Robotok Digitális Erőszabályozásának Dinamikája

Doktori disszertáció

Szerző:
Kovács László
okleveles gépészmérnök

Témavezető:
Dr. Stépán Gábor
tanszékvezető, egyetemi tanár
a Magyar Tudományos Akadémia levelező tagja

2006 Október

1. Tézis

A digitális erőszabályozású robotok és az általuk megérintett környezet alapvető fizikai tulajdonságait leíró egy szabadsági fokú, arányos-differenciáló (PD) szabályozású modell átfogó dinamikai analízisével, meghatároztam a digitálisan szabályozott rendszer stabilitási tulajdonságait, dinamikai viselkedését a mértékadó tervezési paraméterek tartományában.

A szabályozás P és D erősítési tényezői, a mintavételezési frekvencia $f_s = 1/\Delta t$, valamint a mechanikai tulajdonságokat jellemző, elhanyagolható csillapítású, szabályozás nélküli rendszer $f_n = \omega_\mathrm{n}/(2\pi)$ sajátkörfrekvenciájának függvényében elkészítettem a vizsgált rendszer pontos, zárt alakú összefüggésekkel definiált stabilitási térképét. Bebizonyítottam, hogy a differenciális erősítési tényező növelésével a stabilitástérkép széttagolt szerkezetűvé válik, melynek következtében egyes paraméter tartományokban nem lehet stabilis szabályozást megvalósítani. A stabilitási határok mentén azonosítottam a lehetséges bifurkációkat, kiszámítottam az esetlegesen kialakuló öngerjeszett rezgések frekvenciáit.

Zárt alakban meghatároztam a stabilitási térkép jellegzetes pontjait, melyek irányadóak az erőszabályozott rendszer mechanikai és szabályozási paramétereinek megválasztásában. Megmutattam, hogy a C Coulomb súrlódási erő figyelembe vételével, a szabályozás állandósult állapotához tartozó $\Delta F = C/P$ erőhiba az arányos erősítési tényező növelésével az alábbi összefüggés szerint minimalizálható

$$P_{max} = \begin{cases} \dfrac{1-2\cos\Delta T}{1-\cos\Delta T} & ; \quad \dfrac{2\pi}{3} < \Delta T < \dfrac{4\pi}{3} \\ \dfrac{(2\cos\Delta T - 3)^2}{8(1-\cos\Delta T)} & \quad \text{egyébként} \end{cases} , \quad \Delta T = 2\pi f_s/f_n \ ,$$

ahol a stabilitási határhoz tartozó P_{max} maximális erősítési tényező mellett a rendszer elveszti stabilitását és öngerjesztett rezgések alakulnak ki. A kialakuló rezgések f frekvenciája az f_s mintavételezési frekvenciához viszonyítva

$$\frac{f}{f_s} = \begin{cases} \dfrac{1}{2\pi}\tan^{-1}\left(\dfrac{\sqrt{3-4\cos\Delta T\,(1+\cos\Delta T)}}{1+2\cos\Delta T}\right) + \dfrac{1}{2} ; & \quad \dfrac{2\pi}{3} < \Delta T < \dfrac{4\pi}{3} \\ \dfrac{1}{2\pi}\tan^{-1}\left(\dfrac{\sqrt{15-4\cos\Delta T\,(1+\cos\Delta T)}}{1+2\cos\Delta T}\right) & \quad \text{egyébként} \end{cases} .$$

Megmutattam továbbá, hogy az $F_e(t) \sim \exp(f_s t \ln \rho_{min})$ tranziens erőhiba leggyorsabb csillapodását eredményező szabályozási paraméterek

$$P_{opt} = \frac{-8\cos^3\Delta T + 36\cos^2\Delta T - 54\cos\Delta T + 27}{54(1-\cos\Delta T)}$$

$$D_{opt} = \frac{8\cos^3\Delta T + 36\cos^2\Delta T - 27}{54\omega_\mathrm{n}\sin\Delta T} ,$$

melyeknél a csillapodás mértékét jellemző ρ spektrális sugár értéke a minimális

$$\rho_{min} = \frac{2}{3}\cos\Delta T \, .$$

Az értekezés vontakozó részei: 2.2.3 Stability charts, 2.2.4 The minimal force error, 2.3.2 Vibration frequencies, 2.3.3 Exponential decay.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [4], [6], [7], [8], [20].

2. Tézis

A digitális erőszabályozású robotok mozgásegyenleteinek két lépésben történő szétcsatolásával az első tézisben megfogalmazott eredményeket több szabadsági fokú mechanikai rendszerek esetére általánosítottam. Az alkalmazott módszer a dinamikai probléma megoldását egy szabadsági fokú, késleltett, absztrakt oszcillátorok vizsgálatára vezeti vissza. Az eredményeket és a módszer alkalmazhatóságát numerikus szimulációkkal támasztottam alá.

A több szabadsági fokú mechanikai rendszerek kényszermozgásait leíró általános dinamikai egyenletek levezetéséhez Kövecses módszerét alkalmaztam (Kövecses, 2006). A kényszerekkel összefüggő mozgásokat leíró egyenletek meghatározását egy gyakori, két szabadsági fokú, párhuzamos kinematikájú robot modellen szemléltettem. Az egyenletek levezetése, a rendszer stabilitásvizsgálatához szükséges két lépéses dekompozíciós eljárás első lépése volt, melyben általános koordinátáknak a vizsgált 2 szabadsági fokú modell hajtott tengelyeinek elfordulását választottam. A választott minimális koordinátákra való áttéréshez szükséges transzformációs mátrixokat zárt alakban meghatároztam.

Az alkalmazott PD erőszabályozás stabilitásvizsgálatához, második lépésként, modális transzformációt végeztem. Ezzel megmutattam, hogy a vizsgált két szabadsági fokú ötcsuklós mechanizmus absztrakt késleltett oszcillátor modellekre bontható, melyek stabilitási és dinamikai tulajdonságai a dolgozat 2. fejezetében vizsgált, egy szabadsági fokú robot modelljével megegyezőek.

Az értekezés vontakozó részei: 2.2.3 Stability charts, 3.2 Formulation of the equations of motion, 3.3 PD digital force control, 3.5 Simulation.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [1], [4], [5], [16].

3. Tézis

Robotok erőmérésen alapuló, betanításos programozásának részletes dinamikai vizsgálatával meghatároztam egy belső pozíció- és egy külső erőszabályozási kört tartalmazó két-körös szabályozási architektúra alkalmazási lehetőségeit, illetve megvalósíthatóságának korlátait. Megmutattam, hogy a vizsgált arányos szabályozású, kevés szabadsági fokú robot modell stabilitási tulajdonságai, a stacionárius erőhiba, valamint a stabilitási határokon kialakuló rezgések, alapvetően jellemzik az emberrel együttműködő robotok, az ember-gép közötti kölcsönhatás dinamikáját.

A robotok betanításos programozását leíró fent említett modell esetére zárt alakban meghatároztam a szabályozás állandósult állapotához tartozó ΔF erőhibát, mely jelen esetben a robotnak a betanító személlyel szembeni ellenállását jelenti. A betanító által alkalmazott, állandó nagyságú F_0 gerjesztő erőt feltételezve, az erőhiba relatív értéke

$$\left|\frac{\Delta F}{F_0}\right| = \frac{3\Delta t}{2Pm + 3\Delta t}\ ,$$

ahol m jelöli a betanító egység tömegének a modellben figyelembe vett részét, P a szabályozás arányos erősítési tényezője és Δt a szabályozási kör mintavételezési ideje.

A vizsgált rendszer stabilitási térképeit a Pk/ω_n dimenziótlan erősítési tényező és az $f_n/f_s = \omega_\mathrm{n}\Delta t/(2\pi)$ frekvencia arány függvényében ábrázoltam, ahol ω_n a szabályozás nélküli rendszer sajátkörfrekveciája és k a betanító egység eredő merevsége. Megmutattam, hogy a gyakorlatban fontos $P > 0$ és $f_n/f_s < 1/4$ paraméter tartományban az erőhiba minimalizálása az arányos erősítési tényező növelésével lehetséges, melynek maximális értéke

$$P_{max} = \frac{f_n}{2\pi k \tan \Delta T} \quad , \quad \Delta T = 2\pi f_s/f_n\ .$$

Igazoltam, hogy a stabilitási taromány(ok) felső határán öngerjesztett rezgések alakulnak ki. A kialakuló rezgések f frekvenciáját az f_s mintavételezési frekvenciához viszonyítva zárt alakban meghatároztam

$$\frac{f}{f_s} = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}\tan^{-1}\sqrt{\frac{1+2\cos\Delta T}{3-2\cos\Delta T}}\ .$$

Előírt ρ csillapodási paraméter (spektrális sugár) függvényében, paraméteres alakban levezetem a maximális arányos szabályozási tényző meghatározására szolgáló összefüggést

$$\left.\begin{aligned} P_{max} &= \frac{(2\rho(\rho+1)-1)f_n}{2\pi k\sqrt{(2\rho+3)(1-2\rho)}} \\ \text{és}\quad f_n/f_s &= \frac{\cos^{-1}(\rho+\frac{1}{2})}{2\pi} \end{aligned}\right. \quad , \quad \text{ahol} \quad \rho \in \left[\frac{-1+\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right]\ .$$

Az értekezés vontakozó részei: 4.1 Model of teaching-in device, 4.2 Steady state force error, 4.4.2 Vibration Frequencies, 4.4.3 Exponential decay, 4.5 Real parameter case study.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [3], [12], [13], [14], [15], [19].

4. Tézis

A REHAROB Gyógytornásztató Rendszerben (ld. IST-1999-13109 számú európai uniós kutatási projekt), az alkalmazott ipari robotok betanításos programozására indirekt, vagy másképpen külső-köri, erőszabályozást valósítottam meg. Megmutattam, hogy az alkalmazott arányos-integráló (PI) típusú szabályozás paramétereinek hangolásával stabilis és megbízható betanítás érhető el. A robotoknak a betanító gyógytornásszal szembeni ellenállása, a nagy időkésés ellenére is, elfogadható mértéken tartható.

A betanításos programozásakor alkalmazott erőszabályozás dinamikai vizsgáltatához egy két szabadsági fokú mechanikai modellt készítettem, melyben a robotok pozíció/sebesség szabályozását kinematikai kényszerként értelmeztem. Kísérletileg meghatároztam a projektben használt ABB S4C+ típusú robotvezérlő holtidejét, valamint a megvalósítható mintavételezési frekvencia maximális (a hardver és szoftver elemektől függő) értékét.

Az azonosított mechanikai és szabályozási paraméterek figyelembe vételével elvégeztem a REHAROB Gyógytornásztató Rendszerben alkalmazott betanításos erőszabályozás stabilitsávizsgálatát. A stabilitási térképeket a szabályozás arányos- és integráló erősítési tényezőinek függvényében ábrázoltam különöző, a gyógytornász kezét modellező, merevségi érték mellett. Azonosítottam továbbá a stabilitási térképek azon központi tartományait, amelyeknél a betanítót terhelő tranziens erőhiba csillapodása optimális mértékű a gyógytornász kezét jellemző merevségi paraméter széles tartományában.

Elméleti eredményeimet a REHAROB rendszer klinikai vizsgálata során mért kísérleti eredményekkel vetettem össze. Az összehasonlítást egy tipikus, a betanítás során tranziens rezgésekkel induló gyógytorna gyakorlatból származó adatsor segítségével végeztem el. Megmutattam, hogy a rögzített mozgást jellemző legalacsonyabb frekvencia értéke jól egyezik az elméleti számítások eredményével.

Az értekezés vontakozó részei: 5.4 Mechanical model of the teaching-in device, 5.5 Teaching-in force control strategy, 5.6 Model parameters, 5.7 Stability analysis, 5.8 Theory, simulation and experiments.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [2], [9], [10], [11], [17], [18].