

Laboratório de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares

Departamento de Engenharia Eletrônica

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG Brasil

Fone: +55 31 3409-3470



Projeto de Controladores Takagi-Sugeno baseados em Modelos de Referência

Víctor Costa da Silva Campos

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Antônio Borges Tôrres

Co-Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Martinez Palhares

Belo Horizonte, 23 de abril de 2012

Laboratório de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares

Departamento de Engenharia Eletrônica

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG Brasil

Fone: +55 31 3409-3470



Projeto de Controladores Takagi-Sugeno baseados em Modelos de Referência

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Minas Gerais como
requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

Víctor Costa da Silva Campos

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Antônio Borges Tôrres

Co-Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Martinez Palhares

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Belo Horizonte
23 de abril de 2012

\AM@currentdocname .png

.png

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade. Ao Léo por ter me apresentado ao controle de aeronaves e motivado meus estudos. Ao Reinaldo pelas discussões e por ter me apresentado às LMIs e ao controle fuzzy. Ao prof. Paulo Iscold pela oportunidade de trabalhar no projeto de assistência à pilotagem. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado de tal projeto.

Agradeço à minha família pelo apoio e carinho. À Ana pela motivação, carinho e inspiração nesses últimos meses. Aos amigos por estarem sempre lá. Aos amigos de laboratório e do mestrado, em especial ao Tales, Cristina, Grazi, Dimas, Tiago, Vitinho, Gonçalo e Rogério pela companhia e apoio durante esse período da minha vida.

*"A lesson without pain is meaningless. That's because no one can gain without sacrificing something. But by enduring that pain and overcoming it...
...he shall obtain a powerful, unmatched heart.
A fullmetal heart."*

Edward Elric, FullMetal Achemist Brotherhood

"Mozzie: May you live in interesting times.

Neal: You know that's the first of two curses.

Mozzie: What's the other one?

Neal: May you find what you're looking for."

White Collar, primeira temporada, episódio 12

Resumo

As técnicas de controle fuzzy **TS!** (**TS!**) permitem que a síntese de controladores não lineares seja realizada por meio de problemas de otimização sujeitos a Desigualdades Matriciais Lineares e exigem, para isso, um modelo fuzzy **TS!** do sistema a ser controlado.

Neste trabalho, uma função de Lyapunov fuzzy candidata e condições de síntese propostas em trabalhos recentes da literatura são usados para projetar controladores fuzzy **TS!** baseados em modelos de referência. Além disso, algumas modificações em relação a uma técnica numérica de obtenção de modelos fuzzy são sugeridas, de modo a torná-la mais geral.

As condições de síntese supramencionadas são aplicadas ao problema de sincronismo de dois osciladores caóticos acoplados unidirecionalmente por um canal de transmissão e ao problema de controle do movimento longitudinal de uma aeronave de asa fixa.

Em relação ao problema de sincronismo de dois osciladores caóticos, a contribuição deste trabalho está na proposição de uma estratégia de sincronismo em que se estuda formalmente o efeito da distorção introduzida pelo canal de transmissão com banda limitada.

Em relação ao problema de controle do movimento longitudinal de uma aeronave de asa fixa, a lei de controle utilizada pode ser pensada como um controlador de ganho escalonado, sintonizado de forma sistemática graças a representação **TS!** (**TS!**) do mesmo. Além disso, o uso de um modelo de referência permite especificar de forma simples o desempenho associado ao problema de Assistência à Pilotagem - um dos temas motivadores deste trabalho.

Abstract

TS! fuzzy control techniques allow the synthesis of nonlinear controllers based on Linear Matrix Inequalities, as long as a fuzzy **TS!** model of the system is available.

In this work, a fuzzy candidate Lyapunov function and recently proposed synthesis conditions serve as basis to design model reference based fuzzy **TS!** controllers. In addition, some modifications are proposed generalizing a numerical technique used to obtain the fuzzy models.

Such synthesis conditions are applied to the problem of synchronizing two chaotic oscillators coupled unidirectionally by a transmission channel, and to the problem of controlling the longitudinal dynamics of a fixed wing aircraft.

Regarding the chaotic oscillators synchronization problem, one of the contributions is the proposition of a synchronization strategy that formally incorporates the transmitted signal distortion introduced by a band-limited transmission channel.

On the problem of fixed wing aircraft longitudinal control, the final control law can be seen as a gain scheduled controller, whose scheduling strategy is automatically accomplished relying on the **TS!** representation of the controller. In addition, the use of a closed loop reference model simplify the performance requirements specification related to the design of piloting assistance systems - a motivating problem to the present work.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Notação

a	Escalar
\mathbf{a}	Vetor
A	Matriz
\mathcal{A}	Tensor
\mathbf{a}_i	Vetor coluna i da matriz A
a_{ij}	Elemento da linha i , coluna j da matriz A
$a_{i_1 i_2 \dots i_N}$	Elemento da posição (i_1, i_2, \dots, i_N) do tensor \mathcal{A}
$\mathcal{A}_{(n)}$	Matriz de modo n do tensor \mathcal{A}
$\langle \cdot, \cdot \rangle$	Operador de produto escalar
\times_n	Operador de produto modo- n entre um tensor e uma matriz
$\ \cdot \ $	Operador de norma
$\mathcal{S} \bigotimes_{n=1}^N U^{(n)}$	Notação curta para $\mathcal{S} \times_1 U^{(1)} \times_2 U^{(2)} \dots \times_N U^{(N)}$
$\mathbf{1}$	Vetor cujos componentes são todos iguais a um
A^T	Matriz transposta da matriz A
$*$	Elementos transpostos em uma matriz simétrica
$\text{diag}(\cdot)$	Matriz bloco diagonal
$\partial f / \partial \mathbf{x}$	Gradiente de f (vetor coluna), ou matriz Jacobiana de f (se f for multivariável)
$P \succ 0$	Indica que a matriz P é definida positiva
$P \succeq 0$	Indica que a matriz P é semi-definida positiva
$P \prec 0$	Indica que a matriz P é definida negativa
$P \preceq 0$	Indica que a matriz P é semi-definida negativa

Lista de Siglas

CNO	Próxima a Normalizada - <i>Close to Normalized</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
HOSVD	Decomposição de Valores Singulares de Alta Ordem - <i>Higher Order Singular Value Decomposition</i>
INO	Normalizada Inversa - <i>Inverted Normalized</i>
LMI	Desigualdade Matricial Linear - <i>Linear Matrix Inequality</i>
LPV	Linear com Parâmetros Variantes - <i>Linear Parameter Varying</i>
NN	Não Negativa - <i>Non Negative</i>
NO	Normalizada - <i>Normalized</i>
PDC	<i>Parallel Distributed Compensation</i>
PDVA	Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos
qLPV	quase-LPV - <i>quasi-Linear Parameter Varying</i>
RNO	Normalizada Relaxada - <i>Relaxed Normalized</i>
SN	Normalizada em Soma - <i>Sum Normalized</i>
TS	Takagi-Sugeno