

Csatolt diszkrét és folytonos dinamikai rendszerek stabilitása és nemlineáris rezgései

OTKA azonosító: **T0433682**

A munka kezdete és befejezése: **2003. február 1. - 2006. december 31.**

Témavezető: **Dr. Stépán Gábor egyetemi tanár, tanszékvezető**

A kutatócsoport személyi állományában több változás is történt a projekt 4 éve folyamán, az azonban végig az eredeti terveknek megfelelően folyt. Először ezeket a személyi változásokat foglaljuk össze röviden, ismertetve egyúttal a kutatók egyéni szakmai elismeréseit is a projekttel kapcsolatos munkájuk során.

A kutatásban résztvevők közül Szalai Róbert 2003 őszén csatlakozott a csoporthoz, majd Fulbright ösztöndíjjal 2004. szeptember 1.-től 2005 július 1.-ig az MIT Department of Mechanical Engineering-en dolgozott, kutatási témája (elsősorban a numerikus algoritmusok fejlesztése) azonban változatlanul a csoportéhoz kapcsolódott, a projektnek megfelelő volt. Hazatérte után 2005 tavaszán megvédte PhD dolgozatát, majd 2006 nyár óta a University of Bristol, Department of Engineering Mathematics posztdoktorként alkalmazott kutatója.

Baksa István is 2003 őszén került a csoportba doktoranduszként, ő kísérleti berendezést épített erőszabályozások vizsgálatához, majd 2005 nyarán a montreáli McGill University gépészmérnöki tanszékén volt tanulmányúton a témában. Dolgozatát még nem adta be, de a projekthez erősen kapcsolódó szakterületen a Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.-nél kapott kutató-fejlesztői állást 2006 őszén, nem sokkal a projekt lezárulása előtt, szakmai kapcsolatunk azóta sem szakadt meg.

Triesz Péter a munka kezdete óta tagja volt a csoportnak mint akadémiai kutatócsoport tag, majd doktorandusz, elsősorban ő foglalkozott az eredmények rotordinamikai alkalmazásaival. Munkáját egy elnyert fél éves Eötvös kutatói ösztöndíj is segítette a University of Bristol-on 2004 őszén. 2005 február 1-től a győri Szent István Egyetemen kapott tanársegédi állást, jelenleg ott fejezi be PhD tanulmányait. Az eredményeket még a jelen pályázat keretében publikálta konferenciákon, az utóbbi évben viszont már önállóan folytatja kutatásait új munkahelyén és vett részt Bécsben 2006-ban a Rotordinamikai Világkongresszuson.

Kovács László az első 2 évben doktoranduszként, azóta az akadémiai kutatócsoport tagjaként vett részt a projektben. Egy sikeres kanadai-magyar TÉT pályázat segítette, hogy 2004-ben Kanadában volt 3 hónapos tanulmányúton a McGill Egyetemen. PhD dolgozatát a projekt lezárulásával közel egy időben, 2006 végén nyújtotta be, jelenleg bírálat alatt van.

Takács Dénes a Bristol Egyetemen készítette diplomatervét, ő 2005 szeptemberében doktoranduszként kapcsolódott be a kutatási projektbe elsősorban a rugalmas kerék gördülésének dinamikai vizsgálata kapcsán.

Inesperger Tamás státusa nem változott a projekt folyamán, de itt említjük meg, hogy munkáját Magyary Zoltán ösztöndíj is segítette 2003 és 2005 között, jelenleg Bolyai ösztöndíjas. Ebből a kutatási projektből indult, vált ki, az „act-and-wait” szabályozás alapgondolata, mellyel azután másik fiatal kutatónkkal, Szabó Zsolttal együtt önálló kutatási projektbe is kezdtek. Ugyancsak Bolyai ösztöndíjas a kutatócsoport másik tagja, Csernák Gábor, aki az utóbbi

évben már szintén önálló témával indult el saját projektben, ebben azonban ismét az itteni munka segítette.

A kutatás folyamán tehát jelentős mozgás volt a csoportban, számos új gondolat, kutatási téma is keletkezett, több nemzetközi kooperációval (University of Bristol, Washington University, McGill University, University of Ljubljana, University of Dortmund).

2003

A terveknek megfelelően áttekintettük a nemlineáris diszkrét és folytonos rendszerek vizsgálatának szakirodalmát, és jelenelegi kutatási irányait. Ebben a tekintetben a Bristoli Egyetem Alkalmazott Matematika Tanszékével kooperáltunk, ahol szakaszonként folytonos időképlettel rendelkező rendszerekkel foglalkozó projekt fut. Részt vettünk szemináriumainkon és egy általuk szervezett kisebb konferencián, továbbá egy doktoranduszunk is ott töltött pár hónapot, közös publikáció is készült ezek alapján.

A kifejezetten alapkutatási jellegű munkák közül a diszkrét rendszerekhez tartozó központi sokasági transzformációk elvégzésére dolgoztunk ki algoritmust. Előállítottuk a bifurkációs vizsgálatokhoz szükséges normál formákat. A számítások elvégzéséhez számítógépi algebrai módszereket és szoftvereket fejlesztettünk. A munka megkezdődött a diszkrét és folytonos rendszerek esetében is az egységes számításához – ez a késleltetett egyenletek esetén egy új függvényter használata igényli, melynek használatához egy holland kutatóval vettük fel a munkakapcsolatot a bristoli kooperáción keresztül. Ilyen jellegű vizsgálatokra a közepes sebességű marás esetében van szükség, ennek megoldása volt az egyik első alkalmazási cél.

A nagysebességű marás kapcsán, a késleltetett hatásokat ütközésként modellező rendszerekben sikerrel alkalmaztuk a kidolgozott módszereket, ezt konferencia kiadványokban publikáltuk is, beadtunk folyóirat cikket is. Kutatóink részt vettek az ASME két konferenciáján is, ami lehetőséget adott a szerszámgéprezgési kutatási tapasztalatok cseréjében, illetve a részben közösen végzett kutatások publikációiban. Módszerünket több amerikai kutatóhelyen kezdték ezután alkalmazni, számos hivatkozást kapunk, külföldi szakértői cégektől is volt érdeklődés eredményeink iránt. Ugyancsak 2003-ban részt vettünk az IUTAM kaotikus mozgásokkal foglalkozó szimpóziumán, ahol a nemlineáris eredmények elméleti, általános érvényű részét ismertettük.

Ugyancsak a terveknek megfelelően befejeztük és publikáltuk azokat a kísérleti munkákat, amelyek az erőszabályozás kapcsán az EU ReHaRob projektben is alkalmaztak. A robottechnikai alkalmazási eredményeket az IFToMM Világkongresszusán (a halasztás miatt csak 2004 elején) adtuk elő. Az egyikben az erőszabályozással, a másikban az erősítési tényezők paraméteres gerjesztésével foglalkoztunk. Utóbbi esetben korábbi, paraméteres gerjesztéssel történő stabilizálási eredményeinket vittük át egy új alkalmazási területre, ami így ismét egy kapcsolt folytonos és diszkrét rendszer volt. Később ez lett az „act-and-wait” szabályozás alapötlete, ami túlmutat a jelen projekten.

2004

A projekt tervnek megfelelően a második évben a kutatási munka négy olyan területen ért el eredményeket, amelyekben az első évben kidolgozott és megalapozott közös módszereket alkalmaztuk: a diszkrét rendszerekhez tartozó központi sokasági transzformációk elvégzésére kidolgozott algoritmust, a bifurkációs vizsgálatokhoz előállított normál formákat, továbbá a számítások elvégzéséhez fejlesztett számítógépi algebrai módszereket. Az év elején fejeztük be az ezeket kiegészítő, a csatolt diszkrét és folytonos rendszerek esetében az egységes számításhoz szükséges, a késleltetett egyenletek esetén egy új függvénytér használatát igénylő módszerek programozását.

Míg a kutatás első évében a nagysebességű marás kapcsán a késleltetett hatásokat még ütközésként modelleztük és így csak diszkrét matematikai modelleket analizáltunk stabilitási szempontból, addig a második évben már olyan modellek vizsgálatát is el tudtuk végezni a kidolgozott módszerekkel, amelyekben a nagysebességű maró szerszáméleinek a munkadarab anyagában való mozgását nem kellett infinitezimálisan kicsinek tekinteni. Az eredmények között olyan meglepőeket is találtunk, miszerint nagysebességű forgácsolás esetén korábban általunk felfedezett, és azóta amerikai kutatók által mérésekkel is igazolt perióduskettőző rezgésekben jelentkező stabilitásvesztések paraméter tartománya véges, lencse alakú is lehet a forgácsolási paraméterek operációs terében. Ennek kísérleti igazolásával több külföldi (szlovén, német, amerikai) kooperációs partnerünk is próbálkozott, részeredményeikről több közös elő-publikációban, konferencia cikkben számoltunk be. Végül spanyol kutatók publikáltak először az elmélettel teljesen egyező mérési eredményeket 2006-ban.

Megemlítjük, hogy a szerszámgéprezgési modellekben a kutatási tervünknek megfelelően kerestük kaotikus mozgások jelentkezését. A talált és bizonyított kaotikus rezgések paraméter tartományának azonosítása azonban nem talált érdeklődésre a gépészmérnök technológus kutatók között, miközben a fizikusok által egyik meghatározónak tekintett nemlineáris dinamikai lapban sikeresen publikáltuk, és az ottani szakmai körökben úgy hivatkozzák mint az egyikét a kevés olyan példának, ahol kaotikus mozgás létét bizonyítottuk egy a gépészmérnöki gyakorlatból származó nemlineáris mechanikai modellen.

A kritikus fordulatszám felett járó tengelyek „rubbing” jelenségének elemzése során az egyik legfontosabb eredmény az egy szabadsági fokú impakt illetve száraz súrlódásos oszcillátoroknál tapasztalt bonyolult rezgések és a forgó tengely csapágyházzal való ütközéseinek lehetséges kaotikus rezgései közötti fizikai különbségek feltárása, és annak a matematikai modellekben való értelmezése volt. Az elkészült és pontosított modellekre készült számítógépi algoritmusok több, eddig nem elemzett és értelmezett rezgési típust tártak fel, illetve megtaláltuk egy lehetséges útját, mechanizmusát annak, hogyan és miért alakulnak ki kaotikus rezgések az ilyen rendszerekben. Az eredményeket konferencia kiadványokban publikáltuk.

A robotok erőszabályozására történő alkalmazás esetében egy a McGill Egyetem Gépészmérnöki Tanszékével elnyert mobilitási pályázat is segítette a kutatásokat. A ReHaRob projekt korábbi eredményeinek publikálása mellett elvégeztük a probléma lényegét tükröző legegyszerűbb mechanikai modell teljes analitikus vizsgálatát, feltártuk az összes lehetséges stabilitásvesztést, bifurkációt, meghatároztuk a különböző szempontok szerint optimális erősítési tényezők és mintavételezési idők meghatározását. Erről több cikkben számoltunk be, melyek később Kovács László PhD dolgozatának téziseit adták.

2005

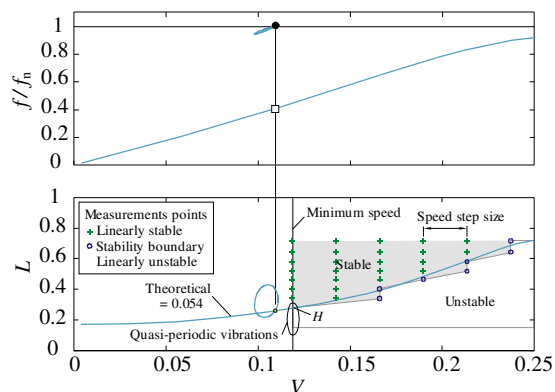
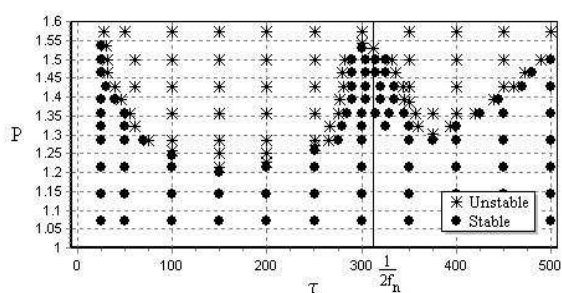
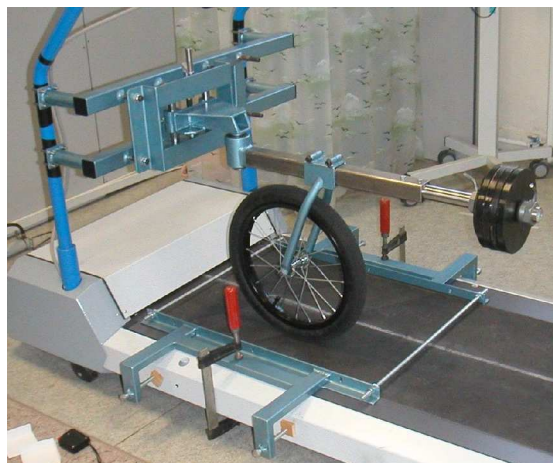
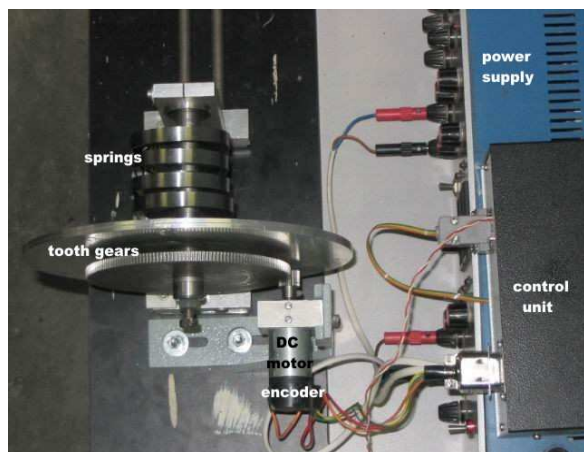
A projekt a tervnek megfelelően a harmadik évben a kifejlesztett algoritmusok és módszerek alkalmazási területeire koncentrált. Ez igényelt bizonyos kísérleti munkát, a kísérletekkel verifikált modellek matematikai, numerikus analízisét, továbbá kisebb mértékben az algoritmusok fejlesztésével is foglalkoztunk, amennyiben az egyes alkalmazási feladatok annak pontosítását igényelték.

Az algoritmusok pontosításával kapcsolatban két eredményt emelünk ki. Insperger Tamással a kapcsolt folytonos és diszkrét időképletetéseket tartalmazó rendszerekre kidolgozott szemi-diszkretizációs módszer magasabb rendű változatait is kidolgoztuk, amit az irodalomban már át is vettek, más, szabályozástechnikai feladatokban is alkalmaztak. Ez adta az ötletet az eredetileg numerikus módszerként kidolgozott eljárás alkalmazására nagy időképletetést tartalmazó rendszerekben digitális szabályozás mellett, melyet „act and wait control” elnevezéssel publikáltunk először konferencia kiadványokban, de később több folyóirat publikáció is készült. A másik módszert Szalai Róberttel fejlesztettük periodikus pályák követésére nemlineáris csatolt diszkrét és folytonos rendszerekben. A rangos folyóirat publikáció csak 2006-ban jelent meg.

Az alkalmazási feladatok mechanikai modelljeivel kapcsolatban két kísérlet sorozatot is végeztünk saját laboratóriumunkban, egyet pedig nemzetközi együttműködésben szlovén és német kollégákkal (utóbbiakat az OTKA témához kapcsolt EU COST illetve TÉT pályázat is támogatta).

Az első kísérlet sorozatot egy az erőszabályozás késleltetett hatásait tartalmazó szerkezeten végeztük el, melyet kis költséggel építettünk. Az eredményeket először ismét csak konferencia kiadvány cikkekben publikáltuk, de azokat később felhasználtuk a környezetüket megérintő robotok stabilitási vizsgálata kapcsán kapott elméleti eredményeink igazolására. Az EU FP5-ös ReHaRob projekt ugyan ekkor már lezárult, de annak eredményeiben az erőszabályozással kapcsolatos eredményeink megjelennek, és azokat számos fórumon, tudományos népszerűsítő előadáson, napilapokban, televízióban, rádióműsorokban ismertettük. A McGill egyetemmel kezdődött együttműködésünk ebben az évben is folytatódott az erőszabályozási alkalmazások kapcsán, a TÉT projekt meghosszabbítására sikerrel pályáztunk.

A második kísérleti sorozatot Takács Dénes végezte el rugalmas gumiköpennyel gördülő keréken. A kísérletek ismét alacsony költséggel, a tanszék Biomechanikai laboratóriumának futószalagján készültek (ennek költségeit még részben a korábbi EU FP5 fedezte), de a mérési eredmények feldolgozásához használtuk a korábbi OTKA műszerpályázaton beszerzett PULSE dinamikai mérőrendszert is. Sikerült kvázi-periodikus rezgéseket azonosítani, melyek egyértelmű bizonyítékát jelentik az időképletetés jelenlétének, hatásának. Az eredményeket először ismét csak konferenciákon ismertettük. Az elméleti vizsgálatok eközben a nemlineáris rezgésekre is kiterjedtek, ebben a Bristol Egyetemmel hagyományos kapcsolataink is segítettek (pl. az AUTO tudományos szoftver telepítése tanszékünk gépein). Korábbi, a Michigani State University gépészmérnöki tanszékével közös TÉT projektünk eredményei a rugalmas kerékkel való fékezéssel kapcsolatban szintén ebben az évben kerültek publikálásra, ezeket reméljük majd egy következő projektben összekapcsolni az idén elvégzett gördülési rezgési kísérletekkel. Az eredményeket próbáljuk összekapcsolni a szabályozási vonalon kidolgozott módszerekkel, ezzel ABS rendszerekben való alkalmazások előtt nyílnak meg az út.



1. ábra: Az elkészült kísérleti berendezések és két példa kísérleti stabilitási térképre

Kiemelten sikeres alkalmazási terület volt továbbra is a szerszámgéprezgések, pontosabban a nagysebességű marás vizsgálata. Ezt terveink szerint már lezártuk volna, de a külföldi partnerektől, sok esetben személyesen ismeretlen kollégáktól olyan mennyiségű kísérleti eredmény feldolgozását és értelmezését kérték módszerünkkel, amit feltétlenül folytatni láttunk érdemesnek. Számítási módszereinket egyértelműen elfogadta és átvette a nemzetközi kutatói közösség. Egyik példaként említjük meg, hogy szlovén kollégák vezetésével a Dortmundi Egyetem nagysebességű megmunkáló központján a legmodernebb, valós, ipari szerszámgépen végeztek igen drága kísérleteket. A kísérletek során folyamatos kapcsolatban voltunk, azok irányát, paramétereit velünk folyamatosan egyeztetjük, és az általunk kidolgozott számítógépi programokkal dolgoztuk fel a mérési eredményeket. Mindez igen sok társszerzős publikációk sorozatához vezetett, ami a szakterület legjobb folyóirataiban és konferenciáin jelent meg.

Az elméleti eredmények egy másik, előre nem tervezett alkalmazási lehetőségeként adódott az egymást követő járművek dinamikai viselkedésének vizsgálata, ami a szerszámgépek rezgéseivel analóg jelenség a járművek vezetőinek reflex késése miatt. A diszkrét dinamikai hatásokat itt az a különleges nemlinaritás jelenti, ami akkor jelentkezik, amikor az autók egymást megfelelő féktávolsággal követve bizonyos helyzetekben, dugók kialakulásakor, meg kell, hogy álljanak. Ez egy önszabályozott diszkrét hatás, ami hasonló a szerszámkés anyagból való kilépéséhez, vagy a gördülő kerekek megcsúszásához. Az eredményeket rangos folyóiratban publikáltuk, és itt is várható, hogy tudományos népszerűsítő cikkeket jelentetünk majd meg, előadásokat tartunk, melyekkel az eredményeket gyakorlatilag érthető, egyszerű formában is közöljük. Ezzel a példával elméleti eredményeink jól reprezentálhatók, népszerűsíthetők.

2006

A kutatás záró évét a terveknek megfelelően elsősorban az elért eredmények hasznának, hatékonyságának ismertetésére fordítottuk, ebben az évben 6 folyóirat cikkünk jelent meg a szakterületen meghatározó, impakt faktorral rendelkező nemzetközi folyóiratokban. Eredményeink nemzetközi beágyazódását, elismerését mutatja, hogy (a néha jelentős számú) társszerzőnk önhivatkozásainak kiszűrése után is, már most 49 SCI által nyilvántartott független hivatkozást kaptunk csupán ezen OTKA projekt keretében 2003 óta publikált cikkeinkre, és további 31 konferencia kiadványban megjelent hivatkozásról tudunk.

Kutatási tevékenységünkben jelentősebb munkaráfördítást igényelt még a futópados simmi kísérletek pontosított megisméltése, a mérőberendezés továbbfejlesztése. Ez a munka nem tekinthető lezártnak ezzel a projekttel, melyre alább még visszatérünk. A mérések minden eddiginél összetettebb nemlineáris rezgési jelenségekre utalnak. Az eddig előre jelzett két rezgés kombinációjából kialakuló kvázi-periodikus rezgések mellett olyanokat találtunk, melyek mért spektrumában időszakonként 5 frekvencia csúcs is jelentkezik, és ezek közül három függetlennek tűnik. A jelenségekre egyelőre nem tudunk analitikus magyarázatot adni, de elméleti mechanikai modellünk továbbfejlesztése után szimulációs program fejlesztésébe kezdtünk. Ez utóbbiak már nem szerepeltek eredeti munkatervünkben.

Végül itt említjük meg, hogy az elért eredményeknek és a kialakult kutatócsoportnak jelentős szerepe volt abban, hogy az év folyamán sikeres pályázatot adtunk be az EU FP6 utolsó felhívási körében ismét egy robotikai témával. A pályázati anyagban felhasználásra kerültek eddigi eredményeink, mind szakmai, mind tudományometriai szempontból, és a megfelelő menedzsment mellett ez is hozzájárult, hogy a 112 pályázatból a 3. helyre rangsorolva kerültünk csoportunkban a 10 nyertes közé.

Összefoglalás

Gépészmérnöki feladatok megoldásakor, ahol mozgások leírása, tervezése a cél, hagyományosan folytonos szemlélet dominál. A műszaki-technológiai fejlesztés azonban sok olyan rezgési problémába ütközött az utóbbi évtizedben, ahol a fejlődés további korlátját jelentő rezgéseket diszkrét hatások okozzák. Ennek alappéldái a robotika rezgési jelenségei, ahol a newtoni dinamikával leírható, folytonosan viselkedő rendszert mikroprocesszorok segítségével szabályoznak, és így a mintavételezésen és kerekítési hibákon keresztül időbeli és térbeli digitális hatásokat kapcsolnak hozzá. Diszkrét és folytonos rendszerek dinamikájának együttes vizsgálatára szükség van akkor is, ha a fizikai rendszer maga szabályozza a folytonos rendszert diszkrét módon, mint a nagy amplitúdójú szerszámgéprezgések, a gyorsan forgó tengelyek rubbing jelensége, vagy a kerekek térbeli gördülése és csúszása során jelentkező kapcsoltság esetén.

Olyan algoritmusokat dolgoztunk ki, amelyek a lehető legkevesebb numerikus közelítést tartalmazva, pontosan és egyszerűen adják meg az ilyen rendszerek stabilitásának feltételeit, illetve a stabilitásvesztéskor kialakuló rezgések jellegét, frekvenciáit, amplitúdóit. Ezekkel a módszerekkel sikerült pl. robotok emberekkel való érintkezéséhez szükséges erőszabályozásokat terveznünk az EU rehabilitációs robot projektjében, új nagysebességű marási technológiákat javasolnunk, magyarázatot adnunk kerekek fékezéskor kialakuló laterális (simmizó) rezgésére.

Záró megjegyzések

Végül néhány gondolat az eredmények hasznosítási lehetőségeiről, hogyan látjuk az egyébként alap kutatási eredményeket továbbvinni az innovációs lánc következő pontjain.

Az erőszabályozás a rehabilitációs robot prototípusában felhasználásra került, jelenleg is folynak vele klinikai tesztek. Az eddigi eredmények ígéretesek, és a robot továbbfejlesztése is folyamatban van az ABB cég közreműködésével, hosszabb távon eladható terméké válhat.

Az eredetileg EU FP5 projekt keretében fejlesztett rehabilitációs robotot nagy létszámú nemzetközi csoport tervezte és építette, ennek kicsi, de kulcsfontosságú, alap kutatás jellegű része volt az erőszabályozás megvalósítása. Ez 2005 óta további GVOP pályázatból az ABB cég bevonásával áll továbbfejlesztés alatt. Ennek a fejlesztésnek egyik kulcseleme az erőszabályozás tökéletesítése a digitális hatások csökkentésével, melyeket részben a projekt keretében elért eredmények alapján tudtak a cég fejlesztő mérnökei megbecsülni. Az erőszabályozás dinamikai modelljére alkalmazott módszerünk zárt alakú becslést ad a rehabilitációs robot betanítás alatti „ellenállása”, rezgésmentes szabályozása és a szabályozásban jelentkező időkéésés és mintavételezési frekvencia között. Ezzel megbecsülhető volt az ABB cég számára, milyen módon és mennyivel gyorsítsák meg a robot szabályozási köreit, hogy az a betanítást végző gyógytornászok számára kényelmesen használható legyen.

A szerszámgéprezgési eredmények technológiai optimalásra használhatók, ezeket a Boeing cég technológiai csoportjában St. Louisban alkalmazzák, a Washington University gépész tanszékének közvetítésével, akikkel együttműködtünk a cég számára végzett, kutatási jellegű kísérleti munkájuk értékelésében. Idehaza a SIEMENS Erőműtechnika cég mutatott érdeklődést 5D nagysebességű marógépeiken való alkalmazásra turbina és kompresszor lapátok megmunkálásakor. Velük céggel egyelőre csak kapcsolatfelvétel történt, szándéknyilatkozat együttműködésre, a kialakult fejlesztési elgondolás nem hozható nyilvánosságra.

A kerék simmivel kapcsolatos eredmények hosszú távon az ABS rendszerek továbbfejlesztésében segíthetnek, elsősorban a megállás előtti pillanatokban bekövetkező blokkolás elkerülésére. A Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft-vel az együttműködés folyamatos, a projektben dolgozó doktorandusz (Baks I) a cégnél helyezkedett el. A Knorr-Bremse-nél a világon általánosan használt Pacejka féle „mágikus formulát” építik be a processzorok szabályozó algoritmusába. Ez kis sebességeknél hibázik. Ennek korrigálására tudunk javaslatot tenni, melyet a kísérletekkel együtt a Michelin európai kutatási igazgatójának, Delmas úrnak is bemutattuk 2006-ban, aki a munka folytatására bíztatott, és kapcsolatfelvételt ígért, amennyiben az eredmények az időkéésletetett gumiköpeny modell kapcsán továbbra is bíztatóak. Nálunk tett látogatását a magyarországi tartózkodása szakmailag legérdekesebb pontjának minősített későbbi tárgyalásain. Az Airbus Bristol melletti gyárának repülőgép futómű és kerék szabályozásával foglalkozó részlegében is ismertettük elképzeléseinket 2006 végén, akikkel a bristoli kollégák már közös projektekben állapodtak meg 2006-ban, projekt javaslatainkban jórészt a mi eddig eredményeinket citálva, és a mi bevonásunkat is ígérve. Mindezek a kutatások azonban már a következő évek feladatai lesznek.