



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH MECHANISMU PRO AKTIVNÍ ŘÍZENÍ DÉLKY OPTICKÉ VĚTVE

OPTICAL PATH DIFFERENCE ACTIVE CONTROL MECHANISM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ANNA NEUMANOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MATĚJ ŠPAČEK

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Studentka: **Anna Neumanová**
Studijní program: Základy strojího inženýrství
Studijní obor: Základy strojího inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Matěj Špaček**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh mechanismu pro aktivní řízení délky optické větve

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro nově vznikající holograficko – tomografickou sestavu mikroskopu je třeba navrhnout mechanismus pro aktivní řízení rozdílu délek optických drah jeho větví.

Cíle bakalářské práce:

1. Provést rešerši vhodných mechanismů.
2. Stanovit parametry navrhovaného mechanismu.
3. Zpracovat konstrukční návrh mechanismu
4. Mechanismus případně vyrobit a otestovat.

Seznam doporučené literatury:

SLABÝ, Tomáš; KOLMAN, Pavel; DOSTÁL, Zbyněk; ANTOŠ, Martin; LOŠŤÁK, Martin et al. Off-axis setup taking full advantage of incoherent illumination in coherence-controlled holographic microscope. Optics Express. 2013, roč. 21, č. 12, s. 14747-14762. ISSN 1094-4087. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/OE.21.014747>.

BALASUBRAMANI, Vinoth; KUŚ, Arkadiusz; TU, Han-Yen; CHENG, Chau-Jern; BACZEWSKA, Maria et al. Holographic tomography: techniques and biomedical applications [Invited]. Applied Optics. 2021, roč. 60, č. 10. ISSN 1559-128X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/AO.416902>.

FUKA, Josef a HAVELKA, Bedřich. Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy. I. Optika. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.

YODER, Paul R. a VUKOBRATOVICH, Daniel. Opto-mechanical systems design: Design and Analysis of Opto-Mechanical Assemblies. Fourth edition. Boca Raton: Taylor & Francis, 2015. ISBN 9781482257700.

GLÉZL, Štefan; KAMARÁD, Josef a SLIMÁK, Ivan. Presná mechanika. Bratislava: Alfa, 1992.
ISBN 80-05-00972-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Na Fakultě strojního inženýrství v Brně v Laboratoři experimentální biofotoniky dlouhodobě probíhá vývoj Koherencí řízeného holografického mikroskopu (CCHM). Do zobrazovací sestavy stávající verze tohoto mikroskopu je třeba implementovat mechanismus, kterým bude možné aktivně řídit délku optické dráhy v jedné z jeho větví. Důvodem je vysoká citlivost mikroskopu na rozdíl optických drah jednotlivých optických větví. Mechanismus proto musí splňovat vysoké požadavky na dosažitelné rozlišení.

Práce se nejprve zabývá vhodnými typy mechanismů, které jsou pro tuto aplikaci využitelné. Na základě rešeršní části jsou následně představeny tři vhodné koncepční návrhy. Pro vybraný návrh je zpracováno kompletní konstrukční řešení, na jehož základě je mechanismus vyroben, sestaven a poté i otestován z hlediska pohybových vlastností.

Klíčová slova

Koherencí řízený holografický mikroskop, rozdíl optických drah, polohovací mechanismus, aktivní řízení

Summary

There is a long-term development of the Coherence-Controlled Holographic Microscope (CCHM) ongoing in the Laboratory of Experimental Biophotonics at the Faculty of Mechanical Engineering in Brno. A mechanism for active control of the optical path length needs to be implemented in the imaging setup of the microscope. The reason is the high sensitivity of the microscope to the optical path difference of its optical branches. Therefore, the mechanism must meet the high-resolution requirements.

First, suitable mechanisms for this application are compared. Based on the research, three conceptual designs are presented. For the selected design, a complete technical solution is elaborated. The mechanism is then fabricated, assembled and tested in terms of its motion characteristics.

Keywords

Coherence-Controlled Holographic Microscope, optical path difference, positioning mechanism, active control

Bibliografická citace

NEUMANOVÁ, Anna. *Návrh mechanismu pro aktivní řízení délky optické větve* [online]. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí Ing. Matěj Špaček.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně, pod odborným vedením Ing. Matěje Špačka a s použitím uvedené odborné literatury a podkladů.

Anna Neumanová

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Matěji Špačkovi za jeho čas, ochotu, cenné rady a odborné vedení mé práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Zbyňkovi Dostálovi, Ph.D. za jeho ochotu a pomoc. Rovněž děkuji mé rodině a přátelům za podporu během studia.

Anna Neumanová

Obsah

Úvod	10
2 Mechanické systémy pro modifikaci délky optické dráhy	12
2.1 Délka optické dráhy	12
2.2 Způsoby řízení délky optické dráhy	13
2.3 Základní parametry polohovacích systémů	13
2.4 Akční členy	14
2.5 Mechanismy pro vedení translačního pohybu	15
2.5.1 Lineární vedení	15
2.5.2 Lineární translační stolky	16
2.6 Mechanismy pro řízení rotačního pohybu	17
2.6.1 Úhlové ustanovky	17
2.6.2 Gimbal mechanismy	18
3 Motivace a cíle práce	19
4 Konceptní návrhy mechanismu	20
4.1 Požadované parametry mechanismu	20
4.2 Mechanismus kombinující aktuátor s krokovým motorem a piezo aktuátor	21
4.3 Mechanismus s piezo motorem	22
4.4 Dvoustupňový mechanismus	22
5 Konstrukční řešení	24
5.1 Výběr optického prvku	24
5.1.1 Rozměrové parametry optických klínů	24
5.2 Sestava pro řízení délky předmětové optické větve	27
5.2.1 Podsestava pro uložení polohovatelného optického klínu	28
5.2.2 Podsestava pro uložení posuvného optického klínu	31
5.3 Sestava pro uložení kompenzačního prvku v referenční optické větvi	32
6 Montáž a testování	33
6.1 Postup montáže sestavy pro řízení délky předmětové optické větve	33
6.2 Mechanické testování	34
Závěr	36
Seznam použitých zdrojů	37
Seznam použitých zkratk a symbolů	39
Seznam příloh	40

Úvod

Biologické vzorky, jako jsou buňky či tkáně, obecně nazýváme fázové objekty. Důvodem je, že světlo nepohlcují ani neodrážejí, ale mají vliv na změnu jeho fáze, kterou však lidské oko není schopno běžně rozpoznat [1]. Jednou z vhodných pozorovacích technik takových objektů je kvantitativní fázové zobrazování, zkráceně QPI. To představuje neinvazivní způsob, jakým lze pozorovat fázové objekty bez nutnosti použití externě dodávaných zvýrazňovacích látek [2].

Mikroskopy, které umožňují kvantitativní fázové zobrazování, se nazývají interferenční mikroskopy. U těchto zařízení obvykle dochází k interferenci dvou svazků světla. První svazek je referenční a obvykle neprochází vzorkem, tudíž není žádným způsobem ovlivněn. Druhý je svazek předmětový, ten naopak vzorkem prochází a díky tomu dojde k ovlivnění jeho fáze. Oba svazky spolu následně interferují a vytvoří interferenční obrazec, který je nositelem informace o fázovém zpoždění a tedy i morfologii a topografii vzorku [3].

Interferenční mikroskopy existují ve dvou základních provedeních, in-line a off-axis. In-line řešení využívá k osvětlení vzorku nízko-koherentního zdroje světla, díky kterému dochází k potlačení nežádoucích artefaktů, není však vhodný pro pozorování dynamicky se měnících dějů, jako jsou například buněčné procesy, protože pro úplný záznam vlny je potřeba více snímků. Pro tuto aplikaci je vhodnější off-axis provedení, které pracuje s dokonale koherentním zdrojem světla. To sice neumožňuje dosáhnout efektu potlačení nežádoucích artefaktů, ale pro rekonstrukci fázového obrazu vzorku je dostačující jeden snímek [4].

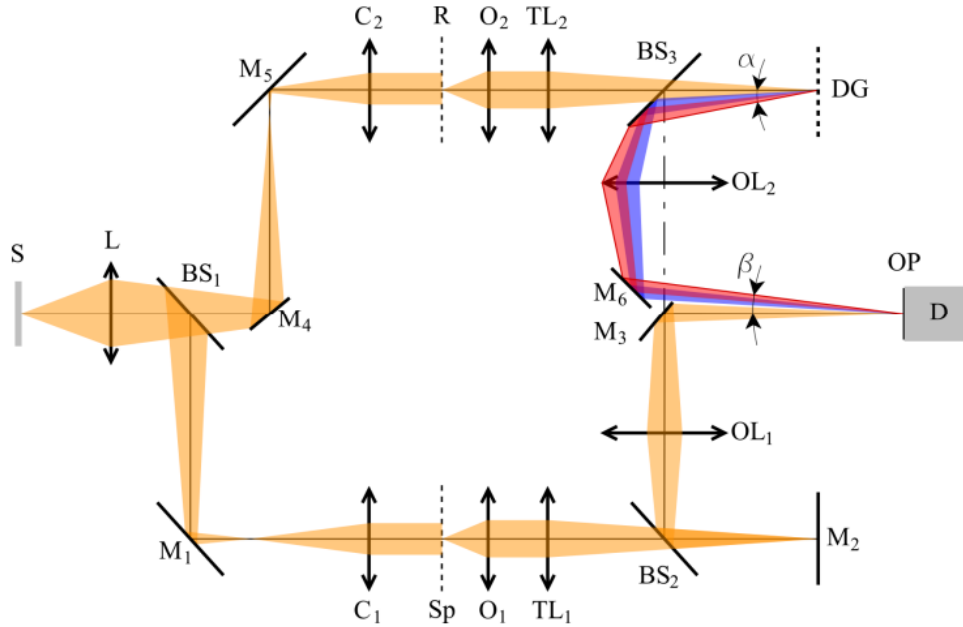
Na Fakultě strojínského inženýrství v Brně v Laboratoři experimentální biofotoniky dlouhodobě probíhá vývoj Koherencí řízeného holografického mikroskopu, z anglického Coherence-Controlled Holographic Microscope, zkráceně CCHM. Jedná se o interferenční mikroskop v off-axis provedení, u nějž je možné míru koherence použitého světla přizpůsobit v závislosti na požadavcích dané aplikace [4]. Při použití nízko-koherentního zdroje světla dosahuje lepšího rozlišení a potlačení nežádoucích artefaktů v obrazu ve srovnání s ostatními off-axis mikroskopy [4]. Zároveň je však možné získat kompletní záznam vlny z jednoho snímku [4]. CCHM kombinuje tedy výhody obou dříve zmíněných provedení. Jeho nedostatkem je, že při použití nízko-koherentního světla je velmi citlivý na rozdíl optických drah referenční a předmětové větve [5]. Je třeba, aby rozdíl optických drah byl podstatně menší, než je koherenční délka použitého světla, pak mají interferenční proužky interferenčního obrazce dostatečně vysoký kontrast [6]. Koherenční délka světla je hodnota rozdílu optických drah, při jejímž překročení už interference svazků světla není znatelná [6]. Hodnotu koherenční délky je možné vypočítat podle vztahu:

$$l_c = \frac{(\overline{\lambda_0})^2}{\Delta\lambda_0}, \quad (1.1)$$

kde $\overline{\lambda_0}$ je střední vlnová délka světla a $\Delta\lambda_0$ je šířka světelného spektra [6].

Na obrázku 1 je ilustrována poslední generace výše zmíněného CCHM. Zdroj světla S je děličem svazku BS₁ rozdělen na předmětový a referenční svazek [4]. Oba svazky jsou kolektorem L přes zrcadla M₁, resp. M₄ a M₅ zobrazeny do předmětových ohniskových rovin kondenzorů C₁ a C₂ [7]. Ty poté osvětlují předmětovou rovinu Sp a referenční rovinu R Köhlerovým osvětlením. Předmětová rovina Sp je přes objektiv O₁ a tubusovou čočku TL₁ zobrazena do roviny zrcadla M₂, analogicky je pak referenční rovina R zobra-

zena do roviny difrakční mřížky DG. V rovině zrcadla M_2 a rovině difrakční mřížky DG vznikají meziobrazy, které jsou přes děliče svazku BS_2 , resp. BS_3 a výstupní čočky OL_1 , resp. OL_2 zobrazeny do výstupní roviny OP [7]. Zde vzniká interferenční obrazec, který je zaznamenán detektorem D.



Obrázek 1: Poslední generace CCHM. Zdroj světla (S), kolektor (L), děliče svazku (BS), zrcadla (M), kolektory (C), referenční rovina (R), předmětová rovina (Sp), objektivy (O), tubusové čočky (TL), difrakční mřížka (DG), výstupní čočky (OL), výstupní rovina (OP), detektor (D), převzato a upraveno z [4].

Pro potřeby dalšího vývoje byla sestavena otevřená laboratorní verze tohoto mikroskopu. V zobrazovací části jeho optické sestavy je třeba navrhnout mechanismus pro aktivní řízení délky optické větve, který bude sloužit jako kompenzace vznikajícího rozdílu optických drah. Konstrukční návrh daného mechanismu je předmětem této práce. Nejprve je však třeba provést rešerši vhodných typů mechanismů pro tuto aplikaci a stanovit parametry, které návrh musí splňovat.

2 Mechanické systémy pro modifikaci délky optické dráhy

Mechanismy používané v mikroskopii spadají do oblasti přesné mechaniky, tudíž jsou na ně často kladeny jiné požadavky než na výrobky z oblasti běžného strojírenství. Tato zařízení typicky nedosahují velkých rozměrů, jsou dimenzována na malá zatížení, při jejich výrobě je klíčové dodržení rozměrové přesnosti a na jejich funkčnost může mít rozhodující vliv frekvence vlastního kmitání [8].

Tato práce se zabývá konkrétní problematikou řízení délky optické větve CCHM, dále proto bude popsán výběr mechanismů a komponent použitelných pro tuto aplikaci. Nejdříve je však třeba definovat, co je délka optické dráhy a jakým způsobem je možné ji měnit.

2.1 Délka optické dráhy

Délka optické dráhy odpovídá vzdálenosti, kterou by světlo urazilo ve vakuu, aby byl vykonaný fázový rozdíl stejný, jako při šíření světla v daném prostředí [6]. Délka optické dráhy je pak pro stejnorodé prostředí definována jako součin geometrické délky dráhy a indexu lomu prostředí [9]. Pro po částech stejnorodé prostředí je možné délku optické dráhy definovat jako:

$$x_o = \sum_{i=1}^n n_i \cdot x_i, \quad (2.1)$$

kde x_o je celková délka optické dráhy a x_i je geometrická délka dráhy světla v prostředí o indexu lomu n_i [9].

Rovnici (2.1) je možné aplikovat pro srovnání optických drah svazků, které tvoří referenční a předmětovou větev CCHM. Pokud je do jedné optické větve vloženo prostředí s jiným indexem lomu než má okolí, dojde k nárůstu optické dráhy. Mezi jednotlivými svazky světla tedy vznikne rozdíl optických drah daný vztahem:

$$\Delta = (n_2 - n_1) \cdot x, \quad (2.2)$$

kde člen $(n_2 - n_1)$ odpovídá rozdílu indexů lomu jednotlivých prostředí a člen x je geometrická délka dráhy, kterou světlo urazí v prostředí s jiným indexem lomu, než má druhá optická větev [1].

Optická dráha vychází z jevu disperze světla, což je závislost indexu lomu na vlnové délce světla ve vakuu [10]. Projev disperze je možné sledovat, když bílé světlo dopadá na rozhraní dvou průhledných prostředí [9]. Dochází totiž k tomu, že jednotlivé složky bílého světla se na průhledném rozhraní lámou pod různým úhlem právě v závislosti na jejich vlnové délce [9].

2.2 Způsoby řízení délky optické dráhy

Jak bylo popsáno v části 2.1, délka optické větve mikroskopu je ovlivněna nejen vzdáleností, kterou světlo urazí, ale také indexem lomu prostředí, kterým se světlo pohybuje. Existují tedy dva základní principy, kterými je možné délku optické větve měnit.

První možností je, že světlo prochází jedním prostředím o daném indexu lomu a reguluje se pouze jeho uražená geometrická dráha. V takovém případě je do optické sestavy typicky vložena podsestava obsahující translační mechanismus v kombinaci s optickými prvky, které svazek světla pouze odrážejí. Mezi takovéto optické prvky patří například optická zrcátka [11]. Jejich vhodnou kombinací s translačním mechanismem je pak definována trasa svazku, kterou je možné modifikovat. Výhodou tohoto řešení je možnost využít komerčně dostupné optické prvky, mechanická uložení a akční členy, které jsou vzájemně kompatibilní. To vede k usnadnění konstrukčního řešení. Nevýhodou je pak často náročnost na zástavbový prostor, který není vždy dostupný. Rovněž nemusí být možné dosáhnout dostatečně jemné regulace dráhy.

Druhým způsobem je nechat světlo projít prostředím s odlišným indexem lomu. To plyne ze skutečnosti, že rychlost šíření světla i jeho vlnová délka souvisí s indexem lomu prostředí, ve kterém se světlo šíří, podle rovnic:

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.3)$$

a

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}, \quad (2.4)$$

kde v je rychlost šíření světla v prostředí o indexu lomu n , c je rychlost světla ve vakuu, λ_n je vlnová délka světla v prostředí o indexu lomu n a λ je vlnová délka světla ve vakuu.

Tento přístup je možné realizovat vložением vhodných optických prvků do optické větve mikroskopu. Je však důležité, aby se optické prvky nacházely v oblasti, kde je svazek světla kolimovaný. V opačném případě by docházelo k zatížení obrazu nežádoucími aberacemi, chromatickou a sférickou vadou. Dále je třeba, aby u použitých optických prvků byl kladen důraz na rovinnost a rovnoběžnost jejich funkčních ploch. Nepřesnosti by vedly k deformaci tvaru vlnoplochy, což by na fungování CCHM mělo nežádoucí vliv.

2.3 Základní parametry polohovacích systémů

Mezi hlavní parametry, kterými charakterizujeme polohovací systémy přesné mechaniky, patří přesnost, opakovatelnost, rozlišení, minimální inkrementální pohyb a rozsah pohybu. Často zde spadá i maximální rychlost posuvu, která ale nemusí být rozhodující.

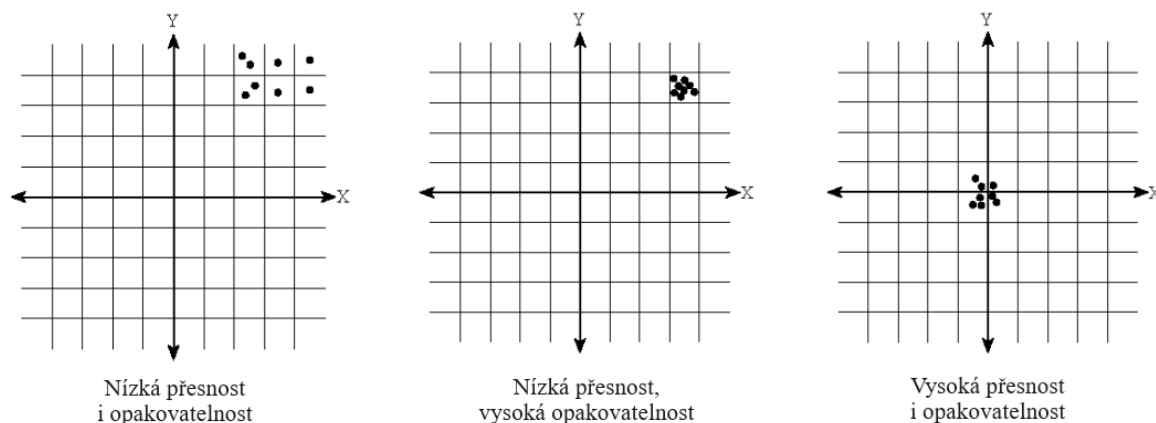
Přesnost udává do jaké míry posuv provedený polohovacím zařízením odpovídá zadanému vstupu. Její hodnotu ovlivňuje několik faktorů, mezi které patří řídicí systém, systém zpětné vazby, nebo prostředí, ve kterém mechanismus operuje [12].

Opakovatelnost představuje schopnost opakovaně dosáhnout požadované pozice. Rozlišujeme, jestli se jedná o opakovatelnost jednosměrnou, která udává schopnost opakovat pohyb pouze v jednom směru, nebo obousměrnou [12]. Mnohem reálnější představu poskytuje opakovatelnost obousměrná, protože bere v potaz problematiku vůlí nebo hystereze materiálu [13]. Obrázek 2 ilustruje, jaký je rozdíl mezi opakovatelností a přesností.

Rozlišení udává nejmenší přírůstek posuvu, který je možné detekovat [12]. Jeho velikost pak do velké míry závisí na použitém zpětnovazebním zařízení.

Minimální inkrementální pohyb je nejmenší možný pohyb, který je mechanismus schopen vykonat [13].

Rozsah pohybu je charakteristika, která závisí zejména na použité technologii. Dosažitelné rozsahy pohybu pro jednotlivé druhy akčních členů budou detailněji specifikovány dále.



Obrázek 2: Rozdíl mezi přesností a opakovatelností, převzato a upraveno z [12]

2.4 Akční členy

Akční člen je prvek mechanismu, který zajišťuje požadované aktivní řízení. Od parametrů vybraného akčního členu se primárně odvíjí charakteristiky konstrukčního návrhu, proto je jednou z nejdůležitějších komponent. V této části budou představeny vhodné a nejčastěji používané typy akčních členů. Jejich vlastnosti jsou dále shrnuty a porovnány v tabulce 1.

Při použití **krokového motoru** je jedna otáčka výstupní hřídele rozdělena na sérii ekvidistantních kroků. Typicky jedna otáčka odpovídá 200 krokům, ale při použití mikrokrokování to může být i násobně více [14]. Výhodou pohybu rozděleného na jednotlivé kroky je možnost dosáhnout požadované polohy bez nutnosti implementace zařízení pro zpětnou vazbu [14]. Krokové motory představují spolehlivý a cenově dostupný akční člen, který je schopen dosáhnout průměrného rozlišení [14]. Nevýhodou je, že při nedostatečném točivém momentu může dojít k vynechávání kroků, nebo až k zastavení motoru [13].

Pro **stejnoseměrné motory** je typickou vlastností hladký chod bez vibrací a vysoké provozní otáčky [13]. Uplatnění tedy nacházejí v aplikacích, kde je vyžadován hladký pohyb. Na rozdíl od krokových motorů u nich však není možné dosáhnout požadované polohy bez použití zařízení pro zpětnou vazbu [14].

Dalším typem jsou **lineární motory**. Ty existují v různých konstrukčních provedeních, která mají každá svá specifika, jejich společným rysem je však velmi přesný, hladký pohyb bez vibrací a vysoká rychlost [12]. Pro zajištění translačního pohybu nejsou potřebné mechanické komponenty, jako převody, pohybové šrouby, řemeny, atd., čímž se eliminuje tření i opotřebení [12]. Jejich nevýhodou je vysoká pořizovací cena [13].

Poslední vybranou skupinou jsou akční členy fungující na principu obráceného piezoelektrického jevu, kdy přivedením napětí na piezoelektrický materiál dochází k jeho deformaci [12]. Do této skupiny patří piezo aktuátory a piezo motory. **Piezo aktuátory** jsou kompaktní, cenově dostupné prvky, které poskytují velmi přesný a rychlý pohyb [12]. Obecně je jimi možné pokrýt rozsah pohybu kolem 200 μm , při použití mechanického zesílení to však mohou být až jednotky milimetrů [14]. Jejich nevýhodou je však nízká opakovatelnost, která plyne z hystereze piezoelektrického materiálu [14]. **Piezo motory** jsou naopak cenově velmi náročné akční členy, které jsou však v závislosti na konkrétním provedení schopny pokrýt rozsah pohybu v rozmezí jednotek až desítek milimetrů [14],[15]. Kromě toho disponují vysokým rozlišením, často menším než jeden nanometr, vysokou rychlostí pohybu a dobrou opakovatelností [14].

Akční člen	Rozsah pohybu	Rozlišení	Opakovatelnost	Cena
KM	střední	střední	střední	nízká
SM	střední	střední	střední	střední
LM	velký	vysoké	vysoká	vysoká
PA	malý	vysoké	nízká	nízká
PM	velký	vysoké	vysoká	vysoká

Tabulka 1: Srovnání akčních členů. Krokový motor (KM), stejnosměrný motor (SM), lineární motor (LM), piezo aktuátor (PA), piezo motor (PM). Převzato a upraveno z [7].

2.5 Mechanismy pro vedení translačního pohybu

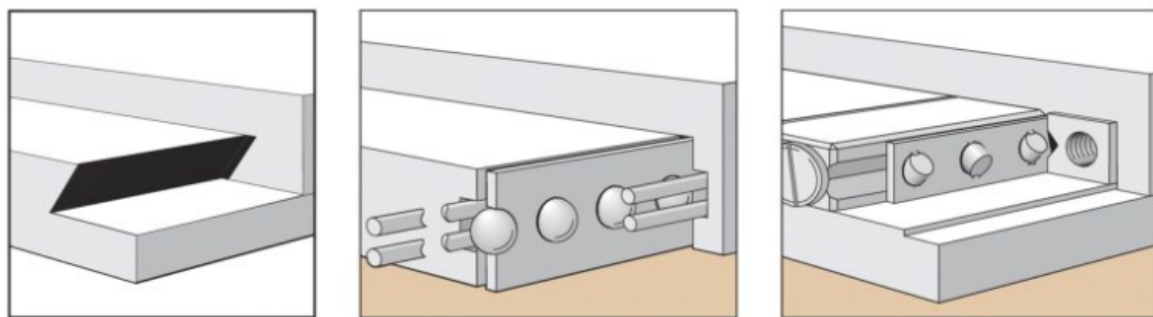
2.5.1 Lineární vedení

Lineární vedení představuje mechanismus pro zprostředkování translačního pohybu po dané trajektorii. Podle způsobu tření se dělí na dvě základní skupiny, valivá a kluzná. U kluzných vedení vzniká smykové tření mezi vodící a vedenou součástí, u valivých vedení je to pak tření valivé, které vzniká mezi vodícím prvkem a valivými elementy [8]. Valivé tření je z energetického hlediska méně náročné než tření smykové, proto je při vyšším zatížení vhodné použít vedení valivá [8]. Ta jsou navíc schopna dosáhnout i lepší přesnosti. Obecně pak platí, že přesnost vedení závisí zejména na vůli mezi vodícím a vedeným prvkem [8]. Jednotlivá provedení lineárních vedení se liší v mnoha parametrech, jako je například přesnost pohybu, hladkost chodu nebo tuhost uložení. Obrázek 3 ilustruje provedení vybraných vedení, která jsou dále detailněji popsána.

Rybinové vedení patří mezi kluzná vedení a jeho výhodou je jednoduchá konstrukce tvořená kluzně se pohybujícími rovinnými plochami. To však způsobuje větší tření a zhoršení přesnosti [16]. Používá se proto pro hrubé polohování, kde je schopno poskytnout vysokou nosnost i tuhost [16].

Kuličkové vedení se řadí mezi vedení valivá. Výhodou použití kuliček jako valivých elementů je, že při kontaktu vzniká velmi malé tření. To je způsobeno bodovým stykem valivých elementů s vodícím prvkem [8]. Kromě toho jsou kuličky dobře a přesně vyrobitelné. Bodový kontakt je schopen spolehlivě přenášet dané zatížení, vedení má tedy střední nosnost, kterou je možné zvýšit použitím dvouřadé konstrukce [8]. Dále disponuje hladkým chodem, dobrou přesností a naopak nízkou tuhostí ve srovnání například s rybinovým vedením [16].

Dalším typem valivého vedení je **vedení válečkové**. Valivými elementy jsou válečky, jejichž nevýhodou je náročná výroba, ta pak vede i k vyšší ceně tohoto typu vedení [16]. Vhodnou konstrukcí je vedení se zkříženými válečky, které disponuje vysokou tuhostí a nosností, což je zapříčiněno liniovým kontaktem mezi válečky a vodícím prvkem [16].



Obrázek 3: Typy vedení. Zleva rybinové vedení, kuličkové vedení, válečkové vedení se zkříženými válečky, převzato z [13].

2.5.2 Lineární translační stolky

Lineární translační stolky jsou mechanismy poskytující přesné řízení translačního pohybu v konkrétním směru. Nejjednodušším typem jsou **manuální translační stolky**. Konstrukčně jsou tvořeny lineárním vedením, nejčastěji kuličkovým nebo válečkovým se zkříženými válečky, a mikrometrickým šroubem, který zprostředkuje pohyb [13]. Vhodnou kombinací několika takových stolků je možné docílit řízeného translačního pohybu podél více než jedné osy [13]. Mezi jejich typické vlastnosti patří střední rozsah pohybu, nízké rozlišení a dobrá cenová dostupnost [13]. Možné řešení manuálního translačního stolku ilustruje obrázek 4.

Součástí **motorizovaných translačních stolků** je pak akční člen, který slouží k řízení posuvného pohybu. Nejčastěji se jako akční členy používají krokové či stejnosměrné motory, nebo piezo aktuátory. Méně časté je pak použití lineárních a piezoelektrických motorů kvůli jejich vysoké pořizovací ceně. Vlastnosti stolku se pak odvíjí od zvoleného typu akčního členu. Vybrané akční členy jsou popsány v části 2.4 a jejich vlastnosti shrnuty v tabulce 1.



Obrázek 4: Manuální translační stolek s mikrometrickým šroubem, převzato z [17]

2.6 Mechanismy pro řízení rotačního pohybu

2.6.1 Úhlové ustanovky

Úhlová ustanovka je mechanismus, který se v přesné mechanice používá pro řízení rotace kolem jedné osy. Touto osou je obvykle optická osa optického prvku, nebo otočná osa daného přístroje. Úhlové ustanovky jsou dvojího typu - osové a obvodové [8].

Konstrukce osové úhlové ustanovky umožňuje dva režimy nastavení úhlové polohy. Pokud je ustanovka z činnosti vypnuta povolením zajišťovacího šroubu, je možné rychle a přibližně nastavit úhlovou polohu v rozsahu 360° [8]. Přibližná poloha je následně zafixována dotažením zajišťovacího šroubu a ustanovka je uvedena do chodu. Přesnou úhlovou polohu je pak možné nastavit tlačným pohybem pohybového šroubu do ramena objímky, které tvoří část ustanovky [8]. Přesnost ustanovky je tím větší, čím delší je její rameno a čím jemnější je stoupání závitu pohybového šroubu [8]. Závity s jemným stoupáním jsou však náchylné na opotřebení a háklivé na nečistoty [8]. Na obrázku je vidět komerčně dostupné řešení osové úhlové ustanovky od společnosti Thorlabs [18].



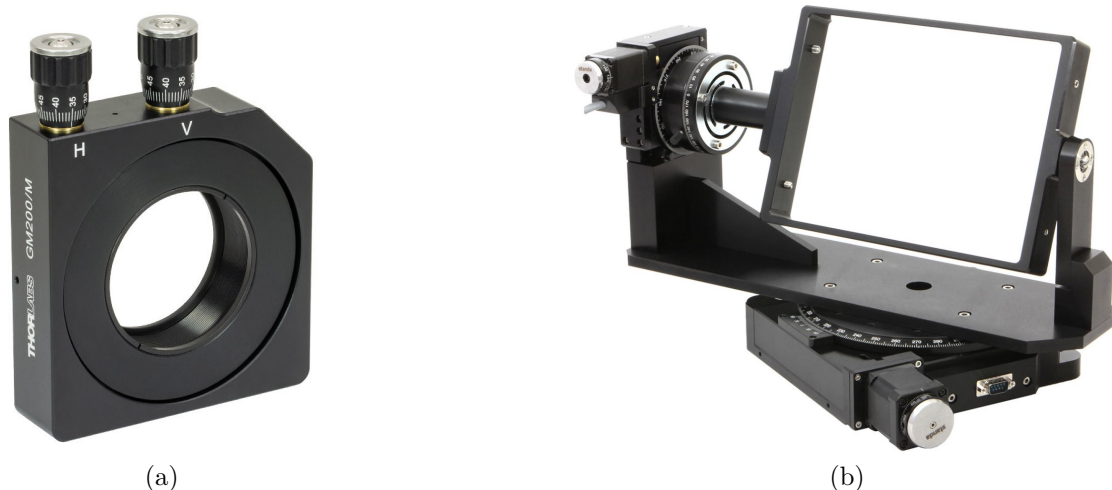
Obrázek 5: Osová úhlová ustanovka společnosti Thorlabs, převzato z [18].

Obvodová úhlová ustanovka je tvořena kruhovým vedením, v němž se pohybují čelisti [8]. Pokud čelisti nejsou sevřené, je opět možné provést přibližné nastavení úhlové

polohy, při jejich sevření je pak umožněn pouze pomalý, přesný pohyb opět pomocí pohybového šroubu [8]. Tento typ konstrukce se používá velmi málo.

2.6.2 Gimbal mechanismy

Jedná se o mechanismy, kterými je možné řídit rotační pohyb kolem několika os. Jedna z nejběžnějších konfigurací je tvořena třemi těly - základnou, vnějším gimbal mechanismem a vnitřním gimbal mechanismem, která jsou propojena otočnými klouby [19]. Gimbal mechanismus je navržen takovým způsobem, aby se osy rotace protínaly v jednom bodě, tzv. středu otáčení [13]. Pokud je střed otáčení sjednocen se středem přední plochy optického prvku, který se má cíleně naklápět, bude se měnit pouze úhel procházejícího svazku světla nikoliv délka jeho dráhy [13]. To je hlavní výhoda, kterou přináší použití gimbal mechanismu při uložení optických prvků oproti standardním kinematickým uložení [13]. Dvě možná konstrukční řešení tohoto mechanismu jsou vidět na obrázku 6.



Obrázek 6: (a) Manuálně řízený gimbal mechanismus společnosti Thorlabs pro uložení optických prvků, převzato z [20]. (b) Motorizovaný gimbal mechanismus společnosti Standa Optics pro uložení optických prvků větších rozměrů, převzato z [21].

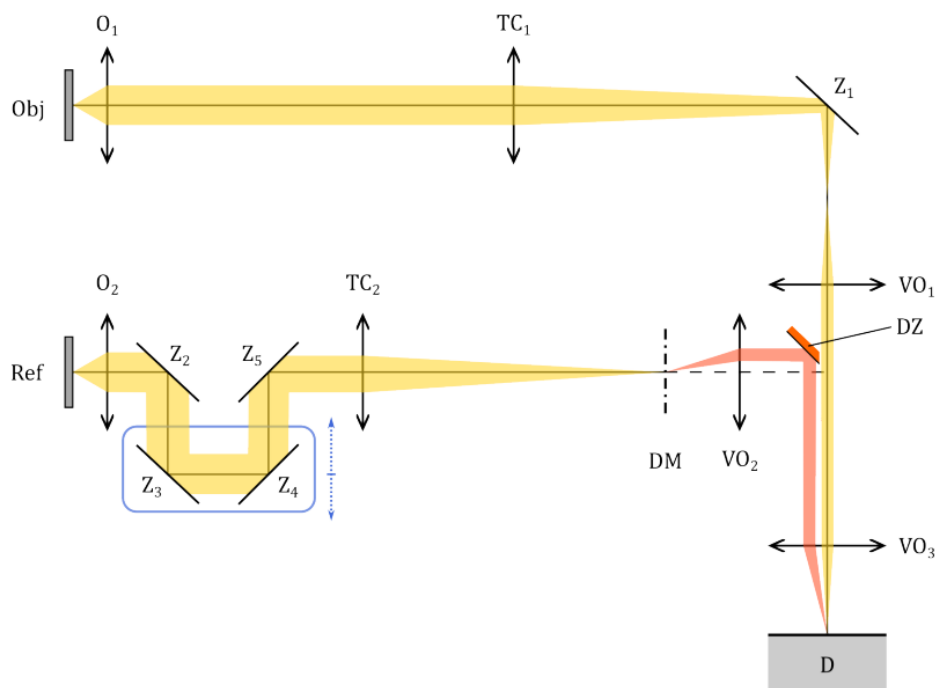
3 Motivace a cíle práce

Pro otevřenou laboratorní verzi Koherencí řízeného holografického mikroskopu je třeba navrhnout mechanismus, který bude sloužit pro aktivní řízení délky optické dráhy. Důvodem je vysoká citlivost tohoto typu mikroskopu na rozdíl optických drah referenční a předmětové optické větve, který, pokud je příliš velký, negativně ovlivní funkčnost zařízení. Tato práce se dále věnuje návrhu a konstrukčnímu řešení takového mechanismu. Pro jednoduché ukládání do stávající optické sestavy je třeba, aby konstrukce byla prostоровě nenáročná a kompatibilní s klecovým systémem společnosti Thorlabs [22]. Aby bylo dosaženo funkčnosti navrhovaného zařízení i ostatních požadavků, je třeba splnit následující cíle:

- Určit parametry, které mechanismus musí splňovat.
- Navrhnout vhodná koncepční řešení.
- Provést konstrukční řešení vybraného koncepčního návrhu.
- Mechanismus případně vyrobit a otestovat.

4 Koncepční návrhy mechanismu

Současná podoba zobrazovací části CCHM mikroskopu je ilustrována na obrázku 7. Nastavením polohy zrcadel Z_3 a Z_4 , která jsou uložena na posuvném stolku s mikrometrickým šroubem, je možné řídit rozdíl optickým drah [5]. Polohu zrcadel je nyní možné nastavit pouze manuálně a snahou je vytvořit mechanismus pro aktivní řízení délky optické dráhy jednotlivých větví mikroskopu. V této části práce jsou definovány parametry, které musí tento mechanismus splňovat, a popsány tři jeho koncepční návrhy.



Obrázek 7: Zobrazovací část CCHM. Referenční větev (Ref), předmětová větev (Obj), objektiv (O), tubusová čočka (TC), zrcadla (Z), výstupní objektivy (VO), D zrcátko (DZ), difrakční mřížka (DM), detektor (D), převzato z [5].

4.1 Požadované parametry mechanismu

Jak vyplývá z části 2.1, **mechanismus je třeba umístit do oblasti, kde je svazek světla kolimovaný**, aby nedošlo ke vnesení chromatické a sférické vady do optické sestavy. Je tedy vhodné umístit jej do oblasti, která se podle obrázku 7 nachází v předmětové větvi mezi objektivem O_1 a tubusovou čočkou TC_1 a ve větvi referenční pak analogicky mezi objektivem O_2 a tubusovou čočkou TC_2 .

Na základě předchozích zkušeností se stávající optickou sestavou bylo definováno, že navrhovaný mechanismus musí dosáhnout **rozlišení, které bude menší než 100 nm**. Dále je třeba, aby byl schopen **kompenzovat rozdíl délky optických drah v intervalu $\pm 150 \mu\text{m}$** .

Pro další parametry, které často definují mechanismy, jako je například opakovatelnost a přesnost, nebylo explicitně definováno, v jakém rozsahu se mají pohybovat. Protože

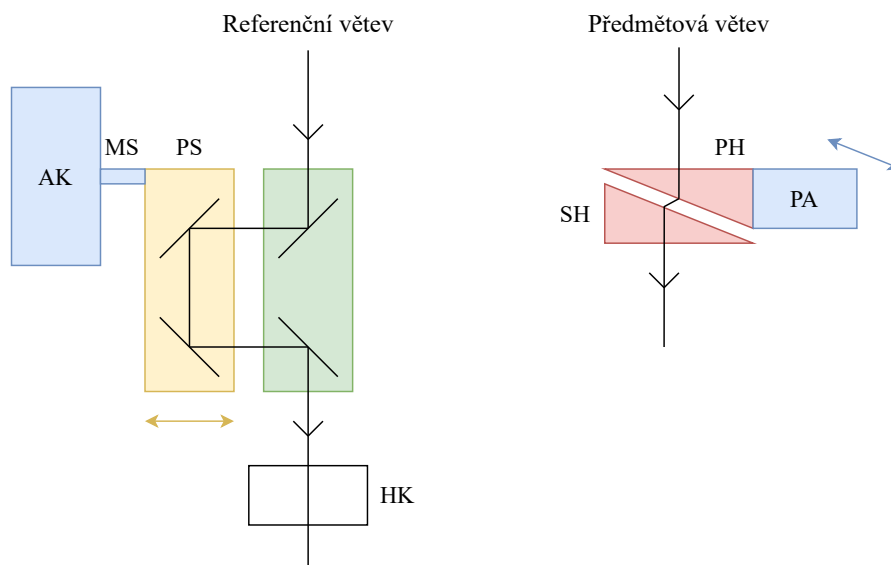
však mají vliv na kvalitu a funkčnost mechanismu, je vhodné, brát je při návrhu v potaz a zajistit, aby dosahovaly přijatelných hodnot.

4.2 Mechanismus kombinující aktuátor s krokovým motorem a piezo aktuátor

V případě prvního návrhu, zobrazeného na obrázku 8, je aktivní řízení délky optické dráhy realizováno v obou optických větvích. V referenční větvi je na posuvný stolek s mikrometrickým šroubem, který se v sestavě již nachází, přes membránovou spojku připojen aktuátor s krokovým motorem. Díky tomu je dosaženo velkého motorizovaného rozsahu pohybu, nicméně není splněno požadované rozlišení.

Tento problém řeší druhá část mechanismu v předmětové větvi. Ta je tvořena dvojicí optických hranolů, kdy posouváním jednoho hranolu vůči druhému je možné měnit délku optické dráhy, kterou procházející světlo urazí. Samotný translační pohyb se realizuje prostřednictvím posuvného stolku s piezo aktuátorem. Ten zajistí dosažení požadovaného rozlišení. Kvůli použití optických hranolů je dále nutné do referenční větve umístit kompenzační blok skla stejné šířky, jakou má dvojice hranolů dohromady ve výchozí poloze.

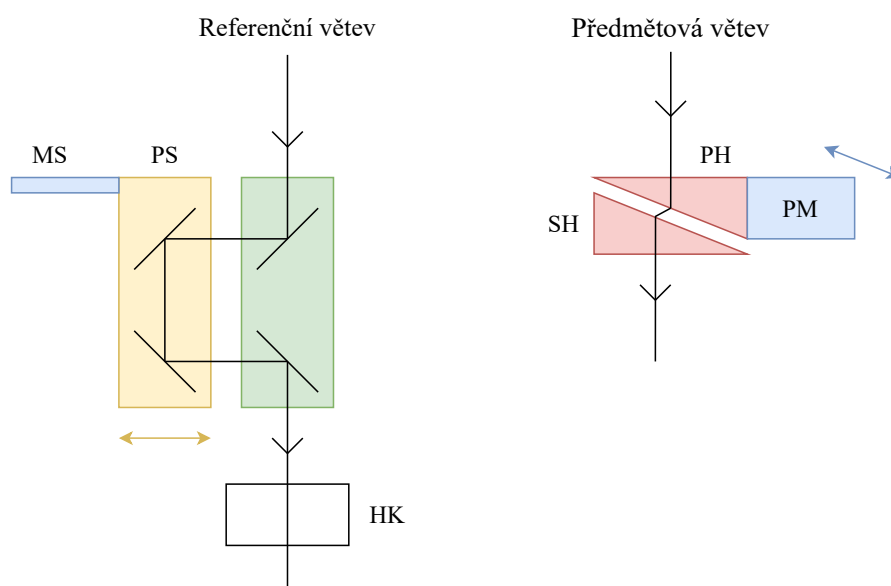
Toto řešení je cenově dostupné, navíc je jeho realizace značně zjednodušena díky přítomnosti stávajícího translačního mechanismu v referenční větvi. Nedostatkem je nutnost implementace odměřování do každé optické větve zvlášť a vyšší vibrace.



Obrázek 8: Schéma mechanismu kombinujícího aktuátor s krokovým motorem a piezo aktuátor. Aktuátor s krokovým motorem (AK), mikrometrický šroub (MS), posuvný stolek (PS), hranolová kompenzace (HK), statický hranol (SH), posuvný hranol (PH), piezo aktuátor (PA).

4.3 Mechanismus s piezo motorem

U druhého návrhu, který je ilustrován na obrázku 9, je motorizovaný pohyb realizován pouze v předmětové větvi. Změna délky optické dráhy, bude opět realizována pomocí dvojice optických hranolů. Posuvný hranol je však v tomto případě připojen k mechanismu s piezo motorem, ten je schopen pokrýt rozsah pohybu i splnit požadované rozlišení. Nedostatkem tohoto řešení je vysoká pořizovací cena piezo motorů. Výhodou je jednodušší řízení a nutnost použití pouze jedno odměřování, které je zpravidla součástí mechanismu s piezo motorem. Ten je navíc kompaktní a nezpůsobuje vysoké vibrace. Posuvný stolek s mikrometrickým šroubem v referenční větvi i nadále zůstane pro možnost manuálního nastavení polohy zrcátek. Opět je nutné do referenční větve vložit blok skla, který bude sloužit jako kompenzace hranolové dvojice.



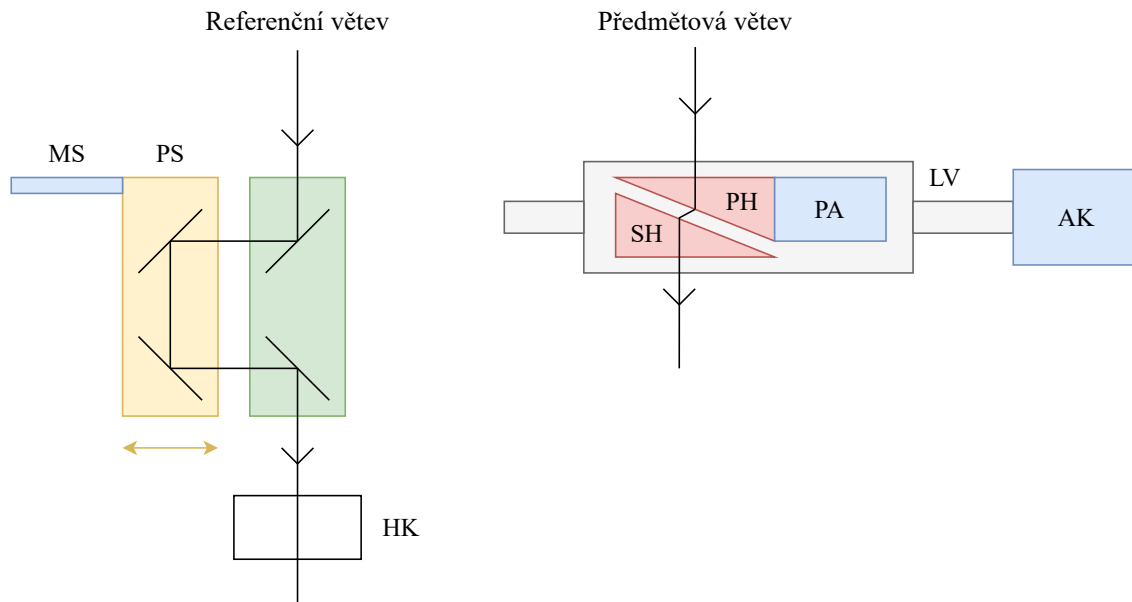
Obrázek 9: Schéma mechanismu s piezo motorem. Mikrometrický šroub (MS), posuvný stolek (PS), hranolová kompenzace (HK), statický hranol (SH), posuvný hranol (PH), mechanismus s piezo motorem (PM).

4.4 Dvoustupňový mechanismus

Cílem třetího koncepčního návrhu je snížení pořizovacích nákladů při zachování použití pouze jednoho odměřování. Translační pohyb posuvného hranolu je v tomto případě realizován s použitím dvoustupňového mechanismu, ilustrovaného na obrázku 10.

Spodní stupeň slouží pro dosažení požadovaného rozsahu pohybu. Konstrukčně se jedná o lineární vedení v kombinaci s aktuátorem s krokovým motorem, který pohybuje s celým horním stupněm mechanismu. Alternativou je použití posuvného stolku s mikrometrickým šroubem připojeného k aktuátoru s krokovým motorem přes membránovou spojku, jako u návrhu popsaného v části 4.2. Horní stupeň mechanismu je tvořen posuvným stolem s piezo aktuátorem, který zprostředkuje translační pohyb posuvného hranolu. Použití piezo aktuátoru zajistí dosažení požadovaného rozlišení i redukci ceny.

Do referenční větve je opět nutné přidat kompenzační blok skla, jinak není nutné ji dále modifikovat. Nedostatkem tohoto řešení je větší velikost, vyšší složitost a vnesení vibrační vlivem použití krokového motoru. Při nedostatečné tuhosti soustavy může také dojít ke zhoršení celkové přesnosti a opakovatelnosti mechanismu. Výhodou však je již zmíněná redukce ceny a potřeba pouze jednoho odměřování.



Obrázek 10: Schéma dvoustupňového mechanismu. Mikrometrický šroub (MS), posuvný stolek (PS), hranolová kompenzace (HK), statický hranol (SH), posuvný hranol (PH), piezo aktuátor (PA), lineární vedení (LV), aktuátor s krokovým motorem (AK).

5 Konstrukční řešení

Mechanismus s piezo motorem, popsáný v části 4.3, má ve srovnání s prvním návrhem výhodu v potřebě použití pouze jednoho odměřování. Oproti třetímu návrhu je konstrukčně jednodušší. Zároveň je oproti oběma řešením menší, jednodušší na ovládání a nehrozí u něj přenos vibrací od krokového motoru. Jeho hlavní nevýhodou zůstává vysoká pořizovací cena aktuátoru s piezo motorem. Odbor optiky a přesné mechaniky Ústavu fyzikálního inženýrství má však takovýto aktuátor k dispozici a je ochoten jej pro tuto aplikaci poskytnout. Dále tedy bude zpracováno konstrukční řešení mechanismu s piezo motorem. V této části práce budou nejprve vybrány vhodné optické prvky a následně popsáno zvolené konstrukční řešení mechanismu.

5.1 Výběr optického prvku

V závislosti na dříve popsaných požadovaných parametrech bude vhodné jako optický prvek použit optický klín z následujících důvodů:

- Pro optické klíny je typické, že úhel klínu nabývá malých hodnot pohybujících se v rozmezí $4^\circ - 20^\circ$ [23]. Tento úhel má přímý vliv na nárůst, resp. pokles délky optické dráhy při translačním pohybu jednoho z optických klínů vůči druhému. U menšího úhlu k nárůstu dojde pozvolněji a lze jej přesněji korigovat.
- Optické klíny se dále vyznačují malým úhlem odchýlení paprsku, který způsobí pouze malý nárůst délky optické dráhy v mezeře mezi klíny. Ten je pak rovněž nutné vykompenzovat. Kompenzaci lze provést nastavením odpovídající výchozí pozice posuvného optického klínu. Toto počáteční posunutí však odebere část jeho efektivní šířky, která by jinak byla využitelná při samotné funkci mechanismu. Je proto výhodné, aby úhel vychýlení paprsku byl dostatečně malý.
- Nakonec je třeba vzít v potaz i nutnost hranolové kompenzace. Tu je možné do referenční větve vložit pouze v několika místech, ani jedno z nich však neposkytuje mnoho volného prostoru. Optické klíny jsou relativně tenké prvky, na jejich kompenzaci je potřeba planparalelní deska menší tloušťky, než kdyby se jednalo například o pravoúhlý optický hranol.

Při použití optického prvku je nutné zajistit, aby jeho volná apertura byla dostatečně velká a nedošlo k oříznutí procházejícího svazku světla. Měřením bylo zjištěno, že v místě, kde je svazek nejširší, tj. před tubusovou čočkou TC_1 , obrázek 7, dosahuje průměru 25 mm. Konvenční optické klíny jsou běžně dostupné pouze do průměru 25,4 mm, minimální garantovaná volná apertura je u nich 20,3 mm. Vezme-li se v potaz i nutnost s hranolem translačně pohybovat v řádech jednotek milimetrů, dostupný rozměr je pro tuto aplikaci nedostačující. Optické klíny lze nechat vyrobit i na zakázku, je tedy třeba určit, jaké parametry musí splňovat.

5.1.1 Rozměrové parametry optických klínů

Jedním z rozhodujících parametrů je úhel optického klínu, který má vliv na minimální délku posuvu klínu potřebnou pro dosažení požadovaného rozdílu optické dráhy, na úhel

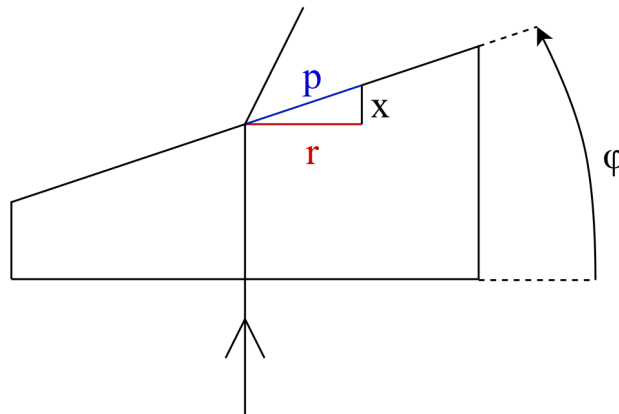
odchýlení paprsku i na tloušťku skla, kterou bude ve výsledku nutné v referenční větvi kompenzovat.

Podle obrázku 11 a ze vztahu (2.2) pro výpočet rozdílu délky optických drah je možné získat závislost mezi úhlem optického klínu φ a potřebnou délkou posunutí klínu jako:

$$p = \frac{x_o}{\sin(\varphi) \cdot (n - n_0)} \quad (5.1)$$

$$r = \frac{x_o}{\tan(\varphi) \cdot (n - n_0)}, \quad (5.2)$$

kde p je délka posuvu, který vykoná optický klín, r je délka průmětu posuvu p do směru kolmého na optickou osu, φ je úhel optického klínu a x_o je rozdíl délky optických drah, ke kterému dojde při posuvu p , resp. r . Parametr $n = 1,515$ odpovídá indexu lomu materiálu NBK-7, z něhož bude optický klín vyroben, $n_0 = 1$ je poté index lomu vakua. Úsečka x v obrázku 11 pak znázorňuje nárůst geometrické délky dráhy, kterou světlo v optickém klínu urazí. Na základě délky posuvu r je možné určit, v jakých hodnotách se musí pohybovat délkový rozměr a znázorněný na obrázku 12b. Za hodnotu parametru x_o je možné dosadit $150 \mu\text{m}$, což je hraniční hodnota požadovaného rozdílu optických drah. Délky posuvů p a r pro vybrané úhly optického klínu φ jsou dopočteny v tabulce 2.



Obrázek 11: Výpočet délky potřebných posuvů: délka posuvu optického klínu (p), délka posuvu ve směru kolmém na optickou osu (r), změna geometrické délky dráhy uražené v optickém klínu (x), úhel optického klínu (φ).

Ze Snellova zákona, rovnice (5.3), a s použitím obrázku 12a lze vyjádřit závislost úhlu odchýlení svazku světla φ_D na úhlu optického klínu φ a indexech lomu jednotlivých prostředí jako:

$$n \cdot \sin(\varphi) = n_0 \cdot \sin(\varphi + \varphi_D), \quad (5.3)$$

kde n_0 je index lomu vzduchu a n je index lomu skla [11]. Díky tomu že u optických klínů dochází pouze k malým úhlům odchýlení paprsku a mají pouze malé úhly zkosení, je

možné zavést následující zjednodušení: $\sin(\varphi) \approx \varphi$. Z rovnice (5.3) lze následně po úpravě vyjádřit:

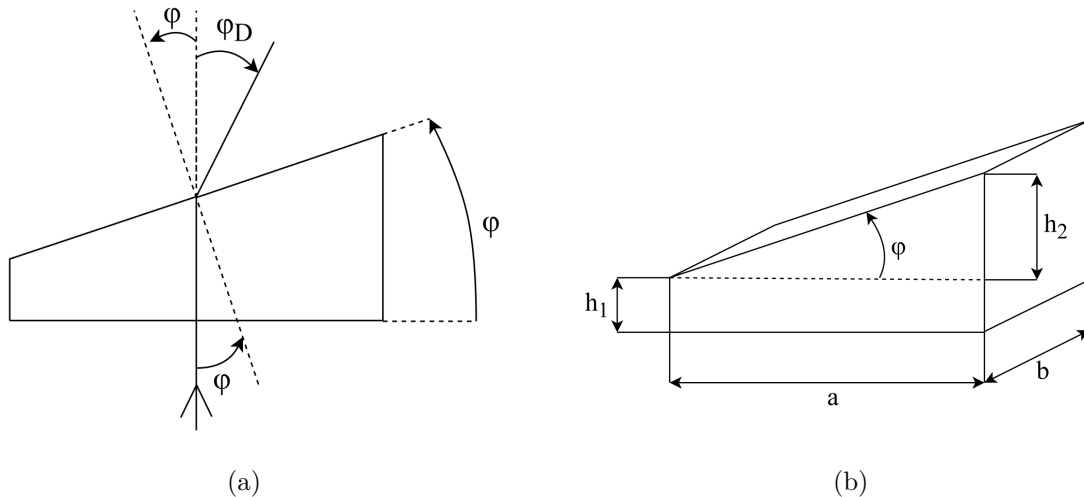
$$\varphi_D \approx \frac{\varphi \cdot (n - n_0)}{n_0}, \quad (5.4)$$

kde úhel odchýlení svazku světla φ_D i úhel optického klínu φ jsou v radiánech [11]. Pro vybrané úhly optického klínu φ jsou v tabulce 2 uvedeny jednotlivé úhly odchýlení svazku světla φ_D .

Celkovou tloušťku skleněné desky bez vzduchové mezery H , kterou dvojice optických klínů společně vytvoří, je možné s pomocí obrázku 12b vyjádřit jako:

$$H = 2 \cdot h_1 + a \cdot \tan(\varphi), \quad (5.5)$$

kde h_1 je dílčí výška optického klínu, a je délka hrany základny klínu a φ je úhel klínu. Aby bylo možné výpočet provést, je na počátku voleno $h_1 = 3$ mm. Tato hodnota bude dále modifikována tak, aby celková tloušťka odpovídala tloušťce dostupného kompenzačního optického prvku. Další možností je modifikovat tloušťku H změnou parametru h_2 , jehož velikost závisí na úhlu optického klínu φ . Z hlediska výroby je však výhodnější optimalizovat délkový rozměr místo úhlového. Celková tloušťka H dvojice optických klínů pro různé konfigurace je dopočtena v tabulce 2.



Obrázek 12: (a) Výpočet úhlu odchýlení svazku: úhel optického klínu (φ), úhel odchýlení svazku (φ_D). (b) Výpočet tloušťky dvojice optických klínů: délka hrany základny (a, b), dílčí výšky (h_1, h_2).

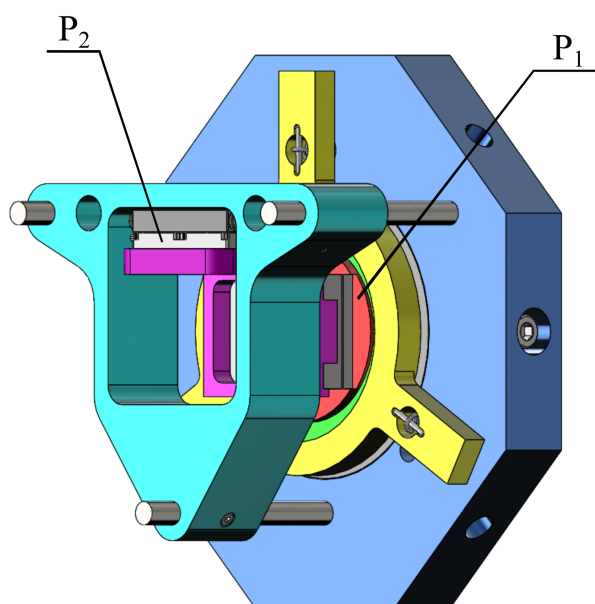
Optimální kombinaci parametrů má optický klín s úhlem 9° . Takový úhel zajistí dostatečně malou délku posuvu klínu potřebnou pro dosažení požadované změny délky optické dráhy. Díky tomu bude stačit použít klín s menšími rozměry základny. To s sebou přinese výhodu snadnějšího ukládání do polohovacích podsestav a snížení potřebného prostoru pro realizaci mechanismu. Pokud zohledníme zmenšení volné apertury optických klínů vlivem jejich uložení, tak dostačující bude základna o velikosti 33x29 mm. Cílem je také co nejméně odklonit svazek světla, což vybraná varianta rovněž splňuje. Poslední výhodou je, že celková tloušťka se blíží hodnotě 12 mm, což odpovídá tloušťce dostupného kompenzačního prvku, potřebnou modifikací je pouze zvětšení rozměru h_1 .

Tabulka 2: Parametry jednotlivých variant optických klínů. Úhel optického klínu (φ), délka posuvu optického klínu (p), délka posuvu ve směru kolmém na optickou osu (r), úhel odchýlení svazku světla (φ_D), délka hrany základny (a), tloušťka dvojice optických klínů (H)

φ [°]	p [mm]	r [mm]	φ_D [°]	a [mm]	H [mm]
8	2,093	2,072	4,12	33	10,64
				35	10,92
				38	11,34
9	1,862	1,839	4,64	33	11,23
				35	11,54
				38	12,02
10	1,677	1,652	5,15	33	11,82
				35	12,17
				38	12,70
11	1,526	1,498	5,67	33	12,41
				35	12,80
				38	13,39

5.2 Sestava pro řízení délky předmětové optické větve

Obrázek 13 ilustruje zvolené konstrukční řešení mechanismu pro aktivní řízení délky předmětové optické větve. Celá sestava bude umístěna v oblasti mezi objektivem O_1 a tubusovou čočkou TC_1 , obrázek 7, kde je procházející svazek světla kolimovaný. Implementace mechanismu do stávající zobrazovací sestavy je realizována uložením na stávající klecový systém, se kterým je kompatibilní tělo mechanismu. Díky tomu bude možné mechanismus případně využít i v jiných optických sestavách. V další části následuje popis jednotlivých podsestav tvořících mechanismus.



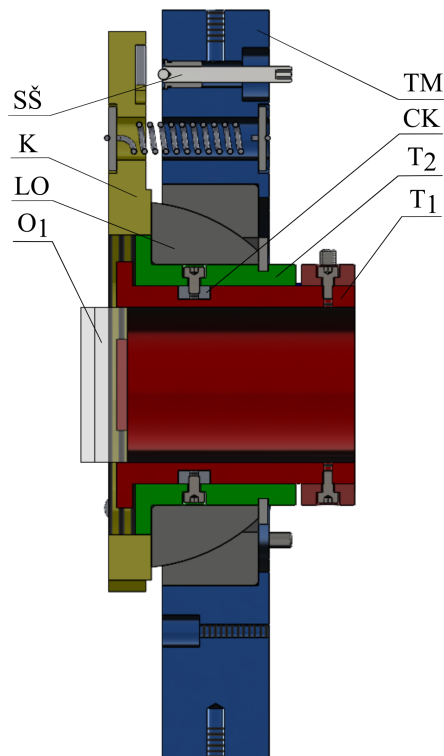
Obrázek 13: Konstrukční řešení mechanismu. Podsestava pro uložení polohovatelného optického klínu (P_1), podsestava pro uložení posuvného optického klínu (P_2).

5.2.1 Podsestava pro uložení polohovatelného optického klínu

Dvojice optických klínů použitá pro modifikaci délky optické dráhy v předmětové větvi tvoří dohromady planparalelní desku. Jedná se o optické prostředí omezené dvěma rovnoběžnými rovinami, které procházející paprsek pouze rovnoběžně posouvá, ale neodchyluje jej [9]. Rovnoběžné posunutí není žádoucí jev, proto je snahou minimalizovat vzdálenost mezi optickými klíny na hodnotu 0,5 mm. Při takovéto vzdálenosti vzniká riziko, že by vlivem výrobních nepřesností jednotlivých komponent mohlo docházet ke kolizi optických klínů. Je tedy žádoucí, aby jeden z klínů bylo možné řízeně naklápět vůči poloze druhého a tomuto problému tím předejít. Pro funkci není podstatné, který optický klín bude polohovatelný, proto je vhodné, aby jeden vykonával pouze translační pohyb a druhý pouze naklápění. Důvodem je zjednodušení při konstrukci dílčích mechanismů a omezená nosnost použitého aktuátoru s piezo motorem. Samotné naklápění je třeba realizovat řízenou rotací klínu, jak kolem optické osy, tak i kolem zbývajících os.

Řízení rotace kolem optické osy

Pro přesné úhlové nastavení se využívá úhlových ustanovek, popsaných v části 2.6.1. Ty obecně umožňují rychlé, přibližné nastavení ve velkém úhlovém rozsahu a následné přesné seřízení. Pro potřeby mechanismu je potřebné pouze přesné seřízení s úhlovým rozsahem v řádech jednotek stupňů. Klasickou konstrukcí osové úhlové ustanovky je proto možné částečně zjednodušit.

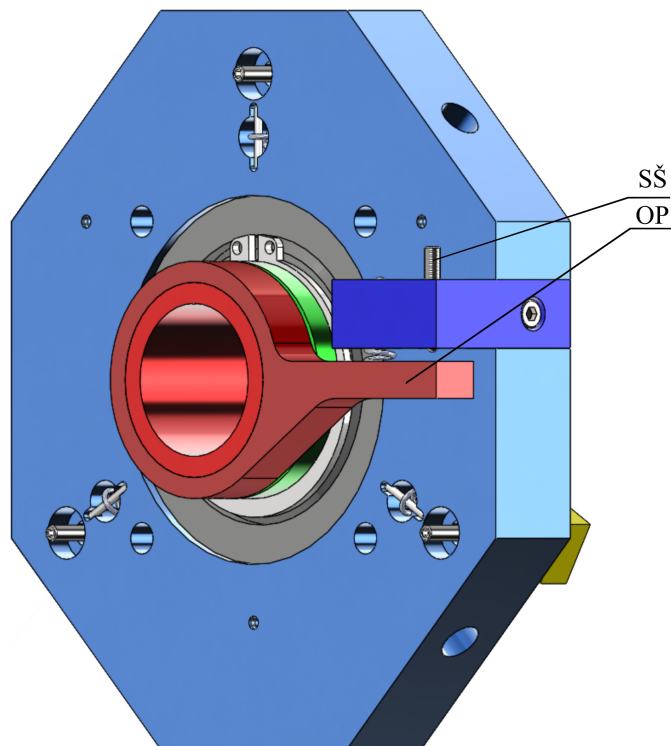


Obrázek 14: Podsestava pro uložení polohovatelného optického klínu - řez. Stavěcí šroub (SŠ), kroužek s rameny (K), axiální kloubové ložisko (LO), naklápěný optický klín (O_1), tělo mechanismu (TM), C-kroužek (CK), vnější tubus (T_2), vnitřní tubus (T_1).

Samotné provedení, zobrazené na obrázku 14 a obrázku 16, obsahuje dva vzájemně otočně uložené tubusy T_1 a T_2 . Axiální vymezení vnitřního tubusu T_1 vůči vnějšímu tubusu T_2 je realizováno přes dvojici C-kroužků CK. Ty jsou s vůlí uloženy v drážce těla tubusu T_1 , aby neomezily jeho rotační pohyb. Zároveň jsou na pevně spojeny s tělem vnějšího tubusu T_2 . V osazení vnitřního tubusu T_1 je lepeným spojením fixován optický klín O_1 .

Vnější tubus T_2 je uložen ve vnitřním kroužku axiálního kloubového ložiska LO, které tvoří základ další části mechanismu. Axiální vymezení vnějšího tubusu T_2 je ze zadní strany realizováno prostřednictvím hřídelového pojistného kroužku. Z přední strany je vnější tubus T_2 opatřen závitovým osazením, na něj je našroubován kroužek s rameny K. Při utažení kroužku s rameny K dojde k vymezení vůle v drážce pro pojistný kroužek a vzniklý přítlak ustaví polohu vnějšího tubusu T_2 uvnitř ložiska LO.

Samotné řízení úhlového natočení se poté, jak ilustruje obrázek 15, realizuje tlačným pohybem stavěcího šroubu SŠ do objímky s pákou OP spojenou s vnitřním tubusem T_1 . Stavěcí šroub SŠ je uložen v nepohyblivém těle mechanismu TM a proti jeho pohybu působí vratná pružina. Poloha objímky s pákou OP na vnitřním tubusu T_1 je zajištěna dvojicí šroubů.

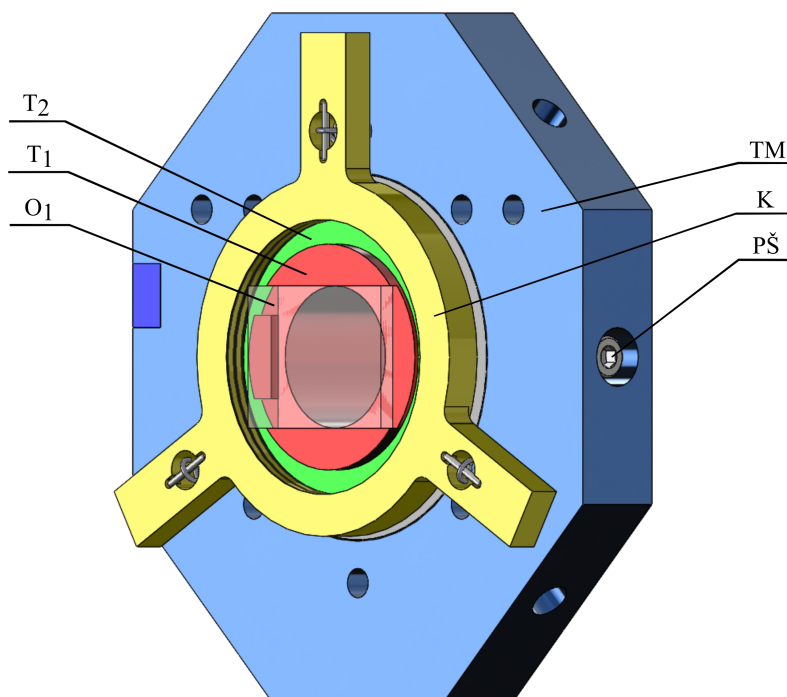


Obrázek 15: Podsestava pro uložení polohovatelného optického klínu - 1. část. Stavěcí šroub (SŠ), objímka s pákou (OP).

Řízení rotací kolem laterálních os

Pro řízenou rotaci kolem několika os se využívá gimbal mechanismů, jejichž bližšímu popisu se věnuje část 2.6.2. Pro účely této práce by bylo možné použít i komerčně dostupná zařízení tohoto typu od výrobců jako Thorlabs popřípadě Standa Optics, nevýhodou by však byla vysoká pořizovací cena a nevhodné rozměry. S použitím gimbal mechanismu pak souvisí i snaha uložit optický klín tak, aby se střed jeho přední plochy shodoval se středem křivosti mechanismu, kolem kterého probíhají rotace. Případně aby vzdálenost těchto bodů byla co nejmenší. Zároveň je nutné naklápěný optický klín uložit takovým způsobem, aby kolem jeho přední plochy byl dostatek volného prostoru pro uložení a pohyb posuvného optického klínu. Konstrukce komerčně dostupných provedení by v kombinaci s požadavky na uložení vedla k velké vzdálenosti mezi středem křivosti a středem přední plochy optického klínu, což by mělo za následek zhoršení přesnosti mechanismu.

Vhodnou alternativou ke komerčním řešením je použití axiálního kloubového ložiska, to má sférické kontaktní plochy, které lze využít jako základ gimbal mechanismu. Zvolenou konstrukci ilustruje obrázek 14 a obrázek 16. Vnější kroužek ložiska LO je uložen uvnitř nepohyblivého těla mechanismu TM a ze zadní strany vymezen osazením. Jeho poloha je dále pojištěna působením kolmo tlačícího šroubu PŠ. Kroužek K je našroubován na závitovém osazení vnějšího tubusu T_2 a vzniklý spoj mu zajišťuje kontakt s vnitřním kroužkem ložiska LO. Axiální poloha vnitřního kroužku ložiska LO je zajištěna působením třech vratných pružin, které spojují kroužek K s tělem mechanismu TM. Samotné naklápění se realizuje tlačným pohybem stavěcích šroubů SŠ do ramen kroužku K.

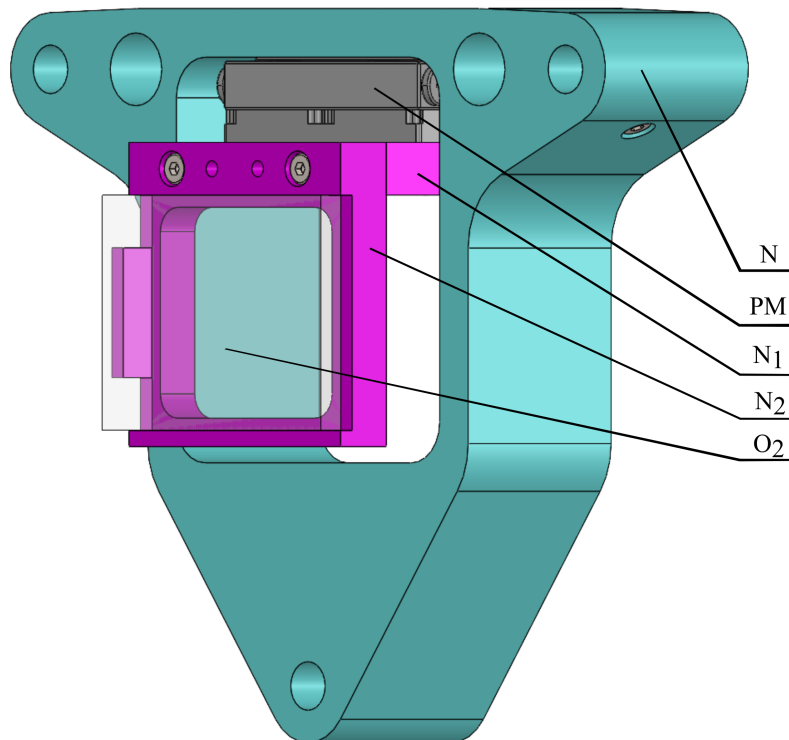


Obrázek 16: Podsestava pro uložení polohovatelného optického klínu - 2. část. Vnější tubus (T_2), vnitřní tubus (T_1), naklápěný optický klín (O_1), tělo mechanismu (TM), kroužek (K), přítlačný šroub (PŠ).

5.2.2 Podsestava pro uložení posuvného optického klínu

Translační pohyb optického klínu se realizuje pomocí lineárního stolku s piezo motorem SLC-2430 od společnosti SmarAct [24]. Tento prvek podsestavy zajistí požadované aktivní řízení délky předmětové optické větve CCHM. Konkrétní verze stolku disponuje vlastním zařízením pro zpětnou vazbu, rozsahem pohybu 16 mm a dosažitelným rozlišením 1 nm [24]. Obě hodnoty dostatečně pokrývají požadované parametry. Kromě toho dosahuje rychlosti pohybu až $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a jednosměrné opakovatelnosti $\pm 40 \text{ nm}$ [24]. Pro tyto parametry sice nebylo explicitně definováno, v jakém rozmezí se mají pohybovat, ale je vhodné, brát je v potaz. V případě vybraného stolku totiž dosahují velmi dobrých hodnot.

Spojení optického klínu O_2 s lineárním stolkem s piezo motorem PM se realizuje pomocí nosiče složeného ze dvou částí N_1 a N_2 ilustrovaného na obrázku 17 spolu se zbytkem této podsestavy. Optický klín O_2 je prostřednictvím lepeného spoje uložen v první části nosiče N_1 . Druhá část nosiče N_2 je následně přišroubována k lineárnímu stolku s piezo motorem PM.



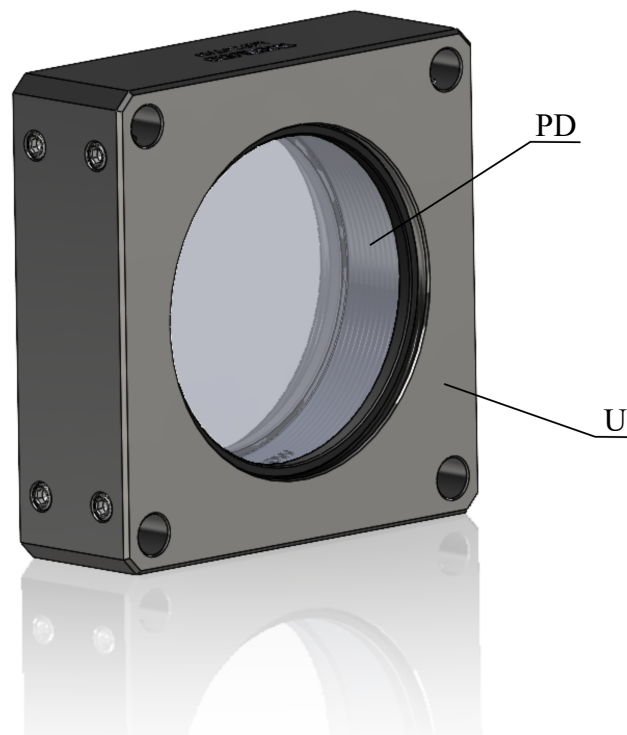
Obrázek 17: Podsestava pro uložení posuvného optického klínu. Nosič lineárního stolku s piezo motorem (N), lineární stolek s piezo motorem (PM), nosič optického klínu - 1. část (N_1), nosič optického klínu - 2. část (N_2), optický klín (O_2).

Lineární stolek s piezo motorem je pak pevně spojen s nosičem N. Ten je uložen na trojici vodících tyčí, po kterých je možné jej posouvat a tímto způsobem nastavit požadovanou vzdálenost mezi optickými klíny O_1 a O_2 . Vodící tyče jsou zašroubovány do těla mechanismu, čímž dojde k propojení obou výše popsanych podsestav.

5.3 Sestava pro uložení kompenzačního prvku v referenční optické větvi

Dvojice optických klínů způsobí v předmětové optické větvi nárůstu délky optické dráhy, který je nutné vykompenzovat. Do referenční větve je proto nutné umístit kompenzační planparalelní desku odpovídající tloušťky. Tímto způsobem lze zajistit, že ve výchozí poloze optických klínů vnikne pouze k minimální rozdílu optických drah, který je způsoben výrobními nepřesnostmi použitých komponent. Tento rozdíl je možné odstranit posunutím dvojice zrcadel Z_3 a Z_4 , obrázek 7, do dané polohy, nebo nastavením odpovídající výchozí pozice posuvného optického klínu. Na funkci mechanismu to dále nebude mít vliv. Pro konstrukci jsou použity komponenty od společnosti Thorlabs.

Provedení podsestavy je vidět na obrázku 18. Jako kompenzační prvek slouží planparalelní deska Thorlabs WG12012-A tloušťky 12 mm [25]. Tu je možné do optické sestavy umístit pouze v místech, kde je svazek světla kolimovaný, aby nedošlo ke vzniku sférické a chromatické vady. Z obrázku 7 je vidět, že takovýto prostor se nachází mezi objektivem O_2 a tubusovou čočkou TC_2 . Vzhledem ke skutečnému provedení je nejvhodnější umístit desku mezi zrcátko Z_5 a tubusovou čočku TC_2 . Ve vybraném místě je výhodou přítomnost klecového systému. Uložení planparalelní desky je pak možné realizovat přes dostupný držák kompatibilní s tímto systémem.



Obrázek 18: Podsestava pro uložení kompenzačního prvku v referenční větvi. Planparalelní deska (PD), uložení kompatibilní s klecovým systémem (U).

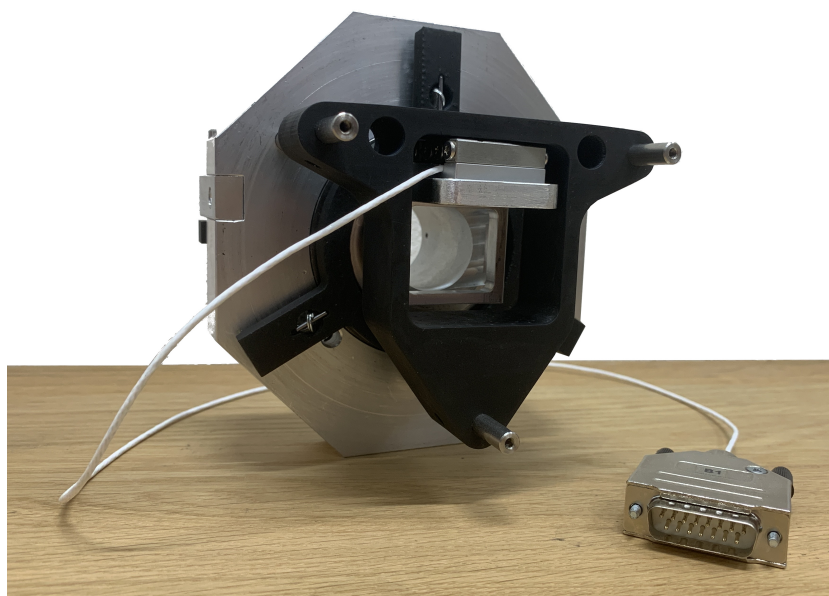
6 Montáž a testování

Následující část práce popisuje postup montáže obou sestav popsanych v kapitole 5 a následné testování. Potřebné komponenty byly vyrobeny, resp. vytištěny na základě výkresové dokumentace obsažené v Příloze A a modelů z prostředí Solidworks. Přičemž přiložená výkresová dokumentace byla přizpůsobena výrobním možnostem.

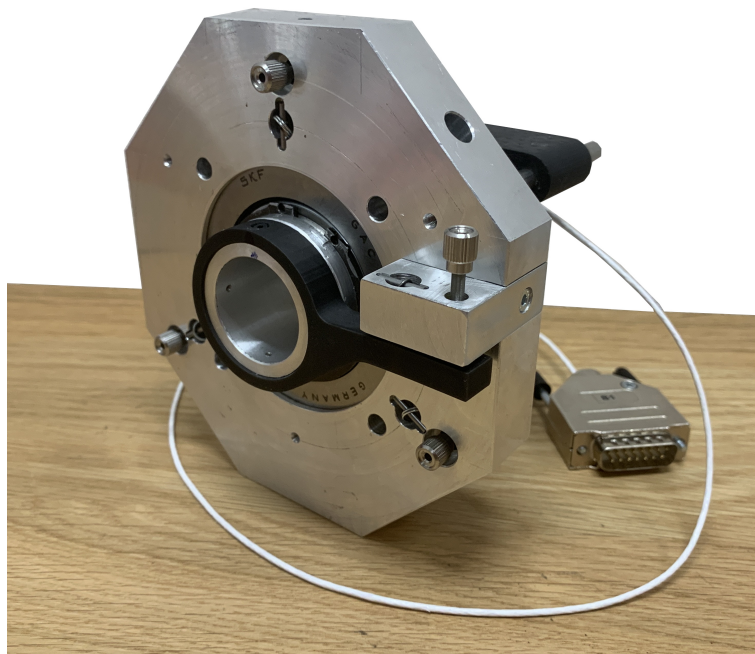
6.1 Postup montáže sestavy pro řízení délky předmětové optické větve

Postup montáže sestavy je následující. Vnější kroužek ložiska je spolu se závitovými vložkami zalisován do těla mechanismu. K tělu mechanismu je přišroubována páčka se zalisovanou závitovou vložkou. Na vnitřní tubus s dvojicí C-kroužků v drážce je nasazen a následně s C-kroužky sešroubován vnější tubus. Dvojice tubusů je zepředu nasunuta do vnitřního kroužku ložiska. Vnější tubus je pojištěn hřídelovým pojistným kroužkem. Na závitové osazení vnějšího tubusu je zepředu našroubován kroužek s rameny. Na vnitřní tubus je zezadu nasunuta a přišroubována objímka s pákou. Do závitových vložek jsou zašroubovány stavěcí šrouby. Tažné pružiny jsou přes kolíky uloženy do odpovídajících děr. Do osazení vnitřního tubusu je nalepen optický klín.

Obě části nosiče posuvného optického klínu jsou sešroubovány a následně uchyceny k lineárnímu stolku s piezo motorem. Do nosiče je nalepen optický klín. Lineární stolek je přišroubován k nosiči podsestavy. Do těla mechanismu je zašroubována trojice vodicích tyčí, na kterou je nosič nasunut. Sestava je nakonec uložena přes klecový systém do optické sestavy mikroskopu. Na obrázku 19 a obrázku 20 je vidět skutečná podoba zkompletované sestavy.



Obrázek 19: Skutečná podoba sestavy pro řízení délky předmětové optické větve, pohled zepředu.

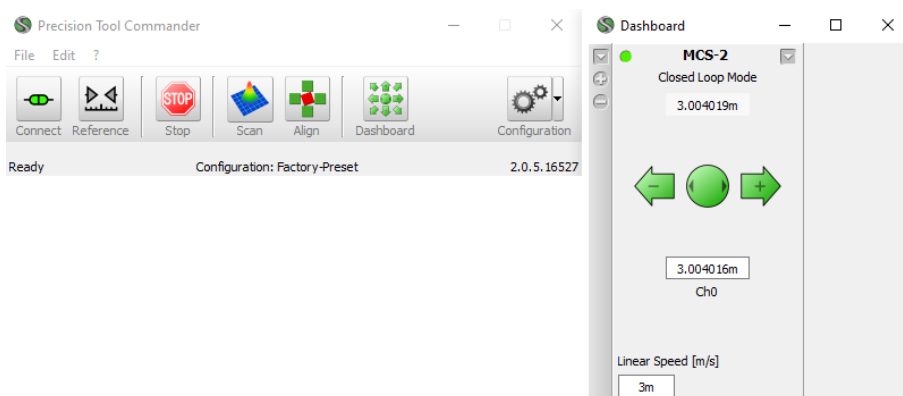


Obrázek 20: Skutečná podoba sestavy pro řízení délky předmětové optické větve, pohled zezadu.

6.2 Mechanické testování

Z důvodu opožděného dodání optických klínu nebylo možné plně otestovat vybrané konstrukční řešení po optické stránce. Bylo tedy realizováno testování pohybových vlastností sestavy pro řízení délky předmětové optické větve popsané v části 5.2.

Nejprve byla otestována podsestava pro uložení posuvného optického klínu za účelem ověření požadovaného rozsahu translačního pohybu. Testování bylo realizováno v prostředí Precision Tool Comander, viz. obrázek 21, které poskytuje jednoduchý způsob řízení lineárního stolku s piezo motorem. Je možné konstatovat, že podsestava disponuje větším rozsahem pohybu, než je minimální potřebný rozsah pro vybranou konfiguraci optického klínu podle tabulky 2. Díky tomu bude možné pokrýt větší rozsah rozdílu délky optických drah. Rovněž při pohybu nedochází ke kolizi žádných mechanických komponent podsestavy.



Obrázek 21: Testovací prostředí Precision Tool Comander.

Následně byla testována podsestava pro uložení polohovatelného optického klínu. Konstrukce poskytuje dobrý pohybový rozsah pro budoucí polohování optického klínu. Při řízení rotace kolem laterálních os dotahováním jednoho polohovacího šroubu je nutné střídatě druhé dva šrouby povolovat, aby nedošlo k vytažení vnitřního kroužku ložiska z vnějšího kroužku. To je způsobeno zvolenou konstrukcí gimbal mechanismu se třemi rameny, která poskytuje oproti designu se dvěma rameny vyšší stabilitu polohovatelného optického klínu a lepší ustavení vnitřního kroužku ložiska. Při pohybu rovněž nedochází ke kolizi mechanických komponent podsestavy.

Závěr

První část práce podává teoretický základ týkající se řízení délky optické dráhy a přehled o vhodných mechanických systémech, které je možné při řešení této problematiky uplatnit. Poznatky z rešeršní části jsou následně aplikovány při definici rozhodujících parametrů mechanismu a návrhu tří jeho koncepčních provedení. Všechna provedení pro modifikaci délky optické dráhy využívají vzájemný posuvný pohyb dvou optických klínů a liší se v použitých akčních členech. Pro vybraný návrh je následně vypracováno konstrukční řešení. To se nejprve věnuje výběru vhodné konfigurace rozměrových parametrů optického klínu, který je klíčovou komponentou celého mechanismu.

Následně je popsáno řešení sestavy určené pro řízení délky předmětové optické větve. Sestava zprostředkovává posuvný pohyb prvního optického klínu prostřednictvím lineárního stolku s piezo motorem. Ten zajistí aktivní řízení i dosažení požadovaných parametrů. Vybrané řešení dále umožňuje řízené polohování druhého optického klínu, díky čemuž se předejde jejich kolizi při posuvném pohybu. Použití gimbal mechanismu v polohovací podsestavě potlačí nežádoucí parazitní pohyby na rozdíl od klasických kinematických uložení. Mimo to je celé řešení kompatibilní s klecovým systémem, což přinese velkou výhodu při její implementaci do zobrazovací sestavy mikroskopu. Zároveň to umožňuje mechanismus využít i v jiných optických přístrojích.

Poslední část konstrukčního řešení se věnuje návrhu sestavy pro uložení kompenzační planparalelní desky, kterou je nutné vložit do referenční optické větve. Důvodem je přítomnost dvojice optických klínů v předmětové optické větvi mikroskopu. Sestava je realizována prostřednictvím komerčně dostupného uložení od společnosti Thorlabs, které je rovněž kompatibilní s klecovým systémem.

Obě sestavy byly následně vyrobeny a zkompletovány. Vlivem opožděného dodání optických klínů nebylo možné plně otestovat mechanismus po optické stránce, proto bylo realizováno pouze testování z hlediska jeho pohybových vlastností.

Výsledkem práce je tedy z hlediska pohybových vlastností funkční mechanismus kompatibilní s klecovým systémem a splňující požadované rozsahy pohybů i možnost aktivního řízení. Dalším krokem je implementace optických klínů a testování funkčnosti mechanismu z hlediska řízení délky předmětové optické větve CCHM.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MURPHY, Douglas B.; DAVIDSON, Michael W. *Fundamentals of light microscopy and electronic imaging*. 2nd ed. Wiley-Blackwell, 2013. ISBN 9780471692140.
- [2] How Quantitative Phase Imaging can change the way you look at cells. In: *Journal of Science* [online]. 2022 [cit. 2023-11-19]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1242/focalplane.10095>.
- [3] *Telight Q-Phase* [online]. [cit. 2023-11-18]. Dostupné z: <https://telight.eu/products/telight-q-phase/>.
- [4] SLABÝ, Tomáš; KOLMAN, Pavel; DOSTÁL, Zbyněk; ANTOŠ, Martin; LOŠŤÁK, Martin; CHMELÍK, Radim. Off-axis setup taking full advantage of incoherent illumination in coherence-controlled holographic microscope. *Optics Express* [online]. 2013, roč. 21, č. 12 [cit. 2023-11-18]. ISSN 1094-4087. Dostupné z DOI: [10.1364/OE.21.014747](https://doi.org/10.1364/OE.21.014747).
- [5] DVOŘÁK, Vladislav. *Návrh zobrazovací sestavy koherencí řízeného holografického mikroskopu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2023. Bakalářská práce.
- [6] BORN, Max; WOLF, Emil. *Principles of Optics*. Sixth. Pergamon Press Ltd., 1980. ISBN 0-08-026482-4.
- [7] ŠPAČEK, Matěj. *Návrh manipulátoru vzorku pro CCHM mikroskop*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2021. Diplomová práce.
- [8] GLÉZL, Štefan; KAMARÁD, Josef; SLIMÁK, Ivan. *Presná mechanika*. 1. vydanie. Bratislava: Alfa, 1992. ISBN 80-05-00972-0.
- [9] FUKA, Josef; HAVELKA, Bedřich. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy*. 1. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
- [10] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl; DUB, Petr. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [11] YODER, Paul R; VUKOBRATOVICH, Daniel. *Opto-mechanical systems design: Design and Analysis of Opto-Mechanical Assemblies*. Fourth edition. Boca Raton: Taylor & Francis, 2015. ISBN 9781482257700.
- [12] DOVER MOTION. *Motion Control Handbook* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://dovermotion.com/resources/motion-control-handbook/>.
- [13] NEWPORT CORPORATION. *Technical Notes* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.newport.com/resourceListing/technical-notes>.
- [14] PHYSIK INSTRUMENTE. *Tech Blog* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.pi-usa.us/en/tech-blog>.
- [15] SMARACT. *Linear Stages* [online]. 2024. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.smaract.com/en/linear-stages>.
- [16] SCHWERTZ, Katie; BURGE, J. H. *Cost and performance trade-offs for commercially available linear stages* [online]. 2010. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.868245>.

- [17] *XR50P/M - Linear Translation Stage* [online]. 2024. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=XR50P/M%5C#ad-image-0>.
- [18] *PR01/M - High-Precision Rotation Stage* [online]. 2024. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PR01/M>.
- [19] OSBORNE, JASON; HICKS, GREGORY; FUENTES, ROBERT. Global Analysis of the Double-Gimbal Mechanism. *IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE*. 2008, s. 1–3.
- [20] *GM200/M - Gimbal Mirror Mount* [online]. 2024. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=GM200/M%5C#ad-image-0>.
- [21] *Motorized Gimbal Mounts for Large Square Optics* [online]. 2024. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: https://www.standa.lt/products/catalog/custom_engineering?item=570.
- [22] *Cage System Construction* [online]. 2024. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2255.
- [23] *Round Wedge Prisms* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=147.
- [24] *SLC-2430 - Linear Piezo Stage* [online]. [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <https://www.smaract.com/pdf-details/en/slc-2430>.
- [25] *WG12012-A - Ø2"N-BK7 Broadband Precision Window* [online]. 2024. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=WG12012-A>.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Význam
QPI	kvantitativní fázové zobrazování
CCHM	Koherencí řízený holografický mikroskop

Symbol	Rozměr	Veličina
l_c	[m]	koherenční délka světla
$\overline{\lambda_0}$	[m]	střední vlnová délka světla
$\Delta\lambda_0$	[m]	šířka světelného spektra
x_o	[m]	délka optické dráhy světla
n	[-]	index lomu
x	[m]	geometrická délka dráhy
Δ	[m]	rozdíl optických drah
v	[m · s ⁻¹]	rychlost světla v prostředí o indexu lomu n
c	[m · s ⁻¹]	rychlost světla ve vakuu
λ_n	[m]	vlnová délka světla v prostředí o indexu lomu n
λ	[m]	vlnová délka světla ve vakuu
p	[m]	délka posuvu optického klínu
r	[m]	délka posuvu optického klínu ve směru kolmém na optickou osu
φ	[°]	úhel optického klínu
φ_D	[°]	úhel odchýlení svazku světla
H	[m]	tloušťka skleněné desky
h_1	[m]	dílčí výška optického klínu
h_2	[m]	dílčí výška optického klínu
a	[m]	délka hrany základny optického klínu
b	[m]	délka hrany základny optického klínu

Seznam příloh

Příloha A : Výkresová dokumentace

BP-2024-0 MECHANISMUS PRO ŘÍZENÍ DÉLKY OPTICKÉ VĚTVE

BP-2024-1 VNĚJŠÍ TUBUS

BP-2024-2 VNITŘNÍ TUBUS

BP-2024-3 TYČ

BP-2024-4 C KROUŽEK

BP-2024-5 TĚLO

BP-2024-6 PÁČKA

BP-2024-7 NOSIČ KLÍNU 1

BP-2024-8 NOSIČ KLÍNU 2

BP-2024-9 KROUŽEK

BP-2024-10 NOSIČ

BP-2024-11 OBJÍMKA S PÁKOU

BP-2024-12 WEDGE PRISM