

Sensor Fusion for Irregularly Sampled Systems

Taiguara Tupinambás

Laboratório de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares (MACSIN)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE)
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

21 de Fevereiro, 2019

Sumário

- 1 Motivação
 - Popularização de Redes de Sensores
 - Desafios
 - Objetivos
- 2 Metodologia
 - Modelo de Amostragem Irregular
 - Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
 - Estimação com Amostragem Aperiodica
- 3 Resultados Numéricos
 - Análise do Erro
 - Cenários de Simulação
 - Sistema Linear
 - Sistema Não-Linear
 - Conclusões

Sumário

1 Motivação

- Popularização de Redes de Sensores

- Desafios
- Objetivos

2 Metodologia

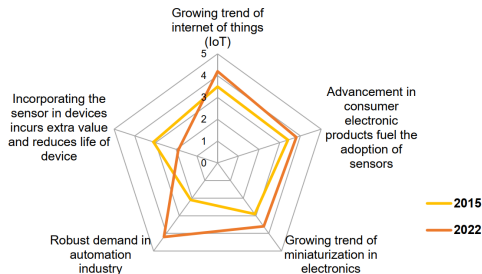
- Modelo de Amostragem Irregular
- Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
- Estimação com Amostragem Aperiodica

3 Resultados Numéricos

- Análise do Erro
- Cenários de Simulação
- Sistema Linear
- Sistema Não-Linear
- Conclusões

Crescimento do Mercado Global de Sensores

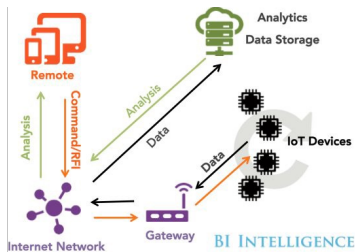
- CAGR de 11.3% a.a. no período 2016-2022
- USD 241 bilhões em 2022



Fonte: Allied Market Research

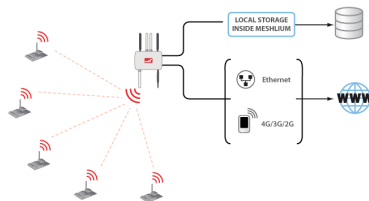
Tendências

Internet das Coisas



Fonte: Business Insider

Redes Complexas de Sensores



Fonte: Libelium

Sumário

1 Motivação

- Popularização de Redes de Sensores
- **Desafios**
- Objetivos

2 Metodologia

- Modelo de Amostragem Irregular
- Estimacão de Estados de Sistemas Amostrados
- Estimacão com Amostragem Aperiodica

3 Resultados Numéricos

- Análise do Erro
- Cenários de Simulação
- Sistema Linear
- Sistema Não-Linear
- Conclusões

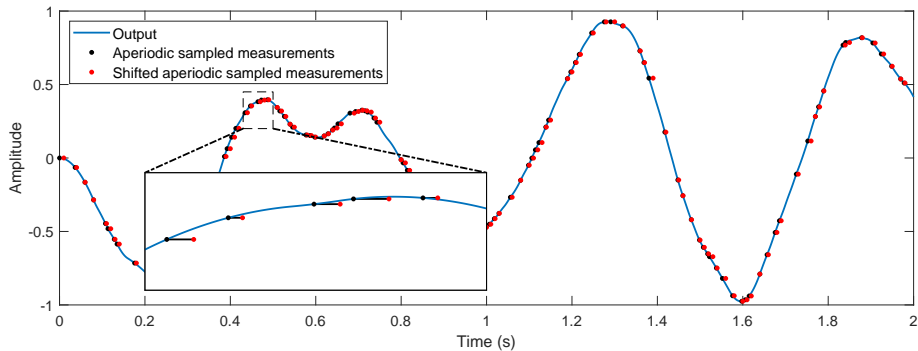
Desafios

Falta de sincronização entre os múltiplos sensores da rede pode levar a **amostragem irregular** sem informação confiável de **carimbo de tempo**

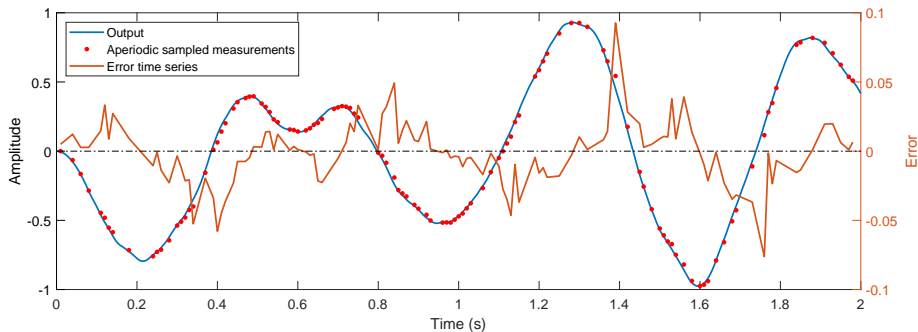
Soluções:

- Investir em sincronização
- Deslocar os instantes de tempo

Efeitos de se deslocar os instantes de tempo



Efeitos de se deslocar os instantes de tempo



Vale a pena investir em sincronização?

- Qual a relevância do erro para os objetivos da fusão sensorial?
- Quais são os fatores que influenciam o desempenho?

Fusão sensorial resumido ao problema de *estimação de estados* de sistemas amostrados

Sumário

1 Motivação

- Popularização de Redes de Sensores
- Desafios
- **Objetivos**

2 Metodologia

- Modelo de Amostragem Irregular
- Estimacão de Estados de Sistemas Amostrados
- Estimacão com Amostragem Aperiodica

3 Resultados Numéricos

- Análise do Erro
- Cenários de Simulação
- Sistema Linear
- Sistema Não-Linear
- Conclusões

Objetivos

1. Revisar os métodos de fusão sensorial e o problema de amostragem irregular;
2. Discutir os algoritmos e suas adaptações ao modelo de medição amostrado irregularmente, sem carimbo de tempo;
3. Desenvolver uma metodologia para estudar os efeitos de desconsiderar os carimbos de tempo;
4. Aplicar a metodologia em um sistema linear e outro não-linear, utilizando índices de desempenho que avaliam a precisão e a consistência de estimação;

Sumário

- 1 Motivação
 - Popularização de Redes de Sensores
 - Desafios
 - Objetivos
- 2 Metodologia
 - Modelo de Amostragem Irregular
 - Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
 - Estimação com Amostragem Aperiodica
- 3 Resultados Numéricos
 - Análise do Erro
 - Cenários de Simulação
 - Sistema Linear
 - Sistema Não-Linear
 - Conclusões

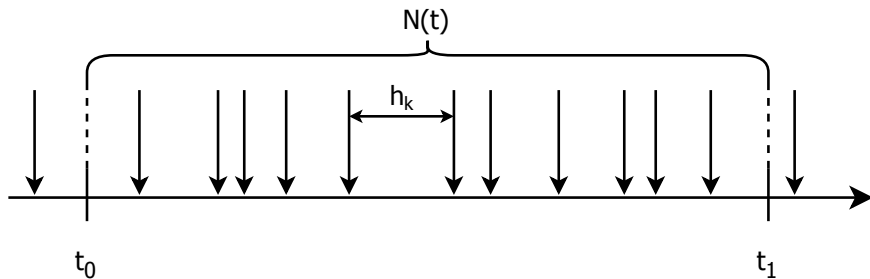
Modelo de Amostragem Irregular

Instantes de amostragem modelados por um processo de Poisson:

$$P(N(t) = n) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}$$

$$\rho_{h_k}(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

Modelo de Amostragem Irregular



Sumário

- 1 Motivação
 - Popularização de Redes de Sensores
 - Desafios
 - Objetivos
- 2 Metodologia
 - Modelo de Amostragem Irregular
 - Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
 - Estimação com Amostragem Aperiodica
- 3 Resultados Numéricos
 - Análise do Erro
 - Cenários de Simulação
 - Sistema Linear
 - Sistema Não-Linear
 - Conclusões

Estimação de Estados

Etapa de predição:

$$\rho(x_k | (y_1, \dots, y_{k-1})) = \int_{\mathbb{R}^n} \rho(x_k | x_{k-1}) \rho(x_{k-1} | y_1, \dots, y_{k-1}) dx_{k-1}$$

Etapa de assimilação de dados:

$$\rho(x_k | (y_1, \dots, y_k)) = \frac{\rho(y_k | x_k) \rho(x_k | (y_1, \dots, y_{k-1}))}{\rho(y_k | (y_1, \dots, y_{k-1}))}$$

Sistemas Não Lineares

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), w(t), t) \\ y(t_k) &= g(x(t_k), v(t_k), t_k)\end{aligned}$$

Discretizado por Runge-Kutta:

$$\begin{aligned}x(t_{k+1}) &= x(t_k) + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 3k_3 + k_4), \\ t_{k+1} &= t_k + h_k,\end{aligned}$$

Sistemas Lineares

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Gw(t) \\ y(t_k) &= Cx(t_k) + v(t_k)\end{aligned}$$

Discretizado por:

$$x(t_{k+1}) = A_d(t_k, t_{k+1})x(t_k) + B_d(t_k, t_{k+1})u(t_k) + w_d(t_k, t_{k+1})$$

Formulação do Problema

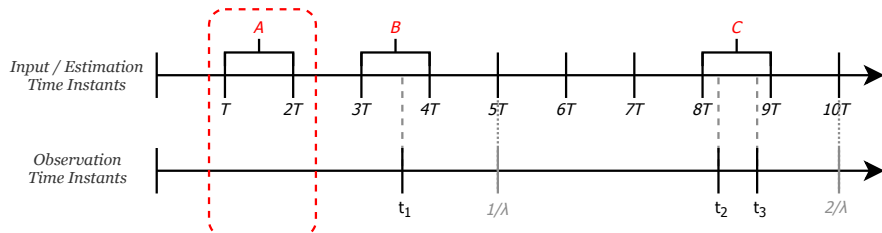
Queremos estimar o vetor de estados $x(t)$ e sua covariância de forma recursiva, em intervalos igualmente espaçados T , considerando:

- Instantes de tempo das observações t_k é definido pelo intervalo:
 - $h_k \triangleq t_k - t_{k-1}$
 - $h_k \sim \mathcal{E}(\lambda)$
- Entrada $u(t)$ é atualizada em intervalos de tempo constantes T :
 - $u(t) = u(iT)$, para $iT \leq t < (i+1)T$

Sumário

- 1 Motivação
 - Popularização de Redes de Sensores
 - Desafios
 - Objetivos
- 2 Metodologia
 - Modelo de Amostragem Irregular
 - Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
 - **Estimação com Amostragem Aperiódica**
- 3 Resultados Numéricos
 - Análise do Erro
 - Cenários de Simulação
 - Sistema Linear
 - Sistema Não-Linear
 - Conclusões

Instantes de Estimação e de Observação



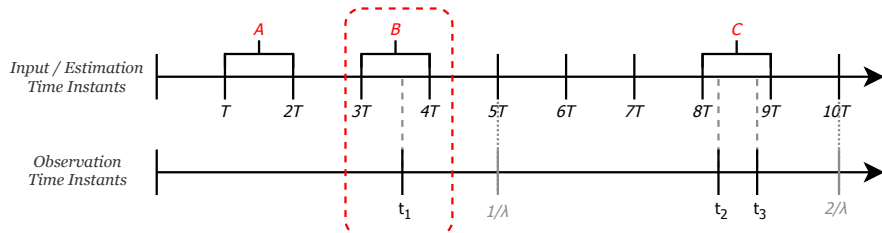
- Com carimbo:

1. predição, de T a $2T$;

- Sem carimbo:

1. predição, de T a $2T$;

Instantes de Estimação e de Observação



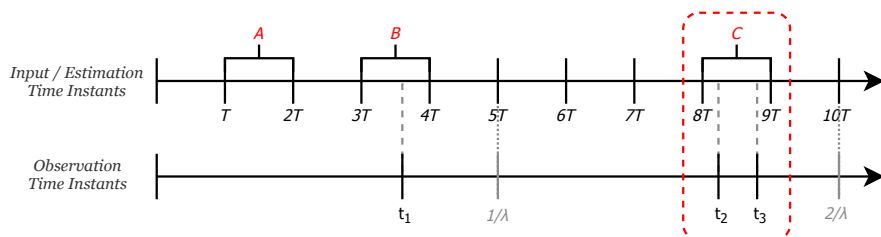
Com carimbo:

1. completo, de $3T$ a t_1 ;
2. predição, de t_1 a $4T$;

Sem carimbo:

1. completo, de $3T$ a $4T$, com $t_1 = 4T$;

Instantes de Estimação e de Observação



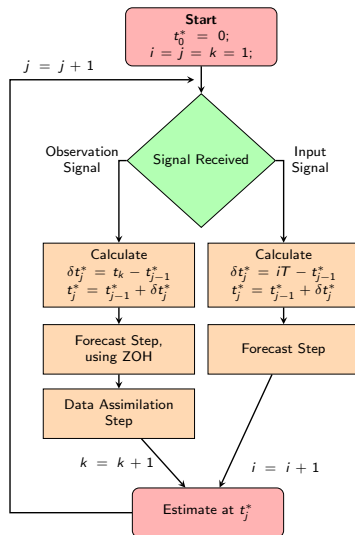
- **Com carimbo:**

1. completo, de $8T$ a t_2 ;
2. completo, de t_2 a t_3 ;
3. predição, de t_3 a $9T$;

- **Sem carimbo:**

1. completo, de $8T$ a $9T$, com $t_2 = 9T$;

Estimador com carimbo de tempo



Sumário

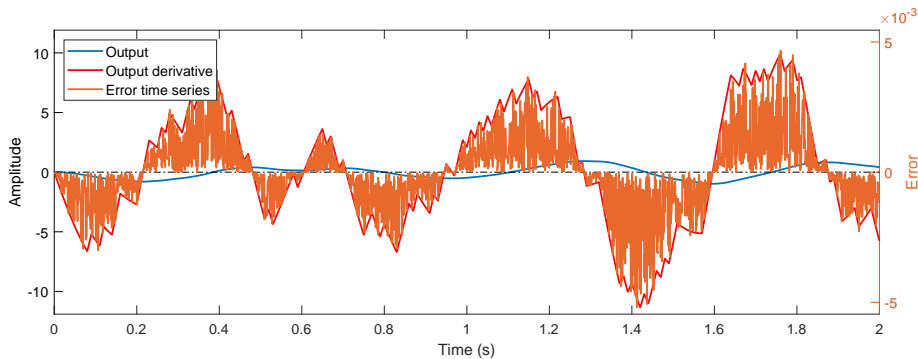
- 1 Motivação
 - Popularização de Redes de Sensores
 - Desafios
 - Objetivos
- 2 Metodologia
 - Modelo de Amostragem Irregular
 - Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
 - Estimação com Amostragem Aperiodica
- 3 Resultados Numéricos
 - **Análise do Erro**
 - Cenários de Simulação
 - Sistema Linear
 - Sistema Não-Linear
 - Conclusões

Diretamente proporcional à derivada do sinal

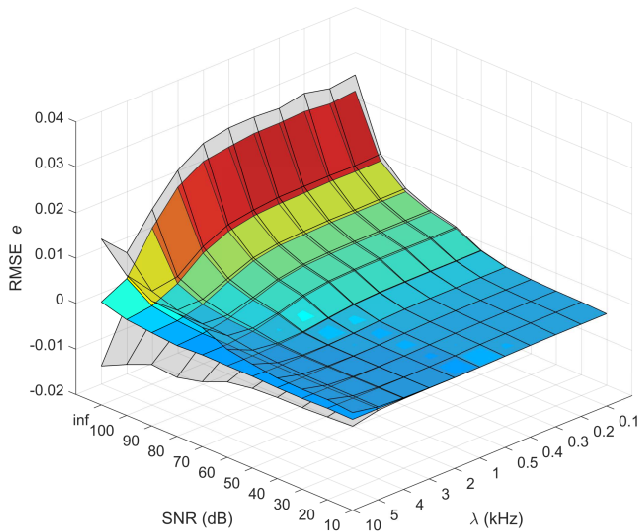
$$e_k = C[x(t_k) - x(t_k + \delta_k)],$$
$$\delta_k = nT - t_k$$

$$\frac{e_k}{\delta_k} = C \left(\frac{[x(t_k) - x(t_k + \delta_k)]}{\delta_k} \right),$$
$$e_k = C \left(\frac{[x(t_k) - x(t_k + \delta_k)]}{\delta_k} \right) \delta_k,$$
$$e_k \approx -C \frac{dx}{dt} \delta_k,$$
$$e_k \approx -\frac{dy}{dt} \delta_k.$$

Diretamente proporcional à derivada do sinal



Em função do ruído e da frequência média de amostragem



Sumário

- 1 Motivação
 - Popularização de Redes de Sensores
 - Desafios
 - Objetivos
- 2 Metodologia
 - Modelo de Amostragem Irregular
 - Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
 - Estimação com Amostragem Aperiodica
- 3 Resultados Numéricos
 - Análise do Erro
 - Cenários de Simulação
 - Sistema Linear
 - Sistema Não-Linear
 - Conclusões

Parâmetros variados

Símbolo	Definição
λ	$h_k \sim \mathcal{E}(\lambda)$
α	$\frac{1}{\lambda} \triangleq \alpha T$
SNR	$SNR_{\text{dB}} \triangleq 10 \log_{10} \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}}$

Sumário

- 1 Motivação
 - Popularização de Redes de Sensores
 - Desafios
 - Objetivos
- 2 Metodologia
 - Modelo de Amostragem Irregular
 - Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
 - Estimação com Amostragem Aperiodica
- 3 Resultados Numéricos
 - Análise do Erro
 - Cenários de Simulação
 - **Sistema Linear**
 - Sistema Não-Linear
 - Conclusões

Descrição do Sistema

(modelo matemático)

Descrição do Sistema

(imagens)

Resultados

(Imagens)

Resultados

(Tabela)

Sumário

- 1 Motivação
 - Popularização de Redes de Sensores
 - Desafios
 - Objetivos
- 2 Metodologia
 - Modelo de Amostragem Irregular
 - Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
 - Estimação com Amostragem Aperiodica
- 3 Resultados Numéricos
 - Análise do Erro
 - Cenários de Simulação
 - Sistema Linear
 - Sistema Não-Linear
 - Conclusões

Descrição do Sistema

(modelo matemático)

Descrição do Sistema

(imagens)

Resultados

(Imagens)

Resultados

(Tabela)

Sumário

- 1 Motivação
 - Popularização de Redes de Sensores
 - Desafios
 - Objetivos
- 2 Metodologia
 - Modelo de Amostragem Irregular
 - Estimação de Estados de Sistemas Amostrados
 - Estimação com Amostragem Aperiodica
- 3 Resultados Numéricos
 - Análise do Erro
 - Cenários de Simulação
 - Sistema Linear
 - Sistema Não-Linear
 - Conclusões

Principais Resultados e Contribuições

(texto)

Trabalhos Futuros

(texto)