

# Simulação de Navegação Autônoma com Correção de Trajetória por Correlação Cruzada entre Imagens Aéreas e Imagens de Satélite

1T Carlos Henrique Machado Silva Esteves

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Pça Marechal Eduardo Gomes, 50. Campus do CTA, São José dos Campos - SP

**Resumo** — Este trabalho realiza uma simulação de navegação aérea autônoma de um Veículo Aéreo Não Tripulado, utilizando a correlação cruzada entre imagens de satélite e imagens aéreas obtidas através da câmera simulada para corrigir a posição estimada do veículo. Supõe-se a orientação e altitude do veículo conhecidas, de forma que o método é aplicado na correção da posição em duas dimensões. São obtidas estatísticas de desempenho, possibilitando a comparação dos resultados com os obtidos para navegação estimada, sem correção de posição ao longo da trajetória. O método também é testado com uma imagem aérea real, para demonstrar a viabilidade prática.

**Palavras-chaves** — Navegação Autônoma, Processamento de Imagens, Veículo Aéreo Não Tripulado.

## I. INTRODUÇÃO

Sistemas aéreos autônomos, como mísseis de médio e longo alcance e veículos aéreos não tripulados (VANTs), devem conhecer sua posição ao longo do tempo para possibilitar a navegação até o alvo com o menor erro possível. Há várias maneiras de estimar esta posição, como por exemplo Sistemas de Navegação Inercial e GPS.

Alguns dos problemas dos sistemas de navegação inercial são a complexidade, o alto custo, e que os erros se acumulam, ou seja, quanto maior a distância percorrida, maior o erro na posição estimada [1].

A navegação por GPS não apresenta erros cumulativos, mas a obtenção da posição depende de comunicação com satélites e pode sofrer diversos tipos de interferência, tanto naturais quanto artificiais, e também depende da disponibilidade dos satélites [2].

Na prática é muito utilizada a navegação inercial em conjunto com o GPS. Uma alternativa a esta configuração é a navegação visual, através da correlação cruzada entre as imagens aéreas obtidas durante o trajeto e imagens de satélite armazenadas numa base de dados. As vantagens são a autonomia (não necessita de nenhum tipo de comunicação), a simplicidade e erros muito pequenos. Este sistema também pode ser usado em conjunto com sistemas de navegação inercial e/ou GPS.

Este trabalho simula o uso de um sistema de navegação visual em um veículo aéreo não tripulado (VANT) através da correlação entre as imagens aéreas obtidas durante trajetória e imagens de satélite. Deste modo quando o veículo se encontra em uma região com imagem de satélite disponível, uma foto é tirada da superfície e a comparação com a imagem de satélite permite a redução do erro na posição estimada.

## II. SIMULAÇÃO DA NAVEGAÇÃO

A navegação do VANT foi simulada através de alguns *way points* na cidade de São José dos Campos. As imagens de satélite foram obtidas através do aplicativo *Google Earth*, sendo que a escala de pixels para metros em cada imagem também é fornecida pelo aplicativo. Esta escala é uma aproximação pois considera a Terra plana em toda a extensão da imagem, mas como as imagens utilizadas são muito pequenas para que a curvatura da Terra cause alguma influência, os erros cometidos por essa aproximação são mínimos.

A posição inicial do veículo (latitude e longitude) foi tida como conhecida, bem como as posições de todos os *way points* a serem seguidos. Considerou-se, por simplicidade, a atitude e altitude exatas do veículo sempre conhecidas, embora com um poder computacional grande os erros nestes parâmetros também possam ser minimizados através do método da correlação cruzada.

Considerou-se que o veículo navega sempre por loxodromias (*rhumb lines*), ou seja, mantendo ângulo constante com os meridianos. Este não é o menor caminho entre dois pontos na superfície terrestre (que é dado por uma ortodromia (*great circle*)), porém é o mais simples de ser percorrido por manter a atitude constante. Deste modo, para encontrar o ângulo a ser seguido pelo veículo basta encontrar o azimute  $\theta$  e entre a origem  $(lat_1, lon_1)$  e o destino  $(lat_2, lon_2)$  considerando uma loxodromia, como é descrito pelas equações abaixo [5].

$$\psi_i = \pm \ln \left[ \operatorname{tg} \left( \left| \frac{lat_i}{2} \right| + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (1)$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \left( \frac{lon_2 - lon_1}{\psi_2 - \psi_1} \right) \quad (2)$$

E para encontrar a distância a ser percorrida até o destino, sendo  $R$  o raio da Terra, tem-se:

$$d = R \left| \frac{\psi_2 - \psi_1}{\cos \theta} \right| \quad (3)$$

Dada a posição  $(lat_0, lon_0)$ , a atitude  $\theta$ , a velocidade  $V$  do veículo e o raio da Terra  $R$ , as coordenadas de sua posição após um tempo  $\Delta t$  podem ser obtidas da seguinte maneira, onde  $\psi_i$  é dado por (1):

$$lat_1 = lat_0 + \frac{V\Delta t \cos \theta}{R} \quad (4)$$

$$lon_1 = lon_0 + tg\theta(\psi_1 - \psi_0) \quad (5)$$

Neste trabalho, a posição estimada do veículo é obtida através da aplicação dos passos demonstrados acima, considerando-se a velocidade e atitude do veículo sempre conhecidas, de modo que, se não houvesse nenhuma influência externa, desconsiderando a dinâmica e considerando a atuação do controle perfeita e instantânea, o veículo poderia chegar a todos os destinos sem nenhum erro e conheceria sua posição exata a todo instante. No entanto, há um grande número de fatores que impossibilitam que isso ocorra, como por exemplo a dinâmica do veículo e a influência do vento. Deste modo, a posição real do veículo diferirá da posição estimada, e este erro é cumulativo no tempo.

Para simular a posição real do veículo, a cada passo de simulação são aplicadas (4) e (5), depois transforma-se a posição obtida para metros em relação a uma origem pré determinada (coordenadas cartesianas), soma-se um ruído gaussiano, e obtém-se novamente as coordenadas de latitude e longitude que correspondem à posição real do veículo. É possível fazer a transformação para coordenadas cartesianas (e a volta) sem perder a informação da curvatura da Terra considerando-se loxodromias. De posse do azimute e da distância entre um ponto e a origem, obtém-se as projeções da distância que serão as coordenadas cartesianas, e de posse das coordenadas, obtém-se a distância e o azimute, e, por (4) e (5), considerando-se  $V\Delta t$  como a distância, obtém-se a latitude e longitude.

### III. OBTENÇÃO DAS IMAGENS AÉREAS

O sistema possui imagens de satélite de referência de todos os *way points* que fazem parte da simulação da trajetória. As imagens aéreas são obtidas baseando-se nas imagens de satélite, dada a posição real do veículo, sua altitude, atitude e os parâmetros de sua câmera. Todas as imagens utilizadas neste trabalho são em tons de cinza, dado que o cálculo da correlação cruzada não necessita da informação de cor.

A câmera do veículo é modelada através da resolução de imagem capturada (320x320 pixels), e do ângulo de visada da lente 30° em ambos os eixos. Deste modo, a imagem aérea obtida não terá a mesma resolução da imagem de satélite (o que tornaria o processo de correlação trivial).

Para a obtenção da imagem, primeiramente encontra-se a posição relativa em pixels entre o veículo e o ponto central da imagem de satélite de referência, de coordenadas e escala conhecidas. Isto é feito simplesmente subtraindo-se as coordenadas cartesianas da posição do veículo do centro da imagem, e multiplicando-se pela escala da imagem.

Obtém-se agora o tamanho em pixels da região capturada pela câmera, através das equações abaixo, onde  $w$  e  $h$  são a largura e a altura da imagem capturada em pixels,  $a$  é a altitude do veículo,  $a_w$  e  $a_h$  são os ângulos de visada da câmera, e  $e$  é o fator de escala da imagem de referência.

$$w = 2.a.e.tg(a_w) \quad (6)$$

$$h = 2.a.e.tg(a_h) \quad (7)$$

Para facilitar os cálculos a imagem de referência é transladada de modo que o seu centro coincida com a posição do veículo, e rotacionada sobre seu novo centro de um ângulo correspondente à atitude da aeronave. Deste modo a área vista pela câmera será um retângulo com centro exatamente no centro da imagem de referência e lados paralelos aos desta.

Como a imagem aérea não tem a mesma resolução da imagem de satélite, a área recortada do retângulo descrito no parágrafo anterior é redimensionada de forma a ter os 320x320 pixels da especificação da câmera. Há perda de informação neste processo e os pixels que eventualmente faltarem são estimados aproximando-se por sua vizinhança.

Além desse processo, uma degradação da imagem da câmera é inserida, de modo a tornar o problema de comparação de imagens mais realista. Esta degradação da imagem é inserida com um *blur*, que pode simular uma câmera se movendo e com o tempo de abertura maior que o ideal, o que pode ser causado por vibração. Seu efeito é deixar uma espécie de "rastro" na imagem. A Fig. 1. mostra a intensidade do *blur* utilizada nas simulações.

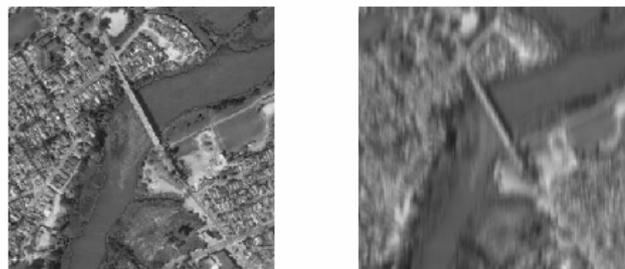


Fig 1. Degradação da Imagem Aérea pelo *blur*

### IV. CORREÇÃO DA POSIÇÃO ESTIMADA

Uma das maneiras mais simples de se comparar imagens é a correlação cruzada, que consiste em um coeficiente entre 0 e 1 calculado sobre os valores dos pixels de duas imagens do mesmo tamanho, indicando o quanto são semelhantes. O valor é 1 quando as imagens são idênticas. O valor da correlação cruzada entre duas imagens em tons de cinza A e B, de mesmas dimensões  $w$  por  $h$  é dado por (8), onde  $A_m$  e  $B_m$  são os valores médios dos pixels de A e B, e  $A_{xy}$  e  $B_{xy}$  indicam, respectivamente, o valor do pixel na posição  $(x,y)$  de A e de B.

$$c = \frac{\sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h (A_{xy} - A_m)(B_{xy} - B_m)}{\sqrt{\left( \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h (A_{xy} - A_m)^2 \right) \left( \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h (B_{xy} - B_m)^2 \right)}} \quad (8)$$

Há outras maneiras mais eficazes de se fazer a comparação entre imagens, como por exemplo obtendo características geométricas ao invés de comparar pixel a pixel [3], porém é possível utilizar correlação cruzada com imagens de satélite, e trabalhos anteriores obtiveram bons resultados com esta técnica [4].

A aplicação da correlação cruzada neste trabalho se dá ao tentar encontrar a imagem aérea obtida dentro da imagem de

satélite de referência. Como as imagens não têm a mesma resolução, deve-se primeiramente redimensionar a imagem aérea, obtendo sua escala (através do seu tamanho em pixels, do ângulo de abertura da câmera e da altitude do veículo) e redimensioná-la por um fator que multiplicado pela sua escala resulte na escala da imagem de satélite, que é conhecida.

Todas as imagens de satélite utilizadas como referência estão orientadas com o Norte a  $0^\circ$ , ou seja, no topo da imagem. Como a atitude do veículo varia durante o voo, a orientação de suas imagens aéreas obtidas também varia, e por isso as imagens de referência também são rotacionadas do mesmo valor da atitude para possibilitar o cálculo da correlação.

Ressalta-se que foi feita a hipótese de que a tanto a atitude quanto a altitude exatas do veículo são conhecidas durante todo o voo, o que é razoável pois em geral os erros nessas medidas são menores que os erros de posição. Mesmo assim poderia-se utilizar o método da correlação cruzada para reduzir os erros de altitude e atitude, da seguinte maneira:

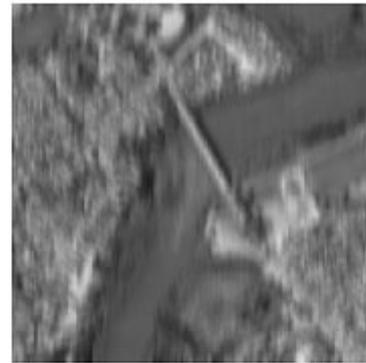
Ao invés de considerar-se a atitude e altitude conhecidas, considera-se alguns valores em torno do valor estimado, e faz-se a correlação cruzada utilizando esses valores (que serão utilizados no redimensionamento da imagem aérea e na rotação da imagem de referência). A máxima correlação cruzada deverá ser a que tem os valores de altitude e atitude mais próximos dos reais. Nota-se que a complexidade do algoritmo aumenta muito ao incluir mais duas variáveis nos testes, necessitando de um poder computacional muito maior. Com as imagens em mesma resolução, realiza-se uma busca partindo do ponto central da imagem de satélite, obtendo-se uma janela em torno deste ponto com o mesmo tamanho da imagem aérea, e aplicando-se (8). O processo é repetido aumentando-se de pixel em pixel a distância dos pontos centrais da janela ao centro da referência e guardando sempre a máxima correlação obtida. Quando encontra-se uma correlação superior a 0.5, é muito provável que a correlação máxima esteja próxima. Desta forma, define-se o critério de parada como sendo o seguinte:

Ao encontrar uma correlação máxima superior a 0.5 em um ponto a uma distância  $dr$  do centro da referência, testa-se todos os pontos a uma distância  $dr+1$  do centro, e caso não se encontre nenhum ponto de maior correlação, termina-se a busca e considera-se a correlação máxima já encontrada. Caso contrário, repete-se o processo para os pontos a  $dr+2$  e assim sucessivamente.

A Fig. 2. mostra uma imagem aérea e sua correspondência obtida na imagem de satélite utilizando o método do parágrafo anterior.

O método descrito irá retornar o deslocamento em pixels contado a partir do centro da imagem de satélite onde a imagem obtida pela câmera da aeronave se sobrepõe à referência. Para corrigir a posição da aeronave, basta utilizar a escala da imagem de satélite para obter o deslocamento em metros em relação ao centro da referência, e como as coordenadas do centro da referência são conhecidas, estima-se as coordenadas do veículo, reduzindo drasticamente o erro acumulado durante o trajeto.

Imagem Aérea



Correlação Encontrada na Imagem do Satélite

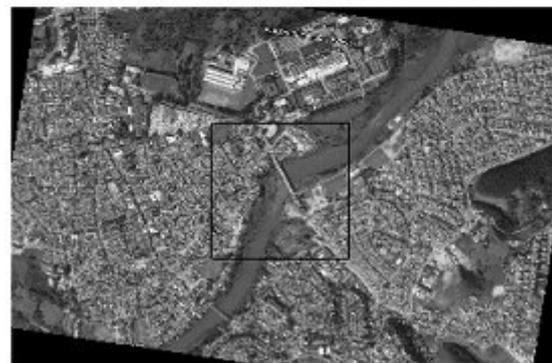


Fig. 2 Imagem Aérea e sua Correspondência na Referência do Satélite

## V. RESULTADOS

Realizou-se a simulação sobre os pontos definidos, partindo-se das coordenadas  $[-23.224579, -45.866190]$  para dois tipos de navegação:

- Navegação por Correlação Cruzada: Navegação utilizando correlação cruzada entre imagens aéreas e imagens de satélite para reduzir o erro na posição estimada ao passar sobre uma referência, como o descrito nas seções anteriores.
- Navegação Estimada: Navegação realizada estimando a posição final simplesmente através da velocidade estimada, atitude estimada, e o tempo decorrido. Também conhecida como *dead reckoning*.

Os parâmetros utilizados nas simulações estão na Tabela I.

TABELA I - PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
$\sigma$ da gaussiana	2/passo
Velocidade	30m/s
Altitude	500m
Distância Total Percorrida	48260m
Passo Mínimo de Simulação	0.1s
Passo Máximo de Simulação	1s

### A Resultados da Navegação Estimada

Na navegação estimada, a posição estimada pelo veículo acumula os erros durante todo o seu trajeto.

A Fig. 3. mostra a evolução do erro entre a posição real e a posição estimada ao longo do tempo. Nota-se que o erro tem características de um *random walk*, que é a integral de um ruído branco, ou seja, é como amostrar valores de uma

distribuição normal cuja variância aumenta ao longo do tempo.

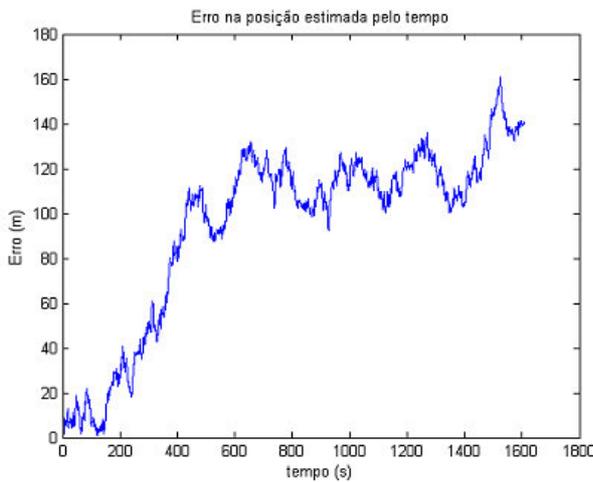


Fig. 3. Erro entre Posição Real e Posição Estimada no Tempo

### B Resultados da Navegação por Correlação Cruzada

Aplicando a navegação por correlação cruzada, a posição estimada é corrigida quando o veículo passa por uma referência, como o descrito na seção IV. A Fig. 4. mostra a evolução do erro ao longo do tempo, para este caso.

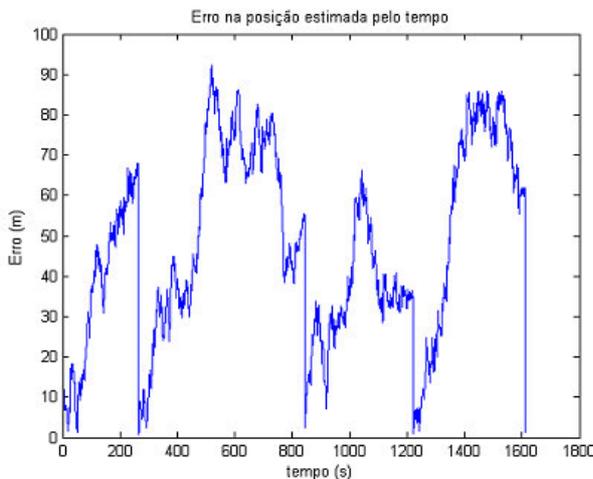


Fig. 4. Erro entre Posição Real e Posição Estimada no Tempo

Na Fig. 4. pode-se perceber claramente os momentos onde a correlação cruzada entre as imagens é aplicada para a redução do erro na posição estimada. Tem-se uma redução instantânea do erro para menos de dois metros aos 264.3s, 843.6s, 1221.8s e 1611.0s, que são exatamente os tempos em que a aeronave chega às referências (de acordo com sua posição estimada).

### C Estatísticas

Simulando-se 100 histórias com navegação por correlação cruzada e 100 histórias com navegação estimada, com os mesmos parâmetros da Tabela I, foi possível obter estatísticas sobre o erro médio na posição estimada em cada referência, possibilitando o cálculo do CEP (erro circular provável) para 4 distâncias percorridas diferentes. A Tabela II mostra estes

resultados para a navegação estimada, enquanto a Tabela III mostra para a navegação por correlação cruzada.

TABELA II ERRO MÉDIO E CEP PARA NAVEGAÇÃO ESTIMADA

Referência	Erro Médio (m)	Desvio Padrão do Erro (m)	CEP (m)
1	40.70	21.66	35.74
2	74.87	36.18	76.36
3	88.36	44.22	93.48
4	100.57	50.23	95.48

TABELA III ERRO MÉDIO E CEP PARA NAVEGAÇÃO POR CORRELAÇÃO

Referência	Erro Médio (m)	Desvio Padrão do Erro (m)	CEP (m)
1	1.30	0.57	1.37
2	2.05	0.97	1.93
3	1.31	0.62	1.27
4	1.31	0.73	1.20

Os resultados mostram que na navegação estimada (bem como na navegação inercial) os erros se acumulam com o tempo, e, portanto, o erro aumenta quanto maior a distância percorrida, enquanto, considerando que o ponto de destino será sempre uma das referências, na navegação por correlação cruzada o erro praticamente não varia com a distância (como na navegação por GPS). A Fig. 5 mostra a variação do CEP com a distância para ambos os casos.

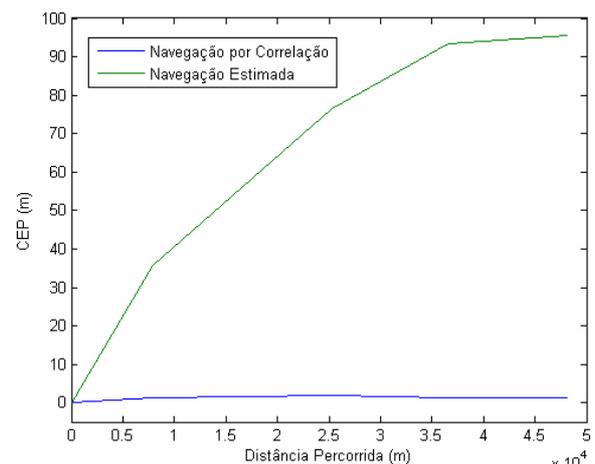


Fig. 5. Variação do CEP com a Distância Percorrida

Para a navegação por correlação cruzada, também foram obtidas estatísticas sobre os valores máximos de correlação encontrados em cada história, entre as imagens aéreas e suas correspondências nas respectivas imagens de satélite de referência. A Tabela IV mostra os resultados.

TABELA IV VALORES MÉDIOS DA MÁXIMA CORRELAÇÃO ENCONTRADA

Referência	Valor Médio da Máxima Correlação (m)	Desvio Padrão
1	0.75	0.01
2	0.96	0.01
3	0.72	0.02
4	0.81	0.01

O baixo desvio padrão encontrado para os valores máximos da correlação e a distância razoável entre os valores das médias para cada referência mostra que o valor máximo da correlação depende fortemente das características da referência, ou seja, da região sobrevoada.

## VI. TESTE COM IMAGEM REAL

Os resultados obtidos até agora utilizaram imagens aéreas simuladas, obtidas através das imagens de satélite, com alteração na resolução e inserção de ruído. Para mostrar a viabilidade do método para imagens reais, foi utilizada uma imagem aérea da cidade de *Lakewood - Colorado*, nos EUA, obtida da base de dados do *TerraServer* [6]. O método da correlação cruzada demonstrado na seção IV foi utilizado para encontrar a imagem aérea dentro de uma imagem de satélite da mesma região obtida através do *Google Earth*. A Fig. 6 mostra o resultado. O valor de correlação encontrado foi 0.63, um pouco menor que os valores obtidos com imagens simuladas, mas que ainda permite a identificação clara da posição da imagem aérea na imagem de satélite.



Fig. 5. Imagem Aérea Real e sua Correspondência Encontrada

## VII. CONCLUSÃO

O método simulado de navegação por correlação cruzada entre imagens aéreas e imagens de satélite mostrou-se muito eficaz, sendo capaz de reduzir o erro circular provável da posição para cerca de 2m, enquanto na navegação estimada nas mesmas condições este erro seria de cerca de 100m.

Deve-se levar em conta, porém, que a orientação e altitude exatas do veículo foram consideradas conhecidas, e fatores como condições de iluminação, nevoeiro, fumaça, e outros podem influenciar numa situação real, o que torna o problema mais complexo.

Um resultado interessante foi mostrado na Tabela IV, onde foi verificada a forte dependência do valor máximo de correlação encontrado com as características da região sobrevoada.

O ideal para a navegação é que o valor de correlação encontrado seja o maior possível no ponto buscado, e muito menor nos pontos da vizinhança, para que o ponto seja encontrado facilmente e a trajetória seja corrigida. Isto pode ser conseguido ao planejar os pontos pelos quais a aeronave deverá passar, escolhendo regiões onde já espera-se que as proposições supracitadas sejam satisfeitas.

Deve ser feito um estudo aprofundado para se conhecer as regiões mais propícias para que a navegação por correlação cruzada seja o mais eficaz possível.

## REFERÊNCIAS

- [1] Lawrence, A. "Modern Inertial Technology - Navigation, Guidance and Control". 1998.
- [2] Grewal, M. S., Weill, L. R., Andrews, A. P. "Global Positioning Systems (GPS), Inertial Navigation, and Integration"
- [3] Dudani, A., Jenney, J. A., Bullock, B. L. "Correlation and Alternatives for Scene Matching".
- [4] Emery, W. J., Baldwin, D., Matthews, D. "Maximum Cross Correlation Automatic Satellite Image Navigation and Attitude Corrections for Open Ocean Image Navigation".
- [5] Alexander, J. "Loxodromes: A Rhumb Way to Go". Mathematics Magazine - Vol 77, No 5. 2004.
- [6] Microsoft Corporation, "TerraServer-USA". <http://terra-server-usa.com/>