

Sistemas Embarcados e Computação Ubíqua

Luciano Bertini Alessandro Copetti

ICT – RCM – UFF
Instituto de Ciência e Tecnologia
Departamento de Computação
Universidade Federal Fluminense

2018

Sumário

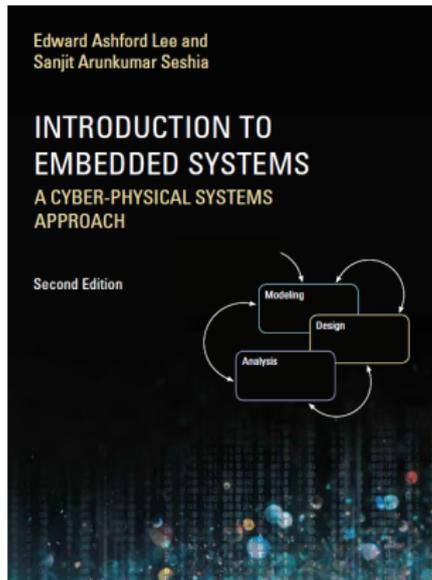
- 1 Introdução
 - Definição de Sistemas Embarcados
 - Exemplos
- 2 Sistemas Contínuos
 - Sistemas de Tempo Contínuo
 - Mecânica Newtoniana
 - Atores de modelo
 - Propriedades dos Sistemas Embarcados
 - Controle Realimentado

Sumário

- 1 Introdução
 - Definição de Sistemas Embarcados
 - Exemplos
- 2 Sistemas Contínuos
 - Sistemas de Tempo Contínuo
 - Mecânica Newtoniana
 - Atores de modelo
 - Propriedades dos Sistemas Embarcados
 - Controle Realimentado

Introdução

Livro:
Edward A. Lee and Sanjit A. Seshia, Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition, MIT Press, ISBN 978-0-262-53381-2, 2017. <http://leeseshia.org>



Introdução

- O uso tradicional de computadores e softwares é a computação visível.
- Ex.: preparar apresentações com powerpoint, busca de informações na Internet, uso de e-mail, etc.
- Entretanto, a grande maioria dos computadores em uso são invisíveis.
- Ex.: nos freios, cintos de segurança e sistema de som de um carro; na codificação da voz e envio de um celular para a estação base; em um forno microondas; impressoras; ar condicionado; projetores multimídia; em robôs industriais; etc.
- Ver utros exemplos no livro (prefácio)

Introdução

- Tais computadores menos visíveis são chamados **sistemas embarcados** e o software que executa neles é chamado **software embarcado**
- Está relacionado com **Computação Ubíqua** que traz o conceito de computação invisível
- A computação pode aparecer em qualquer lugar, a qualquer momento e em qualquer dispositivo
- Recentemente surgiu o termo **cyber-physical systems (CPS)**

Introdução

- Sistemas embarcados existem desde 1970, porém por muito tempo a única preocupação de projeto era otimizar para a falta de recursos de memória, energia, processamento, etc.
- O termo CPS surgiu ao se entender que o desafio em sistemas embarcados é a sua interação com o processo físico, e não a questão dos recursos limitados
- Em um CPS, computadores embarcados monitoram e controlam processos físicos, geralmente usando controle realimentado.

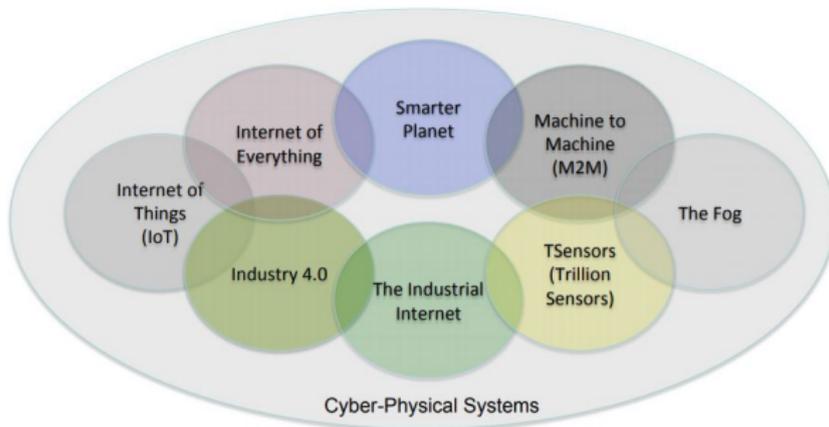
Introdução

Diferenças entre CPS e a computação comum:

- *performance vs correctness* (correção temporal)
- CPS são sistemas de tempo real
- CPS são sistemas altamente concorrentes
- A computação comum está fortemente enraizada na execução serializada
- Processos físicos são uma composição de muitos outros processos simultâneos.

Introdução

Por que estudar sistemas embarcados?
A tendência hoje é de uma tecnologia que profundamente conecta o mundo físico com o mundo de informações. Há vários nomes para isso:



Introdução

- O desenvolvimento de sistemas embarcados requer o uso de múltiplas tecnologias, geralmente de baixo nível. Ex.: interrupções, timers, conversores A/D e D/A, interfaces de comunicação, etc
- Entretanto, a abordagem deste curso não é dominar todas essas tecnologias
- Em vez disso, vamos focar em como modelar e projetar a dinâmica conjunta do software, rede e sistema físico

Introdução

- O foco é na relação do software e do hardware com o ambiente físico no qual eles operam
- Isso requer a modelagem explícita da dinâmica temporal e a especificação das propriedades intrínsecas de concorrência do sistema
- Então foram citadas duas vertentes importantes: modelagem (foco principal) e projeto (tecnologias).
- Existe ainda uma terceira igualmente importante no processo completo de concepção de sistemas embarcados: análise.

Introdução

Exemplo 1: Cirurgia robótica do coração batendo.

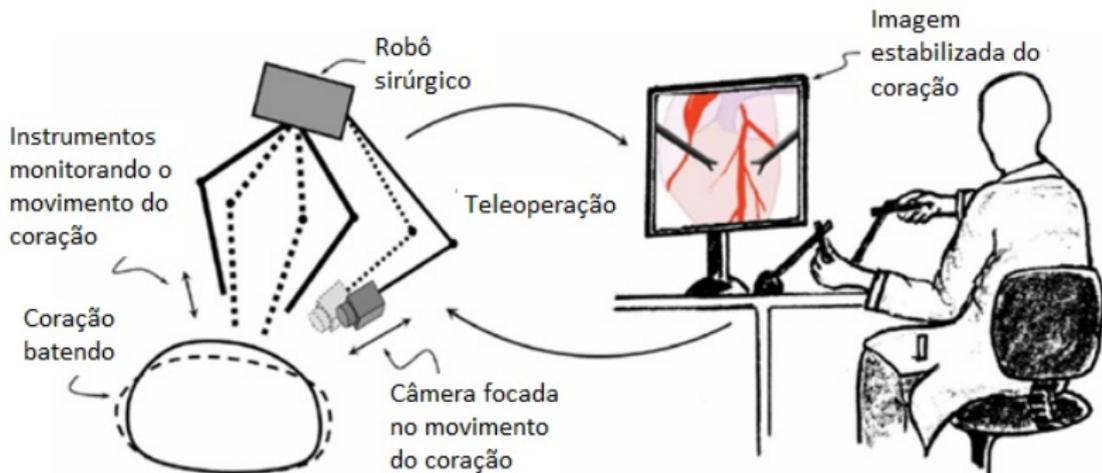


Imagem: <http://engineering.case.edu/groups/iri/BeatingHeart>

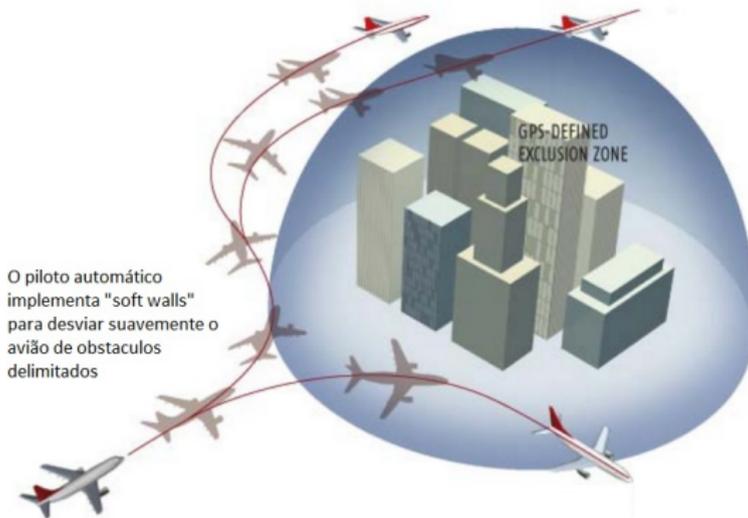
Introdução

Exemplo 2: Sistema colaborativo de semáforos nas cidades inteligentes



Introdução

Exemplo 3: Controle automático de controle de voo



Introdução

Exemplo 4: Serviço de alta velocidade de impressão sob demanda

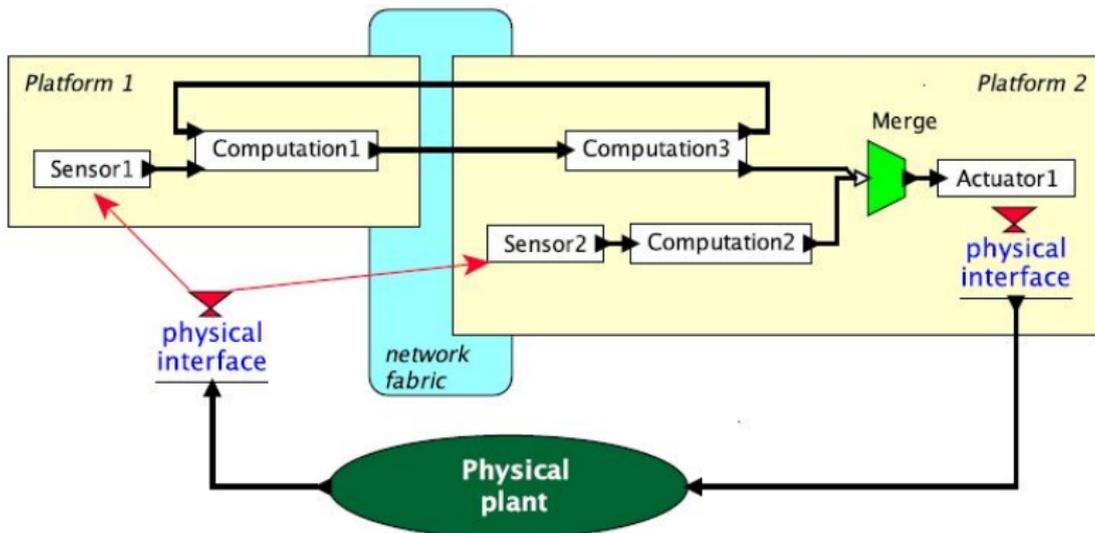


On-Demand Book Printing With the Océ ColorStream <https://www.youtube.com/watch?v=1JJ5HfVQEyM>

Oce JetStream 2200 <https://www.youtube.com/watch?v=52SU28kfdss>

Introdução

Estrutura de um sistema ciber-físico



Introdução

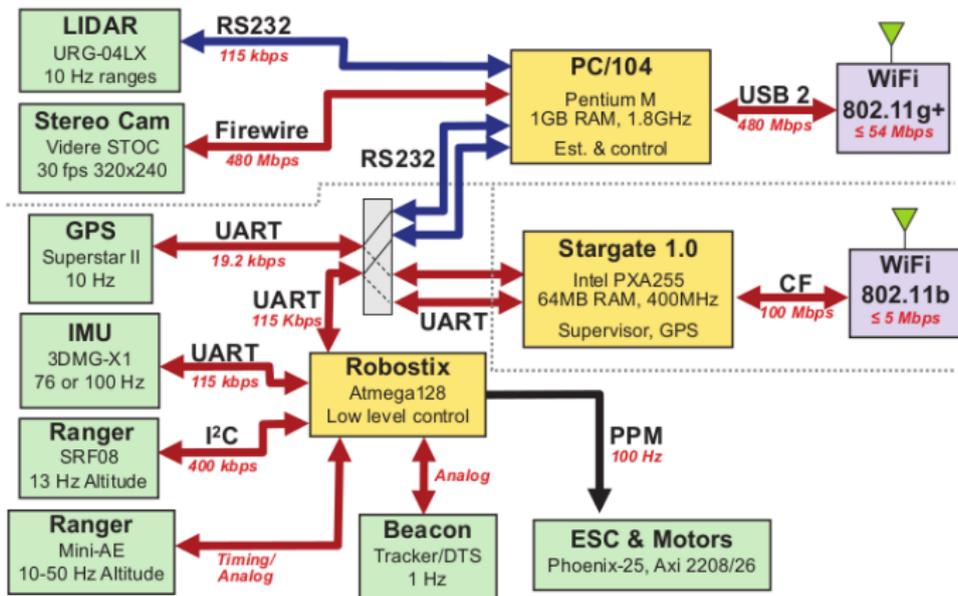
Um exemplo de sistema embarcado complexo:
Stanford Testbed of Autonomous Rotorcraft for Multi
Agent Control (STARMAC)



Exemplos

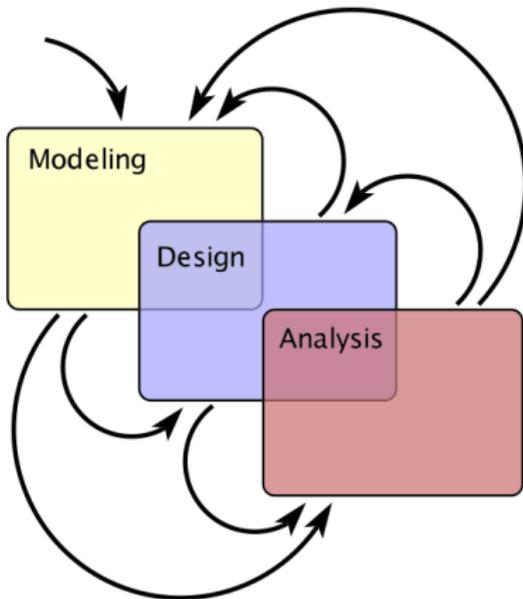
Introdução

Projeto:



Introdução

A concepção de sistemas embarcados consiste de três processos: modelagem, projeto e análise.



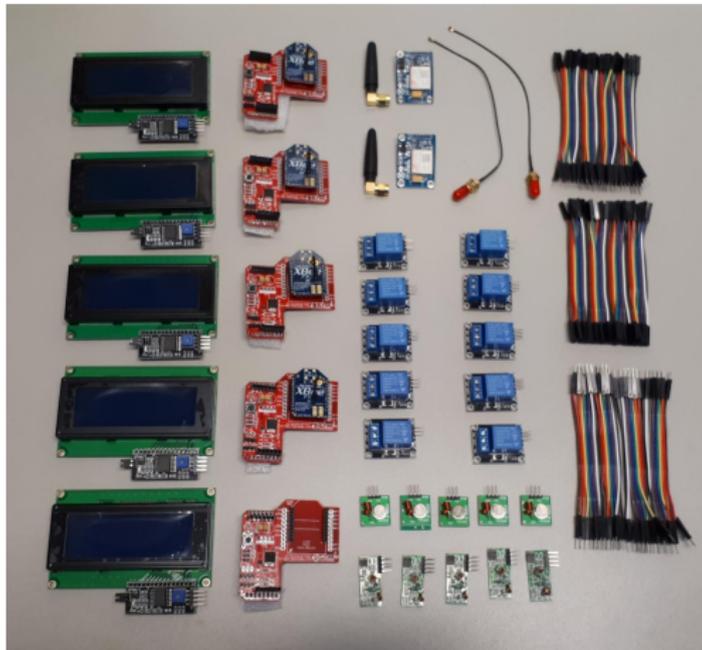
Introdução

- **Modelar** é o processo de se ganhar um entendimento aprofundado de um sistema através da imitação. Os modelos expressam O QUE um sistema faz ou deve fazer.
- **Projetar** é a criação estruturada de artefatos. Especifica COMO o sistema faz o que ele faz.
- **Analisar** é o processo de se ganhar um entendimento aprofundado de um sistema através da dissecação. Especifica PORQUE o sistema faz o que ele faz (ou falha em fazer aquilo que o modelo diz que ele faria)

Exemplos

Introdução

Alguns componentes:



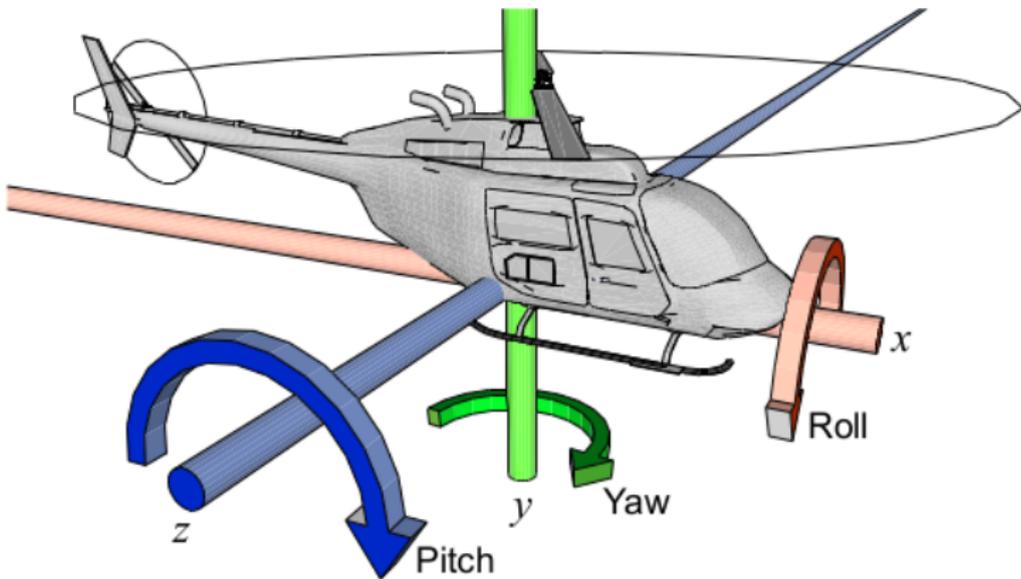
Sumário

- 1 Introdução
 - Definição de Sistemas Embarcados
 - Exemplos
- 2 Sistemas Contínuos
 - Sistemas de Tempo Contínuo
 - Mecânica Newtoniana
 - Atores de modelo
 - Propriedades dos Sistemas Embarcados
 - Controle Realimentado

Sistemas de Tempo Contínuo

- Quase sempre os sistemas Ciber-Físicos precisam da modelagem no tempo contínuo usando a teoria da mecânica clássica
- Movimento no espaço de objetos físicos pode ser representado com seis graus de liberdade
- Três representam a posição no espaço tridimensional e três representam orientação no espaço
- x , y , z , Roll, Yall, Pitch

Sistemas de Tempo Contínuo



Sistemas de Tempo Contínuo

- A posição de um objeto no espaço, portanto, é representada por seis funções da forma $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$: **sinais de tempo contínuo**.
- Mudanças de posição ou orientação são regidas pela segunda lei de Newton:

$$\mathbf{F}(t) = M\ddot{\mathbf{x}}(t) \quad (1)$$

- onde \mathbf{F} é o vetor de força em três direções, M é a massa do objeto e $\ddot{\mathbf{x}}$ é a segunda derivada de \mathbf{x} em relação ao tempo (ou seja, a aceleração)

Sistemas de Tempo Contínuo

- A velocidade é a integral da aceleração:

$$\forall t > 0, \dot{\mathbf{x}}(t) = \dot{\mathbf{x}}(0) + \int_0^t \ddot{\mathbf{x}}(\tau) d\tau \quad (2)$$

- onde $\dot{\mathbf{x}}(0)$ é a velocidade inicial em três direções. Usando (1), isso se torna:

$$\forall t > 0, \dot{\mathbf{x}}(t) = \dot{\mathbf{x}}(0) + \frac{1}{M} \int_0^t \mathbf{F}(\tau) d\tau \quad (3)$$

- A posição é a integral da velocidade:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \mathbf{x}(0) + \int_0^t \dot{\mathbf{x}}(\tau) d\tau \\ &= \mathbf{x}(0) + t\dot{\mathbf{x}}(0) + \frac{1}{M} \int_0^t \int_0^\tau \mathbf{F}(\alpha) d\alpha d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

Sistemas de Tempo Contínuo

- As versões dessas equações de movimento que afetam a orientação usam o **torque**, a versão rotacional da força.
- É novamente um vetor de três elementos como uma função do tempo, representando a força de rotação em um objeto.
- Pode ser relacionado à velocidade angular de maneira semelhante à Equação 1:

$$\mathbf{T}(t) = \frac{d}{dt} \left(\mathbf{I}(t)\dot{\theta}(t) \right) \quad (5)$$

Sistemas de Tempo Contínuo

- onde T é o vetor de torque em três eixos e $I(t)$ é o tensor **momento de inércia** do objeto.
- O momento de inércia é uma matriz 3×3 que depende da geometria e orientação do objeto.
- Representa a relutância de um objeto girar em torno de qualquer eixo
- Se o objeto é esférico, por exemplo, essa relutância é a mesma em torno de todos os eixos, de modo que ela se reduz a um escalar constante I
- Ou, equivalentemente, a uma matriz diagonal I com elementos diagonais iguais a I

Sistemas de Tempo Contínuo

- A equação então fica muito mais parecida com Equação 1:

$$\mathbf{T}(t) = I\ddot{\theta}(t) \quad (6)$$

- Para ser explícito sobre as três dimensões, podemos escrever (5) como:

$$\begin{bmatrix} T_x(t) \\ T_y(t) \\ T_z(t) \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} I_{xx}(t) & I_{xy}(t) & I_{xz}(t) \\ I_{yx}(t) & I_{yy}(t) & I_{yz}(t) \\ I_{zx}(t) & I_{zy}(t) & I_{zz}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_x(t) \\ \dot{\theta}_y(t) \\ \dot{\theta}_z(t) \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

$T_y(t)$ é o torque no eixo y e $I_{yx}(t)$ é a inércia do eixo x em relação ao torque em torno do eixo y .

Sistemas de Tempo Contínuo

- A vel. rotacional é a integral da aceleração:

$$\dot{\theta}(t) = \dot{\theta}(0) + \int_0^t \ddot{\theta}(\tau) d\tau \quad (8)$$

- onde $\dot{\theta}(0)$ é a velocidade rotacional inicial em três direções. Usando (6), isso se torna (esfera):

$$\dot{\theta}(t) = \dot{\theta}(0) + \frac{1}{I} \int_0^t \mathbf{T}(\tau) d\tau \quad (9)$$

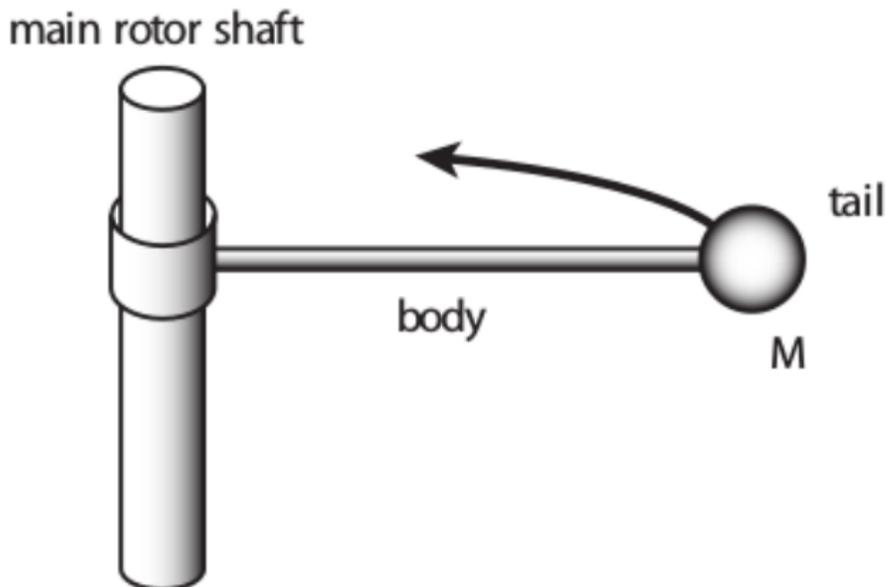
- A orientação é a integral da vel. rotacional:

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \theta(0) + \int_0^t \dot{\theta}(\tau) d\tau \\ &= \theta(0) + t\dot{\theta}(0) + \frac{1}{I} \int_0^t \int_0^\tau \mathbf{T}(\alpha) d\alpha d\tau \end{aligned} \quad (10)$$

Sistemas de Tempo Contínuo

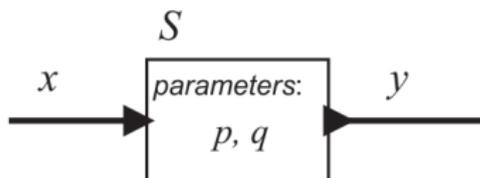
- onde $\theta(0)$ é a orientação inicial.
- Usando estas equações, conhecendo-se as condições de contorno e os torques no objeto, pode-se determinar a orientação, a aceleração e a velocidade rotacionais
- Muitas vezes, como fizemos para um objeto esférico, podemos simplificar reduzindo o número de dimensões consideradas, o que é chamado de **redução de ordem do modelo**.

Sistemas de Tempo Contínuo



Sistemas de Tempo Contínuo

- A modelagem como foi apresentada está baseada na **Mecânica Newtoniana**
- Uma técnica comumente utilizada para modelagem de sistemas de tempo contínuo é a representação por blocos atores de modelagem
- os **atores de modelagem** são caixas com uma porta de entrada e outra de saída:



Sistemas de Tempo Contínuo

- Outras Propriedades dos Sistemas:
 - **Causalidade** – um sistema é causal se sua saída depende apenas de entradas atuais e passadas
 - **Sistemas memoryless** – Um sistema tem memória se a saída depender não apenas das entradas atuais, mas também de entradas passadas (ou das entradas futuras, se o sistema não for causal)
 - **Linearidade e invariância no tempo** – sistemas com propriedades matemáticas que facilitam a modelagem
 - **Estabilidade** – se o sinal de saída é limitado para todos os sinais de entrada limitados

Sistemas de Tempo Contínuo

- **Sistema Causal:**

Quando a saída a qualquer momento depende das entradas apenas nos tempos presente e passado. Por exemplo:

$$y(t) = x(t - 2); \text{ É causal, porque } t - 2 \leq t$$

- **Sistema não causal:**

Da mesma forma, um sistema não é causal se a saída depender a qualquer momento dos valores da entrada do futuro. Por exemplo:

$$y(t) = x(t + 1); \text{ Não causal, porque } t + 1 \not\leq t$$

Sistemas de Tempo Contínuo

- Sistemas Lineares e Invariantes no Tempo (LTI)
Um sistema $S : X \rightarrow Y$, onde X e Y são conjunto de sinais, é **linear** se ele satisfaz a propriedade da superposição:

$$\forall x_1, x_2 \in X, \forall a, b \in \mathbb{R}, S(ax_1 + bx_2) = aS(x_1) + bS(x_2)$$

Para definir **Invariância no Tempo**, precisamos definir um ator **Delay**:

$$\forall x \in X, \forall t \in \mathbb{R}, (D_\tau(x))(t) = x(t - \tau)$$

Um sistema $S : X \rightarrow Y$ é invariante no tempo se:

$$\forall x \in X, \forall \tau \in \mathbb{R}, S(D_\tau(x)) = D_\tau(S(x))$$

Sistemas de Tempo Contínuo

- **Controle Realimentado**

Ligação de uma saída até uma entrada em um sistema com o intuito de regular uma determinada variável

