Modelagem Computacional do Espaço Aéreo Baseada na Distribuição Espacial de Efeitos Causados pela Queda de Veículos Aéreos Não Tripulados

Felipe Leonardo Lôbo Medeiros[1,2], José Demisio Simões da Silva[2]

[1]Instituto de Estudos Avançados (IEAv)
Caixa Postal 6044 – 12.228-970 – São José dos Campos – SP – Brasil

[2]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Caixa Postal 515 – 12227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil

felipe@ieav.cta.br, demisio@lac.inpe.br

Abstract. *Nowadays, researches are developed aiming: the airworthiness certification for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs); and the increase of the autonomy of these vehicles. The main purpose of the airworthiness certification for UAVs is to guarantee a level of safety for the navigation of these vehicles that is equivalent or superior to the level of safety of the manned aerial vehicles. This work proposes a mathematical model and a method to represent aerial navigation environments through visibility graphs, that will allow to UAVs the automatic planning of paths with minimum extension and with decrease of the probability of involving human lives in possible accidents with impact on the ground.*

Resumo. *Atualmente, pesquisas são desenvolvidas visando: a certificação de navegação aérea para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs); e o aumento da autonomia destes veículos. A principal finalidade da certificação de navegação aérea para VANTs é garantir um nível de segurança para a navegação destes veículos que seja equivalente ou superior ao nível de segurança dos veículos aéreos tripulados. Este trabalho propõe um modelo matemático e um método para representar ambientes de navegação aérea através de grafos de visibilidade, que permitirão aos VANTs o planejamento automático de rotas com extensão mínima e com redução da probabilidade de envolver vidas humanas em possíveis acidentes com impacto no solo.*

1. Introdução

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) têm sido utilizados com êxito em diversas aplicações civis e militares. Atualmente, pesquisas são desenvolvidas com o propósito: de elaborar regulamentações e requisitos visando a certificação de navegação aérea para VANTs [Dalamagkidis *et al*. 2008a][Dalamagkidis *et al*. 2008b]; e de aumentar a autonomia destes veículos, proporcionando-lhes novas capacidades [Ludington *et al*. 2006][Grocholsky *et al*. 2006]. A principal finalidade da certificação de navegação aérea para VANTs é garantir um nível de segurança para a navegação destes veículos equivalente ou superior ao nível de segurança dos veículos aéreos tripulados, reduzindo

a probabilidade do envolvimento de vidas humanas em possíveis acidentes [Dalamagkidis et al. 2008a].

O aumento de autonomia consiste em diminuir o grau de dependência dos VANTs de operadores, proporcionando-lhes novas capacidades. Nas pesquisas destinadas ao aumento de autonomia, o cálculo ou planejamento automático de rotas de navegação efetuado pelo VANT é essencial para a realização da maioria das novas capacidades propostas. O planejamento de uma rota é o cálculo de uma seqüência de coordenadas de navegação que devem permitir a execução de trajetórias dinamicamente viáveis pelo VANT [Anderson *et al*. 2005][Kuwata e How 2004a]. A eficiência do método adotado para o planejamento automático de rotas depende principalmente da representação computacional adotada para o ambiente de navegação [Tozour 2003]. Este trabalho considera o planejamento de rotas com a menor extensão possível. Para esta consideração, os grafos de visibilidade são as formas de representação mais eficientes [Nilsson 1969][Lozano-Pérez e Wesley 1979], pois permitem o planejamento de rotas seguras e com a menor extensão possível.

Este trabalho associará a regulamentação para VANTs com o aumento de autonomia destes veículos, propondo um modelo matemático e um método que permitem a construção de grafos de visibilidade para a representação bidimensional de ambientes de navegação aérea. Estes grafos serão construídos com base: em distribuições espaciais de níveis de segurança para VANTs; e em modelos digitais de elevação. Estes grafos permitirão aos VANTs o planejamento de rotas seguras com extensão mínima e com redução da probabilidade de envolver vidas humanas em possíveis acidentes com queda deste veículos.

A Seção 2 deste trabalho apresenta a definição de nível de segurança para VANTs e o modelo matemático proposto em [Dalamagkidis *et al*. 2008c] para o cálculo do número esperado de fatalidades causadas pela queda destes veículos. Na Seção 3, é apresentado o método proposto para a construção de representações bidimensionais do ambiente de navegação através de grafos de visibilidade.

2. Nível de Segurança de um VANT

A métrica utilizada para a avaliar a segurança operacional de um VANT é o intervalo de tempo mínimo aceitável entre dois acidentes com impacto no solo. Este intervalo de tempo é definido por

$$t_m = \frac{n_{ef}}{n_{es}} \tag{1}$$

Onde: n_{ef} é o número esperado de fatalidades; e n_{es} é o nível equivalente de segurança, cujo valor é definido como 10^{-7} fatalidade por hora de vôo para acidentes com impacto no solo [Dalamagkidis *et al*. 2008b].

Este trabalho utiliza o modelo matemático proposto em [Dalamagkidis *et al*. 2008c] para o cálculo do número esperado de fatalidades em acidentes com impacto no solo. Neste modelo, o número esperado de fatalidades é definido por

$$n_{ef} = A_e \, d_p \, P_f \tag{2}$$

Onde: A_e é a área exposta ao acidente, em quilômetros quadrados (km^2); d_p é a densidade demográfica da superfície exposta ao acidente, medida em número de pessoas por quilômetro quadrado (pessoa/km2); e P_f é a probabilidade de ocorrer uma fatalidade.

A área exposta ao acidente é definida por

$$A_e = E_v\left[C_v + \frac{a_p}{sen(\alpha)}\right] \tag{3}$$

Onde: E_v é a envergadura ou o diâmetro do rotor do veículo, em metros (m); C_v é o comprimento do veículo, em metros; a_p é a altura média de uma pessoa, em metros; α é o ângulo de descida do veículo, formado pelo eixo longitudinal do mesmo e a superfície de impacto.

A probabilidade de ocorrer uma fatalidade é definida por

$$P_f = \frac{1}{1+\sqrt{\frac{p_2}{p_3}}\left[\frac{p_3}{E_c}\right]^{\frac{1}{4p_1}}} \tag{4}$$

Onde: E_c é a energia cinética do VANT no momento do impacto, em Joules (J); $p_1 \in (0,1]$ é o parâmetro de proteção que indica quão exposta está uma pessoa ao impacto, e o aumento deste parâmetro indica o aumento da proteção a pessoas expostas ao acidente e, logo, a diminuição da probabilidade de ocorrer uma fatalidade para a mesma energia cinética; p_2 é a energia de impacto, em Joules, necessária para uma probabilidade de fatalidade igual a 50%, com p_1 igual a 0.5; e p_3 é o limiar da energia de impacto, em Joules, necessária para causar uma fatalidade para p_1 tendendo a zero.

Para efeito de simplificação nos cálculos, o aumento em 40% da velocidade máxima de operação v_o pode substituir a velocidade terminal [Dalamagkidis et al. 2008c]. Neste caso, a energia cinética é definida por

$$E_c = m(1.4v_o)^2 \tag{5}$$

Onde: m é a massa do veículo, em quilogramas (kg).

Em [Dalamagkidis *et al*. 2008c] foram geradas e analisadas distribuições espaciais do intervalo de tempo t_m por grande parte do espaço aéreo dos EUA, para seis tipos de VANTs: Global Hawk; Predator; Neptune; Fire Scout; RMAX II; e Maxi Joker 2. Porém, estas distribuições apresentam o mesmo número esperado de fatalidades para áreas urbanas e rurais de um mesmo município, pois foi considerada a mesma densidade demográfica uniforme sem diferenciação destas áreas. Este trabalho propõe um modelo matemático que gerará distribuições semelhantes às apresentadas em [Dalamagkidis *et al*. 2008c], mas diferenciando e estimando densidades demográficas para áreas urbanas e rurais de cada município da superfície do ambiente de navegação.

3. Construção de Grafos de Visibilidade

Um grafo de visibilidade é um conjunto de coordenadas (nós) definidas pelas extremidades convexas dos polígonos que representam as regiões não navegáveis de um

ambiente, e conectadas por arestas que não cortam estes polígonos [Lozano-Pérez e Wesley 1979].

Este trabalho propõem um modelo matemático e um método para a construção de grafos de visibilidade aplicados à representação de ambientes de navegação aérea. O método consiste em duas principais etapas: a criação de representações auxiliares, denominadas grades binárias, das regiões navegáveis e não navegáveis de ambientes de navegação aérea; e a determinação de nós e de arestas de grafos de visibilidade com base nas grades binárias criadas.

A primeira etapa consiste na aplicação do modelo matemático proposto para definição de uma grade binária, considerando: o modelo digital de elevação de um ambiente de navegação; uma altitude de navegação; uma altura de segurança; e uma distribuição espacial do número esperado de fatalidades causadas pelo impacto de um VANT no solo.

A segunda etapa consiste na aplicação dos algoritmos para determinação de nós e arestas de grafos de visibilidade propostos em [Medeiros e Silva 2008] e na aplicação da técnica de verificação de situações de colisões proposta em [Medeiros *et al*. 2007].

Cada nó de um grafo de visibilidade construído usando o método proposto neste trabalho será uma coordenada geográfica central da região navegável representada por uma célula binária adjacente à extremidade de uma célula binária que representa uma região não navegável do ambiente. Os nós são conectados por arestas que não atravessam ou que não passam muito perto de regiões não navegáveis do ambiente. Portanto, uma rota planejada através de um grafo de visibilidade construído pelo método proposto será composta por uma coordenada geográfica inicial, uma seqüência de coordenadas geográficas e uma coordenada geográfica final. A coordenada inicial e a última coordenada podem ser qualquer coordenada geográfica de regiões navegáveis do ambiente. Observa-se que será considerado um afastamento ou distância de segurança igual à distância entre um nó definido pela coordenada central de uma região navegável e a extremidade de uma região não navegável que define este nó. Porém, este afastamento de segurança pode ser especificado de acordo com a necessidade.

3.1. Criação de Grades Binárias

Uma grade binária é uma grade regular [Coxeter 1973][Tozour 2003] cujas células assumem o valor 1, indicando que as regiões do ambiente representadas por estas células são não navegáveis.

Este trabalho propõe um modelo matemático para o cálculo dos valores das células de uma grade binária. Neste modelo proposto, o valor de uma célula da grade binária é definido por

$$b_{lc} = \begin{cases} 0\ se \begin{cases} e`_{lc} = 0 \\ t_m(d_{lc}) \le t_{ml} \end{cases} \\ 1\ se \begin{cases} e`_{lc} = 1 \\ t_m(d_{lc}) > t_{ml} \end{cases} \end{cases} \tag{6}$$

$$d_{lc} = u_{lc}\left(\frac{p_u(m_{lc})}{n_{cu}(m_{lc})a_c}\right) + (1-u_{lc})\left(\frac{p_r(m_{lc})}{n_{cr}(m_{lc})a_c}\right) \quad (7)$$

Onde: l e c são, respectivamente, a linha e a coluna de uma célula da grade binária; e'_{lc} é uma célula da matriz binária de elevações do modelo digital de elevação; m_{lc} é o código padronizado pelo IBGE do município de maior densidade demográfica uniforme, que possui alguma parcela da região representada pela célula binária b_{lc}; $t_m(d_{lc})$ é o intervalo de tempo mínimo aceitável entre dois acidentes com impacto no solo, considerando a densidade demográfica urbana ou rural d_{lc} do município de código m_{lc} da região representada por b_{lc}; t_{ml} é um valor limite para t_m e que permite a restrição das regiões navegáveis por um VANT, garantindo segurança às populações das regiões sobrevoadas; u_{lc} é uma célula da matriz de áreas urbanas e que indica se a região representada por b_{lc} possui ou não alguma área urbana; p_u é a população urbana do município de código m_{lc}; n_{cu} é o número de células com alguma parcela de área urbana do município de código m_{lc}; a_c é a área representada por cada célula da matriz de municípios; p_r é a população rural do município de código m_{lc}; n_{cr} é o número de células com nenhuma parcela de área urbana do município de código m_{lc}.

Este trabalho propõe o método apresentado na Figura 1 para aplicação das Equações (6) e (7) na criação de uma grade binária.

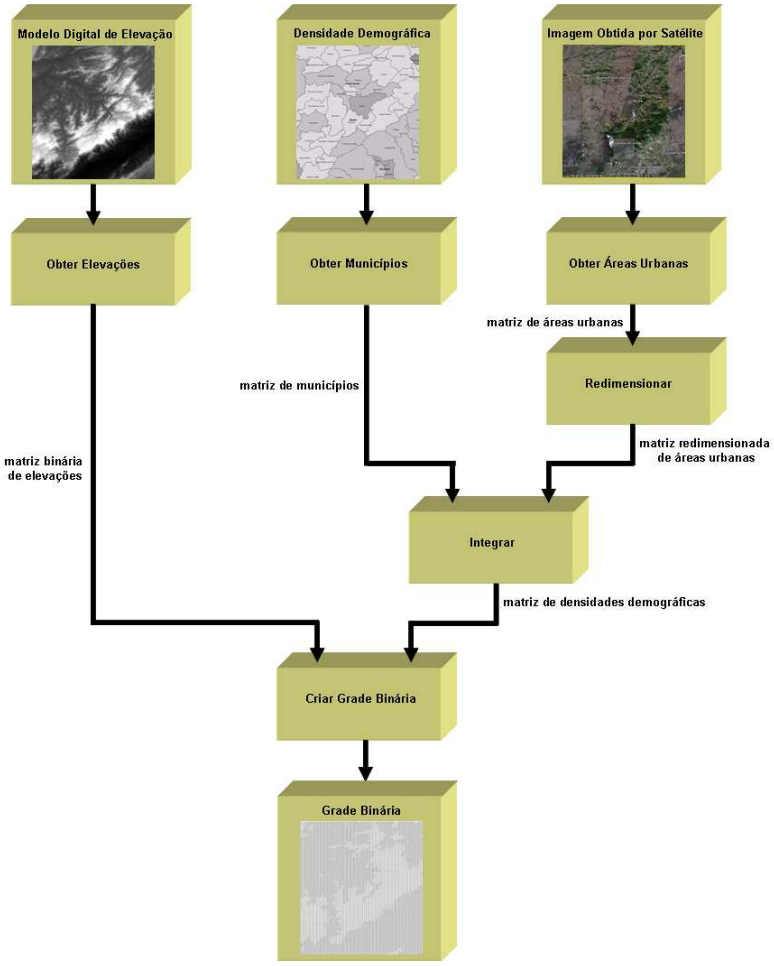

Figura 1. Método proposto para criação de grades binárias

A primeira etapa do método é destinada à criação da matriz binária de elevações, que é uma simplificação e redimensionamento do modelo digital de elevação. Uma célula e'_{lc} da matriz binária de elevações assume o valor 1, se houver pelo menos uma célula da matriz de elevações coberta pela área representada por e'_{lc} com elevação superior ou igual à diferença entre a altitude de navegação e uma altura de segurança.

A segunda etapa é a determinação da matriz de municípios que é uma simplificação utilizada para representar a distribuição espacial dos municípios associada à grade binária. Uma célula m_{lc} da matriz de municípios assumirá o código padronizado pelo IBGE do município com maior densidade demográfica dentre os municípios que possuem alguma parcela de área representada por uma célula b_{lc} da grade binária. Cada célula m_{lc} auxiliará a estimação da densidade demográfica urbana ou rural da região representada por uma célula b_{lc}.

O objetivo da terceira etapa é criar a matriz de áreas urbanas, proporcionando a diferenciação entre áreas urbanas e rurais para a estimação da densidade demográfica de cada célula da grade binária. Neste trabalho, as áreas urbanas e rurais serão estimadas através de classificações de imagens georeferenciadas das superfícies dos ambientes de navegação. Devido às dimensões do ambiente de navegação, serão utilizadas imagens obtidas por sensores embarcados em satélites. Há diversos trabalhos que abordam a determinação de áreas urbanas por meio da aplicação de diferentes métodos na classificação de imagens georeferenciadas obtidas por satélites [Herold *et al*. 2003][Benediktisson *et al*. 2003][Shackelford e Davis 2003][Quintanilha *et al*. 2008] [Gonçalves *et al*. 2005].

A quarta etapa consiste no redimensionamento da matriz de áreas urbanas, transformando-a em uma matriz com a mesma dimensão da grade binária.

Na quinta etapa, a matriz de municípios é integrada à matriz de áreas urbanas, através da aplicação da Equação 7.

A última etapa é a aplicação da Equação (6) que permite a integração da matriz binária de elevações com a distribuição espacial do intervalo de tempo t_m, visando a determinação dos valores de cada célula da grade binária.

Como descrito anteriormente, após a criação de uma grade binária, dois algoritmos propostos em [Medeiros e Silva 2008] serão aplicados em seqüência para a construção de um grafo de visibilidade.

O primeiro algoritmo tem como função o cálculo dos nós do grafo a partir da determinação das extremidades das células não navegáveis de uma grade binária.

O segundo algoritmo determina as arestas de um grafo de visibilidade, com eliminação daquelas arestas não navegáveis, isto é, das arestas que geram situações de colisão para a navegação. Uma aresta não navegável, é aquela que corta ou que se encontra a uma distância inferior a uma distância de segurança de alguma célula não navegável da grade binária. A verificação de situações de colisão será realizada pela técnica proposta em [Medeiros *et al*. 2007].

4. Conclusões

Espera-se que os grafos de visibilidade construídos pelo método e modelo matemático propostos permitam aos VANTs o planejamento automático de rotas: que possuam a extensão mínima; que não ocasionem situações de colisão com elevações das superfícies sobrevoadas; e que reduzam a probabilidade de envolver vidas humanas em possíveis acidentes com impacto no solo.

References

Anderson, E. P., Beard, R. W., McLain, T. W. (2005) "Real-Time Dynamic Trajectory Smoothing for Unmanned Air Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 3, p. 471-477.

Benediktsson, J. A., Pesaresi, M., Arnason, K. (2003) "Classification and Feature Extraction for Remote Sensing Images From Urban Areas Based on Morphological Transformations", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 9, p. 1940-1949.

Coxeter, H. S. M.. Regular Polytopes, Section IV: Tessellations and Honeycombs. Dover, 1973.

Dalamagkidis, K., Valavanis, K.P., Piegl, L.A. (2008a) "Current status and future perspectives for unmanned aircraft system operations in the US", In: Journal of Intelligent and Robotic Systems, pp. 313–329. Springer, The Netherlands.

Dalamagkidis, K., Valavanis, K. P., Piegl, L. A.: On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system: issues, challenges, operational restrictions, certification, and recommendations. Springer (2008b).

Dalamagkidis, K., Valavanis, K.P., Piegl, L.A. (2008c) "Evaluating the risk of unmanned aircraft ground impacts", In: 16th Mediterranean conference on control and automation.

Gonçalves, C. D. A. B.; Pereira, M. N. ; Souza, I. M. E. (2005) "Uso de imagens CBERS para mapeamento de uso do solo urbano como subsídio ao planejamento", In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. Goiânia 2005, 2005, p. 969-977.

Grocholsky, B., Keller, J., Kumar, V., Pappas, G. (2006) "Cooperative Air and Ground Surveillance: A Scalable Approach to the Detection and Localization of Targets by a Network of UAV's and UGV's", IEEE Robotics & Automation Magazine, p. 16-26.

Herold, M., Gardner, M. E., Roberts, D. A. (2003) "Spectral Resolution Requirements for Mapping Urban Areas", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 9, p. 1907-1919.

Kuwata, Y., How, J. P. (2004a) "Stable Trajectory Design for Highly Constrained Environments Using Receding Horizon Control", Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts, p. 902-907.

Lozano-Pérez, T., Wesley, M. A. (1979) "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles", Contmum. ACM, vol. 22, p. 560-570.

Ludington, B., Johnson, E., Vachtsevanos, G. (2006) “Augmenting UAV Autonomy: Vision-Based Navigation and Target Tracking for Unmanned Aerial Vehicles”, IEEE Robotics & Automation Magazine, p. 63-71.

Nilsson, N. J. (1969) "A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques”. In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence , Association for Computing Machinery, New York, p. 509-520.

Quintanilha, J.A., Filho, L.E., Beltrame, A.M.K. (2008) "Spatial and spectral comparison among IKONOS, CBERS and ASTER images to identify and detect land occupation changes around urban railway in São Paulo - Brazil", International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), art. no. 4422882, p. 659-662.

Shackelford, A. K., Davis, C. H., (2003) “A Combined Fuzzy Pixel-Based and Object-Based Approach for Classification of High-Resolution Multispectral Data Over Urban Areas”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 10, p. 2354-2363.

Tozour, P. (2003) “Search Space Representations”, In AI Game Programming Wisdom 2, p. 85-102. Charles River Media.