

Uvod u adaptivno upravljanje

Adaptivni sistemi – L4

Milan R. Rapać

Katedra za automatsko upravljanje
Departman za računarstvo i automatiku
Fakultet tehničkih nauka
Univerzitet u Novom Sadu

10. januar 2020

The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Itasdi

Sadržaj

Osnovni pojmovi i primene

Osnovni pojmovi

Primeri primene

Opšti problem adaptivnog upravljanja

Osnovni tipovi adaptivnog upravljanja

Analiza jednog karakterističnog slučaja

Osnovni pojmovi i primene

Adaptacija i adaptivno upravljanje

- ▶ *“Adaptirati se”* znači *“prilagoditi se”* promenama u svom okruženju.
- ▶ Adaptivni regulatori su upravljački algoritmi koji se prilagođavaju promenama objekta upravljanja (uključujući tu promene procesa, izvršnih organa i mernih uređaja), te promenama spoljašnjih uticaja, odnosno poremećajima.

Adaptivni (prilagodljivi) regulator jeste upravljački algoritam sa podesivim parametrima i mehanizmom za podešavanje parametara.

Istorijske napomene

Počeci adaptivnog upravljanja

Tokom 1950-tih razvijaju se prvi prilagodljivi upravljački algoritmi, uglavnom za potrebe projektovanja autopilota za letelice visokih performansi.

- ▶ Ustanovljeno je da su “klasični” regulatori sa konstantnim parametrima uspešni, ali samo u unapred zadatim režimima leta (zadata brzina i nadmorska visina). Cilj je bio projektovati regulator koji bi mogao raditi dobro u širokom opsegu radnih režima letelice.
- ▶ Konačno, predložen je “*gain scheduling*” princip.
- ▶ U jednom trenutku, razvoj prilagodljivih regulatora je obustavljen, delimično i zbog tada nepremostivih kako praktičnih, tako i teorijskih problema.



Slika: North American X-15

Istorijske napomene

Preduslovi za dalji razvoj adaptivnog upravljanja

Tokom 1960-tih razvoj drugih oblasti upravljanja, identifikacije i optimizacije doprineo je daljem razvoju adaptivnog upravljanja.

- ▶ Uvođenje tzv. “savremene teorije upravljanja” u kojoj se analiza i sinteza vrši u **vremenskom domenu**, metodama **prostora stanja** (Kalman i drugi).
- ▶ Razvoj **teorije stabilnosti** (Teorija Ljapunova i njene posledice).
- ▶ Razvoj *stohastike*, teorije slučajnih procesa, te konačno **stohastičke teorije upravljanja** (Kolmogorov i drugi).
- ▶ Razvoj **optimalnog upravljanja**, naročito uvođenje *dinamičkog programiranja* (Belmanova teorija).
- ▶ Fundamentalni doprinosi Cipkina i drugih.



Aleksandar Mihajlovič
Ljapunov
(1857 – 1918)



Andrej
Kolmogorov
(1903 – 1987)



Jakov Zamjanovič
Cipkin
(1919 – 1997)



Ričard Ernest
Belman
(1920 – 1984)



Rudolf Emil
Kalman
(1930 –)

Istorijske napomene

Renesansa adaptivnog upravljanja

Tokom 1970-tih dolazi do ponovnog rađanja interesa za prilagodljive upravljačke algoritme. Dalji razvoj oblasti tokom 1980-tih i 1990-tih uslovljen je dubljim razumevanjem teorijskih koncepata, te daljim razvojem softvera i hardvera upravljačkih uređaja.

- ▶ Razvoj različitih algoritama za **estimaciju** i *identifikaciju*.
- ▶ Kombinacija algoritama za identifikaciju sa različitim upravljačkim šemama.
- ▶ Prvi rezultati vezani za stabilnost adaptivnih algoritama javljaju se krajem 70-tih i početkom 80-tih godina.
- ▶ Tokom 80-tih i 90-tih godina istražuju se veze između adaptivnog upravljanja i otpornih (robustnih) upravljačkih strategija – **otporno prilagodljivo (robustno adaptivno) upravljanje**.
- ▶ Razvoj teorije *nelinearnih* sistema i **nelinearnog upravljanja**.
- ▶ Razvoj **računarske inteligencije** i **teorije učenja**.
- ▶ Razvoj *numeričkih postupaka, optimizacije* i *računarskih nauka*.

Svrha adaptivnog upravljanja

Adaptivni upravljački algoritmi su uvedeni sa željom da se omogući **prilagođavanje regulatora promenama dinamike upravljanog procesa i promenama svojstava poremećaja**. Tehnike adaptivnog upravljanja su, međutim, veoma uspešno primenjene i za potrebe **automatskog podešavanja parametara** regulatora.

Adaptivne regulatore treba koristiti u onim slučajevima u kojima se javljaju promene svojstava procesa i poremećaja.

- ▶ Ukoliko su te promene nepredvidive, tada je preporučljivo koristiti **adaptivni regulator sa kontinualnom adaptacijom** (samopodešavajući regulatori, adaptacija u odnosu na referentni model, i sl.).
- ▶ Ukoliko se promene predvidive, tada je preporučljivo koristiti **“gain scheduling”**.

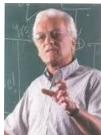
Alternativu adaptivnim regulatorima čine razni savremeni robustni regulatori: “klasični” regulatori sa konzervativno podešenim parametrima, klizni režimi upravljanja (“*sliding mode control*”), itd.

Savremene primene adaptivnog upravljanja

- ▶ Većina savremenih industrijskih upravljačkih algoritama ima ugrađen mehanizam adaptacije, barem u ograničenoj meri.
 - ▶ PID regulatori sa automatskim podešavanjem (*PID auto-tuning*)
 - ▶ PID regulator sa preključivanjem parametara (*PID gain scheduling*)
- ▶ Veliki broj savremenih industrijskih DCS sistema ima podršku za implementaciju određenih adaptivnih upravljačkih algoritama.
- ▶ Savremene civilne, vojne i svemirske letelice koriste adaptivne upravljačke strategije u manjoj ili većoj meri.
- ▶ Autopiloti u savremenim plovilima.



Karl Johan
Åström
(1934 –)



Petar
Kokotović
(1934 –)



Miroslav
Krstić
(1964 –)

Savremene primene adaptivnog upravljanja

U okviru savremenog DCS sistema



DeltaV Adapt provides continuous adaptive control for any DeltaV PID control loop.

Slika: DeltaV Adapt – Deo Emersonovog DCS-a.

Savremene primene adaptivnog upravljanja

Letelice, plovila, projektili, ..., Formacije letelica



Opšti problem adaptivnog upravljanja

Opšti problem adaptivnog upravljanja

1. Matematički model procesa
2. Struktura upravljačkog algoritma
3. Mehanizam adaptacije
4. Implementacija regulatora

Opšti problem adaptivnog upravljanja

Matematički model procesa

- ▶ Adaptivno upravljanje se može primeniti na procese opisane različitim matematičkim modelima: linearnim ili nelinearnim, vremenski kontinualnim ili diskretnim, konačne ili beskonačne dimenzije, sa ili bez kašnjenja, ...
- ▶ U okviru ovog kursa posmatraćemo isključivo **linearne matematičke modele (vremenski kontinualne i vremenski diskretne) bez transportnog kašnjenja.**

VR. KONTINUALNI MODEL I	DISKRETIZACIJA	VR. DISKRETNI MODEL I
$\dot{x} = Ax + Bu$ $y = Cx$	$\Phi = e^{-At}$ $\Gamma = \int_0^T e^{A\tau} B d\tau$	$x^+ = \Phi x + \Gamma u$ $y = Cx$
$G(s) = C(sI - A)^{-1}B$	$G(z) = \mathcal{Z} \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s} G(s) \right\}$	$G(z) = C(zI - \Phi)^{-1}\Gamma$

Opšti problem adaptivnog upravljanja

Struktura upravljačkog algoritma

U praksi se najčešće javjaju sledeći tipovi upravljačkih algoritama.

- ▶ Klasični industrijski regulatori (**P**, **PI**, **PD**, **PID**): $C(s) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s(sT_f + 1)}$
- ▶ **Regulatori po stanjima** procesa: $u = -Kx + r_f$. Parametri regulatora se mogu određivati metodom podešavanja polova ili metodama optimalnog upravljanja (LQR). r_f je “*feed-forward*” komponenta dobijena filtriranjem reference.
- ▶ **Regulatori po estimiranim stanjima**: $u = -K\hat{x} + r_f$. Parametri regulatora i estimatora se mogu određivati metodama podešavanja polova ili optimalno (LQR, LQG).
- ▶ **RST regulatori**: $Ru = -Sy + Tr$. R , S i T su odgovarajući polinomi (po promenljivama s ili z , tj. po diferencijalnom operatoru ili operatoru prednjačenja).

Opšti problem adaptivnog upravljanja

Mehanizam adaptacije

Parametri regulatora se mogu podešavati neposredno ili posredno (na osnovu estimiranih parametara procesa). U tom smislu razlikujemo **direktno** i **indirektno adaptivno upravljanje**.

Bez obzira da li se estimiraju parametri procesa ili regulatora, sama estimacije se može vršiti na različite načine. U praksi se najčešće koriste:

- ▶ **Rekurzivna metoda najmanjih kvadrata**, sa i bez faktora zaboravljanja, te njene različite modifikacije
- ▶ **Gradijentni metod** (*MIT pravilo*) i njegove modifikacije
- ▶ Različiti postupci zasnovani na analizi konvergencije i sl.

Osnovni tipovi adaptivnog upravljanja

Osnovni tipovi adaptivnog upravljanja

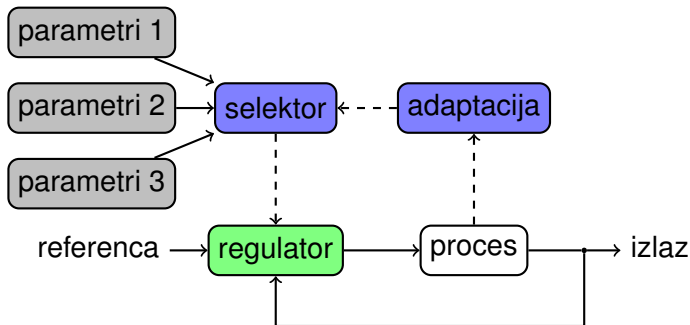
Osnovna hipoteza adaptivnog upravljanja

Za svaki skup vrednosti parametara modela objekta upravljanja (procesa) može se naći regulator zadate strukture koji postiže željena performanse procesa u zatvorenoj sprezi.

- ▶ Preključivanje parametara (*Gain Scheduling*)
- ▶ Adaptiranje prema referentnom modelu (*Model Reference Adaptive Control – MRAC*)
- ▶ Samopodesivi regulatori (*Self-Tuning Regulators – STR*)
- ▶ Dvojno (dualno) upravljanje (*Dual Control*)

Preključivanje parametara

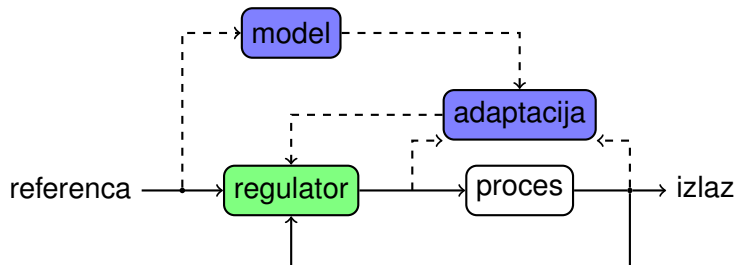
Gain Scheduling



- ▶ *Gain Scheduling* podrazumeva da se unapred definiše **konačan broj radnih režima**. Za svaki od tih radnih režima projektuje se regulator konvencionalnim, neadaptivnim metodama (najčešće PID). **Adaptacija se svodi na izbor onog regulatora koji odgovara tekućem radnom režimu.**
- ▶ Najčešće je struktura regulatora fiksna, jedino se parametri menjaju u zavisnosti od radnog režima upravljanog procesa.

Adaptacija u odnosu na referentni model

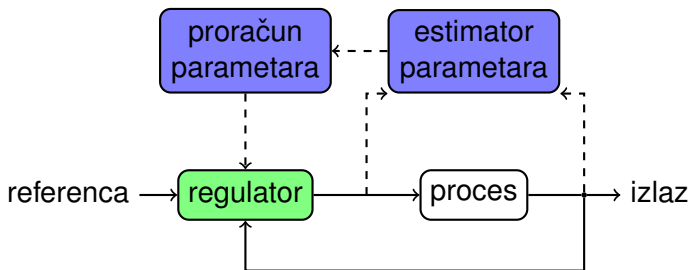
Model Reference Adaptive Control



- ▶ Regulator je fiksne strukture. Parametri regulatora se *kontinualno menjaju sve dok se ponašanje procesa nakon zatvaranja povratne sprege ne poklopi sa ponašanjem referentnog modela*.
- ▶ Mehanizam adaptacije se projektuje bilo primenom *MIT pravila* (gradijentni, *ad-hoc* pristup), bilo na osnovu *Ljapunovljeve teorije stabilnosti*.

Samopodešavajući regulatori

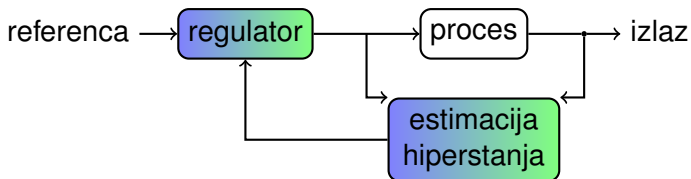
Self Tuning Regulators



- ▶ Regulator je fiksne strukture. **Estimator neprekidno procenjuje parametre procesa ili regulatora.**
- ▶ **Parametri regulatora se proračunavaju na osnovu nekog klasičnog postupka** (*underlying control problem*) – PID, podešavanje polova, itd – **kao da su estimirane vrednosti tačne!** (*certainty equivalence principle*)
- ▶ Ukoliko estimator procenjuje parametre procesa, tada govorimo o *indirektnom (posrednom) samopodešavajućem regulatoru*. Ukoliko se parametri regulatora estimiraju neposredno, tada govorimo o *direktnom samopodešavajućem regulatoru*.

Dvojno upravljanje

Dual Control



- ▶ Dvojno (dualno) upravljanje predstavlja *najopštiji, ali i najsloženiji pristup rešavanju problema adaptivnog upravljanja*.
- ▶ Zasniva na teoriji optimizacije i stohastičkog upravljanja. Otuda ima manje principskih ograničenja u odnosu na prethodne pristupe, a principijelno je u stanju da prati brze promene svojstava procesa i okoline.
- ▶ **Za razliku od prethodno opisanih pristupa, dvojno upravljanje ne razdvaja postupak upravljanja od postupka adaptacije** (otuda i ime).

Analiza jednog karakterističnog slučaja

Upravljački zadatak

Dat je dinamički proces (objekat upravljanja) poznatih i nepromenljivih svojstava, opisan funkcijom prenosa

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)^3} .$$

Upravljanje se vrši pomoću aktuatora izrazito nelinearne statičke karakteristike

$$u_a = f(u) = \begin{cases} 0 & u < 0 \\ u^4 & 0 \leq u \leq 1 \\ 1 & u > 1 \end{cases} ,$$

gde je u_a izlaz aktuatora, a u upravljački signal regulatora.

Predložiti strukturu upravljačkog algoritma i vrednosti svih parametara.