INSTITUTO FEDERAL
ESPIRITO SANTO

Robótica Móvel

Engenharia de Controle e Automação – 7º Período

PROF. LUCAS VAGO SANTANA
lucas@ifes.edu.br

INSTITUTO FEDERAL
ESPIRITO SANTO

Aula 03

- Robôs móveis de tração diferencial:
  - Modelagem
  - Simulação
  - Controle

Referências Bibliográficas

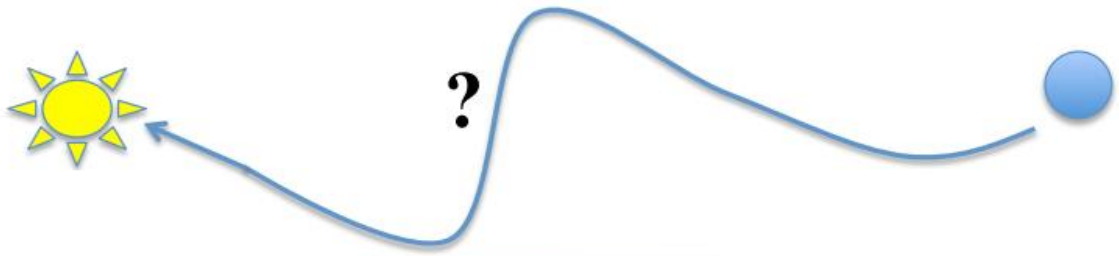
- EGERSTEDT, Magnus. Control of Mobile Robots. Georgia Institute of Technology – Coursera. 2013. Acesso em 28/02/2019.
- HELLSTRÖM, Thomas. Kinematics Equations for Differential Drive and Articulated Steering. Department of Computing Science. Umeå University . 2011. Acesso em 02/04/2019.
- SAKAI, Atsushi; et. al. PythonRobotics: a Python code collection of robotics algorithms. arXiv:1808.10703. 2018. Acesso em 02/04/2019.
- MALU, S. K.; MAJUMDAR, J. Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot. *Global Journal of Researches in Engineering: (H) Robotics & Nano-Tech*, USA, v. 14, n. 1, 2014. Acesso em 09/04/2019.
- OLSON, E. A Primer on Odometry and Motor Control. MIT. 2009. Acesso em 08/04/2019.
- CONDIT, R.; JONES, D. W. AN907 Stepping Motors Fundamentals – Applications Note – Microchip. Acesso em 15/04/2019.

INSTITUTO FEDERAL
ESPIRITO SANTO

Fundamentos de Navegação

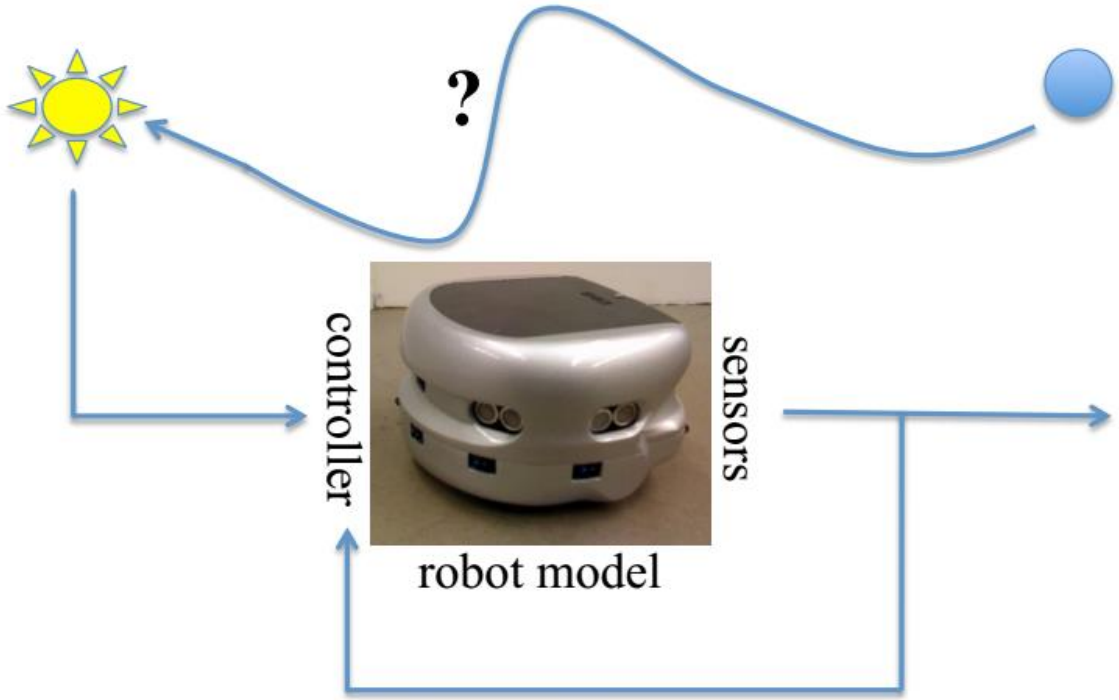
Navegação de Robôs Móveis

- O que é necessário para levar um robô móvel do ponto A até o B?



Navegação de Robôs Móveis

- Fundamentalmente, apenas 3 itens:



Navegação de Robôs Móveis

- Entretanto, os robôs operam em ambientes **dinâmicos**:
  - Casas;
  - Laboratórios;
  - Indústrias;
  - Florestas;
  - Mar;
  - Etc ...
- E seus controladores devem responder a possíveis **mudanças** no **ambiente**;

Navegação de Robôs Móveis

- Projetar um único controlador que realize todas as tarefas de um robô é inviável;
- É mais comum **dividir** o problema de controle em diferentes **comportamentos**:
  - `Ir de um ponto a outro;`
  - `Evitar obstáculos;`
  - `Seguir parede;`
  - `Rastrear um alvo;`
  - `...`
- E implementar controladores diferentes para cada caso.

Navegação de Robôs Móveis

- Vídeo contendo exemplo de controle baseado em comportamentos:
  - *Behavior based robot design software progress - rectangle bot*
  - https://www.youtube.com/watch?v=e2Ag9PaM8NU
  - Acesso em 01/04/2019

INSTITUTO FEDERAL
ESPIRITO SANTO

Modelagem e Simulação

Robôs de Tração Diferencial

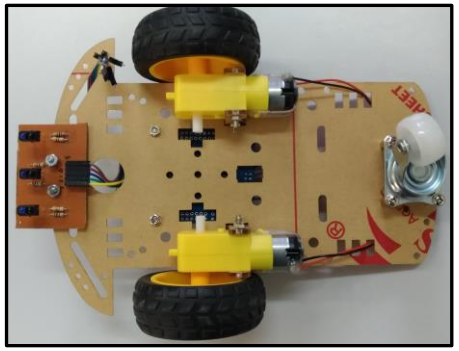
- Arquitetura extremamente comum:

Khepera

E-puck

Roomba

Pioneer

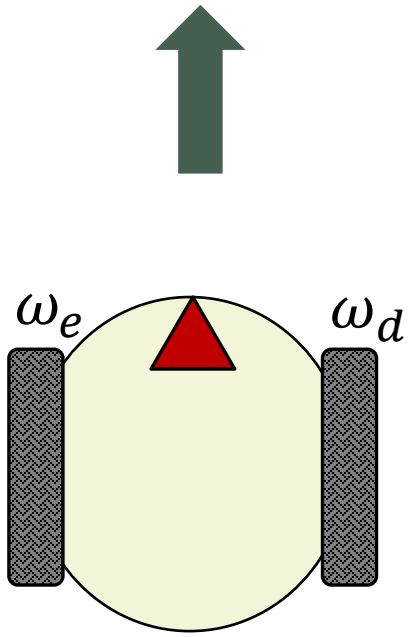


Kits para Arduino/Raspberry Pi

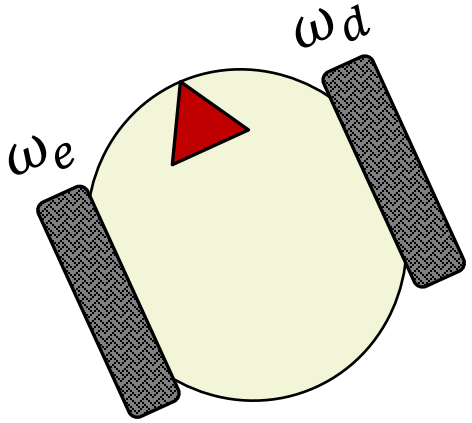
Robôs de Tração Diferencial

- Princípio de funcionamento:

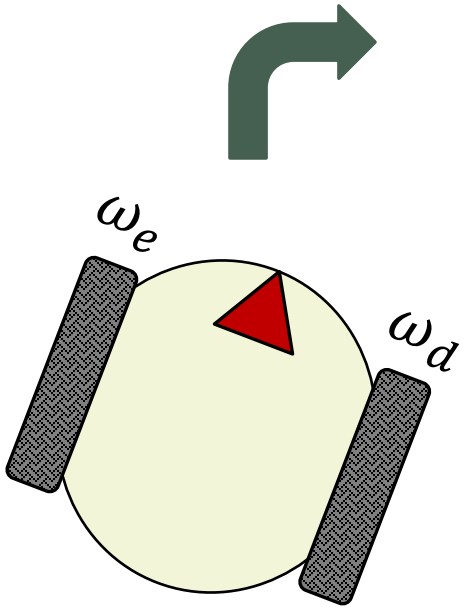
ω_e - velocidade angular da roda esquerda [rad/s]
ω_d - velocidade angular da roda direita [rad/s]



$\omega_e = \omega_d$



$\omega_e < \omega_d$

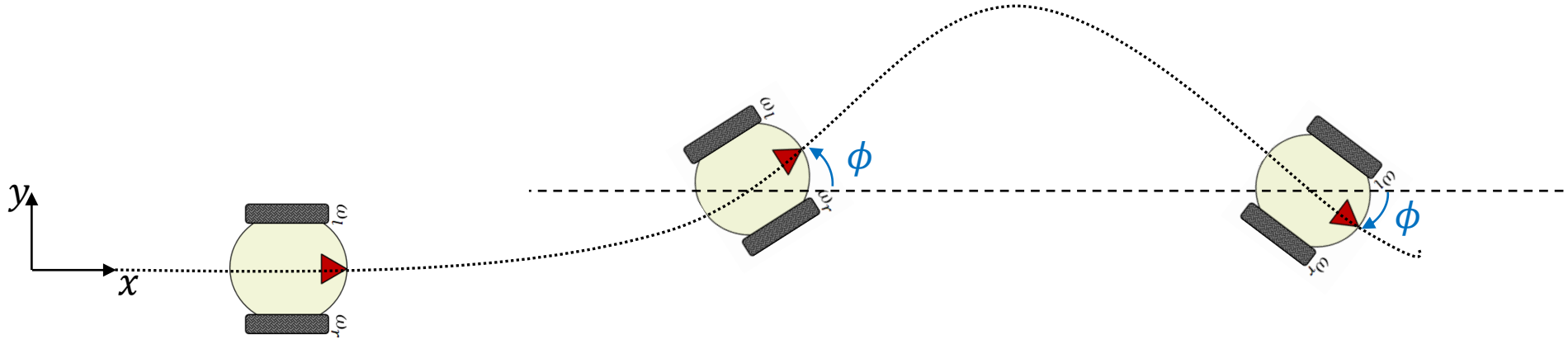


$\omega_e > \omega_d$

Robôs de Tração Diferencial

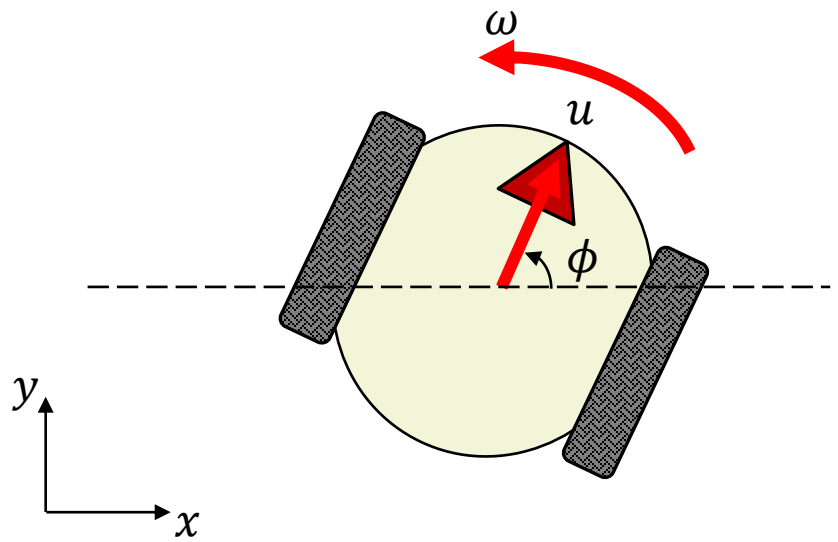
- O que significa controlar um robô deste tipo?
- Significa alcançar **poses desejadas** no espaço bidimensional;

$$p_d = [x_d \quad y_d \quad \phi_d]^T$$



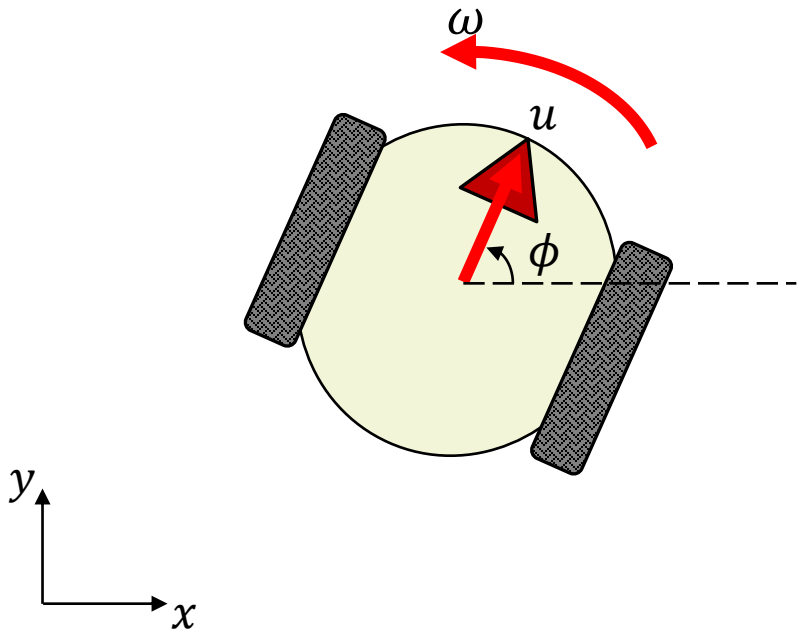
Robôs de Tração Diferencial

- **PROBLEMA:** pensar no movimento cartesiano do robô a partir das velocidades angulares das rodas, **não é intuitivo**;
- **SOLUÇÃO:** Para fins de controle, utiliza-se um modelo simplificado denominado **uniciclo**;
- Nele, considera-se que os estados do robô são controlados pelas velocidades:
  - u – velocidade linear do robô na direção do nariz;
  - ω – velocidade angular do robô em torno de seu próprio eixo;



Robôs de Tração Diferencial

- Equações do uniciclo:



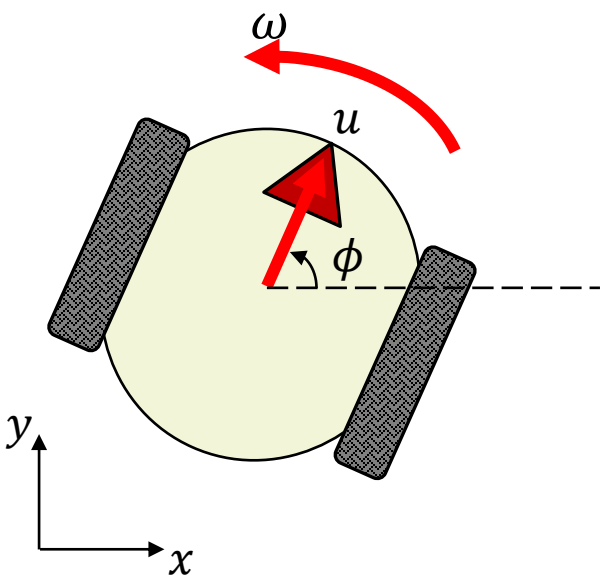
Modelo Uniciclo:

$$\begin{cases} \dot{x} = u\,cos\phi \\ \dot{y} = u\,sin\phi \\ \dot{\phi} = \omega \end{cases}$$

Robôs de Tração Diferencial

- O projeto de controladores consiste em selecionar os sinais u e ω para alcançar $p_d = [x_d \quad y_d \quad \phi_d]^T$, observando que:
  - A relação de $\dot{x}$ e $\dot{y}$ com u não é linear;
  - A relação de $\dot{\phi}$ com ω é linear;
  - Há relação entre ϕ, $\dot{x}$ e $\dot{y}$;
  - Há relação entre u, $\dot{x}$ e $\dot{y}$;
- Características que impactam na escolha da técnica de projeto adequada;

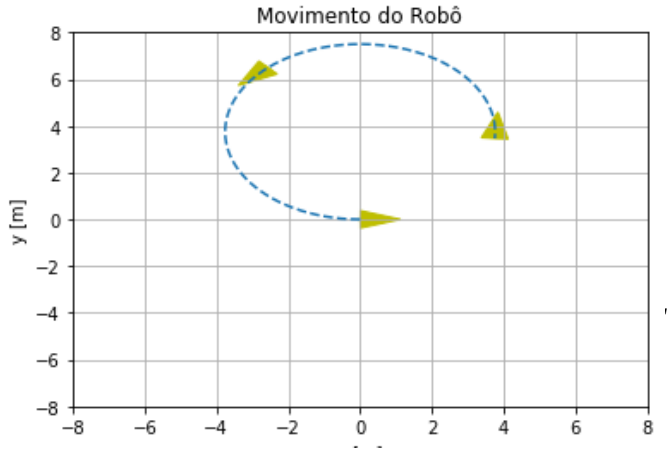
$$\begin{cases} \dot{x} = u\,cos\phi \\ \dot{y} = u\,sin\phi \\ \dot{\phi} = \omega \end{cases}$$



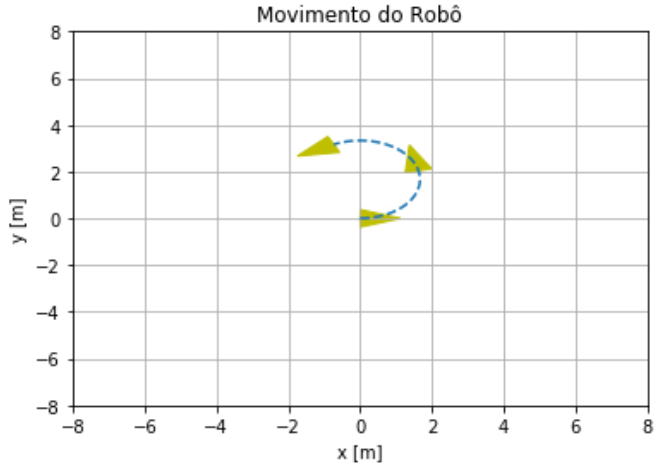
Exercício de Simulação 01

- Acesse o código deste exemplo no *Jupyter Notebook* disponível em:
  - https://colab.research.google.com/drive/1fVVJQpLPFO5DZ0LfDT2f4Zc34JQDNWtT
  - Siga as instruções;

R: [

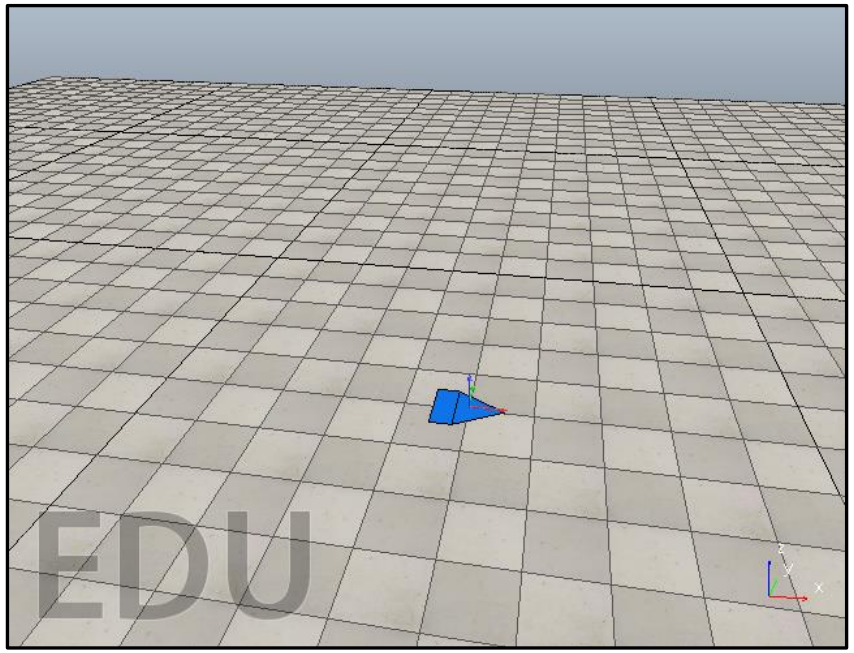


R:



Exercício de Simulação 02 – CoppeliaSim (V-REP)

- Acesse os arquivos da pasta `aula03-ex02` contendo o modelo de uma simulação do Uniciclo usando V-REP e API Remota para Python;
- Rode o código e compreenda seu funcionamento;
- Modifique-o para frear o robô depois de 60 segundos de simulação;
- Compare o movimento executado com do Exercício de Simulação 02, cujos parâmetros de controle na simulação foram:
  - $v = -0.3\ m/s$
  - $\omega = -0.08\ rad/s$

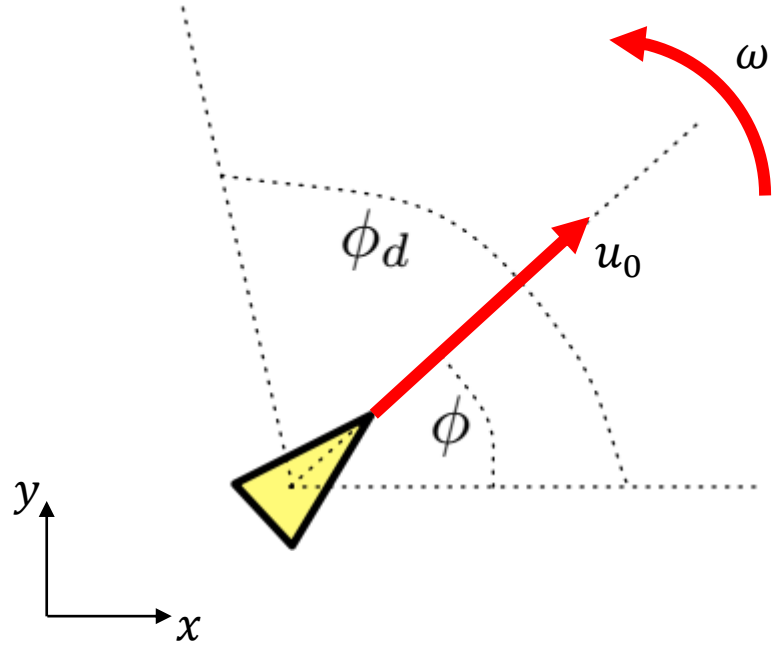


Controle de Orientação (*Heading*)

Controle de Orientação (Heading)

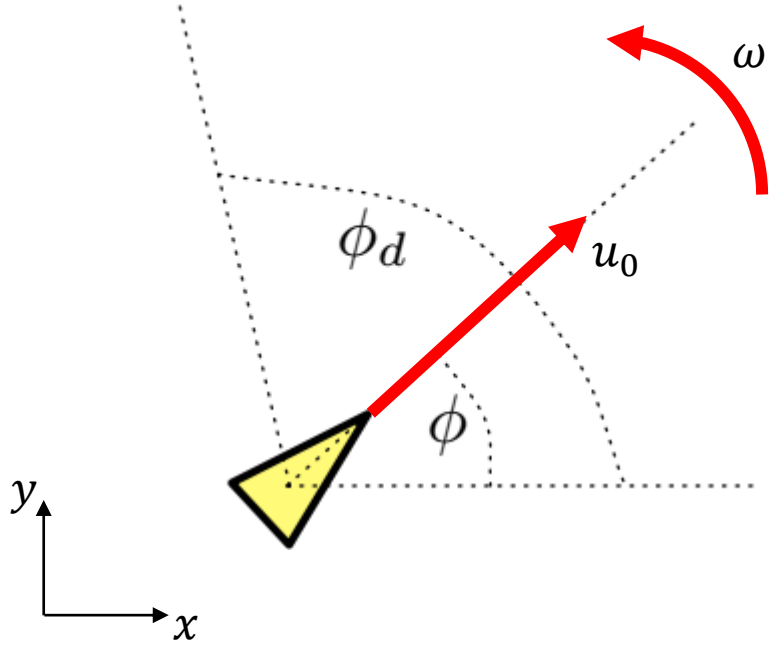
- Suponha o veículo navegando a uma **velocidade linear** constante qualquer $u = u_0$.
- Qual **sinal de controle** ω leva o robô de sua orientação atual (ϕ) para uma orientação desejada (ϕ_d)?

$$\begin{cases} \dot{x} = u_0 \cos\phi \\ \dot{y} = u_0 \sin\phi \\ \dot{\phi} = \omega \end{cases}$$



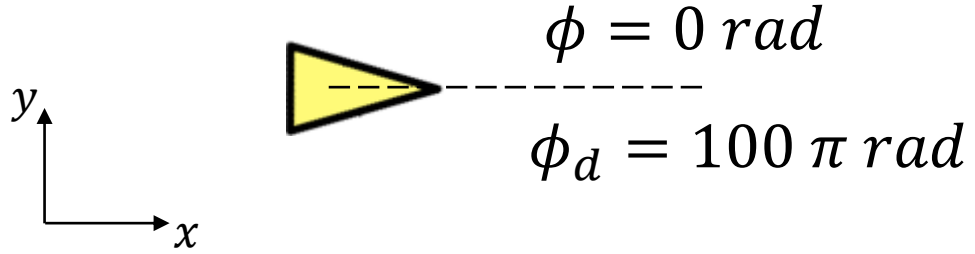
Controle de Orientação (*Heading*)

- Observe que neste problema existe:
  - Uma referência de ângulo desejada: ϕ_d;
  - Um modelo linear: $\dot{\phi} = \omega$;
- Pode-se escrever: $e = \phi_d - \phi$;
- O que implica em: $\omega = k_p e + k_i \int e d\tau + k_d \dot{e}$
- Será que isso funciona?



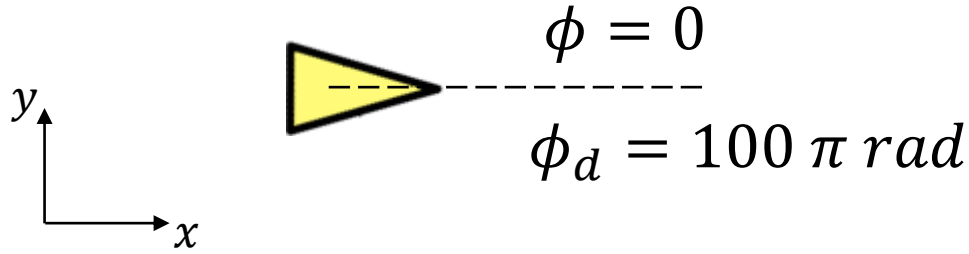
Controle de Orientação (*Heading*)

- **Sim**, desde que os sinais, que são **ângulos**, sejam tratados;
- Suponha um **caso particular**:
  - $\phi = 0\, rad$;
  - $\phi_d = 100\, \pi\, rad$;
- Seria correto usar no controlador um erro:
  - $e = \phi_d - \phi = 100\, \pi\, rad$?
- Não é adequado, pois:
  - $100\, \pi\, rad\ = 0\, rad$;
  - Logo o sinal de erro deveria ser $e = 0\, rad$;



Controle de Orientação (*Heading*)

- Solução:
  - **Garantir** que todos os sinais de controle que sejam **dependentes de ângulos** pertençam ao domínio $[-\pi, +\pi]$;
  - No caso deste exemplo, garantir que: $\boxed{e \in [-\pi\ , +\pi]}$
  - Há um truque computacional para este fim, realizado através da função matemática **arco tangente**;



Controle de Orientação (*Heading*)

- Dado um sinal angular qualquer α, sua tangente é definida como:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$$

- Aplicando o **arco tangente**, em ambos os lados dessa igualdade resta:

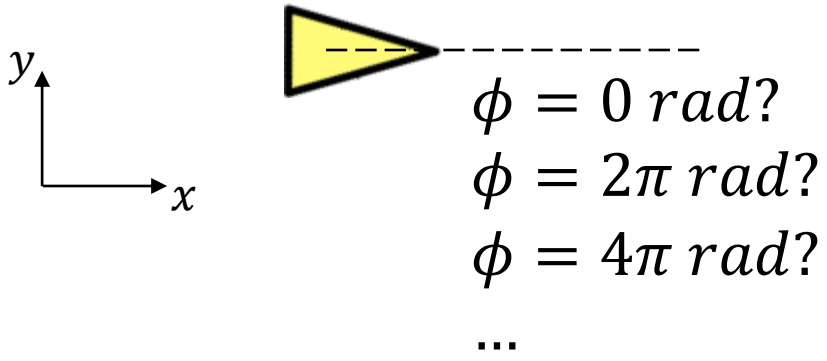
$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}\right)$$

- Nas linguagens de programação, o comando arco tangente de dois argumentos (*atan2*) devolve sinais no domínio desejado;
- Logo ele pode ser usado para implementar a equação acima:

Linguagem	Código Fonte
C/C++	$\alpha_c = atan2(\sin(\alpha), \cos(\alpha))$
Python	$\alpha_c = np.arctan2(np.\sin(\alpha), np.\cos(\alpha))$
Matlab/Octave	$\alpha_c = atan2(\sin(\alpha), \cos(\alpha))$

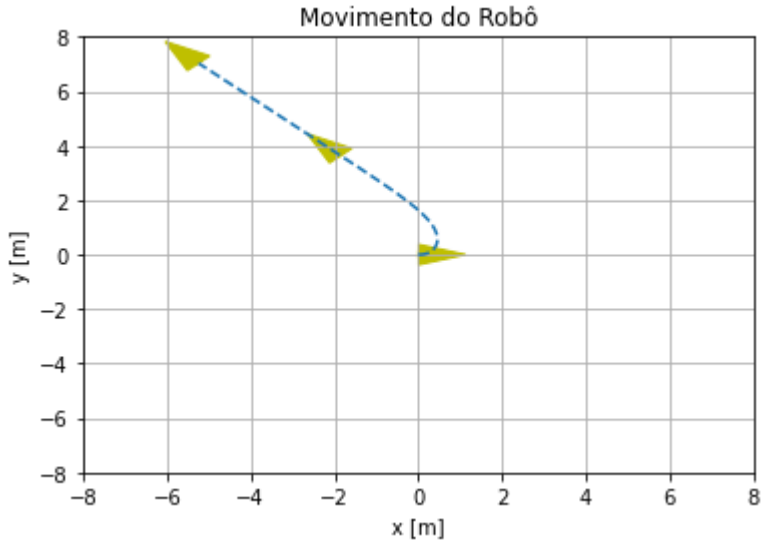
Exercício de Simulação 03

- Acesse o código deste exemplo no *Jupyter Notebook* disponível em:
  - https://colab.research.google.com/drive/1zFMxQIqcfz9VA3Ve2sBh6_5UwzAkxtNF
  - Siga as instruções;



Exercício de Simulação 04

- Acesse o código deste exemplo no *Jupyter Notebook* disponível em:
  - https://colab.research.google.com/drive/1zFMxQIqcfz9VA3Ve2sBh6_5UwzAkxtNF
  - Siga as instruções;

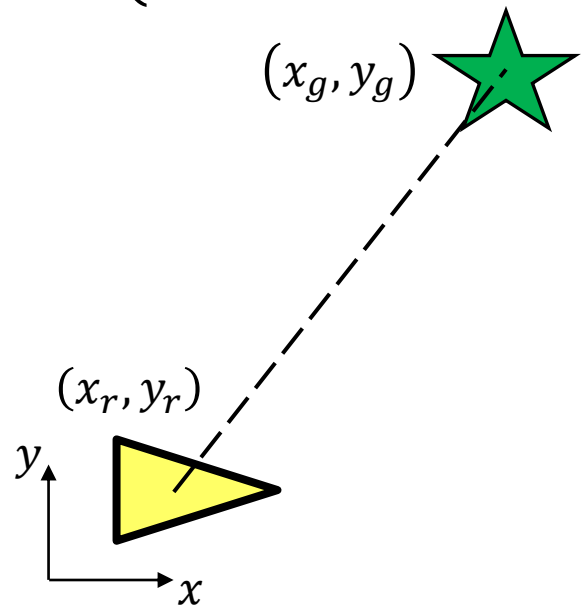


Controle de Posição (*Goal-to-Goal*)

Controle de Posição (*Goal-to-Goal*)

- Como gerar o comportamento de ir até um ponto?

$$\begin{cases} \dot{x} = u\,cos\phi \\ \dot{y} = u\,sin\phi \\ \dot{\phi} = \omega \end{cases}$$



Controle de Posição (*Goal-to-Goal*)

- Uma solução intuitiva consiste em:
  - Estipular uma velocidade linear de avanço $u = u_0$;
  - A cada iteração, calcular uma nova orientação desejada ϕ_d como:

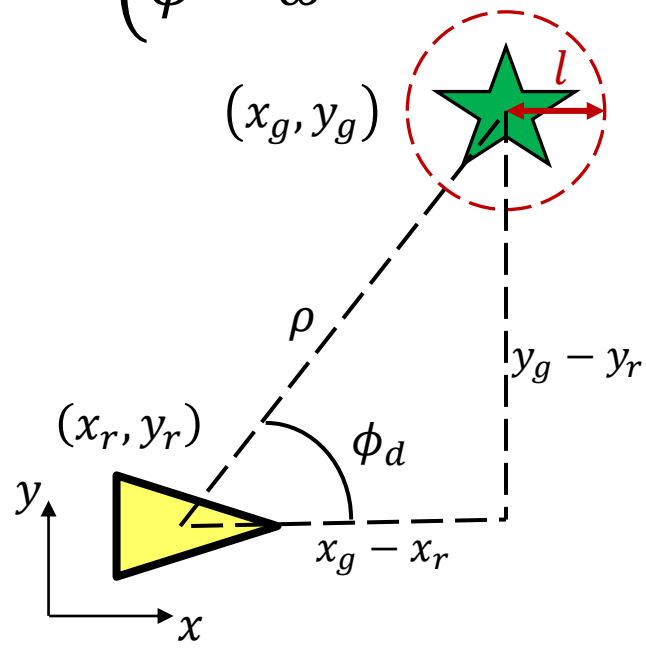
$$\phi_d = \text{tg}^{-1}\left(\frac{y_g - y_r}{x_g - x_r}\right)$$

  - Usar ϕ_d para executar o controle de *heading*;
  - Parar o robô assim que ele adentrar uma região de raio l, no entorno do destino;
  - Como regra, pode-se utilizar :

Calcular: $\rho = \sqrt{(x_g - x_r)^2 + (y_g - y_r)^2}$

Testar: Se $\rho < l$, então: $u = 0$ e $\omega = 0$

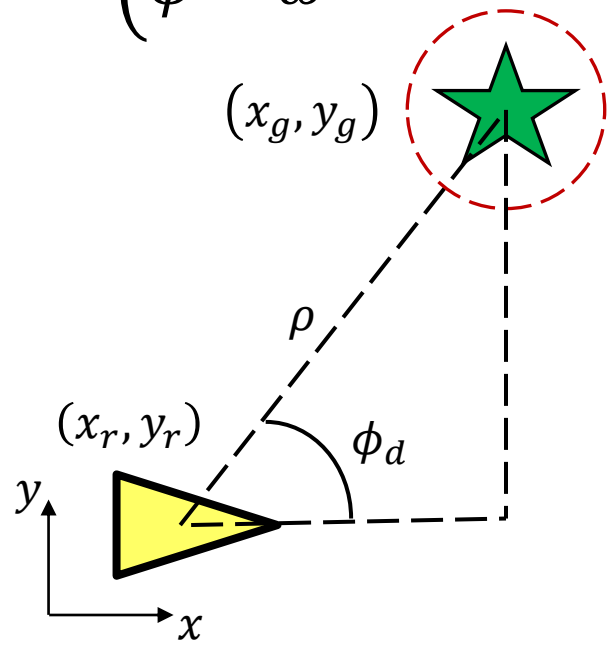
$$\begin{cases} \dot{x} = u\,cos\phi \\ \dot{y} = u\,sin\phi \\ \dot{\phi} = \omega \end{cases}$$



Controle de Posição (*Goal-to-Goal*)

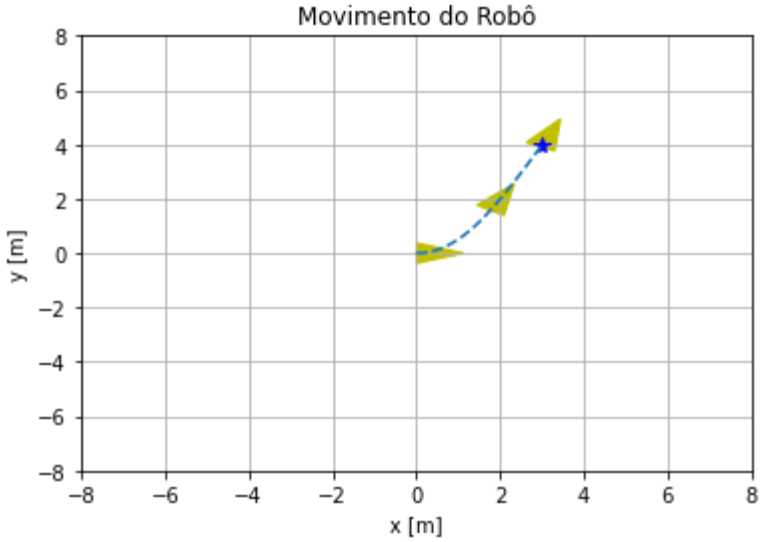
- Observações sobre este método:
  - Não há garantia da orientação final do robô;
  - Não há garantias de convergência se os parâmetros estiveram mal ajustados;

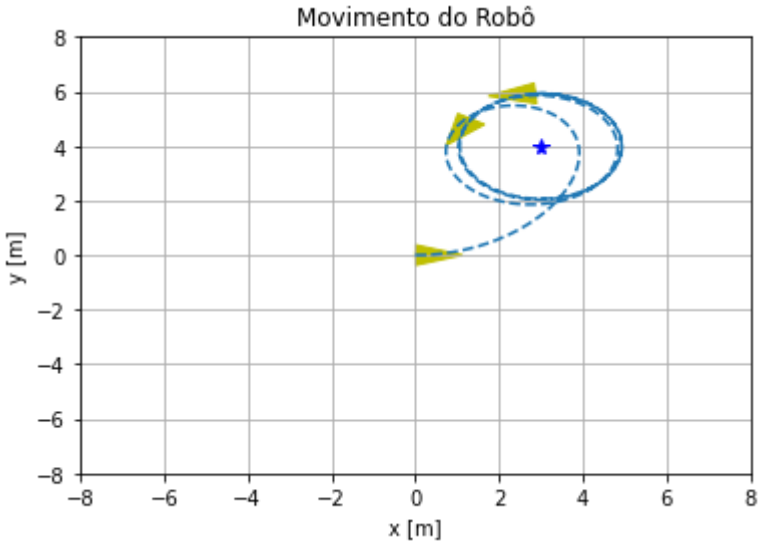
$$\begin{cases} \dot{x} = u\,cos\phi \\ \dot{y} = u\,sin\phi \\ \dot{\phi} = \omega \end{cases}$$



Exercício de Simulação 05

- Acesse o código deste exemplo no *Jupyter Notebook* disponível em:
  - https://colab.research.google.com/drive/1HpXpySzeUxecNDSimdd8NQdC8Y4yX3mK
  - Siga as instruções;





Exercício de Simulação 06 – CoppeliaSim (V-REP)

- Acesse os arquivos da pasta `aula03-ex06` contendo o modelo de uma simulação do Uniciclo com controle *Goal-to-Goal* usando V-REP e API Remota para Python;
- Modifique o código para que o robô alcance o alvo;
- Movimente o alvo na cena e perceba o comportamento do uniciclo.