



# Filtragem Estocástica para Sistemas Híbridos e suas Aplicações em Robótica Aérea

Pedro Henrique de Rodrigues Quemel e Assis Santana

[phrqas@ieee.org](mailto:phrqas@ieee.org)

Laboratório de Automação e Robótica (LARA), Universidade de Brasília (UnB)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação

28 de fevereiro de 2011

# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Sistemas a Múltiplos Modelos
- 3 Sistema de Localização
- 4 Contribuições e Resultados
- 5 Conclusão

# Filtragem Estocástica

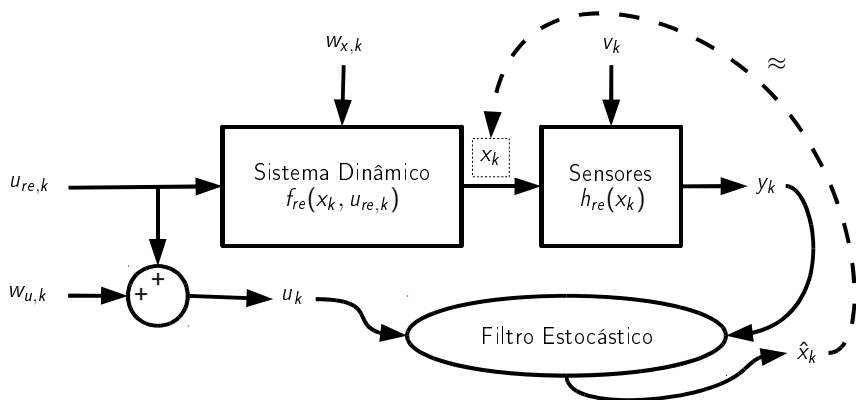
para

## Sistemas Híbridos

e suas

## Aplicações em Robótica Aérea

## Diagrama ilustrativo



Filtragem Estocástica  
para  
**Sistemas Híbridos**  
e suas  
Aplicações em Robótica Aérea

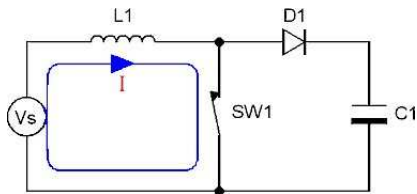
# Definição

## Sistemas Híbridos (Goebel et al. (2009))

Sistemas que combinam comportamentos dinâmicos contínuos e discretos.

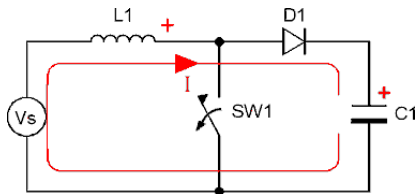
- Conceito extremamente abrangente
- Método formal para descrição de dinâmicas complexas → modelos de EDOs convencionais podem se mostrar insuficientes
- Grande aplicabilidade prática
- Difícil tratamento matemático

## Circuito chaveado (*Boost*)



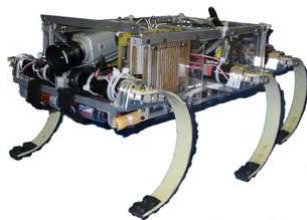
$$L_1 \dot{i} = V_s \rightarrow \text{EDO}$$

+  $\Rightarrow$  Sistema Híbrido



$$L_1 \ddot{i} + \frac{1}{C_1} i = \dot{V}_s \rightarrow \text{EDO}$$

## Robôs com patas



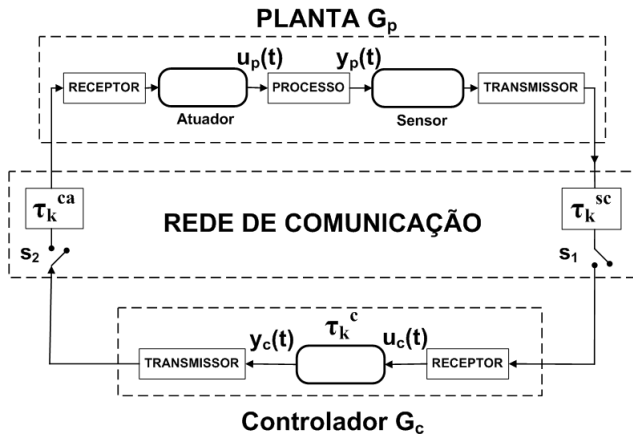
---

Adaptado de <http://www.lara.unb.br/images/projects/quadrupede.png> e

<http://www.oricomtech.com/misc/misc2/rhex.jpg>



## Sistema de Controle em Rede (NCS)



# Filtragem Estocástica para Sistemas Híbridos e suas Aplicações em Robótica Aérea

# Inspeção aérea de linhas de transmissão de energia

- Manutenção periódica
- Procedimento caro
- Ambiente perigoso
- Longas distâncias
- Necessidade de locais de pouso



Adaptado de <http://www.flywausau.com/contact061305.html>

# Metas

- Detectar e contornar falhas dos sensores
- Prover estimativas confiáveis da pose do sistema em condições desfavoráveis de operação



Paradigma de Modelagem de Sistemas Híbridos

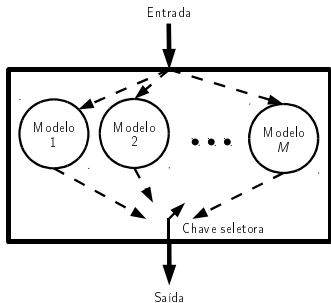
# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Sistemas a Múltiplos Modelos
- 3 Sistema de Localização
- 4 Contribuições e Resultados
- 5 Conclusão

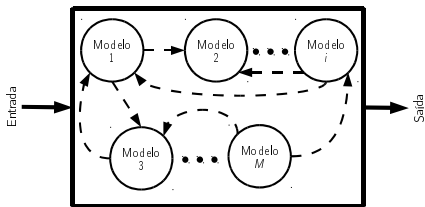
# Sistemas MM

- Caso particular de sistemas híbridos
  - Uma das variáveis de estado discretas denota o modo de operação do sistema
  - Modo  $\rightarrow$  define o modelo matemático que descreve a evolução da porção contínua do vetor de estados
- Estimação adaptativa  $\rightarrow$  mudanças estruturais e paramétricas
- Sistemas dinâmicos complexos
  - Modelo único: demasiadamente complexo ou insuficiente
  - “Dividir e Conquistar”: conjunto de sub-modelos mais simples

## Formas de representação



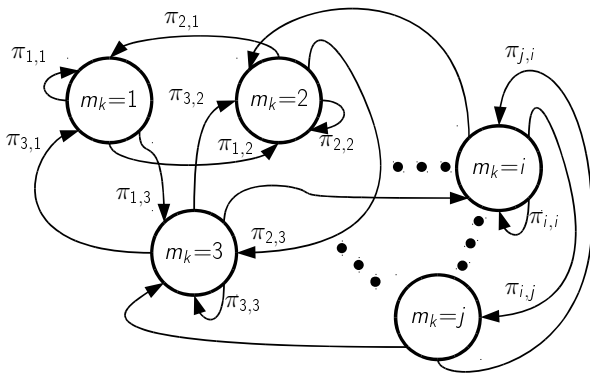
(a) Sistema MM sem transições de modelo.



(b) Sistema MM com transições entre diferentes modelos matemáticos.

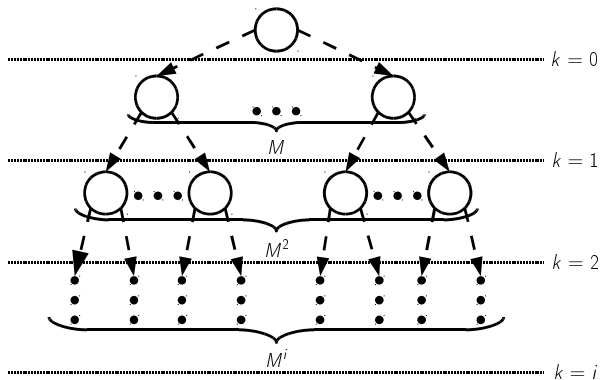
## Transições Markovianas

$$\Pi_k = \{\pi_{i,j}\}, \pi_{i,j} = \Pr\{m_k=j | m_{k-1} = i\}, i, j \in \mathbb{M}, \forall k \in \mathbb{N}.$$





# Explosão da árvore de modos em sistemas Markovianos



Requisitos computacionais ilimitados!

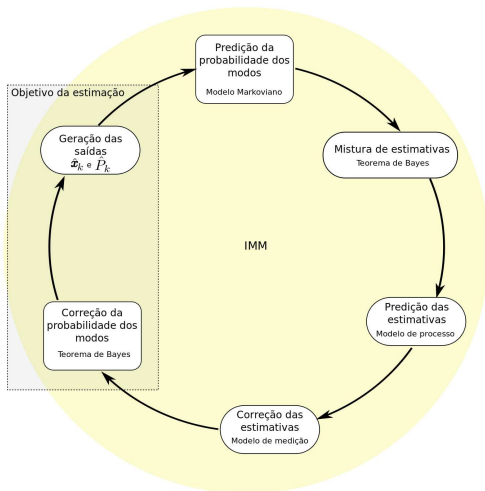
## O Filtro *Interacting Multiple Models* (IMM)

- Proposto por Henk Blom: Blom (1984), Blom and Bar-Shalom (1988)
- Motivação: sistemas de controle de tráfego aéreo
- Estimador híbrido **sub-ótimo**
- Mazor et al. (1998): melhor relação custo-benefício na estimação de estados de sistemas híbridos
- Aplicação mais comum: rastreamento de alvos
- Cada modo  $m_k = i$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ , do sistema é rastreado por um filtro convencional
  - Sistemas lineares: FK (Não é, necessariamente, ótimo!)
  - Sistemas não-lineares: FKE, FKU, Filtro de Partículas, etc.
- Principal característica: “mistura” das estimativas.

## O Filtro *Interacting Multiple Models* (IMM)

- Proposto por Henk Blom: Blom (1984), Blom and Bar-Shalom (1988)
- Motivação: sistemas de controle de tráfego aéreo
- Estimador híbrido **sub-ótimo** → todos os estimadores híbridos implementáveis o são
- Mazor et al. (1998): melhor relação custo-benefício na estimação de estados de sistemas híbridos
- Aplicação mais comum: rastreamento de alvos
- Cada modo  $m_k = i, i \in \{1, 2, \dots, M\}$ , do sistema é rastreado por um filtro convencional
  - Sistemas lineares: FK (Não é, necessariamente, ótimo!)
  - Sistemas não-lineares: FKE, FKU, Filtro de Partículas, etc.
- Principal característica: “mistura” das estimativas.

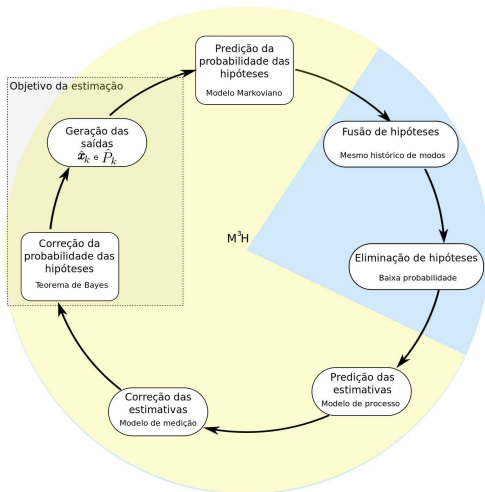
## Diagrama do algoritmo



## O Filtro *Multiple Model Multiple Hypothesis* (M<sup>3</sup>H)

- Proposto por Boers and Driessen (2005)
- Apresenta melhor desempenho do que o amplamente adotado IMM
- Considera  $d \geq 1 \rightarrow$  profundidade variável
- Hipótese  $\rightarrow$  uma seqüência particular de modos do sistema
- Não realiza mistura de estimativas
- Várias hipóteses podem ter o mesmo modo  $\neq$  IMM  $\rightarrow$  a cada modo está associada apenas uma hipótese
- Seleciona estimativas de máxima verossimilhança  $\neq$  IMM  $\rightarrow$  estimativas de mínima variância
- Elimina hipóteses com baixas probabilidades

## Diagrama do algoritmo

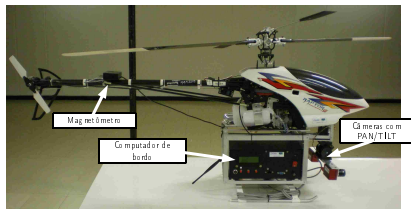


# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Sistemas a Múltiplos Modelos
- 3 Sistema de Localização**
- 4 Contribuições e Resultados
- 5 Conclusão

## Instrumentação

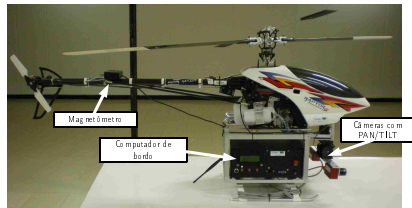
- Magnetômetro tri-axial
- Altímetro barométrico
- Sonar
- GPS
- Central Inercial (IMU)
- Modem Wi-Fi de alta potência
- Sistema de visão estéreo
- CPU de 500 Mhz



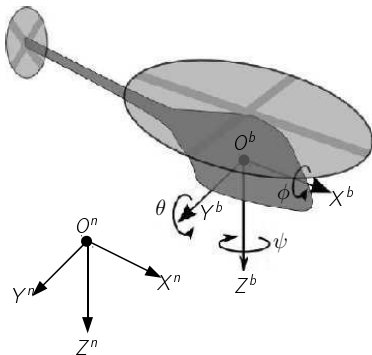


## Instrumentação

- Magnetômetro tri-axial
  - Distúrbios eletromagnéticos
  - “Maus-contatos”
- Altímetro barométrico
- Sonar
- GPS
- Central Inercial (IMU)
- Modem Wi-Fi de alta potência
- Sistema de visão estéreo
- CPU de 500 Mhz



## Sistemas de coordenadas



**Figura:** Sistemas de coordenadas do corpo (**b**) e de referência (**n**). Os ângulos mostrados são denominados rolagem ( $\phi$ ), arfagem ( $\theta$ ) e guinada ( $\psi$ ).

## Saídas dos sensores

$$f_k^b = \left( C_{n,k}^b \right)^T \left( a_k^n - g_E^n \right) + \epsilon_{f,k} \quad \rightarrow \text{Acelerômetro}$$

$$m_{mag,k}^b = \left( C_{n,k}^b \right)^T m_E^n + \epsilon_{m,k} \quad \rightarrow \text{Magnetômetro}$$

$$p_{gps,k}^n = p_k^n + \epsilon_{p,k} \quad \rightarrow \text{GPS (Posição)}$$

$$v_{gps,k}^n = v_k^n + \epsilon_{v,k} \quad \rightarrow \text{GPS (Velocidade)}$$

$$h_{alt,k}^n = z_k^n + \epsilon_{h,k} \quad \rightarrow \text{Altímetro}$$

## Modos do Sistema

Número ( $m_k$ )	Descrição
1	Magnetômetro operando normalmente
2	Falha de comunicação entre o magnetômetro e o computador embarcado
3	$X - b_X, Y - b_Y, Z - b_Z$
4	$X + b_X, Y - b_Y, Z - b_Z$
5	$X - b_X, Y + b_Y, Z - b_Z$
6	$X + b_X, Y + b_Y, Z - b_Z$
7	$X - b_X, Y - b_Y, Z + b_Z$
8	$X + b_X, Y - b_Y, Z + b_Z$
9	$X - b_X, Y + b_Y, Z + b_Z$
10	$X + b_X, Y + b_Y, Z + b_Z$

$$m_{disc,k}^b = 0 + \epsilon_{disc,k} \quad \rightarrow \text{Desconexão}$$

$$m_{bias,k}^b = \left( C_{n,k}^b \right)^T m_E^n + b_{bias,k} + \epsilon_{bias,k} \quad \rightarrow \text{Bias}$$

# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Sistemas a Múltiplos Modelos
- 3 Sistema de Localização
- 4 Contribuições e Resultados**
- 5 Conclusão

## Hybrid Data Fusion Filter (Santana et al. (2010a))

- Primeira experiência envolvendo filtragem estocástica, sistemas híbridos e robótica móvel
- Motivador dos trabalhos seguintes

### Contribuições

- Propõe a modelagem híbrida como alternativa para descrição de sistemas perturbados
- Incorpora a estimação *online* da MPT baseado nas medidas dos sensores
  - IMM  $\rightarrow$  a MPT é dada  $\rightarrow$  hipótese geralmente irreal (Jilkov and Li (2004))
  - É particularmente difícil escolher a MPT quando se está lidando com dados reais

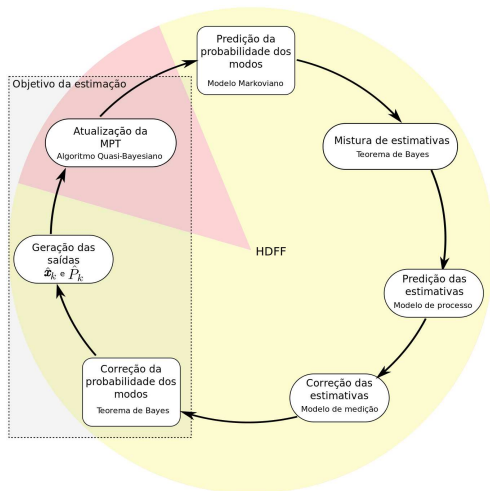
## Hybrid Data Fusion Filter (Santana et al. (2010a))

- Primeira experiência envolvendo filtragem estocástica, sistemas híbridos e robótica móvel
- Motivador dos trabalhos seguintes

### Contribuições

- Propõe a modelagem híbrida como alternativa para descrição de sistemas perturbados
- Incorpora a estimação *online* da MPT baseado nas medidas dos sensores
  - IMM  $\rightarrow$  a MPT é dada  $\rightarrow$  hipótese geralmente irreal (Jilkov and Li (2004))
  - É particularmente difícil escolher a MPT quando se está lidando com dados reais

## Diagrama do algoritmo





## Multiple Hypotheses Mixing Filter (Santana et al. (2010b))

- HDFP → demonstrou a utilidade da modelagem híbrida para sistemas perturbados, em particular robôs móveis com sensores sujeitos a falhas
- Próximo passo → melhorar o desempenho do algoritmo

### Contribuições

- Generalização do IMM
  - Profundidade de fusão  $d \geq 1$
  - Eliminação de hipóteses de baixa probabilidade
- Conserva a estimação *online* da MPT

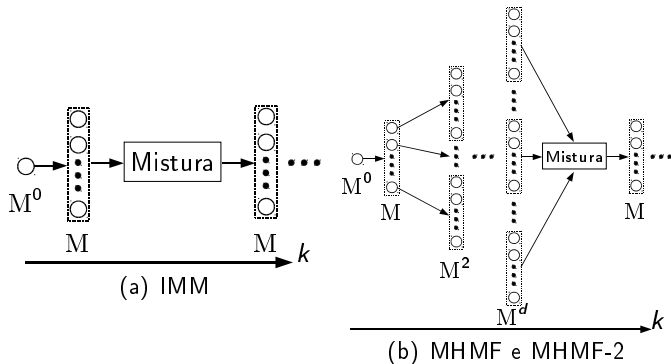
## Multiple Hypotheses Mixing Filter (Santana et al. (2010b))

- HDFP → demonstrou a utilidade da modelagem híbrida para sistemas perturbados, em particular robôs móveis com sensores sujeitos a falhas
- Próximo passo → melhorar o desempenho do algoritmo

### Contribuições

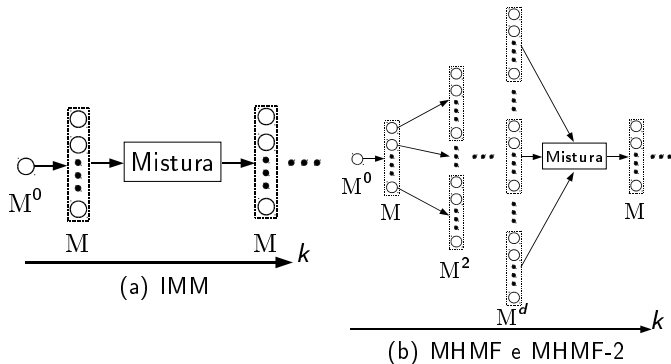
- Generalização do IMM
  - Profundidade de fusão  $d \geq 1$
  - Eliminação de hipóteses de baixa probabilidade
- Conserva a estimação *online* da MPT

## Mistura de estimativas com diferentes profundidades $d$



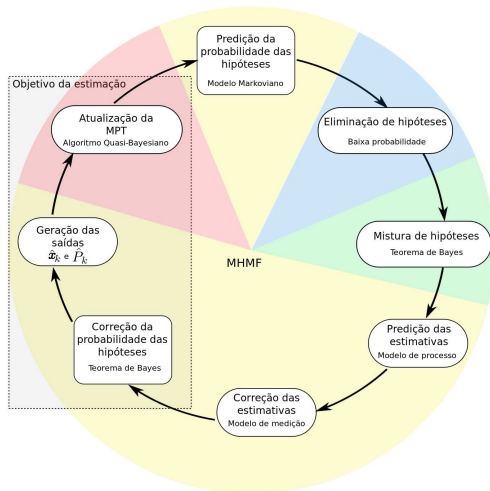
- O MHMF é capaz de representar mais precisamente a evolução dos modos do sistema
- Mistura  $\rightarrow$  conserva os ganhos de desempenho do IMM

## Mistura de estimativas com diferentes profundidades $d$



- O MHMF é capaz de representar mais precisamente a evolução dos modos do sistema
- Mistura  $\rightarrow$  conserva os ganhos de desempenho do IMM

## Diagrama do algoritmo



## Novo MHMF

- MHMF,  $M^3H$  → eliminação de hipóteses é executada imediatamente antes dos passos de predição das estimativas
- Minimiza o número de FKEs
- Transição para modos com baixas probabilidades
  - Eliminação incorreta de hipóteses
  - Discrepância entre o filtro e o modelo real → instabilidade

## Novo MHMF

- MHMF,  $M^3H$  → eliminação de hipóteses é executada imediatamente antes dos passos de predição das estimativas
- Minimiza o número de FKEs
- Transição para modos com baixas probabilidades
  - Eliminação incorreta de hipóteses
  - Discrepância entre o filtro e o modelo real → instabilidade

## Novo MHMF

- Possíveis soluções ( $M^3H$ , MHMF)
  - Elevar o valor do limiar  $\epsilon$  de eliminação de hipóteses
  - Distribuir as probabilidades mais uniformemente na MPT
- Ambas as soluções aumentam o número médio de hipóteses
  - Crescimento da complexidade computacional
  - Possível degeneração das estimativas (Li and Bar-Shalom (1996))



## Novo MHMF

- Possíveis soluções ( $M^3H$ , MHMF)
  - Elevar o valor do limiar  $\epsilon$  de eliminação de hipóteses
  - Distribuir as probabilidades mais uniformemente na MPT
- Ambas as soluções aumentam o número médio de hipóteses
  - Crescimento da complexidade computacional
  - Possível degeneração das estimativas (Li and Bar-Shalom (1996))

# Novo MHMF

## Contribuições

- Conserva as melhorias do MHMF
  - Estimação *online* da MPT
  - Fusão com profundidade variável  $d \geq 1$
  - Mistura de estimativas
  - Eliminação de hipóteses com baixa probabilidade
- Ganhos de estabilidade
  - Passo de eliminação considerando as estimativas previstas
  - Permite corrigir as probabilidades antes de se eliminar hipóteses
  - Evita discrepâncias entre filtro e modelo real
  - FK  $\rightarrow$  predição tem custo insignificante em relação à correção (Chui and G.Chen (1987))

## Novo MHMF

### Contribuições

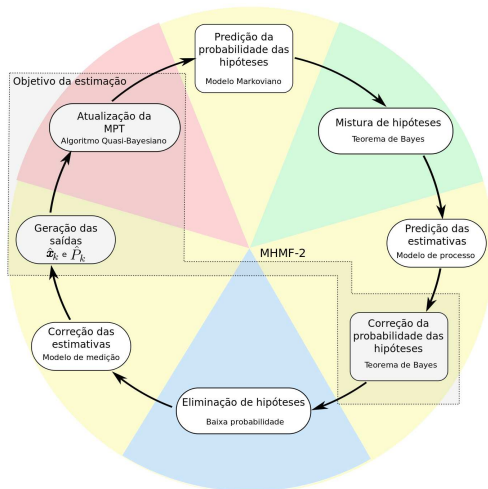
- Conserva as melhorias do MHMF
  - Estimação *online* da MPT
  - Fusão com profundidade variável  $d \geq 1$
  - Mistura de estimativas
  - Eliminação de hipóteses com baixa probabilidade
- Ganhos de estabilidade
  - Passo de eliminação considerando as estimativas previstas
  - Permite corrigir as probabilidades antes de se eliminar hipóteses
  - Evita discrepâncias entre filtro e modelo real
  - FK → predição tem custo insignificante em relação à correção (Chui and G.Chen (1987))

# Novo MHMF

## Contribuições

- Conserva as melhorias do MHMF
  - Estimação *online* da MPT
  - Fusão com profundidade variável  $d \geq 1$
  - Mistura de estimativas
  - Eliminação de hipóteses com baixa probabilidade
- Ganhos de estabilidade
  - Passo de eliminação considerando as estimativas previstas
  - Permite corrigir as probabilidades antes de se eliminar hipóteses
  - Evita discrepâncias entre filtro e modelo real
  - FK → predição tem custo insignificante em relação à correção (Chui and G.Chen (1987))

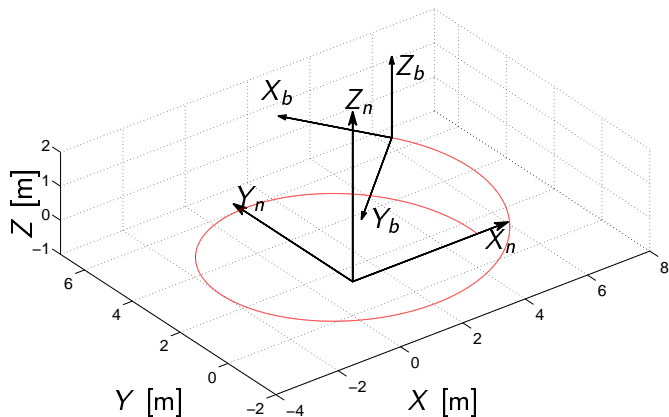
## Diagrama do algoritmo



## Análise comparativa de desempenho

- Filtros testados
  - FKE
  - M<sup>3</sup>H
  - HDFE = IMM + MPT *online*
  - MHMF
  - MHMF-2
- Plataforma experimental → sistema de localização
- Modelamento híbrido (magnetômetro)
  - Vieses
  - Interferência
  - Desconexões temporárias
- Simulações
- Dados reais

## Trajetória das simulações

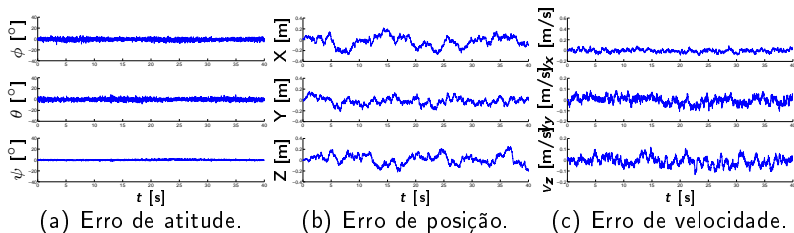


## Teste preliminar

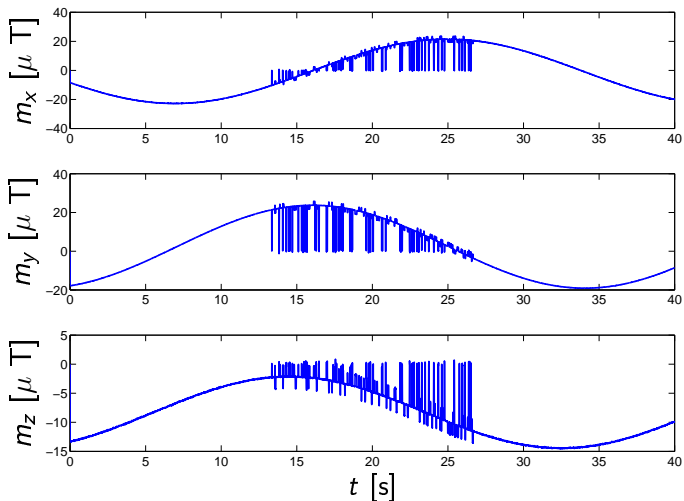
- Verificar se todos os filtros estavam implementados corretamente
- Medidas perturbadas por ruído usual
- Mesmos parâmetros para o  $M^3H$ , o MHMF e o MHMF-2
- $\hat{\Pi}_0$ 
  - HDFF, MHMF e MHMF-2 → completo desconhecimento
  - $M^3H$  → conhecimento perfeito



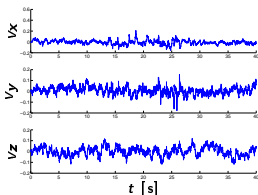
## Desempenho dos filtros



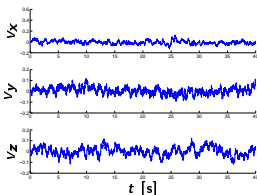
## Magnetômetro perturbado



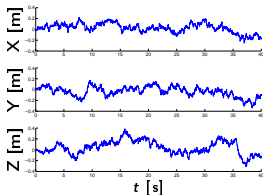
## Comparação entre o FKE e o MHMF-2



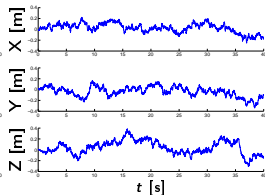
(a) FKE



(b) MHMF-2.

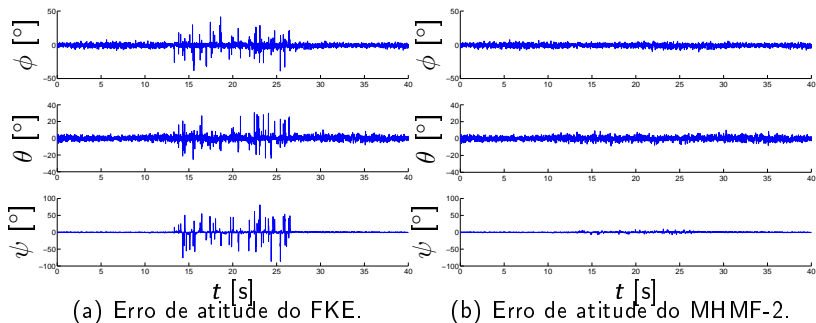


(c) FKE.



(d) MHMF-2.

## Comparação entre o FKE e o MHMF-2



## Desempenho dos filtros

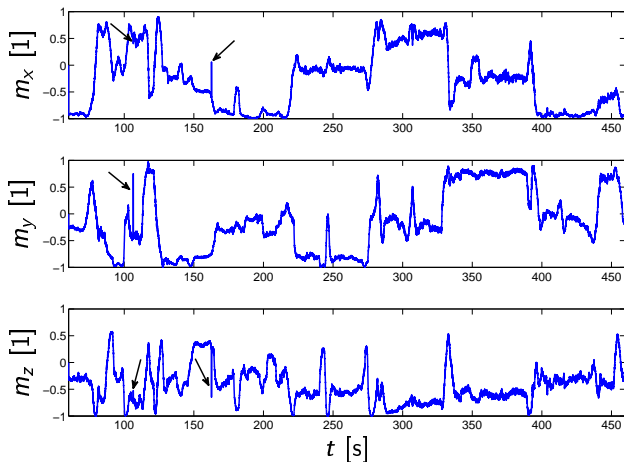
	$d$	$\epsilon$	$\hat{\Pi}_0$	Convergência	Erro RMS	Número médio de hip.
FKE	—	—	—	Sim	Ruim	1
HDFP	1	—	$\Pi_{ig}$	Sim	Bom	10
MHMF	2	0	$\Pi_{ig}$	Sim	Bom	54,949
	2	0,001	$\Pi_{ig}$	Sim	Ruim	10,222
	2	0,002	$\Pi_{ig}$	Sim	Ruim	5,300
	2	[0,003; 0,005]	$\Pi_{ig}$	Não	—	—
	2	[0,01; 0,05]	$\Pi_{ig}$	Não	—	—
M <sup>3</sup> H	2	0	$\Pi$	Sim	Bom	99,885
	2	0	$\Pi_{0,8}$	Sim	Bom	99,885
	2	0,001	$\Pi$	Sim	Bom	10,560
	2	0,005	$\Pi$	Sim	Bom	10,089
	2	0,01	$\Pi_{0,7}$	Sim	Bom	10,332
	2	0,02	$\Pi_{0,8}$	Sim	Bom	9,400
	2	0,03	$\Pi_{0,8}$	Não	—	—
	2	0,03	$\Pi_{0,7}$	Sim	Bom	9,240
	2	[0,04; 0,05]	$\Pi_{0,7}$	Não	—	—
	2	0,05	$\Pi_{ig}$	Sim	Bom	15,646
MHMF-2 <sup>a</sup>	2	0,05	$\Pi_{ig}$	Sim	Bom	1,048
	2	0,10	$\Pi_{ig}$	Sim	Bom	1,039
	2	0,20	$\Pi_{ig}$	Sim	Bom	1,031

<sup>a</sup> Número médio de hipóteses antes do passo de correção do filtro.

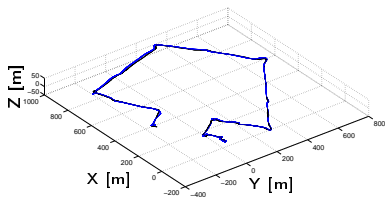
## Experimento real de navegação



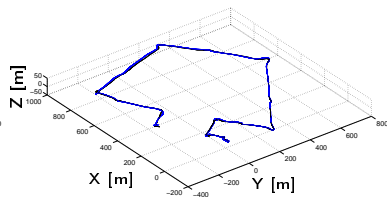
## Leituras do magnetômetro



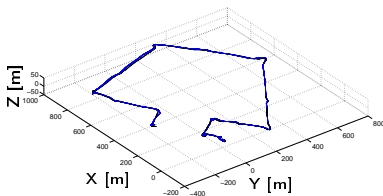
## Comparação entre o FKE, o $M^3H$ e o MHMF-2



(a) Posição 3D do MHMF-2 (sólida).



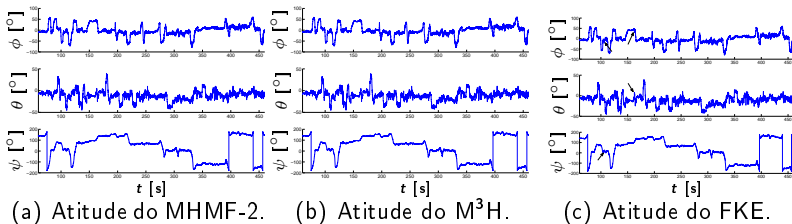
(b) Posição 3D do  $M^3H$ .



(c) Posição 3D do FKE.

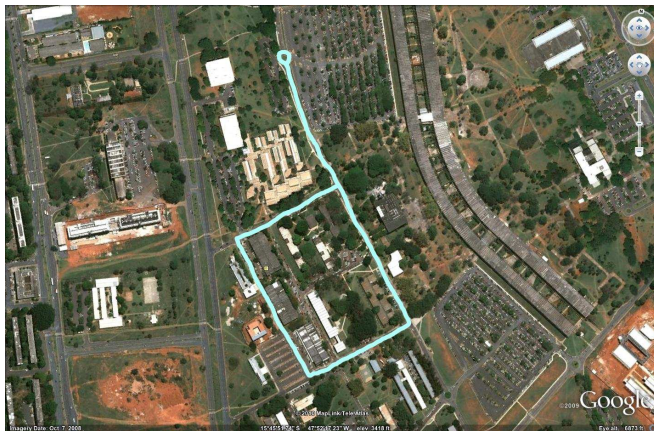


## Comparação entre o FKE, o M<sup>3</sup>H e o MHMF-2

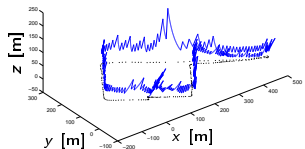
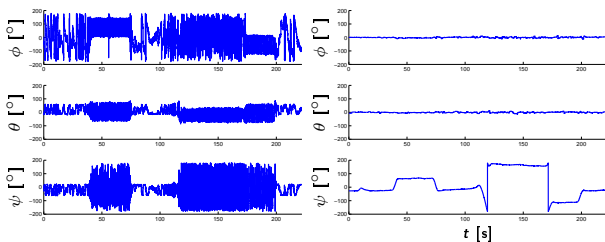


	FKE	MHMF-2	M <sup>3</sup> H
Número médio de hip.	1,0	1,0001	2,0001

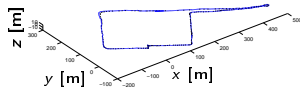
## Experimento com dados reais



## FKE *versus* Abordagem Híbrida



(a) FKE



(b) HDFF

# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Sistemas a Múltiplos Modelos
- 3 Sistema de Localização
- 4 Contribuições e Resultados
- 5 Conclusão**

## Considerações finais

- Três novos filtros para sistemas estocásticos
- MHMF-2
  - Principal resultado do trabalho
  - Bom desempenho em todas as situações testadas até o momento
  - Melhores resultados na análise comparativa
- Modelagem híbrida de falhas dos sensores
  - Tornou o sistema de localização robusto a perturbações
  - Abordagem inovadora para o problema (de acordo com a revisão bibliográfica)
  - MHMF-2 → custo praticamente igual ao do FKE

## Considerações finais

- Três novos filtros para sistemas estocásticos
- MHMF-2
  - Principal resultado do trabalho
  - Bom desempenho em todas as situações testadas até o momento
  - Melhores resultados na análise comparativa
- Modelagem híbrida de falhas dos sensores
  - Tornou o sistema de localização robusto a perturbações
  - Abordagem inovadora para o problema (de acordo com a revisão bibliográfica)
  - MHMF-2 → custo praticamente igual ao do FKE

## Algumas questões

*Teria sido possível tratar as falhas do magnetômetro fazendo uma análise do espectro do sinal ou criando regras para testar medidas?*

- Sim
- Análise do sinal
  - Interferência externa ao filtro
  - Custos adicionais de cálculo
  - Análise espectral não é capaz de rejeitar perturbações de baixa frequência (e.g., vieses induzidos)
- Abordagem híbrida
  - Testes de hipóteses naturalmente incorporados
  - MHMF-2 → praticamente o mesmo custo do FKE
  - Qualquer tipo de falha modelável pode ser considerada

## Algumas questões

*Teria sido possível tratar as falhas do magnetômetro fazendo uma análise do espectro do sinal ou criando regras para testar medidas?*

- Sim
- Análise do sinal
  - Interferência externa ao filtro
  - Custos adicionais de cálculo
  - Análise espectral não é capaz de rejeitar perturbações de baixa frequência (e.g., vieses induzidos)
- Abordagem híbrida
  - Testes de hipóteses naturalmente incorporados
  - MHMF-2 → praticamente o mesmo custo do FKE
  - Qualquer tipo de falha modelável pode ser considerada



## Algumas questões

*Teria sido possível tratar as falhas do magnetômetro fazendo uma análise do espectro do sinal ou criando regras para testar medidas?*

- Sim
- Análise do sinal
  - Interferência externa ao filtro
  - Custos adicionais de cálculo
  - Análise espectral não é capaz de rejeitar perturbações de baixa frequência (e.g., vieses induzidos)
- Abordagem híbrida
  - Testes de hipóteses naturalmente incorporados
  - MHMF-2 → praticamente o mesmo custo do FKE
  - Qualquer tipo de falha modelável pode ser considerada

## Algumas questões

*Teria sido possível tratar as falhas do magnetômetro fazendo uma análise do espectro do sinal ou criando regras para testar medidas?*

- Sim
- Análise do sinal
  - Interferência externa ao filtro
  - Custos adicionais de cálculo
  - Análise espectral não é capaz de rejeitar perturbações de baixa frequência (e.g., vieses induzidos)
- Abordagem híbrida
  - Testes de hipóteses naturalmente incorporados
  - MHMF-2 → praticamente o mesmo custo do FKE
  - Qualquer tipo de falha modelável pode ser considerada

## Algumas questões

*Teria sido possível tratar as falhas do magnetômetro fazendo uma análise do espectro do sinal ou criando regras para testar medidas?*

- Sim
- Análise do sinal
  - Interferência externa ao filtro
  - Custos adicionais de cálculo
  - Análise espectral não é capaz de rejeitar perturbações de baixa frequência (e.g., vieses induzidos)
- Abordagem híbrida
  - Testes de hipóteses naturalmente incorporados
  - MHMF-2 → praticamente o mesmo custo do FKE
  - Qualquer tipo de falha modelável pode ser considerada

## Algumas questões

*Teria sido possível tratar as falhas do magnetômetro fazendo uma análise do espectro do sinal ou criando regras para testar medidas?*

- Sim
- Análise do sinal
  - Interferência externa ao filtro
  - Custos adicionais de cálculo
  - Análise espectral não é capaz de rejeitar perturbações de baixa frequência (e.g., vieses induzidos)
- Abordagem híbrida
  - Testes de hipóteses naturalmente incorporados
  - MHMF-2 → praticamente o mesmo custo do FKE
  - Qualquer tipo de falha modelável pode ser considerada

## Algumas questões

*Você propõe que sistemas híbridos sejam uma solução definitiva para o tratamento de sistemas com falhas?*

- Não
- Função da dinâmica do sistema
  - Lenta (evolução contínua)
    - Exemplo: sistema de localização
    - Há tempo suficiente para convergência
  - Rápida (mudanças abruptas)
    - Exemplo: sistema de controle
    - Não há tempo suficiente para convergência

## Algumas questões

*Você propõe que sistemas híbridos sejam uma solução definitiva para o tratamento de sistemas com falhas?*

- Não
- Função da dinâmica do sistema
  - Lenta (evolução contínua)
    - Exatidão suficiente para filtragem
    - Há tempo suficiente para convergência
  - Rápida (mudanças abruptas)
    - Exatidão não suficiente para filtragem
    - Não há tempo suficiente para convergência

## Algumas questões

*Você propõe que sistemas híbridos sejam uma solução definitiva para o tratamento de sistemas com falhas?*

- Não
- Função da dinâmica do sistema
  - Lenta (evolução contínua)
    - Estimação *online* de parâmetros
    - Há tempo suficiente para convergência do filtro
  - Rápida (mudanças abruptas)
    - É bem modelada como um sistema híbrido
    - Pode não haver tempo hábil para estabilização das estimativas

## Algumas questões

*É necessário que haja modelos matemáticos das falhas para a abordagem de sistemas híbridos?*

- Não
- Forma de manifestação desconhecida
  - Dois modos: bom e mau funcionamento
  - Teste baseado na Distância de Mahalanobis
  - Apenas detecta medidas discrepantes da predição



## Algumas questões

*É necessário que haja modelos matemáticos das falhas para a abordagem de sistemas híbridos?*

- Não
- Forma de manifestação desconhecida
  - Dois modos: bom e mau funcionamento
  - Teste baseado na Distância de Mahalanobis
  - Apenas detecta medidas discrepantes da predição

## Algumas questões

*É necessário que haja modelos matemáticos das falhas para a abordagem de sistemas híbridos?*

- Não
- Forma de manifestação desconhecida
  - Dois modos: bom e mau funcionamento
  - Teste baseado na Distância de Mahalanobis
  - Apenas detecta medidas discrepantes da predição

## Algumas questões

### *Onde está a análise de convergência dos filtros?*

- Estabilidade de sistemas híbridos é um assunto complexo
  - Goebel et al. (2009) traz uma revisão excepcional
  - Um conjunto de modos estáveis pode ser instável
  - Um conjunto de modos instáveis pode ser estável
  - Necessidade de assumir diversas hipóteses simplificadoras
- Resultados fortemente dependentes dos modelos e da dinâmica do chaveamento
- As análises existentes consideram casos particulares (e.g., Seah and Hwang (2008))
- Dentre as referências do trabalho → nenhuma delas faz uma análise de estabilidade geral para os seus filtros

## Algumas questões

### *Onde está a análise de convergência dos filtros?*

- Estabilidade de sistemas híbridos é um assunto complexo
  - Goebel et al. (2009) traz uma revisão excepcional
  - Um conjunto de modos estáveis pode ser instável
  - Um conjunto de modos instáveis pode ser estável
  - Necessidade de assumir diversas hipóteses simplificadoras
- Resultados fortemente dependentes dos modelos e da dinâmica do chaveamento
- As análises existentes consideram casos particulares (e.g., Seah and Hwang (2008))
- Dentre as referências do trabalho → nenhuma delas faz uma análise de estabilidade geral para os seus filtros

## Algumas questões

### *Onde está a análise de convergência dos filtros?*

- Estabilidade de sistemas híbridos é um assunto complexo
  - Goebel et al. (2009) traz uma revisão excepcional
  - Um conjunto de modos estáveis pode ser instável
  - Um conjunto de modos instáveis pode ser estável
  - Necessidade de assumir diversas hipóteses simplificadoras
- Resultados fortemente dependentes dos modelos e da dinâmica do chaveamento
- As análises existentes consideram casos particulares (e.g., Seah and Hwang (2008))
- Dentre as referências do trabalho → nenhuma delas faz uma análise de estabilidade geral para os seus filtros

## Propostas para trabalhos futuros

- Incorporar informações do estado no modelo de transição de modos
- Avaliar filtros não-lineares alternativos: FKU, Filtro de Partícula, etc.
- Correlação entre os passos de previsão e correção do FKE → FKEC
- Testar o MHMF-2 em uma situação real de vôo

## Familiarização com o Tema

- Conferências Internacionais
  - L.F.C. Figueredo, P.H.R.Q.A. Santana, E.S. Alves, J.Y. Ishihara, G.A. Borges e A. Bauchspiess, *Robust Stability of Networked Control Systems*, **7th IEEE Conference on Control and Automation**, ICCA, Dezembro, 2009
  - P.H.R.Q.A. Santana, L.F.C. Figueredo, E.S. Alves, J.Y. Ishihara, G.A. Borges e A. Bauchspiess, *Stability of Networked Control Systems with Dynamic Controllers in the Feedback Loop*, **18th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation**, MED, Junho, 2010
- Conferências Nacionais
  - P.H.R.Q.A. Santana e G.A. Borges, *Modelagem e Controle de Quadrrrotores*, **IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, SBAI, Setembro, 2009
  - L.F.C. Figueredo, P.H.R.Q.A. Santana, E.S. Alves, J.Y. Ishihara, G.A. Borges e A. Bauchspiess, *Estabilidade e Estabilização de Sistemas de Controle em Rede com Incertezas e Atrasos Variantes no Tempo*, **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, CBA, Setembro, 2010

# Filtragem para Sistemas Híbridos (Teoria)

## ■ Periódicos Internacionais

- P.H.R.Q.A. Santana, G.A. Borges e J.Y. Ishihara, *A New Hybrid Data Fusion Filter: Applications to Outdoor Localization of Mobile and Aerial Robots*, **IEEE Transactions on Robotics**, 2010 (Submetido)

## ■ Conferências Internacionais

- P.H.R.Q.A. Santana, G.A. Borges e J.Y. Ishihara, *Hybrid Data Fusion for 3D Localization Under Heavy Disturbances*, **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, IROS, Outubro, 2010
- P.H.R.Q.A. Santana, H.M. Menegaz, G.A. Borges e J.Y. Ishihara, *Multiple Hypotheses Mixing Filter for Hybrid Markovian Switching Systems*, **49th IEEE Conference on Decision and Control**, CDC, Dezembro, 2010



## Filtragem para Sistemas Híbridos (Prática)

### ■ Conferências Nacionais

- P.H.R.Q.A. Santana, G.A. Borges e J.Y. Ishihara, *Métodos Híbridos de Fusão de Dados para Localização sob Condições Adversas*, VI **Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial**, SBEIN, Outubro, 2010

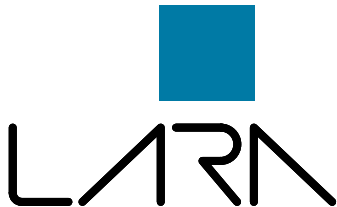
### ■ Notas Técnicas

- P.H.R.Q.A. Santana, B.G. Amui, F.B. Cavalcanti, G.G. Scandaroli, and G.A. Borges, *Building a real-time Debian distribution for embedded systems*. 2010
- P.H.R.Q.A. Santana, G.G. Scandaroli, F.B. Cavalcanti, and G.A. Borges. *How to install a RTAI extension in Linux 2.6.24 Kernel*. 2009

## Apoio financeiro

- CNPQ
- FINATEC
- Plena Transmissoras
- DPP-UnB
- PPGEE-UnB

# Obrigado a todos!



- Blom, H. (1984). An efficient filter for abruptly changing systems. *Proceedings of the 23rd Conference on Decision and Control*, 4(30):656–658.
- Blom, H. and Bar-Shalom, Y. (1988). The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33(8):780–783.
- Boers, Y. and Driessen, H. (2005). A multiple model multiple hypothesis filter for Markovian switching systems. *Automatica*, 41(4):709 – 716.
- Chui, C. and G.Chen (1987). *Kalman filtering with real-time applications*. Springer-Verlag New York, 3rd edition.
- Goebel, R., Sanfelice, R., and Teel, A. (2009). Hybrid dynamical systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 29(2):28–93.
- Jilkov, V. and Li, X. (2004). Online Bayesian estimation of transition probabilities for Markovian jump systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52(6):1620–1630.
- Li, X.-R. and Bar-Shalom, Y. (1996). Multiple-model estimation with variable structure. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(4):478–493.
- Mazor, E., Averbuch, A., Bar-Shalom, Y., and Dayan, J. (1998). Interacting multiple model methods in target tracking: a survey. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 34(1):103–123.
- Santana, P., Borges, G., and Ishihara, J. (2010a). Hybrid data fusion for 3D localization under heavy disturbances. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, pages 55 –60.
- Santana, P., Menegaz, H., Borges, G., and Ishihara, J. (2010b). Multiple hypotheses mixing filter for hybrid Markovian switching systems. In *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*.
- Seah, C. E. and Hwang, I. (2008). Stability analysis of the interacting multiple model algorithm. In *American Control Conference*, pages 2415 –2420.

# The sweetest dilemma...

