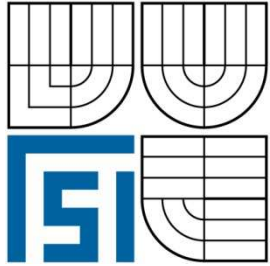


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PĚTIOSÉ FRÉZOVÁNÍ S POLYNOMIÁLNÍ TRAJEKTORIÍ

SPLINE TRAJECTORY IN 5-AXIS MILLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETRA OHNIŠŤOVÁ

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petra Ohnišř'ová

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Pětiosé frézování s polynomialní trajektorií

v anglickém jazyce:

Spline trajectory in 5-axis milling

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza pětiosé frézování s polynomialní trajektorií, základní matematický popis, generování CNC programu, verifikace.

Cíle bakalářské práce:

Úvod

Teoretický rozbor problému

Základní algoritmus generování CNC programu

Verifikace CNC technologie na vybrané součásti

Vyhodnocení výsledků

Závěr

Seznam odborné literatury:

Méry, B. Machines a commande numérique, de l'étude des structures a la maîtrise du langage. ERREUR PERIMES Hermes Science Publications, 1997, pp. 448, EAN 978-2866016074

Tournier Ch., Castagnetti C., Lavernhe S., Avellan F. Tool path generation and post-processor issues in five-axis high speed machining of hydro turbine blades. In:Fifth International Conference on High Speed Machining, Metz. France (2006), Metz -14/15 et 16 Mars 2006, pp. 1-6

Eyup Bagci. Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies. Advances in Engineering Software 40 (2009), pp. 407–418

Motavalli S. Review of Reverse Engineering Approaches. Computers ind. Engng Vol. 35, Nos 1-2, pp. 25-28, 1998.

Tournier Ch. Usinage des aubes de roues de machines hydrauliques. MEMOIRE DE RECHERCHE – Par Cédric CASTAGNETTI. Présenté à l'Université Pierre et Marie Curie, le 23 juin 2005. pp. 36

Sencer B. Five axis trajectory generation methods. Thesis. The University of British Columbia. 2005, pp. 145.

Langeron, J. M. et al.: In A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves. Computer-Aided Desing, Vol. 36, Issue 12, 2004, p. 1219-1229.

Vavruška, P. Machine tool control systems and interpolations of spline type. Engineering MECHANICS, Vol. 19, 2012, No. 4, p. 219–229.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 21.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Cílem práce je uvedení do problematiky pětiosého frézování s polynomiálními trajektorií. Součástí práce je popis numerického řetězce, definice různých metod generace trajektorie nástroje, základní matematický popis obráběného povrchu a generování CNC programu pro pětiosé obráběcí centrum s řídicím systémem Heidenhain.

Klíčová slova

Pětiosé frézování, polynomiální trajektorie, numerický řetězec, Heidenhain, CNC program

ABSTRACT

The aim of this work is an introduction to the five-axis milling with polynomial trajectories. Part of this thesis is a description of the entire process of the forward engineering, a definition of different methods of trajectory generation, a basic mathematical description of the machined surface and generating a CNC program for five-axis machining centre with the Heidenhain control system.

Key words

Five axis milling, polynomial trajectories, forward engineering, Heidenhain, CNC program

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OHNIŠŤOVÁ, Petra. *Pětiosé frézování s polynomiálními trajektorií: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 50 s., bez příloh., vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Pětiosé frézování s polynomiální trajektorií vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 25. 5. 2014

.....
Petra Ohnišťová

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce, dále pak Ing. Davidu Pratovi a panu Jiřímu Čechovi za jejich čas a spolupráci při experimentech.

OBSAH

ABSTRAKT.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
ÚVOD.....	7
1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU.....	8
1.1 CNC frézovací centra.....	8
1.1.1 Základní princip.....	8
1.1.2 Třiosé frézovací centrum.....	8
1.1.3 Pětiosé obráběcí centrum.....	9
1.1.4 Efektivita pětiosého frézování.....	10
1.1.5 Výhody a nevýhody pětiosého frézování.....	11
1.1.6 Kontinuální a poziční frézování.....	11
1.2 Numerický řetězec.....	12
1.2.1 Vytvoření modelu (CAD systémy).....	12
1.2.2 CAM systém.....	12
1.2.3 Postprocessor.....	14
2 ZÁKLADNÍ ALGORITMUS GENEROVÁNÍ CNC PROGRAMU.....	16
2.1 Generace trajektorie nástroje.....	16
2.1.1 Předběžné zpracování 5-ti osé dráhy nástroje.....	17
2.1.2 Profilování trajektorie pohybu.....	17
2.1.3 Kinematika 5-ti osého obráběcího stroje.....	18
2.2 Druhy interpolací trajektorie nástroje.....	20
2.2.1 Lineární interpolace.....	20
2.2.2 Spline interpolace.....	20
2.2.3 Polynomiální interpolace.....	24
3 VERIFIKACE CNC TECHNOLOGIE NA VYBRANÉ SOUČÁSTI.....	26
3.1 2D: Lineární trajektorie a spline interpolace.....	26
3.2 2D Polynomiální trajektorie nástroje.....	31
3.3 Polynomiální interpolace v 5-ti osách.....	35
3.3.1 Polynomiální interpolace s pevně definovanými úhly sklonu nástroje vůči normále k povrchu.....	38
3.3.2 Polynomiální interpolace při kontinuálním obrábění.....	41
4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	43
4.1 2D: Lineární trajektorie a spline interpolace.....	43
4.2 2D Polynomiální trajektorie nástroje.....	43
4.3 Polynomiální interpolace v 5-ti osách.....	44
ZÁVĚR.....	45
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	46
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	48
SEZNAM PŘÍLOH.....	50

ÚVOD

Frézování tvarově složitých ploch začalo být v posledních letech velmi diskutovanou problematikou téměř ve všech odvětvích strojího průmyslu. Frézování musí být přesné, rychlé a pokud možno s co nejmenší spotřebou energie a opotřebením stroje i nástrojů. Proto je dnešním trendem 5-ti osé obrábění, které umožňuje výrazně zredukovat jak čas nastavování stroje, tak samotný čas obrábění a hlavně díky 5-ti osám je možné s nástrojem dosáhnout téměř jakékoliv požadované pozice během jedné operace a to při jediném upnutí obrobku.

Stroje musí být schopny zajistit větší šířku záběru ostří, což vede k nutnosti zvýšení hmotnosti dílů obráběcích strojů, které však musí být polohovány s vysokým zrychlením a velkou rychlostí posuvu, což je poněkud obtížné. S lehčími konstrukcemi je naopak dosaženo markantnějšího zrychlení a větší rychlosti posuvu, ale mohou být očekávány výskyty počátečních vibrací a trvajících chvění při obrábění kontur, což nepříznivě ovlivňuje kvalitu obráběného povrchu a zároveň zapříčiňuje větší opotřebením nástroje [2].

Aby všechny tyto nechtěné okolnosti byly co nejvíce limitovány, je třeba pečlivě zvážit výběr trajektorie nástroje. Existuje mnoho rozdílných typů trajektorie nástroje, ale mezi nezákladnější patří lineární, kruhová a spline trajektorie nástroje. Softwary však skrývají ještě více možností definice dráhy nástroje, mezi něž patří například polynomiální trajektorie.

1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU

1.1 CNC frézovací centra

1.1.1 Základní princip

Číslicově řízené obráběcí stroje neboli CNC stroje (Computer Numerical Control) jsou řízeny automaticky pomocí zadávání povelů z řídicího počítače podle nahraného programu. Díky tomu je možné limitovat zásahy operátora do obráběcího procesu a také zredukovat nároky na zkušenosti operátora. Druhým benefitem je samozřejmě přesnost a reprodukovatelnost obrábění [1].

Nezákladnější funkcí celého CNC stroje je automatické, přesné a konzistentní řízení pohybu. Pohyb je umožněn ve dvou, či více směrech, které nazýváme osy.

Každé CNC frézovací centrum má zásobník nástrojů. Výměna nástrojů se uskutečňuje automaticky a také velmi rychle.

1.1.2 Třiosé frézovací centrum

Pro řízení CNC strojů je nejčastěji využíván pravouhlý tříosý souřadnicový systém s osami X, Y, Z, díky kterým se řídí pohyb nástroje vůči obrobku [1].

Dále je třeba definovat základní vztažné body:

M – nulový bod stroje je definován výrobcem a jedná se o počátek souřadného systému stroje [3].

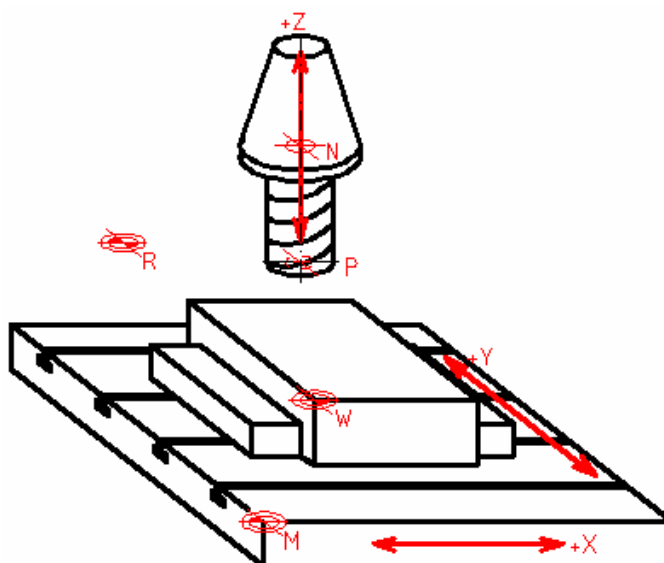
R – referenční bod je také stanoven výrobcem a slouží k nalezení nulového bodu stroje. Umožňuje také přesné určení polohy nástroje v souřadném systému [3].

W – nulový bod obrobku je volen programátorem a jeho poloha je vztahována k nulovému bodu stroje. Váží se na něj všechny programované souřadnice drah programu [3].

P – nulový bod nástroje je stanoven programátorem. U frézy leží na čele v ose nástroje [3].

C – výchozí bod programu je stanoven programátorem a leží mimo obrobek [3].

A – dorazový bod je stanoven programátorem [3].



Obr. 1.1 Vztažné body na trojosé frézce [3].

1.1.3 Pětiosé obráběcí centrum

Pětiosé obrábění je většinou plně využíváno při výrobě nástrojů a forem. Umožňuje trojrozměrnou kompenzaci poloměru řezného nástroje a kompenzaci délky nástroje ve směru osy nástroje, která zohledňuje trasu středu nástroje (Tool Center Point Control, tzn. řízení středového bodu nástroje). To znamená, že pohyb středu nástroje je ovládán tak, že sleduje určené rovné linie, i když se směr osy nástroje mění prostřednictvím dvou rotačních os. Při obrábění se používají 3 lineární osy – X, Y, Z (jako u běžného 3D obrábění) a navíc 2 rotační osy – A, B, C (vždy dvě z nich) [4].



Obr. 1.2 Translační osy X, Y, Z a rotační osy A, B, C [4].

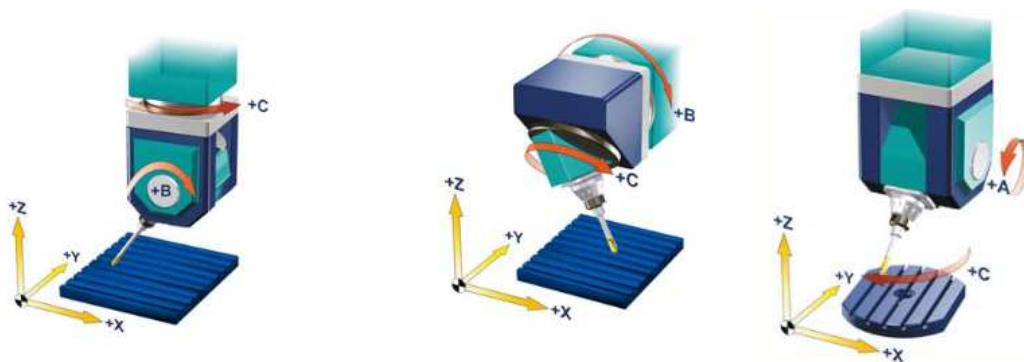
Pětiosá obráběcí centra jsou založena na různých kinematických principech. Mezi nejběžnější patří tyto typy:

- Obě rotační osy ve stole:



Obr. 1.3 Kinematický princip obráběcího centra - rotační osy ve stole [4].

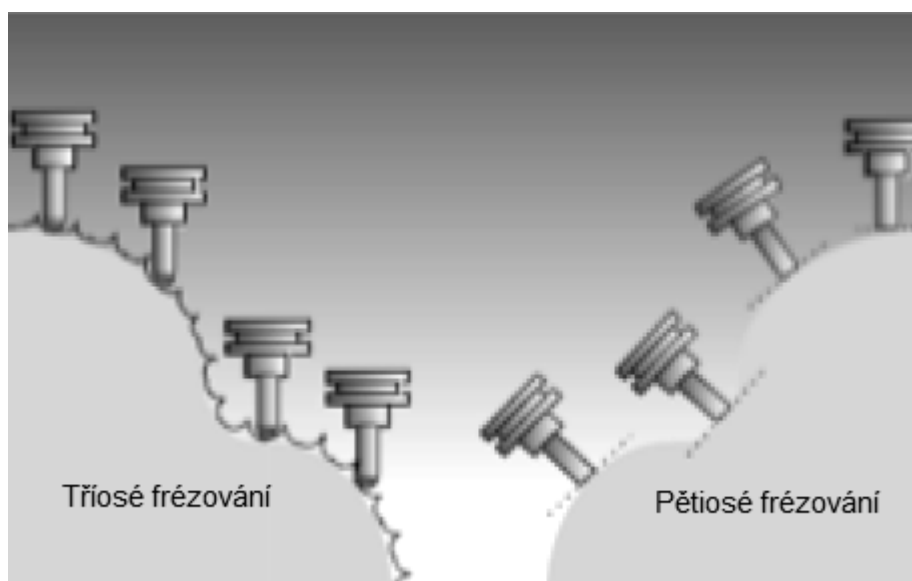
- Obě rotační osy v hlavě:



Obr. 1.4 Kinematický princip obráběcího stroje - rotační osy v hlavě [4].

1.1.4 Efektivita pětiosého frézování

Mezi hlavní výhody pětiosého obrábění patří možnost souvisle naklápět nástroj během obrábění, což vede k lepší dostupnosti k obráběnému povrchu. Kontaktní bod mezi nástrojem a obrokem se přemísťuje z čela nástroje na bok nástroje a to má za následek zlepšení kvality obráběného povrchu a zvýšení životnosti nástroje. Naklápění nástroje umožňuje použití kratších nástrojů, které dovolují efektivnější volbu řezných podmínek a limitují vibrace během obrábění. Všechny výše zmíněné jevy se pozitivně projeví na kvalitě obrobené plochy [4].



Obr. 1.5 Pozice nástroje u třiosého a pětiosého frézování - podle [4].

1.1.5 Výhody a nevýhody pětiosého frézování

Mezi hlavní výhody pětiosého frézování patří kratší vyložení či použití kratších nástrojů, což zabezpečuje přesnější a kvalitnější obrobený povrch. Další výhodou je možnost obrobení úkosů, zkrácení výrobních časů a zredukování počtu průjezdů [22].

Nevýhodou tohoto typu obrábění je ekonomická a personální stránka. Je zapotřebí poměrně vysokých investičních a servisních výdajů. Pětiosé obrábění dále vyžaduje kvalifikovaný personál na pozici programátorů (tvorba NC programů) a seřizovačů.

1.1.6 Kontinuální a poziční frézování

Dále je frézování rozděleno na kontinuální a poziční, podle počtu os pracujících současně [4].

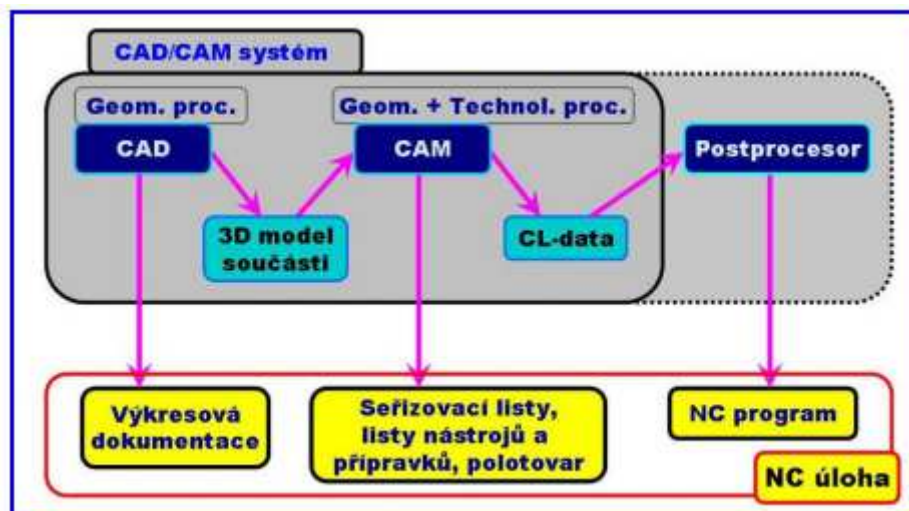
Při kontinuálním frézování pracují všechny osy, jak translační, tak i rotační současně, zatímco u pozičního frézování jsou rotační osy využívány pouze k polohování obrobku do požadované pozice. Následné obrábění probíhá pouze ve 3 translačních osách.

Během celého procesu obrábění může, dle potřeby, docházet ke střídání pozičního a kontinuálního obrábění.

1.2 Numerický řetězec

Klasický numerický řetězec popisuje celý proces výroby požadované součástky. Umožňuje tedy přejít z modelu vytvořeného v CAD systémech, jako jsou například CATIA, AUTOCAD, SOLID WORKS, až k finálnímu produktu [5, 6].

Celý numerický řetězec výroby je zjednodušeně reprezentován následovně:



Obr. 1.6 Schéma postupu automatizované přípravy výroby [6].

1.2.1 Vytvoření modelu (CAD systémy)

Díky modelování v CAD systémech získáváme jak profily 2D, tak i plochy a objemová tělesa, která dávají přesný obraz požadovaného výrobku [7].

Nejčastěji používané formáty jsou DXF pro 2D profily a formáty STL, IGES a STEP pro 3D profily. Tyto 3 poslední zmíněné formáty, jsou takzvané „neutrální“ formáty, které umožňují snadnější převod mezi CAD systémy [7].

1.2.2 CAM systém

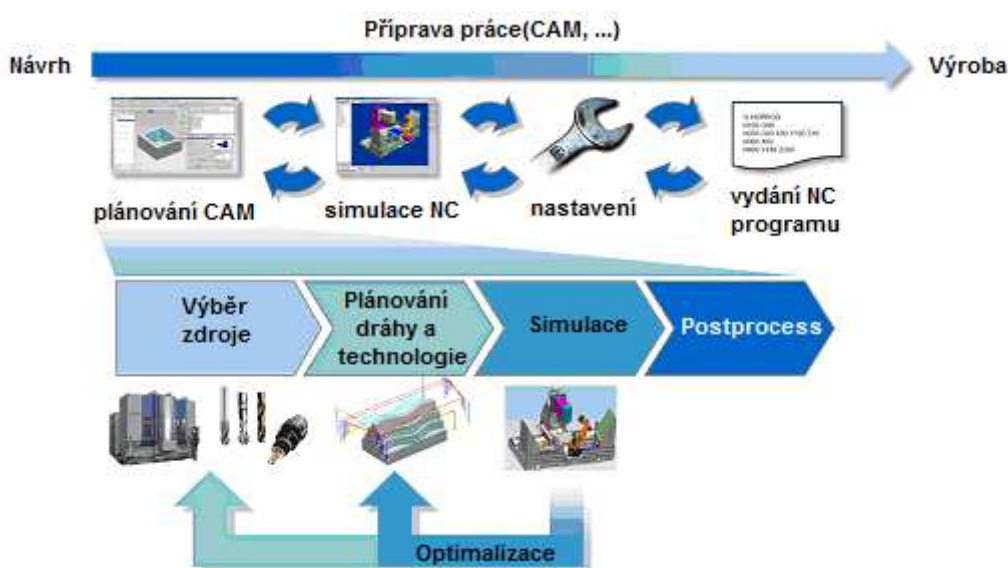
CAM systém je nástroj pro programování obráběcích strojů. Umožňuje získat numerickou podobu požadovaného výrobku, aby bylo následně možné vytvořit a adaptovat trajektorie nástroje. Typ trajektorie nástroje je čistě na uživateli a k dosažení požadovaného výsledku je nutné jej pečlivě vybrat [7].

Tato fáze automatizované přípravy výroby může být dále rozdělena do více parciálních kroků, přes plánování trajektorie a technologie až po vnitřní CAM simulaci. Pokud vnitřní simulace pomocí CAM systému není dostačující, používá se také CNC simulace, která je schopna poskytnout vyšší úroveň detailů. Díky těmto simulacím je poté dosaženo nejlepší optimalizace procesu [8].

Každý CAM systém má svou vlastní strategii obrábění. Některé systémy jsou více automatizované, jiné naopak vyžadují více uživatelských zásahů [7]. Tudíž během celého procesu plánování výroby může systém vyžadovat hned několik uživatelských vstupů. Mnoho již existujících postupů je založeno na inteligentních výpočetních metodách a optimalizačních technikách, jako je například fuzzy logika nebo genetický algoritmus [8].

Při prvotním plánování mohou být výrobní postupy vybírány poloautomaticky, či za některých podmínek i plně automaticky. Například systém založený na znalostech, které pomáhají při výběru vhodného řezného nástroje pro frézování. Pro tento systém je použit interferenční algoritmus pracující na souboru daných pravidel pro filtrování databáze fréz. Kritéria výběru pak mohou být založeny na geometrických charakteristikách nebo naopak na ekonomických a organizačních kritériích, jako je dostupnost nástroje, maximální úběr materiálu či náklady s ním spojené [8].

Ze systému CAM jsou tedy následně generovány soubory obsahující informace o trajektorii nástroje a další pomocné funkce, jako je například informace o výměně nástroje. Takto vzniklé soubory jsou nazývány CL data [3, 8].



Obr. 1.7 Různé fáze konvenčního CAM plánování – podle [8].

1.2.3 Postprocessor

Postprocessor je nástroj, který převádí naprogramované pohyby do jazyka interpretovatelného obráběcím strojem tak, aby byl schopen vykonávat požadované příkazy. Postprocessor může, ale nutně nemusí být součástí systému CAM [6]. Každý stroj může být řízen jiným systémem, proto je třeba při implementaci CAM softwaru pečlivě upravit i postprocessor [21].

Zjednodušeně řečeno, postprocessor převádí CL data vytvořená CAM systémy na takzvaná NC data interpretovatelná obráběcím strojem [3].

Nejběžnějším programovatelným jazykem je takzvaný jazyk ISO. Jazyk ISO je založen na 2 typech funkcí, přípravné funkce „G“ a pomocné funkce „M“ [3,7]. Níže jsou uvedeny základní příklady funkcí pro Sinumerik 810D [9]. Pro ostatní systémy se mohou tyto funkce nepatrně lišit.

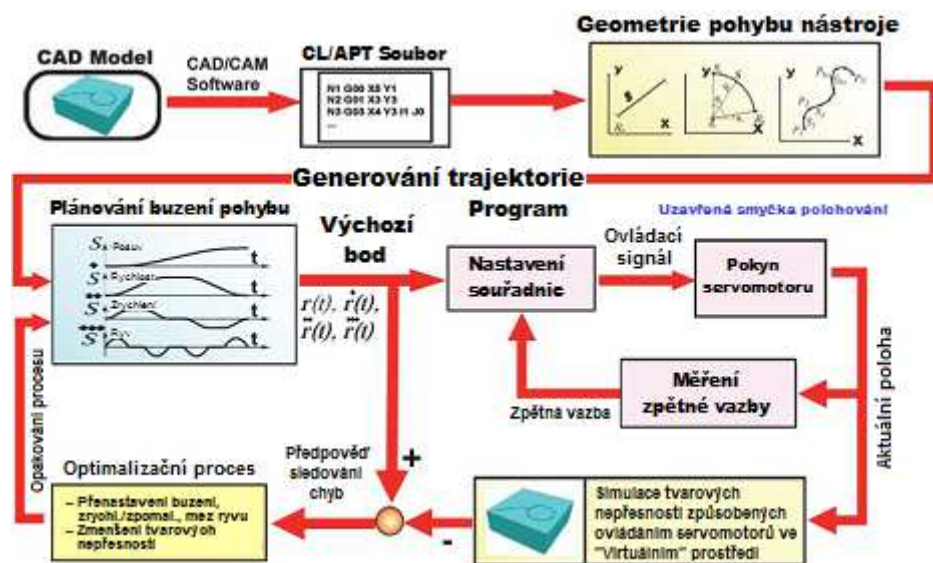
Přípravné funkce:

- G0 - lineární interpolace rychloposuvem.
- G1 - lineární interpolace pracovním posuvem.
- G2 - kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček.
- G3 - kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček.
- G4 - časově předurčená prodleva.
- G18 - volba pracovní roviny Z/X.
- G25 - dolní omezení pracovního pole.
- G26 - horní omezení pracovního pole.
- G33 - řezání závitů s konstantním stoupáním.
- G54 - 1. nastavitelné posunutí nulového bodu.
- G55 - 2. nastavitelné posunutí nulového bodu.
- G56 - 3. nastavitelné posunutí nulového bodu.
- G57 - 4. nastavitelné posunutí nulového bodu.
- G70 - zadávání dráhy v palcích.
- G71 - zadávání dráhy v mm.
- G74 - nájezd do referenčního bodu.
- G90 - absolutní programování.
- G91 - inkrementální programování.
- G94 - posuv F [min.].
- G95 - posuv F [mm].
- G96 - zapnutí konstantní řezné rychlosti.
- G97 - vypnutí konstantní řezné rychlosti (konstantní velikost otáček).

Pomocné funkce:

- M0 - programovatelný stop programu.
- M1 - volitelný stop.
- M2 - konec hlavního programu.
- M3 - start vřetena ve směru hodinových ručiček (CW).
- M4 - start vřetena proti směru hodinových ručiček (CCW).
- M5 - zastavení vřetena.
- M6 - výměna nástroje (standardní nastavení při ruční výměně)
- M8 - zapnutí chlazení.
- M9 - vypnutí chlazení.
- M17 - konec podprogramu.
- M30 - konec programu s návratem na začátek programu.
- M41 - převodový stupeň 1 (nižší řada otáček).
- M42 - převodový stupeň 2 (vyšší řada otáček).

Tok informací u typického CNC systému je uveden na Obr. 1.8. Klasický CNC program je tvořen lineárními, kruhovými, či spline segmenty podél celé dráhy nástroje. Pohyb nástroje podél své dráhy je tedy časovou funkcí rychlosti, zrychlení a tzv. „jerk“ profilu neboli změny zrychlení. Cílem generace trajektorie nástroje je tedy zajistit, že výsledná rychlost, zrychlení a jerk profil budou hladké a nikdy nepřesáhnou dané limity pohybu. Výsledné posuvové příkazy jsou následně pomocí inverzní kinematiky stroje rozděleny na více individuálních pohybových příkazů. Příkazy pro polohu os jsou následně odeslány každé jednotce a vykonány pomocí kontrolních servo systémů každé jednotky. Cílem těchto kontrolních regulátorů je, aby bylo zajištěno, že pohyb bude přesně a hladce následovat definovaný profil a bude dosaženo, co nejvíce a co nejpřesnějších limitů jednotlivých motorů [2].



Obr. 1.8 Tok informací CNC systému – podle [2].

Alternativou tohoto klasického strojírenského procesu, který vychází z CAD modelu a následuje celý proces, který byl popsán výše, je takzvané reverzní inženýrství (anglicky reverse engineering). Proces reverzního inženýrství je založen na principu extrahování informací z již existujícího předmětu a jejich následné převedení do digitální podoby. Zjednodušeně řečeno, na začátku procesu reverzního inženýrství je reálná součástka, která je poté převedena do digitální podoby. Reverzní inženýrství se používá téměř ve všech odvětvích, nejen ve strojírenství, ale také například při uchování historických předmětů. Reverzní inženýrství je velkým přínosem, hlavně pro designéry, kteří takto mohou snímat již vytvořené fyzické makety a poté je převádět do CAD modelů [10,11].

2 ZÁKLADNÍ ALGORITMUS GENEROVÁNÍ CNC PROGRAMU

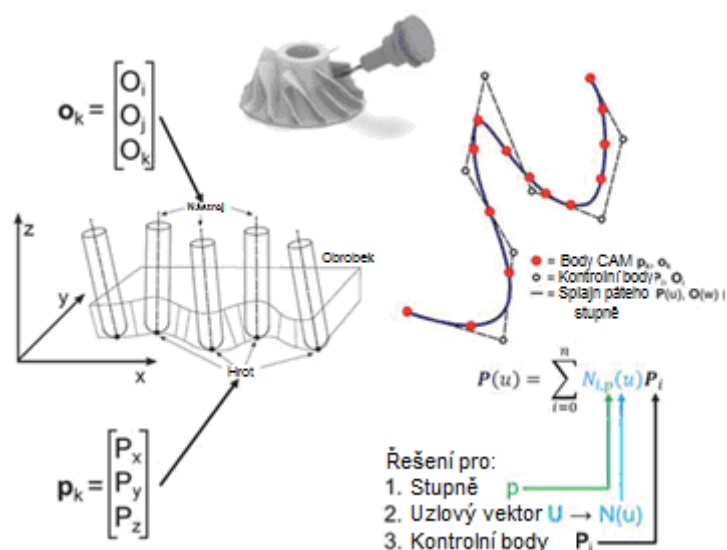
2.1 Generace trajektorie nástroje

Přesnost a kvalita obráběného povrchu pomocí 5-ti osých obráběcích strojů je negativně ovlivňována nespojitostmi v profilech trajektorie pohybu, limitovanou šířkou volného pásma pohybu nebo počátečními vibracemi [2].

Různé formy povrchů jsou modelovány pomocí splinů (A-spline, B-spline, C-spline, NURBS) či lineárních trajektorií a takto vzniklé dráhy nástroje jsou poté pomocí CAM systému generovány do pracovního souřadného systému Obr 2.1. V závislosti na zakřivení a komplexnosti jednotlivých povrchů, jsou dlouhé splinové dráhy rozděleny na kratší, diskrétní segmenty. Program obsahuje informace o poloze špičky nástroje, o pohybových vektorech osy nástroje a v poslední řadě také informace o tečném posuvu na každém geometrickém úseku dráhy nástroje [2].

Generování dráhy nástroje tedy hraje jednu z nejvýznamnějších rolí v dosažení požadované kvality povrchu.

Vytváření referenčních pohybových příkazů pro jednotlivé osy je založeno na 3 hlavních aspektech: plánování dráhy nástroje, zavádění tečného posuvového profilu a reálná interpolace pozice v rámci servo kontrolních frekvenčních smyček.



Obr. 2.1 Poloha hrotu nástroje a polohový vektor osy nástroje pomocí NURBS splinu pátého stupně – podle [2].

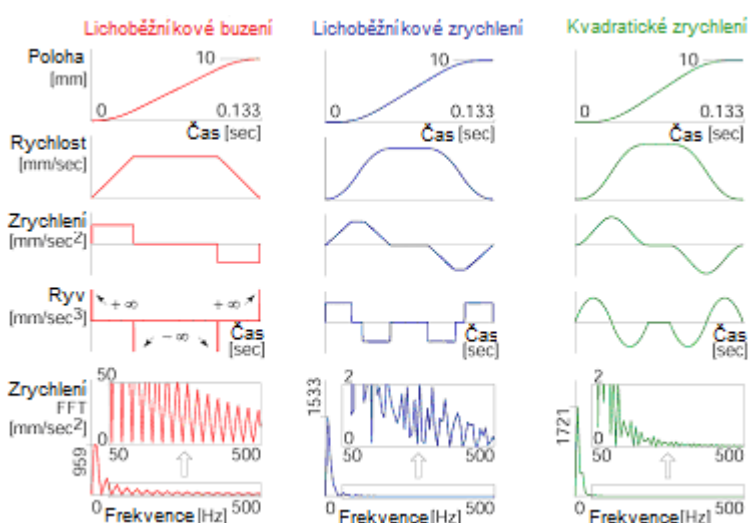
2.1.1 Předběžné zpracování 5-ti osé dráhy nástroje

CAM systém generuje z počátečních dlouhých splinových drah nástroje krátké spline segmenty. Tyto krátké segmenty poté postupují do CNC jako lineární dráhy (G01) nebo opět jako spliny, pokud systém obsahuje reálný NURBS (Non-Uniform Rational B-spline) interpolátor. Rozdíl mezi těmito dvěma způsoby je znatelný, protože lineární pohyb vede k nespojitým přechodům rychlosti a zrychlení v místech spojových uzlů jednotlivých úseků, zatímco NURBS interpolátor umožňuje zajistit hladký pohyb pomocí parametrizovaných splinů, které nám zároveň zaručují spojitost křivek po celé délce pohybu [2].

Poloha hrotu nástroje (p_k) a orientace osy nástroje (o_k), viz. Obr. 2.1, je zajištěna individuálně pomocí NURBS polynomů 5-tého stupně. Následně, vzhledem k tomu, že geometrické interpolační parametry u a w nemají žádný lineární vztah s polohou hrotu nástroje ani s orientací posuvů nástroje podél splinů, mohou být tyto interpolační parametry vyjádřeny jako funkce posunutí podél spline dráhy. Pro dosažení ještě větší hladkosti parametrizované dráhy, variace polohy hrotu nástroje a orientace nástroje jsou vyjádřeny pomocí polynomů 9-tého a 7-mého stupně. Toto předběžné zpracování 5-ti osé dráhy nástroje vede ke geometrické hladkosti a spojitosti podél dráhy nástroje, což vede k hladším povrchům a k menšímu počtu vibrací [2].

2.1.2 Profilování trajektorie pohybu

Dráhová vzdálenost mezi dvěma následujícími polohami je rozdělena na malé diskrétní posuvové segmenty na osových časových interpolačních intervalech nebo na několika celočíselných násobcích, jakožto funkce "jerk", neboli změny zrychlení, akceleračního či rychlostního profilu Obr 2.2 [2].



Obr. 2.2 Profilové trajektorie pohybu – podle [2].

Tečný posuv podél nástrojových drah je vyjádřen pomocí časově závislého polynomu. Aby bylo dosaženo spojitého jerk zrychlení či rychlosti, je žádoucí mít polynomy vyšších stupňů [2].

Dále je nutné vědět, že je třeba omezit frekvenční rozsah pozičních příkazů v rámci šířky volného pásma. Frekvence mohou také ovlivňovat strukturální režim obráběcího stroje. Díky derivacím generujeme diskrétní posuvové příkazy během fáze zrychlování, konstantní rychlosti nebo zpomalování pohybu při respektování limitních mezí pohonu obráběcího stroje po celé délce dráhy nástroje [2].

Pokud zakřivení dráhy nástroje vyžaduje větší točivý moment (větší zrychlení), než jaký mohou pohonové motory zajistit, nikdy nemůžeme dosáhnout takového tečného posuvu, jaký nám udává CNC program. Proto CNC systém obvykle vyhodnocuje pomocí optimalizačního algoritmu nejvhodnější jerk, akcelerační a rychlostní limit pohonu v každém uzlovém bodě splínu, dokud ani jeden z limitů pohonů není překročen. Výsledný dráhový profil je vyhlazen díky splinům vyššího řádu, aby byly dodrženy kontinuální přechody v jednotlivých uzlech [2].

2.1.3 Kinematika 5-ti osého obráběcího stroje

Jak již bylo zmíněno, CAM systém generuje dráhy nástroje pro CNC v souřadném systému, který je vázán k obrobku. Proto pro geometrické vyhlazení, které bylo zmíněno výše, je dráha nástroje převedena do 3 lineárních a 2 rotačních jednotek neboli do souřadného systému obráběcího stroje. K tomuto převodu slouží takzvaná inverzní kinematika [2].

Inverzní kinematický model tedy transformuje pohyby nástroje vázané k souřadnému systému obrobku definovaného v CNC programu na pohyby v souřadném systému stroje tak aby, příkazy pro každý jednotlivý posun mohly být vykonány [22].

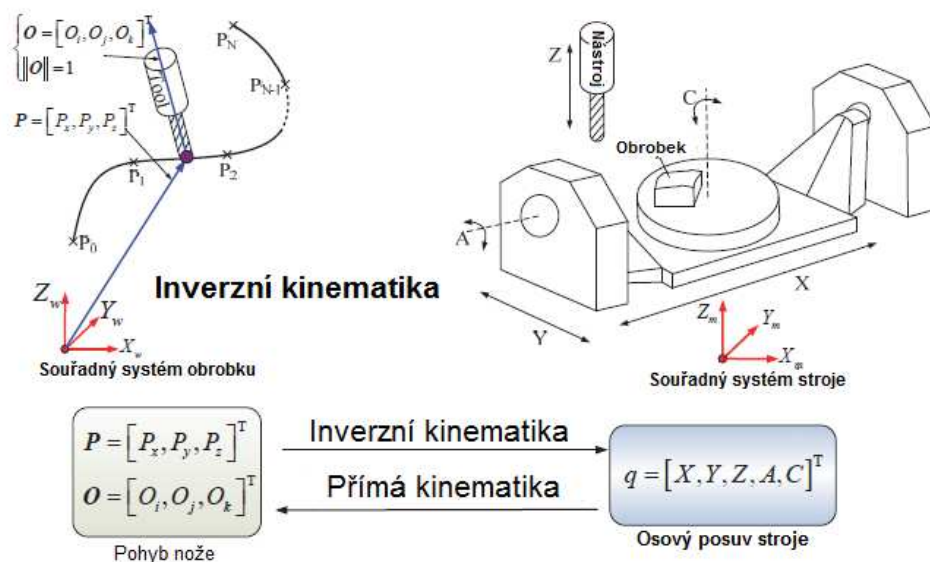
Opakem inverzní kinematiky je takzvaná přímá kinematika, která naopak převádí pohyby definované v souřadném systému stroje na pohyby interpretovatelné v kartézském souřadném systému vázanému k obrobku [2].

Příklad inverzní kinematiky je znázorněn rovnicí (1), kdy je s řezným nástrojem manipulováno v ose Z:

$$\begin{bmatrix} P_x & O_i \\ P_y & O_j \\ P_z & O_k \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = g_{wt}(x, y, z, \theta_a, \theta_c) \begin{bmatrix} 00 \\ 00 \\ 01 \\ 10 \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde (P_x, P_y, P_z) a (O_x, O_y, O_z) jsou translace a úhlové pohyby specifikované v CNC a získané z přímé kinematické transformační matice g_{wt} obsahující 3 translační (x, y, z) a 2 rotační (θ_a, θ_c) pohyby.

Pokud dráha nástroje přechází přes ostré křivky, rotační pohyby mohou být nuceny k náhlým změnám, což zapříčiňuje náhlé změny pohybu i v translačních osách. Tyto anomálie proto musí být detekovány a následně opraveny kinematickým modelem obráběcího stroje. Děje se tak většinou pomocí kompenzace polohy nástroje, kdy pomocí kompenzační (offset) metody zmenšujeme nebo zvětšujeme rotační úhel o $\pm 90^\circ$, aby bylo zaručeno, že nedojde k přerušení rotačních příkazů [2].



Obr. 2.3 Ukázka inverzní kinematiky – podle [2].

2.2 Druhy interpolací trajektorie nástroje

2.2.1 Lineární interpolace

U lineární interpolace jsou zadané body spojovány přímkami. Tato segmentace trajektorie způsobuje, že v každém bodě tečné nespojitosti dvou přímek dochází k zpomalování a následnému zrychlování pohybu nástroje [12]. Tento efekt vede k většímu opotřebování stroje, k vyšším strojním časům a k horší kvalitě povrchu v místě každé nespojitosti.

Obecný matematický popis lineární interpolace je následující:

Pokud jsou známy 2 body se souřadnicemi (x_0, y_0) a (x_1, y_1) , potom lineární interpolace je přímka mezi těmito dvěma body. Pokud pro hodnotu x je interval (x_0, x_1) , poté hodnota y podél přímky je dána rovnicí (2).

$$y = y_0 + (x - x_0) \cdot \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (2)$$

2.2.2 Spline interpolace

Spliny patří ke skupině dráhových funkcí a jsou efektivním nástrojem k tvorbě hladkých a komplexních geometrií. Díky tomuto typu interpolace je možné spojovat body hladkými křivkami. Splineové křivky jsou tvořeny pomocí implicitních rovnic nebo parametrických funkcí. Většina CAD systému však zpravidla používá parametrické formy splineových křivek, protože vyjádření na základě těchto forem je praktičtější pro kontrolu pohybu jednotlivých os stroje [12]. Různé kontrolní systémy umožňují vytvářet více typů spline interpolací, které vedou k rozdílným výsledkům, tudíž pro vytvoření požadovaného profilu je mnohdy nutná předchozí simulace nebo více pokusů [13].

Jak již bylo zmíněno, existuje mnoho typů kontrolních systémů jako Siemens Sinumerik, Heidenhain, Mazak, které umožňují realizovat různé splineové interpolace. Nicméně pro další pokračování této práce budou popsány splineové interpolace pro kontrolní systém Sinumerik 810D.

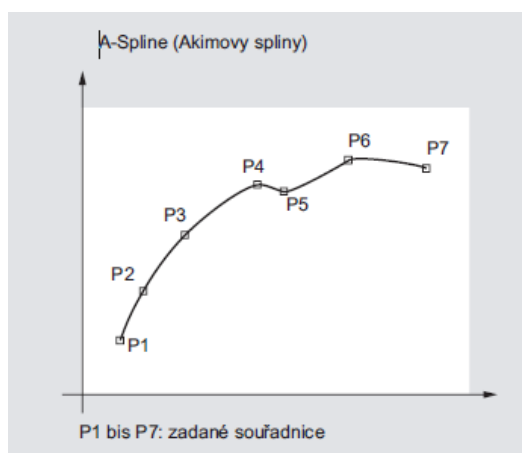
Typy spline interpolací pro Sinumerik:

- A - spline (Akimův spline)
- B - spline (Beziérův spline)
- C - spline (kubický spline)

A-SPLINE

A-spline prochází přesně zadanými body, ale není v těchto bodech spojitý v zakřivení a téměř negeneruje nežádoucí kmitání. Pro interpolaci se používá polynom 3. řádu, viz rovnice (3), a dané kontrolní (okrajové) podmínky [3,13].

$$s(x) = a_0 + a_1 \cdot (x - x_i) + a_2 \cdot (x - x_i)^2 + a_3 \cdot (x - x_i)^3, \text{ kde } x_i \leq x \leq x_{i+1} \quad (3)$$



Obr. 2.4 Grafická interpretace A-splinu [13].

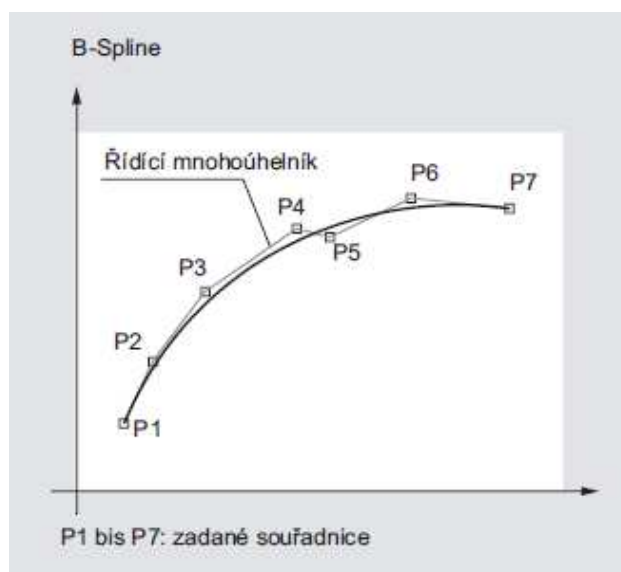
B-SPLINE

I když je tento druh interpolace nazýván výrobcem jako B-spline interpolace, ve skutečnosti se jedná o NURBS interpolaci. B-spline křivky jsou křivky volného tvaru, které se skládají ze segmentů bézierových křivek, které jsou na sebe napojeny s co největší možnou třídou spojitosti. Jsou určeny $n+1$ řídicími body a stupněm p , který určuje stupeň jednotlivých oblouků křivky [14]. Na rozdíl od A-splinu, B-spline přímo neprochází zadanými body kontrolního polygonu (lomenou čarou určenou polohovými vektory bodu), ale je k těmto bodům pouze „přitažen“ dle váhy, která je nastavena operátorem nebo seřizovačem. B-spline je v počátečním a koncovém bodě vždy tangenciální ke kontrolnímu polygonu a negeneruje nežádoucí kmitání [13].

Aby bylo zaručeno, že tento druh interpolace bude aplikovatelný i při více osém obrábění, je v Systému Sinumerik současně programována prostorová křivka pro referenční bod nástroje (poloha špiče nástroje) a prostorová křivka pro další kontrolní bod ležící na ose nástroje v konstantní vzdálenosti [20].

Váha bodu n , kterou zadáváme pro jednotlivé podpůrné body je v rozsahu hodnot 0 až 3 v krocích 0,0011 [13].

- | | |
|---------|--|
| $n > 1$ | Křivka je silněji přitáhuta kontrolním bodem. |
| $n < 1$ | Křivka je méně silně přitáhuta kontrolním bodem. |



Obr. 2.5 Grafická interpretace B-splinu [13].

C-SPLINE

C-spline, neboli kubický spline, přesně prochází zadanými body, je v podpůrných bodech spojitý v zakřivení a je také náchylný k neočekávanému kmitání. Je používán tehdy, leží-li body na analyticky známé křivce [13].

Aby mohl být použit kubický spline, musí splňovat podmínku spojitosti první a druhé derivace na intervalu $\langle x_0, x_n \rangle$ a na každém intervalu (X_i, X_{i+1}) musí být určen polynomem třetího stupně, dle rovnice (4).

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3, \text{ kde } x \in \langle x_i, x_{i+1} \rangle \quad (4)$$

Na okrajích tohoto polynomu nemá smysl mluvit o spojitosti derivací, proto musí být tyto podmínky dodefinovány dvěma následujícími možnými způsoby.

- Pokud známe hodnoty derivací na okraji, pak zadáme $y'(x_0) = y'_0$ a/nebo $y'(x_n) = y'_n$, tedy spline má zadanou hodnotu derivace na okraji.
- Pokud derivaci neznáme, zadáme $y''_0 = 0$ a/nebo $y''_n = 0$. U přirozeného splinu máme tedy $y''_0 = 0$ na obou okrajích.

Druhá derivace kubického polynomu je lineární funkcí tvaru dle rovnice (5).

$$y'' = Ay''_i + By''_{i+1}, \text{ kde } A = \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} \text{ a } B = 1 - A = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (5)$$

Po dvojnásobném zintegrování této rovnice dostaneme rovnici (6):

$$y = Ay_i + By_{i+1} + Cy_i'' + Dy_{i+1}'', \text{ kde } C = \frac{1}{6}(A^3 - A).(x_{i+1} - x_i)^2 \quad (6)$$

$$D = \frac{1}{6}.(B^3 - B).(x_{i+1} - x_i)^2$$

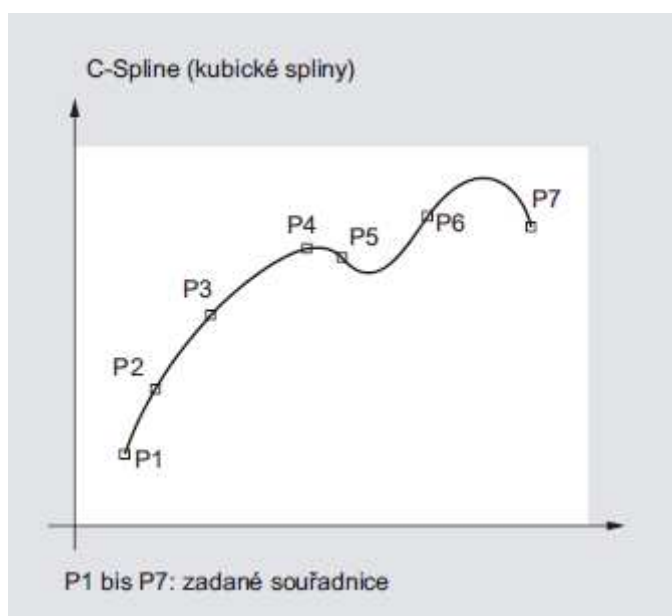
Derivace $y'(x)$ má tvar (7):

$$y'(x) = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{3A^2 - 1}{6}(x_{i+1} - x_i)y_i'' + \frac{3B^2 - 1}{6}(x_{i+1} - x_i)y_{i+1}'' \quad (7)$$

Hodnoty y_i'' určíme z podmínky první derivace splinu ve tvaru (8):

$$\frac{x_i - x_{i-1}}{6} y_{i-1}'' + \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{3} y_i'' + \frac{x_{i+1} - x_i}{6} y_{i+1}'' = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (8)$$

Poté jde tedy o soustavu lineárních rovnic pro koeficienty y_i'' , kde $i = 0, 1, \dots, n$ s tridiagonální, diagonálně dominantní maticí, ze které získáme hodnoty druhé derivace. Pokud známe tyto hodnoty, tak snadno určíme hodnoty splinu [15].



Obr. 2.6 Grafická interpretace C-splinu [13].

2.2.3 Polynomiální interpolace

V dnešní době téměř všechny softwary, například Sinumerik či Heidenhain, mají ve svých funkcích možnost polynomiální interpolace, avšak doposud není ve strojírenství příliš využívána. Největšího rozmachu dosáhla spíše v oblasti robotiky, například při programování robotických paží.

Polynomiální interpolace bývá mnohdy nesprávně zaměňována se spline interpolacemi, u kterých se taktéž používají polynomy třetích řádů, avšak v tomto případě se nejedná o druh splinové interpolace. U CNC obrábění je míněna jako rozhraní pro programování externě vytvořených splinových křivek, to znamená, že splinové úseky mohou být naprogramovány přímo. Proto tento druh interpolace zbavuje CNC systém nutnosti vypočítávat koeficienty polynomů, jako tomu bylo doposud. Polynomická interpolace může být optimálně využita, pokud jsou koeficienty dodány přímo ze systému CAD nebo ze systému pro dodatečné zpracování (Wolfram Mathematica 8.0, atd) [13].

Nejčastěji se používají polynomy třetího stupně, se kterými procesor umí pracovat, ve výjimečných případech však mohou být naprogramovány i polynomy pátého stupně [3].

Každý řídicí systém, ať už se jedná u Sinumerik či Heidenhain, má svou syntaxi na programování externě vytvořených křivek, neboli polynomu.

Syntaxe Siemens (Sinumerik 840D) [13]:

Polynom 3. stupně:

$POLY PO[X]=(xe,a2,a3) PO[Y]=(ye,b2,b3) PO[Z]=(ze,c2,c3) PL=n$

Polynomy 5. stupně a nová syntaxe polynomu:

$POLY X=PO(xe,a2,a3,a4,a5) Y=PO(ye,b2,b3,b4,b5) Z=PO(ze,c2,c3,c4,c5)$
 $PL=n$
 $POLYPATH("AXES","VECT")$

POLY :

Polynomická interpolace se aktivuje blokem s příkazem POLY.

POLYPATH :

Polynomická interpolace může být vybrána pro obě skupiny os AXIS nebo VECT

PO[identifikátor osy/proměnná] :

Koncové body a koeficienty polynomu

X, Y, Z : Identifikátor osy

xe, ye, ze :

Údaj koncové pozice pro příslušné osy, rozsah hodnot a jednotka

a_2, a_3, a_4, a_5 :

Koeficienty a_2, a_3, a_4 a a_5 jsou popsány svou hodnotou, rozsahem hodnot a jednotkou. Poslední koeficient může být vynechán, jestliže má nulovou hodnotu.

PL :

Délka intervalu parametru, na kterém je polynom definován (definiční oblast funkce $f(p)$). Interval má svůj počátek vždy v 0 a p může nabývat hodnot od 0 do PL .

Teoretický rozsah hodnot pro PL : 0,0001 ... 99 999,9999.

Pokud hodnota PL není naprogramována, platí $PL = 1$.

Syntaxe Heidenhain (iTNC 530) [16]:

V tomto kontrolním systému mohou být hladké křivky naprogramovány pomocí parametrů, pod kterými poté kontrolní systém počítá polynomy pro jednotlivé osy. Definice polynomů je následující:

$$X(t) = K3X \cdot t^3 + K2X \cdot t^2 + K1X \cdot t + X$$

$$Y(t) = K3Y \cdot t^3 + K2Y \cdot t^2 + K1Y \cdot t + Y$$

$$Z(t) = K3Z \cdot t^3 + K2Z \cdot t^2 + K1Z \cdot t + Z$$

Kontrolní systém je také schopen programovat hladké křivky pro víceosé obrábění. Za tímto účelem jsou programované bloky rozšířeny ještě o parametry polynomů definující rotační osy nástroje. Značení je podobné jako v předchozím případě:

$$A(t) = K3A \cdot t^3 + K2A \cdot t^2 + K1A \cdot t + A$$

$$B(t) = K3B \cdot t^3 + K2B \cdot t^2 + K1B \cdot t + B$$

$X(t), Y(t), Z(t), A(t), B(t)$ polynomy třetího stupně pro jednotlivé osy

X, Y, Z, A, B počáteční / koncové body

$K3X, K2X, K1X$ koeficienty polynomů pro osu X

$K3Y, K2Y, K1Y$ koeficienty polynomů pro osu Y

$K3Z, K2Z, K1Z$ koeficienty polynomů pro osu Z

$K3A, K2A, K1A$ koeficienty polynomů pro osu A

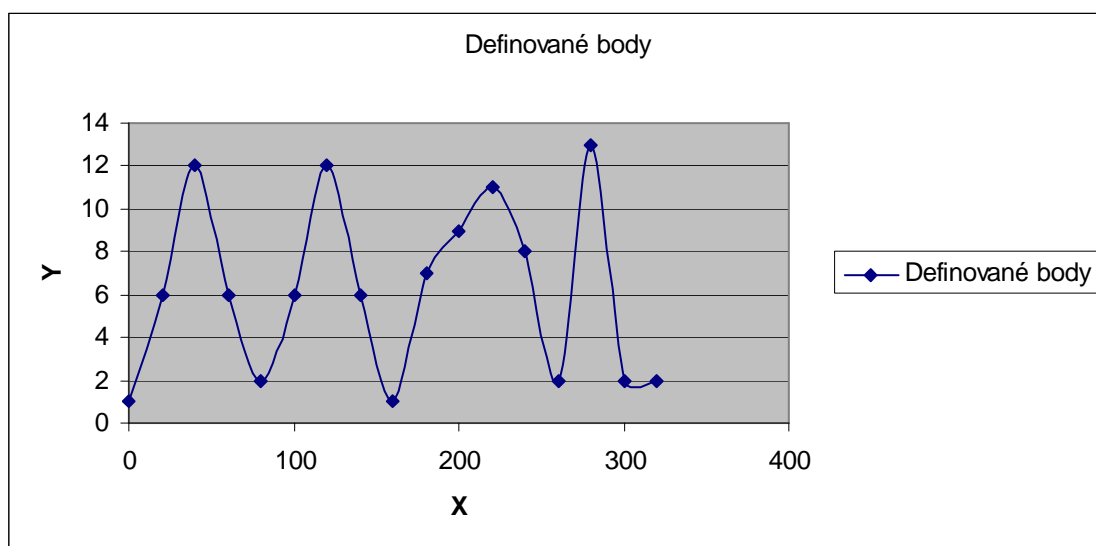
$K3B, K2B, K1B$ koeficienty polynomů pro osu B

t parametr nabývající hodnot 0 až 1

3 VERIFIKACE CNC TECHNOLOGIE NA VYBRANÉ SOUČÁSTI

3.1 2D: Lineární trajektorie a spline interpolace

V praxi bylo vyzkoušeno, jak fungují výše zmíněné generace trajektorie nástroje. Za tímto účelem bylo definováno 17 kontrolních bodů (viz Tab. 3.1), aby bylo ve 2D dosaženo požadované křivky následujícího tvaru:



Obr. 3.1 Grafické znázornění požadované křivky

Tab. 3.1 Definované hodnoty pro X a Y.

X	Y
0	1
20	6
40	12
60	6
80	2
100	6
120	12
140	6
160	1
180	7
200	9
220	11
240	8
260	2
280	13
300	2
320	2

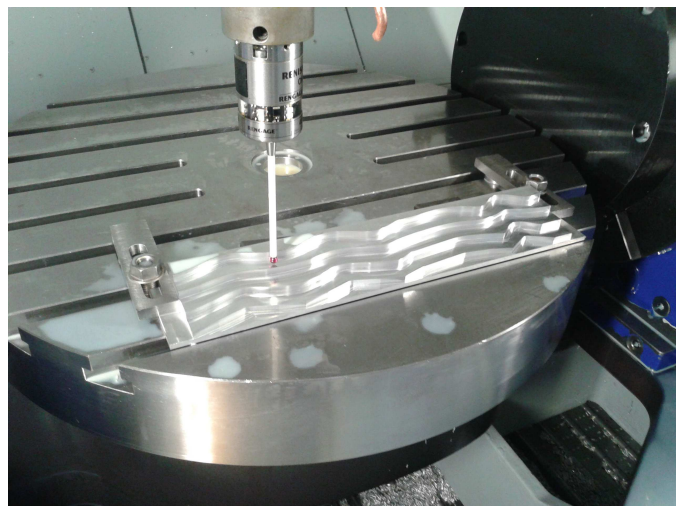
Na základě těchto definovaných kontrolních bodů byly vytvořeny 4 CNC programy pro SINUMERIK 840D pro jednotlivé interpolace a následně bylo zrealizováno obrábění na pětiosém obráběcím centru MCV 1210/Sinumerik 840D s řeznými podmínkami $v_c=200$ m/min, $a_p=15$ mm, $v_f=400$ mm/min, $a_e=2$ mm, pomocí dvoubřité celokarbidové frézy FRAISA $\phi 20$ mm, HM MG10 (ISO K10-20), Code C 5273.682.

Tab. 3.2 Jednotlivé CNC programy pro lineární typ interpolace a A-spline.

<u>Lineární interpolace:</u>	<u>A-spline:</u>
G54	G54
G90	G90
G64	G64
SOFT	SOFT
T="2"	T="2"
M3 S3200 M8	M3 S3200 M8
G1 X-20 Y-4 Z100 A0 C0 F5000	G1 X-20 Y-4 Z100 A0 C0 F5000
G1 Z-20	G1 Z-15
G1 X0 Y-4 F400 ;1BOD	ASPLINE
G1 X20 Y1	X0 Y-4 F400 ;1BOD
G1 X40 Y7	X20 Y1
G1 X60 Y1	X40 Y7
G1 X80 Y-3	X60 Y1
G1 X100 Y1	X80 Y-3
G1 X120 Y7	X100 Y1
G1 X140 Y1	X120 Y7
G1 X160 Y-4	X140 Y1
G1 X180 Y2	X160 Y-4
G1 X200 Y4	X180 Y2
G1 X220 Y6	X200 Y4
G1 X240 Y3	X220 Y6
G1 X260 Y-3	X240 Y3
G1 X280 Y8	X260 Y-3
G1 X300 Y-3	X280 Y8
G1 X320	X300 Y-3
G1 X330	X320
G1 Z100 F5000	
M30	

Tab. 3.3 Jednotlivé CNC programy pro B-spline a C-spline.

<u>B-spline:</u>	<u>C-spline</u>
G54	G54
G90	G90
G64	G64
SOFT	SOFT
T="2"	T="2"
M3 S3200 M8	M3 S3200 M8
G1 X-20 Y-4 Z100 A0 C0 F5000	G1 X-20 Y-4 Z100 A0 C0 F5000
G1 Z-10	G1 Z-5
BSPLINE	CSPLINE
X0 Y-4 PW=0.1 F400 ;1BOD	X0 Y-4 F400 ;1BOD
X20 Y1 PW=0.1	X20 Y1
X40 Y7 PW=0.1	X40 Y7
X60 Y1 PW=0.1	X60 Y1
X80 Y-3 PW=0.1	X80 Y-3
X100 Y1 PW=3	X100 Y1
X120 Y7 PW=3	X120 Y7
X140 Y1 PW=3	X140 Y1
X160 Y-4 PW=3	X160 Y-4
X180 Y2 PW=1	X180 Y2
X200 Y4 PW=1	X200 Y4
X220 Y6 PW=1	X220 Y6
X240 Y3 PW=1	X240 Y3
X260 Y-3 PW=1	X260 Y-3
X280 Y8 PW=3	X280 Y8
X300 Y-3 PW=1	X300 Y-3
X320 PW=1	X320
G1 X330	G1 X330
G 1 Z100 F5000	G1 Z100 F5000
M30	M30



Obr. 3.2 Měření obrobků pomocí integrované měřicí sondy.

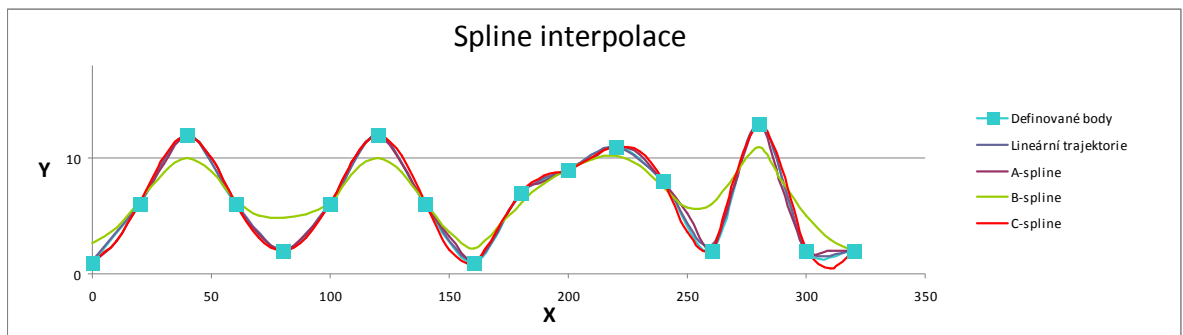
Výsledné křivky byly naměřeny pomocí měřicí sondy integrované v obráběcím centru – viz Tab. 3.4.

Tab. 3.4 Naměřené hodnoty pro 4 typy interpolací.

Lineární trajektorie		A spline		B spline			C spline	
X	Y	X	Y	X	Y	váha	X	Y
0	1,154	0	0,992	0	2,691	PW 0.1	0	1,019
20	6,082	10	2,9	10	4,042		10	2,838
40	11,97	20	6,073	20	6,274	PW 0.1	20	6,141
60	6,077	30	9,532	30	8,804		30	10,08
80	2,09	40	12,01	40	9,987	PW 0.1	40	11,99
100	6,077	50	10,01	50	8,827		50	10,03
120	11,97	60	6,059	60	6,39	PW 0.1	60	6,124
140	6,077	70	3,452	70	5,057		70	3,1
160	1,176	80	1,997	80	4,865	PW 0.1	80	1,991
180	6,997	90	3,453	90	5,108		90	3,117
200	9,001	100	6,061	100	6,147	PW 3	100	6,126
220	10,98	110	10,01	110	8,84		110	9,985
240	8,015	120	12	120	9,993	PW 3	120	11,99
260	2,439	130	9,549	130	8,809		130	10,22
280	12,96	140	6,073	140	6,236	PW 3	140	6,166
300	2,286	150	3,243	150	3,653		150	2,071
320	2,002	160	1,017	160	2,222	PW 3	160	0,998
		170	3,613	170	3,876		170	3,682
		180	7,008	180	6,113	PW 3	180	7,052
		190	8,008	190	7,837		190	8,433
		200	9,008	200	9,008	PW 3	200	8,996
		210	10,01	210	9,901		210	10,09
		220	11,01	220	10,17	PW 3	220	10,99
		230	10,25	230	9,353		230	10,59
		240	8,034	240	7,546	PW 3	240	8,128
		250	5,235	250	5,728		250	3,662
		260	2,048	260	5,977	PW 1	260	2,056
		270	7,696	270	8,471		270	8,302
		280	13,01	280	10,95	PW 3	280	12,99
		290	7,455	290	8,021		290	9,041
		300	2,001	300	5,045	PW 1	300	2,183
		310	2,001	310	2,945		310	0,498
		320	1,999	320	2,001	PW 1	320	1,99



Obr. 3.3 Finální obrobek, postupně: lineární trajektorie, A-spline, B-spline, C-spline.



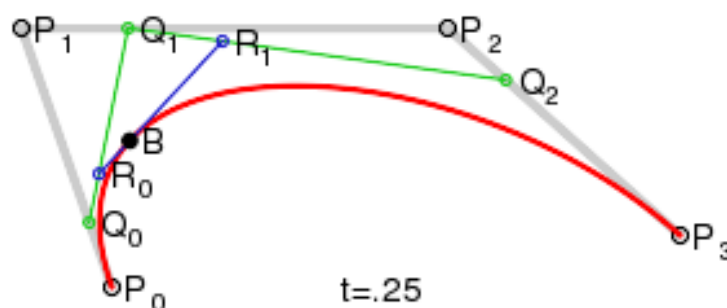
Obr. 3.4 Grafické znázornění naměřených výsledků.

3.2 2D Polynomiální trajektorie nástroje

Aby bylo možné reprodukovat stejnou křivku pomocí polynomiální trajektorie, tedy definovat polynomy třetího stupně pro $x(t)$ a $y(t)$, bylo nutné vycházet z Bézierových křivek třetího stupně, tzv. kubických Bézierových křivek, které jsou definovány 4 kontrolními body, P_0 , P_1 , P_2 a P_3 , a fungují na aproximativním principu. Křivka prochází počátečním a koncovým bodem P_0 a P_3 , zatímco body P_1 , P_2 křivka neprochází. Tyto body udávají tvar křivky [17].

Rovnice definující kubickou Bézierovu křivku (5.1):

$$C(t) = P_0 \cdot (1 - t)^3 + 3 \cdot P_1 \cdot t \cdot (1 - t)^2 + 3 \cdot P_2 \cdot t^2 \cdot (1 - t) + P_3 \cdot t^3 \quad (5.1)$$



Obr. 3.5 Bézierova křivka [17]

Křivka definovaná 17-ti body byla následně rozdělena na 8 úseků po třech bodech.

V programu Mathematica 8.0.1, Příloha 1, byly pro jednotlivé úseky generovány kontrolní body Bézierovy křivky tak, že první a poslední kontrolní bod byl shodný s definovanými body, křivka jimi procházela a byla tak zaručena spojitost. Zbylé 2 kontrolní body byly navrženy tak, aby se jimi vytvořená křivka, co nejvíce přiblížila k definovanému bodu. Na závěr byl vytvořen druhý program, který pomohl vygenerovat polynomy třetího stupně pro $x(t)$ a $y(t)$.

Program vytvořený pro generaci polynomu třetího stupně:

Parametre=1;
 P0={280,13};
 P1={330,13};
 P2={270,2};
 P3={320,2};

Poly1[t_]=P0*(1-t)^3+3*P1*t*(1-t)^2+3*P2*t^2*(1-t)+P3*t^3
 {280 (1-t)^3+990 (1-t)^2 t+810 (1-t) t^2+320 t^3,13 (1-t)^3+39 (1-t)^2 t+6 (1-t) t^2+2 t^3}
 x[t_]=280 (1-t)^3+990 (1-t)^2 t+810 (1-t) t^2+320 t^3
 y[t_]=13 (1-t)^3+39 (1-t)^2 t+6 (1-t) t^2+2 t^3
 280 (1-t)^3+990 (1-t)^2 t+810 (1-t) t^2+320 t^3
 13 (1-t)^3+39 (1-t)^2 t+6 (1-t) t^2+2 t^3

Expand[x[t]]
 280+150 t-330 t^2+220 t^3
 Expand[y[t]]
 13-33 t^2+22 t^3

Výsledné rovnice:*Úsek 1:*

$$x(t) = 73.5 t - 94.4539 t^2 + 60.9539 t^3$$

$$y(t) = 1 + 33 t^2 - 22 t^3$$

Úsek 2:

$$x(t) = 40 + 60 t - 74.539 t^2 + 54.539 t^3$$

$$y(t) = 12 - 30 t^2 + 20 t^3$$

Úsek 3:

$$x(t) = 80 + 60 t - 40.956 t^2 + 20.956 t^3$$

$$y(t) = 2 + 30 t^2 - 20 t^3$$

Úsek 4:

$$x(t) = 120 + 160 t - 360 t^2 + 240 t^3$$

$$y(t) = 12 - 37. t^2 + 26. t^3$$

Úsek 5:

$$x(t) = 160 + 59.981 t - 211.905 t^2 + 191.924 t^3$$

$$y(t) = 1 + 1.49953 t - 0.19335 t^2 + 6.69382 t^3$$

Úsek 6:

$$x(t) = 200 + 61.538 t - 64.614 t^2 + 43.076 t^3$$

$$y(t) = 9 + 6.1538 t - 1.4615 t^2 - 5.6923 t^3$$

Úsek 7:

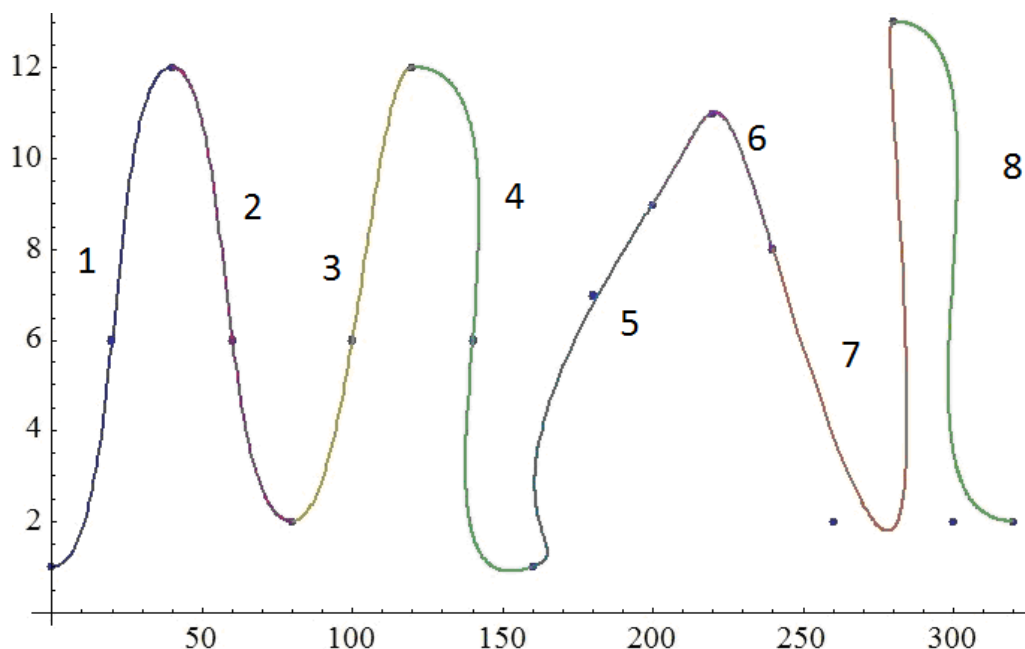
$$x(t) = 240 + 219.512 t - 340.024 t^2 + 160.512 t^3$$

$$y(t) = 8 - 49.3902 t + 113.78 t^2 - 59.3902 t^3$$

Úsek 8:

$$x(t) = 280 + 150 t - 330 t^2 + 220 t^3$$

$$y(t) = 13 - 33 t^2 + 22 t^3$$

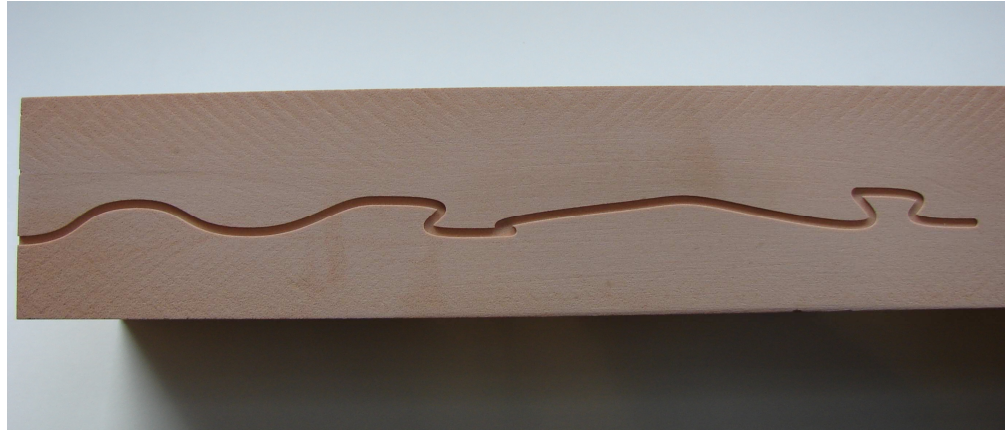
Grafická interpretace polynomiální trajektorie:

Obr. 3.6 Grafická interpretace polynomiální trajektorie.

Na základě koeficientů těchto polynomů pro osy X a Y byl vytvořen program a následně bylo realizováno obrábění na pětiosém obráběcím centru MCV 1210/Sinumerik 840D s řeznými podmínkami $v_c=14$ m/min, $a_p=1$ mm, $v_f=300$ mm/min, $a_e=3$ mm, pomocí tříbřité celokarbidové frézy FRAISA $\phi 3$ mm, HM MG10 (ISO K10-20), Code 5273.180, bez chlazení.

Program Sinumerik 840D:

```
T="2"
M6
N2 S1500 M03
G1 X-10 Y0 F2000
Z-10
N9 X0 Y0 Z-10 G90 F300
POLY
PO[X]=(40,-94.4539,60.9539) PO[Y]=(12,33,-22) PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(80,-74.539,54.539) PO[Y]=(2,-30,20) PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(120,-40.956,20.956) PO[Y]=(12,30,-20) PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(160,-360,240) PO[Y]=(1,-37,26) PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(200,-211.905,191.924) PO[Y]=(9,-0.19335,6.69382) PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(240,-64.614,43.076) PO[Y]=(8,-1.4615,-5.6923) PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(280,-340.024,160.512) PO[Y]=(13,113.78,-59.3902) PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(320,-330,220) PO[Y]=(2,-33,22) PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
```



Obr. 3.7 Finální frézovaná křivka (Siemens Sinumerik).

```
PROGRAM
PETRA_POLY
T="2"
M6
N2 S1500 M03
G1 X-10 Y0 F2000
Z-10
N9 X0 Y0 Z-10 G90 F300
POLY
PO[X]=(40,-94.4539,60.9539) PO[Y]=(12,33,-22)PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(80,-74.539,54.539)PO[Y]=(2,-30,20)PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(120,-40.956,20.956)PO[Y]=(12,30,-20)PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(160,-360,240)PO[Y]=(1,-37,26)PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(200,-211.905,191.924)PO[Y]=(9,-0.19335,6.69382)PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(240,-64.614,43.076)PO[Y]=(8,-1.4615,-5.6923)PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(280,-340.024,160.512)PO[Y]=(13,113.78,-59.3902)PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
PO[X]=(320,-330,220)PO[Y]=(2,-33,22)PO[Z]=(-10,0.0,0.0)
G1 Z20
M30

```

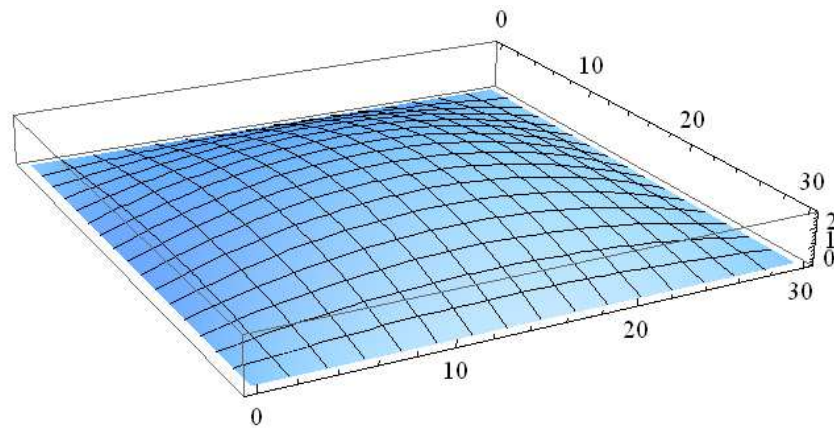
Obr. 3.8 Program v řídicím systému Siemens Sinumerik.

3.3 Polynomiální interpolace v 5-ti osách

Cílem této bakalářské práce bylo zrealizovat polynomiální obrábění v 5-ti osách. K realizaci pětiosého obrábění byl vybrán jednoduchý povrch o rozměrech 30x30 mm definovaný těmito body:

$$\begin{aligned} & \{ \{0, 0, 0\}, \{0, 10, 0\}, \{0, 20, 0\}, \{0, 30, 0\} \}, \\ & \{ \{10, 0, 0\}, \{10, 10, 5.\}, \{10, 20, 5.\}, \{10, 30, 0\} \}, \\ & \{ \{20, 0, 0\}, \{20, 10, 5.\}, \{20, 20, 5.\}, \{20, 30, 0\} \}, \\ & \{ \{30, 0, 0\}, \{30, 10, 0\}, \{30, 20, 0\}, \{30, 30, 0\} \} \end{aligned}$$

Za pomoci lineární kombinace bernstainových bázových polynomů stupně n , které tvoří bázi vektorového prostoru stupně n [17], byla poté generována požadovaná plocha následujícího tvaru:



Obr. 3.9 Plocha generovaná pomocí Bernsteinových polynomů.

Materiál obrobku:

Pro obrobek byla použita hliníková slitina 7020 dle EN 573, kde zinkem jako legujícím prvkem zlepšuje mechanické vlastnosti, ale negativně ovlivňuje odolnost materiálu vůči korozi [10]. Tato slitina hliníku je považována za snadno obrobitelný materiál, protože řezné síly, které při obrábění vznikají, jsou relativně malé.

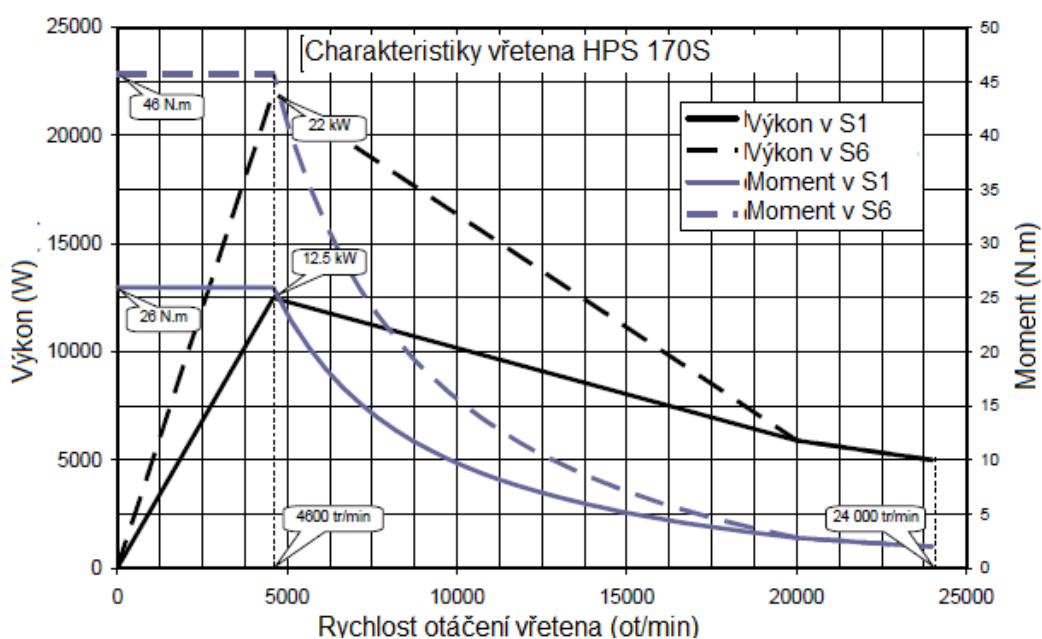
Obráběcí centrum:

Za účelem pětiosého obrábění bylo vybráno obráběcí centrum MIKRON

HSM600U a s oběma rotačními osami ve stole (B, C) a se základními charakteristikami popsány v Tab. 3.5.

Tab. 3.5 Charakteristika HSM600U.

	osa X	osa Y	osa Z	osa B	osa C	vřeteno
Rozsah	800 mm	600 mm	500 mm	-30°/110°	0/360°	
Maximální rychlost	40 m/min	40 m/min	40 m/min	200 ot/min	360 ot/min	24 000 ot/min
Maximální zrychlení	10 m/s ²	10 m/s ²	10 m/s ²	300 ot/s ²	600 ot/s ²	
Maximální síla	8350 N	5150 N	4000 N	640 N.m	340 N.m	46 N.m



Obr. 3.10 Grafická interpretace charakteristik obráběcího stroje MIKRON – podle [4].

Nástroj:

Použitým nástrojem byla kulová fréza Sandvik (R216.62-12030-AO13G 1010) o průměru $D=12$ mm, s počtem zubů $z=2$.



Obr. 3.11 Fréza Sandvik (R216.62-12030-AO13G 1010).

Řezné podmínky:Hrubování:

$N = 5000$ ot/min

$f_z = 0,12$ mm/dt/ot

$a_p = 0,5$ mm

$a_e = 0,4$ mm

$v_c = (D \cdot N \cdot \pi) / 1000 = 188,5$
m/min

N ...počet otáček za minutu

f_z ...posuv na zub

a_e ...pracovní záběr ostří

a_p ...šířka záběru ostří (hloubka řezu)

v_c ...řezná rychlost

h_{max} ...maximální tloušťka třísky

$D_{ef max}$...efektivní průměr nástroje

Dokončování:

$N = 7000$ ot/min

$f_z = 0,12$ mm/dt/ot

$a_e = 0,2$ mm

$a_p = 0,3$ mm

$h_{max} = 18$ μ m

$D_{ef max} = 3,72$ mm

v_c průměrná = 40 m/min

Řezné podmínky byly voleny tak, aby bylo vždy dosaženo větší tloušťky třísky než minimální stanovená tloušťka $h_{min} = 10$ μ m.

Hrubování bylo realizováno pouze ve 3 osách, zatímco dokončování bylo realizováno pomocí pětiosého kontinuálního obrábění.

Chladičí kapalina:

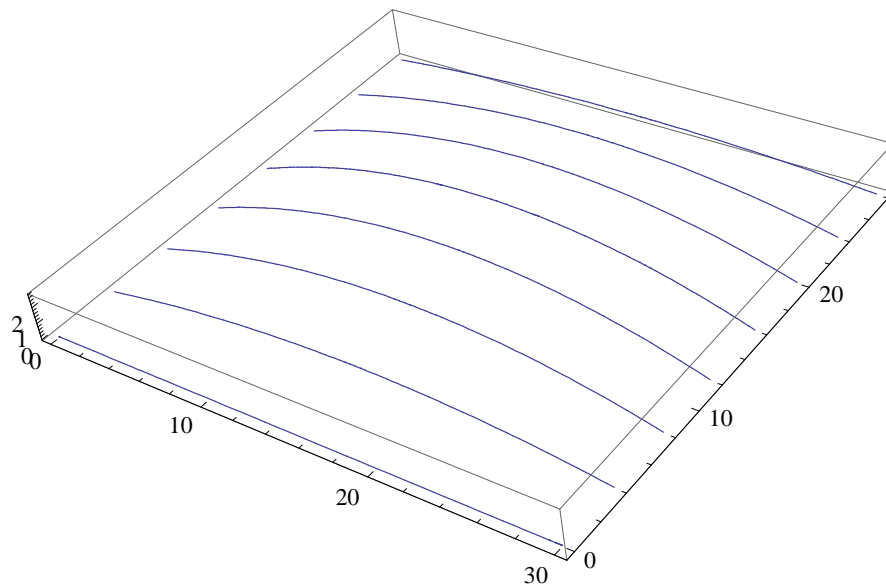
Jako chladičí kapalina byla použita 5% emulze oleje Blaser.

3.3.1 Polynomiální interpolace s pevně definovanými úhly sklonu nástroje vůči normále k povrchu

Během standardního frézování pomocí kulových fréz, kdy materiál a nástroj svírají pravý úhel, je v ose nástroje na čele kulového ostří nulová řezná rychlost v_c , tudíž v tomto místě nástroj pouze zatlačuje materiál do obrobku. Tento jev vede k nežádoucím vlivům (pěchování třísky, zvýšená teplota řezání, atd.), které nepříznivě ovlivňují kvalitu povrchu a trvanlivost nástroje. Všechny tyto nepříznivé jevy lze eliminovat naklopením nástroje či obrobku [19].

Náklon nástroje vůči normále může být realizován ve 2 směrech. Náklon nástroje vůči normále k povrchu ve směru posuvu (β_f) způsobuje vznik mírného normálového napětí. Náklon kolmý na směr posuvu (β_n) vyvolává útlum samobuzených kmitů. Sklon nástroje má tedy stabilizující účinky [19].

V programu Mathematica byl sestaven algoritmus, viz. Příloha 2 této práce, který z těchto bodů, definice užívané frézy, počtu průjezdů ($p=30/ae$) a definovanému sklonu nástroje vůči normále povrchu ($\beta_f = 30^\circ$, $\beta_n = +10^\circ$), vygeneroval polynomiální definice, pro jednotlivé trajektorie nástroje. Tyto polynomy třetího řádu se vztahují k bodu styku nástroje a obráběného povrchu P_g .

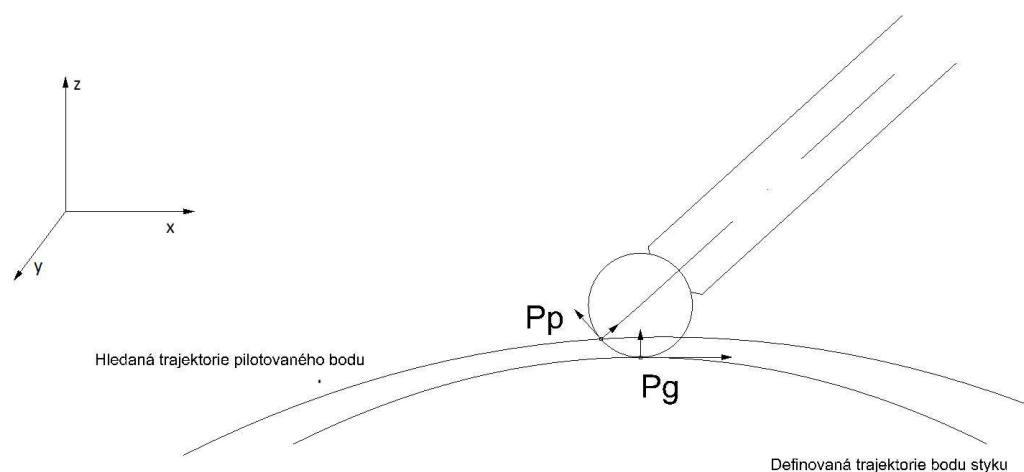


Obr. 3.12 Grafické znázornění obráběné plochy.

Trajektorie jednotlivých průjezdů definované pomocí polynomů:

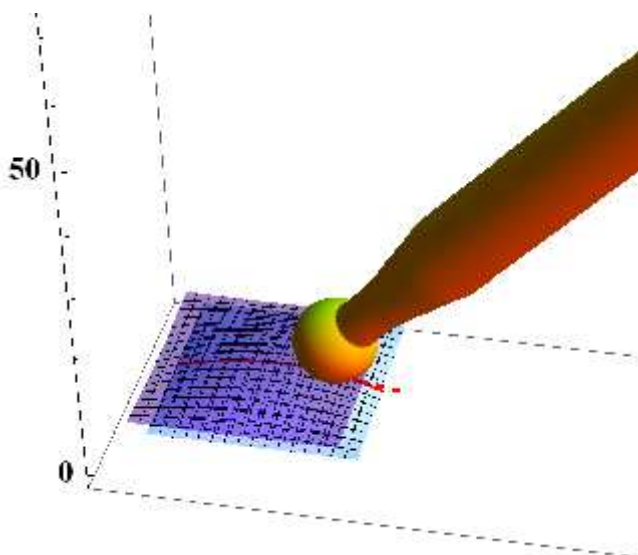
$$\begin{aligned} & \{30t, 0, 0.\} \\ & \{30t, 4, 0.+5.2 t-5.2 t^2\} \\ & \{30t, 8, 0.+8.8 t-8.8 t^2\} \\ & \{30t, 12, 0._+10.8 t-10.8 t^2\} \\ & \{30t, 16, 0._+11.2 t-11.2 t^2\} \\ & \{30t, 20, 0._+10. t-10. t^2\} \\ & \{30t, 24, 0._+7.2 t-7.2 t^2\} \\ & \{30t, 28, 0._+2.8 t-2.8 t^2\} \end{aligned}$$

Další myšlenkou bylo přenést tyto polynomiální definice z bodu styku do nulového bodu nástroje Pp, neboli pilotovaného bodu, který leží na čele v ose frézy. Toho bylo dosaženo díky transformacím souřadnic a poté pomocí inverzní kinematiky, která transformuje souřadný systém vázaný k obrobku na souřadný systém stroje.



Obr. 3.13 Transformace souřadnic.

Při tomto kroku se vyskytly problémy, jelikož při posouvání souřadného systému z bodu styku P_g do nulového bodu nástroje P_p a po následné aplikaci inverzní kinematiky u některých křivek definujících dráhu nástroje nebyly zachovány polynomy třetího stupně, které jsou nutné pro další tvorbu CNC programu. Namísto nich byly některé části křivek definované racionálními funkcemi, se kterými nebylo možné dále pracovat.



Obr. 3.14 Modelování polohy frézy vůči obrobku.

Výstup z programu Mathematica, ukázka polynomu definujícího dráhu pilotovaného bodu:

$$(16328.2_-8052.27 u+8052.27 u^2)/(1026.56_-506.25 u+506.25 u^2)$$

Od tohoto postupu muselo být upuštěno a byla nalezena nová alternativa. Touto alternativou bylo kontinuální obrábění, kdy byla během obrábění osa vždy shodná s normálou povrchu, což vedlo ke shodě bodu styku s nulovým bodem nástroje.

3.3.2 Polynomiální interpolace při kontinuálním obrábění

Kontinuální obrábění, během kterého jsou využívány jak translační, tak obě rotační osy během celého procesu obrábění (obě rotační osy ve stole), umožňuje aplikovat zjednodušený model, kdy je během obrábění osa nástroje vždy shodná s normálou povrchu, tudíž bod styku je shodný s nulovým bodem nástroje. Díky tomuto postupu není nutné transformovat souřadnice z bodu styku P_g do nulového bodu nástroje P_p . Je tedy možné vytvořit zjednodušený program, kdy je polynomiální definice pomocí polynomu třetího stupně vytvořena přímo pro bod P_p .

Na rozdíl od předchozího řešení jsou tedy úhly sklonu nástroje vůči normále k povrchu nulové ($\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$). Byl tedy generován nový algoritmus v programu Mathematica, viz. Příloha 3 této práce, jehož jádro zůstalo stejné až do bodu, kdy je definována funkce post-processoru, viz extrakt algoritmu z programu Mathematica:

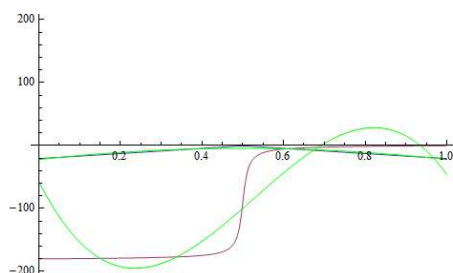
```
FonctionPostPro[Vecteur_] := If[Vecteur[[3]] == 1, {-180 / Pi * ArcCos[Vecteur[[3]]], 0},
{-180 / Pi * ArcCos[Vecteur[[3]]], +180 / Pi * ArcTan[Vecteur[[1]], Vecteur[[2]]]}]
FonctionPostProB[Vecteur_] := -180 / Pi * ArcCos[Vecteur[[3]]]
FonctionPostProC[Vecteur_] := If[Vecteur[[3]] == 1, 0, +180 / Pi * ArcTan[Vecteur[[1]], Vecteur[[2]]]]
```

Proposition 2 : interpolation polynomiale

```
FonctionB[u_, v_] = N[FonctionPostProB[VecteurNormalNorme[u, v]]];
FonctionC[u_, v_] = N[FonctionPostProC[VecteurNormalNorme[u, v]]];

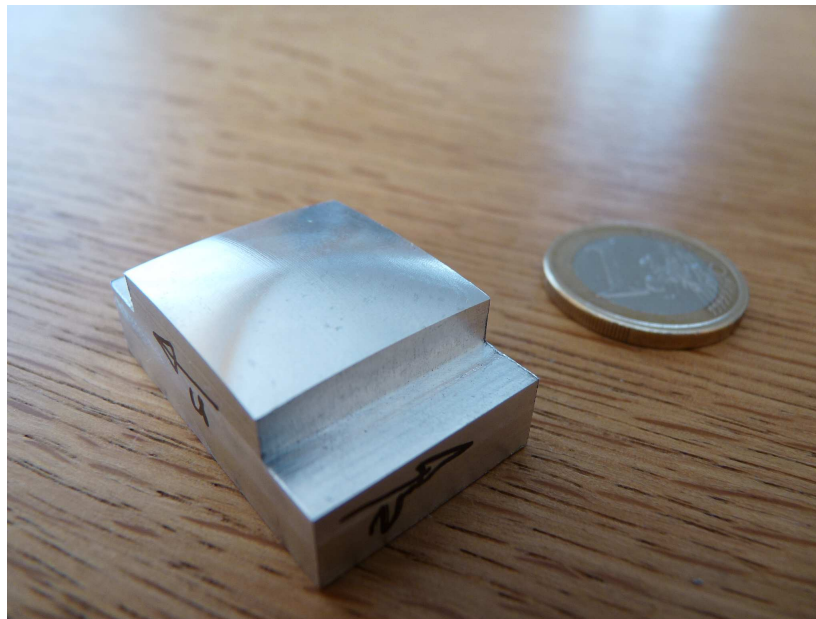
PolynomeAproximatifB[u_, v_] = Fit[Table[{i / 10, FonctionB[i / 10, v]}, {i, 0, 10}], {1, u, u^2, u^3}, u];
PolynomeAproximatifC[u_, v_] = Fit[Table[{i / 100, FonctionC[i / 100, v]}, {i, 0, 100}], {1, u, u^2, u^3}, u];

vTest = 0.49;
PolynomeAproximatifB[u_] = Fit[Table[{i / 10, FonctionB[i / 10, vTest]}, {i, 0, 10}], {1, u, u^2, u^3}, u];
PolynomeAproximatifC[u_] = Fit[Table[{i / 50, FonctionC[i / 50, vTest]}, {i, 0, 50}], {1, u, u^2, u^3}, u];
GraphPolynomeAprox2 = Plot[{PolynomeAproximatifB[t], PolynomeAproximatifC[t]}, {t, 0, 1}, PlotStyle -> {Green}];
Show[Plot[{FonctionB[u, vTest], FonctionC[u, vTest]}, {u, 0, 1}], GraphPolynomeAprox2, PlotRange -> {{0, 1}, {-200, 200}}]
```



Díky této části programu je možné, pomocí aproximativního řešení, definovat polynomiální interpolace pro rotační osy B, C. Následně, také za pomoci programu Mathematica, byla provedena generace CNC programů (řídící systém Heidenhain) pro hrubování ve 3 osách a dokončování v 5-ti osách viz Příloha 3 a Příloha 4 této práce. CNC program je následujícího tvaru:

```
První řádek: L počáteční bod B C F  
Druhý řádek: SPL koncový bod B C bez F  
K3X K2X K1X  
K3Y...  
K3Z...  
K3B...  
K3C... K1C F  
L Z30 B C (vzdálený koncový bod) Fmax  
L (vzdálený počáteční bod) B C Z30 Fmax
```



Obr. 3.15 Obrobená součást.

4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

4.1 2D: Lineární trajektorie a spline interpolace

Naměřené hodnoty byly zatíženy odchylkou měření pomocí sondy o průměru 5mm. Pro toto měření nebylo bráno v úvahu, že normála povrchu není vždy shodná s pomyslnou normálou snímacího hrotu.

Pokud je tato chyba pominuta, je dle očekávání zřejmé, že A-spline a C-spline prochází zadanými body, naopak B-spline, i když mu byla v některých bodech definována největší váha bodu ($PW=3$), se ani zdaleka neblíží zadaným bodům.

Je-li tato křivka definována malým počtem bodů, B-spline je naprosto nevhodným řešením. Nejvhodnějším se naopak zdá C-spline, který se nejvíce blíží očekávané křivce.

Mezi body (300,2) a (320,2) byla požadována lineární trajektorii, kterou není možné dosáhnout ani jedním z těchto splinů.

4.2 2D Polynomiální trajektorie nástroje

Pro úseky 1, 2, 3 bylo proložení bodů pomocí Bézierových křivek bezproblémové, jak je vidět na grafické interpretaci, tak na finálním obrobku. Pro zbývající úseky nejsou výsledné křivky ideální, protože bylo nutné vyhnout se smyčkám a reverzním tečnám, které program generoval. V těchto úsecích není možné ideálně upravit tečny udávající směr křivek tak, aby procházely zadanými body a zároveň zaručovaly spojitost a dodržení požadované trajektorie.

Pro tento druh polynomiálního obrábění byl definován příliš malý počet kontrolních bodů, aby mohlo být dosaženo ideálního výsledku. Tento druh polynomiální interpretace tedy není vhodný pro křivky, které nejsou definovány velkým počtem bodů.

Neoptimálněji lze využít 2D polynomiálního obrábění, pokud jsou koeficienty polynomů definujících křivku dodány přímo z CAD systémů.

4.3 Polynomiální interpolace v 5-ti osách

Byly definovány 2 způsoby generace polynomiální trajektorie pro 5-ti osá obráběcí centra. První možností bylo zavést polynomiální interpolaci s pevně definovanými úhly sklonu nástroje vůči normále k povrchu. Tento způsob, však dále nebyl použitelný, protože během transformace souřadnic z bodu styku do nulového bodu stroje nebyly zachovány polynomy třetího stupně. Byla tedy zvolena polynomiální interpolace při kontinuálním obrábění, kdy bude osa nástroje vždy shodná s normálou povrchu. Tímto se zamezilo nutnosti použití transformace souřadnic z bodu styku do nulového bodu nástroje.

Byly určeny řezné podmínky a na obráběcím centru MIKRON HSM600U s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 bylo realizováno frézování. Hrubování bylo provedeno ve 3 osách, dokončování poté v 5-ti osách.

Finální obrobená plocha, Obr. 3.15, má rozměry 23 x 23 mm, přestože program byl definován pro plochu o rozměrech 30x30 mm. Tento rozdíl byl zaveden záměrně, aby nedošlo ke kolizi nástroje s obrobkem.

Výhodou tohoto druhu polynomiální interpolace vyžaduje velice náročnou matematickou přípravu pro získání finálního obrobku.

ZÁVĚR

Tato práce představuje přehled možností generování trajektorie nástroje pro pětiosá obráběcí centra. V experimentální části byly aplikovány vybrané způsoby polynomiální a spline interpolace pro řídicí systémy Heidenhain a Siemens Sinumerik.

V případě standardního modelu automatizované přípravy výroby (v práci uváděno také jako numerický řetězec) dochází v průběhu převádění mezi systémy CAD, CAM a následně NC systémy ke ztrátě dat. Tato ztráta je způsobena nutností specifikace mnoha proměnných parametrů pro jednotlivé systémy.

Oproti tomu pomocí externí polynomiální interpolace je možné stanovit přesnou matematickou definici požadované obráběné plochy, a tím zbavit řídicí systémy nutnosti práce s neúměrným množstvím použitých parametrů a dat. Díky tomu není operační paměť systému natolik zatěžována a systém lépe interpoluje požadované dráhy na obrobku. Sestavení matematické definice je však časově velmi náročné a vyžaduje stanovení velkého množství bodů, zvl. pro vyšší požadované přesnosti vyráběných rozměrů.

Na základě analýzy provedených experimentů lze konstatovat, že pro pětiosé CNC obrábění je tento postup příliš zdlouhavý. Pro běžnou výrobu tudíž zůstává nejvhodnějším způsobem obrábění lineární interpolací.

Výhoda aplikace polynomiální interpolace může být patrna např. v technologii svařování pomocí robotů. U tohoto výrobního postupu je nutná přesná definice trajektorie elektrod, která není natolik komplexní, jako u obrábění plochy. Z toho důvodu není nutné generovat příliš velký počet křivek, a tímto klesne i celková časová náročnost aplikace polynomiální metody.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- 1) MÉRY, Bernard. *Machines à commande numérique: de l'étude des structures à la maîtrise du langage*. Paris: Hermès, 1997. ISBN 28-660-1607-6.
- 2) ALTINTAS, Y. *Computer Numerical Control of High Speed 5-Axis CNC Machine Tools*. pp. 27-48. In: *Innovations of Sustainable Production for Green Mobility Energy-Efficient Technologies in Production*. 3rd International Chemnitz Manufacturing Colloquium ICMC 2014. Chemnitz, 2014, pp. 27-48. ISBN 978-3-957-004-6.
- 3) CHUDOBA, Milan. *Základy programování a obsluha CNC strojů: Učební text*. STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA, JIHLAVA. 2012. Dostupné z: http://www2.sps-jia.cz/~hill/zakl_progr.pdf
- 4) POULACHON, Gérard, Patric GHIDOSSI, José OUTEIRO a David PRAT. *Procedes et moyens de fabrication: Support de cours- TPS*. Cluny, 2013.
- 5) VAVRUŠKA, P. *Machine tool control systems and interpolations of spline type*. *Engineering MECHANICS*, Vol. 19, 2012, No. 4, p. 219–229
- 6) VAVRUŠKA, P. *Postprocesing a výroba tvarobě složitých ploch*. In: J. MORAVEC, ed. *Sborník Konference studentské tvůrčí činnosti - STČ 2009* [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2009 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/VavruskaPetr-319830.pdf>
- 7) ROCHE, Sylvain. *La chaîne CFAO*. [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://marauder77150.free.fr/cfao.htm>
- 8) BRECHER, Christian, Wolfram LOHSE a Wenkai ZHU. *Evaluation of toolpath quality: User-assisted CAM for complex milling processes*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2013, vol. 6, issue 4, s. 1797-1797. DOI: <http://dx.doi.org/10.3403/02922995>
- 9) POLZER, Aleš. *Funkce řídicího systému Sinumerik 810D: Studijní opora*. VUT Brno. Dostupné z: <http://cadcam.fme.vutbr.cz/sinutrain/5.pdf>
- 10) Eyup Bagci. *Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies*. *Advances in Engineering Software* 40 (2009), pp. 407–418. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/advengsoft
- 11) MOTAVALLI, S. *Review of Reverse Engineering Approaches*. *Computers ind. Engng* Vol. 35, Nos 1-2, pp. 25-28, 1998.

12) SENCER, Burak. *Five-axis trajectory generation methods*. Istanbul, 2003. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied sc. Istanbul Technical University.

13) Sinumerik 840 sl / 828 D. Pro pokročilé. Siemens. Nürnberg: Siemens AG, 2010. p. 822.

14) BASTL, Bohumír. *B-spline, NURBS křivky: KMA/GPM – Geometrické a počítačové modelování*. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: http://geometrie.kma.zcu.cz/index.php/www/content/.../GPM_NURBS.pdf

15) LIMPOUCH, Jiří. *Aproximace funkcí: Interpolace a extrapolace: interpolační spline*. ČVUT Praha-fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2012. Dostupné z: <http://kfe.fjfi.cvut.cz/~limpouch/numet/aprox/node8.html>

16) iTNC 530, příručka uživatele – popisný dialog. Heidenhain. Traunreut: Heidenhain, 2005. p. 691.

17) FAVROLLES, Jean-Pierre. *Les surfaces complexes: pratique et applications*. Paris: Hermès, 1998. ISBN 28-660-1675-0.

18) Vargel, C., *Corrosion de l'aluminium*, 1. vydání Dunod, Paříž, 1999, ISBN 2- 10-004191-6

19) SADÍLEK, Marek. Strategie frézování naklopeným nástrojem. *MM průmyslové spektrum: rubrika Inovace*. 2005, č. 11. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/strategie-frezovani-naklopenym-nastrojem.html>

20) Langeron, J. M. et al.: *In A new format for 5-axis tool path computation, using B-spline curves*. Computer-Aided Design, Vol. 36, Issue 12, 2004, p. 1219-1229.

21) TOURNIER, Ch. *Usinage des aubes de roues de machines hydrauliques*. MEMOIRE DE RECHERCHE – Par Cédric CASTAGNETTI. Présenté à l'Université Pierre et Marie Curie, le 23 juin 2005. pp. 36

22) TOURNIER Ch., Castagnetti C., Lavernhe S., Avellan F. *Tool path generation and post-processor issues in five-axis high speed machining of hydro turbine blades*. In: Fifth International Conference on High Speed Machining, Metz. France (2006), Metz -14/15 et 16 Mars 2006, pp. 1-6

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CAD	[-]	Computer Aided Design (modelování geometrie součásti za pomoci počítače)
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing (modelování obráběcího procesu za pomoci počítače)
CL data	[-]	Cutter Location data (údaje o poloze nástroje)
CNC	[-]	Computer Numerical Control (číslicové řízení pomocí počítače)
DXF	[-]	Drawing Exchange Format (formát pro výměnu dat mezi CAD systémy vyvinutý firmou Autodesk)
EN	[-]	Evropská norma
IGES	[-]	International Graphics Exchange Specification (starší formát souborů používaný pro výměnu CAD dat)
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
NC	[-]	Numerical Control (číslicové řízení)
NURBS	[-]	Non-Uniform Rational Basis Splines (druh kubického splinu)
STEP	[-]	STandard for Exchange of Product model data (mezinárodní standard pro výměnu CAD dat, ISO 10303)
STL	[-]	STereoLitography (stereolitografie, formát pro CAD systémy)

Symbol	Jednotka	Popis
A	[-]	dorazový bod
A, B, C	[-]	rotační osy obráběcího stroje
C	[-]	výchozí bod programu
D	[mm]	průměr frézy
D_{ef max}	[mm]	efektivní průměr nástroje
Gx	[-]	přípravné funkce
M	[-]	nulový bod stroje
Mx	[-]	pomocné funkce
N	[min ⁻¹]	otáčky vřetena
P	[-]	nulový bod nástroje
R	[-]	referenční bod stroje
W	[-]	nulový bod obrobku
X, Y, Z	[-]	translační osy obráběcího centra
a_e	[mm]	radiální záběr nástroje (radiální šířka řezu)
a_p	[mm]	axiální záběr nástroje (axiální šířka řezu)

f_z	[mm]	posuv na zub
h_{\max}	[mm]	maximální tloušťka třísky
h_{\min}	[mm]	minimální tloušťka třísky
n	[-]	váha bodu u B-spline interpolace
\mathbf{o}_k	[-]	matice orientace osy nástroje
\mathbf{p}_k	[-]	matice polohy hrotu nástroje
\mathbf{u}, \mathbf{w}	[-]	geometrické interpolační parametry
\mathbf{v}_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
\mathbf{v}_f	[mm.min ⁻¹]	posuvová rychlost
z	[-]	počet zubů
β_f	[°]	úhel sklonu nástroje v úči normále k povrchu ve směru posuvu
β_n	[°]	úhel sklonu nástroje vůči normále k povrchu kolmý na směr posuvu

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Definování 2D polynomiálních trajektorií v programu Mathematica 8.0 – program vytvořen panem Ing. Davidem Pratem z francouzské Grande Ecole Art et Métiers ParisTech v Cluny.
- Příloha 2 Algoritmus generace 5D polynomiální trajektorie v programu Mathematica 8.0 s pevně definovanými úhly sklonu osy nástroje vůči normále k povrchu - program vytvořen panem Ing. Davidem Pratem z francouzské Grande Ecole Art et Métiers ParisTech v Cluny.
- Příloha 3 Algoritmus generace 5D polynomiální trajektorie v programu Mathematica 8.0 pro osu nástroje shodnou s normálou k povrchu - program vytvořen panem Ing. Davidem Pratem z francouzské Grande Ecole Art et Métiers ParisTech v Cluny.
- Příloha 4 NC program pro hrubování (3 osy)
- Příloha 5 NC program pro dokončování (5 os)