

Válasz Lantos Béla opponensi bírálatára

Mindenekelőtt megköszönöm Dr. Lantos Béla, a műszaki tudomány (MTA) doktora opponensi munkáját és véleményét.

Válaszok a bíráló megjegyzéseire:

A bíráló megjegyzi, hogy a 3.5. ábrán $p = 5$ esetén a lépésköz $h = 2\pi/5 > 1$. A $h < 1$ feltétel valóban kell az approximációs hiba sorfejtésen alapuló becslésre, a szemi-diszkretizációs numerikus módszer azonban ettől függetlenül alkalmazható akkor is, ha $h > 1$, csak ebben az esetben a közelítés nem lesz pontos, ahogy azt a 3.5 ábra is mutatja.

A B. Függelékben tárgyalt approximációs hiba becslése kézi számítással történt, és az eredményeket szimbolikus számítási eszközökkel ellenőriztem a Maple szoftver segítségével. A függelék valóban nem tartalmazza a részletes kiértékelést, csak a megfelelő behelyettesítéseket és a kiértékelések eredményét.

A (4.33)-(4.34) összefüggések levezetésének részletei valóban nem szerepelnek a dolgozatban, a levezetéshez szükséges a

$$\frac{\sin(\alpha)}{1 - \cos(\alpha)} = \frac{2}{\tan(\alpha/2)}$$

összefüggés, ahogy azt a bíráló is megjegyezte.

Válaszok a tézisek értékelésére:

A bíráló az első 3 tézist elfogadja önálló tudományos eredménynek. A 4. és az 5. tézist összevontan javasolja elfogadni, tekintettel azok kisebb súlyára a robusztus irányítások modern elméletének tükrében, és a két vizsgált probléma egyszerűségére és hasonlóságára. Valóban, a "beavatkozom-és-várok" szabályozási elv egy viszonylag egyszerű (és ezért könnyen implementálható) szabályozási módszer, és a két tézis kapcsolódik olyan értelemben, hogy az 5. tézis a "beavatkozom-és-várok" elv erőszabályozási folyamatra való alkalmazásával foglalkozik.

Válaszok a feltett kérdésekre:

1. kérdés:

A periodikus nemlineáris rendszereket linearizálni kellett a stabilitási tartományok meghatározásához. Mi mondható a stabilitási határ paraméterfüggésének megbízhatóságáról a linearizálás következtében? Történtek-e (például az egyszerűbb, csak időfüggő késleltetések esetén) szimulációs kísérletek a lineáris határon lévő paraméterértékek közelében robusztus nemlineáris numerikus technikákkal?

Válasz:

A lineáris stabilitásvizsgálat során egy egyensúlyi helyzet vagy egy periodikus pálya körüli lokális perturbációknak az aszimptotikus viselkedését vizsgáljuk. Például esztergálási folyamat esetén az egyensúlyi helyzet a szerszám és a munkadarab forgácsolási erő hatására keletkező, időben állandó deformációjának felel meg. Marási folyamat esetén a periodikus forgácsoló erő miatt a szerszám és a munkadarab deformációja periodikusan változik, ezért

ebben az esetben e periodikus pálya körüli kis rezgéseket vizsgáljuk. Az így kapott stabilitási térképek az egyensúlyi helyzet vagy a periodikus pálya körüli kis rezgések esetén érvényesek.

Nagyobb rezgés amplitúdók esetén a nemlineáris jelenségek is befolyásolhatják stabilitási tulajdonságokat. Ebben az esetben lineáris stabilitáshatár közelében analitikusan (pl. központi sokaság redukcióval és sorfejtéssel) vagy numerikusan (pl. pályakövetési módszerekkel) lehet vizsgálni a kialakuló nagy amplitúdójú rezgések tulajdonságait.

Esztergálási folyamatok egy szabadsági fokú regeneratív modelljére az analitikus bifurkáció számítás Stépán Gábor és Kalmár-Nagy Tamás cikkében [1] található meg. Ugyanerre a modellre a numerikus bifurkációvizsgálatot Dombóvári Zoltán, Eddie Wilson és Stépán Gábor cikke [2] tartalmazza, ők a DDE-BIFTOOL pályakövető szoftvert használták a kialakuló határciklusok meghatározására. Mind az analitikus és a numerikus számítások azt mutatják, hogy a forgácsolóerő karakterisztikájából adódóan tipikusan szubkritikus bifurkáció keletkezik a stabilitás határok mentén, azaz a lineáris stabilitáshatáron belül nagy perturbáció hatására nagy amplitúdójú rezgések jelenhetnek meg. Ez gyakorlati szempontból azt jelenti, hogy forgácsolás közben hirtelen, látszólag minden ok nélkül alakulhat ki nagy amplitúdójú rezgés. Azt a paramétertartományt, ahol az ideális rezgésmentes megmunkálás és nagy amplitúdójú szerszámgéprezgis is előfordulhat, bistabil tartománynak nevezik [2]. A bistabil tartomány létezését már a 80-as években is kimutatták kísérletileg [3].

Az esztergálási folyamatok állapotfüggő időkésésére vonatkozó modell bifurkációs analízisét numerikusan végeztük el David Barton matematikussal együttműködve [4]. A számításhoz David Barton a DDE-BIFTOOL pályakövető szoftver algoritmusát módosította úgy, hogy az képes legyen implicit egyenlettel definiált állapotfüggő időkésést is kezelni. A numerikus számítások eredménye azt mutatja, hogy az állapotfüggő időkésés hatására bizonyos paramétertartományokban szuperkritikus bifurkáció is megjelenhet a stabilitási határok mentén, azaz a lineáris stabilitáshatáron belül nagy perturbáció hatására sem alakulnak ki nagy amplitúdójú rezgések.

Periodikus késleltetett differenciálegyenletek esetén (pl. periodikus együtthatók esetén, vagy periodikus időkésés esetén) a bifurkáció számítás bonyolultabb, mivel nem periodikus, hanem kváziperiodikus pályát kell követni. Ilyen jellegű vizsgálatokat Szalai Róbert és Stépán Gábor végzett általános periodikus együtthatójú késleltetett differenciálegyenletekre [5] illetve a marási folyamat regeneratív modelljére [6]. A bistabil tartomány analitikus becslésére általános marási folyamat esetén a legjobb tudomásom szerint nem található szakirodalom.

Összességében elmondható, hogy a lineáris stabilitásvizsgálat csak kis perturbációk esetén írja le jól a rendszer viselkedését. Gyakorlati szempontból előfordulnak olyan paramétertartományok, ún. bistabil tartományok, ahol a nemlineáris hatások miatt kialakulhat rezgés annak ellenére, hogy a rendszer lineárisan stabilis. Ezeknek a tartományoknak a felderítése ma is intenzív kutatási téma.

2. kérdés:

A vizsgált példákban több esetben is szükség volt az állapotváltozó ismeretére. Történtek-e vizsgálatok az állapotbecslési pontosság és/vagy a modellparaméter bizonytalanság hatásának felmérésére a stabilitásvizsgálatoknál?

Válasz:

Szabályozási folyamatoknál az állapotváltozók mérése mindig zajjal terhelt, valamint a rendszerparaméterek is csak véges pontossággal ismertek. A jelen disszertációban nem történt paraméterérzékenységi vizsgálat, de az elmúlt 1-2 évben több kollégával foglalkoztunk

hasonló kérdésekkel néhány szabályozási módszer illetve a szerszámgéprezgis modellje esetén. A [7] cikkben John Milton professzorral az emberi egyensúlyozás kapcsán vizsgáltuk az inverz inga stabilizálásának modelljét reflexkésés esetén. Öt különböző szabályozási módszert vizsgáltunk, köztük a disszertációban tárgyalt "beavatkozom-és-várok" szabályozási elvet is. A modellezés során az érzékelt (mért) állapotváltozókat bizonytalan paraméterként modelleztük, és numerikusan meghatároztuk a robusztus stabilitási határokat, amelyeken belül a rendszer adott állapotváltozó-bizonytalanság esetén is stabilis marad. A vizsgálat során az néztük, hogy melyik szabályozási módszer esetén lehet adott érzékelési bizonytalanság és adott reflexkésés esetén a legrövidebb ingát egyensúlyozni.

Hasonló vizsgálatot végeztünk el az inverz inga modelljére Molnár Tamás PhD hallgatóval [8], de itt a modellparaméter bizonytalanság hatását vizsgáltuk a kritikus (még éppen stabilizálható) ingahosszra PD illetve prediktív szabályozás esetén. Ehhez a vizsgálatához a Wim Michiels, Sabine Mondie és Dirk Roose által kidolgozott elméletet [9] alkalmaztuk, amely a megoszló időkésést tartalmazó szabályozások robusztus stabilitásának feltételeit adja meg.

Forgácsolási megmunkálások stabilitásvizsgálata során is felmerül a mért dinamikai paraméterek pontatlanságának hatása a stabilitási diagramokra. Ezt a hatást Hajdu Dávid PhD hallgatóval vizsgáljuk, az első eredmények a [10,11] konferencia cikkekben lettek publikálva, és további eredmények is várhatók.

3. kérdés:

Léteznek fontos periodikus rendszerek, ahol nagy a periódusidő, és ezért a szimulációhoz szükséges lépésköz biztosításához extrém nagy grid-szám (felbontás-szám) lenne szükséges. Vannak-e javaslatok ennek áthidalására?

Válasz:

Váltakozó fordulatszámú megmunkálások esetén a fordulatszám változtatásának periódusideje tipikusan nagyságrendekkel nagyobb, mint az átlagos regeneratív időkésés. Ezekben az esetekben a szemi-diszkretizációs módszernél az egy periódus időre jutó diszkretizációs intervallumok száma valóban nagy, így a stabilitásvizsgálat során sok mátrixszorzást kell elvégezni, ami időigényes művelet. Ez a jelenség a disszertáció 5. fejezetében tárgyalt váltakozó fordulatszámú marási folyamat esetén is fennáll. A disszertációban nem tértem ki ennek a problémának a kezelésére, de több megoldás is létezik a numerikus számítások hatékonyságának növelésére nagy periódusidő esetén.

Az egyik megoldás az, hogy az összeszorandó mátrixok szabályos szerkezetét kihasználva a nagy méretű mátrixok szorzását visszavezetjük kis méretű mátrixok szorzására. A mátrixszorzáshoz szükséges aritmetikai műveletek száma már ebben az esetben is nagyságrendekkel csökken. Erre mutat példát Christoph Henninger és Peter Eberhard cikke [12]. Még hatékonyabb megoldás az, amikor a monodrómia mátrixot egy lépésben állítjuk elő mátrixszorzások nélkül. Mindkét módszert részletesen leírtuk és a monodrómia mátrix előállításához szükséges aritmetikai műveletek számát is megadtuk a [13] könyvben.

Egy harmadik módszer az ún. altér iteráció alkalmazása, amely a monodrómia mátrixot csak a kritikus sajátvektorok alterében határozza meg, így nem kell nagyméretű mátrixokat szorozni, és a sajátérték számítást is csak egy kisméretű mátrix esetén kell elvégezni. Ezt a módszert Mikel Zatarain és munkatársai publikálták 2015-ben [14].

Hivatkozások

- [1] Stépán G, Kalmár-Nagy T (1997) Nonlinear regenerative machine tool vibrations. In: *Proc. of the 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences*, **DETC97/VIB-4021**.
- [2] Dombovari Z, Wilson RE, Stépán G (2008) Estimates of the bistable region in metal cutting. *P Roy Soc A-Math Phy* **464**:3255-3271.
- [3] Shi HM, Tobias SA (1984) Theory of finite amplitude machine tool instability, *Int J of Machine Tool Design and Research* **24**:45-69.
- [4] Insperger T, Barton DAW, Stépán G (2008) Criticality of Hopf bifurcation in state-dependent delay model of turning processes. *Int J Nonlin Mech* **43**:140-149.
- [5] Szalai R, Stépán G, Hogan SJ (2006) Continuation of bifurcations in periodic delay-differential equations using characteristic matrices. *SIAM J Sci Comput* **28**:1301-1317.
- [6] Szalai R, Stepan G (2010) Period doubling bifurcation and center manifold reduction in a time-periodic and time-delay model of machining. *J Vib Control* **16**(7-8):1169–1187.
- [7] Insperger T, Milton J (2014) Sensory uncertainty and stick balancing at the fingertip. *Biol Cybern* **108**:85-101.
- [8] Molnar TG, Insperger T (2014) On the robust stabilizability of unstable systems with feedback delay by finite spectrum assignment, *J Vib Control*, published online, DOI: 10.1177/1077546314529602.
- [9] Michiels W, Mondie S and Roose D (2003) Robust stabilization of time-delay systems with distributed delay control laws: Necessary and sufficient conditions for a safe implementation. Technical Report of Department of Computer Science, Katholieke Universiteit Leuven, TWReport **363**.
- [10] Hajdu D, Insperger T, Stepan G (2015) Sensitivity of stability charts with respect to modal parameter uncertainties for turning operations, *Proceedings of the 12th IFAC Workshop on Time Delay Systems*, June 28-30, 2015, Ann Arbor, MI, USA, közlésre elfogadva.
- [11] Hajdu D, Insperger T, Stepan G, The effect of nonsymmetric FRF on machining: a case study, *Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, **IDETC/CIE 2015**, August 2-5, 2015, Boston, MA, USA, közlésre elfogadva.
- [12] Henninger C, Eberhard P (2008) Improving the computational efficiency and accuracy of the semi-discretization method for periodic delay-differential equations. *Eur J Mech A-Solid* **27**:975-985.
- [13] Insperger T, Stépán G (2011) *Semi-discretization for time-delay systems – Stability and Engineering applications*, Springer, New York.
- [14] Zatarain M, Alvarez J, Bediaga I, Munoa J, Dombovari Z (2015) Implicit subspace iteration as an efficient method to compute milling stability lobe diagrams, *Int J Adv Manuf Tech* **77**(1-4):597-607.

Budapest, 2015. május 17.



Insperger Tamás