Identificarea sistemelor

Ingineria sistemelor, anul 3
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Lucian Buşoniu

Partea I

Introducere în identificarea sistemelor

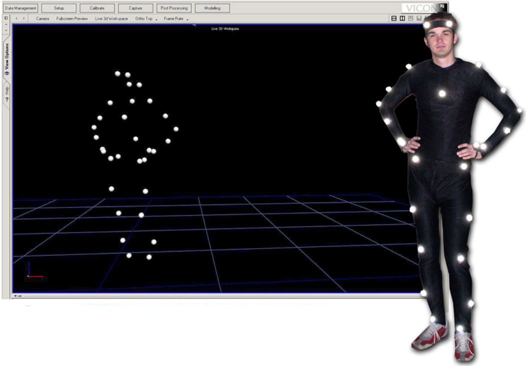
Obiectiv general

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

Un exemplu informal

Un exemplu este captarea mişcărilor, în care:

- *Sistemul* este omul
- *Datele* sunt traiectoriile măsurate are markerilor
- *Modelul* constă din reprezentări ale acestor traiectorii (de ex. curbe spline)

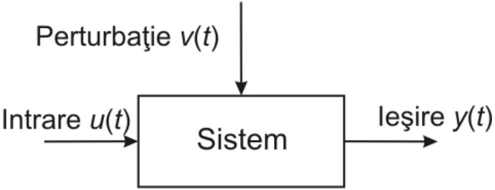


Conţinut

Conceptul de sistem

Definiţie informală

Un sistem este o parte a lumii cu o interfaţă bine definită, asupra căreia acţionează semnale de *intrare* şi de *perturbaţie*, şi care produce semnale de *ieşire*.



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

Exemplu de sistem: O maşină (autovehicul)

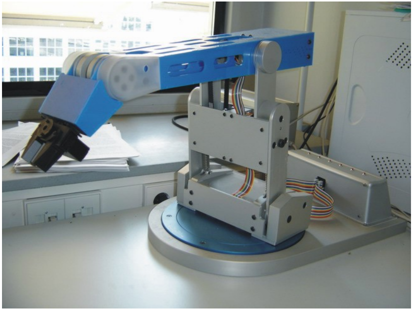
Cnosiderăm mişcarea longitudinală (înainte) a unei maşini.

Intrări: Poziţiile pedalelor de acceleraţie şi frână, eventual treapta de viteză.

Ieşire: Viteza.

Perturbaţie: Frecarea cu diferitele suprafeţe de rulare.

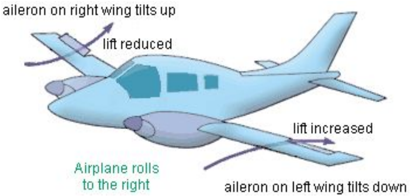
Exemplu de sistem: Braţ robotic



Considerăm un braţ robotic care execută de ex. mişcări de tip “pick and place”.

Intrări:	Voltaje pe motoarele de CC ale cuplelor şi gripper-ului.
Ieşiri:	Unghiurile elementelor şi poziţia gripper-ului.
Perturbaţii:	Masa obiectului ridicat (sarcina), frecarea.

Exemplu de sistem: Avion

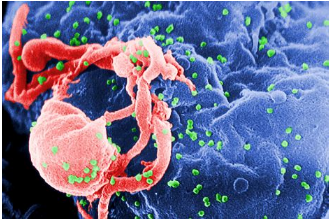


Considerăm mişcarea de rotaţie a unui avion în jurul axei longitudinale (en. *roll*).

Intrare:	Unghiul de deviaţie al eleronului.
Ieşire:	Unghiul de rotaţie al avionului.
Perturbaţii:	Vânt, deviaţiile altor suprafeţe de control, etc.

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

Exemplu de sistem: Infecţia cu HIV



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

Ieşiri: Numărul de celule-ţintă infectate, respectiv sănătoase; răspuns imunitar (toate per mililitru).

Perturbaţii: Co-infecţii, caracteristicile fiecărui pacient.

Alte domenii

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

Alte domenii de aplicaţie sunt:

- Industria chimică.
- Infrastructura energetică, de transport, şi de apă.
- Procesarea semnalelor.
- Economia.
- Ştiinţele sociale (de ex. dinamica reţelelor sociale).
- Etc.

Conţinut

Conceptul de model

Definiţie informală

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

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

Acest lucru este necesar (un model exact nu este fezabil) şi dezirabil (modelele mai simple sunt mai uşor de înţeles şi utilizat).

Exemplu non-matematic: Model mental al unei maşini

Modelul constă din reguli verbale de tipul:

- Rotirea volanului duce la virarea maşinii.
- Apăsarea pedalei de acceleraţie creşte viteza maşinii.
- Apăsarea pedalei de frână scade viteza maşinii.
- ...

Taxonomie a modelelor matematice

După numărul de parametri:

1. Modele parametrice: au formă fixă (formulă matematică), număr cunoscut şi 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 cunoştinţele disponibile în avans ("culoare"):

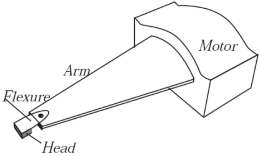
1. Modele din principii de bază, cutie albă: complet cunoscute în avans
2. Modele cutie neagră: complet necunoscute în avans
3. Modele cutie gri: parţial cunoscute

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

Urmează detalii şi exemple.

Exemplu pentru modele (ne)parametrice: hard disk

Considerăm un cap de citire-scriere pentru un hard disk, cu intrarea = voltajul motorului, şi ieşirea = poziţia capului



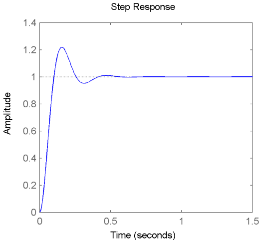
Exemplu model parametric: funcţie de transfer

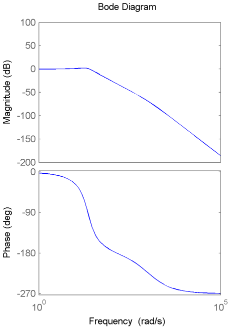
$$H(s) = \frac{b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + \ldots + a_1 s + a_0} = \frac{500}{0.001 s^3 + 1.02 s^2 + 20 s + 500}$$

Forma (formula matematică) este dată şi depinde de un număr fix de parametri (coeficienţi polinomiali $b_0, a_3, \ dotsc, a_0$) care trebuie să fie setaţi pentru a obţine 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 frecvenţă* (diagrama Bode). Următoarele două cursuri vor trata astfel de modele (mai exact răspunsul la treaptă şi la impuls).

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

Modele din principii de bază, cutie albă

Se aplică legile fizice (de ex. echilibre de forţe) pentru a obţine ecuaţii ce descriu sistemul. Toţi parametrii din ecuaţii sunt cunoscuţi. Modelele rezultante sunt de obicei ecuaţii diferenţiale ce implică intrările şi ieşirile.

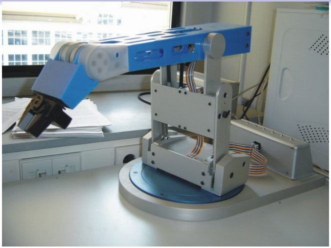
Cum totul este cunoscut / putem “vedea în interiorul cutiei, modelele din principii de bază se numesc şi cutie albă.

Caracteristici:

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

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.

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

τ şi θ sunt funcţii 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 forţelor centrifuge şi Coriolis, G: vectorul gravitaţiei cunoscute (nu intrăm în expresiile lor detaliate).

Modele cutie neagră

Obţinute 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 funcţionare.
- Oferă mai puţină înţelegere asupra sistemului.
- Sunt uşor de construit şi de folosit, şi reprezintă singura opţiune în multe aplicaţii.

Focusul principal al acestui curs de identificarea sistemelor.

Un exemplu detaliat este dat în secţiunea următoare a cursului.

Modele cutie gri

Modelele de tip cutie gri se situează între modelele cutie-neagră şi cele analitice: structura modelului se poate obţine din principii de bază, dar anumiţi parametri sunt necunoscuţi şi trebuie identificaţi din experimente.

Exemplu: ecuaţia braţului robotic $M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau$ este disponibilă, dar coeficienţii de frecare ai cuplelor sunt necunoscuţi (o situaţie tipică în practică, fiindcă modele ale frecării sunt foarte greu de obţinut).

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 situaţii noi. Permite studierea unor scenarii care ar fi periculoase sau costisitoare pentru sistemul real (de ex. cum ar reacţiona un pacient cu HIV la strategii noi de tratament).
- Predicţia ieşirilor viitoare ale sistemului (de ex. predicţia meteo).
- Proiectarea unui controler care să obţină 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 automatişti.

Conexiune: Ingineria reglării automate (anul acesta)

Sumar al conexiunilor cu alte discipline

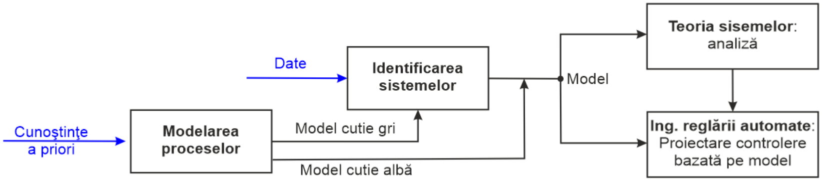
Identificarea sistemelor folosește cunoştinţe de la:

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

şi este utilă pentru:

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

Conexiuni cheie şi culoarea modelului

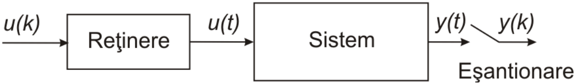


Conţinut

Flux de lucru - exemplu

Identificarea sistemelor se aplică de obicei în timp discret.

Schema tipică a unui sistem în timp discret:

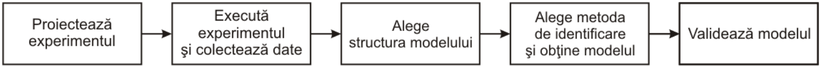


Vom considera aici un braţ robotic flexibil, u = cuplu, y = acceleraţia braţului. Datele provin din DaiSy (Database for the Identification of Systems), `http://homes.esat.kuleuven.be/~smc/daisy/`.

Flux pasul 0: Stabilirea scopului modelului

Scop: Simularea răspunsului braţului flexibil.

Flux pasul 1: Proiectarea experimentului

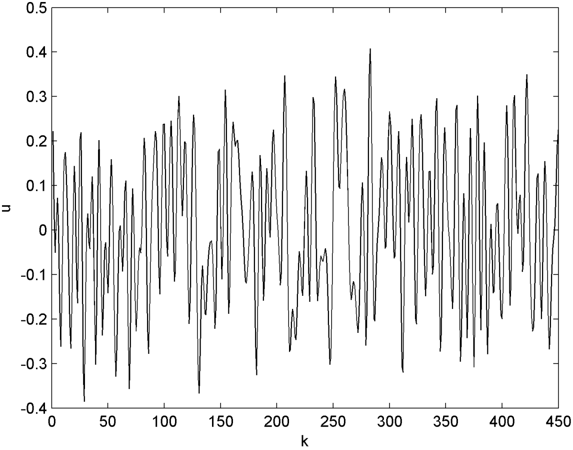


Un element esenţial al proiectării experimentului este selecţia semnalului de intrare (durată, perioadă de eşantionare, formă). Intrarea trebuie să fie suficient de informativă pentru a evidenţia comportamentul relevant al sistemului.

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

Flux pasul 1: Proiectarea experimentului: exemplu

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

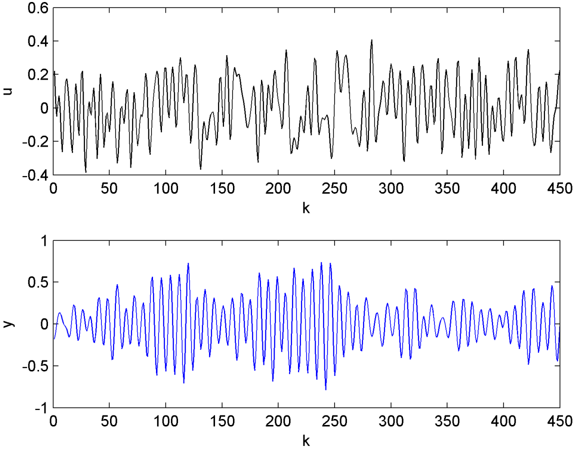


Flux pasul 2: Experiment

Se execută experimentul şi se înregistrează datele de ieşire.

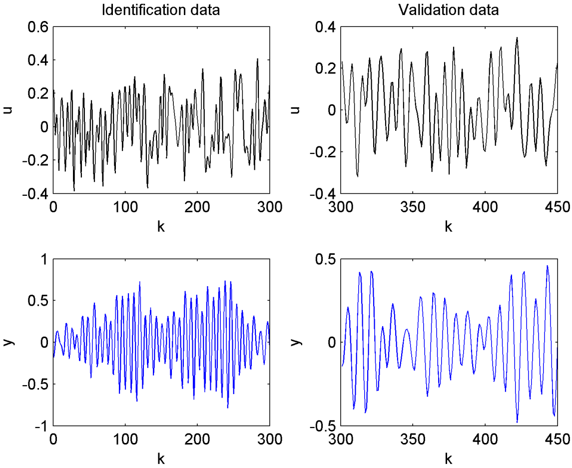
Flux pasul 2: Experiment: Exemplu

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



Flux pasul 2: Experiment: Exemplu (continuare)

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



Flux pasul 3: Structură model

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

Orice cunoştinţe sau intuiţii 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 aşa-numita structură "ARX", unde ieşirea $y(k)$ la pasul discret curent este calculată pe baza intrărilor şi ieşirilor precedente:

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

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

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

Flux pasul 4: Identificarea modelului

O metodă de identificare este aleasă şi 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.

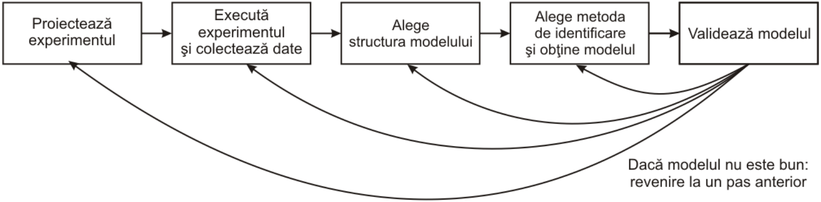
Soluţia este:

$$a_1 = -2.29, a_2 = 2.24, a_3 = -0.88,$$
$$b_1 = -0.06, b_2 = 0.02, b_3 = -0.05$$

ducând prin înlocuirea în structură la modelul aproximativ:

$$\begin{aligned} y(k) = {} & 2.24y(k-1) - 2.17y(k-2) + 0.83y(k-3) \\ & - 0.06u(k-1) + 0.02u(k-2) - 0.05u(k-3) \end{aligned}$$

Flux pasul 5: Validarea modelului

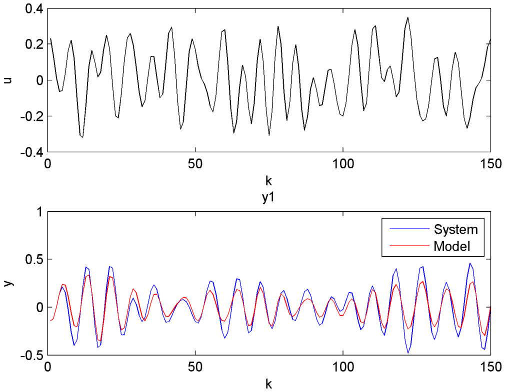


Validarea este un pas esenţial: modelul trebuie să fie suficient de bun *pentru scopurile stabilite*. Dacă validarea eşuează, unii dintre (sau toţi) paşii precedenţi 1–4 trebuie refăcuţi.

De ex., ieşirea modelului obţinut poate fi comparată cu răspunsul real al sistemului, pe un set 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 şi 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 conţinutului tehnic)

- Obiectiv general: modelarea sistemelor dinamice din date.
- Sistem: o parte a lumii influenţată de intrări şi perturbaţii, şi care produce ieşiri. 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 şi utilizarea modelelor.
- Flux de lucru pentru identificare (vezi mai jos), detaliile metodelor discutate ulterior.

Conţinut

Cunoştinţe necesare şi literatură

Cunoştinţe necesare:

Sisteme şi 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 şi de sine stătătoare.
- Cursanţii pot consulta opţional şi: 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 şi platforme

Notare

- 30% lab: 2x15% pentru 2 teste de laborator.
- 10% chestionare la începutul laboratoarelor, începând cu lab 2.
- 30% proiect: 2x15% pentru 2 părţi.
- 30% examen scris final.
- 10% chestionare în timpul fiecărui curs.
- 0.1 puncte bonus fiecare laborator 2–10 trimis în timpul orei respective de laborator.

Platforme

- Microsoft Teams, pentru interacţiune.
- Matlab, pentru dezvoltarea soluţiilor de laborator.
- ClassMarker, pentru chestionare de laborator şi curs.

Laboratoare

- Fiecare laborator (cu excepţia primului) începe cu un chestionar.
- Soluţiile trebuie validate pentru a marca prezenţa la laborator, nu este suficientă prezenţa fizică. Validare în 2 paşi: asistentul de laborator verifică dacă soluţia este corectă şi 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.
- Două teste de laborator de 1 oră, unul la jumatătea semestrului şi unul la sfârşit, în care studenţii vor aplica metode alese aleator dintre cele studiate.

Proiect

Partea 1: Aproximarea funcţiilor cu modele polinomiale
Partea 2: Modele ARX neliniare

- Livrabile: Cod Matlab şi prezentare pentru fiecare parte. Prezentarea se susţine oral şi susţinerea include o sesiune detaliată de întrebări şi răspunsuri.
- Originalitatea se verifică atât direct cât şi semi-automat, şi orice proiect copiat duce la recontractare.

Website, contact

`http://busoniu.net/teaching/sysid2024/index_ro.html`

Email responsabil: `lucian@busoniu.net`

Pe website se găsesc:

- Programul activităţilor disciplinei
- Prezentările de curs
- Regulile şi materialul de laborator
- Informaţii despre proiect
- etc.