MEMÒRIA DEL TREBALL DE RECERCA

Títol:

MODELITZACIÓ DE SISTEMES HÍBRIDS DETERMINACIÓ DE TRAJECTÒRIES ÒPTIMES I SUPERVISIÓ.

Autor:

Santiago Esteva i Payet

Setembre 98

Programa de doctorat:

ENGINYERIA EN INFORMÀTICA INDUSTRIAL I TECNOLOGIES AVANÇADES DE PRODUCCIÓ

DEPARTAMENT D’ELECTRÒNICA, INFORMÀTICA I AUTOMÀTICA

UNIVERSITAT DE GIRONA

ÍNDEX:

1 SISTEMES HÍBRIDS

1.1 DEFINICIÓ

Es consideren sistemes híbrids aquells sistemes on coexisteixen variables continues i discretes, i en els quals es mostra una interacció entre les variables continues i les discretes, marcant canvis de comportament de les variables continues front a canvis de les variables discretes.

Seran processos híbrids aquells en els quals les variables continues i discretes hagin de realitzar un recorregut finit de seqüències o subprocessos, i on es puguin diferenciar i catalogar els estats, separats per esdeveniments .

Perla representació de sistemes híbrids, es requereix d'un formalisme matemàtic que representi el comportament temporal, i evolutiu, mitjançant unes eines d'anàlisi i estudi perla comprensió i optimització del seu funcionament.

Problemàtiques en la simulació de sistemes híbrids , són el càlcul de l'estat de les variables continues en començar el procés o en canviar de comportament , la sincronització d'esdeveniments, la simulació contínua i discreta .La segmentació en sistemes paral·lels permet una anàlisi concurrent d'esdeveniments i el càlcul de variables continues. El simulador ha de poder integrar equacions algebraiques diferencials, amb un algorisme d'aproximació de tercer ordre o superior, interrompre el càlcul en l'arribada d'esdeveniments i també possibiliti la comunicació i la sincronització a l'exterior via TCP/IP, DDE, Sockets o accés a fitxers, per permetre enllaços físics amb el procés.

Diferents eines recents permetent reproduir fàcilment un procés híbrid matemàticament, i aprofitar la descripció del sistema per analitzar el comportament, situacions anòmales, bloqueigs, bucles , verificació de fórmules , etc. Eines com SHIFT COSPAN HY-TECH etc. permeten l'automatització de les tècniques d'anàlisi.

La modelització dels sistemes híbrids es realitza mitjançant grafs bidimensionals, on els estats porten associats uns comportaments dinàmics continus invariants de tipus lineal LTI perpoder ésser avaluats i verificats.

El desenvolupament de teories i eines persistemes híbrids són recents dels finals dels 80 i principalment dels 90 degut a l'existència de potents eines de hardware perla simulació i verificació.

1.2 AUTÒMAT HÍBRID LINEAL i MONÒTON

La majoria de processos s'han de descriure com a sistemes no lineals, sobretot processos complexes, degut a zones mortes, saturacions, fregaments i comportaments especials en determinades condicions, histèresi , salts etc. Comportaments matemàtics no lineals, representats com a sumes de funcions continues exponencials, logarítmiques, potenciacions, productes, etc, amb una característica determinista, un cop aïllat del soroll.

Aquest tipus de sistema es pot tractar de diferents formes: Una anàlisi matemàtic de la funció matemàtica no lineal que representa, i el seu control corresponent no lineal , tema molt actual i sota desenvolupament. El tractament com a conjunt de funcions lineals aplicables com aproximació en la seva zona d'actuació, i el seu corresponent controlador lineal, (Linear Piecewise approach LP / Gain Scheduling).

Els diferents tipus de no linealitats presenten característiques determinades en la representació com un conjunt de sistemes lineals, per exemple, la histèresi s'ha de representar com a combinació de dos models , amb dues vies de connexió, i llindars diferents, amb una representació bidimensional es facilita la interpretació del model.

Un tipus de representació connexionista dels diferents models i amb representació evolutiva són els Graphs que permeten esquemes multidimensionals representats en un pla. L'element de transició d'estat permet ésser un o varis valors llindar , direcció , tendència del senyal, i combinacions d'elles.

La necessitat de funcions i operadors lineals sorgeix per la necessitat de poder decidir (Decidable), si són vàlides proposicions booleanes, o de la valoració dels diferents camins del graf per localitzar un recorregut adequat, i perla reducció de formules preposicionals. Els simuladors lineals suporten sistemes dinàmics lineals i desigualtats lineals a fi de poder avaluar els diferents recorreguts, gràcies a les propietats associativa i commutativa per aplicar-les a la superposició de camins , branques comunes, etc. I desigualtats lineals formades per operadors booleans lineals de tipus AND OR NOT , i desigualtats del tipus $A > K$, i combinacions per formar un predicat de primer ordre , situats en les transicions de les branques per provocar canvis d'estats. I sistemes d'equacions lineals, equacions diferencials ordinàries ODE que es corresponguin als sistemes dinàmics.

La necessitat de models monòtons dins de l'estat, assegura una solució única en la determinació del franqueig dels límits $A > K$ o $A = K$, per evitar la indeterminació en les transicions d'estats.

Anomenem Autòmat Híbrid Lineal i Monòton el que satisfà la linealitat amb totes les seves restriccions , dinàmiques , estàtiques i en les desigualtats.

1.3 LÒGIQUES TEMPORALS:

Un formalisme matemàtic perla representació de sistemes dependents del temps utilitzen una lògica temporal que permet la seva representació matemàtica, el xequeig simbòlic del model i la seva reducció matemàtica a fi de facilitar el seu ús perl'avaluació del procés , anàlisi de fórmules preposicionals , etc. Lògiques del tipus CTL [Clarke] lògica de bifurcació temporal, permet amb els seus operadors existencial ◊ i global i els operadors temporals següent N (Next) i fins a U (Until), representar d'una forma reduïda el temps, evolucions temporals i un ordre en les seqüències de les accions , on es podran aplicar els sistemes de reducció de preposicions i demostracions de formules lògiques.
PLTL PTL [Pnueli 97] CTL CTL* (Preposicional Linear Temporal Logic) Aquest tipus de lògiques permeten raonar amb la interpretació del temps de forma qualitativa i no quantitativa.
TPTL MITL TCTL [Alur 91] Tenen en comte el temps de forma quantitativa i situen la distancia dels esdeveniments en intervals temporals.

TPTL Timed Prepositional Temporal Logic afegeix el temps com una variable de tipus natural, prenent valors 1,2, ... ,N de tipus monotònica, i com a subíndex en les preposicions lògiques , indicant a partir de quin instant de temps la preposició lògica serà certa.

MTL Metric Temporal Logic ,incorpora el temps com a operant que indica sota els operadors temporals el temps a transcórrer per validar l'operand, i intervals temporals definits per analitzar la validesa de les formules.

Per exemple, el procés de bullir patates s'expressaria en PLTL com:
Essent , h procés d'escalfar, b esdeveniment de bullir, s les patates estan toves

$$X = hU(bUs) \vee [h \wedge (b \vee s)]U[\quad \neg (h \vee b \vee s)] \vee (h \wedge \neg s)U[(b \wedge \neg s)U(\quad \neg(h \vee b \vee s))]$$

La subfórmula, $hU(bUs)$, indica el camí de inici (Start) a patates toves (Soft). El tram $h \wedge (b \vee s)]U[\quad \neg (h \vee b \vee s)$, de inici a restart sense bullir l'aigua (Boild), i $(h \wedge \neg s)U[(b \wedge \neg s)U(\quad \neg(h \vee b \vee s))$, de inici a restart passant per aigua bullint.

1.4 APLICACIONS

Existeixen unes eines basades en formalismes matemàtics d'autòmats híbrids lineals emprant lògiques temporals, utilitzats bàsicament per la modelització de sistemes, disseny, anàlisi, i control de sistemes complexos.

MODELITZACIÓ

Per generar un model precís del sistema i ric en coneixement del seu comportament, que permeti un seguiment fiable del sistema en tenir en compte un historial del sistema per poder discernir entre situacions iguals, però amb procedència diferent, el qual li permetrà rebre un tractament diferenciat.

DISSENY

Permet dissenyar noves estructures, que facilitin la seva modelització verificació i control.

ANALISI:

CICLES LIMIT

Determinació de cicles límit, (infinitely often), per evitar que el procés es bloquegi en un estat, o en la commutació de dos estats.

VERIFICACIO

Verificació de formules, comprovació de la possibilitat que sigui veritat una fórmula , conjunt de preposicions, i determinació de condicions per la seguretat (safety).
(Peleties , DeCarlo 93) (Puri ,Varaiya 94, Alur,Henzinger 92, Clarke 95)

CONTROL:

CONTROLABILITAT

Capacitat de conducció de un estat a un altre.
(Nerode, Kohn 93) (Stiver, Antsaklis 95) (Tittus, Edgard 94)

REACHABILITY

Atenyabilitat d'un estat, orígens possibles que poden convergir en un estat.
(Asarin 95)

STABILITY

Determinació de criteris d'estabilitat de Lyapunov en la commutació de sistemes. Estabilitat local. Estabilitat global.
(Branicky 94, Antsaklis 95, Passino 94)

DISCRETE DECISION

Determinació de les accions a prendre per provocar canvis d'estat, des d'un punt de vista discret, accions de control impliquen un canvi d'estat determinístic i immediat.

CONTINUOUS CONTROL

Control continu que condueix al sistema a un canvi de model desitjat.

NON LINEAR CONTROL

Expansió dels dominis d'atracció per als sistemes commutats.
(Guckenheimer 95)

OPTIMALITY

Optimització de recorregut.

(Pettersón, Lennartsón 95) (Kohn 95)

VIABILITY
Existència de trajectòries adequades i segures.
(Deshpande 94)(Kohn 95)

HIERARCHY
Jerarquització del control.
(Caines 95) (Nerode,Kohn 95)

PIECEWISE LINEAR CONTROL
Control lineal a trams, Gain Scheduling.
(Delchamps 90) (Ramadge 90) (Sóntag 81)

DISCRETE EVENT SYSTEM
Models a esdeveniments discrets . Teoria i control
(Lennartsón 94)(Antsaklis Lemmon 93)

SIMBOLIC MODEL CHECKING
Verificació automàtica de formalismes lògics, perdeterminar la validesa d'una formula, dins d'un sistema d'estats finits. Representant el sistema en un diagrama de decisió binari BDD i en un altre la fórmula, es comprova l'existència o no d'un graf dins l'altre (Alur 90).

EINES:

CSIM 96
Es una eina desenvolupada per Microelectronics & Computers Technology Corporation, que s'utilitza per modelitzar el sistema sota una seqüència d'esdeveniments per poder generar un pla d'accions a realitzar sobre el sistema. és un entorn C orientat a processos, resultant un sistema quasi paral·lel en la seva computació.

COSPAN
Eina generada per AT&T Bell Labs. orientada a la coordinació, especificació, anàlisi, verificació , i determinació de la certesa d'una fórmula. Presenta en un entorn gràfic el graf amb detalls de cada estat, i relacions.

HYTECH
Es una eina automàtica perl'anàlisi de sistemes dinàmics, desenvolupat a la Universitat de Berkeley. HyTech calcula les condicions sota les quals un sistema híbrid lineal satisfà un requeriment temporal, mitjançant el xequeig simbòlic del model. Realitza una partició en políedres de règims constants perl'anàlisi de lògiques temporals.

SHIFT
Es un llenguatge de programació desenvolupat a la Universitat de Berkeley, per descriure comportaments dinàmics de sistemes híbrids , utilitzat perla simulació i ajut a l'anàlisi i disseny de controladors. Permet la integració concurrent de processos i la sincronització de múltiples d'esdeveniments. El llenguatge d'alt nivell, facilita una especificació estructurada del sistema, permetent incloure equacions diferencials, i dependències jerarquitzades.

1.5 COMPORTAMENTS

Les disparitats de models que es troben en la literatura, responen a la diversitat de senyals i comportaments del sistema. es poden destacar les característiques més remarcables.

COMPORTAMENT DISCRET

Les diferencies entre models són degudes a la varietat dels següents senyals:

Esdeveniments generats pel sistema (incontrolables), i generats pel supervisor (controlables).

Els esdeveniments discrets poden ésser mesurables, identificables indirectament, i no mesurables ni identificables.

Comportament discret serà no determinista , si es poden donar múltiples transicions a l'hora, i el sistema ha d'escollir entre elles (falles no previstes), i degut a la indeterminació de les variables continues que es propaguen a les variables discretes.

COMPORTAMENT CONTINU

Diferencies en la descripció dels comportaments continus, deguts :

Classificació en models lineals i models no lineals, continus i diferenciables representats en una equació algebraica diferencial DAE. No diferenciables, i models amb histèresi, models que han de poder ésser representats per models locals lineals.

LTI lineals e invariants amb el temps.

Sistemes MIMO, o SISO, en funció del nombre d'entrades i sortides.

Deterministes, si la seva resposta no es veu alterada , en repetir l'experiment amb les mateixes condicions. No determinista, (Deshpande 94) , si el sistema pot evolucionar en varis sentits, o diferents comportaments (Multi-avaluats), degut a l'acció a pertorbacions , soroll, o incertesa dels paràmetres.

Les variables d'estat podran ésser mesurables o no , observables, mitjançant observadors o estimades, identificades prèviament.

ACCIONS DE CONTROL

Les accions de control podran ésser sobre els senyals discrets, les continues en tot el tram, o discretitzats en pocs nivells i combinació d'ells.

1.6 MODELS

La descripció d'un model està intimament lligat a els senyals participants i les característiques que es volen definir segons un llenguatge de descripció.

(Alur-Courcoubertis-Henzinger-Ho 93 AT&T Bell Labs USA)
Defineix un autòmat híbrid com un sistema discret sota un entorn continu, amb dinàmica lineal, per permetre la verificació. Calcula els estats, per aproximació a regions convexes, on es podrà definir una formula lineal.
HA=(Vd,Q,u1,u2,u3) :Vd, conjunt de variables continues. Q set finit d'estats discrets. u1 activitats, dinàmica contínua. u2 invariants. u3 relacions de transició

(Deshpande-Varaiya 95 U. Berkeley USA)
Defineix un autòmat no-determinista , amb *edges*, com a cantonada on es produeixen els esdeveniments, i determina una funció de transició. Una estructura d'informació per determinar una estratègia de control.
Defineix un sistema de transició híbrid com:
(Q,R,Σ,E,Φ) : Q Estats discrets, R variables continues x(t), Σ conjunt d'esdeveniments discrets, E cantonades , Φ vectors de control.
(Tittus, Edgard 94 Chalmers Technological U., SWEDEN)
Els estats estan confinats a condicions invariants, i les transicions estan definides per guardes, podent determinar les possibles trajectòries que duen al resultat. Estats discrets linealitzats.
Es defineixen invariants, amb desigualtats lineals, disposa de entrades discretes que canvien d'estat,
$(Q,\Sigma,\delta,X,W,f,g,\gamma,\alpha)$: Q Estats discrets, Σ conjunt d'esdeveniments discrets, δ funció de transició, X variables continues a l'espai d'estat , W vector d'entrada , f vector d'estat ,g funció de transició, γ generador d'esdeveniments, α actuador

(Branicky 94 Massachusetts Institute of Technology LIDS USA)
El model és compost d'un sistema continu interconnectat al controlador discret mitjançant un conversor A/D i D/A, per mapejar el sistema real a símbols d'estat. Disposa de salts autònoms (franqueig de límits), salts controlats, impulsos autònoms (salt model) i impulsos controlats.
(Q,Σ,σ,C,F) : Q Estats, Σ sistemes dinàmics Σ=(x τ ϕ), x vector d'estat, τ funció de transició, ϕ dinàmica contínua, σ mapejat de transició, C conjunt de salts continus, F mapejat de destí.

(Antsaklis Lemmon 93 U. Notre Dame USA)
Model que disposa d'un interfase entre les parts continues, i el controlador a esdeveniments discrets DES, que representen en símbols, les regions de treball en que es troba la planta, regions linealitzades del sistema. El control es realitza en nivells discretitzats, i es dissenya en forma de superfícies lliscants en les que s'intercreuen, i es poden determinar els recorreguts que condueixen al resultat final.
La interfase discretitza l'espai d'estat en regions per poder donar esdeveniments al controlador. es representa en diagrames de grafs les possibles situacions del sistema i les actuacions del controlador. La solució al problema del control és simula backward, determinant les trajectòries possibles que conformen l'espai d'estat amb un graf que representa totes les situacions possibles i camins per arribar al resultat esperat.
(S,X,R,δ,ϕ) : S Conjunt d'estats, X símbols de la planta, R símbols del control (possibilitats), δ funció de transició d'estats, ϕ funció de dinàmica de sortida.

(Sifakis, Maler 93 Verimag Grenoble F)
Defineix un model que executa dues fases, una evolució temporal del comportament continu, i l'evolució discreta resetejant el temps.
Models comportament continu associat al temps, els esdeveniments discrets inicialitzen el temps. Els estats poden canviar per transicions discretes i per temps
(V,X ,->, tcp, φ) : V Conjunt de posicions, X variables d'estat, -> conjunt de cantonades, tcp time can progress evolució temporal, φ i funció d'evolució dels estats.

(A. Nerode-W. Kohn, 95 Cornell U., NY USA)
Interacció ODE, i autòmat finit, anomenat «event-driven, autonomous sequential deterministic model». Event driven H.S. són seqüències executables realitzables. El model consisteix en la planta, el control digital i la interfase format per un conversor A/D D/A.

Model	Dinàm. Cont.	Din. Discreta	Acció de control
Alur-Henzinguer	LN DT	DT	DC
Asarin-Pnueli	NL DT	DT	DC
Antsaklis-Lemmon	LN DT	DT	CTD
Branicky	NL DT	DT	CT-DC
Deshpande-Varaiya	NL NDT	NDT	CT-DC
Nerode-Kohn	NL NDT	NDT	CT-DC
Peleties-DeCarlo	NL DT	DT	CT-DC
Tittus-Egard	LN DT	DT	DC
Sifakis-Maler	NL DT	NDT	DC

Essent:
LN Dinàmica contínua expressada en models lineals.
NL Dinàmica contínua expressada en models no lineals.
DT Comportament determinista.
NDT Comportament no determinista.
DC Accions de control sobre les variables discretes.
CT Accions de control sobre les variables continues.
CTD Accions de control sobre senyals continus discretitzats.

1.7 PARTICIÓ DEL ESPAI D'ESTAT

La representació de sistemes en l'espai d'estat, permet, interpretar l'estat actual del sistema, i la seva evolució més propera, tant anterior, com posterior. Tendències, estabilitat, variacions etc. són comportaments identificables mitjançant un anàlisi de l'evolució en l'espai d'estat. El seu poc ús en el control industrial, es degut a la restricció a models lineals, amb variables d'estat mesurables, que normalment no es dóna. L'aproximació per trams linealitzats, permet una partició de l'espai d'estat per regions, aproximació emprada per multitud d'autors. Si a més s'utilitzen models identificats, les variables d'estat entre els diferents models estan escalades i són una estimació de les variables físiques.

Autors:
(Asarin-Maler-Pnueli) Piecewise Constant Derivative PCD, parteix l'espai d'estat en regions de políedres convexos associats a una equació de pendent constant.
(Antsaklis 95) Partició del espai d'estat en funció dels símbols de la planta.
(Branicky 94) Jumps, i Switch entre models en l'espai d'estat.
(Billins 87) Piecewise Linear Identification de sistemes no lineals.
(Dautoutidis 96, Sóntag 80-81)

La representació del comportament continu en un espai d'estat discretitzat, permet interpretar sobre un mateix gràfic la interacció contínua-discreta. Indicant les lleis de comportament continu de cada regió marcada pels límits de les variables , i amb fletxes els salts entre regions en atravessar aquests límits. Una representació fàcil i entenedora del sistema, que permet combinar els canvis efectuats mitjançant variacions en senyals discrets, en una representació tridimensional del sistema complert.

La reducció del problema de la representació d'espais d'estat multidimensionals amb la conjugació de grafs evolutius de múltiples capes, es pot realitzar mitjançant la reducció a espais d'estat de dues dimensions, reduint els sistemes a models a segon ordre monòtons, de forma que siguin representable en un espai bidimensional. La reducció a models de segon ordre, no perd generalitat de solució ja que obligarà a la utilització de més models perla representació del sistema, i la reducció de variables discretes per models locals concentrant variables que condueixin als mateixos resultats , reduint-los mitjançant operacions booleanes AND OR NOT sobre la mateixa línia d'actuació. En el cas que el sistema presenti poques variables discretes, el sistema es podrà representar com a un conjunt d'espais d'estat consecutius lligats per l'acció de les variables discretes, quedant representada l'evolució dinàmica del sistema en funció de les actuacions en un espai tridimensional d'espais d'estat.

La problemàtica en la representació en l'espai d'estat és : La discontinuïtat en el salt dels models, condicions inicials que s'hauran de determinar per poder minimitzar la discontinuïtat de sortida; Indeterminació de les condicions inicials del model que es propagaran als diferents models successius, que seran reduïts a mesura que s'estabilitzin els models (regim permanent).

1.8 TÈCNIQUES de LINEALITZACIÓ

Avui en dia, en la resolució de grans problemes de la enginyeria, s'aplica l'estratègia de dividir i conquerir: un problema complex es pot particionar en un nombre finit de subproblemes simples, solucionables independentment, dels quals la solució construeix part de la solució del problema original. Aquesta idea s'utilitza com una aproximació perla descomposició del modelat i control de sistemes sofisticats i amb característiques no lineals.

En models no lineals $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$ sense conèixer la funció matemàtica f , model base, no es poden aplicar tècniques matemàtiques d'aproximació entorn d'un punt, ja que no es disposa d'un model no lineal. S'aplica un procés d'identificació no lineal, o lineal a trams. La identificació no lineal, és molt costosa en desconèixer el comportament base, i s'ha de recórrer a la aproximació a les series de combinació de termes, com les series de Volterra, perprocedir a linealitzar a trams o entorn de punts. Per tant és viable la identificació directament de trams lineals.

Controladors PL Piecewise linear, són calculats com si el sistema fóra lineal, realitzant un control adequat a l'entorn del punt de càlcul.
Gain Scheduling és una tècnica similar que parametritza al controlador lineal, mitjançant un paràmetre d'adaptació α, que provoca variacions dels paràmetres del controlador PI:
$V(t) = K_c(\alpha)[e(t) + \frac{1}{\tau_i}\int_0^t e(t^*)dt^*]$ variant el paràmetre scheduling, commutació de valors per interpolació o per un paràmetre de variació.

Descomposició per règims [Johansen 94] pot ésser realitzat segons diferents criteris: modelització complerta del sistema, diferenciació de controladors; sequenciació de fases d'un procés, en les que prendran part diferents paràmetres per separar les diferents regions, temps, nivells, errors, etc. Els criteris de definició dels límits de les regions seran diferents en cada cas i també depenent del grup d'investigadors.
Parameter optimization problem [Alur 90] és soluciona utilitzant el mètode de predicció del error (Sönderström i Estoica 1988), essent *n* el nombre de règims, el criteri és trobar el mínim d'una seqüència de models *Mn* cada vegada més segmentada, que ens asseguri un error predit.

$$\theta^*1, . .,\theta^*n = \arg\min_\theta Jn(\theta1, . .,\theta n, Mn)$$

Estructure Optimization problem, pot ésser vist com una descomposició en una seqüència de divideix els règims en dos subrègims al pas següent, i el següent criteri de minimització:

$$J^{**}n= \min_{Mn} J^*n(\theta^*1, . .,\theta^*n, Mn)$$

Bounded Amplitude Control (Antsaklis Lemmon 93) parametritza el model de referència amb la linealització de la variació dels paràmetres (LPV), per punts en la trajectòria de referència :

$$X' = A_1(\theta_1(t)) X + B_1(\theta_1(t)) U$$

podent representar l'error no lineal comès, confinant les regions de commutació a zones amb paràmetres dins d'un interval.

$$\theta_i := \{ \theta \ | \sup_j | \theta_j - \theta_{nom,j}| \leq V_{out}\}$$

Identificació de models utilitzant funcions locals o globals de cost [McManis 94] , permet particularitzar les funcions de cost a les diferents regions a linealitzar permetent un grau de llibertat en la definició de la dimensió de les particions.

$$J_i = 1/ m_i \sum_{t=1}^{mi} \varepsilon^T{}_i(t)\, \Lambda_i\, \varepsilon_i(t)$$

essent ε l'error de predicció , Λ una matriu per l'escalat i m el nombre de punts.

1.9 ESDEVENIMENTS DISCRETS

Els esdeveniments discrets poden ésser propis del sistema , o provocats per el supervisor o controlador, essent incontrolables, o controlables. Esdeveniments propis , directament observables o no ,o per mètodes indirectes d'observabilitat mitjançant, extrapolació de comportament (Antsaklis 95). Els esdeveniments provocats, seran el resultat d'aplicar una tècnica de supervisió o control, que condueixi el sistema cap el comportament desitjat. Els esdeveniments propis del sistema, seran aquells donats per : superació dels límits en les variables continues que confinen unes regions, i esdeveniments discrets que marquin un canvi de dinàmica.

Esdeveniments discrets , són aquells esdeveniments que provoquen la transició d'una forma quasi immediata , i causen canvis en la dinàmica del sistema.
Els esdeveniments estant associats a una funció de transició FI que formalitza el canvi d'estat del sistema.

SISTEMES DISCRETS

Els sistemes discrets aïllats són poc corrents, normalment s'interrelacionen amb variables continues, però un procés d'abstracció permet tractar-los de forma aïllada introduint els límits de les variables continues com a esdeveniments que provoquin canvis en el sistema.
Les variables continues estaran sense control intrínsec o amb un regulador independent, permetent la independització del controlador, en general un autòmat.
L'anàlisi de comportament del sistema amb el controlador discret, s'estudia mitjançant una representació amb Xarxes de Petri o Grafs per localitzar bloqueigs o bucles .

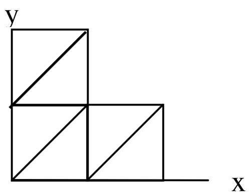
El problema en la simulació dels processos discrets és la modelització. Preveure tots els casos possibles i recorreguts dins del graf, que pot donar lloc a que el procés i el simulador representin sistemes diferents. En el cas de disseny d'un controlador o supervisor, s'han de conèixer les possibles situacions del sistema i determinar les actuacions a generar.

1.10 CLASSES D'AUTOMATS HÍBRIDS

RECTANGULAR AUTOMATA És un autòmat que manté unes propietats en regions confinades per límits $x_i<k \in Z$ Possibilita el seu anàlisi, permetent reduir el set d'estats, però augmenta la representació d'una seqüència, degut a la repetició de múltiples estats base. És un tipus Decidable d'autòmat i les seves variants són:

TIMER REGION AUTOMATA [Alur 90]
Un autòmat n-dimensional està format per n rellotges definits en cada estat com $x'_i=1$, donant lloc a classes per la bisimulació rectangles confinats a regions iguals al pas del rellotge $\frac{dx}{dt}=1$,

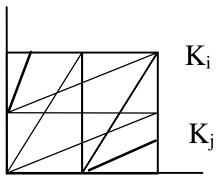
$\frac{dy}{dt}=1$



t=

EXTENSION AUTOMATA [McManis Varaiya 94]
S'expandeix l'autòmat d'evolució fix, a un rati que pot ésser 0 o 1, podent estar actiu, inactiu, o suspès durant cert temps.

MULTIRATE AUTOMATA. [Puri 95]
Com el seu nom diu els rellotges poden tenir diferents evolucions $x'_i=k_i$, $k_i \in [L_i,U_i]$ ratis inferior i superior, i ésser inicialitzats en les transicions. Les regions de congruència en la bisimulació seran triangles de diferent dimensió de proporcions els passos dels rellotges.



t=1

2 MODEL ALFA

2.1 DEFINICIÓ

Per modelar sistemes híbrids dinàmics i no lineals d'una forma simple , entenedora en la seva representació i acurada en els seus resultats, es presenta un mètode amb una transformació de les components del vector d'estat, components no necessàriament mesurables en el procés , però estimables mitjançant simuladors amb models prèviament identificats, facilitant treballar amb sistemes altament no lineals, amb histèresi, discontinuïtats, salts, i variants en el temps.

Es proposa una transformació de l'espai d'estat continu formada per: l'angle que forma el vector resultant de la variació de les components de l'estat, angle indicatiu del comportament del model , i el valor de sortida y, en una representació polar formada per l'angle i de magnitud y, permetent una representació bidimensional de l'evolució del sistema. Uns angles alfa límits percada model local determinen les regions d'aproximació del sistema en aquest tram, que genera una representació fixa en l'espai polar , en canvi una representació variable en funció de la trajectòria del sistema en l'espai d'estat.
Per poder caracteritzar tots els elements que donen lloc a aquest tipus d'aproximació i representació, s'hauran de seguir els següents passos amb les seves consideracions: identificació del sistema, transformació de l'espai d'estat , modelització sobre el pla alfa, determinació dels esdeveniments discrets i generació dels conjunt de plans alfa.

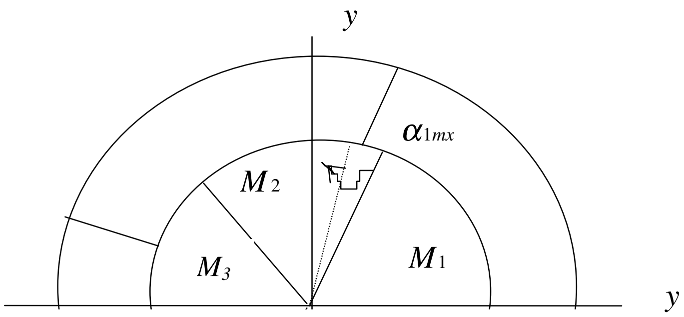
2.2 IDENTIFICACIÓ

La identificació dels models locals que conformaran el conjunt del sistema , haurà de tenir les següents premisses: identificar zones locals temporals monòtones tant l'entrada com la sortida, de mida màxima que donin lloc a un model de segon ordre estable, i que aproximi en la regió identificada el sistema amb un error màxim confinat $|y - \hat{y}| \leq \varepsilon$
Una identificació per mínims quadrats (MSE Minimum Squares Estimation) permet aquest tipus d'identificació, utilitzant la pseudoinversa de la matriu fi $(\Phi^T \Phi)^{-1}\Phi^T$ per ajustar a la dimensió de les incògnites, amb un petit senyal o soroll superposat a l'entrada possibilitarà la inversió de la matriu.

2.3 TRANSFORMACIÓ

Una transformació de l'espai d'estat en l'angle format per les variacions de dues components del vector d'estat $\alpha = \mathrm{atan}(\Delta x_1 / \Delta x_2)$ representa l'estat de la dinàmica del sistema en la variable angle, indicant la tendència a l'estabilització del sistema i les seves variacions.
Els diferents models locals quedaran limitats per uns alfa-limits la zona de reproducció del sistema. En una representació en coordenades polars amb les components, angle i magnitud de sortida, queden marcades les trajectòries del sistema, dinàmica i amplitud, reproduint els efectes a escala en augmentar la sortida. Fent així representable una partició de l'espai d'estat no fix i totalment depenent de la trajectòria del sistema, de difícil intuïció l'evolució del sistema cap als models locals col·laterals. El gràfic queda format per sectors circulars de 180 graus dividits per un nombre de models característic percada sector. Les transicions possibles,

són : La seqüència consecutiva de models, *i,i+1,i+2...* si no es produeixen nous canvis en el senyal de control. El trencament de seqüència si es presenta una variació del senyal de control. El salt a cercles col·laterals superiors o inferiors degut a la no linealitat del guany . De forma que es poden determinar les trajectòries a aplicar per provocar transicions adequades per canviar de model i seguir el camí que ens porti al lloc desitjat amb el vector d'estat adequat.



2.4 ESPAI D'ESTAT

En l'espai d'estat tenim representada la dinàmica del sistema, la intervenció dels diferents pols del sistema per respecte l'evolució del sistema, pols que donen dinamisme al senyal front a un esgraó , pols que estabilitzen el sistema , etc. La reproducció del sistema es realitza amb un conjunt finit de sistemes de segon ordre, que reprodueix parelles de pols identificables, i permet la representació en un pla del vector d'estat.

2.5 MODELITZACIÓ

Es va construint el gràfic de sectors circulars, a mesura que s'identifiquen els model locals del sistema, els trams restants s'identificaran aplicant noves senyals de control, fins a la seva totalitat, que donarà lloc a la representació total del sistema en models locals lineals.

Satisfactorietat de la modelització:
Els model són satisfactoris quan no propaguen els errors de modelització , és a dir es dóna suficient temps al sistema per independitzar-se de les condicions inicials d'entrada al model, provocant la convergència del sistema amb el pas del temps i dels models, de forma que les possibles desviacions entre el procés real i el simulador , siguin degudes a pertorbacions no modelades, o falles del sistema.

La distància entre els estats finals extrems propagats que compleixen amb l'error de modelització inicial, (X_1,X_2) per un cantó i (X_3,X_4) per l'altre, han d'ésser inferiors o iguals a l'error de modelització ε, presenten les següents límits en les condicions per la modelització:

$$x3 = \frac{c1x1 + c2x2 - 2\varepsilon}{\frac{x2}{x1}c2 + c1} \qquad x4 = \frac{c1x1 + c2x2 - 2\varepsilon}{\frac{x1}{x2}c1 + c2}$$

2.6 INMUNITAT AL SOROLL

El soroll de mesura, superposat al senyal, no perjudica la reproducció del angle, quan el vector d'estat es troba en la fase dinàmica, i en la fase d'estabilització en la que la sortida pot representar el soroll, i donar angles i variacions molt brusques, s'elimina mesurant la variació de la sortida o del vector d'estat, evitant tenir en compte l'angle si presenta a petites variacions de la magnitud de sortida.

2.7 CONDICIONS INICIALS

Perl'establiment de condicions inicials úniques perla simulació del proper tram del nou model, s'ha de simular la resposta del sistema al senyal de control, suficientment lluny per evitar que unes condicions inicials arbitràries tinguin efecte en el proper tram simulat. La simulació amb el control corresponent a d'altres dóna lloc a un error màxim en entrar al model.

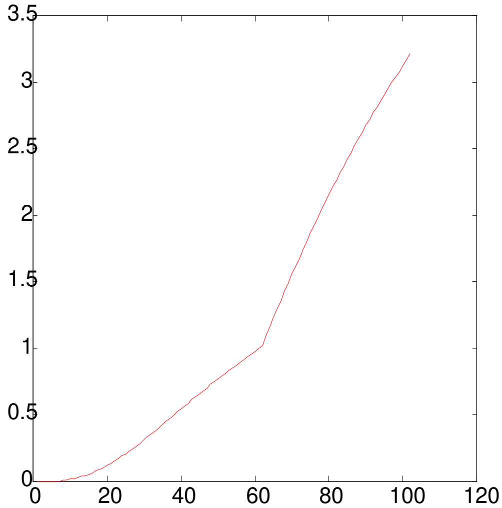
En la commutació del model, resulten discontinuïtats en la variable contínua de sortida, a conseqüència de la diferencia de les matrius C_i , que provoca un canvi de guany. En el cas que les variables d'estat no es corresponguin a variables físiques, habitual, en models identificats per mètodes paramètrics, cada model té els seus eixos de referència, que en superposar-los sobre un mateix diagrama, pot provocar superposició d'àrees de models en l'espai d'estat.

La solució en la commutació de models, volent evitar discontinuïtats, i mantenir l'expressió de la dinàmica, o històric, sobre el vector d'estat, es realitza mitjançant una aproximació d'alguna de les dues condicions: resposta fidel a la trajectòria, és a dir la dinàmica correcta, o la segona condició, evitar discontinuïtats del senyal de sortida.

Es presenten dos mètodes, que aproximen en cada cas un dels criteris:

Obeir a la dinàmica del senyal de referència. El procés es basa en calcular unes condicions inicials en entrar al tram del nou model, que responguin a la trajectòria anterior. Per independitzar el seguiment a la consigna prèvia, de l'estat inicial, aplicat pel càlcul, cal aplicar l'estat inicial, suficientment distant per fer-lo immune. És suficientment lluny quan es comprova que diferents estats inicials d'origen del càlcul, no modifiquen el valor d'entrada al model.

Continuïtat en la sortida. Les premisses són donar continuïtat de sortida, i que es representi la dinàmica correcta de cada model a la trajectòria establerta. A partir de les equacions de dos models d'espai d'estat, s'ha de recórrer a la simulació per obtenir els estats interns correctes. Les condicions inicials per calcular les possibles respostes que portin en temps *Ti* al valor desitjat $Y_1(k)=Y_2(k)$, es consideren nul·les a fi de no interferir i donar la possibilitat que el sistema respongui correctament a la dinàmica de la consigna. L'algorisme es basa en un mètode iteratiu que parteix del punt de commutació i anar reculant en el temps i consignes, fins a trobar una resposta que doni continuïtat de sortida.



Altres mètodes donen resposta a la modelització de sistemes no lineals mitjançant la descomposició en diverses regions, Modelització Fuzzy (Tagaki Sugeno), però l'interès en la utilització de Modelització híbrida no és la suavitat en les transicions sinó, per contra, la correcta modelització dels diferents estats.

2.8 ESDEVENIMENTS DISCRETS

La interacció dels models continus amb els esdeveniments discrets, generen diferents plans alfa de representació de sectors angulars interrelacionats pels esdeveniments discrets. Una funció de transició defineix els models interrelacionats entre els diferents plans alfa.
El problema de la modelització de sistemes és el coneixement exhaustiu necessari del sistema per poder modelitzar-lo, tant des del punt de vista continu, com discret. En la descripció complerta del sistema discret , cal un esforç molt gran de modelització per conèixer tots els possibles estats i les seves alteracions sobre les variables continues, actuacions possibles discretes, i falles possibles del sistema , que vindran representades sobre nous estats discrets, alguns no avaluats.

2.9 MODEL HÍBRID

- Q_h és el conjunt de plans alfa, DS
- $\sum SP$ conjunt de regions en el pla alfa DS
- $X \in R^2$ un vector d'estat bidimensional associat a una ODE en cada SP
- Conjunt finit d'estats discrets virtuals $\{ei\}$, generats internament en creuar les regions SP
- $\Omega : SP \times e \rightarrow SP$ funció de transició d'estat dins del pla alfa.
- Conjunt finit d'estats discrets $\{Vi\}$, generats internament o pel supervisor, en les transicions de plans alfa
- $\Psi : DS \times V \rightarrow DS$ funció de transició d'estats entre plans alfa.

- Senyals de control contínua $U(t)$

2.10 VERIFICACIÓ

La verificació automàtica del sistema, assegura la determinació del mal funcionament, falla, i determina la causa de l'anomalia i el diagnòstic de les falles. Si el sistema ha estat dissenyat per poder reconfigurar el sistema aleshores el sistema serà robust front aquestes falles, per la qual cosa fa necessària la redundància d'actuadors.

2.11 TRAJECTÒRIES ÒPTIMES

Amb el model complet del sistema es pot estudiar l'optimització per la realització d'una determinada trajectòria, optimització que minimitzi per exemple el temps en recórrer una trajectòria.

El problema és de tipus programació lineal de funcions d'objectiu múltiple. Si els models locals donen suficientment temps a la dinàmica del model a estabilitzar-se , el problema es pot independitzar dels models i trajectòries anteriors, i cal minimitzar la transició entre dos models col·laterals, en cas contrari es produeixen errors d'interferència.

Determinats els senyals de control continus que desplacen per un pla alfa, els senyals discrets que fan evolucionar dinàmicament entre diferents espais alfa, el recorregut òptim serà determinat realitzant exploracions en amplada i profunditat per l'arbre de possibilitats i escollint entre els camins que ens duguin al resultat final amb un menor cost.

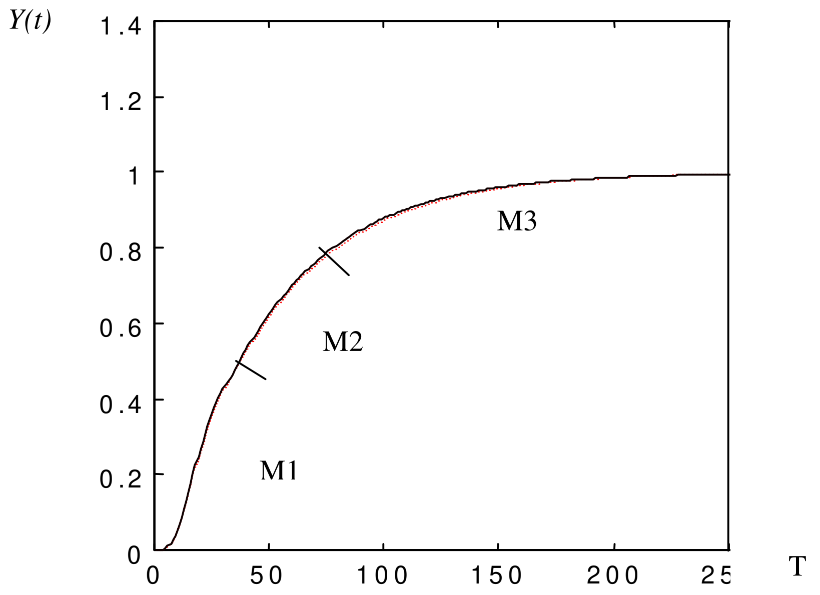
2.12 CONCLUSIONS

La modelització permet primer, una acurada aproximació en els moments de gran dinàmica o variació del sistema, segon una representació fàcil i entenedora del sistema, que combina els canvis efectuats per mitjà de variacions en senyals discrets, en una representació en tres dimensions del sistema complert, tercer modelització de sistemes amb fortes no linealitats i finalment determinació de recorreguts òptims dels models per aconseguir els resultats.

2.13 EXEMPLE

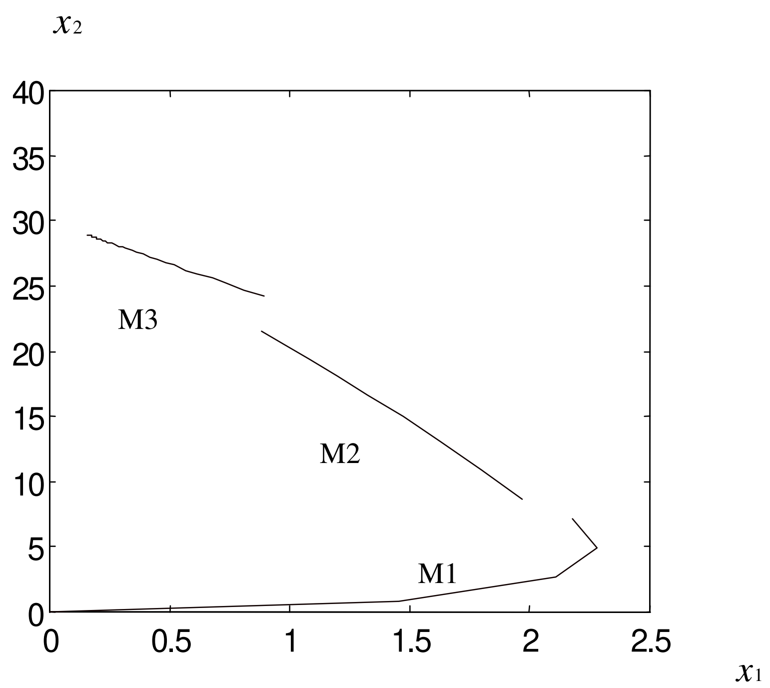
Una transmissió mecànica entre un motor i una cinta transportadora mitjançant una corretja flexible, dóna un comportament no lineal amb la següent expressió:

$y(t) = -2\frac{dy}{dt} - 5\frac{d^2y}{dt^2} - \frac{d^3y^2}{dt^3} + U$ **,** el qual es pot aproximar com a una consecució de 3 models lineals de segon ordre , que reprodueixen la resposta a l'esgraó la seqüència de models 1-2-3.

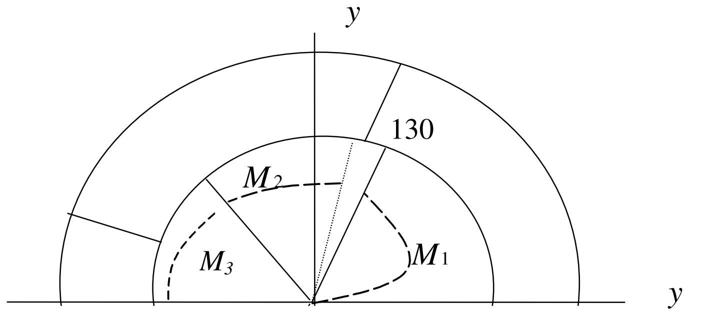


Traç continu, model no lineal, i en traç discontinu aproximació lineal a trams.

Amb una representació de l'espai d'estat :

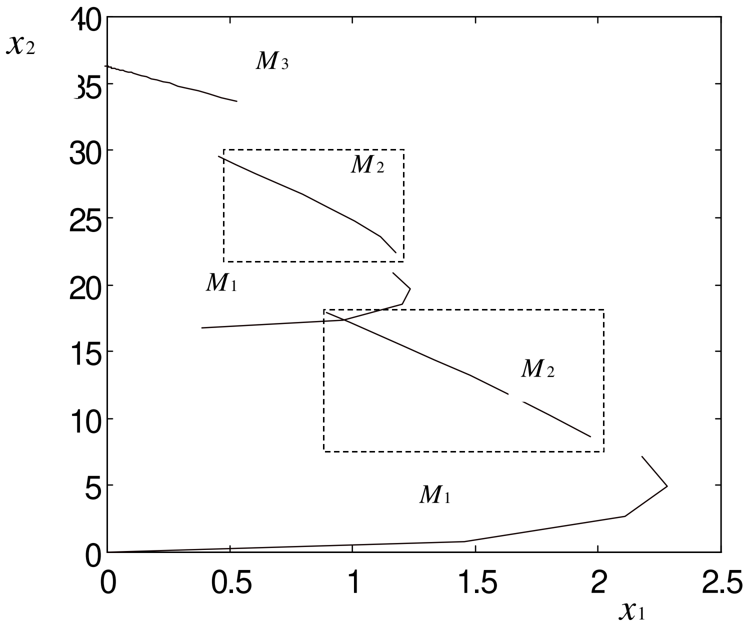


I una representació en el pla alfa:



Una de les característiques més interessants de la representació alfa, es dóna quan s'apliquen senyals similars d'amplituds diferents, els quals donen lloc a unes trajectòries en el pla alfa superposades sobre els sectors circulars, i mantenint els límits de canvi de model. Per contra, sobre l'espai d'estat les regions dels models canvien de dimensions i posició.

Representació en l'espai d'estat , de dos esgraons consecutius de diferent amplitud, aplicat en segon esgraó en el punt de transició del model 2 al model 3, truncant la seqüència consecutiva, i restant la seq: 1-2-1-2-3.



Essent X_1 X_2 les variables d'estat dels models identificats.

3 TRAJECTÒRIES ÒPTIMES

L'optimització d'una funció de cost, en varis trams, ha estat estudiada per Pettersón, Lennartsón 95, Kohn 95, Branicky 95 , en els quals es tracta de minimitzar una funció de cost com la equació de Bellman : $V^*(x) = \min_{p \in \Pi} \left\{ g(x,p) + V^*(x'(x,p)) \right\}$ a trobar l'acció òptima del conjunt d'accions Π , que minimitzi el cost de desplaçament de la variable x sobre l'acció p més una trajectòria òptima de la resta, calculat cap enrera. Donant lloc a la solució Viscosity, un cop aplicats els costos de desplaçament K_i, i transició, i el gradient de x, ∇_x com : $\min_u \left\{ \left\langle \nabla_x V^*(x), f_{i0}(x,u) \right\rangle - aV^*(x) + k_{i0}(x,u) \right\} = 0$, solució determinada per programació dinàmica, amb arguments V^*.[Tsisiklis 89]

3.1 RECORREGUT EN MÍNIM TEMPS

El problema del control en mínim temps, ha estat tractat des de fa dues dècades, [Athans 71] definint el DeadBeat control, com a senyal de control que condueix un sistema invariant i lineal (LTI) a l'origen amb el mínim nombre de passes de temps, que per dualitat, es pot expressar el problema inversament. Problema que té el seu significat en tractar-se de sistemes multivariable o d'ordre superior. El sistema es defineix v-step controlable, si existeix al menys una seqüència de senyals de control, que transfereix al sistema des del seu estat d'inici a l'origen.
La condició necessària i suficient és que el rank de les matrius del sistema [$B, AB, .., A^{v-1}B$]=n per alguna v≤n.
El càlcul de la seqüència de control que realitza el recorregut del vector d'estat, es determina aplicant programació lineal, a la fórmula recursiva de l'espai d'estat discret com a minimització varies funcions de cost, una percada component del vector d'estat,
$\min \sum_{i=1}^{k} \Phi(-iT)H(T)u_i + x_à$ essent $x(iT) = \Phi(T)x[x(i-1)T] + H(T)u_i$ la funció d'espai d'estat discretitzada, sota les restriccions $u_l \le u_i \le u_p$ i també sobre les variables d'estat, produint-se per cada instant de temps nou, una bifurcació en la recerca de l'òptim, a mode de Branch and Bound.

En el cas de sistemes variants, cal optimitzar els trams invariants, tenint en compte els trams col·laterals, de forma que s'aconsegueixi el mínim global.

3.2 OPTIMITZACIÓ

Un cop determinats els models que representen el sistema, i coneguts els valors límits de treball es pot determinar un criteri per realitzar una trajectòria per l'espai d'estat, minimitzant una determinada funció de cost.

Les restriccions seran les restriccions físiques del sistema, valors màxims i mínims de les variables continues, tant entrades com estats , i incorporant en aquestes les restriccions resultants per evitar una transició d'estat no desitjada.

Un criteri pot ésser realitzar una trajectòria, definida per el seu punt inicial, i el seu final, amb el mínim temps, i subjecta a totes les restriccions físiques. Resultant un problema d'optimització lineal amb un criteri de time-optimal control.

La resolució de un problema d'optimització , en el cas de la recerca de la solució en una regió convexa (conjunt convex : $x,y \in C$, $\lambda \in [0,1] \Rightarrow \lambda x+(1-\lambda) y \in C$) té solució única si la funció és monòtona , o convexa (funció convexa : $f(\lambda x + (1+\lambda) y) \leq \lambda f(x)+ (1+\lambda) f(y)$), i amb varis mínims locals, un de global en funcions més complexes. Si la funció és monòtona , respon a un sistema lineal i ofereix la solució en un extrem del recinte de recerca, funcions quadràtiques, poden ésser còncaves o convexes dins la regió, assegurant l'obtenció del mínim o màxim en el seu cas l'optimització quadràtica, funcions quadràtiques: $f(x)=x^T P x+2q^Tx+r$ es convexa si $P^T \geq 0$ i el punt òptim $x_{opt}=-P^{-1}q$.

Es pot definir una norma euclídea per minimitzar un error d'aproximació, min •Ax-b• , amb solució: $x_{op}=(A^TA)^{-1} A^Tb$, i amb restriccions lineals Cx=d, el problema es formula mitjançant una transformació :min •AFw+Ag-b• , o també es pot resoldre com un problema de programació quadràtica, amb una funció objectiu quadràtica i restriccions lineals , min x^TPx+2q^Tx+r ,subjecte a $Ax \leq b$, essent convex si $P\geq 0$.

El problema d'optimització de sistemes dinàmics en espai d'estat, és el nombre de variables d'estat, que generen un problema d´optimització per multiobjectiu $F(x)=(f_1(x), ... ,f_N(x))$ amb el vector objectiu $f_1,...,f_N$ (quasi-)convex, i restriccions convexes, i amb ponderació dels objectius $w_i\geq 0$, per minimitzar $\Sigma\, w_i f_i(x)$.

La solució al càlcul del senyal de control que estabilitza el sistema $x(t+1)=Ax(t)+Bu(t)$, $t=0,1,...,k$ en el mínim temps és buscar el temps mínim d'establiment inf.$\{T|x_i(t)=0$ per $T \leq t \leq K+1)$, subjecte a les condicions inicials $x(0)=x_0$, i a les restriccions de les variables $u(0),..,u(k)$, $u_w\leq u(t)\leq u_p$

El cas concret que es vol resoldre , parteix amb les següents premisses, determinar la trajectòria de control que minimitzi el temps entre un estat inicial i un estat final, amb unes restriccions lineals sobre les entrades i o els estats del sistema i les seves combinacions possibles , problema que es pot plantejar com a minimització d'una norma que expressi l'error ponderat de cada variable del vector d'estat •x_i-x_{if}•, partint de l'estat inicial x_0 , i a obtenir en k instant de temps una aproximació acceptable a x_f . La solució es troba en un punt qualsevol de la regió definida per les restriccions de les variables u_i , en ésser la solució a un problema de programació quadràtica.

Per la determinació dels valors inicials i finals òptims per provocar les transicions dels models locals es determinarà a priori una estimació desitjable per els punts del espai d'estat que realitza una trajectòria adequada a l'aplicació. Un procés d'optimització iteratiu ajustarà dins d'un entorn controlable el punt de transició que minimitza el temps transcorregut entre l'entrada al primer model amb les condicions inicials x_0 , i la sortida pel segon model amb condicions finals x_f , que a l'hora seran condicions inicials dels següents dos models consecutius, i així successivament, aproximant en repetir el procés amb els valors calculats cap el temps mínim total.

Si la trajectòria del mínim passa per la cantonada de la regió que limita un estat, indica que el mínim es troba en un conjunt diferent d'estats, s'han d'incloure en el set d'estats transcorreguts els estats col·laterals. Determinant que el mínim no es troba dins del conjunt d'estats mínim, la suma de mínim nombre de termes mínims no és forçosament inferior a la suma d'un nombre superior de termes mínims.

Un criteri és fixar el valor llindar de transició que té a veure amb el valor de la variable de sortida, i permetre variar la dinàmica en la transició, aprofitant l'evolució del model dinàmic més ràpid per reduir temps en la segona fase, sobrecost de temps en la primera fase, sobrecompensat en el segon tram. El mètode fixa una relació que lliga les components del vector d'estat, en el rang de possibles transicions entre ambdós models.

El mètode es realitza de forma iterativa, degut a la complexitat d'expressar el cost en temps en funció dels models col·laterals, i les condicions inicials i finals, ja que no són independents entre elles. No presentant un greu problema el seu càlcul, per ésser un procés realitzat Off-Line previ a l'execució del sistema.

Les solucions sub-òptimes, seran necessàries en conèixer l'autòmat nomes l'estat següents al actual, i determina el control segons el punt objectiu, estimat a partir dels models col·laterals.

3.3 EXEMPLE

Suposat un circuit de velocitat per vehicles, es vol minimitzar el temps de volta, donades les característiques d'un motor i els límits de velocitat en els punts més restrictius del circuit.
El circuit, és simple i simètric, consta de dos revolts amb Vlim=60 Km/h, i un recorregut total de 10 Km.

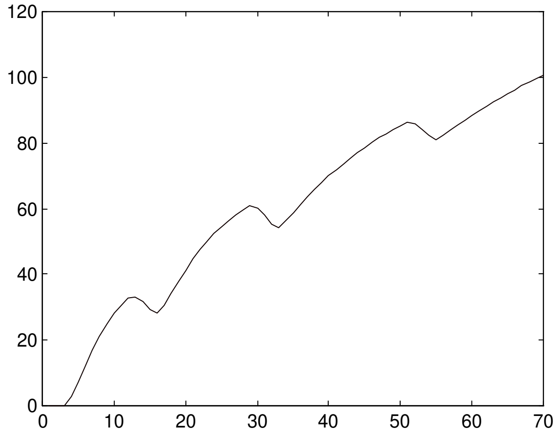
La veloc. màxima del vehicle, és de 180 Km/h, i l'arrancada de 0 a 100 en 7 segons a punt de posar la 5 velocitat. Un retard en canviar les marxes de ½ seg.
Determinar el temps mínim de volta teòric sobre el circuit.
S'han de determinar els punts físics del circuit en que cal canviar de marxa, i les consignes de gas a donar en cada instant de mostreig.

La dinàmica del motor és la següent: $\frac{V}{U} = \frac{Rm * N}{\Gamma * N^2 \; S + 1}$, essent R_m el nombre de revolucions màximes, Γ un factor en la constant de temps, i N el nombre de la velocitat.

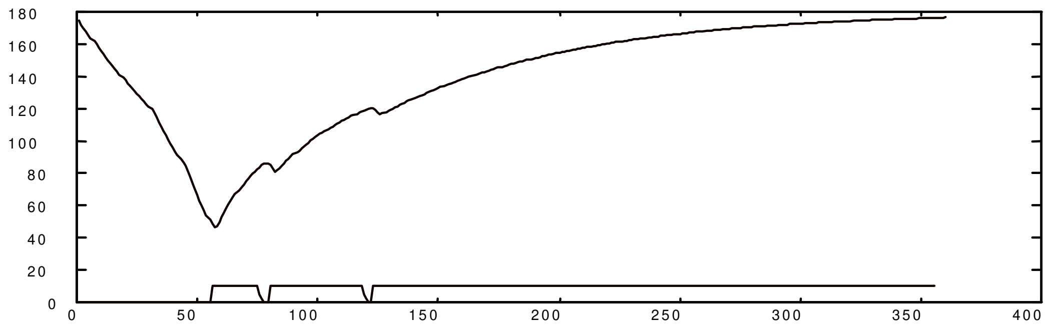
Consideracions:
- En ésser un model lineal de primer ordre, no cal aplicar cap mètode de linealització.
- A partir de l'equació de la dinàmica es determinen les velocitats, on interessa canviar de marxa, per aconseguir una acceleració, o desacceleració màxima, (valor de la derivada de la velocitat iguals per parelles de velocitats consecutives).
- A partir de les limitacions físiques del circuit, i les velocitats de canvi de velocitat, es genera una seqüència d'estats discrets, amb la premissa de reduir temps de volta circulant a la màxima velocitat.
- S'optimitza el recorregut en cada velocitat, i s'itera per aconseguir el vector d'estat final per cada tram fins que sigui òptim.
Es repeteix el procés fins que el estat final del sistema, i l'inicial, coincideixen.

Resultats:
Canvi de 1ª a 2ª a 6/7 *190/5 = 32 Km/h
de 2ª a 3ª a 60 Km/h, de 3ª a 4ª a 86 Km/h, i de 4ª a 5ª a 112 Km/h

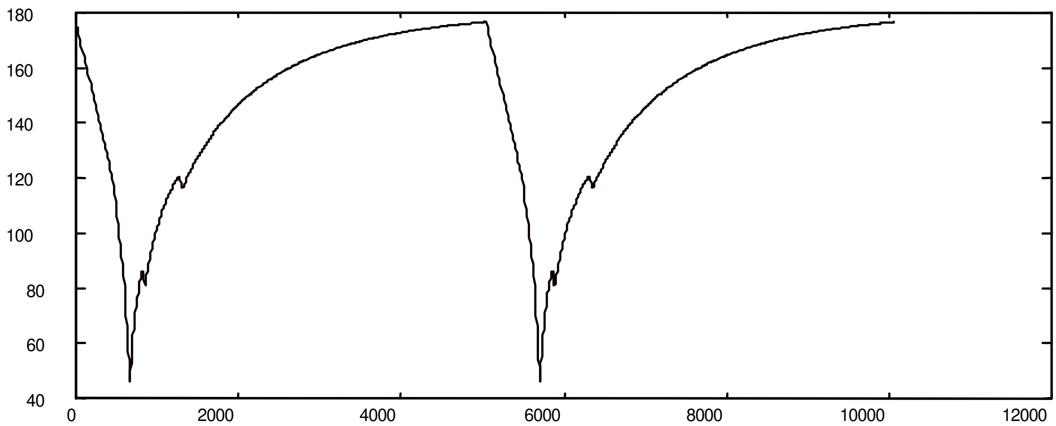
El perfil de 0-100, és el següent:



Determinant la constant de temps de l'expressió del motor Γ = .14 segons. Considerant els canvis de velocitat amb uns 0.25 segons.
La seqüència de velocitats és a priori: 5,4,3,4,5,4,3,4,5 enllaçant amb l'inicial, i el gas a donar en temps (dec. de segon) , per donar la volta més ràpida en 7.2 segons:



Velocitat en funció del temps (a dalt) , i de l'espai (avall).



4 SUPERVISIÓ

4.1 SUPERVISIÓ DE SISTEMES DISCRETS

La supervisió de sistemes discrets ha estat amplament tractat per diferents autors, (Ramadge 89-90, Wonham 87-88, Zhong 90, Wong 96, Tsisiklis 89)

Per a l'encaminament de sistemes discrets cal fer una previsió de les seqüències d'estats possibles del sistema que ens puguin dur al valor final desitjat. És una recerca heurística dins de l'arbre d'estats possibles que ens pugui conduir segons un criteri de cost cap el resultat.

Primer cal expressar en diagrama d'estats les possibles seqüències del sistema, marcant les transicions i els possibles destins o estats, creant un tronc d'alfabets S possibles generats pel graf.

Analitzar el graf per determinar les parts que s'evitaran en la seva utilització, degut al perjudici que provoca certs estats, i expressar l'alfabet de control mínim i els seus derivats, associant estructures encadenades en sèrie per productes, i diferents branques per sumes dels subconjunts, $S_k \subset S$, el sistema controlat genera un alfabet inclòs a l'alfabet del sistema.

Un sistema és completament controlable, si tots els estats poden ésser conduïts a tots els estats, estat atenyables des de qualsevol estat, permetent una llibertat total en la conducció del sistema a l'objectiu.

La trajectòria òptima es pot valorar en funció del nombre d'estats a transcórrer, el cost en funció del temps en recórrer els diferents estats del recorregut, etc, mitjançant un algorisme de recerca de tipus alfa-beta , o una recerca en amplitud i profunditat (Lafortune 92-98).

Jerarquitzar la supervisió del sistema discret sobre el comportament continu , mitjançant l'abstracció del comportament continu, per un generador d'esdeveniments (Lemmon 96) cap al sistema d'esdeveniments discrets DES, o reduir el problema a un problema de control local (Single Control Police), i en cas que dins la regió local, no es pugui determinar l'objectiu, localitzar la regió lateral objectiu (Target Region).

4.2 SUPERVISIÓ DE SISTEMES HÍBRIDS

El control discret sobre el sistema híbrid es pot realitzar segons diferents objectius, i per entorns específics. Des del sistema més simple , monovariable , amb diferents estats, passant pel multivariable, fins a multiplicitat de sistemes en paral·lel.

L'objectiu del supervisor discret, passa per l'anàlisi de comportament, evitar el bloqueig del sistema, possibilitar la sincronització de processos, determinar condicions inicials de funcionament, estabilitzar al sistema front a falles o pertorbacions, i demés, amb l'ajut de potents eines de simulació i anàlisi de sistemes híbrids.

El sistema més simple, SISO, amb un set d'estats , permet un estudi simple de les seves característiques, si reuneix certes condicions. Comportament continu completament controlable ,CCC, amb la condició d'ésser la matriu $[\, A \mid AB]$ de rang 2 per sistemes de segon ordre, que assegura poder construir un senyal de control no restringida, que condueixi el sistema, des d'un estat inicial, a un final qualsevol, amb un temps finit. La limitació del senyal de control, existeix en amplitud , i en certs casos en temps, limitant els valors límits finals atenyables per l'estat.

L'atenyabilitat d'un estat final, dependrà tant de les accions locals aplicades en els estats, com les transicions i recorreguts realitzats en el gràfic d'estats. Un sistema discret és completament controlable [PURY 95], si permet arribar a qualsevol estat, a partir de qualsevol altre estat DCC. La combinació d'un sistema CCC, i DCC, permet el control total sobre el sistema, permetent múltiples recorreguts per arribar al resultat final, i aplicar un criteri d'optimització sobre el control per realitzar el més convenient.

Un sistema que no compleixi els criteris de controlabilitat complerta, s'analitza de enrera cap endavant, per localitzar els estats inicials possibles que permeten arribar al estat final, marcant els recorreguts límits superiors e inferiors, dels comportaments continus, i determinant les possibles transicions dins del ventall d'estats inicials , i així consecutivament. Seran determinats un ventall de condicions inicials que condueixen al resultat final esperat (Reachability Set).

En sistemes sofisticats on corren a l'hora diferents models (processos concurrents), i cal una sincronització per canviar d'estat conjuntament, s'afegeix una nova restricció, el temps, que força l'anàlisi de condicions inicials i recorreguts, a un temps igual o màxim a T. Són sistemes el control en elements perifèrics o de l'entorn, processos paral·lels, p.e. l'estudi d'una xarxa de comunicacions, en els quals el temps és un paràmetre intrínsec i lliga en certs instants de temps els elements que formen part de l'escenari.

Una de les tasques del supervisor és la d'evitar que el sistema es bloquegi, impossibilitat de generar noves transicions i no es pugui seguir avançant cap el objectiu final. La solució és determinar un llenguatge viu, que no es bloquegi, que serà una part del alfabet del procés híbrid $L_C \in L_H$ [Antsaklis 95] , eliminant de l'alfabet del procés els bucles infinitament visitats, fons de bloqueig del sistema.

El sistema està format per un conjunt de esdeveniments controlables, i un conjunt d'esdeveniments incontrolables, $\sum_u \bigcup \sum_c = \sum$ poden ésser observables o no (Ramadge Whonham 87-88). El controlador mitjançant els esdeveniments controlables, l'autòmat G ha de generar un subllenguatge viu $L(G) \subset \sum^*$, format per strings finits, un subconjunt del conjunt de strings. El recorregut desitjat vindrà generat per el controlador com a un subconjunt dels camins marcats, o possibles $K \subseteq L_m(G)$

La descripció de l'autòmat com a sistema a esdeveniments discrets és determinista en conèixer els esdeveniments els estats i les transicions. L'indeterminisme apareix en la dinàmica contínua, i les pertorbacions que poden aparèixer, que repercuteix en l'autòmat, en dependre de l'estat final, el qual pot provocar diferents transicions.

4.3 DEFINICIONS

ATENYABILITAT

La projecció enrera de l'atenyabilitat del sistema, analitza els estats possibles atenyables en un temps màxim donat, determinant els estats anteriors que projectant segons un particular control

en cada cas l'arribada al punt destí, al mateix temps es reprodueix sobre aquest estats anteriors, augmentant el marge d'accés a mesura que és recula. Determinant estats PRE al estat actual.

PROJECCIÓ

Cas invers a l'explicat i donant lloc als estats POST

FALLES

En la identificació de les falles caldrà tenir en compte possibles falles sobre el comportament continu, i sobre el discret.

Sobre el model continu, seran representades com una desviació entre el comportament del sistema i el model, expresat com una desviació dels paràmetres que representen la dinàmica del sistema. La tècnica a emprar és l'anàlisi de residus.

Sobre el model discret, s'interpretaran com a falles les desavinences del sistema i el graf representatiu del model comportamental, en detectar estats o seqüències no previstes, o condicions de les variables diferents, el qual cal tractar diferentment segons el seu origen.

En una seqüència no existent es perd el seguiment i l'històric del sistema , havent-se d'identificar de nou a partir de zero, i de reconduir el sistema mitjançant accions segures i convergents.

En un estat desconegut, es determina la incisió d'un nou estat estable acotat amb uns senyals discrets diferents i comportament continu diferent. El tractament a aplicar és la incisió al graf en el lloc que s'interrelacioni correctament amb els estats col·laterals, podent aprofitar l'històric. Si no permet la seva incisió en el lloc on ha aparegut, es perd el seu històric , i es recol·loca a on s'identifica el seu lloc.

DEFINICIONS PRÒPIES:

PSEUDOESTAT
Pestat, s'anomenarà un estat del sistema en el que es desconeixen algun valor d'una variable o fins i tot la participació d'una variable, que comporta el coneixement incomplet de l'estat del sistema.

PUNT de CONVERGÈNCIA ESTABLE PCE
Tots els recorreguts poden passar per aquest punt, starts, o resets per reconduir el sistema en produir-se falles.

ACCIONS CONVERGENTS AC
Accions que estabilitzen el sistema i el condueixen cap els estats PCE , provocables des de qualsevol punt ,avortament del procés.

DISTÀNCIA AL RECORREGUT ADEQUAT
Es la distància mínima en nombre d'estats que s'han de transcórrer per arribar a situar-se sobre el recorregut òptim o adequat.

PESTATS IGUALS DIFERENTS EGD
Són Pestats que individualment són exactes, comportament continu A i variables discretes afectades V_i, però amb el seu històric vinculant diferent HVC, i l'estat següent o posteriors també dependran de l'històric.

HISTÒRIC VINCULANT CARACTERISTIC HVC
Passat anterior que donen lloc a l'estat actual, segons unes accions preses determinades, que donen lloc a un tram de seqüències úniques. Defineix un camí particular amb parts comunes a d'altres camins, quedant definit per les parts comunes + Pestat anterior que el discrimina dels altres.

TRAM SEQÜENCIAL TS
Les condicions del sistema per aconseguir el Pestat redueixen a una seqüència única de Pestats.

TRAM FUTUR TF
L'històric vinculant i els esdeveniments actuals marquen una seqüència futura de Pestats, previstes perla consecució de l'objectiu.

IDENTIFICACIÓ HISTORICA
Reconèixer una seqüència temporal de Pestats i accions reproduïble en un futur, a partir d'on convergeixen seqüències desprès un sol camí seqüencial TS, a partir de PCE

FINESTRA HISTÓRICA
Pestats enrera que conflueixen en el Pestat actual. L'atenyabilitat marca un tram seqüencial TS

GRAF ESTÀTIC
Representació dels possibles estats del sistema, sense intervenir les accions de control.

GRAF DE SEQÜÈNCIES
Representació de les possibles seqüències i evolucions, sota efecte d'accions de control viables Graf complert estudiat prèviament.

CONTROLADOR ESTABLE
Permet ésser reconduït en presencia de falles o grans pertorbacions.
Representar un graf amb PCE's i AC's.

FUSIÓ de TRAMS
Trams que desemboquen en un punt comú, els TS es poden fusionar en un TS residual únic representatiu de les característiques comunes.

PROPIETATS:

Dins històric no hi ha PCE: $PCE \notin HVC_i$ per qualsevol Pestat.

Històrics de EGD són diferents: $HVC_{k\_i} \in EGD_{k\_i} \neq HVC_{k\_l}$

Dins un TS poden existir diferents branques endavant però no enrera , equival a dir que TS iguals donen lloc a Pestats diferents, és el TS propi d'un Pestat.

Cada Pestat té un TS i un TF associat , TF a un pas únic en sortir del Pestat (cond. finals estat+objectiu). Sempre es pot predir al menys un estat TF a partir de TS+ cond.final del Pestat actual.

Queda determinada la llei de control a aplicar en conèixer el Pestat final -> que implica Pestat inicial i el Pestat final del TF, i el criteri global d'optimització.

El TF ve donat per una funció resultant de TS + valor final del Pestat, i l'objectiu, tot fixat a priori, donant lloc a una funció de transició única per cada TS+Pestat final.

Arribat al Pestat següent TF_1 es reconsidera el TS

Indeterminacions discretes poden trencar un TS

4.3 FUNCIONS DEL CONTROLADOR

Es crea unes funcions de transició que determinen a partir de l'històric, i els esdeveniments produïts unes accions, que crearan un Pestat dins d'una trajectòria orientada a la consecució d'uns objectius plantejats per la generació de la taula.

Determina segons una llei d'optimització el senyal de control, amb els límits en les variables d'estat, per evitar provocar una transició a un model no desitjat.

La funció del controlador és limitar l'arbre de possibles recorreguts que es donen amb el sistema en sí. Determinant els camins que tenen un sentit en la consecució de l'objectiu.

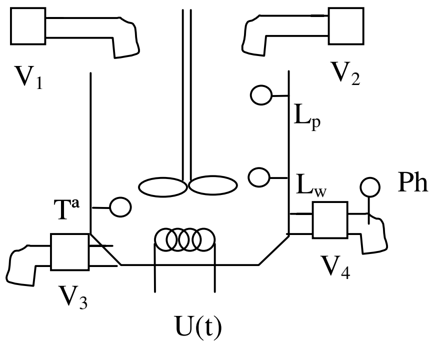
Les funcions de transició Ω determinen les dinàmiques i les condicions dels nous Pestats en produir-se una transició e_i de franqueig dels límits de la regió. Funcions de transició creades a partir del α-graf de regions possibles on en poden saltar les variables continues X , en funció del límit franquejat en la transició.

Es genera una taula Γ_i de seqüències úniques d'entrada, per obtenir les accions de control a aplicar , senyal de control contínu. Les seqüències d'entrada, seran formades per un alfabet format per els Pestats transcorreguts dins α-graf , únics i distingibles.
Es possible provocar una transició discreta en sobrepassar un límit d'una regió, en tal cas es trasllada la solució a la taula Π, de funcions de transició Ψ.

Les funcions de transició Ψ venen marcades per la generació d'esdeveniments discrets sobre el procés, esdeveniments provocats internament pel sistema, i que poden donar lloc com a resposta un esdeveniment discret provocat pel supervisor, a fi de reconduir el sistema, cap un α-graf desitjable, i transferint informació a la taula Γ_i corresponent per determinar el senyal de control a aplicar.
En cas d'una falla, donar-se un Pestat que no es correspongui amb el seu històric , o Pestat desconegut, s'haurà de buscar en el graf de seqüències possibles, la seva situació, i desplaçar al sistema des de la distància al recorregut desitjat actual cap aquest recorregut, escollint els Pestats intermedis amb una progressió més ràpida.

4.5 EXEMPLE

Dipòsit amb dues vies d'entrada, dues de sortida , barrejador, resistència, i sóndes de nivell, mesura de temperatura i de Ph en la sortida.



Conjunt d'accions: V1,V2,V3,V4,Lw,Lp,M1, essent Vi les vàlvules, Li les sóndes de nivell, M motor barrejador.

Accions no controlables directament: Lw,Lp,Ph, sóndes de nivell, sónda de Ph, flags de configuració.

Conjunt de Pestats: FV1,FV2,C,EV1,EV21,EV22,R ,Buit, essent FVi emplenar amb vàlvula Vi, amb dinàmica contínua $\dot{h} = k_i$, C escalfar i barrejar el líquid amb dinàmica

$\dot{t} = k_1(T_{Max} - t)U(t)$, EVi buidat segons vàlvula i, additiu àcid 21, base 22, dinàmica

$\dot{h} = k_i\sqrt{h}$, el Pestat R barreja i refreda el tanc a $\dot{t} = -k_2(t - T_{amb})$, i romana buit.

Les variables continues mesurables, la temperatura tª.

L’acció de control continua, és l'energia aplicada a la resistència.

El procés ha de realitzar determinades mescles a temperatura fixa, i ha de buidar a temperatura inferior a un límit donat, en cas de ph dolent, si l’additiu és àcid, afegir additiu. L’autòmat ha de calcular les accions per realitzar el procés, el més ràpid possible.

Es determinen les seqüències possibles sota el control, des de un punt de vista no determinista:
seq1: EV1,EV21,C,R,V4 ,Buit, procés complert correctament , i responent als senyals discrets Ini, T1, Lp si està entorn T2, Temp1, Ta, Temp2, Lw, i torna a estat estable.
seq1': EV1,EV22,C,R,V4
seq2: EV1,EV21,V3,Buit , en quan el Lp no s'assoleix en T2 (dip sub. buits etc)
seq2': EV1,EV22,V3,Buit ,
seq3: EV1 ,EV2,C,R,V3,Buit , en transcórrer un temps màxim de refredament sense assolir la temperatura fixada, Temp2, o (mala consigna)
seq3': EV1 ,EV22,C,R,V3,Buit
seq4: EV1,EV21,C,V3,Buit, en transcórrer un temps màxim d'escalfament sense assolir la temperatura fixada, Temp1, (mala consigna, dipòsit buit, falla)
seq4': EV1,EV22,C,V3,Buit,
seq5: EV1,EV22,C,R,V4,V3,Buit , falla el Ph.
seq6: EV1,EV21,C,R,V4,EV21,C,R,V4,Buit, cas d'haver afegir additiu, senyal sónda Ph.

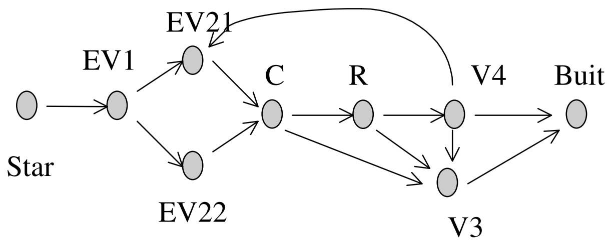
seq7: EV1,EV21,C,R,V4,EV21,C,R,V4,EV21,C,R,V4,Buit, corregir dos cops el Ph.
seq successives, afegir additiu més vegades

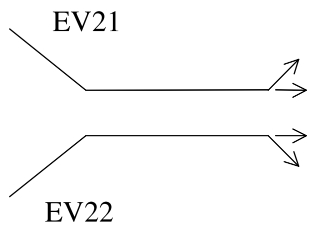
Un anàlisi de les seqüències, ens determina els històrics de cada estat:
Hist de EV2: EV1 ; C: [EV22; EV21] ; A: [EV22; EV21] ; R: [EV22; EV21] ; V4: [EV22; EV21] ;
Es determina els estats posteriors, dels estats amb històric, en funció dels esdeveniments:
Post EV2: C, Lp entorn T2 ; EV2: V3, cas contrari
C: A si Temp1 dins Tlimit ; C: V3 , cas contrari
A: R sense condicions
R: V4 si Temp2 dins Tlimit ; R: V3 cas contrari
V4: V3 si Hist. EV22
V4: EV2 si Hist. EV21
Pestats post. dels sense històric:
post EV1: EV2
V3: Buit
V4: Buit

A generar la funció de transicions Ψ, com una taula de Pestats Històrics , esdeveniments , Pestats posteriors, i accions de control, continues i discrets.
On quedin totalment definides les evolucions del sistema en funció de l'històric, i els esdeveniments.

Històric	Pestat Actual	Esdeveniment	Var.Contínua	Pestat Post	Control	Nou Hist.
Buit	EV1	Start				EV1
EV1	EV21	T2&Lp	To	C	U(t)	EV21
EV1	EV22	T2&Lp	To	C	U(t)	EV22
EV21	C	Temp1	Tmax	R	U(t)	anterior
EV22	C	Temp1	Tmax	R	U(t)	"
EV21	C	Tlim	Tf	V3		"
EV22	C	Tlim	Tf	V3		
EV21	R	Temp2	Tmin	V4		
EV22	R	Temp2	Tmin	V4		
EV21	R	Tlim	Tf	V3		
EV22	R	Tlim	Tf	V3		
EV21	V4	Ph		EV21		
EV22	V4	Ph		V3		"
EV21	V4	Lw		EV1		buit
EV22	V4	Lw		EV1		buit
EV21	V3	Lw		EV1		buit
EV22	V3	Lw		EV1		buit

El control es determina amb la funció de minimització del temps discretitzat entre la temperatura inicial dels components X_o (pot ésser afectat per pertorbacions) i la temperatura final de la barreja X_f (prefixada) $\min_k X_f = A^k X_o + A^{k-1} X_o B U_1 + \ldots + B U_k$, de la qual la seva dinàmica $X_{f(2)}$ és calculada prèviament a partir de la minimització del temps de cicle entre dos Pestats, i determinant una funció depenent de les temperatures a assolir en ambdós Pestats, $X_f = f(t^a(\text{trans}), t^a(\text{inici}), t^a(\text{fi}),)$, aproximant per una funció polinòmica lineal de primer ordre amb el mètode de mínims quadrats. Prefixades les constants de les dinàmiques (Tm=90,Tamb estimada en 25, k_1=1/300, k_2=1/500)





L'històric marca un flux en la seqüència, encara que es barregin, o tinguin trams comuns.

L'autòmat supervisa el procés buscant el Pestat posterior, i les accions a prendre en la taula de transicions, segons l'històric, i els esdeveniments. En cas de pèrdua, no existència en la taula, el autòmat pot donar el Pestat o l'acció com a falla, havent d'aplicar l'acció convergent AC, que dugui el procés al punt de convergència estable, d'on es pot reanudar la seqüència desitjada.

Existeixen exemples que utilitzen tota la descripció del Model-α, Models dinàmics no lineals, amb histèresi, i discontinuïtats, que requeriran de la funció de transicions Ω dins d'un espai d'estat, que porta al càlcul de trajectòries continues que generin un determinat recorregut dins l'espai d'estat.

4.6 TREBALL FUTUR

Aquesta teoria cal ésser validada mitjançant processos reals a on prenguin part les pertorbacions i l'indeterminisme que causa, per analitzar la robustesa del controlador i del supervisor.

Aplicar sobre processos típicament no lineals, mitjançant una quasi linealització per retornt d'estat, estats no mesurats si no identificats o observats, per aplicar a l'optimització de trajectòries.

Comparar les trajectòries obtingudes per la gent que optimitza els processos no lineals contra els mateixos processos linealitzats a trams.

Automatitzar el procés d'aplicació per minimitzar l'actuació del operador al instal·lar el controlador sobre la seqüència del procés real.

5 REFERÈNCIES:

[Alur 90] R. Alur, C.Corcoubetis, D.Dill. Model-Checking for real time systems. Proc 5th IEEE Simp. on Logic in Comp. Science 1990
[Alur 91] R. Alur. Techniques of Automatic Verification of Real-Time Systems. Ph.D Thesis, Standfor Univ. 1991
[Alur 95] R.Alur et al. The Algorithmic Analysis of Hybrid Systems. Theor. Comp. Science 138-3
[Alur Henzinger 92] R.Alur T.Henzinger. Logics and Models of Real Time: A Survey. Technical Report TR 92-1262 Dept. Comp. Scien. Cornell Univ.
[Antsaklis Lemmon 93] P.Antsaklis J.Stiver M.Lemmon. Hybrid Systems Modeling and Autonomous Control Systems. Lect. Notes in Comp. Science 736. Springer-Verlag
[Antsaklis 95] X.Yang P.Antsaklis. On the supremal Controllable sublanguage in the Discrete-Event Model of Nondeterministic Hybrid Control Systems. IEEE Trans. on Aut. Control 40-12
[Beneviste 90] A.Beneviste P.Le Gernic. Hybrid Dynamical Systems Theory and the SIGNAL Language. IEEE Trans. on Aut. Control 35-5
[Billings 87] S.Billings, W.Voon. Piecewise linear identification of non-linear systems. Int. J. Control 46-2
[Billings 89] S. Billings, S. Chen. Extended model set, global data and threshold model identification of severely non-linear systems. Int. J. Control 50-5
[Branicky 94] M. Branicky V. Borkar S.Mitter. A Unified Framework for Hybrid Control. 33 Conf. on Decision and Control.
[Branicky 95] M.Branicky S.Mitter. Algorithms for Optimal Hybrid Control. 34 CDC New Orleans 95
[Branicky 98] M.Branicky V.Borkar S.Mitter. A unified Framework for Hybrid Control: Model and Optimal Control Theory. IEEE Trans. on Aut. Control 43-1
[Caines 95] P.Caines J.Wei. The hierarchical lattices of a finite machine. Systems and Control Letters 25.
[Clarke] E.M.Clarke E.A.Emersón. Automatic verification of finite state concurrent systems using temporal logic specification. 10 ACM Symposium on Principles of Programming
[Daoutidis 96] A.Kumar P.Daoutidis. State-Space Realizations of Linear Differential-Algebraic Equation Systems with Control-dependent State Space.IEEE Trans. Aut.Control 41-2
[Delchamps 90] D. Delchamps. Stabilizing a Linear Systems with Quantized State Feedback. IEEE Trans.on Aut Control 35.
[Deshpande 94] A.Deshpande. Control of Hybrid Systems. PhD Thesis. Elec. Eng. and Comp. Sciencies. Univ Berkeley 94.
[Deshpande Varaiya 95] A. Deshpande and P.Varaiya. Viable Control of Hybrid Systems. Lectures Notes in Comp. Sciences 999, Springer-Verlag, 95
[Grossman 95] R.Grossman R.Larsón. An Algebraic Approach to Hybrid Systems. Theor. Comp. Scienc. 138-1
[Guckenheimer 95] J.Guckenheimer 95. A Robust Hybrid stabilization strategy for equilibria. IEEE Trans. Aut. Control 40-2
[Henzinger 91] T. Henzinger. The Temporal Specification and Verification of Real-Time Systems. PhD Thesis. U. Stanford. 91
[Henzinger 98] T.Henzinger P.Ho H.Wong-Toi. Algorithmic Analysis of Nonlinear Hybrid Systems. IEEE Trans. on Aut. Control. 43-4
[Hilshorst 92] R.Hilshorst. Supervisory Control of Mode-Switch Processes. Thesis.U.Twentee.
[Johansen 94] T. Johansen. Operating Regime based Process Modeling and Identification. PhD Thesis. U. of Trondheim 94.
[Johansen 95] T. Johansen, A.Foss. Identification of non-linear system structure and parameters using operating regime decomposition. Automatica 31-2
[Khon Nerode 94] W. Khon A.Nerode. Multiple Agent Hybrid Control: Carrier Manifolds and Chattering Approximations to Optimal Control. 33 Conf. CDC

[Kohn 95] W. Kohn A.Nerode. Viability in Hybrid Systems. T. Comp. Science 138-1
[Lafortune 92] S. Lafortune, S.Chung. Limited Lookahead Policies in Supervisory Control of Discrete Event Systems. IEEE Trans. on Aut. Control 37-12
[Lafortune 98] R.Sengupta S.Lafortune. An Optimal Control Theory for Discrete Event Systems. SIAM J. Control Optim. 36-2
[Lennartsón 94] B. Lennartsón B.Edgard M.Tittus. Hybrid Systems in Process Control, 33 Conf. Dec. Control 94
[McManis 94] McManis,Varaiya. Suspension automata: A decidable class of hybrid automata. Workshop Computer-Aided Verification 1994.
[Murray 94] R. Murray-Smith. A Local Model Network Approach to Nonlinear Modelling. PhD Thesis. U. of Strathclyde, Glasgow.
[Nerode Khon 93] A.Nerode W.Khon. Models for Hybrid Systems: Automata, Topologies, Controllability, Observability. Lectures Notes in Comp. Sciences 736
[Nerode Khon 95] W. Khon A. Nerode. Viability in Hybrid Systems. Theoretical Computer Science 138
[Passino 94] K. Passino A.Michel P.Antsaklis. Lyapunov stability of a Class of Discrete Event Systems IEEE Transactions on Aut. Control 39-2
[Peleties DeCarlo 93] P.Peleties R.DeCarlo . A Modeling Strategy for Hybrid Systems Based on Event Structures. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications3.
[Pettersón Lennartsón 95] S. Pettersón B. Lennartsón. Time-Optimal Control for a Class of Hybrid Systems. European Control Conf. 95
[Pnueli 97] A.Pnueli. The Temporal Logic of Programs. FOCS 77 IEEE 97
[Puri 94] A.Puri and Varaiya. Decidable of hybrid systems with rectangular differential inclusions. Workshop Computer-Aided Verification 1994.
[Puri Varaiya 94] A. Puri P. Varaiya. Verification of Hybrid Systems using Abstractions. Hibrid Systems Workshop.
[Puri 95] A.Puri. Theory of Hybrid Systems and Discrete Event Systems. PhD Thesis. U. of California at Berkeley. 95
[Ramadge 89] P.Ramadge. Some Tractable Supervisory Control Problems for Discrete-Event Systems Modeled by Buchi Automata. IEEE Trans. on Aut. Control 34-1
[Ramadge 90] P. Ramadge. On the Periodicity of Symbolic Observations of Piecewise Smooth Discrete-Time Systems. IEEE Trans. on Aut. Control 35-7
[Sóntag 80] E.Sóntag. Nonlinear Regulation: The Piecewise Linear Approach. IEEE Trans. on Aut. Control 26-2
[Sóntag 81] E. Sóntag. Nonlinear Regulation: The Piecewise Linear Approach. IEEE Trans. Aut. Control 26-2
[Stiver Antsaklis93] J. Stiver P.Antsaklis DES Supervisor Design for Hybrid Control, 31 Annal Allerton Conf. on Communic. Control and Computers. 93
[Tsisiklis 89] J.Tsitsiklis. On the Control of Discrete-Event Dynamical Systems. Math. Control Signals Systems 89-2
[Tittus 94] M.Tittus, B.Egardt. Control-Law Synthesis for Linear Hybrid Systems. 33 CDC 94
[Tittus Edgard 94] M.Tittus B.Edgard. Control-Design for Linear Hybrid Systems. Tech Report. Control Eng. Lab. Chalmers Univ.Sweden
[Wong 96] K.Wong W.Wonham. Hierarchical Control of Discrete-Event Systems. Disc. Event Dyn. Systems: Theory and App.
[Wonham 87] W.Wonham P.Ramadge. Supervisory Control of a Class of Discrete Events Processes. SIAM J Control Optim. 25-1
[Wonham 88] W.Wonham P.Ramadge. On the Supremal Controllable Sublanguages of a Given Language. SIAM J. Control Optim. 25-2
[Zhong 90] H. Zhong W. Murray. On the Consistency of Hierarchical Supervision in Discrete-Event Systems. IEEE Trans. on Aut. Control 35-10