

ARQUITETURA BASEADA EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS E REDES DE SENSORES PARA APLICAÇÕES AGRÍCOLAS

FAUSTO GUZZO DA COSTA¹
TORSTEN BRAUN²
JÓ UEYAMA³
GUSTAVO PESSIN⁴
FERNANDO SANTOS OSÓRIO⁵

RESUMO: A aplicação de defensivos químicos em áreas agrícolas é de primordial importância no rendimento de lavouras. O uso de aeronaves é cada vez mais comum em tal tarefa principalmente pelo fato de aumentar a agilidade na operação. Entretanto, alguns fatores podem acarretar perdas no rendimento da produção (*e.g.* áreas não cobertas pela aplicação dos defensivos) ou mesmo prejuízo aos produtores (*e.g.* aplicação sobreposta dos defensivos, multas por aplicação de defensivos na borda exterior da lavoura). Características climáticas, como intensidade e orientação do vento durante a aplicação adicionam ainda mais dificuldade neste controle. Este artigo descreve uma arquitetura baseada em veículos aéreos não tripulados (VANT) com o objetivo de implementar um laço de controle para aplicações agrícolas onde VANTs são responsáveis pela aplicação de defensivos químicos em lavouras. O processo da aplicação dos defensivos é controlado com base no *feedback* de sensores posicionados no terreno da lavoura. Um aspecto importante considerado é de que o controle deva ser robusto para suportar espaços de tempo extremamente curtos no laço de controle. A informação recuperada dos sensores permite que os VANTs apliquem os defensivos apenas nas áreas delimitadas, considerando mudanças na orientação e intensidade do vento.

PALAVRAS-CHAVE: veículo aéreo não tripulado, aplicação agrícola, redes móveis *ad-hoc*.

1. INTRODUÇÃO

Veículos aéreos não tripulados têm se tornado cada vez mais baratos principalmente pelo fato de diversas funções de controle terem migrado da camada de *hardware* para a camada de *software*. Isso tem facilitado o uso e permitido a aplicação de múltiplos VANTs em tarefas singulares. Nestas tarefas, os VANTs devem possuir recursos de comunicação com o objetivo de permitir a troca de informação com os agentes do grupo, em geral, de forma bidirecional. Isso pode ser feito equipando os VANTs com dispositivos de rede sem fio, tornando cada VANT um nó de rede móvel. Num cenário como este, o grupo de VANTs pode ser considerado como uma rede em malha altamente móvel (BRAUN et al., 2010).

Diversos VANTs formam um chamado enxame, onde podem colaborativamente realizar trabalho útil. Inúmeras aplicações têm sido propostas para enxames robóticos, tais como a formação de nós de comunicação *ad-hoc* em caso de desastres, recuperando informações de sensores implantados em áreas de difícil acesso a seres humanos, ou mesmo realizando a transmissão online de áudio e vídeo de eventos esportivos de movimentação rápida, como corridas de bicicleta, esqui ou maratonas.

¹ Mestrando em Computação no ICMC-USP, E-mail: fausto@icmc.usp.br

² Diretor do Instituto de Computação e Matemática na Universidade de Bern - Suíça, E-mail: braun@iam.unibe.ch

³ Professor no ICMC-USP, Doutor em Computação pela Lancaster University, E-mail: joueyama@icmc.usp.br

⁴ Doutorando em Computação no ICMC-USP, E-mail: pessin@icmc.usp.br

⁵ Professor no ICMC-USP, Doutor em Computação pelo INPG/IMAG - Grenoble, E-mail: fosorio@icmc.usp.br

Neste artigo, propomos o uso de um enxame de VANTs intercomunicáveis para atuação em uma aplicação agrícola, especificamente no controle da dispersão de defensivos químicos em áreas delimitadas. Usando sensores e VANTs, propomos um laço de controle que permita que a aplicação de defensivos seja auto-ajustável, evitando a aplicação redundante e a aplicação em áreas indevidas (borda externa da lavoura). Considerando mudanças climáticas frequentes e rápidas (principalmente as relacionadas à orientação e intensidade do vento), o laço de controle proposto deve ser o mais ágil possível. Isso requer conexão permanente entre os sensores que medem a quantidade de queda de defensivos no solo (similar a pluviômetro) com os VANTs responsáveis pela dispersão dos defensivos.

Desta forma, uma rede de comunicação composta por múltiplos VANTs deve preencher os seguintes requisitos: (i) conectividade permanente; (ii) roteamento robusto em redes móveis *ad-hoc* (*mobile ad-hoc networks* - MANET). A primeira questão pode ser resolvida com a execução de um algoritmo de controle de formação ou topologia que garanta a existência de conectividade completa na rede de VANTs. A segunda questão pode ser resolvida com o uso de esquemas oportunos de roteamento, onde o melhor nó receptor de pacotes seja sempre o nó retransmissor. O detalhamento destas questões será realizado na próxima seção. O restante do artigo está estruturado da seguinte forma: A seção 2 aborda a definição do problema e a metodologia proposta para solução. Na seção 3 detalhamos o desenvolvimento das simulações, as ferramentas de software utilizadas, recursos de *hardware*, e finalizamos apresentando conclusões sobre os trabalhos realizados e possíveis trabalhos futuros.

2. VANT PARA APLICAÇÃO AGRÍCOLA

A Figura 1(a) apresenta o cenário de aplicação proposto neste trabalho. Um VANT é usado para pulverizar defensivos químicos em um campo agrícola. Alguns fatores podem acarretar perdas no rendimento da produção (*e.g.* áreas não cobertas pela aplicação dos defensivos) ou mesmo prejuízo aos produtores (*e.g.* multas por aplicação de defensivos na borda exterior da lavoura, aplicação sobreposta dos defensivos). Tais fatores devem ser evitados.

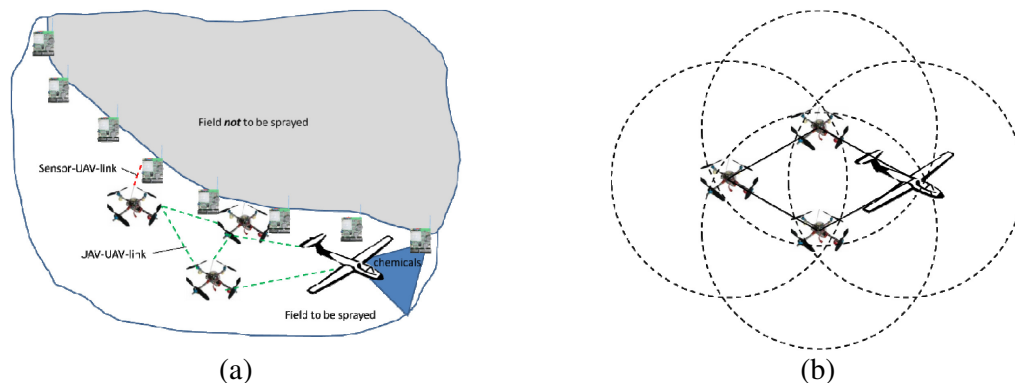


Figura 1. (a) Cenário completo de aplicação. (b) Modelo de VANTs repetidores.

Para resolver o problema da aplicação indevida na borda externa da lavoura, propomos o uso de sensores distribuídos de acordo com a Figura 1(a). Quando um sensor detecta níveis altos de concentração, deve informar ao VANT para que este se afaste da borda. O problema, entretanto, é que pode demorar diversos segundos até que o defensivo chegue ao solo e seja detectado pelo sensor. Neste meio tempo, o VANT já pode estar fora do alcance de comunicação do sensor, que tipicamente tem uma área de comunicação limitada.

Como exemplo, gotas de água alcançam uma velocidade de queda de cerca de 6m/s. Assumindo uma altitude de voo de 10m acima do solo e velocidade de voo do VANT de 20m/s, o VANT

estaria a pelo menos 200m de distância do sensor quando este identificasse a quantidade de químico pulverizada. O sensor não pode, então, transmitir um sinal para o VANT diretamente.

Para resolver este problema, propomos o uso de VANTs repetidores (Fig. 1(b)). Neste caso, o sensor envia a comunicação para um VANT que tem como função seguir o VANT responsável pela pulverização. Assumimos que um dos VANTs seguidores tem como papel realizar a leitura sensorial, desta forma, sempre que um VANT estiver próximo suficiente de um sensor, o mesmo faz requisição de leitura. Como resposta, o sensor deve retornar a concentração química presente e a sua localização geográfica. Assumimos que os sensores têm GPS ou que foram colocados em posições geográficas predefinidas. Se os sensores estiverem perto suficiente do VANT responsável pela pulverização, então eles podem transmitir a informação diretamente.

Para manter alta a robustez do sistema, propomos o uso de dois VANTs repetidores. A formação pode ser controlada com a abordagem líder/seguidor. O VANT pulverizador, de tempos em tempos, transmite sua posição, direção, e velocidade aos VANTs seguidores. Isso permite ajustar a velocidade e a direção de acordo a se manter na área de comunicação tanto dos sensores como do VANT pulverizador.

Diversas abordagens têm sido propostas na literatura de controle de formação; a mais apropriada para a aplicação proposta neste artigo é a de modelo baseado em líder. Em tal modelo, um agente age como líder e outros agentes agem como seguidores que tentam imitar o comportamento reagindo a sua vizinhança próxima. Os agentes são hierarquicamente conectados ao agente líder. Isso simplifica o controle de formação tornando-o um problema de traqueamento (PANT, et al., 2002). Outros modelos de formação podem ser vistos em (BEARD, et al., 2001).

Quando o VANT pulverizador recebe informação referente a superdosagem de defensivo em área de fronteira, ele deve se afastar da mesma. Caso contrário, pode manter a linha atual de comportamento ou mesmo se aproximar da borda, caso a concentração de defensivo esteja abaixo de um limite especificado.

Considerando que a situação pode mudar rapidamente devido a condições climáticas, o uso de um protocolo de roteamento (transmissão de mensagens) capaz de lidar com tal dinamicidade é necessário. O protocolo de roteamento que mais se enquadra em tal necessidade é o protocolo oportunista, o qual pressupõe que um caminho de comunicação pode quebrar com frequência ou pode não existir em determinados momentos (BISWAS; MORRIS, 2004; WESTPHAL, 2006). O mecanismo de roteamento encaminha a mensagem para o destino em uma base salto-por-salto, sendo o próximo salto selecionado de acordo com as características específicas do protocolo. Não é necessário ter uma conexão de ponta a ponta estável da fonte para o destino. Os pacotes são enviados, mesmo que a topologia mude continuamente. Normalmente, os protocolos de roteamento oportunistas enviam um pacote não apenas para um único salto seguinte, mas sim para diversos vizinhos simultaneamente. Outros tipos de protocolos de roteamento podem ser vistos em (BRAUN et al., 2010).

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Existem duas maneiras principais para validação de projeto de WSN em larga escala: *testbeds* e simulação (COLESANTI, et al., 2007). A abordagem de *testbed* é realizada através de testes em versões reduzidas do projeto, normalmente dividindo-o em módulos e testando-os separadamente. Essa abordagem tem diversas limitações, principalmente pelo fato de que as aplicações são usualmente designadas para mensurar dados de fenômenos em regiões críticas, ocasionando o difícil acesso aos seres humanos. Além disso, WSNs enfrentam problemas que outros tipos de redes não sofrem: como a energia é fornecida por baterias, para fazer testes é necessário frequentemente a troca delas, o que é um processo demorado e custoso. Com essa limitação de energia, a abordagem tradicional de transmissão ou armazenamento de mensagens de *debug* no sensor fica mais complicada – pois a transmissão de pacotes *wireless* gerará mais

tráfego e consumo de energia, já o armazenamento das mensagens é limitado pelo espaço disponível no sensor (COLESANTI, et al., 2007). Devido a esses problemas com *testbeds*, a comunidade de WSN vem realizando validação de projetos com a abordagem de simulação. Existe uma grande quantidade de simuladores disponíveis (e.g. ns2, JavaSim, SSFNet). Estes simuladores foram desenvolvidos para redes específicas, sendo a extensão para o uso em WSN complicada (MALLANDRA, et al. 2006).

Desta forma, para o desenvolvimento deste trabalho utilizamos o OMNeT++, que é um simulador de evento discreto baseado em C++ para modelar redes de comunicação, multiprocessadores e outros sistemas paralelos e distribuídos. O OMNeT++ é *open-source* e não foi projetado para ser um simulador específico, assim, ele tem sido utilizado em muitos domínios diferentes, de simulação de redes com filas à redes sem fio (VARGA, 2010). Como o OMNeT++ é um simulador de redes genéricas, muitos arcabouços foram desenvolvidos para o uso de redes específicas. Um exemplo é o MiXiM, um arcabouço para modelagem de redes sem fio. Ele provê modelos detalhados de canais e conexões *wireless*, modelos móveis, modelos para obstáculos e vários protocolos de comunicação (KÖPKE, et al., 2008).

Com relação à implementação do projeto, a mesma foi dividida em duas frentes: (i) a simulação da comunicação/comportamento dos agentes – *Módulo Comportamento* e (ii) a simulação da aplicação/dispersão do defensivo – *Módulo Dispersão*. No *Módulo Comportamento*, para simular a comunicação entre o VANT e os sensores localizados na plantação foi utilizada a ferramenta OMNeT++ com o arcabouço MiXiM (Fig. 2(a)). Nesta figura podemos ver 5 nós em linha delimitando o espaço da lavoura, e um nó logo abaixo deles representando o VANT. Periodicamente o VANT efetua mensagens *broadcast* na lavoura para checar a quantidade de defensivo no local. Caso o sensor receba a mensagem, este responderá com outra mensagem *broadcast* com a quantidade de defensivo no local. Com essa informação, o VANT pode tomar decisão de mudar ou não de rota.

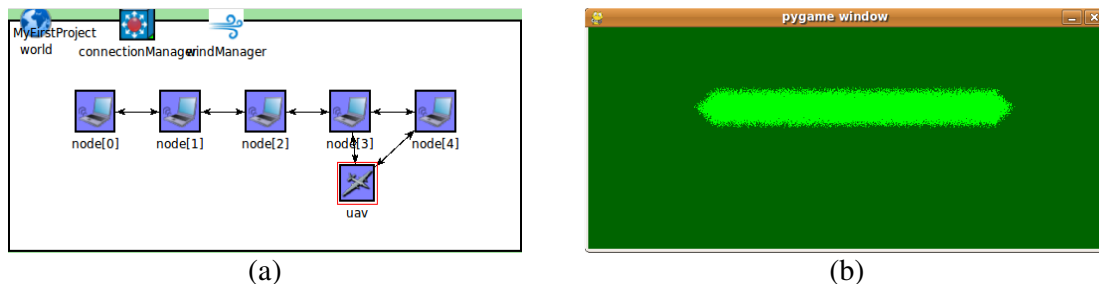


Figura 2. (a) Modelo do projeto construído no OMNeT++. (b) Vista parcial da aplicação de defensivo sendo borrifado na plantação.

O *Módulo Dispersão* foi desenvolvido em Python⁶ com a biblioteca SDL⁷. Tal módulo permite também a visualização do defensivo na plantação (Fig. 2(b)). Os dois módulos funcionam integrados⁸ com comunicação através de *sockets*. O *Módulo Comportamento* envia para o *Módulo Dispersão* a posição atual do VANT (x, y, z) além da velocidade e a orientação (v, θ). Ainda, no *Módulo Comportamento*, está implementada a função de gerenciamento de vento (*windManager*) que simula as mudanças de velocidade e orientação do vento, informando ao *Módulo Dispersão* as modificações. Através dessas informações, o *Módulo Dispersão* realiza o cálculo da dispersão do defensivo, obtendo a posição e o tempo de queda de cada gota. Os sensores, por sua vez, identificam a quantidade e a posição de defensivo depositado e retornam a informação ao *Módulo Comportamento*.

⁶ Python Programming Language, <http://www.python.org>

⁷ Simple DirectMedia Layer, <http://www.libsdl.org>

⁸ Vídeo da simulação disponível em http://youtu.be/wv_fqLYO4J8

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo foi proposto o uso de um enxame de VANTs intercomunicáveis para atuação em controle da dispersão de defensivos químicos em áreas delimitadas. Usando sensores e VANTs, propomos um laço de controle que permite que a aplicação de defensivos seja auto-ajustável, evitando a aplicação em áreas indevidas (borda externa da lavoura). A validação da presente etapa conta com dois módulos simuladores, um do comportamento dos sensores e outro da dispersão do defensivo. Apesar da plataforma ainda estar em fase de desenvolvimento, já é possível simular diferentes cenários do projeto, visando o melhor posicionamento dos sensores na lavoura, a velocidade e altura máximos do VANT, entre outras variáveis.

Restam ainda diversos trabalhos a serem desenvolvidos, notadamente: (i) Modelar de maneira mais real o comportamento do defensivo no ar; (ii) Implementar a camada de aplicação do VANT para que este possa mudar de rota de acordo com as respostas dos sensores da lavoura; (iii) Modelar a simulação com um enxame de VANTs; (iv) Validar o projeto em lavouras de diferentes dimensões e formatos; (v) Especificar o uso de *hardware* para o projeto.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro da FAPESP (ID 2008/05346-4) e CNPq (ID 483699/2009-8). Agradecemos também o apoio financeiro do CNPq e FAPESP ao INCT-SEC (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos) processos 573963/2008-8 e 08/57870-9. Por fim, gostaríamos de agradecer a CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro por meio de bolsas de estudos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEARD, R.; LAWTON, J.; HADAEGH F. Y.; **A coordination architecture for spacecraft formation control**, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 9, no. 6, 2001.
- BISWAS, S.; MORRIS, R. **Opportunistic Routing in Multi-Hop**, Wireless Networks ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 34, no. 1, January 2004, pp. 69-74
- BRAUN, T.; HEISSENBÜTTEL, M.; ROTH, T. **Performance of the beacon-less routing protocol in realistic scenarios**, Ad Hoc Networks, Vol. 8, Nr. 1, pp. 96-107, Elsevier, 2010.
- COLESANTI, U. M.; CROCIANI, C.; VITALETTI, A.; **On the Accuracy of OMNeT++ in the Wireless Sensor Networks Domain: Simulation vs. Testbed**. Proc. of the 4th ACM workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks, 2007.
- GIULETTI, F.; POLLINI, L.; INNOCENTI, M.; **Autonomous formation flight**, IEEE Control Systems Magazine, vol. 20, no. 6, pp. 34-44, 2000.
- KÖPKE, A.; SWIGULSKI, M.; WESSEL, K.; WILKOMM, D.; HANEVELD, P. T. K.; PARKER, T. E. V.; VISSER, O. W.; LICHTHE, H. S.; VALENTIM, S.; **Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++: the MiXiM vision**. Proceedings of SimuTools. 2008.
- LAWTON, J. R.; YOUNG, B.J.; BEARD, R.W.; **A decentralized approach to elementary formation maneuvers**, in IEEE Int. Conf. Robotics and Auto., 2000, pp. 2728-2733.
- LI, S.M.; BOSKOVIC, J. D.; AMIN S. S.; MEHRA, J.; MEHRA, R. K.; BEARD, R. W.; MCLAIN, T. W.; **Autonomous hierarchical control of multiple unmanned combat air vehicles (UCAVs)**, in Proc. of the American Control Conference, vol. 1, 2002.
- MALLANDRA, C.; SURI, A.; KUNCHAKARRA, V.; IYENGAR, S. S.; KANNAN, R.; DURRESI, A.; **Simulating Wireless Sensor Networks with OMNeT++**, 2006.
- MCLAIN, T. W.; CHANDLER, P. R.; RASMUSSEN, S.; PACHTER, M.; **Cooperative control of UAV rendezvous**, in Proc. of the American Control Conference, vol. 3, 2001.
- PANT, A.; SEILER, P.; HEDRICK, K.; **Mesh stability of look-ahead interconnected systems**, IEEE Trans. Automatic Contr: Conf, Vol. 47, No. 2, pp. 403-407, 2002.
- SCHUMACHER, C. J.; KUMAR, R.; **Adaptive control of UAVs in close-coupled formation flight**, in Proceedings of the American Control Conference, vol. 2, 2000.
- VARGA, A.; **Modeling and Tools for Network Simulation**, Cap. OMNeT++, Springer, 2010.
- WESTPHAL, C. **Opportunistic Routing in Dynamic Ad Hoc Networks: the OPRAH Protocol**, IEEE Int. Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2006.