

Rodrigo Telles da Silva Vale

**Desenvolvimento de um sistema de navegação
para um ROV em ambientes semi
estruturados**

Monografia de Conclusão de Curso apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Engenheiro

São Paulo
2011

Rodrigo Telles da Silva Vale

**Desenvolvimento de um sistema de navegação
para um ROV em ambientes semi
estruturados**

Monografia de Conclusão de Curso apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Engenheiro

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Ettore Apolônio de Barros

FICHA CATALOGRÁFICA

Vale, Rodrigo Telles da Silva

Desenvolvimento de um sistema de navegação para um
ROV em ambientes semi estruturados / R.T.S. Vale. -- São
Paulo, 2011.

59 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.

1. Navegação marítima 2. Processamento de imagens
3. Algoritmos para imagens I. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica
e de Sistemas Mecânicos II. t.

Resumo

Neste projeto, será tratado o problema de navegação de um veículo submarino não tripulado operado remotamente, conhecido como ROV, em ambientes semi estruturados. Foi desenvolvido um sistema de apoio a navegação desse veículo, normalmente executada por um operador em terra. Tal sistema, a partir de informações oriundas de sensores acústicos de detecção de obstáculos e de um sensor magnético, provê funções de auxílio à estimativa de posição do veículo quando este se desloca no interior de uma instalação submersa com geometria e dimensões conhecidas. Com o recurso desenvolvido, pretende-se integrar o sistema de navegação (estimativa de localização) desenvolvido no veículo para auxiliar o operador dele em missões no interior de ambientes semi estruturados e de pouca luminosidade. O programa do trabalho compreende estudos na área de sensores de navegação, algoritmos de detecção de formas geométricas e processamento de imagens.

Abstract

In this project, will be treated the problem of navigating a remotely operated underwater vehicle, known as ROV, on structured environments. The aim of the project is to develop a support navigation system for this vehicle, usually performed by a operator on ground. This system, based on information from acoustic sensors to detect obstacles and a magnetic sensor, provides functions to assist the estimated position of the vehicle when it moves inside an underwater installation with known geometry and dimensions. With this resource developed, intended to integrate the navigation system in the vehicle to aid the operator of it on missions in the interior of structured environments that has low light. The work includes studies in the field of navigation sensors, algorithms to detect features and image processing.

Conteúdo

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 13 |
| 1.1 | Motivação | 15 |
| 1.2 | Objetivo | 15 |
| 1.3 | Revisão Bibliográfica | 16 |
| 1.4 | Estrutura de Trabalho | 18 |
| 2 | Sonar de varredura mecânica | 20 |
| 2.1 | Como funciona | 20 |
| 2.2 | Interpretando imagens de sonares | 22 |
| 2.2.1 | Reflexões | 23 |
| 2.2.2 | Largura do feixe na vertical | 23 |
| 2.2.3 | Diminuição da resolução da imagem do sonar | 24 |
| 2.2.4 | Ruídos | 25 |
| 2.3 | Distorções provocadas pelo movimento | 25 |
| 2.4 | Conclusão | 26 |
| 3 | Localização com um mapa a priori | 28 |
| 3.1 | Localização por meio de um algoritmo de votação | 28 |
| 3.2 | Solução para lidar com o alto período do sonar de varredura mecânica | 31 |
| 3.3 | Solução para lidar com erros do magnetômetro | 32 |
| 3.4 | Conclusão | 33 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Processamento das imagens do sonar | 35 |
| 4.1 | Local para realização de testes | 35 |
| 4.2 | Características da imagem do sonar | 36 |
| 4.3 | Filtro Gaussiano | 37 |
| 4.4 | Resultados obtidos do processamento da imagem do sonar | 39 |
| 4.5 | Identificação das dimensões do tanque por meio da imagem gerada pelo sonar | 40 |
| 4.6 | Conclusão | 41 |
| 5 | Implementação do sistema de navegação | 42 |
| 5.1 | Fluxo de dados | 42 |
| 5.2 | Descrição do software | 42 |
| 5.3 | Sincronização entre a aquisição do sonar e o algoritmo de votação . . | 44 |
| 5.4 | MapReduce | 45 |
| 5.5 | Conclusão | 46 |
| 6 | Resultados | 47 |
| 6.1 | Construção da plataforma de testes | 47 |
| 6.2 | Algoritmo de Votação | 47 |
| 6.2.1 | Dados coletados do sonar | 47 |
| 6.2.2 | Testes do algoritmo de votação | 50 |
| 6.2.3 | Comparação do algoritmo de votação com a filtragem dos dados | 52 |
| 6.2.4 | Validação do algoritmo de votação | 53 |
| 6.2.5 | Correção dos distúrbios no magnetômetro | 55 |
| 6.3 | Conclusão | 57 |
| 7 | Conclusão | 58 |
| | Apêndice A – Especificações do sonar de varredura mecânica | 59 |
| A.1 | Descrição | 59 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Componentes básicos de um ROV (imagem reproduzida de (1)) . . . | 13 |
| 1.2 | Possíveis configurações para o posicionamento acústico (imagem reproduzida de (2)) | 14 |
| 1.3 | Crescimento das incertezas dos pontos de referência no mapa e da localização do veículo (imagem reproduzida de (2)) | 16 |
| 1.4 | Mapeamento de elementos encontrados no ambiente (imagem reproduzida de (2)) | 16 |
| 1.5 | Incorporando os resultados das novas informações para se obter uma nova estimativa da posição do veículo como do mapa (imagem reproduzida de (2)) | 17 |
| 1.6 | Ilustração do método de localização com um mapa a priori (imagem reproduzida de (2)) | 18 |
| 1.7 | Localização por meio da forma de objetos utilizando lasers e uma câmera de vídeo (imagem reproduzida de (3)) | 18 |
| 2.1 | Ilustração da onda acústica emitida pelo sonar de varredura mecânica (imagem reproduzida de (1)) | 21 |
| 2.2 | Imagem gerada pelo sonar | 21 |
| 2.3 | Ilustração das reflexões ocorridas em uma imagem de sonar retirada de um tanque de formato retangular | 23 |
| 2.4 | Influência da largura do feixe do sonar na vertical na formação de sua imagem (imagem reproduzida de (2)) | 24 |
| 2.5 | Ilustração da diminuição da resolução da imagem do sonar com relação ao aumento do ângulo de incidência da onda emitida pelo sonar no obstáculo | 25 |
| 2.6 | Imagem do sonar sem a distorção causada pelo movimento | 26 |
| 2.7 | Imagem do sonar com a distorção causada pelo movimento | 27 |

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Candidatas a posição do veículo correspondente a uma determinado retorno (imagem reproduzida de (2)) | 30 |
| 3.2 | Resultado da votação quando o veículo está se movimentando | 32 |
| 3.3 | Método utilizado para lidar com erros do magnetômetro (imagem reproduzida de (2)) | 34 |
| 4.1 | Local escolhido para a realização de testes, tanque de testes do laboratório de engenharia naval e oceânica da escola politécnica da Universidade de São Paulo | 36 |
| 4.2 | Imagem do tanque obtida utilizando os dados brutos do sonar | 36 |
| 4.3 | Valores da função gaussiana em função de x para um desvio padrão de 8,0 | 38 |
| 4.4 | Imagem do sonar após a filtragem Gaussiana | 39 |
| 4.5 | Imagem do sonar após a filtragem Gaussiana e a limiarização | 40 |
| 4.6 | Imagem do sonar após a filtragem Gaussiana, a limiarização e o cancelador de ecos | 40 |
| 4.7 | Identificação das dimensões do tanque por meio da imagem gerada pelo sonar | 41 |
| 5.1 | Fluxo de dados do software | 42 |
| 5.2 | Descrição do funcionamento do software | 44 |
| 5.3 | Processo de sincronização entre o processo que faz a leitura do sonar e o processo que executa o algoritmo de votação | 45 |
| 6.1 | Plataforma utilizada para realização de teste do sistema | 48 |
| 6.2 | Imagem do sonar de varredura mecânica com alcance para 5 metros retirada do software "Micro Software v3.1"da empresa Tritech International Limited | 48 |
| 6.3 | Imagem do sonar de varredura mecânica com alcance para 10 metros retirada do software "Micro Software v3.1"da empresa Tritech International Limited | 49 |
| 6.4 | Imagem obtida após a filtragem dos dados do sonar com um alcance de 5 metros | 50 |
| 6.5 | Imagem obtida após a filtragem dos dados do sonar com um alcance de 7.8 metros | 51 |

| | | |
|------|---|----|
| 6.6 | Imagem obtida após a filtragem dos dados do sonar com um alcance de 10 metros | 51 |
| 6.7 | Resultado do algoritmo de votação com os dados do sonar com alcances de 5, 7.8 e 10 metros | 51 |
| 6.8 | Imagem obtida após nova filtragem dos dados do sonar com um alcance de 10 metros | 52 |
| 6.9 | Comparação do resultado do algoritmo entre os dados não filtrados e os dados filtrados | 53 |
| 6.10 | Resultados da primeira posição | 54 |
| 6.11 | Resultados da segunda posição | 54 |
| 6.12 | Resultados da terceira posição | 54 |
| 6.13 | Resultados da quarta posição | 55 |
| 6.14 | Variações do magnetômetro causados por materiais ferromagnéticos localizados ao redor do tanque | 56 |
| 6.15 | Verificação da real variação da orientação por meio gráfico | 57 |

Lista de Tabelas

1 Introdução

Atualmente com o avanço da tecnologia e a necessidade de se explorar cada vez mais regiões mais profundas do oceano, como no caso da indústria de petróleo, vem crescendo a utilização e desenvolvimento de veículos submarinos não tripulados. Esses veículos trouxeram a possibilidade de efetuar tarefas fora do alcance dos seres humanos e de substituí-lo em algumas tarefas em que envolviam risco de vida. Um dos tipos desses veículos submarinos não tripulados é o ROV.

Remotely Operated Underwater Vehicle, ou simplesmente ROV, são veículos submarinos não tripulados que são comandados por um operador na superfície. O envio de comando do operador para o veículo é feito por meio de um cabo umbilical que disponibiliza para o robô, além dos comandos, a energia necessária para o seu funcionamento. Com isso esse tipo de robô não tem problema com relação ao tempo de duração da missão. Para auxiliar o operador na navegação desses robôs, geralmente eles possuem uma câmera de vídeo e um sonar de varredura. Todas as manobras executadas por esses veículos são realizadas por meio de propulsores sem a utilização de tanques de lastros. A figura 1.1 ilustra os componentes que envolvem um ROV.

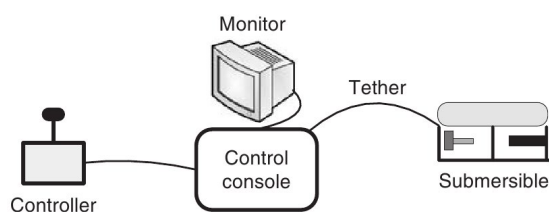


Figura 1.1: Componentes básicos de um ROV (imagem reproduzida de (1))

Atualmente um dos problemas que limitam algumas aplicações de ROV é a necessidade de se saber a posição desse veículo enquanto ele realiza a sua função como, por exemplo, o caso da inspeção de ambientes semi-estruturados onde é necessário saber a localização do veículo para indicar o local onde está inspecionando. Para solucionar esse problema é necessário implementar no veículo um sistema de navegação. A função de um sistema de navegação consiste em informar a posição atual do veículo baseado em informações atuais e passadas de alguns sensores.

Como uma breve introdução à sistema de navegação a seguir serão citados alguns exemplos desse tipo de sistema. Um primeiro exemplo é a navegação inercial que consiste na integração da velocidade ou na dupla integração da aceleração para a obtenção da posição, tendo como ponto negativo o aumento do erro de posicionamento ao passar do tempo tornando impraticável para operações de longa duração (4) . Outro tipo de sistema de navegação consiste na utilização de um GPS (Global Positioning System). A localização por GPS funciona por meio do cálculo da distância entre quatro satélites diferentes que estão na órbita da Terra pelo receptor, como o GPS usa ondas de rádio para efetuar essa localização essas ondas são absorvidas pelo meio aquático impossibilitando a localização fazendo com que o GPS não funcione em ambiente submersos. Como o GPS não funcionar em ambientes submersos, o GPS é utilizado para atualizar o posicionamento do veículo quando o mesmo se encontra na superfície (5). Em muitos casos essa atualização de baixa frequência não é suficiente e por isso é necessário a utilização do sistema de posicionamento acústico que tem o mesmo princípio de funcionamento de um GPS, mas que se necessita de algumas bases transmissoras submersas em uma determinada região e uma base receptora no veículo (6). Existem várias configurações desse tipo de sistema como: Long Base Line (LBL), Short Base Line (SBL) ou Ultra Short Base Line (USBL). A figura 1.2 esses vários tipos de configuração.

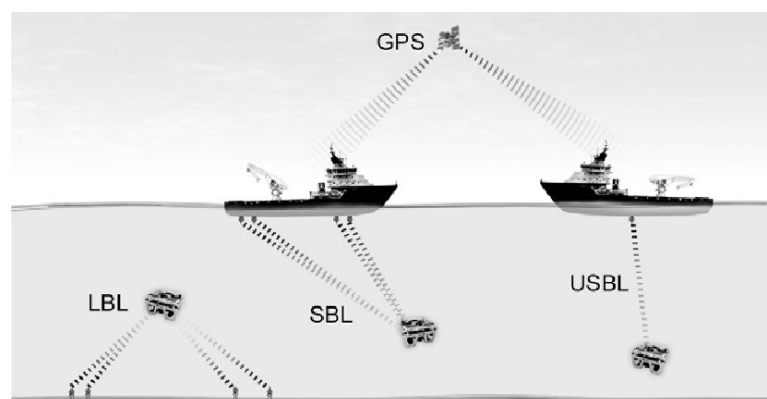


Figura 1.2: Possíveis configurações para o posicionamento acústico (imagem reproduzida de (2))

Em alguns casos não há a possibilidade de se usar esse tipo de sistema como no o caso de navegações em duto ou em ambientes semi-estruturados onde não se tem uma linha de visada entre o receptor e o transmissor. Para esses casos há outros tipos de navegação que podem ser utilizados, como o caso da localização por meio do conhecimento a priori de campos geofísicos como, por exemplo, o campo magnético ou anomalias do campo gravitacional que com a medição desse campo por meio de sensor embarcado no veículo pode-se determinar a posição do veículo fazendo uma correlação entre a medida do sensor e as características desses campos (7). Outras variações desse

método é a utilização de sensores de distância e um conhecimento prévio da planta do ambiente (2) ou o conhecimento do relevo do fundo do mar e a utilização de um sonar de batimetria (8). Por último, um outro exemplo de sistema de navegação se baseia na utilização de uma câmera de vídeo e lasers que podem juntos medir a distância até um objeto ou também mesmo estimar a posição do veículo com base na forma desse objeto (3) .

1.1 Motivação

A motivação do projeto vem do desafio de se estudar e desenvolver um sistema de navegação para um veículo submarino não tripulado do tipo ROV para que missões que envolvem navegação em ambientes semi estruturados como, por exemplo, a inspeção da parte interna de dutos, sejam realizadas em um tempo menor e com maior facilidade.

1.2 Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de apoio à navegação de um veículo submarino remotamente operado, mais conhecido como ROV, em um ambiente semi estruturado. Entenda-se por ambiente semi estruturado como sendo um ambiente em que se tenha uma geometria conhecida e pouco mutável e que não haja marcações que facilitariam a navegação como, por exemplo, uma linha desenhada indicando a trajetória a ser realizada.

Outro aspecto a se levantar sobre o ambiente em que se fará a navegação é a possibilidade de se ter algumas limitações com relação aos tipos de sensores a serem utilizados, isso porque o ambiente pode ter certas características que impeçam o uso de alguns sensores como, por exemplo, não se ter luminosidade suficiente para se fazer a navegação por meio de uma câmera de vídeo.

Outro ponto do projeto a considerar é manter a base de informações e instrumentações que um operador usa para a navegação de um ROV como imagens de sonar e câmera de vídeo e informações de profundidade e rumo. Ou seja, pretende-se não alterar o ambiente familiarizado que o operador já apresenta ao se pilotar um ROV comum.

1.3 Revisão Bibliográfica

Com base no objetivo do projeto foi realizada uma pesquisa visando exemplos de veículos submarinos não tripulados que tivessem um sistema de navegação para ambientes semi-estruturados. O sistema de navegação utilizado na maioria dos veículos encontrados foi o sistema de Localização e Mapeamento Simultâneo (SLAM, sigla em inglês) que, como o nome já indica, corresponde à captação de imagens do meio para se construir virtualmente a geometria do ambiente ao mesmo tempo em que se está localizando o veículo. Esse sistema tem como objetivo diminuir o erro da navegação inercial utilizando-se do reconhecimento de algumas geometrias do ambiente ao mesmo tempo em que se constrói virtualmente o ambiente. As figuras 1.3, 1.4 e 1.5 formam uma sequência de imagens que ilustram o funcionamento do sistema SLAM.

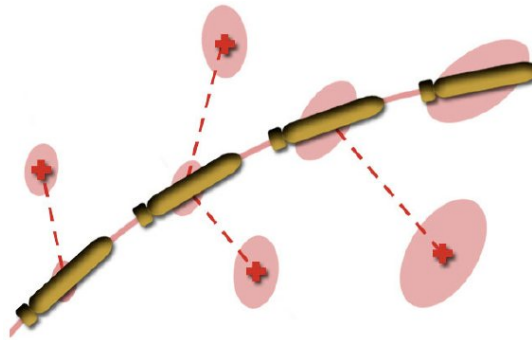


Figura 1.3: Crescimento das incertezas dos pontos de referência no mapa e da localização do veículo (imagem reproduzida de (2))

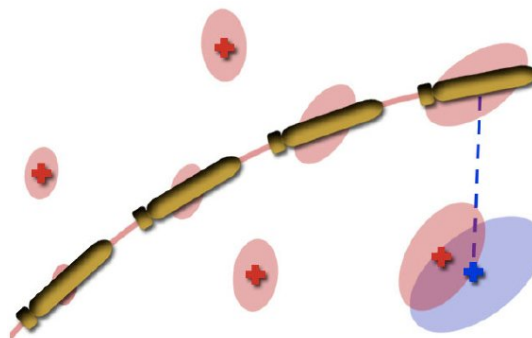


Figura 1.4: Mapeamento de elementos encontrados no ambiente (imagem reproduzida de (2))

A captura de imagens para esse tipo de sistema pode ser efetuada ou por uma câmera de vídeo ou por um sonar. Em ambiente aquático pode-se ter algumas complicações com relação ao uso de câmeras de vídeo como, por exemplo, baixa luminosidade e partículas em suspensão na água, por isso há uma maior utilização de sonares nesse tipo de sistema ou então uma integração da câmera com o sonar. Outro fator que diferencia de um sistema SLAM para outro é quanto à seção de varredura do sonar. Existem

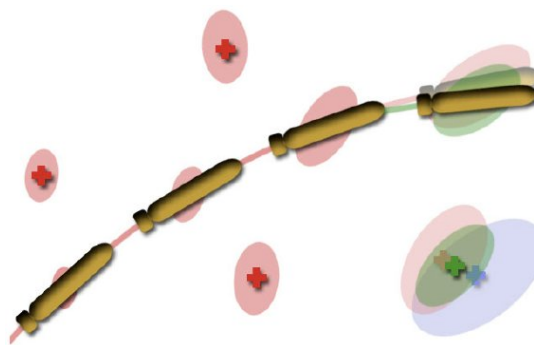


Figura 1.5: Incorporando os resultados das novas informações para se obter uma nova estimativa da posição do veículo como do mapa (imagem reproduzida de (2))

sonares com varredura de 45° , 90° , 120° , 180° e 360° e a escolha do sonar dependerá da aplicação do veículo.

Em (2) temos um exemplo desse tipo de sistema de navegação. Neste trabalho foi proposta uma navegação em ambientes estruturados como, por exemplo, portos, utilizando um sonar de varredura mecânica como sensor principal sem a necessidade de se alterar o ambiente (sem colocação de marcas para facilitar a navegação). Além do sonar, esse sistema também utiliza um medidor de velocidade por efeito Doppler e um magnetômetro.

Em (9) temos outro exemplo de sistema de navegação por SLAM. Este trabalho fala sobre o sistema de navegação implementado no veículo HAUV que foi projetado para aplicações de vigilância de portos e inspeções de cascos de navio. Os sensores do veículo HAUV que executam o SLAM são: um medidor de velocidades por efeito Doppler, um giroscópio a laser e um sonar. Ao final, (9) apresenta resultados que demonstram uma navegação sem erros na estimativa de posição do veículo em vários ambientes aquáticos.

Outro tipo de navegação encontrado é uma variação mais simplificada da navegação SLAM que corresponde à situação em que já se tem um mapa da região aonde o veículo navegará e que por meio de sensores de distância pode-se deduzir a localização do veículo com as informações tiradas desse mapa, retirando a necessidade de se construir virtualmente o ambiente. A figura 1.6 ilustra esse tipo de sistema de navegação.

A vantagem desse método com relação ao SLAM é que o custo computacional exigido é menor. Exemplo desse método podem ser encontrados em (2). O último exemplo encontrado de sistema de navegação utilizado em ambientes semi-estruturados foi o encontrado em (3). Esse sistema tem como objetivo a localização do veículo por meio da busca de objetos que compõe o ambiente e depois pela forma desses objetos determinar a posição. Essa determinação da posição é realizada por meio de três ponteiros de laser, uma câmera CCD e o método de triangulação. A figura 1.7 ilustra

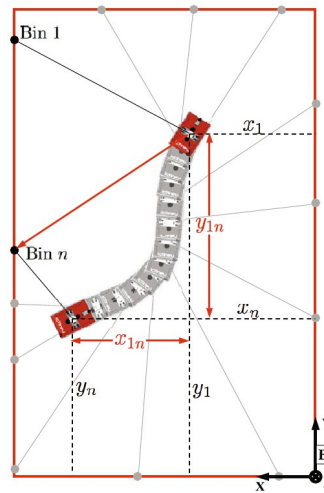


Figura 1.6: Ilustração do método de localização com um mapa a priori (imagem reproduzida de (2))

esse método.

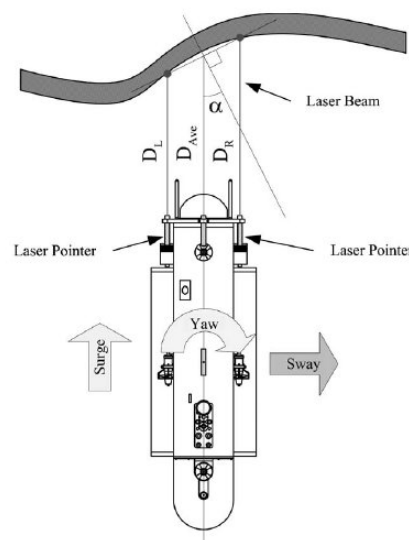


Figura 1.7: Localização por meio da forma de objetos utilizando lasers e uma câmera de vídeo (imagem reproduzida de (3))

Para testar esse sistema foram realizados experimentos com o ROV Tri-Dog 1 que além do laser e da câmera apresenta outros sensores como: um medidor, GPS, sensores acústicos de proximidade, entre outros.

1.4 Estrutura de Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo traz uma introdução sobre os veículos submarinos remotamente operados, apresentando suas características e suas aplicações. Esse capítulo também cita alguns tipos de sistema de navegação utilizados nesse tipo de veículo. Depois no segundo capítulo é dada uma

explicação básica sobre o principal sensor utilizado no sistema de navegação que será implementado nesse trabalho que corresponde ao sonar de varredura mecânica. Em seguida, no capítulo três, são dadas explicações sobre um método de localização de um veículo do tipo ROV em um ambiente semi estruturado em que é necessário se ter o conhecimento do mapa da região para que ele funcione. Esse método se baseia em um algoritmo de votação sendo que para ele funcionar tem que ser satisfeita a hipótese de que o veículo permaneça parado ou se movimente com uma velocidade baixa. No capítulo seguinte, o capítulo quatro, é abordado o tema de processamento de imagens já que o trabalho envolve a utilização de um sonar de imageamento. No capítulo cinco são mostrados alguns resultados obtidos nesse trabalho e o último capítulo traz uma conclusão sobre o trabalho realizado e os resultados obtidos.

2 Sonar de varredura mecânica

Apesar da grande utilização de câmeras de vídeo para se efetuar o posicionamento de um veículo em ambientes terrestres, quando se trata do caso de um posicionamento em ambientes submersos esse tipo de sensor passa a ter certas limitações. Como a luz é absorvida mais rapidamente dentro d'água do que no ar, quando a câmera de vídeo é utilizada embaixo d'água o alcance de visão dela acaba diminuindo muito. Para suprir essa deficiência das câmeras de vídeo, geralmente os sistemas de navegação de veículo submersos as substituem por sonares. Por causa da excelente propagação do som na água faz com que seja possível, para uma onda acústica, propagar milhares de metros, conseguindo com isso maiores alcances do que a câmera de vídeo. Assim os sonares conseguem formar uma imagem do ambiente parecida em certos pontos com as imagens de uma câmera de vídeo sendo que a diferença entre elas está no fato de que a imagem acústica apresenta uma resolução menor (2) .

Com base nisso, optou-se por fazer o sistema de navegação desse trabalho com base no sonar de varredura mecânica. Portanto a seguir tem-se algumas explicações sobre o sonar de varredura mecânica. As informações expostas neste capítulo tiveram como base a referência (2) e (10). No apêndice A são colocadas as especificações do sonar de varredura mecânica utilizados nesse projeto.

2.1 Como funciona

O sonar de varredura funciona por meio de um mecanismo que rotaciona um transdutor em passos de pequenos ângulos que são pré-definidos por meio do sistema dele. A cada passo que o transdutor é rotacionado, ele envia uma onda acústica com o formato de um leque para fazer o escaneamento do ambiente, como mostra a figura 2.1

Obstáculos que estejam no caminho dessa onda irão refletir parte da energia dela na direção do transdutor. O transdutor então captura essa reflexão e sabendo o tempo que a onda levou para percorrer essa distância e a velocidade do som na água consegue-se determinar a distância que o objeto está do sonar. O transdutor também consegue identificar a intensidade com que a onda sonora retorna. Em uma única onda acústica,

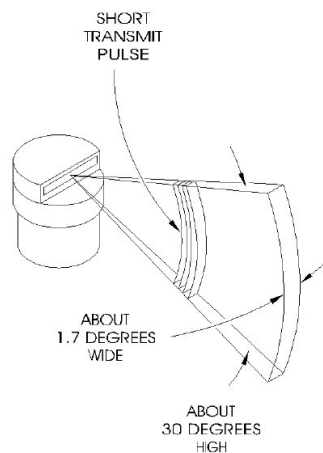


Figura 2.1: Ilustração da onda acústica emitida pelo sonar de varredura mecânica (imagem reproduzida de (1))

que o transdutor envia, podem ocorrer várias reflexões, se houverem vários obstáculos em diferentes distâncias, fazendo com que seja possível fazer uma relação entre a distância percorrida e a intensidade do eco ao longo de um determinado alcance. Com todas essas informações e a capacidade de realizar uma varredura de 360° , o sonar forma uma imagem acústica de duas dimensões do ambiente como é ilustrado na figura 2.2.

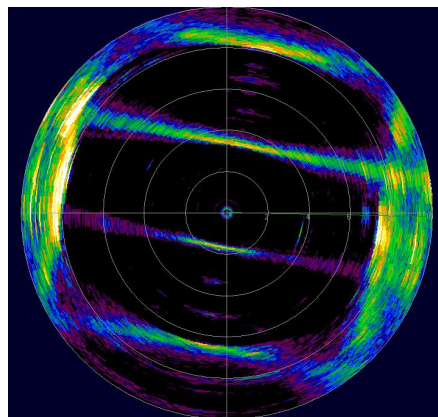


Figura 2.2: Imagem gerada pelo sonar

Esse tipo de sonar é geralmente montado na parte frontal e superior do ROV para evitar obstruções nas imagens e para obter uma imagem acústica clara. Como qualquer sonar acústico, o sonar de varredura só pode mostra imagens de objetos que reflitam as ondas sonoras. Assim superfícies bem polidas geralmente não são capturadas pelos sonares, assim como fundos com texturas rugosas podem borrar a imagem acústica.

Para facilitar as explicações que serão dadas no decorrer desse trabalho será dada uma nomenclatura para diferenciar cada onda acústica que retorna para o transdutor como consequência de um obstáculo encontrado, do conjunto de todas as ondas que retornam para o transdutor como consequência de obstáculos encontrados pelo caminho

de uma única onda emitida por ele. Ou seja, como resultado da emissão de uma onda pelo transdutor como já foi dito anteriormente, o transdutor capta várias ondas devido a vários obstáculos encontrados na frente do sonar, esse conjunto de ondas captadas serão chamadas de feixe e cada uma das ondas que formam o feixe será chamada de arco. Portanto um arco é consequência da reflexão de apenas um obstáculo encontrado pela onda emitida pelo transdutor.

Nesse tipo de sonar há a possibilidade de se mudar duas propriedades dele, um é o alcance e outro é o ângulo entre cada emissão de onda acústica realizada pelo ele. Como elas são relacionadas com a varredura do sonar, elas também estão relacionadas com o período de varredura do sonar, que será muito discutido durante o desenvolver desse trabalho. Com relação ao alcance, aumentando-se esse valor o sonar terá um alcance maior só que terá o seu período de varredura aumentado, por outro lado se esse valor for diminuído o sonar terá um alcance menor só que terá o seu período diminuído. Para o objetivo desse trabalho quanto menor o período de varredura do sonar maior será a facilidade de se realizá-lo. O valor dessa propriedade dependerá do ambiente em que o sonar será usado como, por exemplo, se o sonar for usado em uma piscina pode-se escolher o valor do alcance com um valor igual a maior dimensão da piscina o que seria suficiente para rastrear a piscina por completo. Já com relação ao ângulo entre cada emissão de onda acústica realizada pelo ele, diminuindo-se esse valor a imagem do sonar terá uma resolução maior só que terá seu período de varredura aumentado, por outro lado se aumentarmos esse valor a imagem do sonar terá uma resolução menor só que terá seu período diminuído. Assim quando o algoritmo de estimação de posição estiver implementado pode-se testar qual resolução mínima que o algoritmo ainda consegue operar para que se possa ter uma maior frequência de aquisição do sonar.

2.2 Interpretando imagens de sonares

Como uma das partes desse trabalho envolve um algoritmo baseado em imagens acústicas geradas por um sonar de varredura mecânica é necessário ter um conhecimento das características envolvidas na formação de uma imagem acústica para que posteriormente se possa fazer uma interpretação dessas imagens corretamente. Por isso, a seguir será listados os efeitos mais relevantes que possam aparecer em uma imagem acústica devido a interferência provocadas pelo ambiente.

2.2.1 Reflexões

Um efeito que podem aparecer nas imagens acústicas são as reflexões que são pontos de intensidade na imagem indicando a presença de algum objeto em região onde não existe nada. A origem das reflexões acontece da seguinte maneira: quando a onda acústica emitida pelo transdutor do sonar encontra um grande obstáculo, esse obstáculo por ter grandes dimensões consegue refletir grande parte da energia dessa onda em um de sentido de propagação contrário ao onda original. Essa onda refletida por sua vez pode ser refletida por outro obstáculo. Com isso o sonar pode captar essa onda final e interpretá-la como se fosse um objeto a uma certa distância, ou seja, o sonar irá mostrar na imagem um objeto que na verdade não existem. A reflexão pode ser causada pela superfície ou também pelo fundo do ambiente onde o veículo está navegando. No caso de ambientes semi estruturados, a ocorrência de reflexões pode ser muita alta devido as paredes desse ambiente. Como o sonar que será utilizado nesse trabalho permite configurar o seu alcance, a ocorrência de reflexões pode ser minimizada quanto menor for o alcance do sonar só que quanto menor for o alcance menor será a visão do sonar. Com isso será necessário fazer uma escolha com relação ao alcance que o sonar terá no sistema de navegação para que se consiga captar boa parte do ambiente sem ter muitas ou nenhuma reflexão. A imagem 2.4 mostra um exemplo de imagem de sonar com reflexões na qual as linhas em vermelho representam os limites do tanque retangular de onde foi obtida essa imagem, todos os ecos formados fora desse limite são reflexões.

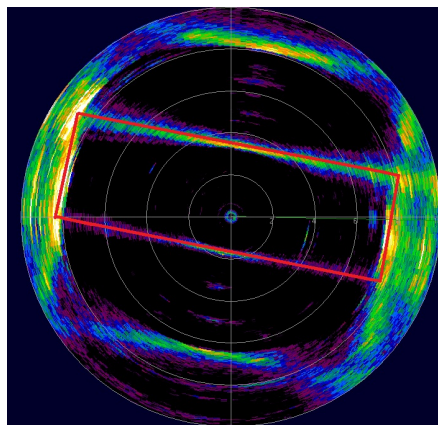


Figura 2.3: Ilustração das reflexões ocorridas em uma imagem de sonar retirada de um tanque de formato retangular

2.2.2 Largura do feixe na vertical

A largura vertical do feixe do sonar pode influenciar a imagem acústica do seguinte modo. Apesar do feixe rastrear uma região de três dimensões, a imagem gerada pelo sonar será de duas dimensões, com isso o sonar não consegue identificar a que altura um

objeto está com relação a ele. Além disso, se mais de um objeto estiver a uma mesma distância do sonar, ele irá detectar as reflexões causadas por eles, mas isso resultará em um único valor de intensidade a uma certa distância do sonar, ou seja irá tratar esses objetos como se fossem apenas um. Portanto com uma largura de feixe vertical menor é possível se ter uma maior certeza dos objetos que estejam realmente na frente do veículo só que por outro lado com um largura de feixe vertical maior é possível identificar uma maior quantidade de obstáculos que estejam à frente do veículo. Uma outra característica das imagens formadas por feixes com uma grande largura do feixe na vertical é que nelas podem aparecer retornos correspondentes ao fundo do ambiente ou à superfície da água, fazendo com que ela fique mais poluída. Como no caso desse trabalho é apenas necessário detectar as paredes de um ambiente, melhor utilizar um sonar com uma largura de feixe na vertical grande.

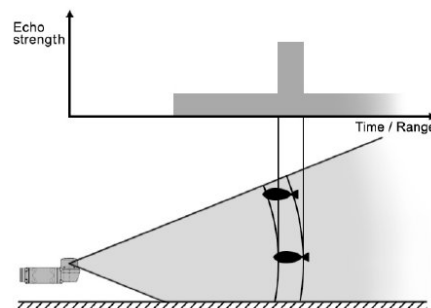


Figura 2.4: Influência da largura do feixe do sonar na vertical na formação de sua imagem (imagem reproduzida de (2))

2.2.3 Diminuição da resolução da imagem do sonar

Dada a natureza de medição do processo, que consiste no rotacionamento do transdutor do sonar em passos de pequenos ângulos e que em cada passo mede-se a distância até os obstáculos encontrados, o sonar de varredura mecânica produz dados com base em um sistema de coordenadas polar. Uma consequência importante é que, se o ângulo em que a onda acústica emitida pelo sonar incidir no obstáculo for muito grande, isso ocasionará uma reflexão mais dispersa do obstáculo gerando uma imagem com uma resolução menor. A figura 2.5 ilustra essa diminuição da resolução da imagem do sonar. Essa figura corresponde a uma imagem de sonar tirada de um tanque de formato retangular. Dessa figura pode-se observar que os pontos das paredes laterais do tanque que estão mais distantes do sonar, ou seja, os pontos do tanque onde o ângulo de incidência da onda emitida pelo sonar é maior, apresenta uma menor resolução de sua imagem. Isso pode ser observado pelo aumento dos contornos das paredes laterais do tanque mostrados nessa figura.

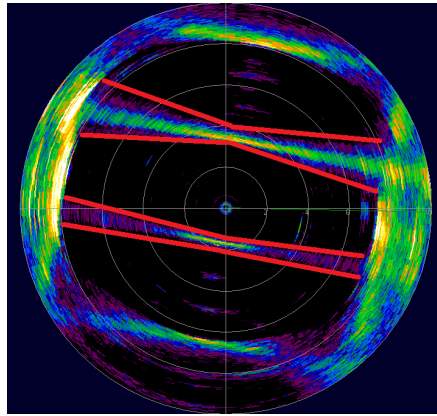


Figura 2.5: Ilustração da diminuição da resolução da imagem do sonar com relação ao aumento do ângulo de incidência da onda emitida pelo sonar no obstáculo

2.2.4 Ruídos

Os ruídos que aparecem nas imagens acústicas podem ter várias origens. Uma dessas origens é uma combinação de perturbações geradas pelo meio como, por exemplo, efeitos hidrostáticos de ondas ou correntezas, atividades sísmicas, o tráfego de navios, entre outros. Os ruídos também podem ser gerados pelo próprio veículo por causa da vibração dos propulsores dele. Os ruídos também podem ser gerados pelo próprio sonar por causa de seu encapsulamento que serve como vaso de pressão e que fará com que a onda acústica seja refletida nele.

2.3 Distorções provocadas pelo movimento

A informação de um sonar de varredura mecânica para uma imagem acústica completa não é recolhida instantaneamente, mas por meio da rotação do seu transdutor que precisa de uma quantidade considerável de tempo para completar uma volta de 360° . Apesar da demora de se completar uma volta, a imagem acústica não é atualizada de 360° em 360° , mas sim a cada feixe de som que o sonar capta. Uma das possíveis maneiras de se trabalhar com os dados gerados pelo sonar é fazer uma avaliação apenas a cada volta completa do transdutor. Esse modo de avaliação é ineficiente já que o período de varredura do sonar é muito alto comparado com a dinâmica do ROV, ou seja, como a imagem do sonar é atualizada de feixe em feixe, o primeiro e o último feixes de uma varredura de 360° serão colocados na imagem próximos um do outro, mas com uma diferença de tempo considerável entre os instantes em que foram obtidos. Uma outra possível maneira de se trabalhar com os dados gerados pelo sonar é a utilização de uma fila de dados que guardaria as informações mais recentes de uma varredura completa de 360° que faria com que fosse possível tratar com os dados do sonar de uma forma mais rápida. Mas em ambos os casos, se o ROV mudar de

posição enquanto a imagem acústica é gerada, ela pode eventualmente apresentar uma descontinuidade fazendo com que a sua interpretação fique dificultada tanto para o operador quanto para um processamento de seus dados. Geralmente esse efeito pode ser ignorado para velocidades muito baixas, no entanto para altas velocidades é essencial ter algum método que possa identificar quais foram os movimento do veículo, para poder ser feito uma realimentação da posição dele possibilitando arrumar a imagem gerada pelo sonar. Alguns exemplos de métodos que possibilitariam isso seria a navegação estimada (integração da velocidade obtida por meio de sensores inerciais para obtenção da posição) , o SLAM (Localização e Mapeamento Simultâneo), entre outros. As distorções nas imagens são consequência da ação combinada de ambos os movimentos de translação e rotação do veículo e que a influência de cada um desses movimentos pode variar dependendo do tipo de veículo. No caso dos ROVs, eles geralmente se movem em velocidades de translação baixas, mas têm a capacidade de realizarem movimentos de rotação rápidos, sendo que as imagens acústicas geradas pelo sonar fiquem mais sensível às distorções angulares. Arrumando as distorções apresentadas nas imagens acústicas pode facilitar interpretação delas tanto para o operador quanto para um processamento de seus dados.

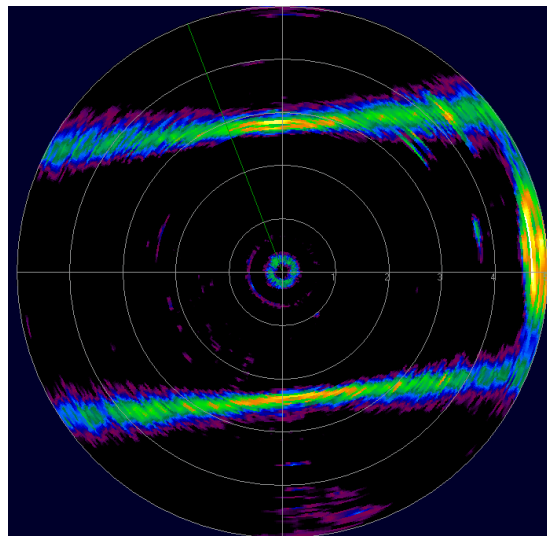


Figura 2.6: Imagem do sonar sem a distorção causada pelo movimento

2.4 Conclusão

Esse capítulo forneceu uma base para o entendimento de como são obtidas as imagens pelo sonar de varredura mecânica e também de alguns efeitos que possam aparecer nelas devido alguns distúrbios ou características do meio em que o veículo está navegando. Isso auxiliará na forma de como tratar as imagens obtidos pelo sonar no algoritmo de localização que será proposto no decorrer desse trabalho. Essas

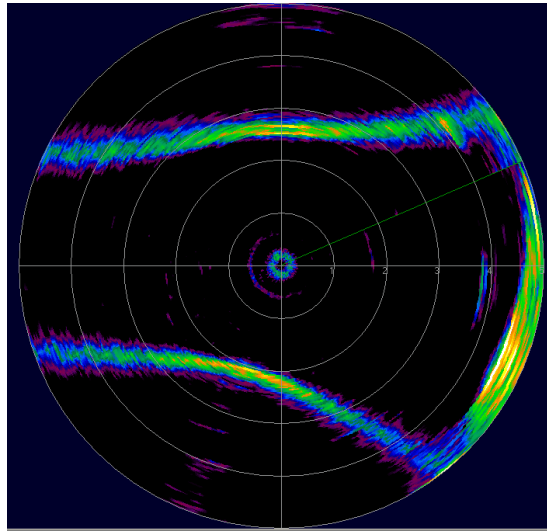


Figura 2.7: Imagem do sonar com a distorção causada pelo movimento

informações também servirão para explicar alguns problemas encontrados durante os testes desses algoritmos. Além disso, esse capítulo mostrou que será necessário realizar alguns testes com o sonar de varredura mecânica para se determinar o alcance necessário para se conseguir efetuar o posicionamento em um menor tempo possível.

3 Localização com um mapa a priori

Essa seção do trabalho irá mostrar um método de localização de um veículo submarino não tripulado em que se é necessário ter um mapa da região onde o veículo navegará para poder realizar a localização dele. Com objetivo de simplificar o projeto será feita a hipótese de que o veículo submarino não tripulado terá um controle passivo de rolagem e arfagem. Essa hipótese é comum de ser feita para veículos submarinos do tipo ROV, por causa que esses controles passivos são decorrentes de um certo posicionamento do centro de gravidade e do centro de flutuabilidade que podem ser facilmente controlados por meio da utilização de flutuadores ou lastros.

O método mostrado servirá para localizar o veículo em condições em que ele se encontre parado ou se movimentando com uma velocidade muito baixa. Os motivos dessas condições serão mostrados depois. Esse método se baseia em um algoritmo que funciona de forma parecida com a transformada de Hough por se tratar também de uma algoritmo de votação. Esse método além do conhecimento de um mapa a priori, ele também usa um sonar de varredura mecânica e um magnetômetro. Esse método apresentado aqui foi proposto por (2). Além desse método essa seção também apresenta soluções para o caso de pequenas distorções no magnetômetro por causa de materiais ferromagnéticos presentes no ambiente e também para um problema causado pelo fato do sistema de localização utilizar um sonar de varredura mecânica, que é o alto período de varredura dele. Essas soluções também foram tiradas de (2).

3.1 Localização por meio de um algoritmo de votação

O método de localização proposto neste trabalho determina a posição do veículo por meio de um algoritmo de votação utilizando um magnetômetro e o conhecimento prévio das dimensões do ambiente junto com as medições de um sonar de varredura mecânica. O mapa e o sonar darão a posição do veículo na horizontal e o magnetômetro dará o rumo do veículo.

O algoritmo para determinar a posição do veículo no ambiente é uma adaptação da transformada de Hough (11) . A transformada de Hough é um algoritmo para detecção de um tipo de estrutura geométrica como, por exemplo uma reta, a partir de dados de algum sensor, por exemplo, uma foto de uma máquina fotográfica. Tomando como exemplo o caso da Transformada de Hough para detectar retas em imagens, a transformada de Hough irá detectar todas as retas presentes nessa imagem. O princípio da transformada de Hough é gerar um espaço em que a estrutura geométrica, em que se quer detectar, seja representada por um único ponto. Isso é feito por meio de uma parametrização. Assim, acumulando informações de um sensor, o algoritmo associa os dados desse sensor a alguns pontos desse espaço, ou seja, cada dado do sensor irá votar nas possíveis candidatas ao tipo dessa estrutura geométrica no ambiente em que se está trabalhando. Escolhendo os pontos em que tiveram uma quantidade de votos, consideradas suficientes, é possível determinar quais tipos dessa estrutura geométrica realmente existem nesse ambiente. Na forma adaptada da transformada de Hough proposto por (2), também será utilizado um espaço discretizado que por meio dos dados de distância obtido pelo sonar, do ângulo com que a onda acústica foi emitida pelo sonar e o ângulo de orientação entre o veículo e a piscina obtido pelo magnetômetro, formam os parâmetros de cada ponto desse espaço votação. Essa parametrização é feita de tal forma que o resultado da votação dê a posição do veículo dentro do ambiente.

Para efetuar esse algoritmo da transformada de Hough adapta, não serão utilizados todos os dados que o sonar de varredura mecânica gera, ou seja, será realizada uma filtragem dos dados do sonar que sejam mais relevantes para esse algoritmo. Essa filtragem será realizada por meio de dois fatores. Primeiramente será selecionado apenas o arco de maior intensidade de cada feixe obtido pelo sonar, para que depois com esses arcos selecionados seja realizada uma restrição de que eles tenham um valor de intensidade que seja suficiente para representar a detecção de um objeto real sendo que os arcos que não apresentarem esse valor de intensidade serão descartados. Isso será feito com o objetivo de diminuir o custo computacional do algoritmo fazendo com que se tenha uma frequência maior de atualização da posição do veículo. Portanto isso faz com que seja necessário realizar alguns experimentos com o sonar de varredura mecânica dentro do ambiente para determinar o valor de intensidade que corresponda a uma detecção da parede dele.

O primeiro passo do algoritmo de votação é usar as informações das dimensões da piscina para definir uma discretização do espaço dela. Essa discretização da piscina fará com que cada ponto dessa discretização represente uma posição do veículo nela. Por isso a escolha da resolução da discretização da piscina será muito importante pois se for escolhido uma pequena discretização da piscina, isso fará com não se tenha

tanta precisão na estimativa da posição do veículo. Por outro lado, a escolha de uma discretização maior fará com que haja uma maior precisão na estimativa da posição do veículo, só que isso irá aumentar o custo computacional do algoritmo. Com a discretização da piscina será possível acumular evidências sobre a posição do veículo em forma de votos. O conjunto de arcos selecionados da forma descrita anteriormente, serão os responsáveis por indicar quais região do espaço da piscina terão que ser votadas. Ao final do processo de votação a região com o maior número de votos será escolhida como sendo a região mais provável em que o veículo esteja. Até agora foi dada uma explicação geral de como o algoritmo funciona, a seguir será explicado como é feita a votação. Sabendo a orientação do veículo dada pelo magnetômetro, a distância até uma das paredes do ambiente dada pela seleção do retorno de maior intensidade do feixe emitido pelo sonar e o ângulo com que esse feixe foi emitido, é feita uma busca das possíveis posições do veículo. Essa busca das possíveis posições do veículo é realizada com base em duas restrições. A primeira restrição é que o retorno associado com a posição candidata deve se sobrepor aos limites do ambiente e a segunda é que o veículo tem que estar dentro dos limites do ambiente. Para garantir essas duas restrições, as candidatas a posição do veículo para um dado retorno formam uma zona com formato de "L", ou seja, para cada retorno do sonar tem-se um "L" que indica quais são as possíveis posições do veículo. A figura 3.1 ilustra um exemplos dessas possíveis candidatas a posição do veículo no formato de "L" que são consequência da votação de apenas um retorno.

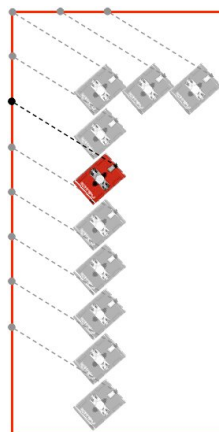


Figura 3.1: Candidatas a posição do veículo correspondente a uma determinado retorno (imagem reproduzida de (2))

Todas as possíveis posições do veículo que formam esse "L" receberão um voto. Repetindo-se esse processo para uma varredura completa de 360° do sonar será possível determinar a posição do veículo verificado qual região do espaço discretizado do ambiente recebeu mais votos.

3.2 Solução para lidar com o alto período do sonar de varredura mecânica

O sonar de varredura mecânica apresenta uma relação entre o seu alcance e o seu período de varredura, que corresponde ao fato de que quanto maior o valor do alcance desse sonar maior será o período de varredura dele, por outro lado quanto menor o valor do seu alcance, menor será o seu período de varredura. O sonar utilizado nesse trabalho, o Micro DST, permite que seu valor de alcance seja mudado permitindo portanto ter algumas opções de períodos de varredura para ele. Mesmo no menor alcance permitido por esse sonar, o período de varredura dele ainda é muito alto fazendo com que a estimativa da posição do veículo pelo algoritmo de votação seja dada numa frequência muito baixa já que se terá que esperar uma varredura de 360° para o veículo se localizar. Então para resolver esse problema (2) deu uma solução que é utilizar uma fila de dados que irá acumular um total de dados correspondente a mais recente varredura de 360° , ou seja, quando um novo feixe é obtido pelo sonar, ele é adicionado na fila de dados e o feixe mais antigo que se encontra no fila é descartado. Assim com as informações dessa fila é possível que a cada novo feixe que é obtido pelo sonar seja possível efetuar uma nova votação e com isso ter uma nova estimativa da posição do veículo sem ter que esperar uma varredura completa de 360° do sonar. Portanto com a utilização dessa fila é possível ter uma frequência da estimativa da posição do veículo maior.

Apesar da fila de dados proporcionar uma frequência maior da estimativa de posição do veículo, ela apresenta limitações para que seus dados sejam usados no algoritmo de votação. As limitações correspondem à resolução da discretização escolhida para representar o ambiente e a velocidade com que o veículo está se movimentando. O motivo dessas limitações serão discutidas a seguir. A escolha da resolução da discretização para representar o ambiente é dos maiores problemas quando se está implementando o algoritmo de votação. Escolhendo uma resolução pequena irá aumentar a precisão das estimativa da posição só que irá aumentar o custo computacional do algoritmo fazendo com que a melhora na precisão de posicionamento leve a uma demora na atualização do posicionamento. Por outro lado, escolhendo uma resolução grande irá reduzir a precisão da estimativa da posição, diminuindo o custo computacional levando a atualização mais rápida do posicionamento. Assim era de se pensar em escolher a melhor precisão de posicionamento com um tempo razoável de atualização. No entanto, há situações em que utilizar uma resolução menor trará benefícios. Uma dessas situações será quando o veículo estiver se movendo com uma baixa velocidade e os retornos armazenados na fila de dados mencionado acima, serão obtidos de diferentes posições do veículo. Consequentemente, quando é realizado o algoritmo de votação com esses retornos, os

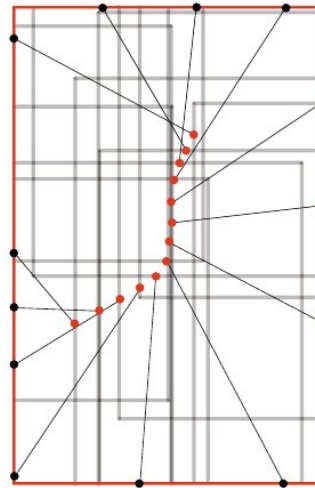


Figura 3.2: Resultado da votação quando o veículo está se movimentando

votos deles serão distribuídos conforme a posição em que eles foram obtidos que será diferente da posição atual. Isso fará com que haja uma dispersão dos votos no espaço de votação produzindo um resultado incorreto no final da estimação da posição como mostra a figura 3.2 .

No entanto, se a resolução da discretização do espaço de votação for reduzida, as incertezas produzidas pela movimentação do veículo podem ser consertada por meio da alocação dos votos dessa movimentação em uma única região do espaço de votação que faria com que o resultado do algoritmo de votação fosse correto. Com isso pode-se chegar a conclusão de que para que a utilização da fila de dados para realizar o algoritmo de votação visto em 3.1 dê certo é necessário que a velocidade com que o veículo se mova durante o posicionamento seja relativamente baixa para que em um intervalo entre duas execuções do algoritmo de votação, o deslocamento do veículo seja corrigido pela discretização do espaço do ambiente e que essa discretização seja pequena o suficiente para que se possa obter uma boa precisão no posicionamento do veículo.

3.3 Solução para lidar com erros do magnetômetro

Como mencionado anterior um magnetômetro é usado para determinar a atual orientação do veículo com relação ao ambiente, com isso ao veículo se movimentar dentro desse ambiente poderão ocorrer erros na medida de orientação obtida magnetômetro por causa da presença de alguns materiais ferromagnéticos nesse ambiente. Esses erros na orientação do veículo serão transmitidos para o algoritmo de votação, explicado na seção 3.1, por meio da alocação incorreta dos votos no espaço de votação. Como o espaço de votação representa uma discretização do ambiente, ou seja, representa as

possíveis regiões onde o veículo pode estar dentro do ambiente, uma alocação incorreta dos votos corresponderá a uma estimativa de posição não confiável.

Para solucionar esse problema das medições do magnetômetro, (2) propôs a seguinte solução. Primeiramente, assume-se que todos os votos dados a partir dos dados do sonar no algoritmo de votação têm algum erro de orientação devido a distúrbios no magnetômetro. Como não é possível determinar o valor desse erro, será considerado alguns possíveis valores para ele, ou seja, será considerado um intervalo de erros. Esse intervalo de erro fará com que cada medição de orientação dado pelo magnetômetro seja representada por alguns valores de orientação que englobem esse intervalo. Assim ao invés de se trabalhar com um espaço de votação, o algoritmo irá trabalhar com vários espaços de votação, sendo que cada um representa um valor de erro do magnetômetro. Ou seja, quanto maior o intervalo de erros escolhido, maior será a quantidade de espaços de votação que serão necessários para realizar o algoritmo. Isso fará com que o custo computacional aumente muito, mas devido ao fato de que os erros provocados pelo magnetômetro fazem com o algoritmo não produza uma estimativa de posição confiável, não se tem como evitar esse aumento computacional. Portanto o princípio de funcionamento do algoritmo não irá mudar, o que ficará diferente é que serão gerados mais de um espaço de votação, um para cada valor de erro do magnetômetro. Agora com todos esses espaços de votação, a estimativa da posição do veículo é tomada a partir da procura da região mais votada em cada um desses espaços (máximo local), para que depois dentre esses máximos encontrados, se encontre um máximo entre eles (máximo global). A figura 3.3 ilustra essa solução para lidar com erros do magnetômetro.

De (2), também se consegue obter a explicação para o fato desse processo conseguir estimar a posição do veículo levando em consideração esse intervalo de possíveis erros do magnetômetro. A explicação está no fato de que a região que receber o maior número de votos irá corresponder ao espaço de votação no qual os arcos que efetuaram a votação corresponderão aos arcos que estão mais alinhados com as paredes da piscina, ou seja, é o espaço de votação com o menor erro angular dado pelo magnetômetro.

3.4 Conclusão

Com base no objetivo desse trabalho e junto com as simplificações feitas para possibilitar a implementação desse projeto, neste capítulo foi proposto um método de localização para um veículo submarino não tripulado em que necessitam do conhecimento prévio de um mapa da região onde o veículo navegará. O método apresenta uma limitação de que o veículo tem que permanecer parado para funcionar ou que ele esteja se movimentando com uma velocidade relativamente baixa. Esse método necessita de

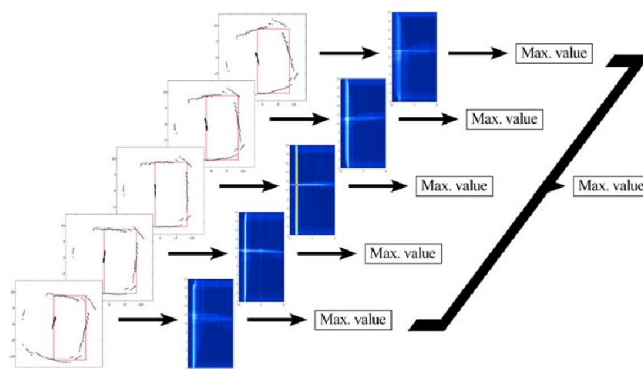


Figura 3.3: Método utilizado para lidar com erros do magnetômetro (imagem reproduzida de (2))

um sonar de varredura mecânica e um magnetômetro.

4 Processamento das imagens do sonar

Como foi visto na seção 2.2, as imagens de um sonar podem apresentar algumas características e alguns ruídos que podem dificultar as suas interpretações. Como o sistema de navegação desenvolvido nesse trabalho depende das informações dessas imagens é necessário que haja um reconhecimento dos ruídos presentes nelas, assim como um processamento delas para que não haja um erro na localização do veículo. Assim, esse capítulo explica o processamento utilizado nas imagens do sonar para se obter imagens mais próxima do real.

4.1 Local para realização de testes

Como as características das imagens geradas pelo sonar também dependem do ambiente em que elas são obtidas, primeiramente teve-se que escolher o local para serem realizados os testes. Assim, como o trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de navegação para um ROV em um ambiente semi estruturado, o ambiente escolhido para realização de testes teria que ser um ambiente onde geometria fosse simples, conhecida e pouco mutável. Com isso, foi utilizado o tanque de testes do Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica (LENO) do departamento de engenharia Naval da escola politécnica da Universidade de São Paulo como local para realização de testes. Esse tanque é parecido com uma piscina e tem um formato retangular. A figura 4.1 mostra uma imagem desse tanque.

A escolha desse local foi feita por causa de sua proximidade e por ter fácil acesso para alunos da escola politécnica. Uma característica que deve ser ressaltada desse tanque é que em uma de suas extremidades existe uma praia que pode interferir no sistema de navegação já que essa região pode formar na imagem do sonar uma nuvem de intensidades que poderá impossibilitar o reconhecimento de uma das paredes do tanque. Por isso deverá ser realizada uma análise da imagem do sonar referente a essa região.



Figura 4.1: Local escolhido para a realização de testes, tanque de testes do laboratório de engenharia naval e oceânica da escola politécnica da Universidade de São Paulo

Como o sistema de navegação proposto nesse projeto necessita do conhecimento das dimensões do ambiente semi estruturado no qual se fará a navegação, foram tiradas as medidas desse tanque por meio de uma trena. Na obtenção das dimensões do tanque, não se levou em consideração as dimensões da praia existente no tanque. As medidas foram de 15,5 metros de comprimento e 5,0 metros de largura aproximadamente.

4.2 Características da imagem do sonar

Tendo escolhido um local para a realização dos testes, foram recolhidos alguns dados do sonar de varredura mecânica para a obtenção de uma imagem desse local com o intuito de se verificar quais ruídos ela iria apresentar. A figura 4.2 mostra a imagem obtida.

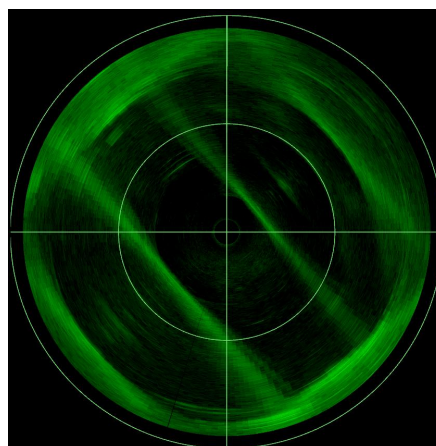


Figura 4.2: Imagem do tanque obtida utilizando os dados brutos do sonar

Da figura 4.2, podemos observar algumas características da imagem gerada pelo sonar que podem prejudicar o posicionamento do veículo com o algoritmo de votação.

A primeira característica a ser ressaltada é o grande número de reflexões presentes na imagem. Uma segunda característica é o retorno de objetos que não estão no plano de varredura do sonar que são causados devido a grande largura do feixe do sonar na vertical e representam o fundo do tanque, a superfície da água, entre outros objetos como foi visto na seção 2.2.2. Esses retornos apresentam uma intensidade bem menor se comparada com as intensidade obtidas pelos retornos das paredes do tanque. A última característica a ser ressaltada da imagem é com relação a grande quantidade de ruídos de alta frequência devido a forma de como o sonar obtém os dados como explicado na seção 2.2.3 que dificultam a identificação dos retornos de maior intensidade das paredes do tanque.

Tendo identificado os ruídos presentes na imagem gerada pelo sonar, é necessário encontrar alguns processamentos que juntos consigam eliminá-los. A escolha do filtro a ser utilizado foi restringida pelo fato de que como a determinação da posição é derivada da informação da imagem gerada pelo sonar, a filtragem dessa imagem só poderia ser feita utilizando filtros lineares para que não houvesse uma deformação da imagem resultando em um posicionamento errado do veículo. Para eliminar as reflexões é necessário utilizar um cancelador de ecos que consiste em ignorar os sinais a partir da identificação de um certo número de retornos consecutivos de alta intensidade. Já para eliminar os retornos de objetos que não estão no plano de varredura do sonar é necessário fazer uma limiarização que corresponde a ignorar os retornos que apresentam uma intensidade menor do que uma intensidade estabelecida. Por último para eliminar os ruídos de alta frequência é necessário utilizar uma filtragem mais complexa que consiste em um filtro gaussiano (12). Para um melhor entendimento do filtro gaussiano, a seguir será dada uma explicação mais extensa sobre ele.

4.3 Filtro Gaussiano

Para um melhor entendimento do filtro Gaussiano, será feito primeiro uma explicação rápida sobre alguns conceitos envolvidos no processamento de imagens. Alguns filtros fazem um processamento da imagem por meio de uma convolução, que consiste no fato de se calcular a intensidade de um ponto da imagem utilizando além do valor dele, valores dos pontos vizinhos a ele. A convolução é feita por meio da atribuição de pesos para cada um dos vizinhos de um ponto, indicando uma influência do valor de intensidade de cada vizinho na determinação da intensidade desse ponto. A atribuição dos pesos é feita por meio de uma função, que é chamada de kernel. Assim, para se obter o valor de intensidade filtrado de um ponto da imagem, multiplica-se a função de peso pelo valor da intensidade original de cada um dos vizinhos desse ponto e ao

final soma-se todos os valores obtidos. Esse processo de convolução é resumido pela equação 4.1.

$$F_x = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h_i f_{x-i} \quad (4.1)$$

Onde h é o kernel, f corresponde aos valores brutos da imagem no intervalo $[-\infty, \infty]$ e F é o valor filtrado de um ponto da imagem. O filtro Gaussiano consiste em um filtro que é parecido com um filtro de média só que a ponderação do sinal é feita por meio de uma distribuição gaussiana. Portanto o filtro Gaussiano modifica os dados da imagem por meio de uma convolução com uma função Gaussiana mostrada na equação 4.2.

$$G_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.2)$$

onde x é a distância do ponto até a origem do sistema e σ é o desvio padrão da distribuição gaussiana que faz a ponderação.

O filtro Gaussiano a princípio teria que ser aplicado em um intervalo infinito $x \in [-\infty, \infty]$ já que a função do filtro Gaussiano é não nula para todo esse intervalo. No entanto, como o valor dessa função diminui rapidamente com aumento de x e o fato que o computador apresenta uma limitação na representação dos números, é razoável considerar um intervalo menor de utilização da função Gaussiana já que por causa do truncamento efetuado pelo computador, depois de um certo valor de x , a função Gaussiana teria valor nulo, não tendo razão para utilização de intervalos maiores que esse valor de x . Como pode ser observado pela fórmula 4.1 a largura desse intervalo depende do valor utilizado de desvio padrão na função Gaussiana. Com objetivo de verificar essa largura de aplicação da função Gaussiana, foi feito um gráfico 4.3 que mostra o valor da função Gaussiana com relação a x para um valor de desvio padrão de 8,0.

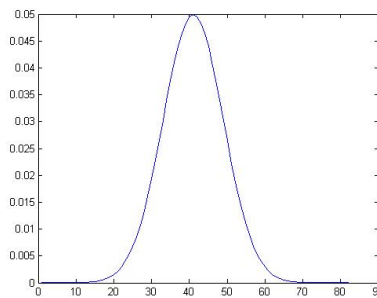


Figura 4.3: Valores da função gaussiana em função de x para um desvio padrão de 8,0

Observando 4.3, chega-se a conclusão de que é suficiente utilizar uma largura de

aplicação da função Gaussiana de três vezes o valor do desvio padrão dela, ou seja, um intervalo de $[-3\sigma, 3\sigma]$.

O filtro Gaussiano tem como resultado uma suavização da imagem, ou seja, os valores de intensidade dos pontos da imagem têm seus valores diminuídos, funcionando como um filtro passa-baixa. A suavização do filtro Gaussiano depende do seu valor de desvio padrão, quanto maior for esse valor, maior será a suavização.

4.4 Resultados obtidos do processamento da imagem do sonar

Nessa seção serão mostradas as imagens obtidas após as filtrações utilizadas para eliminar os ruídos ressaltados na seção 4.2. A primeira filtração realizada foi o filtro Gaussiano que como explicado na seção 4.3 é um filtro passa-baixa que tem como resultado uma suavização da imagem. A figura 4.4 mostra a imagem obtida após a filtração Gaussiana.

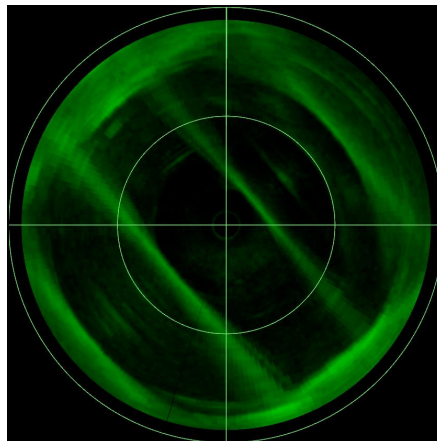


Figura 4.4: Imagem do sonar após a filtração Gaussiana

Pode-se observar da figura 4.4 que os ruídos de alta frequência foram eliminados. A segunda filtração realizada foi a limiarização que consiste da eliminação dos retornos que possuem uma intensidade inferior à intensidade que corresponde a uma das paredes do tanque. A figura 4.5 mostra a imagem obtida após a filtração de Limiarização.

Pode-se observar da figura 4.5 que os retornos referente aos objetos que não estão no plano de varredura do sonar foram eliminados. A última filtração realizada foi o eliminador de ecos para eliminar as reflexões da imagem. A figura 4.6 mostra a imagem obtida após a filtração de eliminação de ecos.

Pode-se observar da figura 4.6 que houve uma grande melhora na representação dos contornos do tanque.

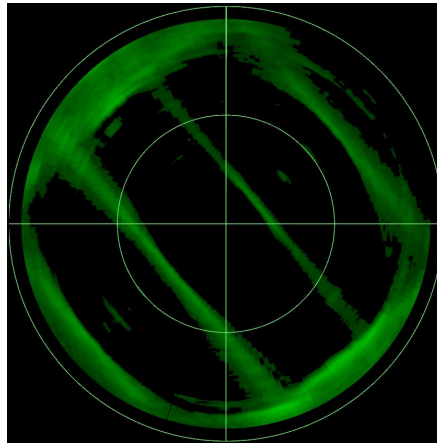


Figura 4.5: Imagem do sonar após a filtragem Gaussiana e a limiarização

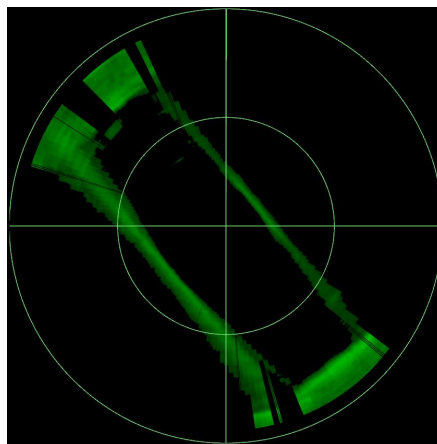


Figura 4.6: Imagem do sonar após a filtragem Gaussiana, a limiarização e o cancelador de ecos

4.5 Identificação das dimensões do tanque por meio da imagem gerada pelo sonar

Apesar de terem sido tiradas as dimensões do tanque por meio de uma trena, optou-se por tentar obter essas informações por meio dos dados do sonar. Como visto em 4.4, com os dados do sonar é possível obter os contornos do tanque. Com isso, por meio de um processo iterativo desenhou-se um retângulo em cima da imagem do tanque formada pelos dados do sonar até que esse retângulo sobrepuhasse os contornos do tanque obtido na imagem. Assim, por esse método foi obtido as dimensões de 16,3 metros de comprimento e 5,1 metros de largura para o tanque. Esses valores deram bem próximos dos valores obtidos por meio da medição com a trena, o que valida a filtragem utilizadas. A figura 4.7 mostra o resultado explicado acima.



Figura 4.7: Identificação das dimensões do tanque por meio da imagem gerada pelo sonar

4.6 Conclusão

Por meio da identificação de alguns ruídos nas imagens geradas pelo sonar de varredura mecânica e da aplicação de uma limiarização, de um cancelador de ecos e de um filtro gaussiano nessas imagens foi possível identificar os contornos do tanque sem alterar seu formato original.

5 Implementação do sistema de navegação

Nessa seção será dada algumas explicações sobre a estrutura do código implementado em C++ para implementar o sistema de navegação proposto nesse trabalho. Também será explicado algumas das ferramentas de software utilizadas na implementação.

5.1 Fluxo de dados

Como foi visto na seção 3.1, o algoritmo de votação precisa da informação de distância, azimuth e rumo do retorno de maior intensidade de cada feixe de uma varredura de 360° , sendo que os dados de azimuth e distância são obtidos do sonar e o dado de rumo é obtido do magnetômetro. Para se ter a maior frequência de atualização da posição, o sonar de varredura mecânica foi configurado na sua velocidade mais alta que representa passos de $1,8^\circ$ em $1,8^\circ$, ou seja, o sonar de varredura mecânica completará uma volta de 360° em 200 passos. Então o fluxograma de dados do programa pode ser representado como ilustra a figura 5.1.

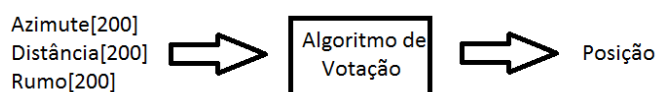


Figura 5.1: Fluxo de dados do software

5.2 Descrição do software

O sistema de navegação proposto neste trabalho se baseia em um algoritmo de votação que funciona por meio de dois sensores, um sonar de varredura e um magnetômetro. Com isso, o software foi implementado por meio de três processos, um processo que faz a aquisição do sonar, outro que faz a aquisição do magnetômetro e um último que

executa o algoritmo de votação. A seguir será dada uma explicação sobre cada um desses processos.

O processo que faz a aquisição do magnetômetro é um processo bem simples porque realiza apenas a leitura de dados pela serial desse sensor e armazena esse valor em uma variável global. Assim como o período de aquisição do magnetômetro é de 0,04 segundos, esse processo terá esse período de execução. Uma única característica a ser ressaltada desse processo é que essa variável global que armazena o valor do rumo é declarada como uma variável atômica. Foi utilizado esse recurso de variável atômica para lidar com o problema da condição de corrida. Condição de corrida é um problema que envolve compartilhamento de dados entre processos que são executados paralelamente. O problema está no fato de que como esses processos estão sendo executados paralelamente e utilizam uma mesma variável é necessário utilizar alguma solução para se evitar que um processos interrompa o outro enquanto este está utilizando a variável compartilhada. Se isso não for evitado a variável pode acabar por ter um valor incoerente resultante do acesso dos dois processos. Quando se utiliza o recurso de variável atômica, esse recurso garante que quando um processo está acessando o valor dela, ele não seja interrompido garantido as restrições da condição de corrida. Existem outras soluções para esse problema só que a mais prática é utilizar variáveis atômicas.

O processo que faz a aquisição do sonar de varredura mecânica tem como função a leitura de dados do sonar pela serial assim como efetuar a filtragem desses dados.

O processo que executa o algoritmo de votação lê os dados gerados pelo processo de aquisição do sonar e faz a execução do algoritmo de votação. Como foi visto na seção 3.3, o algoritmo de votação tem que ser executado mais de uma vez para poder corrigir os possíveis distúrbios no magnetômetro. Com isso, esse processo fica responsável pelo manejo de processos que serão responsáveis por paralelizar a execução dos algoritmos de votação. O recurso utilizado para se fazer isso será explicado mais adiante. Ao final da execução de todos os algoritmos de votação, é obtido um novo valor da posição da plataforma, assim como um valor de rumo corrigido.

Como o processo que executa o algoritmo de votação utiliza os dados gerados pelo processo de leitura do sonar é necessário fazer uma sincronização entre eles. Essa sincronização é feita por meio da exclusão mútua. Essa sincronização será explicada mais adiante.

A figura 5.2 exemplifica o funcionamento de todo o software do sistema de navegação.

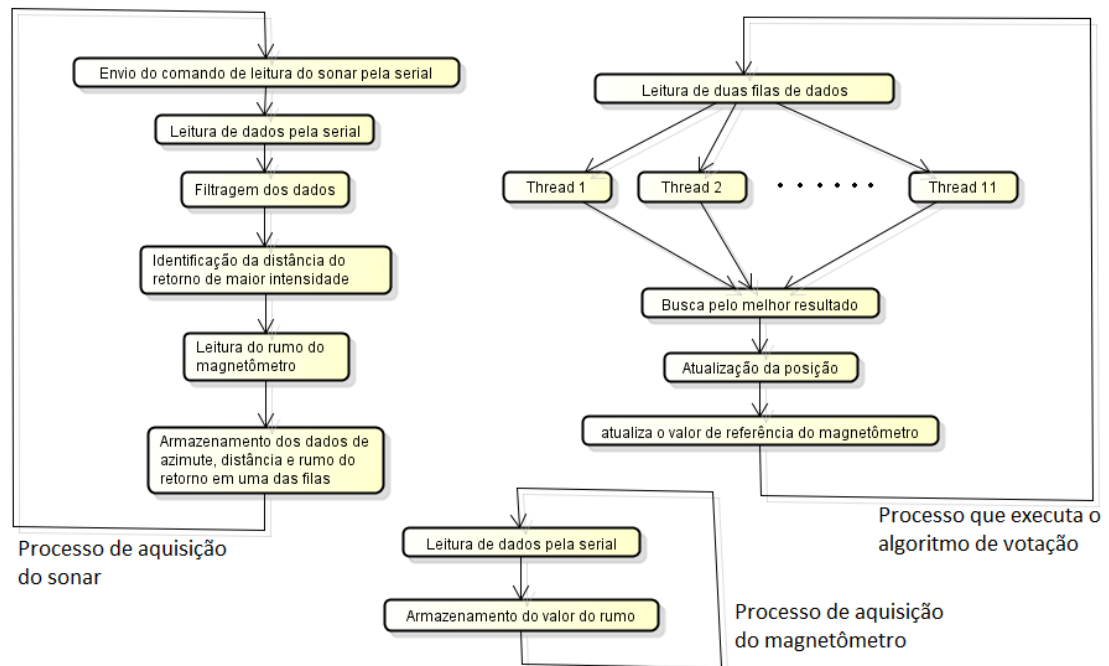


Figura 5.2: Descrição do funcionamento do software

5.3 Sincronização entre a aquisição do sonar e o algoritmo de votação

Como foi explicado na seção 3.2 um dos grandes problemas de se utilizar o sonar de varredura mecânica é o fato dele ter um período de varredura muito alto, por isso também na seção 3.2 foi proposto a utilização de uma fila de dados para armazenar as informações da mais recente varredura de 360° do sonar de varredura mecânica. Assim com essa fila de dados, o algoritmo de votação poderia ser executado a cada aquisição de um feixe, só que isso poderia fazer com que a aquisição do sonar ficasse limitada por causa que o algoritmo de votação ficaria na maior parte do tempo utilizando a fila de dados. Por isso foi necessário achar uma mediação entre o alto período de varredura do sonar e o tempo de execução do algoritmo de votação. Com isso, decidiu-se que a atualização da posição seria feita a cada varredura de 180° . Outra mudança necessária na implementação do sistema de navegação, para que a atualização de posição fosse feita de forma mais rápida, foi a utilização de três filas de dados cada uma armazenando informações de uma varredura de 180° do sonar ao invés de apenas uma que armazenasse uma varredura de 360° . Essa mudança foi feita para que enquanto o algoritmo de votação utilizasse duas dessas filas, o processo de aquisição do sonar pudesse preencher a outra, tornando a atualização da posição mais rápida. Só que apesar desse ganho na rapidez do código, houve um aumento em sua complexidade já que foi necessário fazer a sincronização dessas três filas. A sincronização foi feita por meio da exclusão mútua que consiste numa ferramenta que evita que dois processos

concorrentes acessem simultaneamente um mesmo recurso. Portanto cada uma das filas tem um mutex que controla o seu acesso, assim o processo que faz a leitura do sonar a cada varredura de 180° destrava uma fila e começa a gravar na outra (trava outra fila), já o processo que executa o algoritmo de votação utiliza duas filas por vez então a cada execução do algoritmo, esse processo destrava uma fila e trava outra. Esse processo é resumido pela figura 5.3.

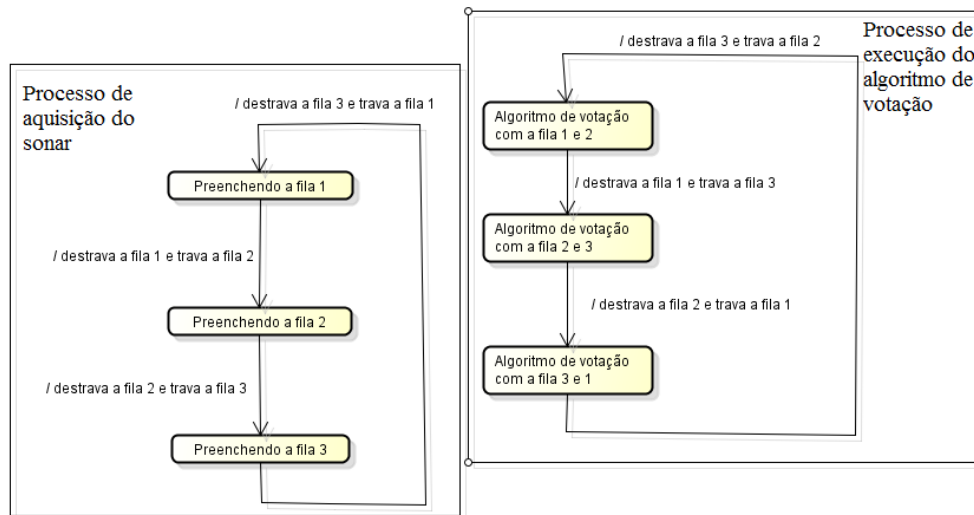


Figura 5.3: Processo de sincronização entre o processo que faz a leitura do sonar e o processo que executa o algoritmo de votação

5.4 MapReduce

Como foi explicado na seção 3.3, o algoritmo de votação tem que ser executado em uma faixa de valores de rumo para compensar eventuais distúrbios no magnetômetro. Como a faixa de valores escolhida foi de -5 a +5 do valor de rumo, o algoritmo de votação teria que ser executado 11 vezes para se fazer essa correção. Como o resultado de uma votação com um valor de rumo não depende do resultado de outra votação com outro valor de rumo e como o espaço de votação do algoritmo pode ser segmentado, essa correção é fácil de ter seu processamento paralelizado. Para paralelizá-la foi utilizado uma ferramenta chamada Map Reduce que faz essa tarefa automaticamente. A idéia básica do Map Reduce é dividir o algoritmo em duas partes, uma referente ao processo que pode ser executado em paralelo em partes individuais dos dados de entrada (map) e outra que coleta os resultados produzidos pelo mapa e a partir deles produz um resultado final (reduce). No caso do algoritmo de votação o map é o próprio algoritmo de votação e o reduce é uma função que obtém o valor máximo entre os resultados obtido das votações conseguindo assim a posição do veículo. Assim com as funções de map e reduce e os dados de entrada, o framework do MapReduce automaticamente faz

a paralelização das onze execuções do algoritmo de votação distribuindo-os entre cada nó de processamento, fazendo com que a execução dessa solução seja automatizada.

5.5 Conclusão

Apesar de algumas complexidades encontradas para implementação do sistema de navegação pode-se utilizar ferramentas que ajudaram no desenvolvimento do software.

6 Resultados

6.1 Construção da plataforma de testes

Como o trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de navegação, foi necessário a construção de uma plataforma de testes para possibilitar a aquisição dos dados dos sensores necessários para esse sistema, assim como possibilitar que ele seja testado. Como a plataforma terá essas duas funções, foram tomados alguns cuidados em sua construção. O primeiro cuidado foi com relação ao posicionamento do sonar de varredura mecânica, já que como esse sensor é um sensor acústico, ele foi posicionado de uma forma que suas ondas não incidem sobre a própria plataforma de teste. Outra preocupação foi com relação à profundidade de operação do sonar, já que, para profundidades muito baixas a reflexão da onda acústica na superfície da água poderia causar desvios nas estimativas do sistema de navegação. Uma última preocupação foi com relação a largura e comprimento da plataforma já que como ela terá que se movimentar na água é necessário que ela tenha uma certa estabilidade de guinada e rolagem para não prejudicar o sistema de navegação já que o sistema foi projetado com a hipótese dessas estabilidades. Por isso foi escolhido um comprimento e uma largura grandes para dar essas estabilidades à plataforma. A figura 6.1 ilustra a plataforma para testes construída.

6.2 Algoritmo de Votação

6.2.1 Dados coletados do sonar

Uma das partes do desenvolvimento do sistema de navegação desse trabalho consiste na implementação de um algoritmo de posicionamento por votação proposto em (2). Para começar a fazer os teste desse algoritmo foi feita a aquisição do sonar de varredura mecânica. Como esse sonar possibilita que seu alcance seja configurado em diferentes valores de alcances, esse sonar pode gerar imagens acústicas com características diferentes dependendo do alcance configurado. Foram feitas três aquisições em diferentes tipo de alcances de uma mesma posição da plataforma de teste com intuito de

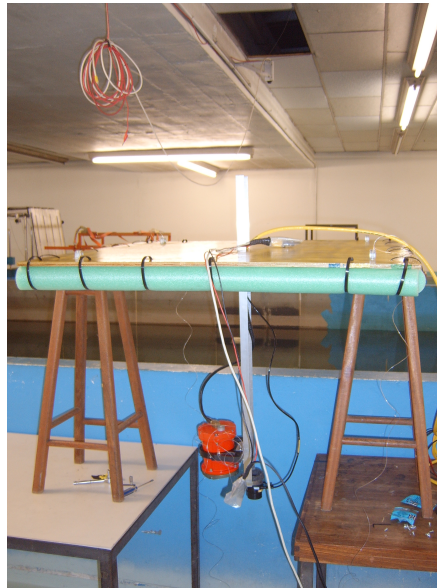


Figura 6.1: Plataforma utilizada para realização de teste do sistema

verificar as diferenças de funcionamento do algoritmo votação com relação aos alcances. Com base nas dimensões do tanque visto na seção 4.5, os alcances escolhidos foram 5, 7.8 e 10 metros. Para se ter uma comparação entre os resultados de imagens geradas pelo o algoritmo e os dados reais, foi utilizado o software da empresa do sonar utilizado nesse trabalho, a Tritech International Limited, para se obter algumas imagens do sonar. Nesse software próprio do sonar não se tem a opção de escolher alcances entre 5 e 10, por isso foram geradas apenas as imagens dos alcances de 5 e 10 metros que são mostradas nas figuras 6.2 e 6.3.

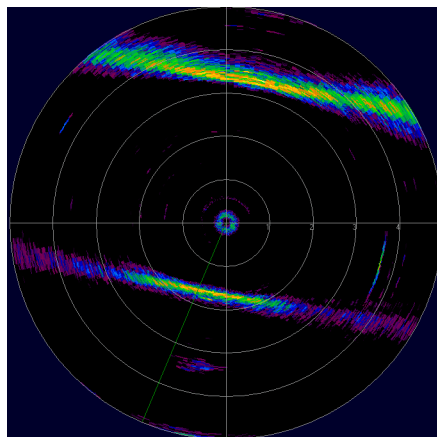


Figura 6.2: Imagem do sonar de varredura mecânica com alcance para 5 metros retirada do software "Micro Software v3.1" da empresa Tritech International Limited

Observando a figura 6.2, podemos verificar três características das imagens geradas pelo sonar configurado com um alcance de 5 metros que podem vir a prejudicar o algoritmo de navegação por votação. A primeira característica, que deve ser uma característica que também deverá ser observada na imagem gerada pelo sonar configurado com um alcance de 10 metros, é a reflexão causada pela plataforma de teste que

forma um círculo pequeno de intensidade razoável no centro da imagem. A segunda característica, que também será observado na imagem gerada para 10 metros, são as baixas intensidades que formam uma das paredes. Isso é resultado de um baixo ângulo de incidência da onda acústica emitida pelo sonar na parede. A última característica é o fato de que como o tanque, que serviu de base os testes, ter uma dimensão de 15,5 por 5 metros, esse alcance de 5 metros é insuficiente para captar todo o tanque.

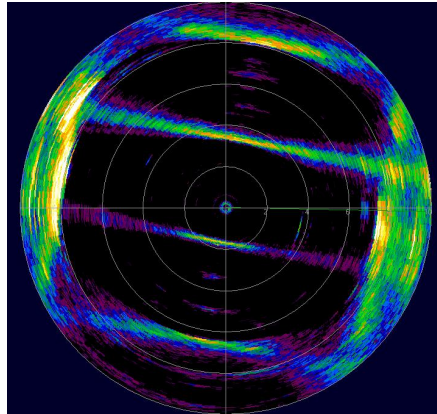


Figura 6.3: Imagem do sonar de varredura mecânica com alcance para 10 metros retirada do software "Micro Software v3.1" da empresa Tritech International Limited

Observando a figura 6.3, que mostra a imagem gerada pelo sonar com um alcance de 10 metros, podemos verificar outras duas características além das duas características já mencionadas na figura 6.2, que são comuns para as duas imagens. A primeira característica é com relação ao resultado obtido da reflexão das ondas na região da praia no tanque. Pelo fato da praia desse tanque não ir até o fundo, isso faz com que a sua borda tenha uma intensidade maior que o resto. Isso irá fazer com que não se tenha muitos problemas na execução do algoritmo de posicionamento por votação, já que se esperava nessa região da praia uma nuvem de intensidades que poderiam formar uma parede irregular no algoritmo. Com essa característica, o comprimento do tanque que será levada em conta para a realização do algoritmo de posicionamento por votação será o comprimento do tanque menos o comprimento da praia. A outra característica observada são as reflexões observadas na imagem devido ao uso de um alcance muito maior que a menor dimensão do tanque que é 5 metros.

Após observar as imagens 6.3 e 6.2 podemos concluir que a execução do algoritmo de navegação terá duas situações diferentes, uma com menos informações das paredes do tanque só que com menos reflexões e outra com um número maior de informações das paredes do tanque só que com um número maior de reflexões. Uma situação apropriada para a execução do algoritmo de votação seria ter a imagem gerada para 10 metros sem ter as reflexões existentes nela, isso pode ser alcançado por meio da escolha de uma alcance do sonar em que tivéssemos uma relação razoável entre essas duas imagens.

6.2.2 Testes do algoritmo de votação

Esse trabalho envolve o desenvolvimento de um sistema de navegação para um ROV em um ambiente semi estruturado e desse sistema faz parte um algoritmo de posicionamento por votação que é proposto em (2) e que utiliza dados obtidos de um magnetômetro e de um sonar de varredura mecânica. Para a realização de testes iniciais, foram coletados dados apenas do sonar de varredura mecânica e por isso foram feitas algumas mudanças no algoritmo para que ele pudesse ser testado apenas com esses dados. A mudança realizada, para que o algoritmo não precisasse dos dados de rumo, foi a execução do algoritmo considerando ângulos de rumo de 0° a 360° com uma variação de 1° . Com os resultados obtidos de cada valor de ângulo de rumo, tirou-se a máxima entre eles obtendo-se a posição da plataforma de teste. Essa solução tem o mesmo princípio da solução comentada na seção 3.3. A única mudança realizada foi a comentada acima, então para começar a implementação do algoritmo primeiro foi feito um filtragem dos dados do sonar de varredura mecânica que é proposta em (2). Como o sonar de varredura mecânica gera uma grande quantidade de dados, (2) propõe uma filtragem desses dados para se ter um algoritmo mais rápido. A filtragem proposta tem duas características, a primeira é que serão selecionados apenas os arcos de maior intensidade de cada feixe e a segunda é que desses arcos será imposta uma restrição de que eles tenham um valor de intensidade que seja suficiente para representar a detecção de um objeto real sendo que os arcos que não apresentarem um valor acima dessa intensidade serão descartados. Fazendo-se essa filtragem nos dados obtidos do sonar com alcances de 5, 7.8 e 10 metros, obteve-se as seguintes imagens:



Figura 6.4: Imagem obtida após a filtragem dos dados do sonar com um alcance de 5 metros

Antes de fazer os comentários sobre os resultados obtidos é necessário ressaltar que essas imagens não estão em uma mesma escala, isso faz com que a imagem de 5 metros pareça com a de 7.8 metros, mas na verdade a de 7.8 metros tem muita mais informação do que a de 5 metros. Com esses dados filtrados foi aplicado o algoritmo de votação para cada um desses três casos e os resultados obtidos foram os seguintes:



Figura 6.5: Imagem obtida após a filtragem dos dados do sonar com um alcance de 7.8 metros



Figura 6.6: Imagem obtida após a filtragem dos dados do sonar com um alcance de 10 metros

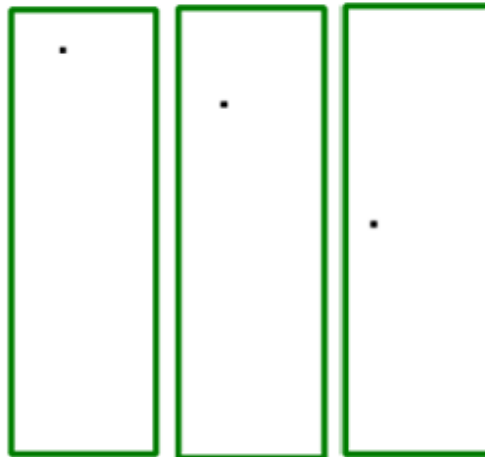


Figura 6.7: Resultado do algoritmo de votação com os dados do sonar com alcances de 5, 7.8 e 10 metros

Os comentários que serão feitos a seguir sobre os resultados obtidos até agora serão apenas qualitativos já que quando foi realizado a aquisição do sonar para a realização desses testes não foram tiradas as medidas de distâncias da plataforma de teste com relação ao tanque e por isso não foi possível fazer análises quantitativas. Comparando a figura 6.7 com as imagens 6.2 e 6.3, podemos concluir que o único resultado razoável é o resultado obtido com os dados do sonar em um alcance de 10 metros, isso porque os posicionamentos obtidos com os dados de 5 metros e 7.8 metros foram resultados com

um erro de posicionamento muito grande. Analisando agora apenas o posicionamento obtido com os dados de 10 metros com a imagem 6.3 concluiu-se que o resultado não teve uma precisão adequada já que o resultado aparece muito mais perto de uma das paredes do que deveria.

6.2.3 Comparação do algoritmo de votação com a filtragem dos dados

Como os resultados de posicionamento obtidos em 6.2.2 não foram precisos o suficiente optou-se por fazer a filtragem proposta em 4.4. Como a única imagem que apresentou um número significativo de ruídos foi a imagem obtida com os dados de 10 metros e com isso, é a única imagem que poderá ter uma maior mudança nos resultados com uma filtragem maior optou-se por comentar apenas os resultados dessa filtragem para a imagem dos dados de 10 metros. O resultado obtido com essa filtragem dos dados dos sonar com alcance de 10 metros é mostrada na figura 6.8.



Figura 6.8: Imagem obtida após nova filtragem dos dados do sonar com um alcance de 10 metros

Em cima dessa filtragem dos dados do sonar com alcance de 10 metros foi executado o algoritmo de votação e obteve-se um novo resultado que é mostrado na figura 6.8 juntamente com o resultado mostrado na seção 6.2.2 que foi obtida com o filtragem dos dados do sonar por meio de um detector de picos.

Como foi observado na seção 6.2.2, o resultado obtido com o filtro inicial ficou muito mais perto do que deveria de uma das paredes assim uma melhora na localização seria observada se ela ficasse mais afastada da parede. Como não se tem dado reais da localização exata da plataforma de teste, essa característica pode ser usada para avaliar a nova filtragem realizada nos dados do sonar. Podemos observar da figura 6.9 que houve essa melhora esperada. Para uma melhor visualização da melhora do uso dos filtros nos dados do sonar foram feitas imagens dos votos

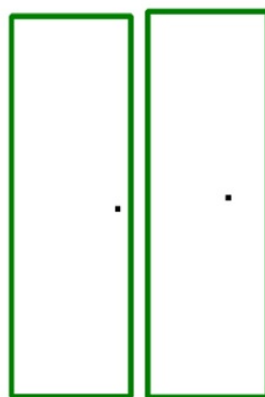


Figura 6.9: Comparação do resultado do algoritmo entre os dados não filtrados e os dados filtrados

6.2.4 Validação do algoritmo de votação

Nos primeiros testes realizados com o algoritmo de votação mostrados na seção 6.2.2, a preocupação era comparar o posicionamento da plataforma para diferentes alcances do sonar, não se preocupando com a exatidão do posicionamento obtida nesses testes. A partir desses testes chegou-se a conclusão de que o melhor posicionamento foi obtido com um alcance de 10 metros, com isso foi necessário obter uma validação mais precisa do algoritmo de votação com esse alcance. Então para se fazer essa validação optou-se por comparar o resultado obtido pelo algoritmo de votação com a medição da posição da plataforma de testes feitas por meio de uma trena. Com esse intuito a plataforma de teste foi posicionada em quatro posições diferentes do tanque e foram tiradas as medidas de cada uma dessas posições utilizando uma trena, assim como também foram feitas coletas de imagens do sonar de cada uma delas para que se fosse possível executar o algoritmo de votação. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 juntamente com as tabelas 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3 e 6.2.4. Nessa imagens foram colocadas para cada posição a imagem do tanque obtida pelos dados do sonar, a posição obtida pelo algoritmo de votação e o espaço de votação resultante desse posicionamento. Para se poder discutir os resultados obtidos nessa seção tem que ser considerado que o sonar de varredura mecânica com a configuração para um alcance de 10 metros, fornece uma resolução de 12,5 milímetros.

| Primeira Posição | Valor Medido (m) | Algoritmo de Votação (m) | Erro (m) |
|------------------|------------------|--------------------------|----------|
| x | 3,54 | 3,44 | 0,1 |
| y | 7,20 | 7,60 | 0,4 |
| Segunda Posição | Valor Medido (m) | Algoritmo de Votação (m) | Erro (m) |
| x | 2,9 | 2,73 | 0,17 |
| y | 9,67 | 10,26 | 0,59 |

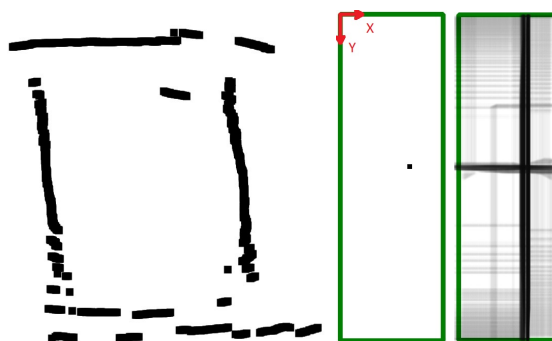


Figura 6.10: Resultados da primeira posição

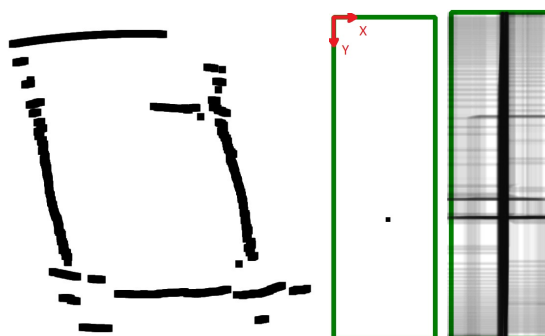


Figura 6.11: Resultados da segunda posição

| Terceira Posição | Valor Medido (m) | Algoritmo de Votação (m) | Erro (m) |
|------------------|------------------|--------------------------|----------|
| x | 1,08 | 1,21 | 0,13 |
| y | 10,83 | 11,35 | 0,52 |
| Quarta Posição | Valor Medido (m) | Algoritmo de Votação (m) | Erro (m) |
| x | 1,87 | 1,87 | 0 |
| y | 7,0 | 7,25 | 0,25 |

Observando as figuras 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 e as tabelas 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3 e 6.2.4 pode-se concluir que se obteve um melhor posicionamento da plataforma na direção x do que na direção y . Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que na direção

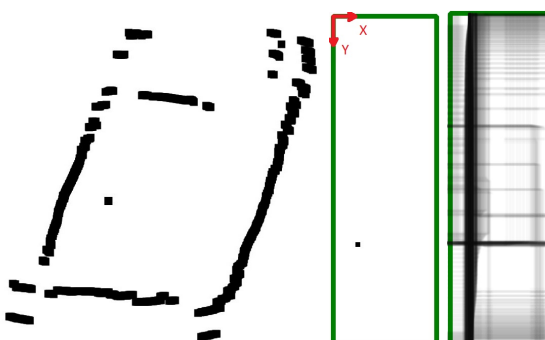


Figura 6.12: Resultados da terceira posição

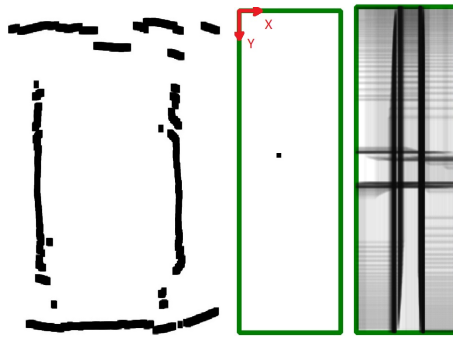


Figura 6.13: Resultados da quarta posição

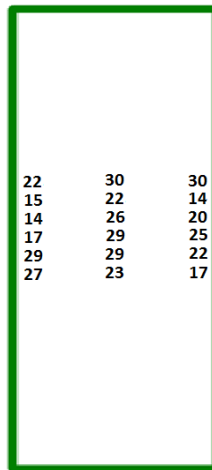
y o tanque tem uma praia como comentado na seção 4.1 que distorce os contornos do tanque como pode ser observado das figuras 6.11 e 6.12. Podemos concluir também que a imagem obtida pelos dados do sonar na quarta posição é a imagem que melhor representa os contornos do tanque e observando os resultados obtidos do algoritmo de votação percebemos que essa posição é a posição em que se obteve um melhor posicionamento pelo algoritmo. Já o prior caso obtido pelo algoritmo de votação foi obtido na segunda posição que observando a figura 6.11 foi o caso em que se teve maior influência da praia existente no tanque. Por último, podemos concluir desses resultados que com esse algoritmo de votação e utilizando a filtragem proposta em 4 conseguiu-se na média uma precisão de posicionamento de 10 centímetros na menor dimensão do tanque e de 44 centímetros na outra. Apesar do erro ter dado muito maior do que a resolução permitida pelo sonar, esse resultado pode ser considerado satisfatória frente a ao objetivo do algoritmo que a localização de um veículo do tipo ROV.

6.2.5 Correção dos distúrbios no magnetômetro

Nesse projeto um dos sensores utilizados para realização da navegação é um magnetômetro e como o objetivo do projeto é fazer a navegação em ambientes semi estruturados, considerou-se que esse tipo de ambiente possa conter materiais ferromagnéticos e que causariam distúrbios no magnetômetro. Por isso foi proposto nesse trabalho uma solução para lidar com possíveis erros nos valores de rumo obtidos pelo magnetômetro (Seção 3.3). Então nessa etapa do trabalho foram realizados testes para verificar o funcionamento dessa solução. Como o local escolhido para realização de testes desse trabalho, apresenta ao seu redor vários fatores que influenciam no magnetômetro, esse local também foi propício para a realização desse tipo de teste.

A solução proposta na seção 4.3 para esse problema considera uma faixa que engloba os possíveis valores de erros causados pelos distúrbios no magnetômetro, assim o algoritmo de votação é executado para alguns valores desse intervalo, ou seja, mesmo

que o magnetômetro apresente algum erro em sua medição esse intervalo conterá o valor certo. Então primeiramente para verificar o tamanho desse intervalo de erro, foi realizado um mapeamento magnético da parte do tanque que foi relevante para os testes do sistema de navegação. Esse mapeamento foi realizado movendo-se a plataforma de teste em diferentes posições do tanque mantendo a sua orientação constante e fazendo a leitura do magnetômetro para cada uma dessas posições. O mapeamento é mostrado na figura 6.14. Dessa figura pode-se observar que na região mapeada o máximo desvio do magnetômetro foi de 15 graus.



| | | |
|----|----|----|
| 22 | 30 | 30 |
| 15 | 22 | 14 |
| 14 | 26 | 20 |
| 17 | 29 | 25 |
| 29 | 29 | 22 |
| 27 | 23 | 17 |

Figura 6.14: Variações do magnetômetro causados por materiais ferromagnéticos localizados ao redor do tanque

Com base nesse mapeamento foi escolhido para a solução proposta na seção 3.3 um intervalo de erro do magnetômetro de $[-5, +5]$ graus. Essa escolha não foi baseada só no máximo desvio do magnetômetro encontrado, mas também na carga de processamento que está relacionada ao aumento desse intervalo que por sua vez está relacionado com um maior tempo de execução. Para se verificar o funcionamento dessa solução foi realizado um teste em que a plataforma foi transladada de uma certa distância e rotacionada de um certo ângulo dentro do tanque e foram coletados os dados do sonar e do magnetômetro das posições de início e fim do movimento. A variação obtida pelo magnetômetro de uma posição para a outra foi de 47° . Com os dados coletados pelo sonar primeiramente foram geradas imagens do tanque com intuito de se obter a rotação exata da plataforma de uma posição para a outra. A figura 6.15 mostra as imagens geradas para descobrir a variação da orientação da plataforma.

Com os resultados da figura 6.15, obteve-se uma variação de 44° , o que mostra que a medição do magnetômetro apresentou erros. Efetuando o algoritmo de votação para as duas posições chegou-se a uma variação de 44° o que prova o funcionamento da solução escolhida para corrigir os distúrbios no magnetômetro.

Um outro ponto relevante sobre essa solução escolhida para corrigir os distúrbios

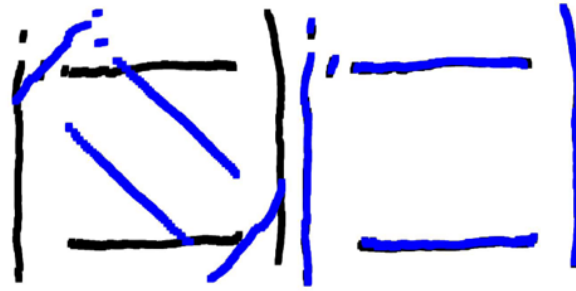


Figura 6.15: Verificação da real variação da orientação por meio gráfico

no magnetômetro é que como o cálculo para determinação da posição para cada valor de rumo é independente do cálculo dos outros valores e também como o espaço de votação pode ser segmentado, essa solução é facilmente paralelizada possibilitando uma maior eficiência do algoritmo.

6.3 Conclusão

Nesse capítulo foram obtidos resultados com relação ao funcionamento do algoritmo de votação proposto em 3 que consiste no sistema de navegação proposto nesse trabalho. Primeiramente descobriu-se qual a melhor configuração de alcance para o sonar de varredura mecânica para a obtenção de melhores resultados do algoritmo de votação. Depois, comprovou-se a melhora no resultado desse algoritmo utilizando a filtragem na imagem do sonar proposta em 4. Para validar o algoritmo de votação foram realizados testes que indicaram uma precisão da localização desse algoritmo no posicionamento da plataforma de teste. Ao final obteve-se resultados que mostraram o funcionamento da solução proposta em 3.3 para lidar com distúrbios no magnetômetro.

7 Conclusão

Neste trabalho foram mostrados o conteúdo necessário para se obter a localização de um veículo submarino não tripulado em um ambiente que tenha geometria simples, conhecida e pouco mutável, ou seja, um ambiente semi estruturado utilizando um sonar de varredura mecânica e um magnetômetro. Foram obtidos resultados que mostraram a eficiência do método de localização, assim como algumas de suas deficiências.

APÊNDICE A – Especificações do sonar de varredura mecânica

A.1 Descrição

A seguir serão mostrados alguns dados do sonar de varredura mecânica que será utilizado nesse trabalho que é o sonar Micron DST da fabricante Tritech. Dados obtidos de (13).

Tabela 1 - Especificações do Micro DST sonar

| | |
|---------------------------------|-----------------------|
| Frequência de operação | entre 650kHz a 750kHz |
| Largura vertical do feixe | 35° |
| Largura horizontal do feixe | 3° |
| Intervalo de alcance | 2 a 75 metros |
| Campo de varredura | 360° |
| Potência | 12V-50V @ 4VA |
| Comunicação | RS232 |
| Diâmetro máximo | 56 mm |
| Comprimento máximo | 78.5 mm |
| Peso no ar | 324g |
| Peso na água | 180g |
| Máxima profundidade de operação | 750 m |

Bibliografia

- 1 CHRIST, R. D.; SR, R. L. W. *The ROV Manual: A User Guide for Observation Class Remotely Operated Vehicles*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2007.
- 2 RIBAS, D.; RIDAO, P.; NEIRA, J. *Underwater SLAM for Structured Environments using an imaging sonar*. [S.l.]: Springer, 2010.
- 3 KONDO, H.; URA, T. Navigation of an auv for investigation of underwater structures. 2003.
- 4 BARSHAN, B.; DURRANT-WHYTE, H. F. Inertial navigation systems for mobile robots. 1995.
- 5 ZHAO, L.; GAO, W. The experimental study on gps/ins/dvl integration for auv. 2008.
- 6 MANDT, M.; GADE, K.; JALVING, B. Integrating dgps-usbl position measurements with inertial navigation in the hugin 3000 auv. 2000.
- 7 TUOHY, S. T.; LEONARD, J. J.; BELLINGHAM, J. G.; PATRIKALAKIS, N. M.; CHRYSSOSTOMIDIS, C. Map based navigation for autonomous underwater vehicles. 1996.
- 8 LUCIDO, L.; OPDERBECKE, J.; RIGAUD, V.; DERICHE, R.; ZHANG, Z. A terrain referenced underwater positioning using sonar bathymetric profiles and multiscale analysis. 2004.
- 9 JOHANSSON, H.; KAESSE, M.; ENGLLOT, B.; HOVER, F.; LEONARD, J. Imaging sonar-aided navigation for autonomous underwater harbor surveillance. 2003.
- 10 HORTON, J. W. *Fundamentals of sonar*. [S.l.]: Wiley, 2007.
- 11 BALLARD, D. H. Generalizing the hough transform to detect arbitrary shapes. 1980.
- 12 GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Processamento de imagens digitais*. [S.l.]: Edgard Blucher, 2000.
- 13 Tritech International Limited. *Tritech Micron DST Sonar Datasheet*. [S.l.], June 2011. Disponível em: <<http://www.tritech.co.uk/products/datasheets/micron-dst.pdf>>.