

Inteligência Artificial para Robótica Móvel

**Introdução a Otimização
Métodos de Otimização de Busca Local**

Professor: Marcos Maximo

Roteiro

- Motivação.
- Métodos Analíticos.
- Métodos dos Mínimos Quadrados (MMQ).
- Descida do Gradiente.
- Hill Climbing.
- Simulated Annealing.
- Busca Tabu.
- Dicas Práticas para Robótica.

Motivação

Otimização Matemática

- Encontrar o mínimo (ou máximo) de uma função:

$$\mathbf{x}^* = \arg \min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) \text{ ou } \mathbf{x}^* = \arg \max_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x})$$

- Nomenclatura:

- $J(x)$: função objetivo, função de *fitness*, medida de qualidade, função de avaliação, função de custo etc.
- \mathbf{x} : parâmetros.
- \mathbf{x}^* : ótimo (mínimo ou máximo).

- Também é comum haver restrições:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(\mathbf{x}) &\leq \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) &= \mathbf{0} \end{aligned}$$

Otimização Matemática

- Pode-se pensar como busca em que o caminho não importa.
- Diversos problemas de Engenharia podem ser escritos como problema de otimização.
- Frequentemente, em tomada de decisão, comportamentos envolvem parâmetros a serem ajustados;
 - Exemplo: como ajustar os parâmetros do Roomba do lab 1 de modo a limpar o ambiente no menor tempo?
- Também usa-se o nome “programação matemática” (marketing): programação linear, programação quadrática, programação dinâmica etc.
- A área de Aprendizado de Máquina é construída em cima de otimização.

Otimização Numérica

- Quando solução analítica não é possível: otimização numérica.
- Há diversas técnicas.
- **Não** existe o melhor algoritmo.
- “Melhor” depende de quão difícil é o problema de otimização.
- Algoritmos específicos para certas classes:
 - Programação linear: função de custo e restrições lineares.
 - Programação quadrática: função de custo quadrática e restrições lineares.
 - Programação quadrática restrita quadraticamente: função de custo e restrições quadráticas.
- Comunidade de IA geralmente está preocupada com problemas de otimização muito difíceis (classes mais gerais).

Metaheurísticas

- A maioria dos algoritmos que veremos estão na classe de Metaheurísticas.
- Metaheurísticas são os algoritmos mais “força bruta”. ♣ ♦ ♥ ♠
- Para muitos desses algoritmos, não precisa nem da expressão de $J(x)$, basta conseguir amostrar.
- Sem muitas garantias matemáticas, mas funcionam muito bem na prática.
- Algoritmos apresentados com base na experiência do professor 😊.

Exploitation x Exploration

- Em problemas muito difíceis, não há garantia de encontrar o ótimo global.
- Surge o dilema de *exploitation* x *exploration*.
- *Exploitation*: tentar mais do que sei que é bom.
- *Exploration*: buscar por onde não fui antes.
- Focar demais em *exploitation* resulta em convergência prematura para ótimo local.
- Focar demais em *exploration* faz convergência demorar demais.

Métodos Analíticos

Métodos Analíticos

- Quando o problema é muito simples, a solução é analítica:

$$J'(x) = 0$$

- Se for uma função multivariável (campo escalar), usa-se o gradiente:

$$\nabla J(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$$

$$\nabla J(\mathbf{x}) = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} = \left[\frac{\partial J}{\partial x_1} \quad \frac{\partial J}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial J}{\partial x_n} \right]^T$$

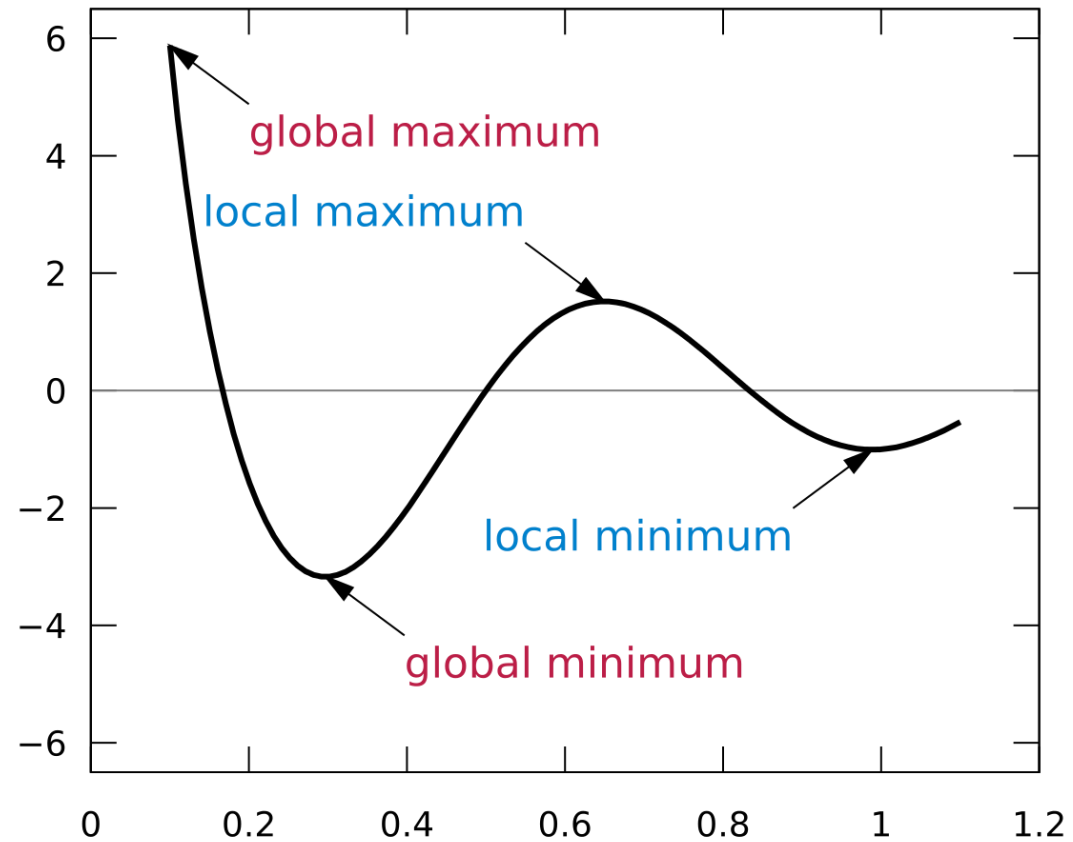
- Segunda derivada indica se é ponto de mínimo ou máximo local:

$$f''(x_0) > 0 \Rightarrow \text{mínimo local}$$

$$f''(x_0) < 0 \Rightarrow \text{máximo local}$$

$$f''(x_0) = 0 \Rightarrow \text{ponto de inflexão}$$

Ótimos Locais e Globais



Métodos Analíticos

- Por que mínimo ou máximo? Seja x na vizinhança de x_0 :

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + f''(x_0)(x - x_0)^2 = \\ f(x_0) + \underbrace{f''(c)}_{>0} (x - x_0)^2$$

- Como c é arbitrariamente próximo de x_0 , $f''(c)$ tem o mesmo sinal de $f''(x_0)$.
- Assim:

$$f''(x_0) > 0 \Rightarrow f(x_0) < f'(x) \text{ (mínimo)}$$

$$f''(x_0) < 0 \Rightarrow f(x_0) > f'(x) \text{ (máximo)}$$

Métodos Analíticos

- Para o caso multivariado, o teste da derivada segunda se refere à hessiana:
$$f(\mathbf{x}) \approx f(\mathbf{x}_0) + \nabla f(\mathbf{x}_0)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T \mathbf{H}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}$$

Métodos Analíticos

- Seja $\mathbf{H} = \mathbf{H}^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$, diz-se que:
 - $\mathbf{H} > 0$ (positivo-definida) se $\mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} > 0, \forall \mathbf{x} \neq \mathbf{0}$.
 - $\mathbf{H} \geq 0$ (positivo-semidefinida) se $\mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} \geq 0, \forall \mathbf{x} \neq \mathbf{0}$.
 - $\mathbf{H} < 0$ (negativo-definida) se $\mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} < 0, \forall \mathbf{x} \neq \mathbf{0}$.
 - $\mathbf{H} \leq 0$ (negativo-semidefinida) se $\mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} \leq 0, \forall \mathbf{x} \neq \mathbf{0}$.
- Ideia: generalizar a noção de positivo/negativo para matrizes.

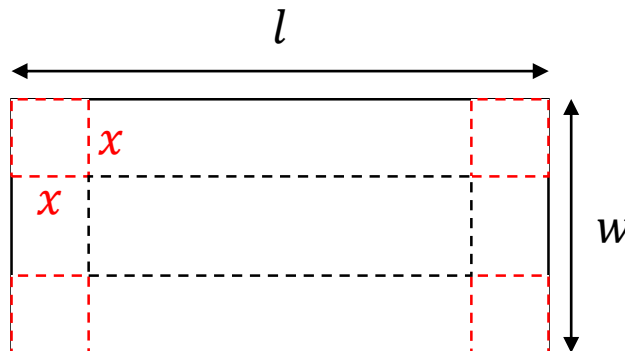
Métodos Analíticos

- Teste da segunda derivada para caso multivariado:
 $\mathbf{H} > 0 \Rightarrow$ mínimo local
 $\mathbf{H} < 0 \Rightarrow$ máximo local
- Demonstração é análoga ao caso univariado.

Métodos Analíticos

- Exemplo:

Tem-se um pedaço de papelão de comprimento l e largura w . Deseja-se construir uma caixa (sem tampa) cortando-se quadrados de lado x nos cantos desse papelão e dobrando. Qual deve ser o valor de x para termos volume máximo?



Métodos Analíticos

$$\begin{aligned} J(x) &= x(l - 2x)(w - 2x) \Rightarrow \\ J(x) &= lwx - 2(w + l)x^2 + 4x^3 \\ J'(x) &= lw - 4(w + l)x + 12x^2 = 0 \Rightarrow \\ x &= \frac{(w + l) \pm \sqrt{l^2 + w^2 - lw}}{6} \end{aligned}$$

$$x_1 = \frac{(w+l) + \sqrt{l^2 + w^2 - lw}}{6} \text{ não satisfaz pois lado menor seria negativo.}$$

$$J''(x) = -4(w + l) + 24x = 4\sqrt{l^2 + w^2 - lw} < 0 \text{ (ponto de máximo)}$$

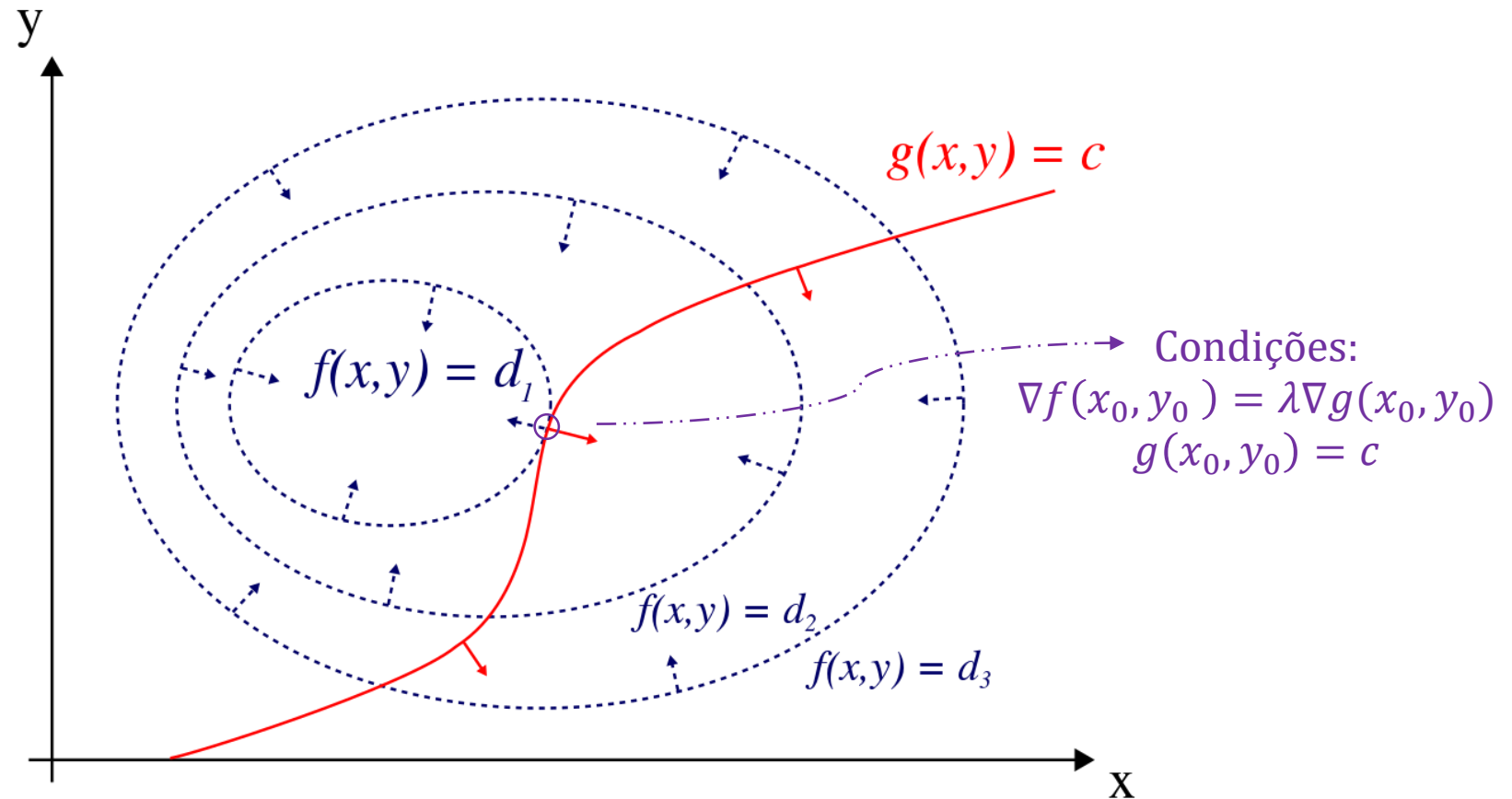
Otimização com Restrições

$$\min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) \text{ s. a. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{c}$$

- Solução analítica usa Multiplicadores de Lagrange.
- Converter em otimização sem restrições com função de custo:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = J(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{c})$$

Multiplicadores de Lagrange



Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Lagrange_multiplier

Otimização com Restrições

- Exemplo:

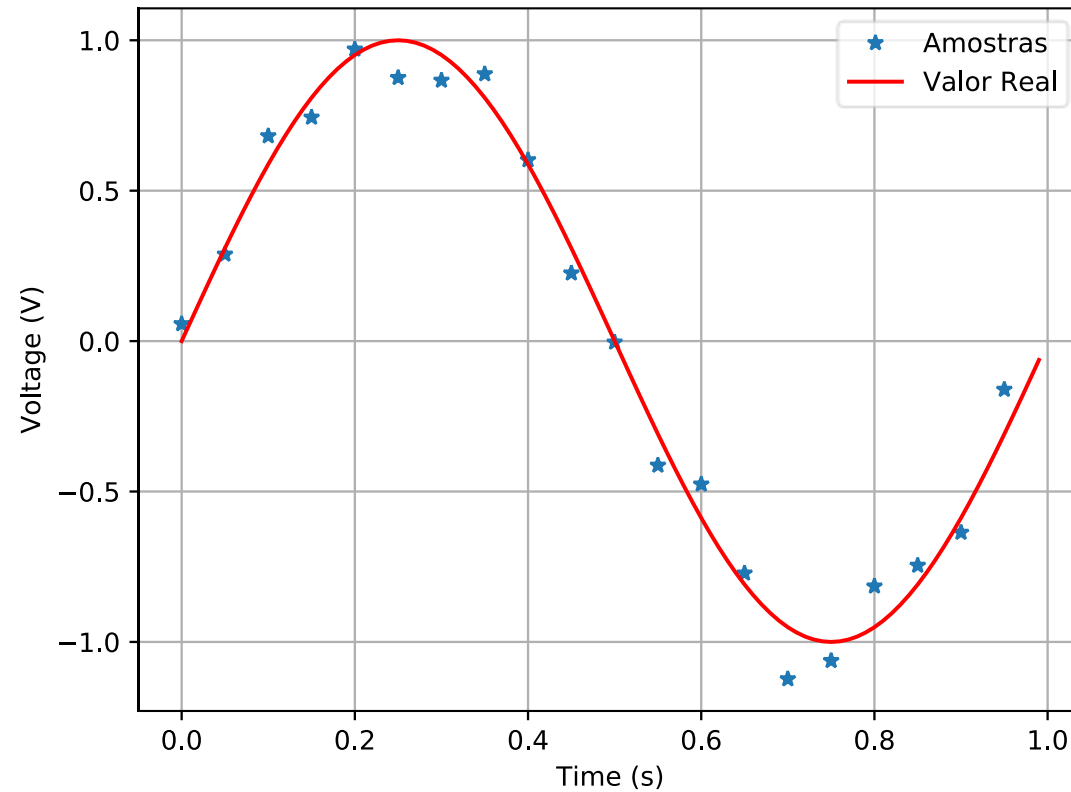
Uma caixa retangular sem tampa deve ser feita com 12 m^2 de papelão. Determine as dimensões x , y e z que fornecem o volume máximo de tal caixa.

Otimização com Restrições

$$\begin{aligned} J(x, y, z) &= xyz \\ g(x, y, z) &= xy + 2xz + 2yz = 12 \\ L(x, y, z, \lambda) &= xyz + \lambda(xy + 2xz + 2yz - 12) \\ \nabla L(x, y, z, \lambda) &= \mathbf{0} \\ &\begin{cases} x = 2 \\ y = 2 \\ z = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)



Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

- Problema de ajuste de curvas.
- Assumir modelo para a curva:
$$f(x) = \theta_0\phi_0(x) + \theta_1\phi_1(x) + \theta_2\phi_2(x) + \dots + \theta_n\phi_n(x)$$
- $\phi_j(x)$ são funções arbitrárias (*features*).
- $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_n]^T$ é vetor de parâmetros.
- Coletar m pontos experimentais: $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$.
- Função de custo quadrática:

$$J(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n) = \sum_{i=1}^m (y_i - f(x_i))^2$$

- Espécie de “Aprendizado Supervisionado” muito simples!

Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

- Solução (analítica) recai na solução de sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \sum_i \phi_0(x_i)\phi_0(x_i) & \sum_i \phi_0(x_i)\phi_1(x_i) & \cdots & \sum_i \phi_0(x_i)\phi_n(x_i) \\ \sum_i \phi_1(x_i)\phi_0(x_i) & \sum_i \phi_1(x_i)\phi_1(x_i) & \cdots & \sum_i \phi_1(x_i)\phi_n(x_i) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_i \phi_n(x_i)\phi_0(x_i) & \sum_i \phi_n(x_i)\phi_1(x_i) & \cdots & \sum_i \phi_n(x_i)\phi_n(x_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i \phi_0(x_i)y_i \\ \sum_i \phi_1(x_i)y_i \\ \sum_i \phi_2(x_i)y_i \\ \vdots \\ \sum_i \phi_n(x_i)y_i \end{bmatrix}$$

- Demonstração (derivar e igualar a zero)!

Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

- Notação alternativa:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{X}^T \mathbf{y}$$

$$\begin{aligned} X_{ij} &= \phi_j(x_i) \\ \boldsymbol{\theta} &= [\theta_0 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_n]^T \\ \mathbf{y} &= [y_1 \quad y_2 \quad \cdots \quad y_m] \end{aligned}$$

Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

- Há alguns casos especiais clássicos...

- Regressão Linear:

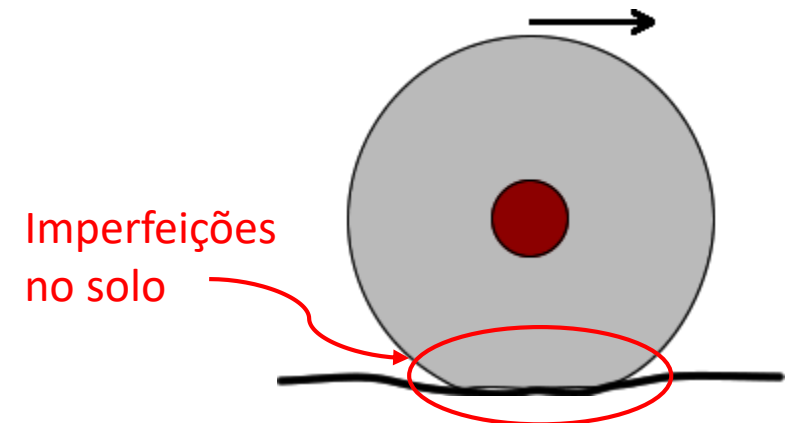
$$f(x) = \theta_0 + \theta_1 x$$

- Regressão Polinomial:

$$f(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \theta_2 x^2 + \dots + \theta_n x^n$$

Predição de Movimento da Bola

- Para que um robô consiga interceptar uma bola em movimento, é importante um bom modelo de predição do movimento da bola.
- Uma bola perfeitamente esférica num terreno perfeitamente plano teoricamente não sofre atrito.
- Na prática imperfeições na bola ou no solo geram *rolling friction*.
- Modelo comum: $v(t) = v_0 - ft$.
- f depende do campo e da bola.
- Interesse: aprender f .





Predição de Movimento da Bola

Procedimento:

1. Usar câmera para obter posições (x, y) da bola em cada instante.
2. Calcular velocidades em x e y usando diferenças finitas centradas:

$$v_x[k] = \frac{x[k+1] - x[k-1]}{2\Delta t}, \quad v_y[k] = \frac{y[k+1] - y[k-1]}{2\Delta t}$$

3. Calcular $v[k] = \sqrt{v_x^2[k] + v_y^2[k]}$.

4. Usar MMQ para obter v_0 e f .
5. Usar f para previsões futuras.

MMQ Multivariável

- MMQ é facilmente extensível para múltiplas variáveis.
- Basta considerar que cada ϕ_j pode depender de múltiplas variáveis:

$$\phi_j(\mathbf{x}) = \phi_j(x_1, x_2, \dots, x_p)$$

- Deve-se resolver o mesmo sistema linear que antes:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{X}^T \mathbf{y}$$

Limitações do MMQ

- Resolver sistema linear pode ter alto custo computacional e cair em problemas numéricos.
- Função do modelo tem que ser combinação linear das *features*.

$$f(\mathbf{x}) = \sum_j \theta_j \Phi_j(\mathbf{x})$$

- Quando é não-linear, às vezes dá para transformar em linear:

$$f(x) = A \cos(x + \phi) = A(\cos(x)\cos(\phi) - \sin(x)\sin(\phi)) = \theta_0 \cos(x) + \theta_1 \sin(x)$$

$$\theta_0 = A \cos \phi, \theta_1 = -A \sin \phi$$

- De modo geral, não dá para fazer isso (e.g. rede neural).

Métodos de Otimização de Busca Local

Métodos de Otimização de Busca Local

- Métodos de busca local buscam iterativamente ótimos locais próximo ao ponto inicial (chute inicial).
- Convergem rápido, mas são muito suscetíveis a ficar preso em ótimo local.
- Em geral, funcionam bem quando se tem poucos parâmetros e um bom chute inicial.

Descida do Gradiente

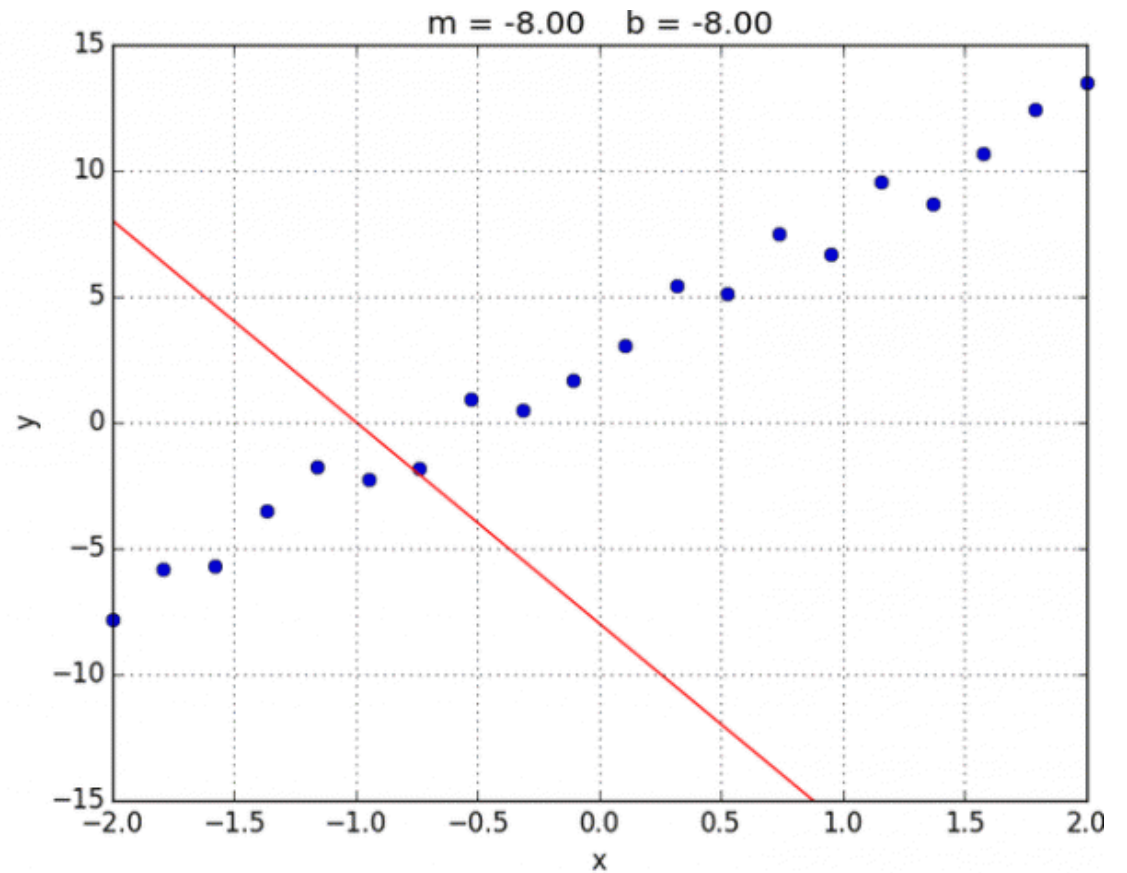
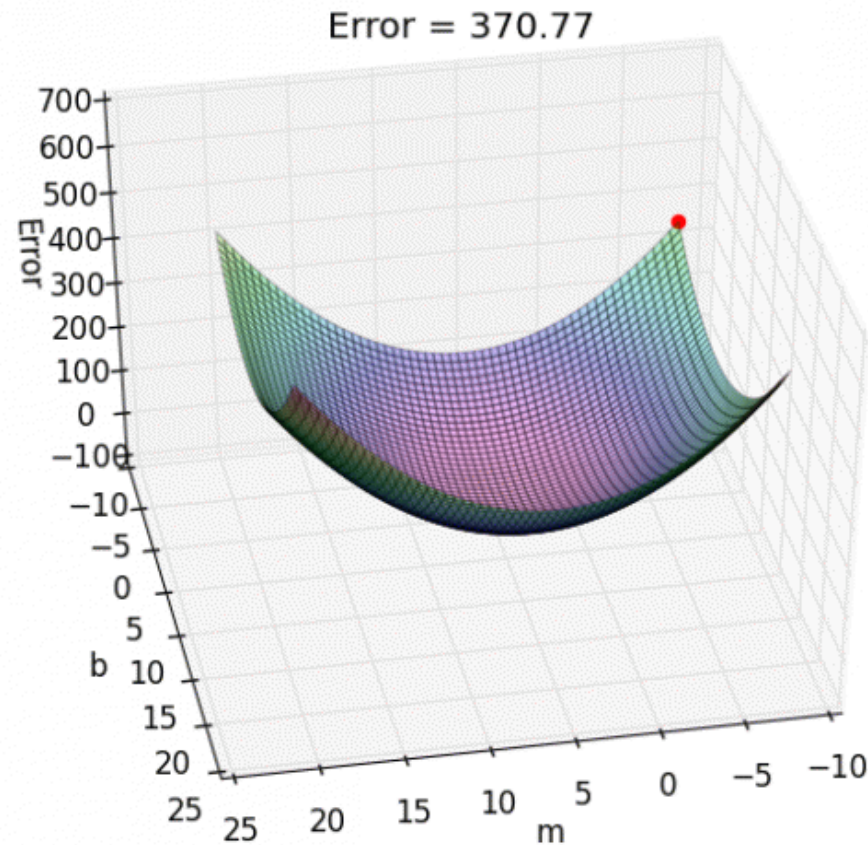
Descida do Gradiente

- Inglês: *Gradient Descent* (GD). Também conhecido como *Steepest Descent*.
- Método popularizado devido ao uso para treinar redes neurais.
- Funciona bem se for possível calcular o gradiente analiticamente.
- MAT: gradiente dá a direção de máximo crescimento da função.
- Ideia do algoritmo: seguir na direção contrária à do gradiente (máximo decrescimento).

$$\boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k - \alpha \frac{\partial J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}}$$

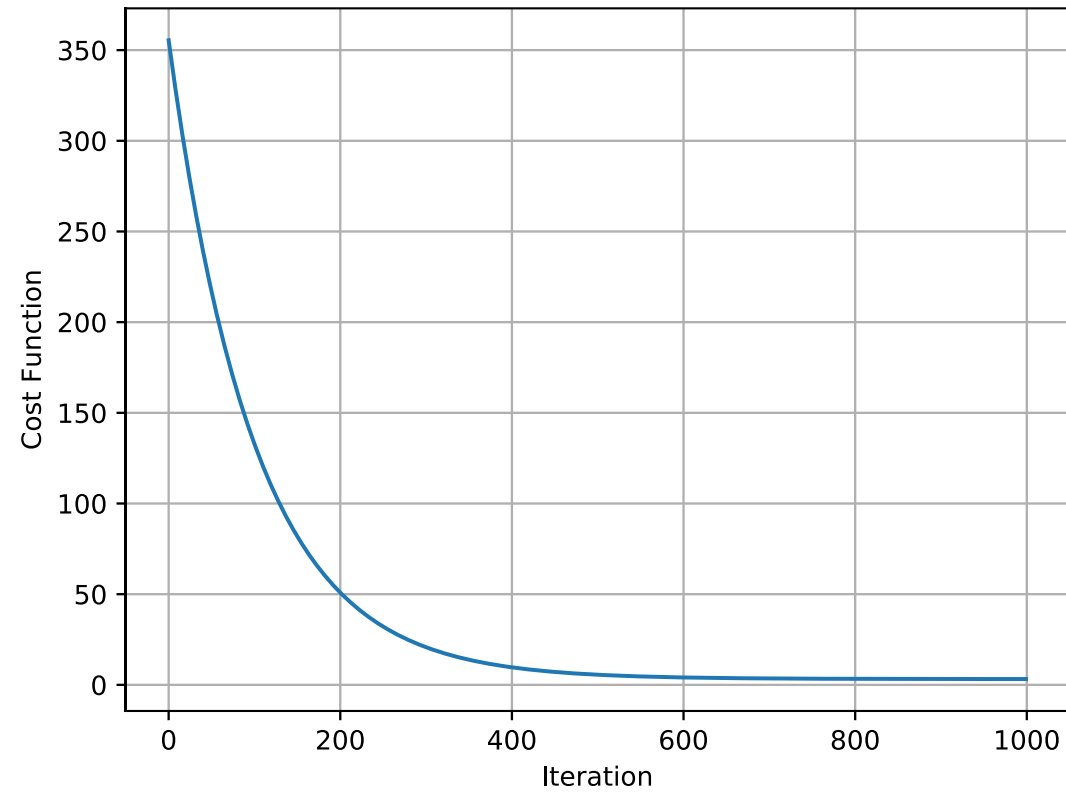
- α : taxa de aprendizagem (hiperparâmetro).
 - Ajustado por tentativa e erro.
 - Depende do problema.

Descida do Gradiente



Fonte: <https://giphy.com/gifs/gradient-O9rcZVmRcEGqI>

Descida do Gradiente



Descida do Gradiente

- Regressão linear:

$$f(x) = \theta_0 + \theta_1 x$$

$$J(x) = \frac{1}{2m} \sum_i (f(x_i) - y_i)^2$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_0} = \frac{1}{m} \sum_i (f(x_i) - y_i), \quad \frac{\partial J}{\partial \theta_1} = \frac{1}{m} \sum_i (f(x_i) - y_i) x_i$$

$$\theta_0 = \theta_0 - \alpha \frac{1}{m} \sum_i (f(x_i) - y_i)$$

$$\theta_1 = \theta_1 - \alpha \frac{1}{m} \sum_i (f(x_i) - y_i) x_i$$

Descida do Gradiente

```
def gradient_descent(dJ, theta, alpha):  
    while not check_stopping_condition():  
        theta = theta - alpha * dJ(theta)  
    return theta
```


Descida do Gradiente

- Também resolve problemas em que $f(x)$ envolve combinação não-linear das *features*, desde que seja possível calcular $\partial J / \partial \theta$.
- Muito dependente do chute inicial.
- É comum usar um *schedule* para o α (começa com valor alto e vai diminuindo).
- Veremos melhorias do algoritmo quando estudarmos Deep Learning.

Descida do Gradiente

- Fica “preso” em mínimos locais.
- Critérios de parada comuns:
 - Número de iterações.
 - $J < \varepsilon_1$.
 - $|J_{k+1} - J_k| < \varepsilon_2$.
 - Monitora curva de J e para quando achar que está bom (usado na prática).
- O que fazer quando não se tem expressão de $\partial J / \partial \theta$?
 - Possível calcular numericamente (alto custo).
 - Em geral, usa-se outros métodos.

Hill Climbing

Hill Climbing

- Português: subida de encosta.
- “*Climbing*” dá ideia de maximização, mas pode usar para minimização.
- Avalia vizinhos da posição atual.
- Vai para vizinho melhor avaliado.
- Continua até atingir critério de parada.
- Não requer cálculo da derivada.
- Funciona quando espaço de busca é discreto.

Hill Climbing

Assuming maximization

```
def hill_climbing(J, theta):  
    while not check_stopping_condition():  
        best = None #  $J(\text{None}) = -\infty$   
        for neighbor in neighbors(theta):  
            if J(neighbor) > J(best):  
                best = neighbor  
        if J(best) < J(theta):  
            return theta  
        theta = best  
    return theta
```

Obs.: Na prática, guardar em variáveis os valores de $J(\mathbf{x})$.

Escolha de Vizinhos

- Para problema contínuo, é comum adotar:

$$\theta'_i = \theta_i \pm \alpha$$

(cada vizinho soma/subtrai α em uma dimensão)

- Quando a dimensão do espaço é muito grande, escolhe-se dimensões aleatórias para expansão: *Stochastic Hill Climbing* (SHC).

Hill Climbing

- Muito dependente do chute inicial.
- É comum o uso com reinício aleatório.
 - Executa-se HC várias vezes com diferentes chutes iniciais.

Simulated Annealing

Simulated Annealing

- Português: têmpera simulada.
- Semelhante a *Hill Climbing*, mas permite transição para estados piores.
- Motivo: fuga de mínimos locais.
- Inspiração vem do processo de tempera da metalurgia (aquecimento seguido de resfriamento lento para tratamento de um metal).

Simulated Annealing

```
# Assuming maximization
def simulated_annealing(J, theta):
    while not check_stopping_condition():
        T = temperature_schedule(i)
        if T < 0.0:
            return theta
        neighbor = random_neighbor(theta)
        deltaE = J(neighbor) - J(theta)
        if deltaE > 0:
            theta = neighbor
        else:
            r = random_uniform(0.0, 1.0) # Draws random number w/ uniform dist.
            if r <= exp(deltaE / T):
                theta = neighbor
    return theta
```

Simulated Annealing

- Garantia matemática: se T diminui lentamente o suficiente, então sempre atinge o melhor estado.
- Garantia de pouca utilidade prática: “lentamente o suficiente” pode significar muito tempo.
- Exemplos de *schedule* de temperatura:

$$T_i = T_0 \beta^i$$

$$T_i = \frac{T_0}{1 + \beta i}$$

Busca Tabu

Busca Tabu

- Inglês: *Tabu Search*.
- Modificação no *Hill Climbing* em que se mantém uma lista de estados já visitados (lista tabu) para que se evite voltar a eles.
- Ajuda a evitar mínimos locais.
- Vai para melhor vizinho que não está na lista tabu, mesmo que piore.
- Mas guarda melhor até agora.

Busca Tabu

```
# Assuming maximization
def tabu_search(J, theta, max_tabu_len):
    previous_best = theta
    while not check_stopping_condition():
        current_best = None # J(None) = -inf
        for neighbor in neighbors(previous_best):
            if (not neighbor in tabu_list) and J(neighbor) > J(current_best):
                current_best = neighbor
        tabu_list.append(current_best)
        if J(current_best) > J(theta):
            theta = current_best
        if len(tabu_list) > max_tabu_len:
            tabu_list.remove_first() # tabu_list operates in a FIFO fashion
        previous_best = current_best
    return theta
```

Dicas Práticas para Robótica

Chute Inicial

- Como encontrar um bom chute inicial?
- Tentar resolver problema “simplificado”.
 - Ignorar efeitos da Física até ter solução analítica.
 - Ignorar “acoplamento” (e.g. resolver problema 2D primeiro).
 - Usar outra técnica (e.g. visibility graph e A* para chute inicial de caminho).
- Tentativa e erro (testar alguns valores).

Função de Custo

- Comumente, o $J(\cdot)$ em problemas de Robótica é estocástico (aleatório), i.e. $J(\boldsymbol{\theta})$ pode dar valores diferentes para o mesmo $\boldsymbol{\theta}$.
- Nesse caso, costuma-se avaliar $J(\boldsymbol{\theta})$ várias vezes e tomar uma media.
- A variância (“erro”) de $J(\boldsymbol{\theta})$ fica dividida por \sqrt{r} , em que r é o número de repetições.

Custo Computacional

- Tipicamente, em problemas de Robótica, o gargalo é o cálculo de $J(\cdot)$.
- Isso é principalmente verdade se $J(\cdot)$ envolver uma simulação.
- Simulações em geral são implementadas usando CPU, logo problema é *CPU bounded*.
- Por outro lado, otimização costuma ser muito paralelizável.
- Otimizações podem demorar alguns dias.

Para Saber Mais

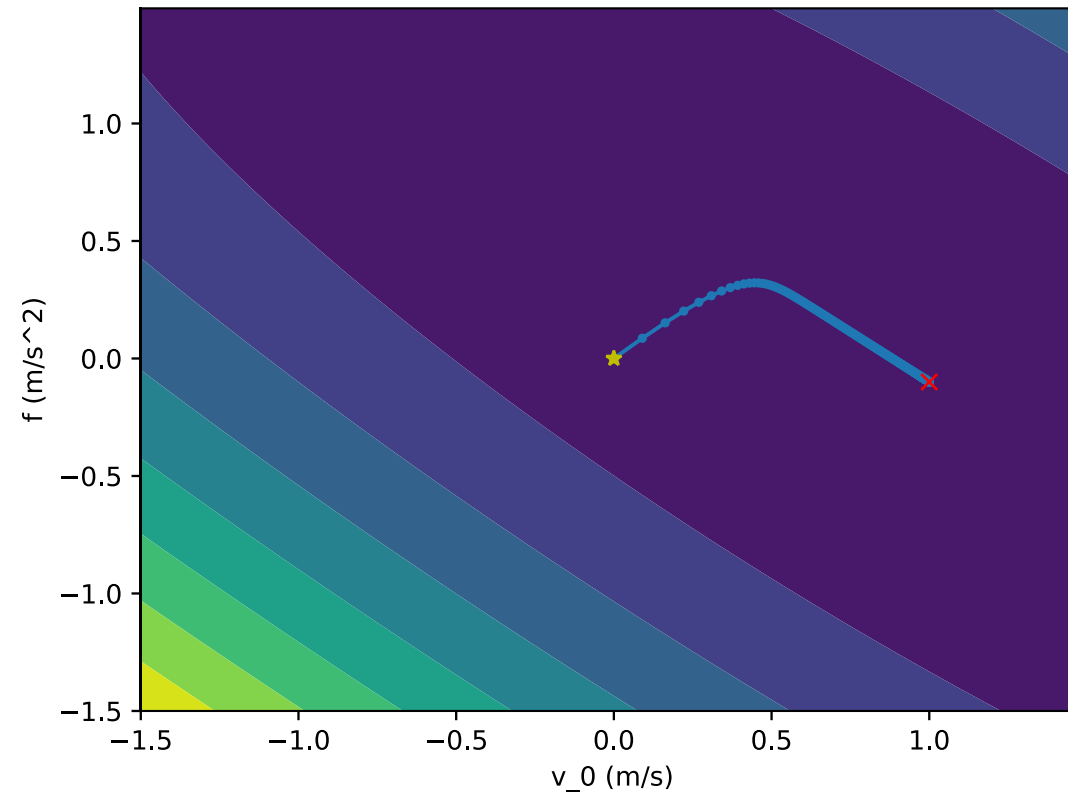
- Descida de Gradiente:
 - Capítulos 5 e 8 do livro *Deep Learning* de Goodfellow, Begin & Courville.
 - Primeiras duas aulas de Aprendizado Supervisionado 😊.
 - Cursos 1 e 2 da especialização de Deep Learning do Coursera (Andrew Ng).
- Hill Climbing e Simulated Annealing:
 - Capítulo NORVIG, Peter; RUSSELL, Stuart. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson, 2009.

Laboratório 3

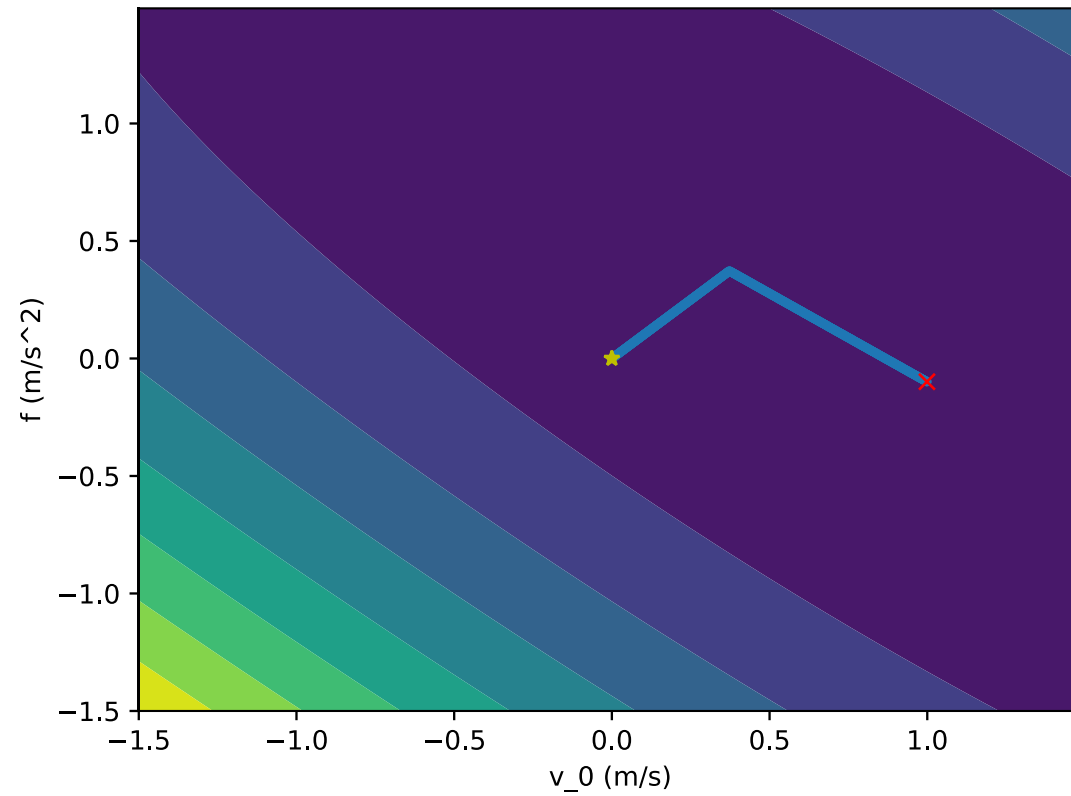
Laboratório 3

- Implementar algoritmos de otimização:
 - Descida do Gradiente.
 - *Hill Climbing*.
 - *Simulated Annealing*.
- Problema: regressão linear (achar v_0 e f no problema de *fit* da bola).
- Método dos Mínimos Quadrados já implementado (comparar solução).

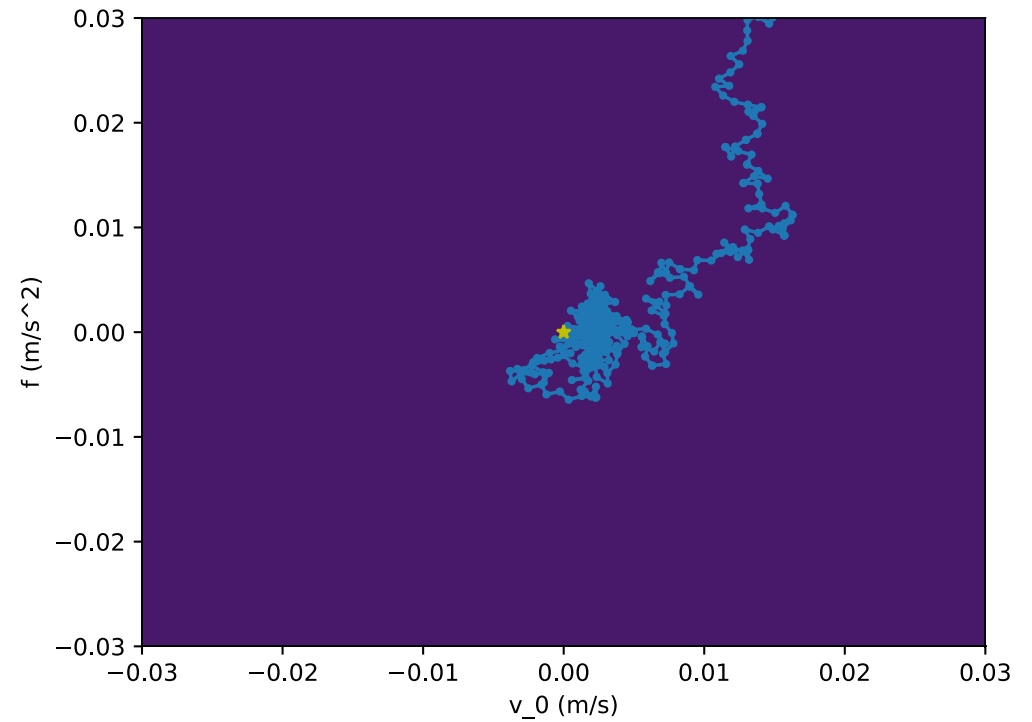
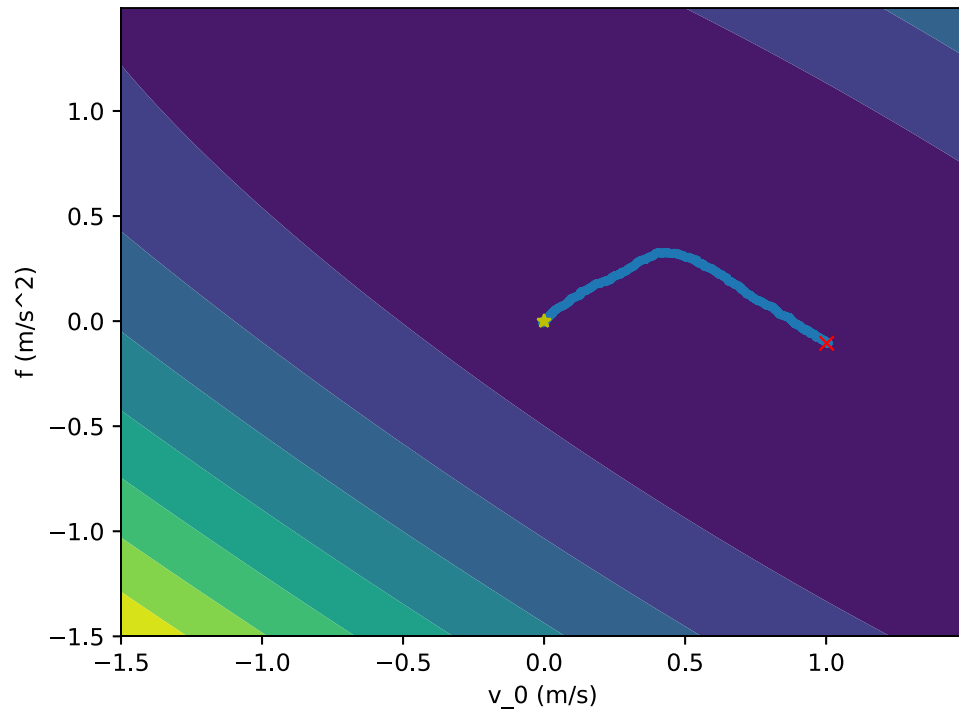
Descida do Gradiente



Hill Climbing



Simulated Annealing



Projeto do Exame

Projeto do Exame

- Técnica ou problema não apresentado no curso.
- Preferência em resolver problema de robótica ou agentes (e.g. jogos).
- Recomendação: resolver problema relacionado ao seu tema de pesquisa.
- Combinar tema com professor (pessoalmente, e-mail, WhatsApp) até 14/06 (sexta-feira da 16ª semana).

Projeto do Exame

- No máximo 3 alunos por grupo.
- No máximo 3 grupos com o mesmo tema.
- Avaliação depende do número de alunos por grupo.
- **Colocar grupo na planilha de grupos.**

https://docs.google.com/spreadsheets/d/10IZ8xPuMBTWGtb_UMqyOdJp-APcckxNZ7De55jo7WXc/edit?usp=sharing

- Relatório em formato de artigo.
- Template da IEEE:

<https://www.ieee.org/conferences/publishing/templates.html>

- Máximo de 8 páginas.

DATA SCIENCE CHALLENGE

Inscrições a partir de 28/02 • Submissões até 17/05 •

Apresentação dia 24/05 durante EEF 2019 •

Inscrição e regulamento em bit.ly/2XpPRQ1



A equipe vencedora receberá apoio financeiro para
participação no KDD-BR 2019 em Salvador/BA

Realização: **ENGINEERING
EDUCATION FOR THE FUTURE**
1ST EDITION • ITA, BRAZIL





V WORKSHOP

ITA ^{ndroids}



Venha conhecer nossos
projetos de robótica

Datas: 12/03 e 20/03

Horário: 15h - 17h

Local: Auditório Celso Renna

Prédio ELE/COMP



Virtual PYXIS



radix
Engenharia e Software

SOLIDWORKS



micropress

Altium



ITAEx

FHE
POUPEX

polimold

Lab C

