

System pro bezkontaktní měření geometrie čelních automobilových skel

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Tomáš Jarkovský

Vedoucí práce:

Ing. Marcel Horák, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

Konzultanti práce:

Ing. Ondřej Matúšek, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

Ing. Michal Starý, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky





Zadání diplomové práce

System pro bezkontaktní měření geometrie čelních automobilových skel

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Jarkovský**
Osobní číslo: S19000255
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení
Zadávací katedra: Katedra sklářských strojů a robotiky
Akademický rok: 2020/2021

Zásady pro vypracování:

Bezkontaktní měřicí systémy se již mnoho let uplatňují v celé řadě průmyslových aplikací zaměřených na hodnocení tvarové přesnosti polotovarů, resp. výrobků v různých fázích automatické výroby. Měřicí zařízení využívají škálu senzorů založených na různých fyzikálních principech od ultrazvuku, přes laserovou triangulaci až po speciálně vyvinuté konfokální měřicí sondy vhodné pro detekci transparentních materiálů zatížených vysokou úrovní parazitních reflexí.

Cílem diplomové práce je navrhnout systém pro měření geometrie čelních automobilových skel a prověřit opakovatelnou úroveň přesnosti detekce tvaru skleněného výrobku v závislosti na okrajových podmínkách měření, tj. vzájemné poloze a orientace snímače a měřené plochy objektu, přesnosti založení objektu v měřicí pozici a deformaci čelního skla způsobené gravitací vlivem nízké příčné tuhosti v důsledku minimálních tloušťek v intervalu od 1,6 do 2,1 mm. Během řešení diplomové práce bude postupně realizována:

- Podrobná rešerše snímací techniky využitelné pro detekci skleněných objektů;
- Na základě rešerše zpracována metodika a koncepce laboratorního pracoviště pro měření geometrie čelního automobilového skla;
- Počítačová simulace deformací měřeného skla v závislosti na rozložení podpěrných bodů v měřicí pozici a virtuální simulace polohování snímače v závislosti na zvolené strategii měření;
- Laboratorní měření skla s analýzou opakovatelné přesnosti měření ve vztahu k zvoleným okrajovým podmínkám měření;
- Technickoekonomická analýza přínosu a aplikovatelnosti řešení v průmyslové praxi.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

výkresová dokumentace
40-50 stran textu vč. výpočtů
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. HOTAŘ, Vlastimil. *Úvod do problematiky strojového vidění. Část 1, Základní principy a hardware*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-9474-156-6.
2. NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. *Konstrukce robotů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-216-7. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
3. HOTAŘ, Vlastimil. *Úvod do problematiky strojového vidění. Část 2, Základy zpracování obrazu*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-202-0.
4. NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. *Efektory průmyslových robotů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-195-5. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
5. MATÚŠEK, Ondřej. *Pokročilé techniky snímání lesklých a obtížně detekovatelných materiálů: Advanced techniques for image acquisition of glossy and difficult-to-detect materials*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019.

Vedoucí práce:

Ing. Marcel Horák, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Konzultanti práce:

Ing. Ondřej Matúšek, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky
Ing. Michal Starý, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Datum zadání práce:

24. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

24. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

1. června 2021

Bc. Tomáš Jarkovský

System pro bezkontaktní měření geometrie čelních automobilových skel

Anotace

Diplomová práce analyzuje současné principy měření geometrie čelních automobilových skel. Dále jsou v práci provedeny testy přesnosti měření vybraných typů snímačů. Na základě vyhodnocených testů přesnosti byla zpracována metodika měření a uvedeny koncepční návrhy variant laboratorního pracoviště. Pro vybrané laboratorní pracoviště a efektor robotu je předloženo konstrukční řešení. V neposlední řadě byla analyzována navržená metodika v laboratorních podmínkách a následně vyhodnocena. V závěru je vypracováno technicko-ekonomické zhodnocení navržené varianty.

Klíčová slova

Robotické měření, bezkontaktní měření, čelní automobilové sklo, efektor, konstrukční návrh středícího přípravku, automatizace

System for contactless measurement of automotive windshield geometry

Annotation

Diploma thesis analyses current principles of measurement of automotive windshield geometry. Furthermore, measurement accuracy tests of chosen sensor types are presented. Based on performed accuracy tests, the measurement methodology was developed and conceptual designs of laboratory workplace variants were prepared. A design solution is presented for the selected laboratory workplace and the robot effector. Finally, the proposed methodology was examined in laboratory conditions and subsequently evaluated. In the conclusion, technical-economical evaluation of proposed variant is performed.

Keywords

Robotic measurement, contactless measurement, windshield, effector, design of the centering device, automation

Poděkování

Rád bych nejprve poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Marcelu Horákovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady, připomínky a za čas, který věnoval mně a mé práci.

Poděkování patří také Ing. Ondřeji Matúškovi, Ph.D., Ing. Michalovi Starému, Ph.D. a kolegům z KSR za odborné rady a připomínky k diplomové práci.

Na závěr bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni Barboře Šedivé za podporu při mém dosavadním studiu na fakultě strojní.

Obsah

Seznam použitých zkratk a značek	9
Úvod	11
1. Analýza současného stavu	12
1.1. Současné principy měření geometrie automobilových skel	12
1.2. Patentová řešerše systémů umožňujících bezkontaktní měření geometrie transparentních objektů.....	12
1.3. Fyzikální principy měření a sensorika	13
1.3.1. Laserové triangulační snímače	13
1.3.2. Ultrazvukové snímače.....	14
1.3.3. Konfokální snímače.....	15
1.3.4. Kamerové systémy a speciální postupy měření	16
2. Laboratorní testy přesnosti měření v závislosti na použitém senzoru	17
2.1. Popis metodiky a průběh testů	17
2.2. Vyhodnocení testovaných senzorů.....	21
3. Návrh metodiky měření a koncepce laboratorního pracoviště	22
3.1. Metodika měření.....	22
3.2. Koncepce standu pro měření geometrie čelních automobilových skel.....	23
3.2.1. Varianta A.....	24
3.2.2. Varianta B.....	24
3.2.3. Varianta C.....	25
4. Konstrukční řešení přípravku pro polohování měřeného skla	26
4.1. Konstrukce polohovacího přípravku pro fixaci skla	26
4.2. Konstrukce efektoru	34
4.3. Vizualizace výsledného robotického pracoviště.....	35
5. Pilotní prověření navržené metodiky v laboratorních podmínkách	36
5.1. Strategie programování průmyslového robotu.....	37
5.2. Počítačová simulace elastických deformací skla, příprava porovnávacích dat,	42
6. Laboratorní měření čelního skla	43
6.1. Popis podmínek měření.....	43
6.2. Vyhodnocení opakovatelné přesnosti měření	45
7. Technicko-ekonomická analýza přínosu a aplikovatelnosti řešení v průmyslové praxi ...	46
Závěr	48
Seznam použité literatury	49
Seznam příloh	51

Seznam použitých zkratek a značek

\$BASE	příkaz definice báze (souřadný systém robotu)
\$TOOL	příkaz definice nástroje (koncového bodu robotu)
μ	koeficient tření [-]
3D	trojrozměrný
ADC	analogově digitální převodník
CAD	Computer-aided design – počítačová podpora projektování (designu)
CAM	Computer-aided manufacturing – počítačová podpora obrábění
CCD	kamerový snímač
CNC	číslicové řízení počítačem
DECL	příkaz deklarace proměnných
EM	elektromotor
F_G	gravitační síla [N]
FOR	příkaz pro cyklus typu for
F_t	třecí síla [N]
g	gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
I/O	vstupy / výstupy
J_A	moment setrvačnosti pohonu [$kg \cdot cm^2$]
J_L	moment setrvačnosti zátěže [$kg \cdot cm^2$]
$J_{PŘ}$	moment setrvačnosti převodovky [$kg \cdot cm^2$]
J_R	moment setrvačnosti motoru [$kg \cdot cm^2$]
$J_{ř}$	moment setrvačnosti řemenice [$kg \cdot cm^2$]
KRL	Kuka Robot Language
m	hmotnost [kg]
M_1	rozběhový moment [Nm]
M_2	ustálený moment [Nm]
M_3	brzdny moment [Nm]
M_{MAX}	maximální hnací moment pohybové jednotky [Nm]
M_{MMIN}	minimální hodnota hnacího momentu motoru [Nm]
M_{nM}	jmenovitý moment motoru [Nm]
$M_{PŘ}$	výstupní moment z převodovky [Nm]

$M_{PR'}$	hodnota hnacího momentu převodovky s navrženým motorem [Nm]
M_{STR}	střední moment [Nm]
m_v	hmotnost posouvajících součástí [kg]
PC	počítač
PJ	pohybová jednotka
PŘ	převodovka
$r_{ř}$	účinný poloměr řemenice [m]
SW	software
SWRITE / CWRITE	příkaz pro zapisování hodnot do souboru
t_1	čas rozběhu [s]
t_2	čas ustáleného pohybu [s]
t_3	čas brzdění [s]
v_{MAX}	maximální posuvová rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
WAIT	příkaz čekání [s]
$\omega_{ř}$	úhlová rychlost řemenice [$rad \cdot s^{-1}$]

Úvod

Měření geometrie čelních automobilových skel je důležité zejména pro kontrolu jakosti a průběžné sledování geometrie polotovarů během výrobního procesu v závislosti na nastavení technologických parametrů. Současné kontaktní principy měření jsou spojené vysokými náklady na skladování velkého množství rozměrných měřicích maket.

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou bezkontaktního měření geometrie automobilových skel s využitím několika rozdílných principů měření v kombinaci s multiúhlovým průmyslovým robotem. V rámci řešení bylo navrženo robotizované pracoviště a ve variantách byl zpracován středící přípravek pro polohování a fixaci skla v měřicí poloze. Nedílnou součástí řešení byl návrh a konstrukce efektoru, který umožňoval instalaci ultrazvukového senzoru na přírubu robotu. Principem navrženého pracoviště je měření vzdálenosti od předem definovaných bodů na analyzovaném skle tak, že ultrazvukový snímač je polohován v prostoru prostřednictvím robotu v definované vzdálenosti s orientovanou osou snímače kolmo k měřené ploše. Konkrétní dráha robotu je generována na základě 3D modelu skla s využitím CAM SW a v ideálním případě senzor vyhodnocuje ve všech měřených bodech shodnou vzdálenost.

Výstupem práce je návrh a prověření metodiky měření čelních automobilových skel. Dále je v práci popsán konstrukční návrh středícího přípravku a efektoru včetně výkresové dokumentace. Práce se rovněž zabývá podrobnou analýzou přesnosti měření v závislosti na použitém fyzikálním principu a konkrétním typu snímače.

1. Analýza současného stavu

1.1. Současné principy měření geometrie automobilových skel

V současné době se zjišťování geometrické přesnosti tvarovaných skel, především automobilových skel, provádí kontaktním způsobem pomocí několika desítek kontaktních snímačů umístěných v maketě. Maketou je myšlena forma, která kopíruje vnitřní nebo vnější tvar měřeného skla. Měřené sklo se umístí na maketu v přibližně horizontální poloze mezi dorazy na tzv. RPS body, které jsou definovány v 3D modelu skla. Sklo spolu s maketou se poté naklopí pootočením oproti vodorovné ose do měřicí polohy, která odpovídá poloze skla umístěného na karoserii automobilu (tzv. "car position"). Měření proběhne během několika vteřin, kdy se všechny kontaktní snímače najednou vysunou minimální silou do kontaktu s měřeným sklem, jejich poloha je uložena a porovnána se souřadnicemi odpovídajícími 3D modelu.

Nevýhodou kontaktního měření je možnost deformace skla po kontaktu se snímači a z toho vyplývající nepřesnost měření. Riziko vzniká zejména u velmi tenkých automobilových skel, vyráběných v současné době. Další nevýhodou je potřeba skladovat makety pro každý typ skla, a to v takových podmínkách jako jsou například optimální teplota, vlhkost a další parametry pro uskladnění měřicích přípravků.

1.2. Patentová řešení systémů umožňujících bezkontaktní měření geometrie transparentních objektů

Nový způsob zjišťování geometrické přesnosti tvaru transparentních tvarovaných výrobků ze skla bezkontaktní metodou popisuje CN 109084682, kde objekt je měřen pomocí dvou měřicích sestav s laserovými sondami. Zatímco první měřicí sestava obsahující bodovou laserovou sondu je schopná získat souřadnice určitého bodu na vnějším povrchu automobilového skla, získává druhá měřicí sestava osazená laserovou liniovou sondou souřadnice bodů černého okraje automobilového skla. Po snímání následuje porovnání vůči referenčnímu vzorku.

Použití laserových snímačů je nevýhodné z důvodu nepřesnosti triangulačního odměřování polohy pro tvarově složité plochy, přičemž naměřená hodnota je závislá na odklonu laserového paprsku od normály měřeného povrchu. Nepřesnost je ještě výraznější při snímání lesklých povrchů s vysokou mírou parazitních reflexí.

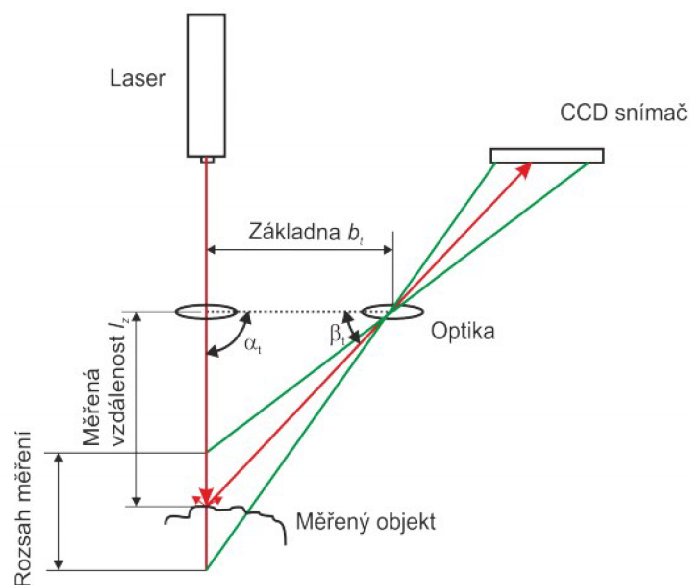
1.3. Fyzikální principy měření a sensorika

K bezkontaktnímu měření transparentních, tvarově členitých výrobků ze skla lze využít několika sensorů založených na různých fyzikálních principech. Využívá se laserových, ultrazvukových a konfokálních snímačů vzdálenosti i speciálních kamerových systémů.

1.3.1. Laserové triangulační snímače

Jedním ze sensorů pro měření vzdálenosti je laserový snímač fungující na principu triangulace. Jako zdroj laserového paprsku se obvykle využívá polovodičová dioda pracující na vlnové délce červeného světla (cca 650 – 750 nm), jehož přijímačem je obvykle CCD snímač.

Princip triangulace (obr. 1) vychází z předpokladu, že paprsek se odráží od detekovaného předmětu pod konstantním úhlem, na základě čehož je vzdálenost dopadu odraženého paprsku na čelo senzoru úměrná vzdálenosti detekovaného předmětu od čela snímače. Nevyhodnocuje se tedy intenzita dopadajícího paprsku, ale místo, kam odražený paprsek dopadl. Paprsek dopadá na světlocitlivou plochu CCD snímače, která je vyhodnocena jako vzdálenost snímaného objektu od snímače. Zároveň je tato plocha omezená, což má za následek limitování měřicího rozsahu, který je dán optikou snímače a velikostí plochy CCD snímače. Laserový triangulační snímač (obr. 2) umožňuje nejen měření vzdálenosti, ale i tloušťky transparentních homogenních předmětů a ploch [1].



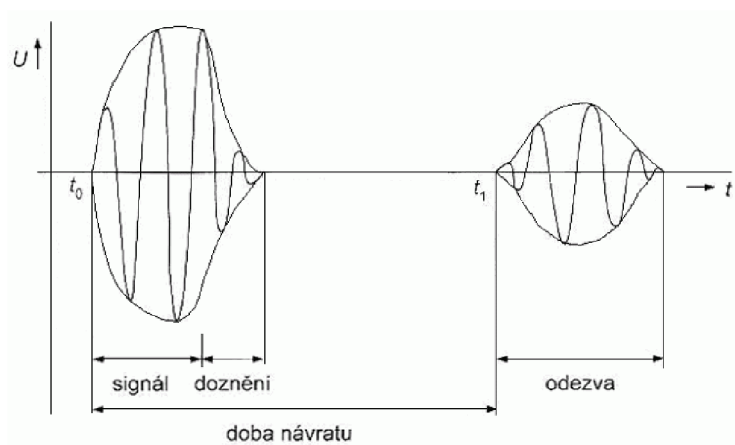
Obr. 1: Princip triangulačního laserového senzoru [2]



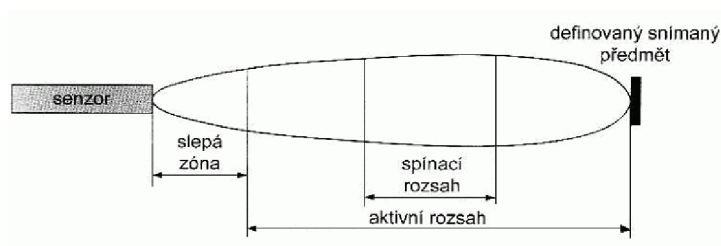
Obr. 2: Příklad laserového triangulačního senzoru firmy SICK [3]

1.3.2. Ultrazvukové snímače

Dalším senzorem pro měření vzdálenosti je snímač ultrazvukový. Principem snímače (obr. 3) je měření času návratu zvukové vlny (tzv. time of flight). Zdrojem ultrazvukových vln je obvykle piezokeramický měnič s budícími a přijímacími obvody. Měnič vyšle v časovém okamžiku t_0 několik impulsů, které se šíří daným prostředím rychlostí zvuku. Narazí-li tento signál na nějaký předmět, část vlnění se odrazí a dojde k návratu zpět do senzoru za čas t_1 . Vyhodnocovací elektronika pak může z doby zpoždění výstupního signálu vůči vstupnímu vypočítat vzdálenost objektu.



Obr. 4: Princip ultrazvukového senzoru [4]



Obr. 3: Rozsah ultrazvukového senzoru [4]



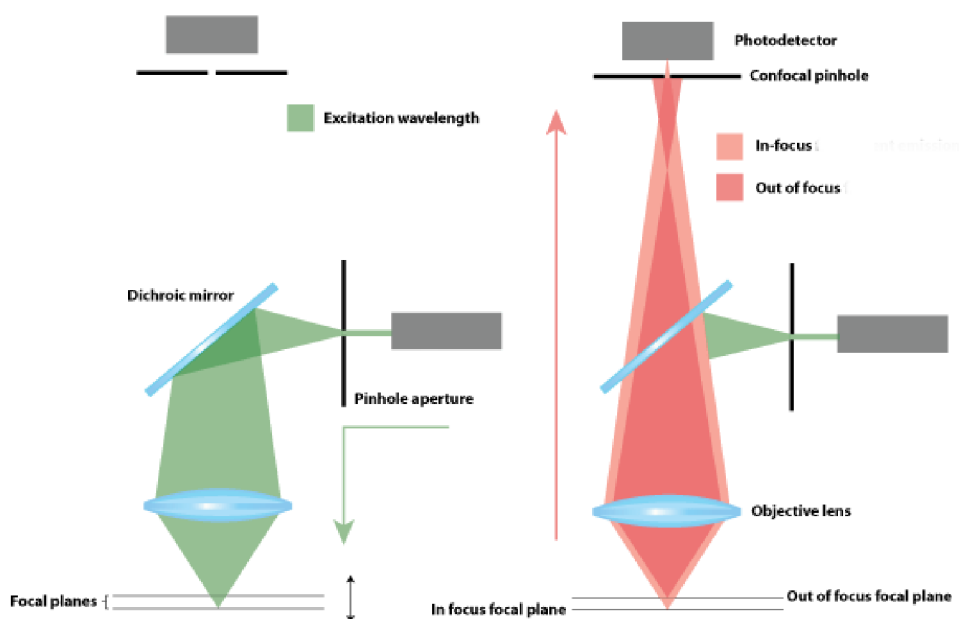
Obr. 5: Příklad ultrazvukového senzoru firmy Baumer [5]

Nevýhodou snímače s jedním měničem je fakt, že po vyslání impulsu musí senzor „čekat“ až měnič dokmitá. Následkem dokmitání mají ultrazvukové měniče u senzoru nefunkční pásmo (obr. 4), nazývané mrtvá nebo slepá zóna, v níž nemůže být žádná odezva detekována [4].

1.3.3. Konfokální snímače

Jiným typem senzoru pro měření vzdálenosti je konfokální snímač. Technologie tohoto snímače funguje na principu (obr. 6) zaostřování polychromatického bílého světla pomocí multičočkového optického systému. Čočky v optickém systému jsou uspořádány konfokálně, přičemž je bílé světlo řízenou chromatickou aberací rozděleno na jednotlivé složky světla (monochromatické) [6].

Pokud jsou dvě čočky konfokálně uspořádané, znamená to, že jejich ohniskové vzdálenosti si odpovídají. Světlo procházející ohniskem dává ostrý obraz, zatímco světlo procházející jiným bodem je čočkami sice také zobrazeno, ale jeho obraz není ostrý. Signál, který není ostrý, lze odfiltrout pomocí bodové clonky. Pouze světlo s vlnovou délkou, které je přesně zaostřeno na



Obr. 6: Princip konfokálního snímače [6]

cílovou plochu, je použito pro měření. Vzdálenost je tedy vypočítána na základě vlnové délky světla, která přichází na elektro-optický přijímač [6].



Obr. 7: Příklad konfokálního snímače CHRocodile C firmy PRECITEC [7]

1.3.4. Kamerové systémy a speciální postupy měření

Moderním způsobem získání obecné geometrie prostorových objektů je využití kamerového systému, přesněji 3D skeneru (obr. 8). Touto bezkontaktní metodou lze snímat především netransparentní povrchy s přesností v řádu setin milimetru. Aby bylo možné snímání transparentních objektů realizovat, je nutný nástřik antireflexní vrstvy, avšak rozměry objektu se zvětší o tloušťku nástřiku, která není stejná v celé ploše. Skenování využívá principu promítání strukturovaného světla na objekt a jeho snímání dvojicí stereo kamer umístěných v určité vzdálenosti a pod určitým úhlem ve skeneru.



Obr. 8: 3D skener GOM ATOS Q [8]

Nevýhodou této metody je i příprava objektu na vlastní skenování, tj. nalepení referenčních bodů pro určení pozice skeneru v prostoru a následnému přenesení těchto informací do 3D, proto je tato metoda nevhodná pro účel diplomové práce.

Speciálním řešením pro měření geometrie skla s obecnou geometrií v prostoru je kombinace liniových či bodových laserů v kombinaci s jednou nebo více kamerami. Principem měření je promítání laserových paprsků pod ostrým úhlem na plochu skla. Odraz laserových paprsků vytváří obraz, který snímá jedna či více kamer. Obraz je následně vyhodnocen pomocí SW, který umožní vytvořit 3D model měřeného objektu.

Metoda promítání laserového paprsku je pro účely diplomové práce nevhodná z důvodu složitosti a velkým rozměrům snímaného objektu.

2. Laboratorní testy přesnosti měření v závislosti na použitém senzoru

Na základě provedené analýzy použitelných fyzikálních principů uvedené v kap. 1.3 bylo vtypováno několik snímačů, u kterých byla postupně sledována opakovatelná přesnost měření vzdálenosti od horní plochy plochého vzorku skla. Jednalo se o:

- Triangulační snímač SICK OD5000-C85W20 s pro sklo použitelným rozsahem 20 mm (75 – 95 mm),
- Konfokální snímač Precitec Optronic s rozsahem 25 mm (53 – 78 mm),
- Ultrazvukový snímač Migatron RPS-412A-10-V s rozsahem 178 mm (76 – 254 mm),
- Ultrazvukový snímač Baumer UNCK 09U6914/KS35AD1 s rozsahem 147 mm (3 – 150 mm).

Údaje uvedené v závorkách ukazují minimální a maximální vzdálenost objektu od snímače.

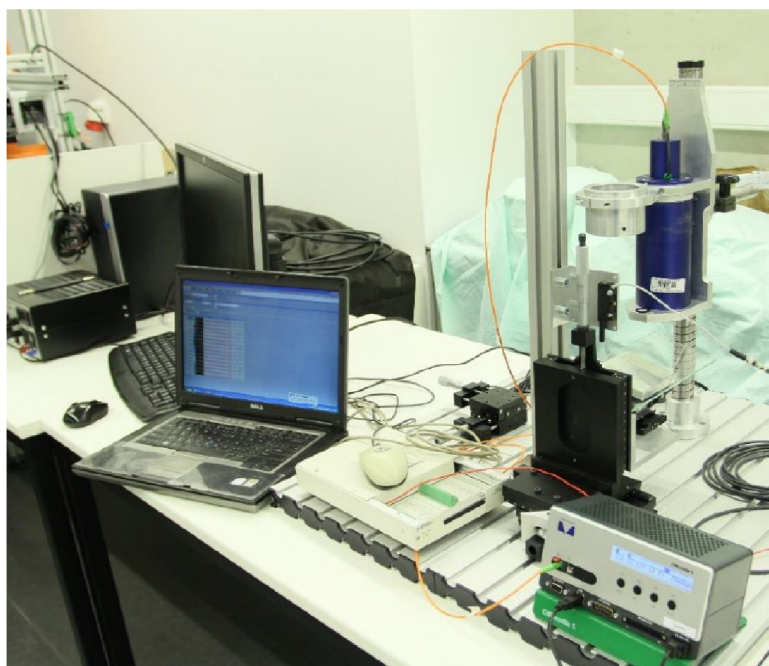
2.1. Popis metodiky a průběh testů

Experimentální pracoviště (obr. 9) se skládalo z pomocného rámu, na kterém byly připevněny výše zmíněné snímače, posuvného laboratorního stolu, PC a vyhodnocovací elektroniky (pro konfokální a ultrazvukové snímače). Konfokální snímač Precitec je spojený optickým kabelem s vlastní řídicí jednotkou, která umožňuje přímé odečítání vzdálenosti. Ultrazvukové snímače umožňují vyčítání analogového signálu napětí (0 – 10 V), kde pro správné vyčítání hodnot je třeba připojit analogově – digitální převodník (ADC), který se propojí s PC a prostřednictvím příslušného SW rozhraní je možné zpracovat měřená data.

Na připraveném experimentálním pracovišti (obr. 9) byly testovány vybrané snímače a dosažitelná přesnost měření vzdálenosti od skla ve vztahu k definovanému odklonu skla od normály měření. Úhel odklonu měřeného skleněného vzorku byl volen v rozsahu -12° až 12° od normály měření. Při definovaném odklonu skla byly proměřeny vzdálenosti ve voleném rozsahu.

Rozsah a pracovní vzdálenosti byly přizpůsobeny parametrům triangulačního snímače (disponoval nejmenším rozsahem z testovaných snímačů, a to konkrétně 20 mm).

Měřený přířez skla byl postupně přibližován a oddalován od snímačů pomocí přesného mikrometrického stolku, naměřené hodnoty byly zapsány a porovnávány každý 1 mm ve zvoleném rozsahu. Kladný směr náklonu byl volen podle předepsaného směru náklonu senzoru SICK OD5000. Kladný směr hodnot mikrometrického stolku pak odpovídá prodlužování vzdálenosti od senzorů. Mikrometrický stolek umožňuje subjektivní odečtení hodnoty s přesností na 0,01 mm. Konfokální snímač Precitec Optronic 25 po určení nulové hodnoty poskytuje přímo absolutní data v milimetrech s přesností 0,001 mm.



Obr. 9: Připravené laboratorní měřící stanoviště

Triangulační snímač SICK OD5000-C85W20 umožňuje vyčítání dat pomocí ethernetu „přes webovou aplikaci“, kde je nutné snímač zkalibrovat, tj. přiřadit definovanou vzdálenost určitému signálu. Pro lesklé a zrcadlové materiály pak snímač nabízí rozsah 20 mm (85 mm \pm 10 mm). Snímač byl tedy nejdříve zkalibrován na kraji měřícího rozsahu s pracovní vzdáleností 85 mm, v tabulce naměřených hodnot označeno jako Sick 85 (nulová hodnota byla přiřazena vzdálenosti 85 mm od snímače). Poté byl překalibrován na základě síly signálu na pracovní vzdálenost 83 mm (nulová hodnota byla přiřazena vzdálenosti 83 mm od snímače) a kalibrován byl uprostřed měřícího rozsahu, označeno v tabulce naměřených hodnot jako Sick 83.

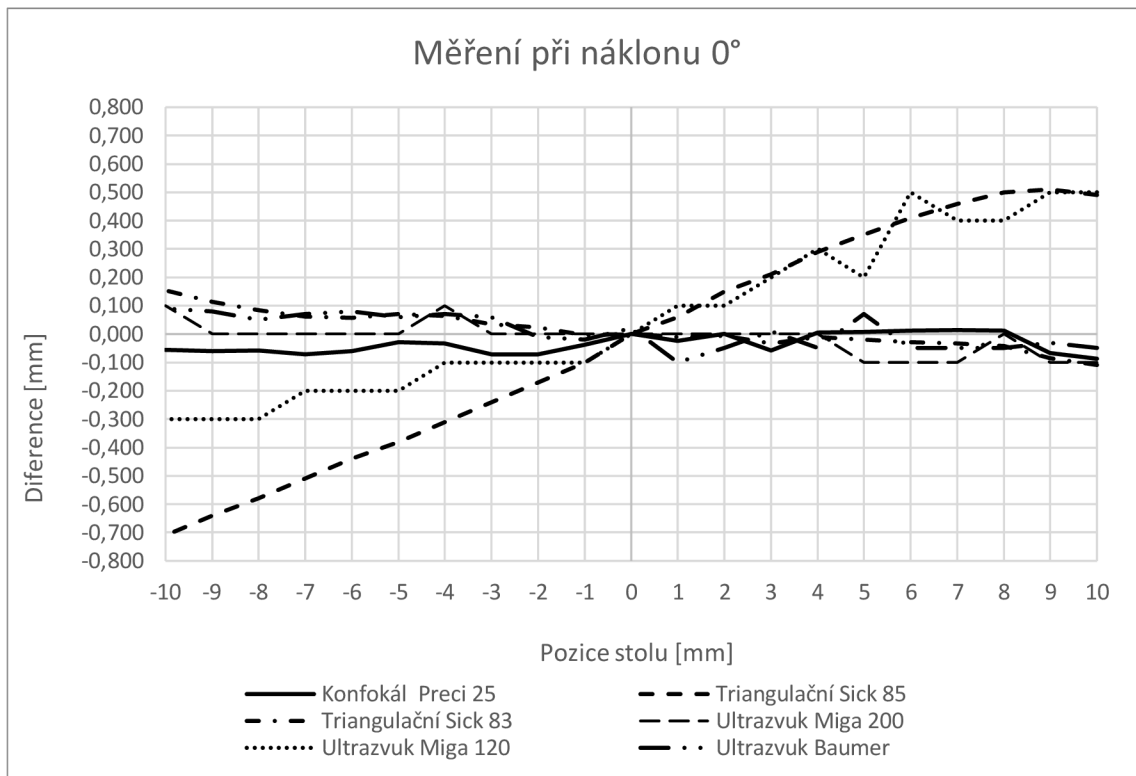
Ultrazvukový snímač Migatron RPS-412A-10-V disponuje analogovým výstupním signálem v rozsahu 0 až 10 V s přesností \pm 0,09 mV, což umožňuje po přepočtu na vzdálenost dosáhnout přesnosti měření na úrovni setiny milimetru. Šum měření byl bohužel tak vysoký, že spolehlivě

bylo možné vyčítat na úrovni 0,1 mm. Nejprve bylo provedeno měření na konci měřícího rozsahu – nulová hodnota byla volena ve vzdálenosti 200 mm od snímače (z 254 mm rozsahu), v tabulce naměřených hodnot označeno jako Miga 200. V tomto případě však snímač nebyl schopen měřit pod úhlem náklonu vzorku 12°. Další měření bylo realizováno ve vzdálenosti 120 mm od snímače (nulová hodnota byla nastavena ve vzdálenosti 120 mm od snímače, minimální měřící vzdálenost snímače je 76 mm), v tabulce naměřených hodnot označeno jako Miga 120. V tomto případě už snímač měřil i při náklonu 12°.

Ultrazvukový snímač Baumer UNCK 09U6914/KS35AD1 posílá analogový signál, kterému je přiřazena vzdálenost. Snímač umožňuje vyčítat na úrovni 0,01 mm. Byl testován zhruba v polovině rozsahu, ve vzdálenosti 80 mm od čela snímače. Testovaný ultrazvukový snímač nebyl schopen odměřit vzdálenost od vzorku s náklonem o více než ca 9°. Příklad naměřených hodnot s vyhodnoceným grafem je možné vidět na dalších stránkách (tab. 1, obr. 10).

Tab. 1: Naměřené hodnoty vzdálenosti a difference vybraných snímačů

Naměřená vzdálenost - Náklon 0° [mm]							Diference od měřicího stolku [mm]					
Pozice stolku	Konfokál Preci 25	Triangulační Sick 85	Triangulační Sick 83	Ultrazvuk Miga 200	Ultrazvuk Miga 120	Ultrazvuk Baumer	Konfokál Preci 25	Triangulační Sick 85	Triangulační Sick 83	Ultrazvuk Miga 200	Ultrazvuk Miga 120	Ultrazvuk Baumer
10	9,913	10,490	9,891	9,900	10,500	9,950	-0,087	0,490	-0,109	-0,100	0,500	-0,050
9	8,933	9,510	8,916	8,900	9,500	8,970	-0,067	0,510	-0,084	-0,100	0,500	-0,030
8	8,011	8,500	7,957	8,000	8,400	7,950	0,011	0,500	-0,043	0,000	0,400	-0,050
7	7,014	7,460	6,967	6,900	7,400	6,950	0,014	0,460	-0,033	-0,100	0,400	-0,050
6	6,011	6,410	5,972	5,900	6,500	5,950	0,011	0,410	-0,028	-0,100	0,500	-0,050
5	5,007	5,350	4,980	4,900	5,200	5,070	0,007	0,350	-0,020	-0,100	0,200	0,070
4	4,005	4,290	3,989	4,000	4,300	3,950	0,005	0,290	-0,011	0,000	0,300	-0,050
3	2,941	3,210	2,967	3,000	3,200	3,010	-0,059	0,210	-0,033	0,000	0,200	0,010
2	2,001	2,150	1,993	2,000	2,100	1,950	0,001	0,150	-0,007	0,000	0,100	-0,050
1	0,977	1,060	0,990	1,000	1,100	0,900	-0,023	0,060	-0,010	0,000	0,100	-0,100
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020
-1	-1,038	-1,100	-1,003	-1,000	-1,100	-1,020	-0,038	-0,100	-0,003	0,000	-0,100	-0,020
-2	-2,071	-2,170	-1,977	-2,000	-2,100	-2,010	-0,071	-0,170	0,023	0,000	-0,100	-0,010
-3	-3,072	-3,240	-2,966	-3,000	-3,100	-2,940	-0,072	-0,240	0,034	0,000	-0,100	0,060
-4	-4,032	-4,310	-3,935	-3,900	-4,100	-3,930	-0,032	-0,310	0,065	0,100	-0,100	0,070
-5	-5,029	-5,380	-4,930	-5,000	-5,200	-4,940	-0,029	-0,380	0,070	0,000	-0,200	0,060
-6	-6,061	-6,440	-5,943	-6,000	-6,200	-5,920	-0,061	-0,440	0,057	0,000	-0,200	0,080
-7	-7,072	-7,510	-6,939	-7,000	-7,200	-6,930	-0,072	-0,510	0,061	0,000	-0,200	0,070
-8	-8,057	-8,580	-7,916	-8,000	-8,300	-7,950	-0,057	-0,580	0,084	0,000	-0,300	0,050
-9	-9,061	-9,640	-8,886	-9,000	-9,300	-8,920	-0,061	-0,640	0,114	0,000	-0,300	0,080
-10	-10,055	-10,710	-9,846	-9,900	-10,300	-9,910	-0,055	-0,710	0,154	0,100	-0,300	0,090



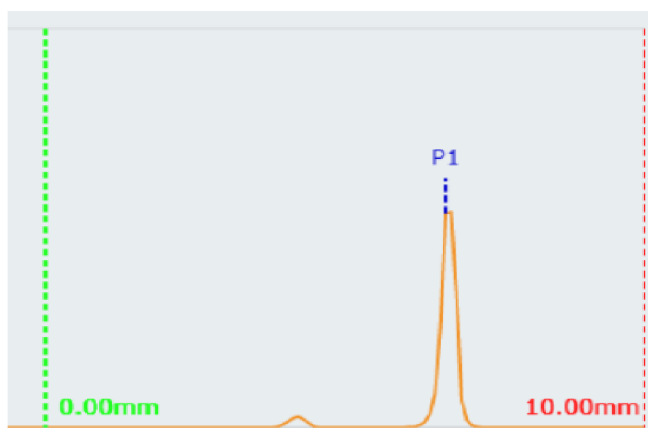
Obr. 10: Závislost diference na pozici laboratorního stolu při náklonu vzorku 0°

2.2. Vyhodnocení testovaných senzorů

Pozice mikrometrického stolku byla volena jako referenční vzdálenost. Hodnoty získané konfokálním snímačem Precitec Optronic se sondou 25 mm se lišily v řádu setin mm.

Triangulační snímač vzdálenosti SICK OD5000-C85W20 po odpovídající kalibraci (může se lišit pro jiné okrajové podmínky) měřil také s chybou několika setin, v nejhorším případě jedné desetiny. U snímače bylo nutné sledovat, který peak je vyhodnocován, v některých případech bylo nutné ručně vybrat (přepnout) na správný peak (obr. 11), aby snímač neodečítal druhou vzdálenost (vzdálenost + tloušťku skla). Pojem peak znamená maximální hodnotu rozlišitelnou ve zvoleném rozsahu, která je přepočítána na vzdálenost od snímače. To by bylo možné obejít vlastní filtrací a vyhodnocovacím softwarem. Ojedinele snímač správný peak vůbec nerozeznal. Tomu odpovídají i nesprávné hodnoty v tabulce naměřených hodnot. Nesprávně kalibrovaný snímač odečítal hodnoty s chybou až 0,5 mm.

Výstupní signál ultrazvukového snímače Migatron RPS-412A-10-V byl během měření zatížen vysokou úrovní parazitního šumu, který negativním způsobem ovlivnil výslednou přesnost měření chybou do 0,1 mm. Na konci rozsahu (200 mm) nebyl snímač schopen vyčítat vzdálenost od skla s náklonem 12°, v první půlce rozsahu (120 mm) ano.



Obr. 11: Nesprávně odečtený PEAK při měření triangulačním senzorem SICK OD5000

Ultrazvukový snímač Baumer UNCK 09U6914/KS35AD1 byl testován v polovině rozsahu (80 mm). Naměřené hodnoty se od referenčních lišily v řádu setin mm. Snímač však neumožňuje odměřit vzdálenost od vzorku s náklonem o více než cca 9°.

Pro měření geometrie čelních automobilových skel byl vybrán ultrazvukový snímač Baumer UNCK 09U6914/KS35AD1 z důvodu dobré přesnosti, malých zástavbových rozměrů a relativně nízké ceny oproti ostatním porovnávaným snímačům.

3. Návrh metodiky měření a koncepce laboratorního pracoviště

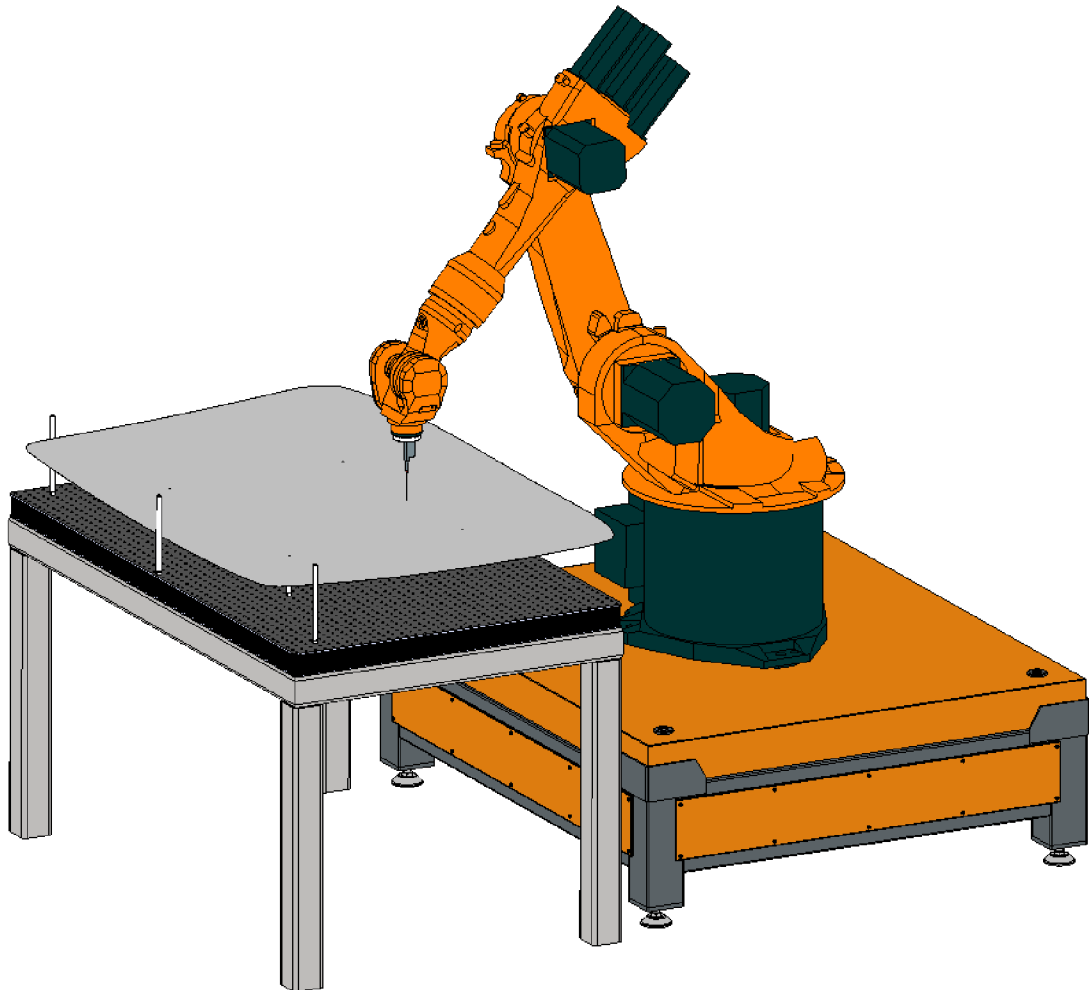
Cílem práce bylo navrhnout univerzální pracoviště umožňující bezkontaktní měření čelních automobilových skel s využitím jednoho nebo více testovaných snímačů. Během řešení budou prověřeny možnosti nasazení průmyslového robotu v procesu měření jako moderní alternativa k standardně používaným postupům ve výrobě automobilových skel. Postupně bude navržena metodika měření a ve variantách zpracován návrh koncepčního řešení středícího přípravku pro polohování (centrování) měřeného skla.

3.1. Metodika měření

Principem bezkontaktního měření čelních skel je měření vzdálenosti, kdy senzor v ideálním případě měří stejnou vzdálenost normálově k snímanému povrchu ve všech místech měření. Nutností pro tuto metodiku je znalost 3D modelu snímaného čelního skla v deformovaném stavu, tj. podepřeného skla deformovaného vlastní vahou, aby bylo možné vygenerovat dráhy robotu, které jsou ekvidistantní vůči snímanému objektu. Pro měření jsou vygenerovány dráhy koncového bodu robotu pomocí SW ze známého 3D modelu deformovaného čelního skla.

Přesnost použitého snímače závisí na odklonu od normály snímaného povrchu. Aby bylo možné zaručit podmínku měření ve směru normály od obecné geometrie skla, tak je snímač připevněn na přírubu robotu se 6° volnosti. Zjednodušený princip snímání je zobrazen na následujícím obrázku (obr. 12).

Předpokladem pro správné měření je laboratorní stand s možností středění snímaného objektu do měřicí pozice vůči robotu, správný 3D model skla nebo referenční vzorek skla. Návrhy laboratorního standu jsou zpracovány v další kapitole.



Obr. 12: Zobrazený princip snímání geometrie čelního automobilového skla

3.2. Koncepte standu pro měření geometrie čelních automobilových skel

Koncept standu byl navrhnout s ohledem na požadavky automatického středění skla do měřicí pozice s dostatečnou přesností a opakovatelností. Dalším požadavkem na stand byla univerzálnost použití na vybrané typy čelních automobilových skel.

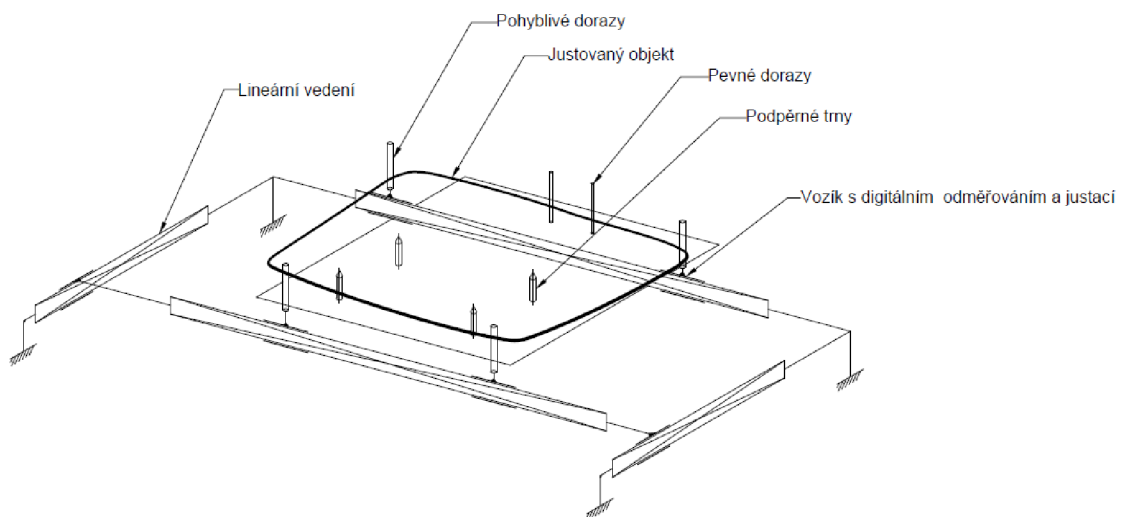
Základními součástmi pro stand je prostorový, tuhý svařovaný rám, na který navazuje systém podpěrných trnů, které definují pozici skla ve vertikální ose (z). Dále jsou to pevné a

pohyblivé dorazy. V dalších podkapitolách jsou zpracovány a popsány jednotlivé koncepty středícího přípravku.

3.2.1. Varianta A

Principem varianty A (obr. 13) je manuální nastavení jednotlivých dorazů do pozice odpovídající vnější hraně čelního automobilového skla v deformovaném stavu. Varianta se skládá z dvojice navzájem kolmých translačních jednotek, jejichž vozíky umožňují flexibilním způsobem nastavovat pozice obvodových válcových dorazů v závislosti na typu skla. První dvojice dorazů umožňuje měnit polohu pouze v ose (x), další dvojici pak řeší polohu ve dvou osách x a y. K správnému nastavení dorazů je třeba lineárního vedení s odměřováním a justací pro zachování této pozice. Pohyblivé dorazy jsou ve schématu zobrazeny jako válcové, avšak za předpokladu zakládání měřeného objektu robotem, by bylo lepší vyrobit dorazy kuželovité, aby objekt lépe vedly do měřicí pozice. Měření je prováděno pomocí senzoru připevněného ke koncové přírubě robotu.

Tato varianta, jak již bylo zmíněno, funguje na principu manuálního nastavení dorazů, a proto není příliš vhodná do automatizovaného provozu.



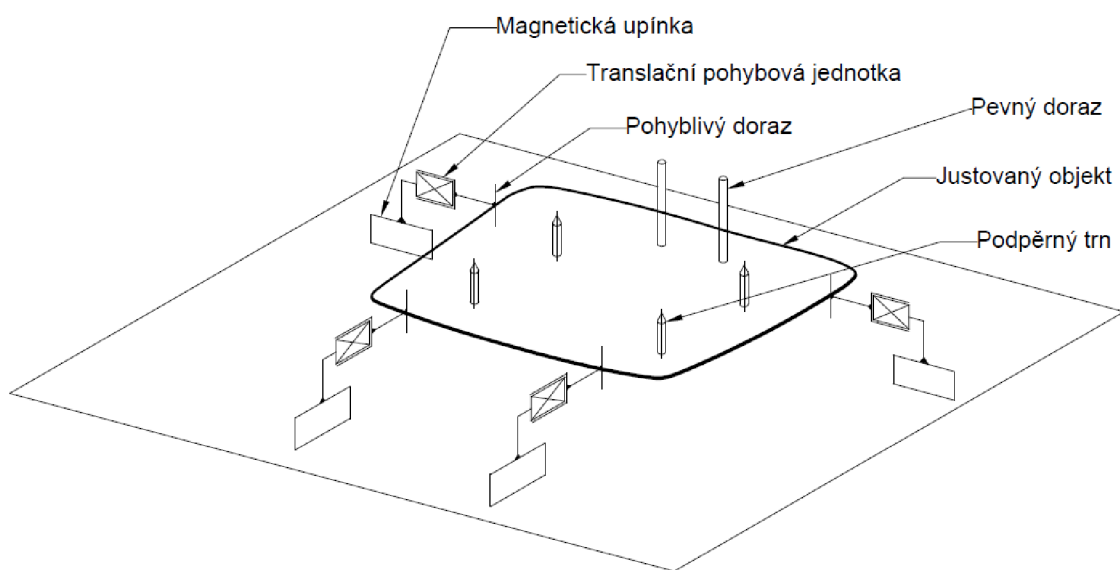
Obr. 13: Schéma varianty A

3.2.2. Varianta B

Další varianta (obr. 14) byla navržena s ohledem na potřebu automatizovaného pracoviště, v tomto případě poloautomatického. Principem této varianty je magnetické upnutí translačních pohybových jednotek s pohyblivými dorazy na upínací desku. Dalšími součástmi

jsou nepohyblivé dorazy, které je možné v případě potřeby posunout na jinou pozici tak, aby odpovídaly příslušnému typu skla. Pozice magnetických upínek s translačními jednotkami operátor nastaví pomocí laserového paprsku namontovaného k přírubě robotu, který jednotlivé pozice promítá na upínací desku. Stejným principem by se nastavily i pozice podpěrných trnů a pevných dorazů.

Výhodou této metody je konstrukční jednoduchost, avšak nevýhodou je potřeba přenastavení pozice akčních členů v případě změny typu čelního skla. Varianta je tedy náročnější z pohledu off-line programování robotu, kde je třeba vytvořit program pro měření a zároveň pro nastavení pozice akčních členů (magnetických upínek).

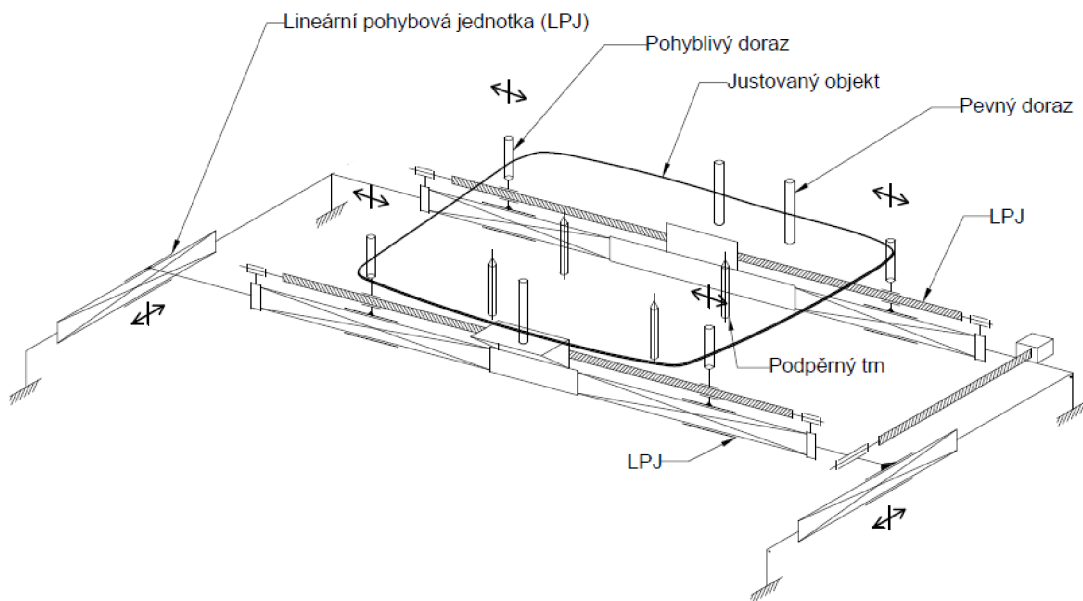


Obr. 14: Schéma varianty B

3.2.3. Varianta C

Poslední variantou laboratorního standu (obr. 15) je komplexní řešení se zaměřením na univerzálnost a automatizaci vycházející z varianty A. Stejně jako předchozí varianty, se u této vyskytují podpěrné trny, pevné dorazy a pohyblivé dorazy. Pohyblivé dorazy jsou navrženy tak, aby jejich vzájemný pohyb byl symetrický. Pohyblivé dorazy jsou schopné se během krátké chvíle překonfigurovat na jiný typ skla bez nutnosti manuálního zásahu. Principem této varianty je založení měřeného skla do přibližné pozice pomocí robotu a následně se pohybem jednotlivých pohyblivých dorazů vystředí a zafixuje. V případě potřeby je možné podpěrné trny i pevné dorazy

přemístit. Výhodou tohoto řešení je univerzálnost použití na různé typy skel, tím je vhodné pro automatizovanou linku. Tato varianta byla dále zkonstruována v další kapitole.



Obr. 15: Schéma varianty C

4. Konstrukční řešení přípravku pro polohování měřeného skla

Pro konstrukční řešení přípravku se vycházelo ze 4 typů různých čelních automobilových skel, které by přípravek měl být schopen správně vystředit a zafixovat pro následné měření pomocí robotu. Ze zpracovaných koncepčních návrhů uvedených v kap. 3.2 vyplynulo, že nejvhodnějším řešením pro nasazení v průmyslu je varianta C, pro kterou byl v rámci řešení diplomové práce vytvořen 3D počítačový model a zpracována výkresová dokumentace. Formou počítačového modelu a dokumentace bylo zpracováno i konstrukční řešení efektoru, který integruje ultrazvukový senzor pro detekci geometrie skla a laser pro případnou identifikaci polohy podpěrných trnů. Ke konstrukčnímu návrhu byl využit SW Autodesk Inventor Professional 2020.

4.1. Konstrukce polohovacího přípravku pro fixaci skla

Jedním ze zásadních parametrů pro konstrukci polohovacího přípravku byla znalost potřebné síly pro posunutí skla po podpěrných trnech. Předpokládaná hmotnost čelního automobilového skla je cca 15 kg při zatížení vlastní hmotností. Součinitel tření pro dvojici sklo – kov se pro suchý povrch při statickém zatížení pohybuje mezi hodnotou 0,5 – 0,7. [9]

$$F_G = F_N = m \cdot g = 15 \cdot 9,81 \cong 150 \text{ N} \quad (1)$$

$$F_t = F_N \cdot \mu = 150 \cdot 0,7 \cong 105 \text{ N} \quad (2)$$

Síla F_t je tedy celkovou třecí silou působící na podpěrné trny, kterou je třeba překonat pohybovou jednotkou, aby došlo k posunu skla. Vypočtená třecí síla je tedy v nejnepriznivějším stavu, kdy je pohyb kuličky navrženého podpěrného trnu zastaven. Původní návrh podpěrného trnu jako jednolitého hliníkového kuželu se zaoblením byl přepracován z důvodu možného poškození skla při pohybu. Obě varianty jsou zobrazeny na obr. 16. Nový podpěrný trn se skládá z obrobeného těla z hliníkové slitiny a nalisovaného tělíska od firmy ERWIN HALDER KG s pružinou a kuličkou, která umožní snadný posuv skla při středění. Podpěrný trn je připevněn



Obr. 16: Varianty podpěrných trnů: původní (vlevo) a nový (vpravo)

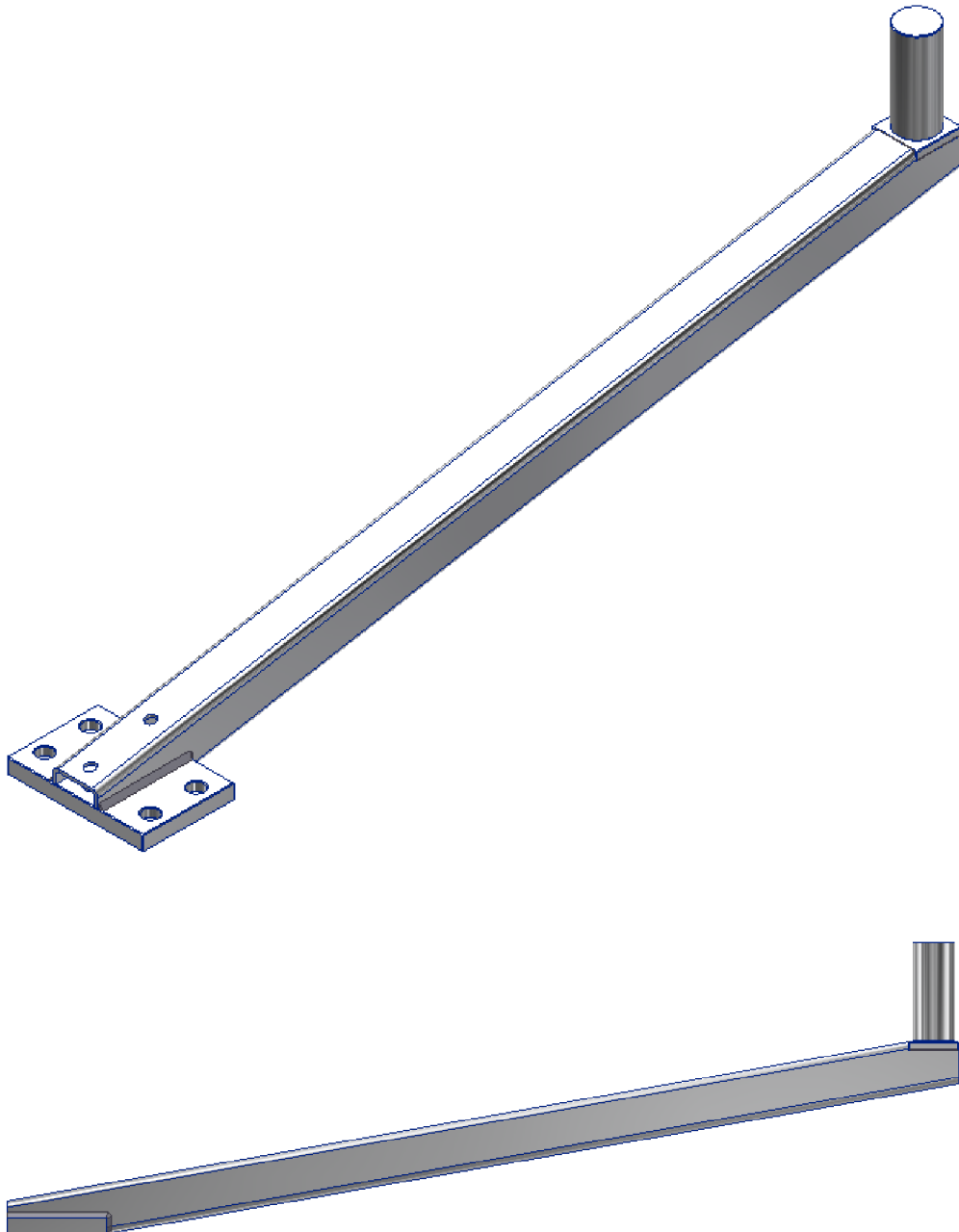
pomocí šroubu do obrobené desky ze slitiny hliníku a jeho poloha přesně určena dírou pro středící dutinku. Obrobená deska je opatřena otvory pro snadné přemístění podpěrných trnů v závislosti na velikosti snímaného objektu pomocí šroubu. V případě potřeby lze snadno vyměnit za jinou desku.

Dalším krokem pro konstrukci polohovacího přípravku bylo vybrat nebo navrhnout translační pohybové jednotky s pohonem pro pohyb skla. Ve schématu (obr. 15) je zobrazena pohybová jednotka se šroubovým převodem, ale pro tuto aplikaci bylo vybrána pohybová jednotka firmy FESTO, typ ELGG, která umožňuje synchronní protiběžný pohyb. Jedná se o

Obecné technické údaje		35	45	55
velikost		35	45	55
konstrukce		přímočarý elektromechanický pohon s ozubeným řemenem		
vedení		vedení v kuličkových oběžných pouzdech kluzné vedení		
montážní poloha		libovolná		
pracovní zdvih na saně	[mm]	50 ... 700	50 ... 900	50 ... 1200
max. posuvová síla F_x ¹⁾	[N]	50	100	350
max. moment při chodu naprázdno	[Nm]	0,18	0,3	0,5
max. hnací moment	[Nm]	0,46	1,24	5
max. odpor při chodu naprázdno	[N]	10,8	16,1	27,9
max. rychlost				
vedení v kuličkových oběžných pouzdech	[m/s]	3		
kluzné vedení	[m/s]	1		
max. zrychlení ²⁾	[m/s ²]	50		
opakovatelná přesnost	[mm]	±0,1		

Obr. 17: Technické údaje jednotky ELGG [10]

jednotku s ozubeným řemenem s opakovatelnou přesností polohování $\pm 0,1$ mm (obr. 17). Pro polohování, resp. středění byly vybrány 2 jednotky ELGG-TB-55-200-0H tohoto typu se zdvihem 200 mm, který byl zvolen s ohledem na rozdíl maximálních rozměrů čelních skel (obr. 19) a maximální přípustné posuvové síly F_x .



Obr. 18: 3D model konzole s dorazem

Konzole s dorazy (obr. 18) jsou navrženy tak, aby nebylo nutné vybrat translační pohybové jednotky s velkým zdvihem, které souvisí s cenou. Tyto konzole mohou být v případě nutnosti změněny tak, aby odpovídali větším i menším rozměrům čelních automobilových skel. Konzola

je navržena jako tuhý svařenec z hliníkové slitiny, který je šrouby spojen s vozíkem pohybové jednotky a jeho poloha jednoznačně určena středícími dutinkami.

Předpokládají se 2 režimy rychlosti pohybu translačních jednotek. Režim rychloposuvu, který je možný od konce zdvihu translační jednotky až po hranici 10 mm od vnější hrany skla a režim snížené rychlosti pro posuv skla po podpěrných trnech.

Pro režim snížené rychlosti byl výběr motorů pro pohybové jednotky dán jednoduchým vztahem;

$$M_{P\ddot{R}} = F_t \cdot r_{\ddot{r}} \quad (3)$$

Účinný poloměr řemenice $r_{\ddot{r}}$ zjištěn z katalogového listu FESTO – ELGG

$$r_{\ddot{r}} = 14,33 \text{ mm} = 0,014 \text{ m} \quad (4)$$

$$M_{P\ddot{R}} = 105 \cdot 0,014 = 1,47 \text{ Nm} \quad (5)$$

$M_{P\ddot{R}}$ je minimální výstupní moment z převodovky potřebný k pohonu jednotky, aby mohlo dojít k posuvu skla po podpěrných trnech. Pro snížení vstupního momentu byla vybrána planetová převodovka EMGA-60-P-G5-EAS-60 s převodem 5:1

$$M_{M_{MIN}} = \frac{M_P}{i_P} = \frac{1,47}{5} = 0,29 \text{ Nm} \quad (6)$$

$$M'_{P\ddot{R}} = M_{n_M} \cdot i = 0,6 \cdot 5 = 3 \text{ Nm} < M_{MAX} = 5 \text{ Nm} \dots\dots\dots \text{vyhovuje} \quad (7)$$

Minimální hodnota hnacího momentu pro motor M_M je 0,29 Nm, proto byl vybrán servomotor EMME-AS-60-S-LS-ASB se jmenovitým momentem M_{n_M} 0,6 Nm.

Vypočtená hodnota momentu vstupujícího do pohybové jednotky $M'_{P\ddot{R}}$ nepřevyšuje maximální hodnotu M_{MAX} použitelnou pro translační jednotku ELGG, což znamená, že vybraný motor vyhovuje.

V režimu rychloposuvu již nelze zanedbat dynamické účinky posouvajících se hmot a je nutné provést kontrolu

Předpokladem je maximální posuvová rychlost vozíku $v_{MAX} = 0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Výpočet úhlové rychlosti řemenice $\omega_{\ddot{r}}$ je dán vztahem;

$$\omega_{\ddot{r}} = \frac{v_{MAX}}{r_{\ddot{r}}} = \frac{0,9}{0,014} \cong 64,3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (8)$$

Pro určení momentu setrvačnosti J_A platí;

$$J_A = (J_R + J_{P\ddot{R}}) \cdot i^2 = (0,086 + 0,078) \cdot 5^2 \cong 4,1 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad (9)$$

kde J_R je moment setrvačnosti motoru, $J_{PŘ}$ je moment setrvačnosti převodovky a i je převodovým poměrem převodovky. Tyto hodnoty byly zjištěny z katalogových listů FESTO.

Pro výpočet momentu setrvačnosti zátěže J_L platí rovnice (10);

$$\frac{1}{2} \cdot J_L \cdot \omega_{\dot{\gamma}} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot J_{\dot{\gamma}} \cdot \omega_{\dot{\gamma}} + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot m_V \cdot v_{MAX}^2 \quad (10)$$

kde $J_{\dot{\gamma}}$ je moment setrvačnosti řemenice pohonu a m_V je hmotnost vozíku translační jednotky s připojenou konzolí (posouvající se hmotnost). Hodnota momentu setrvačnosti řemenice byla zjištěna z katalogového listu FESTO.

Z rovnice (10) lze vyjádřit vzorec (11) pro výpočet momentu setrvačnosti zátěže J_L ;

$$J_L = 2 \cdot J_{\dot{\gamma}} + m_V \cdot r_{\dot{\gamma}} = 0,764 + 2 \cdot 1,4 \cong 3,6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad (11)$$

Dále musí platit rovnice;

$$J_L = 3,6 < 3 \cdot J_A = 12,3 \dots\dots\dots \text{vyhovuje} \quad (12)$$

Vypočtená hodnota momentů setrvačnosti dle rovnice (12) je platná, což znamená, že navrhovaný pohon translační jednotky vyhovuje.

Dále je proveden výpočet rozběhového, ustáleného, brzdného a středního momentu. Čas rozběhu t_1 byl zvolen 0,1 s stejně jako čas brždění t_3 , čas ustáleného momentu t_2 a doba prodlevy t_1 . Síla při chodu na prázdko F_p zjištěna z katalogového listu FESTO.

Pro výpočet momentů platí vztahy;

$$M_2 = F_p \cdot r_{\dot{\gamma}} = 27,9 \cdot 0,014 \cong 0,4 \text{ Nm} \quad (13)$$

$$M_1 = M_2 + (J_A + J_L) \cdot \varepsilon_{\dot{\gamma}} = M_2 + (J_A + J_L) \cdot \frac{\omega_{\dot{\gamma}}}{t_1} \quad (14)$$

$$M_1 = 0,4 + (4,1 + 3,6) \cdot 10^{-4} \cdot \frac{64,3}{0,1} \cong 0,9 \text{ Nm} \quad (15)$$

$$M_3 = (J_A + J_L) \cdot \varepsilon_{\dot{\gamma}} - M_2 = (4,1 + 3,6) \cdot 10^{-4} \cdot \frac{64,3}{0,1} - 0,4 \cong 0,1 \text{ Nm} \quad (16)$$

$$M_{STŘ} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_C}}$$

$$M_{STŘ} = \sqrt{\frac{0,9^2 \cdot 0,1 + 0,4^2 \cdot 0,1 + 0,1^2 \cdot 0,1}{0,4}} \cong 0,5 \text{ Nm} \quad (17)$$

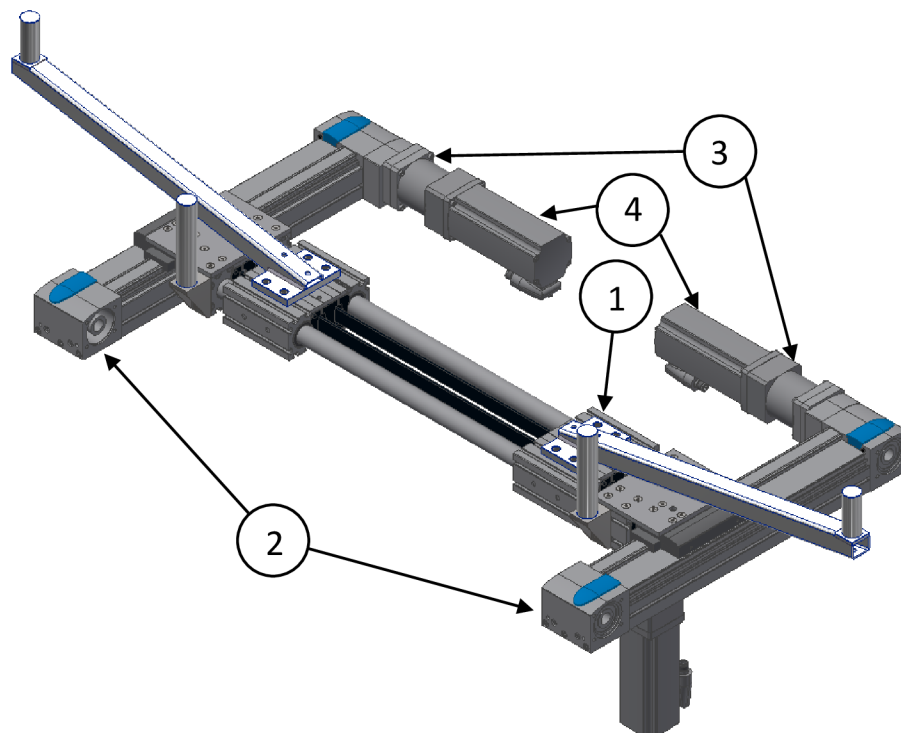
Zároveň pro pohon platí;

$$\frac{M_{STŘ}}{i} = 0,1 Nm < M_{nM} = 0,6 Nm \dots \text{vyhovuje} \quad (18)$$

$$M_{STŘ} = 0,5 Nm < M'_{PŘ} = 3 Nm \dots \dots \text{vyhovuje} \quad (19)$$

Dle provedených výpočtů bylo ověřeno, že výběr servomotoru, převodovky i pohybové jednotky vyhovují voleným parametrům a lze je použít pro pohon středícího přípravku. Analogicky byl výpočet proveden pro jednotky EGC, které také vyhovují použití pro pohon středícího přípravku.

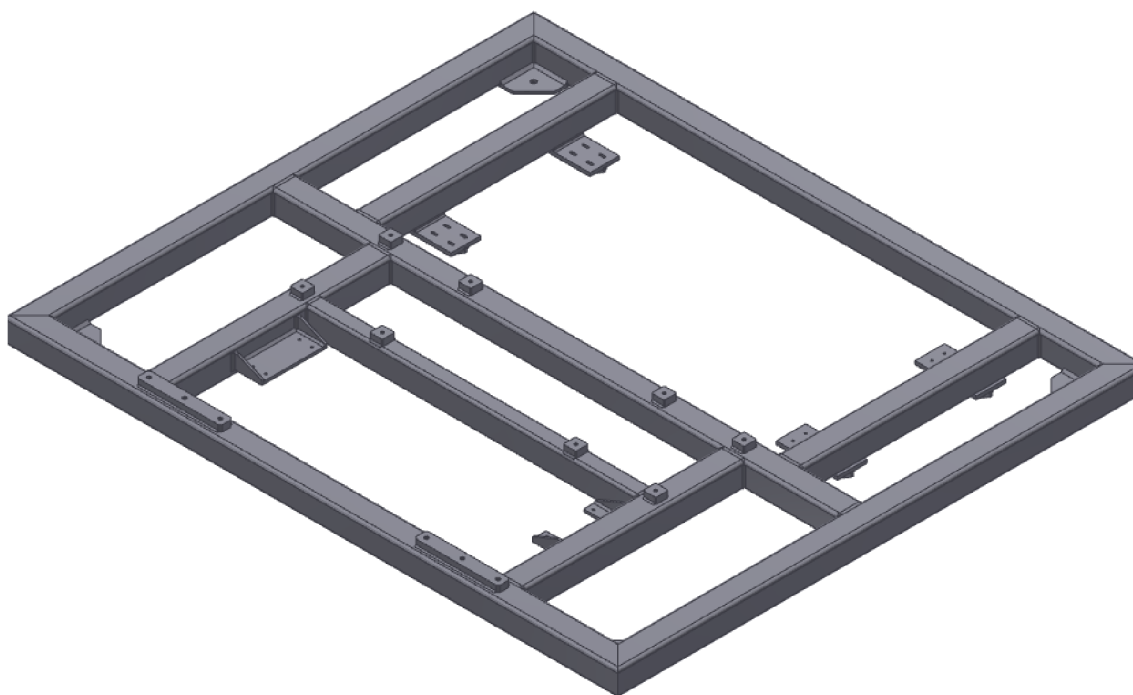
Sestava konstrukčního řešení funkčního uzlu středícího přípravku je zobrazena na obr. 20. Jedna z jednotek ELGG je uložena pevně v rámu stolu středícího přípravku, druhá jednotka (pozice 1) je uložena kolmo na translačních pohybových jednotkách tak, aby byl umožněn pohyb v ose symetrie čelního automobilového skla. Na základě přechodých výpočtů byly vybrány pohybové jednotky s ozubeným řemenem firmy FESTO, konkrétně EGC-80-250-TB-KF-OH-GP (pozice 2). Přesnost polohování jednotky EGC-80 je $\pm 0,08$ mm s maximální posuvovou silou 350 N a pracovním zdvihem 250 mm. K těmto jednotkám byly připojeny stejné planetové převodovky EMGA (pozice 3) pro zvýšení krouticího momentu. Pro pohon jednotek EGC byl zvolen stejný motor EMME (pozice 4) jako pro jednotky ELGG. Aby byla dosažena vzájemná rovnoběžnost těchto jednotek, tak je uložení pro jednu jednotku pevné a druhé s oválnou dírou



Obr. 20: Konstrukční řešení funkčního uzlu středícího přípravku

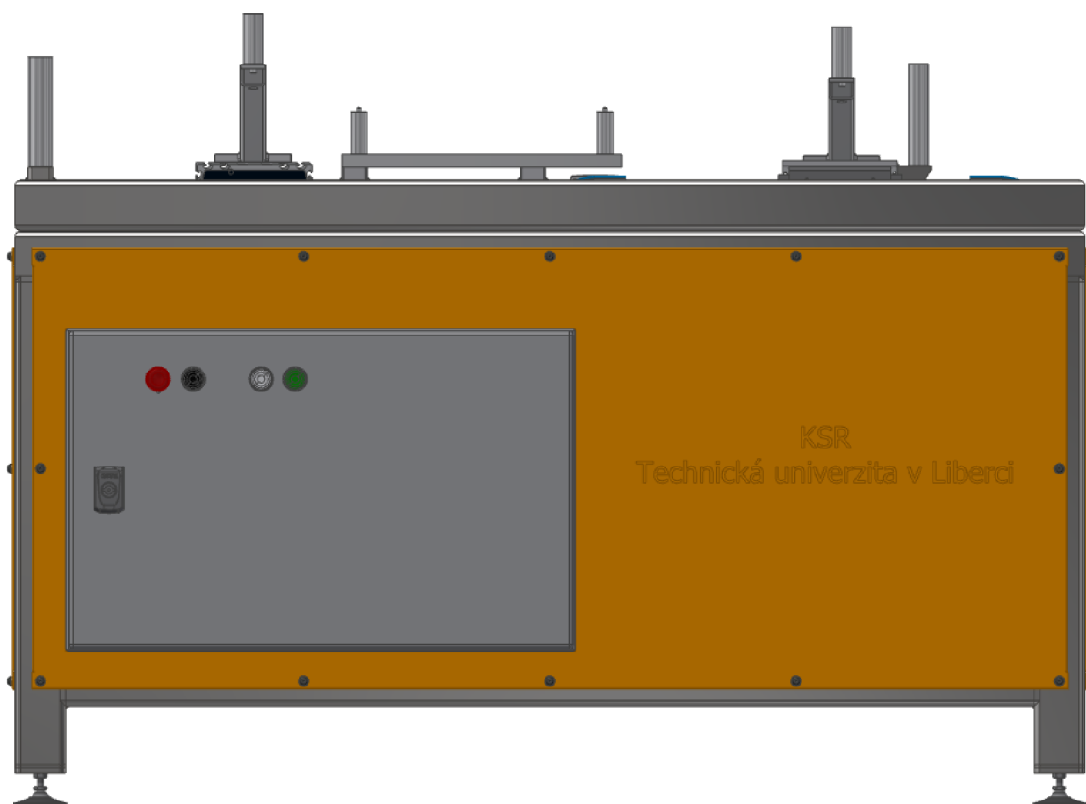
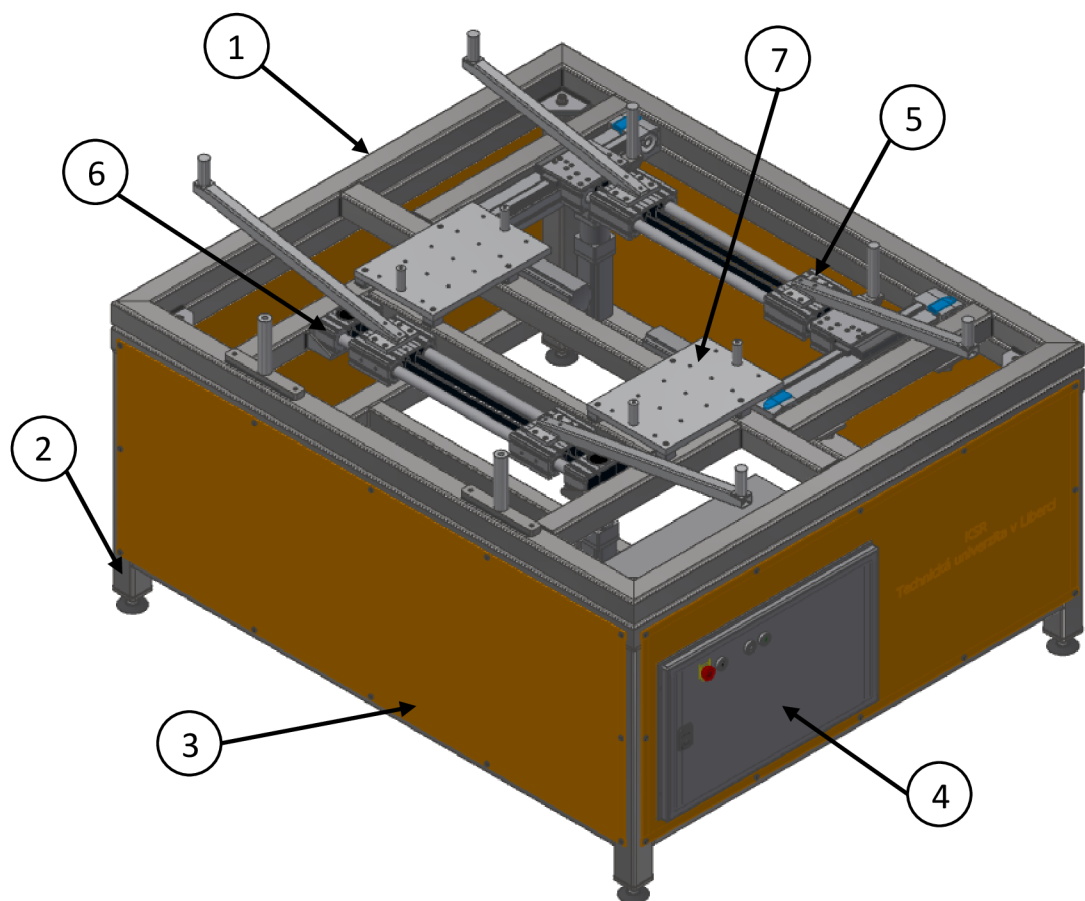
pro vymezení výrobních nepřesností. Poloha jednotky ELGG vůči jednotkám EGC je jednoznačně určena středícími dutinkami v pojezdových vozících jednotek EGC.

Rám stolu polohovacího přípravku byl z důvodu lepší montáže a jednodušší výroby rozdělen na 2 části, které jsou spojeny šroubovým spojem. Obě části rámu jsou zkonstruovány jako tuhé ocelové svařence. Jednotlivé díly jsou navařeny na ocelovou konstrukci a následně je celý rám obroben. Důležité jsou zejména dosedací plochy pro jednotlivé translační jednotky. Sestava svařené a obrobené horní části rámu polohovacího přípravku bez translačních jednotek je zobrazena na obr. 21.



Obr. 21: Sestava horní části rámu polohovacího přípravku

Dalším krokem v konstrukci polohovacího přípravku bylo vytvoření celkové sestavy (obr. 22), včetně elektrické rozvodné skříně (pozice 4) od firmy Rittal, která obsáhne veškerou řídicí elektroniku (PLC, řídicí jednotky elektromotorů atd.). Na horní část rámu (pozice 1) jsou připevněny pohybové jednotky s motory (posuvná – pozice 5 a pevná – pozice 6), pevné dorazy a desky s podpěrnými trny (pozice 7). Spodní část rámu polohovacího přípravku (pozice 2) je opatřena krytováním (pozice 3) z ocelových plechů připevněných pomocí šroubů k rámu. Rám je opatřen stavitelnými nohama pro ustavení do roviny.

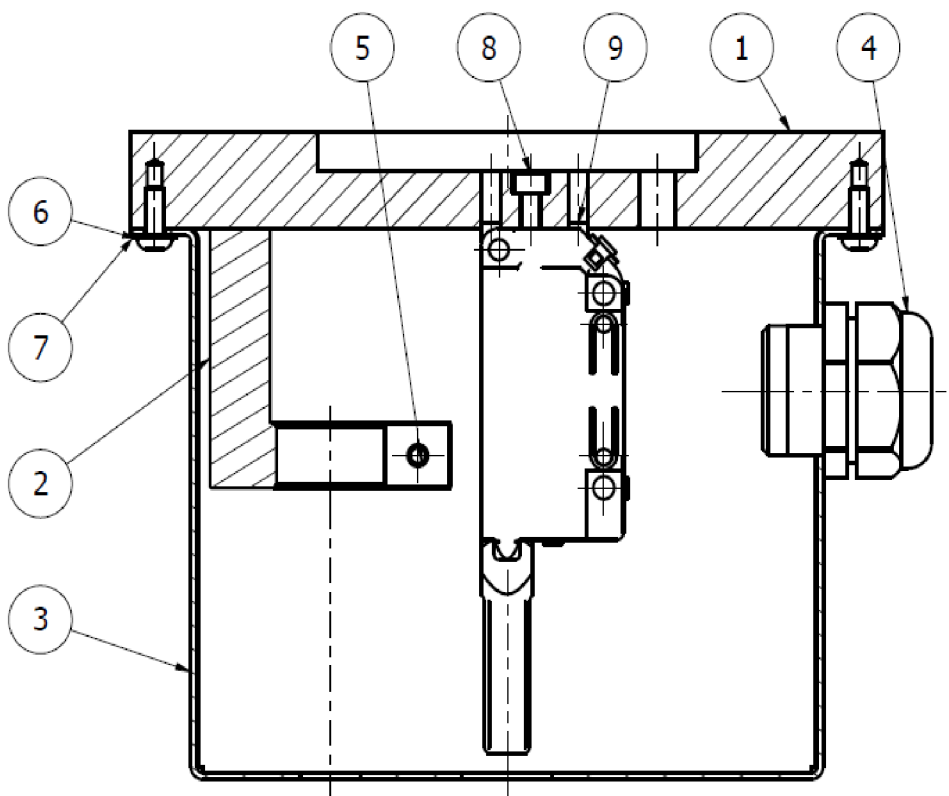


Obr. 22: Celkový 3D model polohovacího přípravku

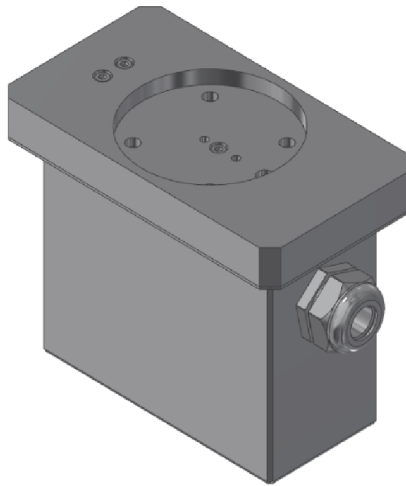
4.2. Konstrukce efektoru

Důležitým prvkem při bezkontaktním měření čelních automobilových skel je efektor (obr. 23, 24) připojený ke koncové přírubě robotu. Efektor se skládá z obráběné základny z hliníkové slitiny (pozice 1), na které je připevněn pomocí šroubu (pozice 8) ultrazvukový senzor Baumer UNCK 09U6914/KS35AD1 (pozice 9) a držák pro bodový laser $\varnothing 18$ mm (pozice 2). Ke svěrnému upevnění bodového laseru slouží šroub (pozice 5). V případě potřeby lze změnit držák laseru na odpovídající průměr nebo úplně odstranit. Laser slouží k promítání paprsku a vizuální kontrole správné pozice pro pevné dorazy nebo podpěrné trny. Montážní rozměry základny vycházejí ze standardizované příruby robotů.

Efektor je rovněž doplněn ochranným krytem (pozice 3), aby nedošlo k poškození senzoru při kolizi. Plášť je zkonstruován jako ohýbaný svařenec z hliníkové slitiny, který je připevněn pomocí šroubů (pozice 7) s podložkami (pozice 6). K plášti je připojena kabelová průchodka (pozice 4) pro energetické a signálové vedení.



Obr. 23: Sestava efektoru v řezu

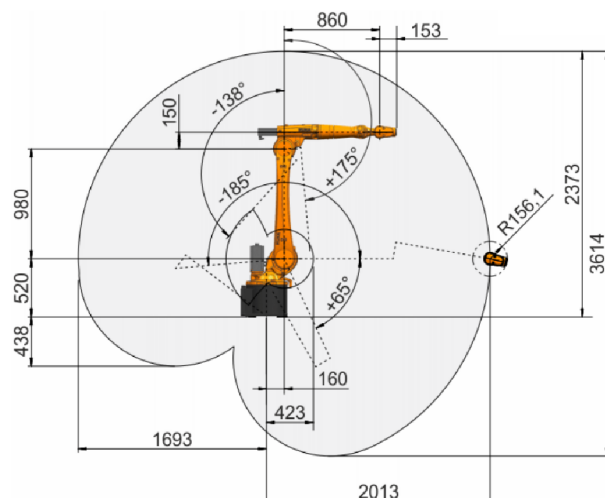


Obr. 24: 3D model efektoru

4.3. Vizualizace výsledného robotického pracoviště

Na závěr kap. 4 byl zpracován návrh robotického pracoviště (obr. 26) použitelného v průmyslovém provozu. Předpokládá se, že navržené pracoviště bude instalováno paralelně s hlavním tokem výroby na studeném konci výrobní linky na výstupu z chladicí pece, kde jsou skla automaticky překládána na dopravník prostřednictvím angulárního průmyslového robotu. Cílem je realizovat kontrolu jakosti vybraných skel, která budou robotem založena do měřicí stanice na podpěrné trny středicího přípravku. Po založení skla proběhne fáze středění (a upnutí) a následné měření pomocí snímače na jiném angulárním robotu. Po skončení fáze měření je výrobek opět vrácen na dopravník. Pracoviště je z důvodu bezpečnosti opatřeno ochranným plotem firmy Axellent.

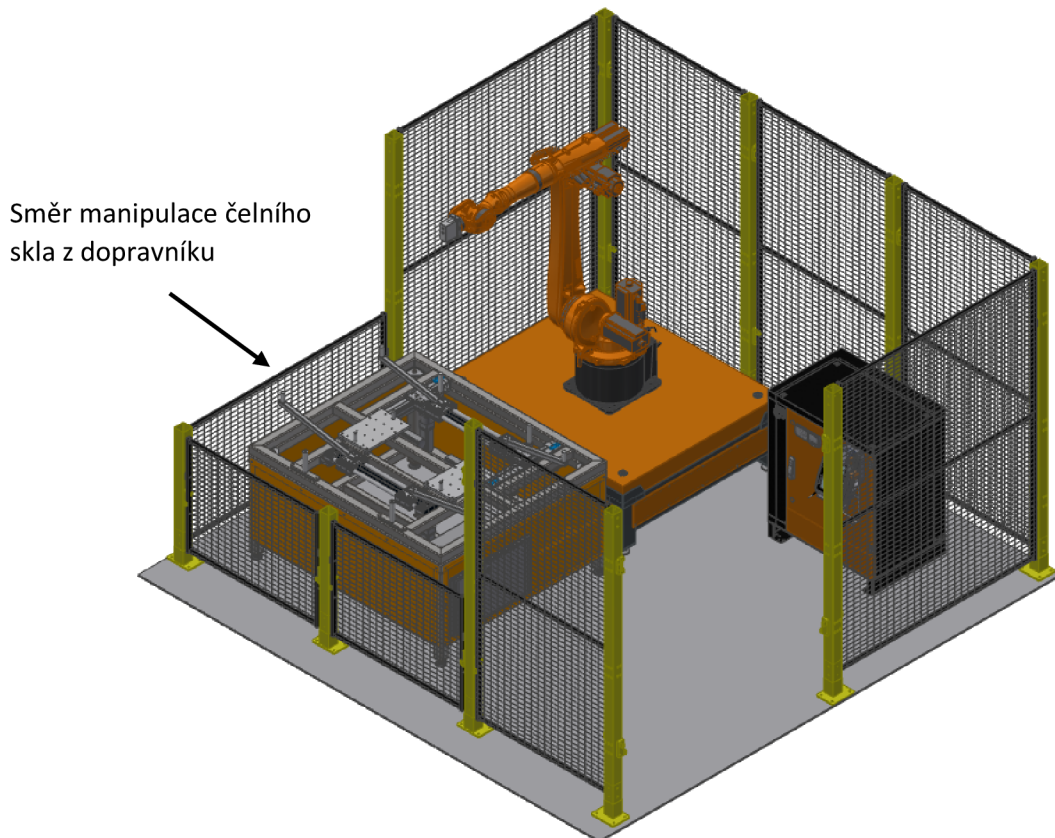
Pro měření bylo nutné vybrat robot s dostatečným dosahem a zároveň i dostatečnou opakovatelnou přesností polohování. Na základě těchto požadavků byl vybrán robot KR 8 R2010-



Obr. 25: Pracovní zóna robotu KR 8 R2010-2 [11]

2 od firmy KUKA. Tento robot je schopen dosáhnout opakovatelné přesnosti polohování $\pm 0,04$ mm a maximálního dosahu 2013 mm se jmenovitou hmotností břemene 8 kg (obr. 25) [11].

Robot zobrazený ve výsledné vizualizaci robotického pracoviště (obr. 26) slouží pouze k účelu měření a nerealizuje manipulaci s čelním automobilovým sklem. Založení snímaného objektu provádí robot, který je mimo ochranný plot.



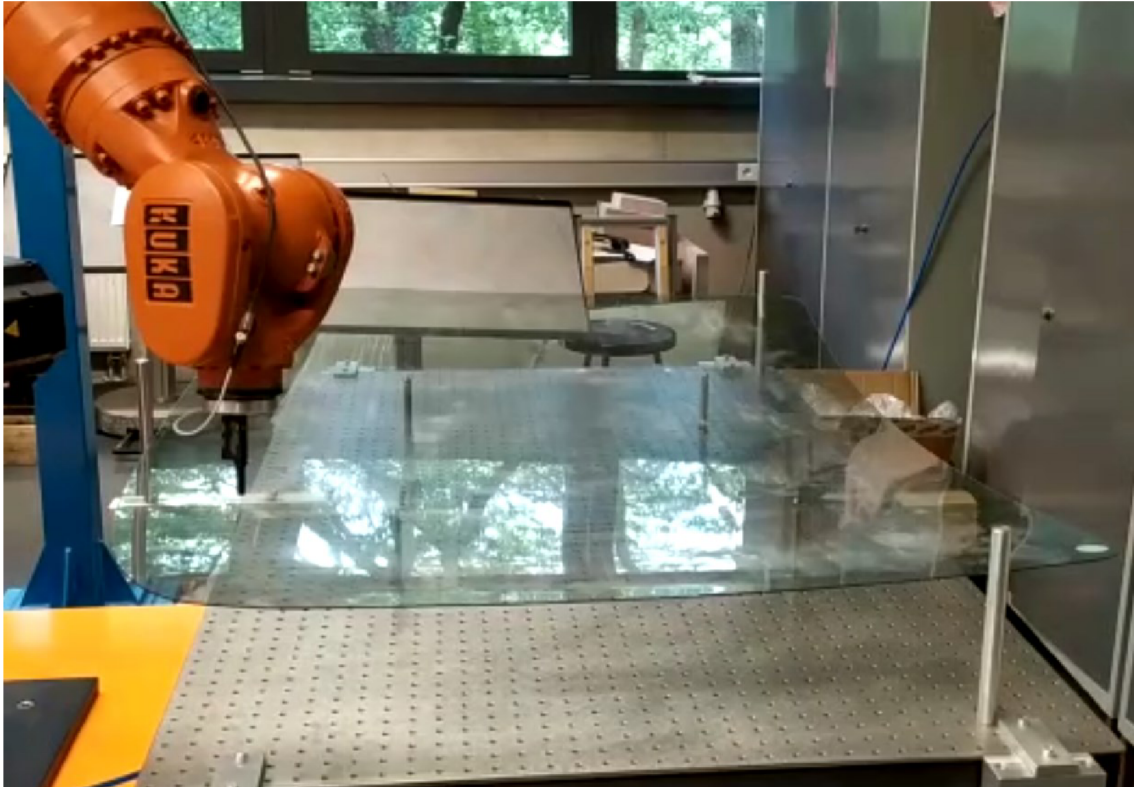
Obr. 26: Vizualizace robotizovaného pracoviště

5. Pilotní prověření navržené metodiky v laboratorních podmínkách

Na základě analýzy metodiky provedené v kap. 3 a výběru senzoru v kap. 2 bylo navrženo laboratorní pracoviště k ověření dané problematiky. Pracoviště bylo zrealizováno v laboratořích katedry sklářských strojů a robotiky.

Cílem laboratorních experimentů bylo prověřit metodiku měření prostřednictvím robotu bez realizace automatizovaného systému polohovacího přípravku (obr. 27). Místo navrhovaného robotu KR 8 R2010-2 byl k dispozici robot KR 16 R1610-2, který má menší dosah, ale opakovatelná přesnost polohování je shodná. Rovněž je jiný středící přípravek, místo kterého je pracovní stůl s rovinnou kompozitovou deskou od firmy Newport, do které jsou pevné dorazy

i podpěrně trny našroubovány. Středění probíhá manuálně pomocí kalibračního trnu připojeného ke koncové přírubě robotu. Ze známého 3D modelu deformovaného skla bylo možné vygenerovat dráhy pro pohyb robotu s kalibračním trnem, který kopíruje vnější hranu skla, což umožňuje vycentrovat objekt měření v závislosti na souřadném systému robotu.



Obr. 27: Laboratorní pracoviště při měření

5.1. Strategie programování průmyslového robotu

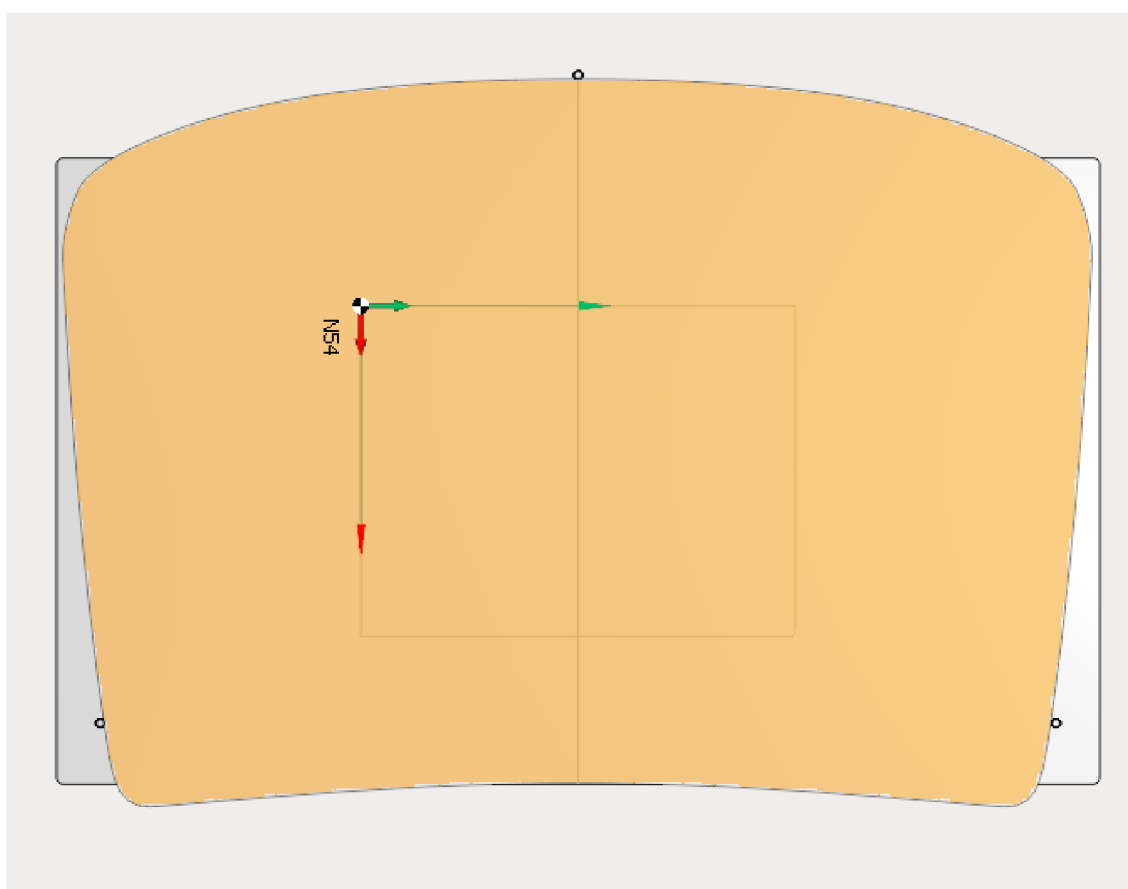
Programování průmyslových robotů je možné dvěma odlišnými způsoby. Online programování pomocí teach pendantu, konkrétně smartPADu u robotů firmy KUKA. SmartPAD připojený k řídicí jednotce umožňuje přímé řízení a ukládání jednotlivých bodů dráhy robotu. Jelikož je třeba zajistit kolmost koncové příruby, resp. snímače k obecné ploše známé z 3D modelu, tak je tento způsob nevhodný pro účel diplomové práce.

V rámci řešení diplomové práce bylo využito principu offline programování. To znamená vygenerovat dráhy pohybu bez fyzické přítomnosti robotu. K tomu obecně slouží CAM SW nainstalovaný v PC, který umožňuje naprogramovat dráhu nástroje vycházející z 3D modelu objektu, ale musí obsahovat postprocesor pro daný stroj. Postprocesor je převodník drah nástroje sestavených v CAM SW do datového jazyka příslušného stroje, tedy konkrétně robotu KUKA. Vygenerovaný program je následně přenesen z PC do řídicí jednotky robotu, např. pomocí USB flash disku.

Pro vytvoření programu pro měření bylo využito CAM SW SprutCAM, který umožňuje vytvoření jakéhokoliv virtuálního modelu robotu s perifériemi, pokud je znám 3D model a kinematické schéma daného robotu. Tento SW je primárně určen pro technologie obrábění, tudíž na úlohu měření bylo nahlíženo jako na úlohu obrábění se zanedbatelnou tloušťkou přídavku materiálu, která má být obrobena (např. 0,01 mm).

Před samotným programováním drah nástroje musel být 3D model skla upraven. Postup úprav je popsán v kap. 5.2. Aby bylo možné vytvořit správné dráhy nástroje, tak bylo nejprve nutné vytvořit kinematický model robotu odpovídající reálnému pracovišti. Dalším krokem bylo importování upraveného 3D modelu měřeného objektu, pracovního stolu, podpěrných trnů a pevných dorazů.

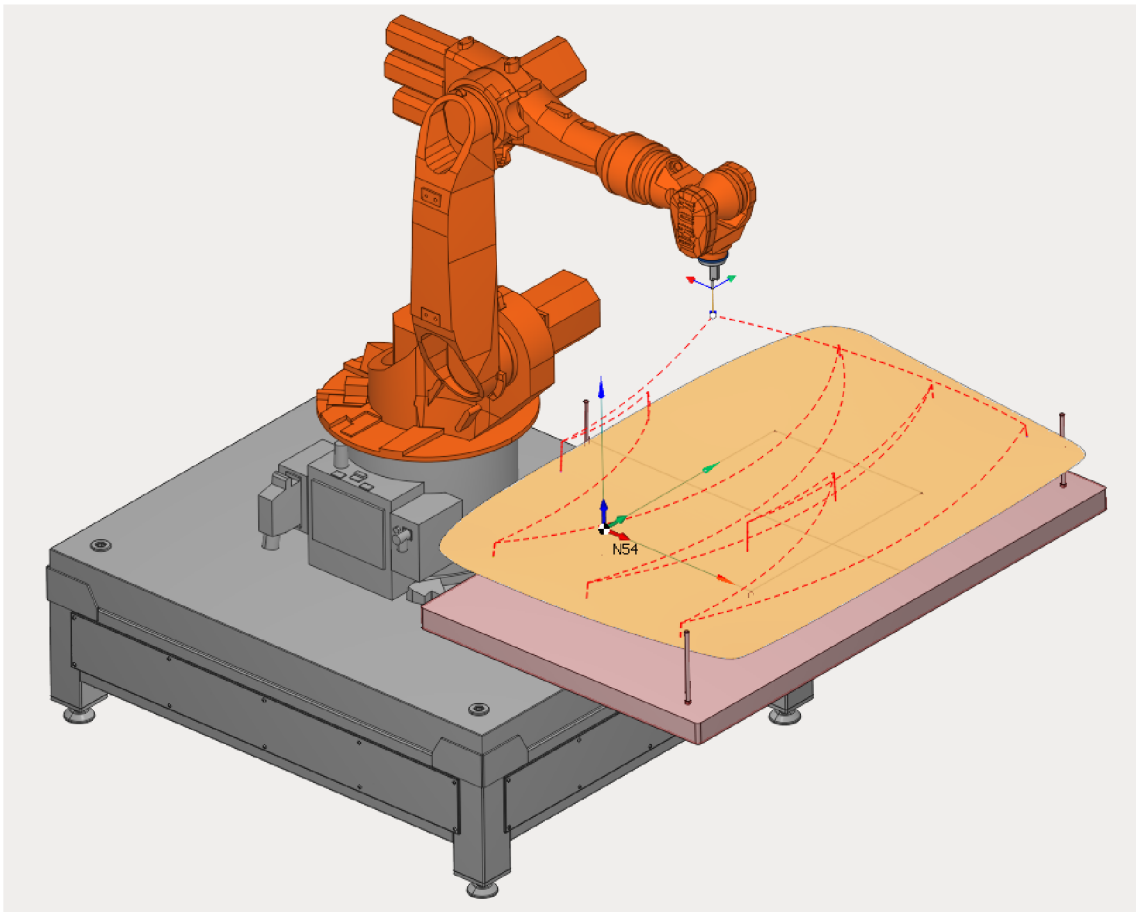
Po dokončení těchto úprav následovalo definování souřadného systému (SS), který byl dán polohou jednotlivých podpěrných trnů z 3D modelu sestavy pracovního stolu a čelního automobilového skla. Jako počátek (označení N54 na obr. 28) tohoto souřadného systému byl vybrán jeden z podpěrných trnů a další byly využity k definování polohy souřadných os x a y (obr. 28). Tento systém definice souřadného systému byl vybrán z důvodu snadného propojení se SS robotu KUKA. Operátor je schopen pomocí robotu s kalibračním trnem určit uživatelský



Obr. 28: Pohled shora na virtuální model v SW SprutCAM

souřadný systém (bázi) kdekoliv v pracovní zóně robotu. Touto bází je možné snadno sjednotit SS virtuálního modelu v SW SprutCAM a reálným pracovištěm.

Pro ověření navržené metodiky byly naprogramovány dráhy robotu pro 5 dvojic bodů, které jsou rozloženy symetricky na čelním skle. Následně jsou pro tyto body naprogramovány jednotlivé dráhy (obr. 29). Výsledný program je nakonec zkontrolován simulací a vygenerován kód pro řízení robotu v datovém jazyce KRL. Část kódu je zobrazena na obr. 30.



Obr. 29: Naprogramované dráhy robotu

```

DEF test1()

EXT test_ukladani ()

;FOLD INI;%{PE}
;FOLD BASISTECH INI
  GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ( )
  INTERRUPT ON 3
  BAS (#INITMOV,0 )
;ENDFOLD (BASISTECH INI)
;FOLD USER INI
  ;Make your modifications here

;ENDFOLD (USER INI)
;ENDFOLD (INI)
$APO.CDIS = 0.5000
BAS (#INITMOV,0)
BAS (#VEL_PTP,20)
BAS (#ACC_PTP,10)

$BASE=BASE_DATA[4]
$TOOL=TOOL_DATA[7]
$advance=5
$VEL.CP=0.167
PTP {A1 71.726, A2 -78.913, A3 116.154, A4 -6.803, A5 53.436, A6 0.000, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, E5 0, E6 0}
LIN {X 3.221, Y 617.528, Z 86.4, A -165.773, B -0.869, C 174.588} C_DIS
LIN {X 0.038, Y 624.912, Z 2.602, A -166.609, B -0.948, C 174.601} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 0, Y 625, Z 1.606, A -166.621, B -0.949, C 174.602} C_DIS
WAIT SEC 1
test_ukladani ()
LIN {X 0.038, Y 624.913, Z 2.602, A -166.609, B -0.948, C 174.601} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 3.221, Y 617.529, Z 86.4, A -165.773, B -0.869, C 174.588} C_DIS
PTP {A1 77.624, A2 -47.684, A3 68.302, A4 -4.482, A5 66.300, A6 0.000, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, E5 0, E6 0}
LIN {X 474.962, Y 624.918, Z 2.602, A -169.617, B 3.002, C 175.79} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 475, Y 625, Z 1.606, A -169.619, B 3.002, C 175.79} C_DIS
WAIT SEC 1
test_ukladani ()
LIN {X 474.962, Y 624.919, Z 2.602, A -169.617, B 3.002, C 175.79} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 471.752, Y 618.051, Z 86.4, A -169.426, B 3.016, C 175.8} C_DIS
PTP {A1 101.849, A2 -47.898, A3 68.675, A4 4.518, A5 66.180, A6 0.000, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, E5 0, E6 0}
LIN {X 474.962, Y 0.082, Z 2.603, A 170.17, B 2.962, C -175.761} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 475, Y 0, Z 1.607, A 170.172, B 2.961, C -175.761} C_DIS
WAIT SEC 1
test_ukladani ()

```

Obr. 30: Část kódu pro řízení robotu v jazyce KRL

Vygenerovaný kód musel být dodatečně upraven tak, aby bylo možné v definovaných bodech zastavit a provést měření vzdálenosti. Diskontinuální způsob měření byl zvolen proto, aby bylo možné dosáhnout maximální přesnosti měření, která by v případě kontinuálního měření během pohybu robotu byla negativním způsobem ovlivněna.

Pro automatické ukládání naměřených dat bylo nutné vytvořit podprogram (obr. 31), který umožňoval filtraci a průměrování dat s možností nastavení vzorkovací frekvence (na obr. 30 jako test_ukladani). V podprogramu je rovněž naprogramováno ukládání hodnot měření pro další vyhodnocení.

```

&ACCESS RV01
&REL 11
DEF test_ukladani ( )
DECL INT HANDLE
DECL STATE_T STAT
DECL MODUS_T MODE
DECL REAL dist
DECL REAL artmdist
DECL CHAR distancechar[50]
DECL CHAR data[150]

DECL INT I
DECL INT offset
DECL INT N

$BASE=BASE_DATA[4]
$TOOL=TOOL_DATA[7]

MODE = #SYNC
HANDLE = 0
dist = 0
offset = 0
artmdist = 0

N = 10

FOR I=1 TO N
WAIT SEC 0.1
dist = dist +($ANIN[1] * 10 * 14.7 + 3)
ENDFOR

artmdist = dist / N

CWRITE($FCT_CALL, STAT, MODE, "kr1_fopen", "MeasLog.TXT", "a", HANDLE)

SWRITE(data[],STAT,offset,"%2.2f, %2.2f, %2.2f, ",($pos_act.X),($pos_act.Y),($pos_act.Z))
CWRITE($FCT_CALL, STAT, MODE, "kr1_fputs", HANDLE, data[])

offset=0
SWRITE(distancechar[],STAT, offset,"%2.2f " ,artmdist)
CWRITE($FCT_CALL, STAT, MODE, "kr1_fwriteIn", HANDLE, distancechar[])

CWRITE($FCT_CALL, STAT, MODE, "kr1_fclose", HANDLE)
END

```

Obr. 31: Kód podprogramu test_ukladani.src

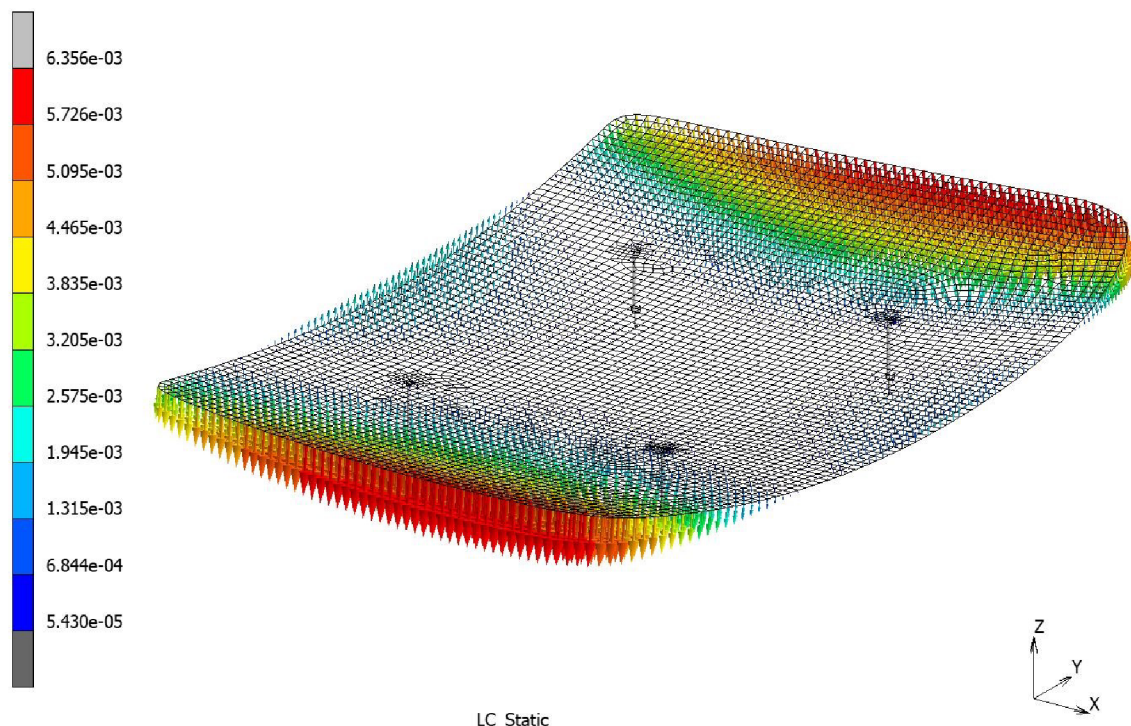
V první části podprogramu je uvedena deklarace příslušných proměnných (DECL). Následující příkazy (\$BASE a \$TOOL) definují použitou bázi (souřadný systém) a nástroj, resp. souřadnice koncového bodu. Ultrazvukový snímač je připojen k I/O kartě instalované do řídicího systému robotu, která umožňuje vyčítání analogového signálu napětí. Tato hodnota musí být převedena na hodnotu vzdálenosti (dist). V programu je rovněž proveden aritmetický průměr 10 nasnímaných hodnot s časovým odstupem 0,1 s. Hodnoty průměrování a časového odstupu mohou být v případě potřeby změněny. Poslední částí programu je zapisování (SWRITE / CWRITE) naměřených hodnot vzdálenosti včetně pozice v prostoru vzhledem k uvedenému SS do textového souboru MeasLog.txt.

5.2. Počítačová simulace elastických deformací skla, příprava porovnávacích dat,

Pro umožnění bezkontaktního měření čelních automobilových skel je nutná znalost 3D modelu konkrétního typu snímaného skla. Výchozím 3D modelem je čelní automobilové sklo v nezatíženém stavu. Jelikož je reálně sklo uloženo na podpěrných trnech, tak je předpokládána elastická deformace vlivem zatížení vlastní hmotností. K simulaci deformačního pole skla byl použit simulační SW MSC Marc.

Do prostředí simulačního SW byl importován 3D model konkrétního typu skla s podpěrnými trny tak, aby virtuální model odpovídal reálnému uložení čelního skla na laboratorním pracovišti. Dále byly v úloze simulace definovány okrajové podmínky. Podpěrné trny jsou definovány jako dokonale tuhé a jejich pozice ve směru působení gravitace je neměnná. Jedná se o úlohu kontaktní, kdy čelní sklo je v kontaktu s podpěrnými trny.

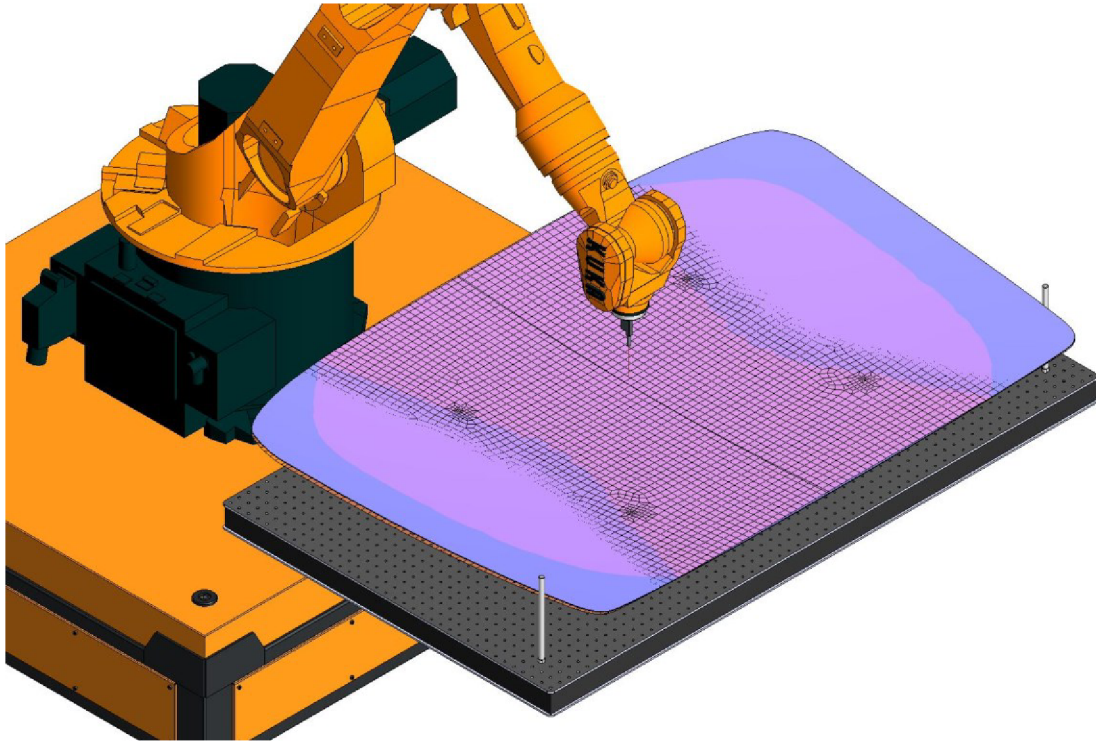
3D model čelního skla byl převeden na síť plošných konečných prvků (elementů), kterým byla přiřazena tloušťka. Z důvodu minimalizace výpočetních nestabilit byla výpočetní síť v oblastech kontaktu trnu a plochy skla lokálně zahuštěna větším počtem elementů. Dalším parametrem pro provedení simulace je Youngův modul pružnosti, který se u skla v závislosti na konkrétním chemickém složení v rozsahu $65 \div 72$ GPa a Poissonovo číslo v rozsahu $0,2 \div 0,27$ [12]. Modul pružnosti byl nastaven na hodnotu 71 GPa a Poissonovo číslo na hodnotu 0,23. Takto nastavená simulace byla provedena a výsledný zatížený model byl z prostředí exportován pro další úpravy. Výsledek provedené simulace je zobrazen na obr. 32.



Obr. 32: Výsledek simulace se zobrazeným průhybem v mm

Dalším krokem pro vytvoření modelu pro SW SprutCAM je nadefinování příslušných bodů zájmu měření. K tomuto úkolu byl použit SW Autodesk Inventor Professional 2020. Pomocí SW je možné definovat libovolný počet měřicích bodů. Jelikož SW SprutCAM neumožňuje provést výpočet drah robotu z definovaných bodů, byly tyto body definovány jako úsečky velmi malé délky (0,01 mm).

Na obr. 33 je zobrazen virtuální model s překrytím 3D modelu nezatíženého i zatíženého čelního skla. Modrá barva označuje nezatížený 3D model.



Obr. 33: Zobrazení virtuálního modelu s překrytím 3D modelů

6. Laboratorní měření čelního skla

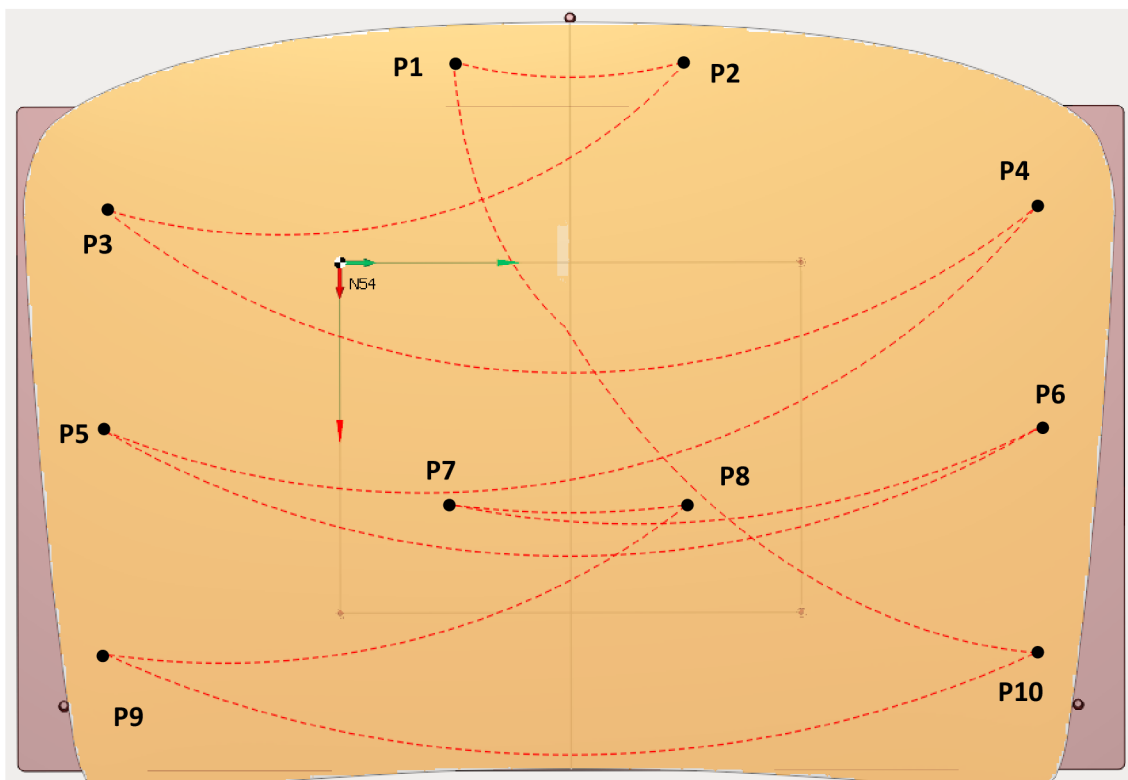
Měření bylo provedeno v souladu s navrženou metodikou v kap. 3.1. Po provedeném měření byla naměřená data analyzována a vyhodnocena.

6.1. Popis podmínek měření

Čelní automobilové sklo bylo umístěno na pracovní stůl a manuálně vycentrováno pomocí robotu s kalibračním trnem, který kopíroval vnější hranu skla. Následně bylo provedeno měření dle vygenerovaného programu. Pozice centrovaného skla byla dána pozicemi pevných dorazů upevněných na kompozitní rovinné desce.

Rychlosti pohybu robotu při měření byly sníženy, aby nedošlo k poškození měřeného objektu či snímače v důsledku špatně generovaného programu nebo nedošlo ke kmitavému pohybu robotu v čase měření a získaná data nebyla zkreslena.

Měření proběhlo dle vygenerovaných trajektorií a zastavením v daných bodech (P1 – P10) zobrazených na obr. 34. Měření proběhlo několikrát za sebou, aby bylo možné analyzovat opakovatelnou přesnost.



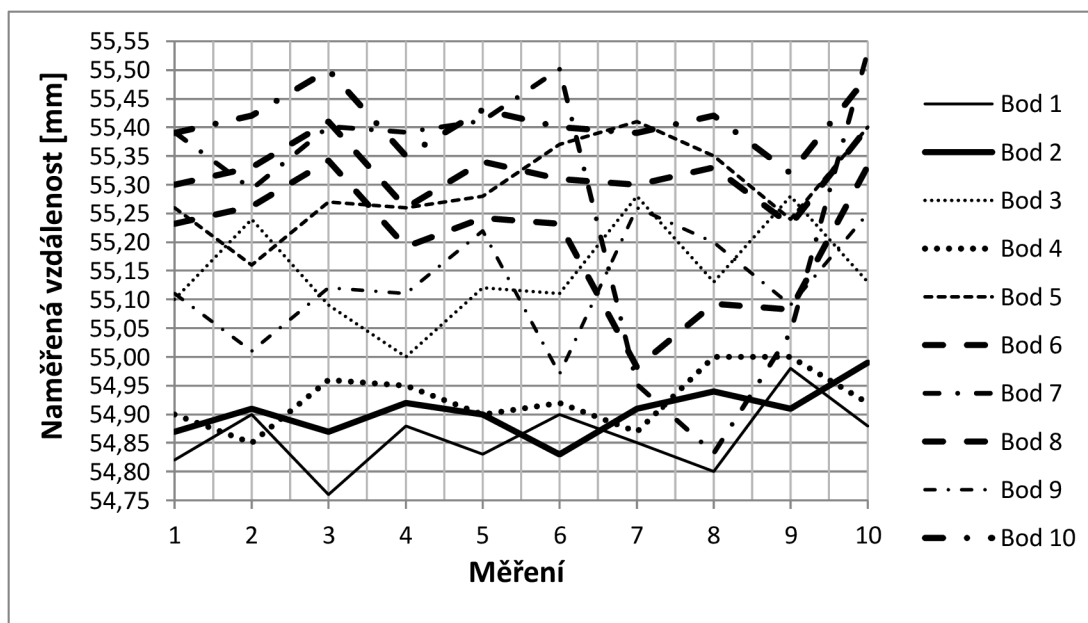
Obr. 34: Zobrazení bodů měření

6.2. Vyhodnocení opakovatelné přesnosti měření

Na základě provedeného laboratorního měření čelního skla byla analyzována naměřená data. Data uložená do textového souboru popsaného v kap. 5.1 byla přesunuta do PC a vyhodnocena v SW Microsoft Excel. Pro každý naprogramovaný bod proběhlo 10 měření za sebou, aby mohla být určena opakovatelná přesnost. Výsledek měření včetně hodnot naměřených vzdáleností je zobrazen v obr. 35 a 36. V tabulce naměřených hodnot je zvýrazněna maximální a minimální naměřená vzdálenost. Body jsou ve dvojicích symetricky rozmístěny na povrchu čelního automobilového skla.

Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bod 1	54,82	54,90	54,76	54,88	54,83	54,90	54,85	54,80	54,98	54,88
Bod 2	54,87	54,91	54,87	54,92	54,90	54,83	54,91	54,94	54,91	54,99
Bod 3	55,10	55,24	55,09	55,00	55,12	55,11	55,28	55,13	55,28	55,13
Bod 4	54,90	54,85	54,96	54,95	54,90	54,92	54,87	55,00	55,00	54,92
Bod 5	55,26	55,16	55,27	55,26	55,28	55,37	55,41	55,35	55,24	55,40
Bod 6	55,30	55,33	55,41	55,26	55,34	55,31	55,30	55,33	55,23	55,40
Bod 7	55,39	55,29	55,40	55,39	55,41	55,50	54,95	54,83	55,04	55,53
Bod 8	55,23	55,26	55,34	55,19	55,24	55,23	54,98	55,09	55,08	55,33
Bod 9	55,11	55,01	55,12	55,11	55,22	54,97	55,26	55,20	55,09	55,25
Bod 10	55,39	55,42	55,50	55,35	55,43	55,40	55,39	55,42	55,32	55,49

Obr. 36: Naměřené hodnoty vzdálenosti v jednotlivých bodech [mm]



Obr. 35: Zobrazení naměřených hodnot jednotlivých bodů

Z přiložených obrázků lze vypočítat střední naměřenou vzdálenost 55,11 mm a rozsah naměřených hodnot $\pm 0,29$ mm. Robot KUKA KR16 disponuje opakovatelnou přesností $\pm 0,04$ mm, která také ovlivňuje celkovou opakovatelnou přesnost měření.

Dle analýzy provedené v kap. 2.2 je přesnost použitého ultrazvukového snímače v řádech setin mm, což znamená, že výsledná přesnost měření souvisí s jinými podmínkami. Přesnost měření závisí i na 3D modelu měřeného čelního automobilového skla odpovídající reálnému výrobku a správně provedené numerické simulaci. Naměřené hodnoty lze proto ještě zpřesnit změnami parametrů numerických simulací.

7. Technicko-ekonomická analýza přínosu a aplikovatelnosti řešení v průmyslové praxi

Předkládané řešení robotického pracoviště bylo provedeno s cílem alternativně nahradit kontaktní způsob měření měřením bezkontaktním a minimalizovat tak použití maket a velké množství kontaktních snímačů.

Hlavní nevýhodou kontaktního měření nejsou jen problémy se skladováním, ale jsou to také vysoké náklady související s výrobou 3D prostorových maket, které se složitě vyrábějí na CNC obráběcích centrech s vysokou přesností a dále se pak musí proměřovat, popř. kalibrovat. Další problém je nízká flexibilita systému, změna sortimentu vyžaduje změnu makety, což je časově náročné. Proto byla v rámci řešení diplomové práce vytvořena pilotní metodika a testovány možnosti využití bezkontaktních snímačů měření vzdálenosti.

Omezení použití pracoviště je pouze v dosahu vybraného robotu, který lze vyměnit za robot s dosahem větším či v rozměrech snímaného čelního skla, jenž souvisí s navrženými konzolemi. V případě potřeby lze tyto konzole upravit a vyměnit, aby vyhovovaly danému typu skla.

Dalším důležitým parametrem je čas, za který je možné získat požadovaná data. U měřicích maket je tento čas velmi krátký kvůli desítkám zabudovaných kontaktních senzorů, jež snímají najednou celou geometrii čelního skla v čase do 1 s. Po provedení měření v laboratorních podmínkách je jasné, že čas měření pro navržené robotizované pracoviště bude několikrát delší v závislosti na počtu měřicích bodů. Takto navržené pracoviště tedy není vhodné pro kontrolu automobilových skel na výrobní lince, nýbrž je vhodné pro namátkovou kontrolu. Snížení času potřebného pro měření by bylo možné, pokud by se využilo více robotů provádějících měření najednou nebo více senzorů připevněných ke koncové přírubě robotu. Varianty s více senzory

nebo roboty nebyly testovány, ale mají potenciál a mohou v budoucnu představovat zajímavé řešení.

Pro navržené robotické pracoviště byly stanoveny předběžné pořizovací náklady na realizaci. Rovněž jsou zde uvedeny ceny snímačů použitých při laboratorním testování přesnosti měření. Vyhodnocení měření vybraných snímačů v kap. 2 ukázalo, že nejlepší dosaženou přesností měření disponuje konfokální snímač, avšak v porovnání s ostatními senzory jsou jeho pořizovací náklady několikanásobně větší a v multisenzorickém nasazení jsou náklady v řádech milionů korun. Proto se stále hledají alternativy na principu ultrazvukových nebo laserových snímačů.

Ceny snímačů použitých v laboratorním testování přesnosti bez DPH:

Snímač	Cena bez DPH
Baumer UNCK 09U6914/KS35AD1	10200 Kč
Migatron RPS-412A-10-V	28000 Kč
Precitec Optronic	280000 Kč
SICK OD5000-C85W20	75000 Kč

Ceny jednotlivých částí robotizovaného pracoviště s DPH:

Průmyslový robot	1000000 Kč
UZ senzor Baumer	10200 Kč
EM, PŘ, PJ - (FESTO)	200000 Kč
Rámy středícího přípravku	20000 Kč
Ostatní součásti	10000 Kč
Spojovací materiál	2000 Kč
Celkem	1242200 Kč

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout systém pro měření geometrie čelních automobilových skel a prověřit opakovatelnou přesnost detekce tvaru skleněného výrobku v závislosti na okrajových podmínkách. V úvodní části práce byla provedena analýza současného stavu měření geometrie čelních automobilových skel včetně patentové rešerše. Dále byly v této části popsány senzory pracující na různém fyzikálním principu, které jsou použitelné pro bezkontaktní měření vzdálenosti transparentních materiálů. Pro tyto senzory byly provedeny laboratorní testy přesnosti a vybrán nejvhodnější senzor z hlediska přesnosti, pořizovací ceny a zástavbových rozměrů.

Dále se práce zabývala návrhem metodiky měření včetně konceptu tří různých variant středícího přípravku pro správné polohování a fixaci čelního automobilového skla v měřicí pozici s podrobným popisem a výběrem nejvhodnějšího řešení použitelné v průmyslové praxi. V této části byla provedena kontrola pohonů pohybových jednotek z hlediska dynamických účinků pomocí výpočtů. Dále byl v této části proveden konstrukční návrh efektoru robotu a zobrazena vizualizace robotického pracoviště pro bezkontaktní měření čelních automobilových skel.

Také bylo v práci provedeno pilotní prověření navržené metodiky měření v laboratorních podmínkách včetně popisu offline programování robotu ve virtuálním prostředí a numerických simulací, bez kterých by nebylo možné měření uskutečnit. Také jsou zde popsány podmínky laboratorního měření a vyhodnocena opakovatelná přesnost měření.

Na závěr bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení navrženého robotického pracoviště. V této části jsou popsány výhody i nevýhody pracoviště v porovnání se současnou technologií měření.

Seznam použité literatury

- [1] Princip laserových triangulačních snímačů. Automatizace.hw.cz [online]. 2015 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [2] Moderní metody rozpoznávání a zpracování obrazových informací [online]. 2019 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.fm.tul.cz/files/pages/other/MTI/obr19/TUL-Hotar.pdf>
- [3] SICK: Sensor Intelligence [online]. [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.sick.com>
- [4] Ultrazvukové senzory přiblížení - funkce, provedení, použití. Automatizace.hw.cz [online]. 2017 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/ultrazvukove-senzory-priblizeni-funkce-provedeni-pouziti.html>
- [5] Baumer [online]. [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.baumer.com>
- [6] Konfokální princip optického měření vzdáleností. Automatizace.hw.cz [online]. 2016 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/konfokalni-princip-optickeho-mereni.html>
- [7] Konfokální snímač - CHRcodile C. PRECITEC [online]. [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.precitec.com/optical-3d-metrology/products/point-sensors/chrocodile-c/>
- [8] 3D skener GOM ATOS Q. 3Dees [online]. [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/3d-skenery/gom-zeiss/gom-atos-q>
- [9] Součinitel tření. E-konstruktor [online]. 2013 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [10] Pohony s ozubeným řemenem ELGG. FESTO [online]. [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/ELGG_CZ.PDF
- [11] KUKA KR 8 R2010-2. KUKA [online]. [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000321017_cs.pdf?rev=11b85ab057564198a2c75e0d084b020b&hash=0ED2922278370A65678BBAB388323192
- [12] Mechanické vlastnosti pevných látek. E-konstruktor [online]. 2013 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/mechanicke-vlastnosti-pevnnych-latek>
- [13] HOTAŘ, Vlastimil. Úvod do problematiky strojového vidění. Část 1, Základní principy a hardware. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-9474-156-6.

- [14] NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. Konstrukce robotů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-216-7. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
- [15] HOTAŘ, Vlastimil. Úvod do problematiky strojového vidění. Část 2, Základy zpracování obrazu. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-202-0.
- [16] NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. Efektory průmyslových robotů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-195-5. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
- [17] MATÚŠEK, Ondřej. Pokročilé techniky snímání lesklých a obtížně detekovatelných materiálů: Advanced techniques for image acquisition of glossy and difficult-to-detect materials. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019.

Seznam příloh

Příloha 1 – Výkresová dokumentace rámu středícího přípravku (horní)

Příloha 2 – Výkresová dokumentace rámu středícího přípravku (horní) – obrobek

Příloha 3 – Výkresová dokumentace rámu středícího přípravku (spodní)

Příloha 4 – Výkresová dokumentace sestavy středícího přípravku

Příloha 5 – Výkresová dokumentace sestavy efektoru

Příloha 6 – Výkresová dokumentace základny efektoru