

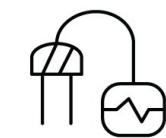
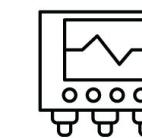
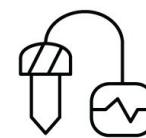
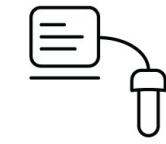
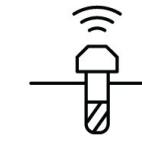
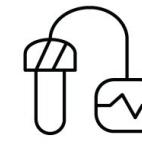
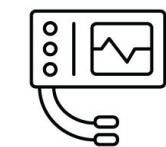
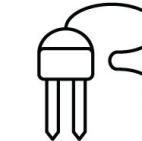
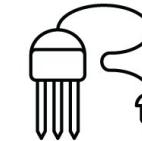
Universidade do Minho
Departamento de Informática

Fusão Sensorial

SA @ Perfil SI, MEI
2º sem, 2024/2025



- Sensores:





- Sensores:

- utilizam diferentes princípios físicos para captação de dados;
- produzem dados em diferentes formatos;
- geram dados a taxas diferentes;
- captam dados em instantes de tempo diversos (desfasados);
- os dados caracterizam-se por **diferentes resoluções, diferentes graus de precisão, diferentes níveis de confiança**;

- Então, como dar utilidade a todas estas “peças” de informação?





Perceção Fusão Sensorial

- Fusão Sensorial:
 - integração da informação proveniente de diversos sensores.

- Porquê?



Perceção Fusão Sensorial

- Fusão Sensorial:
 - integração da informação proveniente de diversos sensores.

- Porque uma pessoa com um relógio sabe que horas são;





Perceção Fusão Sensorial

- Fusão Sensorial:
 - integração da informação proveniente de diversos sensores.
- Porque uma pessoa com um relógio sabe que horas são;
- Mas uma pessoa com dois relógios, não tem bem a certeza!

DAN ARTEY



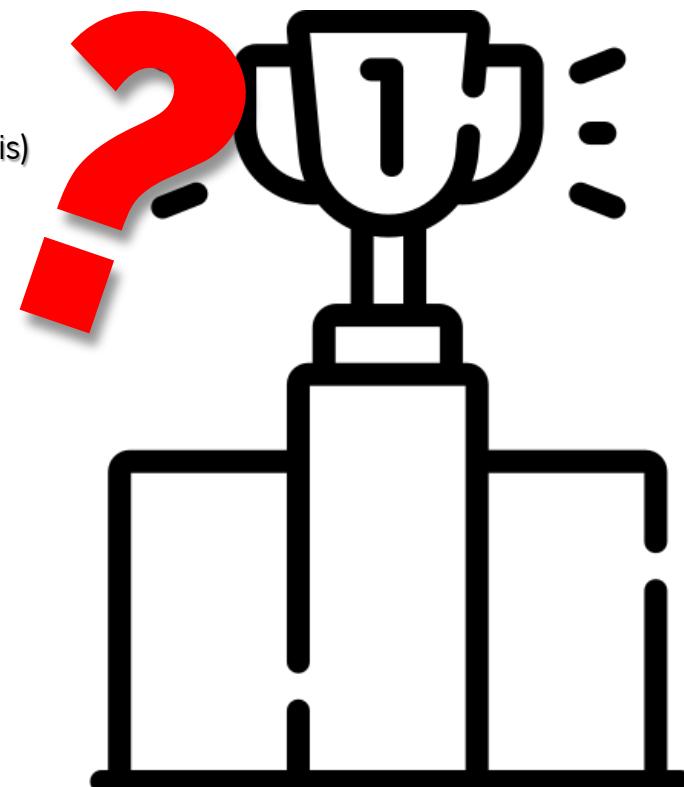


Definição: Fusão Sensorial

- Combinação de **dados recolhidos** por sensores e de **dados derivados** de sensores, de **fontes sensoriais diversificadas**, de modo que o conhecimento resultante seja **melhor** do que o tratamento individual desses dados (ou dessas fontes de dados).

*"how to properly fuse the sensed information pieces from various sources [...].
This is what sensor fusion stands for."*

Huadong Wu (PhD Thesis)





Definição: Fusão Sensorial

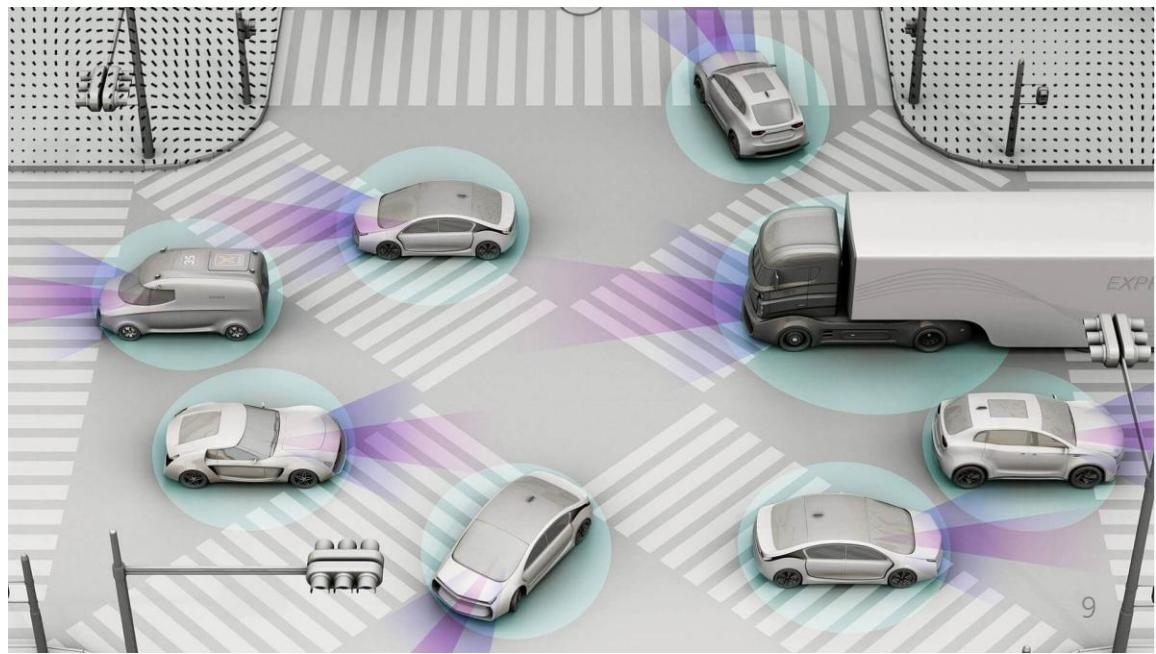
- Combinação de **dados recolhidos** por sensores e de **dados derivados** de sensores, de **fontes sensoriais diversificadas**, de modo que o conhecimento resultante seja **melhor** do que o tratamento individual desses dados (ou dessas fontes de dados).
- melhor** = preciso + completo + crédito (confiança)





Definição: Sinónimos

- Data Fusion;
- Data Integration;
- Multi-sensor Data Fusion;
- Information Fusion;
- Information Integration:
 - Data Mining (dados estruturados);
 - Text Mining (dados não estruturados);
 - Web Mining (dados semi-estruturados);





Múltiplos Sensores

- Aumentam o conhecimento;



Moisture Flex Touch Solar light Metal detection



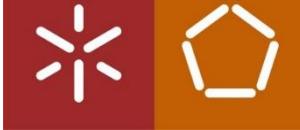
RTC Vibration Thermistor Infrared Ultrasonic



Gyro Accelero
meter Color PIR GAS



Smoke Temperature LDR Rain fall Soil
Moisture



- Aumentam o conhecimento:
 - Por possibilitar a **extração de conhecimento** a partir de dois ou mais sensores:
 - **ouvir** a sirene da ambulância aumenta a probabilidade de se **ver** a ambulância;
 - Por permitir que informação de uns sensores seja utilizada para **minimizar erros** nos dados recolhidos de outros:
 - utilizar informação de GPS para melhorar o desempenho ou minorar os erros característicos de odómetros;





- Aumentam o conhecimento:
 - Por possibilitar a **extração de conhecimento** a partir de dois ou mais sensores:
 - **ouvir** a sirene da ambulância aumenta a probabilidade de se **ver** a ambulância;
 - Por permitir que informação de uns sensores seja utilizada para **minimizar erros** nos dados recolhidos de outros:
 - utilizar informação de GPS para melhorar o desempenho ou minorar os erros característicos de odómetros;
- mas...





- Aumentam o conhecimento:
 - Por possibilitar a **extração de conhecimento** a partir de dois ou mais sensores:
 - **ouvir** a sirene da ambulância aumenta a probabilidade de se **ver** a ambulância;
 - Por permitir que informação de uns sensores seja utilizada para **minimizar erros** nos dados recolhidos de outros:
 - utilizar informação de GPS para melhorar o desempenho ou minorar os erros característicos de odómetros;
- Aumentam a incerteza:
 - Porque surgem **conflitos e inconsistências** entre os dados recolhidos, impedindo uma correta percepção do ambiente;
 - Porque, devido a erros de calibração, sensores idênticos **percepcionam** o ambiente de forma **distinta**;
 - Porque os **dados** recolhidos podem chegar em momentos **desfasados**;
 - Porque ...





Tipos de Fusão Sensorial

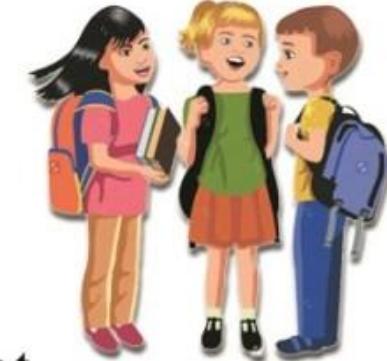
- Fusão direta;

- Fusão indireta;

"I will buy a laptop for you."



My dad said he would buy a laptop for me.





Tipos de Fusão Sensorial

- Fusão direta:

- fusão de dados sensoriais obtidos de sensores:
 - homogéneos;
 - heterogéneos;
 - virtuais/*software*;
 - históricos;

- Fusão indireta;

"I will buy a laptop for you."



My dad said he would buy a laptop for me.





Tipos de Fusão Sensorial

- Fusão direta:

- fusão de dados sensoriais obtidos de sensores:
 - homogéneos;
 - heterogéneos;
 - virtuais/*software*;
 - históricos;

- Fusão indireta:

- fusão de informação proveniente de:
 - conhecimento sobre o ambiente;
 - introdução de dados por utilizador.



"I will buy a laptop for you."

My dad said he would buy a laptop for me.



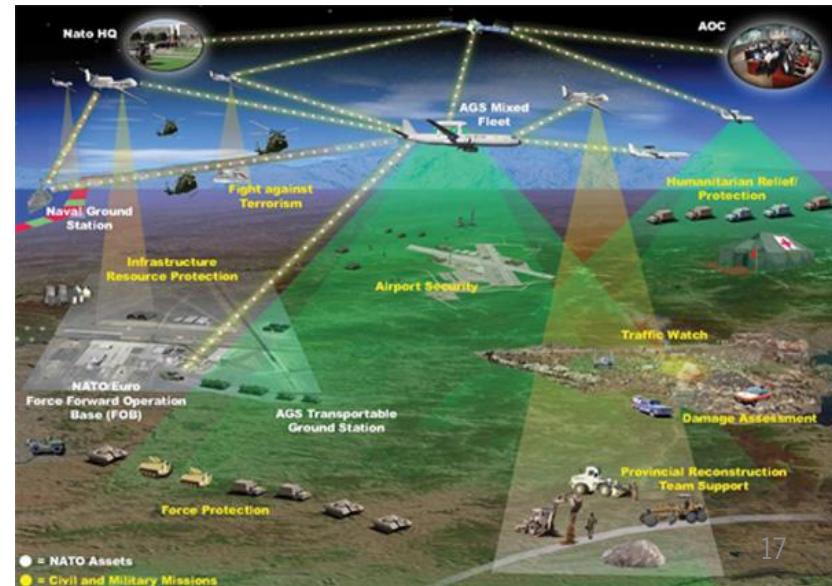


Processo de Fusão Sensorial

- “**Multisensor data fusion is** an emerging technology **applied to Department of Defense (DoD) areas** such as automated target recognition, battlefield surveillance, and guidance and control of autonomous vehicles, and to non-DoD [...]. **Techniques** for multisensor data fusion **are drawn from** a wide range of areas including **artificial intelligence**, pattern recognition, statistical estimation, and other areas. [...]”

David Hall, James Llinas, 1997, “An Introduction to Multisensor Data Fusion”

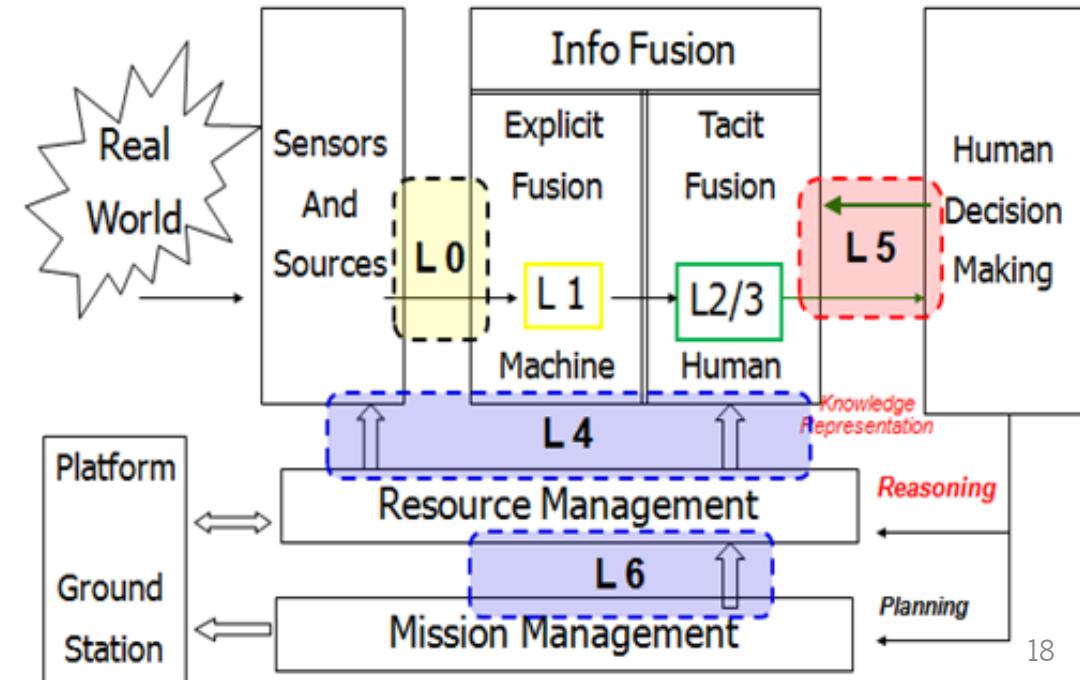
- “A fusão de dados é uma tecnologia emergente aplicada no Departamento de Defesa (DoD) em áreas como reconhecimento automático de alvos, vigilância do campo de batalha, orientação e controle de veículos autónomos [...]. As técnicas de fusão de dados são extraídas de uma ampla gama de áreas, incluindo inteligência artificial, reconhecimento de padrões, estatística e outras [...]”





Processo de Fusão Sensorial

- Em 1986 foi criado o JDL - Joint Directors of Laboratories, Data Fusion Working Group: grupo de trabalho que incluía diretores de diversos serviços do Departamento de Defesa (DoD) americano:
 - uniformizou a terminologia utilizada entre investigadores (militares) e engenheiros;
 - elaborou um Modelo de Processo para Fusão de Dados (*Data Fusion Process Model*), conhecido por JDL Process Model;





Processo de Fusão Sensorial

■ Terminologia:

- Fusion;
- Alignment;
- Association;
- Correlation;
- Correlation Tracker;
- Classification;
- Situation Assessment;
- Threat Assessment.

FUSION	The integration of information from multiple sources to produce specific and comprehensive unified data about an entity.
ALIGNMENT (Level 1)	Processing of sensor measurements to achieve a common time base and a common spatial reference.
ASSOCIATION (Level 1)	A process by which the closeness of sensor measurements is completed.
CORRELATION (Level 1)	A decision-making process which employs an association technique as a basis for allocating sensor measurements to the fixed or tracked location of an entity.
CORRELATOR-TRACKER (Level 1)	A process which generally employs both correlation and fusion component processes to transform sensor measurements into updated states and covariance for entity tracks.
CLASSIFICATION (Level 1)	A process by which some level of identity of an entity is established, either as a member of a class, a type within a class, or a specific unit within a type.
SITUATION ASSESSMENT (Level 2)	A process by which the distributions of fixed and tracked entities are associated with environmental, doctrinal, and performance data.
THREAT ASSESSMENT (Level 3)	A structured multi-perspective assessment of the distributions of fixed and tracked entities which result in estimates of (e.g.): <ul style="list-style-type: none">• expected courses of action;• enemy lethality;• unit compositions and deployment;• functional networks (e.g., supply, comms); and• environmental effects.



Processo de Fusão Sensorial

■ Terminologia:

- Fusion;
- Alignment;
- Association;
- Correlation;
- Correlation Tracker;
- Classification;
- Situation Assessment;
- Threat Assessment.

FUSION	The integration of information from multiple sources to produce specific and comprehensive unified data about an entity.
ALIGNMENT (Level 1)	Processing of sensor measurements to achieve a common time base and a common spatial reference.
ASSOCIATION (Level 1)	A process by which the closeness of sensor measurements is completed.
CORRELATION (Level 1)	A decision-making process which employs an association technique as a basis for allocating sensor measurements to the fixed or tracked location of an entity.
CORRELATION	A process which generally involves both correlation and fusion.

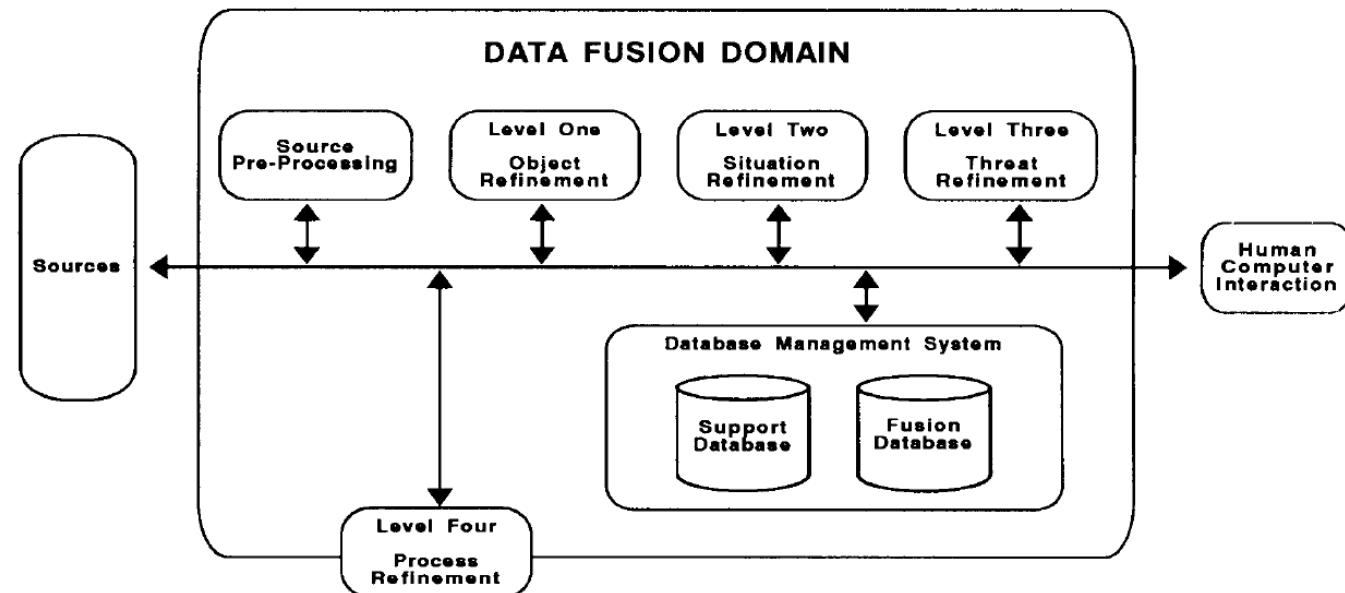
FUSION	The integration of information from multiple sources to produce specific and comprehensive unified data about an entity.
ALIGNMENT (Level 1)	Processing of sensor measurements to achieve a common time base and a common spatial reference.
ASSOCIATION (Level 1)	A process by which the closeness of sensor measurements is completed. • environmental effects.



Processo de Fusão Sensorial

- Modelo de Processo para Fusão de Dados:

- Fontes de Dados (*Sources*);
- Interface Homem-Máquina (HCI);
- Pré-processamento;
- Nível Objeto;
- Nível Situação;
- Nível Impacto;
- Nível Processo.

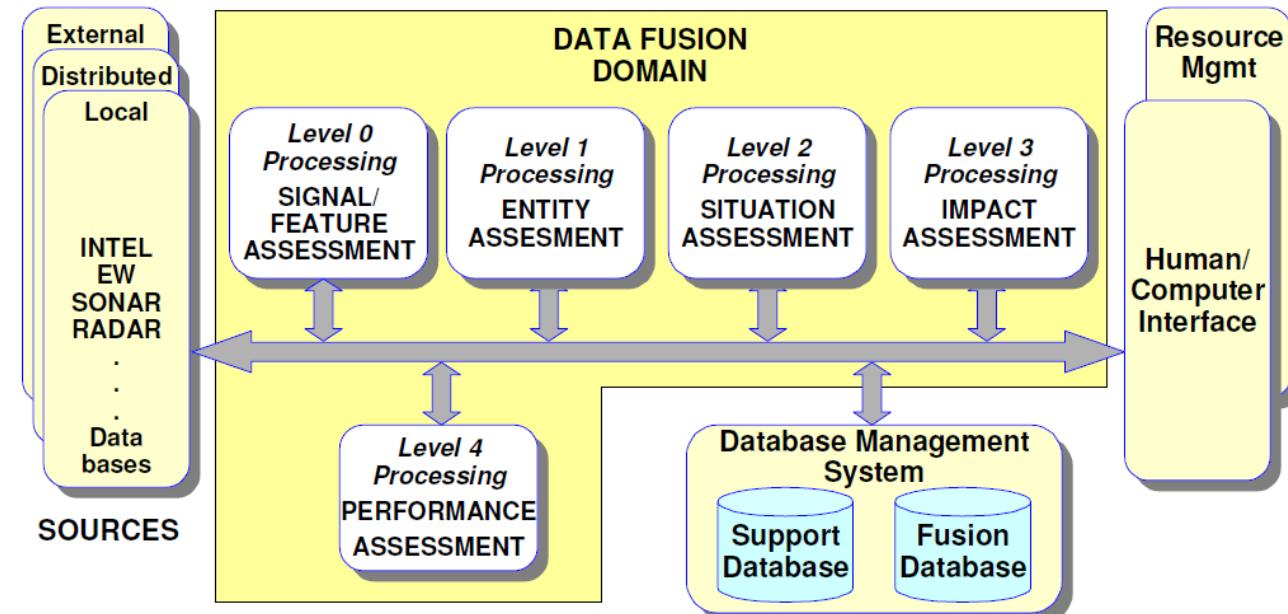




Processo de Fusão Sensorial

- Modelo de Processo para Fusão de Dados (Revisão):

- Nível Processo (4) passou a “Avaliação de Desempenho”, incluído no corpo principal por completo;
- A terminologia passou a usar expressões menos relacionadas com a área militar;





- Permite aumentar o desempenho segundo 4 perspetivas:
 - Representação;
 - Certeza/Correção;
 - Precisão;
 - Completude.





Fusão Sensorial: Porquê?

- Permite aumentar o desempenho segundo 4 perspetivas:

- Representação:
 - a informação disponível no final ou durante o processo de fusão permite um nível de abstração e uma granularidade dos dados superior, logo, de maior qualidade;
 - Certeza/Correção;
 - Precisão;
 - Completude.





- Permite aumentar o desempenho segundo 4 perspetivas:

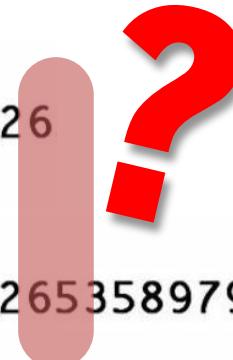
- Representação;
- Certeza/Correção:
 - pretende-se que os dados após fusão apresentem uma maior certeza/correção, quando comparados com os dados obtidos dos sensores ou com os valores previstos para ocorrências individuais;
- Precisão;
- Completude.

$$\pi = 3,14$$
$$\pi = 3,1415926$$



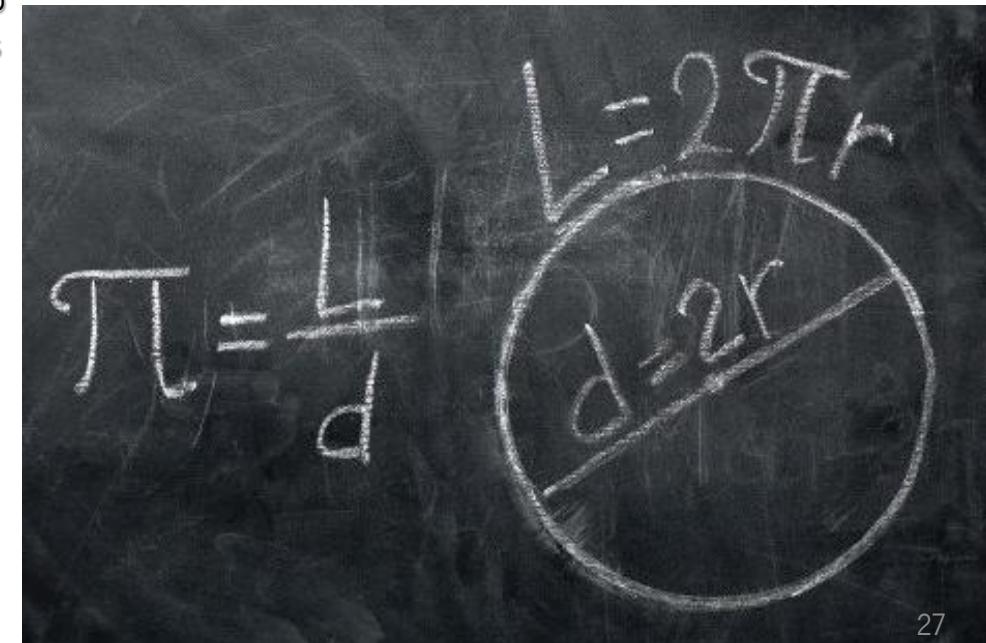
- Permite aumentar o desempenho segundo 4 perspetivas:

- Representação;
 - Certeza/Correção;
 - Precisão:
 - sendo os dados ruidosos ou erróneos, o processo de fusão tenderá a eliminar essa característica dos dados obtidos dos sensores (a precisão e a correção são fatores correlacionados);
 - Completude.

$$\pi = 3,14$$
$$\pi = 3,1415926$$
$$\pi = 3,14159265358979323846.$$




- Permite aumentar o desempenho segundo 4 perspetivas:
 - Representação;
 - Certeza/Correção;
 - Precisão;
 - Completude:
 - produzir ou obter mais informação para “adicionar” ao presente estado de conhecimento do meio envolvente, permite uma percepção mais completa e global do ambiente.





Classificação quanto ao Tipo de Fusão

- Pode-se classificar um sistema de fusão sensorial quanto ao aspetto dos dados em análise:
(Boudjema, Forbes, 2004)
 - Fusão através dos sensores;
 - Fusão através dos atributos;
 - Fusão através dos domínios;
 - Fusão através do tempo.



Classificação quanto ao Tipo de Fusão

- Pode-se classificar um sistema de fusão sensorial quanto ao aspetto dos dados em análise:
(Boudjemaa, Forbes, 2004)
 - Fusão através dos sensores:
 - os sensores medem a mesma propriedade;
 - exemplos:
 - um conjunto de termómetros para calcular a temperatura ambiente;
 - um conjunto de microfones para identificar o nível de ruído;
 - Fusão através dos atributos;
 - Fusão através dos domínios;
 - Fusão através do tempo.





Classificação quanto ao Tipo de Fusão

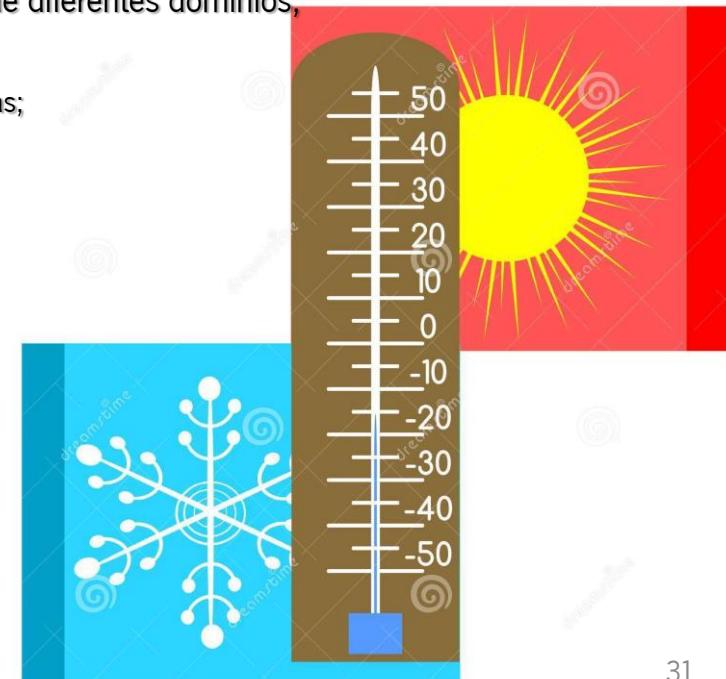
- Pode-se classificar um sistema de fusão sensorial quanto ao aspetto dos dados em análise:
(Boudjema, Forbes, 2004)
 - Fusão através dos sensores;
 - Fusão através dos atributos:
 - diferentes sensores medem grandezas distintas, para caracterização de uma mesma situação;
 - exemplo:
a temperatura do ar, a humidade e a pressão permitem calcular o coeficiente de refração do ar;
 - Fusão através dos domínios;
 - Fusão através do tempo.





Classificação quanto ao Tipo de Fusão

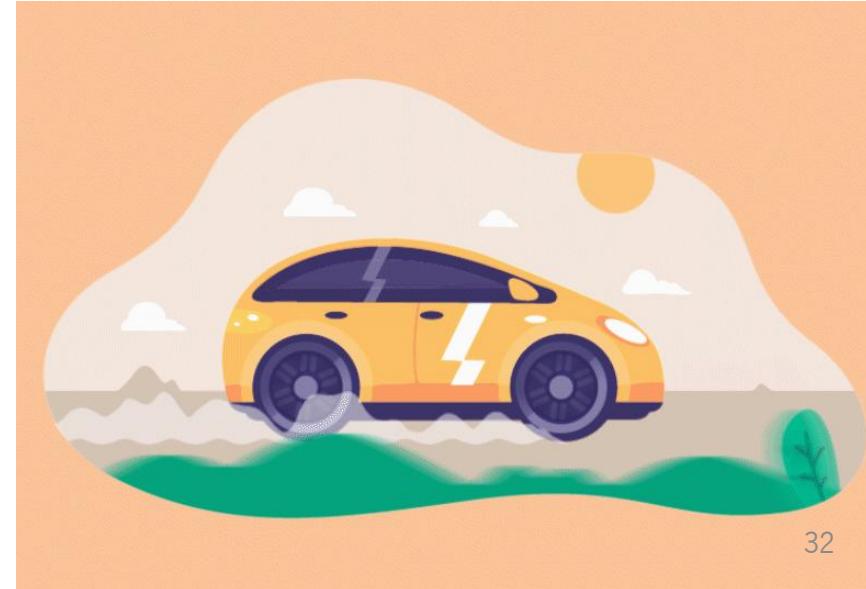
- Pode-se classificar um sistema de fusão sensorial quanto ao aspetto dos dados em análise:
(Boudjema, Forbes, 2004)
 - Fusão através dos sensores;
 - Fusão através dos atributos;
 - Fusão através dos domínios:
 - um conjunto de sensores que medem o mesmo atributo ao longo de diferentes domínios;
 - exemplo:
medir variações de temperatura para definir uma escala de temperaturas;
 - Fusão através do tempo.





Classificação quanto ao Tipo de Fusão

- Pode-se classificar um sistema de fusão sensorial quanto ao aspetto dos dados em análise:
(Boudjema, Forbes, 2004)
 - Fusão através dos sensores;
 - Fusão através dos atributos;
 - Fusão através dos domínios;
 - Fusão através do tempo:
 - as grandezas medidas são fundidas com valores históricos;
 - não é possível medir a aceleração por obtenção da velocidade instantânea.





Classificação quanto à Configuração

- Classifica-se a fusão quanto à configuração dos sensores:
(Durrant-Whyte, 1988)
 - Complementar;
 - Competitiva;
 - Cooperativa.



Classificação quanto à Configuração

- Classifica-se a fusão quanto à configuração dos sensores:
(Durrant-Whyte, 1988)

- Complementar:

- quando os sensores não dependem diretamente entre si, podendo ser combinados por forma a complementar a “visão” do ambiente;
 - permite lidar com o problema da incompletude;

- Competitiva;

- Cooperativa.





Classificação quanto à Configuração

- Classifica-se a fusão quanto à configuração dos sensores:
(Durrant-Whyte, 1988)

- Complementar;
 - Competitiva:
 - quando cada sensor obtém, de forma independente, uma medida para a mesma propriedade;
 - o objetivo da fusão competitiva é o de reduzir a incerteza e os erros das leituras (p.ex., odometria);
 - microfones no ambiente para identificação do nível de ruído;
 - Cooperativa.





Classificação quanto à Configuração

- Classifica-se a fusão quanto à configuração dos sensores:
(Durrant-Whyte, 1988)

- Complementar;
- Competitiva;
- Cooperativa:
 - quando é utilizada a informação de vários sensores independentes, de modo a permitir derivar nova informação;
 - através da triangulação de sinais de GPS é possível calcular a posição no plano ou no espaço.





Algoritmos para Fusão Sensorial

- Kalman Filter;
- Bayesian Networks;
- Dempster-Shafer.



- Kalman Filter:

(Rudolf E. Kalman)

- Tem como objetivo produzir valores (através do cálculo de estimativas) que **tendem** a estar mais próximos dos valores reais, pelo uso de medições observadas **ao longo do tempo**, contendo **ruído** ou **imprecisões**;
- Produz estimativas para valores reais pelo **cálculo da média pesada entre os valores previstos e a incerteza** atribuída a cada previsão:
 - atribui-se maior peso à previsão efetuada com menor incerteza;
 - atribui-se menor peso à previsão com maior incerteza;
 - a estimativa (média) é “melhor” do que a medição.

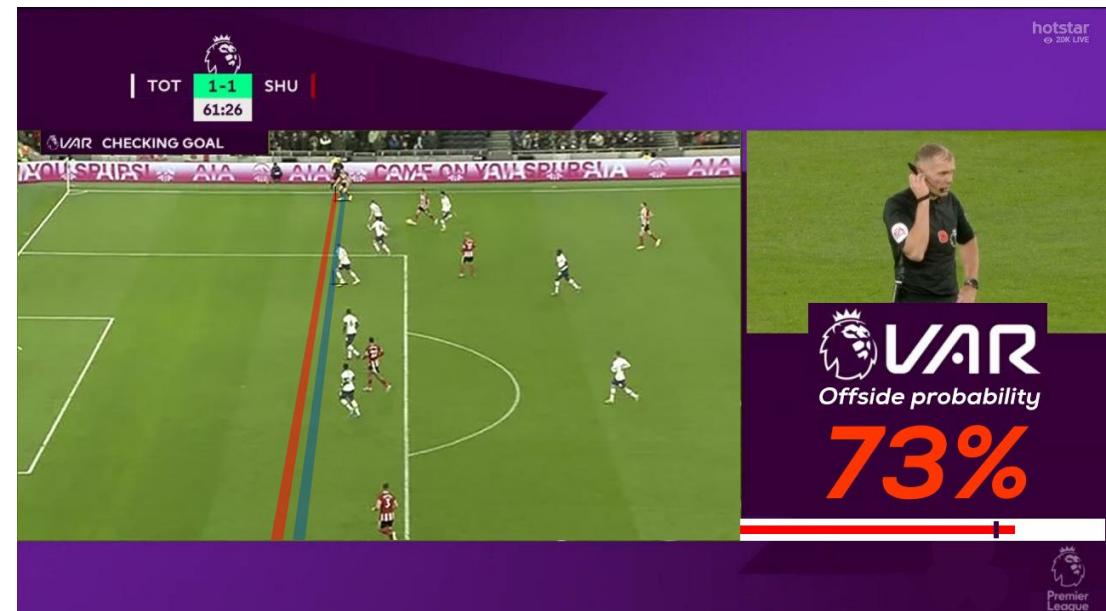


Algoritmos para Fusão Sensorial

- Kalman Filter:

(Rudolf E. Kalman)

- Conjunto de equações matemáticas que permitem **calcular**, de forma (computacionalmente) eficiente, **uma estimativa** do estado de um processo, minimizando o quadrado dos erros;
- Processo recursivo de cálculo de estimativas para o estado de um sistema dinâmico, tendo em consideração um conjunto de dados incompletos e com ruído;
- Exemplos:
 - calcular estimativas sobre a posição e a velocidade de um dispositivo, recorrendo a um conjunto de observações sobre o seu posicionamento, observações essas que incluem algum erro;





- Kalman Filter:

(Rudolf E. Kalman)

- Conjunto de equações matemáticas que permitem **calcular**, de forma (computacionalmente) eficiente, **uma estimativa** do estado de um processo, minimizando o quadrado dos erros;
- Processo recursivo de cálculo de estimativas para o estado de um sistema dinâmico, tendo em consideração um conjunto de dados incompletos e com ruído;
- Exemplos:
 - IAAF Sprint Start Research Project: is the 100ms limit still valid?
[worldathletics.org/news/news/iaaf-sprint-start-research-project-is-the-100?\(...\)](http://worldathletics.org/news/news/iaaf-sprint-start-research-project-is-the-100?(...))





- Kalman Filter:

(Rudolf E. Kalman)

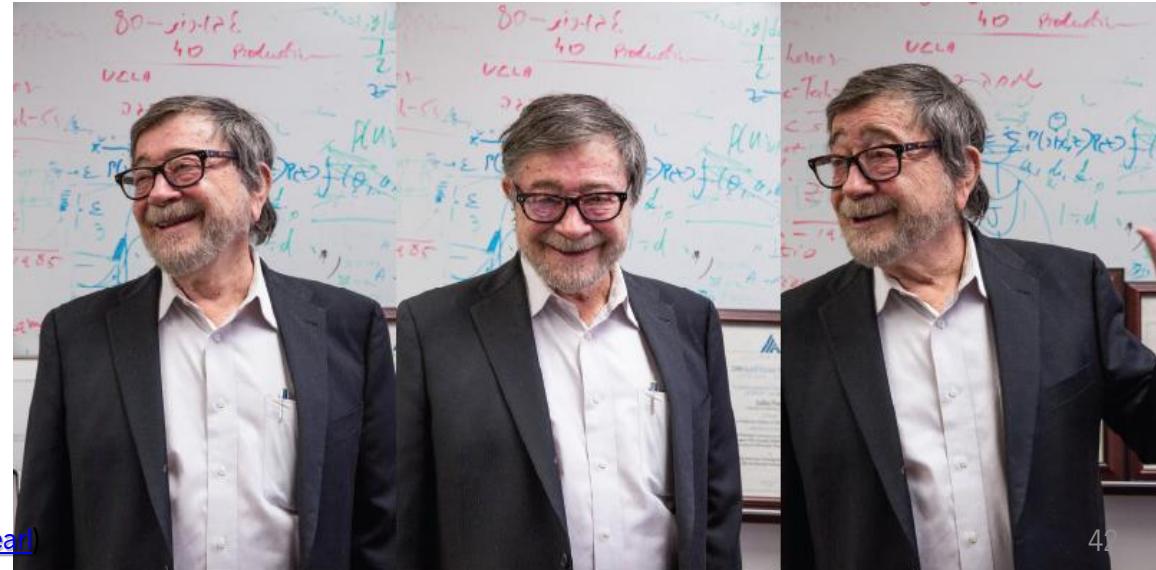
- Conjunto de equações matemáticas que permitem **calcular**, de forma (computacionalmente) eficiente, **uma estimativa** do estado de um processo, minimizando o quadrado dos erros;
- Processo recursivo de cálculo de estimativas para o estado de um sistema dinâmico, tendo em consideração um conjunto de dados incompletos e com ruído;
- Exemplos:
 - Cenário:
carro velho, parado no semáforo;
 - Características:
acelera dos 0 aos 100 em 20 segundos; velocímetro avariado;
 - Descrição:
quando o sinal “abre”, em 10 segundos atinge os 120;
 - Problema:
esta informação é aceitável?
 - Solução:
será possível calcular uma estimativa melhor do que esta leitura obtida pelo velocímetro?





- Bayesian Networks:

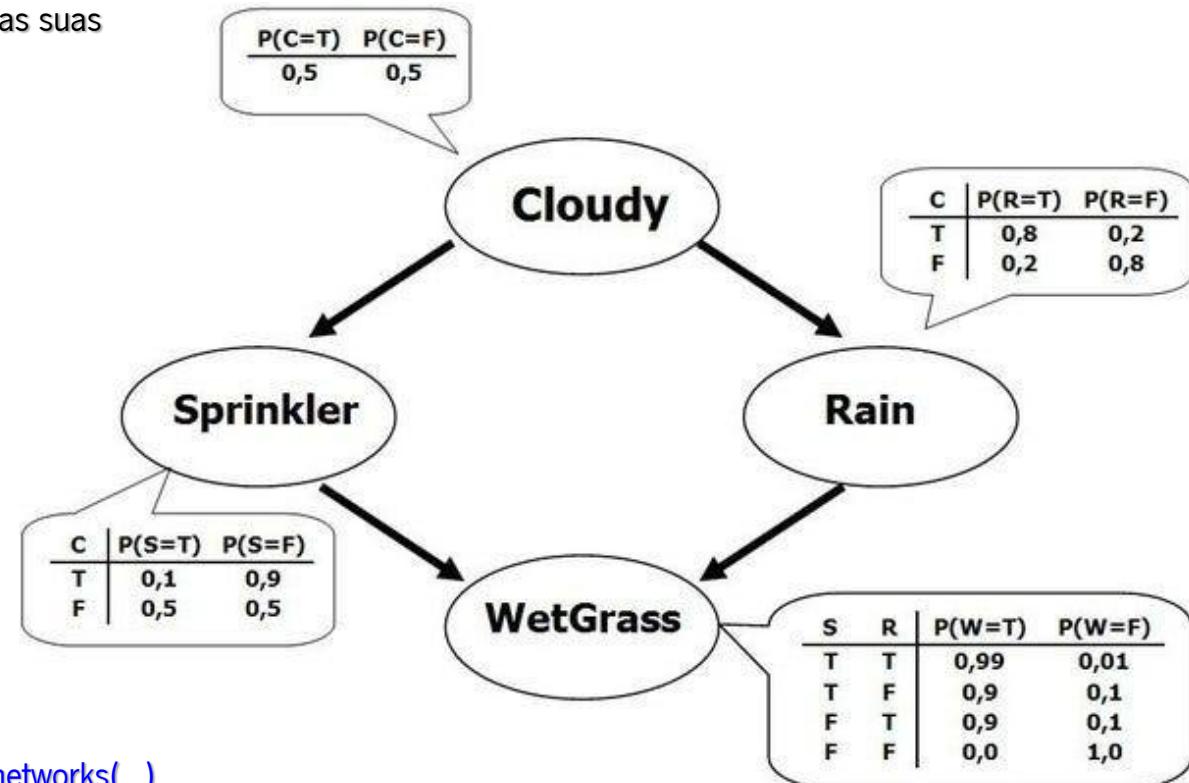
- Termo “cunhado” por Judea Pearl em 1985:
 - Caracterizar a natureza subjetiva dos dados (*inputs*);
 - A confiança de estruturas de Bayes como fundamento para a atualização de dados;
 - A distinção entre conhecimento probabilístico e conhecimento factual.





- Bayesian Networks:

- Bayesian Networks ou Belief Networks;
- uma rede de Bayes é um modelo gráfico de probabilidades, que representa um conjunto de variáveis e as suas independências condicionais;





Algoritmos para Fusão Sensorial

- Aplicações de Bayesian Networks:

- Fusão sensorial;
- Fusão de dados;
- Extração de conhecimento;
- Classificação;
- Processamento de imagem;
- Bioinformática;
- etc.



Algoritmos para Fusão Sensorial

- A **Teoria de Dempster-Shafer** permite considerar a crença que se confere às probabilidades atribuídas para a ocorrência de diversos resultados ou evidências.

Arthur Dempster, Glenn Shafer



Glenn Shafer and Arthur Dempster at Quimper, April 2010



Algoritmos para Fusão Sensorial

- A **Teoria de Dempster-Shafer** permite considerar a crença que se confere às probabilidades atribuídas para a ocorrência de diversos resultados ou evidências.

Arthur Dempster, Glenn Shafer

- é uma teoria matemática de evidências, baseada na avaliação de funções de crença e de raciocínio de plausibilidade, usada para combinar porções distintas de informação (evidências) para calcular a probabilidade de ocorrência de um evento;
- **probabilidade de ocorrência de uma evidência** (qual é a probabilidade de atirar uma moeda e sair cara/coroa?);
- **crença na probabilidade ocorrência de uma evidência** (... e se a moeda estiver viciada?).



Glenn Shafer and Arthur Dempster at Quimper, April 2010



- A **Teoria de Dempster-Shafer** permite considerar a crença que se confere às probabilidades atribuídas para a ocorrência de diversos resultados ou evidências.

Arthur Dempster, Glenn Shafer

- Exemplos:
 - Em cenários de incerteza, em termos probabilísticos:
 - lançar uma moeda ao ar e sair cara ou coroa acontece com um grau de confiança de 50% para cada evidência;
 - sabendo-se que a moeda não está viciada, sair cara ou coroa apresenta exatamente os mesmos valores de confiança: 50%.



Glenn Shafer and Arthur Dempster at Quimper, April 2010



- A **Teoria de Dempster-Shafer** permite considerar a crença que se confere às probabilidades atribuídas para a ocorrência de diversos resultados ou evidências.

Arthur Dempster, Glenn Shafer

- Exemplos:
 - Em cenários de incerteza, a Teoria de Dempster-Shafer tenciona ter capacidade para representar situações caracterizadas, por exemplo, pela ignorância:
 - sem certezas sobre a natureza da moeda, a crença em sair cara é de 0 (zero) (e de sair coroa também é 0 (zero));
 - quando se perceba que a moeda não é viciada, então, a crença em sair cara é de 0,5, tal como a de sair coroa;



Glenn Shafer and Arthur Dempster at Quimper, April 2010

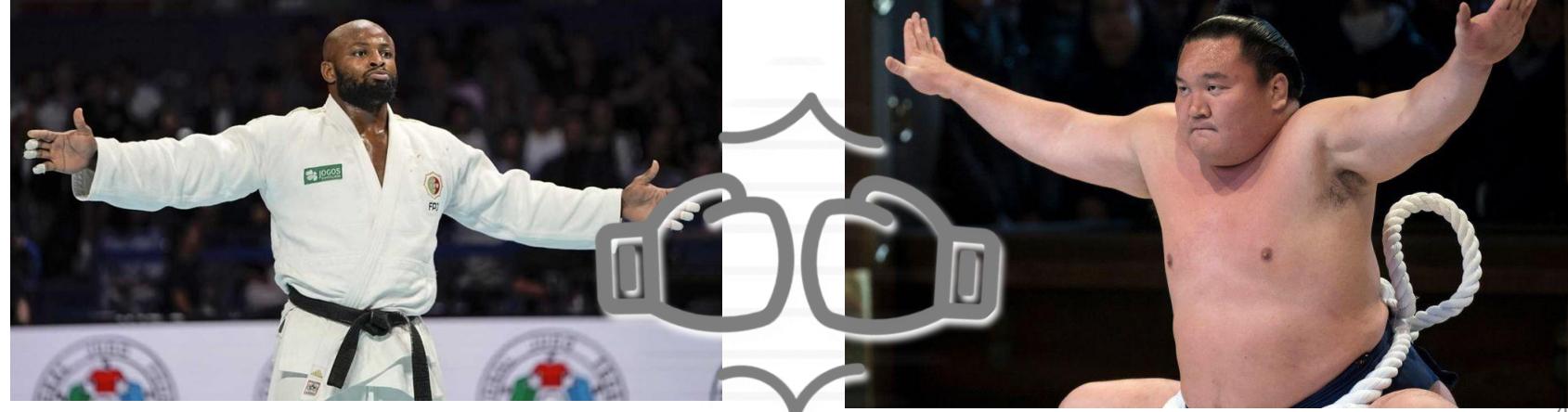


Algoritmos para Fusão Sensorial

- A **Teoria de Dempster-Shafer** permite considerar a crença que se confere às probabilidades atribuídas para a ocorrência de diversos resultados ou evidências.

Arthur Dempster, Glenn Shafer

- Exemplos:
 - Qual a probabilidade de sucesso a atribuir a cada oponente numa luta de boxe entre um lutador de sumo e um judoca?





- Kanagachidambaresan, G.R., "Sensors and SBCs for Smart City Infrastructure", in: Role of Single Board Computers (SBCs) in rapid IoT Prototyping, Internet of Things, Springer, Cham, 2021.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-72957-8_3
- H.B. Mitchell, "Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction", Springer, 2007.
- Boudjemaa , Forbes, "Parameter estimation methods for data fusion", National Physical Laboratory, 2004.
- Durrant-Whyte, "Sensor models and multisensor integration", International Journal of Robotics Research, 1988.
- Judea Pearl, "Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems", Morgan Kaufmann, 1988.

