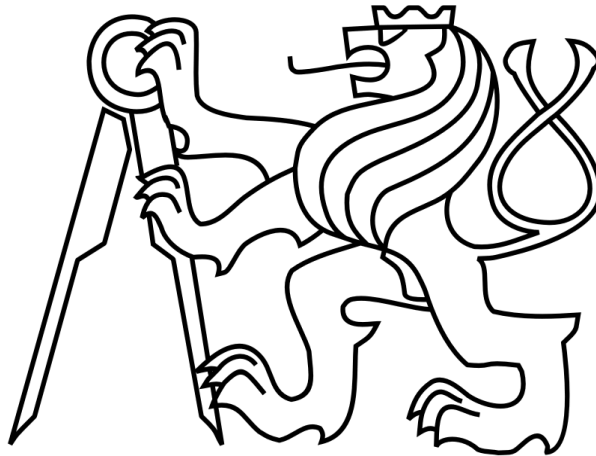


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Vizualizace interpolovaných drah nástroje při pětiosém frézování

2021

Marcel Pražák

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pražák** Jméno: **Marcel** Osobní číslo: **484022**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vizualizace interpolovaných drah nástroje při pětiosém frézování

Název bakalářské práce anglicky:

Visualization of interpolated toolpaths in five-axis milling

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Student bude pracovat na tvorbě analyzačního nástroje, kterým bude možno hodnotit kvalitu pětiosých drah nástroje interpolovaných řídicím systémem Heidenhain TNC640 stroje MCU 700 VT-5X při aktivní funkci TCPM. Výstupem bude skript v Matlab obsahující kinematické přepočty pro transformaci dat z odměřování pohybových os do obrobkového souřadnicového systému. Osnova práce: A) Provedení rešerše na téma vizualizace kinematických parametrů drah nástroje v CAM sw, řídicích systémech, editorech NC kódu aj., B) Návrh a realizace kinematické transformace interpolovaných drah nástroje do obrobkového souřadnicového systému v Matlab, C) Vizualizace reversací pohybových os, rychlosti špičky nástroje a nároku na zrychlení pohybových os, D) Provedení testů a vyhodnocení formou vizualizace naměřených dat pro souvislé pětiosé obrábění na tvarovém dílci; Rozsah textové části: 40 - 60 stran; Rozsah grafické části: výstupy z vizualizace interpolovaných drah nástroje.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Heidenhain TNC640: Zachování polohy hrotu nástroje při polohování os natočení [online]. Německo, 2019 [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: http://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/TNC640/34059x-10/bhb/892903-C7.pdf.
- 2) STEJSKAL, V. - VALÁŠEK, M.: Kinematics and dynamics of machinery. 1. vydání. New York: MARCEL DEKKER, INC., 1996. 494s. ISBN: 0-8247-9731-0

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Vavruška, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Michal Stejskal, ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 22. 7. 2021

.....
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Petru Vavruškovi, Ph.D. a panu Ing. Michalu Stejskalovi za předané rady, zkušenosti a za možnost hlubšího poznání oboru. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Moravcovi, Ph.D. a panu Mgr. Janu Lomičkovi za velkorysou pomoc při přípravě a odbavování testů na obráběcím stroji. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině a přítelkyni za podporu nejenom během studia.

Děkuji.



Anotace

Autor:	Marcel Pražák
Název BP:	Vizualizace interpolovaných drah nástroje při pětiosém frézování
Rozsah práce:	66 str., 40 obr., 1 tab.
Školní rok vyhotovení:	2020/2021
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí BP:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Michal Stejskal
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Hodnocení kvality zvolené strategie obrábění, navržených drah nástroje.
Klíčová slova:	řídící systém, pětiosé obrábění, interpolace, kinematika obráběcího stroje
Abstrakt:	Bakalářská práce se zabývá tvorbou univerzálního vizualizačního nástroje v programu Matlab, který bude sloužit jako nástroj pro hodnocení kvality zvolené strategie obrábění a kvality navržených drah nástroje v CAM systémech ve vazbě na konkrétní obráběcí stroj. Grafické znázornění interpolovaných drah nástroje je realizováno na základě kinematických přepočtů k danému obráběcímu stroji.



Annotation

Author:	Marcel Pražák
Title of thesis:	Visualization of interpolated toolpaths in five axis milling
Extent:	66 p., 40 fig., 1 tab.
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Consultant:	Ing. Michal Stejskal
Submitter of the Theme:	CTU FME
Application:	Quality evaluation of the selected machining strategy, designed toolpaths.
Key words:	control system, five-axis machining, interpolation, machine tool kinematics
Abstract:	Bachelors thesis deals with the creation of a universal visualization tool in Matlab, which will serve as a tool for evaluating the quality of the selected machining strategy and the quality of the designed toolpaths in CAM systems in relation to a specific machine tool. Graphical representation of interpolated toolpaths is realized on the basis of kinematic transformations to a given machine tool.



Obsah

Přehled použitých veličin, jednotek a symbolů	9
Přehled použitých zkratk	11
1 Úvod	12
2 Pětiosé obrábění tvarově komplexních dílců	13
2.1 Příprava výroby na pětiosých frézovacích strojích	13
2.1.1 Příprava technologie pro pětiosé frézování	13
2.1.2 Zachování polohy špičky nástroje při polohování rotačních os (TCPM/funkce M128)	19
2.1.3 Možná rizika vzniku chyb při pětiosém frézování	19
2.2 Vizualizační software	20
2.2.1 Vizualizační software na úrovni CAM	21
2.2.2 Vizualizační software na úrovni ŘS	23
2.2.3 Vizualizační software na úrovni NC programu	26
2.2.4 Simulační software	28
2.3 Shrnutí řešerše	30
3 Návrh variant zpracování vizualizačního nástroje	32
3.1 Varianta A – Matlab kód	32
3.2 Varianta B – Matlab App designer	33
3.3 Varianta C – Python	33
3.4 Varianta D – Řídicí systém	34
3.5 Výběr varianty zpracování vizualizačního nástroje	34
4 Tvorba vizualizačního nástroje	36
4.1 Kinematika pětiosých CNC strojů	36
4.1.1 Kinematika obráběcího stroje MCU 700 VT-5X	37
4.1.2 Transformace interpolovaných dat	37
4.2 Zobrazované dráhové parametry	41
4.2.1 Rychlost, zrychlení	41
4.2.2 Výsledná rychlost	42



4.2.3	Nárok na zrychlení pohybových os	44
4.2.4	Reverzace rotačních os	46
4.3	Vývoj vizualizačního nástroje	47
4.3.1	Uživatelské rozhraní vizualizačního nástroje	49
4.3.2	Schéma vstupů, výstupů	50
4.4	Programování vizualizačního nástroje	52
4.5	Případové studie	56
5	Závěr	59
	Seznamy	61
	Seznam použité literatury	61
	Seznam použitého softwaru	64
	Seznam obrázků	64
	Seznam tabulek	66



Přehled použitých veličin, jednotek a symbolů

Veličina	Jednotka	Význam
a	mm/s ²	celkové zrychlení
A	rad	úhel rotační osy A
a_e	mm	šířka odřezávané vrstvy
a_p	mm	výška odřezávané vrstvy (hloubka řezu)
a_X, a_Y, a_Z	mm/s ²	zrychlení translační osy X, Y, Z
C	rad	úhel rotační osy C
D	mm	průměr frézovacího nástroje
f_z	mm	posuv na zub
h	mm	výška scallopu
L	–	poloha bodu L
n	otáčky/min	otáčky nástroje (vřetena)
N	rad/mm	nárok na zrychlení pohybových os
p	mm	vzdálenost mezi dvěma drahami
P	mm	vzdálenost obrobkového souřadnicového systému vůči strojnímu souřadnicovému systému
r	mm	poloměr otáčení stolu
$M_{r_{ML}}$	–	průvodič bodu L ze strojního souřadnicového systému
r_{v1}	mm	vzdálenost špičky nástroje od osy rotace rotační osy A
r_{v2}	mm	vzdálenost špičky nástroje od osy rotace rotační osy C
$W_{r_{WL}}$	–	průvodič bodu L z obrobkového souřadnicového systému
R_x, R_z	–	transformační matice
s	mm	vzdálenost špičky nástroje (nebo TCP) ve dvou okamžicích
t, t_1, t_2	s	čas, čas v okamžiku 1, 2
T_{12}, T_{23}, T_{34}	–	transformační matice
T_{4W}, T_{M1}, T_z	–	transformační matice
v	mm/s	rychlost špičky nástroje
v_c	m/min	řezná rychlost
v_f	mm/min	posuvová rychlost
v_X, v_Y, v_Z	mm/s	rychlost translační osy X, Y, Z



Veličina	Jednotka	Význam
X, Y, Z	mm	poloha translační osy X, Y, Z
x_1, y_1, z_1	mm	souřadnice špičky nástroje ve strojním souřadnicovém systému
x_2, y_2, z_2	mm	souřadnice průsečíku os rotace ve strojním souřadnicovém systému
z_z	–	počet zubů (břitů) nástroje
α	rad	naklopení rotační osy A
α_A	rad/s ²	zrychlení rotační osy A
α_C	rad/s ²	zrychlení rotační osy C
γ	rad	natočení rotační osy C
ω_A	rad/s	okamžitá úhlová rychlost rotační osy A
ω_C	rad/s	okamžitá úhlová rychlost rotační osy C



Přehled použitých zkratk

2D	dvojrozměrný
3D	trojrozměrný
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporované projektování
CAM	Computer Aided Manufacturing – počítačem podporované obrábění
CAS	Collision Avoidance System – systém prevence kolizí
CL	Cutter Location – poloha nástroje
CNC	Computer Numerical Control – počítačové číslicové řízení
NC	Numerical Control – číslicové řízení
OS	obráběcí stroj
PMI	Product and Manufacturing Information – informace o výrobku a výrobě
ŘS	řídící systém
TCP	Tool Center Point – středový bod nástroje
TCPM	Tool Center Point Management – správa středového bodu nástroje
TT	Tool Tip – špička nástroje



1 Úvod

Příprava výroby při pětiosém frézování je velmi komplexní a náročnou úlohou. Celá příprava je složena z velkého počtu procesů na mnoha úrovních od CAD (Computer Aided Design – počítačem podporované projektování) systému po ŘS (řídící systém). V každé úrovni se může vyskytnout těžko odhalitelná chyba v řídicích datech pro pohyb obráběcího stroje (dráha nástroje), která může výrazně zhoršit klíčové parametry, jako např. přesnost, jakost nebo produktivitu obrábění. Příprava výroby je popsána v úvodní kapitole.

K odhalení případné chyby dráhy nástroje se používají simulace a vizualizace obrábění na jednotlivých úrovních přípravy výroby. Pro tvorbu drah nástroje při pětiosém frézování se zpravidla využívají CAM (Computer Aided Manufacturing – počítačem podporované obrábění) systémy. Pro úpravu NC (Numerical Control – číslicové řízení) programů se využívají editory NC programů, v kterých je možná vizualizace dráhy nástroje. Pro optimalizaci nebo např. kontrolu kolizí se využívá simulační software, který umožňuje vizualizaci obrábění i s obráběcím strojem. Vizualizace v CAM systémech nebo editorech NC programů může být značně zkreslena vůči skutečné dráze nástroje zpracované ŘS, obzvláště při pětiosém obrábění. Na možnosti vizualizace dráhy nástroje je provedena rešerše.

Pro usnadnění hledání příčin nedostatků je vytvořen vizualizační nástroj pro vizualizaci dat z ŘS v softwaru Matlab. Pro přesnou vizualizaci dráhy nástroje je nutná transformace ze strojního souřadnicového systému do obrobkového souřadnicového systému. V rámci vizualizace bude možné zobrazit dráhové parametry pro hodnocení kvality dráhy nástroje, jako např. rychlost špičky nástroje, nebo reverzaci pohybových os.



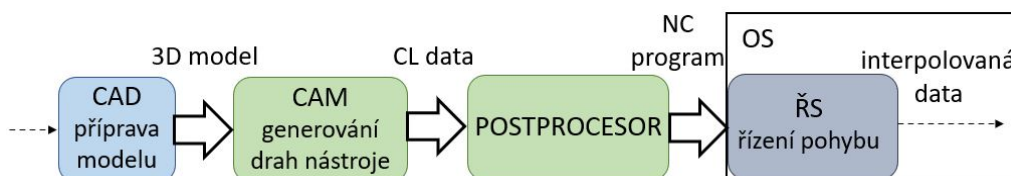
2 Pětiosé obrábění tvarově komplexních dílců

Pětiosé obrábění se využívá při obrábění tvarově komplexních dílců (např. kompresorová kola, lopatky). Oproti tříosému obrábění není většinou nutné obrobek přeupínat a tím je možné zvýšit produktivitu. Obrobením obrobku na jedno upnutí se také zvyšuje přesnost a opakovatelnost.

Obecné tvarové plochy jsou využívány hlavně v leteckém, kosmickém, automobilovém, tak i ve spotřebním průmyslu např. při výrobě forem, nástrojů. Tvarové plochy mohou být funkční nebo pouze estetické. [1]

2.1 Příprava výroby na pětiosých frézovacích strojích

Příprava výroby na pětiosých obráběcích strojích, jak bylo zmíněno, je zpravidla realizována v CAM systémech. Vstupními daty je 3D (trojrozměrný) model dílce a výkresová dokumentace z CAD systému. Trendem se stává PMI (Product and Manufacturing Information – informace o výrobku a výrobě) kótování 3D modelu a tím přenášet tvary, tolerance i drsnosti v 3D modelu. Dále se v CAM systému nastaví strategie obrábění, dále např. řezné podmínky, tolerance dráhy nástroje, a vygenerují se CL data (Cutter Location data – data o poloze nástroje). Poté se CL data importují do postprocesoru, který transformuje data z CAM systému do NC programu. Postprocesor tedy vygeneruje NC program pro daný obráběcí stroj, viz Obr. 1.



Obr. 1: Schéma přípravy výroby od 3D modelu po zpracování dat ŘS

2.1.1 Příprava technologie pro pětiosé frézování

Pro pětiosé frézování se používají dvě hlavní strategie obrábění. Jednou z nich je bodové obrábění, kde nástroj obrábí teoreticky jedním bodem. Druhá strategie je obrábění bokem nástroje, kde se osa nástroje naklápí v závislosti na tvarové ploše.



Nejpoužívanější nástroje pro obrábění tvarových ploch jsou dokončovací frézovací nástroje. Příkladem je kulová fréza, kuželová fréza, nebo toroidní fréza. [1]

Bodové obrábění

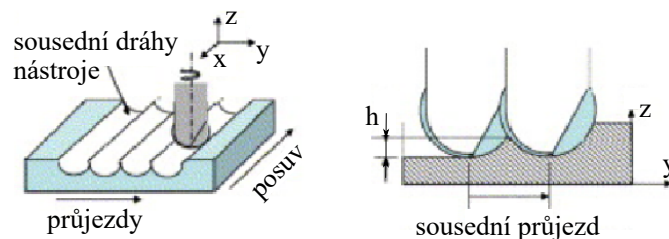
Bodové obrábění je obrábění nástrojem, který se teoreticky dotýká obrobku pouze v jediném kontaktním bodě. Využívá se pro obecné („freeform“) plochy (např. lopatky turbínových kol). Používají se nástroje s kruhovou řeznou hranou (tzv. kulové frézy). Při bodovém obrábění se musí provádět velký počet přejezdů, aby výsledný povrch byl dostatečně kvalitní (malý scallop). Při bodovém obrábění se používají různé dráhy nástroje např. pohyb po šroubovici (využívá se např. při obrábění blisk lopatek), nebo pohyb cik-cak (využívá se např. při obrábění forem).

U obrábění kulovou frézou vzniká scallop mezi jednotlivými drahami nástroje na povrchu. Výška závisí na vzdálenosti dvou sousedních drah. Je to způsobeno kulovou geometrií frézovacího nástroje. Předpokládá se bodový dotyk frézy s obrobkem. Pro rovnou plochu se dá scallop odhadnout podle rovnice 1.

$$h = \frac{p^2}{4 \cdot D} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

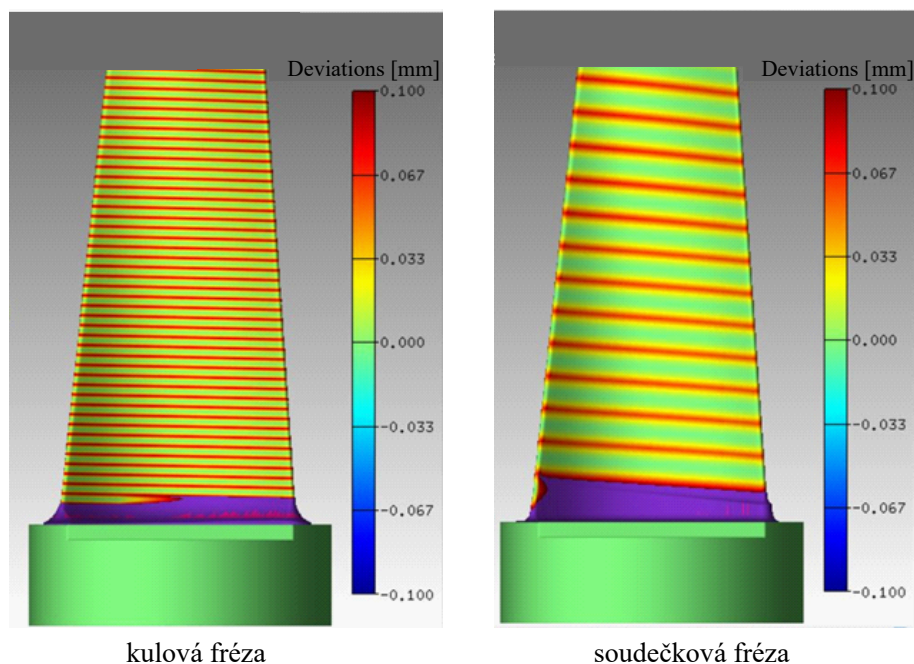
Výška scallopu je h , p je vzdálenost mezi dvěma drahami a D průměr frézovacího nástroje.

V pravé části Obr. 2 je znázorněn scallop mezi dvěma sousedními průjezdy. Scallop u vzdáleností mezi drahami je konstantní vlastností kulové frézy. [2]



Obr. 2: Vznikající scallop při obrábění nástrojem s kruhovou řeznou hranou [2]

Scallop se dá ovlivnit např. úhlem naklonění nebo použitým nástrojem. Soudečkovými nástroji, které mají velký poloměr, se dá dosáhnout stejného scallopu za menší počet přejezdů, jak je zobrazeno na Obr. 3. Zelená barva znamená shodu s modelem, tedy teoretickou výšku scallopu 0 mm. Červená barva znázorňuje výšku scallopu 0,1 mm.



Obr. 3: Vizualizace scallopu pro dva různé typy nástrojů v softwaru Millvis (pozn.: software vyvíjený na ústavu výrobních strojů a zařízení | RCMT)

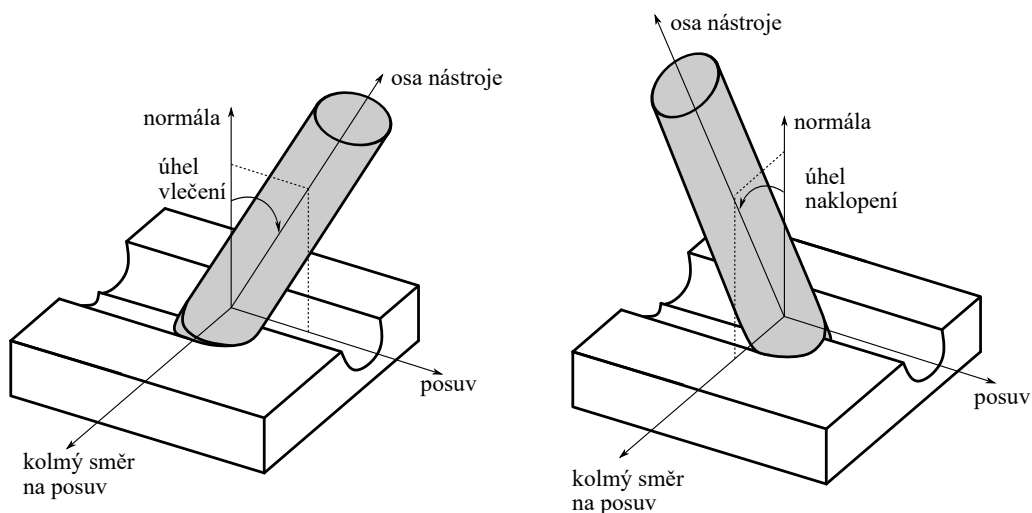
Při pětiosém frézování úhel vlečení a úhel naklonění ovlivňuje proces obrábění. Pomocí těchto dvou úhlů je možné dostat bod dotyku mimo osu nástroje a tím se vyhnout nulové řezné rychlosti. Úhel vlečení nemá vliv na velikost scallopu, zatímco úhel naklonění výšku ovlivňuje. Při větším naklonění mohou být větší vzdálenosti jednotlivých drah nástroje při zachování stejného scallopu.

Úhel vlečení je úhel mezi normálou obráběné plochy a natočením osy nástroje ve směru posuvu. Úhel naklonění je úhel mezi normálou obráběné plochy a natočením osy nástroje ve směru kolmém na směr posuvu, jak je vidět z Obr. 4. [3]

Obrábění bokem nástroje

Obrábění bokem nástroje je obrábění nástrojem, který by se měl teoreticky dotýkat obrobku v kontaktní přímce. Je možné zvýšit produktivitu a zlepšit výsledný povrch, protože se netvoří scallop. Aby bylo obrábění bokem nástroje možné, musí obráběná plocha být přechodová plocha přímková. Využívá se tedy např. pro obrábění lopatek kompresorových kol.

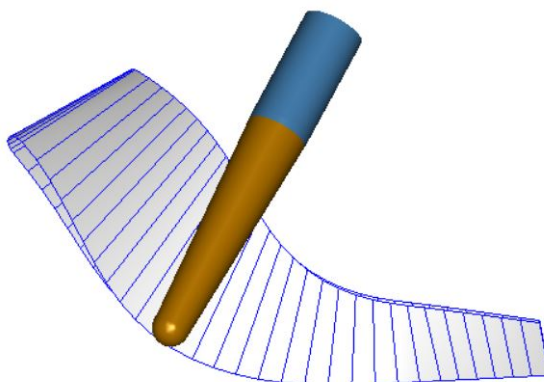
„Přechodová plocha interpoluje dva zadané protilehlé okraje – křivky, jejichž analytickou reprezentací je vektorová funkce jedné proměnné. Přímkovou přechodovou plochu,



Obr. 4: Úhel vlečení a úhel naklonění (dle [3])

jejíž analytickou reprezentací je vektorová funkce dvou proměnných, dostaneme lineární interpolaci mezi zadanými okraji. Lineární interpolace mezi zadanými okraji znamená, že určíme body okrajů odpovídající stejné hodnotě parametru a tyto body spojíme úsečkami. Množina všech těchto úseček tvoří přímkovou přechodou plochu.“ [4]

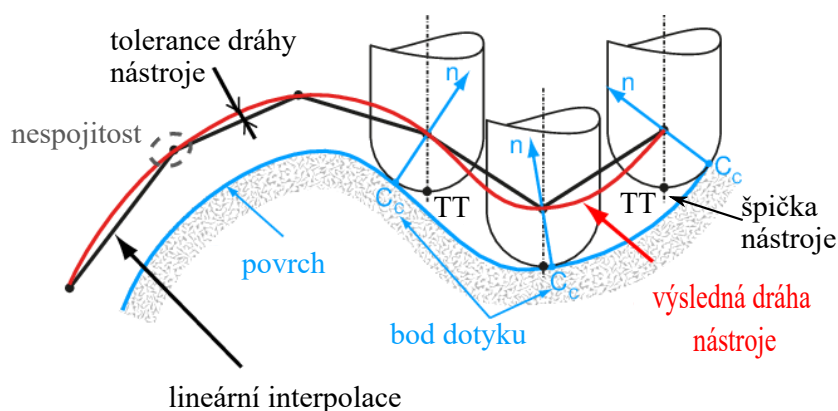
Obrábění bokem nástroje se využívá i u tvarově složitějších ploch. Obrábění bokem nástroje přímkových přechodových ploch je spolehlivější než u obecných tvarových ploch. Cílem je, aby obrábění bokem nástroje bylo produktivnější než obrábění bodové. Odebírá se větší množství materiálu najednou, případně se plocha obrobí na jeden průjezd. Ukázka přímkové přechodové plochy na lopatce je na Obr. 5. [5]



Obr. 5: Obrábění přímkové přechodové plochy kuželovým nástrojem [6]

Tolerance dráhy nástroje

CAM systém při tvorbě drah nástroje nerovné plochy aproximuje plochu jednotlivými body. Mezi těmito body je využita lineární interpolace. Při použití lineární interpolace vzniká odchylka od spojité plochy. Odchylku můžeme ovlivnit nastavením tolerance v systému CAM přidáním více bodů. Zvýší se tím počet bloků programu, který musí ŘS odbavit. Dráha nástroje je pouze C^0 spojitá, tzn. úsečky mezi body nemají společnou tečnu. Délka a úhel mezi jednotlivými lineárními interpolacemi může mít vliv na posuvovou rychlost. Následně je NC program interpolován ŘS (např. B-spline) viz Obr. 6.



Obr. 6: Zpracování lineární interpolace ŘS [7]

Tuto problematiku řeší např. autoři Beudaert Xavier, Lavernhe Sylvain a Tournier Christophe v článku Direct Trajectory Interpolation on the Surface using an Open CNC. Tato metoda vypočítává body, které leží přímo na povrchu, který se obrábí a provádí interpolaci jak umístění nástroje, tak posuvu synchronně. Bloky programu jsou nevýznamné, protože CL data jsou vypočítané během interpolace na části dráhy. Neprobíhá žádná diskretizace dráhy nástroje a tím může být dosažena vyšší posuvová rychlost a nižší čas obrábění. [7]

Řezné podmínky

Řezná rychlost je dána vektorovým součtem všech rychlostí, tj. rychlostí hlavního pohybu a posuvové rychlosti. Rychlost hlavního pohybu v_c v metrech za minutu se vypočítá podle rovnice 2.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2)$$

D je průměr frézovacího nástroje v milimetrech, n jsou otáčky nástroje v otáčkách za minutu.



Do NC programu se nezapíše rychlost řezání, ale zapisují se otáčky vřetena. Výpočet otáček je z rovnice 3, který je vyjádřený z rovnice 2.

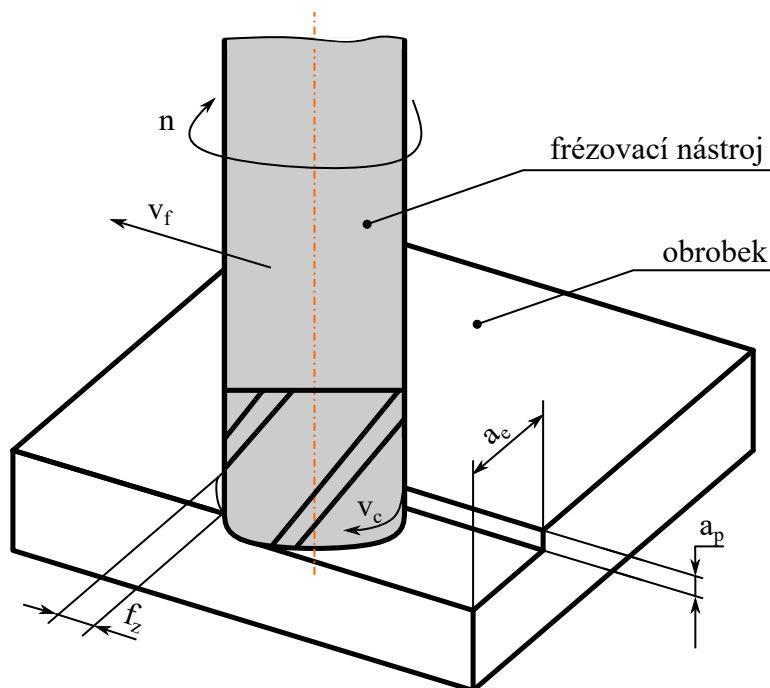
$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (3)$$

Posuvová rychlost odpovídá relativní rychlosti mezi osou nástroje a obrobkem. Posuvová rychlost v_f v milimetrech za minutu se vypočítá z rovnice 4.

$$v_f = f_z \cdot z_z \cdot n \quad (4)$$

Posuv na zub v milimetrech je f_z , z_z počet zubů (břitů) a n otáčky nástroje v otáčkách za minutu. Posuv na zub je dán hodnotou dráhy nástroje (stolu) vykonanou mezi záběry dvou následujících břitů.

Při čelním frézování je axiální hloubka řezu a_p výškou odřezávané vrstvy a radiální hloubka řezu a_e šířkou odřezávané vrstvy. Řezné parametry jsou na Obr. 7. [8], [9]



Obr. 7: Řezná rychlost, posuvová rychlost, axiální a radiální hloubka řezu (dle [10])

Při frézování jsou požadovány konstantní řezné podmínky pro dosažení stejné kvality povrchu. Při pětiosém frézování není konstantních podmínek často dosaženo, protože závisí např. na zrychlení pohybových os. Při zrychlování pohybových os dochází ke kolísání posuvu.



2.1.2 Zachování polohy špičky nástroje při polohování rotačních os (TCPM/funkce M128)

Dráhy nástroje v CAM systému se programují na špičku nástroje. Nastaví se úhel naklonění a úhel vlečení. Při kinematice stůl – stůl je nutné přepočítat polohu špičky nástroje, tak aby zůstala poloha špičky nástroje oproti obrobku nezměněna. Tento přepočet probíhá automaticky v ŘS při zapnuté funkci TCPM (Tool Center Point Management – správa středového bodu nástroje). Transformace může proběhnout i při zpracování CL dat postprocesorem. Pro vizualizaci dráhy nástroje při zapnuté funkci TCPM se musí provést zpětné transformace.

Standardní chování (bez funkce M128): „Když se změní úhel naklonění nástroje, vznikne přesazení špičky nástroje proti žádané poloze. Řízení toto přesazení nekompensuje. Když obsluha nevezme v úvahu odchylku v NC-programu, proběhne obrábění s přesazením.“ [11]

Chování s funkcí M128: „Změní-li se v NC-programu poloha některé řízené osy naklonění, pak zůstane během procesu naklápění poloha hrotu nástroje oproti obrobku nezměněna.“ [11]

Funkce M128 u naklápěcích stolů: „Programujete-li při aktivní M128 pohyb naklápěcího stolu, pak řídicí systém souběžně natočí souřadný systém. Natočíte-li například osu C o 90° (polohováním nebo posunutím nulového bodu) a pak naprogramujete pohyb v ose X, tak řídicí systém provede pohyb ve strojní ose Y.

Řídicí systém rovněž transformuje vztahný bod, který se pohybem otočného stolu přesune.“ [11]

2.1.3 Možná rizika vzniku chyb při pětiosém frézování

Ke vzniku chyb při obrábění může docházet vlivem např. špatně nastavených drah v CAM systému. Pro daný obrobek se musí zvolit vhodná strategie obrábění, tolerance dráhy nástroje i řezné podmínky. V přechodu od drah nástroje ve formátu CL dat k NC programu



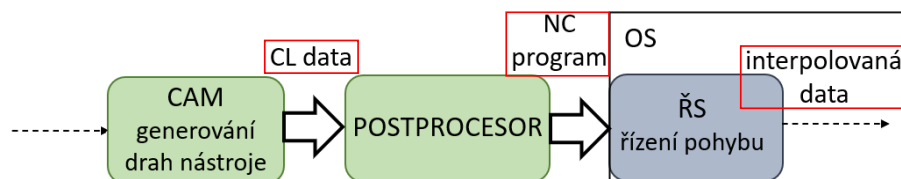
je nutné mít správně vytvořený postprocessor. Při odbavování NC programu na obráběcím stroji závisí na kinematice obráběcího stroje. Při změnách směru obrábění se mění posuvové rychlosti pohybových os, které musí zrychlovat, aby se dostaly na požadovanou hodnotu posuvové rychlosti a na danou polohu včas. Pokud by nastala situace, kdy jedna z pohybových os nestíhá a ostatní pohybové osy se musí zastavit, tak se deformovaný nástroj nebo obrobek vrátí do původního tvaru vlivem zmenšení řezných sil a nástroj může způsobit podřez. Při pětiosém frézování dochází ke změně naklonění stolu, kde při velké vzdálenosti TCP (Tool Center Point – středový bod nástroje) od osy rotace dochází k velké změně v translačních osách i při malých úhlech naklonění. Při reverzaci os (změna směru osy) dochází ke zpomalení na nulovou rychlost a k opětovnému zrychlování na požadovanou hodnotu.

Výsledná přesnost, jakost a produktivita je ovlivněna volenými parametry (např. tolerance dráhy nástroje, strategie obrábění, řezné podmínky, aj.) a je závislá na tom, jak kvalitní data se předávají v jednotlivých procesech, zvláště při programování s funkcí TCPM. Z těchto důvodů je dobré data vizualizovat a kontrolovat v předvýrobní a výrobní fázi. Vizualizace, které jsou dostupné v CAM systémech nemusí být přesné, protože v nich není zahrnuta dynamika obráběcího stroje. Navíc vizualizují dráhy nástroje na úrovni CL dat, ale obráběcí stroj pracuje s daty zpracovanými z NC programu v ŘS.

2.2 Vizualizační software

Vizualizace dráhy nástroje poskytuje možnost odchytení nedostatků před odbavením na obráběcím stroji (např. kolizí, nežádoucích přejezdů). Pokud je dráha nástroje vizualizována na úrovni interpolovaných dat, tak může sloužit jako zpětná vazba pro odhalení příčin vzniku nedostatků.

Dráha nástroje se dá vizualizovat na několika úrovních. Vizualizace na úrovni CL dat v CAM systémech je univerzální, ale mohou vznikat značná zkreslení vůči skutečné dráze nástroje zpracované ŘS. Ve vizualizaci na úrovni NC programu je zahrnut postprocessor pro daný stroj, ale výsledná dráha nástroje není ovlivněna obráběcím strojem. Vizualizace na úrovni ŘS je věrohodnější oproti vizualizaci na úrovni CL dat i NC programu, ale je nutné vytvořit transformace pro daný obráběcí stroj a jeho kinematiku. Na Obr. 8 jsou znázorněny možnosti vizualizace po procesech při přípravě dráhy nástroje.



Obr. 8: Možnosti vizualizace dráhy nástroje

2.2.1 Vizualizační software na úrovni CAM

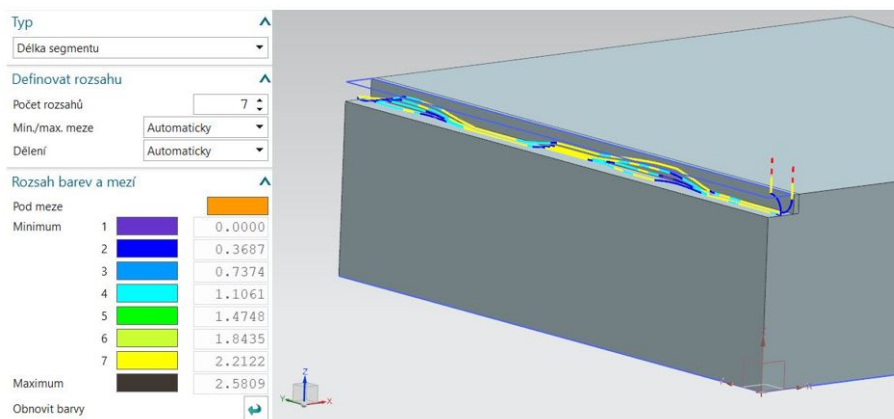
Vizualizace dráhy nástroje v CAM systémech spočívá ve vyobrazení dráhy nástroje z CL dat.

Siemens - analýza dráhy nástroje

V softwaru Siemens NX 12.0 je možnost analyzovat dráhu vygenerovaných CL dat pomocí nástroje „Analýza dráhy nástroje“. Na výběr jsou různé parametry analýzy pro pětiosé obrábění. Zobrazí se dráha nástroje v barvách podle zadaných rozsahů. Pomocí tohoto nástroje se dají identifikovat případné problémy ještě před obráběním, upravit dráhu nástroje a vyhnout se tím případným problémům při odbavení na obráběcím stroji.

Na výběr ze zobrazovaných parametrů jsou např. délka lineárních úseček, úhel vlečení, úhel naklopení. [12]

Na Obr. 9 lze vidět analýzu délky lineárních úseček dráhy nástroje pro jednoduchou drážku, ale s obrovskými výkyvy úhlu naklopení, proto se délky lineárních úseček liší.



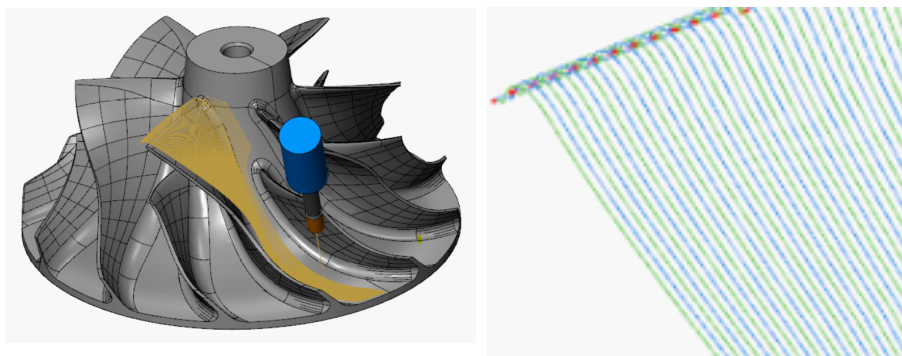
Obr. 9: Analýza dráhy nástroje v softwaru Siemens NX 12.0 – délka segmentu



Mastercam Machine Simulation

Mastercam Machine Simulation slouží k prověřování drah nástroje u tříosých, čtyřosých, nebo pětiosých frézovacích strojů. Pomáhá detekovat kolize ještě před odbavením NC programu na obráběcím stroji. Je to pomocný nástroj pro efektivnější a přesnější dráhy nástroje.

Poskytuje několik nástrojů pro posouzení efektivity a přesnosti dráhy nástroje. Na výběr k analýze je několik možných vlastností. Mezi těmito vlastnostmi jsou např. reverzace rotačních, nebo translačních os. Zobrazení směru pohybu a reverzací os je znázorněno na Obr. 10. [13]



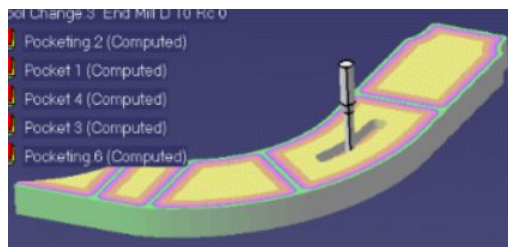
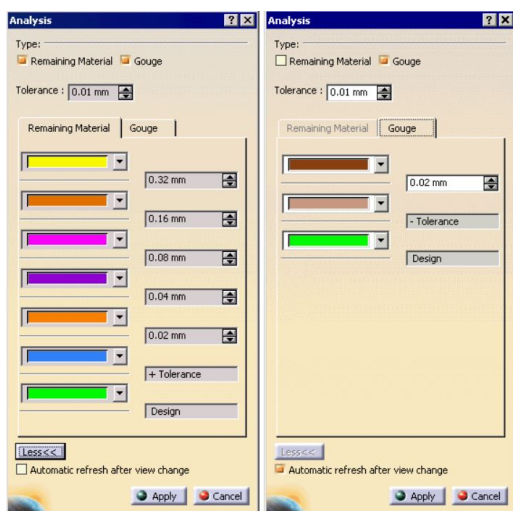
Obr. 10: Analýza dráhy nástroje v softwaru Mastercam Machine Simulation – vlevo – dráha nástroje s modelem; vpravo – barevné zobrazení směru pohybu [13]

CATIA V5 Machining

CATIA V5 Machining je CAM systém, který je určený pro nastavení obráběcího procesu. Modul Machine Tool Simulation dokáže simulovat obrábění s úběrem materiálu a kontrolovat kolize nástroje, stopky nástroje nebo držáku nástroje s obráběcím strojem i při pětiosém frézování. Porovnáním obrobeneho dílce a modelu dokáže zobrazit podřezy a přebytek materiálu. Na Obr. 11 je vlevo nastavení barevného zobrazení a vpravo virtuálně obrobená součástka s barevným znázorněním podřezů a nedořezů. [14]

HSMWorks

HSMWorks je CAM systém vytvořený pro spolupráci s CAD systémem Solidworks. HSMWorks dokáže simulovat úběr materiálu a kolize nástroje i při pětiosém frézování. [15]



Obr. 11: CATIA V5 – vlevo – nastavení barevného zobrazení; vpravo – znázornění podřezů a nedořezů na součásti [16]

2.2.2 Vizualizační software na úrovni ŘS

Analyze MyWorkpiece/Toolpath (AMWT)

Analyze MyWorkpiece je software určený pro vizualizaci a analýzu NC programů. Lze využít pro soustružení i frézování. Je určený pro optimalizaci před obráběním, nebo při hledání chyb, které nastanou při obrábění.

Pokud nastanou chyby při obrábění, tak může být příčinou jakýkoliv proces od CAD, přes CAM, generování NC programu, postprocesor až k samotnému obráběcímu stroji. Chybu může také způsobovat například nástroj, chlazení nebo dokonce materiál. Kvalita každého procesu závisí na kvalitě procesu předchozího a dat z těchto procesů.

Analyze MyWorkpiece dokáže zobrazit přepisy výstupu interpolátoru CNC (Computer Numerical Control – počítačové číslicové řízení), přičemž se přiřadí sada bodů ke každému bodu v part programu. Zobrazují se různé vlastnosti v různých barvách. Barvy mohou reprezentovat například hustotu bodů, zakřivení dráhy nástroje, nebo rychlost.

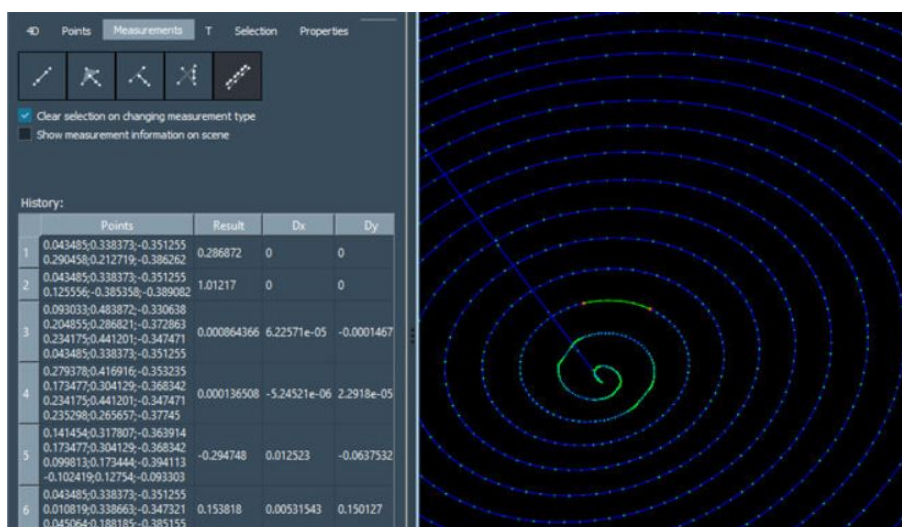
Nerovnoměrnost v bodech vygenerovaný softwarem CAD může být nalezen na špatné ploše obrobku. Indikuje to špatnou parametrizaci ve výstupu systému CAD. Pokud jsou dva body velmi blízko sebe, přerušuje se tím kontinuita zakřivení dráhy nástroje. [17], [18]

Analyze MyWorkpiece podporuje vstupní soubory v různých formátech.



- NC programy, nebo part program – *.mpf, *.cnc, *.spf
- JSON – *.json, *.zip
- CAD NX – *.stl
- Dráha nástroje – *.xml, *.csv [18]

Na Obr. 12 je analýza vzdáleností bodů dráhy nástroje v prostředí Analýze MyWorkpiece.

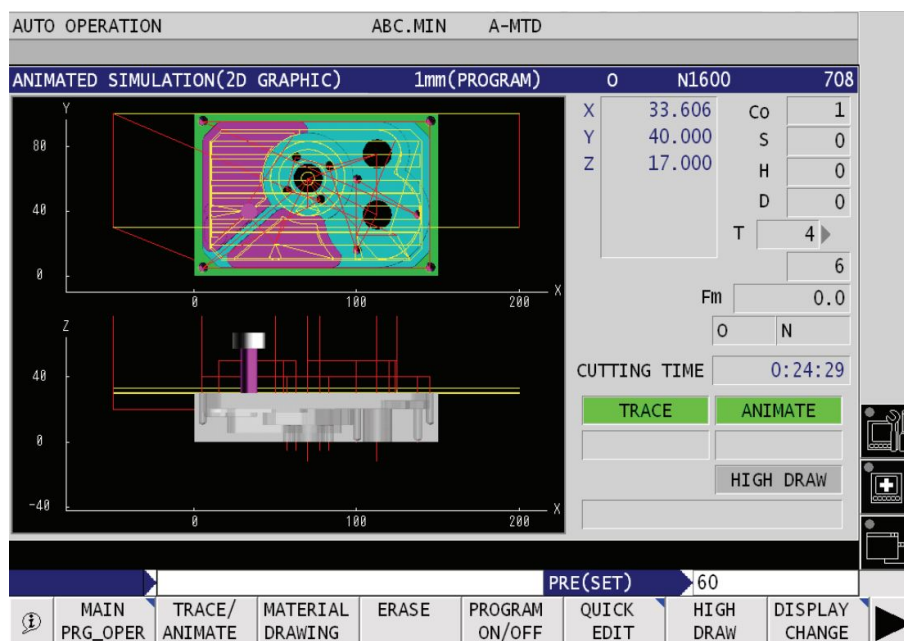


Obr. 12: Ukázka měření vzdáleností bodů dráhy nástroje v prostředí Analýze MyWorkpiece [18]

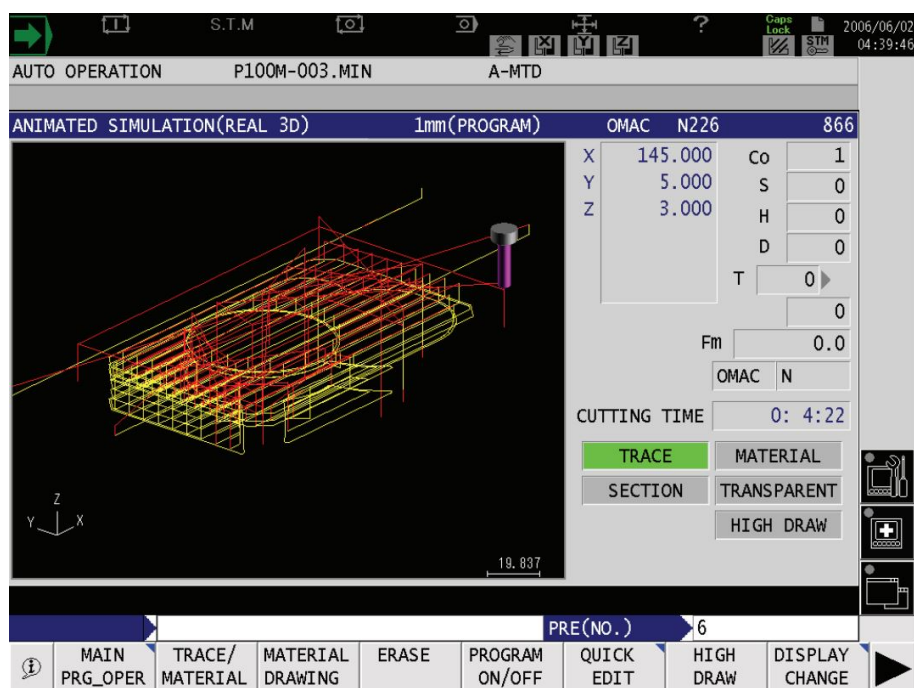
OKUMA

Na strojích OKUMA je vizualizace dráhy nástroje standardní. Zobrazují se odměřené body nástroje. Prostředí se nazývá Animated Simulation. Zobrazení může být 2D (dvojrzměrný), navolí se zobrazované roviny, nebo 3D. V jednotlivých pohledech se dá zapnout či vypnout zobrazení držáku nástroje nebo průhlednost obrobku. Dá se navolit hodnota posuvové rychlosti. Z této rychlosti se poté počítá potřebný čas na obrobení dílce. Je možné zobrazit dráhy nástroje, materiál, nástroj i úběr materiálu. Posuv v řezu, manuálně nastavený posuv a rychloposuv jsou barevně odlišeny. Ukázka uživatelského prostředí je na Obr. 13. V zobrazení ve 3D jsou podobné možnosti, dráha nástroje zobrazená ve 3D je na Obr. 14. [19]

Mezi inteligentní funkce řadí OKUMA funkci CAS (Collision Avoidance System – systém prevence kolizí), která slouží k predikci kolizních stavů a zabraňuje jim v reálném



Obr. 13: Ukázka uživatelského prostředí v Animated Simulation (2D Graphic) [19]



Obr. 14: Ukázka zobrazení drah nástroje v Animated Simulation (3D Graphic) [19]

čase. Obráběcí stroje s funkcí CAS jsou vybaveny 3D modelem obráběcího stroje. Uživatel nadefinuje upínací zařízení a nástroj s držákem. 3D modely se dají vytvořit v softwaru



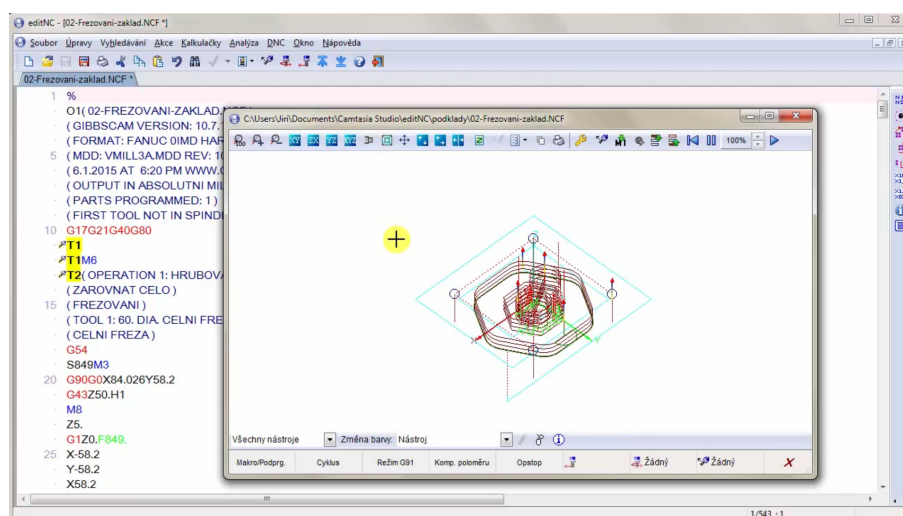
stroje. Na tomto virtuálním modelu se kontrolují kolizní stavy a to jak při ručním, tak i automatickém pohybu. Na virtuálním modelu se zobrazují všechny operace i při obrábění v reálném čase. Probíhá kontrola kolizí i na nově obrobených plochách. Virtuální prostředí CAS lze přenést na jiný počítač do softwaru Okuma 3D Virtual Monitor, kde se dá NC program simulovat a odladit. [20]

2.2.3 Vizualizační software na úrovni NC programu

Vizualizací dráhy nástroje na úrovni NC programu se zabýval autor Górecki Jan v bakalářské práci Software pro analýzu NC programů pro stroj MAS MCV1000. [21]

EditNC

EditNC je český editor pro kontrolu a vizualizaci NC programů. Také ukazuje výměnu nástroje, časy rychloposuvu, přímý posuv. Ukázka uživatelského rozhraní a zobrazení drah nástroje je na Obr. 15. [22]



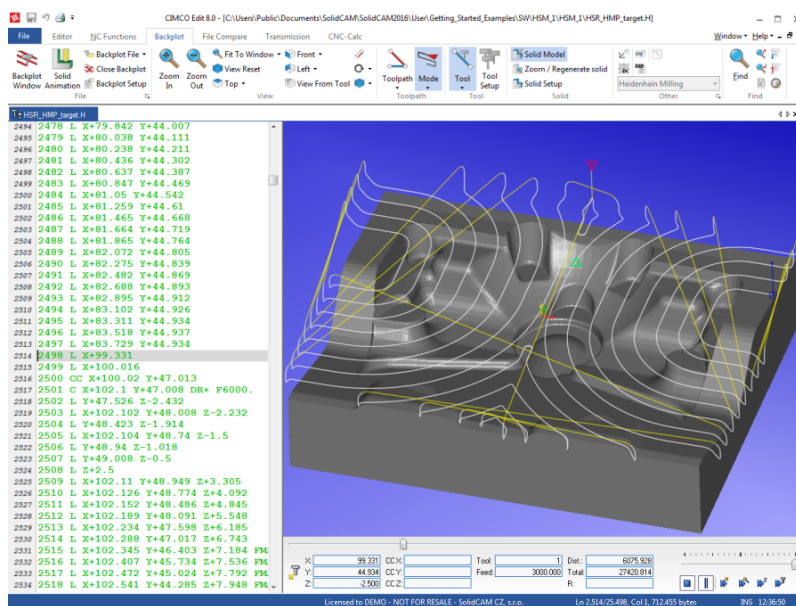
Obr. 15: Ukázka zobrazení dráhy nástroje v editoru EditNC [22]

CIMCO Edit

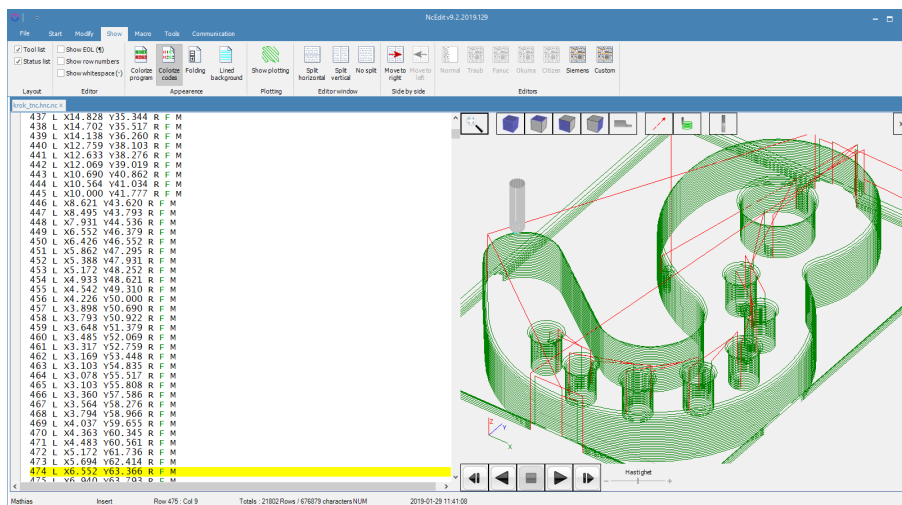
CIMCO Edit je další český editor NC programů. Kromě upravování NC programů také umožňuje vykreslení drah nástroje pro tříosé frézování a dvouosé soustružení. Dokáže zobrazit kolize. Ukázku zobrazení dráhy editoru v CIMCO edit je na Obr. 16. [23]

NcEdit

NcEdit je editor sloužící k úpravě NC programů. Uživatelské rozhraní je na Obr. 17. [24]



Obr. 16: Ukázka zobrazení dráhy nástroje v editoru CIMCO Edit [25]



Obr. 17: Ukázka uživatelského rozhraní v editoru NcEdit [24]

CAMotics

Editor CAMotics slouží k simulování NC programů tříosých strojů. Je to open-source editor, který je zadarmo. Tento editor je mířen pro využití v domácím prostředí než pro velké firmy. Tento editor dokáže vizualizovat, ověřit a simulovat dráhu nástroje. Do budoucna se počítá např. s podporou pětiosého frézování a optimalizací dráhy nástroje. [26]



2.2.4 Simulační software

Simulační software slouží především k optimalizaci dráhy nástroje. V těchto softwarech je většinou jednoduchá vizualizace dráhy nástroje, ale nejsou tam další možnosti analýzy nebo zobrazení. Tyto softwary simulují odebíraný materiál.

ICAM

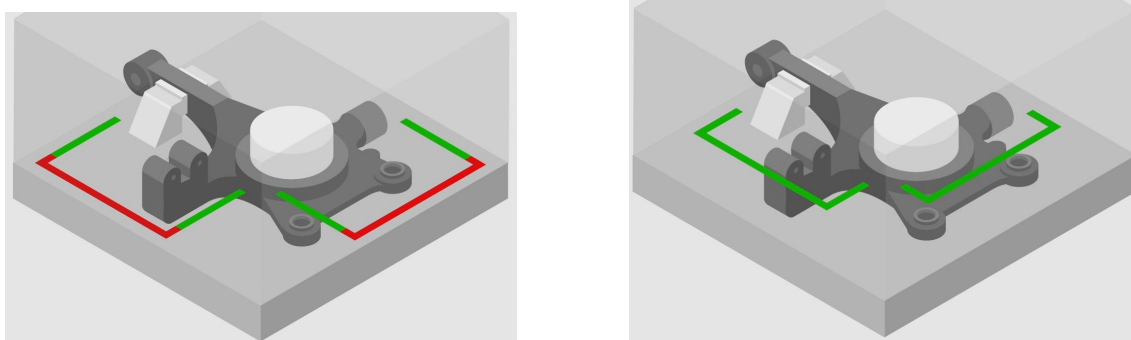
ICAM je software určený pro simulaci postprocesoru, obráběcích strojů a optimalizaci dráhy nástroje.

ICAM Control Emulator dokáže, kromě simulování dráhy nástroje, vyobrazit jak obráběcí stroj na NC program zareaguje. Dá se využít např. k detekci a eliminaci kolizí, povrchových podřezů. Simulátor poskytuje metodu ověřování, která umožňuje určit asociaci mezi NC programem a konkrétními operacemi uvnitř NC programu. Tento software podporuje přední CAD/CAM systémy, např. Siemens NX, Mastercam, CATIA. [27]

Pro optimalizaci dráhy nástroje slouží ICAM SmartPATH, SmartCUT a SmartFEED. SmartPATH optimalizuje dráhu nástroje hledáním optimální, bezpečné dráhy nástroje při přesouvání nástroje z jedné pozice na druhou vzhledem ke specifické kinematice obráběcího stroje a vzdálenosti. Zároveň dokáže kontrolovat kolize s dynamicky se měnícím obrobkem, upínkami nebo s hýbajícími se částmi obráběcího stroje. Ukázka optimalizace dráhy je na Obr. 18. SmartCUT je zaměřen na úpravu řezných podmínek pro zvýšení efektivity obrábění. Simulací odebíraného materiálu je detekováno, kdy je nástroj v řezu a kdy ve vzduchu. Podle toho se upraví řezné podmínky a případně se upraví posuv na rychloposuv. S kombinací se SmartPATH dokáže hledat nejrychlejší cestu pro obrábění materiálu. SmartFEED slouží pro úpravu posuvu v závislosti na hloubce řezu. Optimalizuje řezné posuvy použitím simulace odebíraného materiálu a automaticky přepočítá posuvy pro daný nástroj. Při menší velikosti odebíraného materiálu zvýší posuv a naopak. [28]

VERICUT

VERICUT je software pro ověření, optimalizaci NC programu a simulaci CNC obráběcího stroje. Simuluje NC program vytvořený systémem CAM. VERICUT má mnoho modulů a mohou fungovat nezávisle na sobě, tudíž se dají využít jen ty potřebné. [29]



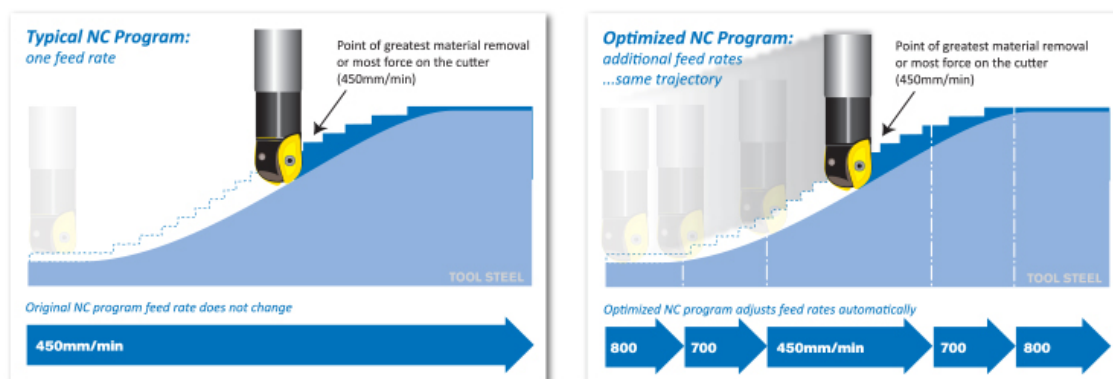
Obr. 18: SmartPATH – vlevo – dráha nástroje bez optimalizace; vpravo – dráha nástroje po optimalizaci [28]

Jeden ze softwarů řady VERICUT se nazývá VERICUT VERIFICATION. Tento základní software se dá přizpůsobit dalšími moduly. Vstupem je NC program. VERICUT VERIFICATION detekuje chyby v NC programu, pomáhá bránit kolizím a zničení nástroje, emuluje řídicí systém a zobrazuje, měří a analyzuje geometrii obrobku. Jeden z přídatných modulů je AUTO-DIFF, který detekuje podřezy nebo nedořezy porovnáním modelu a virtuálně obrobeného modelu. Pomocí modulu Machine Simulation detekuje kolize mezi všemi částmi obráběcího stroje. Také dokáže proces vizualizovat. Modul Analýze zobrazuje NC program a upozorňuje na nevyužitě řezné podmínky, vysoké řezné síly, úběry materiálů, momenty nebo průhyby nástroje. Tato analýza ukazuje pohled na obrábění před samotným odbavováním NC programu na obráběcím stroji. Modul VERICUT OptiPath skrz simulaci zajistí optimální posuvy v závislosti na množství odebíraného materiálu. Výstupem je identická dráha nástroje s původní, ale s vylepšenými posuvy. Počítá s faktory jako např. příkon, typ vřetena, chlazení, materiál, počet zubů. Znázorněno je to na Obr. 19. [29], [30]

Third Wave Systems Production Module

Production Module od firmy Third Wave Systems je integrovatelný software do systémů CAM Siemens NX, Mastercam a CATIA. Znamená to, že není nutné používat další software, ale používá se přímo v prostředí daného CAM systému. Slouží k analýze a optimalizaci drah nástroje.

Production Module pomáhá vybrat vhodnou dráhu nástroje. Analyzuje a minimalizuje odchylky, zvyšuje životnost nástroje, redukuje výrazné skoky v otáčkách vřetena. [31]



Obr. 19: Znárodnění optimalizace posuvu – vlevo – jedna posuvová rychlost pro dráhu nástroje; vpravo – více posuvových rychlostí pro dráhu nástroje [30]

IMSverify

Software pro kontrolu NC programu předtím než se odbaví na obráběcím stroji. Detekuje kolize obrobku a nástroje se všemi částmi obráběcího stroje. Dá se souběžně zobrazit data ze systému CAM, NC program z postprocesoru a odebrání materiálu zároveň. [32]

2.3 Shrnutí řešerše

Analýza a vizualizace drah nástroje lze provádět na několika úrovních. První vizualizace je při vytváření drah nástroje v CAM systémech. Tato analýza je přístupná v samotném systému CAM, ve kterém je víceméně nutné vytvářet dráhy nástroje pro složitější tvary dílců. Vizualizace lze provádět v Siemens NX 12.0, Mastercam i v softwaru CATIA V5. Běžnou součástí CAM systémů je také simulace drah nástroje kvůli kontrole správnosti a také kvůli kolizím či nežádoucím přejezdům nástroje. Tato vizualizace probíhá většinou na úrovni CL dat. (Výjimečně jsou vizualizována interpolovaná data ze simulace řídicího systému, ke kterému je nutné mít nadstavbový modul – využití především ke zpřesnění obráběcího času, ne k analýze dráhy nástroje.)

Další možností vizualizace drah nástroje je na úrovni dat z řídicího systému. NC program je řídicím systémem interpolován a vznikají interpolovaná data, která mohou být analyzována. Software, se kterým lze vizualizovat a analyzovat interpolovaná data z řídicího systému, je software Analyze My Workpiece od firmy Siemens. Tento software



spolupracuje s řídicími systémy Sinumerik. Narozdíl od CL dat jsou v těchto datech zahrnuty vlastnosti stroje a s tím je spojena vyšší přesnost analýzy. Nicméně stroje mají různé kinematiky a s tím je spojen problém s transformací dat ze stroje zpět na dráhu nástroje.

Na strojích OKUMA je standardní možností vizualizace dráhy nástroje pomocí software Animated Simulation (2D nebo 3D). Z navolené posuvové rychlosti se vypočítá strojní čas. Posuvová rychlost, manuálně nastavená posuvová rychlost a rychloposuv jsou barevně odlišeny. Mezi inteligentní funkce řadí OKUMA funkci CAS, která slouží k predikci kolizních stavů a zabraňuje jim v reálném čase.

Simulační software slouží především k optimalizaci NC programu než k analýze. Zaměřováním neproduktivní posuvové rychlosti za rychlejší posuvovou rychlost, případně za rychloposuv, optimalizací dráhy zvyšují efektivitu odbavení NC programu na obráběcím stroji. Tento software pracují na úrovni NC programu a simulaci řezných sil a tudíž není zahrnut vliv obráběcího stroje.

Editory NC programů také nejsou zaměřeny na analýzu a vizualizaci dráhy nástroje, ale zaměřují se především na úpravu samotného NC programu. V případě nutnosti ruční změny je tento software nápomocný. Také dokáží vizualizovat dráhu nástroje na úrovni NC programu.

Pro analýzu drah nástroje je nutné dráhy nástroje vizualizovat v závislosti na různých proměnných (rychlost TT (Tool Tip – špička nástroje), reverzace pohybových os, naklopení rotační osy, nárok na zrychlení pohybových os). Pro vytvoření vizualizace je potřeba vytvořit kinematický model daného obráběcího stroje (MCU 700 VT-5X) pro transformaci dat získaných z ŘS obráběcího stroje na špičku nástroje (nebo TCP).

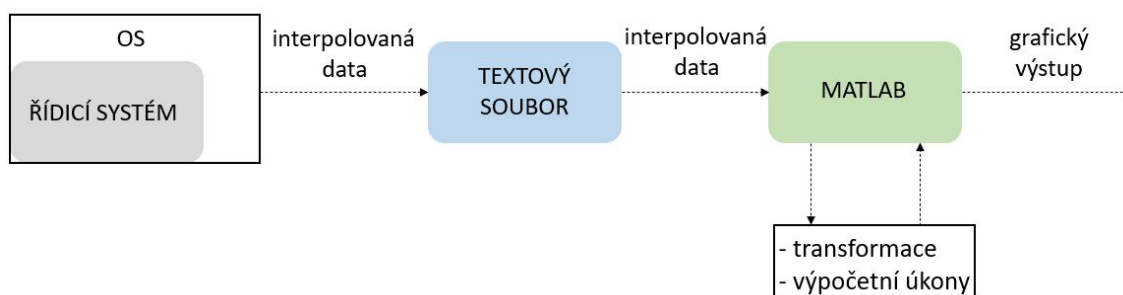


3 Návrh variant zpracování vizualizačního nástroje

Z provedené rešerše je zřejmé, že není mnoho nástrojů pro vizualizaci a analýzu interpolované dráhy nástroje. Data jsou získaná z ŘS, tedy jsou v nich zahrnuty všechny možné chyby, které vznikají při tvorbě a odbavování NC programu. Předmětem této bakalářské práce není vizualizace z dat, které předcházejí před samotným odbavením, ale naopak až po odbavení na obráběcím stroji. Tyto data zvyšují přesnost výpočtů vizualizace a jsou blíže ke skutečnému průběhu obrábění než je tomu u CL dat nebo NC programu. Proto jsou všechny varianty zaměřeny na interpolovaná data z obráběcího stroje. Varianty se liší způsobem zpracování dat. Kritérii pro rozhodování mezi jednotlivými variantami byla jednoduchost realizace, nutné licence dalšího softwaru, rychlost zpracování dat, uživatelská přívětivost, uživatelské možnosti přizpůsobení funkce vizualizačního nástroje.

3.1 Varianta A – Matlab kód

Interpolovaná data získaná z obráběcího stroje se převedou v softwaru Matlab do matice a s tou se bude dále pracovat pro vizualizaci a analýzu. V softwaru Matlab jsou naprogramovány potřebné výpočty a funkce pro vizualizaci interpolovaných drah nástroje a pro analýzu dráhy nástroje. Uživatel bude mít přístup ke kódu a bude moci kód upravit dle svých potřeb, ale musí mít licenci softwaru Matlab. Schéma lze vidět na Obr. 20.

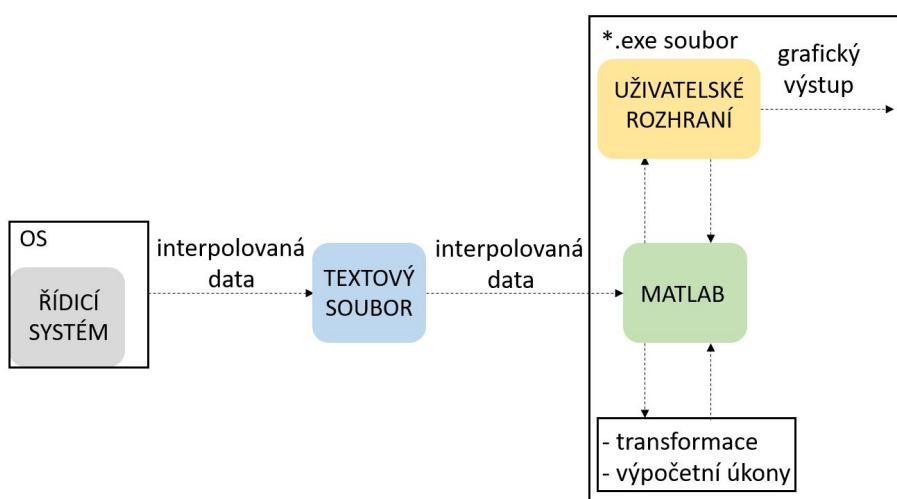


Obr. 20: Schéma návrhu řešení varianty A – Matlab kód



3.2 Varianta B – Matlab App designer

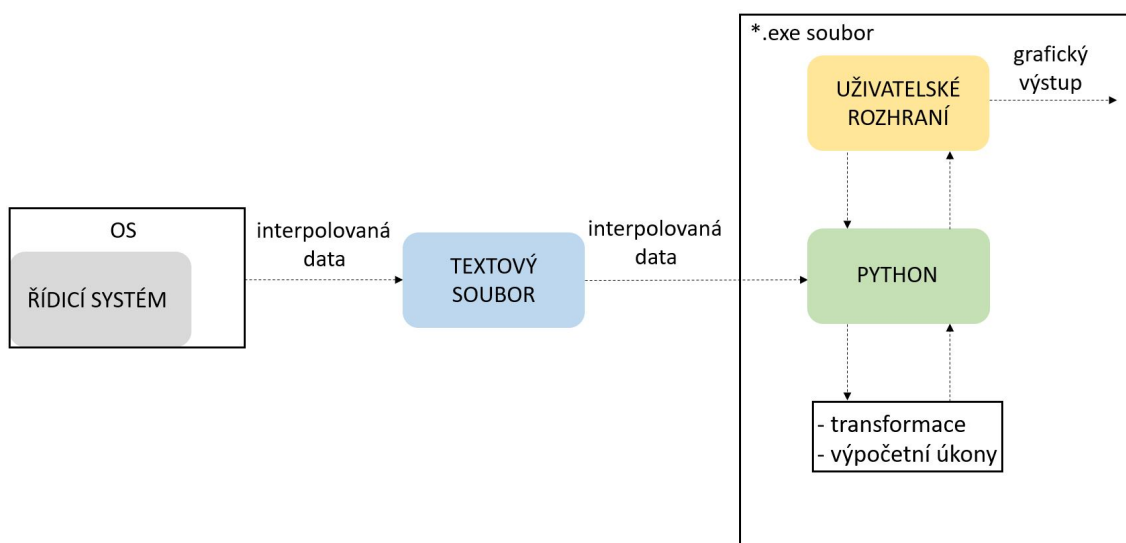
V této variantě budou využity stejné výpočty a funkce jako u varianty A – Matlab kód. Rozdílem bude vytvořené uživatelské rozhraní přes nástroj App designer v softwaru Matlab. Uživatel bude mít přístup ke kódu v omezené míře, protože vizualizační nástroj bude ve formátu *.exe. Uživatel přes uživatelské rozhraní importuje interpolovaná data a zadá délku nástroje a posunutí obrobkového souřadnicového systému. Oproti variantě A – Matlab kód není nutná licence softwaru Matlab. Schéma lze vidět na Obr. 21.



Obr. 21: Schéma návrhu řešení varianty B – Matlab App designer

3.3 Varianta C – Python

Ve variantě C – Python budou využity stejné výpočty a funkce jako u varianty A i B, ale v tomto případě je použit jiný programovací jazyk. Vizualizační nástroj je vytvořen např. v programovacím jazyku Python. Oproti variantě A – Matlab kód není nutná licence softwaru Matlab. Jako u varianty B – Matlab App designer je vytvořeno uživatelské rozhraní, přes které uživatel komunikuje s vizualizačním nástrojem. Výhoda této varianty spočívá v rychlosti zpracování dat oproti variantě A i B. Nevýhodou této varianty je obtížnější naprogramování vizualizačního nástroje. Schéma lze vidět na Obr. 22.



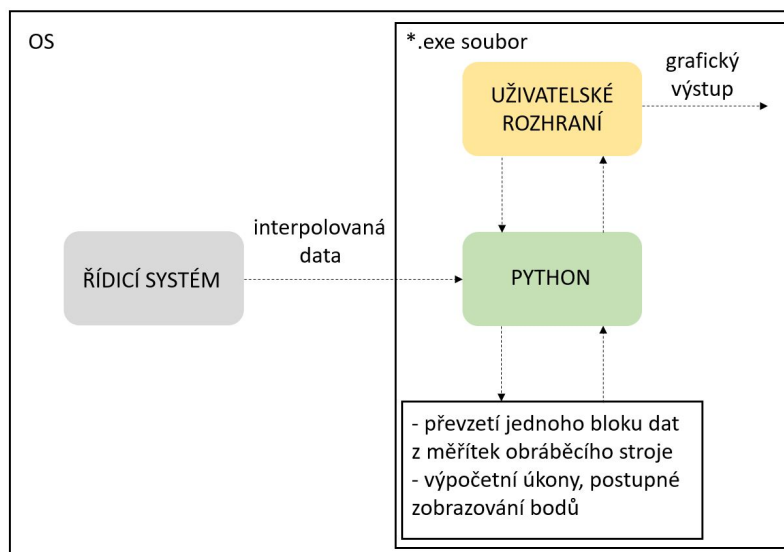
Obr. 22: Schéma návrhu řešení varianty C – Python

3.4 Varianta D – Řídicí systém

Varianta A, B i C pracují s interpolovanými daty, které jsou uloženy např. v textovém souboru. Varianta D – Řídicí systém přenáší interpolovaná data z ŘS obráběcího stroje v průběhu obrábění a současně i provádí vizualizaci v reálném čase. Vizualizační nástroj k tomu přizpůsobený je vhodnější vytvořit v jiném programovacím jazyku než v softwaru Matlab. Výhodou této varianty je rychlost zpracování dat oproti všem variantám. Nevýhodou je obtížnost zpracování a zakomponování vizualizačního nástroje do ŘS. Schéma lze vidět na Obr. 23.

3.5 Výběr varianty zpracování vizualizačního nástroje

Při výběru varianty zpracování vizualizačního nástroje byla zohledněna jednoduchost realizace řešení. Rozhodnutí ovlivnila zkušenost se softwarem Matlab, protože byl při studiu využíván. Naprogramování vizualizačního nástroje by bylo v jiném programovacím jazyce časově náročnější. Pro implementaci do řídicího systému by bylo zapotřebí i mnoho jiných znalostí. Kromě varianty A – Matlab kód nejsou potřebné žádné licence. U varianty A – Matlab kód je nutné mít licenci softwaru Matlab pro spuštění vizualizačního nástroje. U varianty B – Matlab App designer je společně s vizualizačním nástrojem ve formátu *.exe i soubor pro spuštění bez licence softwaru Matlab. Rychlost zpracování



Obr. 23: Schéma návrhu řešení varianty D – Řídicí systém

dat je nejlepší u varianty D – Řídicí systém, protože probíhá v reálném čase. Na druhou stranu u ostatních variant se počítá s přenášením interpolovaných dat např. v textovém souboru a možností vizualizovat dráhu nástroje a provádět analýzu i mimo prostor obráběcího stroje. Rychlost zpracování dat u varianty A – Matlab kód a B – Matlab App designer bude pomalejší oproti variantě C – Python. Pro uživatele jsou uživatelsky přívětivé všechny varianty, kromě varianty A – Matlab kód. V těchto variantách je vytvořeno uživatelské rozhraní, přes které uživatel komunikuje s vizualizačním nástrojem.

Pro uživatelskou přívětivost a jednodušší programování byla vybrána varianta B – Matlab App designer. V této variantě je vizualizační nástroj vytvořen v softwaru Matlab v prostředí App designer, uživatel má k dispozici uživatelské rozhraní a nemá přístup ke kódu.



4 Tvorba vizualizačního nástroje

V následujících kapitolách bude popsáno řešení vizualizačního nástroje pro vizualizaci dat z ŘS (dále vizualizační nástroj). Princip vizualizačního nástroje, kinematika stroje, potřebné výpočty, schémata vstupů a výstupů jsou popsány v následující kapitole. Dále bude popsáno programování vizualizačního nástroje a ukázka případových studií pro využití vizualizačního nástroje.

Vizualizační nástroj je vytvořen v softwaru Matlab. Z ŘS obráběcího stroje se zaznamenají pomocí funkce osciloskopu (TNCscope) interpolovaná data. Interpolovaná data se importují přes uživatelské rozhraní do vytvořeného vizualizačního nástroje, kde si uživatel vybere, které dráhové parametry se mají zobrazit na transformované dráze nástroje.

Vizualizační nástroj slouží k vizualizaci a analýze dat z řídicího systému. Může pomoci v hledání nedostatků na obrobeném dílci, hledání příčin vzniků chyb na zmetku. Při zjištění příčiny vzniku nedostatku proběhne odstranění příčiny, ať už na samotné dráze nástroje v CAM systému, upravení rezných podmínek nebo revize obráběcího stroje, jestliže dochází k chybě přímo na obráběcím stroji. Vizualizační nástroj umožní blíže poznat na jakém místě řetězce se může chyba potenciálně objevit.

4.1 Kinematika pětiosých CNC strojů

Kinematika popisuje polohu, pohyb těles, mechanismů bez zkoumání sil způsobující tento pohyb. Počet pohybových os obráběcího stroje obvykle odpovídá počtu stupňů volnosti. Pro maximální pružnost orientace nástroje vzhledem k obrobku je požadováno minimálně pět stupňů volnosti. To znamená, že nástroj a obrobek mohou být relativně orientovány pod jakýmkoliv úhlem. [33]

Klasifikace kinematických struktur pětiosých frézovacích strojů

Kinematické struktury pětiosých frézovacích strojů mohou být rozděleny dle počtu translačních os a počtu rotačních os.

- 3 translační osy a 2 rotační osy
- 2 translační osy a 3 rotační osy
- 1 translační osa a 4 rotační osy



- 5 rotačních os

Téměř všechny pětiosé obráběcí stroje mají kinematiku se třemi translačními osami a dvěma rotačními osami. Do této skupiny také patří řada svařovacích robotů nebo laserových obráběcích center. Obráběcí stroje se dvěma translačními osami a třemi rotačními osami se mohou využívat při obrábění lodních šroubů. Zbylé kinematické struktury se využívají u robotů, většinou s přidáním více stupňů volnosti.

Dále lze rozdělit kinematickou strukturu se třemi translačními osami a dvěma rotačními osami podle umístění rotačních os. Rotační osa může nést vřeteno nebo stůl. Pořadí os v kinematickém řetězci nesoucím vřeteno nebo stůl není důležité, pokud jsou osy stejného typu (rotační nebo translační).

- Rotační osy nesou vřeteno.
- Rotační osy nesou stůl.
- Jedna rotační osa nese vřeteno a druhá nese stůl.

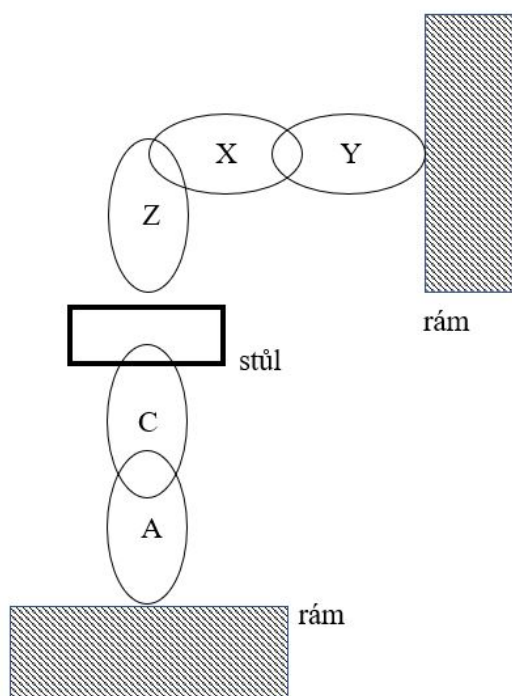
Pětiosé frézovací stroje s oběma rotačními osami nesoucími vřeteno mají menší tuhost, jsou vhodné pro obrábění obrobků s většími rozměry. Obráběcí stroj s oběma rotačními osami nesoucími stůl mají tuhost větší, ale nejsou vhodné pro obrobky s většími rozměry a hmotností. Poslední varianta se využívá k obrábění menších obrobků. [33]

4.1.1 Kinematika obráběcího stroje MCU 700 VT-5X

Pětiosé vertikální centrum MCU 700 VT-5X má tři translační osy a dvě rotační osy. Na Obr. 24 je kinematický řetězec stroje MCU 700 VT-5X. Osa Y nese osy X a Z, osa Z je nesená na ose X. Osa nástroje je vždy rovnoběžná s osou Z obráběcího stroje. Obě rotační osy jsou na stole. Rotační osa C je nesená naklápěním rotační osy A. Vybrané parametry jsou vypsány v Tab. 4.1 a stroj MCU 700 VT 5-X je na Obr. 25.

4.1.2 Transformace interpolovaných dat

Interpolovaná data jsou zaznamenána ve strojním souřadnicovém systému. V ŘS obráběcího stroje jsou zaznamenány polohy jednotlivých os s konstantním časovým krokem.



Obr. 24: Kinematický řetězec stroje MCU 700 VT-5X (dle [33])

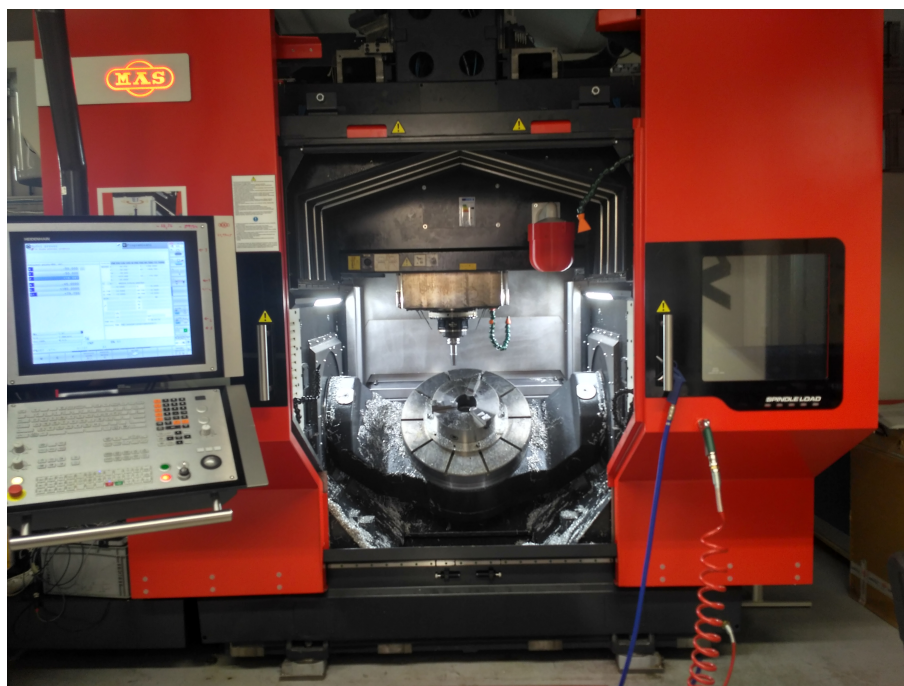
Tabulka 4.1: Vybrané parametry stroje MCU 700 VT-5X [34]

Pojezd v ose X	700 mm
Pojezd v ose Y	820 mm
Pojezd v ose Z	550 mm
Pracovní posuv v osách X/Y/Z	1 ÷ 60000 mm/min
Rozsah naklápění osy A	+120/−120 °
Rozsah otáčení osy C	neomezeně °
Rychloposuv v osách X/Y/Z	60000 mm/min

Poloha osy Z zaznamenává čelo vřetena, to znamená, že pro polohu špičky nástroje se musí odečíst délková korekce. Schéma obráběcího stroje MCU 700 VT-5X a souřadnicových systémů je na Obr. 26.

Transformace ze strojního souřadnicového systému ke špičce nástroje je podle rovnice 5.

$${}^M r_{ML} = T_{M1} \cdot T_{12} \cdot T_{23} \cdot T_{34} \cdot T_{4W} \cdot {}^W r_{WL} \quad (5)$$

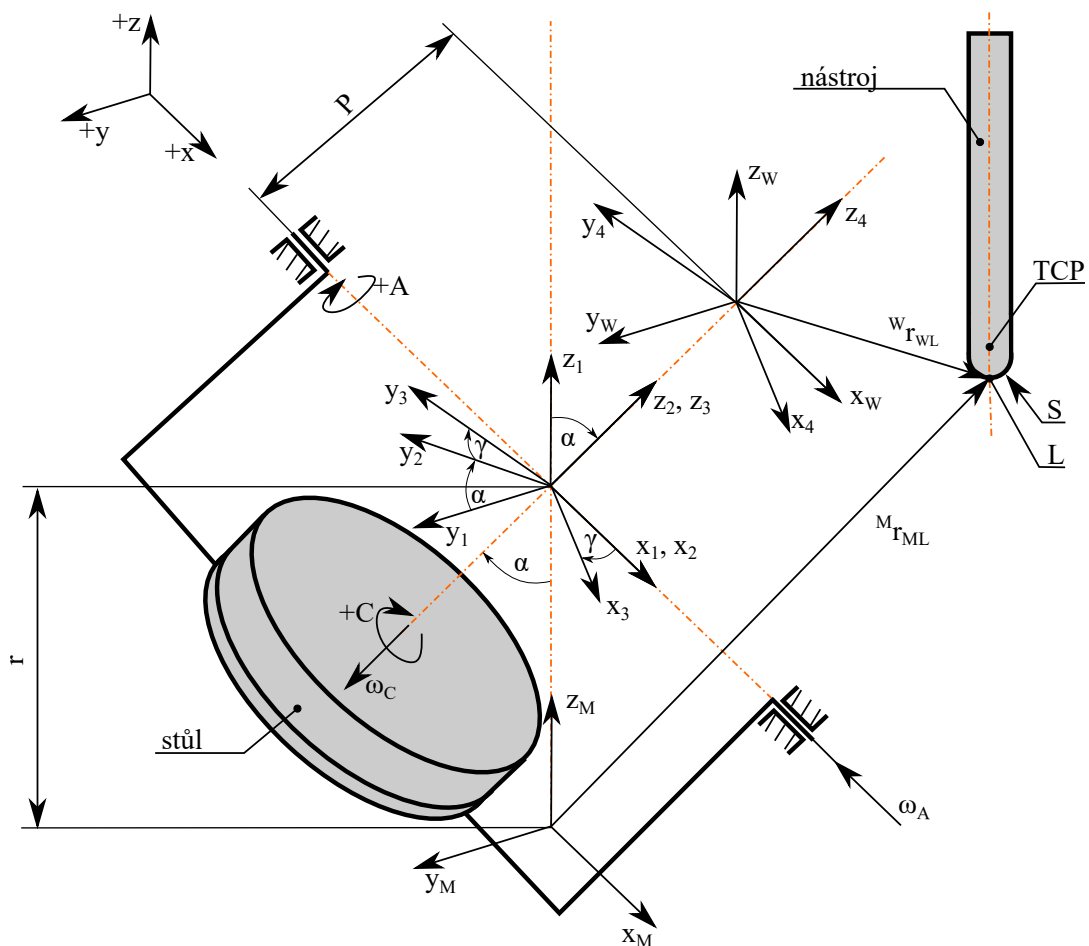


Obr. 25: Stroj MCU 700 VT 5-X KOVOSVIT MAS Machine Tools, a.s.

$M_{r_{ML}}$ je průvodič bodu L z počátku strojního souřadnicového systému, T_{M1} – transformace ze strojního souřadnicového systému do průsečíku os rotace, T_{12} – transformace souřadnicového systému podle primární osy rotace, T_{23} – rotace podle sekundární osy rotace, T_{34} – transformace z průsečíku os rotace do obrobkového souřadnicového systému, T_{4W} – transformace z obrobkového souřadnicového systému do souřadnicového systému v CAM, ke kterému jsou vztaženy dráhy nástroje, ${}^W r_{WL}$ – průvodič bodu L z počátku obrobkového souřadnicového systému.

Transformační matice $T_z(z)$, $R_x(\alpha)$ a $R_z(\gamma)$ jsou zavedeny v rovnicích 6, 7 a 8. Označení průvodiče ${}^a r_{bL}$ značí průvodič bodu L z počátku souřadnicového systému b a se složkami vyjádřenými v souřadnicovém systému a. [35]

$$T_z(z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$



Obr. 26: Schéma kinematiky stroje MCU 700 VT-5X

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$



Strojní souřadnicový systém je na stroji MCU 700 VT-5X uprostřed stolu na horní ploše při úhlu naklonění rotační osy A nula, pak platí transformace podle rovnice 9.

$${}^M r_{ML} = T_z(r) \cdot R_x(-\alpha) \cdot R_z(-\gamma) \cdot T_z(P) \cdot {}^W r_{WL} \quad (9)$$

Vzdálenost r je poloměr osy otáčení stolu, α – naklonění osy A, γ – natočení osy C, vzdálenost P – vzdálenost obrobkového souřadnicového systému vůči ose otáčení stolu.

Pro výpočet průvodiče ${}^W r_{WL}$ platí rovnice 10.

$${}^W r_{WL} = T_z(P)^{-1} \cdot R_z(-\gamma)^{-1} \cdot R_x(-\alpha)^{-1} \cdot T_z(r)^{-1} \cdot {}^M r_{ML} \quad (10)$$

4.2 Zobrazované dráhové parametry

Uživatel vizualizačního nástroje má přes uživatelské rozhraní možnosti zobrazení dráhových parametrů. Zobrazované dráhové parametry jsou rychlost translační osy, zrychlení translační osy, úhlová rychlost rotační osy, úhlové zrychlení rotační osy, naklonění rotační osy A, natočení rotační osy C, reverzace rotačních os, nárok na zrychlení pohybových os a výsledná rychlost.

4.2.1 Rychlost, zrychlení

Rychlosti translačních os se získají z pohybové osy a zaznamenaného času podle rovnic 11, 12 a 13. Pro výpočet byl použitý zjednodušený vzorec rychlosti po sečně, protože hodnoty polohy polohových os jsou známé po velmi krátkých časových intervalech, tak je chyba zanedbatelná. [36]

$$v_X = \frac{dX}{dt} \approx \frac{X(t_2) - X(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (11)$$

$$v_Y = \frac{dY}{dt} \approx \frac{Y(t_2) - Y(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (12)$$

$$v_Z = \frac{dZ}{dt} \approx \frac{Z(t_2) - Z(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (13)$$

Celková rychlost se vypočítá z rovnice 14.

$$v = \sqrt{v_X^2 + v_Y^2 + v_Z^2} \quad (14)$$



Zrychlení translačních os se vypočítají z rovnic 15, 16 a 17.

$$a_X = \frac{d^2X}{dt^2} \approx \frac{v_X(t_2) - v_X(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (15)$$

$$a_Y = \frac{d^2Y}{dt^2} \approx \frac{v_Y(t_2) - v_Y(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (16)$$

$$a_Z = \frac{d^2Z}{dt^2} \approx \frac{v_Z(t_2) - v_Z(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (17)$$

Celkové zrychlení se vypočítá z rovnice 18.

$$a = \sqrt{a_X^2 + a_Y^2 + a_Z^2} \quad (18)$$

Úhlová rychlost a úhlové zrychlení rotačních os se vypočítají z rovnic 19, 20, 21 a 22.

$$\omega_A = \frac{d\alpha}{dt} \approx \frac{\alpha(t_2) - \alpha(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (19)$$

$$\omega_C = \frac{d\gamma}{dt} \approx \frac{\gamma(t_2) - \gamma(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (20)$$

$$\alpha_A = \frac{d\omega_A}{dt} \approx \frac{\omega_A(t_2) - \omega_A(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (21)$$

$$\alpha_C = \frac{d\omega_C}{dt} \approx \frac{\omega_C(t_2) - \omega_C(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (22)$$

4.2.2 Výsledná rychlost

Výsledná rychlost špičky nástroje (nebo TCP) vzhledem k rámu obráběcího stroje. Špička nástroje se pohybuje rychlostí danou translačními osami, ale obrobek, který je nesen otočně-sklopným stolem, se pohybuje rychlostí jinou. Obrobek se může pohybovat obecně jiným směrem než nástroj. V této podkapitole je popsán vliv stolu na výslednou rychlost špičky nástroje jak v rotační ose A, tak i rotační ose C. Výpočet je vztažen ke špičce nástroje, ale obrábí se kontaktním bodem, který je obecně jiný než je špička nástroje (dokonce je snaha vyhnout se obrábění špičkou nástroje kvůli nulové rezné rychlosti). Obvodová rychlost rotačních os se spočítá z rovnic 23 a 24.

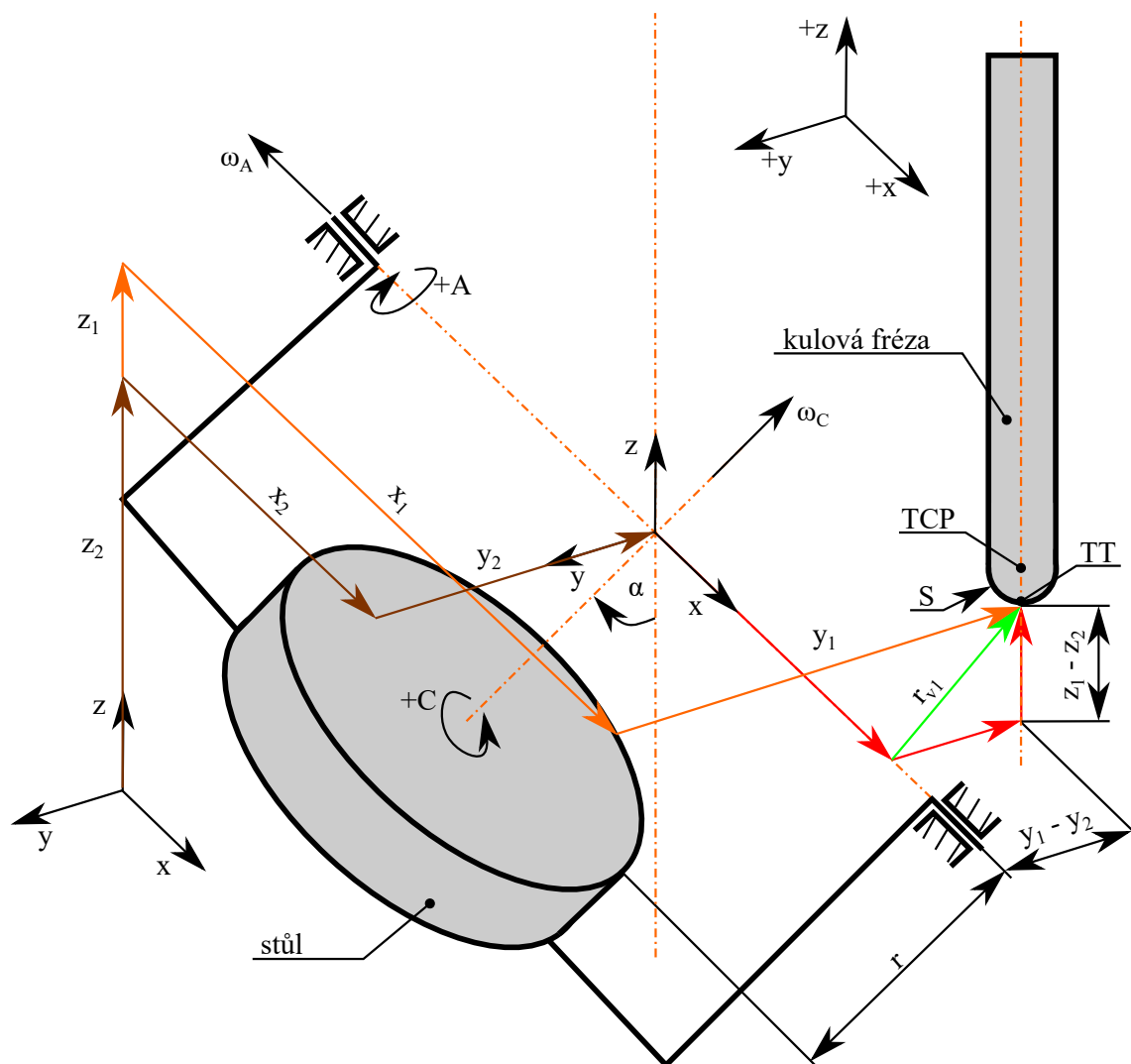
$$v_A = \omega_A \cdot r_{v1} \quad (23)$$



$$v_C = \omega_C \cdot r_{v2} \quad (24)$$

Obvodová rychlost je závislá na úhlové rychlosti a poloměru.

Pro znalost rychlostí od rotačních os je nutné znát vzdálenost od osy rotace, tedy vzdálenost od špičky nástroje ke středu otáčení rotační osy. Schéma pro výpočet rychlosti od rotace A je na Obr. 27. Na obrázku je zjednodušené schéma otočného stolu se znázorněnou kulovou frézou.



Obr. 27: Schéma pro výpočet vzdálenosti pro výslednou rychlost od osy A

Poloha počátku středu rotace od osy A a poloha špičky nástroje se vztahuje k počátku strojního souřadnicového systému. Výsledná rychlost, která vznikne od rotace osy A, se vypočítá ze známé úhlové rychlosti a vzdálenosti, které záleží na poloze špičky nástroje.



Vzdálenost je znázorněna na Obr. 27 zeleným vektorem. Výpočet vzdálenosti r_{v1} je z rovnice 25.

$$r_{v1} = \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (25)$$

Poloha špičky nástroje ve strojním souřadnicovém systému je y_1 a z_1 a y_2 , z_2 je poloha středu rotace stolu ve strojním souřadnicovém systému. Výsledná rychlost od rotace osy A se dopočítá ze vztahu 23.

Na Obr. 27 lze vidět, že pohyb nástroje v ose x nemá žádný vliv na vzdálenost špičky nástroje od osy rotace a neovlivňuje výslednou rychlost od rotace osy A.

Schéma pro výpočet rychlosti od rotace C je na Obr. 28. Na obrázku je zjednodušený otočný stůl se znázorněnou kulovou frézou.

Poloha počátku středu rotace od osy C a poloha špičky nástroje se vztahuje k počátku strojního souřadnicového systému. Výsledná rychlost, která vznikne od rotace osy C, se vypočítá ze známé úhlové rychlosti a vzdálenosti, které záleží na poloze špičky nástroje. Vzdálenost je znázorněna na Obr. 28 zeleným vektorem. Výpočet vzdálenosti r_{v2} je z rovnice 26.

$$r_{v2} = \sqrt{[\cos\alpha(r \cdot \sin\alpha + y_1 - y_2) + \sin\alpha(z_2 - r \cdot \cos\alpha - z_1)]^2 + (x_1 - x_2)^2} \quad (26)$$

Souřadnice špičky nástroje ve strojním souřadnicovém systému jsou x_1 , y_1 a z_1 a x_2 , y_2 , z_2 jsou souřadnice středu rotace stolu ve strojním souřadnicovém systému. Z Obr. 29 je vidět původ první poloviny vztahu pod odmocninou, v obrázku je tento vektor znázorněn modrou barvou.

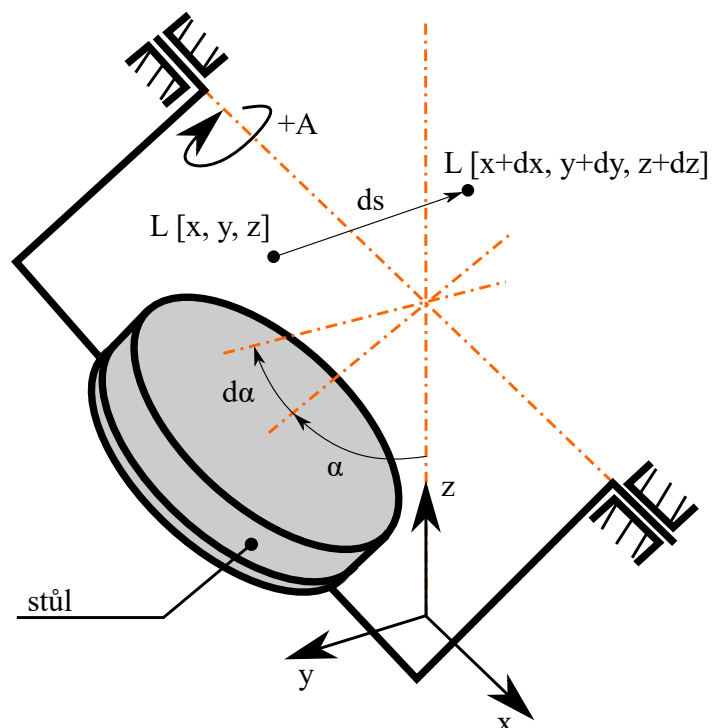
Modrý vektor se vypočítá z rovnice 27.

$$r_y + r_z = \cos\alpha \cdot (r \cdot \sin\alpha + y_1 - y_2) + \sin\alpha \cdot (z_2 - r \cdot \cos\alpha - z_1), \quad (27)$$

Posunutí špičky nástroje v ose y je r_y a r_z je posunutí špičky nástroje v ose z, dále r je poloměr otáčení stolu, úhel α je natočení stolu, y_1 a z_1 jsou souřadnice špičky nástroje ve strojním souřadnicovém systému a y_2 , z_2 jsou souřadnice středu rotace stolu ve strojním souřadnicovém systému.

4.2.3 Nárok na zrychlení pohybových os

Dalším zobrazovaným dráhovým parametrem je závislost změny naklonění rotační osy a změny polohy špičky nástroje. Schéma změny polohy špičky nástroje a změny polohy



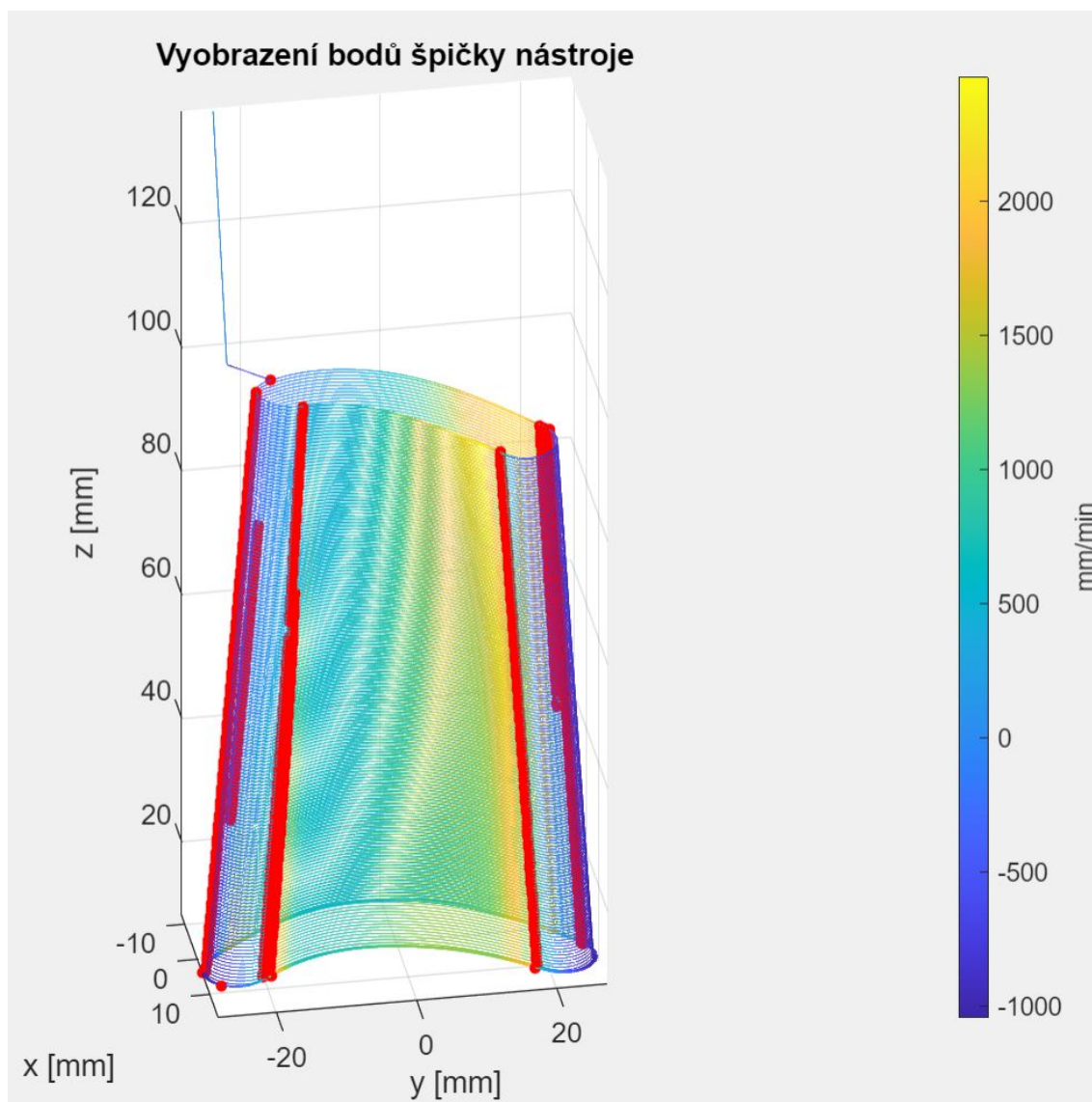
Obr. 30: Schéma změny naklonění rotační osy a změny polohy špičky nástroje

dráha špičky nástroje lopatky se zobrazenou rychlostí translační osy Y a reverzace rotační osy C.

4.3 Vývoj vizualizačního nástroje

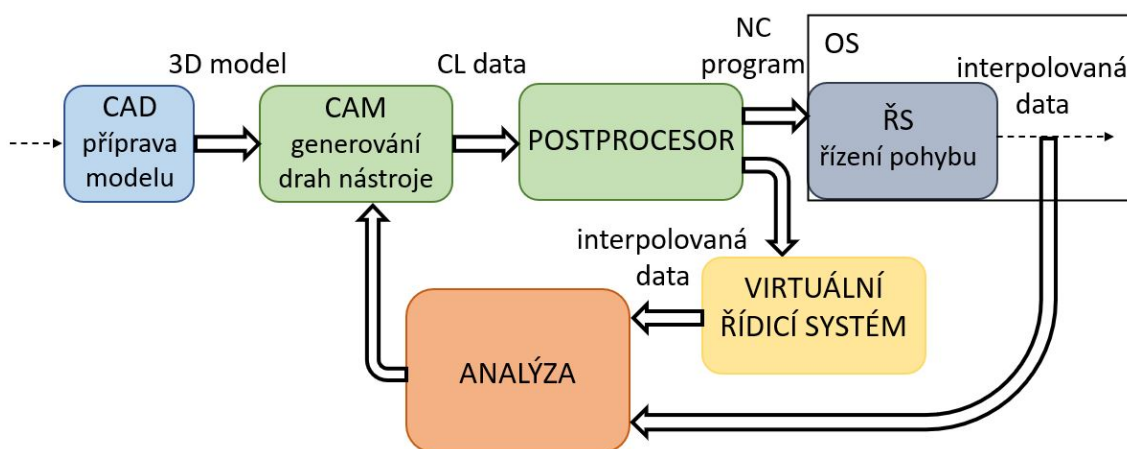
Z ŘS obráběcího stroje se získají data o každé poloze všech os po určitém časovém intervalu (na stroji MCU 700 VT-5X je časový interval 0,003 s). Pomocí těchto dat se získá rychlost i zrychlení pohybových os. Dále je nutné znát poloměr rotace stolu a délku použitého nástroje.

Uložená interpolovaná data se transformují do obrobkového souřadnicového systému. Poté se provede výpočet dráhových parametrů (rychlost, zrychlení, nárok na zrychlení pohybových os, reverzace rotačních os, výsledná rychlost). Nakonec se vykreslí dráha nástroje s dráhovými parametry v uživatelském prostředí.



Obr. 31: Transformovaná dráha nástroje se zobrazenými dráhovými parametry lopatky 1 (rychlost translační osy X a reverzace osy C)

V datech jsou zaznamenány polohy jednotlivých os a také čas. Do vizualizačního nástroje vstupují tato data ve formátu *.mat. V softwaru Matlab jsou provedeny transformace špičky nástroje (nebo TCP) a výpočty zobrazovaných parametrů. Další možností jak získat interpolovaná data je přes virtuální řídicí systém. Při zjištění nedostatků je možné zasáhnout do procesu příprav výroby např. změnou v CAD nebo CAM systému, strategie obrábění, řezného nástroje aj. Schéma je na Obr. 32.

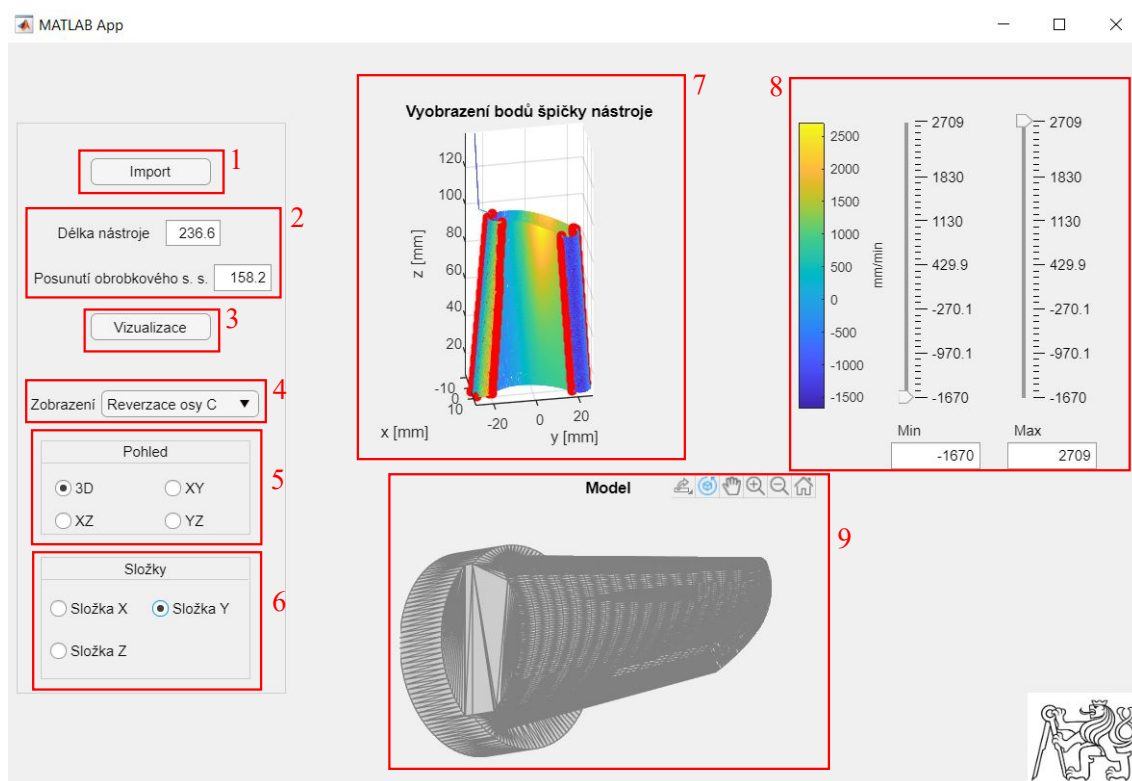


Obr. 32: Schéma přípravy výroby od 3D modelu po ŘS s vizualizačním nástrojem

Vizualizační nástroj je vytvořen v softwaru Matlab v prostředí App Designer. Toto prostředí slouží k vytváření aplikací. Umožňuje vytvoření vlastního uživatelského rozhraní a pomocí funkcí v softwaru Matlab se provádí výpočty. Celá aplikace jde exportovat ve formátu *.exe a lze používat na zařízeních bez licence softwaru Matlab.

4.3.1 Uživatelské rozhraní vizualizačního nástroje

Vytvořené uživatelské rozhraní je zobrazeno na Obr. 33. Barevně označené dráhy špičky nástroje znázorňují rychlost translační osy Y a červené body znázorňují reverzaci rotační osy C. Tlačítko „Import“ (č. 1) slouží k nahrání interpolovaných dat ve formátu *.mat nebo modelu ve formátu *.stl. Dále je nutné zadat délku nástroje a posunutí obrobkového souřadnicového systému (č. 2). Tlačítkem „Vizualizace“ (č. 3) se spustí výpočty. Po provedení výpočtů se zobrazí graf s drahami nástroje (č. 7). Zobrazované dráhové parametry se volí z rozbalovacího menu „Zobrazení“ (č. 4). Výběr pohledu pro dráhu nástroje se volí z možností „Pohled“ (č. 5). Pokud má zobrazovaný dráhový parametr složky v určitém směru, tak se zobrazí možnost „Složky“ (č. 6) pro výběr složky v daném směru. Barevná škála a posuvníky pro upravení horní a dolní hranice barevné škály jsou vpravo nahoře (č. 8). Pokud byl nahrán model, tak se zobrazí v dolní části (č. 9).



Obr. 33: Uživatelské prostředí vizualizačního nástroje

4.3.2 Schéma vstupů, výstupů

Do vizualizačního nástroje jsou importována interpolovaná data z ŘS. Z ŘS jsou interpolovaná data zaznamenána pomocí funkce osciloskopu (TNCscope). Poté se interpolovaná data upraví do formátu *.mat. V těchto datech jsou uloženy polohy všech os (translační osy v milimetrech a rotační osy ve stupních). Ve formátu *.mat jsou uloženy data v typu dat „cell“ (Obr. 34 vlevo). Pod názvem „DATAexp“ jsou polohy pohybových os, v „DIMENSION“ jsou zapsány jednotky pohybových os, v „NAME“ jsou zapsány názvy pohybových os a v „TIMEexp“ jsou zaznamenány časové intervaly (0,003 s) odebíraných dat (všech patnáct vektorů je stejných). Data poloh pohybových os jsou uložena pod názvem „DATAexp“ v jednotlivých buňkách v řádku, ostatní buňky jsou prázdné. V těchto buňkách jsou uloženy vektory s jedním sloupcem a počty řádků závislé na době měření, ostatní sloupce jsou prázdné (Obr. 34 uprostřed). Jeden z těchto vektorů je znázorněn na Obr. 34 vpravo. V první buňce „DATAexp“ je uložena poloha žádaná osy X ($X_{\check{z}}$), v druhé skutečná poloha osy X (X_s). Ve třetí buňce je žádaná poloha osy Y ($Y_{\check{z}}$), dále skutečná poloha osy Y (Y_s), žádaná poloha osy Z ($Z_{\check{z}}$), skutečná poloha



osy Z, žádaná poloha osy A, skutečná poloha osy A, žádaná poloha osy C, skutečná poloha osy C. V poslední pěti buňkách jsou uloženy odchylky osy X, Y, Z, A a osy C (C_o).

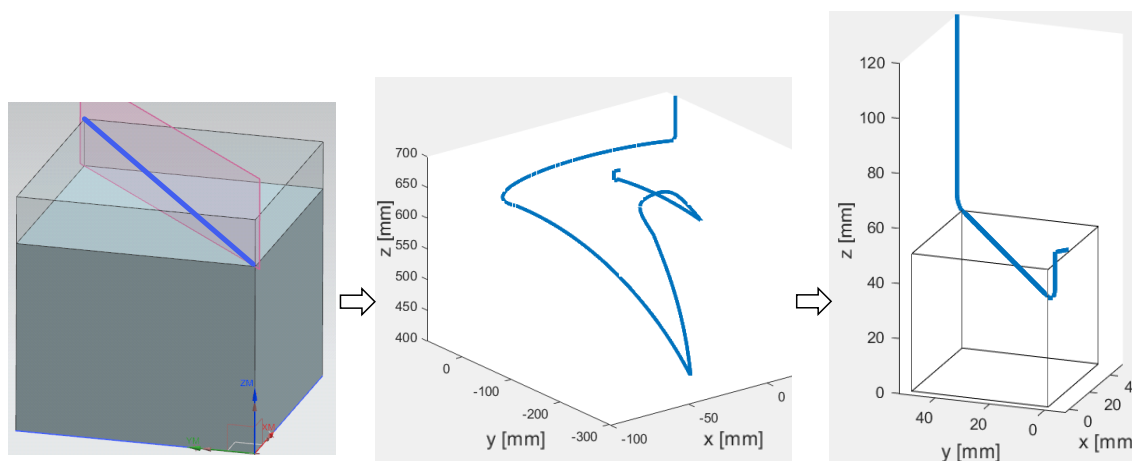
*.mat	
DATAexp	1x15 cell
DIMENSION	1x15 cell
NAME	1x15 cell
TIMEexp	1x15 cell

DATAexp							
	1	2	3	4	5	•••	15
1	X_ž	X_s	Y_ž	Y_s	Z_ž	•••	C_o
2							
3							
4							
⋮							

X_s			
	1	2	3...
1	2,302		
2	2,311		
3	2,319		
4	2,323		
⋮			

Obr. 34: Ukázka formátu vstupních dat ve formátu *.mat

Pomocí těchto dat se vypočítají zobrazované dráhové parametry. Přes uživatelské rozhraní je nutné zadat délku nástroje a posunutí obrobkového souřadnicového systému pro transformaci dráhy nástroje. Výstupem je transformovaná dráha nástroje, která je shodná s dráhou nástroje v CAM systému, jen může být jinak natočená (závisí ke kterému souřadnicovému systému byly vztaženy dráhy nástroje v CAM systému). Na této transformované dráze nástroje jsou zobrazovány dráhové parametry. Ukázka dráhy nástroje v CAM systému, interpolovaných dat a transformované dráhy nástroje je na Obr. 35 (krychle u transformované dráhy nástroje není součástí vizualizačního nástroje).



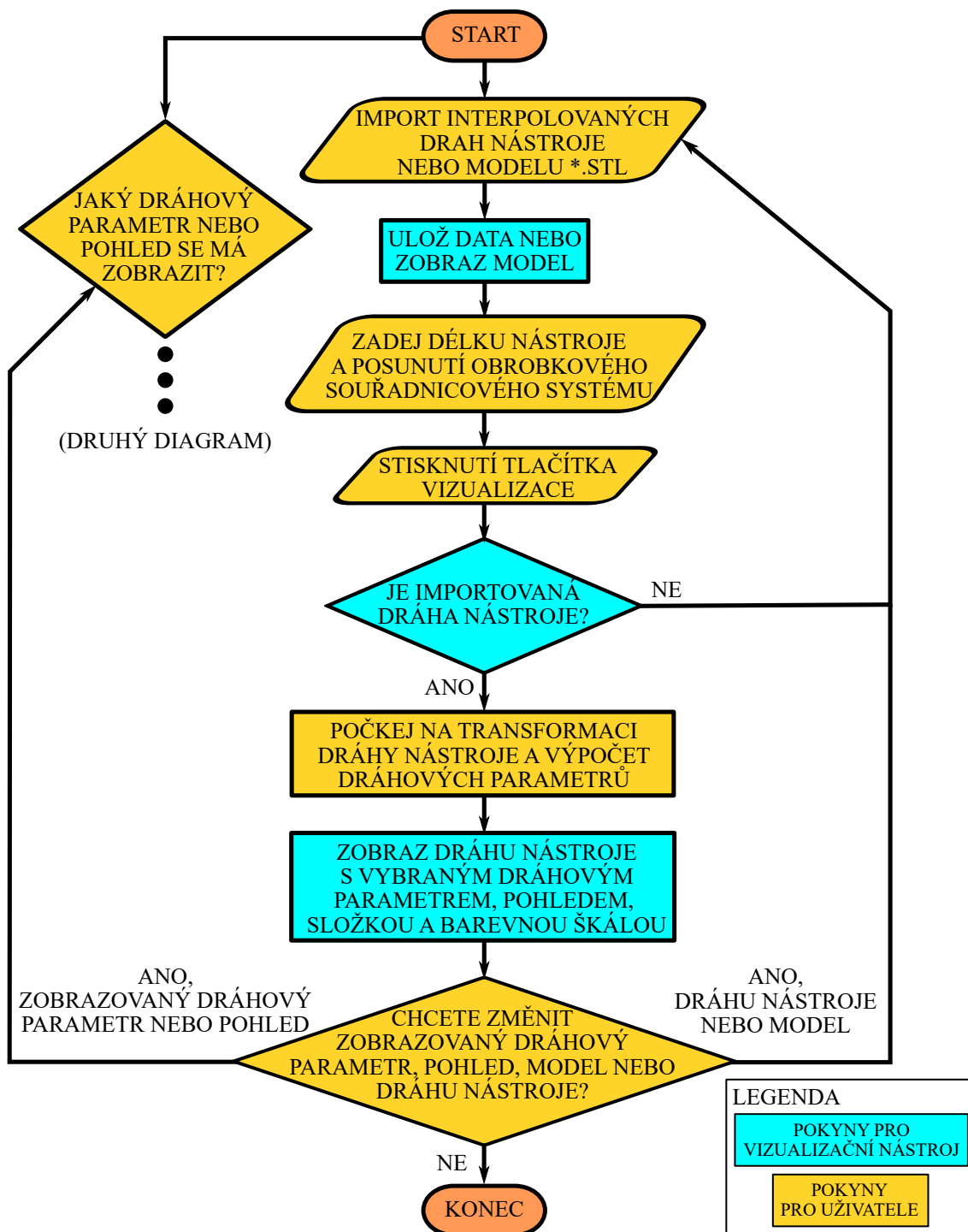
Obr. 35: Vlevo – dráhy nástroje v CAM systému; uprostřed – dráha nástroje z interpolovaných dat; vpravo – transformovaná dráha nástroje



4.4 Programování vizualizačního nástroje

Vizualizační nástroj je naprogramován v prostředí App designer v softwaru Matlab. Toto prostředí umožňuje vytvořit vlastní uživatelské rozhraní pomocí knihovny, která je součástí tohoto prostředí a obsahuje prvky, jako např. tlačítka, rozbalovací nabídky, osy pro zobrazování grafů, popisky, posuvníky a mnoho dalších prvků. Při použití některého prvku z knihovny se dá vytvořit zpětná vazba, aby např. po stisknutí tlačítka započal výpočet. Prostředí pro tvorbu uživatelského rozhraní a úprava kódu pro funkce jsou oddělené, ale zároveň jsou funkčně úzce propojené. V prostředí pro úpravu kódu jsou připravené šedé a bílé části kódu. Šedé části kódu jsou automaticky vygenerované v závislosti na přidávaných prvcích z prostředí pro tvorbu uživatelského rozhraní. Při běžném používání tento kód nelze měnit (např. názvy prvků, pozice prvků a jejich vlastnosti) – např. zajištění použití stejného názvu prvku v celém kódu. Některé z těchto automaticky generovaných částí kódu se mění při změně v prostředí úpravy uživatelského rozhraní (např. názvy prvků, pozice, viditelnost, zdroj obrázku). Bílé části kódu jsou předpřipravená místa pro tvorbu vlastního kódu.

Schéma uživatelského rozhraní je zobrazeno na vývojovém diagramu, který je rozdělen do dvou obrázků, viz Obr. 36 a Obr. 37. Start a konec vývojového diagramu je označen tmavě oranžovou barvou. Světle oranžovou barvou jsou pokyny nebo rozhodnutí závisléjší na uživateli. Světle modrou barvou jsou pokyny nebo rozhodnutí závisléjší na straně kódu vizualizačního nástroje. Uživatel může jako první importovat interpolovaná data, model, nebo může jako první změnit zobrazovaný dráhový parametr, nebo pohled. V prvním vývojovém diagramu na Obr. 36 je zobrazen průběh importu interpolovaných dat ve formátu *.mat nebo modelu ve formátu *.stl (v nabídce se musí změnit zobrazované formáty pro importování). Po importu interpolovaných dat se data musí uložit, aby s nimi mohlo být dále počítáno. Model ve formátu *.stl se po importování ihned zobrazí ve spodní části uživatelského rozhraní. Poté uživatel musí zadat délku nástroje a posunoutí obrobkového souřadnicového systému, které jsou potřebné pro transformaci dráhy nástroje. Uživatel může délku nástroje a posunoutí obrobkového souřadnicového systému zadat před importováním interpolovaných dat, ale ve vývojovém diagramu je uvažována pouze možnost importování interpolovaných dat jako první, protože délka nástroje a posunoutí obrobkového souřadnicového systému závisí na interpolovaných drahách nástroje.



Obr. 36: Vývojový diagram vizualizačního nástroje 1

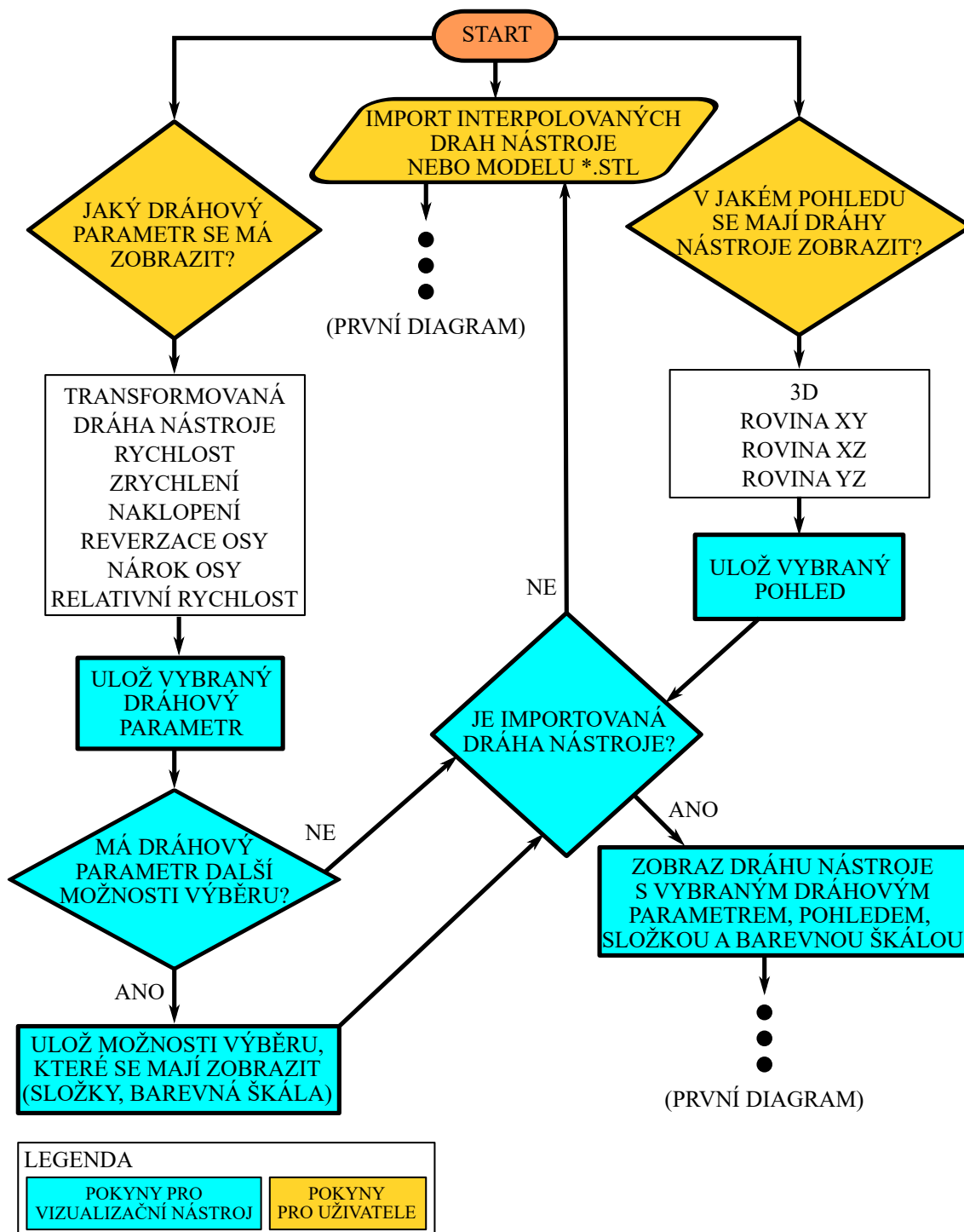


Výpočet je započat až po stisknutí tlačítka „Vizualizace“, aby měl uživatel možnost interpolovaná data změnit. Dále je naprogramována kontrola, aby nezačal výpočet bez importovaných interpolovaných dat. Při splnění podmínky importu interpolovaných dat ve správném formátu započne transformace dráhy nástroje a výpočet dráhových parametrů. Po dokončení transformace a výpočtu se v prostřední části uživatelského rozhraní zobrazí transformovaná dráha nástroje. Poté má uživatel k dispozici rozbalovací menu „Zobrazení“, kde může měnit dráhové parametry. Vývojové schéma pro možnosti výběru dráhových parametrů a pohledu je na vývojovém diagramu na Obr. 37.

Na druhé části vývojového diagramu (Obr. 37) jsou zobrazeny možnosti v uživatelském rozhraní před importováním interpolovaných drah nebo modelu. Vybraný dráhový parametr nebo pohled bude uložen a při transformaci dráhy nástroje a zobrazení dráhových parametrů se zobrazí vybrané možnosti.

Z dráhových parametrů si uživatel vybere z rozbalovací nabídky „Zobrazení“. Na výběr jsou možnosti transformovaná dráha nástroje, rychlost a zrychlení translačních os, úhlová rychlost a úhlové zrychlení rotačních os, naklonění rotační osy A, natočení rotační osy C, reverzace rotační osy A, C, nárok na zrychlení pohybových os a výsledná rychlost (všechny možnosti dráhových parametrů nejsou vypsány ve vývojovém diagramu). Některé dráhové parametry jdou rozložit do složek, proto při vybrání takového parametru se po proběhnutí výpočtu zobrazí nabídka pro vybrání složek. Pokud je dráhový parametr jiný než transformovaná dráha nástroje, tak se po výpočtu zobrazí také barevná škála s posuvníky.

S grafem v softwaru Matlab lze libovolně natáčet, ale při vyšším počtu zobrazovaných bodů je ruční natáčení pomalé. Proto je zde možnost zobrazení grafu do rovin a izometrický pohled na dráhu nástroje. Uživatel si pohled i dráhové parametry může měnit před importováním interpolovaných dat nebo během analýzy dráhy nástroje. Pokud je importovaná dráha nástroje, tak se zvolený dráhový parametr nebo pohled nastaví ihned, jinak se pouze tato možnost uloží a použije po transformaci dráhy nástroje a výpočtu dráhových parametrů.



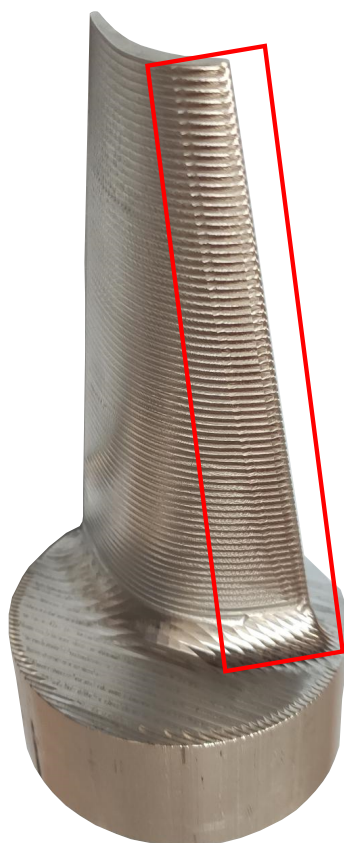
Obr. 37: Vývojový diagram vizualizačního nástroje 2



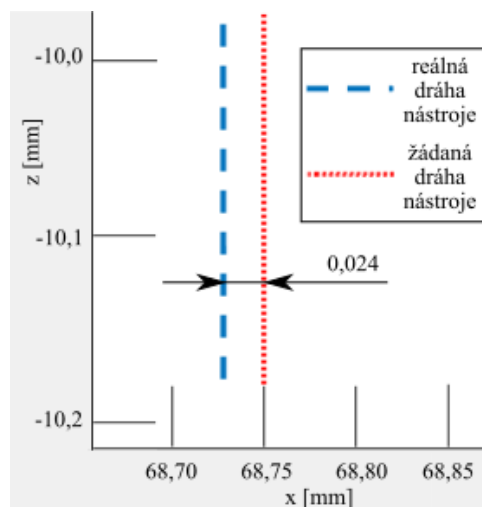
4.5 Případové studie

V této kapitole jsou ukázány možnosti využití vizualizačního nástroje v praxi. Proběhla výroba dvou funkčních prototypů lopatek (lopatka 1 a lopatka 2). U obou lopatek se vyskytly nekvality a bylo nutné najít příčiny vzniku nekvalit a eliminovat je. Vizualizační nástroj byl také využit při ladění speciální funkce soustružení s naklápěním rotační osy A. Jedná se o souvislé čtyřosé soustružení. V tomto případě bylo změřeno, že nebyla dodržena geometrická tolerance válcovitosti a bylo nutné zjistit příčinu. Obrábění proběhla na obráběcím stroji MCU 700 VT-5X.

Lopatka 1 je z hliníkové slitiny a byla obráběná kulovou frézou s poloměrem 5 mm. Při výrobě se vyskytly podřezy na povrchu dílce, jak je vidět v červeném rámečku na Obr. 38. Ve vizualizačním nástroji bylo zjištěno, že tyto nedostatky na povrchu mohly být způsobeny reverzací rotační osy C, jak je vidět na Obr. 31.



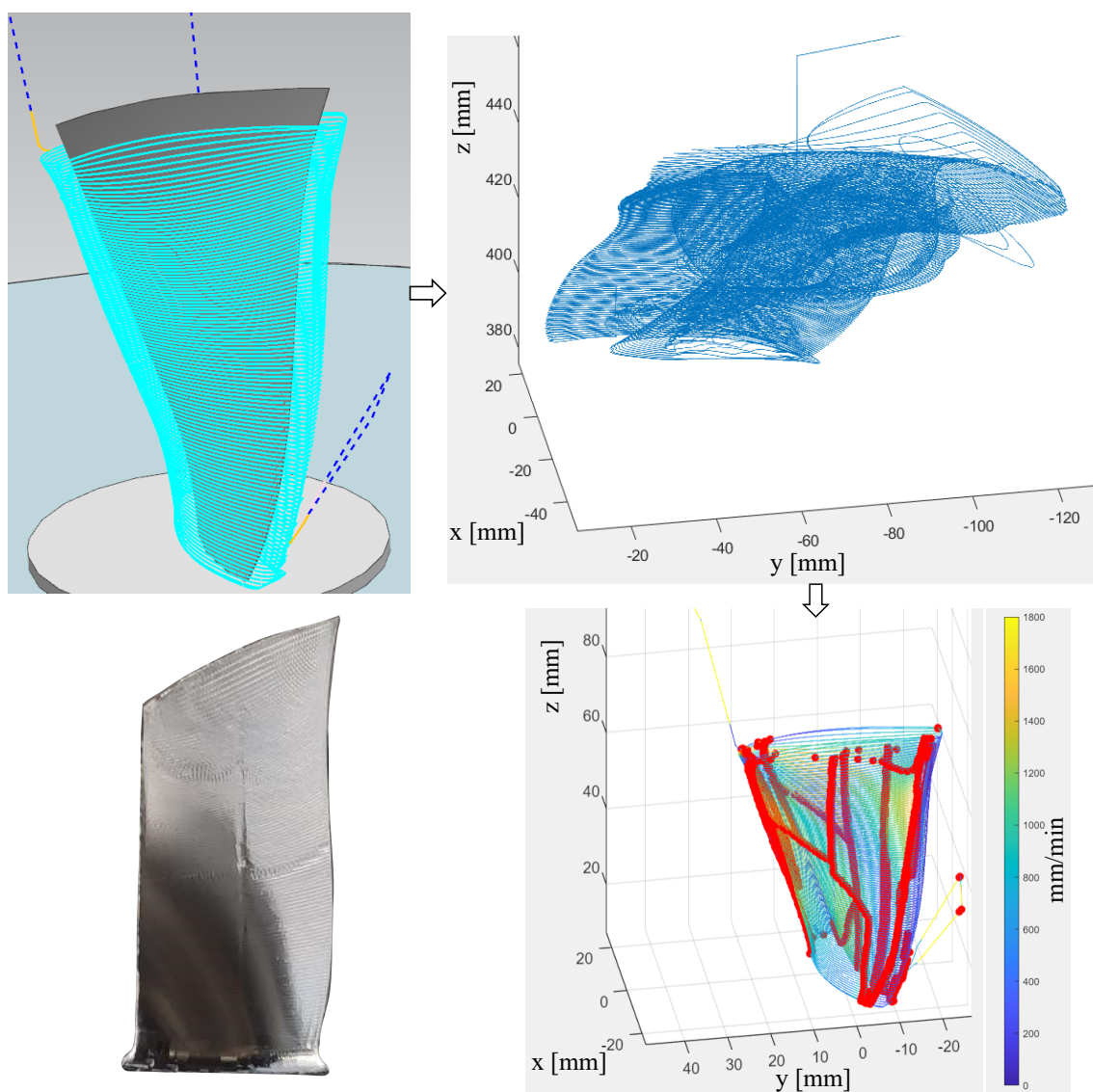
Obr. 38: Ukázka chyb na povrchu lopatky 1



Obr. 39: Vlevo – soustružení s naklápěním osy A; vpravo – transformované dráhy nástroje ze soustružení s naklápěním osy A s žádanou dráhou nástroje

Při soustružení s rotační osou A vznikala při provádění testů místo válcové plochy plocha kuželová. Obráběný dílec byl z nerezové oceli a byl obráběn s kruhovou řeznou vyměnitelnou břitovou destičkou o poloměru 6 mm. Využitím transformací byla porovnána reálná a žádaná dráha nástroje. Dráha nástroje z interpolovaných dat tvořila kužel. Řešením bude změna tolerancí ŘS. Na Obr. 39 je vlevo soustružení s naklápěním rotační osy A a vpravo je porovnání reálné a žádané dráhy nástroje.

Lopatka 2 je z chromniklmoxybdenové oceli a byla obráběná kulovou frézou s poloměrem 5 mm. Při obrábění lopatky 2 se složitou geometrií se vyskytly chyby na povrchu. Na Obr. 40 je dráha nástroje v CAM systému, interpolovaná dráha nástroje, transformovaná dráha nástroje ve vizualizačním nástroji a foto lopatky 2. Ve střední části lopatky je shoda s reverzacemi rotační osy C i rotační osy A.



Obr. 40: Vlevo nahoře – dráhy nástroje v CAM systému; vpravo nahoře – dráha nástroje z interpolovaných dat; vlevo dole – foto lopátky 2; vpravo dole – transformovaná dráha nástroje ve vizualizačním nástroji



5 Závěr

Bakalářská práce se zabývá možnostmi vizualizace a analýzy drah nástroje. Cílem bylo vytvořit univerzální vizualizační nástroj pro interpolované dráhy nástroje z pětiosého vertikálního centra MCU 700 VT-5X s řídicím systémem Heidenhain TNC640 při aktivní funkci TCPM. V úvodní kapitole je popsána příprava výroby na pětiosých frézovacích strojích (používané strategie, řezné podmínky). Dále je popsána funkce TCPM, která se zpravidla při pětiosém frézování využívá, a možná rizika vzniku chyb při pětiosém frézování.

Vizualizovat nebo analyzovat dráhu nástroje lze provádět na několika úrovních v řetězci od tvorby drah nástroje po odbavení drah nástroje na obráběcím stroji. V CAM systémech se dráha nástroje vizualizuje na úrovni CL dat, v editorech NC programu na úrovni NC programu a v ŘS na úrovni interpolovaných dat. Vizualizace dráhy nástroje v CAM systémech se může značně lišit od skutečné dráhy nástroje odbavené na obráběcím stroji, protože v CL datech není standardně zahrnuta např. kinematika a dynamika obráběcího stroje. Editory NC programů vizualizují dráhu nástroje, ale nemají možnosti zobrazení dráhových parametrů. V ŘS jsou možnosti od firem Siemens a OKUMA, ale software Analyze MyWorkpiece (Siemens) je pouze pro ŘS Siemens a software Animated Simulation nemá možnosti zobrazení dráhových parametrů, ale slouží k vizualizaci dráhy nástroje v reálném čase, případně ke kontrole kolizí.

Pro přesnou vizualizaci dráhy nástroje byl vytvořen kinematický model obráběcího stroje MCU 700 VT-5X a byly odvozeny transformace ze strojního souřadnicového systému do obrobkového souřadnicového systému. Obráběcí stroj MCU 700 VT-5X má kinematiku stůl – stůl. Pro přesnou transformaci je nutné znát délku nástroje (vzdálenost od čela vřetena ke špičce nástroje) a posunutí obrobkového souřadnicového systému.

Poté byl vytvořen vizualizační nástroj v softwaru Matlab v prostředí App Designer. Bylo vytvořeno uživatelské rozhraní pro import interpolovaných dat a pro zobrazování dráhových parametrů na transformovaných drahách. Z interpolovaných dat z ŘS se transformuje dráha nástroje ze strojního souřadnicového systému do obrobkového souřadnicového systému. Vizualizace dráhy nástroje je možná v závislosti na rychlosti translačních os, zrychlení translačních os, úhlové rychlosti rotačních os, úhlovém zrychlení rotačních os, naklopení rotačních os, rychlosti translačních os s reverzacemi rotačních os, nároku



na zrychlení pohybových os a na výsledné rychlosti špičky nástroje (středu řezné hrany nástroje) a obrobku.

Navržený vizualizační nástroj byl ověřen při hledání možných příčin nekvalit při obrábění několika složitých dílců na stroji MCU 700 VT-5X. Na těchto dílcích byl prokázán přínos vizualizačního nástroje, který je vhodné využívat při přípravě výroby i jiných dílců. Jádro vizualizačního nástroje je univerzální a lze v budoucnu rozšířit o další kinematiky obráběcích strojů



Seznamy

Seznam použité literatury

1. LASEMI, Ali, XUE, Deyi, GU, Peihua. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design* [online]. 2010, roč. 42, č. 7, s. 641–654 [cit. 2020-11-29]. ISSN 0010-4485. Dostupné z DOI <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.04.002>.
2. JENQ-SHYONG, Chen, YUNG-KUO, Huang, MAO-SON, Chen. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2005, vol. 45, no. 9, s. 1077–1084 [cit. 2020-10-28]. ISSN 0890-6955. Dostupné z DOI [10.1016/j.ijmachtools.2004.11.019](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.019).
3. OZTURK, Erdem, TUNC, L. Taner, BUDAK, Erhan. Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2009, vol. 49, no. 14, s. 1053–1062 [cit. 2020-10-28]. ISSN 0890-6955. Dostupné z DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.07.013>.
4. LINKEOVÁ, Ivana. *ZÁKLADY POČÍTAČOVÉHO MODELOVÁNÍ KŘÍVEK A PLOCH* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: http://www.linkeova.cz/vyuka/pg_pgs/public/pgr_skripta.pdf.
5. KLEIN, Peter. *Designing Ruled Surfaces for Flank Milling* [online]. 2019 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.conceptsnrec.com/blog/designing-ruled-surfaces-for-flank-milling>.
6. KLEIN, Peter. *Flank Milling - How Hard Can It Be?* [Online]. 2019 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.conceptsnrec.com/blog/flank-milling-how-hard-can-it-be>.
7. BEUDAERT, Xavier, LAVERNHE, Sylvain, TOURNIER, Christophe. Direct Trajectory Interpolation on the Surface using an Open CNC. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z DOI [10.1007/s00170-014-6134-7](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6134-7).
8. MÁDL, Jan, BARCAL, Jaroslav. *Základy Technologie II*. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02610-8.



9. BRYCHTA, Josef, ČEP, Robert, NOVÁKOVÁ, Jana, PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II - 2. díl*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
10. *MM: Příručka pro technology* [online]. 2013 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-dosahnout-vysoke-produktivity-pri-frezovani.html>.
11. *Heidenhain TNC640: Zachování polohy hrotu nástroje při polohování os natočení* [online]. Německo, 2019 [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: http://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/TNC640/34059x-10/bhb/892903-C7.pdf.
12. *Siemens* [online] [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12.0.2/nx_help%5C#uid:xid1128418:index_mfggeneral:xid1099402.
13. *MASTERCAM MACHINE SIMULATION TUTORIAL* [online]. Tolland: CNC Software, 2018 [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: <http://colla.lv/wp-content/uploads/2018/07/Mastercam-Machine-Simulation-Tutorial.pdf>.
14. *DASSAULT SYSTEMS: CATIA - NC Manufacturing Verification 2 (NVG)* [online] [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: https://www.3ds.com/products-services/catia/products/v5/portfolio/domain/Machining/product/NVG/?woc=%5C%7B%5C%22category%5C%22%5C%3A%5C%5B%5C%22category%5C%2Fchampions%5C%22%5C%5D%5C%7D%5C&wocw=card_content_cta_1_url%5C%3A%5C%22https%5C%3A%5C%2F%5C%2Fblogs.3ds.com%5C%2Fcatia%5C%2F%5C%22.
15. *AUTODESK: HSMWorks* [online] [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/hsmworks/overview?plc=F360%5C&term=1-YEAR%5C&support=ADVANCED%5C&quantity=1>.
16. *CATIA Documentation: Comparing the Machined Stock Part and the Design Part* [online] [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: http://catiadoc.free.fr/online/CATIAfr_C2/nvgugCATIAfrs.htm.
17. *Siemens: Identifying errors* [online] [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en/markets/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/fokus-digitalisierung/analyse-myworkpiece-tp.html>.



18. *Siemens: SINUMERIK Analyze MyWorkpiece/Toolpath* [online]. 2019 [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/636/109772636/att_1001363/v1/AMWT_Tool_enUS_en-US.pdf.
19. *Manuál Okuma – SPECIAL FUNCTIONS MANUAL (ME32-128-R3)*. 3rd Edition. Oguchi-cho, 2014.
20. *Manuál Okuma – INSTRUCTION MANUAL (ME32-127-R1)*. 1st Edition. Oguchi-cho, 2012.
21. GÓRECKI, Jan. *Software pro analýzu NC programů pro stroj MAS MCV1000*. Praha, 2018. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79498/F2-BP-2018-Gorecki-Jan-BP_Gorecki.pdf?sequence=-1%5C&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
22. *T-support: editNC - editor a verifikace NC programů* [online] [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/editnc-editor-a-verifikace-nc-programu>.
23. *T-support: CIMCO Edit* [online] [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/cimco-edit>.
24. *NcEdit* [online] [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <http://www.ncedit.net/home>.
25. *T-support* [online]. Praha [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/cimco-edit/>.
26. *CAMotics* [online] [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: <https://camotics.org/>.
27. *ICAM: CNC G-CODE SIMULATOR* [online] [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <https://icam.com/cnc-g-code-simulator/>.
28. *ICAM: Tool-Path & Feed-Rate Optimization* [online] [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://icam.com/tool-path-optimization-software/>.
29. *VERICUT* [online] [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: https://www.cgtech.com/images/pdf/VERICUT_Brochure.pdf.
30. *CGTech: OptiPath* [online] [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.cgtech.com/products/product-line/100-optipath.html>.
31. *ThirdWave: Production Module* [online] [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <http://www.thirdwavesys.com/machining-modeling/productionmodule/>.



32. *IMS Software: IMSverify* [online] [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.ims-software.com/en/content/imsverify>.
33. BOHEZ, E. L.J. Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2002, vol. 42, no. 4, s. 505–520 [cit. 2020-10-29]. ISSN 0890-6955. Dostupné z DOI [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00134-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00134-1).
34. *KOVOSVIT MAS: MCU 700V[T]-5X NEXT GENERATION* [online]. Sezimovo Ústí [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcu-700vt-5x-next-generation-p39.html%5C#technicaldata>.
35. STEJSKAL, Vladimír, VALÁŠEK, Michael. *Kinematics and dynamics of machinery*. 1. vydání. New York: MARCEL DEKKER, 1996. ISBN 0-8247-9731-0.
36. *Rychlost a zrychlení* [online] [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/mechanika/1_2.

Seznam použitého softwaru

- MATLAB R2020b Update 3
- NX 12.0.2.9
- TeXstudio 3.0.1
- Inkscape 1.0.1

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma přípravy výroby od 3D modelu po zpracování dat ŘS	13
Obr. 2: Vznikající scallop při obrábění nástrojem s kruhovou řeznou hranou [2].	14
Obr. 3: Vizualizace scallopu pro dva různé typy nástrojů v softwaru Millvis (pozn.: software vyvíjený na ústavu výrobních strojů a zařízení RCMT)	15
Obr. 4: Úhel vlečení a úhel naklopení (dle [3])	16
Obr. 5: Obrábění přímkové přechodové plochy kuželovým nástrojem [6]	16
Obr. 6: Zpracování lineární interpolace ŘS [7].	17
Obr. 7: Řezná rychlost, posuvová rychlost, axiální a radiální hloubka řezu (dle [10])	18
Obr. 8: Možnosti vizualizace dráhy nástroje	21



Obr. 9: Analýza dráhy nástroje v softwaru Siemens NX 12.0 – délka segmentu	21
Obr. 10: Analýza dráhy nástroje v softwaru Mastercam Machine Simulation – vlevo – dráha nástroje s modelem; vpravo – barevné zobrazení směru pohybu [13]	22
Obr. 11: CATIA V5 – vlevo – nastavení barevného zobrazení; vpravo – znázornění podřezů a nedořezů na součásti [16]	23
Obr. 12: Ukázka měření vzdáleností bodů dráhy nástroje v prostředí Analyze My- Workpiece [18]	24
Obr. 13: Ukázka uživatelského prostředí v Animated Simulation (2D Graphic) [19]	25
Obr. 14: Ukázka zobrazení drah nástroje v Animated Simulation (3D Graphic) [19]	25
Obr. 15: Ukázka zobrazení dráhy nástroje v editoru EditNC [22]	26
Obr. 16: Ukázka zobrazení dráhy nástroje v editoru CIMCO Edit [25]	27
Obr. 17: Ukázka uživatelského rozhraní v editoru NcEdit [24]	27
Obr. 18: SmartPATH – vlevo – dráha nástroje bez optimalizace; vpravo – dráha nástroje po optimalizaci [28]	29
Obr. 19: Znázornění optimalizace posuvu – vlevo – jedna posuvová rychlost pro dráhu nástroje; vpravo – více posuvových rychlostí pro dráhu nástroje [30]	30
Obr. 20: Schéma návrhu řešení varianty A – Matlab kód	32
Obr. 21: Schéma návrhu řešení varianty B – Matlab App designer	33
Obr. 22: Schéma návrhu řešení varianty C – Python	34
Obr. 23: Schéma návrhu řešení varianty D – Řídicí systém	35
Obr. 24: Kinematický řetězec stroje MCU 700 VT-5X (dle [33])	38
Obr. 25: Stroj MCU 700 VT 5-X KOVOSVIT MAS Machine Tools, a.s.	39
Obr. 26: Schéma kinematiky stroje MCU 700 VT-5X	40
Obr. 27: Schéma pro výpočet vzdálenosti pro výslednou rychlost od osy A	43
Obr. 28: Schéma pro výpočet vzdálenosti pro výslednou rychlost od osy C	45
Obr. 29: Schéma pro výpočet vzdálenosti pro výslednou rychlost od osy C – pohled do roviny yz	46
Obr. 30: Schéma změny naklonění rotační osy a změny polohy špičky nástroje	47
Obr. 31: Transformovaná dráha nástroje se zobrazenými dráhovými parametry lo- patky 1 (rychlost translační osy X a reverzace osy C)	48
Obr. 32: Schéma přípravy výroby od 3D modelu po ŘS s vizualizačním nástrojem . .	49
Obr. 33: Uživatelské prostředí vizualizačního nástroje	50
Obr. 34: Ukázka formátu vstupních dat ve formátu *.mat	51



Obr. 35: Vlevo – dráhy nástroje v CAM systému; uprostřed – dráha nástroje z interpolovaných dat; vpravo – transformovaná dráha nástroje	51
Obr. 36: Vývojový diagram vizualizačního nástroje 1	53
Obr. 37: Vývojový diagram vizualizačního nástroje 2	55
Obr. 38: Ukázka chyb na povrchu lopatky 1	56
Obr. 39: Vlevo – soustružení s naklápěním osy A; vpravo – transformované dráhy nástroje ze soustružení s naklápěním osy A s žádanou dráhou nástroje	57
Obr. 40: Vlevo nahoře – dráhy nástroje v CAM systému; vpravo nahoře – dráha nástroje z interpolovaných dat; vlevo dole – foto lopatky 2; vpravo dole – transformovaná dráha nástroje ve vizualizačním nástroji	58

Seznam tabulek

Tab. 4.1: Vybrané parametry stroje MCU 700 VT-5X [34]	38
---	----