

Juan Carlos Cutipa-Luque

**Identificação e Controle de um Veículo Submersível
Autônomo Sub-atuado**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

São Paulo
2012

Juan Carlos Cutipa-Luque

Identificação e Controle de um Veículo Submersível Autônomo Sub-atuado

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração:
Engenharia de Controle e Automação Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Décio Crisol Donha

São Paulo
2012

Dedico este trabalho com gratidão e amor
a meu pai Prof. Ing. Juan Cutipa Luque.

A minha família: Maricecy, Milena,
Julia, John, Reynold e Richard.

Agradecimentos

Aos professores de pós-graduação dos Departamentos de Eng. Mecânica, Naval, Mecatrônica e Elétrica, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelos seus ensinamentos nas disciplinas que cursei durante a minha formação. Agradeço ao Professor Prof. Dr. Décio Donha pela orientação na realização deste trabalho, pelas inúmeras discussões sobre técnicas de controle centralizado e sub-atuado, entre outras áreas. Agradeço ao Prof. Dr. Ettore de Barros do Laboratório de Veículos Não Tripulados (LVNT) do Departamento de Engenharia Mecatrônica, por disponibilizar o submersível Pirajuba para a realização de testes de controle, pelo encaminhamento e orientação dos métodos de identificação de sistemas. Ao Prof. Dr. Jaime da Cruz do Departamento de Engenharia Elétrica, quem sempre esteve disposto a me ouvir e apoiar esclarecendo-me sobre sistemas de controle multivariável. Ao Prof. Dr. Helio Morishita do Departamento de Engenharia Naval, pelas discussões e ensinamentos sobre sistemas não lineares e controle não-linear de sistema marítimos. Ao Dr. Flávio Soares, com quem inicialmente compartilhei sala de estudos no Laboratório de Dinâmica e Controle do Departamento de Engenharia Mecânica, pelo compartilhamento de sua experiência sobre construção de VSAs. Ao Dr. Juan Pablo Julca Avila com quem discuti métodos de identificação de sistemas e pelo fornecimento de dados experimentais de manobras do veículo submarino não tripulado semi-autônomo LAURS. Ao Eng. João Dantas, pelos esclarecimentos na modelagem hidrodinâmica do VSA, pelo fornecimento de coeficientes hidrodinâmicos relativos aos momentos de 'munk' do veículo Pirajuba. À equipe do LVNT (Luciano, João, Lucas, Rodrigo e William), pelo incansável esforço na construção e funcionamento do Pirajuba. A Lucas Machado pelo apoio na integração dos controladores \mathcal{H}_∞ no sistema embarcado do veículo submersível autônomo.

Agradeço à FAPESP (Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo), pela bolsa outorgada e que fez possível a apresentação do meu trabalho em congressos e conferências internacionais. À Profa. Cristina Borba pelas revisões dos artigos em língua inglesa.

Agradeço aos incentivadores da minha inclinação pela atividade acadêmica. Aos professores e orientadores que tive durante minha graduação na Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, por seus ensinamentos. Aos Professores Dr. Daniel Yanyachi e Dr. Raúl Yanyachi, pelo apoio e motivação constante em continuar com os estudos de pós-graduação. Ao Dr. Raul Yanyachi, Diretor da estação de observação espacial da NASA Characato-Arequipa, pelas vi-

sitas técnicas feitas que aumentaram meu interesse pela pesquisa. Ao Prof. Dr. Victor Hugo Rivera pelo convite e à *Universidad Católica de Santa Maria* Arequipa - Peru, pela oportunidade de dar aulas. Aos colegas do Instituto Tecnológico TECSUP de Arequipa, onde trabalhei por um período curto e onde também aprendi a excelência do ensino tecnológico.

Agradeço a todos os colegas das salas onde passei, pelo compartilhamento do conhecimento. Pela amizade, agradeço aos amigos que fiz neste longo período: Décio, Ivan, Crhistian, Joan, Pablo, Alexis, Eli, José, Saulo, Elizir, Simone, Edson e Darlene. Agradeço à minha família que sempre esteve do meu lado, me outorgando a confiança e o apoio. Finalmente, com gratidão infinita, a Deus, pela vida, pela motivação que recebi nos momentos de desânimo que tive no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho apresenta a descrição de um modelo matemático completo em seis graus de liberdade para um Veículo Submersível Autônomo (VSA) sub-atuado. Desenvolveram-se métodos de identificação de sistemas para identificar o modelo não linear do veículo. A fim de evitar problemas de divergência na estimação de parâmetros hidrodinâmicos do modelo, usou-se o método de transformação paramétrica. Usou-se o filtro estendido de Kalman como estratégia para o processo de estimação de parâmetros quando ruídos de natureza gaussiana estavam presentes no modelo e nas medidas. Com o objetivo de estimar um maior número de parâmetros de uma só vez, empregou-se o método de máxima verossimilhança. Os experimentos mostraram que o filtro de Kalman responde bem à estimação de parâmetros específicos, porém, divergiu facilmente à estimação de múltiplos parâmetros. Uma alternativa que apresentou melhor desempenho foi o método de máxima verossimilhança. Testaram-se manobras circulares e de zig-zags para a obtenção de dados do veículo. Para os ensaios experimentais, utilizou-se o VSA sub-atuado do Laboratório de Veículos Não Tripulados (LVNT) do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Validou-se o modelo identificado mediante o simulador do veículo.

Numa segunda etapa, desenvolveram-se controladores \mathcal{H}_∞ capazes de controlar a dinâmica do VSA em seus seis graus de liberdade. Projetaram-se controladores SISO (uma entrada e uma saída) e MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas) com o fim de avaliar o acoplamento dinâmico do sistema. Projetaram-se controladores centralizados robustos para garantir as condições de operação num ambiente marinho e em condições de laboratório próximas às de uma aplicação real. As leis de controle são baseadas na técnica de sensibilidade mista \mathcal{H}_∞ que garantem condições de robustez do sistema de controle, tanto no desempenho quanto na estabilidade. Uma estrutura de controle de dois graus de liberdade (2GL) produziu melhores propriedades de desempenho comparada com a estrutura do controlador de um grau de liberdade. Compararam-se as respostas dos controladores descentralizados SISO e os controladores centralizados. O controlador 2GL garantiu as especificações do projeto, inclusive aquelas definidas no domínio do tempo. Um controlador central pode controlar o veículo na realização de manobras complexas em três dimensões que emulem a inspeção ou monitoramento de sistemas *offshores* ou outras tarefas comuns na exploração submarinha. O trabalho apresenta também a integração dos algoritmos de controle com o sistema de tempo real embarcado, os sensores inerciais de navegação, os motores elétricos para os atuadores lemes e o propulsor, o banco de baterias e o processador central ARM7 de 32 bits de ponto fixo. Traduziram-se os algoritmos de controle de ordem elevada para a aritmética de ponto fixo produzindo a execução rápida e, no possível, evitando a ocorrência de transbordamento de dados.

Abstract

This work presents a full six degrees-of-freedom mathematical model description of a sub-actuated Autonomous Underwater Vehicle (AUV). The work developed methods of System Identification for identifying the nonlinear model of the vehicle. In order to avoid divergence problems in the process of hydrodynamic, it used the parametric transformation technique. It used the extended Kalman filter to estimate the model parameters subject to Gaussian noise, in the process and in the measurements. In order to tackle the problem of multiple parameter estimation at once, the work used the maximum likelihood approach. The experimental results showed that the Kalman filter approach is better when the aim is to estimate a specific parameter, however, it diverges easily when the aim is to estimate multiple parameters. The maximum likelihood technique showed better response to estimate multiple parameters of the model. Zig-zag and circular standard maneuvers were tested with the identification algorithms. For experimental tests, an AUV, namely Pirajuba and constructed by the Unmanned Vehicle Laboratory (LVNT), were used. Results were also assessed using an AUV six degrees of freedom simulator.

In a second stage, the work developed \mathcal{H}_∞ controllers to manoeuvre the vehicle in six-degrees-of-freedom. Decoupled SISO (single input and single output variables) and MIMO (multiple input and multiple output variables) controllers were synthesized in order to validate the coupling dynamics of the AUV. Moreover, centralized robust controllers were developed to control the vehicle in the sea and in test tanks with extreme conditions close to the ocean environmental. The control techniques were based in the \mathcal{H}_∞ mixed sensitivity approach which guarantees robust performance and stability of the sub-actuated system. A structure of two-degrees-of-freedom (2GL) controller presented better performance compared with the classic single \mathcal{H}_∞ controller of one degree of freedom structure. A comparison between responses was used to validate the decoupling and centralized controllers. The 2GL controller has good performance specifications despite these defined in the time domain. A central controller can control the AUV in complex maritime task that require complex and three-dimensional manoeuvres. The work deals also with the implementation issues coding these advanced control algorithms into the real time embedded system including inertial sensors, electric motors for the propeller and actuator surfaces, battery banks, and the unit central process ARM7 of 32 bits of fixed point. The control algorithms were translated from floating point to fixed point arithmetic avoiding data overflow, seeking simplicity and fast task execution.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

Lista de Símbolos

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.3	Contribuições da tese	6
2	Modelagem do Veículo	8
2.1	Introdução	8
2.2	Características do veículo	8
2.3	Sistema de Coordenadas	11
2.4	Cinemática do Veículo	11
2.5	Dinâmica de Corpo Rígido do Veículo	13
2.5.1	Equações de Translação e de Rotação	13
2.6	Coeficientes Hidrodinâmicos	14
2.6.1	Massa Adicionada	15
2.6.2	Resistência ao Avanço	18
2.6.3	Arrasto Cruzado	18

2.6.4	Propulsor	19
2.6.5	Esforços de Sustentação	21
2.7	Esforços Restauradores	23
2.8	Modelo Não Linear do Veículo	24
2.9	Modelo Dinâmico Vetorial	27
2.10	Modelos desacoplados	30
2.10.1	Dinâmica horizontal	30
2.10.2	Dinâmica vertical	32
2.11	Linearização	33
2.11.1	Modelos lineares desacoplados	34
3	Identificação do Sistema	36
3.1	Filtro de Kalman Estendido	37
3.2	Método de Máxima Verossimilhança	38
Otimização da função custo		39
3.3	Transformação de parâmetros	41
3.4	Resultados	41
4	Sistema de Controle	49
4.1	Introdução	49
4.2	Abordagem de Projeto	50
4.3	Representação do Sistema Dinâmico Linear	51
4.4	Controlabilidade e Observabilidade	52
4.5	Incertezas	53
4.5.1	Incertezas Estruturadas	54
4.5.2	Incertezas Sem-estrutura	54
4.6	Especificações e Limitações de Desempenho	55

4.6.1	Normalização	58
4.7	Estabilidade	58
4.7.1	Estabilidade Robusta	59
4.8	Desempenho	60
4.8.1	Desempenho Robusto	61
4.8.2	Formatação das Funções de Sensibilidade	63
4.8.3	Configuração de Dois Portos	64
4.9	Metodologia da Sensibilidade Mista	65
4.10	Controlador	66
4.10.1	Formulação do Problema de Controle	66
4.10.2	Algoritmo geral \mathcal{H}_∞	68
4.11	Controlador de dois graus de liberdade (2GL)	69
4.12	Desigualdades Matriciais Lineares	71
4.12.1	Estrutura do problema LMI	71
4.13	Implementação	72
4.14	Controle de Guinada	74
4.15	Controle Guinada Profundidade	85
4.16	Controlador Central	90
5	Conclusões	103
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	104
	Referências Bibliográficas	106
	Apêndice A – Hidrodinâmica do VSA	114
A.1	Coefficientes Hidrodinâmicos do Veículo	114
	Apêndice B – Script em Matlab	119
B.1	Identificação	119

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

