

PŘEHLED PLÁNOVÁNÍ TRAJEKTORIE PRO ROBOTA PŘI LAKOVÁNÍ

Petr Lisník

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
Ústav automatizace a informatiky
Technická 2896/2, Brno 616 69, Česká republika
Petr.Lisnik@vutbr.cz

Abstrakt: Plánování trajektorie pro robotické lakování je klíčové v automatickém lakování. Existují různé metody plánování trajektorie, včetně ručního nastavování bodů, metody teach-in a učení robota na základě ukázky. Automatické generování trajektorie na základě CAD modelů je další pokročilá technika, která umožňuje efektivní a přesné plánování. Simulace a optimalizace jsou klíčovými prvky tohoto procesu, které umožňují předvídat a optimalizovat distribuci barvy. Tento přehled shrnuje hlavní metody plánování trajektorie a zdůrazňuje význam simulace a optimalizace při automatickém generování trajektorie pro robotické lakování.

Klíčová slova: automatické lakování, plánování a generování trajektorie, učení robota, optimalizace, simulace.

1 Úvod

Automatické lakování přináší řadu výhod nejen z hlediska efektivity a přesnosti procesu, ale také z pohledu bezpečnosti a komfortu pro operátora. Díky automatizaci lakovacího procesu není lidský personál vystaven riziku spojenému s prací v prostředí s laky a rozpouštědly. To zahrnuje možná zdravotní rizika spojená s vdechováním škodlivých výparů nebo práškových částic, dále kontakt s chemikáliemi jako jsou organické rozpouštědla a těkavé sloučeniny obsažené v lakovacích materiálech. Automatizace také zajišťuje konzistentní kvalitu lakování a minimalizuje chyby způsobené lidskými faktory, což v konečném důsledku přispívá k výraznému zlepšení celkového výstupu lakovacího procesu.

V průmyslovém prostředí, zejména v oblasti automobilového průmyslu a dalších odvětvích, kde je lakování klíčovou součástí výrobního procesu, hraje plánování trajektorie při robotickém lakování zásadní roli. Efektivní a přesné plánování trajektorie umožňuje robotům aplikovat lakovací materiál s vysokou přesností, což vede k dosažení optimální kvality povrchu a minimalizaci odpadu materiálu. V posledních letech se stále více prosazuje automatizovaný přístup k plánování trajektorie na základě CAD modelů, který nabízí výhody v podobě zrychlení procesu, snížení lidské chybovosti a zvýšení konzistence výsledků. Avšak ruční plánování trajektorie stále zůstává důležitou možností, zejména v situacích, kde je zapotřebí flexibilita nebo kde není možné plně spoléhat na automatické algoritmy. Tento přístup také může často vést k lepšímu splnění požadavků díky mnohaletým zkušenostem lakýrníků.

2 Manuální plánování trajektorie

Ruční plánování trajektorie při robotickém lakování představuje proces, kdy operátor manuálně definuje trajektorii, kterou robot následně sleduje při aplikaci lakovacího materiálu. Existuje několik přístupů a technologií, které umožňují operátorům provádět ruční plánování trajektorie s různými úrovněmi kontroly a automatizace. Všechny tyto metody jsou závislé na zkušenostech a schopnostech operátorů (lakýrníků).

2.1 Manuální nastavování průjezdných bodů

Tato technologie umožňuje operátorům manuálně definovat trajektorii online přímo na robotovi (manuální nastavení bodů pomocí teachpendantu) nebo off-line pomocí simulačního softwaru. Operátor ručně zadává body trajektorie nebo definuje trajektorii pomocí grafického rozhraní. Tento přístup je flexibilní a umožňuje detailní plánování a snadné úpravy trajektorie v průběhu jejího vytváření. Je možné vytvářet i složitější trajektorie, ale vyžaduje to určitou úroveň odbornosti a roste časová náročnost. Při této metodě je nutné dělat kompromis mezi přesností (výslednou kvalitou) a časovou náročností při vytváření trajektorie. Off-line vytváření trajektorie je možné i mimo pracovní dobu robota. Celkově ruční plánování vede k menší přesnosti v porovnání s automatizovanými metodami.

2.2 Teach-In metoda

Teach-In metoda je další technologií ručního plánování trajektorie, která umožňuje operátorovi interaktivně definovat trajektorii. Během této metody operátor fyzicky vede robota po požadované trajektorii, zatímco robot zaznamenává svůj pohyb. Pro tuto metodu je nutné použití kolaborativního robota. Výsledná trajektorie má pouze omezenou přesnost, protože při vedení klade robot určitý odpor, který se může průběžně měnit na jeho poloze, což stěžuje tvorbu trajektorie operátorovi. Výhodou této metody je hlavně jednoduchost a intuitivnost, ale za cenu nízké přesnosti.

2.3 Učení robota na základě ukázky

Princip spočívá ve sledování pohybu lakýrníka a zaznamenávání polohy při klasickém ručním lakování. Poloha a pohyb lakovací pistole jsou zaznamenány pomocí různých senzorů, jako jsou velometry, akcelerometry a jiné nebo pomocí kamerových systémů. Zaznamenaný pohyb je poté digitalizován a zpracován, aby mohla být vytvořena trajektorie pro robotický systém. Mezi výhody této technologie patří jednoduchost použití, jelikož operátor nemusí speciálně programovat trajektorii, ale pouze provádí lakování. Po vytvoření se správnost trajektorie ověří v simulačním programu, kde je možné ji dále upravovat.[10]

Správnost, preciznost této metody je ovlivněna samotným lakýrníkem, neboť robot pouze opakuje jeho pohyb. Jednou z nevýhod je závislost na senzorech, jelikož přesnost a spolehlivost této metody může být ovlivněna kvalitou a kalibrací použitých senzorů. Pro minimalizaci těchto nevýhod je důležité používat spolehlivé senzory a zajistit jejich správnou kalibraci, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků při plánování trajektorie.

3 Automatické generování trajektorie na základě CAD modelu

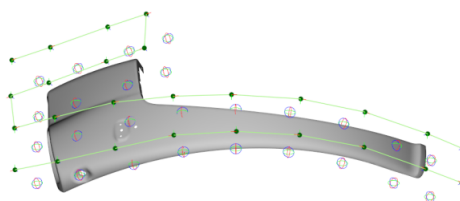
Automatické generování trajektorie na základě CAD modelu je technika využívaná v průmyslovém lakování, která umožňuje automaticky generovat trajektorii pro robota na základě digitálního 3D modelu objektu. Plánování dráhy lakování pro průmyslové roboty je zásadní pro rovnoměrné rozložení barvy, dobu cyklu procesu a minimalizaci ztrát materiálu atd. Plánování dráhy je časově náročný a nákladný proces, který způsobuje jednu z překážek v automatizaci výroby. V současné době neexistuje univerzální nástroj, který by byl schopen vygenerovat trajektorii pro libovolný objekt. V akademické sféře i v průmyslu stále probíhá vývoj tohoto nástroje. Pro automatické generování dráhy robota pro lakování je třeba porozumět procesu a parametrům dráhy, které určují rozložení barvy. Ty jsou popsány níže.[2, 12, 7]

3.1 Model dílu

V automatizovaném plánování trajektorie pro lakování se obvykle používají dva hlavní typy CAD modelů: parametrické a síťové. Parametrické modely poskytují přesnou reprezentaci geometrie dílu a zahrnují všechny potřebné informace, zatímco síťové modely nabízejí jednoduchou metodu modelování, ale chybí jim detaily o materiálových vlastnostech a geometrických prvcích (například hrany). Síťové modely mohou být snadno analyzovány, ale obsahují velké množství dat, kde se mohou vyskytovat chyby. Parametrické modely obsahují mnoho redundantních informací a mohou být obtížné analyzovat, zejména u složitých dílů s mnoha malými plochami.[2]

3.2 Plánování dráhy nástroje

Plánování dráhy začíná vytvořením rastru ve 2D prostoru. Vzdálenost bodů v rastru je určena modelem lakovací pistole a rozložením barvy. Tento rastr se poté nanese na danou součást, jak lze vidět na obrázcích 1. Nyní máme povrch charakterizovaný jednotlivými body rastru. Tato metoda předpokládá, že rychlost lakování je v každém bodě konstantní. V případě složitých dílů je nutné provést zjednodušení a aproximaci povrchu. Při aproximaci dochází ke ztrátě informací a může docházet k odchylkám v rozložení barvy.[8, 4]

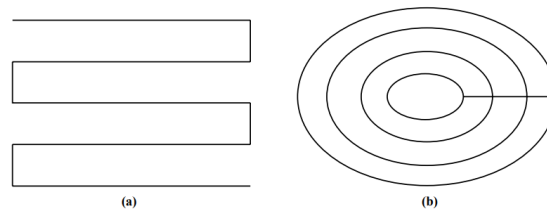


Obrázek 1: Rastrová křivka promítnutá dolů na povrch[8]

3.3 Model lakovací pistole, distribuce barvy a vzor nanášení

Model nástroje nebo model distribuce barvy se používá pro dvě hlavní účely: pro plánování cesty barvy a pro simulaci distribuce barvy po vygenerování cesty barvy. Existují 2 metody nanášení, klasický vzduchový postřik a elektrostatické rozprašování.[13] Přesnost modelu nanášení barvy je důležitá, protože určuje konečnou kvalitu barvy na dílu. Barva na rovném povrchu je zásadní pro automatické plánování dráhy nátěru. Různé modely nástrojů se používají při plánování dráhy, např. jednoduchý konstantní profil, kruhový profil, parabolický profil. Důležité je rozložení nanesené barvy takovým modelem.

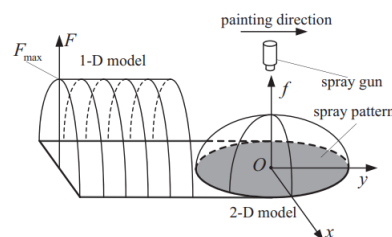
Nanášení materiálu může probíhat kontinuálně bez zastavení nástroje nebo diskontinuálně zapínáním a vypínáním nástroje. Dva hlavní způsoby nanášení materiálu, vzory rastrové a spirálové lze vidět na obrázku 2. Dále se budeme zabývat jen rastrovým vzorem.[2, 6]



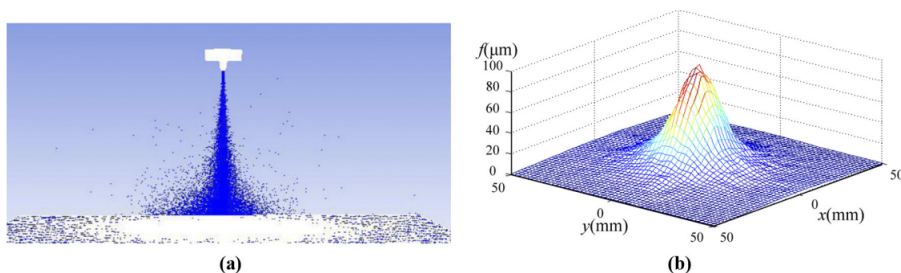
Obrázek 2: Vzory nanášení materiálu: (a) rastrový vzor, (b) spirálový vzor[3]

3.4 Simulace nanášení barvy

Simulace nanášení barvy se stala klíčovým prvkem v plánování trajektorií pro robotické malování. Existují dva hlavní přístupy k této simulaci: explicitní funkční metoda a metoda založená na počítačové dynamice tekutin CFD (*computational fluid dynamics*). Explicitní funkční metoda vychází z experimentálních dat a vytváří explicitní model nanášení barvy na základě empirických funkcí. Model explicitního nanášení je zobrazen na obrázku 3. Na druhou stranu CFD metoda (obrázek 4) se zaměřuje na matematické modelování procesu stříkání barvy a umožňuje simulaci komplexních podmínek a povrchů. Z výzkumu [5] vyplývá, že CFD metoda se stává převažujícím trendem v simulaci nanášení barvy pro plánování trajektorií robotického malování. Avšak stále zůstává otázkou, jak přesně simulovat nanášení barvy na dynamicky se měnících površích, což vyžaduje vhodný CFD model a studium přístupů k dynamické simulaci malování. Tato simulace je klíčová pro optimalizaci plánovaných trajektorií a zajištění vysoce kvalitního nátěru.[5, 1]



Obrázek 3: Explicitní model nanášení barvy[5]



Obrázek 4: Vizualizace proudového pole při lakování metoda CFD(a) pole proudění, (b) rozložení tloušťky[5]

4 Metoda automatického lakování neznámých dílů

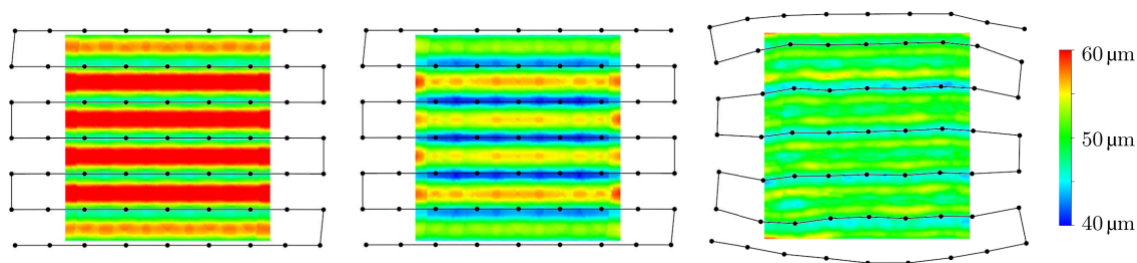
Tato metoda je poslední zmíněnou metodou v tomto přehledu a je taky technologicky nejnáročnější. Představuje přístup využívající snímkování k detekci geometrických prvků a automatickému generování trajektorií lakovacích robotů pro malé šarže s velkým počtem variant dílů. Experimenty ukázaly proveditelnost koncepce takového systému.[11]

5 Simulace a optimalizace

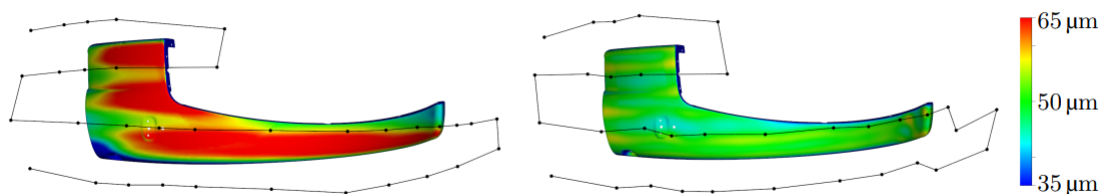
Využití simulace u manuálních metod při plánování trajektorie pro lakování přináší několik výhod, ale není možné u všech metod využít. Záleží na konkrétních metodách a zařízeních, které máme k dispozici. Hlavní výhoda, která je podstatou toho, proč se simulaci provádí, spočívá v možnosti detailního a interaktivního testování různých trajektorií před samotným prováděním lakování. Simulace umožňuje operátorům experimentovat s různými scénáři a upravovat trajektorii pro dosažení požadované kvality a efektivity. Dále simulace poskytuje prostředí pro školení a trénink operátorů, kteří se učí pracovat s novými metodami a technologiemi bez rizika poškození materiálů nebo zařízení. Navíc umožňuje simulace zachytit a vyhodnotit potenciální chyby nebo nedostatky v plánované trajektorii, což napomáhá minimalizaci ztrát a nežádoucích efektů při reálném provádění lakování. Celkově lze konstatovat, že simulace manuálních metod představuje důležitý nástroj pro zvyšování efektivity, bezpečnosti a kvality lakovacích procesů.

Při automatickém generování trajektorie pro lakování je simulace a optimalizace také klíčovým prvkem bez, kterého by se tyto metody neobešly. Simulace umožňuje předvídat, jak bude barva aplikována na díl, což umožňuje identifikovat potenciální problémy nebo nedostatky v distribuci barvy před samotným procesem lakování. To zahrnuje simulaci různých vzorů a metod aplikace barvy, aby se dosáhlo optimálního výsledku.

Optimalizace se pak zaměřuje na nalezení nejefektivnější trajektorie pro aplikaci barvy, která minimalizuje odpad a zvyšuje přesnost aplikace. To může zahrnovat optimalizaci rychlosti, úhlu a vzdálenosti nástroje v závislosti na geometrii a povrchu dílu. Proces optimalizace na jednoduchém čtvercovém plochem dílu můžete vidět na obrázku 5, na reálném dílu na obrázku 6. Je nutné podotknout, že tato optimalizace je zaměřená na rovnoměrnou tloušťku naneseného materiálu při konstantní rychlosti. Není zde optimalizace například na rychlost lakování nebo minimální ztrátu materiálu.[9, 8]



Obrázek 5: Optimalizace na testovacím čtverci[9]



Obrázek 6: Optimalizace na reálném dílu[9]

6 Závěr

Plánování trajektorie pro robotické lakování je klíčovým prvkem pro dosažení optimálního výsledku v průmyslovém lakování. Ruční plánování trajektorie poskytuje operátorům flexibilitu a kontrolu, zatímco automatické generování trajektorie na základě CAD modelů zvyšuje efektivitu a přesnost procesu. Simulace a optimalizace hrají klíčovou roli při dosahování optimální distribuce barvy a minimalizaci ztrát materiálu.

Pro dosažení nejlepších výsledků je důležité kombinovat různé metody plánování trajektorie v závislosti na konkrétních požadavcích a podmínkách výrobního prostředí.

V současném trendu automatizace se může očekávat, že bude prioritou co nejvíce využít automatické generování trajektorií. Realita však není tak jednoduchá. S nedostatkem kvalifikované pracovní síly, například pro opravu případných chyb v automatických procesech, se stává klíčovým cílem zjednodušení procesu. V této souvislosti nabývá velkého významu metoda Učení robota na základě ukázky. Zkušený lakýrník aplikuje lakovací materiál a robot poté pouze zopakuje jeho pohyb, což snižuje nároky na automatizaci a zvyšuje spolehlivost procesu. Tato metoda v kombinaci s využitím simulačního prostředí eliminuje potřebu zasahovat do samotného výrobního procesu a umožňuje provádět generování trajektorie a případné úpravy nebo optimalizace bez rizika výrobních přestávek.

Jednoduchost má v sobě také Teach-In metoda, ale vzhledem k požadavku na kolaborativního robota v kombinaci s nepřesnostmi, které mohou vznikat při vedení robota, není tato metoda tolik žádaná, ale i přes to nachází své využití.

Reference

- [1] ARIKAN, M. A. S., AND BALKAN, T. Process simulation and paint thickness measurement for Robotic Spray Painting. *CIRP Annals* 50, 1 (Jan. 2001), 291–294.
- [2] CHEN, H., FUHLBRIGGE, T., AND LI, X. Automated industrial robot path planning for spray painting process: A review. In *2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering* (2008), pp. 522–527.
- [3] CHEN, H., FUHLBRIGGE, T., AND LI, X. A review of CAD-based robot path planning for spray painting. *Industrial Robot: An International Journal* 36, 1 (Jan. 2009), 45–50. Publisher: Emerald Group Publishing Limited.
- [4] CHEN, W., AND ZHAO, D. Path Planning for Spray Painting Robot of Workpiece Surfaces. *Mathematical Problems in Engineering* 2013 (Aug. 2013), 659457. Publisher: Hindawi Publishing Corporation.
- [5] CHEN, Y., CHEN, W., LI, B., ZHANG, G., AND ZHANG, W. Paint thickness simulation for painting robot trajectory planning: a review. *Industrial Robot: An International Journal* 44, 5 (Jan. 2017), 629–638. Publisher: Emerald Publishing Limited.
- [6] DIAO, X., ZENG, S., AND TAM, V. W. Development of an optimal trajectory model for spray painting on a free surface. *Computers & Industrial Engineering* 57, 1 (2009), 209–216. Collaborative e-Work Networks in Industrial Engineering.
- [7] GASPARETTO, A., VIDONI, R., PILLAN, D., AND SACCAVINI, E. Automatic path and trajectory planning for robotic spray painting. In *ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics* (2012), pp. 1–6.
- [8] GLEESON, D., JAKOBSSON, S., SALMAN, R., EKSTEDT, F., SANDGREN, N., EDELVIK, F., CARLSON, J. S., AND LENNARTSON, B. Generating optimized trajectories for robotic spray painting. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 19, 3 (2022), 1380–1391.
- [9] GLEESON, D., JAKOBSSON, S., SALMAN, R., SANDGREN, N., EDELVIK, F., CARLSON, J. S., AND LENNARTSON, B. Robot spray painting trajectory optimization. In *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (2020), pp. 1135–1140.
- [10] Industrial robotics. *Robotic solution for spraying, coating and painting*. dostupné z: <https://industrialrobotics.lt/robotic-painting-coating-solution>.
- [11] PICHLER, A., VINCZE, M., ANDERSEN, H., MADSEN, O., AND HAUSLER, K. A method for automatic spray painting of unknown parts. In *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)* (2002), vol. 1, pp. 444–449 vol.1.
- [12] SHENG, W., XI, N., SONG, M., CHEN, Y., AND MACNEILLE, P. Automated cad-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces. In *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)* (2000), vol. 3, pp. 1918–1923 vol.3.
- [13] SUH, S.-H., WOO, I.-K., AND NOH, S.-K. Development of an automatic trajectory planning system (atps) for spray painting robots. In *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1991), pp. 1948–1955 vol.3.