

# Vizualizace interpolovaných drah nástroje při pětiosém frézování

Marcel Pražák\*, Michal Stejskal

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, Horská 3, 128 00 Praha 2, Česká republika

## Abstrakt

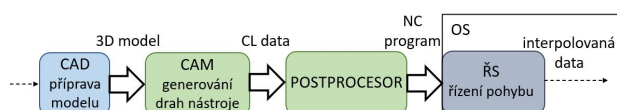
Simulace pětiosé dráhy nástroje v CAM systémech, editorech NC kódu nebo simulačních softwarech jsou značně zkrusleny vůči skutečné dráze nástroje zpracované řídicím systémem, zvláště při použití funkcí TCPM (tool center point management). To může v důsledku vést ke zhoršení očekávané jakosti a produktivity. Rešerše neodhalila žádný komerční univerzální vizualizační nástroj interpolovaných drah nástroje. Z těchto důvodů se článek zabývá tvorbou univerzálního vizualizačního nástroje v programu Matlab, který bude sloužit jako nástroj pro hodnocení kvality zvolené strategie obrábění a kvality navržených drah nástroje v CAM systémech ve vazbě na konkrétní obráběcí stroj. Grafické znázornění interpolovaných drah nástroje je realizováno na základě kinematických přepočtů k danému obráběcímu stroji.

*Klíčová slova:* řídicí systém; pětiosé obrábění; interpolace; kinematika obráběcího stroje

## 1. Úvod

Pětiosé frézování se využívá při obrábění tvarově komplexních dílců (např. kompresorová kola, lopatky). Tyto dílce jsou využívány v leteckém, kosmickém, automobilovém, tak i ve spotřebním průmyslu např. při výrobě forem, nástrojů. [1]

Příprava výroby na pětiosých obráběcích strojích je zpravidla realizována v CAM (Computer Aided Manufacturing) systémech. Vstupními daty je 3D model dílce a výkresová dokumentace z CAD (Computer Aided Design) systému. Trendem se stává PMI (Product and Manufacturing Information) kótování 3D modelu a tím přenášet tvary, tolerance i drsnosti v 3D modelu. V CAM systému se nastaví strategie obrábění, dále např. řezné podmínky, tolerance dráhy nástroje, a vygenerují se CL (Cutter Location) data. Poté se CL data importují do postprocesoru, který transformuje data z CAM systému na daný stroj. Postprocesor tedy vygeneruje NC (Numerical Control) kód pro daný stroj.



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

Výsledná přesnost, jakost, produktivita je ovlivněna volenými parametry (např. tolerance dráhy nástroje, strategie obrábění, řezné podmínky, aj.) a je závislá na tom, jak kvalitní data se předávají v jednotlivých procesech, zvláště při programování s funkcí TCPM. Z těchto důvodů je dobré data vizualizovat a kontrolovat v předvýrobní a výrobní fázi.

### 1.1. Vizualizační software

Dráha nástroje se dá vizualizovat na několika úrovních. CAM systémy vizualizují dráhu nástroje pomocí CL dat a tudíž neberou v úvahu obráběcí stroj, proto mohou být tato data značně zkreslující. CL data se dají vizualizovat v závislosti na různých parametrech (např. délka segmentu, úhel náběhu, úhel otočné osy,

rychlost rotační osy). Na úrovni NC programu vizualizují dráhu nástroje editory NC kódu a simulační software. Tyto programy simulují odebíraný materiál. Editory NC kódu a simulační software slouží především k optimalizaci dráhy nástroje.

Dále se dá vizualizovat dráha nástroje na úrovni ŘS (Řídicí Systém), kde je nutná znalost kinematiky stroje. Software Analyze My Workpiece od firmy Siemens nabízí možnost vizualizace a analýzy jak NC programů, tak i interpolovaných dat (data zpracována řídicím systémem z NC programu). Dráha nástroje se dá zobrazit v závislosti na vybraných parametrech (např. rychlost, křivost, zrychlení). Dále se dá dráha nástroje analyzovat (např. vzdálenosti bodů, rozložení rychlosti). Tento software je pouze pro stroje s řídicím systémem Siemens. [2]

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

### 1.2. Chování obráběcího stroje s funkcí TCPM

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

### 1.3. Cíl

Vizualizovat a analyzovat dráhy nástroje lze provádět na několika úrovních. Vizualizace v CAM systémech je univerzální, ale může se značně lišit od skutečné dráhy nástroje zpracované řídicím systémem, zvláště při použití funkce TCPM.

\*Kontakt na autora: Marcel.Prazak@fs.cvut.cz

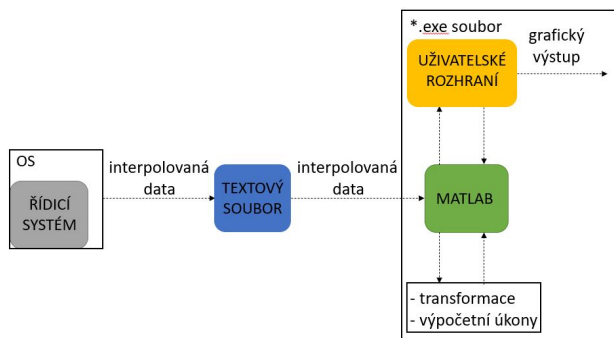
Editory NC kódu a simulační software neslouží primárně k vizualizaci a analýze dráhy nástroje, a proto nemají možnost vizualizace dráhy nástroje s dalšími parametry.

Vizualizace a analýza na úrovni ŘS z interpolovaných dat je možná v softwaru AnalyzeMyWorkpiece, ale tento software je pouze pro stroje s řídicím systémem Siemens. OKUMA nabízí možnost vizualizace dráhy nástroje, ale nejsou zde možnosti analýzy nebo navolení dalších parametrů.

Cílem je vytvořit analyzační nástroj interpolovaných dat z řídicího systému Heidenhain TNC 640 na stroji MCU 700. To vyžaduje tvorbu kinematického modelu, uživatelského prostředí, verifikaci navržených transformací a výpočtů.

## 2. Vizualizační nástroj

Vizualizační software je vytvořen v programu Matlab. Z ŘS obráběcího stroje se z měřítek zaznamenají pomocí funkce osciloskopu (TNCscope) interpolovaná data. Interpolovaná data se nahrají přes uživatelské rozhraní do vytvořeného vizualizačního softwaru, kde si uživatel vybere, které parametry se mají zobrazit. Schéma je na Obr. 2.



Obr. 2. Schéma řešení vizualizačního nástroje

### 2.1. Kinematika obráběcího stroje MCU 700VT-5X

Pětiosé vertikální centrum MCU 700 má tři translační osy a dvě rotační osy. Obě rotační osy jsou umístěné na stole stroje. Osa nástroje je vždy rovnoběžná s osou Z stroje.

Zavedeme transformační matice  $T(x; y; z)$ ,  $R_x(\alpha)$  a  $R_z(\gamma)$ . Dále zavedeme označení průvodiče  ${}^a r_{bL}$ , které značí průvodič bodu L z počátku souřadnicového systému b a se složkami vyjádřenými v souřadnicovém systému a.

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

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 2.2. Transformace interpolovaných dat

Interpolovaná data jsou zaznamenána ve strojním souřadnicovém systému. Na měřítkách stroje jsou zaznamenány polohy jednotlivých os s konstantním časovým krokem. Poloha osy Z zaznamenává čelo vřetena, to znamená, že pro polohu špičky nástroje se musí odečíst délková korekce. Schéma obráběcího stroje MCU 700 a souřadných systému je na Obr. 3. Transformace ze strojního souřadnicového systému ke špičce nástroje je:

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

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

Pro stroj MCU 700 platí transformace:

$${}^M r_{ML} = T_z(r) \cdot R_x(-\alpha) \cdot R_z(-\gamma) \cdot T_z(P) \cdot {}^W r_{WL} \quad (5)$$

Vzdálenost  $r$  je poloměr osy otáčení stolu,  $\alpha$  – naklonění osy A,  $\gamma$  – natočení osy C, vzdálenost  $P$  – posun obrobkového souřadného systému vůči strojnímu souřadného systému.

Pro výpočet průvodiče  ${}^W r_{WL}$  platí:

$${}^W r_{WL} = T_z(P)^{-1} \cdot R_z(-\gamma)^{-1} \cdot R_x(-\alpha)^{-1} \cdot T_z(r)^{-1} \cdot {}^M r_{ML} \quad (6)$$

### 2.3. Zobrazované parametry

Rychlosti translačních os se získají z pohybové osy a zaznamenaného času:

$$v_X = \frac{dX}{dt} \quad (7)$$

$$v_Y = \frac{dY}{dt} \quad (8)$$

$$v_Z = \frac{dZ}{dt} \quad (9)$$

Zrychlení translačních os jsou:

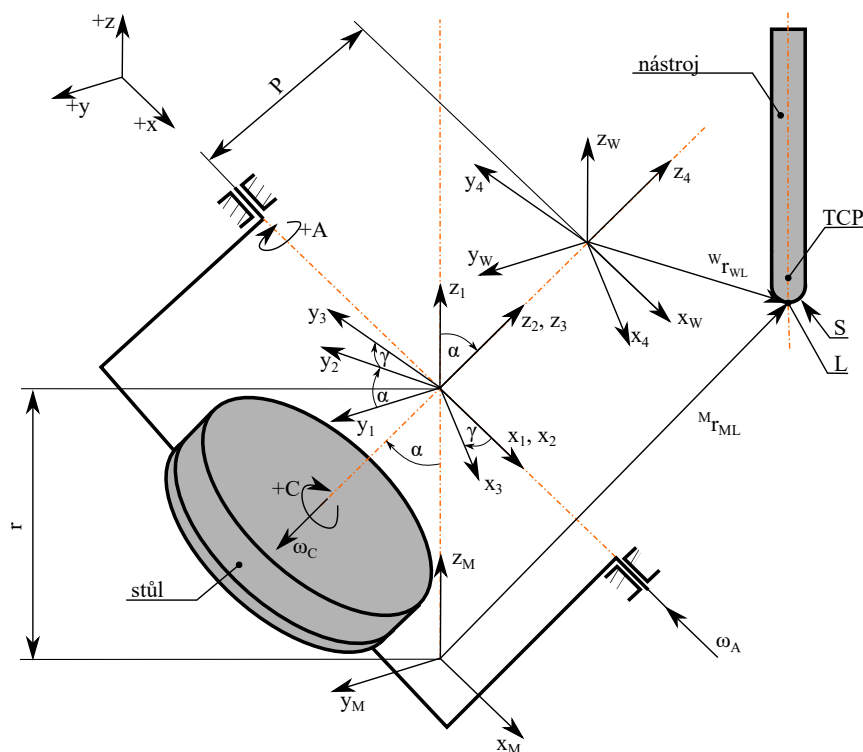
$$a_X = \frac{d^2 X}{dt^2} \quad (10)$$

$$a_Y = \frac{d^2 Y}{dt^2} \quad (11)$$

$$a_Z = \frac{d^2 Z}{dt^2} \quad (12)$$

Okamžitá úhlová rychlost je:

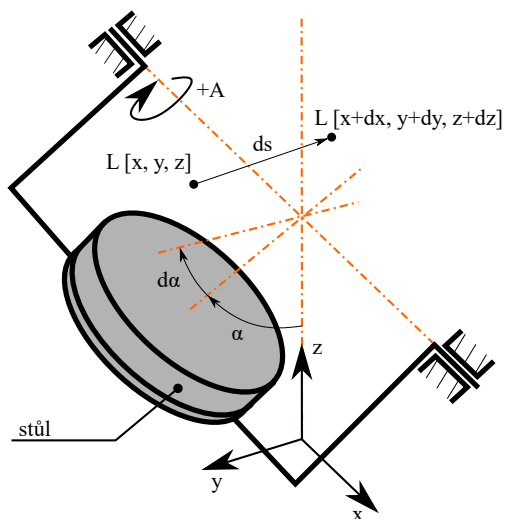
$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (13)$$



Obr. 3. Schéma kinematiky stroje MCU 700

Dalším parametrem je závislost změny naklonění rotační osy a změny polohy špičky nástroje. Schéma změny polohy špičky nástroje a změny polohy rotační osy je na Obr. 4. S větší změnou úhlu jsou kladeny větší nároky na rychlost rotačních os. Tím může posuvová rychlost v místě obrábění výrazně kolísat od nominální, žádané hodnoty. To může vést v případě odtlačeného nástroje řeznými silami k relaxaci „narovnání“ nástroje a tím vzniku nežádoucího podřezu.

$$N = \frac{d\alpha}{ds} \quad (14)$$



Obr. 4. Schéma změny naklonění rotační osy a změny polohy špičky nástroje

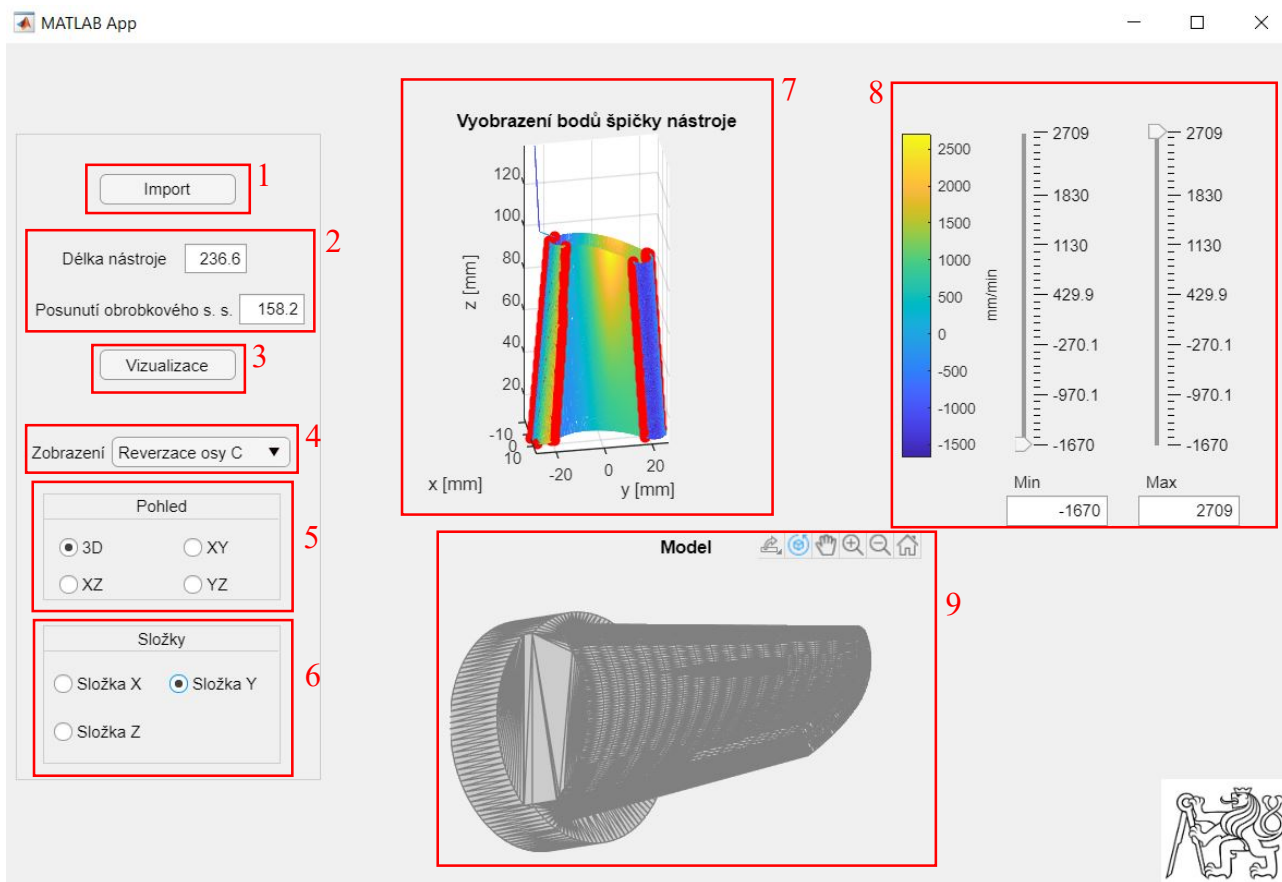
Mezi další zobrazované parametry je naklonění rotační osy A a natočení rotační osy C. Pro lepší kvalitu povrchu by změny smyslu otáčení rotačních os měly být plynulé.

Reverzace os mohou mít vliv na kvalitu povrchu a přesnost.

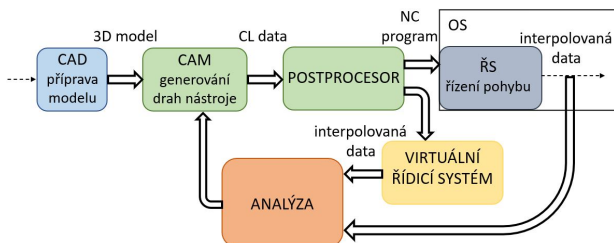
## 2.4. Vývoj vizualizačního nástroje

Data jsou sbírána z měřítka stroje každé 3 ms. Uložená interpolovaná data se transformují do obrobkového souřadného systému. Poté se provede výpočet zobrazovaných parametrů (rychlost, zrychlení, závislost změny naklonění rotační osy a změny polohy špičky nástroje, naklonění a natočení, reverzace rotačních os). Nakonec se vykreslí dráha nástroje s parametry v uživatelském prostředí.

V datech jsou zaznamenány polohy jednotlivých os a také čas. Do vizualizačního nástroje vstupují tato data ve formátu \*.mat. V programu Matlab jsou provedeny transformace špičky nástroje a výpočty zobrazovaných parametrů. Další možností jak získat interpolovaná data je přes virtuální řídicí systém. Tato data jdou také zobrazit ve vizualizačním nástroji a analyzovat možné chyby. Při zjištění nedostatků je možné zasáhnout do procesu příprav výroby např. změnou CAD, strategie obrábění, řezného nástroje aj. Schéma je na Obr. 6.



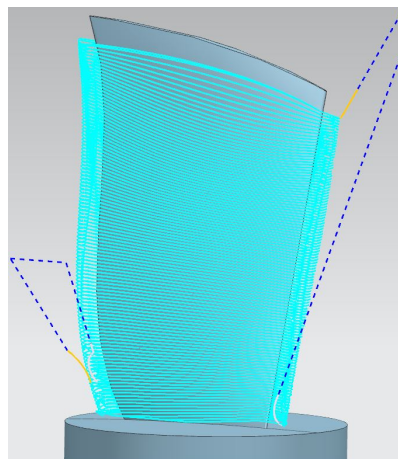
Obr. 5. Uživatelské prostředí vizualizačního nástroje



Obr. 6. Schéma přípravy výroby od 3D modelu po ŘS s vizualizačním nástrojem

### 3. Případové studie

Dráhy nástroje byly připraveny v CAM systému Siemens NX 12.0, na Obr. 7. V CAM systému vypadá dráha nástroje v pořádku. Lopatka byla obrobena na stroji MCU 700, výsledek je na Obr. 8. Na lopatce se vyskytly chyby, proto se do vizualizačního nástroje importovala interpolovaná data. Po zobrazení parametru „Reverzace osy C“ je vidět velké množství reverzací osy C na okrajích lopatky, Obr. 9. Reverzace osy C může být jedna z příčin špatného povrchu lopatky. Další postup by byla snaha např. upravit dráhy nástroje v CAM systému, tak aby se optimalizovala dráha pro rotační osu C.



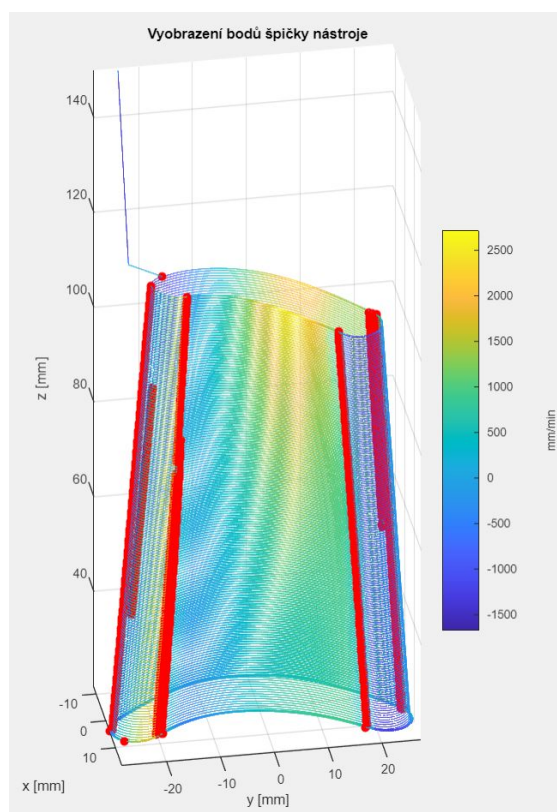
Obr. 7. Dráhy nástroje v CAM systému NX 12

### 2.5. Uživatelské rozhraní

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



Obr. 8. Testovací lopatka obrobená na stroji MCU 700 VT-5X



Obr. 9. Dráhy nástroje ve vizualizačním nástroji

#### 4. Závěr

Tento článek měl seznámit s možnostmi vizualizace a analýzy drah nástroje. Cílem bylo vytvořit univerzální vizualizační nástroj pro interpolované dráhy

nástroje. Pro správnou vizualizaci dráhy nástroje bylo potřeba vytvořit kinematický model obráběcího stroje MCU 700 a vytvořit transformační model.

Poté byl vytvořen vizualizační nástroj v programu Matlab. Z interpolovaných dat se transformuje dráha nástroje ze strojního souřadnicového systému do obrobkového souřadnicového systému. Vizualizace dráhy nástroje je možná s závislostí na rychlosti translačních os, zrychlení translačních os, úhlové rychlosti rotačních os, změně naklonění rotační osy a změně polohy špičky nástroje, naklonění rotační osy A, natočení rotační osy C nebo na reverzaci os.

Navržený vizualizační nástroj byl aplikován při hledání možných příčin nekvalit na povrchu Blisk lopatky při pětiosém obrábění na stroji MCU 700 VT-5X.

#### Seznam symbolů

$a_X$	zrychlení translační osy X (mm/min <sup>2</sup> )
$a_Y$	zrychlení translační osy Y (mm/min <sup>2</sup> )
$a_Z$	zrychlení translační osy Z (mm/min <sup>2</sup> )
$M_{r_{ML}}$	průvodič bodu L ze strojního souřadnicového systému (-)
$W_{r_{WL}}$	průvodič bodu L z obrobkového souřadnicového systému (-)
$t$	čas (min)
$T_{12}, T_{23}, T_{34}$	transformační matice (-)
$T_{4W}, T_{M1}$	transformační matice (-)
$R_x, R_z, T_z$	transformační matice (-)
$v_X$	rychlost translační osy X (mm/min)
$v_Y$	rychlost translační osy Y (mm/min)
$v_Z$	rychlost translační osy Z (mm/min)
$X$	poloha translační osy X (mm)
$Y$	poloha translační osy Y (mm)
$Z$	poloha translační osy Z (mm)
$\alpha$	naklonění rotační osy A (rad)
$\gamma$	natočení rotační osy C (rad)
$\varphi$	úhel natočení rotační osy (rad)
$\omega$	okamžitá úhlová rychlost (rad/min)

#### Literatura

- [1] Ali Lasemi, Deyi Xue a Peihua Gu. *Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review*. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448510000631> (cit. 29. 11. 2020).
- [2] Siemens. *SINUMERIK Analyze MyWorkpiece/Toolpath*. 2019. Dostupné z: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/636/109772636/att\\_1001363/v1/AMWT\\_Tool\\_enUS\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/636/109772636/att_1001363/v1/AMWT_Tool_enUS_en-US.pdf) (cit. 03. 11. 2020).
- [3] *Manuál Okuma - SPECIAL FUNCTIONS MANUAL (ME32-128-R03)*. 3rd Edition. 2014.