důvodu nerozlišitelné soběpodobnosti značek. K odstranění této nejistoty je tedy zapotřebí určitého porozumění výsledkům neboli rozumové interpretace, jejíž naprogramování vyžaduje značné úsilí.

Korelační metody obecně jsou založeny na poznatku, že nejvyšší korelace mezi dvěma úseky náhodného signálu nastává tehdy, pokud jsou tyto úseky identické. Důsledkem potom

je, že ze dvou záznamů (například fotografií, které jsou v počítačovém zpracování reprezentovány jako rozsáhlé matice intenzit světla zaznamenaných pravidelně uspořádanými obrazovými elementy snímače digitálního fotoaparátu) téhož signálu (scény prostorově rozmístěných objektů) lze vybrat sobě odpovídající části (body na površích těchto objektů). Z relativních pohybů spárovaných míst v referenční soustavě obrazu je možné vyčíst informace o prostorových vztazích mezi tělesy "v reálném světě".

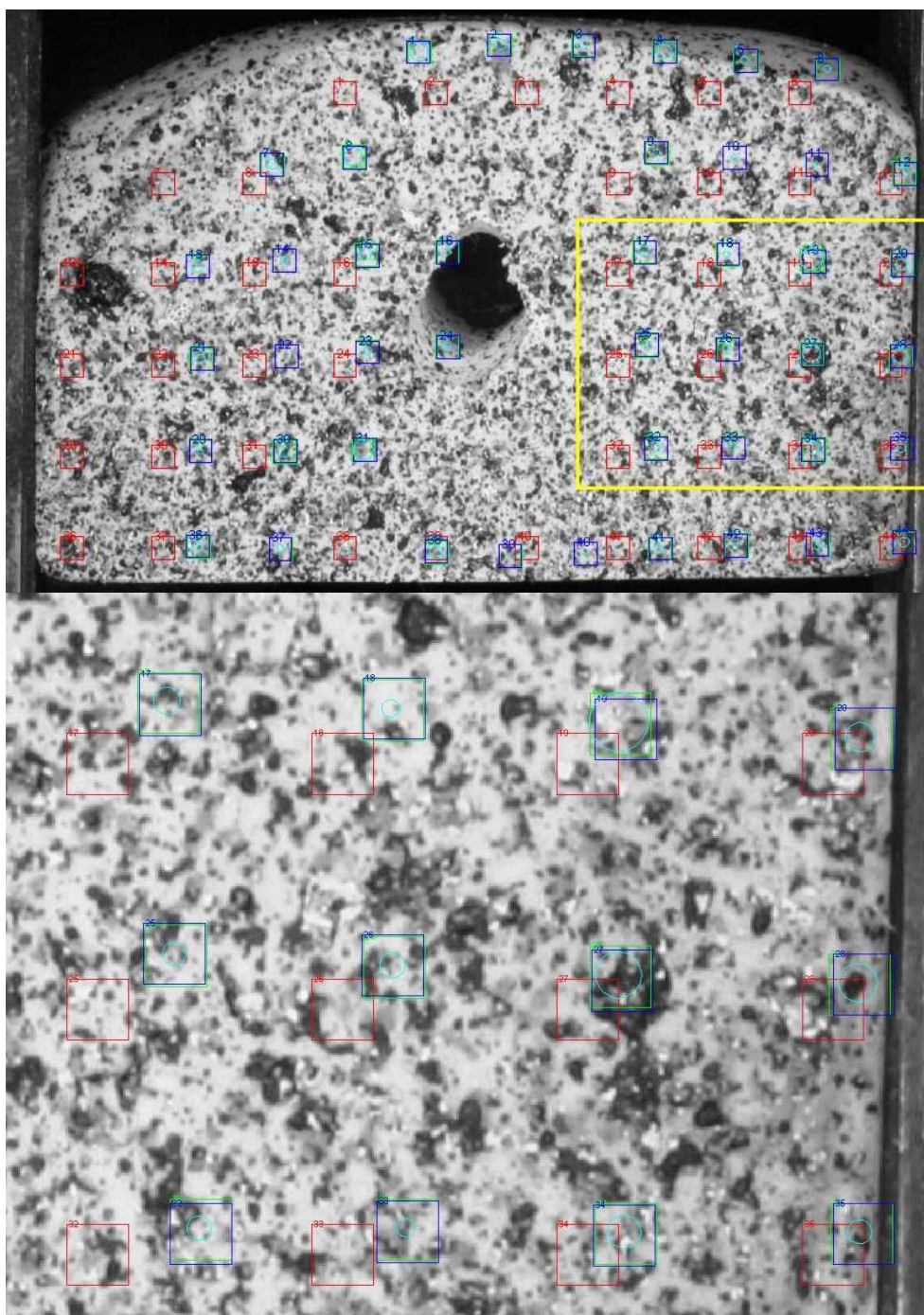
Podmínkou aplikovatelnosti korelace obrazů je pokrytí studovaných předmětů scény kontrastním vzorem náhodné (nikoli opakující se) povahy ať už přirozeného původu (například drsnost nebo stíny na povrchu těles) nebo uměle připraveným (nesouvislý nástřík kontrastní barvou, který nechává nepropojené skvrny, jako je tomu na Obrázku 1). Prakticky se postupuje tak, že se zaznamenané obrazy rozdělí na pravidelné pole podoblastí stejné velikosti reprezentovanými jako matice normalizovaných intenzit, tzv. subsety, přičemž výběr rozměru a počtu subsetů podléhá určitým pravidlům zohledňujícím velikost náhodného vzoru na povrchu těles ve vztahu k velikosti těles ve scéně a rozlišení, kterým je scéna zaznamenána. Volba rozměrů subsetu je důležitým krokem, kterým se vyvažují dvě protichůdné tendence: na jedné straně s rostoucí velikostí subsetu stoupá i jistota, že vysoká korelace je opravdu indikátorem nalezení téhož místa na jiném obrazu, na druhé straně zjemňování subsetů vede k zahuštění zjištěného pole posunutí a deformací, tudíž k věrohodnějším výsledkům v místech významnějších gradientů deformací (viz Obrázek 2). Pro daný subset ve výchozím, "referenčním" obraze se hledá nejlépe "padnoucí" subset ve druhém obraze, přičemž míra shody je kvantifikována velikostí korelace mezi těmito oblastmi. Jak z výše uvedeného vyplývá, teorie předpokládá identické části signálu v obou záznamech, v reálných experimentech se za "odpovídající" považuje dvojice subsetů s maximální korelací. Nalezení páru je ekvivalentní s určením posunutí, které "namapuje" subset z jednoho obrazu na sebe ve druhém obraze.

Pro další zpřesnění výsledků se provádí takzvaná subpixelová [2] aproximace vycházející z předpokladu, že posun subsetu mezi dvěma obrazy nebude uskutečněn celočíselným, ale spíše racionálním počtem pixelů, které se určí jako poloha odpovídající lokálnímu maximu hodnot korelace.

Tyto matematické postupy ztrácí účinnost v situaci, kdy podobnost subsetu se svým vzorem se zmenšuje s rostoucí deformací tělesa v daném místě, jak dokládá Obrázek 1. S poklesem podobnosti (chápaným jako synonymum pro podmínku uvažující pouze translaci a rotaci subsetů, nikoli jejich distorzi), totiž současně roste i pravděpodobnost spárování nesprávné dvojice, čímž v měření vzniká určitá chybová singularita. Tato vlastnost nabývá na důležitosti s velikostí a nerovnoměrností deformace studovaného tělesa, jejímž důsledkem je rychlý pokles soběpodobnosti subsetů daným jejich zřetelným vlastním přetvořením způsobující, že shoda mezi subsetem a jeho obrazem bývá jen částečná a mezi „kandidátskými“ regiony není žádný s výrazně převyšující hodnotou korelace. Tato situace nastává tehdy, když deformace změní velikost subsetu alespoň o jeden pixel, což při straně subsetu cca 30px odpovídá deformaci 3%, kterou lze u (hyperelastických) materiálů typu pryž dosáhnout snadno.

Otázkou vlastní deformace subsetů se zabývá více prací rozvíjejících tuto experimentální metodu. Lze jít například cestou uvolnění předpokladu rigidity subsetů a připustit jejich deformabilitu a tím rozšířit původní transformaci subsetů mezi obrazy z translaci a rotaci tuhých bloků na různě obecné projekce a optimalizovat z výsledků parametry takové transformace, nebo jiný přístup je založen na postupu, kdy lze pole deformací určené z první iterace předpokládající tuhé subsety použít pro vyhodnocení korelace ve druhé iteraci, která už hledá korelace deformovaných subsetů, atd.

Zde prezentovaná práce přistupuje k výše zmíněnému problému vylepšením způsobu provádění záznamu optické metody. Upřednostněním pořizování sekvence obrazů a jejich



Obrázek 3 Celkový pohled na těleso a znázornění výřezu pro detail (žlutý obdélník). Do fotografie jsou vkresleny původní polohy vybraných subsetů (červeně, subsety jsou označeny také čísla pro snazší hledání sobě odpovídajících) a jejich polohy po deformaci interpretované jednak pomocí sekvence (modré), jednak ze srovnání "první-poslední" (zelené). V mnoha případech je zřejmé, že se výsledky nepřekrývají. Pro zřetelnější znázornění rozdílu mezi posunutími určenými oběma postupy jsou ve středu modrých čtverců zobrazeny tyrkysové kružnice, jejichž poloměr je pětinasobkem délky rozdílu posunutí. Nejlepší ilustrací spolehlivosti metody založené na analýze sekvence snímků je ovšem chybějící srovnání posunutí ve středové oblasti tělesa v horní části obrázku: kolem otvoru v tělese dosahují deformace značných hodnot a míra podobnosti subsetů pro metodu srovnávající první s posledním snímkem klesá natolik, že dosažená korelace nesplnila kritérium pro získání uspokojivé shody, tudíž zde nevedla k výsledkům. Metoda založená na analýze sekvence fungovala spolehlivě.

analýzy lze dosáhnout významného zpřesnění výsledků oproti postupu založeném na korelaci prvního s posledním, jak dokumentuje Obrázek 3. Tento přístup také nabízí jednodušší zpracování výsledků (zkrácení výpočetního času prohledáváním menšího okolí).

V případě studia těles s velkým přetvořením se ukazuje – a to je hlavním závěrem příspěvku – jako výhodnější rozložit záznam ve více kroků, které v konečném srovnání nesou věrohodnější výsledky, než spoléhat na vyhodnocení měření z počátečního a konečného stavu. Zhoršení výsledné korelace pro sekvenci obrazů vlivem kumulace chyb mezi jednotlivými kroky, jejichž korelace se postupně pronásobují, se ukazuje být nevýznamné ve srovnání se snížením korelace v důsledku ztráty podobnosti subsetů, která nastává pro postup založený na srovnání „prvního a posledního“.

Implementace teoretického základu optické metody korelace obrazů pro vyhodnocení experimentu do podoby příkazových skriptů a uživatelských funkcí byla provedena v prostředí Matlab, které nabízí efektivní nástroje pro maticové operace, funkce pro práci s digitálními obrázky (s nimiž lze manipulovat jako s velkými maticemi) i prostředky grafické vizualizace výsledků, ale především uživateli dovoluje soustředění na fyzikální stránku problému, zatímco programátorsko-technickou stránku diskrétně skrývá. V neposlední řadě rozsáhlá komunita uživatelů sdílí výsledky své práce v podobě volně použitelných zdrojových kódů, mezi kterými lze nezdědka nalézt řešení velmi speciálních problémů. To platí i v prezentovaném případě, který vliv výše zmíněných singulárních chyb eliminoval aproximační funkcí gridfit [3], zajímavou možností citlivého "ladění" výsledku s přihlédnutím na celkový trend při současném zachování místních gradientů a vyloučení chybových singularit.

Poděkování: Tento příspěvek vzniknul v rámci výzkumného záměru VZ AV0Z20710524 s částečným přispěním grantu 106/04/0567 GAČR.

Literatura:

[1] M.A. Sutton, S.R. McNeill, J.D. Helm, & Y.J. Chao, in: PK Rastogi (Ed.), Photomechanics, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2000, pp. 323-372.

[2] J. Jahoda: Optické metody měření deformací (digitální korelace obrazu), Bakalářská práce FD ČVUT, 2009.

[3] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8998>

Spojení na autory: J. Jahoda: moonstone@seznam.cz; J. Valach: valach@itam.cas.cz