

Proiect

Identificarea sistemelor 2019-2020

Organizare

Acest proiect este parte obligatorie a cursului de Identificarea Sistemelor, seria B, linia de licență Ingineria Sistemelor, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca. Nota la proiect are o pondere de 30% în nota finală a disciplinei (15% partea 1, și 15% partea 2). Proiectul va fi efectuat în grupuri de câte **trei** studenți, și rezolvarea sa necesită aproximativ 20 ore / student, depinzând și de experiența fiecăruia în MATLAB. Fiecare grup va primi seturile sale de date separate. Pentru a le primi, formați cât mai repede grupuri și trimiteți un email profesorului Lucian Bușoniu, la adresa `lucian@busoniu.net`. Menționați numele și adresele de email ale tuturor membrilor grupului.

Proiectul constă din două probleme. În prima problemă, se va modela comportamentul unei funcții necunoscute folosind un aproximator cu funcții radiale de bază, iar a doua problemă tratează identificarea ARX neliniară a unui sistem dinamic necunoscut, cu aproximare polinomială. Evaluarea se face diferit pentru cele două părți, vezi mai jos fiecare parte pentru detalii. **Regulă esențială:** Este strict interzisă copierea de cod, text, sau rezultate de la colegi sau din alte surse cum ar fi website-uri etc. Verificările de plagiarism se fac cu metode automate, și nu se va tolera nici un fel de material copiat: încălcarea acestei reguli duce imediat la pierderea dreptului de participare la examen. Fiți așadar extrem de atenți!

Partea 1. Modelarea unei funcții necunoscute

Se dă un set de date de intrare-ieșire, unde ieșirea este generată de o funcție necunoscută, neliniară dar statică. Ieșirea este afectată de zgomot, pe care-l vom presupune aditiv, de medie zero, și normal distribuit. Funcția are două variabile de intrare și una de ieșire. Va trebui dezvoltat un model pentru această funcție. Un al doilea set de date, generat de aceeași funcție, este furnizat pentru validarea modelului dezvoltat. Cele două seturi sunt furnizate într-un fișier de date MATLAB, conținând câte o structură (tip de date MATLAB) pentru fiecare set. Structura pentru antrenarea modelului este numită `id`, iar cea pentru validare `val`. Fiecare din aceste structuri conține următoarele câmpuri:

- O colecție de coordonate X pentru intrări, unde X este un *cell array* conținând doi vectori, fiecare vector $X\{1\}$, $X\{2\}$ conținând o grilă de n puncte pentru dimensiunea `dim` a intrării.
- O colecție de ieșiri corespunzătoare Y , reprezentată printr-o matrice de dimensiunea $n \times n$, unde $Y(k1, k2)$ este valoarea funcției f în punctul $(X\{1\}(k1), X\{2\}(k2))$ (afectată de zgomot).

Vom crea un aproximator pentru f folosind funcții radiale de bază (RBF) de tip Gaussian. Pentru simplitate, vom plasa RBFurile pe o grilă echidistantă cu $R \times R$ puncte. (Nu este aceeași cu grila de eșantioane de mai sus!) Un RBF individual are formula:

$$\phi_i(x) = \exp \left[-\frac{(x_1 - c_{i,1})^2}{b_1^2} - \frac{(x_2 - c_{i,2})^2}{b_2^2} \right]$$

unde:

- $i = 1, \dots, R^2$ este indexul RBFului pe grilă. De notat că grila este bidimensională, așadar avem nevoie de R^2 RBFuri. Pentru o precizie mai bună a aproximatorului, creați grila în așa fel încât să fie câte un RBF în fiecare colț al domeniului.

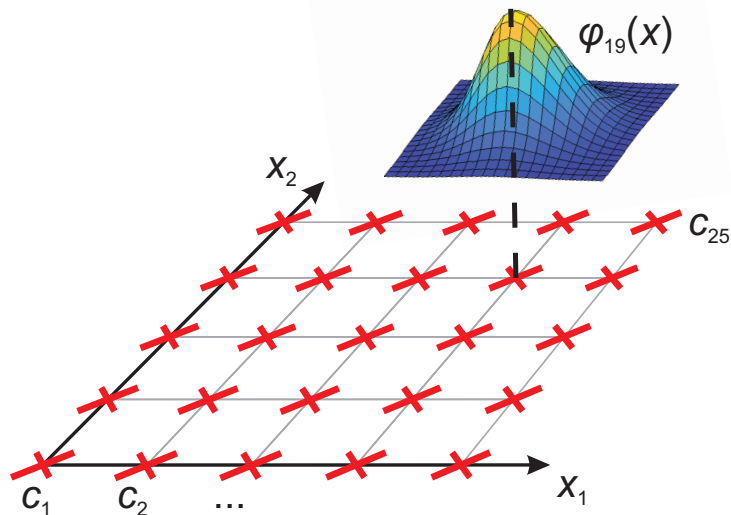


Figura 1: Ilustrație a grilei de RBFuri pentru $R=5$. Fiecare X roșu este un centru, și figura arată și una din cele 25 RBFuri.

- c_i este centrul RBFului cu indexul i . De notat că $c_{i,1}$ dă poziția centrului pe prima dimensiune, și $c_{i,2}$ pe a doua.
- b_1 este raza RBFului pe dimensiunea 1, și b_2 pe dimensiunea 2. De notat că b nu se schimbă cu indexul i al RBFului, așadar toate RBFurile au aceeași formă, și doar centrele diferă (se mută pe grilă).

Aproximatorul complet este atunci:

$$g(x) = \sum_{i=1}^{R^2} \phi_i(x)\theta_i$$

unde $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_{R^2}]^T$ este vectorul de parametri. Vezi Figura 1 pentru o ilustrație a grilei de RBFuri.

Dacă domeniul grilei de RBFuri este luat egal cu cel al datelor, atunci singurele variabile ce trebuie acordate sunt R și b . Odată ce aceste variabile au fost alese, aflarea modelului constă din calculul vectorului optim de parametri θ în așa fel $g(x)$ se apropie cel mai mult de funcția țintă $f(x)$ pe setul de date de identificare – matematic, vectorul θ care minimizează suma (sau echivalent media) erorilor pătratice. Antrenarea se poate face cu metoda regresiei liniare, ținând cont de faptul că g este liniar în parametri (chiar dacă, prin ecuația RBFurilor, este neliniar în variabilele de intrare x). Detaliile despre această metodă se găsesc în curs, Partea 4: *Baze matematice*, secțiunile despre regresia liniară. Regresorii sunt în cazul nostru RBFurile.

Cerințele pentru prima problemă sunt următoarele. Programați un aproximator cu RBFuri în care mărimea grilei R și raza RBFurilor b sunt configurabile. Încercați să antrenați aproximatoare cu diverse valori ale R , pentru a-l obține pe cel mai precis. Pentru început, puteți lua b_1 și b_2 egale cu distanțele între două centre de pe grilă, pe fiecare din cele două dimensiuni, obținând astfel un aproximator neted. Apoi, opțional, puteți acorda și razele b . Validarea (inclusiv pentru comparația între diverse valori ale lui R , de exemplu) trebuie efectuată permanent pe setul diferit de date pentru validare. Raportați eroarea medie pătratică pe ambele seturi de date (identificare și validare), și reprezentați grafic rezultatul dat de aproximator, comparat cu valorile reale ale funcției, pe cele două seturi de date. Discutați rezultatele,

inclusiv alegerea lui R și posibil a lui b , precum și erorile pe cele două seturi de date, ținând cont de discuția din curs despre alegerea modelului și supraantrenarea (en. *overfitting*) în regresie.

Pentru inspirație puteți examina soluția dvs. pentru laboratorul 4, *Regresia liniară pentru aproximarea funcțiilor*.

Evaluare partea 1

Soluția proiectului constă dintr-un scurt raport, scris în engleză sau în română, și din codul asociat. Un grup produce un singur raport. Termenul limită pentru raport și cod este **10 noiembrie 2019, cel târziu la 24:00**. În caz că un grup întârzie cu trimiterea soluției, fiecare nouă zi de întârziere începută duce la pierderea a două puncte din nota maximă (de exemplu, dacă soluția este livrată în 12 noiembrie 2019 la ora 00:10AM, nota maximă devine 6 fiindcă a început deja a doua zi de întârziere).

Vă rugăm să **fiți atenți la, și să urmăriți strict**, următoarele instrucțiuni pentru trimiterea soluției. Un proces uniform și semi-automat pentru procesarea soluțiilor este esențial pentru eficiența în notare. Orice deviație de la reguli înseamnă că soluția va necesita timp adițional pentru procesare manuală, și cum acest timp în general nu este disponibil, riscați să nu vi se poată nota soluția.

- Soluția va consta din exact două fișiere, denumite exact: Nume1Nume2Nume3.pdf și Nume1Nume2Nume3.zip, unde Numei este numele de familie al studentului "i" din grupul de proiect. De exemplu: IonescuFarkasBonta.pdf și IonescuFarkasBonta.zip.
- Primul fișier este raportul, care trebuie livrat **în format PDF** (nu DOCX sau orice alt format sursă; doar PDF). Raportul trebuie să includă listing-uri complete ale codului MATLAB dezvoltat (funcții și scripturi).
- Al doilea fișier conține codul în sine, trimis separat într-o **arhivă ZIP** (nu RAR, nu 7Zip sau alte formate; doar ZIP clasic). Important: Arhiva nu are voie să conțină subdirectoare, toate fișierele .m trebuie să fie în rădăcina arhivei.
- Aceste fișiere se vor trimite via un DropBox file request, al cărui link va fi trimis înainte de deadline. Nu trimiteți versiuni multiple, acestea nu vor fi luate în considerare. Doar prima variantă va fi luată în considerare, asigurați-vă așadar că este completă și corectă.
- Data de creare a fișierului în sistemul DropBox este folosită pentru calculul penalităților de întârziere conform regulilor de mai sus.

Partea 2. ARX neliniar

Pentru a efectua această parte din proiect, este preferabil să aveți bazele despre modele ARX *liniare* din Partea 5 a materialului de curs, *Metode ARX*.

Se dă un set de date măsurat de la un **sistem dinamic** cu o intrare și o ieșire. Ordinul sistemului nu este mai mare de 3, și dinamica poate fi neliniară, în timp ce ieșirea poate fi afectată de zgomot. Vom dezvolta un model de tip cutie neagră pentru acest sistem, folosind o structură ARX neliniară de tip polinomial. Un al doilea set de date, măsurat de la același sistem, este furnizat pentru validarea modelului dezvoltat. Cele două seturi de date sunt furnizate într-un fișier MATLAB, respectiv în variabilele `id` și `val`, ambele

obiecte de tip `iddata` din toolbox-ul de identificarea sistemelor. Reamintim că intrarea, ieșirea, și perioada de eșantionare sunt disponibile în câmpurile `u`, `y`, `Ts` ale acestor obiecte. În caz că toolbox-ul nu este instalat, aceleși seturi de date sunt furnizate și în format vectorial, `id_array` și `val_array`, fiecare dintre ele o matrice cu structura: valorile de timp pe prima coloană, intrarea pe a doua, și ieșirea pe ultima coloană.

Considerăm un model cu ordinele na , nb , și întârzierea nk , folosind aceeași convenție ca și funcția MATLAB `arx`. Modelul ARX neliniar are atunci structura:

$$\begin{aligned}\hat{y}(k) &= p(y(k-1), \dots, y(k-na), u(k-nk), u(k-nk-1), \dots, u(k-nk-nb+1)) \\ &= p(d(k))\end{aligned}\quad (1)$$

unde vectorul de ieșiri și intrări întârziate este notat $d(k) = [y(k-1), \dots, y(k-na), u(k-nk), u(k-nk-1), \dots, u(k-nk-nb+1)]^T$, și p este un polinom de gradul m de aceste variabile.

De exemplu, dacă $na = nb = nk = 1$, atunci $d = [y(k-1), u(k-1)]^T$, și dacă luăm gradul $m = 2$, putem scrie explicit polinomul:

$$y(k) = ay(k-1) + bu(k-1) + cy(k-1)^2 + vu(k-1)^2 + wu(k-1)y(k-1) + z \quad (2)$$

unde a, b, c, v, w, z sunt coeficienți reali și parametrii modelului. De notat că modelul este neliniar, conține pătrate și produse între variabilele întârziate (spre deosebire de ARX standard, care ar conține doar termenii liniari în $y(k-1)$ and $u(k-1)$). Modelul (1) are o proprietate esențială: este liniar în parametri, ceea ce înseamnă că parametrii pot fi găsiți folosind metoda regresiei liniare.

De notat că forma liniară ARX este un caz special al formei generale (1), obținut prin alegerea gradului $m = 1$, ceea ce duce la:

$$\hat{y}(k) = ay(k-1) + bu(k-1) + c$$

și în plus impunând ca termenul liber să fie $c = 0$ (fără această condiție, modelul se numește afin).

Cerințele sunt descrise în cele ce urmează. Programați o funcție care generează un model ARX neliniar de tip polinomial, pentru ordine na, nb , întârzieri nk , și gradul m configurabile. Programați de asemenea procedura de regresie pentru identificarea parametrilor, și utilizarea modelului cu intrări noi. De notat că această utilizare trebuie să se poată face în două moduri:

- Predicție (cu un pas înainte), care folosește valorile reale ale ieșirilor întârziate ale sistemului; în exemplul (2), la pasul k s-ar aplica ecuația (2) folosind variabilele $y(k-1)$ și $u(k-1)$ în partea dreaptă a egalității.
- Simulare, în care ieșirile precedente ale sistemului nu sunt disponibile, și ca atare nu se pot folosi decât ieșirile anterioare ale modelului însuși; în exemplu, $y(k-1)$ ar fi înlocuit cu valoarea simulată precedent $\hat{y}(k-1)$ în partea dreaptă a ecuației (2)

Identificați un astfel de model ARX neliniar folosind setul de date de identificare, și validați-l pe setul de validare. Alegeți atent ordinele modelului și întârzierea, precum și gradul polinomului. Pentru a simplifica procedura de căutare, puteți lua $na = nb$. Raportați eroarea de predicție și eroarea de simulare atât pentru setul de identificare, cât și pentru cel de validare (folosiți eroarea medie pătratică). Includeți un grafic reprezentativ al calității modelului pentru cele două seturi, în simulare și pentru predicție. Discutați rezultatele, incluzând calitatea modelului pe cele două seturi de date.

Prezentarea de mai sus este suficientă pentru implementarea metodei, dar pentru detalii tehnice puteți studia de ex. următoarele articole:

1. H. Peng et al., *RBF-ARX model-based nonlinear system modeling and predictive control with application to a NOx decomposition process*, Control Engineering Practice 12, paginile 191–203, 2007. Modelul este explicat în secțiunile 2.1-2.2, dar folosește în loc de polioname funcții de bază radiale reglabile în poziție și lățime.
2. L. Ljung, *System Identification*, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2007. Disponibil sub formă de raport tehnic cu numărul LiTH-ISKY-R-2809. Vezi secțiunea 4 pentru modele neliniare, care din nou folosesc funcții de bază.

Evaluare partea 2

Partea 2 va fi prezentată oral, și codul trebuie de asemenea trimis. Prezentările vor avea loc în săptămâna 13 a semestrului, anume între 6 și 10 ianuarie. Programul exact va fi comunicat cu un timp suficient în avans. Fiecare grup are 20 de minute, din care 10 sunt pentru prezentarea în sine, și 10 pentru întrebări. Toți membrii grupului trebuie să fie prezenți, și cu excepția situațiilor de forță majoră, orice student absent nu va avea proiectul validat, și ca atare nu va fi eligibil pentru examen. Nota va lua în considerare trei aspecte: soluția în sine (cod, rezultate); prezentarea; și răspunsurile la întrebări. Scopul principal al întrebărilor va fi diferențierea contribuției fiecărui student din grup, deci în general fiecare student va primi altă notă.

Termenul limită pentru prezentare și pentru cod este **20 decembrie 2019, cel târziu la 24:00**. În caz că un grup întârzie cu trimiterea soluției, fiecare nouă zi de întârziere începută duce la pierderea a două puncte din nota maximă, ca și pentru partea 1.

Vă rugăm să urmăriți, la fel de strict ca și pentru partea 1, următoarele instrucțiuni pentru trimiterea soluției.

- Soluția va consta din exact două fișiere, denumite exact: Nume1Nume2Nume3.pdf, .ppt, sau .pptx; și Nume1Nume2Nume3.zip, unde Numei este numele de familie al studentului “i” din grupul de proiect. De exemplu: IonescuFarkasBonta.pdf și IonescuFarkasBonta.zip.
- Primul fișier este prezentarea, care trebuie livrat **în format PDF, PPT, sau PPTX** (nu se acceptă alte formate).
- Al doilea fișier conține codul în sine, trimis separat într-o **arhivă ZIP** (nu se acceptă alte formate). Important: Arhiva nu are voie să conțină subdirectoare, toate fișierele .m trebuie să fie în rădăcina arhivei.
- Aceste fișiere se vor trimite via un DropBox file request, al cărui link va fi trimis înainte de deadline. Nu trimiteți versiuni multiple, acestea nu vor fi luate în considerare. Doar prima variantă va fi luată în considerare, asigurați-vă așadar că este completă și corectă.
- Data de creare a fișierului în sistemul DropBox este folosită pentru calculul penalităților de întârziere conform regulilor de mai sus.

Programare în MATLAB și remarci adiționale

Dacă sunteți mai puțin familiari cu programarea în MATLAB, următoarele idei vă pot fi de folos. Scrieți `doc` în linia de comandă pentru accesarea documentației. Un nod util la început este *Getting Started with MATLAB*. Vor fi de folos de asemenea și *Matrices and Arrays*, *Programming Basics*, și *Plotting Basics*.

Faceți un efort pentru a produce un cod MATLAB compact și elegant, evitând folosirea buclelor `for`, `while` și a instrucțiunilor `if-then-else` pentru operații care pot fi efectuate mai simplu folosind vectori sau matrici. Indicii în această direcție găsiți căutând conceptul de “vectorizare” (en. *vectorization*) în documentația MATLAB. Nu exagerați însă cu vectorizarea: dacă programul este mai clar sau ușor de înțeles cu bucle sau instrucțiuni `if`, folosiți-le.

Este de preferat ca fiecare grup să lucreze la proiect pe laptopul lor, și ca acest laptop să fie același pe toată durata proiectului. Se evită astfel incompatibilitățile între versiunile de MATLAB instalate pe calculatoarele dvs. și cele ale Universității.