

Energetický model tiskového robotu

Daniel Kajzr <daniel.kajzr@tul.cz>, Tomáš Myslivec, Josef Černohorský

Projekt se zabývá vytvořením energetického modelu tiskového robotu pro 3D tisk budov z betonu. Technologie 3D tisku budov z betonu je v současné době velmi aktuálním a rozvíjejícím se tématem a jeví se jako výhodná zejména z hlediska udržitelnosti výroby. Důležitým aspektem v posuzování udržitelnosti je energetická účinnost tiskového robotu. Tiskový robot při tisku spotřebovává značné množství energie, a proto je nezbytné znát model spotřeby elektrické energie, tzv. energetický model robotu. Energetický model robotu je klíčový zejména pro analýzu a zlepšení energetické účinnosti robotu. Další možné využití spočívá v predikci spotřeby elektrické energie při tisku konkrétních trajektorií a možnou optimalizaci těchto trajektorií za účelem snížení spotřeby el. energie. Pro tvorbu co nejrealističtějšího energetického modelu robotu je nezbytné provést identifikaci setrvačných parametrů a parametrů tření tiskového robotu. Následně je třeba navrhnout vhodný měřicí aparát pro možné vyhodnocení, respektive analýzu aktuální spotřeby robotu a provést porovnání modelované spotřeby s naměřenou spotřebou tiskového robotu.

Klíčová slova: energetický model, 3D tisk z betonových směsí, B&R, řízení založené na modelu

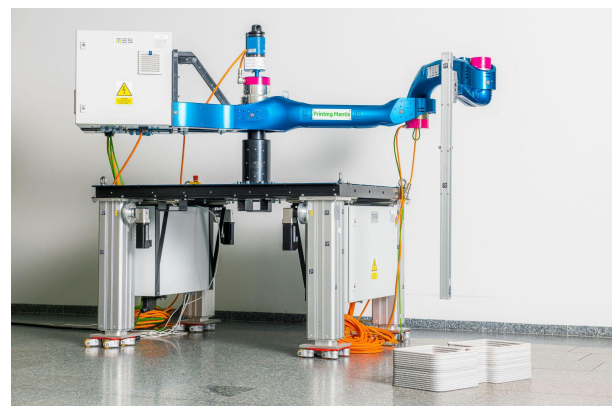
Úvod

Nízká energetická náročnost zařízení a minimální uhlíková stopa patří dnes mezi hlavní kritéria ke splnění klimatické neutrality. Ve stále rozvíjející se oblasti 3D tisku z betonových směsí se velmi často setkáváme s průmyslovými šestiosými robotickými rameny nebo portálovými roboty, jejichž použití nemusí být pro tuto technologii zcela vhodné, zejména z hlediska energetické náročnosti těchto zařízení.

V rámci řešení projektu 3D Star [4] zabývajících se technologií 3D tisku z betonu ve stavebnictví (jenž běžel na naší univerzitě), byl navržen unikátní tiskový robot, který je pro tuto technologii přímo optimalizován. Jedná se o tiskový robot s dosahem 5,6 m, jehož konstrukce vychází z konstrukce SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) s přidanou osou rotace. Přidaný stupeň volnosti zvyšuje kinematickou a dynamickou flexibilitu, což v kombinaci s tím, že se články tiskového robotu pohybují převážně v horizontální rovině (aniž by docházelo ke změně jejich potenciální energie) může vést k výrazné úspoře energie při tisku budov [1].

Během řešení projektu bylo sestrojeno několik zařízení navržených pro testování možností technologie 3D tisku. Prvním zařízením je klasický Gantry robot, který je v současné době používán pro 3D tisk v Kloknerově ústavu, jenž byl naším partnerem během řešení projektu 3D Star. Posledním zařízením je experimentální tiskový robot v měřítku 1:2 vůči finálnímu tiskovému robotu zvaný Printing Mantis, který dokumentuje Obrázek 1. Printing Mantis má dosah 2,6 m a nosnost 35 kg a představuje poměrně velké robotické rameno vhodné pro ověření energetické náročnosti technologie 3D tisku z betonových směsí.

Hlavním cílem tohoto projektu je vytvořit energetický model unikátního tiskového robotu a provést porovnání spotřeby elektrické energie při tisku tímto robotem a při tisku klasickým průmyslovým robotem. Porovnání bude provedeno jak simulačně, tak měřením reálné spotřeby u zmiňovaných vzniklých tiskových zařízeních.



Obrázek 1: Printing Mantis

Metodika

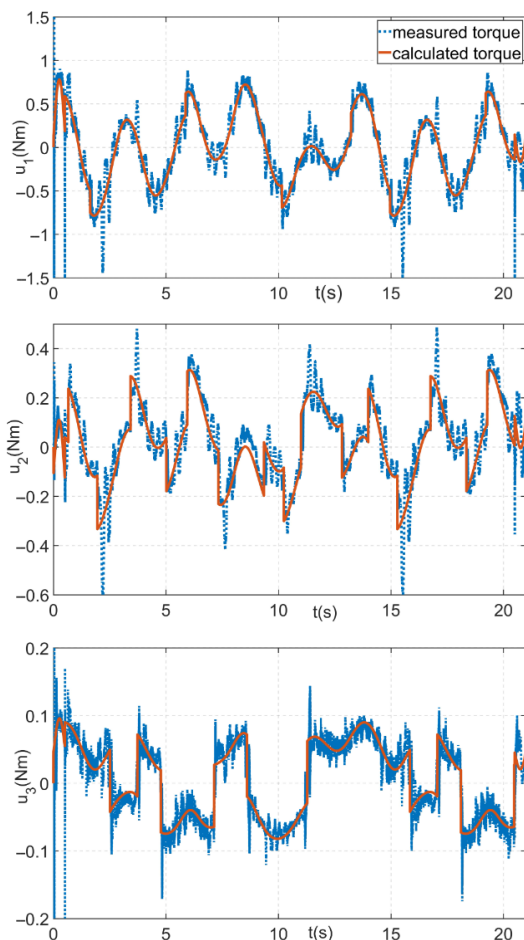
Metodika získání energetického modelu tiskového robotu zahrnuje několik fází. Prvotní fáze představuje provedení identifikačního experimentu pro získání setrvačných parametrů robotu a následnou tvorbu dynamického modelu pro přesnou simulaci točivého momentu jednotlivých os robotu během pohybu robotu po tiskové trajektorii v prostředí Matlab/Simulink [3]. Pro možnost porovnání spotřeby s průmyslovými robotickými rameny je použit simulační nástroj komerčního softwaru průmyslových robotů ABB Robot Studio [2]. V tomto SW je vytvořena robotická stanice obsahující průmyslový robot s obdobným tiskovým prostorem a nosností v porovnání s experimentálním robotem Printing Mantis. Následně bude provedeno porovnání simulovaných příkonů jednotlivých robotů při pohybu po totožné tiskové trajektorii. Poslední fáze spočívá v reálném měření spotřeby elektrické energie jednotlivých tiskových zařízení během pohybu po tiskové trajektorii. Měření a porovnání bude provedeno na experimentálním tiskovém rameni Printing Mantis a na Gantry robotu umístěném v Kloknerově ústavu.

Tento příspěvek se zabývá představením první fáze metodiky stanovení energetického modelu spočívající v identifikaci dynamických parametrů. Přesná identifikace dynamických parametrů vyžaduje speciálně navržený experiment. Během návrhu tohoto experimentu je potřeba zajistit dostatečné vybuzení dynamiky robotického

manipulátoru tak, aby se projevily všechny dynamické parametry a byl tak dosažen rychlý a přesný odhad těchto parametrů i za přítomnosti poruch. Dále je potřeba zajistit, aby bylo zpracování výsledných dat jednoduché a vedlo na konzistentní a přesné výsledky. Na základě těchto požadavků byla v prostředí Matlab/Simulink navržena periodická excitační trajektorie, která má podobu konečné Fourierovy řady. Tato trajektorie byla následně optimalizována za účelem snížení čísla podmíněnosti matice regresoru a jednotlivé dynamické parametry/koefficienty byly vyhodnoceny metodou nejmenších čtverců.

Výsledky a diskuze

Výsledky identifikace dynamických parametrů spolu s porovnáním s dynamickými parametry získanými prostřednictvím 3D modelu robotického ramene dokumentuje Tabulka 1. Pokud bychom parametry získané z 3D modelu považovali za skutečné parametry ramene, byla by maximální procentuální chyba odhadu parametrů menší než 28 %, což není nejlepší výsledek. Ve skutečnosti však předpoklad uvažování dynamických parametrů získaných z 3D modelu za skutečné není příliš relevantní, protože 3D model má omezenou přesnost a nezahrnuje působení tření mezi jednotlivými články robotu. Graf 1 demonstruje naměřené momenty na tiskovém rameni spolu s vypočítanými momenty prostřednictvím identifikovaných dynamických parametrů. Z průběhů je patrné, že míra shody je velmi dobrá.



Graf 1: Estimované vs. naměřené momenty

Base inertia parameters	π_{ident}	π_3 DMODEL
$J_{xx1} + J_{yy1} + a_1^2(m_1 + m_2 + m_2) + 2a_1m_1x_{t11}$	0.1821	0.1495
$J_{xx2} + J_{yy2} + a_2^2(m_2 + m_3) + 2a_2m_2x_{t22}$	0.0444	0.0494
m_3x_{t33}	0.0211	0.0189
$a_1a_2m_2 + a_1a_2m_3 + a_1m_2x_{t22}$	0.0692	0.0632
$J_{xx3} + J_{yy3}$	0.0084	0.0066

Tabulka 1: Dynamické koeficienty tiskového robotu

Závěr

Doposud byl připraven funkční model robotu, na kterém proběhla identifikace parametrů energetického modelu pro následné zpracování a byla vytvořena soustava pro nepřímé měření elektrické spotřeby zařízení.

Dalším krokem bude odměřování energetické náročnosti robotů určených pro 3D tisk z betonových směsí při předem definované obdobné trajektorii, velikosti tiskového prostoru a zatížení. Naměřené hodnoty spotřeby elektrické energie budou porovnány z hlediska energetické náročnosti. Při porovnávání bude jednak použito odměřování spotřeby energie přímo z řídicího systému robotu, ale i nepřímé měření pomocí měřáku ARTIQ 233.

Poděkování

Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2023.

Reference

- [1] Kajzr, D., Myslivec, T., & Cernohorsky, J. (2023). An Open PLC-Based Robot Control System for 3D Concrete Printing. In Robotics (Roč. 12, Issue 4, s. 96). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/robotics12040096>
- [2] Paes, K., Dewulf, W., Elst, K. V., Kellens, K., & Slaets, P. (2014). Energy Efficient Trajectories for an Industrial ABB Robot. In Procedia CIRP (Roč. 15, s. 105–110). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.043>
- [3] Othman, A., Belda, K., & Burget, P. (2015). Physical modelling of energy consumption of industrial articulated robots. In 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iccas.2015.7364727>
- [4] 3D STAR. 3D tisk ve stavebnictví a architektuře. Dostupné online: <https://3dstar.tul.cz/> (dostupné 1 září 2023).