
CONTROLE REATIVO PARA O ROBÔ SUBMARINO TAIPAN

Pedro K. Paim*

pedropaim@terra.com.br

Bruno Jouvencel†

Bruno.Jouvencel@lirmm.fr

Geovany A. Borges*

gaborges@ene.unb.br

*Laboratório de Controle e Visão por Computador (LCVC)

Grupo de Instrumentação, Controle e Automação (GICA)

Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) - Universidade de Brasília (UnB)

Caixa Postal 04591 - Asa Norte - Brasília - CEP 70910-900 - Brazil

†Département Robotique - LIRMM

UMR CNRS/Université Montpellier II, n°. C55060

161, rue ADA. 34392 - Montpellier - Cedex 5 - France

RESUMO

Este trabalho fornece uma visão da situação atual da robótica submarina, um ramo em rápido desenvolvimento. São descritos os principais tipos de veículo, bem como alguns desafios tecnológicos. Em seguida, o trabalho trata de algoritmos de controle baseado em sensor para um veículo submarino autônomo (AUV). É fornecida uma descrição do modelamento matemático do veículo. O método de controle utilizado aqui é denominado Método das Zonas Virtuais Deformáveis, e foi inicialmente desenvolvido para evitação de obstáculos em robótica móvel. Este método já foi estendido para outras aplicações. Aqui se apresenta o método das zonas virtuais deformáveis em uma aplicação onde um veículo autônomo deve seguir uma tubulação submarina para inspeção. Resultados de simulação são fornecidos, mostrando a robustez do algoritmo quando o cano muda de direção de forma brusca. O método descrito está em vias de implementação usando o veículo TAIPAN II, um pequeno AUV de tipo torpedo desenvolvido no LIRMM, equipado com um sonar de perfilamento.

PALAVRAS-CHAVE: robótica submarina, controle baseado em sensor, controle reativo, controle e guiagem de AUVs

ABSTRACT

This paper presents an overview of the present state of underwater robotics, a rapidly developing field of research. We

describe the most important classes of unmanned underwater vehicles (UUVs), as well as a few technological challenges. Subsequently, we describe sensor-based control algorithms for an autonomous underwater vehicle (AUV). We present the vehicle's dynamic simulation model. The control method used here is the so-called Deformable Virtual Zones method, which was conceived for obstacle avoidance applications with mobile robots, but whose applications have been well extended to other fields. We present this deformable virtual zones methods applied to the problem of an AUV which must follow an underwater pipeline for inspection. Simulation results are presented, showing the algorithm's robustness as the pipeline abruptly changes direction. The proposed method is currently being implemented using the TAIPAN II, a small sized torpedo-like AUV developed at the LIRMM, fitted with a profiling sonar system. Experimental results will soon be available.

KEYWORDS: underwater robotics, sensor-based control, reactive control, AUV guidance and control

1 INTRODUÇÃO

Impulsionada pela crescente demanda por operações submarinas nos campos de telecomunicações e extração de óleo, a robótica submarina tem se desenvolvido rapidamente. Robôs submarinos, ou UUVs (Unmanned Underwater Vehicles) têm há muito estado presentes em operações comerciais, militares e em pesquisa oceanográfica. Esses veículos

realizam missões como inspeção de equipamentos, recuperação de objetos, manutenção e detecção de minas a profundidades muito elevadas ou excessivamente arriscadas para veículos tripulados.

Neste contexto, veículos autônomos submarinos, ou AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) têm se mostrado como uma nova tendência em um meio tradicionalmente dominado pelos chamados ROVs (Remotely Operated Vehicles), que são comandados à distância através de um cabo umbilical. Avanços tecnológicos recentes indicam ainda que operações como inspeção de equipamentos, canalizações e cabos submarinos serão em breve realizadas rotineiramente por AUVs. Este fato motiva o desenvolvimento de algoritmos de guiagem e controle para a execução deste tipo de missão. Os obstáculos técnicos a serem vencidos em robótica submarina diferem muito daqueles presentes em ambientes aéreos. A rápida atenuação de ondas eletromagnéticas dentro da água impede a comunicação por rádio, a navegação com auxílio de GPS e a obtenção de imagens de vídeo além de uma pequena distância. Contornar estas limitações representa um desafio para a evolução e para o emprego prático de robôs submarinos.

Este artigo discutirá de forma breve na Seção 2 a pesquisa realizada atualmente em robótica submarina, citando algumas das questões tecnológicas a serem tratadas. Em seguida, a Seção 3 fornecerá uma descrição do TAIPAN, um AUV empregado atualmente em pesquisa no LIRMM, em Montpellier (França). Na Seção 4 serão apresentados modelos cinemáticos e dinâmicos deste veículo, fundamentais para o desenvolvimento de leis de controle e simulação. A elaboração destes modelos foi tema de trabalhos anteriores (Aguiar, 1996)(Presterio, 2001). A Seção 5 introduzirá as Zonas Virtuais Deformáveis (ZVD), um método de controle baseado em sensor desenvolvido originalmente para evitação de obstáculos por robôs móveis (Zapata, 1991). Em seguida, uma das contribuições deste trabalho será apresentada na Seção 6. Ela consiste na derivação de um método de controle reativo baseado em ZVD para inspeção de tubulações submarinas com veículos submarinos autônomos.

2 ROBÓTICA SUBMARINA

2.1 O veículo teleoperado (ROV)

A maioria dos UUVs atuais são veículos operados remotamente, os denominados ROVs. Estes empregam um cabo umbilical para transmissão de potência e dados entre a 'nave-mãe' e o veículo. ROVs já são largamente utilizados em missões de instalação, manipulação e inspeção de equipamentos submarinos. Estas atividades requerem veículos grandes e robustos, de alta potência, equipados com câmeras de alta resolução, braços robóticos e diferentes ferramentas para realização de uma variedade de operações especializadas.

A evolução dos ROVs para operação em águas cada vez mais



Figura 1: Veículo teleoperado Hytec H300 - www.hytec.fr

profundas é vinculada ao tratamento de diversas questões tecnológicas. A limitação em profundidade de operação dos ROVs está ligada à transmissão de dados e potência pelo cabo umbilical. Cabos muito longos implicam grandes perdas de energia na transmissão. Estas perdas podem ser reduzidas através da utilização de cabos de maior diâmetro. No entanto, cabos muito espessos resultam em grande arrasto hidrodinâmico, interferindo na dinâmica do veículo. A distância de operação e diâmetro do cabo representam um compromisso de projeto. Esta limitação tem levado à construção de ROVs que operam a níveis mais baixos de energia.

Diversos tipos de acionamento já foram empregados, incluindo sistemas eletro-hidráulicos, onde um motor elétrico central aciona uma bomba para acionamento hidráulico de todos os atuadores. A tendência, no entanto, é que sistemas puramente elétricos predominem devido à sua maior eficiência energética (Whitcomb, 2000).

A Figura 1 mostra o ROV H300, um modelo comercial produzido pela Hytec. Este é um veículo leve utilizado para inspeções a profundidades de até 300m. Ele pode ser equipado com diversos acessórios, como braços manipuladores ou sonares de navegação para a realização de tarefas específicas.

2.2 O veículo autônomo (AUV)

Veículos autônomos submarinos, ou AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), apesar de terem aplicação comercial limitada atualmente, são objeto de intensa pesquisa em laboratórios ao redor do mundo. Em breve estes veículos realizarão rotineiramente missões de inspeção de equipamentos, tubulações e cabos, mapeamento de regiões submarinas, atendendo às demandas da indústria petrolífera e de telecomunicações.

Por não estarem fisicamente ligados à nave-mãe, a operação eficiente dos AUVs encontra ainda problemas adicionais referentes a armazenamento de energia e transmissão de dados. Devido à rápida atenuação de ondas eletromagnéticas na água, a comunicação acústica se torna a única alternativa viável. No entanto, ela ainda impõe sérias limitações. Esta

forma de comunicação é principalmente limitada pela velocidade de propagação do som na água, por volta de 1500m/s, e pelo aumento da atenuação com a frequência do som. Assim, a comunicação acústica sempre sofre um atraso, devido à velocidade de propagação, e sua banda decresce em função do alcance.

Mais um grande desafio para o projeto de AUVs está em sua navegação e controle. Estes requerem informações confiáveis sobre a localização e atitude do veículo, o que é obtido através de complexos sistemas de fusão sensorial. O controle de alto-nível, permitindo a programação de combinações de tarefas como navegação, seguimento de fundo ou retorno à base, ainda constitui objeto de intensa pesquisa.

Devido à dificuldade de se encontrar parâmetros precisos para os modelos dinâmicos de veículos submarinos, é muito comum a prática de métodos de controle robusto, em particular o controle deslizante. Aplicações de controle deslizante de primeira ordem em AUVs são descritas em (Healey and Lienard, 1993) (Cristi et al., 1990) (Rodrigues et al., 1996). (Pan-Mook et al., 1999) apresenta a utilização de controle quase-deslizante no plano vertical como solução para realização de controle baseado em sensor para seguimento de fundo, utilizando sonares que fornecem leituras em intervalos de tempo longos e irregulares.

Além do controle deslizante, diversos métodos vêm sendo investigados para o controle de AUVs, como o PID (Jalving, 1994), o controle Fuzzy (Debitetto, 1995), controle Fuzzy-deslizante (LePage and Holappa, 2000) e controle por redes neurais (Kawano and Ura, 2002).

A arquitetura de sensores em AUVs e o problema de controle baseado em sensor para seguimento de fundo são abordados em (Santos, 1995) e (Creuze, 2002). (Martins-Encarnação, 2002) trata da geração de trajetórias e a coordenação de um veículo autônomo submarino e um veículo autônomo de superfície.

2.3 O AUV de intervenção

Grupos de pesquisa ao redor do mundo vêm desenvolvendo um novo tipo de veículo submarino que alia as capacidades dos veículos autônomos com aqueles teleoperados, é o chamado AUV de intervenção. Este é um veículo autônomo equipado com manipuladores, podendo assim assumir funções geralmente atribuídas aos ROVs.

É um conceito atraente por apresentar as vantagens tanto dos veículos autônomos quanto dos teleoperados. No entanto, possuem também problemas operacionais que apresentam desafios adicionais no projeto de seu sistema de controle. (Weiss et al., 2003) descreve um exemplo deste tipo de veículo, o FreeSub, construído em cooperação entre diversas instituições de pesquisa da União Européia. O veículo é mostrado na Figura 2.



Figura 2: Um AUV de intervenção - www.freesub.soton.ac.uk

3 O AUV TAIPAN

3.1 Descrição dos protótipos

O LIRMM conta hoje com dois protótipos de veículos autônomos submarinos, denominados TAIPAN I e II. Ambos são AUVs de baixo custo, de forma cilíndrica. Diferenciam-se entre si pelas dimensões e pelo hardware embarcado. A Tabela 1 mostra as dimensões e peso dos dois protótipos.

A propulsão de ambos os veículos é feita por um motor elétrico, e eles são manobrados através de conjuntos de aletas verticais e horizontais na popa e horizontais na proa. As aletas horizontais na proa são uma especificidade do TAIPAN, que o permitem operar a velocidades tão baixas quanto 2 nós e que o capacitam a controlar sua profundidade sem modificar seu ângulo de arfagem através da coordenação dos conjuntos anterior e posterior de aletas. Isto o habilita a operação em águas tão rasas quanto 15 m.

Ambos utilizam baterias NiMH 48V/16Ah. Seus sistemas de navegação inercial contam com inclinômetros, magnetômetros e girômetros, sensores de pressão e receptores GPS para localização em superfície. O hardware embarcado do protótipo TAIPAN I é baseado em um transputer INMOS T805 com componentes adicionais dedicados a conversão A/D, comunicação serial RS232, geração de sinal PWM e I/O digital. Uma descrição detalhada do veículo é fornecida em (Vaganay et al., 1998). Sua foto é mostrada na Figura 3(a). Na Figura 3(b) é mostrado o TAIPAN II, versão mais recente construída em cooperação com uma empresa de tecnologia submarina, tem seu sistema baseado em um computador PENTIUM III. O veículo é equipado com um sistema Loch Doppler. Ele conta ainda com um enlace WiFi e

Tabela 1: Dimensões dos UAVs Taipan I e II

-	Comprimento	Diâmetro	Peso
TAIPAN I	1,66 m	0,15 m	25kg
TAIPAN II	1,80 m	0,20 m	60kg

um modem acústico para comunicação. O TAIPAN II utiliza ainda três sensores acústicos para detectar obstáculos.

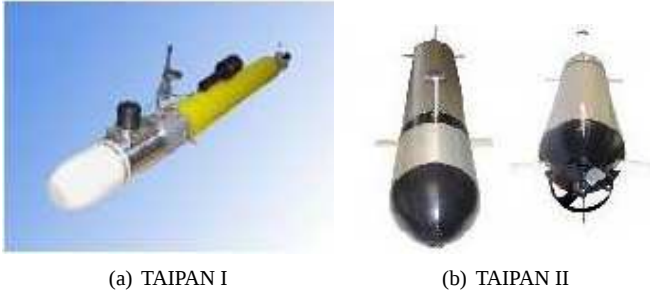


Figura 3: Protótipos do AUV TAIPAN

3.2 Atividades de pesquisa em Robótica Submarina

Atualmente o grupo de robótica submarina no LIRMM concentra seus esforços na área de controle robusto, controle de alto nível e coordenação de frotas de AUVs. A aplicação de controladores em modo deslizante de ordem superior, empregando técnicas como o *twisting* e *super twisting*, foi descrita em (Salgado-Jimenez, 2004)(Salgado-Jimenez et al., 2004).

A integração das linhas de pesquisa em controle embarcado e navegação, que é foco deste artigo, se dará quando uma tarefa complexa for realizada de forma eficiente por uma frota de AUVs. Uma aplicação vislumbrada é a inspeção de tubulações submarinas por um par de veículos que se auxiliam e trocam informações. A frota de AUVs seria lançada a partir de um barco, que faria o papel de nave-mãe. Um primeiro AUV faria o papel de líder, realizando a inspeção do cano submarino, seguindo-o a curta distância e coletando dados. Estes dados seriam retransmitidos ao segundo AUV, o seguidor, que estaria a uma profundidade menor. A períodos definidos, o AUV seguidor retornaria à superfície para retransmitir os dados à nave-mãe, ao mesmo tempo em que receberia o sinal de GPS, atualizando sua estimativa de posição.

A utilização de uma frota de AUVs ao invés de um só traria benefícios em eficiência e economia energética. A presença do AUV seguidor mais próximo da superfície eliminaria a necessidade que o veículo principal emergisse frequentemente para retransmitir informações e receber o sinal de GPS. Espera-se assim que a eliminação desta necessidade represente considerável economia de energia.

Outro fato é que a inspeção de tubulações submarinas requer grande gasto de energia para operação do sonar. Em uma situação onde mais de um veículo fosse utilizado, eles poderiam alternar entre si o papel de líder e seguidor, de forma a melhor aproveitar a energia. Isto poderia aumentar a autonomia da frota.

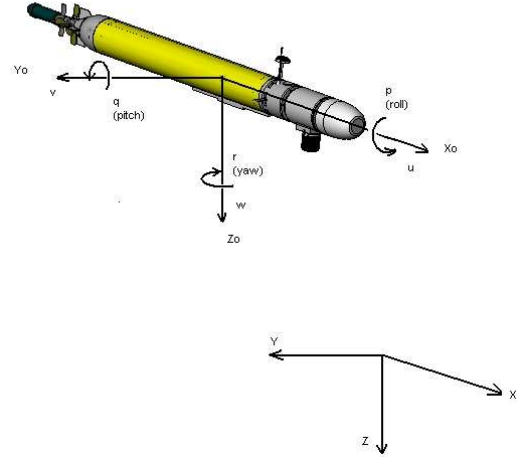


Figura 4: Sistemas de coordenadas do TAIPAN

4 O MODELAMENTO DO AUV TAIPAN

De acordo com a prática comum em Robótica Submarina, as equações do modelo dinâmico a seis graus de liberdade do veículo TAIPAN são representadas com o auxílio de um sistema de coordenadas global e um local (Fossen, 1994) (c.f., Figura 4). Este padrão é proposto pela SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers).

O sistema de coordenadas local é em geral localizado no centro de massa do veículo, e é definido de tal forma que seus eixos coincidam com seus eixos principais de inércia. Desta forma, tira-se vantagem da simetria do veículo conduzindo a um modelo mais simples. Este sistema tem componentes de movimento dadas pelo vetor de velocidades lineares $v_1 = [u, v, w]^T$ e angulares $v_2 = [p, q, r]^T$. O vetor geral de velocidades é então dado por:

$$v = [v_1^T, v_2^T]^T = [u, v, w, p, q, r]^T. \quad (1)$$

O vetor de posição $\eta_1 = [x, y, z]^T$ e orientação $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ é expresso em relação ao sistema absoluto. Em sua forma geral

$$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T, \quad (2)$$

na qual ϕ representa o ângulo de rolagem, θ o ângulo de arfagem e ψ a guinada.

4.1 Modelamento Cinemático

A relação entre as velocidades no sistema de coordenadas local e absoluto é dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0 \\ 0 & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

em que $J_1(\eta_2)$ é a matriz jacobiana de rotação que fornece as componentes de velocidade linear v_1 no sistema absoluto,

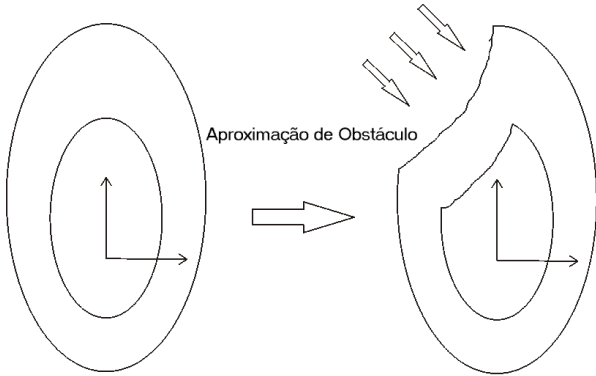


Figura 5: Deformação da ZVD

e $J_2(\eta_2)$ é a matriz jacobiana que relaciona a velocidade angular v_2 com a atitude do veículo no sistema absoluto.

4.2 Modelamento Dinâmico

A dinâmica de veículos submarinos é obtida baseado em princípios do movimento de corpos rígidos. Seu movimento é governado por componentes de inércia, por acelerações de coriolis, forças centrífugas e forças hidrodinâmicas, que são provocadas por transferências de energia entre o fluido e o veículo devido ao deslocamento relativo entre eles. Para levar em conta a inércia do fluido ao redor do veículo, ou seja, a transferência de energia cinética entre o veículo e o fluido, emprega-se o conceito de massa adicionada.

As equações não-lineares de movimento referentes aos seis graus de liberdade do veículo podem ser expressas de forma compacta através da equação matricial (Fossen, 1994):

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (4)$$

em que $M = M_{RB} + M_A$ é a matriz de inércia com massa adicionada, $C = C_{RB} + C_A$ é a matriz de Coriolis e termos centrífugos, com massa adicionada, D é a matriz de amortecimento, g é o vetor de forças e momentos gravitacionais e τ é o vetor de forças e torques dos atuadores, para os quais utilizam-se modelos lineares.

5 ZONAS VIRTUAIS DEFORMÁVEIS

5.1 Descrição geral

O método das Zonas Virtuais Deformáveis (ZVD) é uma técnica de controle reativo desenvolvido no LIRMM originalmente para a evitação de obstáculos em robótica móvel (Zapata, 1991), mas cuja aplicação já foi estudada em robótica aérea (Zapata and Lépinay, 1998). Outras aplicações de controle reativo são descritas em (Creuze, 2002), (Zapata et al., 1994) e (Lépinay et al., 1993).

O método consiste no modelamento de uma zona protetora imaginária ao redor do robô, cujos parâmetros dependem do

estado deste. A aproximação de objetos é detectada por sensores de proximidade. Quando algum objeto penetra nesta zona, causa uma deformação. E o sinal de controle é calculado de forma que o robô reaja no sentido que minimizará esta deformação.

Para aplicação em evitação de obstáculos, modela-se a ZVD em geral como uma elipse no caso bidimensional ou um elipsóide para o caso tridimensional. Os parâmetros desta elipse dependem do estado do robô. Esta pode portanto ser maior quando o robô estiver se movendo em alta velocidade, o que representaria uma maior cautela para detecção de obstáculos.

A Figura 5 ilustra uma situação em que um robô que, ao se mover pelo ambiente, se aproxima de um obstáculo. Este obstáculo causa então uma deformação na ZVD. Esta deformação pode ser minimizada pelo robô por uma combinação de duas ações: uma redução de velocidade e uma mudança de direção. Figura 6 mostra uma tentativa de minimizar a deformação da ZVD através da mudança na direção do robô.

A descrição matemática da ZVD, como desenvolvida em (Zapata, 1991), é uma soma de dois termos, caracterizando a interação entre o robô e seu ambiente:

$$\Xi = \Xi_h + \Delta. \quad (5)$$

em que Ξ_h representa uma zona protetora não-deformada e Δ representa uma deformação nesta zona devido à intrusão de informação. A deformação é detectada por sensores de proximidade.

A geometria desta zona é função de um vetor π , que caracteriza os graus de liberdade controláveis do robô:

$$\Xi_h = \rho_{\Xi}(\pi). \quad (6)$$

A deformação depende da intrusão de informação de proximidade e da configuração não-deformada da zona protetora:

$$\Delta = \alpha(\Xi_h, I). \quad (7)$$

A derivada desta deformação é dada por:

$$\dot{\Delta} = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \Xi_h}(\Xi_h, I) \times \rho_{\Xi}^T(\pi) \right) \dot{\pi} + \frac{\partial \alpha}{\partial I}(\Xi_h, I) \dot{I}. \quad (8)$$

Observa-se que a variação de deformação na zona virtual é determinada por dois componentes. O primeiro é consequência do vetor $\dot{\pi}$, que representa a taxa de evolução das variáveis controláveis do robô. O segundo, $\dot{I}$, é provocado pelo próprio ambiente. O objetivo do método das Zonas Virtuais Deformáveis é calcular o vetor de controle $\dot{\pi}$ de forma a minimizar a deformação.

A evolução completa da deformação também pode ser expressa por:

$$\dot{\Delta} = A(\pi, I) \dot{\pi} + B(\pi, I) \dot{I}. \quad (9)$$

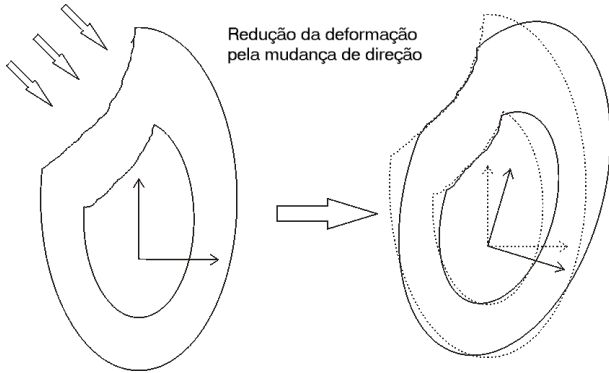


Figura 6: Redução da deformação por mudança de direção

O primeiro passo para o cálculo da lei de controle é determinar uma evolução desejada para a deformação. Uma solução apropriada é uma soma ponderada da deformação e sua derivada no tempo:

$$\nabla = -M\Delta - N\dot{\Delta}. \quad (10)$$

Lembrando que $A(\pi, I)$ é a função que relaciona a variação do movimento do robô com a variação da deformação na ZVD, o sinal de controle que minimiza esta deformação é calculado por:

$$\phi_{best} = A^+ \cdot \nabla; \quad (11)$$

onde $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$ é a pseudo-inversa de Moore-Penrose de $A(\pi, I)$.

5.2 Simulação

A simulação mostrada na Figura 7 emprega os princípios apresentados. Ela representa um único AUV que se move através de um meio desconhecido numa tentativa de atingir um ponto destino, passando por um ponto intermediário. O ponto inicial, ponto intermediário e destino, a velocidade do robô e o número de sensores de proximidade são determinados pelo usuário, assim como número de obstáculos, representados por círculos. Esta figura ilustra o desempenho satisfatório da ZVD obtido a baixo custo computacional.

6 APLICAÇÃO DA ZVD NA INSPEÇÃO DE TUBULAÇÕES SUBMARINAS

6.1 Derivação da ZVD

A extensão da ZVD para a inspeção de canos submarinos começa pela concepção de uma nova configuração tal que o esforço contínuo para se minimizar sua deformação faça com que o robô siga o cano. Assim, a configuração escolhida tem uma cavidade cilíndrica abaixo do AUV. Caso o robô saia da trajetória, o cano se torna desalinhado com a cavidade, deformando a zona virtual.

Considera-se que o robô esteja equipado com um sonar de

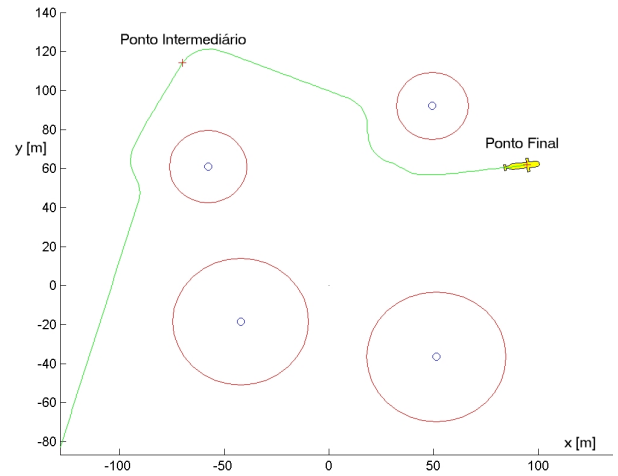


Figura 7: Simulação de evitação de obstáculos com AUV

perfilamento, acoplado à sua cabeça, tal que forneça leituras do perfil do cano e da superfície do fundo do mar. Como o sonar de perfilamento só fornece informação de proximidade sobre um plano perpendicular ao seu eixo, a lei de controle deve ser calculada a partir da projeção da ZVD sobre este plano.

A Figura 8 mostra a configuração tridimensional da ZVD para seguimento de cano submarino e sua projeção sobre o plano do sonar. $\{R\}$ representa um sistema de coordenadas fixo ao robô, e $\{ZVD\}$ um sistema fixo à ZVD, que é representada pelas linhas tracejadas. É necessário encontrar uma expressão analítica para a ZVD e derivá-la com respeito aos estados controláveis do AUV. O resultado desta derivação deve refletir a mudança do raio da ZVD na direção de cada sensor individual como consequência do deslocamento do sistemas de coordenadas fixo ao robô e daquele fixo à ZVD.

6.2 Discretização da ZVD e lei de controle

Considera-se que o sonar forneça n leituras de proximidade ao longo de ângulos igualmente espaçados $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$. A matriz jacobiana que relaciona a variação da deformação na ZVD com as variações em cada estado controlável do robô é dada por:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y(\alpha_1)}{\partial u} & \frac{\partial Y(\alpha_2)}{\partial u} & \dots & \frac{\partial Y(\alpha_{n-1})}{\partial u} & \frac{\partial Y(\alpha_n)}{\partial u} \\ \frac{\partial Y(\alpha_1)}{\partial v} & \frac{\partial Y(\alpha_2)}{\partial v} & \dots & \frac{\partial Y(\alpha_{n-1})}{\partial v} & \frac{\partial Y(\alpha_n)}{\partial v} \\ \frac{\partial Y(\alpha_1)}{\partial \psi} & \frac{\partial Y(\alpha_2)}{\partial \psi} & \dots & \frac{\partial Y(\alpha_{n-1})}{\partial \psi} & \frac{\partial Y(\alpha_n)}{\partial \psi} \\ \frac{\partial Y(\alpha_1)}{\partial \theta} & \frac{\partial Y(\alpha_2)}{\partial \theta} & \dots & \frac{\partial Y(\alpha_{n-1})}{\partial \theta} & \frac{\partial Y(\alpha_n)}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Y(\alpha_1)}{\partial \phi} & \frac{\partial Y(\alpha_2)}{\partial \phi} & \dots & \frac{\partial Y(\alpha_{n-1})}{\partial \phi} & \frac{\partial Y(\alpha_n)}{\partial \phi} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

em que $Y(\alpha)$ é a deformação da ZVD na direção α , definida como a diferença entre a ZVD não-deformada e a leitura do sonar nesta direção.

Para a presente aplicação, no entanto, deseja-se que o robô mantenha velocidade constante, rolagem e arfagem nulos.

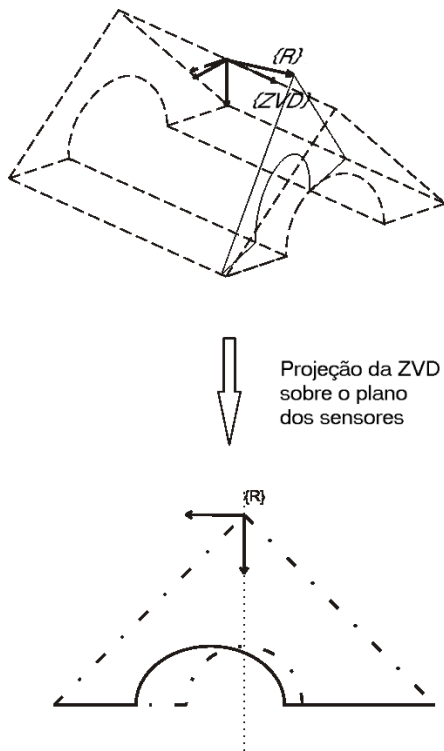


Figura 8: Projeção da ZVD sobre o plano do Sonar

Desta forma, eliminam-se os respectivos termos da matriz jacobiana, que se torna:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y(\alpha_1)}{\partial \psi} & \frac{\partial Y(\alpha_2)}{\partial \psi} & \dots & \frac{\partial Y(\alpha_{n-1})}{\partial \psi} & \frac{\partial Y(\alpha_n)}{\partial \psi} \\ \frac{\partial w}{\partial \psi} & \frac{\partial w}{\partial \psi} & \dots & \frac{\partial w}{\partial \psi} & \frac{\partial w}{\partial \psi} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

A lei de controle é calculada pelo produto da pseudo-inversa de Moore-Penrose da matriz jacobiana e a evolução desejada da ZVD:

$$\nabla = -M\Delta - N\dot{\Delta}, \quad (14)$$

$$\phi_{best} = J^+ \cdot \nabla. \quad (15)$$

A Figura 9 mostra uma simulação em andamento, onde são representados os sensores, o veículo e a tubulação submarina. A Figura 10 apresenta resultados da simulação realizada com um período de amostragem de 2 segundos, mostrando o sinal de controle em guinada, o erro linear de seguimento entre AUV e a tubulação, e o erro angular entre os dois. O robô se mostrou capaz de seguir a tubulação mesmo com mudanças bruscas de direção. Quando a tubulação sofreu uma mudança de direção de 45 graus, o erro de seguimento não excedeu quatro metros. Desempenho adequado foi obtido com períodos de amostragem de até 8 segundos, a partir de onde o sistema se tornou excessivamente instável. As taxas de amostragem utilizadas na simulação são compatíveis com aquelas fornecidas por sonares de perfilamento comerciais.

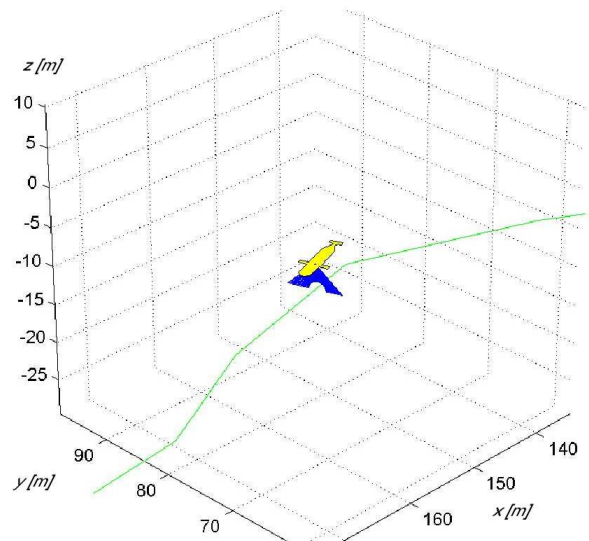


Figura 9: Simulação Gráfica de seguimento de cano submarino

7 CONCLUSÃO

Enquanto os submarinos teleoperados (ROVs) já são largamente utilizados em aplicações comerciais, a aplicação de veículos autônomos submarinos (AUVs) depende ainda da resolução de algumas questões tecnológicas. Estes veículos são hoje objeto de intensa pesquisa, e estarão cada vez mais presentes em aplicações comerciais, científicas e militares.

Este artigo descreveu alguns aspectos de projeto de AUVs e ROVs, e alguns obstáculos técnicos, que diferem muito daqueles encontrados em ambientes aéreos. Apresentou ainda os dois protótipos de AUV do LIRMM e uma visão geral das linhas de pesquisa no assunto. Em seguida, foi descrito o modelamento matemático de veículos autônomos submarinos e a aplicação de um método de controle por ações reflexas em evitação de obstáculos e no seguimento de uma tubulação submarina. O método descrito está em fase de implementação através da instalação de um sonar de perfilamento no AUV TAIPAN II. Primeiros resultados experimentais estarão disponíveis em breve. Está sendo estudada ainda a integração das zonas deformáveis com o controle em modo deslizante para seguimento de tubulações, buscando melhorar o desempenho do método apresentado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Lionel Lapierre por sua cooperação neste trabalho. O autor Pedro K. Paim realizou este estudo durante o período de seis meses que passou no LIRMM fazendo estágio pelo curso de graduação em Engenharia Mecatrônica da UnB. A Etienne Dombre, diretor do *Département Robotique*, e Bruno Jouvencel ficam os agradecimentos pela boa acolhida do estagiário.

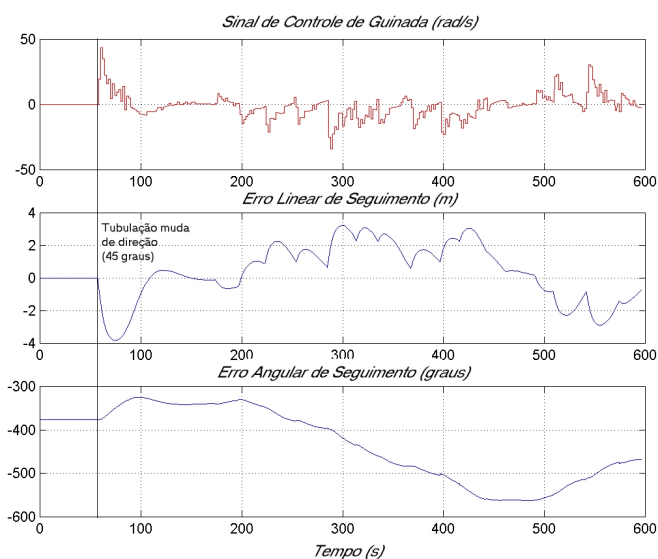


Figura 10: Resultados de Simulação

REFERÊNCIAS

- Aguiar, A. (1996). *Modelização, controlo e condução de um veículo submarino autónomo para transporte de laboratórios bênticos*, Master's thesis, Universidade Técnica de Lisboa.
- Creuze, V. (2002). *Navigation référencée terrain pour véhicule autonome sous-marin*, PhD thesis, Université de Montpellier II.
- Cristi, R., Papoulias-Fotis, A. and Healey, J. (1990). Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 3(15).
- Debitetto, A. (1995). Fuzzy logic for depth control of unmanned undersea vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 3(20).
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd.
- Healey, J. and Lienard, D. (1993). Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 3(18).
- Jalving, B. (1994). The NDREA-AUV flight control system, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 19(4).
- Kawano, H. and Ura, T. (2002). Fast reinforcement learning algorithm for planning of non-holonomic autonomous underwater vehicle in disturbance, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- LePage, Y. G. and Holappa, K. W. (2000). Simulation and control of an autonomous underwater vehicle equipped with a vectored thruster, *MTS/IEEE OCEANS*.
- Lépinay, P., Zapata, R. and Jouvencel, B. (1993). Sensor-based control of reactive behaviours of walking machines, *International Conference IECON'93*, Maui, Hawaii, EUA.
- Martins-Encarnação, P. (2002). *Nonlinear path following control system for ocean vehicles*, PhD thesis, Universidade Técnica de Lisboa.
- Pan-Mook, L., Seok-Won, H. and Yong-Kon, L. (1999). Discrete-time quasi-sliding mode control of an autonomous underwater vehicle, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 3(24).
- Prestero, T. (2001). *Verification of a six-degree-of-freedom simulation model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle*, Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Rodrigues, L., Tavares, P. and Prado, M. (1996). Sliding mode control of an AUV in the diving and steering planes, *MTS/IEEE OCEANS*.
- Salgado-Jimenez, T. (2004). *Contribution à la commande d'un robot sous-marin de type torpille*, PhD thesis, Université de Montpellier II.
- Salgado-Jimenez, T., Spiewak, J.-M., Fraisse, P. and Jouvencel, B. (2004). A robust control algorithm for auv: based on a high order sliding mode, *Proceedings IEEE OCEANS*, Kobe, Japão.
- Santos, S. A. (1995). *Contribution à la Conception des sous-marins autonomes : Architecture des actionneurs, architecture des capteurs d'altitude et commandes référencées capteurs*, PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Vaganay, J., Jouvencel, B. and Lépinay, P. (1998). Taipan, an AUV for very shallow water applications, *World Automation Congress*, San Diego.
- Weiss, P., Mascarell, J., M.Badica, D.Labbe, I.Brignone and Lapierre, L. (2003). Freesub: Modular control system for intervention AUVs, *Proceedings 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, New Hampshire, EUA.
- Whitcomb, L. (2000). Underwater robotics: Out of the research laboratory and into the field, *IEEE*.
- Zapata, R. (1991). *Quelques aspects topologiques de la planification de mouvements et des actions réflexes en robotique mobile*, PhD thesis, Université de Montpellier II.
- Zapata, R. and Lépinay, P. (1998). Collision avoidance of a 3d simulated flying robot, *International Symposium in Robotics and Automation*.
- Zapata, R., Lépinay, P. and Thompson, P. (1994). Reactive behaviours of fast mobile robots, *Journal of Robotic Systems*.