UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
ENGENHARIA MECATRÔNICA

HEBERT ALAN KUBIS

CONTROLE DE PROFUNDIDADE DE VEÍCULO SUBAQUÁTICO AUTÔNOMO (AUV)

Joinville
2025

HEBERT ALAN KUBIS

CONTROLE DE PROFUNDIDADE DE VEÍCULO SUBAQUÁTICO AUTÔNOMO (AUV)

Trabalho apresentado ao Centro Tecnológico de Joinville - CTJ da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a disciplina EMB5641 - Sistemas de Controle.

Prof. Alexandro Garro Brito

Joinville
2025

Resumo

Ainda tenho que escrever o trabalho para poder resumir

SUMÁRIO

1 Introdução **3**

2 Definição do sistema **4**
2.1 Considerações 4
2.2 Fontes de dados 4

3 Modelamento do sistema **4**
3.1 Variaveis do sistema 4
3.2 Equilibrio de forças 5
3.3 Parametros do sistema 6
3.4 Análise do sistema 7

4 Controlador **7**
4.1 Requisitos de desempenho 7
4.2 Análise do lugar das raízes 7
4.3 Projeto do controlador 7
4.4 Resposta em frequência 7

5 Implementação **7**
5.1 Discretização do controlador 7
5.2 Aplicação no sistema 7
5.3 Testes e resultados 7

6 Conclusão **7**

1. INTRODUÇÃO

No presente relatório será descrito o processo de modelamento do sistema de controle de profundidade de um AUV (Veículo Autônomo Submarino, do inglês Autonomous Underwater Vehicle). O processo de modelamento desse sistema se dá pela união entre duas necessidades, uma é a realização do trabalho avaliativo de Sistemas de controle e a outra é a necessidade de um controle de profundidade preciso para o veículo Yvy da equipe Terra Competition da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Joinville.

2. DEFINIÇÃO DO SISTEMA

O sistema a ser controlado é um AUV (Autonomous Underwater Vehicle) que utiliza 6 motores, 4 para controle no plano xOy e 2 para controle no eixo Z (vertical). Outra característica é que este veículo possui 2 cilindros em seu interior. Um deles está posicionado encostado na parte de cima ao longo do eixo X, sendo que neste fica toda a eletrônica responsável por controlar o veículo, e um cilindro menor na mesma orientação encostado na parte inferior do veículo, sendo que esse é o cilindro responsável por abrigar a bateria.

Dado essa descrição do veículo, pode-se definir o objetivo do sistema de controle: **estabilizar o veículo em uma dada profundidade.**

2.1. CONSIDERAÇÕES

Para o modelamento do sistema serão feitas as seguintes considerações:

- Será avaliado somente o movimento vertical do veículo, assumindo que o peso dele está homogeneamente distribuído ao longo dos outros eixos;
- Será assumido que os dois motores que controlam o movimento vertical estão equidistantes ao longo do eixo Y em relação à origem e estão sobre a origem em X. Desta forma, não será considerado o torque gerado pelos motores superiores sobre os eixos X e Y caso estes estejam desalinhados;
- O eixo Z positivo é direcionado para baixo no veículo;
- O veículo está completamente submerso.

2.2. FONTES DE DADOS

Para controlar o veículo são necessárias fontes de dados para saber como atuar na malha. Com isso, os sensores disponíveis para analisar o comportamento do veículo são:

- Sensor de profundidade, fonte precisa de dados de pressão;
- Pixhawk PX4, fonte de dados precisa de aceleração;
- Cruzamento dos dados desses dois sensores, por integração e derivação numérica, para obter a velocidade.

3. MODELAMENTO DO SISTEMA

3.1. VARIAVEIS DO SISTEMA

Para modelar o sistema de controle de profundidade do AUV alguns dados precisam ser considerados, sendo que muitos, e talvez todos, podem sofrer alterações. Para modelar um sistema que permita controlar o veículo mesmo com a alteração de suas características, será consideradas variáveis no lugar dos dados do veículo. O seguintes dados serão usados:

- M_t - Massa do veículo;
- V_t - Volume do veículo;
- h_p - Distância que o sensor de pressão está do topo do AUV;

3.2. EQUILIBRIO DE FORÇAS

Para modelar o sistema de controle de profundidade do AUV, primeiramente é necessário analisar as forças que atuam sobre o veículo. As forças que atuam sobre o veículo são:

- Força peso, F_p;
- Força de empuxo, F_e;
- Força gerada pelos motores, F_m;
- Força de arrasto, F_d.

Fazendo o somatorio das forças que atuam sobre o veículo e aplicando a segunda Lei de Newton tem-se:

$$\sum F = F_p - F_e + F_m - F_d = m \cdot a \tag{1}$$

Onde a é a aceleração do veículo ao longo do eixo Z, ou seja, $a = \frac{d^2z}{dt^2}$. Substituindo as forças na equação acima:

$$M_t \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = M_t \cdot g - \rho \cdot g \cdot V_t + F_m - B_d \cdot \frac{dz}{dt} \tag{2}$$

Assumindo que o AUV se encontra numa posição que é seu ponto de equilibrio z_0 mais uma perturbação Δz, ou seja, $z = z_0 + \Delta z$. Com isso, a equação 2 fica:

$$M_t \cdot \frac{d^2(z_0 + \Delta z)}{dt^2} = (M_t \cdot g - \rho \cdot g \cdot V_t) + F_{me} + \Delta F_m - B_d \cdot \frac{d(z_0 + \Delta z)}{dt} \tag{3}$$

Onde F_{me} é a força dos motores no ponto de equilibrio e ΔF_m é a variação dessa força. Sabendo que a derivada de uma constante é nula, ou seja, $\frac{dz_0}{dt} = 0$ e $\frac{d^2z_0}{dt^2} = 0$, tem-se:

$$M_t \cdot \frac{d^2\Delta z}{dt^2} = (M_t \cdot g - \rho \cdot g \cdot V_t) + F_{me} + \Delta F_m - B_d \cdot \frac{d\Delta z}{dt} \tag{4}$$

Da equação 2 sabe-se que no ponto de equilibrio a parcela $\frac{d^2z}{dt^2} = 0$ e $\frac{dz}{dt} = 0$, logo:

$$0 = M_t \cdot g - \rho \cdot g \cdot V_t + F_{me} \tag{5}$$

$$F_{me} = \rho \cdot g \cdot V_t - M_t \cdot g \tag{6}$$

Substituindo a equação 6 na equação 4 tem-se:

$$M_t \cdot \frac{d^2\Delta z}{dt^2} = \Delta F_m - B_d \cdot \frac{d\Delta z}{dt} \tag{7}$$

Isolando os termos:

$$M_t \cdot \frac{d^2\Delta z}{dt^2} + B_d \cdot \frac{d\Delta z}{dt} = \Delta F_m \tag{8}$$

Agora, assumindo condições iniciais nulas, ou seja, $\Delta z(0) = 0$ e $\frac{d\Delta z(0)}{dt} = 0$, aplicando a Transformada de Laplace na equação acima tem-se:

$$M_t \cdot s^2 \cdot \Delta Z(s) + B_d \cdot s \cdot \Delta Z(s) = \Delta F_m(s) \tag{9}$$

Reorganizando a equação para obter a função de transferência:

$$\frac{\Delta Z(s)}{\Delta F_m(s)} = \frac{1}{M_t \cdot s^2 + B_d \cdot s} \tag{10}$$

Como o sistema encontrado é de segunda ordem, divide-se o numerador e o denominador por M_t para obter a forma padrão da função de transferência:

$$\frac{\Delta Z(s)}{\Delta F_m(s)} = \frac{\frac{1}{M_t}}{s^2 + \frac{B_d}{M_t} \cdot s} \tag{11}$$

Com isto é possivel analisar que o sistema encontrado é de 2ª ordem do tipo 1, pois o maior grau do denominador é 2 e, reorganizando os termor, é possivel visualizar que possui um polo na origem, que torna o erro em estado estacionario nulo para uma entrada degrau.

Por conta da natureza do sistema a ser controlado percebe-se que que o controlador a ser implementado deve ser um P ou PD caso seja necessária uma resposta mais rápida.

3.3. PARAMETROS DO SISTEMA

Para fazer a análise do sistema é necessario definir os parametros que o compõem, e como este é um veiculo real os parametros dele são os seguintes:

- Massa do veículo, M_t = 19 kg;
- Volume do veículo, V_t = m^3;
- Coeficiente de arrasto, B_d = ;
- Densidade da água de piscina, $\rho = 1000$ kg/m^3;
- Aceleração da gravidade, $g = 9.81$ m/s^2.

A massa do veiculo foi medida com uma balança no Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE) da Universidade Federal de Santa Catarina. Ja o volume foi obtido a partir do modelo CAD do veiculo, que foi feito no SolidWorks.

Para obter o coeficiente de arrasto foi assumido que o AUV é um cubo de lado 0.4 m ja que suas dimensões são de 0.38 x 0.4 x 0.38 m. Assim, calculando o número de Reynolds para $\rho = 1000$ kg/m^3, $\mu = 0.001$ Pa.s, $v = 0.1$ m/s e $L = 0.4$ m tem-se:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0.1 \cdot 0.4}{0.001} = 40000 \tag{12}$$

Com este valor que é Re $> 10^4$ o coeficiente de arrasto para um cubo é $C_d = 1.05$

3.4. ANÁLISE DO SISTEMA

4. CONTROLADOR

4.1. REQUISITOS DE DESEMPENHO

4.2. ANÁLISE DO LUGAR DAS RAÍZES

4.3. PROJETO DO CONTROLADOR

4.4. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

5. IMPLEMENTAÇÃO

5.1. DISCRETIZAÇÃO DO CONTROLADOR

5.2. APLICAÇÃO NO SISTEMA

5.3. TESTES E RESULTADOS

6. CONCLUSÃO