

Consenso na robótica móvel

Alan Kunz Cechinel

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Pós-graduação em Engenharia de Automação e Sistemas – PPGEAS

DAS410059 – Sistemas Multiagentes – 2022

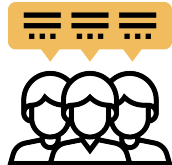
- 1 Introdução e Motivação
- 2 Protocolo de Consenso
- 3 Consenso em *Formation Control*
- 4 Limitações
- 5 Conclusão

Introdução e Motivação



O que é consenso?

- Consiste em um conjunto de **agentes** chegar em um **acordo a respeito do valor de uma variável de interesse** [1, 2, 3, 4];

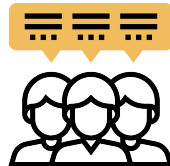


Fonte: Flaticon.com



O que é consenso?

- Consiste em um conjunto de **agentes** chegar em um **acordo a respeito do valor de uma variável de interesse** [1, 2, 3, 4];
- Ocorre por meio de uma rede de **sensoriamento** ou **comunicação** [3];

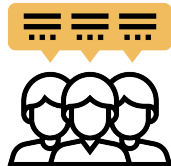


Fonte: Flaticon.com



O que é consenso?

- Consiste em um conjunto de **agentes** chegar em um **acordo a respeito do valor de uma variável de interesse** [1, 2, 3, 4];
- Ocorre por meio de uma rede de **sensoriamento** ou **comunicação** [3];
- As **regras de interação** entre um agente e seus vizinhos é definida por um protocolo/**algoritmo**/esquema de **consenso** [2, 4];

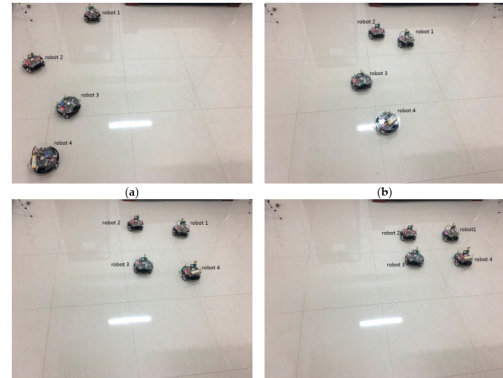


Fonte: Flaticon.com

Aplicações comuns na robótica móvel



- Formação (*Formation*) [2, 5, 4, 6]

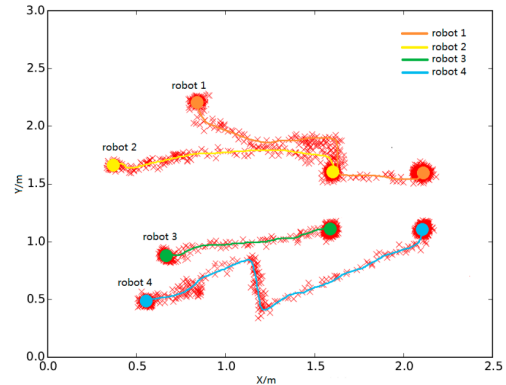


Fonte: [7]



Aplicações comuns na robótica móvel

- Formação (*Formation*) [2, 5, 4, 6]

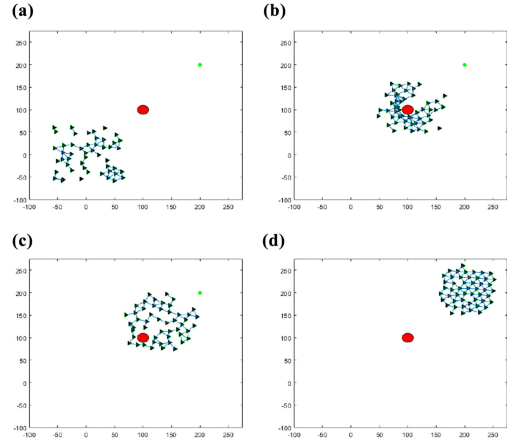


Fonte: [7]

Aplicações comuns na robótica móvel



- Formação (*Formation*) [2, 5, 4, 6]
- Bandos (*Flocking*) [1, 2, 5, 4]

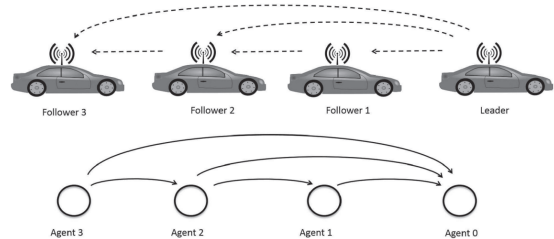


Fonte: [8]

Aplicações comuns na robótica móvel



- Formação (*Formation*) [2, 5, 4, 6]
- Bandos (*Flocking*) [1, 2, 5, 4]
- Pelotão (*Platooning*) [1, 5]

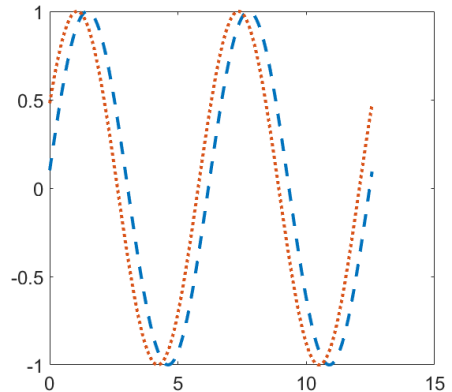


Fonte: [9]

Outras aplicações



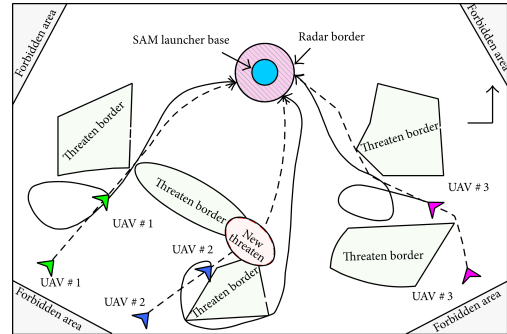
- Sincronização de osciladores [1, 2, 4];



Outras aplicações



- Sincronização de osciladores [1, 2, 4];
- Rendezvous [1, 2];

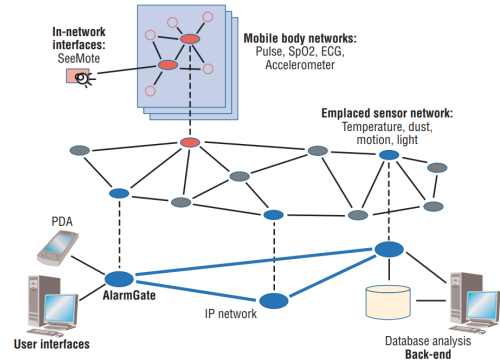


Fonte: [11]

Outras aplicações



- Sincronização de osciladores [1, 2, 4];
- Rendezvous [1, 2];
- Fusão de sensores [2, 4, 6];



Fonte: illustrative purpose only [12]

Outras aplicações



- Sincronização de osciladores [1, 2, 4];
- Rendezvous [1, 2];
- Fusão de sensores [2, 4, 6];
- Blockchain [10];



Fonte: Flaticon.com

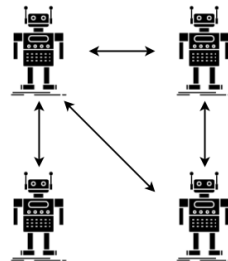
Protocolo de Consenso

Classificações



Classificações dos protocolos de consenso [13, 14]:

- Consenso sem líder: com o passar do tempo, os agentes podem convergir para um ponto comum, ou valor de estado de interesse assintoticamente, em tempo finito (**Formation**);

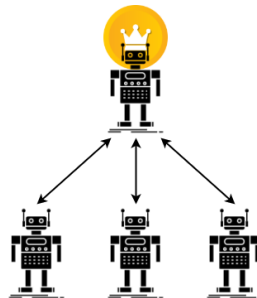


Classificações



Classificações dos protocolos de consenso [13, 14]:

- Consenso sem líder: com o passar do tempo, os agentes podem convergir para um ponto comum, ou valor de estado de interesse assintoticamente, em tempo finito (**Formation**);
- Consenso seguidor de líder (*Tracking*): visa garantir que todos os seguidores possam rastrear o líder (**Platooning**);

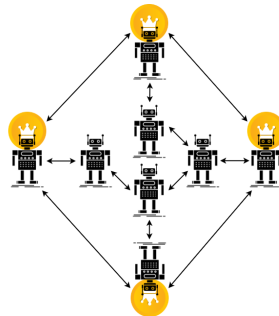


Classificações



Classificações dos protocolos de consenso [13, 14]:

- Consenso sem líder: com o passar do tempo, os agentes podem convergir para um ponto comum, ou valor de estado de interesse assintoticamente, em tempo finito (**Formation**);
- Consenso seguidor de líder (*Tracking*): visa garantir que todos os seguidores possam rastrear o líder (**Platooning**);
- Consenso de contenção (*Containment*): os líderes podem limitar a posição geográfica de agentes para controlar as fronteiras do grupo. Os líderes podem trocar informação entre si (**Flocking**).



Protocolo de Consenso Contínuo



Protocolo [1]:

$$\dot{x}_i(t) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} (x_i(t) - x_j(t))$$

$$x_i(t) = x_i(t - dt) + dt \cdot \dot{x}_i(t - dt)$$

Critério de convergência:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0, \forall i \neq j$$

Onde:

- x_i : variável de interesse no agente i ;
- \mathcal{N}_i : conjunto de vizinhos do agente i ;
- α_{ij} : ganho relacionado à informação do agente j para o agente i ;
- Tipicamente $\alpha_{ij} = 1$;
- dt : intervalo de tempo suficientemente pequeno para a aplicação;
- Para notação matricial veja [1];

Protocolo de Consenso Discreto



Protocolo [1]:

$$x_i[k+1] = \sum_{j \in \mathcal{N}_i \cup \{i\}} \beta_{ij}[k] \cdot x_j[k]$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}_i \cup \{i\}} \beta_{ij}[k] = 1$$

Critério de convergência:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|x_i[k] - x_j[k]\| = 0, \forall i \neq j$$

Onde:

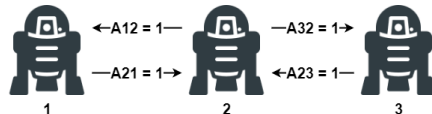
- x_i : variável de interesse no agente i ;
- β_{ij} : ganho relacionado à informação do agente j para o agente i .
- Tipicamente:

$$\beta_{ij} = \frac{1}{|\mathcal{N}_i \cup \{i\}|}, \forall i, j | j \in \mathcal{N}_i \cup \{i\}$$

- Para notação matricial veja [1];

Exemplo – Elaboração

Enunciado: Três agentes desejam escolher a temperatura de um ar-condicionado.



Algébrica:

$$\dot{x}_i(t) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} (x_i(t) - x_j(t))$$

$$\dot{x}_1(t) = -\alpha_{12}(x_1(t) - x_2(t)) = x_2(t) - x_1(t)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2(t) &= -(\alpha_{21}(x_2(t) - x_1(t)) + \alpha_{23}(x_2(t) - x_3(t))) \\ &= x_1(t) + x_3(t) - 2 \cdot x_2(t) \end{aligned}$$

$$\dot{x}_3(t) = -\alpha_{32}(x_3(t) - x_2(t)) = x_2(t) - x_3(t)$$

Matricial:

$$\dot{x} = -L \cdot x$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$



Exemplo – Execução

Sensato (x_1)

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) - x_1(t)$$

$$x_1(0) = 23$$

$$\dot{x}_1(0) = 16 - 23 = -7$$

$$x_1(0.1) = 23 + 0.1 \cdot -7 = 22.3$$

$$\dot{x}_1(0.1) = 19.2 - 22.3 = -3.1$$

$$x_1(0.2) = 22.3 + 0.1 \cdot -3.1 = 21.99$$

$$\vdots$$

$$x_1(8) \approx 21.33$$

Encalorado (x_2)

$$\dot{x}_2(t) = x_1(t) + x_3(t) - 2 \cdot x_2(t)$$

$$x_2(0) = 16$$

$$\dot{x}_2(0) = 23 + 25 - 2 \cdot 16 = 32$$

$$x_2(0.1) = 16 + 0.1 \cdot 32 = 19.2$$

$$\dot{x}_2(0.1) = 22.3 + 24.1 - 2 \cdot 19.2 = 8$$

$$x_2(0.2) = 19.2 + 0.1 \cdot 8 = 20$$

$$\vdots$$

$$x_2(8) \approx 21.33$$

Friorento (x_3)

$$\dot{x}_3(t) = x_2(t) - x_3(t)$$

$$x_3(0) = 25$$

$$\dot{x}_3(0) = 16 - 25 = -9$$

$$x_3(0.1) = 25 + 0.1 \cdot -9 = 24.1$$

$$\dot{x}_3(0.1) = 19.2 - 24.1 = -4.9$$

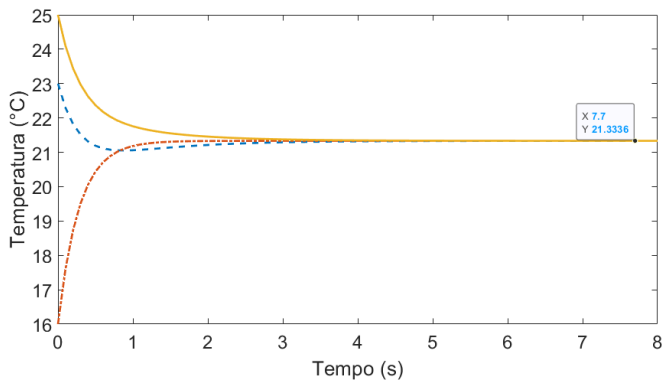
$$x_3(0.2) = 24.1 + 0.1 \cdot -4.9 = 23.61$$

$$\vdots$$

$$x_3(8) \approx 21.33$$

Link no GitHub: https://github.com/alankc/consenso_seminario_SMA

Exemplo – Gráfico



Consenso em *Formation Control*

Consenso em *Formation Control*



- Controla a formação de múltiplos robôs aéreos ou com rodas;
- Protocolo: $\dot{x}_i(t) = v_i(t)$;
- Cada eixo é independente dos demais:
 - Robôs com rodas precisam ser omnidirecionais;

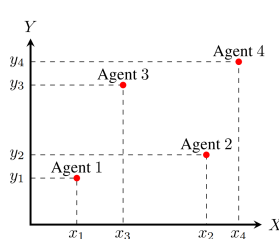


Figura: Posição inicial.

Fonte: [5]

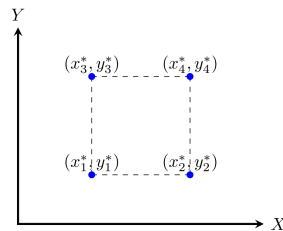


Figura: Formação desejada.

Fonte: [5]

Consenso em *Formation Control* – Modelagem

Modelagem [5]:

$$\delta_i = \begin{bmatrix} x_i - x_i^* \\ y_i - y_i^* \end{bmatrix}$$

$$u_i(t) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} (\delta_i(t) - \delta_j(t))$$

$$u_{x,i}(t) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} ((x_i(t) - x_i^*) - (x_j(t) - x_j^*))$$

$$u_{y,i}(t) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} ((y_i(t) - y_i^*) - (y_j(t) - y_j^*))$$

$$v_x(t) = u_{x,i}(t)$$

$$v_y(t) = u_{y,i}(t)$$

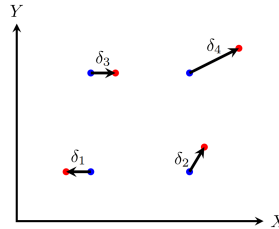


Figura: Distância δ_i até a posição de formação.

Fonte: [5]

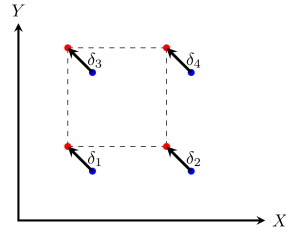


Figura: Consenso sobre a distância em formação.

Fonte: [5]

Consenso em *Formation Control* – Exemplo

Agente 1:

$$u_{x,i}(t) = -((x_1(t) - x_1^*) - (x_2(t) - x_2^*))$$

$$u_{y,i}(t) = -((y_1(t) - y_1^*) - (y_2(t) - y_2^*))$$

Agente 2:

$$u_{x,i}(t) = -((x_2(t) - x_2^*) - (x_4(t) - x_4^*))$$

$$u_{y,i}(t) = -((y_2(t) - y_2^*) - (y_4(t) - y_4^*))$$

Agente 3:

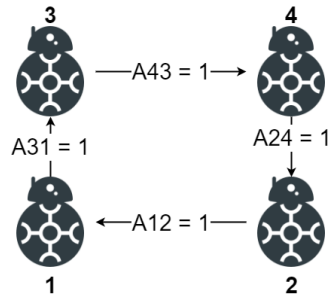
$$u_{x,i}(t) = -((x_3(t) - x_3^*) - (x_1(t) - x_1^*))$$

$$u_{y,i}(t) = -((y_3(t) - y_3^*) - (y_1(t) - y_1^*))$$

Agente 4:

$$u_{x,i}(t) = -((x_4(t) - x_4^*) - (x_3(t) - x_3^*))$$

$$u_{y,i}(t) = -((y_4(t) - y_4^*) - (y_3(t) - y_3^*))$$



Consenso em *Formation Control* – Estado Inicial



- Agente 1:

- $(x_1(0), y_1(0)) = (-1, 0.5)$
- $(x_1^*, y_1^*) = (0, 0)$

- Agente 2:

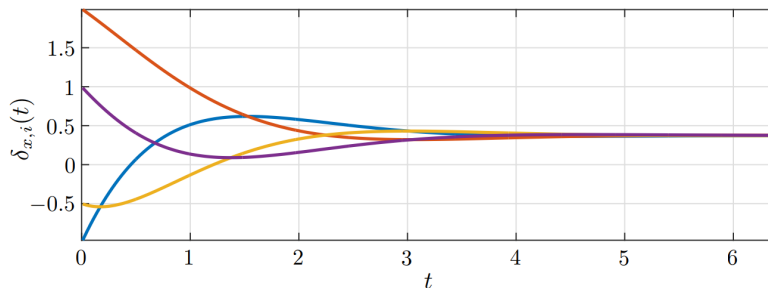
- $(x_2(0), y_2(0)) = (2, 0)$
- $(x_2^*, y_2^*) = (1, 0)$

- Agente 3:

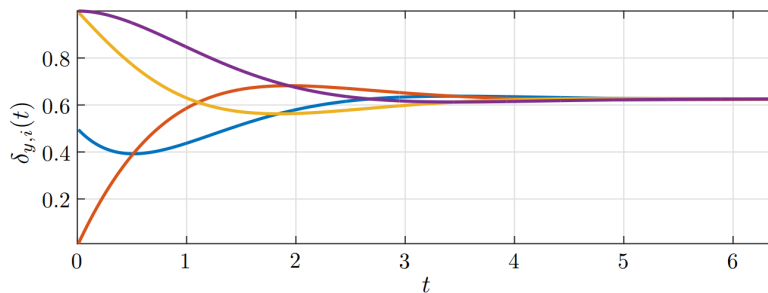
- $(x_3(0), y_3(0)) = (-0.5, 1)$
- $(x_3^*, y_3^*) = (0, 1)$

- Agente 4:

- $(x_4(0), y_4(0)) = (-1, 1)$
- $(x_4^*, y_4^*) = (1, 1)$

Consenso em *Formation Control* – Evolução de δ_i Figura: Evolução de $\delta_{x,i}$.

Fonte: [5]

Consenso em *Formation Control* – Evolução de δ_i Figura: Evolução de $\delta_{y,i}$.

Fonte: [5]

Consenso em *Formation Control* – Evolução da posição

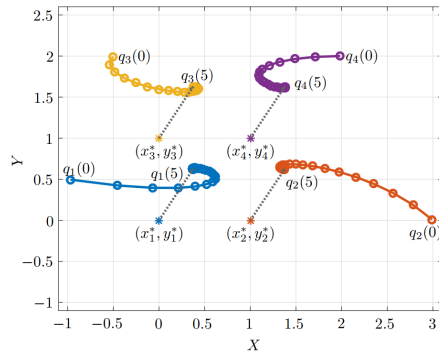


Figura: Evolução da posição.

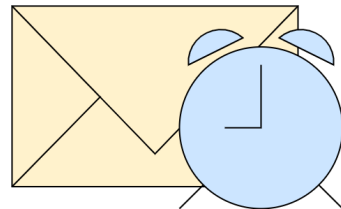
Fonte: [5]

Limitações

Limitações



- Atrasos fazem parte da interação de agentes;
- Causados por limitações computacionais e físicas [5]:
 - Canais de transmissão;
 - Processamento de informações;
 - Tempo de resposta dos atuadores.
- Podem fazer o sistema oscilar ou divergir em torno da variável de interesse [15].

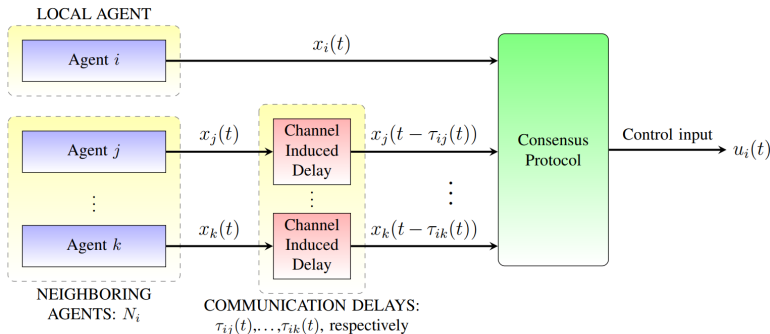


Limitação por atraso na comunicação – Modelagem

Modelagem do consenso com atrasos de comunicação [5]:

$$\dot{x}_i(t) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} (x_i(t) - x_j(t - \tau_{ij}(t)))$$

Obs.: atraso de comunicação significa receber/utilizar dados de estados passados!



Fonte: [5]



Limitação por atraso na comunicação – Gráfico

O **atraso de comunicação não impede** os agentes de atingirem o **consenso**, mas **impacta** significativamente no **tempo de convergência** [16]. Para isso, a informação de um agente deve chegar a todos os outros ao menos indiretamente.

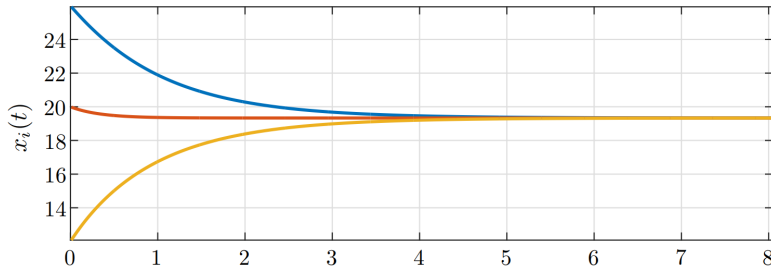


Figura: Consenso sem atraso.

Fonte: [5]



Limitação por atraso na comunicação – Gráfico

O **atraso de comunicação não impede** os agentes de atingirem o **consenso**, mas **impacta** significativamente no **tempo de convergência** [16]. Para isso, a informação de um agente deve chegar a todos os outros ao menos indiretamente.

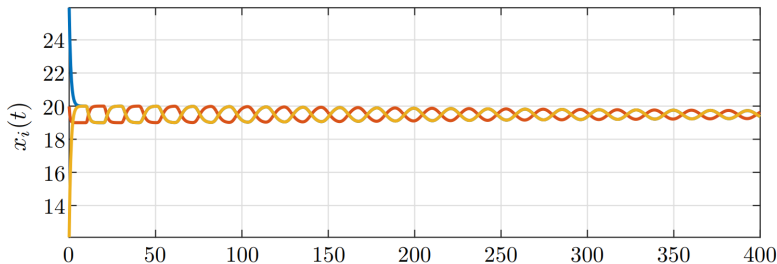


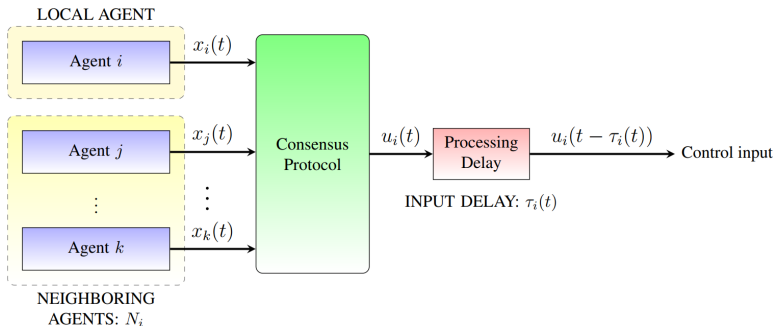
Figura: Consenso com 10 segundos de atraso de comunicação.

Fonte: [5]

Limitação por atraso no processamento – Modelagem

Modelagem do consenso com atrasos no processamento [5]:

$$\dot{x}_i(t) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} (x_i(t - \tau_i(t)) - x_j(t - \tau_i(t)))$$



Fonte: [5]



Limitação por atraso no processamento – Gráfico

O **atraso de processamento** pode impedir os agentes de atingirem **consenso**. Para o exemplo em questão o $\tau^{max} = 0.5236$ [17].

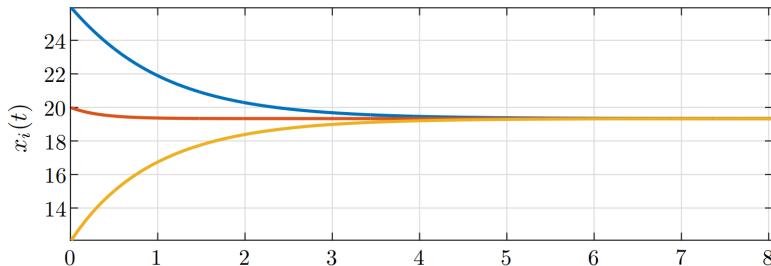


Figura: Consenso sem atraso.

Fonte: [5]

Limitação por atraso no processamento – Gráfico

O **atraso de processamento** pode impedir os agentes de atingirem **consenso**. Para o exemplo em questão o $\tau^{max} = 0.5236$ [17].

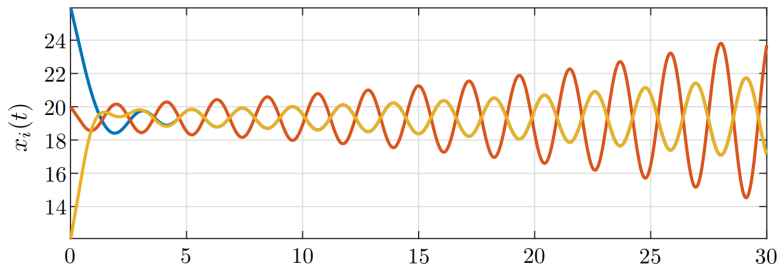


Figura: Consenso com 0.55 segundos de atraso de processamento.

Fonte: [5]

Conclusão

Conclusão



- Forma simples de obter acordos com relação a variáveis de interesse dos agentes;
- Apesar de simples, a técnica consegue atender aplicações complexas;
- Encontra valores de interesse considerando a opinião de todos os agentes indiretamente.
Ex.: o agente encalorado foi o intermediador;
- O atraso de comunicação pode tornar inviável em certas aplicações de tempo real;
- O atraso de processamento pode tornar o seu uso inviável;
- Muito diferente das técnicas que vimos em sala:
 - Não utiliza raciocínio;
 - Comportamento reativo;

Referências

Referências I



- [1] Wei Ren, R.W. Beard e E.M. Atkins. “A survey of consensus problems in multi-agent coordination”. Em: *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005*. 2005, 1859–1864 vol. 3. DOI: 10.1109/ACC.2005.1470239.
- [2] Reza Olfati-Saber, J. Alex Fax e Richard M. Murray. “Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems”. Em: *Proceedings of the IEEE* 95.1 (2007), pp. 215–233. DOI: 10.1109/JPROC.2006.887293.
- [3] Zhongkui Li e Duan Zhisheng. *Cooperative Control of Multi-Agent Systems. A Consensus Region Approach*. CRC Press, 2017. DOI: 10.1201/b17571.
- [4] Lifeng Ma et al. “Consensus control of stochastic multi-agent systems: a survey”. Em: *Science China Information Sciences* 60.120201 (2017). ISSN: 1869-1919. DOI: 10.1007/s11432-017-9169-4.

Referências II



- [5] Heitor Judiss Savino. “Novos métodos para consenso em sistemas multiagentes”. Tese de dout. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- [6] Yanjiang Li e Chong Tan. “A survey of the consensus for multi-agent systems”. Em: *Systems Science & Control Engineering* 7.1 (2019), pp. 468–482. DOI: 10.1080/21642583.2019.1695689.
- [7] Heng Wei et al. “Consensus Algorithms Based Multi-Robot Formation Control under Noise and Time Delay Conditions”. Em: *Applied Sciences* 9.5 (2019). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app9051004.
- [8] Zachary Young e Hung Manh La. “Consensus, cooperative learning, and flocking for multiagent predator avoidance”. Em: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 17.5 (2020), p. 1729881420960342. DOI: 10.1177/1729881420960342.

Referências III



- [9] Mario di Bernardo, Alessandro Salvi e Stefania Santini. “Distributed Consensus Strategy for Platooning of Vehicles in the Presence of Time-Varying Heterogeneous Communication Delays”. Em: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16.1 (2015), pp. 102–112. DOI: 10.1109/TITS.2014.2328439.
- [10] Xiang Fu, Huaimin Wang e Peichang Shi. “A survey of Blockchain consensus algorithms: mechanism, design and applications”. Em: *Science China Information Sciences* 64.2 (2020). DOI: 10.1007/s11432-019-2790-1.
- [11] Qingjie Zhang et al. “Cooperative Solution of Multi-UAV Rendezvous Problem with Network Restrictions”. Em: *Mathematical Problems in Engineering* 2015 (2015), pp. 1–14. DOI: 10.1155/2015/878536.
- [12] John A. Stankovic. “Wireless Sensor Networks”. Em: *Computer* 41.10 (2008), pp. 92–95. DOI: 10.1109/MC.2008.441.

Referências IV



- [13] Xiaohua Ge e Qing-Long Han. “A brief survey of recent advances in consensus of sampled-data multi-agent systems”. Em: *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2016, pp. 6758–6763. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793379.
- [14] Ali Dorri, Salil S. Kanhere e Raja Jurdak. “Multi-Agent Systems: A Survey”. Em: *IEEE Access* 6 (2018), pp. 28573–28593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2831228.
- [15] Peng Lin et al. “Average consensus for networks of continuous-time agents with delayed information and jointly-connected topologies”. Em: *2009 American Control Conference*. 2009, pp. 3884–3889. DOI: 10.1109/ACC.2009.5160356.

Referências V



- [16] L. Moreau. “Stability of continuous-time distributed consensus algorithms”. Em: *2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (IEEE Cat. No.04CH37601)*. Vol. 4. 2004, 3998–4003 Vol.4. DOI: 10.1109/CDC.2004.1429377.
- [17] R. Olfati-Saber e R.M. Murray. “Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays”. Em: *IEEE Transactions on Automatic Control* 49.9 (2004), pp. 1520–1533. DOI: 10.1109/TAC.2004.834113.

Obrigado!

cechinel.a.k@gmail.com