

Navegação Entre Obstáculos Usando Um Método De Campos De Potencial Modificados

Bruno D. Damas, Pedro U. Lima, Luis M. Custódio
bdamas@math.ist.utl.pt, pal@isr.ist.utl.pt, lmmc@isr.ist.utl.pt
<http://socrob.isr.ist.utl.pt>

Instituto de Sistemas e Robótica
Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa, PORTUGAL

Resumo - Este artigo descreve um método de campos de potencial modificados para navegação robótica, especialmente apropriado para robots não holónomos de tracção diferencial. O campo de potencial é modificado de maneira a dar mais importância aos obstáculos na direcção do robot. As acelerações lineares e angulares do robot podem então ser expressas como funções da velocidade, distância e orientação relativa dos obstáculos.

Abstract - This paper describes a modified potential fields method for robot navigation, especially suited for unicycle-type non-holonomic mobile robots. The potential field is modified so as to enhance the relevance of obstacles in the direction of the robot motion. The angular speed and linear acceleration of the robot can then be expressed as functions of the linear speed, distance and relative orientation to the obstacles

I. INTRODUÇÃO

O problema de navegação de um robot móvel num ambiente onde existam obstáculos é um problema tradicional em robótica. Algumas variações do tema, como obstáculos dinâmicos vs estáticos ou robots holónomos vs não-holónomos ainda o fazem mais difícil de resolver [4]. Entre os métodos existentes na literatura que procuram resolver esse problema encontra-se o conhecido método de campos de potencial [2], desenhado para conduzir veículos holónomos. No entanto esse método pode ser modificado de diferentes maneiras para lidar com restrições não holónomas, projectando por exemplo o campo resultante nos vectores de aceleração possíveis, como é o caso do método dos campos de potencial generalizados [3].

Este artigo introduz uma abordagem alternativa onde o campo de potencial é modificado de maneira a realçar a relevância dos obstáculos na direcção de movimento. Esta nova abordagem também permite especificar independentemente as acelerações tangenciais e normais causadas por um obstáculo, permitindo a especificação das velocidades angular e linear do robot de uma forma simples e natural.

O artigo está organizado da maneira seguinte: na Secção II é revisto o método dos campos de potencial generalizado. A Secção III descreve o método dos campos de potencial modificados introduzido neste artigo. A Secção IV conclui o artigo.

II. MÉTODO DOS CAMPOS DE POTENCIAL GENERALIZADOS

O método tradicional de desvio de obstáculos usando campos de potencial consiste em avaliar uma força repulsiva para cada obstáculo, tendo em conta a distância do robot ao obstáculo e a velocidade relativa entre estes. É também calculada uma força atractiva que tende a levar o robot para o seu alvo. Cada uma dessas forças tem a direcção do objecto (obstáculo ou alvo) que lhes deu origem. As forças atractivas aceleram o robot na direcção do alvo enquanto as repulsivas o aceleram na direcção oposta dos obstáculos. No método dos campos de potencial generalizados [3] o valor absoluto de cada vector repulsivo é obtido a partir de

$$|a| = \frac{\alpha v}{2d\alpha - v^2}, \quad (1)$$

onde α é a aceleração máxima disponível para o robot e v e d são respectivamente a componente da velocidade de aproximação na direcção do obstáculo e a distância do obstáculo. A expressão (1) resulta do facto de definir o potencial repulsivo como sendo o inverso do intervalo de tempo crítico até uma colisão ter lugar. Esse potencial é infinito quando o tempo estimado até à colisão é igual ao tempo que seria necessário para travar o veículo usando a desaceleração máxima.

Este método tem sérias limitações: por um lado não é sempre possível, para veículos não holónomos, acelerar na direcção dada pela vector resultante, e como tal o conceito dos campos de potencial deixa de ser aplicável; por outro lado, quando um obstáculo está suficientemente próximo, a singularidade da equação (1) é por vezes alcançada devido aos erros causados pelo tempo de amostragem dos sensores e do ruído inevitável contido nas medidas desses sensores, levando o robot a ter um comportamento brusco e instável.

Apesar de não ser completamente adaptável aos veículos não holónomos, o método dos campos de potencial é muito atraente, na medida em que permite usar vários outros métodos de navegação no contexto de uma arquitectura baseada em comportamentos [1], usando um módulo de campos de potencial independente para o desvio de obstáculos e outros módulos possivelmente mais complexos, como planeamento de trajectórias ou estabilização de postura, para levar o robot até ao seu alvo. De facto, a método dos campos de potencial define implicitamente uma tal arquitectura, onde a avaliação da soma das forças repulsivas conta como um módulo e a avaliação do vector atractivo conta como outro, sendo o resultado final simplesmente igual à soma vectorial da saída de cada um desses módulos. Por isso, melhor ainda do que usar outro método de desvio de obstáculos para veículos não holónomos é modificar esse método de maneira a que tenha em conta as restrições desse tipo de veículos, preservando dessa maneira a modularidade do método.

III. MÉTODO DOS CAMPOS DE POTENCIAL MODIFICADOS – O CASO DO VEÍCULO DE TRACÇÃO DIFERENCIAL

O modelo da cinemática do veículo de tracção diferencial representado na Fig. 1 é dado por

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r/2 & r/2 \\ r/2L & -r/2L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_R \\ w_L \end{bmatrix}, \quad (2)$$

onde

v : velocidade do robot

$w = \dot{\theta}$: velocidade angular do robot

v_R, v_L : velocidade de rotação da roda direita e esquerda

r : raio da roda

L : metade da distância entre os pontos médios de cada roda.

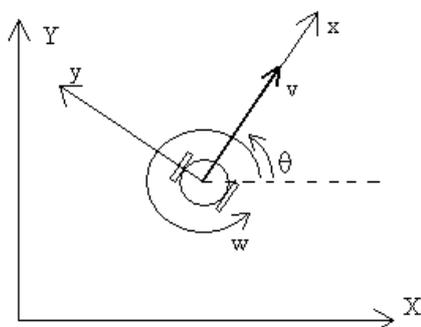


Fig. 1. Modelo cinemático

A natureza não holónoma de um veículo de tracção diferencial não permite movimentos em direcções arbitrárias: a velocidade instantânea do robot tem sempre a direcção da frente do robot (o referencial do veículo

pode ser visto na Fig. 1). É por isso muito mais natural exprimir a aceleração repulsiva em termos de duas componentes: a primeira diz respeito à aceleração normal (na direcção do eixo y) e é dada por $a_y = vw$; a segunda, a aceleração tangencial do robot (na direcção de movimento, ou seja, ao longo do eixo x), é igual à derivada temporal da velocidade instantânea. O ponto fulcral é que a soma vectorial da aceleração normal e da aceleração tangencial não tem de ter necessariamente a direcção do obstáculo, como acontecia com o método tradicional de campos de potencial. De facto uma melhor abordagem pode ser dimensionar o comportamento do robot separadamente em termos de como deve virar (aceleração normal) e como deve travar (aceleração tangencial) na presença de obstáculos.

3.1 Campos De Potencial

A ideia por detrás do conceito do método dos campos de potencial é a analogia com o movimento de partículas electricamente carregadas no espaço vazio: cada uma das partículas é repelida pelas partículas que têm o mesmo sinal e é atraída pelas partículas com sinais opostos. A força exercida numa partícula por outra tem sempre a direcção dessa partícula, apontando para a partícula quando esta tem sinal oposto e apontando no sentido contrário quando tem o mesmo sinal. A intensidade do campo electrostático não depende da velocidade das partículas: como o campo é radial é suficiente conhecer as distâncias entre partículas para conseguir definir completamente a função de potencial. Isto é uma consequência natural da ausência de restrições no movimento. No entanto não é muito útil actuar na direcção de uma força repulsiva originada por um obstáculo cuja posição só dificilmente pode ser atingida tendo em conta as restrições cinemáticas do robot. Em vez de se usar uma distância Euclidiana para o cálculo da função de potencial, pode-se “moldar” o campo de potencial de modo a adaptar-se à natureza não holónoma do robot.

No caso do veículo de tracção diferencial, na ausência de derrapagem, existe uma restrição do movimento ao longo do eixo y : v_y é necessariamente igual a zero em todos os instantes de tempo, e como tal é conveniente aumentar a componente repulsiva ao longo do eixo x uma vez que a velocidade só tem uma componente segundo esse eixo.

Existem muitas possíveis formas de campos de potencial diferentes: o campo de potencial triangular e o elíptico são apenas dois exemplos. O primeiro é descrito pela equação

$$|y| = -\frac{|x|}{m} + d, \quad (3)$$

enquanto que o último é dado por

$$\frac{y^2}{d^2} + \frac{x^2}{(md)^2} = 1. \quad (4)$$

Em ambos os casos x e y são as coordenadas do obstáculo no referencial do veículo, d é o valor do potencial para esse obstáculo em particular e m é uma constante que define o “alongamento” do campo de potencial ao longo da direcção factível de movimento (o eixo x no caso do veículo de tracção diferencial). A constante m tem geralmente um valor maior do que 1, significando que o valor do potencial de um obstáculo colocado ao longo do eixo y é igual ao valor de potencial do mesmo obstáculo colocado a uma distância m -vezes maior ao longo do eixo x . Se o valor de potencial for expresso em termos de x e y , tem-se

$$d = \frac{|x|}{m} + |y| \quad \text{e} \quad (5)$$

$$d = \sqrt{y^2 + \frac{x^2}{m^2}} \quad (6)$$

para os campos de potencial triangulares e elípticos, respectivamente. Pode ser também útil exprimir esses campos em termos de coordenadas polares, ficando respectivamente

$$d = r \cdot \left(\frac{1}{m} |\cos \varphi| + |\sin \varphi| \right) \quad \text{e} \quad (7)$$

$$d = r \cdot \sqrt{\frac{1}{m^2} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} \quad , \quad (8)$$

onde φ , a orientação do obstáculo relativamente ao robot, e r , a distância do obstáculo, são obtidas usando as transformações usuais,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{e} \quad (9)$$

$$\varphi = \arctg \frac{y}{x} \quad . \quad (10)$$

As linhas equipotenciais para ambos os campos de potencial podem ser observadas na Fig. 2.

Repare-se que geralmente o valor de potencial corresponde a uma distância ao robot usando métrica diferente, não Euclidiana. Note-se também que se se fizer $m=1$ para o campo elíptico é obtido um campo de potencial circular e a distância em termos de valor de potencial fica Euclidiana.

Até agora nada foi dito sobre a navegação através dos obstáculos e sobre as próprias forças repulsivas; de facto, o único objectivo desta secção era conceber a ideia de uma distância não-Euclidiana que se pode mostrar mais útil quando se tem em conta as restrições não holónomas

do robot. Os algoritmos de navegação em si serão apresentados nas subsecções seguintes.

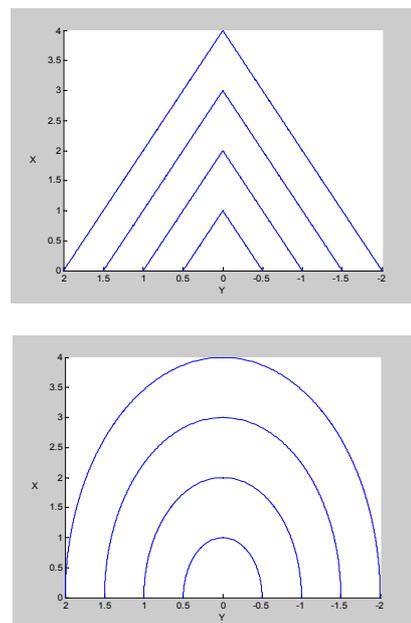


Fig. 2. Linhas equipotenciais para um campo triangular e um campo elíptico, com $m = 2$.

3.2 Aceleração Normal

A aceleração total aplicada na direcção perpendicular ao movimento é simplesmente igual à soma das acelerações normais individuais, $a_y = v w$

$$a_y = a_{y1} + a_{y2} + a_{y3} + \dots \quad (11)$$

A expressão anterior, tendo em conta que $a_y = v w$, pode ser escrita como

$$w = w_1 + w_2 + w_3 + \dots \quad (12)$$

Isso significa que a aceleração normal total do robot é dada pela soma das velocidades angulares aplicadas ao robot, aparte o factor de escala v , a velocidade do robot. Se, para uma mesma configuração dos obstáculos e para as mesmas condições iniciais, é pretendido que o robot siga a mesma trajectória independentemente da sua velocidade linear, então é preciso assegurar que a função de curvatura C para essa configuração de obstáculos é independente da velocidade linear do robot. Tendo em conta que

$$w = Cv \Leftrightarrow C = \frac{w}{v} \quad , \quad (13)$$

se, para cada obstáculo i , se fizer

$$w_i = c(d_i) \cdot v \quad (14)$$

onde $c(d_i)$ é uma função da distância d_i ao obstáculo (medida usando o campo de potencial escolhido), então

$$C = c(d_i) \quad (15)$$

e a função de curvatura passa a depender apenas da posição do obstáculo. Geralmente é suposto essa função diminuir com a distancia: uma vez mais existem vários candidatos para a função de curvatura. $c(d)$ pode ser qualquer uma das seguintes funções:

$$|c(d)| = \frac{G}{d - D}, \quad (16)$$

$$|c(d)| = \frac{G}{(d - D)^2} \text{ ou} \quad (17)$$

$$|c(d)| = \begin{cases} G \left(1 - \frac{d}{D}\right) & d < D \\ 0 & d \geq D \end{cases} . \quad (18)$$

G é um ganho geral e D é um parâmetro que controla a derivada da função de curvatura em relação a d , a distância do obstáculo ao centro do robot. D tem unidades de distância e no caso (18) e (19) tem de ser dimensionado de maneira a garantir que $0 < D < R$, onde R é o raio do robot (se não fosse assim a função de curvatura poderia atingir uma singularidade). Um escolha cuidadosa de D e G é crítica no que diz respeito ao desempenho do robot.

O sinal da função de curvatura é dado obviamente

$$\frac{c(d)}{|c(d)|} = \begin{cases} 1 & -\frac{\pi}{2} \leq \varphi < 0 \\ -1 & 0 < \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (19)$$

Para $\varphi = 0$ o sinal é indefinido.

3.3 Aceleração Tangencial

A aceleração tangencial total é também dada pela soma das componentes tangenciais individuais,

$$a_x = a_{x1} + a_{x2} + a_{x3} + \dots \quad (20)$$

o que pode ser transformado em

$$\dot{v} = \dot{v}_1 + \dot{v}_2 + \dot{v}_3 + \dots \quad (21)$$

Para cada obstáculo, a aceleração repulsiva tangencial pode ser projectada de diversas maneiras: geralmente deve aumentar quando o obstáculo se aproxima e deve diminuir

quando o robot anda mais devagar. Essa aceleração depende da velocidade do robot e também da distância ao obstáculo,

$$\dot{v} = F(d, v, \dots), \quad (22)$$

embora possa também depender das derivadas de v e d quando uma relação dinâmica é usada em vez de uma estática (por exemplo, um controlador PID).

Não existe necessidade de usar os mesmos parâmetros, nem mesmo a mesma forma de campos de potencial, quando se modela as acelerações repulsivas tangenciais e normais: lembre-se que essas duas componentes são de facto independentes.

3.4 Aceleração Atractiva

As equações (12) e (21) simplesmente constataam que depois de dimensionado o módulo de desvio de obstáculos o módulo responsável por levar o robot até ao seu alvo é adicionado por simples soma das respectivas componentes de aceleração.

O controlador mais simples que se pode dimensionar é

$$\begin{aligned} w &= K_w (\theta_{ref} - \theta) \\ \dot{v} &= K_v (v_{ref} - v) \end{aligned} \quad (23)$$

onde θ_{ref} e v_{ref} são respectivamente o ângulo e velocidade desejados e K_v e K_w são parâmetros de controlo. θ_{ref} é definido como

$$\theta_{ref} = \arctg \left(\frac{y_{ref} - y}{x_{ref} - x} \right) \quad (24)$$

onde (x_{ref}, y_{ref}) é postura alvo do robot.

Apesar da sua simplicidade, estes controladores provaram ser bastante satisfatórios quando conjugados com o módulo de desvio de obstáculos.

3.5 Obstáculos múltiplos

Embora as equações (12) e (21) sejam extremamente atraentes, sugerindo uma adição natural das componentes normais e tangenciais provocadas por cada obstáculo, uma tal abordagem tem vários inconvenientes: dois obstáculos pequenos colocados lado a lado dariam origem a uma força repulsiva muito mais forte do que a provocada por um obstáculo duas vezes maior e colocado na mesma posição. Mais: no caso de um robot que só tenha acesso a medidas fornecidas por, e.g., um anel de sonares ou infravermelhos colocados à sua volta não existe a possibilidade de distinguir se a leitura de dois sensores contíguos pertence ou não ao mesmo objecto. Uma solução possível consiste em considerar apenas o

obstáculo mais crítico de cada lado do robot, determinando os obstáculos esquerdo e direito mais próximos e descartando todos os outros. No caso da repulsão tangencial basta considerar apenas o obstáculo frontal mais próximo, e como tal as acelerações repulsivas ficam definidas como

$$w_o = |v \cdot c(d_{LMAX})| - |v \cdot c(d_{RMAX})| \quad (25)$$

e

$$\dot{v}_o = F(d_{MAX}, v, \dots), \quad (26)$$

onde d_{LMAX} , d_{RMAX} e d_{MAX} são respectivamente as distâncias mínimas dos obstáculos à esquerda, à direita e a frente, e F é a mesma função de (22). Quando o obstáculo mais próximo está localizado precisamente à frente do robot, a equação (25) fica indefinida; não é recomendado então escolher aleatoriamente o lado ao qual atribuir esse obstáculo, uma vez que tal abordagem pode conduzir a uma instabilidade indesejada. Pode-se calcular o segundo obstáculo mais próximo e então atribuir o obstáculo mais próximo ao lado desse segundo obstáculo, criando uma espécie de histerese que evita a “hesitação” do robot.

As actuações do robot vêm finalmente dadas por

$$\begin{aligned} w &= w_c + w_o \\ \dot{v} &= \dot{v}_c + \dot{v}_o \end{aligned} \quad (27)$$

onde w_c e \dot{v}_c são as acelerações atractivas que tentam conduzir o robot para a sua postura final e w_o e \dot{v}_o são as acelerações repulsivas devido aos obstáculos, definidas nas equações (25) e (26).

IV. CONCLUSÕES

Este artigo introduziu uma versão modificada do método generalizado dos campos de potencial. Entre outras coisas este novo método permite considerar campos de potencial com diferentes formas, “alongados” por ajuste de um parâmetro. Também permite especificar independentemente as acelerações tangenciais e normais causadas por um obstáculo. Essas acelerações podem ser vistas como perturbações no esforço do robot atingir uma determinada postura, baseado num controlador por retroacção adequado.

Este método tem sido usado, com resultados bastante satisfatórios, na equipa de futebol robótico IsocRob (middle size league), usando uma componente de repulsão em direcção baseada na equação (18) e uma componente de repulsão tangencial baseada num controlador PD. Em ambos os casos são utilizados campos elípticos, embora na repulsão tangencial o factor de alongamento seja variante com a velocidade. Os diversos parâmetros, quer da equação (18) quer do cálculo do factor de alongamento são determinados de forma a que, para os controladores de atracção escolhidos (variantes menos simplificadas dos controladores descritos em (23)), o robot tenha um

comportamento próximo do desejado. A flexibilidade deste método permite que, por escolha de diferentes valores para os parâmetros se consigam obter comportamentos substancialmente diferentes no que diz respeito ao evitar dos obstáculos, permitindo controlar, entre outras coisas, a distância média aos obstáculos, o grau de antecipação dos obstáculos na navegação e a suavidade da trajectória.

V. REFERÊNCIAS

- [1] R. Arkin, *Behavior-Based Robotics*, The MIT Press, 1998
- [2] O. Khatib, “Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots”, 1985 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, St. Louis, Missouri, pp. 500-505, March 25-28, 1985
- [3] B. H. Krogh, “A Generalized Potential Field Approach to Obstacle Avoidance Control”, Proc. of Intern. Robotics Research Conference, Bethlehem, Pennsylvania, August, 1984
- [4] J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publ., 1991