

PROIECTAREA SISTEMELOR TIMP-REAL PENTRU APLICAȚII CRITICE

MIHAI V. MICEA



EDITURA ORIZONTURI UNIVERSITARE
TIMIȘOARA

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

MICEA, MIHAI V.

**Proiectarea sistemelor timp-real pentru aplicații
critice** / Mihai V. Micea. - Timișoara : Orizonturi Universitare,
2005

Bibliogr.

ISBN 973-638-222-2

681.5:62.002.3(075.8)(076)

Dr. ing. Mihai V. MICEA

Universitatea "Politehnica" din Timișoara
Facultatea de Automatică și Calculatoare
E-mail: micha@dsplabs.cs.utt.ro

Referent științific

Prof.dr.ing. Vladimir CREȚU - Universitatea "Politehnica"
din Timișoara

Consilier editorial

Prof.dr.ing. Ștefan KILYENI

Tehnoredactare computerizată

Mihai V. MICEA

Pregătire pentru tipar

Constantin BĂRBULESCU

Coperta

Mihai V. MICEA

© 2005 Editura ORIZONTURI UNIVERSITARE
Timișoara

Prefață

Sistemele timp-real ocupă un loc important în societatea modernă. Prezența lor în este din ce în ce mai semnificativă și în același timp din ce în ce mai pregnantă. Ele acoperă un spectru larg de aplicații care se extinde de la controlul sistemelor de comandă simple, la controlul traficului aerian, al telecomunicațiilor, până la controlul sistemelor militare de apărare, al instalațiilor nucleare și multe altele. În ultimele două decenii domeniul lor de aplicabilitate s-a extins de la aplicațiile de nivel înalt mai sus enumerate, spre contexte mai accesibile publicului larg cum ar fi industria de automobile, aparatură și echipamente medicale, aparate electrocasnice, bunuri de larg consum etc.

Sistemele timp-real sunt sisteme de prelucrare în care validitatea prelucrărilor este condiționată nu numai de corectitudinea rezultatelor ci mai ales de momentul la care acestea trebuie furnizate. Într-adevăr, aceste sisteme sunt în mod esențial caracterizate prin conștiința de timp care afectează acțiunile pe care le întreprind și care trebuie respectate de o manieră mai mult sau mai puțin critică.

În acest context, sistemele de control digital încorporat (embedded systems) și achiziția și prelucrarea numerică a semnalelor (DSP-based systems) sunt două domenii înrudite, de interes major în preocupările actuale ale comunității academice și industriale, fapt dovedit și de numărul imens de aplicații ce integrează astfel de sisteme în aproape toate domeniile activității umane. O cerință esențială impusă acestor sisteme și aplicații este operarea în timp-real, cu garantarea respectării termenelor de timp impuse de specificațiile de proiectare și de mediu.

Cartea "*Proiectarea sistemelor timp-real pentru aplicații critice*" redactată de către *dr.ing. Mihai Micea* se încadrează în acest domeniu, autorul abordând problematica sistemelor timp-real (STR) stricte destinate aplicațiilor critice de achiziție și prelucrare numerică a semnalelor și de control digital încorporat. Autorul și-a propus să definiască și să valideze un set omogen de modele destinate reprezentării semnalelor și taskurilor și să dezvolte o metodologie unitară de proiectare și implementare a unor sisteme timp-real pentru aplicații critice de achiziție și prelucrare numerică de semnal.

Primul capitol al cărții are un caracter introductiv și el fixează cadrul general al abordării, și anume achiziția și prelucrarea numerică timp-real a semnalelor utilizând sisteme distribuite. Capitolul se încheie cu o succintă trecere în revistă a laboratoarelor de cercetare în cadrul cărora a fost desfășurată activitatea de cercetare sau cu care autorul lucrării a avut colaborări substanțiale.

În cadrul capitolului 2, se prezintă o trecere în revistă a principalelor concepte actuale în domeniul sistemelor timp-real de achiziție și prelucrare numerică de semnal (APNS) și de control digital încorporat (embedded systems). Sunt definite și descrise de asemenea noțiunile de sistem timp-real, timp ca și coordonată esențială a sistemelor timp-real, iar în final se prezintă două exemple clasice de sisteme de acest gen.

Capitolul 3 atacă problemele dezvoltării STR stricte pentru aplicații critice, fiind evidențiată în context importanța soluționării acestora pentru ca proiectarea și implementarea sistemelor și aplicațiilor timp-real stricte să se poată efectua în concordanță cât mai strânsă cu specificațiile impuse. Se discută despre arhitecturi, predictibilitate, specificarea și analiza temporală a acestui gen de aplicații.

Capitolul 4, intitulat "Informația de timp, evenimente și acțiuni. Modelul taskului TR strict" introduce și studiază setul omogen de modele pentru timp-real, semnale și task-uri, care constituie baza proiectării și dezvoltării STR stricte pentru aplicații critice. În acest context este prezentat și analizat în detaliu modelul original dezvoltat de autor al task-urilor TR stricte denumite ModX-uri.

Capitolul 5 este dedicat planificării aplicațiilor TR stricte. Autorul insistă asupra tehniciilor de planificare non-preemptivă, capabile să garanteze operarea cu maximă predictibilitate a STR stricte, în orice condiții. Sunt prezentate doi dintre algoritmii cei mai utilizați în prezent pentru planificarea

non-preemptivă (EDFNP și MLFNP) și sunt introduse o serie de adaptări și de noi algoritmi, în funcție de diversele cerințe impuse de tipul aplicațiilor timp-real ce se doresc implementate. În finalul capitolului este prezentată și analizată planificarea non-preemptivă a ModX-urilor independente cu execuție fixă.

În cadrul capitolului 6 autorul realizează analiza performanțelor algoritmilor de planificare propuși în capitolul anterior. Pentru testarea și evaluarea performanțelor algoritmilor de planificare autorul a dezvoltat o serie de programe specifice pentru testarea comparativă a algoritmilor.

Ultimul capitol al cărții prezintă modelul de STR strict pentru aplicații critice, model conceput de autor pentru a oferi un mediu integrat, unitar, de specificare, programare, analiză și execuție a aplicațiilor critice din domenii ca achiziția și prelucrarea numerică a semnalelor, orientat pe arhitecturi compacte, de control digital încorporat, cum ar fi spre exemplu sistemele bazate pe procesoare numerice de semnal.

Rod al unei activități de cercetare desfășurate de-a lungul a peste 10 ani, cartea de față prezintă rezultatele obținute și materializate de autor într-o teză de doctorat laureată cu mențiunea "cum laude". În ansamblul ei, lucrarea "*Proiectarea sistemelor timp-real pentru aplicații critice*" se adresează inginerilor, specialiștilor în domeniu, masteranzilor și doctoranzilor. Ea vine să actualizeze și să furnizeze în manieră pragmatică, inginerească, o viziune realistă asupra sistemelor timp-real critice dublată de o metodologie de proiectare a unor astfel de sisteme.

Lucrarea de față care se constituie într-o apariție editorială semnificativă, evidențiază pe de o parte realizările în acest domeniu obținute în laboratoarele de cercetare ale *Departamentului Calculatoare* din cadrul *Universității "Politehnica" din Timișoara*, iar pe de altă parte consacră în persoana autorului un cercetător deplin format, de mare perspectivă.

Timișoara, 26 Septembrie 2005

Prof.dr.ing. Vladimir-Ioan Crețu

Cuprins

1. Introducere	1
2. Sisteme timp-real de achiziție și prelucrare numerică de semnal: concepte actuale	5
2.1. Sisteme de achiziție și prelucrare numerică de semnal	6
2.1.1. Sisteme de achiziții de date.....	6
2.1.2. Sisteme de prelucrare numerică a semnalelor.....	11
2.2. Sisteme timp-real	14
2.3. Timpul ca și coordonată esențială a specificării și operării sistemelor timp-real.....	17
2.4. Tehnici de planificare.....	21
2.5. Exemple de sisteme timp-real	25
2.5.1. Sistemul Giotto	25
2.5.2. Sistemul Spring	28
3. Problemele dezvoltării sistemelor timp-real stricte pentru aplicații critice	31
3.1. Dezvoltarea sistemelor timp-real: concepte și arhitecturi	32
3.2. Predictibilitatea execuției task-urilor timp-real cu termene stricte	34
3.3. Specificarea, programarea și analiza temporală a aplicațiilor timp-real critice	35
3.4. Modelul unui sistem timp-real strict pentru aplicații critice	37
4. Informația de timp, evenimente și acțiuni.	
Modelul task-ului timp-real strict	39
4.1. Timpul sistem și un model temporal pentru dezvoltarea sistemelor timp-real stricte	40
4.2. Evenimente în sisteme timp-real stricte	43
4.3. Tratarea evenimentelor: acțiuni timp-real stricte	47
4.4. Modelul task-ului timp-real strict.....	60

5. Planificarea aplicațiilor timp-real stricte	69
5.1. Introducere.....	70
5.2. Planificarea non-preemptivă a ModX-urilor independente	73
5.2.1. Modelul setului de task-uri independente.....	73
5.2.2. Algoritmul de planificare MLFNP	77
5.2.3. Algoritmul de planificare EDFNP	82
5.2.4. Condițiile de planificabilitate	86
5.3. Planificarea online non-preemptivă a ModX-urilor independente	91
5.3.1. Planificarea online în cicluri cu număr constant de execuții	92
5.3.2. Planificarea online în cicluri periodice.....	98
5.4. Planificarea non-preemptivă a ModX-urilor independente cu execuție fixă	104
5.4.1. Introducere.....	104
5.4.2. Modelul matematic al ModX-urilor cu execuție fixă	106
5.4.3. Planificarea unui set de două FModX-uri	108
5.4.4. Planificarea unui set cu un număr oarecare de FModX-uri.....	120
5.5. Concluzii.....	123
6. Evaluarea performanțelor algoritmilor de planificare non-preemptivă.....	125
6.1. Introducere: metode utilizate pentru analiza performanțelor....	126
6.2. Evaluarea comparativă a algoritmilor EDFNP și MLFNP	132
6.3. Evaluarea comparativă a algoritmilor de planificare online non-preemptivă	136
6.4. Evaluarea algoritmului FENP	141
6.5. Concluzii.....	145
7. Modelul de sistem timp-real strict pentru aplicații critice	147
7.1. Descrierea generală și caracteristicile sistemului OPEN-HARTS	148
7.2. Principiile de operare	152
Bibliografie	155

1

Introducere

Sistemele de control digital încorporat (embedded systems) și achiziția și prelucrarea numerică a semnalelor (DSP-based systems) sunt două domenii înrudite, de interes major în preocupările actuale ale comunității academice și industriale, fapt dovedit și de numărul imens de aplicații ce integrează astfel de sisteme în aproape toate domeniile activității umane. O cerință esențială impusă acestor sisteme și aplicații este operarea în timp-real, cu garantarea respectării termenelor de timp impuse de specificațiile de proiectare și de mediu.

Un număr foarte mare de aplicații au un impact critic asupra mediului înconjurător și/sau asupra factorului uman cu care interacționează. Exemple de aplicații critice de achiziție, prelucrare numerică a semnalelor și control digital încorporat sunt sistemele de control al zborului din avioanele moderne (*avionics, fly-by-wire, auto-pilot*), sisteme de navigație, sistemele de control ale rachetelor, navetelor și stațiilor spațiale, echipamentul de supraveghere și control al automobilelor (*automotive*), linii de fabricație automatizată, sistemele de supraveghere și control al centralelor nucleare, și multe altele. Eșecul unor astfel de sisteme în îndeplinirea *la termenele specificate* a sarcinilor programate poate avea consecințe catastrofale asupra mediului înconjurător, ducând chiar la pierderi de vieți omenești.

În prezent există o cantitate covârșitoare de informație ce tratează domeniile de mai sus, inclusând publicațiile societăților științifice IEEE și ACM (SUA), site-uri de Web ale unor instituții și laboratoare de renume în domeniu, baze de informație ale unor firme majore (Motorola, Texas Instruments, QNX), etc. Din documentația studiată rezultă faptul că *problematica sistemelor timp-real stricte destinate aplicațiilor critice de achiziție și prelucrare numerică a semnalelor și de control digital încorporat* nu este rezolvată în mod satisfăcător, existând încă o serie de probleme importante:

- Introducerea timpului ca o coordonată esențială în toate etapele dezvoltării, analizei și implementării sistemelor și aplicațiilor timp-real;

- Unificarea și integrarea tuturor modelelor și fazelor de dezvoltare ale sistemelor timp-real într-o metodologie omogenă;
 - Utilizarea cu precauție a structurilor și mecanismelor clasice, concepute pentru creșterea eficienței de operare a sistemelor pentru cazurile de operare tipice (de medie), exemplul cel mai important fiind utilizarea fără restricții a intreruperilor și a mecanismelor asincrone;
 - Existența unei mari varietăți de metode de specificare și verificare formală a sistemelor timp-real. Până în prezent însă, nici una nu este încă acceptată în întregime de mediul academic și în industrie.
- Principala problemă constă din decalajul important între rezultatele cercetărilor din domeniul modelelor formale timp-real (modelele concepute) și implementările practice reușite.

Lucrarea de față sintetizează într-un prim volum activitatea de peste 10 ani de cercetare-dezvoltare a autorului în domeniu, inclusiv programul de doctorat cu teza "Proiectarea și implementarea sistemelor timp-real pentru aplicații critice de achiziție și prelucrare numerică de semnal", realizată sub îndrumarea științifică a prof. dr. ing. Vladimir Crețu.

Abordarea noastră în domeniul proiectării și implementării sistemelor timp-real stricte pentru aplicații critice se axează pe următoarele idei principale:

- Utilizarea intreruperilor în sistemele timp-real stricte reprezintă o problemă din punctul de vedere al predictibilității, afectând capacitatea acestora de a garanta în orice condiții de operare respectarea termenelor impuse task-urilor timp-real stricte.
- Pentru a oferi predictibilitate maximă sistemelor timp-real stricte destinate aplicațiilor critice de achiziție și prelucrare numerică a semnalelor și de control digital incorporat, este necesară abordarea modelelor non-preemptive în ceea ce privește definirea semnalelor, a task-urilor și conceperea algoritmilor de planificare.
- Dezvoltarea viabilă a sistemelor și aplicațiilor timp-real stricte trebuie să aibă la bază, pentru toate fazele sale, metode și modele omogene, compatibile, în care timpul este o coordonată cheie.
- În procesul de dezvoltare a aplicațiilor timp-real stricte, faza de analiză offline, apriori execuției sale pe sistemul țintă, reprezintă o cerință obligatorie.

Plecând de la ideile cheie enumerate anterior, au rezultat o serie de obiective, asupra cărora s-au focalizat preocupările noastre în domeniu:

(1) Conceperea, dezvoltarea și demonstrarea unui set omogen de modele pentru semnale și task-uri timp-real, bazate pe un sistem corespunzător de reprezentare a timpului real.

- (2)Conceperea unei metodologii unitare de dezvoltare și implementare a sistemelor timp-real pentru aplicații critice de achiziție și prelucrare numerică de semnal. Elementul central al tuturor fazelor implicate (proiectare, specificare, verificare, analiză, implementare și testare) este sistemul de modele realizat în cadrul primului obiectiv.
- (3)Studiul detaliat al tehniciilor și metodelor ce permit operarea unui sistem timp-real strict cu garantarea respectării termenelor de timp impuse de aplicațiile critice și maximizarea predictibilității. Interesul a fost focalizat pe studiul algoritmilor de planificare non-preemptivă a seturilor de task-uri timp-real și a mecanismelor ce trebuie dezvoltate pentru rezolvarea elementelor asincrone din operarea sistemelor timp-real stricte.

Volumul de față prezintă rezultatele obținute de autor în direcția specificării, proiectării și a analizei sistemelor timp-real destinate aplicațiilor critice de achiziție și prelucrare numerică de semnal și de control digital încorporat.

Capitolul următor conține o scurtă trecere în revistă a conceptelor actuale ce vor fi abordate ca subiecte de interes ale lucrării, din domeniul sistemelor timp-real și de control digital încorporat.

Cu toate că tematica sistemelor timp-real a beneficiat de o atenție deosebită din partea comunității academice și industriale în ultimele decenii, există încă o serie de probleme nerezolvate, câteva fiind amintite în paragrafele anterioare. În Capitolul 3 sunt evidențiate și discutate un număr de subiecte care necesită încă soluționare și care vor fi abordate în capitolele următoare ale volumului.

În capitolele ce urmează sunt introduse și studiate o serie de modele care pot fi utilizate în tratarea omogenă a fazelor de concepție, proiectare, specificare, verificare și analiză a sistemelor timp-real stricte. Astfel, un model temporal este propus și analizat în Capitolul 4, urmând a se constitui într-un element de bază pentru toate fazele dezvoltării sistemelor timp-real stricte. În continuare sunt clasificate și studiate semnalele cu care interacționează sistemele timp-real și, utilizând modelul temporal sistem, este derivat un set minimal și complet de parametri temporali ce pot modela semnalele din punct de vedere al specificării formale. Comportarea în timp a task-urilor timp-real este de asemenea abordată pe baza același model temporal, rezultând un set de parametri și relații, cu ajutorul căror este propus și discutat modelul task-ului timp-real strict, ModX-ul.

Problema planificării seturilor de task-uri timp-real este abordată în Capitolul 5, din perspectiva modelelor pentru timp, semnale și task-uri introduse în capitolul anterior, rezultând un studiu detaliat al algoritmilor de planificare non-preemptivă pentru seturi de ModX-uri (task-uri timp-real stricte, periodice), atât din perspectiva operării algoritmice, cât și a operării în cadrul sistemelor timp-real (operare online). Tot aici sunt discutate în detaliu aspectele legate de modelarea și planificarea seturilor de task-uri ce necesită o execuție fixă în cadrul fiecărei perioade a acestora.

Evaluarea performanțelor și studiul comparativ al algoritmilor de planificare non-preemptivă este prezentată în Capitolul 6. Ca rezultat, se discută selecția și modul de combinare a celor algoritmi care prezintă o comportare optimă pentru clasa de aplicații timp-real critice asupra căreia se axează preocupările din lucrare.

Modelul unui sistem complet, OPEN-HARTS, care unifică toate conceptele introduse și discutate în acest volum, este prezentat în Capitolul 7. Sistemul OPEN-HARTS este conceput ca un set de soluții pentru problemele ridicate de dezvoltarea unitară a unui sistem sau aplicații timp-real stricte, utilizând modelele de timp sistem și semnal, și ModX-urile cu planificare și execuție non-preemptivă.

Fiind în primul rând rezultatul activității de cercetare-dezvoltare de doctorat a autorului, lucrarea de față se adresează în special doctoranzilor și studenților de Master implicați în cercetarea din domeniul sistemelor timp-real de achiziție și prelucrare numerică de semnal și de control digital incorporat. În același timp însă, materialul se dorește a fi o sursă utilă tuturor celor interesați de aceste domenii deosebit de actuale și de importante din tehnologia de vârf a zilelor noastre.

Rezultatele teoretice și experimentale ce fac obiectul acestui volum au fost obținute în cadrul Laboratoarelor de Prelucrare Numerică a Semnalelor, DSPLabs (<http://dsplabs.cs.utt.ro>), ale Departamentului de Calculatoare, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, laboratoare coordonate de autor și de către prof. dr. ing. Vladimir Crețu. De asemenea diverse elemente și rezultate au fost obținute în colaborare cu Laboratorul de Circuite Integrate și Sisteme Numerice de Achiziție (coordonator prof. dr. ing. Mircea Stratulat), Laboratorul Multidisciplinar de Testare a Mașinilor Electrice ("D109", coordonatori: prof. dr. ing. Marius Biriescu și prof. dr. ing. Vladimir Crețu) și Laboratorul pentru Studiul Dinamicii Fluidelor (coordonatori: prof. dr. ing. Liviu Anton și prof. dr. ing. Alexandru Baya).

Incepând cu anul 1999, autorul a beneficiat și de suportul companiei Motorola, Incorporated, constând, printre altele, din oferirea sistemelor de evaluare pentru procesoare numerice de semnal Motorola DSP56303 EVM, DSP56824 EVM și DSP56307 EVM. Aceste sisteme au fost utilizate ca platforme pentru implementarea și testarea cu bune rezultate a nucleului timp-real strict HARETICK. Descrierea arhitecturii și a operării nucleului HARETICK, împreună cu cele mai interesante rezultate obținute în urma testării și evaluării acestuia, vor face obiectul unui volum ulterior.

Dorim să ne exprimăm mulțumirile noastre și pe aceasta cale, tuturor colegilor și instituțiilor menționate mai sus. Discuțiile purtate în domeniul sistemelor timp-real cu prof. dr. ing. Nicolae Robu s-au dovedit extrem de utile, fiind germeni ai unor importante idei din lucrare. Menționăm de asemenea colaborarea prețioasă și sprijinul colegilor ing. Lucian Pătcaș, ing. drd. Zsolt Husz și ing. Alexandru Joni.

C
48

Cl

Colecția
calculatoare - informatică

ISBN: 973-638-222-2