ESTIMAÇÃO DO MOVIMENTO POR SENSORES LASER PARA ATERRAGEM AUTÓNOMA EM COMETAS

Nuno Gonçalves

Instituto de Sistemas e Robótica / Departamento de Engenharia Electrotécnica
Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra, Portugal
Pinhal de Marrocos - Polo II - 3030 Coimbra
nunogon@isr.uc.pt

1. INTRODUÇÃO

A aplicação dos conceitos teóricos no desenvolvimento de aplicações práticas é o objectivo fundamental de qualquer projecto de investigação. Na verdade, hoje em dia, existem dois tipos essenciais de trabalhos de I&D, precisamente o I e o D, isto é, a investigação teórica, qualquer que seja o seu grau de ligação às questões práticas, não deixa contudo de ser um trabalho teórico e o D, isto é, o desenvolvimento, onde as ideias teóricas são aplicadas em ideias práticas, qualquer que seja o seu grau de ligação à indústria e comércio.

Este trabalho surge no âmbito de uma disciplina do Mestrado em Sistemas e Automação, **Sistemas Robóticos Autónomos**, e o seu objectivo é analisar uma publicação numa conferência muito conceituada na área dos sistemas robóticos - o ICRA, na edição do corrente ano. O *paper* analisado chama-se *Motion Estimation from Laser Ranging for Autonomous Comet Landing* e os seus autores são Andrew E. Johnson e A. Miguel San Martin.

No seguimento daquilo que foi dito no primeiro parágrafo, este *paper* é o desenvolvimento de algumas ideias teóricas, algumas delas já antigas outras recentes, dos próprios autores, para o apoio de uma aplicação prática e real, a aterragem de robots espaciais em cometas, projecto em curso na agência espacial norte-americana (NASA).

A operação de aterragem de um robot autónomo espacial em qualquer corpo celeste é por si só um desafio ao sentido inventivo da engenharia espacial e, quando esse corpo celeste é um cometa, as dificuldades podem ser acrescidas, devido à necessidade de ancorar num corpo com um campo gravitacional muito fraco. Por esta última razão, a velocidade de aproximação ao cometa não pode ter as componentes tangencial e normal muito elevadas.

O objectivo do algoritmo explicado na publicação em análise é estimar o movimento da nave espacial (provavelmente apenas uma cápsula), que deverá´, usando esta estimativa, corrigir o seu movimento com vista a uma aterragem segura.

Na primeira parte do trabalho será feito um resumo explicado do trabalho, nas secções 2 (conceitos introdutórios) e 3 (implementação prática). Seguidamente serão apresentados os resultados reais da simulação em laboratório e no mundo real dos algoritmos e, por fim, na secção 5 será dada uma reflexão crítica ao trabalho e tiradas algumas conclusões.

2. CONSTRUÇÃO TEÓRICA

O modelo teórico descrito no *paper* em análise assenta em tres fases: construção dos mapas de terreno com dados de um sensor de varrimento laser (*laser rangefinder*), alinhamento dos mapas de terreno e, finalmente, cálculo do movimento translacional e da covariância do movimento entre os varrimentos. É usado o modelo do corpo rígido para calcular a componente translacional do movimento efectuado.

Para a componente rotacional do movimento, são usados sensores inerciais (giroscópios), cuja precisão na estimativa do movimento de rotação é elevada (da ordem do 0.01^o por segundo).

2.1 Construção do mapa de terreno

Os sensores de varrimento de laser produzem resultados usando os modelos de projecção esférica ou projectiva. Os varrimentos são muitas vezes por linha, isto é, é efectuado um varrimento de um área rectangular linha a linha mas, não é necessário que assim seja, podendo por vezes o varrimento ser helicoidal ou espiral.

Além de os modelos de projecção apresentados serem não-lineares, o facto de os varrimentos não serem totalmente alinhados, leva a que a amostragem da superfície não seja regular. É possível criar modelos em que os dados dos varrimentos podem ser usados directamente sendo, contudo, mais vantajoso passar por um estado intermédio de reamostragem regular para a construção de grelhas regulares num espaço cartesiano. Nestas condições é então possível tornar o problema da estimação do movimento como um problema de alinhamento de mapas, o que o torna muito mais simples.

Um mapa de terreno é uma função $Z(r, c)$ que representa a altitude ou elevação de cada uma das células da grelha. Esta grelha pode não ser regular mas, neste caso, o seu manuseamento torna-se substancialmente mais complexo.

Seja f o campo de visão angular do sensor de laser e seja R a distância média do sensor de laser à superfície. Consideramos, por simplicidade, que o campo de visão do sensor é quadrado. O

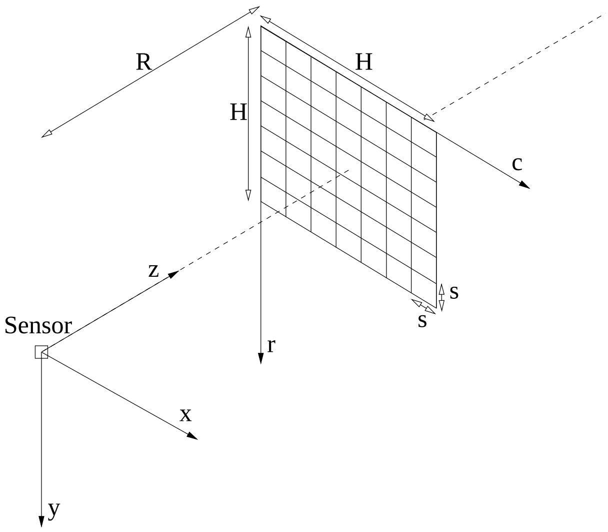

Figura 1: Sistema de coordenadas do sensor laser e do mapa de grelhas

comprimento do lado da janela varrida pelo sensor de laser é dada por:

$$H = 2R \tan \frac{f}{2}$$

A transformação deste quadrado numa grelha, cria células de lado s, tal que

$$s = \frac{H}{n}$$

onde n é o número médio de amostras de varrimento na cena (campo de visão).

Assim, com esta configuração, o mapa do terreno vai cobrir sensivelmente a mesma área coberta pelos dados de varrimento e cada célula irá conter aproximadamente uma amostra.

A figura 1 mostra os aspectos discutidos, bem como os referenciais cartesianos do mapa do terreno (r, c) e do *laser rangefinder* (x, y, z).

Para atribuir os valores ao mapa do terreno, e para evitar *aliasing*, são usadas duas funções para efectuar a interpolação bilinear dos dados. Seja, então, $E(r, c)$ um acumulador de altitude e $W(r, c)$ um acumulador de peso. Então, para cada amostra com coordenadas (r, c), as quatro células da grelha são actualizadas da seguinte forma:

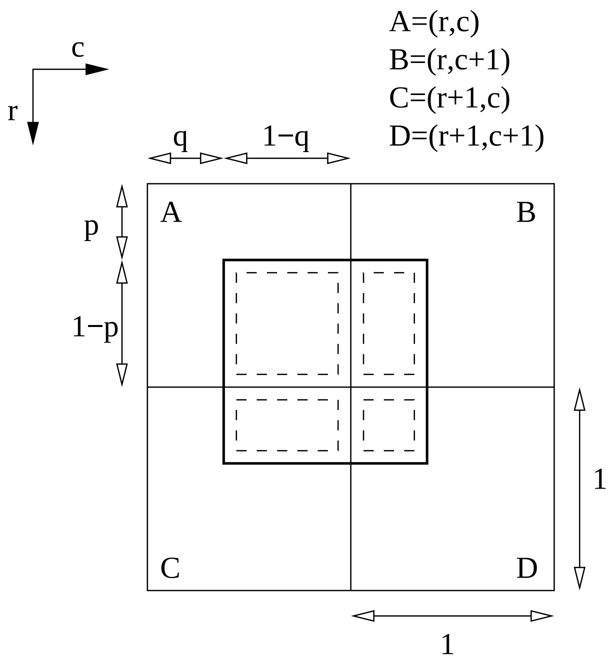

Figura 2: Interpolação bilinear dos mapas de terreno

$$\begin{aligned}
&p = r - \underline{r} \\
&q = c - \underline{c} \\
&E(r, c) = E(r, c) + (1 - p)(1 - q)z \\
&W(r, c) = W(r, c) + (1 - p)(1 - q) \\
&E(r + 1, c) = E(r, c) + p(1 - q)z \\
&W(r + 1, c) = W(r + 1, c) + p(1 - q) \\
&E(r, c + 1) = E(r, c) + (1 - p)qz \\
&W(r, c + 1) = W(r, c + 1) + (1 - p)q \\
&E(r + 1, c + 1) = E(r, c) + pqz \\
&W(r + 1, c + 1) = W(r + 1, c + 1) + pq
\end{aligned}$$

onde $\underline{x}$ representa a parte inteira de x. A figura 2 mostra a forma como cada amostra contribui para o cálculo da altitude de uma célula. Depois de todas as amostras terem sido acumuladas pelas células correspondentes, é possível calcular a elevação de cada célula da grelha da seguinte forma:

$$Z(r, c) = \frac{E(r, c)}{W(r, c)}$$

Nalguns casos é possível que algumas células da grelha não possuam valores de elevação pois a distribuição de amostras de varrimento laser não é uniforme. Neste casos, é necessário utilizar um método de interpolação simples até que todas as células da grelha tenham um valor coerente de altitude.

Antes do alinhamento é necessário ainda garantir que não haja nenhuma rotação entre dois mapas de terreno. Como dispomos de informação inercial de rotação de cada um dos mapas de terreno, é fácil fazer a rotação inversa de forma a que os mapas tenham a mesma orientação.

Resumindo, o primeiro passo é converter os dados dos varrimentos em valores de elevação em grelhas cartesianas. De seguida, a rotação entre os mapas é eliminada rodando os restantes mapas em relação a um mapa de referência (normalmente o primeiro). Os valores de rotação são-nos dados pela informação do giroscópio. Por último, os parâmetros dos mapas de terreno são calculados usando os dados do mapa de referência. As dimensões das células da grelha devem também ser iguais para se poder passar à fase seguinte.

2.2 Alinhamento de dois mapas de terreno

A operação de alinhamento consiste num deslocamento do segundo mapa de terreno sobre o primeiro, o mapa de referência, de uma quantidade infinitesimal $\mathbf{d} = (dr, dc, dz)$ até que a diferença de elevação entre os dois mapas seja minimizada.

Sejam os mapas de terrenos $l(r,c)$ e $J(r,c)$. O objectivo do algoritmo é calcular o deslocamento $\mathbf{d}$ de forma a que seja válida a expressão:

$$l(r+dr, c+dc) + dz = J(r,c)$$

Este problema pode resumir-se a um problema de minimização da variável ϵ, tal que:

$$\epsilon = \sum_W (l(r+dr, c+dc) + dz - J(r,c))^2$$

sobre uma janela W que deverá ser tão grande quanto possível.

Sejam os gradientes de $l(r,c)$ calculados usando as diferenças finitas, tal que:

$$\frac{\partial l}{\partial r} = \frac{l(r+1,c) - l(r-1,c)}{2}$$
$$\frac{\partial l}{\partial c} = \frac{l(r,c+1) - l(r,c-1)}{2}$$

O problema resume-se à resolução do sistema linear cuja incógnita é $\mathbf{d}$, tal que:

$$\mathbf{e} = H\mathbf{d} \tag{1}$$

onde:

$$\mathbf{e} = \sum_W (J(r,c) - l(r,c))\mathbf{g} \tag{2}$$

$$H = \sum_W \mathbf{g}\mathbf{g}^T \tag{3}$$

$$\mathbf{g}^T = \left(\frac{\partial l}{\partial r}, \frac{\partial l}{\partial c}, 1\right) \tag{4}$$

Na verdade, devido ao facto de ter sido usada uma paroximação de Taylor de primeira ordem, a equação 1 não dá o mínimo global mas é possível com um processo simples de minimização de Newton-Raphson obter a solução óptima.

A última questão a analisar no processo de alinhamento é a janela de comparação W. Por um lado, W deve ser tão grande quanto possível para minimizar o erro de alinhamento mas, por outro lado, W não pode ser tal que ultrapasse os limites dos mapas de terreno.

Náo é fácil obter uma estimativa para a dimensão da área dos mapas que está sobrepostas (área usada para o alinhamento e depois para a estimação do vector $\mathbf{d}$). O algoritmo descrito usa os valores das janelas dos pares de mapas analisados anteriomente para extrapolar para o presente par de mapas de terreno. É de notar, no entanto, que a utilização de um valor fixo para W torna o algoritmo mais rápido, ainda que os resultados não sejam totalmente optimizados.

2.3 Estimação do movimento

O objectivo desta fase do algoritmo é transformar o vector de alinhamento $\mathbf{d}$ num vector de translação 3D $\mathbf{T}$ e ao mesmo tempo calcular a matriz de covariância C da translação.

Seja a matriz S dada por:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & s & 0 \\ s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O vector translação T é, então, dado por:

$$\mathbf{T} = S\mathbf{d} = \begin{bmatrix} s \cdot dc \\ s \cdot dr \\ dz \end{bmatrix} \tag{5}$$

Uma vez que $\mathbf{d}$ é uma estimativa usando o método dos mínimos quadrados, a covariância de $\mathbf{d}$ é o inverso de H. Dado que T é uma função linear, a covariância de $\mathbf{T}$ é dada por:

$$C = (S^T H S)^{-1} \sigma^2$$

onde σ^2 é a variância do ruído do mapa de terreno, podendo ser calculada usando as características do sensor laser.

2.4 Algoritmo final

O primeiro passo consiste em fazer um primeiro varrimento à superfície, sendo gerado o mapa de terreno e os respectivos gradientes. Este mapa é o mapa de referência. O próximo varrimento é efectuado e é construído o mapa de terreno usando os parâmetros do mapa de referência. O valor da janela de comparação W é baseado na predição inicial da translação entre varrimentos. Os mapas são então alinhados e são calculados os vectores de movimento e as matrizes de covariância do movimento entre os mapas. São adquiridos os dados de novos varrimentos e os mapas de terreno são calculados. O valor da janela W é calculado usando extrapolação partindo dos valores dos alinhamentos anteriores. Este procedimento repete-se até que o valor de W desca abaixo de metade do número de células da grelha. Neste ponto, é seleccionado outro mapa de referência (o último, p.ex.) e o procedimento repete-se.

3. IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

Depois de construído o modelo teórico e algoritmo, é necessário levar à execução prática as ideias. Nesta secção iremos discutir algumas das questões de implementação prática.

Para credibilizar o algoritmo, os seus autores testaram-no em ambientes exteriores (mundo real). Contudo, uma vez que se destina à aterragem de robots espaciais em cometas, os terrenos a usar no teste devem estar livres de objectos modernos (intervenção humana) e de vegetação. Como os dados vão ser adquiridos na superfície, é desejável obter terrenos montanhosos com uma amplitude vertical elevada, isto é, a porção de céu nos varrimentos deve ser reduzido.

O sensor de varrimento de laser usado foi especialmente desenvolvido para esta aplicação com um alcance máximo de 500 metros e uma sensibilidade de 2 centímetros. A divergência do raio laser é de 2 mrad. A frequência de repetição do pulso é de 9 kHz, o que conduz à aquisição de imagens de 100×100 em pouco mais de um segundo. O campo de visão máximo do sensor é $10^o \times 10^o$.

O varrimento nos dois eixos é possibilitado devido à existência de dois espelhos deflectores.

Para estabelecer os valores reais para comparação (*ground truth*), foi usado um teodolito digital. O teodolito e o sensor de varrimento laser são inicialmente acoplados rigidamente numa plataforma. A transformação cartesiana entre o sensor e o teodolito foi calculada em laboratório usando um método de calibração.

Ao ser apontado o sensor e o teodolito para o objectivo (*target*), o teodolito calcula a posição 3D do sensor relativamente aos objectos na cena e o sensor efectua o varrimento. Os dados são armazenados e passa-se ao objectivo seguinte na trajectória.

É então usado em laboratório o método de Faugeras e Hebert para calcular as matrizes de transformação rígidas entre as posições para se calcular os seis graus de liberdade (rotação e translação) do movimento.

Foram efectuados testes com um campo de visão de 10^o e efectuadas 100×100 amostras de varrimento, de onde foram gerados 100×100 mapas de terreno.

4. RESULTADOS PRÁTICOS

Foram capturadas duas sequências de mapas de terreno. Uma das sequências era vertival (ao longo da montanha) e a outra era horizontal. Os resultados obtidos para a sequência vertical foram melhores.

Os resultados obtidos foram razoavelmente satisfatórios, tendo medidas de erro relativas da ordem dos 1 a 2% para distâncias de algumas dezenas de metros e da ordem dos 3 a 4% para distâncias da ordem das dezenas de centímetros.

Em termos computacionais, o algoritmo mostrou-se ser comportável pelos sistemas de computadores actuais, tendo uma taxa de actualização de 4.4 Hz, o que é suficiente para a aplicação a que se destina que usa uma taxa de 1 Hz.

Além dos dados experimentais com varrimentos em ambientes reais, foi também testado o algoritmo usando um método de simulação designado por Monte Carlo, que usa mapas de terreno sintéticos com o *ground truth* previamente estabelecido.

Os resultados obtidos para a simulação foram, como seria de esperar, melhores do que os obtidos na prática. Os erros relativos eram inferiores a 1% tanto para trajectórias verticais (0.5%) como horizontais (0.7%).

A posição de aterragem foi calculada com uma precisão de 0.16 metros a uma altitude de 100 metros, o que mostra a precisão do algoritmo.

5. CRÍTICA

O *paper* em análise apresenta uma técnica para estimar o movimento do próprio sensor ou robot (*ego-motion*) baseado em imagens de profundidade (*range data*). As técnicas de estimação de movimento são muitas e as que usam informação de profundidade (distância ao sensor) são muito importantes, com o surgimento de diversos sensores de profundidade a baixo custo e elevada performance. Os sensores mais usados para a obtenção deste tipo de informação são os sensores de visão e os *laser rangefinders*, sendo este último o tipo de sensor usado pelos autores do *paper*.

Um outro aspecto a considerar é o número de graus de liberdade do movimento estimados. O objectivo para o qual se destina este método é estimar o movimento de uma nave espacial na proximidade de um cometa, ou seja, pretende-se adquirir o movimento completo da nave, com os três parâmetros de rotação e outros três de translação. São ao todo seis graus de liberdade pois o robot movimenta-se no espaço livre sem restrições. Contudo, este algoritmo parte do princípio de que são conhecidos os parâmetros da rotação, usando para isso um giroscópio que permitirá, no cálculo dos parâmetros da translação compensar as rotações efectuadas.

O algoritmo propriamente dito para a estimação final do movimento está dividido em três fases: construção dos mapas de terreno, alinhamento dos mapas de terreno e estimação do movimento propriamente dita.

Na construção dos mapas de terreno, as técnicas matemáticas usadas não são inovadoras pois é utilizada uma grelha regular onde as altitudes são acumuladas por um processo de interpolação bilinear. Em relação ao alinhamento de mapas, este pressupõe uma prévia compensação da rotação e depois o uso de um processo de minimização por mínimos quadrados do erro de altitude. A ideia também não é inovadora no que toca aos conceitos matemáticos subjacentes. A fase final, é apenas uma transformação de coordenadas entre o vector translação em coordenadas do mapa do terreno para as coordenadas do sensor e, portanto, da nave espacial.

Na minha opinião, este método é um conjunto de ideias não inovadoras, ou seja, não cria teoria específica para o caso mas, conjugadas de uma forma inovadora, isto é, parte da conjugação de vários métodos já utilizados noutros campos para resolver o problema do *egomotion*. Tem, no meu entender, o mérito de tornar relativamente simples um problema que se torna por vezes complexo, tanto mais que usa dois tipos de sensores: laser e inercial (giroscópio).

Um outro aspecto a referir é o facto de não ter sido tratado o caso de obstáculos móveis. Naturalmente num cometa não existem obsctáculos móveis mas, quando aplicado ao mundo real na Terra, o tratamento deste caso é importante.

Uma outra questão que se coloca é, perante o facto de a construção de mapas de profundidade poder ser efectuada por outro tipo de sensores, a de saber se o algoritmo ou técnica apresentadas são gerais na sua aplicação e na sua interacção com os vários tipos de sensores. De facto, uma boa estratégia para avaliar a generalidade de um método é saber se é facilmente adaptável para outras formas de adquirir a informação que o alimenta, isto é, neste caso saber se o método descrito pode facilmente ser usado com informação de visão por computador, ou qualquer outra fonte de imagens de profundidade. A resposta a esta pergunta parece-me ser incerta. Se por um lado, o método foi desenvolvido para usar informação de um sensor de laser, também é verdade que com algum trabalho será possível adaptar os mapas de profundidade obtidos por visão para a construção dos mapas de profundidade de terreno usados no método descrito. Contudo, penso que a filosofia do método perder-se-ia uma vez que o campo de visão de uma câmara é normalmente muito superior ao de um *laser rangefinder* e, portanto um único campo de visão da câmara pode cobrir todo o mapa de terreno, tornando necessárias manipulações mais ou menos complexas e despropositadas. Neste aspecto, não considero, portanto, o método descrito genérico.

Quanto aos resultados experimentais, penso que são bastante razoáveis, mesmo quando testado em ambientes reais, semelhantes àqueles para os quais foi desenvolvido, o que de si já permite concluir que o método é bom.

Em forma de balanço, a minha opinião geral sobre o método des estimação do movimento é bastante positiva, pois apresenta uma solução simples e eficaz para o problema que se propõe resolver, sem recurso a técnicas matemáticas elaboradas ou outro tipo de truques. Apresenta alguns aspectos inovadores, especialmente em relação à ideia geral, não utilizando teoria nova. Um outro aspecto muito positivo deste método é o facto de não partir de pressupostos para a sua construção teórica.

Quanto à relação entre os contéudos do *paper* e da matéria leccionada na disciplina de Sistemas Robóticos Autónomos, penso que a publicação em estudo se enquadra perfeitamente nos conteúdos programáticos na disciplina, sendo um bom complemento aos assuntos abordados durante as aulas, permitindo dar ao aluno uma ideia da projecção dos conteúdos programáticos da disciplina na sua aplicação prática real. Os conceitos subjacentes foram ou serão abordados durante as aulas.

Quanto à apresentação do *paper* e à maneira como está descrito, penso que a única figura que tem não está muito esplícita e penso que na explicação da interpolação bilinear, uma figura viria ajudar o leitor menos habituado a este tipo de matemáticas. Na sua generalidade o texto está bem escrito, sendo compreensível mas, apresentando umas escolhas um tanto discutíveis na organização de algumas frases. Apesar disso, a opinião geral que fica desta publicação é positiva.

REFERENCES

[1] Johnson, Andrew E. and San Martin, A. Miguel. Motion Estimation from Laser Ranging for Autonomous Comet Landing. In *2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 132–138, San Francisco, CA, USA, 2000.