

Identificarea sistemelor

Ingineria sistemelor, anul 3
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Lucian Buşoniu



Partea I

Introducere în identificarea sistemelor

Obiectiv general

Identificarea unui sistem este procesul de creare a unui *model* care să descrie comportamentul unui *sistem dinamic*, din *date experimentale*.

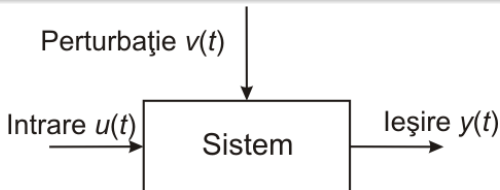
Conținut

- 1 Conceptul de sistem
- 2 Conceptul de model
- 3 Fluxul de lucru pentru identificare, cu exemplu
- 4 Rezumat
- 5 Organizarea disciplinei

Conceptul de sistem

Definiție informală

Un **sistem** este o parte a lumii cu o interfață bine definită, asupra căreia acționează semnale de *intrare* și de *perturbație*, și care produce semnale de *ieșire*.



Intrările pot fi controlate, dar nu și perturbațiile; adeseori perturbațiile nu pot fi nici măsurate. De notat că semnalele sunt funcții de timp, deci sistemul evoluează în timp – este *dinamic*.

Exemplu de sistem: O mașină (autovehicul)



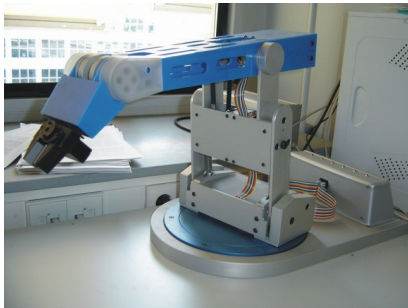
Considerăm mișcarea longitudinală (înainte) a unei mașini.

Intrări: Pozițiile pedalelor de accelerație și frână, eventual treapta de viteză.

Ieșire: Viteza.

Perturbație: Frecarea cu diferitele suprafețe de rulare.

Exemplu de sistem: Braț robotic



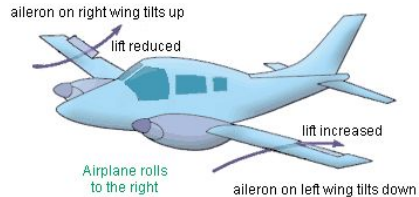
Considerăm un braț robotic care execută de ex. mișcări de tip “pick and place”.

Intrări: Voltaje pe motoarele de CC ale cuplelor și gripper-ului.

Ieșiri: Unghiurile elementelor și poziția gripper-ului.

Perturbații: Masa obiectului ridicat (sarcina), frecarea.

Exemplu de sistem: Avion



Considerăm mișcarea de rotație a unui avion în jurul axei longitudinale (en. *roll*).

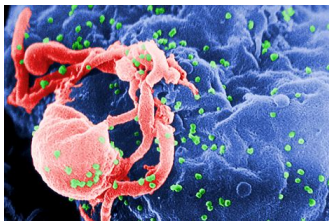
Intrare: Unghiul de deviație al eleronului.

Ieșire: Unghiul de rotație al avionului.

Perturbații: Vânt, deviațiile altor suprafețe de control, etc.

De notat că studiem doar o parte a dinamicii sistemului. Astfel de simplificări sunt adeseori efectuate.

Exemplu de sistem: Infecția cu HIV



Intrări: Cantități de medicament aplicate (de ex. PI, RTI).

Ieșiri: Numărul de celule-țintă infectate, respectiv sănătoase; particule virale; răspuns imunitar (toate per mililitru).

Perturbații: Co-infecții, caracteristicile fiecărui pacient.

Alte domenii

Ultimul exemplu ilustrează că modelarea și identificarea sistemelor sunt utile și în afara cazurilor tipice din automatică (sisteme electrice, mecanice, hidraulice, pneumatice cum ar fi cele descrise mai sus).

Alte domenii de aplicație sunt:

- Industria chimică.
- Infrastructura energetică, de transport, și de apă.
- Procesarea semnalelor.
- Economia.
- Științele sociale (de ex. dinamica rețelelor sociale).
- Etc.

Conținut

- 1 Conceptul de sistem
- 2 Conceptul de model**
- 3 Fluxul de lucru pentru identificare, cu exemplu
- 4 Rezumat
- 5 Organizarea disciplinei

Conceptul de model

Definiție informală

Un **model** este o descriere a sistemului care îi surprinde comportamentul relevant.

Caracteristică esențială: modelul este întotdeauna o *aproximare* (idealizare, abstractizare) a sistemului real.

Acest lucru este necesar (un model exact nu este fezabil) și dezirabil (modelele mai simple sunt mai ușor de înțeles și utilizat).

Exemplu non-matematic: Model mental al unei mașini



Modelul constă din reguli verbale de tipul:

- Rotirea volanului duce la virarea mașinii.
- Apăsarea pedalei de accelerație crește viteza mașinii.
- Apăsarea pedalei de frână scade viteza mașinii.
- ...

Taxonomie a modelelor matematice

După numărul de parametri:

- 1 Modele parametrice: au formă fixă (formulă matematică), număr cunoscut și de obicei mic de parametri
- 2 Modele neparametrice: nu pot fi descrise cu un număr fix, mic de parametri
Adesea reprezentate prin grafice sau tabele

După cunoștințele disponibile în avans ("culoare"):

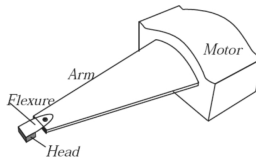
- 1 Modele din principii de bază, cutie albă: complet cunoscute în avans
- 2 Modele cutie neagră: complet necunoscute în avans
- 3 Modele cutie gri: parțial cunoscute

Identificarea sistemelor este utilă în aflarea (părților necunoscute din) modelele cutie neagră sau gri

Urmează detalii și exemple.

Exemplu pentru modele (ne)parametrice: hard disk

Considerăm un cap de citire-scriere pentru un hard disk, cu intrarea = voltajul motorului, și ieșirea = poziția capului



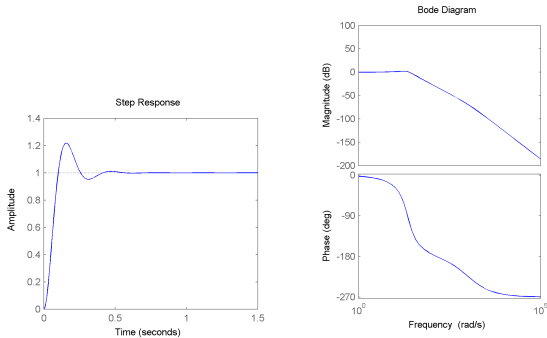
Exemplu model parametric: funcție de transfer

$$H(s) = \frac{b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{500}{0.001 s^3 + 1.02 s^2 + 20 s + 500}$$

Forma (formula matematică) este dată și depinde de un număr fix de parametri (coeficienți polinomiali b_0 , a_3 , *dotsc*, a_0) care trebuie să fie setați pentru a obține modelul complet specificat.

 **Conexiune:** Teoria sistemelor.

Exemplu model neparametric: grafic



Modelul reprezintă comportamentul sistemului în formă grafică, de ex. *răspuns la treaptă* (indicial) sau *răspuns la frecvență* (diagrama Bode). Următoarele două cursuri vor trata astfel de modele (mai exact răspunsul la treaptă și la impuls).

 **Conexiune:** Teoria sistemelor (reamintim răspunsul la treaptă și impuls al sistemelor de ordinul 1 și 2, diagramele Bode).

Modele din principii de bază, cutie albă

Se aplică legile fizice (de ex. echilibre de forțe) pentru a obține ecuații ce descriu sistemul. Toți parametrii din ecuații sunt cunoscuți. Modelele rezultante sunt de obicei ecuații diferențiale ce implică intrările și ieșirile.

Cum totul este cunoscut / putem “vedea în interiorul cutiei, modelele din principii de bază se numesc și **cutie albă**.

Caracteristici:

- Rămân valide în toate punctele de funcționare.
- Oferă o înțelegere profundă a comportamentului sistemului.
- Nu sunt fezabile dacă sistemul este prea complicat sau insuficient înțeles.



Conexiune: Modelarea proceselor.

Exemplu model cutie albă



$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau$$

Intrări: Cuplurile motoarelor, concatenate în vectorul $\tau \in \mathbb{R}^n$. n este numărul de cuple.

Ieșiri: Unghiurile elementelor, concatenate în vectorul $\theta \in [-\pi, \pi)^n$.

τ și θ sunt funcții de timp (omitem aici argumentul t). Derivata în raport cu timpul este notată cu un punct, de ex. $\dot{\theta} = d\theta/dt$.

M : matricea de masă, C : matricea forțelor centrifuge și Coriolis, G : vectorul gravitației cunoscute (nu intrăm în expresiile lor detaliate).

Modele cutie neagră

Obținute numeric, din date experimentale colectate de la sistem.

Caracteristici (comparativ cu modelele cutie albă):

- Sunt valide de obicei doar *local*, în jurul unui punct de funcționare.
- Oferă mai puțină înțelegere asupra sistemului.
- Sunt ușor de construit și de folosit, și reprezintă singura opțiune în multe aplicații.

Focusul principal al acestui curs de identificarea sistemelor.

Un exemplu detaliat este dat în secțiunea următoare a cursului.

Modele cutie gri

Modelele de tip **cutie gri** se situează între modelele cutie-neagră și cele analitice: structura modelului se poate obține din principii de bază, dar anumiți parametri sunt necunoscuți și trebuie identificați din experimente.

Exemplu: ecuația brațului robotic $M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau$ este disponibilă, dar coeficienții de frecare ai cuplelor sunt necunoscuți (o situație tipică în practică, fiindcă modele ale frecării sunt foarte greu de obținut).

Utilizarea modelelor

Modelele sunt utile în multe scopuri, dintre care:

- **Analiza** modelului (pentru a determina caracteristici cum ar fi stabilitatea, constantele de timp etc.)
- **Simularea** răspunsului sistemului în situații noi. Permite studierea unor scenarii care ar fi periculoase sau costisitoare pentru sistemul real (de ex. cum ar reacționa un pacient cu HIV la strategii noi de tratament).
- **Predicția** ieșirilor viitoare ale sistemului (de ex. predicția meteo).
- **Proiectarea unui controler** care să obțină un comportament bun al sistemului (de ex. răspuns rapid, suprareglaj mic).
- **Proiectarea sistemului în sine**, prin studierea comportamentului său înainte de a-l construi efectiv (cum sistemul nu este disponibil în acest caz, este nevoie de modelarea analitică din principii de bază.)

Proiectarea controlerelor este cea mai relevantă pentru noi, ca ingineri automatiști.

 **Conexiune:** Ingineria reglării automate (anul acesta)

Sumar al conexiunilor cu alte discipline

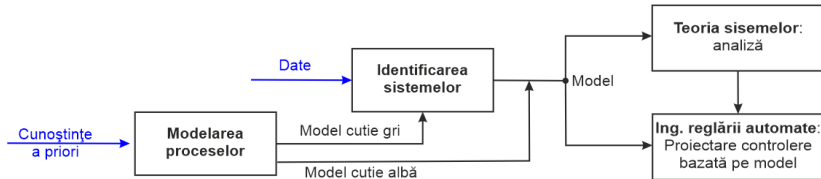
Identificarea sistemelor **folosește cunoștințe de la:**

- Algebră liniară
- Calcul numeric
- Modelarea proceselor
- Teoria sistemelor
- Optimizări

și **este utilă pentru:**

- Ingineria reglării automate
- Sisteme de conducere a proceselor continue
- Sisteme de conducere a roboților
- etc.

Conexiuni cheie și culoarea modelului



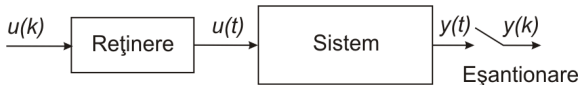
Conținut

- 1 Conceptul de sistem
- 2 Conceptul de model
- 3 Fluxul de lucru pentru identificare, cu exemplu**
- 4 Rezumat
- 5 Organizarea disciplinei

Flux de lucru - exemplu

Identificarea sistemelor se aplică de obicei în timp discret.

Schema tipică a unui sistem în timp discret:

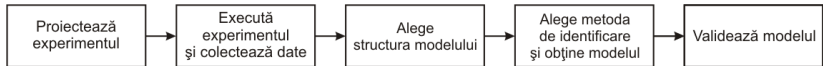


Vom considera aici un braț robotic flexibil, u = cuplu, y = accelerația brațului. Datele provin din DaiSy (Database for the Identification of Systems), <http://homes.esat.kuleuven.be/~smc/daisy/>.

Flux pasul 0: Stabilirea scopului modelului

Scop: [Simularea](#) răspunsului brațului flexibil.

Flux pasul 1: Proiectarea experimentului

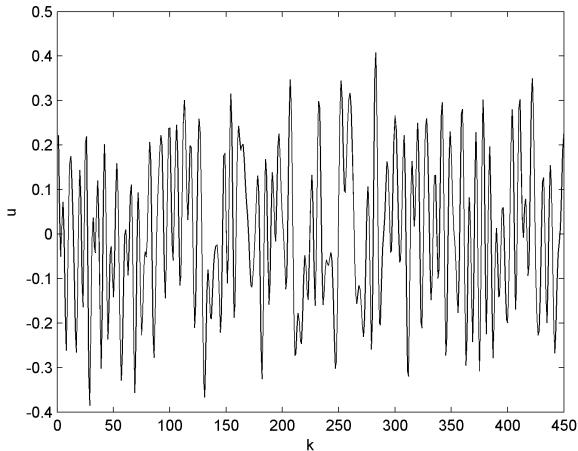


Un element esențial al proiectării experimentului este selecția semnalului de intrare (durată, perioadă de eșantionare, formă). Intrarea trebuie să fie suficient de informativă pentru a evidenția comportamentul relevant al sistemului.

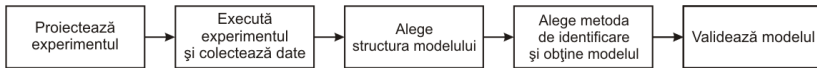
De obicei se impun constrângeri: sistemul nu poate fi plasat în regimuri periculoase, nu poate devia prea mult de la un punct de funcționare profitabil, etc.

Flux pasul 1: Proiectarea experimentului: exemplu

Semnal de intrare: $u(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots, N$



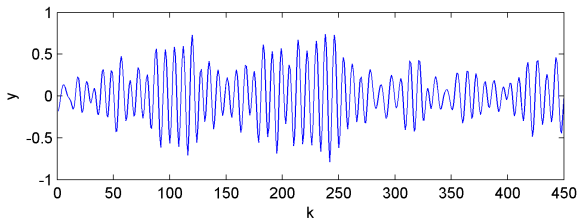
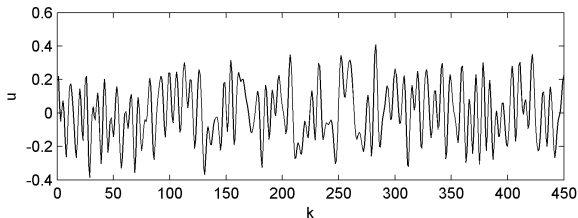
Flux pasul 2: Experiment



Se execută experimentul și se înregistrează datele de ieșire.

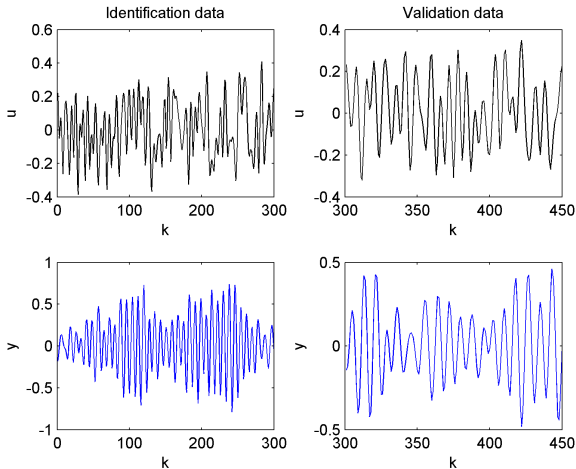
Flux pasul 2: Experiment: Exemplu

$$y(k), k = 0, 1, 2, \dots, N$$

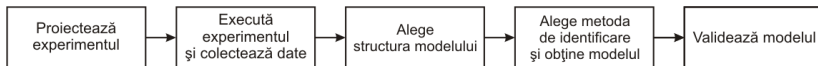


Flux pasul 2: Experiment: Exemplu (continuare)

Împărțim datele într-un set pentru *identificare* și altul pentru *validare* (important mai târziu).



Flux pasul 3: Structură model



Se alege structura modelului (grafic sau matematic, etc.)

Orice cunoștințe sau intuiții despre sistem trebuie exploatate în alegerea unei structuri potrivite: destul de flexibilă pentru a modela precis sistemul, dar suficient de simplă pentru ca identificarea să fie eficientă.

Flux pasul 3: Structură model: Exemplu

Alegem așa-numita structură “ARX”, unde ieșirea $y(k)$ la pasul discret curent este calculată pe baza intrărilor și ieșirilor precedente:

$$\begin{aligned}y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + a_3 y(k-3) \\ = b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + b_3 u(k-3) + e(k)\end{aligned}$$

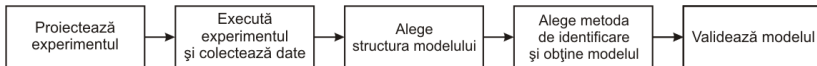
echivalentă cu

$$\begin{aligned}y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - a_3 y(k-3) \\ + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + b_3 u(k-3) + e(k)\end{aligned}$$

$e(k)$ este eroarea indusă de către model la pasul k . Ordinul modelului este 3.

Parametrii modelului: a_1, a_2, a_3 și b_1, b_2, b_3 .
(Reamintim că y și u sunt *datele*.)

Flux pasul 4: Identificarea modelului



O metodă de identificare este aleasă și aplicată pentru identificarea parametrilor modelului. Metodele aplicabile depind de structura aleasă.

Flux pasul 4: Identificarea modelului: Exemplu

Identificarea modelului ales constă din găsirea parametrilor $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$. Alegem o metodă care minimizează suma erorilor pătratice $\sum_{k=1}^{300} e^2(k)$ pe datele de identificare. Algoritmul în sine va fi prezentat într-un curs ulterior.

Soluția este:

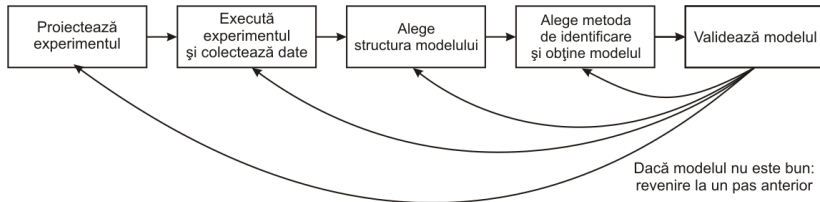
$$a_1 = -2.29, a_2 = 2.24, a_3 = -0.88,$$

$$b_1 = -0.06, b_2 = 0.02, b_3 = -0.05$$

ducând prin înlocuirea în structură la modelul aproximativ:

$$y(k) = 2.24y(k-1) - 2.17y(k-2) + 0.83y(k-3) \\ - 0.06u(k-1) + 0.02u(k-2) - 0.05u(k-3)$$

Flux pasul 5: Validarea modelului

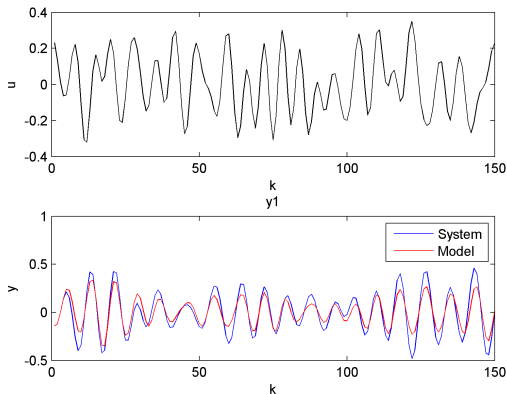


Validarea este un pas esențial: modelul trebuie să fie suficient de bun *pentru scopurile stabilite*. Dacă validarea eșuează, unii dintre (sau toți) pașii precedenți 1–4 trebuie refăcuți.

De ex., ieșirea modelului obținut poate fi comparată cu răspunsul real al sistemului, pe un set de date de validare. Acest set ar trebui să fie diferit de setul folosit pentru identificare (fie se execută un experiment separat, fie se împart datele experimentale în două seturi, unul de identificare și altul de validare).

Flux pasul 5: Validarea modelului: Exemplu

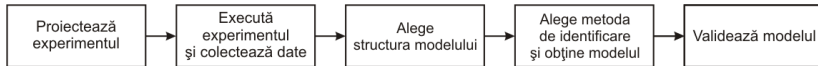
Folosim setul de validare pe care l-am rezervat la pasul 2:



Scopul de a simula răspunsul sistemului este atins (pentru intrări care sunt “bine reprezentate” de către intrarea experimentală aleasă).

Rezumat (al conținutului tehnic)

- **Obiectiv general:** modelarea sistemelor dinamice din date.
- **Sistem:** o parte a lumii influențată de intrări și perturbații, și care produce ieșiri. Exemple.
- **Model:** descriere (de obicei matematică) a unui sistem surprinzând comportamentul relevant.
- Taxonomie a modelelor: parametric/neparametric, din principii de bază (cutie albă)/cutie neagră/cutie gri.
- Exemple și utilizarea modelelor.
- **Flux de lucru pentru identificare** (vezi mai jos), detaliile metodelor discutate ulterior.



Conținut

- 1 Conceptul de sistem
- 2 Conceptul de model
- 3 Fluxul de lucru pentru identificare, cu exemplu
- 4 Rezumat
- 5 Organizarea disciplinei**

Cunoștințe necesare și literatură

Cunoștințe necesare:

Sisteme și modele dinamice, algebră liniară, metode numerice, statistică, Matlab (subiectele matematice necesare vor fi recapitulate în cadrul cursului)

Literatură

- Obligatorie: prezentările de curs, scrise suficient de detaliat pentru a oferi o imagine completă și de sine stătătoare.
- Cursanții pot consulta opțional și: T. Söderström, P. Stoica. *System Identification*. Prentice Hall, 1989, carte care formează baza cursului. Textul complet este disponibil gratuit la:
<http://user.it.uu.se/~ts/bookinfo.html>.

Creditul pentru anumite idei se cuvine cursului de identificare de la Uppsala University, al lui K. Pelckmans.

<http://www.it.uu.se/edu/course/homepage/systemid/vt12>

Notare și platforme

Notare

- 35% laboratoare, notate începând cu lab 2 (7 lab x 0.5 puncte).
- 10% chestionare la începutul laboratoarelor, începând cu lab 2.
- 30% proiect: 2x15% pentru 2 părți.
- 30% examen scris final.
- 10% chestionare în timpul cursurilor.

Platforme

- Microsoft Teams, pentru interacțiune.
- Matlab, pentru dezvoltarea soluțiilor de laborator și proiect.
- ClassMarker, pentru chestionare de laborator și curs.

Laboratoare

- Fiecare laborator (cu excepția primului) începe cu un chestionar.
- Soluțiile trebuie validate pentru a marca prezența la laborator, nu este suficientă prezența fizică. Validare în 2 pași: asistentul de laborator verifică dacă soluția este corectă și originală, apoi se efectuează un test semi-automat de plagiarism.
- Primul laborator copiat invalidează laboratorul respectiv, a doua încercare duce la recontractarea cursului anul viitor.
- Comparat cu anul trecut, am alocat timp dublu majorității laboratoarelor.

Proiect

Partea 1: Aproximarea funcțiilor cu modele polinomiale

Partea 2: Modele ARX neliniare

- Livrabile: Cod Matlab și prezentare pentru fiecare parte. Prezentarea se susține oral și susținerea include o sesiune detaliată de întrebări și răspunsuri.
- Pe parcursul primei părți, decizie go/no go bazată pe cod parțial care generează regresorii (LLM $\Rightarrow$ no go)
- Originalitatea se verifică atât direct cât și semi-automat, și orice proiect copiat duce la recontractare.

Website, contact

http://busoniu.net/teaching/sysid2026/index_ro.html

Email responsabil: lucian@busoniu.net

Pe website se găsesc:

- Programul activităților disciplinei
- Prezentările de curs
- Regulile și materialul de laborator
- Informații despre proiect
- etc.