



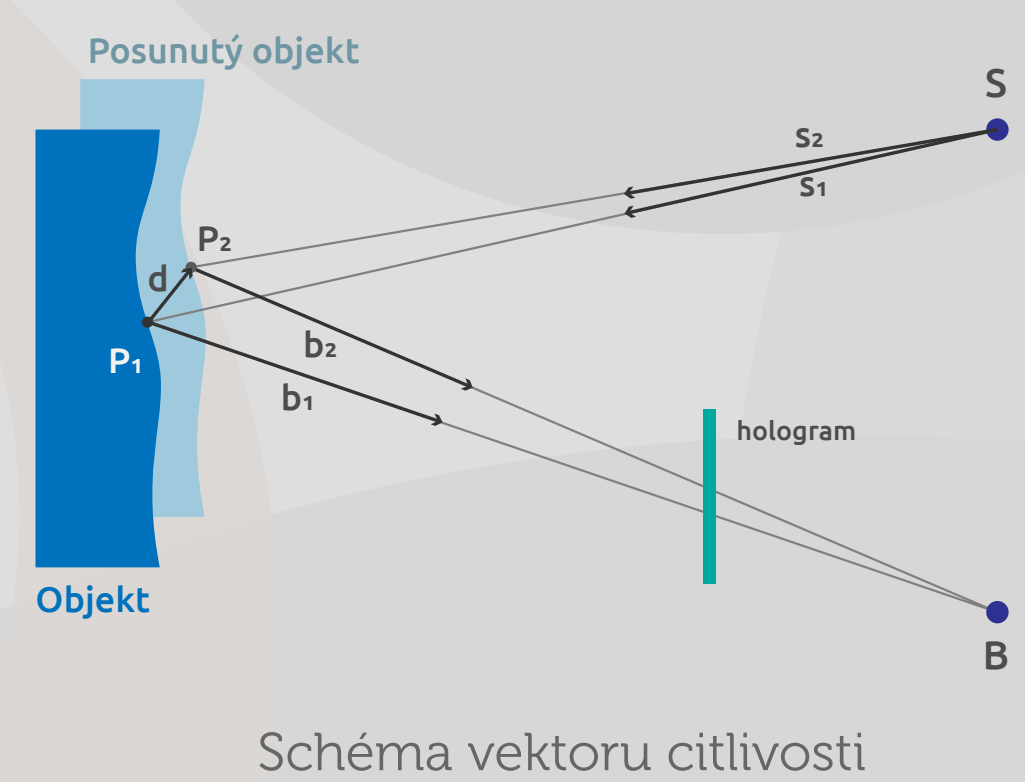
## Optimalizace holografické metody pro měření topografie povrchu

### Abstract

Digitální holografie je měřicí metoda využitelná pro měření mnoha různých fyzikálních veličin jako tvary, posuny a deformace. Při měření posunu a deformace pomocí digitální holografické interferometrie narážíme na problém zkreslení, které je způsobeno nesterjím rozložením směrů dopadajících a odražených paprsků. V tomto příspěvku je diskutován teoretický popis chování a výpočtu vektoru citlivosti a je také navržena experimentálně ověřen způsob jeho měření.

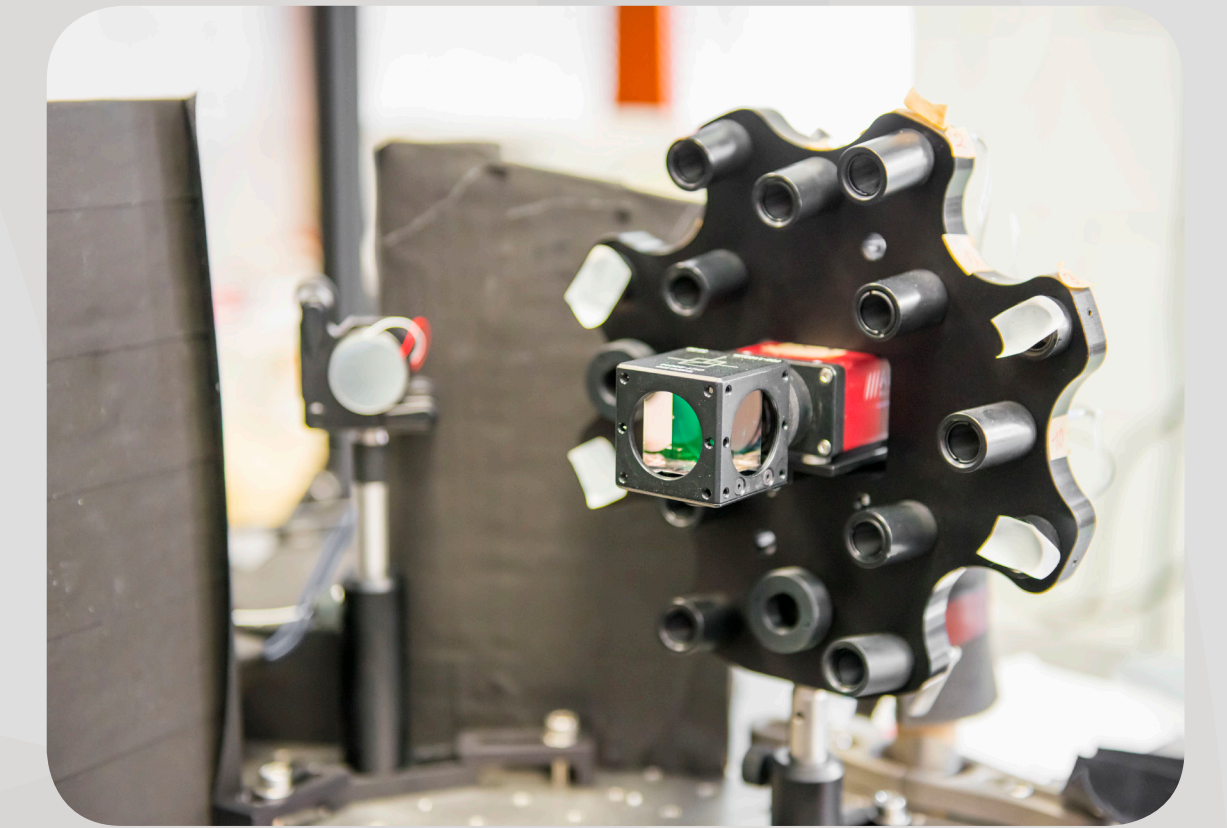
### Úvod

Digitální holografická interferometrie (DHI) se používá pro měření tvaru, deformací, posunů, teplotních či proudových polí a dalších veličin [1; 2]. DHI je celoplošná a velmi citlivá diferenciální měřicí metoda, která nachází využití v mnoha aplikacích. DHI je schopna měřit změny stavu objektu téměř v reálném čase a je vhodná i pro její relativní nenáročnost na kvalitu a složitost použitých optických komponent. Výstupem DHI je interferenční fázové pole odpovídající rozdílu optických drah OPD, tedy rozdílu stavu zkoumaného objektu mezi dvěma záznamy hologramu. V dalším kroku je nutné najít vztah mezi OPD a měřenou veličinou, kde narážíme na problém obecně netriviální závislosti fáze interferenčního pole např. na posunu jednotlivých bodů na povrchu v případě měření deformací. Deformace objektu v každém měřeném bodě se tak projeví v interferenčním fázovém poli s jinou vahou – citlivostí. Je tedy nutné nalézt závislost citlivosti měření dané veličiny pro každý měřený bod na povrchu objektu. Tuto závislost je možné popsat pomocí citlivostního vektoru, který vyjadřuje, jak se změna měřené veličiny u jednotlivých bodů promítne do změny fáze interferenčního pole. Přesná znalost citlivostního vektoru v každém bodě povrchu je tedy zcela zásadní pro přesné měření pomocí DHI. Existují dva základní způsoby pro určení citlivostních vektorů. První je založen na určení citlivostních vektorů proměněním geometrických vztahů mezi jednotlivými komponentami uspořádání a druhý na přímém měření citlivostních vektorů pomocí posunu či rotace objektu [3; 4].

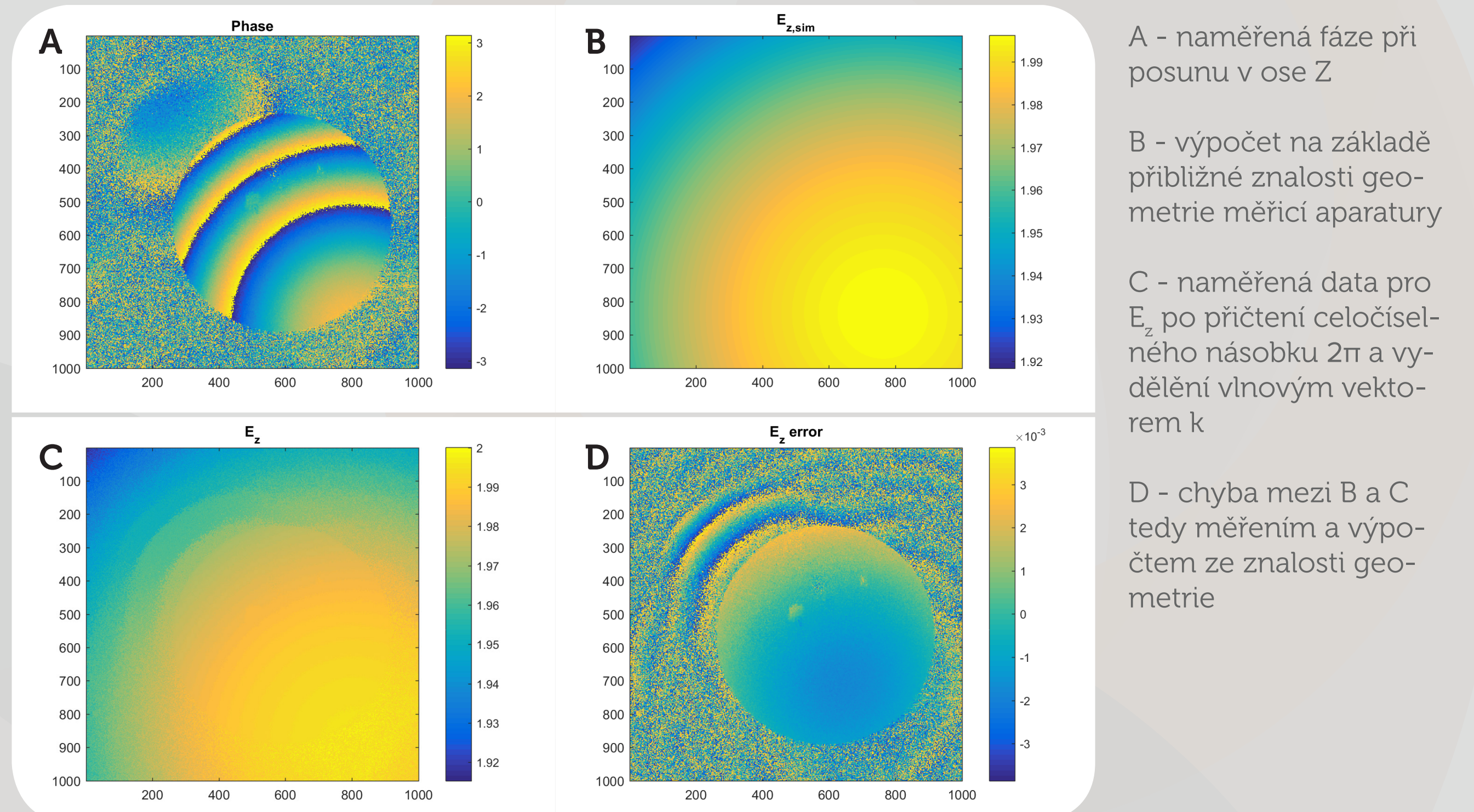


### Výsledky

Abychom byli schopni získat představu o citlivostních vektorech, musíme pro jejich výpočet změřit souřadnice jednotlivých komponent měřicí aparatury. Bod B, odpovídající kameře, byl umístěn do počátku souřadnicového systému. Bod S má souřadnice [37,5; -80,0; -20,0] a body P [P<sub>x</sub>; P<sub>y</sub>; 390,0], jde tedy o rovinu kolmou ke kameře vzdálenou 390 mm. Pro posuny byl použit polohovací stolek PI L-509. Byla změřena série hologramů rovinného broušeného objektu s různými mikroposuny v ose Z. Pokud vezmeme libovolně dva hologramy s různými posuny, můžeme pomocí DHI určit fázovou změnu. Vzhledem k harmonické povaze interferenční rovnice lze změnu ve fázi  $\Delta\Phi_{\text{meas}}$  jakožto úhel v komplexní rovině, určit pouze v rozsahu  $[-\pi; \pi]$ . Pro absolutní změnu fáze  $\Delta\Phi = \Delta\Phi_{\text{meas}} + n2\pi$  je nutné správně určit celočíselný násobek n. Pro jeho určení můžeme použít výpočtu z přibližné znalosti geometrie aparatury a následně data k datům z měření přičíst vhodné n tak aby se naměřené a vypočtené hodnoty co nejlépe shodovaly.



Vícesměrové holografické měřidlo "šestnáctihlavá saň"



### Teorie

Při vzniku hologramu dochází k interferenci objektové a referenční vlny. V digitální holografické interferometrii (DHI) nejprve zaznamenáme hologram zkoumaného objektu v počátečním stavu a zrekonstruujeme fázové pole  $\Phi_1$ . Následně provedeme změnu na objektu, zaznamenáme a zrekonstruujeme druhý hologram [5], čímž získáme fázové pole  $\Phi_2$ . Interferenční fáze mezi oběma stavy objektu bude odpovídat Optical Path Difference - OPD. Při posunutí (a ekvivalentně i deformaci) objektu je tedy dráhový rozdíl paprsků OPD v každém bodě povrchu objektu **P** roven:

$$\Delta\phi(P) = \frac{2\pi}{\lambda} OPD(P)$$

$$e(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [b(P) - s(P)] = k[b(P) - s(P)]$$

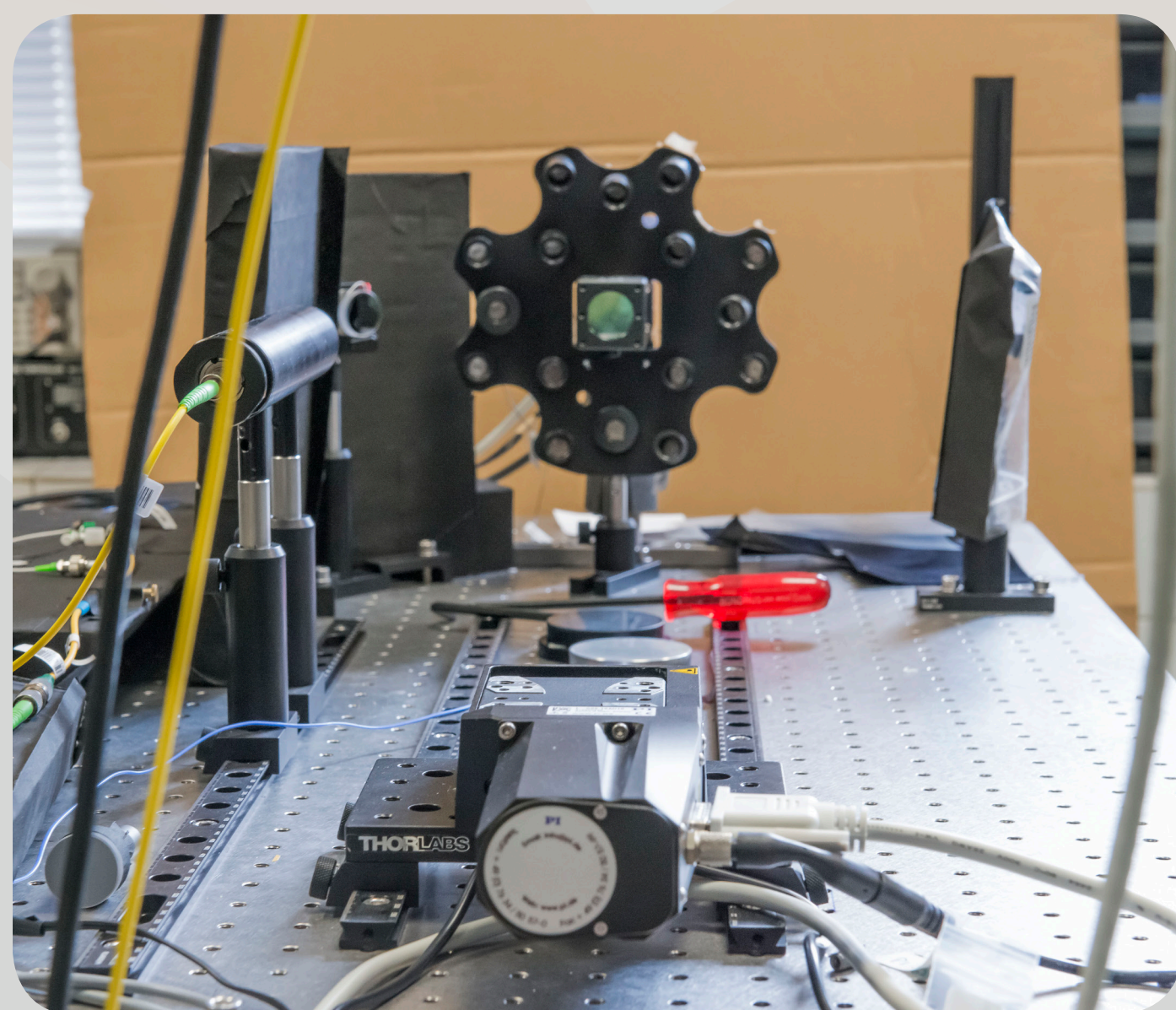
$$\Delta\phi(P) = d(P)e(P)$$

kde **e** je citlivostní vektor, **d** je posun bodu na povrchu a  $\Delta\phi$  je fázová změna. Citlivostní vektor je možné určit buďto ze znalosti geometrie měřicí aparatury, nebo pomocí měření s definovanými posuny objektu podle:

$$\Delta\phi = D e,$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi^1(P) \\ \Delta\phi^2(P) \\ \Delta\phi^3(P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x^1(P) & d_y^1(P) & d_z^1(P) \\ d_x^2(P) & d_y^2(P) & d_z^2(P) \\ d_x^3(P) & d_y^3(P) & d_z^3(P) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x(P) \\ e_y(P) \\ e_z(P) \end{bmatrix}$$

kde **D** představuje matici posunů. Pro určení všech tří složek citlivostního vektoru pomocí měření je třeba provést alespoň tři měření s lineárně nezávislými posuny objektu  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $d_z$ . V nejjednodušším případě posunu ve směru souřadnicových os se matice **D** ze vztahu stane diagonální a řešení soustavy je snadné.



Měřicí aparatura (bez měřeného objektu)

### Diskuse a závěr

Měření citlivostního vektoru je velmi důležité pro měření posunů a deformací v digitální holografické interferometrii, protože umožňuje zpřesnit dosažené výsledky. Navržený postup kombinuje výpočet, který je zde použit pro hrubší odhad a měření, které poslouží ke zpřesnění jejich výsledků. Touto kombinací je možné dosáhnout lepších výsledků než výpočtem citlivostního vektoru. Na základě navrženého postupu se podařilo změřit Z složku citlivostního vektoru. Jako ideální volba posunu se ukázala v našem případě hodnota okolo 100 μm, která je dostatečně velká, aby se minimalizovala nejistota posunu objektu a zároveň ještě dostatečně malá tak, aby oba hologramy vytvořily interferenční pole. Pro větší posuny okolo 1 mm se již velmi zhoršuje korelace obou hologramů, což má za následek nízkou kvalitu interferenčního pole. Zároveň je patrné, že pro malé posuny se zvyšuje vliv nepřesnosti polohování a posunu, a to dále zvětšuje chybu.

### Reference

- [1] LÉDL, Vít, Pavel PSOTA, František KAVÁN, Ondřej MATOUŠEK a Pavel MOKRÝ. Surface topography measurement by frequency sweeping digital holography. Applied Optics [online]. 2017, 56(28), 7808-[cit. 2018-01-07]. DOI: 10.1364/AO.56.007808. ISSN 1559-128X. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-56-28-7808>
- [2] DOLEČEK, Roman, Pavel PSOTA, Vít LÉDL, Tomáš VÍT, Jan VÁCLAVÍK a Václav KOPECKÝ. General temperature field measurement by digital holography. Applied Optics [online]. 2013, 52(1), 319-[cit. 2018-05-03]. DOI: 10.1364/AO.52.00A319. ISSN 1559-128X. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-52-1-A319>
- [3] PRYPUTNIEWICZ, Ryszard J. a Karl A. STETSON. Determination of sensitivity vectors in hologram interferometry from two known rotations of the object. Applied Optics [online]. 1980, 19(13), 2201-[cit. 2018-05-03]. DOI: 10.1364/AO.19.002201. ISSN 0003-6935. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-19-13-2201>
- [4] PRYPUTNIEWICZ, Ryszard J. Determination of the sensitivity vectors directly from holograms\*. Journal of the Optical Society of America [online]. 1977, 67(10), 1351-[cit. 2018-05-03]. DOI: 10.1364/JOSA.67.001351. ISSN 0030-3941. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josa-67-10-1351>
- [5] VERRIER, Nicolas a Michael ATLAN. Off-axis digital hologram reconstruction: some practical considerations. Applied Optics [online]. 2011, 50(34), 136-[cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1364/AO.50.00H136. ISSN 0003-6935. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-50-34-H136>