

Funkční vzorek: polohovací systém pro rastrovací mikroskopy vyrobený technikou 3D tisku

Petr Klapetek, Miroslav Valtr, Středoevropský Technologický Institut VUT v Brně

Motivace

Předmětem tohoto funkčního vzorku je nízkonákladový dvouosý polohovací systém umožňující provádět polohování vzorku v rastrovacím sondovém mikroskopu (skenování). Metody rastrovací sondové mikroskopie (SPM – Scanning Probe Microscopy) patří mezi velmi rozšířené techniky charakterizace povrchů pevných látek, jak ve výzkumu a vývoji, tak v průmyslové praxi. Nejčastěji využívanou technikou z této rodiny analytických metod je mikroskopie atomárních sil (AFM - Atomic Force Microscopy). Pomocí AFM můžeme mapovat tvar povrchů pevných látek (topografii) s velmi vysokým rozlišením, až atomárním, bez nutnosti speciální přípravy vzorku. Z topografie můžeme stanovit například tvar různých objektů, drsnost povrchu nebo jeho defekty. Jádrem mikroskopu atomárních sil jsou dva klíčové prvky: velmi ostrá sonda se systémem umožňujícím detekci její silové interakce s povrchem a polohovací systém s vysokým rozlišením umožňující provádět pohyb se sondou nebo vzorkem s rozlišením v řádu nanometrů.

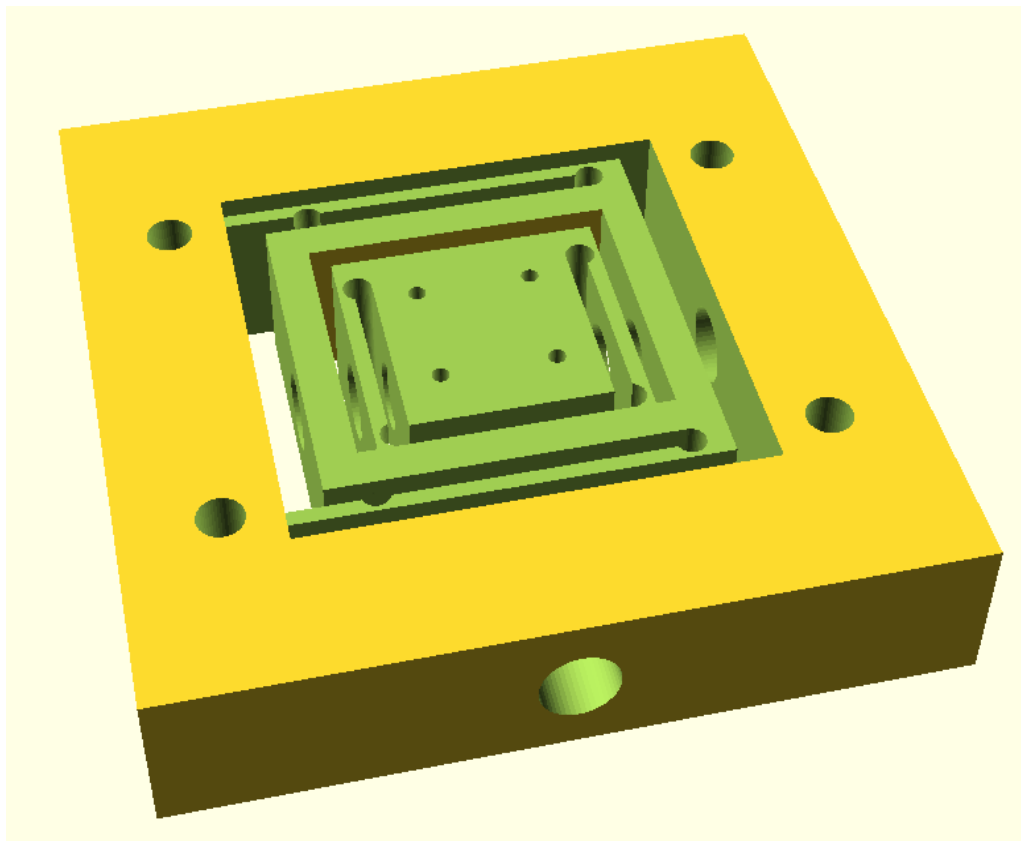
I přes svůj jednoduchý princip je jako celek mikroskop atomárních sil poměrně nákladné zařízení, v řádu milionů korun. Se stále se zvyšujícími požadavky na měření tvaru povrchů v mikro- a nanoměřítku dochází k určité diferenciaci mezi velmi komplexními systémy umožňujícími vědeckou práci na nejvyšší možné úrovni a systémy s horšími parametry, nicméně příznivější cenou, umožňujícími základní analýzu. Zejména z pohledu průmyslově vyráběných povrchů je druhá kategorie zařízení stále naprosto dostačující a očekáváme, že právě cenově dostupné mikroskopy by mohly dále zvýšit rozšíření těchto moderních metrologických nástrojů v průmyslu.

V této zprávě popisujeme výsledek snahy o vytvoření velmi levného polohovacího systému vhodného pro rastrovací mikroskopii. Využili jsme metodu 3D tisku, která nabízí možnost velmi snadné modifikace výrobku a jeho přizpůsobení aktuálním požadavkům. Pro srovnání, běžné polohovací systémy pro tyto účely se vyrábí typicky metodou elektroerozivního obrábění, což je podstatně náročnější technologie, zejména pokud je tvar výrobku komplexní a není možné ho zhotovit jednou operací. Použitý materiál a technika v našem případě samozřejmě poněkud omezuje tuhost celého systému a jeho metrologické vlastnosti, nicméně jako technologie pro vyvíjení prototypů je zcela dostačující, a jak je uvedeno dále ve zprávě, ukazuje se jako dostačující i pro mnohá měření pomocí mikroskopie atomárních sil.

Hardwarová část navrženého systému

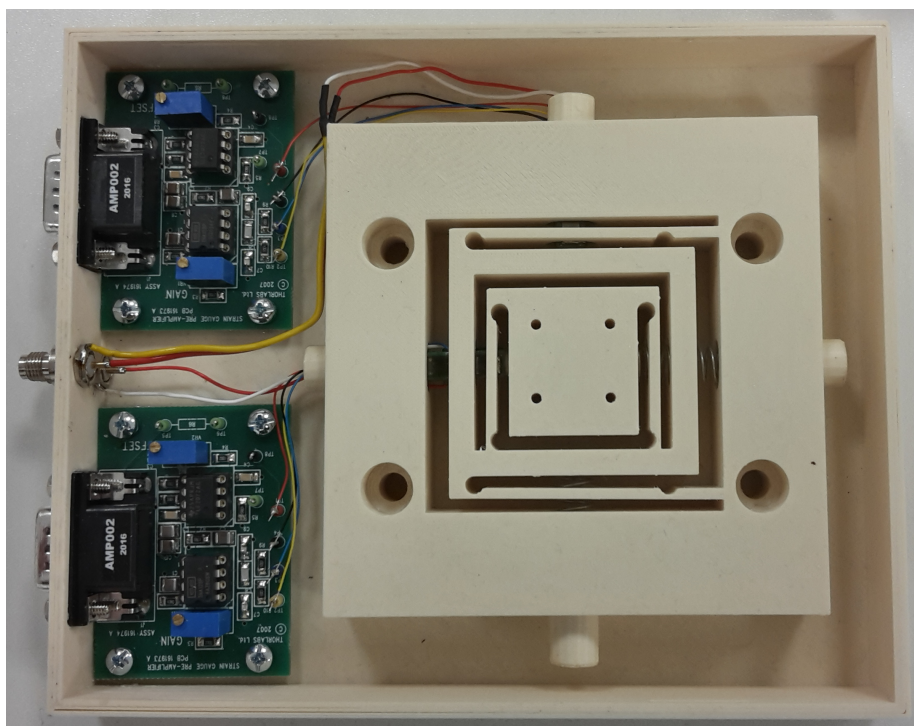
Návrh mechanické části popisovaného systému byl vytvořen ve volně šiřitelném softwaru OpenSCAD, který umožňuje zadávat jednoduché geometrické útvary parametrizovaně (objekt je zapisován pomocí textového souboru určujícího definice jednotlivých dílů). Díky tomu je možné velmi snadno měnit vlastnosti navrhovaného polohovacího systému (například tloušťku planžet) změnou jednotlivých parametrů. Systém je navržen jako dvě do sebe vnořená lineární vedení s planžetami. Jako zdroj pohybu jsou použity piezokeramické komponenty. Pro kompenzaci malé vratné síly plastové

konstrukce polohovacího systému jsou využity pružiny. V prvních testech byl použit systém, ve kterém je rozsah pohybu stejný jako rozsah použitých piezokeramických komponentů, nicméně jednoduchou změnou parametrů je možné dosáhnout mechanického zvětšení rozsahu pomocí páky až na čtyřnásobek rozsahu piezokeramického prvku. Model stolku je znázorněn na obr. 1.



Obr. 1: design plastového polohovacího systému pro rastrovací mikroskopii

Rozsah stolku se tedy podle parametrizace a použitých piezokeramických komponent může pohybovat mezi $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ a $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. Testované stolky byly vyrobeny v laboratořích Českého metrologického institutu na jednoduché 3D tiskárně od firmy Prusa Research. Tiskli jsme z různých plastů - PLA, ABS a PET. Rozlišení tisku v ose z bylo zvoleno maximální možné, tj. 0,5 mm, doba tisku byla typicky 12 hodin. Poté byly do výtisku vlepeny piezokeramické komponenty a pružiny. Fotografie stolku spolu s osazenými piezokeramikami, konektory a předzesilovači je na obr. 2.

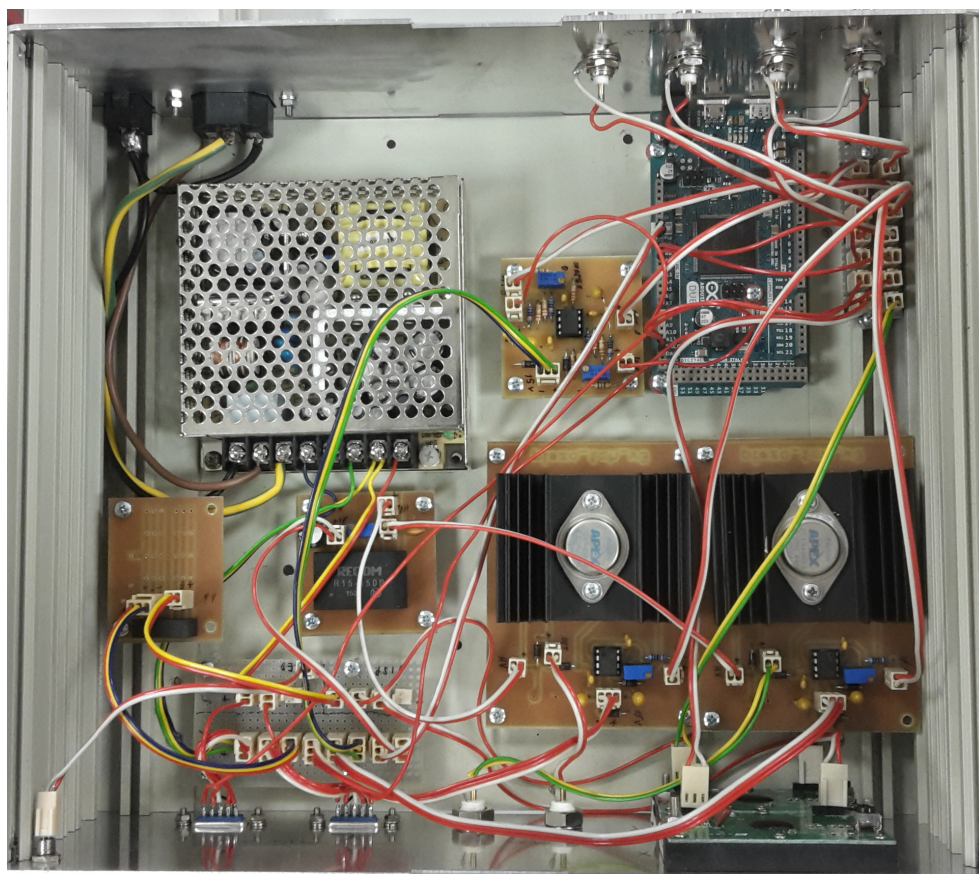


Obr. 2: fotografie osazeného stolku

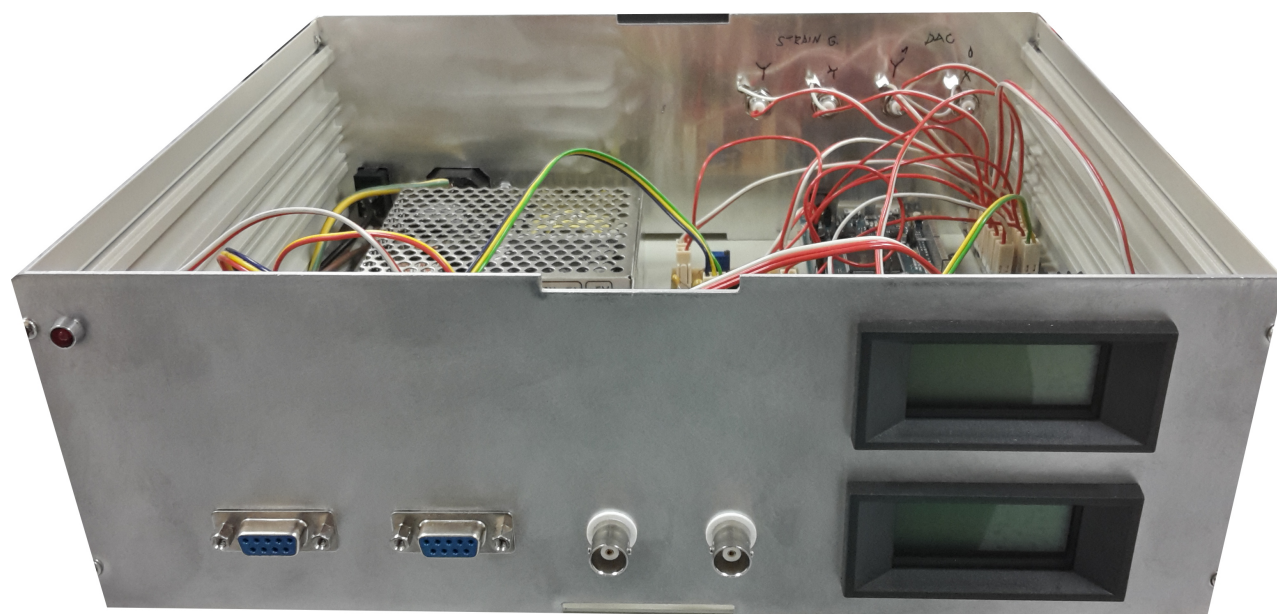
Elektronika

Pro napájení a řízení piezokeramických komponent jsme využili námi navrženou elektroniku využívající levný mikrokontrolér Arduino DUE, který je založen na 32 bitovém procesoru Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Procesor běží na frekvenci 84 MHz, takže poskytuje dostatek výkonu pro námi zamýšlený účel, tj. udržování zpětnovazebné smyčky pro polohování systému. Procesor je mj. vybaven dvanácti A/D a dvěma D/A převodníky, které mají hloubku 12 bitů. Pomocí A/D převodníků se čtou napětí z předzesilovačů Thorlabs (AMP002), které dávají na výstupu napětí úměrné roztažení piezokeramických komponent. Na základě zvolené polohy je pak na D/A převodníku nastaveno napětí, které je pak přes vysokonapěťový zesilovač přivedeno na příslušnou piezokeramiku. Tím je dáno i rozlišení polohování. V nejhorsím případě, tj. na největším rozsahu, je rozlišení $50 \mu\text{m}/4096 = 12 \text{ nm}$. Naopak na nejmenším rozsahu ($4 \mu\text{m}$) je rozlišení rovno 1 nm .

Na obr. 3 je vyfocena celá řídicí elektronika. Kromě již zmíněného mikrokontroléru Arduino je důležitou komponentou vysokonapěťový zesilovač. Ten sestává ze dvou stupňů – z invertujícího zesilovače s nastavitelným zesílením založeného na operačním zesilovači TL081 a dále z výkonového operačního zesilovače Apex PA88A, který je rovněž zapojen jako invertující ovšem s pevným zesílením 47x. Kladné napětí na vstupu, které se předpokládá v rozsahu $0 \text{ V} - 3,3 \text{ V}$, je tak zesíleno na $0 \text{ V} - 150 \text{ V}$, což je maximální napětí, které lze přivést na piezokeramické komponenty. Vzhledem k tomu, že D/A převodníky v Arduino pracují v rozsahu cca $0,5 \text{ V} - 2,7 \text{ V}$, bylo nutné zkonstruovat pomocný modul – dvoukanálový diferenciální zesilovač založený na operačním zesilovači TL072, který tento rozsah „rozšíří“ na požadovaných $0 \text{ V} - 3,3 \text{ V}$. Vysoké napětí (150 V) je generováno modulem RECOM R15 – 150B, který napětí z průmyslového zdroje 15 V transformuje na 150 V . Za zmínku stojí ještě LCD moduly (viz obr. 4), které fungují jako voltmetry a zobrazují napětí z předzesilovačů Thorlabs. Slouží tedy jako indikátory polohy. Napájení LCD modulů (9 V) bylo třeba galvanicky oddělit. To bylo vyřešeno modulem Murata MEV1S1509SC.



Obr. 3: řídicí elektronika

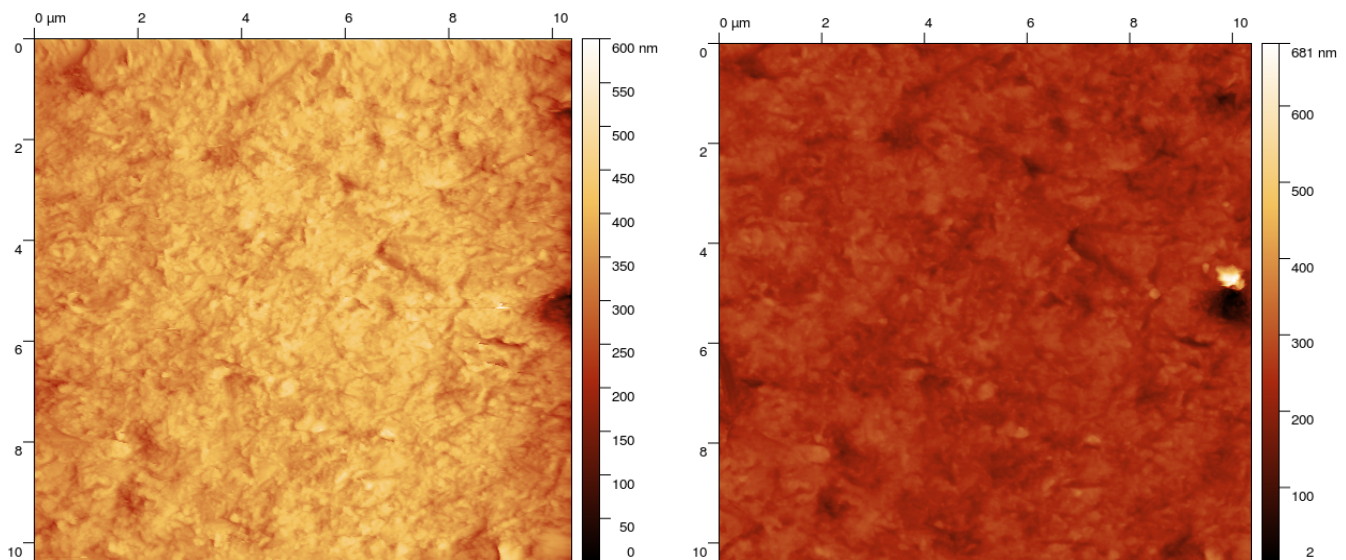


Obr. 4: řídicí elektronika – přední panel

Výsledky charakterizace

Pro charakterizaci byl polohovací systém doplněn jednoduchou detekční jednotkou pro AFM měření, také vlastní konstrukce. Detekční jednotka se skládala z fokusovatelného laserového modulu (Thorlabs), polohově citlivého optického detektoru (Hamamatsu S5991-01) a několika dalších pasivních optomechanických komponent. Pro polohování v ose z byl použit piezokeramický prvek od firmy Piceramic (Physik Instrumente). Pro měření jsme využili sondy PPP-CONTR od firmy NanoAndMore, jejichž hlavní výhodou je velká délka pružného držáku hrotu (cantileveru) a s tím související snadné najustování celého zařízení. Pro orientaci na vzorku a nastavení laserového svazku jsme využili CCD kameru (Thorlabs) a objektiv s velkou pracovní vzdáleností (Mitutoyo).

Abychom byli schopni charakterizovat metrologické vlastnosti plastového polohovacího systému v co možná nejvyšším rozlišení, rozhodli jsme se využít drsného povrchu (vzorek od firmy Simetrics) a provést vzájemnou korelaci mezi výsledkem měření pomocí zde popisovaného zařízení a mezi komerčním mikroskopem od firmy Bruker (Dimension Icon). Vzhledem k velmi dobrým metrologickým vlastnostem mikroskopu Dimension Icon můžeme předpokládat, že veškeré rozdíly mezi tvarem povrchu drsného vzorku měřeného pomocí tohoto mikroskopu a pomocí zde popisovaného plastového polohovacího systému jsou dané nedokonalostí plastového systému. Výsledky měření drsného povrchu oběma zařízeními (na stejném místě na vzorku) jsou uvedeny na obrázku 5.



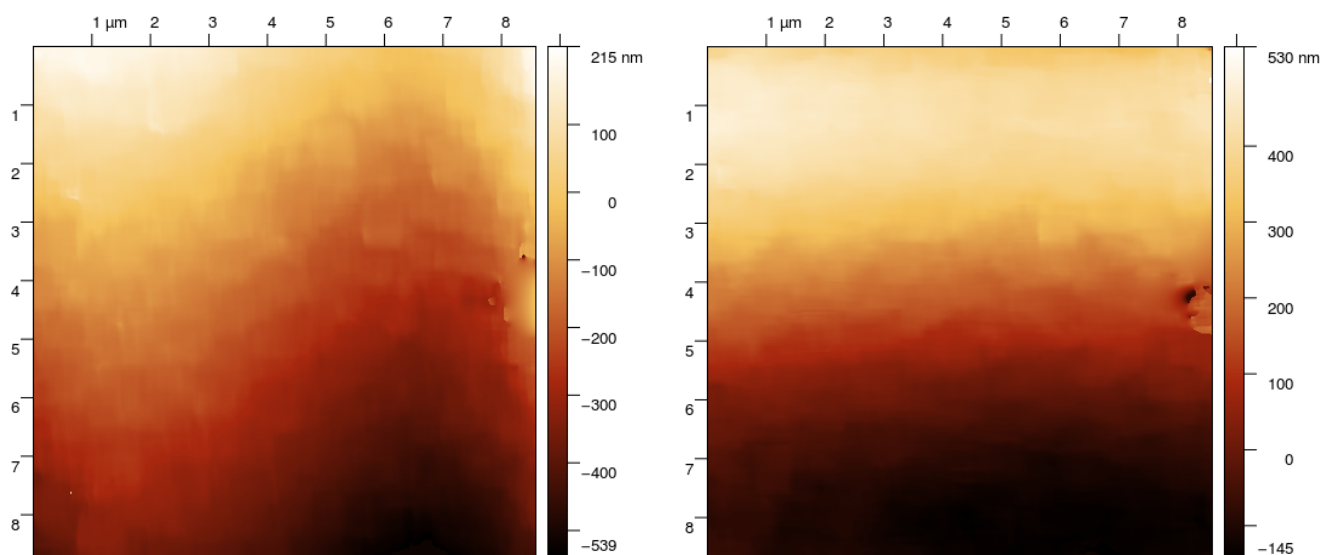
Obr. 5: snímek drsného povrchu křemíku získaný pomocí plastového polohovacího systému (vlevo) a pomocí komerčního zařízení Dimension Icon od firmy Bruker (vpravo).

Je patrné, že obrázky získané pomocí komerčního mikroskopu a pomocí zde popisovaného plastového polohovacího systému jsou si velmi podobné, nicméně podrobnější výsledky je možné získat až numerickou analýzou. Ta byla provedena pomocí volně šiřitelného programu Gwyddion (<http://gwyddion.net>), s využitím modulu pro vzájemnou korelaci. Postup vzájemné korelace je následující:

- V každém bodě jednoho ze snímků je vytyčeno okolí o uživatelem stanovených rozměrech, typicky např. 20 x 20 pixelů.
- Na druhém ze snímků je vybrána oblast hledání, větší než je výše zmíněné okolí.
- Pro každé z možných umístění okolí do oblasti hledání je spočten korelační koeficient mezi

částí obrazu z jednoho a z druhého snímku. Jako výsledek je použito místo, kde je korelační koeficient nejvyšší.

Výsledkem analýzy je mapa vzájemných posunutí jednotlivých částí obrazu, kterou v tomto případě můžeme interpretovat přímo jako mapu systematických chyb našeho plastového polohovacího systému. Mapa pro posunutí v ose x a v ose y je uvedena na obrázku 6.



Obr. 6: mapa systematických chyb plastového polohovacího systému v ose x (vlevo) a v ose y (vpravo).

Z uvedených dat je patrné, že systematické chyby jsou poměrně velké, což by bylo možné u takového plastového lineárního vedení s omezenou tuhostí očekávat. Co je však podstatné, systém vykazuje poměrně dobrou stabilitu a opakovatelnost, chyby polohování je tedy možné kompenzovat softwarově. Kromě této možnosti jsme v další fázi vývoje přidali k piezokeramickým komponentům senzory mechanické deformace, které nám umožňují vyloučit časově závislou složku systematické chyby (hysterezi) a tím možnost softwarové korekce dále zpřesnit.

Závěr

Představený systém umožňuje polohování vzorku v rastrovací sondové mikroskopii a provádění měření topografie povrchu. Byly charakterizovány jeho metrologické vlastnosti a byl navržen postup pro minimalizaci systematických chyb při měření. Díky metodě 3D tisku je možné snadno přizpůsobit rozsah a další parametry navrženého zařízení při zachování velmi příznivé ceny.

Poděkování

Vývoj byl podpořen projektem CEITEC2020 pod registračním číslem LQ1601 v rámci Národního programu udržitelnosti II.