

Zárójelentés az NKFI-K-132477 kutatáshoz

Vezető kutatók:

Stépan Gábor (2019-2020)

Miklós Ákos (2020-2023)

Résztvevők:

Béri Bence

Hajdú Dávid

Kádár Fanni

Kiss Ádám

Szaksz Bence

Vizi Máté Benjamin

Budapest, 2023.12.30.



A projekt alap kutatás jellegű eredményei

Napjaink iparának meghatározó eleme a környezetvédelem. A technológia kiválasztásának egyik szempontja a gépek energiafogyasztásának és anyagfelhasználásának csökkentése. A vékony vagy karcsú elemeket tartalmazó termékek megmunkálása nehézséget jelent annak ellenére, hogy napjaink szerszámgépei nagy pontossággal képesek dolgozni akár az ezredmilliméteres tartományban is. A kihívást az anyag káros rezgésektől mentes megmunkálása jelenti, melynek akadálya a vékony munkadarab nagyfokú rugalmassága. Az esztergálás vagy marás során esetlegesen fellépő rezgések rámásolódnak a megmunkált felületre, ami selejthez vezet. A rezgések csökkentésének egyik intuitív módja a kézzel történő megfogás, csillapítás. Ez amellett, hogy veszélyes, kivitelezhetetlen is, karjaink nem képesek elegendő erőt és csillapítást biztosítani ahhoz, hogy a megmunkálás során fellépő kis amplitúdójú, de nagy frekvenciájú rezgéseket csökkentsük. A projekt során alkalmazott megoldás az emberi kéz robotkarral történő helyettesítése volt. A megoldás megvalósítása során két problémát kellett leküzdeni. Egyrészt a szerszámgéprezgés egy instabil folyamat, meg kell találni azt a csillapítást, ami elegendő a rezgés megszüntetéséhez. Másrészt viszont a robotkar önmagában is képes rezgésbe jönni egy előírt erő biztosítása közben. A kutatás során a két rendszer együttes viselkedését sikerült feltérképezni, ezáltal a vékony falú és karcsú munkadarabok megmunkálása során hatékonyan tudtuk csökkenteni a rezgések veszélyét.

A szerszámgéprezgésekben és a digitálisan szabályozott robotok rezgéseiben egy fontos közös pont, hogy mindkettő legfőbb oka a rendszerben megjelenő időkésés. Míg az első esetben az időkésés a mechanikai folyamat természetes következménye, a második esetben a digitális szabályozó kör mintavételezett jellegéből (is) adódik. A kutatócsoport tagjai évtizedekre visszanyúló tapasztalattal rendelkeznek időkésleltetett dinamikai rendszerek kutatásában, és az első munkacsomag feladatai közé tartozott a már ismert módszerek további fejlesztése, illetve alkalmazása a szerszámgép-robot rendszerére.

A kutatáshoz szükséges matematikai háttérrel a késleltetett differenciálegyenletek adták. A matematikai eszköztár alapos ismerete lehetőséget ad egyrészt arra, hogy az időkésés destabilizáló hatását előre tudjuk jelezni, másrészt viszont kimutatható, hogy bizonyos esetekben stabilizálni is képes. A kifejlesztett eszköztárat nyomáshatároló szelepek esetére több folyóiratcikkben publikáltuk. Ebből az is látszik, hogy az időkésleltetett dinamikai rendszerek vizsgálatához kifejlesztett módszerek a mérnöki problémák igen széles spektrumán alkalmazhatók, nem csak a szerszámgéprezgések vagy robotszabályozás, de nyomáshatároló szelepek vagy éppen önvezető járművek és forgalomszabályozás esetében is. A kutatócsoportnak több közleménye jelent meg ilyen témákban is.

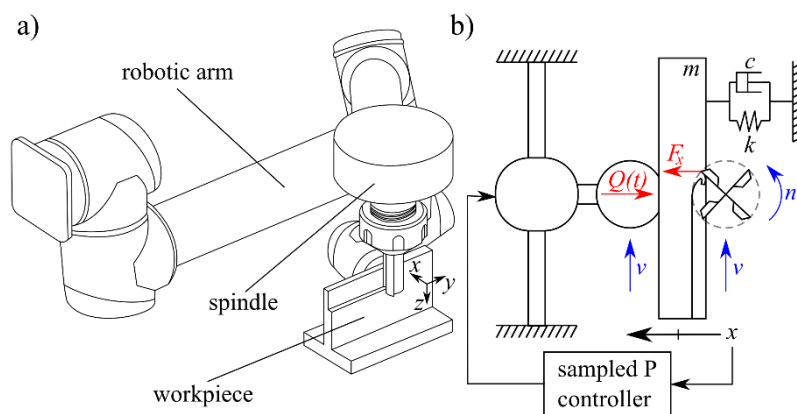
A késleltetett differenciálegyenletek biztosítják a szerszámgéprezgések matematikai háttérét is. A projektben ezek a kutatások központi szerepet kaptak. A korábbi eredményekhez képest a projekt a vékonyfalú és karcsú munkadarabok forgácsolása (esztergálás és marás) során létrejövő stabilitási határok számításában jelent előrelépést. Megvizsgáltuk, hogy a karcsú munkadarabok axiális terhelése hogyan csökkenti a stabil megmunkálási tartományokat, illetve, hogy periodikus axiális terhelés hatására lehetséges a folyamat stabilizálása.

A kutatás négy éve során számos publikáció született a robotok pozíció és erőszabályozásával kapcsolatban. Olyan szabályozási algoritmusokat vizsgáltunk és dolgoztunk ki, amelyek hatékonyan időkésleltetett dinamikai rendszerek szabályozására: ilyenek voltak a kollokált pozíciószabályozás és az impedancia és admittancia szabályozók.

A robotok szabályozása során kihívást jelent a robotok környezettel való érintkezése. A környezet és a robot között fellépő esetlegesen nagy erőhatások kárt tehetnek mind magában a robotban mind pedig a vele kapcsolatba kerülő tárgyokban. Az ilyen jellegű kontakt problémákra több szabályozási stratégia is ismert, ilyenek például az erő-, az impedancia és az admittancia szabályozás. Korábbi kutatásainkból és a szakirodalomból egyaránt ismert, hogy a erőszabályozó digitális megvalósításából adódó időkésés kiemelt szerepet játszik a szabályozás kimenetelében és túlságosan nagy időkésés a szabályozás instabilitásához vezet. Az impedancia és admittancia szabályozók és digitális hatások együttes vizsgálata hiányzik a szakirodalomból, de az erőszabályozást alapul véve sejthető, hogy az időkésés ezen esetekben is kulcsfontosságú.

Megalkottuk a impedancia és admittancia szabályozók digitális, egy szabadsági fokú modelljeit és ezeken stabilitásvizsgálatot végeztünk. Mindkét szabályozó esetén meghatároztuk a stabil szabályozást eredményező szabályozási paraméterek halmazát az időkésés függvényében, valamint sikerült megadni az adott időkésés esetén a leggyorsabb szabályozáshoz tartozó erősítési tényezőket is. Becslést adtunk a szabályozó beállási idejére és az eredményeket numerikus szimulációkkal is ellenőriztük. A pontos szimuláció eléréséhez saját numerikus eljárást implementáltunk, mely alkalmas a digitális mintavételezés pontos szimulálására. A numerikus szimulációink alátámasztják az elméleti eredményeink helyességét a szabályozás stabilitását és a beállási időket illetően egyaránt.

A robot által támogatott marás lehetőségeinek feltérképezéséhez vizsgálni kellett a mintavételes digitális szabályozás és a megmunkálás regeneratív hatásának kölcsönhatását. Ezt egy egyszerűsített modell segítségével tettük meg.



1. Ábra: Robottal támogatott marás egyszerűsített mechanikai modellje.

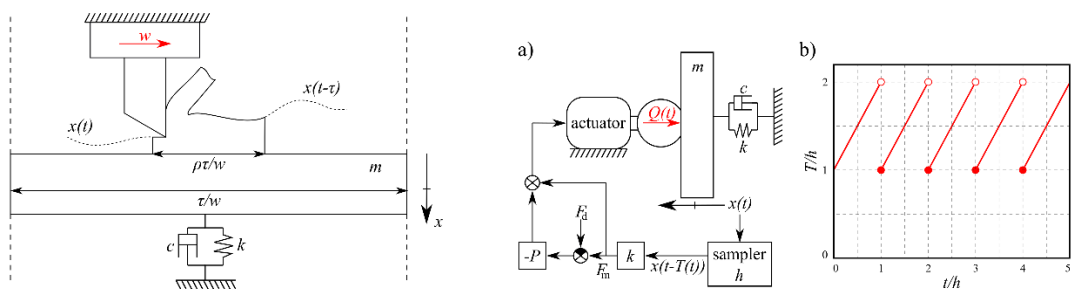
Az egyszerűsített modell több folyamat-paraméter alapvető összefüggéseinek feltérképezésére ad lehetőséget, valamint a robottal támogatott marás módszerében rejlő lehetőségekre és kihívásokra is lehet következtetni segítségével. Az első eredmény, hogy a mintavételezési időnek kisebbnek kell lennie a regeneratív hatást jellemző időnél, különben nem érhető el jelentős javulás a stabilitást illetően. Ez alapvető korlátokat szab a szabályozás tervezésére a megmunkálási folyamat paramétereire alapján. Sikerült kimutatni, hogy amennyiben a mintavételezési frekvencia a munkadarab sajátfrekvenciájánál legalább négyszer nagyobb, akkor a rendszer viselkedése jól prediktálható lesz. Ezekben az esetekben a szabályozott munkadarab átviteli függvényének mérése elegendő a stabilitási térképek számításához. A túlszabályozott munkadarab esetében a Hopf típusú rezgések teljesen eltűntek, míg a legjobb szabályozó paraméterek esetében nagy stabil zónákat sikerült kialakítani. Amennyiben

a mintavételezési frekvencia túl alacsony (kevesebb mint a sajátfrekvencia négyszerese), úgy csak numerikus becslést tudunk adni a stabilitási térképre.

A projekt elméleti eredményeinek kísérleti igazolása

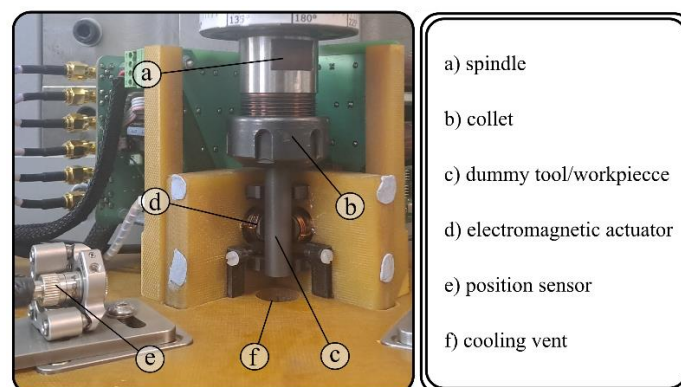
A kutatócsoportnak a projekt megkezdésekor rendelkezésére állt több berendezés, amely lehetővé tette az eredmények kísérleti validálását. Egyebek mellett a kísérletek legfontosabb eszközei egy háromtengelyes megmunkáló központ, egy elektromágneses elvű környezetszimulációs berendezés, illetve a rezgés mérési eszközök, gyorsulásmérő szenzorok, gerjesztők és impulzuskalapácsok. A kutatás kezdeti szakaszában elindítottuk ezek mellé egy kisméretű UR10e kollaboratív robot beszerzését.

Az projekt során vizsgált robottal támogatott marás modelljének két alkotó eleme van: nagy mértékben megszakított forgácsolás, illetve mintavételezett erőszabályozás. Ezeket a fent említett környezetszimulációs berendezéssel kísérleti úton is képesek voltunk előállítani, így volt lehetséges az elméleti eredmények validálása.



2. Ábra: Nagy mértékben megszakított forgácsolás és mintavételezett erőszabályozás mechanikai modelljei.

A hardware-in-the-loop kísérleti rendszer segítségével mindkét modellt mérésekkel is alátámaszthattuk. A nagy mértékben megszakított forgácsolás és a mintavételezett erőszabályozás esetében is kiváló egyezést mutattak a számításokkal és a mérésekkel meghatározott stabilitási határok.



3. Ábra: Hardware-in-the-loop kísérleti eszköz.

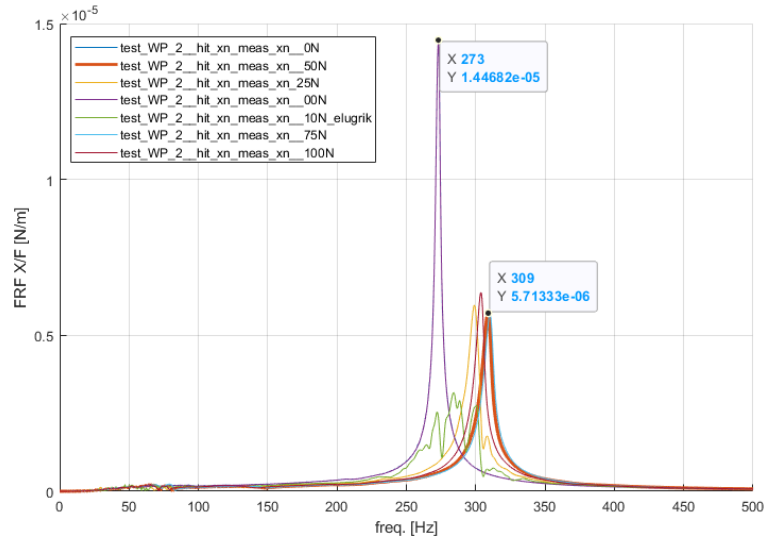
A kísérletek során az UR10e kollaboratív roboton, kihasználva a robotvezérlő által nyújtott lehetőségeket, implementáltuk a munkadarab forgácsolás közbeni megtámasztására szolgáló szabályozást. A szabályozás célja a munkadarab állandó nagyságú erővel történő megtámasztása, ezzel megváltoztatva a munkadarab dinamikai tulajdonságait. Mivel a munkadarab megmunkálás közben mozog, ezért a robot ezt a mozgást követi, hogy a munkadarabot a megmunkálás során végig azonos helyen támassza meg. Ilyen módon két dolog történik egyszerre, egy pozíció/sebesség szabályozóval követjük a munkadarabot, és emellett egy erőszabályozás révén megtámasztjuk a munkadarabot. A szabályozás stabilitásának érdekében az egész szabályozó a robotvezérlőn került megvalósításra, nem külső PC-ről vezéreljük a robotot. Ezzel minimalizáljuk a szabályozás során fellépő diszkrét mintavételezésből adódó időkésés negatív hatását.

Végül a megmunkáló központ és az újonnan beszerzett kollaboratív robot integrációjával sikerült igazolni a robottal támogatott forgácsolás koncepcióját. A forgácsolást egy egyszabadságfokú rendszeren végeztük, amely jól modellezi a vékonyfalú munkadarabok megmunkálását. A robot a rendszert a lágyabb irányban támasztja, az előtolás iránya erre merőleges.



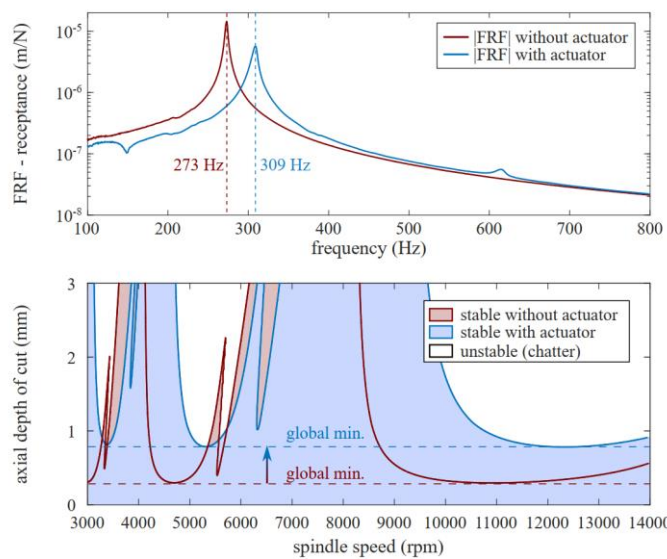
4. Ábra: Munkadarab forgácsolása 50 N támasztóerő mellett.

A kísérletek során bebizonyosodott, hogy a megtámasztás hatására jelentős mértékben megváltoznak a munkadarab frekvenciaátviteli tulajdonságai, hozzávetőlegesen megduplázódik a csillapítás, és a sajtfrekvencia is számottevő mértékben eltolódik. Továbbá azt tapasztaltuk, hogy 10 N nagyságú nyomás esetén nem megfelelő a robot szabályozása, ezt nem tudja megvalósítani, és a robot elugrálhat a munkadarabról. Erősebb megtámasztás esetén (25 N, 50 N, 75 N és 100 N) ez nem fordult elő. Az egyes megtámasztási erőkhez tartozó frekvenciaátviteli függvényeket mutatja az alábbi ábra:



5. Ábra: Frekvenciaátviteli függvények különböző nagyságú támasztóerő mellett.

A forgácsolóerő modell korábbi tesztek során lett meghatározva. A megtámasztott rendszer frekvenciaátviteli függvénye és a forgácsolóerő paramétereinek segítségével kiszámítottuk a megtámasztás nélküli és a megtámasztott rendszer stabilitási határait, és kimutattuk, hogy a globális stabilitási tartomány (amely forgácsvastagság esetén a rendszer mindenképpen stabil) kétszeresére nőtt.



6. Ábra: Frekvenciaátviteli függvények különböző nagyságú támasztóerő mellett.

Összefoglalás

A kutatás során elvégeztük a robotokkal támogatott forgácsolás alapos elméleti előkészítését. A kutatócsoport jelentős korábbi tapasztalatait tovább bővítettük az időkésleltetett dinamikai rendszerek vizsgálatához szükséges eszköztárral kapcsolatban. Számos elméleti eredményt kísérletekkel is igazoltunk, és végül sikerült a komplex szerszámgép és robot rendszer integrálása is. A vizsgált módszer hasznosítása jelenleg is folyik. A világ számos pontján

történnék fejlesztések ezen a területen, és ebben a munkában sikerült jelentős hozzájárulást nyújtani a kutatás során.