

Cooperative UAVs using multi-agent coordination techniques for search operations

Aquila N. Chaves¹, Paulo Sérgio Cugnasca¹

¹Grupo de Análise de Segurança (GAS)

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP/USP)

Av. Prof. Luciano Gualberto, 158, trav. 3, nº 158 – 05508-900 – São Paulo, SP – Brazil

aquila.chaves@usp.br, paulo.cugnasca@poli.usp.br

Abstract. *A multi-agent model of cooperative UAVs applied to search and rescue operations is proposed. The advantages of applying this kind of robot are: not exposing the crew to risks; cost reduction; and the possibility of flying during tens of hours without rest. The model comprises the agent knowledge modeling, the individual planning of each agent, the use of coordination mechanisms from the multi-agent systems theory and the cooperation strategy. Simulations of a search operation involving two cooperative UAVs show an average reduction of 55% of the time required to find all lost search objects, comparing with the time required to find the same objects in a non-cooperative operation with the same two UAVs.*

Resumo. *Este trabalho propõe um modelo multiagente de VANTs cooperativos para operações de busca e salvamento. As vantagens da utilização desse tipo de robô são: não exposição de pessoas a riscos; redução de custos; e a possibilidade de operar por longos períodos sem descanso. O modelo compreende a modelagem do conhecimento dos agentes, o planejamento individual de cada agente, a utilização de mecanismos de coordenação e a estratégia de cooperação. Simulações envolvendo dois VANTs cooperativos foram realizadas e, comparado ao tempo de busca de uma operação envolvendo duas aeronaves não cooperativas, observou-se uma redução do tempo de busca de 55% em média.*

1. Introdução

Numa operação de busca e salvamento (mais conhecida pela sigla em inglês SAR – *Search and Rescue*), as operações de busca constituem a fase mais importante [DECEA 2009]. Nesse contexto, o objetivo do trabalho é propor um modelo de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) cooperativos para uma operação de busca, aumentando, assim, as chances de sucesso da operação de busca e salvamento.

As principais vantagens que a utilização de VANTs traz para esse tipo de operação são: esses robôs podem se submeter a uma exposição maior ao risco do que aeronaves tripuladas (voos em baixa altitude, por exemplo); são capazes de executar operações de longa duração, sem necessidade de descanso (ao contrário dos voos tripulados); e apresentam menor consumo de combustível. Além disso, de acordo com a doutrina SAR internacional, não se deve utilizar mais de uma aeronave tripulada para realizar buscas em uma mesma subárea, pois essa situação geraria um estado de alerta prejudicial ao sucesso

da operação, fazendo com que a tripulação tenha a sua atenção desviada das buscas para a navegação e a coordenação com outras aeronaves [IMO/ICAO 2003].

Para atingir o objetivo deste trabalho, o problema de busca utilizando VANTs cooperativos foi dividido em quatro partes: modelo de conhecimento para troca de informações entre os agentes; proposta de planejamento baseada em algoritmos de navegação para VANTs e em padrões de busca estabelecidos pelas instituições responsáveis por operações SAR; obtenção de cooperação por meio de mecanismos de coordenação multiagente; e definição de estratégia de cooperação adequada ao cenário de busca.

A ideia é que, atuando de forma autônoma e distribuída, cada VANT tome suas próprias decisões levando em conta o objetivo de reduzir o tempo de busca e as ações dos outros VANTs. Com isso, espera-se que o desempenho do grupo cooperativo seja maior do que o desempenho de um grupo não cooperativo com o mesmo número de indivíduos.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta alguns conceitos sobre os VANTs e as perspectivas de futuro (os VANTs cooperativos); apresentação do modelo de VANTs cooperativos, que compreende mecanismos de coordenação (Seção 3), modelagem do conhecimento do agente de modo adequado à solução do problema (Seção 4), planejamento individual dos agentes (Seção 5) e estratégia de cooperação (Seção 6); e, por fim, a Seção 7 e a Seção 8 apresentam as simulações realizadas e as considerações finais, respectivamente.

2. Veículos Aéreos Não Tripulados Cooperativos

Apesar de os primeiros protótipos de VANTs terem surgido na metade do século XIX e os primeiros modelos precursores dos que se vê hoje terem sido construídos na segunda metade do século XX, foi somente no início do século XXI que se observou um verdadeiro interesse por VANTs. Nesses últimos anos, verificou-se um grande aumento de investimentos e de pesquisas em VANTs, com previsão de crescer ainda mais [UAS Center of Excellence 2010, Teal Group 2011].

Após décadas de avanço, os principais desafios referentes aos veículos aéreos não tripulados estão relacionados ao voo cooperativo, que é um problema predominantemente computacional. Pesquisadores e relatórios governamentais apontam que, no futuro, múltiplos robôs voadores serão capazes de atuar, até sob a forma de enxames, cooperativamente e de modo autônomo [UAS Center of Excellence 2010], funcionando como uma rede coordenada de sensores que cumprirão missões complexas sem nenhuma intervenção humana.

Dentro dessa perspectiva, o problema a ser resolvido é a coordenação de múltiplos veículos. Sendo assim, há duas abordagens possíveis [Ren and Cao 2011]: adotar o controle centralizado ou o distribuído. A abordagem distribuída, apesar de mais complexa, apresenta vantagens tais como flexibilidade, escalabilidade e maior tolerância a falhas. A seguir, a Subseção 2.1 apresenta as principais linhas de pesquisa em VANTs cooperativos e a Seção 3 os caminhos para alcançar a cooperação de VANTs utilizando a teoria multiagente.

2.1. Controle distribuído

Para alcançar a cooperação de agentes autônomos distribuídos (incluindo VANTs), a revisão da literatura permite identificar seis categorias de cooperação de VANTs [Ren and Cao 2011]: (i) coordenação por consenso, em que os agentes tomam decisões consensuais, com participação de todos os indivíduos envolvidos; (ii) controle por formação distribuída, que é baseado na formação de um padrão geométrico (por exemplo, o padrão de voo adotado por grupos de aves migratórias); (iii) otimização distribuída, na qual heurísticas de otimização são utilizadas; (iv) distribuição de tarefas, em que um objetivo maior é dividido em tarefas menores, que são distribuídas entre os agentes; (v) controle por estimativa distribuída, cujos principais objetivos são a coleta de informações e a tomada de decisões distribuídas, em que sensores espalhados entre os agentes são utilizados para realizar estimativas globais; (vi) coordenação inteligente, em que cada agente é dotado de certa “inteligência” e, portanto, planeja suas próprias ações levando em conta o seu próprio conhecimento.

As três primeiras abordagens, (i), (ii) e (iii), não são atrativas para o objetivo deste trabalho. A busca por uma solução consensual degradará a robustez do sistema, de modo que as decisões serão tomadas apenas se houver consenso no grupo de VANTs, situação que nem sempre é possível. A formação de padrão geométrico, embora bastante utilizada em pesquisas utilizando múltiplos VANTs, também não é interessante para o cenário deste trabalho porque haveria perda de autonomia e os VANTs perderiam a capacidade de responder a modificações do ambiente. Por último, a otimização distribuída demandaria muito processamento, situação incompatível com a operacionalização de VANTs cooperativos.

Este trabalho se enquadra nas categorias (iv), (v) e (vi).

3. Coordenação Multiagente

A abordagem multiagente fornece um conjunto de mecanismos e protocolos de negociação, de tomada de decisão descentralizada e de coordenação [Pechoucek and Sislak 2009]. Ademais, não há qualquer restrição na utilização de agentes em sistemas complexos ou críticos [Jennings and Wooldridge 1998], como é o caso dos VANTs cooperativos.

Portanto, com o intuito de obter a cooperação de VANTs, também faz parte das contribuições deste trabalho o mapeamento dos principais mecanismos de coordenação encontrados na literatura, apresentados na Subseção 3.1, bem como a avaliação da adequação de cada um deles ao modelo de VANTs cooperativos.

Por fim, cabe ressaltar que os mecanismos de coordenação multiagente não são intercambiáveis. Ou seja, cada um possui um enfoque diferente dos outros, sendo mais, ou menos, adequado para cada cenário de cooperação.

3.1. Coordenação

Cooperação pode ser definida como coordenação com um objetivo comum [Luck et al. 2005]. Já a coordenação, que é o maior problema na cooperação de agentes (desempenhando um papel essencial na gestão de desastres [Pereira et al. 2011]), pode ser definida como o gerenciamento de interdependências das ações dos agentes

[Wooldridge 2009], visando coerência nas ações dos agentes [Nwana et al. 1996]. Portanto, o mapeamento de mecanismos de coordenação se faz necessário para alcançar a cooperação entre os VANTs.

Adicionalmente, há quatro situações em que a coordenação é necessária [Bellifemine et al. 2007]: (i) quando os objetivos dos agentes conflitam com suas ações; (ii) quando os objetivos dos agentes são interdependentes; (iii) existência de agentes com diferentes capacidades e conhecimentos complementares; (iv) ou, quando há o desejo de que os objetivos possam ser alcançados mais rapidamente, com cada um dos agentes se empenhando em um objetivo paralelamente. No modelo de VANTs cooperativos para operações de busca, as situações (i), (ii) e (iv) são bastante visíveis, pois as rotas dos VANTs podem ser coincidentes, seus objetivos são interdependentes e deseja-se realizar a busca no menor tempo possível.

3.1.1. Organização estrutural

O mecanismo de coordenação baseado na organização estrutural se baseia num *framework* que define atividades e interações entre os agentes por meio da definição de regras, canais de comunicação e relações de autoridade [Durfee 1999]. Esse mecanismo se utiliza da metáfora social, em que cada indivíduo possui habilidades, papéis e responsabilidades diferentes. Dessa forma, o comportamento coordenado do grupo de indivíduos é resultado dessas regras e relações.

Embora seja uma abordagem bastante interessante, nem sempre é possível prever, com segurança, as ações dos agentes. Por esse motivo, esse mecanismo de coordenação foi considerado inadequado ao modelo de VANTs cooperativos.

3.1.2. Acordos bilaterais

Outra importante técnica de coordenação multiagente é a utilização do protocolo *Contract Net* [Smith 1980]. Essa abordagem é inspirada num mercado descentralizado, em que os agentes podem desempenhar apenas dois papéis: contratante e contratado. Basicamente, a ideia é que, para alcançar um objetivo, um agente encontre outros agentes capazes e com disposição de colaborar.

Esse mecanismo possui duas variações [Wooldridge 2009]: “resolução de inconsistências” e “divisão de tarefas”. Na primeira, cada agente planeja suas atividades individualmente e apenas os planos conflitantes são resolvidos. Na segunda, o processo divide-se em três fases: decomposição do problema, resolução do subproblema e síntese da solução [Smith and Davis 1981] – assim, o maior desafio é descobrir como dividir e alocar as tarefas.

A simplicidade e a eficácia desse mecanismo faz que ele seja bastante empregado em pesquisas envolvendo múltiplos VANTs.

3.1.3. Compartilhamento de informações

O compartilhamento de informações nada mais é do que a coordenação pela troca de informações relevantes à solução do problema. Os agentes podem trocar informações pró-ativamente, quando um agente envia informação a outro(s) agente(s) porque acredita que esta será útil, ou reativamente, quando o agente envia informações somente quando é solicitado [Wooldridge 2009].

Esse mecanismo aumenta a confiabilidade, a completeza e a precisão da solução do problema, e reduz o tempo de resposta [Durfee 1999], pois informações de diversos agentes podem ser conferidas umas com as outras e a visão da operação é ampliada.

No modelo de cooperação de VANTs proposto, a utilização desse mecanismo se faz pela troca do conhecimento dos agentes (apresentado na Seção 4). Isso aumenta a capacidade de planejamento do VANT, na medida em que este possui mais informações disponíveis para tomar suas decisões.

3.1.4. Planejamento multiagente

Esse mecanismo aborda o problema de coordenação de agentes como um problema de planejamento, que pode ser centralizado ou distribuído. A estratégia é planejar previamente as ações dos agentes de modo a evitar inconsistências e conflitos com os planos dos outros agentes [Bellifemine et al. 2007].

A resolução de conflitos pode, inclusive, ter como objetivo a manutenção da segurança dos agentes. Durante a implementação da simulação, levou-se em consideração que a cooperação não deve ser incondicional, ou seja, o VANT deve cooperar com os outros, mas não deve colocar em risco sua própria segurança ou a segurança dos demais. Dessa forma, este mecanismo de coordenação foi utilizado para que os VANTs evitem rotas de colisão ao se cruzar subáreas de outros VANTs.

No planejamento centralizado, há um agente central, que recebe os planos parciais ou locais de cada agente, identifica os eventuais conflitos, altera pontualmente os planos eliminando os conflitos e os devolve aos agentes [Georgeff 1983]. Já no planejamento multiagente distribuído, os agentes devem comunicar suas intenções aos outros para eliminar os conflitos de planos existentes [Martial 1990].

A vantagem da utilização do planejamento multiagente distribuído é o alto grau de descentralização que pode ser obtido. No modelo de cooperação de VANTs proposto, esse mecanismo é utilizado para evitar colisões entre os VANTs. Na Seção 6 esse processo é apresentado em detalhes.

3.1.5. Negociação

O mecanismo de negociação é o processo de comunicação em que um grupo de agentes busca um acordo a respeito de alguma situação [Bussmann and Müller 1993]. Por isso, provavelmente esse é o mecanismo de coordenação multiagente mais confiável, pois todos os agentes do grupo são partes ativas no processo de decisão, podendo haver concessões

de algumas partes. Assim, evita-se que uma decisão de um agente prejudique outro agente sem o seu consentimento [Bellifemine et al. 2007].

Entretanto, perde-se em robustez, na medida em que uma falha de comunicação de um agente pode, erroneamente, levar o sistema a não tomar uma decisão. Além disso, o tempo de processamento pode ser consideravelmente comprometido pela necessidade de participação de todos os indivíduos.

Portanto, esse mecanismo de coordenação também foi considerado inadequado ao modelo de cooperação de VANTs.

4. Conhecimento do agente

As informações mantidas e trocadas pelos agentes representam o conhecimento sobre o ambiente, possibilitando, portanto, acompanhar a evolução da operação de busca. Sem essa troca de informações, o conhecimento de cada VANT estaria restrito às informações locais obtidas pelos seus próprios sensores. Assim, por meio da troca de conhecimento, os VANTs passam a “enxergar” o ambiente não só com o seu sensor, mas também com os sensores dos outros agentes. Conseqüentemente, melhora-se a qualidade do planejamento individual.

A Figura 1 ilustra a estrutura desse conhecimento. O espaço de busca é discretizado em células que possuem uma medida da probabilidade de conter um objeto de busca (objeto que se deseja buscar – pessoas, fuselagens, botes, etc.). Além disso, cada célula do conhecimento deve ter tamanho adequado, de modo que o quadrado fique circunscrito na área de visada do VANT quando este sobrevoa o ponto central da célula.

A situação descrita na Figura 1 é um exemplo de detecção de objeto, em que as células ao redor da célula onde o objeto foi detectado têm as medidas de probabilidade aumentadas. Os valores apresentados são meramente ilustrativos e indicam que as células com valores maiores que zero devem ser priorizadas em relação às outras. No contexto da estratégia de cooperação (Seção 6), esse processo – de detecção, atualização do conhecimento e compartilhamento de informações – será apresentado dentro do contexto da estratégia de cooperação.

5. Planejamento individual do agente

O plano de busca dos agentes corresponde a um plano de voo, que por sua vez é uma seqüência de pontos (*waypoints*) gerados por algoritmos de navegação que consideram cada célula do espaço de busca (Figura 1) como um nó navegável. Durante a operação de busca, mais de um algoritmo pode ser utilizado – a Seção 6 apresenta como eles são combinados para formar a estratégia de cooperação.

Além dos padrões de busca estabelecidos pelos órgãos responsáveis por operações de busca e salvamento [DECEA 2009], identificou-se na literatura a existência de duas classes de algoritmos de navegação de VANTs: algoritmos de navegação ponto-a-ponto e de busca local.

Os algoritmos de navegação ponto-a-ponto fornecem uma trajetória de navegação de um ponto de origem até um ponto de destino. Já os de busca local tem o objetivo de, dada uma região, varrê-la exaustivamente da melhor maneira possível, maximizando a probabilidade de encontrar um objeto de busca.

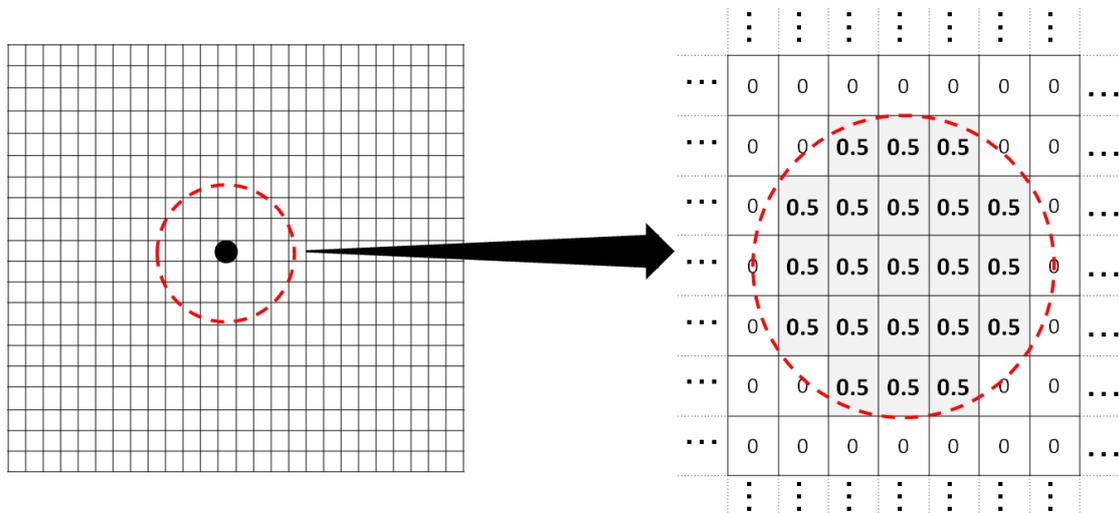


Figura 1. Conhecimento do agente

O algoritmo mais utilizado na navegação ponto-a-ponto de VANTs de pequeno porte é o algoritmo A* [Lester 2005], que muitas vezes é implementado com alguma adequação ao problema que se quer resolver. Esse algoritmo se mostra bastante flexível e rápido.

Outros algoritmos encontrados na literatura são os baseados em forças virtuais, entre eles o *fuzzy virtual force method* [Zhuoning et al. 2010]. Nesses algoritmos, os VANTs são atraídos aos pontos de destino por forças de atração e são repelidos de obstáculos por forças de repulsão. Sendo assim, esses algoritmos possuem a desvantagem de que a navegação é guiada por comandos do tipo “vire à esquerda” e “vire à direita” (ao invés de “passe pelos pontos...”), tornando-os menos adequados ao problema deste trabalho. Por isso, optou-se, neste trabalho, pela utilização do algoritmo A* para a navegação ponto-a-ponto.

Quanto aos algoritmos de busca local, é possível identificar a existência de dois grupos: a varredura concentrada e a navegação por gradiente. O primeiro, ilustrado na Figura 2, visa sobrevoar uma área de maneira uniforme com trajetória em “zig-zag”, cobrindo todas as células dessa área. O segundo, bastante utilizado em aplicações de robótica, guia o robô fazendo com este desloque sempre na direção em que determinado atributo, medido por sensores, é aumentado. No caso do modelo de VANTs cooperativos em questão, o sentido do gradiente seria o sentido em que probabilidade de detecção de objetos de busca aumenta.

Por fim, dentre os padrões de busca definidos pelo Manual de Busca e Salvamento [DECEA 2009], cabe destacar o padrão “Rotas Paralelas”. Semelhante ao algoritmo da Figura 2, esse padrão também se baseia em sobrevoos em “zig-zag”. Mas, ao contrário da varredura concentrada, esse padrão não visa necessariamente cobrir todas as células, mas, principalmente, cobrir uma área uniformemente. Ou seja, pode-se optar por não sobrevoar determinadas colunas ou linhas de células entre as idas e vindas, reduzindo, assim, a densidade da varredura e aumentando a velocidade de progressão do VANT.

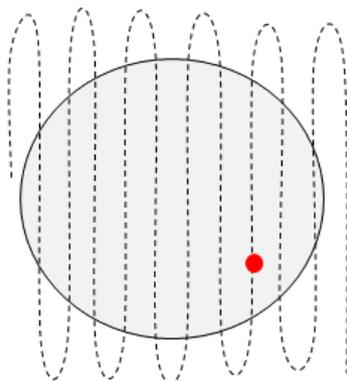


Figura 2. Busca local. A região circular representa a localização provável do objeto, o ponto escuro o objeto e a linha tracejada o plano de voo da aeronave.

6. Estratégia de cooperação

Durante uma operação de busca, os agentes compartilham as informações coletadas e escolhem o algoritmo de navegação mais adequado em cada momento, realizando, assim, um planejamento dinâmico da busca. Para isso, a definição prévia do cenário é crucial para o sucesso da operação.

O cenário de busca definido é a perda de uma aeronave em alto mar com desconhecimento de qualquer informação sobre sua posição, que representa um dos cenários mais complexos no que diz respeito a operações de busca de salvamento. Nessa situação, sabe-se apenas a região retangular onde é possível que estejam as partes que se espalharam (a partir de um ponto central de acordo com uma distribuição gaussiana). Cabe ressaltar que o espalhamento gaussiano está de acordo com o espalhamento marítimo indicado pelo Manual Internacional de Busca e Salvamento [IMO/ICAO 2003].

Assim, os VANTs iniciam a busca escolhendo o padrão de busca “Rotas Paralelas” descrito na Seção 5, que é o padrão ideal para iniciar uma busca nesse cenário [DECEA 2009].

Nessa varredura inicial, cada VANT aloca uma subárea para si e realiza o sobrevoo nessa subárea. O planejamento da trajetória é realizado periodicamente, de modo a incrementar a sequência de próximos de navegação e obedecendo ao padrão de busca “Rotas Paralelas”. Nessa fase da busca não há necessidade de trocar informações sobre o mapa discretizado, pois ainda não há nenhuma informação relevante a ser compartilhada – apenas se sabe, no caso de ainda não ter havido detecção de objeto de busca, onde eles não estão.

Quando um dos VANTs detecta um objeto de busca, ele atualiza o seu conhecimento sobre o espaço de busca, aumentando a probabilidade das células não visitadas ao redor desse ponto (Figura 1). Nesse momento, esse VANT possui uma informação relevante a ser compartilhada. Então, o conhecimento do espaço de busca é enviado aos demais VANTs (agentes).

A cada nova detecção, por qualquer um dos VANTs, o conhecimento é atualizado e compartilhado com os demais. Assim, quanto maior for o número de detecções melhor será o mapeamento da área de espalhamento do acidente. É interessante notar que esse

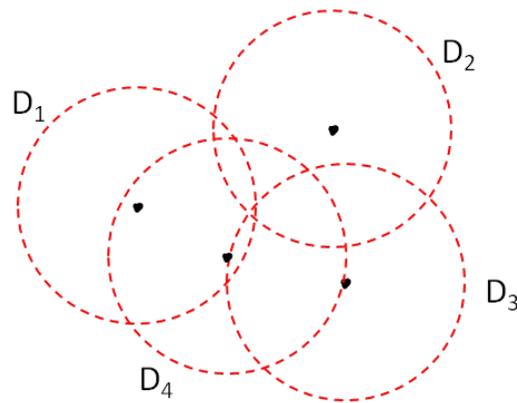


Figura 3. Exemplo de evolução do conhecimento dos agentes

conhecimento vai sendo cooperativamente construído e refinado ao longo da busca. A Figura 3 ilustra um caso hipotético de evolução do conhecimento do grupo de VANTs, em que D1, D2, D3 e D4 representam detecções sequenciais.

Esse conhecimento é compartilhado pelo envio de mensagens *broadcast*. Na simulação, considerou-se como nulo o tempo de envio (pelo transmissor via *broacast*) mais a atualização (no receptor) do conhecimento. Assim, quando um VANT detecta um objeto, todos os outros atualizam os seus conhecimentos imediatamente.

No momento em que ocorre a primeira atualização do conhecimento, um dos VANTs se prontifica a realizar a busca local na região que agora apresenta células com maior probabilidade, pois, a existência desse objeto é indício de que há outros objetos próximos daquela célula onde ocorreu a primeira detecção. Então, esse VANT altera seu algoritmo de planejamento de voo e passa a utilizar o algoritmo A* para se deslocar até a célula de detecção. Enquanto isso, o VANT que detectou o primeiro objeto continua sua busca no padrão “Rotas Paralelas”.

Em caso de haver mais de dois VANTs realizando a busca cooperativa, a escolha de qual VANT será eleito para a busca local deve ser feita utilizando o mecanismo bidding (Subseção 3.1.2), em que será escolhido o VANT que estiver mais próximo. No entanto, a simulação apresentada neste trabalho, que envolveu apenas dois VANTs, não empregou esse mecanismo de coordenação.

Durante o deslocamento do VANT pelo algoritmo A*, há a possibilidade de cruzamento de rotas com outros VANTs. Sendo assim, nesse deslocamento o VANT emprega o mecanismo de coordenação Planejamento Multiagente (subseção 3.1.4). Assim, com o intuito de evitar colisões, o VANT que se desloca para a busca local passa utilizar informações de planos e posicionamento dos outros VANTs em seu planejamento de trajetória. Ou seja, no cálculo da trajetória utilizando o algoritmo A*, o VANT que se desloca calcula a distância necessária para chegar até o ponto de destino e, utilizando essa distância e o plano de voo do VANT “dono” da subárea onde se encontra o ponto de destino, estima onde este último estará quando primeiro VANT chegar ao seu destino. Então, no cálculo da trajetória, o algoritmo A* considera a célula onde o segundo VANT estará, e as vizinhas num raio de 500 metros, como células não navegáveis – evitando, assim, a colisão.

Chegando ao local da primeira detecção, o VANT que vinha utilizando o algoritmo A* altera novamente o algoritmo de planejamento de trajetória, passando a utilizar um algoritmo de busca local. Nesse momento, o objetivo desse VANT passa a ser a varredura exaustiva de toda a área contida dentro do círculo criado após a primeira detecção (Figura 1) e as demais que forem se acrescentando a esta (Figura 3), tentando maximizar a probabilidade de detecção.

Nesse processo de busca local, o mecanismo de Planejamento Multiagente também é utilizado. Ao construir a trajetória de busca, o VANT responsável pela busca local desconsidera qualquer célula que está mesma linha no espaço de busca do outro VANT, que continua sua varredura utilizando o padrão Rotas Paralelas. Como a trajetória da busca local é calculada incrementalmente, em passos pequenos, mesmo que o VANT do padrão Rotas Paralelas continue se deslocando, o VANT da busca local nunca “invadirá” alguma célula em rota de colisão.

Por fim, cabe ressaltar que na simulação apresentada na Seção 7 foram utilizados apenas dois VANTs. Por conseguinte, a escolha do VANT para realizar a busca local será óbvia. No caso de haver mais de dois VANTs, pode-se utilizar o mecanismo de “*bidding*” do protocolo *Contract Net*.

7. Simulação e resultados

Simulações utilizando dois VANTs cooperativos indicam uma redução média no tempo de busca de 55%, comparada a uma busca utilizando dois VANTs não cooperativos no mesmo cenário. Essa média foi obtida realizando 40 simulações, número suficientemente grande para assegurar a validade estatística do resultado.

Os parâmetros utilizados na simulação foram os seguintes: lado das células igual a cem metros; utilizando uma distribuição gaussiana com desvio padrão de 1.500 metros, foram espalhados vinte objetos ao redor de um ponto sorteado aleatoriamente; e o espaço de busca foi definido num quadrado com dez quilômetros de lado. Ao final da simulação, gera-se uma sequência de comandos de MatLab responsáveis pela construção da Figura 4.

Os pontos vermelhos da Figura 4 representam os objetos perdidos, as linhas azul (partindo da metade inferior) e verde (na metade superior) representam as trajetórias dos VANTs (que inicialmente empregam o padrão “Rotas Paralelas”) e a área amarela representa as células em que a probabilidade de detecção é maior (essas células tiveram suas probabilidades incrementadas após sucessivas detecções). Observa-se que, conforme o VANT que realiza a busca local vai avançando nessa tarefa, essa área vai sendo “consumida”. Na Figura 4, a simulação foi interrompida quando o último objeto foi detectado.

Por fim, cabe dizer a simulação foi desenvolvida em Java e as simulações foram realizadas numa máquina com sistema operacional Windows Vista (32 bits), com processador Intel Core 2 Duo (2,10 GHz), com memória RAM de 3 GB e utilizou-se a plataforma de desenvolvimento NetBeans 7.0.

8. Considerações finais

Combinando mecanismos de coordenação da teoria multiagente, modelando o conhecimento dos agentes na forma de espaço discretizado em células e concebendo o planejamento individual dos agentes na forma de algoritmos de navegação, este trabalho propôs

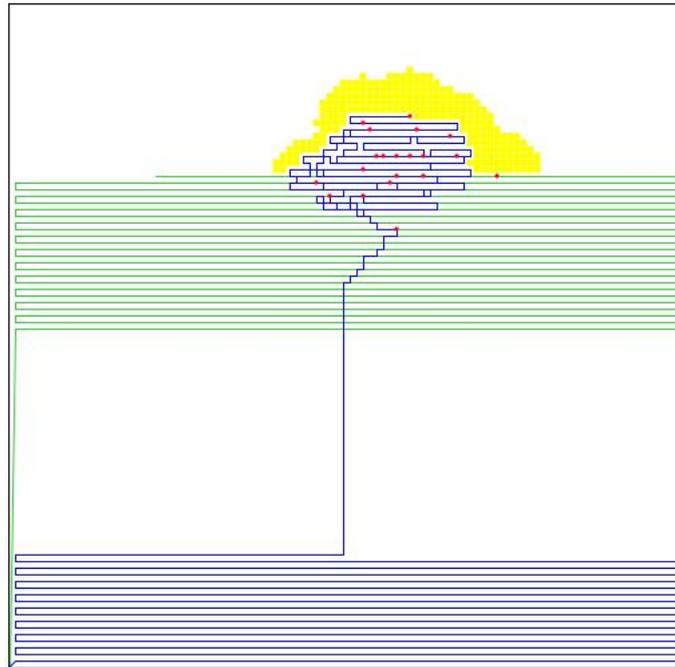


Figura 4. Simulação de cooperação com dois VANTs

um modelo de VANTs cooperativos, com uma estratégia de cooperação que se aplica a operações de busca.

Simulações empregando dois VANTs cooperativos revelaram, em média, 55% de redução do tempo de busca – em comparação a dois VANTs não cooperativos no mesmo cenário.

Outras simulações ainda serão realizadas e há expectativas de obtenção de uma redução do tempo de busca ainda maior. Simulações com quatro VANTs e reduzindo a densidade da varredura inicial pelo padrão “Rotas Paralelas” são exemplos de simulações que podem ser realizadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio concedido na forma de bolsa de mestrado.

Referências

- Bellifemine, F., Caire, G., and Greenwood, D. (2007). *Developing multi-agent system with JADE*. Wiley.
- Bussmann, S. and Müller, J. (1993). A negotiation framework for cooperating agents. In Deen, S., editor, *1992 Proceedings of the Special Interest Group on Cooperating KnowledgeBased Systems*, pages 1–17, Keele, UK. Dake Centre, University of Keele.
- DECEA (2009). Manual de busca e salvamento (mca 64-3). Technical report, Comando da Aeronáutica.

- Durfee, E. H. (1999). Distributed problem solving and planning. In Weiß, G., editor, *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, pages 121–164. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Georgeff, M. P. (1983). Communication and interaction in multi-agent planning. In *Proceedings of the 3rd National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-83)*, pages 125–129, Menlo Park, CA. AAAI Press.
- IMO/ICAO (2003). International aeronautical and maritime search and rescue manual (iamsar manual). Technical report, International Maritime Organization and International Civil Aviation Organization, London, United Kingdom.
- Jennings, N. R. and Wooldridge, M. (1998). *Applications of intelligent agents*, pages 3–28. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA.
- Lester, P. (2005). A* path finding for beginners. Acesso em 18/04/2012: <http://www.policyalmanac.org/games/aStarTutorial.htm>.
- Luck, M., McBurney, P., Shehory, O., and Willmott, S. (2005). *Agent Technology: Computing as Interaction (A Roadmap for Agent Based Computing)*. AgentLink.
- Martial, F. V. (1990). Interactions among autonomous planning agents. In In Demazeau, Y. and Müller, J.-P., editors, *Decentralized AI - Proceedings of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW-89)*, pages 105–120, Amsterdam, The Netherlands. Elsevier Science Publishers B.V.
- Nwana, H., Lee, L., and Jennings, N. (1996). Coordination in software agent systems. *British Telecom Technical Journal*, 14 (4):79–88.
- Pechoucek, M. and Sislak, D. (2009). Agent-based approach to free-flight planning, control, and simulation. *IEEE Intelligent Systems*, 24(1):14–17.
- Pereira, A. H., Nardin, L. G., and Sichman, J. S. (2011). Coordination of agents in the robocup rescue: A partial global approach. In *Anais do V Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações (WESAAC)*, pages 75–84, Curitiba, Brazil.
- Ren, W. and Cao, Y. (2011). *Distributed Coordination of Multi-agent Networks*. Springer.
- Smith, R. (1980). The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *Computers, IEEE Transactions on*, C-29(12):1104–1113.
- Smith, R. G. and Davis, R. (1981). Frameworks for cooperation in distributed problem solving. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 11(1):61–70.
- Teal Group (2011). World unmanned aerial vehicle systems - 2011 market profile and forecast. Technical report, Teal Group Corporations, Fairfax, VA, EUA.
- UAS Center of Excellence (2010). U.s. army roadmap for unmanned aircraft systems 2010-2035. Technical report, Fort Rucker, Alabama.
- Wooldridge, M. (2009). *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons, second edition edition.
- Zhuoning, D., Rulin, Z., Zongji, C., and Rui, Z. (2010). Study on uav path planning approach based on fuzzy virtual force. *Chinese Journal of Aeronautics*, 23(3):341–350.