

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

Planejamento de Trajetórias
Tridimensionais para Veículos Aéreos Não
Tripulados

Elda Nunes de Carvalho

Manaus – AM
2013

RESUMO

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) têm sido alvo de pesquisas para aplicações onde haja situações de risco à integridade da tripulação. Um grande esforço tem sido feito para aumentar a autonomia desses veículos ao realizar esse tipo de missão. Bons resultados têm sido alcançados na área militar, entretanto, aplicações relevantes no domínio civil ainda permanecem um desafio, por falta de bons investimentos para seu desenvolvimento e de regulamentação específica. No entanto, em algumas situações, a falta de pilotos a bordo torna a execução da missão uma tarefa não trivial. Um exemplo disso são missões realizadas sobre ambientes com em constante ameaça, pois essas ameaças que pode ser um obstáculo fixo ou móvel poderá atingir o veículo e impedir o cumprimento da missão, gerando perdas e prejuízos ao andamento da missão. Este trabalho objetiva a construção de um planejador de trajetória para um VANT com a missão de encontrar uma rota segura para que o veículo possa navegar com segurança dentro de um determinado ambiente, levando em conta algumas de suas principais restrições físicas de movimento.

Palavras-Chave

Planejamento de trajetória, mapa do ambiente, veículos aéreos não tripulados (VANT).

SUMÁRIO

1 Introdução.....	6
2 Revisão Bibliográfica.....	11
3 Metodologia	13
4 Resultados Preliminares.....	17
5 Considerações Finais.....	22
6 Cronograma de Atividades.....	22
Referências Bibliográficas.....	24

Lista de Figuras

Figura 1: Modelo de um VANT de asa fixa. Os graus de liberdade são três rotações e duas translações.....	9
Figura 2: Diagrama esquemático de um modelo de planejador de trajetória.....	14
Figura 3: Representação de uma matriz 3D de tamanho 3x3x3.....	19
Figura 4: Coordenadas de passos possíveis geradas pelo algoritmo usando uma matriz 3D de tamanho 3x3x3.....	19
Figura 5: Gráfico que simula a trajetória gerada pelo veículo.....	20
Figura 6: Matriz 3D de tamanho 10x10x10.....	21
Figura 7: Coordenadas de pontos que geram a trajetória.....	22
Figura 8: Trajetória gerada pelas coordenadas de saída da matriz 10x10x10.....	22

Lista de Termos, Abreviaturas e Siglas.

IFR – Regras de Voo por Instrumentos

GNSS – Sistemas Globais de Navegação por Satélite

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

VFR – Regras de Voo Visual

1 Introdução

O problema abordado neste projeto de pesquisa é sintetizado por meio da seguinte pergunta: Como obter uma trajetória segura para um veículo aéreo não tripulado que satisfaça os requisitos da missão?

Na aviação civil a definição de trajetória é feita por meio do plano de voo, documento específico que contém informações relacionadas com um voo planejado de uma aeronave ou com parte do mesmo que são fornecidas aos órgãos que prestam serviços ao tráfego aéreo. Envolve basicamente dois pontos principais de segurança: o cálculo do consumo de combustível e a concordância do plano com o controle de tráfego aéreo, para minimizar as possibilidades de colisão em pleno voo [Furtado 2008].

Neste trabalho, a questão está relacionada com o planejamento de voo de um Veículo Aéreo Não Tripulado, ou VANT. Essas aeronaves são sistemas robóticos cuja locomoção ocorre no espaço aéreo por meio de empuxo aerodinâmico, como os aviões ou helicópteros, ou por meio da flutuação, como os dirigíveis.

O uso de aeronaves não tripuladas está aumentando devido ao grande número de aplicações e serviços potenciais oferecidos por este tipo de veículo, principalmente quando aplicados a tarefas que colocam em risco a vida humana ou que apresentem custo elevado, quando realizada por meios convencionais. Seu campo de aplicação estende-se de domínios militares à civis, na execução de diferentes tipos de missões. Quando se considera o VANT em aplicações civis, há um grande escopo de cenários possíveis para sua utilização, por exemplo: pesquisa ambiental remota, monitoração e certificação de poluição, gerenciamento de queimadas, segurança, monitoração de fronteira, oceanografia, agricultura e aplicações de pesca. Em geral, todas estas aplicações podem ser divididas em quatro grandes grupos: aplicações ambientais, aplicações de segurança, aplicações de comunicação e aplicações de monitoramento e vigilância [Pastor 2007].

Na sua forma mais simples, os VANT's podem ser operados remotamente, ou seja, controlados à distância por um operador humano, o tempo todo, para desempenhar determinada tarefa. Atualmente, a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico para essa classe de veículos robóticos enfocam o aspecto da execução autônoma de atividades que são

atribuídas a esses sistemas. Para esse funcionamento autônomo, o sistema robótico deve perceber a sua própria situação e aquela do ambiente onde ele evolui, toma decisões de maneira independente e movimenta-se para cumprir a missão que lhe foi atribuída, sem precisar da dependência constante de um operador humano, ou então agindo em cooperação com esse operador [Bueno 2005]. Para um VANT, o planejamento de voo deve garantir não só uma rota segura, mas também estabelecer que essas rotas observem as exigências impostas por meio das condições internas e externas da aeronave, além, claro, do cumprimento efetivo da missão [Lentilhac 2010; Naldi 2010].

Quando os VANT's são empregados para missões de monitoramento ou cobertura de grandes regiões, por exemplo, sua operacionalização consiste basicamente em decolar, voar seguindo rota e altitude pré-determinadas, chegar a um ou mais pontos de controle e sobrevoá-los a altitudes e tempo pré-programados, transmitir as informações de sinais e imagens captadas, deslocar-se até o ponto de recolhimento e pousar em segurança [LiXia 2009; Wu 2011].

Nos sistemas autônomos, planejar uma trajetória consiste em encontrar caminhos livres de colisão em um ambiente estático ou dinâmico [Chan-Wook Lin 2010; Hao Meng 2010; Karimoddini 2010]. No caso dos VANT's também deve-se levar em consideração as condições internas e externas da aeronave. Compreende-se como condições internas, os fatores que dependem da aeronave, tais como: as velocidades nas quais pode ser operada; o consumo específico do combustível; a capacidade máxima de combustível a bordo. As condições externas compreendem: fatores meteorológicos; o relevo da área sobrevoada; e a existência de zonas de exclusão [LiXia 2009; Naldi 2010].

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um planejador de trajetória segura para veículo aéreo não tripulado. Para o planejamento da trajetória, deve-se levar em conta a autonomia e segurança do voo em missões de monitoramento e vigilância de regiões amplas e esparsas, típicas da região amazônica. O planejador deverá levar em consideração também todas ou a maior parte das possíveis interferências que podem interferir na trajetória do VANT, objetivando prevenir tragédias e reduzir os custos da missão do veículo. A trajetória é descrita por uma curva tridimensional que descreve todo o percurso, levando em consideração para o seu traçado as características dinâmicas e cinemáticas da aeronave.

Neste trabalho considera-se que o VANT é uma aeronave de asa fixa, movida a empuxo aerodinâmico, com 3 graus de liberdade, de porte pequeno a médio (envergadura

entre 1,00 e 2,00m). VANT's desse tipo voam em ambiente ao ar livre (outdoor), e são, em geral, lançados manualmente com pouso controlado. A Figura 1 ilustra um modelo de VANT.



Figura 1. Modelo de um VANT de asa fixa. Os graus de liberdade são três rotações e uma translação. [Fonte: PORTAL VANT].

A principal contribuição deste trabalho é prover o sistema autônomo de um plano de voo exequível como alternativas a eventuais problemas que possam comprometer o objetivo da missão, levando em conta menor caminho possível. A abordagem a ser desenvolvida tem por objetivo dotar de um planejamento seguro sem comprometer a segurança do voo visando à eficiência da missão em um ambiente grande, dinâmico e incerto ao ar livre.

1.1 Justificativa

O planejamento de voo na aviação comercial é comumente feito por meio de cartas eletrônicas para navegadores GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite) portáteis, como os populares Garmin 496, 695 e 696. Essa abordagem é feita como meio suplementar de navegação para voos VFR (em condições visuais), sendo utilizadas preponderantemente nos voos IFR (por instrumentos). Embora essas cartas não sejam geradas por meio de um sistema planejador, seu uso já habilita as aeronaves modernas ao voo praticamente autônomo. Por outro lado, muito do desenvolvimento na área de VANT's está focado no próprio desenho da aeronave, sua manobrabilidade e sua dinâmica de operação, deixando uma ampla lacuna tecnológica no que diz respeito ao emprego de técnicas que permitam aos VANT's planejarem e agirem de forma verdadeiramente autônoma.

Unir as restrições impostas pela missão com os fatores dependentes da aeronave para a geração de planos de voo é um desafio importante e que habilitará os VANT's a

desenvolverem com mais eficiência a execução da missão. Trabalhos recentes tratam esse aspecto de forma desassociada, enfatizando, na maioria dos casos, a captura de informações e o planejamento de voo [Chan-Wook Lin et al., 2010] ou ainda as restrições impostas pela aeronave, sensores ou fatores externos e internos envolvidos no voo [Lentilhac 2010; Naldi 2010; Wu 2011].

Ao associarmos esses conjuntos de restrições em um planejador capaz de definir rotas ótimas sob as condições impostas pela missão com os fatores determinantes do voo é a principal justificativa deste projeto de pesquisa. Esse planejador será integrado à arquitetura do sistema de controle do VANT, garantindo assim um largo passo no desenvolvimento do sistema verdadeiramente autônomo.

1.2 Motivação

De acordo com [Pastor 2007], o controle da missão, o planejamento de trajetórias de voo e da carga útil são os principais gargalos que podem impedir o desenvolvimento real de VANT's no setor civil. Os VANT's militares usam projetos de controle específicos, especialmente sob medida para a missão de monitoramento e vigilância que eles devem executar. No entanto, um VANT civil deveria ser capaz de implementar uma grande variedade de missões com um pequeno tempo de reconfiguração, caso a aplicação tenha a necessidade de ser economicamente viável.

Planejar trajetórias é um problema desafiador para o desenvolvimento de veículos aéreos não tripulados realmente autônomos [Qu, 2005]. A segurança na trajetória deve ser garantida para a sobrevivência dos VANT's, não importando o tipo de sua missão. Esse fato motivou o desenvolvimento de um planejador de trajetórias segura para o voo levando em conta as restrições impostas pela missão, gerando rotas que possa facilitar a negação do veículo em ambiente pré-definido.

O planejamento de trajetória não seguras dificulta o planejador da missão em tratar ocorrências que comprometam não só o voo, como também a execução das tarefas que compõem a missão. Os danos causados por falhas no voo podem levar, no pior dos casos, a perda do total do veículo, gerando um alto custo. Sistemas com o planejamento de trajetórias viabilizam o melhor controle da missão evitando, entre outros problemas, a perda da

conexão entre o controle local e o controle da missão, o voo às escuras e o não cumprimento integral da missão propriamente dita.

1.3 Objetivos

Para melhor compreensão dos objetivos desta proposta, os mesmos estão divididos em geral e específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um planejador de trajetórias no espaço tridimensional para veículo aéreo não tripulado que atenda as restrições imposta pela missão com os fatores de voo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Prover um VANT de um sistema de planejamento inteligente capaz de gerar rotas que viabilizem o cumprimento da missão;
- b) Integrar o planejamento do voo com as restrições da missão e do voo;
- c) Dotar o sistema da capacidade de se planejar frente às condições internas e externas do VANT;
- d) Avaliar o planejador sob diferentes condições de controle simulado e experimental.

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho é constituído por quatro seções, onde a Seção 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre os conceitos e técnicas necessárias para o desenvolvimento de sistemas planejadores de trajetórias para VANT's. Na Seção 3 é apresentada a metodologia para desenvolvimento do trabalho. A Seção 4 mostra alguns resultados parciais obtidos por meio de simulação para a obtenção de uma trajetória tridimensional. Algumas considerações sobre trabalhos futuros estão desenvolvidas na Seção 5 juntamente com as considerações finais. Por fim, a Seção 6 apresenta o cronograma de atividade do projeto de pesquisa.

2 Revisão Bibliográfica

Em [LiXia 2009] foi proposto e simulado um planejador de trajetória para VANT que navega em baixa altitude, considerando um mapa de navegação seguro em um ambiente de perigo constante, a tarefa principal é gerenciar as informações do ambiente no que diz respeito ao tipo de ameaças, para isto utilizou-se uma heurística melhorada do algoritmo A*. Os resultados obtidos nesse trabalho foram analisados por meio de simulações, que pode apresentar resultados divergentes quando aplicado em ambientes reais.

No trabalho de [Lentilhac 2010] é proposto um planejador de navegação segura considerando uma cooperativa de VANT's levando em conta a distância mínima de um veículo para outro com as restrições do limite obtido por sensores. Os resultados são satisfatórios principalmente em ambiente de guerra, pois no espaço de navegação conta com o auxílio de vários veículos que trabalham de maneira cooperativa para colher o máximo de informações possíveis do ambiente navegado. Para que as aeronaves possam navegar, o trabalho utilizou algoritmo genético, que traça o caminho seguro para navegação dos veículos. Por trata-se de um trabalho de cooperação de VANT's os resultados tende a ser o mais eficiente possível. Para construir um plano de voo o trabalho foi dividido em duas etapas, a primeira trata do algoritmo que calcula um plano de voo conectando dois pontos no espaço considerando o ambiente e as características dos veículos. A segunda etapa é a tomada de decisão para a escolha correta do trajeto no espaço de navegação, o algoritmo calcula o plano de voo para que o VANT possa navegar, tanto quanto possível em altitude de cruzeiro e com velocidade máxima de confiabilidade. Um problema encontrado nesse trabalho é a limitação dos sensores. Uma vez que o sistema cooperativo trabalha com um número de VANT's desconhecidos, as informações percebidas pelas aeronaves limitam-se a cobertura dos sensores, necessitando de vários veículos para que a informações sejam satisfatória.

O planejamento de trajetória foi tratado em [Qu 2005] utiliza duas abordagens principais: a primeira usa um algoritmo genético e campos potenciais ideais para planejamento de trajetória off-line; a segundo abordagem usa o diagrama de Voronoi para encontrar o caminho mínimo dos pontos e da heurística de busca do algoritmo A*. Neste artigo, a questão do planejamento de trajetória é desenvolvida para operar um VANT em ambiente hostil.

Em [Zhang 2010] apresenta um novo método de planejamento de trajetória para VANT baseado em otimização de colônia de formigas. Este método estuda o comportamento natural das formigas em busca de alimentos, adequado para resolver problema de planejamento de caminho, pois planejar trajetória para VANT é tratado como um problema de otimização discreta.

O planejamento de trajetória foi tratado em [Naldi 2010] para aeronaves da classe V/STOL minimizando o tempo entre dois pontos de localização. Para definir uma trajetória para esta classe de veículo devem ser consideradas duas condições possíveis de voo: o voo pairado e o voo nivelado. O voo pairado é caracterizado por valores pequenos de velocidade, de maneira que as forças mais relevantes que atuam sobre o veículo são dadas pelo impulso da hélice e a força da gravidade, enquanto que voo nivelado à velocidade deve ser suficientemente grande, de maneira que a aeronave seja controlada através das forças aerodinâmicas.

Em [Meng 2010] o planejamento de trajetória para VANT é baseado no algoritmo genético recozimento simulado. Este algoritmo é usado para planejar pista de voo de VANT em superfície. No algoritmo o mapa de elevação digital é planejado considerando superfície com pequena ameaça, para obter uma superfície mais suave para o voo, planejamento do mapa é feito em quatro direções em seguida utiliza o algoritmo genético recozimento simulado para planejar as rotas tridimensionais na superfície de ameaça mínima.

No trabalho de [Lim 2010] foi proposto um algoritmo de planejamento de caminho para vigilância de VANT's com missão de restrição de tempo. O caminho gerado é sub-otimo em relação ao tempo de voo, pois neste trabalho o VANT deve observar os alvos dentro do intervalo de tempo, os pontos de observação que definirá a trajetória do voo. Algumas restrições da missão devem ser adotadas como a altura e a velocidade que o veículo possa operar para que não ocorra colisão com o terreno. Para o planejamento de trajetória foi utilizado algoritmos de planejamento de trajetória com lógica de segmentos para observação do terreno que foram gerados pela sequência de observação que satisfaz as restrições de tempo. E cada segmento foi conectado por curva Dubins que mostra o caminho final gerado.

3 Metodologia

Para o desenvolvimento de um planejador de trajetória para VANT, existem algumas etapas de implementação que precisam ser bem definidas para que o planejamento de trajetória satisfaça um problema proposto inicialmente, que é encontrar o melhor caminho tendo como partida um ponto x e chegada em um determinado ponto y , de maneira que esta rota de navegação do VANT seja a mais segura possível.

Baseado na metodologia de desenvolvimento de planejador de trajetória descrita em [Vachtsevanos 2005], a proposta inicial deste trabalho de pesquisa demonstrada na Figura 2, representa um diagrama esquemático do modelo de um planejador, com as definições de cada etapa a ser desenvolvida até gerar um planejador de trajetória com rotas seguras.

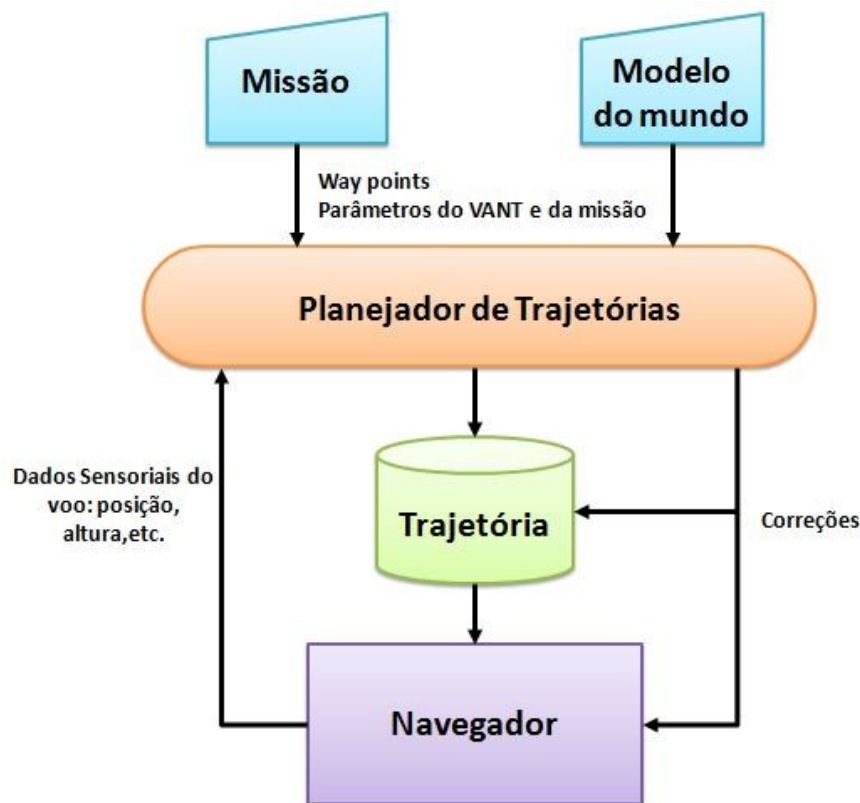


Figura 2. Arquitetura dos procedimentos.

Atualmente, a pesquisa e desenvolvimento em veículos aéreos não tripulados enfocam os aspectos de execução autônoma de atividades atribuídas a esses veículos. Para este funcionamento autônomo, o sistema de planejamento de caminho deste tipo de veículo deve perceber a sua própria situação e aquela do ambiente onde ele navega além de tomar

decisões de maneira independente e movimentar-se para cumprir a tarefa que lhe foi atribuída, sem precisar da dependência constante de um operador humano, ou então agindo em cooperação com esse operador. A estrutura hierárquica adotada na metodologia da Figura 2 é descrita detalhadamente a seguir.

3.1 Missão

Cada vez mais vêm sendo destacado a utilidade dos VANT's tanto para fins militares e aplicações civis, normalmente, tarefas básicas executadas por um robô necessitam de uma representação do ambiente para serem executadas. Supondo, por exemplo, que um robô deve planejar uma trajetória para se locomover de sua posição atual até uma posição de destino. Nesse caso, um mapa do ambiente é fundamental para que o caminho mais eficiente seja encontrado.

As tarefas que os VANT's (ou um grupo coordenado de VANT's) podem cumprir depende do tipo de operação que pode ser de uso civil ou militar, e que poderá cobrir diferentes áreas de aplicação, tais como: reconhecimento tático, apoio operacional e execução de missões em atividades militares; patrulhamento e monitoração das regiões remotas, fronteiras e áreas costeiras; segurança e apoio policial; busca e salvamento; operação em zonas de perigo ou de desastres; mapeamento; prospecção mineral e arqueológica; levantamento de uso da terra em regiões rurais e urbanas para diagnóstico e planejamento; observação e contagem de rebanhos; detecção de incêndios e suporte à sua extinção; pesquisa ambiental e do clima, incluindo composição atmosférica e qualidade do ar, monitoração e avaliação de reservas florestais, manguezais áreas marítimas; a inspeção de estruturas tais como os oleodutos, linhas da transmissão, represas e estradas; monitoração e controle de transportes; telecomunicações e serviços da transmissão; outra aplicação robótica que normalmente necessita de um mapa é a localização, que consiste em estimar a posição de um robô em um ambiente previamente conhecido.

Portanto, dependendo do tipo de missão que o VANT irá cumprir, poderá implicar diretamente no planejamento de sua trajetória e consequentemente no bom andamento da missão. Na definição do tipo de missão que o VANT irá desenvolver se estabelece os pontos de navegação (waypoints) que são coordenadas importante no mapa de navegação por onde o veículo possa navegar, uma vez que este mapa e as coordenadas foram definidas tem um modelo do mundo e a partir de então planejar as suas possíveis rotas.

3.2 Modelo do Mundo

Para que o VANT possa cumprir uma determinada missão deverá existir um ambiente de navegação, ou seja, o modelo do mundo. O levantamento de dados sobre o ambiente e a consequente construção de mapas (criação de uma representação do ambiente onde está inserido o veículo) é um problema de estimação que consiste em uma tarefa fundamental para o desenvolvimento de robôs móveis autônomos. Dentro deste ambiente o VANT deverá ter autonomia para ser capaz de: conhecer o ambiente de navegação que envolve o conhecimento prévio de toda a área a ser sobrevoada, a identificação dos obstáculos mapeando todo o ambiente como área ocupada e área livre, traçando uma rota segura entre as áreas livres desviando assim dos obstáculos, procurando sempre a melhor rota a fim de favorecer o cumprimento da missão.

O cumprimento da missão para que tenha êxito depende de um plano de voo com coordenadas de rotas bem definidas, para uma navegação segura dentro de um mapa de navegação, os waypoints são conhecidos e delimitados, e logo extraídas as coordenadas que gere uma rota segura de navegação dentro deste espaço. Utilizando o mapa, o robô verifica os possíveis caminhos que levam até a posição desejada e os obstáculos que devem ser evitados [Thrun 2005].

O modelo do mundo que trata este projeto de pesquisa é um mapa 3D discretizado de tamanho limitado e conhecido do veículo, pois faz parte do plano de voo. No espaço tridimensional a geometria dos objetos estende-se arbitrariamente. A cada nova interação do VANT é preciso conhecer o modelo do mundo antes de navegar.

3.3 O Planejador de trajetória

Segundo [LiXia 2009] planejamento de trajetória é um problema de otimização complexo multi-objetivo, que pode ser resolvido com uma solução satisfatória ou viável em vez de uma solução ótima.

Planejamento de trajetória consiste em encontrar pontos livres num espaço tridimensional, neste espaço que VANT vai navegar assim que uma rota for definida. Estes pontos são definidos geometricamente através de um algoritmo de busca que trabalha com uma função de navegação esta navegação ocorre por meio do uso de um mapa é possível planejar ações de alto-nível, como definir previamente uma trajetória a ser executada pelo

veículo, especificando as ações elementares a serem realizadas de modo a se deslocar de uma posição-origem até uma posição-alvo;

Para desenvolver um planejador geralmente são necessários conhecimentos matemáticos e algorítmicos não triviais para construir um planejador de trajetórias razoavelmente geral e confiável. Dentro do contexto da navegação, é necessário que o robô saiba com precisão sua localização dentro do ambiente para que o mesmo possa determinar uma trajetória até o ponto de destino.

O problema de planejamento de trajetórias pode abranger diversos aspectos como o planejamento de movimentos entre obstáculos móveis, coordenação do movimento de vários veículos, e consideração de modelos físicos. Portanto, planejamento trajetória pode englobar a consideração de restrições geométricas, além de restrições físicas e temporais.

3.3.1 Heurísticas

A metodologia usada para o desenvolvimento de trajetória para o VANT neste experimento inicial foi o método do algoritmo A*, dado um mapa de navegação, no caso uma matriz 3D a qual seria a definição do espaço de navegação onde o veículo possa se locomover para cumprimento da missão recebida, neste mapa é definido o ponto de partida e chegada do VANT. Para completar o percurso existem várias opções de caminhos que o veículo pode seguir até chegar ao alvo, com a ajuda do algoritmo A* ele busca a melhor solução entre os caminhos oferecidos a fim de cumprir a missão no menor percurso possível e com segurança.

Os obstáculos também são delimitados no espaço tridimensional além de chegar ao destino final o veículo precisa chegar com segurança por isso é preciso identificar e desviar dos obstáculos encontrados, navegando sempre em ambiente seguro, decidindo qual a melhor rota a seguir para o cumprimento da missão definida, caso haja qualquer interferência.

O algoritmo A* é uma técnica utilizada para planejamento de trajetória que sempre procura fazer a melhor escolha entre as opções de rotas que estiver disponível, essa técnica de planejamento é conhecida como uma técnica de planejamento discreto e também é considerada pela literatura bastante simples por que os veículos considerados nesses casos são representados por modelos geométricos simples (pontos no espaço) e não existe a

necessidade de equações diferenciais ou de modelos matemáticos complexos para descrever seu comportamento.

3.4 Trajetória

O problema da navegação em robótica consiste em controlar o deslocamento do robô de uma posição inicial até uma posição de destino. Este tipo de tarefa envolve diferentes técnicas, como exemplo, o planejamento de uma trajetória e a execução da navegação utilizando um mapa previamente disponibilizado do ambiente, que deve incluir mecanismos para evitar colisões, incluindo o desvio de obstáculos e o tratamento de situações imprevistas.

A trajetória é o resultado final das etapas que inclui um sistema para desenvolver trajetórias para VANT's, ou seja, um planejador de rotas de navegação por onde o VANT possa navegar com segurança. Uma vez definida a tarefa a ser realizada pelo VANT, é possível estabelecer um plano de ações, que pode ser composto da execução de sub-tarefas mais elementares, como por exemplo: explorar o ambiente; seguir uma parede ou corredor até o seu final, se deslocar em uma direção-alvo desviando de obstáculos, recolher objetos, seguir um comboio, patrulhar uma área, etc, essas tarefas são executadas seguindo um plano de trajetória na qual diz as rotas viáveis para que a mesma seja cumprida.

3.5 Navegador

Navegação robótica tem a capacidade de executar as ações planejadas de modo robusto, como por exemplo, executar o deslocamento de uma posição-origem até uma posição-alvo, realizando os devidos ajustes durante o deslocamento para evitar a colisão com obstáculos. A navegação robótica é a execução do plano de trajetórias e ações previamente definido;

O planejamento somente pode ser feito com base em um horizonte limitado de informações sobre o ambiente (já que o conhecimento acerca dele é adquirido aos poucos) e como resultado dessas informações temos o navegador que é o sistema que orienta a navegação segura.

4 Resultados Preliminares

Como proposta para uma atividade de experimentação foi implementado o algoritmo heurístico de busca A*, usando o compilador DevC, na atividade foi criada uma matriz 3D

(x,y,z) quadrada , o algoritmo gera as coordenadas que indicam o caminho mais curto e seguro para o veículo navegar. Abaixo uma representação de uma matriz [x][y][z].

```

{{1, 1, 1},{1, 1, 1}, {3, 1, 1}},
{{1, 1, 1},{1, 1, 1}, {9, 9, 9}},
{{1, 1, 2},{9, 9, 9}, {9, 9, 9}}

```

Figura 3. Representação de uma matriz 3D de tamanho 3x3x3.

Onde:

- 1: Células livres, por onde o VANT possa navegar;
- 3: VANT;
- 9: Obstáculos que impendem a trajetória do VANT e;
- 2: Destino final do veículo.

O algoritmo A* gera uma coordenada de passos que indicam o melhor caminho para o VANT seguir até chegar ao destino final. Abaixo um exemplo de coordenadas de passos geradas pelo algoritmo com a matriz de entrada mostrada na Figura 3.

```

Search found goal state
Coordenadas do no : (0,2,0)
Coordenadas do no : (1,1,1)
Coordenadas do no : (2,0,2)
Solution steps 2
SearchSteps : 16

```

Figura 4. Coordenadas de passos possíveis geradas pelo algoritmo usando uma matriz 3D de tamanho 3x3x3.

Como resultados dessas coordenadas têm a rota de navegação dentro do ambiente que é retrado nesses experimentos como uma matriz 3D de tamanho 3x3x3. Para a melhor análise do resultado produzido pela heurística utilizou-se a ferramenta MatLab, que fica mais claro a trajetória de movimentos realizado pelo VANT até o destino final.

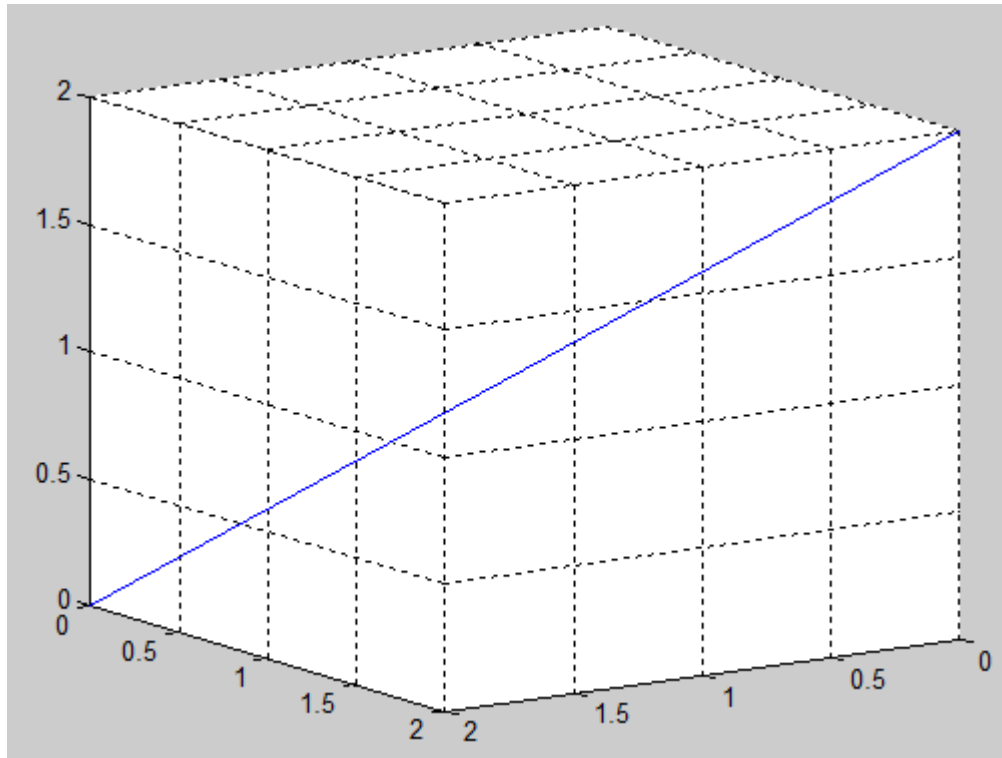


Figura 5. Gráfico que simula a trajetória gerada pelo veículo.

Matriz de tamanho 10x10x10, que representa um espaço de navegação no ambiente 3D.

```

{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{{3, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},

{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9}, {9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9}, {9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9}, {9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9}, {9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9}, {9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9}, {9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},

```

```

{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {9, 9, 1, 1, 9, 9, 1, 1, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {9, 9, 1, 1, 9, 9, 1, 1, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {9, 9, 1, 1, 9, 9, 1, 1, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {9, 9, 1, 1, 9, 9, 1, 1, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {9, 9, 1, 1, 9, 9, 1, 1, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {9, 9, 1, 1, 9, 9, 1, 1, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {9, 9, 1, 1, 9, 9, 1, 1, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {9, 9, 1, 1, 9, 9, 1, 1, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {9, 9, 1, 1, 9, 9, 1, 1, 9, 9},

{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9},

{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2}};

```

Figura 6. Matriz 3D de tamanho 10x10x10.

Coordenadas de passos que geram a trajetória para a navegação do veículo.

```

Search found goal state
Coordenadas do no : (9,0,0)
Coordenadas do no : (8,0,0)
Coordenadas do no : (7,0,0)
Coordenadas do no : (6,0,0)
Coordenadas do no : (5,1,1)
Coordenadas do no : (4,2,0)
Coordenadas do no : (3,3,1)
Coordenadas do no : (3,4,1)
Coordenadas do no : (2,5,2)
Coordenadas do no : (2,6,2)
Coordenadas do no : (3,7,1)
Coordenadas do no : (4,8,2)
Coordenadas do no : (4,8,3)
Coordenadas do no : (5,9,4)
Coordenadas do no : (6,8,5)
Coordenadas do no : (6,8,6)
Coordenadas do no : (7,9,7)
Coordenadas do no : (8,8,8)
Coordenadas do no : (9,9,9)
Solution steps 18
SearchSteps : 750

```

Figura 7. Coordenadas de pontos que geram a trajetória.

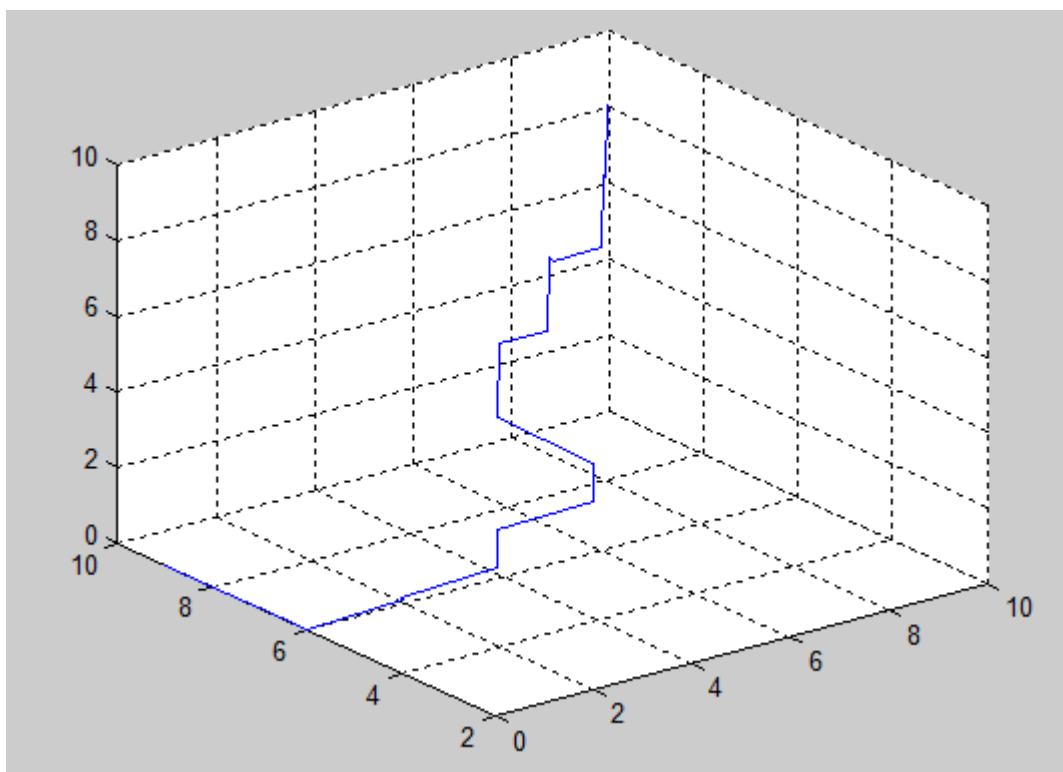


Figura 8. Trajetória gerada pelas coordenadas de saída da matriz 10x10x10.

5 Considerações Finais

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de planejador de caminho baseado na discretização do espaço 3D para navegação de um VANT. Vale ressaltar que apesar dos resultados apresentados nesta proposta terem sido feitos utilizando o algoritmo A*, apresentou bons resultados, mostrando as opções de caminhos possíveis num mapa de navegação com delimitação de espaço e alguns obstáculos que poderiam interferir no andamento da trajetória.

Os testes realizados permitiram analisar a eficiência e eficácia da técnica de planejamento de caminho para sua aplicação em navegação de veículos, e demonstram ser uma técnica viável para a solução do problema onde o resultado é obter o caminho mais curto.

O próximo passo para o desenvolvimento do trabalho é o estudo e implementação de curvas de controle e sua modelagem.

6 Cronograma de Atividades

Os resultados obtidos após a validação do sistema serão descritos na dissertação de Mestrado e apresentados ao Instituto de Computação da Universidade Federal do Amazonas - IComp. As etapas podem ser visualizadas em ordem temporal de ocorrências previstas conforme os prazos estabelecidos pelo Programa de Pós-Graduação em Informática, conforme na Tabela 1.

(1) Revisão de literatura

- Estudo do sistema de controle de um VANT;
- Estudo da aplicação de técnicas de planejamento de caminho;
- Análise dos modelos de trajetória de robôs móveis
- Definição conceitual do trabalho;

(2) Desenvolvimento de um modelo baseado na discretização do espaço 3D

- Espaço em 3D;
- Implementação de uma função de custo para trajetórias;
- Aplicar o algoritmo de busca de caminho;
- Coordenadas do espaço de navegação;

(3) Validação do modelo

- Avaliação do modelo por simulação;
- Avaliação em protótipo real;
- Análise dos resultados;
- Identificação e implementação de melhorias.

(4) Elaboração da Dissertação e Artigos.

- Publicação de artigos científicos;
- Elaboração dos capítulos;
- Revisões;
- Versão Final

Atividades	2013			
	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
2	x	x		
3		x	x	x
4		x	x	x

Tabela 1: Cronograma de atividades.

Referências Bibliográficas

posteriormente

ALVES, O. L. F; CUNHA, A. E. C. Modelagem e Controle de uma Aeronave de Asas Fixas para o Planejamento de Missões de VANTs. *Anais do CBA*, 2010.

BUENO, S. S. **Robótica Aérea**: PORTAL COMCIENCIA. Nº 70. Outubro de 2005. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/2005/10/10.shtml>> Acessado em Agosto de 2012.

CHAN-WOOK LIM; SANGHYUK PARK; CHANG-KYUNG RYOO; KEEYOUNG CHOI; JUNG-HEE CHO. *A path planning algorithm for Surveillance UAVs with timing mission constraints*, 2010 International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS), pp. 2371 – 2375, 2010.

FURTADO, V. H. et al. “Aspectos de Segurança na Integração de Veículos Aéreos Não Tripulados (Vant) No Espaço Aéreo Brasileiro”. Simpósio de Transporte Aéreo, 2008, Rio de Janeiro. Anais do VII SITRAER. Rio de Janeiro: E-Papers, 2008. v. 1 e 2. p. 92-99.

HAO MENG; GUIZHOU XIN. *UAV route planning based on the genetic simulated annealing algorithm*, 2010 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp. 788 – 793, 2010.

KARIMODDINI, A.; GUOWEI CAI; CHEN, B.M.; HAI LIN; LEE, T.H. *Multi-layer flight control synthesis and analysis of a small-scale UAV helicopter*, 2010 IEEE Conference on Robotics Automation and Mechatronics (RAM), Digital , pp. 321 – 326, 2010.

LENTILHAC, S. *UAV flight plan optimized for sensor requirements*, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Volume: 25 , Issue: 2, pp. 11 - 14 2010.

LIXIA; XIE JUN; CAI MANYI; XIE MING; WANG ZHIKE. *Path planning for UAV based on improved heuristic A* algorithm*, 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI '09, pp.. 3-488 - 3-493, 2009.

LIM, C.W.; RYOO, C.K.; CHOI, K.; CHO, J. *Path generation algorithm for Intelligence, Surveillance and Reconnaissance of an UAV*, Proceedings of SICE Annual Conference 2010, Pp. 1274 – 1277, 2010.

NALDI, R.; MARCONI, L. *Minimum Time Trajectories For A Class Of V/STOL Aircrafts*, Chinese Control and Decision Conference (CCDC), , Pp. 2097 – 2102, 2010.

PASTOR, E., LOPES, J. and ROYO, P. *UAV Payload and Mission Hardware/Software Architecture*. IEEE A&E Systems Magazine. June 2007.

PORTAL VANT. Disponível em: < <http://www.vant.org.br> >. Acessado em Julho de 2012.

QU, YAO-HONG; PAN, QUAN; YAN, JIAN-GUO. *Flight Path Planning of UAV Based on Heuristically Search and Genetic Algorithms*. IEEE 2005.

WU, P.P.-Y.; CAMPBELL, D. MERZ, T. *Multi-objective Four-Dimensional Vehicle Motion Planning in Large Dynamic Environments Systems*, IEEE Transactions on Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Volume:PP., pp. 1 - 14, [Issue: 99](#), 2011.

VACHTSEVANOS, GEORGE; TANG, LIANG; DROZESKI, GRAHAM; GUTIERREZ, LUIS. *From mission planning to flight control of unmanned aerial vehicles: Strategies and implementation tools*. Annual Reviews in Control 29 (2005) 101–115.

THRUN, S.; BURGARD, W.; FOX, D. (2005). Probabilistic Robotics. Cambridge: The MIT Press. 667p.

ZHANG, CHAO; ZHEN, ZIYANG; WANG, DAOBO; LI, MENG. *UAV Path Planning Method Based on Ant Colony Optimization*. IEEE 2010.