

# Grafos de Visibilidade Aplicados à Representação Computacional de Ambientes de Navegação Aérea

Felipe Leonardo Lôbo Medeiros<sup>1</sup> e José Demisio Simões da Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Estudos Avançados (IEAv) – CEP 12.228-970 – São José dos Campos – SP – Brasil

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – CEP 12227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil

**Resumo** — Este trabalho propõe uma técnica para construção automática de grafos de visibilidade, a fim de representar bidimensionalmente ambientes de navegação aérea para veículos autônomos. Os grafos de visibilidade são construídos através de grades binárias e do raio de curva do veículo autônomo. Resultados são apresentados neste trabalho.

**Palavras-chaves** — Grafo de visibilidade, representação computacional de ambientes, navegação aérea autônoma.

## I. INTRODUÇÃO

Veículos autônomos são utilizados com êxito em diversas aplicações civis e militares. Atualmente, pesquisas têm sido desenvolvidas com o propósito de proporcionar novas capacidades ao veículo autônomo [1]-[2]. O cálculo ou planejamento automático de trajetórias de navegação é essencial para a realização da maioria destas novas capacidades.

O planejamento de uma trajetória consiste na determinação de uma seqüência de coordenadas de navegação, também denominadas *waypoints*, que é enviada para o sistema de controle do veículo autônomo, para que o mesmo navegue de uma coordenada de origem até uma coordenada de destino. Para a navegação aérea, as coordenadas são expressas no sistema de coordenadas geodésicas. Neste sistema, cada coordenada é formada por uma latitude, uma longitude e uma altitude.

Há diversos métodos que podem ser aplicados ao problema de planejamento de trajetórias. A eficiência de tais métodos depende da representação computacional adotada para o ambiente de navegação [3]. Uma representação adequada para o ambiente de navegação pode proporcionar segurança e viabilidade dinâmica para as trajetórias planejadas, e ainda pode permitir uma redução de custos computacionais para os métodos de planejamento de trajetórias.

Alguns dos principais métodos usados em jogos computacionais para a representação computacional de ambientes de navegação são utilizados também na navegação autônoma. Os mais utilizados na navegação aérea de veículos autônomos são os grafos de visibilidade [4] e os diagramas de Voronoi [5].

Este trabalho propõe uma técnica para a construção automática de grafos de visibilidade para representar bidimensionalmente ambientes de navegação aérea. A representação é bidimensional devido à altitude de navegação ser considerada constante. Os grafos de visibilidade são

construídos através de grades binárias e do raio de curva do veículo autônomo. As grades binárias são utilizadas para possibilitar a determinação dos nós e arestas do grafo de visibilidade, através de uma modelagem das regiões navegáveis e não navegáveis do ambiente, considerando constantes uma altitude de navegação e uma altura de segurança. A utilização do raio de curva do veículo permite a criação de grafos de visibilidade através dos quais seja possível planejar trajetórias com viabilidade dinâmica e segurança para a navegação.

A seção 2 apresenta o algoritmo proposto para a criação de grades binárias. Na seção 3 é descrita a integração do raio de curva do veículo autônomo com o grafo de extremidades. A seção 4 descreve a técnica proposta para a construção automática de grafos de extremidades. Na seção 5, são apresentados os resultados obtidos com a implementação da técnica e com a aplicação a um conjunto de casos de teste. A seção 6 apresenta as conclusões obtidas com a análise dos resultados.

## II. GRADES BINÁRIAS

Uma grade binária é uma discretização da matriz de altitudes que compõe o modelo digital de elevação do ambiente utilizado para a navegação aérea autônoma [6]. Cada célula da grade binária representa uma região com área  $mb\ ma\ rs^2$  do ambiente de navegação, onde:  $rs$  é a resolução para a conversão da matriz de altitudes em uma grade binária;  $ma$  é a medida, em graus, da altura de uma célula da matriz de altitudes; e  $mb$  é a medida, em graus, da base de uma célula da matriz de altitudes. A região da matriz de altitudes que corresponde a uma célula  $b_{lc}$  da grade binária é apresentada no esquema da Fig. 1, onde  $ci$  e  $cf$  são as coordenadas limitantes do modelo digital de elevação.

As células da grade são binárias e aquelas com valor igual a 1 indicam as regiões não navegáveis do ambiente, considerando uma altitude limite  $al$  dada pela diferença entre uma altitude de navegação  $an$  e uma altura de segurança  $as$ . O valor de uma célula  $b_{lc}$  é definido por

$$b_{lc} = \begin{cases} 0, & \text{para } a_{l_1 \leq i \leq l_2, c_1 \leq j \leq c_2} < al \\ 1, & \text{para } a_{l_1 \leq i \leq l_2, c_1 \leq j \leq c_2} \geq al \end{cases} \quad (1)$$

Onde:  $l$  e  $c$  são os índices das linhas e colunas da grade binária, para  $l$  e  $c$  variando de 1 até a ordem da grade binária. A ordem da grade binária é definida por

$$ng = \frac{na}{rs} \quad (2)$$

Onde:  $na$  é a ordem da matriz de altitudes do modelo digital de elevação.

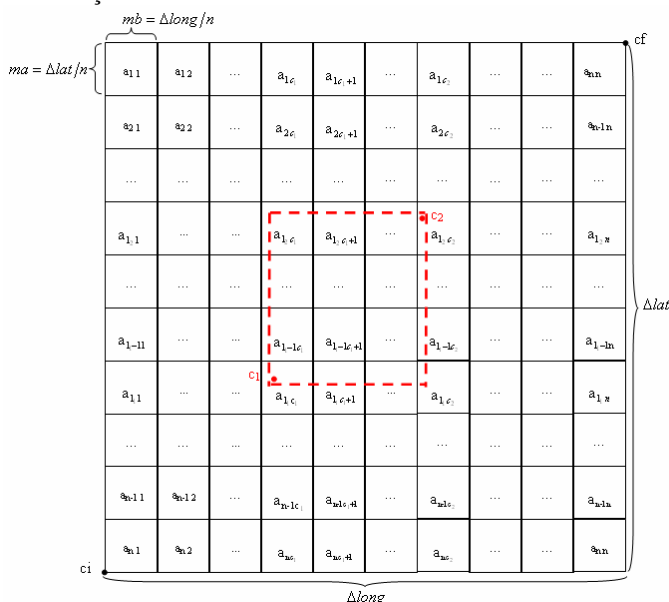


Fig. 1. Região correspondente a uma célula  $b_{lc}$ .

### III. INTEGRAÇÃO DE RAIOS DE CURVA COM GRAFO DE VISIBILIDADE

O objetivo da integração da característica dinâmica raio de curva é a construção de grafos de visibilidade através dos quais seja possível planejar trajetórias seguras e dinamicamente viáveis para a navegação de veículos aéreos autônomos. O raio de curva é definido por

$$rc = \frac{v^2}{G \tan(\beta)} \quad (3)$$

Onde:  $v$  é a velocidade de navegação do veículo aéreo;  $G$  é a aceleração da gravidade;  $\beta$  é o ângulo de inclinação do veículo, para uma velocidade especificada;  $P$  é o peso do veículo; e  $F$  é a força centrípeta. A Fig. 2 apresenta um esquema com as informações necessárias para o cálculo do raio de curva de um veículo aéreo.

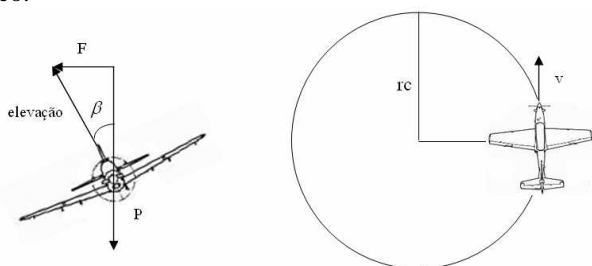


Fig. 2. Raio de curva de um veículo aéreo.

Neste trabalho,  $\beta$  é a inclinação máxima possível que não compromete a estrutura do veículo, para uma velocidade constante de navegação.

O tamanho de cada célula é associado ao raio de curva do veículo aéreo através do cálculo do comprimento do menor lado da célula da grade binária baseado no raio de curva do veículo. O menor lado da célula binária é definido por

$$ml = \frac{fm(ci, cf)}{ng} = 2krc \quad (4)$$

Onde:  $k$  é um parâmetro de segurança;  $fm$  é uma função baseada na distância geodésica, que converte o menor valor entre  $\Delta lat$  e  $\Delta long$  em metros.

Substituindo os termos de (4) por (2) e por (3), a resolução de conversão da matriz de altitudes na grade binária é definida, em termos do raio de curva, por

$$rs = \frac{2krcna}{fm(ci, cf)} \quad (5)$$

Desta forma, o tamanho de cada célula da grade binária está associado com o raio de curva do veículo.

### IV. CONSTRUÇÃO DO GRAFO DE VISIBILIDADE

Este trabalho propõe uma técnica para a construção de representações do ambiente de navegação aérea por meio de grafos de visibilidade. A técnica consiste em duas etapas: o cálculo dos nós do grafo a partir da determinação das extremidades das células não navegáveis de uma grade binária; e a determinação das arestas do grafo, com eliminação daquelas arestas que cortam ou que estão próximas a células não navegáveis da grade.

Cada nó do grafo de visibilidade é a coordenada central da região navegável representada por uma célula binária, que é vizinha da extremidade de outra célula da grade binária que representa uma região não navegável. As extremidades dos obstáculos são determinadas através do algoritmo apresentado a seguir.

Para  $l$  variando de 1 até  $ng$  faça

Para  $c$  variando de 1 até  $ng$  faça

Se  $b_{lc} = 1$  faça

Se  $l+1 \leq ng$  e  $c-1 \geq 0$  faça

$$\text{Se } \begin{bmatrix} (l+1, c-1) & (l+1, c) \\ (l, c-1) & (l, c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ faça}$$

Calcular a coordenada central da célula  $b_{l+1, c-1}$ .  
Adicionar tal coordenada como nó do grafo de extremidades.

Se  $l+1 \leq ng$  e  $c+1 \leq ng$  faça

$$\text{Se } \begin{bmatrix} (l+1, c) & (l+1, c+1) \\ (l, c) & (l, c+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ faça}$$

Calcular a coordenada central da célula  $b_{l+1, c+1}$ .  
Adicionar tal coordenada como nó do grafo de extremidades.

Se  $l-1 \geq 0$  e  $c+1 \leq ng$  faça

$$\text{Se } \begin{bmatrix} (l, c) & (l, c+1) \\ (l-1, c) & (l-1, c+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ faça}$$

Calcular a coordenada central da célula  $b_{l-1, c+1}$ .  
Adicionar tal coordenada como nó do grafo de extremidades.

Se  $l-1 \geq 0$  e  $c-1 \geq 0$  faça

$$\text{Se } \begin{bmatrix} (l, c-1) & (l, c) \\ (l-1, c-1) & (l-1, c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ faça}$$

Calcular a coordenada central da célula  $b_{l,c}$ .  
Adicionar tal coordenada como nó do grafo de extremidades.

Na segunda etapa, é eliminada cada aresta do grafo que gera uma situação de colisão, isto é, que corta ou que está muito próxima a alguma região não navegável. O algoritmo para verificação de situações de colisão é aquele proposto em [6]. Assim, é possível planejar trajetórias dinamicamente viáveis e seguras através dos grafos de visibilidade construídos pela técnica apresentada.

## V. RESULTADOS

O algoritmo para criação de grades binárias e o algoritmo para construção de representações de ambientes de navegação através de grafos de visibilidade foram implementados. Depois, foram criadas quatro grades binárias considerando os raios de curva obtidos com as especificações de velocidade e ângulo de inclinação máximo apresentadas na Tabela 1. A altitude limite  $al$  necessária para a criação das grades binárias é igual a 1200 metros, considerando uma altitude de navegação  $an$  igual a 1500 metros e uma altura de segurança  $as$  igual a 300 metros. O modelo digital de elevação utilizado possui uma matriz de altitude de ordem igual a 1201 e é delimitado: por uma coordenada  $ci$ , com latitude igual a -22,994583 e com longitude igual a -45.99875; e por uma coordenada  $cf$ , com latitude igual a -22.000417 e com longitude igual a -45.002917.

TABELA I GRAFOS DE VISIBILIDADE CONSTRUÍDOS

| v<br>(km/h) | $\beta$ | rc (m)  | rs    | ng  | Nº de Nós | Nº de Arestas |
|-------------|---------|---------|-------|-----|-----------|---------------|
| 200         | 30°     | 544.94  | 8.78  | 137 | 641       | 31893         |
| 200         | 60°     | 181.65  | 2.93  | 411 | 2564      | 259674        |
| 300         | 30°     | 1226.11 | 19.75 | 61  | 211       | 5697          |
| 300         | 60°     | 408.70  | 6.58  | 183 | 934       | 54996         |

A Fig. 3 apresenta um grafo de visibilidade construído considerando o raio de curva de 1226.109 metros.

## VI. OBSERVAÇÕES FINAIS

Através dos resultados obtidos, foi possível comprovar a eficiência da técnica proposta, devido à verificação da viabilidade dinâmica e da segurança da aplicação de grafos de visibilidade à representação bidimensional de ambientes para navegação aérea autônoma, considerando a construção dos grafos através de modelos digitais de elevação e de raios de curva de veículos aéreos.

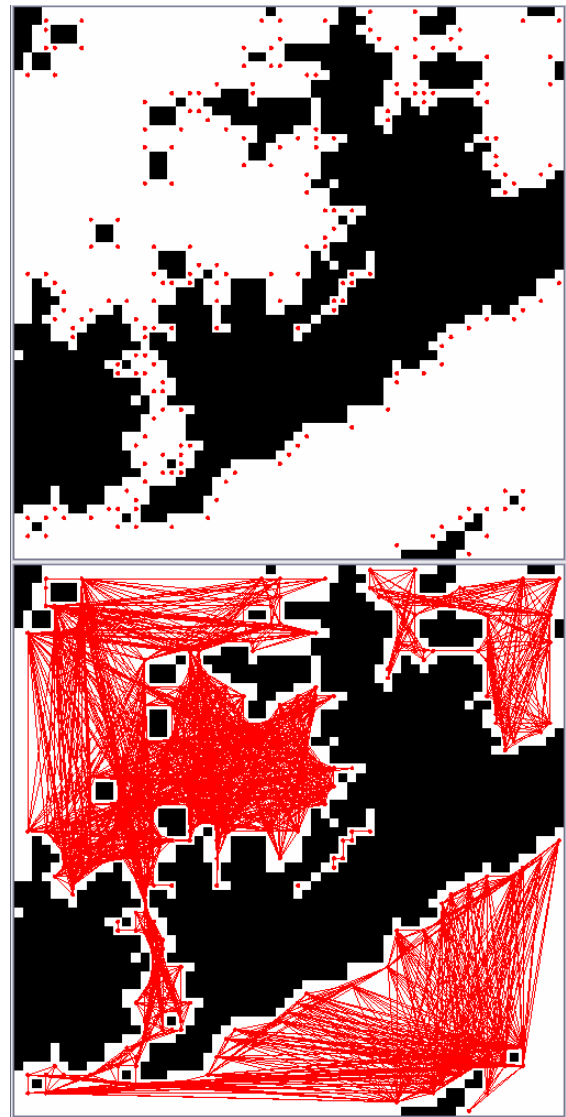


Fig. 3. Grafo de visibilidade criado com raio de curva igual a 1226.109 m.

## REFERÊNCIAS

- [1] Ludington, B., Johnson, E., Vachtsevanos, G., "Augmenting UAV Autonomy: Vision-Based Navigation and Target Tracking for Unmanned Aerial Vehicles", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, pp. 63-71.
- [2] Grocholsky, B., Keller, J., Kumar, V., Pappas, G., "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*, 2006, pp. 16-26.
- [3] Tozour, P., *Search Space Representations*, in *AI Game Programming Wisdom 2*, Charles River Media, pp. 85-102.
- [4] Lee, J., Kim, H. J., "Trajectory Generation for Rendezvous of Unmanned Aerial Vehicles with Kinematic Constraints", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 1056-1061.
- [5] Beard, R. W., McLain, T. W., Goodrich, M. A., Anderson, E. P., "Coordinated Target Assignment and Intercept for Unmanned Air Vehicles", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 6, 2002, pp. 911-922.
- [6] Medeiros, F. L. L., Shiguemori, E. H., Monteiro, M. V. T., Domiciano, M. A. P., Martins, M. P., "Verificação Automática de Situações de Colisão na Navegação de Veículos Aéreos Não Tripulados", *VI Encontro Nacional de Inteligência Artificial (ENIA'07)*, 2007, pp. 932-941.