

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Vizualizace dráhy nástroje při aktivaci kinematických funkcí v NC
programu

Tomáš Jiránek

č.: BP0301

r.: 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jiránek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **508995**
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 dráhy nástroje při aktivaci kinematických funkcí v NC programu.

Název bakalářské práce anglicky:

Visualization of toolpaths when activating kinematic functions in the NC program.

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Možnost vizualizovat dráhu nástroje i s aktivací kinematických funkcí napomůže odhalit již v předvýrobní fázi možné kolize či chyby v NC programu. Tyto funkce se používají např. při výměně frézovacích hlav v průběhu výroby složitých dílců. Osnova práce: Student zpracuje rešerši na funkce (cykly) řídicích systémů, které kinematicky transformují NC program. Dalším krokem bude kinematický rozbor vybraných funkcí. Student závěrem sestaví pro tyto funkce vlastní transformační modely v Matlab a vizualizuje transformovaný pohyb v obrobkovém souřadnicovém systému. Rozsah grafické části: Potřebné obr., tab., graf. Rozsah textové části: cca 40 – 60 stran.

Seznam doporučené literatury:

- [1] STEJSKAL, Vladimír, VALÁŠEK, Michael. Kinematics and dynamics of machinery. 1. vydání. New York: MARCEL DEKKER, 1996. ISBN 0-8247-9731-0
[2] PRAŽÁK, Marcel. Vizualizace interpolovaných drah nástroje při pětiosém frézování. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Michal Stejskal, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Jan Malý ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání bakalářské práce: **11.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **21.07.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **24.09.2024**

Ing. Michal Stejskal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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 ČVUT v Praze O dodržování etických principů při přípravě vysoko-školských závěrečných prací v aktuálním znění.

Dále prohlašuji, že v případě použití při tvorbě obsahu bakalářské práce prostředků umělé inteligence jsem postupoval dle metodického pokynu ČVUT v Praze Rámcová pravidla používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc a NM studiu a zahrnul tyto prostředky do použitých informačních zdrojů.

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 21. 7. 2024

.....

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Michalu Stejskalovi, Ph.D. za přínosné konzultace, cenné rady a vstřícnost při vypracovávání bakalářské práce. Rád bych také poděkoval své rodině, která mě podporovala a pomáhala mi po celou dobu studia.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<i>Autor práce:</i>	Tomáš Jiránek
<i>Název práce:</i>	Vizualizace dráhy nástroje při aktivaci kinematických funkcí v NC programu
<i>Rok vydání:</i>	2024
<i>Rozsah práce:</i>	65 str., 39 obr., 4 tab.
<i>Škola:</i>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<i>Pracoviště:</i>	Ústav výrobních strojů a zařízení
<i>Vedoucí práce:</i>	Ing. Michal Stejskal, Ph.D.
<i>Konzultant práce:</i>	Ing. Jan Malý
<i>Klíčová slova:</i>	CNC, řídicí systém, kinematická transformace, frézování
<i>Abstrakt:</i>	<p>Bakalářská práce se zabývá vizualizací dráhy nástroje při použití funkcí (cyklů), které kinematicky transformují NC kód. Nejprve byl proveden rozbor kinematiky obráběcích center, NC kódu a v něm používaných transformačních cyklů. Následně byly matematicky vyjádřeny transformace popisující chování cyklů, s jejichž využitím byla vizualizována dráha nástroje v programu MATLAB. Závěrem byl proveden experiment, který ověřil správnost provedení transformace do vizualizace.</p>

ANNOTATION SHEET BACHELOR'S THESIS

Thesis autor Tomáš Jiránek

Thesis title: Visualization of toolpaths when activating kinematic functions in the NC program

Year of publication: 2024

Thesis extent: 65 p., 39 fig., 4 tab.

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: Department of Production Machines and Equipment

Thesis supervisor: Ing. Michal Stejskal, Ph.D.

Thesis consultant: Ing. Jan Malý

Keywords: CNC, control system, kinematic transformation, milling

Abstract: Bachelor thesis deals with visualization of tool path using functions (cycles) that kinematically transform NC code. First, the kinematics of machining centers, NC code and transformation cycles used in it were analyzed. Subsequently, transformations describing the behavior of cycles were mathematically expressed, using which tool path was visualized in MATLAB program. Finally, an experiment was performed to verify the accuracy of the transformation to visualization.

Seznam použitých zkratk

3D	Three dimensional
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
ISO	International Organization for Standardization
NC	Numerical Control
PLC	Programmable Logic Controller
RPL	Rotation Plane
RPY	Roll, Pitch, Yaw

Seznam použitých veličin a symbolů

A, B, C	[°]	Úhly natočení okolo os X, Y, Z
a	[mm]	Délka úsečky pro výpočet promítnutého úhlu
b	[mm]	Délka promítnuté úsečky pro výpočet promítnutého úhlu
\vec{B}	[-]	Vektor báze
\vec{B}_j	[-]	Jednotkový vektor báze
BX, BY, BZ	[-]	Složky vektoru báze
B_jX, B_jY, B_jZ	[-]	Složky jednotkového vektoru báze
$EULNU$	[°]	Úhel nutace (natočení okolo osy X)
$EULPR$	[°]	Úhel precese (natočení okolo osy Z)
$EULROT$	[°]	Úhel rotace (natočení okolo osy Z)
M	[-]	Transformační matice změny měřítka
M_R	[-]	Transformační matice změny měřítka nezávisle pro osy X, Y, Z
m	[-]	Velikost změny měřítka souřadného systému
m_x, m_y, m_z	[-]	Velikost změny měřítka os X, Y, Z
\vec{N}	[-]	Vektor normály
\vec{N}_j	[-]	Jednotkový vektor normály

NX, NY, NZ	[-]	Složky vektoru normály
N_jX, N_jY, N_jZ	[-]	Složky jednotkového vektoru normály
\vec{n}	[-]	Vektor totožný s osou Z
\vec{n}_j	[-]	Jednotkový vektor totožný s osou Z
n_1, n_2, n_3	[-]	Složky vektoru totožného s osou Z
n_{1j}, n_{2j}, n_{3j}	[-]	Složky jednotkového vektoru totožného s osou Z
P	[-]	Transformační matice (přechodu)
$P1X, P1Y, P1Z$	[mm]	Souřadnice bodu 1
$P2X, P2Y, P2Z$	[mm]	Souřadnice bodu 2
$P3X, P3Y, P3Z$	[mm]	Souřadnice bodu 3
PX, PY, PZ	[mm]	Souřadnice pomocného bodu
$PROMIN$	[°]	Promítnutý úhel natočení okolo osy X
$PROPR$	[°]	Promítnutý úhel natočení okolo osy Y
$PROROT$	[°]	Úhel natočení okolo natočené osy Z
R	[-]	Transformační matice celkové rotace
R_x, R_y, R_z	[-]	Transformační matice rotace okolo os X, Y, Z
\vec{R}	[-]	Vektor kolmý k vektorům \vec{B}, \vec{N}
\vec{R}_j	[-]	Jednotkový kolmý vektor
RX, RY, RZ	[-]	Složky kolmého vektoru
R_jX, R_jY, R_jZ	[-]	Složky jednotkového kolmého vektoru
S	[-]	Výsledná matice transformace
S_0	[-]	Aktivní matice transformace
S_1	[-]	Přírůstková matice transformace
SPA, SPB, SPC	[°]	Úhly natočení okolo os X, Y, Z
T	[-]	Transformační matice celkového posunutí
T_0	[-]	Transformační matice prvotního posunutí
T_1	[-]	Transformační matice následného posunutí
t	[-]	Parametr parametrického vyjádření přímky
\vec{u}	[-]	Vektor totožný s osou Y
\vec{u}_j	[-]	Jednotkový vektor totožný s osou Y
u_1, u_2, u_3	[-]	Složky vektoru totožného s osou Y
u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}	[-]	Složky jednotkového vektoru totožného s osou Y

\vec{v}	[-]	Vektor totožný s osou X
\vec{v}_j	[-]	Jednotkový vektor totožný s osou X
v_1, v_2, v_3	[-]	Složky vektoru totožného s osou X
v_{1j}, v_{2j}, v_{3j}	[-]	Složky jednotkového vektoru totožného s osou X
X, Y, Z	[mm]	Posunutí v ose X, Y, Z
Z_c	[-]	Transformační matice výsledného zrcadlení
Z_x, Z_y, Z_z	[-]	Transformační matice zrcadlení os X, Y, Z
α	[°]	Přepočítaný úhel <i>PROMIN</i>
β	[°]	Úhel roven úhlu <i>PROPR</i>
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	[°]	Úhly natočení okolo os X, Y, Z

Obsah

1. Úvod a cíl práce	12
2. Kinematika CNC obráběcích strojů	13
2.1. CNC obráběcí stroje	13
2.1.1. Rozdělení obráběcích center	14
2.1.2. Obráběcí centra pro rotační součásti	14
2.1.3. Obráběcí centra pro nerotační součásti	15
2.1.4. Kinematika pětiosých obráběcích center.....	16
2.1.5. Multifunkční obráběcí centra	18
2.2. Vřetenové hlavy a otočné stoly.....	18
2.2.1. Vřetenové hlavy	18
2.2.2. Otočné stoly	20
3. Řízení CNC obráběcích strojů	21
3.1. NC kód.....	21
3.1.1. Struktura NC kódu.....	21
3.1.2. Podprogramy	23
3.1.3. Parametrické programování	23
3.2. Příprava NC kódu	24
3.2.1. Ruční programování.....	24
3.2.2. Dílenské programování	24
3.2.3. CAM.....	25
4. Cykly řídicího systému – transformace	26
4.1. Ekvivalentní cykly v Siemens a Heidenhain.....	26
4.1.1. Translace.....	27
4.1.2. Rotace	28



4.1.3. Zrcadlení.....	30
4.1.4. Změna měřítka	31
4.2. Definování roviny obrábění v Heidenhain	32
4.3. Definování roviny obrábění v Siemens	37
5. Popis transformací cyklů	39
5.1. Mechanická transformace.....	39
5.1.1. Základní transformační matice	39
5.1.2. Aditivní transformace	42
5.1.3. Transformace PLANE	42
5.1.4. Transformace CYCLE 800	49
5.2. Návrh testovacího dílce	49
5.3. Příprava obrábění (NC kódu).....	50
5.4. Provedení transformací do MATLAB	51
5.5. Vizualizace v programu MATLAB	52
6. Realizace experimentu.....	56
6.1. MCU 700 VT 5AX - kinematika	56
6.2. Test na stoju a vizualizace v MATLAB.....	57
6.3. Vyhodnocení.....	59
7. Závěr.....	60
Seznamy	61
Seznam použité literatury	61
Seznam obrázků.....	64
Seznam tabulek.....	65
Seznam použitých softwarů.....	65
Seznam elektronických příloh.....	65

1. Úvod a cíl práce

Bakalářská práce se bude zabývat vizualizací dráhy nástroje při použití funkcí (cyklů), které kinematicky transformují NC kód.

Snahou při třískovém obrábění na CNC obráběcích strojích je dokázat obrobít součást na jedno upnutí k dosažení co nejpřesnějšího tvaru obrobku. To vedlo výrobce k přidání rotačních os k osám lineárním. Došlo ke zvýšení složitosti struktury obráběcího stroje i NC programu, který řídí činnost stroje. Umístěním rotačních os se mění kinematika stroje. Rotační osy jsou na stroji v podobě otočných stolů a vřetenových hlav. Pomocí nichž lze transformovat souřadný systém při obrábění, aby byl nástroj vhodně orientován vůči obráběné ploše obrobku. Z tohoto důvodu se musí vhodně určit obráběcí rovina, která se definuje pomocí transformačních cyklů v rámci řídicích systémů stroje.

Při vytváření NC kódu se často v praxi využívá kombinace způsobů programování. To způsobuje komplikace při kontrole pohybu nástroje s použitím transformačních cyklů. V dnešní době nejsou softwarové nástroje, které by umožňovaly virtuální zobrazení dráhy nástroje při použití transformačních cyklů v rámci různých řídicích systémů. Na základě vizualizace by se mohl NC kód lépe zkontrolovat pro případ vzniku kolizí, nebo i optimalizovat pohyby nástroje při pojezdech naprázdno.

Vyhledají se a popíší transformační cykly v řídicích systémech Siemens a Heidenhain. Pro nalezené transformační cykly se vyjádří matematický předpis popisující transformaci souřadného systému při použití těchto cyklů. Na základě těchto předpisů se vytvoří transformační modely (funkce) v programu MATLAB, které se použijí pro vyobrazení dráhy nástroje v obrobkovém souřadném systému. Dráha nástroje bude vizualizována při obrábění testovacího dílce. Na závěr se provede experiment na stroji pro vybrané transformační cykly. Tím se ověří správnost transformačních modelů v programu MATLAB, kterými se transformuje dráha nástroje, která se následně bude zobrazovat.

2. Kinematika CNC obráběcích strojů

Možnosti obrábění složitých dílců na obráběcích strojích závisí na jejich kinematice. Při obrábění složitějších dílců je výhodné použít takový obráběcí stroj, který je schopen daný dílec efektivně obrobit do požadovaného tvaru. To zajišťuje kinematika stroje, která je určena počtem a polohou strojních os.

2.1. CNC obráběcí stroje

Číslicově řízené stroje, neboli CNC stroje (Computer Numerical Control), jsou stroje, které využívají příkazů z řídicího počítače pro řízení pohybu nástroje a obrobku po dané trajektorii a definovanou rychlostí. CNC obráběcí stroje jsou konstrukčně uzpůsobeny k práci v automatickém cyklu s automatickou výměnou nástrojů případně obrobků. Řízení CNC strojů se uskutečňuje podle vhodného NC programu, který zpracovává řídicí systém, jenž využívá k realizaci řízení počítač. Software přizpůsobí systém strojům s různými počty řízených os, funkcí apod. Když je možné na stroji provádět vícero různých operací na jedno upnutí obrobku, hovoří se o tzv. CNC obráběcích centrech. Tyto stroje jsou vybaveny o jednu nebo i více přídatných os, ve kterých dokáží pracovat současně (souvislé obrábění). [1]

CNC obráběcí stroj se skládá ze čtyř hlavních částí:

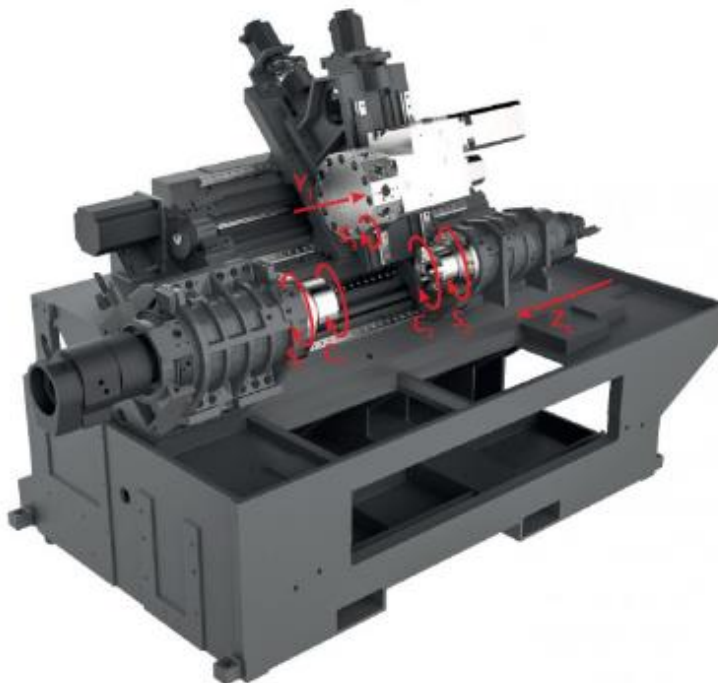
- Mechanická část – realizuje relativní pohyby mezi řezným nástrojem a obrobkem.
- Elektrická část – CNC řídicí systém a elektro skříň, které zajišťují na základě instrukcí a povelů vykonávání definovaných pohybů.
- Mezičlánek mezi mechanickou částí a CNC řízením, který zajišťuje, aby si tyto dvě části rozuměly, se nazývá PLC.
- Procesní média nutná ke správné činnosti stroje (vzduch, hydraulika, elektřina).

2.1.1. Rozdělení obráběcích center

Při třískovém obrábění se vyskytují dvě základní operace, jimiž jsou soustružení a frézování. U obráběcích center je charakteristické, že jedna z těchto operací je dominantní. Například soustružení je dominantní a frézování je doplňkové, nebo naopak. Podle tohoto se obráběcí centra dělí na frézovací obráběcí centra (obrábění převážně nerotačních obrobků) nebo soustružnická obráběcí centra (obrábění převážně rotačních obrobků). Existují také multifunkční obráběcí centra, která sdružující obě dvě základní operace třískového obrábění do jednoho stroje. [1]

2.1.2. Obráběcí centra pro rotační součásti

Pro tyto stroje je charakteristické, že hlavní řezný pohyb (rotační) koná obrobek a vedlejší pohyby (posuv a přísuv) koná nástroj. Pro upevnění nástrojů a jejich rychlou výměnu je stroj opatřen revolverovou nástrojovou hlavou, která zároveň dovoluje svým konstrukčním provedením použití poháněných nástrojů, jako jsou např. frézy, vrtáky. [1]

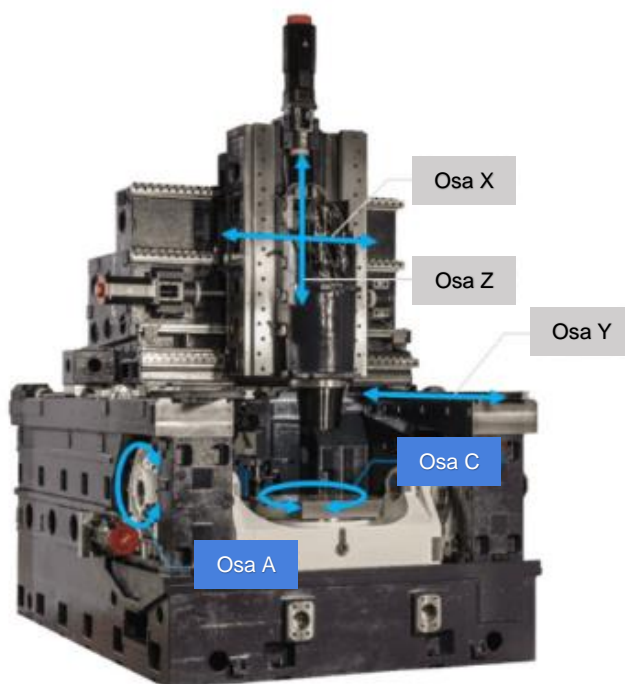


Obr. 2.1 Kinematika CNC soustružnického centra [2]

Na Obr. 2.1 je znázorněno možné uspořádání jednotlivých pohyblivých os stroje. Zde se přísuv pohybuje ve směru průměru obrobku a nachází se v ose X. Posuv se nachází v ose Z a pohybuje se ve směru osy rotace obrobku. Přidáním osy ve směru kolmém na tyto dvě osy vzniká osa Y. Pro přesné natočení obrobku se přidává poháněná rotační osa C.

2.1.3. Obráběcí centra pro nerotační součásti

Pro tyto stroje je charakteristické, že hlavní řezný pohyb (rotační) koná nástroj. V závislosti na konstrukčním provedení stroje koná vedlejší pohyby (posuv a přísuv) obrobek nebo nástroj. Tato centra mají minimálně tři translační osy, doplněné o jednu nebo více pohyblivých os, převážně rotačních. To umožňuje vyrábět tvarově složitější a komplexnější obrobky na jedno upnutí. [1]



Obr. 2.2 Kinematika CNC frézovacího centra [3]

Na Obr. 2.2 je vyobrazeno možné uspořádání jednotlivých os na pětiosém obráběcím centru. Rotační osy se přidávají ke třem translačním osám, přičemž se používají pouze dvě ze tří rotačních os A, B, C. Rotační osy rotují kolem

translačních os. Osy se označují tak, že kolem osy X rotuje rotační osa A, kolem osy Y osa B a kolem osy Z rotační osa C. Tyto obráběcí stroje je možné rozdělit podle umístění rotačních os:

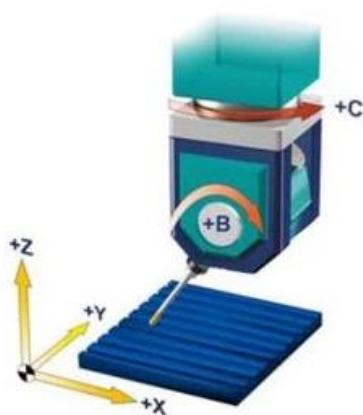
- Umístění ve stole – pohyb vykonává stůl s obrobkem
- Umístění ve vřetenové hlavě – pohyb vykonává hlava s nástrojem

2.1.4. Kinematika pětiosých obráběcích center

Uspořádání hlava – hlava

U tohoto typu stroje se obě rotační osy nacházejí na straně nástroje. Rotační pohyb vykonává nástrojová hlava a obrobek zůstává stejně orientován. [4]

- Schéma uspořádání: Obr. 2.3
- Zástupcem tohoto uspořádání je stroj TRIMILL VF 3016 (Obr. 2.4).



Obr. 2.3 Kinematika hlava – hlava [5]

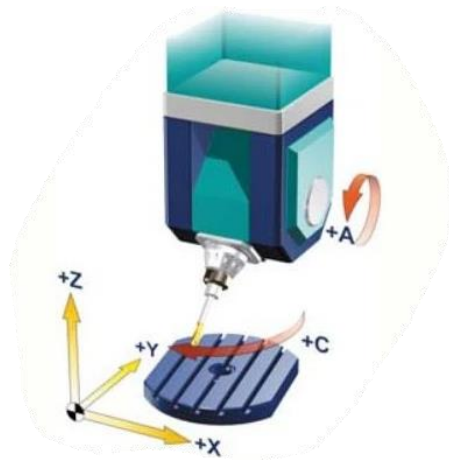


Obr. 2.4 TRIMILL VF 3016 [6]

Uspořádání hlava – stůl

Při tomto uspořádání je jedna rotační osa na straně nástroje a druhá rotační osa je umístěna na straně obrobku. Nástrojová hlava vykonává pouze jeden rotační pohyb, naklápí se, a druhý rotační pohyb vykonává obrobek, otáčí se. Toto uspořádání je tužší než uspořádání hlava – hlava. [4]

- Schéma uspořádání: Obr. 2.6
- Zástupcem tohoto uspořádání je stroj AVIA X-5 1300/630 od společnosti PILAR (Obr. 2.5).



Obr. 2.6 Kinematika hlava – stůl [5]

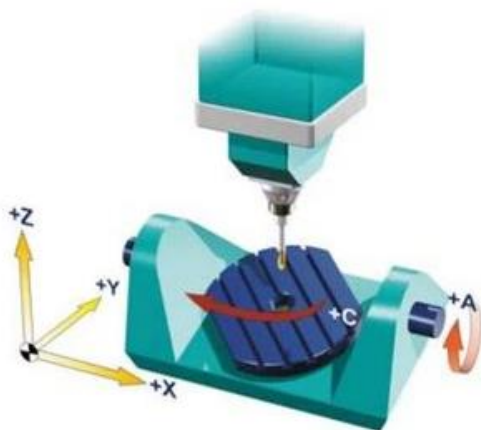


Obr. 2.5 AVIA X-5 1300/630 [7]

Uspořádání stůl – stůl

U tohoto uspořádání se obě rotační osy nacházejí na straně obrobku. Rotační pohyby vykonává pouze obrobek. Tento typ uspořádání se vyznačuje vysokou tuhostí, avšak nevýhodou je omezená velikost a váha obrobku. [4]

- Schéma uspořádání: Obr. 2.7.
- Zástupcem tohoto uspořádání je stroj MCU 700VT-5X od společnosti Kovosvit MAS (Obr. 2.8).



Obr. 2.7 Kinematika stůl – stůl [5]



Obr. 2.8 MCU 700 VT-5X [8]

2.1.5. Multifunkční obráběcí centra

Charakteristickým rysem multifunkčních obráběcích center je, že ani jedna ze dvou základních operací třískového obrábění (soustružení a frézování) není dominantní z hlediska přenášeného výkonu. Možnost obrábět až v šesti osách se současnou možností soustružení umožňuje komplexní obrábění v pětiosém frézování i v plnohodnotných soustružnických operacích tvarově složitých obrobků. [1]

2.2. Vřetenové hlavy a otočné stoly

2.2.1. Vřetenové hlavy

Vřetenové hlavy rozšiřují kinematické a technologické možnosti obráběcích strojů, proto jsou běžným volitelným příslušenstvím strojů. Pohon zajišťuje mechanicky naháněné vřeteno nebo elektro vřeteno. U mechanicky naháněného vřetena je krouticí moment veden přes soustavu hřídelů s převody ozubenými koly z hlavního pohonu až k pracovnímu vřetenu. V případě elektro vřetena je nutné zajistit přívod silových elektrických kabelů. Hlavy mají různý tvar, různé rozměry a parametry. Frézovací hlavy se rozlišují podle konstrukčního provedení. [9]

Univerzální frézovací hlavy

Tento typ hlav má možnost rotace kolem osy A, proto je uplatnění těchto hlav především u tvarově složitějších obrobků. Jak je vidět na Obr. 2.9 mají dělicí rovinu pod úhlem 45° , díky tomu mohou být při obrábění některé úhly naklopení nástroje vůči obrobku nedosažitelné. Zpravidla mají vyšší tuhost a jsou výhodnější při manévrování v obrobku. Příkladem těchto hlav je Univerzální frézovací hlava HUIL 50 od TOS Varnsdorf. [10]



Obr. 2.9 Univerzální frézovací hlava HUIL 50 [11] Obr. 2.10 Ortogonální frézovací hlava HOIL 50 [11]

Ortogonální frézovací hlavy

Vzájemná poloha os je vůči sobě kolmá neboli s pravouhlým uspořádáním. Hlava tak dokáže uskutečnit úhly naklopení nástroje vůči obrobku, které univerzální frézovací hlava nedokáže. Pravouhlé uspořádání je pro dílenské programování jednodušší. Čas polohování bývá kratší, jelikož mnohdy stačí pohnout pouze jednou osou. Příkladem těchto hlav je na Obr. 2.10 Ortogonální frézovací hlava HOIL 50 od TOS Varnsdorf. [10]

Vidlicové vřetenové hlavy

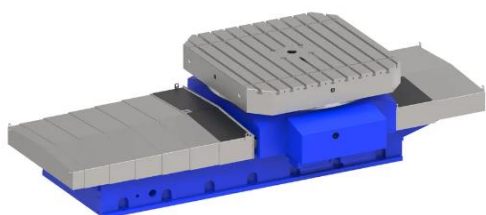
Vidlicové vřetenové hlavy mají pracovní vřeteno uloženo ve vidlici, které omezuje jejich pracovní rozsahy rotace v ose A, ale jelikož je tato konstrukce symetrická, mají hlavy větší tuhost. Vřetenové hlavy v tomto uspořádání se převážně používají u portálových strojů. Příkladem těchto hlav je na Obr. 2.11 vidlicová frézovací hlava VKE od TOS Kuřim. [10]



Obr. 2.11 Vidlicová frézovací hlava VKE [12]

2.2.2. Otočné stoly

Realizují rotační pohyb kolem jedné z hlavních os souřadného systému, tedy kolem os A, B, nebo C. Nejčastěji jsou otočné stoly koncipovány jako přídatná zařízení frézovacích center. U multifunkčních center otočný stůl zastupuje funkci včetně při soustružení a musí být schopen dosáhnout otáček odpovídající otáčkám při soustružení. Na Obr. 2.12 je vyobrazen otočný stůl s pojezdem od TOS Varnsdorf. [13]



Obr. 2.12 Otočný stůl s pojezdem [14]



Obr. 2.12 Otočný stůl s kolébkou [15]

Pro přidání další osy se otočný stůl zabuduje do tzv. kolébky. Přestože se získala další rotační osa stroje, tak se zmenšil pracovní prostor a také je omezena hmotnost obrobku. Na Obr. 2.12 je otočný stůl s kolébkou od Haas. [15]

3. Řízení CNC obráběcích strojů

Řízení CNC obráběcích strojů se provádí skrze NC kód, který dává stroji všechny potřebné informace potřebné pro obrábění a řídí jeho činnost. Pro obrábění složitějších obrobků již nestačí vytvořit NC kód ručně. Ale jsou nutné složitější NC kódy, které se vytváří pomocí počítačového softwaru CAM.

3.1. NC kód

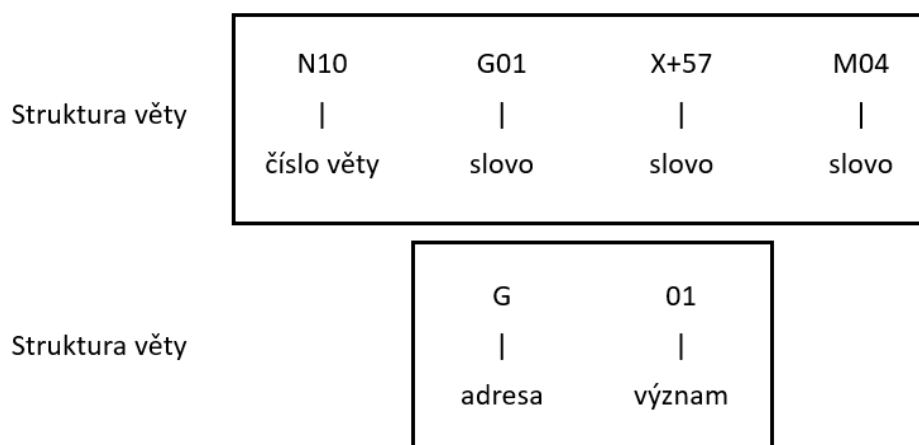
NC program popisuje činnost obráběcího CNC stroje a obsahuje pohybové a pomocné instrukce pro CNC stroj. Program se dělí do jednotlivých pracovních kroků a následně se tyto instrukce přeloží řídicímu systému jako kód.

ISO kód – programovací jazyk v řídicím systému Siemens.

Dialog – programovací jazyk v systému Heidenhain.

3.1.1. Struktura NC kódu

Pro zlepšení přehlednosti NC kódu a pro ulehčení změny programu nebo hledání případných chyb, je nutné, aby měl NC kód přehlednou strukturu. NC kód je tvořen z bloků (vět), které jsou složeny z jednotlivých příkazů (slov). Všechny slova se dělí na adresu a význam. Na Obr. 3.1 je příklad jednoho řádku NC kódu a jeho rozbor. [16]



Obr. 3.1 Struktura programu [16]

Významy adres v NC programu:

N – číslo bloku (řádku)

G – přípravná funkce (funkce dráhy)

X, Y, Z – základní osy souřadného systému (souřadnice cílového bodu)

A, B, C – hodnoty středu kruhu u kruhové interpolace

F – posuv

S – počet otáček

T – číslo nástroje

M – pomocné funkce

G funkce (přípravné) se používají pro přikázání specifických akcí stroje, jednoduché pohyby, nebo složitější funkce pro poháněné nástroje a osy C. V Tab. 3.1 je uveden výběr nejpoužívanějších G funkcí. [17]

Tab. 3.1 Vybrané G funkce [17]

Funkce	Název funkce	Použití
G00	Lineární interpolace	Rychloposuv
G01		Pracovní posuv
G02	Kruhová interpolace	Pohyb ve směru hodinových ručiček
G03		Pohyb v protisměru hodinových ručiček
G17	Pracovní rovina	Určení roviny pro provedení dané operace
G18		
G19		
G40	Vypnutí korekcí	Střed nástroje se pohybuje po kontuře
G41	Zapnutí korekcí	Nástroj se pohybuje vlevo od kontury (po ekvidistantě)
G42		Nástroj se pohybuje vpravo od kontury (po ekvidistantě)
G54 –G59	Programování v pracovním souřadném systému	
G90	Absolutní	Programování v souřadném systému
G91	Přírůstkové	Programování k poslední poloze

M funkce (pomocné) jsou různé příkazy pro stroj, které nepřikazují pohyby os. Slouží k ovládání funkcí stroje, jako zapnutí, vypnutí motoru, čerpadla chlazení. M funkce zpravidla řídí PLC stroje. V Tab. 3.2 je uveden výběr nejpoužívanějších M funkcí. [17]

Tab. 3.2 Vybrané M funkce [17]

Funkce	Název funkce	Použití
M00	Zastavení stroje	Stroj zastaví a čeká na pokyn k pokračování v programu
M03	Otáčky vřetene	Roztočení ve směru hodinových ručiček
M04		Roztočení v protisměru hodinových ručiček
M05	Zastavení vřetene	Při ručním ovládní stroje
M06	Výměna nástroje	Společně s odkazem na nástroj (T)
M30	Konec programu	Přejetí na začátek programu

3.1.2. Podprogramy

Často je zapotřebí opakovat určitý úsek v NC programu, a to i na různých místech programu. Zápis jedné části programu vícekrát způsobuje jeho nepřehlednost, prodloužení programu a pravděpodobnější výskyt chyb. Proto se zavádí podprogramy, které si program volá v místě, kde je potřeba. [16]

3.1.3. Parametrické programování

Na začátek programu se zavádějí tzv. parametry, do kterých se ukládají číselné hodnoty. V průběhu programu se pak s těmito parametry pracuje jako s číselnými hodnotami. Hodnoty parametrů lze vyjádřit i matematickými operacemi. Výhodou parametrů je rychlá a snadná změna programu. [18]

3.2. Příprava NC kódu

Při tvorbě kódu, tedy programování, je snaha popsat dráhu nástroje co možná nejjednodušeji. Při programování se používají dva způsoby, absolutní a přírůstkové (inkrementální) programování.

Absolutní – souřadnice všech programovaných bodů se zadávají ke zvolenému pevně definovanému počátku souřadnic tzv. kótování od základny.

Přírůstkové (inkrementální) – souřadnice všech programovaných bodů se zadávají k předchozímu, naposledy naprogramovanému bodu, tzv. řetězcové kótování.

Pro získání NC kódu lze využít několik způsobů programování – ruční, dílenské, strojní. Ne všechny NC kódy jsou vhodné pro všechny obráběné součásti. Zvolený způsob závisí převážně na složitosti obráběné součásti, a v praxi se převážně používá kombinace těchto způsobů pro zajištění maximální efektivity přípravy obrábění.

3.2.1. Ruční programování

Ruční programování je nejstarší způsob tvorby programu. Kód se píše ručně do textového editoru. Při tomto programování je potřeba znát základní příkazy a mít dobrou představivost pro představení si dráhy nástroje. Přestože stačí obyčejný textový editor, existují i editory, které umožňují simulaci dráhy nástroje. Takto programovat je vhodné pouze pro jednoduché součásti. [19]

3.2.2. Dílenské programování

Program se vytváří přímo na panelu stroje, kdy obsluha zapisuje kód přímo do řídicího systému. NC program je sestaven z parametrických bloků, které představují jednotlivé technologické operace. Jde o zjednodušení tvorby programu. Pro kontrolu programu lze využít vizualizaci na panelu stroje nebo pustit stroj na prázdno. Tento způsob není praktický. Obsluha je ovšem stále

schopna programovat pouze ve třech osách. Využívá se převážně při kusové výrobě. [19]

3.2.3. CAM

Při strojním programování se program vytváří na externím počítači pomocí CAM softwaru a výsledný program se přenesení do stroje. Pro vytvoření kódu se nejprve vytvoří 3D model. Následně se vygenerují dráhy nástroje pro obrábění. Přes post procesor se z těchto drah vytvoří NC kód, který řídicí systém přečte. Výhodou tohoto programování je, že se dá obrábět ve více osách než jen ve třech, jak tomu bylo u předchozích způsobů. Používá se při výrobě složitějších součástí a při sériové výrobě. Mezi nejpoužívanější CAM softwary patří Siemens NX, SolidCAM, PowerMILL, Fusion 360. [19]

4. Cykly řídicího systému – transformace

Řídicí systémy jsou nezbytnou součástí CNC strojů. Propojují počítačový systém stroje s jeho mechanickými částmi. Jednou z jejich nejdůležitějších úloh je výpočet a řízení trajektorie pohybu. V NC programu je někdy nezbytné nebo výhodné změnit (transformovat) souřadný systém, což vede i ke změně pohybu nástroje. Řídicí systémy CNC obráběcích strojů obsahují funkce (cykly), které umožňují transformaci polohy, natočení, změnu měřítka os, zrcadlově převrací os souřadného systému. Mezi nejvíce rozšířené řídicí systémy CNC obráběcích strojů patří SINUMERIC, HEIDENHAIN a FANUC.

4.1. Ekvivalentní cykly v Siemens a Heidenhain

Popis cyklů v NC programu se liší v závislosti na řídicím systému, ale jejich funkce jsou sejné. Dále se tato práce bude zabývat cykly v řídicím systému Siemens SINUMERIC a HEIDENHAIN.

V řídicím systému Siemens SINUMERIC se příkazům pro transformaci souřadného systému říká frame a rozlišují se tři druhy:

Základní frame popisuje transformaci souřadného systému ze základního souřadného systému do základního počátečního systému.

Nastavitelný frame jsou nastavitelná posunutí počátku, která definují vztah mezi počátkem souřadné soustavy obrobku a základním souřadným systémem.

Programovatelné framy uskutečňují posunutí, otáčení, zrcadlové převrácení, změnu měřítka nastavitelného souřadného systému.

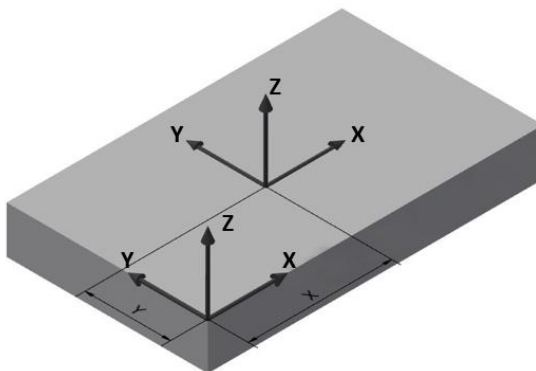
Framy se rozdělují na dva typy:

Nahrazující příkaz – vymaže všechny dříve naprogramované příkazy framu, jako vztažný se používá poslední zadané nastavitelné posunutí počátku.

Aditivní příkaz – superponuje se na již existující frame, jako vztažný se použije naposled naprogramovaný počátek souřadného systému obrobku. [20]

4.1.1. Translace

Pomocí příkazů TRANS/ATRANS (Siemens) a cyklu 7 (Heidenhain) se posouvá počátek souřadného systému ve směru os. Využitím této transformace je možné opakovat stejné obráběcí operace na různých místech obrobku. Na Obr. 4.1 je znázorněno posunutí počátku souřadného systému v osách X a Y. [20] [21]



Obr. 4.1 Posunutí souřadného systému

Název cyklu a jeho zápis v NC kódu:

- Siemens SINUMERIC - Posunutí počátku:

TRANS X... Y... Z...

ATRANS X... Y... Z...

- HEIDENHAIN - Posunutí nulového bodu:

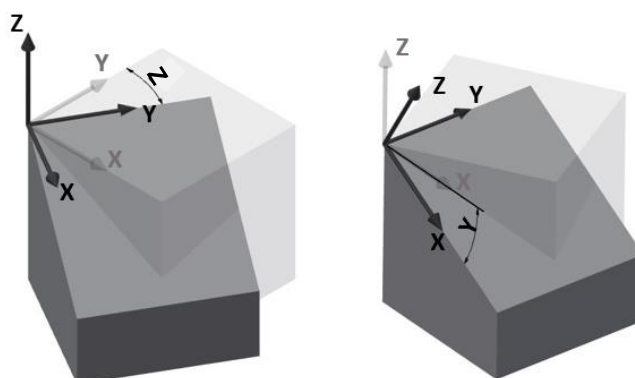
CYCL DEF 7.0 NULOVÝ BOD

CYCL DEF 7.1 X... Y... Z...

Parametry X, Y, Z udávají velikost posunutí v jednotlivých osách.

4.1.2. Rotace

Pomocí příkazů ROT/AROT (Siemens) a cyklu 19 (Heidenhain) je možné natočit souřadný systém obrobku okolo libovolných geometrických os X, Y, Z, nebo o úhel RPL ve zvolené pracovní rovině. Na Obr. 4.2 je znázorněna rotace souřadného systému nejprve kolem osy Z a následně rotace kolem osy Y.



Obr. 4.2 Rotace souřadného systému

Název cyklu a jeho zápis v NC kódu:

- Siemens SINUMERIC - Programovatelné otočení:

ROT X... Y... Z...

AROT X... Y... Z...

ROT RPL=...

AROT RPL=...

Parametry X, Y, Z udávají velikosti úhlů.

RPL (Rotation Plane) udává otáčení v aktuální rovině. Posloupnost uskutečnění otáčení definuje strojní parametr. Zápis se provádí pomocí Eulerových úhlů, kdy se provádí otáčení postupně okolo os Z, X, Z, nebo zápis typu RPY (Roll, Pitch, Yaw), kde otáčení probíhá nejprve kolem osy Z, poté okolo osy Y a nakonec okolo osy X.

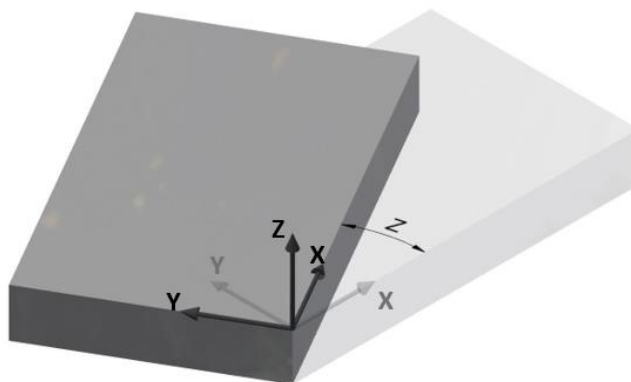
- HEIDENHAIN - Rovina obrábění:

CYCL DEF 19.0 ROVINA OBRÁBĚNÍ

CYCL DEF 19.1 A... B... C...

Parametry A, B, C udávají osu naklopení s příslušnou velikostí úhlu natočení.

Při použití příkazů ROTS/ARPTS (Siemens) a cyklu 10 (Heidenhain) se souřadný systém natočí v rovině. Na Obr. 4.3 souřadný systém rotuje kolem osy Z.



Obr. 4.3 Otočení souřadného systému

Název cyklu a jeho zápis v NC kódu:

- Siemens SINUMERIC - Programovatelné otočení ramu o prostorový úhel:

ROTS X... Y... /Z...

AROTS X... Y... /Z...

Parametry X, Y, Z udávají velikost prostorového úhlu a smí být použity vždy pouze dva najednou.

- HEIDENHAIN – Natočení:

CYCL DEF 10.0 NULOVÝ BOD

CYCL DEF 10.1 ROT...

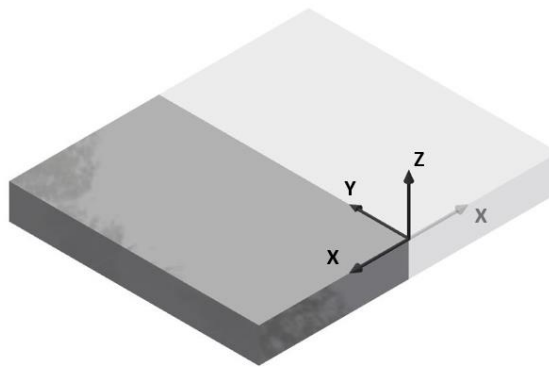
Vztažné osy pro úhel natočení:

Rovina X/Y osa X, Rovina Y/Z osa Y, Rovina Z/X osa Z

Po nadefinování cyklu **10** je nutné provést pohyb v obou osách v uvedené rovině. [20] [21]

4.1.3. Zrcadlení

Příkazem MIRROR/AMIRROR (Siemens) a cyklu 8 (Heidenhain) lze provádět zrcadlové převrácení souřadného systému podél jeho os. Všechny pracovní pohyby se následně budou provádět zrcadlově převrácené. Na Obr. 4.4 je znázorněno zrcadlení osy X souřadného systému.



Obr. 4.4 Zrcadlení souřadného systému

Název cyklu a jeho zápis v NC kódu:

- Siemens SINUMERIC - Programovatelná zrcadlové převrácení:

MIRROR X... Y... Z...

AMIRROR X... Y... Z...

Parametry X, Y, Z udávají, které osy se mají zrcadlit, hodnota je libovolná.

- HEIDENHAIN – Zrcadlení:

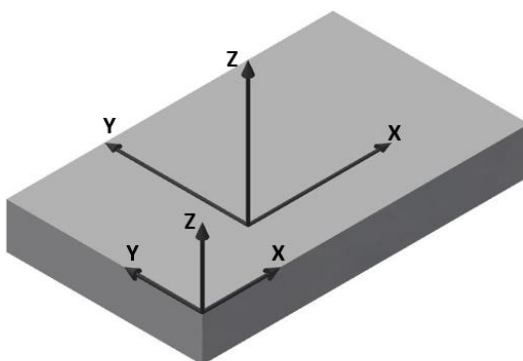
CYCL DEF 8.0 ZRCADLENÍ

CYCL DEF 8.1 X... Y... Z...

Parametry X, Y, Z udávají, které osy se mají zrcadlit, včetně rotačních os (A, B, C, U, V, W). [20] [21]

4.1.4. Změna měřítka

Příkazy SCALE/ASCALE (Siemens) a cyklus 26 (Heidenhain) se mění měřítko souřadného systému v jednotlivých osách pro účel zvětšení nebo zmenšení. U cyklu 11 (Heidenhain) se měřítko mění ve všech osách stejně. Na Obr. 4.5 se po posunutí souřadného systému zvětšilo i jeho měřítko.



Obr. 4.5 Změna měřítka souřadného systému

Název cyklu a jeho zápis v NC kódu:

- Siemens SINUMERIC - Programovatelná změna měřítka:

SCALE X... Y... Z...

ASCALE X... Y... Z...

Parametry X, Y, Z udávají velikost změny měřítka v jednotlivých osách.

- HEIDENHAIN - Koeficient změny měřítka:

CYCL DEF 11.0 ZMĚNA MĚŘÍTKA

CYCL DEF 11.1 SCL ...

SCL udává velikost změny měřítka.

- HEIDENHAIN - Osově specifický koeficient změny měřítka:

CYCL DEF 26.0 ZMĚNA MĚŘÍTKA DANÉ OSY

CYCL DEF 26.1 X... Y... Z... CCX... CCY...

Parametry X, Y, Z udávají velikost změny v jednotlivých osách a CCX, CCY udávají souřadnice středu osově specifického natažení nebo smrštění. [20] [21]

4.2. Definování roviny obrábění v Heidenhain

V řídicím systému Heidenhain je vytvořena funkce (cyklus) pro naklopení roviny obrábění s názvem PLANE. Tento cyklus umožňuje definovat rovinu obrábění několika způsoby, kdy naklopení není závislé na osách, které skutečně existují na stroji.

- **Definování roviny obrábění pomocí prostorového úhlu: PLANE SPATIAL**

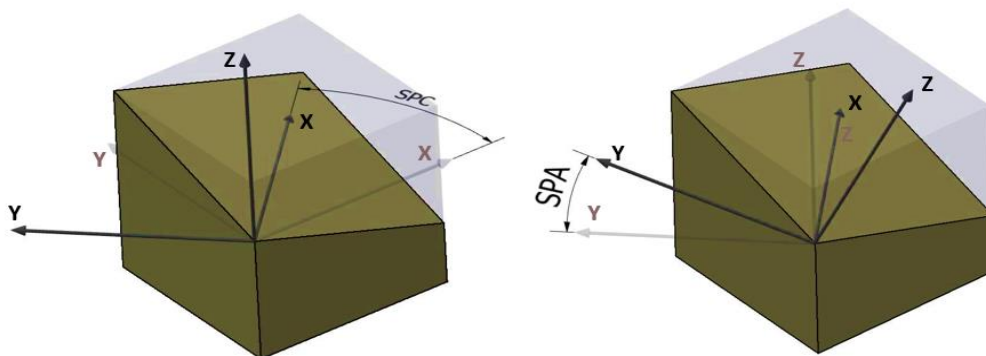
Obráběcí rovinu definuje prostorový úhel až třemi natočeními v souřadném systému. Jsou k dispozici dvě možnosti provedení:

- Natočení kolem pevného souřadného systému stroje, kdy posloupnost pohybů natočení je nejprve kolem strojní osy C, poté kolem strojní osy B, nakonec natočení kolem strojní osy A.
- Natočení kolem již natočeného souřadného systému, kdy se natočení souřadný kolem strojní osy C, poté kolem natočené osy B a nakonec kolem natočené osy A.

Vstupní parametry SPA, SPB, SPC jsou úhly natočení kolem pevných strojních os X, Y, Z. Natočení souřadného systému kolem pevných strojních os je znázorněno na Obr. 4.6, kdy se nejprve natočí okolo osy Z a následně okolo osy X. Úhel natočení SPB kolem osy Y se v tomto případě nepoužije.

Zápis v NC kódu:

PLANE SPATIAL SPA... SPB... SPC...



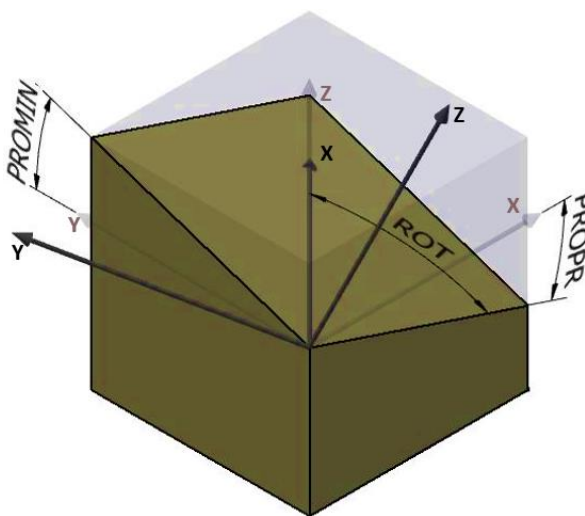
Obr. 4.6 Natočení PLANE SPATIAL

- **Definování roviny obrábění pomocí průmětového úhlu: PLANE PROJECTED**

Rovina obrábění je definována průměty úhlů zadáním dvou úhlů, které lze zjistit průmětem 1. roviny souřadnic (Z/X při ose nástroje Z) a 2. roviny souřadnic (Y/Z při ose nástroje Z) do roviny obrábění, která se má definovat. Vstupní parametry PROPR a PROMIN představují průměty úhlů naklonění do pevného souřadného systému stroje. Parametr PROROT udává natočení nakloněného souřadného systému kolem nakloněné osy nástroje. Na Obr. 4.7 je vyobrazeno natočení souřadného systému do roviny obrábění pomocí funkce PLANE PROJECTED.

Zápis v NC kódu:

PLANE PROJECTED PROPR... PROMIN... PROROT...



Obr. 4.7 Natočení PLANE PROJECTED

- **Definování roviny obrábění pomocí Eulerova úhlu: PLANE EULER**

Eulerovy úhly definují rovinu obrábění pomocí až tří natočení kolem daného nakloněného souřadného systému. Na Obr. 4.8 se nejprve souřadný systém natočí kolem osy Z, poté okolo osy X a nakonec opět kolem osy Z.

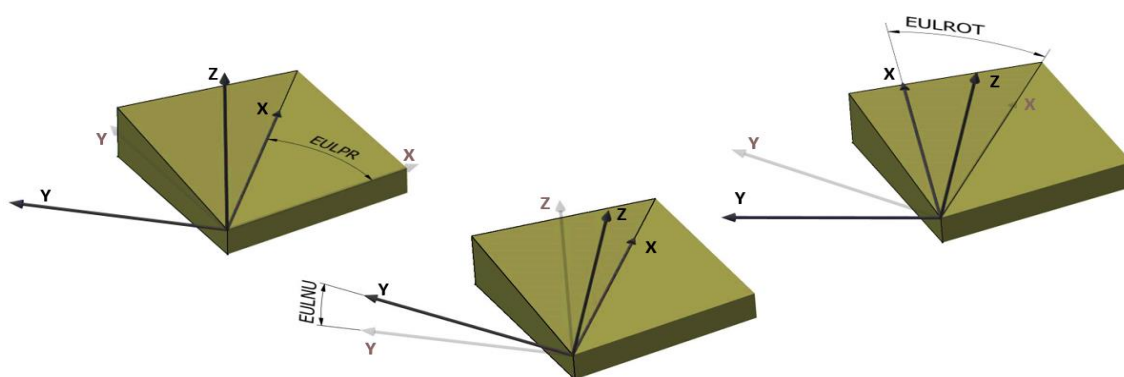
EULPR (úhel precese) - natočení souřadného systému kolem osy Z.

EULNU (úhel nutace) - natočení souřadného systému kolem osy X natočené precesním úhlem.

EULROT (úhel rotace) - natočení naklonené roviny obrábění kolem osy Z.

Zápis v NC kódu:

PLANE EULER EULPR... EULNU... EULROT...



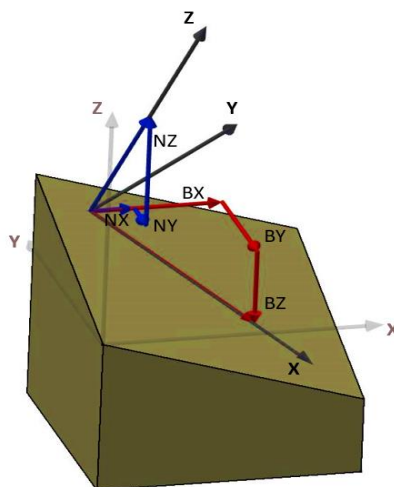
Obr. 4.8 Natočení PLANE EULER

- **Definování obráběcí roviny pomocí dvou vektorů: PLANE VECTOR**

Rovinu obrábění definuje vektor báze se složkami BX, BY, BZ a vektor normály se složkami NX, NY, NZ. V Obr. 4.9 je definována rovina obrábění pomocí vektorů báze (červené) a vektorů normály (modré).

Zápis v NC kódu:

PLANE VECTOR BX... BY... BZ... NX... NY... NZ...



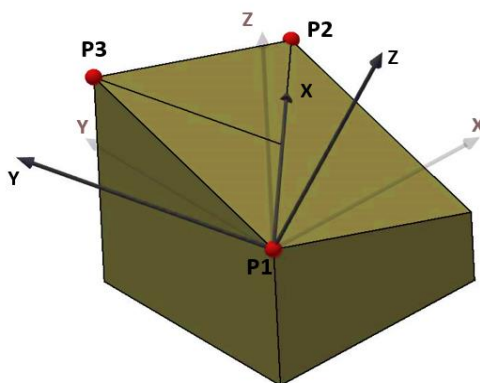
Obr. 4.9 Natočení PLANE VECTOR

- **Definování roviny obrábění pomocí tří bodů: PLANE POINTS**

Zadáním tří bodů P1, P2 a P3 lze definovat rovinu obrábění. Spojnice mezi body 1 a 2 určuje směr naklonené hlavní osy. Směr natočení nástroje se určí polohou bodu 3 vztaheného ke spojnici bodů 1 a 2. Vstupními parametry jsou souřadnice jednotlivých bodů. Na Obr. 4.10 je definována rovina obrábění pomocí tří bodů, jejichž souřadnice jsou P1 (P1X, P1Y, P1Z), P2 (P2X, P2Y, P2Z), P3 (P3X, P3Y, P3Z).

Zápis v NC kódu:

PLANE POINTS P1X... P1Y... P1Z... P2X... P2Y... P2Z... P3X... P3Y... P3Z...



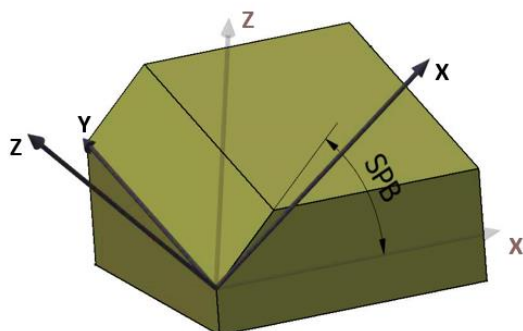
Obr. 4.10 Natočení PLANE POINTS

- **Definování roviny obrábění jediným inkrementálním prostorovým úhlem: PLANE RELATIVE**

Pro další naklonění již aktivní naklonené roviny obrábění. Definovaný úhel působí vůči rovině obrábění. Na Obr. 4.11 je natočení naklonené roviny o úhel SPB kolem osy Y pro obrábění zkosení na této rovině.

Zápis v NC kódu:

PLANE RELATIVE SPA... /SPB... /SPC...



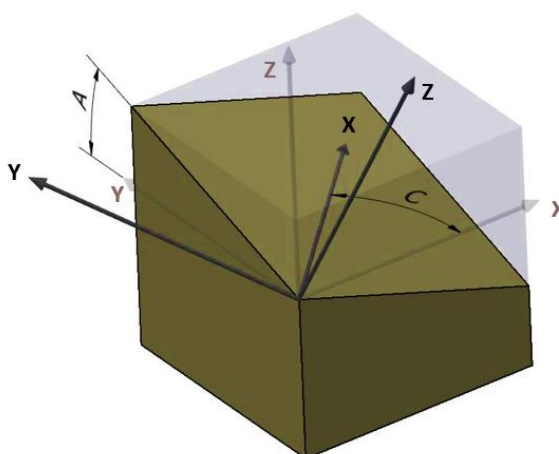
Obr. 4.11 Natočení PLANE RELATIV

- **Rovina obrábění pomocí osového úhlu: PLANE AXIAL**

Tato funkce definuje jak polohu roviny obrábění, tak i cílové souřadnice os natočení. Zadávají se úhly os, na které se mají osy A, B nebo C naklopit, nebo o jaký úhel se má daná osa naklopit z aktuální pozice v případě přírůstkového zadávání. Tato funkce využívá pouze rotační osy, které jsou skutečně na stroji. Na Obr. 4.12 je znázorněna rotace, kdy nejprve rotuje osa A a poté osa C. [22]

Zápis v NC kódu:

PLANE AXIAL A... B... /C...



Obr. 4.12 Natočení PLANE AXIAL

4.3. Definování roviny obrábění v Siemens

Pro natočení roviny obrábění se v řídicím systému Siemens SINUMERIC používá cyklus CYCLE800. Naklápění je možné uskutečnit axiálně, jako úhel projekce nebo jako prostorový úhel. V případě potřeby lze posunout lineární osy před nastavením rotačních os.

Zápis v NC kódu:

CYCLE800 (_FR, _TC, _ST, _MODE, _X0, _Y0, _Z0, _A, _B, _C, _X1, _Y1, _Z1, _DIR, _FR_I)

Vstupní parametry:

_FR – Zasouvání (před natočením rotačních os)

Hodnoty tohoto parametru určují, jaký má nastat zpětný pohyb ve směru nástroje, kdy „0“ je bez zatažení, „1“ je zatažení osy Z, „2“ zatažení osy Z, X, Y, „4“ je maximální zatažení ve směru nástroje, „5“ je inkrementální zatažení ve směru nástroje.

_ST – Otočná rovina

Určuje, zda se definuje nová naklopená rovina (předchozí framy se vynulují), nebo se přidá ke stávajícímu cyklu otáčení.

_MODE – Otočný režim

Tento parametr definuje režim otáčení pro osu.

- Pomocí axiálního natočení se nástroj postupně otáčí kolem jednotlivých os souřadného systému.
- Při otáčení pomocí úhlu projekce se hodnota úhlu natočené plochy promítne do prvních dvou os pravouhlého souřadného systému a třetí rotace začíná od předchozí rotace.
- S možností otáčení v plném úhlu se nejprve souřadný systém otočí kolem osy Z a poté kolem osy Y.
- S přímým řízením os lze polohy rotačních os zadat přímo.

_TC – Název datového záznamu otáčení

_X0, _Y0, _Z0 – Referenční bod před otočením

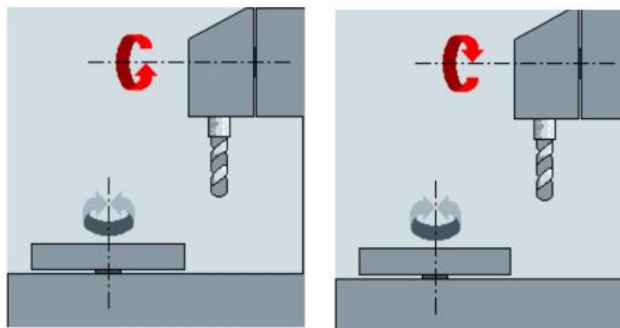
_X1, _Y1, _Z1 – Nulový bod po otočení

_A, _B, _C – Natočení jednotlivých os

_FR_I – Hodnota inkrementálního odtažení ve směru nástroje

_DIR – Otočení, směr

Pokud se při vyvolání cyklu vypočítají dvě možná řešení natočení, může operátor zvolit preferovaný směr. Například vlevo na Obr. 4.13 je znázorněn směr „minus“ (dolní hodnota rotační osy), kdy se osa B otočí o -10° a osa C o 90° , vpravo je směr „plus“ (vyšší hodnota rotační osy) a osa B se otočí o $+10^\circ$ a osa C o 270° . Řešení se liší o 180° . [23]



Obr. 4.13 Směr "minus" a "plus" [23]

5. Popis transformací cyklů

Mezi dvěma souřadnými systémy v prostoru (souřadný systém stroje a obrobku) existuje vztah, který lze matematicky definovat. Tento vztah je možné vyjádřit pomocí transformačních matic, které definují potřebné operace k transformaci jednoho souřadného systému do druhého.

5.1. Mechanická transformace

Základní operace, jimiž se dá popsat transformace, jsou posunutí, rotace kolem jednotlivých os a změna měřítka. K těmto základním operacím se řadí také operace, která zrcadlí jednotlivé osy.

5.1.1. Základní transformační matice

Matematický předpis pro popis posunutí počátku souřadného systému vyjadřuje rovnice (5.1), kde hodnoty X, Y, Z udávají velikost posunutí v jednotlivých osách. [24]

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Tuto transformaci využívají cykly **TRANS** a **CYKLUS 7**, kde se v jejich zápise v NC kódu udávají rovnou hodnoty posunutí.

Matematický popis rotace souřadného systému se nedá vyjádřit jednou maticí. Musí se vyjádřit matice pro každou osu samostatně. Jejich postupným vynásobením mezi sebou se získá výsledná matice rotace. Při násobení matic je důležité jejich pořadí, které je stejné s pořadím rotací os na stroji. Rovnice (5.2) je maticí rotace kolem osy x, rovnice (5.3) je maticí rotace kolem osy y a rovnice (5.4) je maticí rotace kolem osy z. Hodnoty φ udávají velikost úhlu natočení ve stupních a index určuje osu rotace. [24]

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_x & -\sin \varphi_x & 0 \\ 0 & \sin \varphi_x & \cos \varphi_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \varphi_y & 0 & \sin \varphi_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_y & 0 & \cos \varphi_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \varphi_z & -\sin \varphi_z & 0 & 0 \\ \sin \varphi_z & \cos \varphi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Rovnice (5.5) vyjadřuje celkovou transformaci rotace, kdy se nejprve souřadný systém rotuje okolo osy z, následně proběhne rotace kolem osy y a nakonec bude rotovat kolem osy x.

$$R = R_z \cdot R_y \cdot R_x \quad (5.5)$$

Cykly **ROT** a **CYKLUS 19**, **ROTS** a **CYKLUS 10** využívají transformaci využitím těchto transformačních matic pro rotaci.

Matematický předpis pro změnu měřítka souřadného systému ve všech osách stejně vyjadřuje rovnice (5.6). Rovnice (5.7) udává změnu měřítka os nezávisle na ostatních osách. Parametr matice m je hodnota, která určuje změnu měřítka všech os v násobkách. V rovnici (5.7) určuje index u parametru m hodnotu změny měřítka dané osy. [24]

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$M_R = \begin{bmatrix} m_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

U cyklů **SCALE** a **CYKLUS 26** se primárně používá rovnice (5.7), ale je možno využít i rovnici (5.6) při použití stejných hodnot pro všechny osy. Rovnicí (5.7) je definován také CYKLUS 11.

Při zrcadlení os souřadného systému se využijí matematické předpisy vyjádřené rovnicemi (5.8),(5.9),(5.10) pro jednotlivé osy. Výsledné zrcadlení se určí vzájemným násobením matic pro požadované osy. Při násobení nezáleží na pořadí matic. [24]

$$Z_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$Z_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$Z_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Rovnice (5.11) vyjadřuje výslednou transformaci při zrcadlení všech tří os souřadného systému.

$$Z_c = Z_x \cdot Z_y \cdot Z_z \quad (5.11)$$

Aplikací těchto matic jsou cykly **MIRROR** a **CYKLUS 8**.

5.1.2. Aditivní transformace

Při transformaci již transformovaného souřadného systému se vynásobí aktivní transformace (S_0) přírůstkovou maticí požadované transformace (S_1). Tento vztah je vyjádřen rovnicí (5.12).

$$S = S_0 \cdot S_1 \quad (5.12)$$

5.1.3. Transformace PLANE

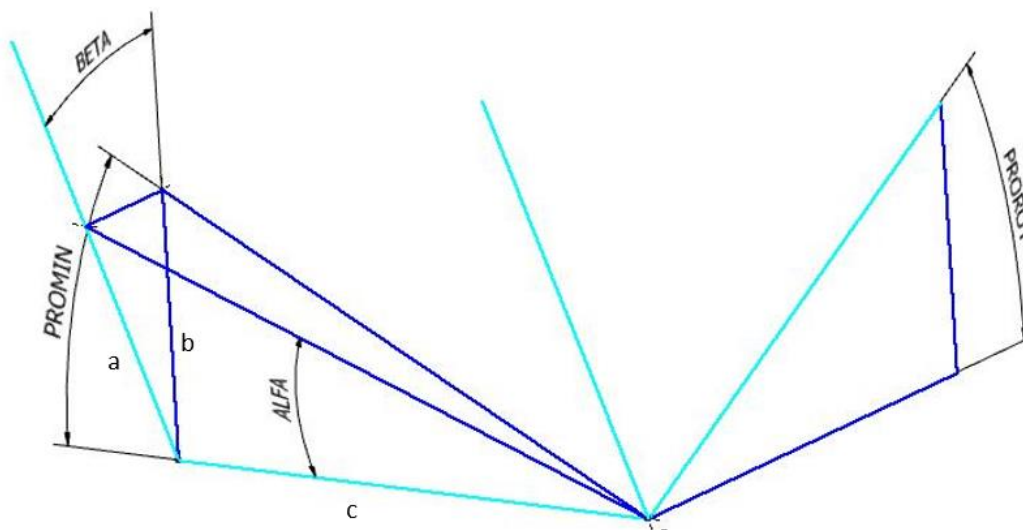
PLANE SPATIAL **SPA...** **SPB...** **SPC...** :

Tento cyklus se chová při transformaci stejně jako u cyklů ROT a cyklus 19. Pouze značení parametrů se liší, kdy úhel rotace kolem osy x se značí SPA, úhel kolem osy y SPB a úhel kolem osy z SPC. Výslednou transformaci popisuje rovnice (5.13).

$$R = R_z(SPC) \cdot R_y(SPB) \cdot R_x(SPA) \quad (5.13)$$

- PLANE PROJECTED **PROPR...** **PROMIN...** **PROROT...** :

Obdoba PLANE SPATIAL, ale první dva úhly pro rotaci (PROMIN, PROPR) jsou promítnuty do stěn kvádrů ležících v počátku souřadného systému.



Obr. 5.1 Přečet úhlu PROMIN

Jeden promítnutý úhel (PROMIN nebo PROPR) je třeba přepočítat, jelikož je třeba znát skutečný úhel, o který se souřadný systém pootočil. Úhel, který se přepočítá, byl zvolen PROMIN, který se otáčí kolem osy X. Na Obr. 5.1 jsou uvedeny úhly a úsečky, pomocí kterých se úhel PROMIN přepočítá na skutečný úhel natočení α , při natočení souřadného systému o úhel PROPR (roven úhlu β) kolem osy Y. Světle je vyznačen souřadný systém pootočený o úhel PROROT.

Nejprve se vyjádřila úsečka b pomocí úhlu β a úhlu PROMIN (5.14) a úsečka a pomocí úhlu α (5.15).

$$b = a \cdot \cos \beta = c \cdot \tan PROMIN \quad (5.14)$$

$$a = \tan \alpha \cdot c \quad (5.15)$$

Tyto dvě rovnice se sloučí a získá se rovnice (5.16), ze které se vyjádří sinus úhlu α (5.17) a následně i samotný úhel α (5.19).

$$\tan \alpha \cdot c \cdot \cos \beta = c \cdot \tan PROMIN \quad (5.16)$$

$$\tan \alpha = \frac{\tan PROMIN}{\cos \beta} \quad (5.17)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\tan PROMIN}{\cos PROPR} \right) \quad (5.18)$$

Rovnice (5.19) je výslednou rovnicí transformace rotace pro PLANE PROJECTED.

$$R = R_y(PROPR) \cdot R_x(\alpha) \cdot R_z(PROROT) \quad (5.19)$$

- **PLANE EULER EULPR... EULNU... EULROT... :**

Při této transformaci se používá rotace pouze kolem os X a Z, přičemž se rotuje postupně nejprve kolem osy Z, poté kolem osy X a nakonec opět kolem osy Z. Výslednou transformaci popisuje rovnice (5.20).

$$R = R_z(EULPR) \cdot R_x(EULNU) \cdot R_z(EULROT) \quad (5.20)$$

- PLANE VECTOR **BX... BY... BZ... NX... NY... NZ... :**

Vektorovým součtem složek vektorů báze se získá vektor \vec{B} (5.21), který je totožný s novou osou X a vektorovým součtem složek vektorů normály se získá vektor \vec{N} (5.22), který je totožný s novou osou z. Určením kolmého vektoru k těmto dvěma vektorům se získá vektor \vec{R} (5.23) totožný s osou Y.

$$\vec{B} = \overline{BX} + \overline{BY} + \overline{BZ} = \begin{bmatrix} BX \\ BY \\ BZ \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$\vec{N} = \overline{NX} + \overline{NY} + \overline{NZ} = \begin{bmatrix} NX \\ NY \\ NZ \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} RX \\ RY \\ RZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY \cdot NZ - BZ \cdot NY \\ BZ \cdot NX - BX \cdot NZ \\ BX \cdot NY - BY \cdot NX \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

Pro možnost dosazení složek vektorů do transformační matice je nutno dané vektory přepočítat na jednotkové vektory stejného směru. To se provede spočtením velikosti jednotlivých vektorů ((5.24), (5.25), (5.26)) a následným podělením složek vektorů velikostí vektorů ((5.27), (5.28), (5.29)).

$$|\vec{B}| = \sqrt{BX^2 + BY^2 + BZ^2} \quad (5.24)$$

$$|\vec{N}| = \sqrt{NX^2 + NY^2 + NZ^2} \quad (5.25)$$

$$|\vec{R}| = \sqrt{RX^2 + RY^2 + RZ^2} \quad (5.26)$$

$$\vec{B}_j = \begin{bmatrix} BX/|\vec{B}| \\ BY/|\vec{B}| \\ BZ/|\vec{B}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_jX \\ B_jY \\ B_jZ \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$$\vec{N}_j = \begin{bmatrix} NX/|\vec{N}| \\ NY/|\vec{N}| \\ NZ/|\vec{N}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_jX \\ N_jY \\ N_jZ \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

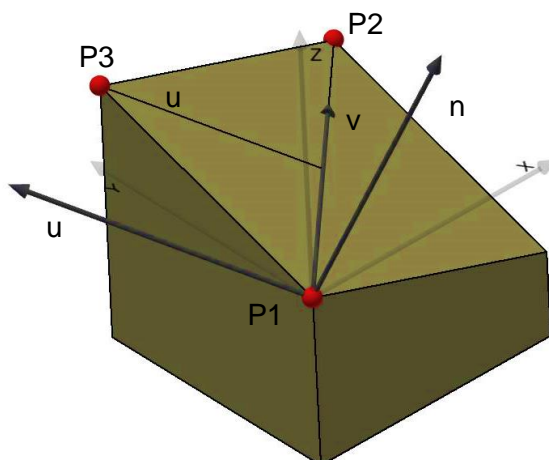
$$\vec{R}_j = \begin{bmatrix} RX/|\vec{R}| \\ RY/|\vec{R}| \\ RZ/|\vec{R}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_jX \\ R_jY \\ R_jZ \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

Sloupce transformační matice (matice přechodu) (5.30) tvoří souřadnice jednotkových vektorů \vec{B}_j , \vec{R}_j , \vec{N}_j vzhledem k novému souřadnému systému.

$$P = \begin{bmatrix} B_jX & R_jX & N_jX & 0 \\ B_jY & R_jY & N_jY & 0 \\ B_jZ & R_jZ & N_jZ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

- PLANE POINTS **P1X... P1Y... P1Z... P2X... P2Y... P2Z... P3X... P3Y... P3Z...**:

Pomocí zadaných bodů se vypočítají vektory, které budou tvořit nový souřadný systém. Na Obr. 5.2 jsou označeny vektory \vec{u} , \vec{v} , \vec{n} , které se získají pomocí bodů P1, P2, P3.



Obr. 5.2 PLANE POINTS vektory

Mezi body P1 a P2 se nachází vektor \vec{v} (5.31), který směřuje k bodu P2.

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} P2X - P1X \\ P2Y - P1Y \\ P2Z - P1Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Vektor \vec{u} (5.32) prochází bodem P3 a je kolmý na vektor \vec{v} . Pro jeho určení se zavede pomocný bod náležící vektoru \vec{v} se souřadnicemi PX, PY, PZ.

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} P3X - PX \\ P3Y - PY \\ P3Z - PZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

Body PX, PY, PZ se vyjádří parametricky (5.33), (5.34), (5.35).

$$PX = P1X + v_1 \cdot t \quad (5.33)$$

$$PY = P1Y + v_2 \cdot t \quad (5.34)$$

$$PZ = P1Z + v_3 \cdot t \quad (5.35)$$

Z podmínky kolmosti vektorů (5.36) se určí rovnice (5.37), do které se dosadí jednotlivé složky vektorů (5.38).

$$\cos 90^\circ = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|} \quad (5.36)$$

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = 0 = u_1 \cdot v_1 + u_2 \cdot v_2 + u_3 \cdot v_3 \quad (5.37)$$

$$0 = (P3X - P1X - v_1 \cdot t) \cdot v_1 + (P3Y - P1Y - v_2 \cdot t) \cdot v_2 + (P3Z - P1Z - v_3 \cdot t) \cdot v_3 \quad (5.38)$$

Rovnice se roznásobí a vyjádří se všechny členy závislé na parametru t (5.39).

$$\begin{aligned} (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2) \cdot t = \\ = (P3X - P1X) \cdot v_1 + (P3Y - P1Y) \cdot v_2 \\ + (P3Z - P1Z) \cdot v_3 \end{aligned} \quad (5.39)$$

Z této rovnice se již spočítá parametr t (5.40), se kterým se dopočítají složky vektoru \vec{u} .

$$t = \frac{(P3X - P1X) \cdot v_1 + (P3Y - P1Y) \cdot v_2 + (P3Z - P1Z) \cdot v_3}{(v_1^2 + v_2^2 + v_3^2)} \quad (5.40)$$

Určí se normálový vektor \vec{n} (5.41).

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_2 \cdot u_3 - v_3 \cdot u_2 \\ v_3 \cdot u_1 - v_1 \cdot u_3 \\ v_1 \cdot u_2 - v_2 \cdot u_1 \end{bmatrix} \quad (5.41)$$

Pro možnost dosazení složek vektorů do transformační matice je nutno vektory přepočítat na jednotkové vektory stejného směru ((5.42), (5.43), (5.44)). To se provede spočtením velikosti jednotlivých vektorů a následným podělením složek vektorů velikostí vektorů ((5.45), (5.46), (5.47)).



$$|\vec{v}| = \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2} \quad (5.42)$$

$$|\vec{u}| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (5.43)$$

$$|\vec{n}| = \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2} \quad (5.44)$$

$$\vec{v}_j = \begin{bmatrix} v_1/|\vec{v}| \\ v_2/|\vec{v}| \\ v_3/|\vec{v}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1j} \\ v_{2j} \\ v_{3j} \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

$$\vec{u}_j = \begin{bmatrix} u_1/|\vec{u}| \\ u_2/|\vec{u}| \\ u_3/|\vec{u}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1j} \\ u_{2j} \\ u_{3j} \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

$$\vec{n}_j = \begin{bmatrix} n_1/|\vec{n}| \\ n_2/|\vec{n}| \\ n_3/|\vec{n}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{1j} \\ n_{2j} \\ n_{3j} \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

Dosazením složek jednotkových složek vektorů do sloupců matice se získá transformační předpis pro transformaci (5.48).

$$P = \begin{bmatrix} v_{1j} & u_{1j} & n_{1j} & 0 \\ v_{2j} & u_{2j} & n_{2j} & 0 \\ v_{3j} & u_{3j} & n_{3j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

- PLANE RELATIVE **SPA...** /**SPB...** /**SPC...** :

Rotace se realizuje pouze kolem jedné požadované osy, proto výsledná matice rotace bude shodná s maticí rotace pro zvolenou osu, jak je uvedeno v (5.49).

$$R = R_x(SPA) \quad R = R_y(SPB) \quad R = R_z(SPC) \quad (5.49)$$

- PLANE AXIAL **A... /B... /C...** :

Definuje rovinu obrábění zadáním prostorového úhlu. Transformační předpis je obdobou cyklu PLANE SPATIAL, ale používají se pouze rotační osy, které jsou skutečně na stroji. Výsledný transformační předpis je uveden v (5.50) a za hodnotu rotace neexistující osy se dosadí nula.

$$R = R_x(A) \cdot R_y(B) \cdot R_z(C) \quad (5.50)$$

5.1.4. Transformace CYCLE 800

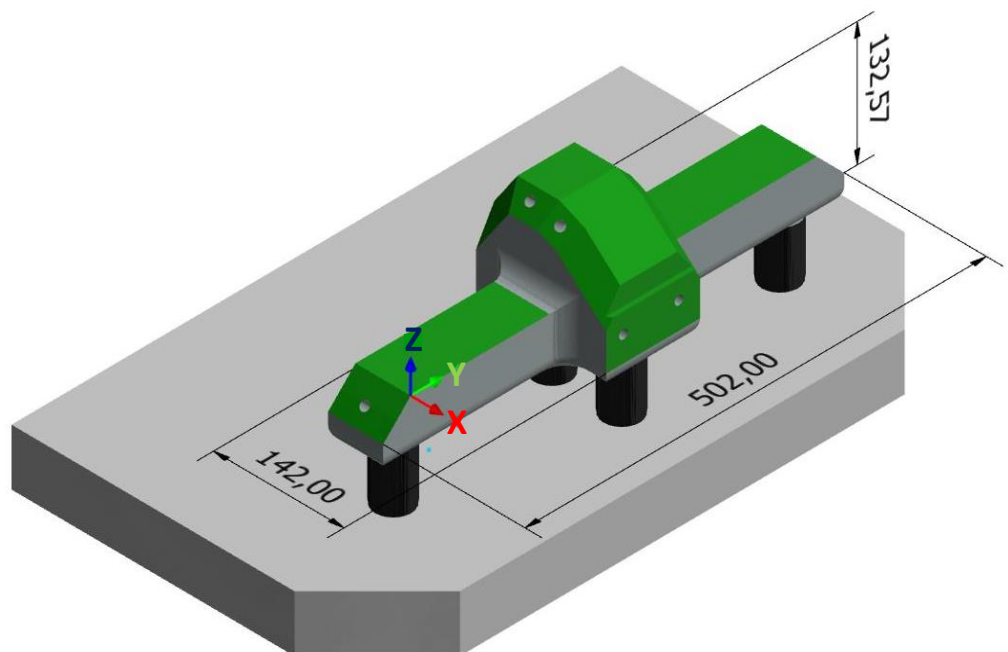
Cyklus kombinuje transformaci posunutí a rotace. Nejprve se lokální souřadný systém posune do požadované polohy, ve které bude probíhat následující transformace. Poté proběhne rotace požadovaných os o zadanou hodnotu natočení. Nakonec se na již posunuté a natočené ploše dále posune do lokálního počátku pro obrábění. Rovnice (5.51) popisuje tuto transformaci.

$$S = T_0 \cdot R_z \cdot R_y \cdot R_x \cdot T_1 \quad (5.51)$$

Z jeho plného zápisu v NC kódu (CYCLE800 (**_FR, _TC, _ST, _MODE, _X0, _Y0, _Z0, _A, _B, _C, _X1, _Y1, _Z1, _DIR, _FR _I**)) se vyberou hodnoty pro transformaci, kde T_0 je transformační matice prvního posunutí a obsahuje hodnoty X_0, Y_0, Z_0 . Matice R popisují transformaci rotace o úhly A, B, C a jejich indexy určují osu rotace. T_1 je transformační matice druhého posunutí, kterou určují hodnoty X_1, Y_1, Z_1 .

5.2. Návrh testovacího dílce

Pro vizualizaci dráhy nástroje s využitím transformačních cyklů v NC kódu byl vytvořen testovací dílec. Polotovarem testovacího dílce je odlitek, na kterém se obrábí pouze poslední finální vrstva materiálu. Dílec je navržen tak, aby při obrábění byly využity transformační cykly, přičemž se obrábí barevně (zeleně) označené plochy a díry viz Obr. 5.3. Na dílci se zvolil výchozí obrobkový souřadný systém. Soubor s 3D modelem je v elektronických přílohách.



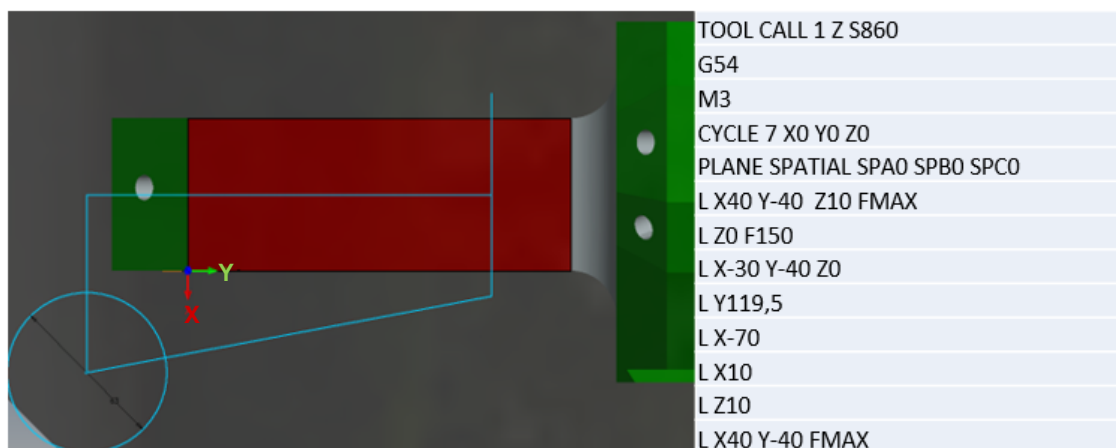
Obr. 5.3 Testovací dílec s upnutím

5.3. Příprava obrábění (NC kódu)

NC kód pro obrábění testovacího dílce se vytvářel pomocí ručního programování. Proto bylo třeba určit způsob, jakým se dílec bude obrábět. Obráběné plochy jsou jednoduché rovinné a osové díry. Z tohoto důvodu byla jako nástroj zvolena čelní fréza s průměrem 63 mm a vrták o průměru 10 mm. Průměr frézy je větší než šířka ploch na dílci, tím pádem se plochy obrobí na jeden přejezd frézy. Dále se definoval souřadný systém pro každou plochu. Tyto souřadné systémy se získaly transformací obrobkového souřadného systému pomocí transformačních cyklů. Každá plocha je tvořena osami X a Y. Osa z pak určuje směr přísuvu nástroje.

Během samotného programování NC kódu se uvažovali pouze informace důležité pro pohyb nástroje, tedy body trajektorie nástroje, a transformační cykly. Pro danou plochu se určila dráha nástroje s naznačením přísuvu a odsuvu nástroje. Z trajektorie se získaly body, které jsou definovány v transformovaném souřadném systému dané plochy. Transformace se realizuje přes cyklus PLANE. Na Obr. 5.4 je znázorněna obráběná plocha (červeně) a vyznačena dráha nástroje (modře), která se bude následně vizualizovat. Dále je promítnut nástroj,

kterým se daná plocha obrábí. Na Obr. 5.4 vpravo je ukázka NC kódu pro zvolenou dráhu nástroje. Stejný postup byl použit i pro ostatní obráběné plochy viz elektronické přílohy.



Obr. 5.4 Obráběná plocha s NC kódem (modře dráha nástroje)

5.4. Provedení transformací do MATLAB

Pro vizualizaci dráhy nástroje při obrábění se nejprve vytvořily vlastní funkce v MATLABu. Vlastní funkce byly vytvořeny na základě znalostí matematického předpisu transformačních cyklů a jejich zadaných hodnot při zápise v NC kódu. Vstupními parametry funkcí jsou zadané hodnoty zapsané ve vektoru a matici bodů. Matice je určena souřadnicemi bodů, které se získaly z předem určené dráhy nástroje při obrábění v souřadném systému plochy. Výstupem funkcí je matice bodů, které určují dráhu nástroje v souřadném systému obrobku.

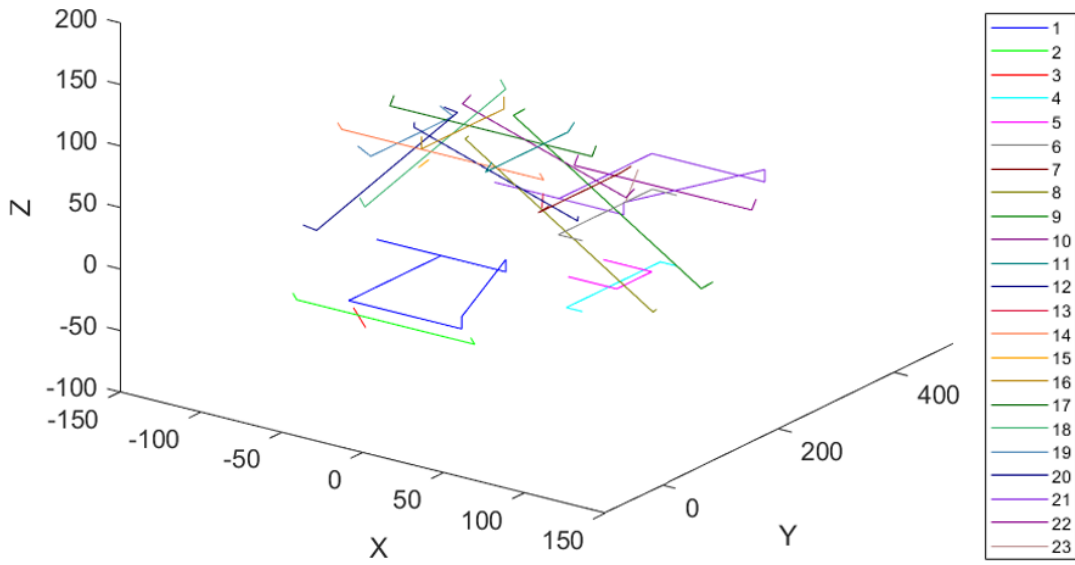
Funkce nejprve určí počet řádků matice bodů nástroje. Následně rozšíří matici bodů o jednotkový sloupec. Jelikož transformační matice mají rozměr 4x4, tak bylo třeba vytvořit vektory o rozměru 4x1, aby se mohly násobit. Takový vektor odpovídá řádku rozšířené matice bodů, který se následně transponuje. Proces se opakuje pro všechny řádky matice. Transformované vektory se zapíší opět do matice, ze které se vyjádří výsledná matice již transformovaných bodů, které se následně budou vizualizovat. V Obr. 5.5 je uvedena funkce v programu MATLAB, která odpovídá cyklu PLANE SPATIAL. Další funkce viz elektronické přílohy.

```
1 function [PLOCHA]= PLANE_SPATIAL(BODY,TRANS)
2 % FUNKCE [PLOCHA]= PLANE_SPATIAL(BODY,TRANS) pro transformaci otočení (více 'help PLANE_SPATIAL')
3 % výstupem je matice bodů po transformaci (matice transformovaných bodů v obrabkovém souřadném systému)
4 %
5 % matice bodů v NC kódu (programování na ploše bez uvažování transformace)
6 % BODY=[ X Y Z % 1. BOD
7 %       X Y Z % 2. BOD
8 %       X Y Z] % ...
9 % matice hodnot určující parametry transformace
10 % TRANS=[SPA SPB SPC] (STUPNĚ DANÝCH ÚHLŮ)
11
12 % převod na úhly %
13 SPA=deg2rad(TRANS(1));
14 SPB=deg2rad(TRANS(2));
15 SPC=deg2rad(TRANS(3));
16
17 % transformační matice %
18 Rx=[ 1 0 0 0
19      0 cos(SPA) -sin(SPA) 0
20      0 sin(SPA) cos(SPA) 0
21      0 0 0 1];
22
23 Ry=[ cos(SPB) 0 sin(SPB) 0
24      0 1 0 0
25      -sin(SPB) 0 cos(SPB) 0
26      0 0 0 1];
27
28 Rz=[ cos(SPC) -sin(SPC) 0 0
29      sin(SPC) cos(SPC) 0 0
30      0 0 1 0
31      0 0 0 1];
32
33 % rozměry matice %
34 [radky,sloupce]=size(BODY);
35
36 % matice bodu rozšířená o jednotkový sloupec
37 V=[BODY ones(radky,1)]; % nuly zeros()
38
39 % transformace bodů
40 for n=1:radky
41     V(n,:)=Rz*Ry*Rx*V(n,:);
42 end
43
44 % vektory souřadnic bodů v jednotlivých osách
45 x_=V(:,1);
46 y_=V(:,2);
47 z_=V(:,3);
48
49 PLOCHA=[x_ y_ z_];
50 end
```

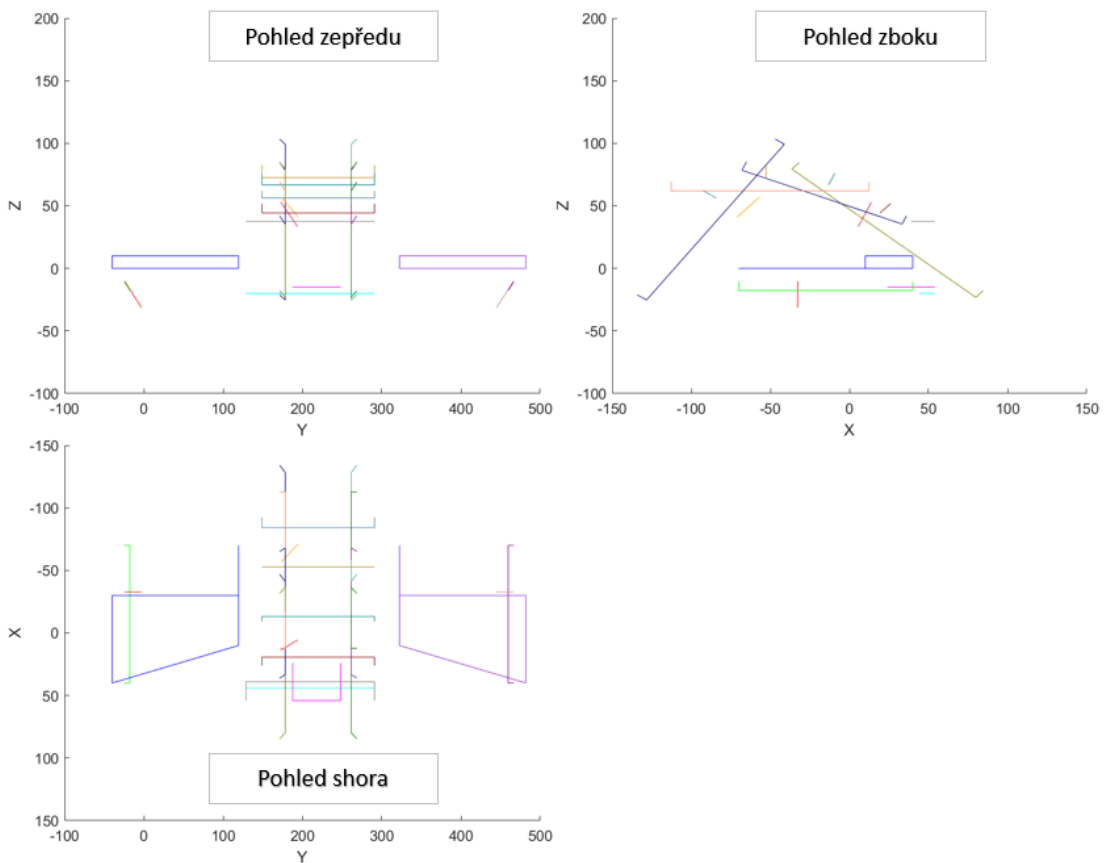
Obr. 5.5 Ukázka funkce PLANE SPATIAL v MATLAB (skript)

5.5. Vizualizace v programu MATLAB

Do skriptu v MATLAB je nutné zapsat informace o dráze nástroje a použité transformaci pro obráběnou plochu. Dráha nástroje je uvedena jako matice bodů. Hodnoty transformace (pro rotaci nebo posunutí) se zapisují do vektorů. Pro změnu souřadnic bodů se využijí definované funkce pro zvolené transformace v NC kódu, které vrátí matici bodů, jež se bude vizualizovat. Ve skriptu se musí nejprve použít funkce pro rotaci a poté pro posunutí. V opačném případě by se dráha nástroje nezobrazila správně. Tento postup se opakuje pro všechny obráběné plochy a ve skriptu se píšou pod sebe, aby se vykreslily všechny dráhy do jednoho obrázku. K vykreslení byla použita funkce v programu MATLAB pro vytvoření 3D grafu. V grafu se zobrazuje střed nástroje, který se pohybuje po obráběné ploše. S grafem je možné libovolně otáčet a mohou se nechat vypsát souřadnice zvoleného bodu. Na Obr. 5.7 je vyobrazena vizualizace dráhy nástroje při obrábění testovacího dílce. Legenda napravo přiřazuje barvu úsečky k příslušné ploše a v Tab. 5.1 je popis provedených transformací při vizualizaci. Na Obr. 5.6 jsou tyto dráhy znázorněny v základních pohledech.



Obr. 5.7 Vizualizace dráhy nástroje při obrábění testovacího dílce (popis viz Tab. 5.1)



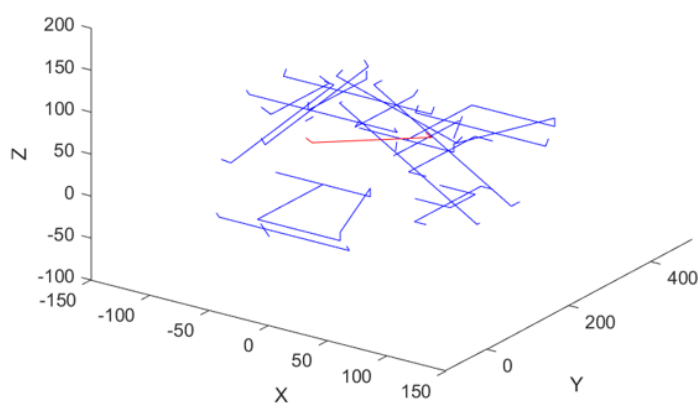
Obr. 5.6 Pohledy dráhy nástroje při obrábění testovacího dílce

Tab. 5.1 Popis transformací vizualizace

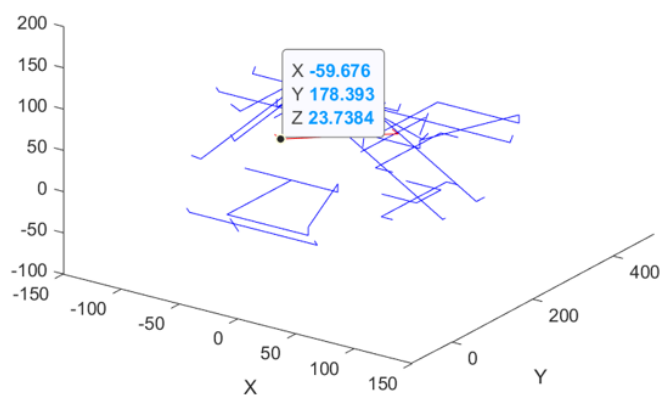
1	Zvolení obrobkového souřadného systému.
2	Rotace okolo osy X (PLANE RELATIVE SPA-45)
3	Vrtání na ploše 2
4	Posunutí počátku (CYCLE 7 X44 Y169 Z-42) Rotace okolo osy Y (PLANE RELATIVE SPB90)
5	Vrtání na ploše 4
6	Transformace stejná s plochou 4
7	Posunutí počátku (CYCLE 7 X0.615 Y189 Z60.853) Rotace okolo osy Y (PLANE RELATIVE SPB41.4)
8	Posunutí počátku (CYCLE 7 X0.615 Y189 Z60.853) Rotace okolo osy Y, X (PLANE SPATIAL SPA45 SPB41.4 SPC0)
9	Posunutí počátku (CYCLE 7 X0.615 Y251 Z60.853) Rotace okolo osy Y, X (PLANE SPATIAL SPA-45 SPB41.4 SPC0)
10	Posunutí počátku (CYCLE 7 X0.615 Y251 Z60.853) Rotace okolo osy Y, X (PLANE SPATIAL SPA-45 SPB23 SPC0)
11	Posunutí počátku (CYCLE 7 X0.615 Y251 Z60.853) Rotace okolo osy Y (PLANE RELATIVE SPB23)
12	Posunutí počátku (CYCLE 7 X0.615 Y189 Z60.853) Rotace okolo os Y, X (PLANE SPATIAL SPA45 SPB23 SPC0)
13	Vrtání na ploše 12
14	Posunutí počátku (CYCLE 7 X-72.763 Y189 Z72.574) Rotace okolo osy X (PLANE RELATIVE SPA45)
15	Vrtání na ploše 14
16	Posunutí počátku (CYCLE 7 X-72.763 Y189 Z72.574)
17	Posunutí počátku (CYCLE 7 X-72.763 Y251 Z72.574) Rotace okolo osy X (PLANE RELATIVE SPA-45)
18	Posunutí počátku (CYCLE 7 X-72.763 Y251 Z72.574) Rotace okolo os Y, X (PLANE SPATIAL SPA-45 SPB-55 SPC0)
19	Posunutí počátku (CYCLE 7 X-72.763 Y251 Z72.574) Rotace okolo osy Y (PLANE SPATIAL SPA SPB-55 SPC0)
20	Posunutí počátku (CYCLE 7 X-72.763 Y189 Z72.574) Rotace okolo osy Y (PLANE SPATIAL SPA45 SPB-55 SPC0)
21	Posunutí počátku (CYCLE 7 X0 Y442 Z0)

22	Posunutí počátku (CYCLE 7 X0 Y442 Z0) Rotace okolo osy X (PLANE RELATIVE SPA-45)
23	Vrtání na ploše 23

Z grafu se dá případně určit chyba, která by nastala během obrábění ještě před samotným obráběním. Chybu lze nalézt vizuálně. Například úsečka se výrazně liší od průběhů ostatních úseček, přestože v modelu nebo ve výkresu není v tomto místě žádná obráběná plocha. Taková chyba je znázorněna na Obr. 5.8 a zvýrazněna červeně. V praxi se chyby tohoto typu vyskytují a ladí se až při obrábění na stroji, což není efektivní a hrozí kolize. Nebo přesněji lze nalézt chybu, kdy se pro zvolený bod v grafu určí jeho souřadnice (Obr. 5.9).



Obr. 5.8 Vizuální kontrola chyby



Obr. 5.9 Zobrazení souřadnic bodu

6. Realizace experimentu

Pro ověření správného pochopení fungování transformačních cyklů a definování jejich předpisu byl proveden experiment na stroji. Zjišťovalo se natočení rotačních os stroje, při definování jedné roviny obrábění několika cykly. Dále se porovnávaly grafy, které byly získány z vizualizace v MATLABu pro stejnou definici obráběcí roviny. Pro ověření se vybíraly cykly v řídicím systému HEIDENHAIN, který se používá na stroji MCU 700 VT 5AX, na němž probíhal experiment.

6.1. MCU 700 VT 5AX - kinematika

Pětiosé obráběcí centrum MCU 700 VT 5AX (Obr. 6.1) má tři translační a dvě rotační osy. Kinematické uspořádání tohoto stroje je **stůl – stůl**. Rotační osy A a C jsou umístěny ve stole, přičemž naklápěcí osa A nese rotační osu C. Všechny translační osy jsou umístěny na straně nástroje. Osa Z je osou nástroje a nese ji osa X. Obě tyto osy jsou nesené osou Y. [25]



Obr. 6.1 MCU 700 VT 5AX (pro experiment)

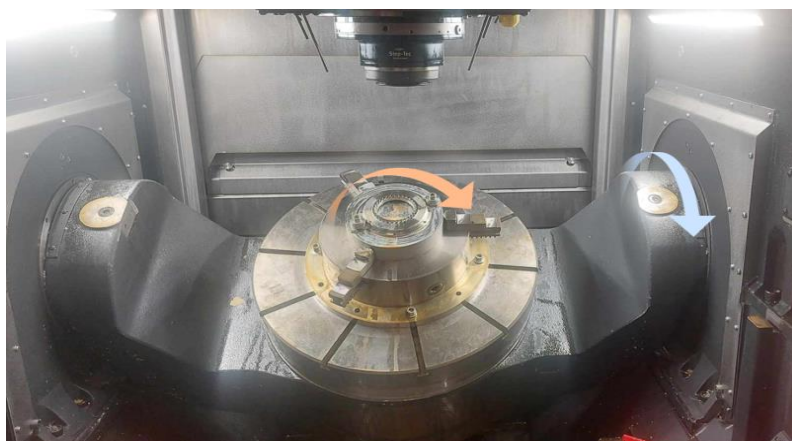
6.2. Test na stroji a vizualizace v MATLAB

Při testování se zvolila rovina obrábění definovaná úhly natočení souřadného systému A, B, C, které odpovídají hodnotám cyklu 19. Pro tuto rovinu se následně určily parametry pro vybrané transformační cykly (Tab. 6.1). Dané parametry se zjistily graficky pomocí modelu v CAM.

Tab. 6.1 Hodnoty parametrů transformačních cyklů pro experiment

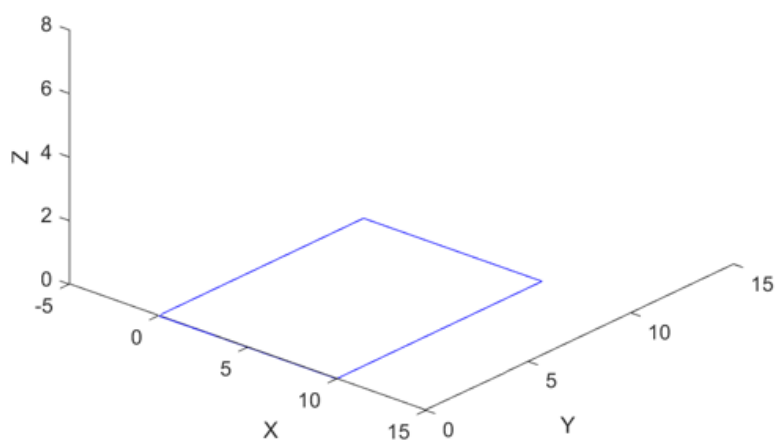
Trans. cyklus	Parametry pro definování roviny								
Cyklus 19	A			B			C		
	10			-30			40		
PLANE SPATIAL	SPA			SPB			SPC		
	10			-30			40		
PLANE PROJECTED	PROPR			PROMIN			PROROT		
	-17,3			27,79			38,55		
PLANE EULER	EULPR			EULNU			EULROT		
	-30,57			31,47			73,26		
PLANE POINTS	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
	0	0	0	13,27	11,13	10	-0,72	25,11	13,01

Během samotného testování na stroji se do NC kódu zapsaly vybrané cykly a provedla se první transformace. Na Obr. 6.2 je zobrazena konečná poloha rotačních os po transformaci s vyznačenými směry pohybu rotace. Po dokončení transformace (ustálení stroje) se přepnul transformační cyklus a pozorovala se případná změna natočení os. Takto se postupovalo postupně pro všechny určené cykly. Při přepínání cyklů se pozorovalo, že se poloha rotačních os neměnila.

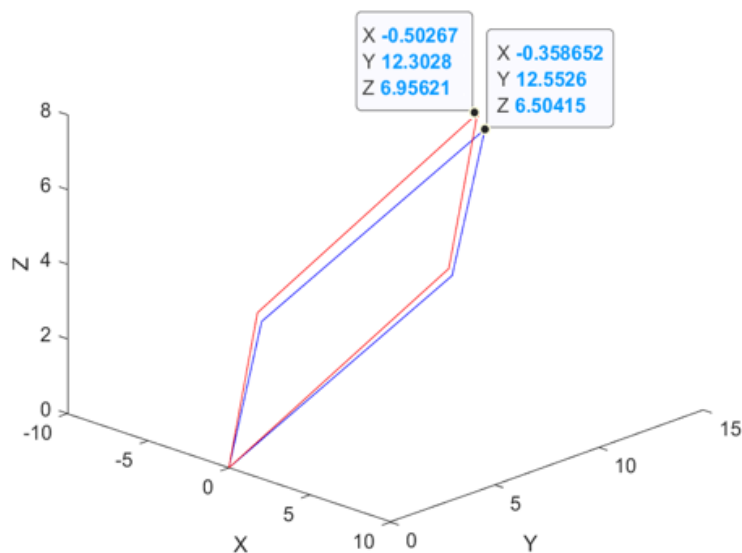


Obr. 6.2 Směry otáčení rotačních os při transformaci

Výsledky z provedení transformací na stroji se porovnaly s grafickým znázorněním provedeným v programu MATLAB za použití vlastních funkcí pro transformační cykly. Nejprve se určí testovací dráha nástroje, která se bude transformovat (Obr. 6.3). Následně se tato dráha transformovala cykly, které byly použity při testu na stroji (Tab. 6.1). Na Obr. 6.4 je již dráha nástroje transformována s vyobrazenými souřadnicemi bodů, které jsou nejvíce vzdáleny od středu transformace. Červeně zvýrazněná dráha je vizualizována funkcí PLANE PROJECTED. Viditelná odchylka je způsobena nepřesností odečtu úhlů, kdy jejich desetinný rozvoj byl příliš dlouhý, a proto se zaokrouhlily na dvě desetinná místa.



Obr. 6.3 Dráha nástroje před transformací (experiment)



Obr. 6.4 Dráha nástroje po transformaci (experiment)

6.3. Vyhodnocení

Porovnáním výsledků zaznamenaných na stroji a výsledků z programu MATLAB lze konstatovat, že byly splněny předpoklady. Konkrétně, že definované cykly, které se ověřovaly na stroji, skutečně popisují jednu rovinu obrábění. Popis cyklů a z nich vytvořené funkce v MATLAB správně definují transformaci. Na Obr. 6.4 se dráhy nástroje překrývají (modrá) kromě dráhy využívající funkci PLANE PROJECTED. Znatelný odklon roviny je způsoben zaokrouhlením úhlů pro transformaci. Tento odklon na stroji nebyl viditelný, jelikož odchylka souřadnic bodů byla v řádu desetin milimetru na deseti milimetrech. Je lepší používat cykly, jejichž parametry jsou jednoznačně známy.

7. Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na tvorbu transformačních modelů v programu MATLAB a vizualizaci dráhy nástroje při použití transformačních funkcí (cyklů) v NC programu.

Nejprve byl proveden rozbor kinematiky obráběcích center a NC kódu. Dále byly vyhledány a popsány cykly, které transformují souřadný systém při obrábění. V řídicích systémech Siemens a Heidenhain byly nalezeny ekvivalentní transformační cykly, které provádějí základní operace transformace (posunutí, rotace, změna měřítka, zrcadlení). Další cykly jsou složitějšími funkcemi transformace obou řídicích systémů.

Pro vytvoření transformačních modelů (funkcí) v programu MATLAB se určily matematické předpisy cyklů, které popisují transformaci v podobě transformačních matic. S využitím těchto funkcí se vizualizovala dráha nástroje v obrobkovém souřadném systému. K vytvoření vizualizace byl navržen testovací dílec a k jeho obrábění byly použity transformační cykly.

Pro transformační modely v programu MATLAB byl proveden experiment k ověření jejich správnosti. Při experimentu se určila rovina obrábění pomocí několika transformačních cyklů. Po spuštění transformace a následné změně cyklu nebyla vyhodnocena změna natočení stolu nebo kolébky. Opakovaná zkouška potvrdila, že dané cykly skutečně definují stejnou rovinu obrábění. Následně byla vizualizována zkušební dráha nástroje s použitím stejných transformačních cyklů. Vyhodnocením experimentu se zjistilo, že transformace dráhy nástroje v programu MATLAB pomocí vytvořených transformačních modelů odpovídá transformaci při využití transformačních cyklů na stroji. Z experimentu také vyplývá, že je vhodné používat cykly, u kterých jsou hodnoty transformace známé. Jelikož přepočítávání hodnot je složité a je k němu potřeba program pro grafické řešení.

Seznamy

Seznam použité literatury

- [1] M. Jiří, Konstrukce CNC obráběcích strojů, verze DMG MORI, Praha: MM publishing, s. r. o, 2019. ISBN 978-80-907452-0-9.
- [2] SP 280. [online]. Kovošvit MAS. Dostupné z: <http://www.masmachinetools.cz/sp-280>. [cit. 2024-01-16].
- [3] The Essential Guide To 5-Axis CNC Machining. [online]. HWACHEON. 2019.. Dostupné z: <https://hwacheonasia.com/id/the-essential-guide-to-5-axis-cnc-machining/>. [cit. 2024-01-16].
- [4] Shane. 5 Axis Machining: Your Ultimate Guide. [online]. MACHINEMFG. 2023. Dostupné z: <https://www.machinemfg.com/5-axis-machining/>. [cit. 2024-01-16].
- [5] Milling with SINUMERIK: 5-axis machining, manual. [online]. Siemens. 05/2009. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/454/37335454/att_110322/v1/SIN_WF5_0509_en.pdf. [cit. 2024-06-30].
- [6] VF 3016. [online] TRIMILL. Dostupné z: <https://www.trimill.cz/produkty-ihned-k-dodani/vf-3016/>. [cit. 2024-01-16].
- [7] 5 osé obráběcí centrum AVIA X-5 1300/630. [online]. PILART. Dostupné z: <https://www.pilart.cz/produkt/5-ose-obrabecci-centrum-AVIA-X-5-1300-630-1182/>. [cit. 2024-01-16].
- [8] MCU 700VT-5X. [online]. KOVOSVIT MAS.. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcu-700vt-5x/>. [cit. 2024-01-16].
- [9] Výzkum pro praxi: Vřetenové hlavy pro frézovací a vyvrtávací stroje. MM Průmyslové spektrum. [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyzkum-pro-praxi-vretenove-hlavy-pro-frezovaci-a-vyvrtavaci-stroje>. [cit. 2024-01-16].
- [10] CIMPOVÁ, Martina. Simulační modely pro výpočtovou podporu návrhu vřetenových hlav. Praha, 2022. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní..
- [11] Frézovací hlavy. [online]. TOS VARNSDORF. Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/cs/frezovaci-hlavy>. [cit. 2024-01-16].

- [12] Zlaté české ruce pro obráběcí stroje. MM Průmyslové spektrum. [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zlate-ceske-ruce-pro-obrabeci-stroje>. [cit. 2024-01-16]..
- [13] SULITKA, Matěj. Otočný CNC stůl s karuselovací funkcí. MM Průmyslové spektrum. [online]. 2012. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/otocny-cnc-stul-s-karuselovaci-funkci>. [cit. 2024-01-16]..
- [14] Přídavné otočné stoly. [online]. TOS VARNSDORF. Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/cs/pridavne-otocne-stoly>. [cit. 2024-01-16]..
- [15] TR301. [online]. Haas. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/rotaries-indexers/5-axis-rotaries/models/tr310.html>. [cit. 2024-01-16].
- [16] HUDEC, Roman a ONDŘÍŠEK, Zdeněk. [online]. In: Jak naprogramovat N-céčko: Základy programování (programová skladba... písmena, slova, věty). ISBN 978-80-88058-62-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/182/05.html>.. [cit. 2024-07-08]..
- [17] K čemu slouží G kódy a M kódy? [online]. MACMATIC. 2016. Dostupné z: <https://www.macmatic.cz/component/content/article/40-technicke-clanky/66-k-cemu-slouzi-g-kody-a-m-kody>. [cit. 2024-01-17]. .
- [18] CNC programování prakticky Parametrické programování a skoky v NC programech. Technický Týdeník. [online]. 2006. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/cnc-programovani-prakticky-parametricke-programovani-a-skoky-v-nc-programech_11589..
- [19] TOMÁŠ, Bařka. Jak získat G-kód pro CNC obrábění. [online]. Postav CNC. Dostupné z: <https://postavcnc.cz/jak-ziskat-g-kodu-pro-cnc-obrabeni/>. [cit. 2024-01-17]. .
- [20] SIEMENS SINUMERIK 840D sl / 828D, Základy: Programovací příručka. [online]. SIEMENS. 03/2010. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/635/28705635/att_75725/v1/P_G_0310_cs_cs-CZ.pdf. [cit. 2024-01-17]..
- [21] HEIDENHAIN TNC 640: Příručka uživatele programování cyklů. [online]. HEIDENHAIN. 10/2015. Dostupné z: https://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/TNC640/34059x-06/zyklen/892905-C3.pdf. [cit. 2024-01-17]. .
- [22] HEIDENHAIN TNC 640: Uživatelská příručka programování s popisným dialogem HEIDENHAIN. [online]. HEIDENHAIN. 04/2014. Dostupné z:

https://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/TNC640/34059x-04/bhb/892903-C1.pdf. [cit. 2024-01-17]. .

- [23] SIEMENS SINUMERIK 840D sl / 828D, Pro pokročilé: Programovací příručka. [online]. SIEMENS. 08/2018. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/802/109760802/att_962427/v1/840Dsl_828D_job_planning_progr_man_0818_cs-CZ.pdf. [cit. 2024-01-17]. .
- [24] STEJSKAL, Vladimír, VALÁŠEK, Michael. Kinematics and dynamics of machinery. 1. vydání. New York: MARCEL DEKKER, 1996. ISBN 0-8247-9731-0.
- [25] PRAŽÁK, Marcel. Vizualizace interpolovaných drah nástroje při pětiosém frézování. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní..

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Kinematika CNC soustružnického centra [2]	14
Obr. 2.2 Kinematika CNC frézovacího centra [3]	15
Obr. 2.3 Kinematika hlava – hlava [5]	16
Obr. 2.4 TRIMILL VF 3016 [6].....	16
Obr. 2.5 AVIA X-5 1300/630 [7].....	17
Obr. 2.6 Kinematika hlava – stůl [5]	17
Obr. 2.7 Kinematika stůl – stůl [5]	17
Obr. 2.8 MCU 700 VT-5X [8].....	17
Obr. 2.9 Univerzální frézovací hlava HUIL 50 [11]	19
Obr. 2.10 Ortogonální frézovací hlava HOIL 50 [11]	19
Obr. 2.11 Vidlicová frézovací hlava VKE [12].....	19
Obr. 2.12 Otočný stůl s kolébkou [15]	20
Obr. 3.1 Struktura programu [16]	21
Obr. 4.1 Posunutí souřadného systému	27
Obr. 4.2 Rotace souřadného systému.....	28
Obr. 4.3 Otočení souřadného systému	29
Obr. 4.4 Zrcadlení souřadného systému	30
Obr. 4.5 Změna měřítka souřadného systému	31
Obr. 4.6 Natočení PLANE SPATIAL	32
Obr. 4.7 Natočení PLANE PROJECTED	33
Obr. 4.8 Natočení PLANE EULER	34
Obr. 4.9 Natočení PLANE VECTOR	34
Obr. 4.10 Natočení PLANE POINTS.....	35
Obr. 4.11 Natočení PLANE RELATIV	36
Obr. 4.12 Natočení PLANE AXIAL	36
Obr. 4.13 Směr "minus" a "plus" [23]	38
Obr. 5.1 Přepočet úhlu PROMIN	42
Obr. 5.2 PLANE POINTS vektory.....	46
Obr. 5.3 Testovací dílec s upnutím	50
Obr. 5.4 Obráběná plocha s NC kódem (modře dráha nástroje).....	51
Obr. 5.5 Ukázka funkce PLANE SPATIAL v MATLAB (skript)	52

Obr. 5.6 Pohledy dráhy nástroje při obrábění testovacího dílce	53
Obr. 5.7 Vizualizace dráhy nástroje při obrábění testovacího dílce (popis viz Tab. 5.1)	53
Obr. 5.8 Vizualizace chyby	55
Obr. 5.9 Zobrazení souřadnic bodu.....	55
Obr. 6.1 MCU 700 VT 5AX (pro experiment).....	56
Obr. 6.2 Směry otáčení rotačních os při transformaci	58
Obr. 6.3 Dráha nástroje před transformací (experiment).....	58
Obr. 6.4 Dráha nástroje po transformaci (experiment)	59

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Vybrané G funkce [17]	22
Tab. 3.2 Vybrané M funkce [17]	23
Tab. 5.1 Popis transformací vizualizace	54
Tab. 6.1 Hodnoty parametrů transformačních cyklů pro experiment.....	57

Seznam použitých softwarů

Autodesk Inventor Professional 2023

Excel 2016

MATLAB R2023b

Seznam elektronických příloh

3D_model.stp

MATLAB soubory.rar

NC kód pro obrábění dílce.xlsx