

## Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

---

# A linha lateral dos peixes: comparando estratégias de busca em simetrias esférica e dipolar

Cláudia Patrícia Torres Cruz<sup>1</sup>

Escola de Engenharia e Ciências Exatas, UnP, Natal, RN

Ana Carolina Luchiari<sup>2</sup>

Departamento de Fisiologia, Centro de Biociências, UFRN, Natal, RN

Gilberto Corso<sup>3</sup>

Departamento de Biofísica e Farmacologia, UFRN, Natal, RN

**Resumo** Comparamos algoritmos de navegação em campos esféricos e dipolares. Construímos algoritmos que permitem navegar sobre um campo dipolar tanto para indivíduos se deslocando diretamente ao alvo como realizando trajetórias curvas seguindo as linhas do dipolo; padrões estes observados em experimentos biológicos com peixes que utilizam a linha lateral como sensor.

**Palavras-chave.** Linha lateral, sensores, comportamento dos peixes, navegação espacial.

## 1 Introdução

Espécies animais se utilizam amplamente de seus órgãos sensoriais para decodificar o meio ambiente ajudando-as a encontrar nutrientes, manterem-se afastados de ameaças ou se reproduzirem [9]. Neste manuscrito nos concentramos na linha lateral dos peixes, um órgão sensorial menos estudado e menos sofisticado do que a visão, a audição ou mesmo a ecolocalização. O horizonte maior em que se inscreve o nosso trabalho, entretanto, são os algoritmos naturais por busca de recursos empregados por animais.

Os algoritmos de animais que se utilizam de um sensor e buscam por uma fonte no espaço, tipicamente alimento, são bem estudados no caso em que a fonte esta associada a um potencial ou gradiente que decai espacialmente segundo esferas. Campos potenciais do tipo esférico são a regra, uma fonte sonora, por exemplo, está associada a um campo de pressão que cai quadraticamente com a distância [4]. Um outro exemplo pode ser uma mosca varejeira que procura uma carcaça em decomposição, o odor diminui de acordo com distância do alimento, e em primeira aproximação pode-se considerar que decai de

---

<sup>1</sup>claudia@dfte.ufrn.br, claudiacruz@unp.br

<sup>2</sup>analuchiari@yahoo.com.br

<sup>3</sup>corso@cb.ufrn.br

acordo com esferas centradas na fonte que libera substâncias orgânicas [9]. Um exemplo mais prosaico seria uma fonte de calor que um mosquito dotado de sensores infravermelho localiza no espaço, pois a radiação eletromagnética produzida por um animal também decai espacialmente seguindo um padrão esférico.

As situações acima descritas podem ser ilustradas como na figura 1 que simula um peixe em busca de um alimento que libera odor no fundo de um lago. O peixe se guia por um gradiente de concentração que segue uma simetria esférica. Neste trabalho estudaremos diferenças entre os algoritmos que buscam alimentos em um campo do tipo esférico e em um campo dipolar. De fato um animal se mexendo na água, ou um corpo vibrante qualquer, produz um campo de pressão do tipo dipolar. A linha lateral dos peixes, por sua vez, é capaz de perceber e se orientar pelas linhas do dipolo. Neste trabalho analisamos, de uma forma algorítmica, a estratégia de busca por alimento do sculpin estudado experimentalmente na referência [1] que se guia pelo campo de dipolo. O sculpin é um peixe bentônico, vive no fundo de lagos na zona temperada do hemisfério norte, e usa suas nadadeiras dianteiras para dar pequenos saltos. Nas referências [1, 2] são descritos mais de 300 aproximações do sculpin a um ponto que simula uma fonte de alimento evidenciando a importância do campo dipolar no movimento dos indivíduos. A comparação da navegação animal sobre simetrias esférica e dipolar é o tema deste estudo.

## 2 Metodologia

### 2.1 A biologia a ser estudada

A linha lateral é um órgão sensorial utilizado exclusivamente em animais aquáticos que consiste em um conjunto de dezenas ou centenas de sensores de pressão organizados preferencialmente sobre linhas lateralmente dispostas ao longo do corpo de espécies de peixes ou anfíbios [10]. A linha lateral tem participação na orientação de peixes em cardumes, na procura de parceiros para acasalamento [8], na caça [7] e na orientação [3]. Neste estudo focalizamos o uso da linha lateral para procura de animais que perturbam o meio criando em torno de si um campo oscilante de variação de pressão no meio como, por exemplo, um pequeno animal que se move movimentando seus membros locomotores.

O experimento descrito na referência [1] ilustra a trajetória do sculpin, espécie de peixe, *Cottus bairdi*, quando ele se dirige a um alvo que oscila. Este experimento foi realizado totalmente no escuro para se ter certeza que o sculpin estava sendo guiado exclusivamente pela linha lateral e não pela visão. A fonte que produzia uma oscilação da pressão na água, simulando um crustáceo que se movimenta, foi uma pequena esfera de 3 cm de diâmetro que oscila com a frequência de 100 Hz. Este tipo de arranjo experimental é padrão no estudo da linha lateral [6]. O trabalho experimental [1] conclui que, apesar de uma grande variabilidade característica de experimentos na área biológica, o sculpin apresenta pelo menos dois tipos de trajetórias bem caracterizadas: uma que segue diretamente ao alvo, e outra que se curva seguindo as linhas potências do campo dipolar.

## 2.2 Breve descrição do campo esférico e do campo dipolar

O campo pontual ou esférico pode ser descrito por um potencial  $V$  que, em um espaço tridimensional, decai com o quadrado da distância,  $r$ . No caso mais simples de uma fonte isotrópica o potencial é representado como:

$$V \sim \frac{P}{r^2} \quad (1)$$

onde  $P$  é a potência da fonte pontual. O campo dipolar, por sua vez, pode ser descrito da seguinte forma:

$$V \sim \frac{P \cos\theta}{r^3} \quad (2)$$

onde utilizamos coordenadas polares  $r$  e  $\theta$  para facilitar a nomenclatura matemática. As linhas de isopotencial dos campos esféricos e dipolares estão ilustradas nas figuras 1 e 2, respectivamente. O campo dipolar, diferentemente do campo esférico, apresenta uma direção preferencial onde as linhas de campo se acumulam; a fonte que oscila produzindo o campo dipolar se movimenta ao longo desta direção.

## 3 Resultados

O algoritmo utilizado para deslocamento do sculpin, nos casos esféricos e dipolar apresentam, conforme ilustrado em apêndice, as seguintes características comuns:

- Trabalhamos com peixes do tipo bentônico, eles se deslocam aos saltos sobre uma superfície plana.
- Para ser biologicamente plausível, os peixes se deslocam para a frente dando pulos de tamanho constante.
- Estimamos, aleatoriamente, a posição de vários saltos possíveis virtuais que o peixe poderia dar a cada passo.
- Para todas as condições virtuais estimamos  $\Delta V$ , a diferença de pressão entre a cabeça e a cauda do peixe.
- A localização do peixe a cada passo é escolhida como sendo um ótimo de  $\Delta V$ .
- O ótimo escolhido depende do critério a ser seguido: maximizar potencial quando se atravessam linhas potenciais ou minimizar potencial para deslocar-se ao longo de uma linha de potencial constante.

### 3.1 Campo esférico

O deslocamento no potencial esférico pode ser tratado de duas formas distintas. A mais simples computacionalmente, e que estamos seguindo neste trabalho, é maximizar a diferença de intensidade de campo,  $\Delta V$ , entre cabeça e cauda. Entretanto, uma grande

parte dos animais segue a estratégia de manter constante a diferença de potencial entre os lados esquerdo e direito do corpo. De fato, este é o princípio de imageamento estéreo, quando, por exemplo, nos aproximamos em direção a uma fonte sonora giramos a cabeça até que a intensidade sonora percebida em cada ouvido seja a mesma [5]. Quando isto ocorrer podemos estar certos que encontramos a direção da fonte.

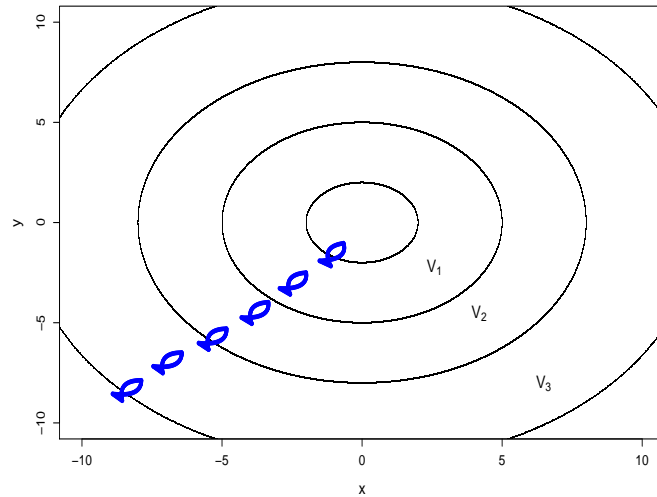


Figura 1: Campo potencial do tipo esférico onde são mostradas algumas linhas isotônicas. O algoritmo de busca é ilustrado usando um peixe que realiza seis passos a partir de sua condição inicial situada embaixo e a esquerda da figura. Na ilustração, a intensidade do campo decai segundo  $V_1 > V_2 > V_3$ .

### 3.2 Campo dipolar

Para simular as duas trajetórias básicas do sculpin no campo dipolar utilizamos algoritmos que ora atravessem linhas de isodipolo (maximizar  $\Delta V$ ), ou ora sigam linhas de isodipolo (minimizar  $\Delta V$ ). Estes dois comportamentos estão ilustrados na figura 2. A direita está representado um peixe que se desloca ao longo de uma linha de potencial constante; segue, portanto, a estratégia de procurar um mínimo de  $\Delta V$ . A esquerda, outro peixe, segue a estratégia oposta, maximizando  $\Delta V$  e, assim, se dirige diretamente ao alto. É interessante notar que no estudo experimental [1] foram observadas trajetórias similares a estas mostradas, mas também, um grande número de situações intermediárias.

## 4 Discussão e Conclusão

A linha lateral é um sentido especial em peixes que permite que eles percebam vibrações ou movimentos na água usando sensores na superfície de seus corpos [10]. Em animais terrestres não existe um sentido correspondente, ademais a maioria dos sentidos

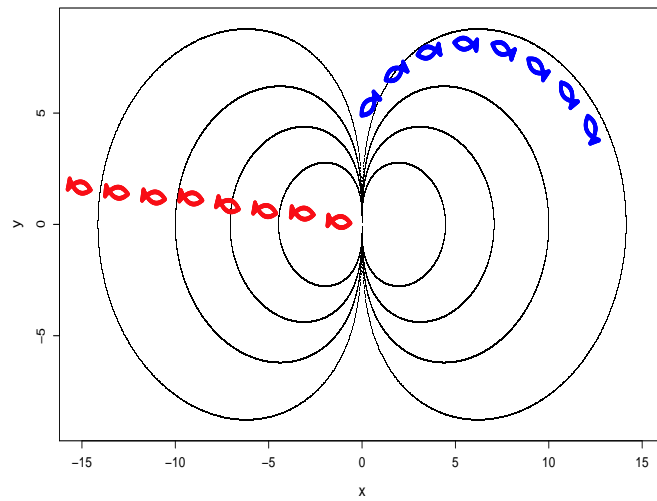


Figura 2: Representação do campo dipolar e da trajetória de dois peixes. O da esquerda se dirige diretamente ao centro cruzando perpendicularmente as linhas isotopenciais, o da direita segue uma linha fazendo uma trajetória curva. Os resultados experimentais do sculpin evidenciam que ambos os tipos de trajetórias são realizadas.

com os quais estamos acostumados apresentam um padrão esférico onde a intensidade diminuiu à medida que nos afastamos da fonte igualmente em todas as direções. A linha lateral, por captar vibrações, se orienta segundo um padrão dipolar. Neste trabalho exploramos comparativamente algoritmos de busca por alvos no espaço em simetrias esféricas e dipolares.

Tipicamente um predador em busca de um alvo pontual, se desloca em sua direção percorrendo o caminho mais curto e assim ele aumenta gradativamente o estímulo que chega da fonte, por exemplo, o predador se move no sentido de aumentar a intensidade sonora da presa ou do seu cheiro. Seguindo esta estratégia o predador cruza perpendicularmente as linhas potencias ou os gradientes de concentração para se dirigir ao local de máxima intensidade ou concentração.

No caso de busca em um campo dipolar, o sculpin, o caso em análise, utiliza-se de duas estratégias distintas. Ele pode se dirigir diretamente ao alvo cruzando perpendicularmente as linhas isotopenciais como no caso de um predador buscando um alvo em simetria esférica. Alternativamente, ele pode se deslocar ao longo das linhas potencias até atingir o alvo. A possibilidade de seguir linhas de isotopencial distingue radicalmente as buscas em simetria esférica e dipolar. De fato, um animal que usasse a estratégia de seguir linhas de potencial constante em um campo esférico estaria condenado permanentemente a andar em círculos, o que não é o caso na simetria dipolar.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo apoio.

## A O algoritmo

O algoritmo está escrito em pseudo código. O peixe é representado através de um conjunto de pontos,  $Peixe = Peixe(x, y)$ , com formato típico. Destacam-se no peixe dois pontos extremos na cabeça  $(x_{cab}, y_{cab})$  e na cauda  $(x_{cau}, y_{cau})$ , e dois pontos laterais na direita  $(x_{dir}, y_{dir})$  e na esquerda  $(x_{esq}, y_{esq})$ . Especifica-se a posição do peixe por três coordenadas: duas variáveis cartesianas do centro do peixe,  $x_p, y_p$  e uma variável angular  $\alpha$  que define um ângulo entre a linha cabeça - cauda do peixe e o eixo horizontal.

O algoritmo abrange todos os casos estudados. A função potencial pode ser tanto dada pela equação (1) quanto pela equação (2). Ademais, a diferença de potencial  $\Delta V$  compreende dois casos: a diferença de potencial paralelo,  $\Delta V_{\parallel}$ , e a diferença de potencial perpendicular,  $\Delta V_{\perp}$ . O primeiro diz respeito a diferença de potencial entre dois pontos nas extremidades longitudinais do peixe:  $\Delta V_{\parallel} = V(x_{cab}, y_{cab}) - V(x_{cau}, y_{cau})$ . Enquanto o segundo se refere a dois pontos laterais:  $\Delta V_{\perp} = V(x_{esq}, y_{esq}) - V(x_{dir}, y_{dir})$ . Por fim, quando o algoritmo requer um  $\Delta V$  ótimo, este tanto pode ser um máximo quanto um mínimo.

```

define x, y          # coordenadas cartesianas no plano
define V(x, y)       # função potencial para qualquer ponto x,y do plano
plot(V(x,y))         # desenha gráfico com linhas isopotencias
                    # condições iniciais da dinâmica
define x0; y0; α0
define Peixe(x0, y0)
                    # parâmetros da dinâmica
define n_salto       # número de saltos que o peixe realiza
define l_salto       # tamanho de cada salto
define α_lim         # limite do ângulo de salto para frente do peixe
define n_virt        # número de passos virtuais, um há de ser o ótimo
define Fun_otimo     # função ótimo que escolhe o ótimo de ΔV dentre as possibilidades
                    # virtuais geradas por randomização. A este associa-se: x_ot, y_ot e α_ot
                    # a dinâmica propriamente
DO i = 1 TO n_salto
IF(i = 1) x_p ← x0; y_p ← y0; α_p ← α0;
IF(i > 1) x_p ← x_p + x_ot; y_p ← y_p + y_ot; α_p ← α_p + α_ot;
plot(Peixe(x_p, y_p))
DO j = 1 TO n_virt
x_p ← x_p + x_rand; y_p ← y_p + y_rand; α_p ← α_p + α_rand;
tal que x_rand^2 + y_rand^2 = l_salto^2 e |α_rand - α_p| < α_lim
Fun_otimo (x_p, y_p, α_p)

```

END  $n_{virt}$   
 END  $n_{salto}$

## Referências

- [1] R. A. Conley and S. Coombs, Dipole source localization by mottled sculpin. I. Approach strategies., *J. Comp. Physiol.*, **180**, 387-399, (1997), DOI: 10.1007/s003590050057.
- [2] R. A. Conley and S. Coombs, Dipole source localization by mottled sculpin. II. The role of lateral line excitation patterns, *J. Comp. Physiol.*, **180**, 401-415, (1997), DOI: 10.1007/s003590050058.
- [3] T. B. de Perera, *Spatial parameters encoded in the spatial map of the blind Mexican cave fish, *Astyanax fasciatus**, *Animal Behavior*, **68**, 291-295, (2004), DOI: 10.1016/j.anbehav.2003.11.009.
- [4] F. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley Publishing Company, (1964).
- [5] R. Glaser, *Biophysics*, Springer-Verlag, Heidelberg, (1996).
- [6] G. G. Harris and W. A. van Bergeijk, *Evidence that the Lateral-Line Organ Responds to Near-Field Displacements of Sound Sources in Water*, *Journal of the Acoustical Society of America*, **34**, 1831-1841, (1962), DOI: 10.1121/1.1909138.
- [7] K. Pohlmann, J. Atema and T. Breihaupt, *The importance of the lateral line in nocturnal predation of piscivorous catfish*, *J. Experimental Biology*, **207**, 2971-2978, (2004), DOI: 10.1242/jeb.01129.
- [8] M. Satou, H. A. Takeuchi, J. Nishii, M. Tanabe, S. Kitamura, N. Okumoto, and M. Iwata, *Behavioral and electrophysiological evidences that the lateral line is involved in the inter-sexual vibrational communication of the hime salmon (landlocked red salmon, *Oncorhynchus nerka*)*, *J. Comp. Physiol. A*, **174**, 539-549, (1994), DOI: 10.1007/BF00217373.
- [9] K. Schmidt-Nielsen, *Animal Physiology - Adaptation and Environment*, Cambridge University Press, (1975).
- [10] J. F. Webb, R. R. Fay and A. N. Popper, *Fish Bioacoustics*, Springer, (2008).