Koraki za zmanjšanje računske zahtevnosti prediktivnega regulatorja za vodenje plazme v ITER fuzijskem reaktorju

Boštjan Pregelj[1], Samo Gerkšič[1], Matic Knap[1,2], Matija Perne[1]

[1]Institut Jožef Stefan, Odsek za sisteme in vodenje
[1]FMF / Cosylab
E-pošta: bostjan.pregelj@ijs.si

Improving computational performance of MPC for ITER magnetic plasma control

Abstract. *For plasma magnetic control, cascade control scheme with a plasma current and shape controller (CSC) in the outer loop and a vertical stabilisation controller in the inner loop is commonly used. In this work predictive controller is considered for CSC control and for it a methodical way is presented to reduce the optimization problem complexity and significantly improve computational performance. Additionally, a fast solver is introduced for further improvement. Simulation results are presented in charts and table for comparison.*

1 Uvod

Projekcije bodoče proizvodnje energije se delno v opirajo tudi uporabo fuzijskih reaktorjev. Tehnologija je zanimiva zaradi potencialno velikih moči, varnosti ter zanemarljivega vpliva na okolje. Klub temu da se začetek dejanske uporabe tovrstnih reaktorjev pomika vse dlje v prihodnost, znanost usmerja znaten del sredstev v raziskave in razvoj na tem področju. Poleg raziskav struktur, primernih materialov in njihovih lastnosti, se delo usmerja tudi na modeliranje in vodenje nestabilne plazme visoke gostote. Slednje je namreč ključno za varno in učinkovito delovanje fuzijskih reaktorjev. Pri tem gre za kompleksne multi-variabilne sisteme visokega reda z omejitvami tako na vhodnih kot izhodnih signalih, ter z zahtevanimi odzivnimi časi v območju µs do ms. Taka narava procesa je zelo zanimiva za uporabo pristopov prediktivnega vodenja, problematična pa je velikost modela. Le-ta narekuje visoko računsko zahtevnost tovrstnih algoritmov, ki onemogoča uporabo regulatorjev z vnaprej izračunanimi parametri (eksplicitni), kot tudi omejuje uporabo regulatorjev s sprotno optimizacijo. Uvedba hitrih optimizacijskih algoritmov pa umika to oviro in odpira možnost doseganja kratkih vzorčnih časov regulacijske zanke tudi za vodenje kompleksnih procesov visokega reda.

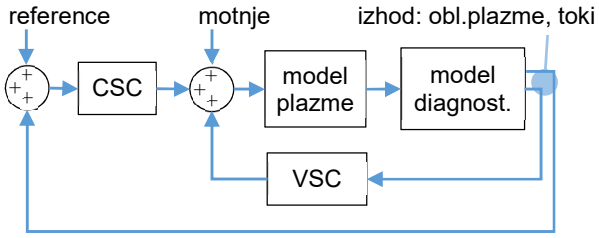
2 Simulacijski model za vodenje plazme

Modeli uporabljeni za načrtovanje regulatorjev in simulacijske eksperimente temeljijo na rezultatih programskih kod CREATE-L in CREATE-NL za simulacijo ravnotežnih modelov plazme in magnetnih navitij po pristopu teoretičnega modeliranja [1], s pomočjo katerih smo dobili lokalne linearne modele visokega reda (~130 stanj). Kot nominalni model smo uporabili Model 1 za ravnotežno stanje v delovni točki pri toku plazme I_p =14.5 MA, poloidnem beta faktorju β_p = 0.11, ter notranji induktanci l_i = 0.85, za oceno robustnosti pa smo uporabljali znatno drugačen Model 2 v delovni točki pri I_p =15 MA, β_p = 0.1 in l_i =1.21.

3 Vodenje plazme v fuzijskem reaktorju

Glavni izzivi vodenja so povezani z vzdrževanjem obratovanja v želenih okvirih v prisotnosti izrazitih motenj, kot na primer vertikalnih pomikov (*vertical displacement event, VDE*) in robnih lokaliziranih načinov (*edge localised mode, ELM*) [2].

Sheme magnetnega vodenja so tipično kaskadne strukture z regulatorjem za tok in obliko plazme (CSC) v zunanji zanki, ter regulatorjem za vertikalno stabilizacijo (VSC) v hitri notranji zanki, kot je prikazano na sliki 1. Pri tem so glavni izzivi *i)* vzdrževanje želene oblike plazme ob tipičnih motnjah, *ii)* robustnost na spremembe dinamike procesa, *iii)* najboljša izraba prostora reaktorja (čim večji presek plazme), ter *iv)* hitra regulacija ob upoštevanju največjih dovoljenih napajalnih tokov, ter najmanjših dovoljenih odmikov od stene reaktorja.



Slika 1. Kaskadna shema magnetne regulacije plazme.

Povzeli smo koncept magnetnega vodenja za ITER [3], ki predvideva izvedbo hitre vertikalne stabilizacije (VS) plazme preko dveh napetostnih generatorjev za kombinaciji zunanjih superprevodnih (*superconducting*, SC) navitij PF2-PF5 in dodatnih notranjih (*in-vessel*, IV) ohmskih navitij, na shemi preseka reaktorja na sliki 2 obkroženih z modro oz. rdečo črto. Pri njihovi uporabi pa je nujno upoštevati termične omejitve.

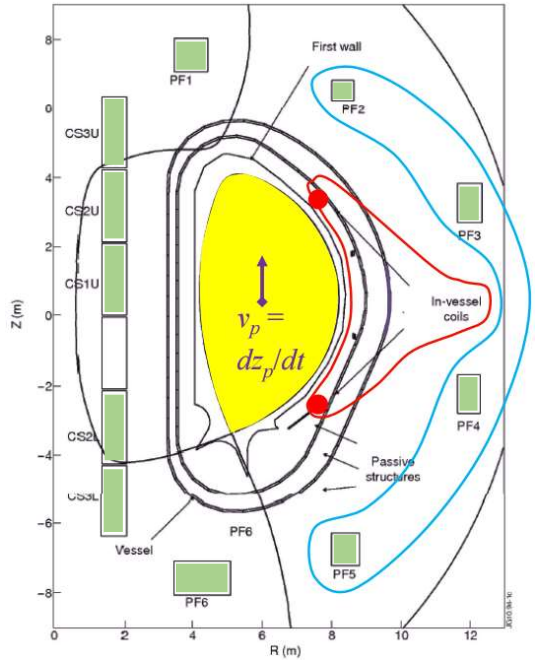
Za problem stabilizacije vertikalnega položaja plazme smo obravnavali podsistem celotnega modela z dvema vhodoma:

- u_1 napetost VS3 na IV navitjih (slika 2, rdeče)
- u_2 napetost VS1 na SC navitjih (slika 2, modro)

in dvema izhodoma, ki ju regulator vodi proti izhodišču:

- y_1 – tok na ohmskih navitjih VS3
- y_2 – vertikalna hitrost centroida plazme v_p

Uporabljeni regulator za notranjo zanko je LQG v časovno zvezni obliki in je podrobno obravnavan v [4].

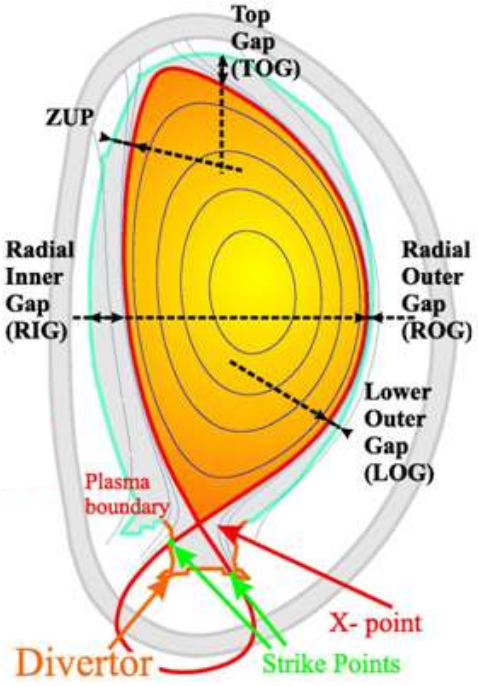


Slika 2. Poloidni presek ITER tokamak reaktorja. Rumeno: plasma, modro obkrožena superprevodna, rdeče ohmska navitja regulatorja VSC, zelena superprevodna navitja CSC

V tem delu se osredotočamo na regulator toka in oblike plazme (CSC) v zunanji zanki, ki regulira sistem z 11 vhodi SC navitij (zeleno) in ima 18 izhodov. To so:

- tok plazme I_p
- vektor 6 reguliranih odmikov **g**: 4 izbrani odmiki-*gaps*, ter dva položaja udarnih točk (*strike points*),
- tokovi 11 SC navitij $\mathbf{I}_{PF}$ (slika 2, zeleno),

ter dva dodatna merjena izhoda: tok SC navitij I_{VSI}, ter pozicijo plazme z_p.



Slika 3. Presek plazme z označenimi nekaterimi odmiki.

Za potrebe vodenja smo model ob zadržanju ključnih dinamik uspeli zmanjšati na iz 199 na 44 stanj [4]. To je mogoče le z opazovanjem spreminjanja dinamike ob redukciji. Model se za potrebe prediktivnega regulatorja nato razširi s 7 integratorji za motnje na signalih I_p in **g**, ter dodatnimi na 11 vhodih (*du* razširitev) na še obvladljivih 61 stanj. Ta stanja niso direktno merljiva, zato se ocenjujejo s pomočjo Kalmanovega filtra. Ker procesnih meritev za oceno kovariančnih matrik $\mathbf{Q}_k$ in $\mathbf{R}_k$ ni na voljo, sta le-ti grobo uglašeni z nastavljanjem ojačenj skupin diagonalnih elementov podobne dinamike, končna uglasitev pa je izvedena ročno skupaj z regulatorjem.

4 Poenostavitev računske kompleksnosti

Pri prediktivnem vodenju gre za iskanje minimuma kriterijske funkcije prek intervala predikcije N

$$J(\delta\tilde{\mathbf{u}}) = \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{y}_k^T \mathbf{Q}_y \mathbf{y}_k + \delta\mathbf{u}_k^T \mathbf{R}_{\delta u} \delta\mathbf{u}_k \ , \tag{1}$$

kjer sta vektorja $d\mathbf{u}$ in $\mathbf{y}$ podvržena enakostnim omejitvam, ki jih določa dinamika procesa zapisana v hitrostni obliki

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\delta\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{aligned}, \tag{2}$$

ter neenakostnim omejitvam,

$$\mathbf{A}_{ineq} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{u} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} \le \mathbf{b}_{ineq}, \tag{3}$$

ki jih določajo fizikalne oziroma tehnične omejitve sistema, $\mathbf{Q}_y$ in $\mathbf{R}_{du}$ pa uglaševalska parametra regulatorja. Računsko gledano gre za reševanje kvadratnega programa, na katerega velikost vplivajo *i)* velikost vektorjev $d\mathbf{u}$ in $\mathbf{y}$, *ii)* število omejitev ter *iii)* dolžina intervala predikcije (horizont). Ob uporabi mehkih omejitev se vektorju stanj doda še vektor »slack« spremenljivk.

4.1 Poenostavitev prediktivnega regulatorja

Za pohitritev izvajanja optimizacije lahko posežemo po pristopih za poenostavitev kvadratnega programa. V nadaljevanju je opisanih nekaj postopkov, rezultat uporabe le-teh pa prikazuje Tabela 1

4.1.1 Učinkovito obvladovanje mehkih omejitev

Klasična izvedba mehkih omejitev vsaki omejeni spremenljivki doda dve pomožni *(angl.: slack)* spremenljivki ter 4 neenakostne omejitve. V zadnjem času so bili razviti pristopi [6], kjer lahko mehke omejitve upoštevamo brez vnosa *slack* spremenljivk. S tem pristopom bistveno zmanjšamo tako optimizacijski vektor kot število omejitev.

4.1.2 Omejevanje sprememb regulirnega signala

Znano je, da se upoštevajoč konstantno motnjo vzdolž intervala predikcije regulirni signal opazno spreminja le v prvih nekaj korakih, nato pa ostane konstanten. To lastnost izkorišča tehnika »move blocking«, ki fiksira regulirni signal med posameznimi skupinami korakov predikcije in s tem neposredno zmanjšuje velikost optimizacijskega vektorja [7].

Tabela 1. Poenostavitev MPC problema in vpliv na kompleksnost kvadratnega programa

konfig.\ parameter	n_{y_om}	n_s	N_{reg}	N_{om}	**Z** $(n_x+n_u+n_s)*N$	**A**$_{ineq}$ $(n_y+n_u+n_s)*N_{om} \times n_z$	**Hessian** $(n_z \times n_z)$	**spomin QPgen**
osnovni problem	20	40	30	30	3390	1530×3390	3390×3390	*neizved.*
mehke omejitve brez slack sprem.	20	**0**	30	30	2190	930×2190	2190×2190	9.7 MB
eliminacija odvečnih omejitev	**11**	0	30	30	2190	660×2190	2190×2190	7.7 MB
move blocking	11	0	**3**	30	219	660×219	219×219	2.3 MB
redčenje izh. omejitev	11	0	3	**10**	219	220×219	219×219	1.6 MB
zgoščen zapis QP	11	0	3	10	33	220x33	33x33	0.06MB

n_u – število vhodov, n_x – število stanj, n_s – št. slack spremenljivk, n_{y_om} – št. omejenih izhodov, N_{reg} – št. sprememb reg. signala, N_{om} – št. korakov z omejitvami signalov

4.1.3 Redčenje omejitev tekom intervala predikcije

Učinkovit pristop za nadaljnjo poenostavitev problema je zmanjšanje števila omejitev s postavljanjem le-teh na vsak *k*-ti vzorec (npr. vsak drugi, tretji, itn.) [4].

4.1.4 Izbris enačb nepotrebnih omejitev

Z eliminacijo enačb neomejenih spremenljivk se velikost problema zmanjša brez vsakršnega vpliva na regulator.

4.2 Zgoščena formulacija QP problema

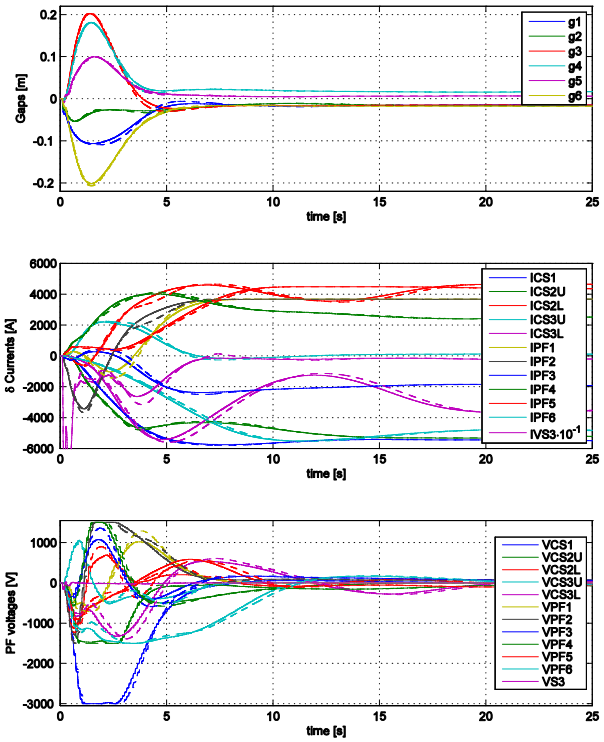
V strukturirani obliki QP problema optimizacijski vektor **z** vsebuje tako stanja **x**, kot vhode **u** sistema za vsak korak v intervalu predikcije. Za vodljive sisteme pa velja, da jih je mogoče pretvoriti v zgoščeno oblika zapisa, kjer so prihodnja stanja eliminirana iz optimizacijskega vektorja, ter zapisana kot eksplicitna funkcija trenutnega stanja in prihodnjih vhodov [8]. To je mogoče izvesti z upoštevanjem strukture dinamičnega sistema (DS) ali matematično z razcepom singularnih vrednosti (SVD). Tega koraka ni mogoče izvesti za vsak hitri QP algoritem, ker imajo nekateri zahtevano specifično strukturo zapisa sistema, ki omogoča učinkovito reševanje z razpršenimi diagonalnimi matrikami.

5 Uporaba paketa QPgen

Navkljub prej omenjenim poenostavitvam, algoritem generičnega optimizacijskega paketa CPLEX za izračun regulirnega signala še vedno potrebuje preveč časa za uporabo pri vodenju. Težava generičnih optimizacijskih algoritmov pri uporabi za vodenje, je vsakokratna predpriprava *(angl. preconditioning)* na reševanje problema, ki pa se tu ne spreminja. Prednosti specifičnih hitrih algoritmov je prav v tem, da zapleteno predpripravo na reševanje (inverzije matrik, iskanje optimalnih parametrov in faktorizacijo) izvedejo le enkrat, med reševanjem problema pa v vsakem koraku nastopajo le preproste operacije vektorskega množenja. Pri iskanju teh algoritmov smo se osredotočali na metode prvega reda, ki večinoma zelo hitro dosežejo zmerno natančnost, ki za vodenje večinoma zadošča, zaradi prisotnosti šuma, drugih nedoločenosti, ter možnosti popraveka že v naslednjem koraku regulacijske zanke. Po primerjavi večih (FiOrdOs, HP-mpc, QPgen), smo se zaradi dobrih performans in prilagodljivosti odločili za QPgen [9], odprtokodni Matlab paket za generiranje C-kode optimizacijskega algoritma na osnovi modela MPC. Za uporabo ga nadgradili z implementacijo prej navedenih poenostavitev ter dodatkom za uporabo kvadratnih uteži na mehkih omejitvah.

6 Simulacijski preizkusi

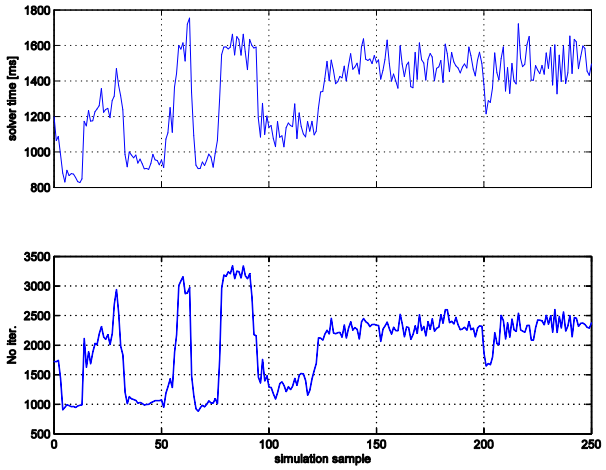
V simulacijskih preizkusih smo preko posnetih vhodnih potekov parametrov β_p in l_i simulirali tipično ELM motnjo - s takimi naj bi se soočal pravi sistem - in beležili 25 s odziv. Primerjali smo osnovni in poenostavljeni prediktivni regulator s CPLEX optimizacijskim algoritmom, ter na koncu še s QPgen algoritmom. Slika 4 prikazuje primerjavo potekov signalov odzivov (1, 2 graf) ter regulirnih signalov (3 graf) osnovnega (polna črta) in poenostavljenega (črtkano) regulatorja.



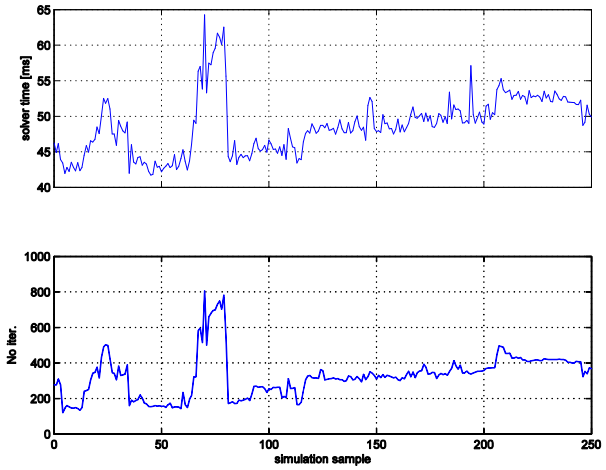
Slika 4. Primerjava reguliranih (zgoraj in sredina) in regulirnih (spodaj) signalov za primer odziva na tipično motnjo: osnovni MPC (polna črta) in poenostavljeni MPC (črtkana črta).

Trenutno so bile simulirane le posamezne motnje, v prihodnje pa so predvidene tudi te in simulacije z dodanim šumom meritev.

Sliki 5 in 6 prikazujeta računsko zahtevnost algoritma osnovnega oziroma poenostavljenega regulatorja v obliki potrebnih iteracij (spodaj) in porabljenega časa (zgoraj) za izračun v posameznem koraku simulacije na računalniku z 2.4 GHz procesorjem Intel Core2Duo z 8 GB ram. Statistični parametri za celoten simulacijski tek so prikazani v tabeli 2. V tabeli so podani tudi primerjalni podatki doseženi z algoritmom zgeneriranim s paketom QPgen na enakem računalniku, ki je bil gnan kot Matlab-mex funkcija na istem računalniku kot simulacijsko okolje. Tako kreirano programsko (C) kodo, optimizacijskega algoritma je mogoče prevesti tudi v samostojno aplikacijo, ki se izvaja na enem ali več jedrih ter ob tem še dodatno optimirati. Ob tem se pričakuje dodatne pohitritve algoritma, ki pa jih je potrebno še potrditi.



Slika 5. Računski čas (zgoraj) ter število iteracij (spodaj) ob simulaciji sistema z ***osnovnim*** prediktivnim regulatorjem, ter generičnim optimizacijskim algoritmom CPLEX.



Slika 6. Računski čas ter število iteracij ob simulaciji sistema s ***poenostavljenim*** prediktivnim regulatorjem.

Tabela 2. Računski parametri preizkušenih konfiguracij

Konfiguracija regulatorja	tol.	***Osnovni MPC*** povpr. / maks.		***Poenostav. MPC*** povpr. / maks.	
		št iter.	čas [ms]	št. iter.	čas [ms]
CPLEX	10^{-6}*	2000/3340	1332/1755	326/806	48.7/64.3
QPgen	10^{-3}	113 / 260	160 / 230	81 / 320	5.9 / 14.1
	10^{-4}	/	/	286/1230	9.7 / 31.0

* računski čas se tudi ob povečanju tolerance opazno ne skrajša.

7 Zaključek

V prispevku so opisane poenostavitve modela prediktivnega regulatorja in na aplikaciji vodenja plazme v ITER tokamak reaktorju prikazani potencialni vplivi na računsko zahtevnost ter kvaliteto vodenja tako prirejenega regulatorja. Poleg tega je nakazana tudi pohitritev, ki jo je mogoče doseči z uporabo izbranega hitrega optimizacijskega algoritma QPgen. S tem možnosti pohitritve še niso izčrpane: trenutno poteka delo na optimizaciji kode za samostojno realizacijo QPgen algoritma na neodvisnem računalniku z RT operacijskim sistemom, paralelizaciji in certifikaciji algoritma.

Literatura

[1] R. Albanese and F. Villone, *The linearized CREATE-L plasma response model for the control of current, position and shape in tokamaks*, Nucl. Fus. 38, 5, 1998

[2] T. Bellizio, R. Albanese, G. Ambrosino, M. Ariola, G. Artaserse, F. Crisanti, et al., *Control of elongated plasma in presence of ELMs in the JET tokamak*, IEEE T. Nucl. Sci. 58, 4, 2011

[3] G. Ambrosino, M. Ariola, G. De Tommasi, A. Pironti, *Plasma Vertical Stabilization in the ITER Tokamak via Constrained Static Output Feedback*, IEEE T. Contr. Syst. T. 19, 2, 2011

[4] Gerkšič, S., de Tommasi, G. *Vertical stabilization of ITER plasma using explicit model predictive control.* Proceedings of the 27th Symposium on Fusion Technology, SOFT-27, Liège, Belgium, September, 2012

[5] Gerkšič, S., de Tommasi, G. *Improving magnetic plasma control for ITER.* Proceedings of the 11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, (ISFNT-11), September, 2013, Barcelona, Spain,

[6] Kouzoupis D.: "*Complexity of First-Order Methods for Fast Embedded Model Predictive Control (Master Thesis)*". Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich 2014.

[7] S. J. Qin and T. A. Badgwell, *A survey of industrial model predictive control technology*, Control Eng. Pract., **11** 2003

[8] Maciejowski J., *Predictive Control with Constraints*, Pearson Education under the Prentice Hall imprint, 2001.

[9] QPgen, http://www.control.lth.se/QPgen/index.html