

# Rede de Sensores Inerciais para Equilíbrio de um Robô Humanóide

Telmo Filipe de Jesus Rafeiro

Universidade de Aveiro

*rafeiro@ua.pt*

15 de Dezembro de 2013

1 - Introdução

2 - Sensores Inerciais

3 - Desenvolvimento da Rede

4 - Validação da Rede de Sensores Inerciais

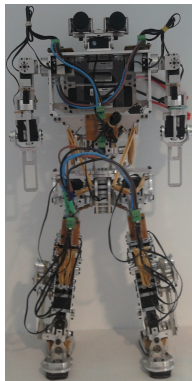
5 - Conclusão e Trabalho Futuro

## Projeto Humanóide da Universidade de Aveiro - PHUA

- Esforço conjunto dos departamentos de Engenharia Mecânica e Engenharia Electrónica, Telecomunicações e Informática.

- Segunda Plataforma:

- 27 Graus de Liberdade;
- Atuação por servomotores *HITEC*®;
- Atuação passiva;
- 65 cm de altura;
- 6 kg.



# Motivação

- Modelo dinâmico do robô humanóide praticamente impossível de obter graças ao elevado número de GDL e folgas.
- A incorporação de elementos sensoriais trará dados que tornarão os modelos dinâmicos necessários menos complexos.

# Objetivos

- Desenvolvimento e concepção de uma rede de sensores inerciais;
- Rede de sensores inerciais deverá ser dotada de modularidade;
- Realização de atividades experimentais de validação dos sensores e da rede;
- Desenvolvimento de *software* de aquisição de dados com recurso à plataforma ROS - *Robot Operating System*.

## Sensor A

### RAZOR 9GDL- SEN 10736

Acelerómetro 3 GDL;

- Medições até  $\pm 16 g$ ;
- Sensibilidade até  $4 \text{ mg/LSB}$ ;

Giroscópio 3 GDL;

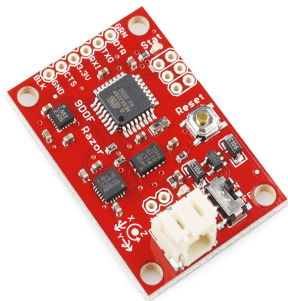
- Medições até  $\pm 2000 \text{ }^\circ/\text{s}$ ;
- Sensibilidade até  $6.96 \text{ mdps/LSB}$ ;

Magnetómetro 3 GDL;

- Medições até  $\pm 8 \text{ Gauss}$ ;
- Sensibilidade até  $2 \text{ mGauss}$ ;

Microcontrolador integrado;

Comunicação por *RS232*.



## Sensor B

### POLOLU - MinIMU9DOF v2

Acelerómetro 3 GDL;

- Medições até  $\pm 16 g$ ;
- Sensibilidade até  $1 mg/LSB$ ;

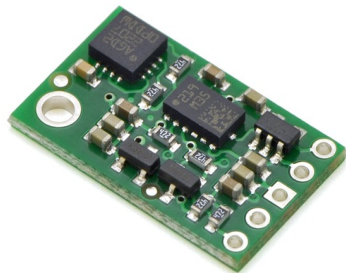
Giroscópio 3 GDL;

- Medições até  $\pm 2000^\circ/s$ ;
- Sensibilidade até  $8.75 mdps/LSB$ ;

Magnetómetro 3 GDL;

- Medições até  $\pm 8 Gauss$ ;
- Sensibilidade até  $1 mGauss$ ;

Comunicação por  $I^2C$ .



## Grandezas dos Sensores

- **Acelerómetro**

aceleração linear;

- **Giroscópio**

velocidade angular;

- **Magnetómetro**

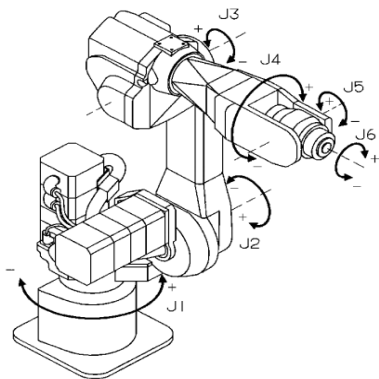
campo magnético (grandeza não inercial).



# Caraterização de Sensores

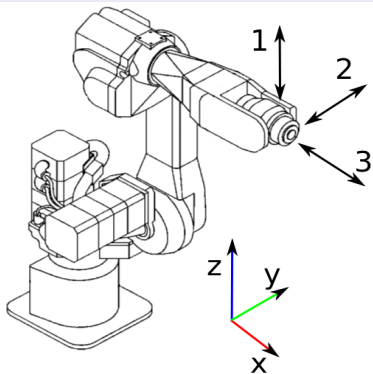
## Braço Robótico *FANUC M-6iB 6s*

- Capaz de manipular objetos até 5kg com elevada precisão.
- Permite a obtenção da própria posição e orientação.
- Ferramenta ideal para a realização de testes com sensores.

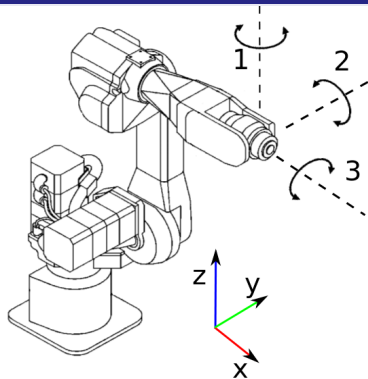


# Movimentos do Braço Robótico

## Translação



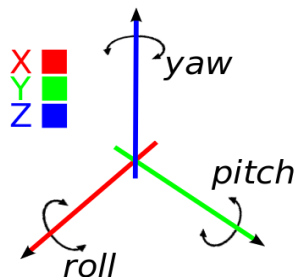
## Rotação



## Obtenção dos Ângulos de *Euler*

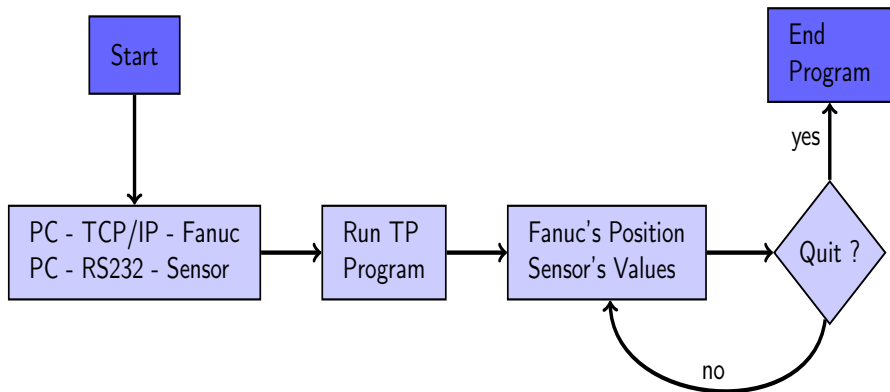
### Sensor acelerómetro.

- Situações consideradas estáticas.
- De relações trigonométricas dos seus eixos, que apenas captam a aceleração gravítica, obtém-se:
  - *roll*;
  - *pitch*.



Representação dos ângulos de *Euler*.

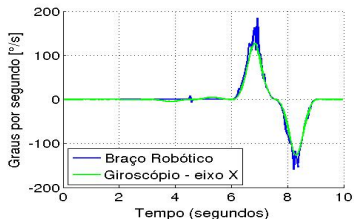
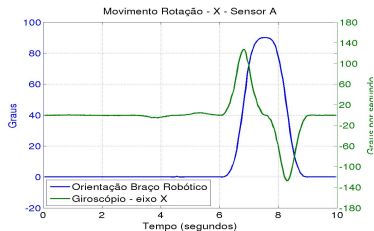
## Aquisição de Dados



Aquisição de dados do braço robótico e sensores realizada a 20Hz.

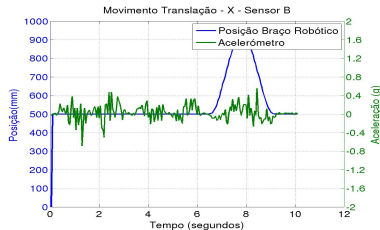
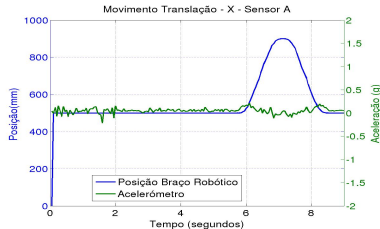
# Giroscópios

- Medições fiáveis perante os movimentos de rotação.
- Observação de pequenas oscilações em movimentos de translação.



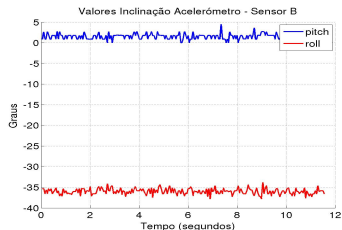
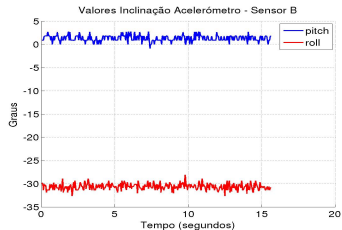
## Acelerômetros

- Em movimentos de translação:
  - Ruído elevado, com origem em:
    - vibrações causadas pelos servomotores do braço robótico;
    - interferência entre eixos dos acelerômetros.
  - Oscilações e valores da aceleração por vezes da mesma ordem de grandeza.



# Acelerômetros

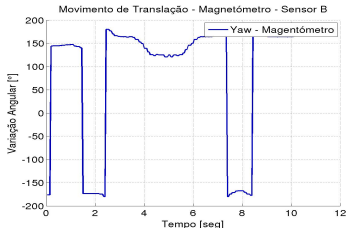
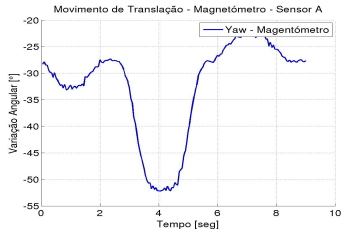
- Inclinações:
  - Medição de inclinações bem sucedida.
  - Inclinações que diferem pelo menos de  $5^\circ$ , são possíveis de distinguir.





# Magnetômetros

- Valores de *Yaw*:
  - Grandes variações de *yaw*, quando deveriam ser constantes.
  - Variações originadas pela interferência da corrente dos servomotores do braço robótico no campo magnético.



## Resultados da caracterização dos sensores

- Unidades inerciais A e B apresentam comportamentos semelhantes.
- Giroscópios fiáveis na medição de velocidade angular e pequenas oscilações em translações.
- Acelerómetro B com ruído ligeiramente superior.
- Acelerómetros em movimentos de translação apresentaram ruído por vezes da mesma ordem de grandeza das acelerações envolvidas nos movimentos.
- Magnetómetros inviabilizados para implementação no robô humanóide.

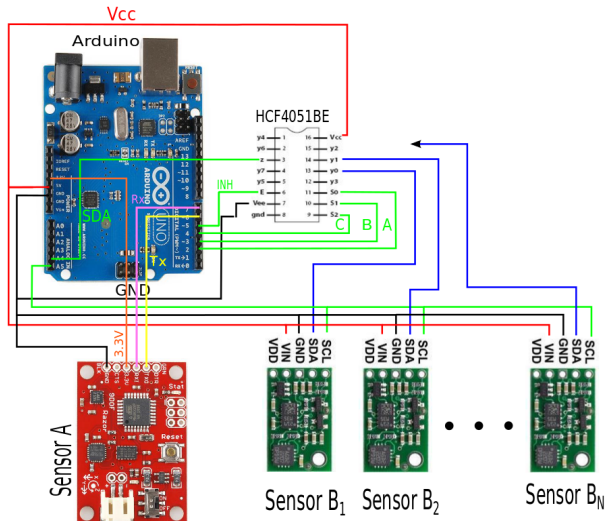
# Rede de Sensores Inerciais

## Seleção de Unidades Inerciais

Com base na caracterização de sensores:

- Rede composta maioritariamente por **Sensores B**.
  - Sensores B com menores dimensões.
  - **Não dispõem de endereço I<sup>2</sup>C configurável.**
  - Utilização de dispositivo de re-direcionamento de comunicação.
  
- Necessidade de uma **unidade de controlo** para realizar leituras dos sensores.

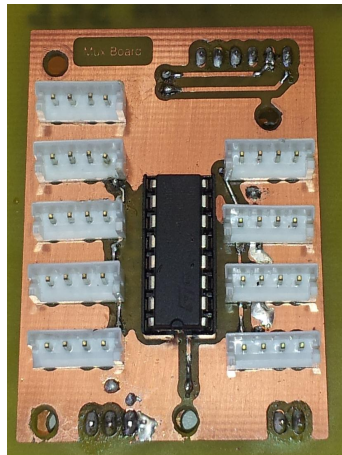
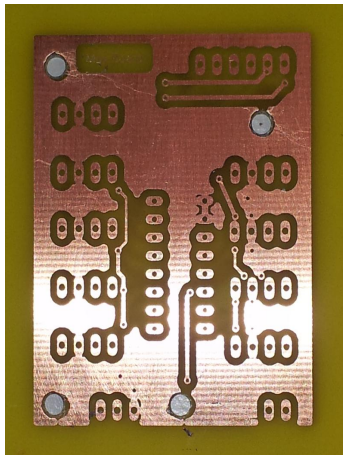
# Ligações da Rede

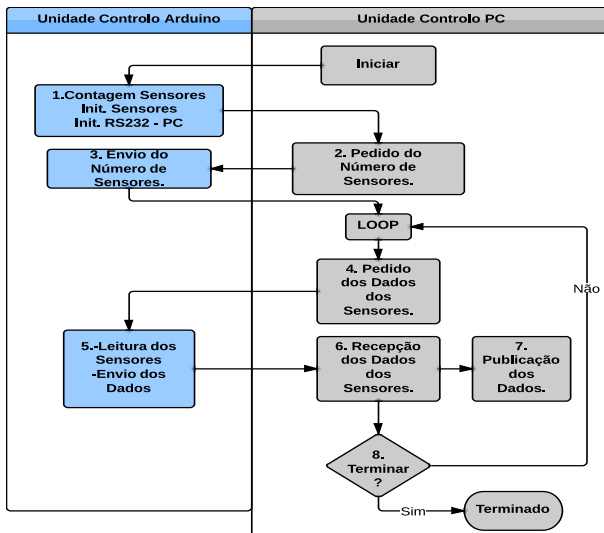


└ Rede de Sensores Inerciais

└ Placa de Circuito Impresso

## Placa de Circuito Impresso





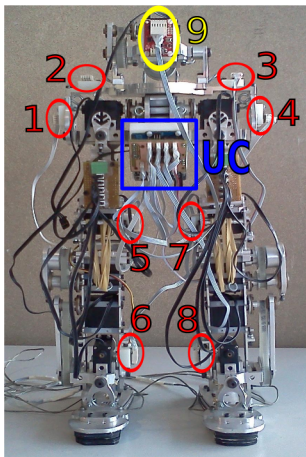
Módulo ROS para aquisição de dados da rede a 7Hz.

## Resultado Final da Rede

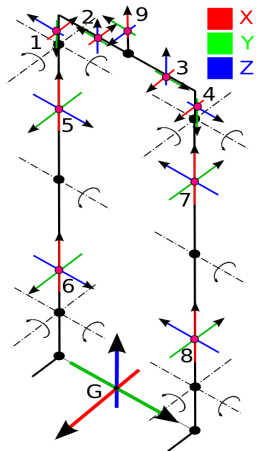
- Rede com um máximo de 9 unidades inerciais;
- Aquisição de dados aproximadamente a uma frequência de  $7Hz$ ;
- Possibilidade de funcionamento com qualquer número de unidades (compreendido de 1 a 9);
- Posicionamento das unidades variável;
- Possibilidade de conexão com qualquer dispositivo externo.



# Implementação da Rede no Humanóide



Rede no Robô Humanóide.

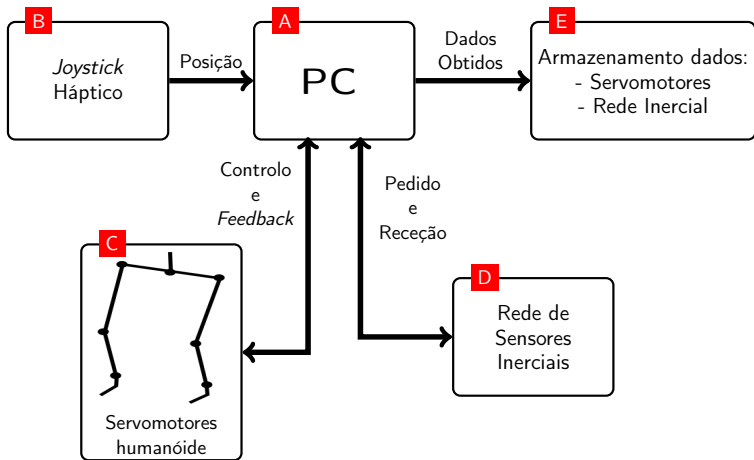


Sistemas Coordenadas das Unidades.

# Validação da Rede de Sensores Inerciais

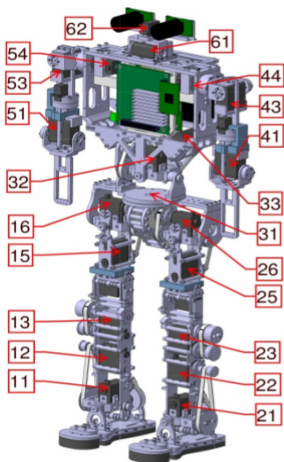
## Setup Experimental

- *Joystick Háptico*;
- parte inferior do robô humanóide;
- rede de sensores inerciais;
- unidade de controlo externa - PC.



Funcionamento da montagem experimental - aquisição e controlo através da plataforma ROS.

## Servomotores Envolvidos em Cada Movimento

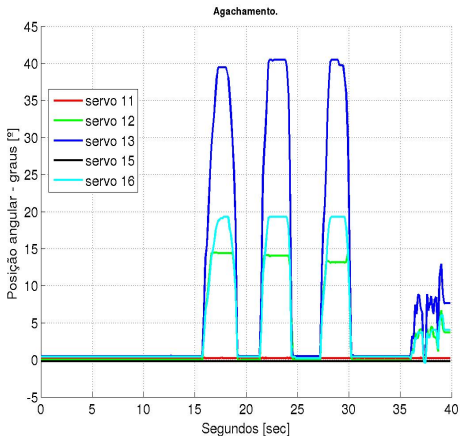


Movimento	Juntas que se movem
1 - Agachamento	12,22,13,23,16,26
2 - Flexão do joelho	13,23,16,26
3 - Movimento lateral	11,21,15,25

Juntas envolvidas para cada tipo de movimento.

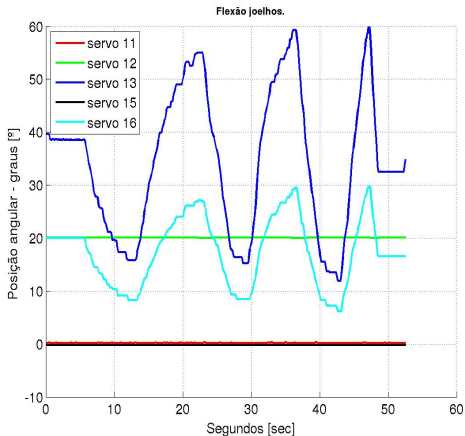
Servomotores do robô humanoide.

# 1 - Agachamento



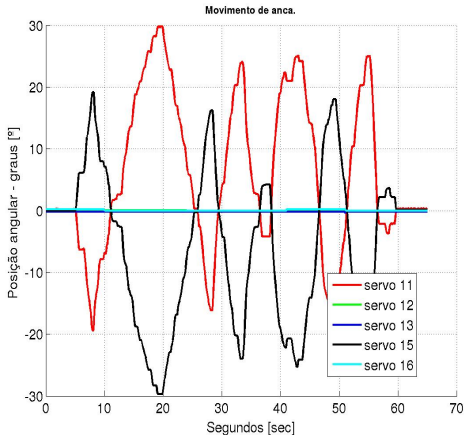
Valor angular dos servomotores no agachamento.

## 2 - Flexão do Joelho



Valor angular dos servomotores na flexão do joelho.

### 3 - Movimento Lateral



Valor angular dos servomotores no movimento lateral.



### Grandezas a avaliar:

- Velocidade Angular
- Aceleração Linear
- Inclinação

### Comparadas com:

- Velocidade dos servomotores
- Cálculos provenientes da cinemática direta das pernas

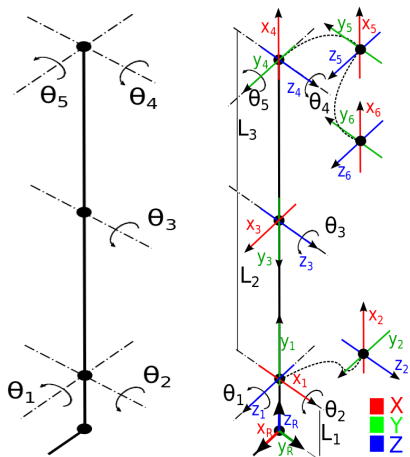
## Velocidade Angular

Zona do tornozelo e tíbia:

- comparação direta entre giroscópio e velocidade do servomotor.

Zonas do joelho e anca:

- comparação entre a velocidade do servomotor e a diferença de velocidades dos giroscópios adjacentes.



Elo	$\theta_i$	$L_i$ (mm)	$d_i$ (mm)	$\alpha_i$
1	$\frac{\pi}{2}$	0	$L_1$	$\frac{\pi}{2}$
2	$\theta_1 + \frac{\pi}{2}$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
3	$\theta_2$	$L_2$	0	0
4	$\theta_3$	$L_3$	0	0
5	$\theta_4$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
6	$\theta_5$	0	0	0

Tabela de *Denavit-Hartenberg* para as pernas do robô humanóide PHUA.

## Aceleração Linear

Comparação direta dos dados dos acelerômetros e a aceleração obtida pelos dados da cinemática direta.

$$d\vec{r} = J \cdot d\vec{q} \quad (1)$$

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = J \cdot \frac{d^2\vec{q}}{dt^2} + \frac{d}{dt}J \cdot \frac{d\vec{q}}{dt} \quad (2)$$

$$\Delta^2 r = J \cdot \Delta^2 q + \Delta J \cdot \Delta q \quad (3)$$

## Inclinação

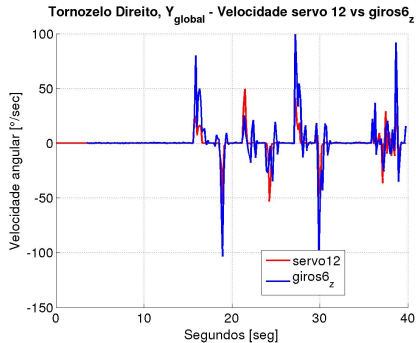
Comparação entre ângulos *roll* e *pitch* obtidos pelos dados dos acelerómetros e obtidos pelos dados da cinemática.

$${}^R T_n = \begin{bmatrix} r_{x,x} & r_{x,y} & r_{x,z} & x \\ r_{y,x} & r_{y,y} & r_{y,z} & y \\ r_{z,x} & r_{z,y} & r_{z,z} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

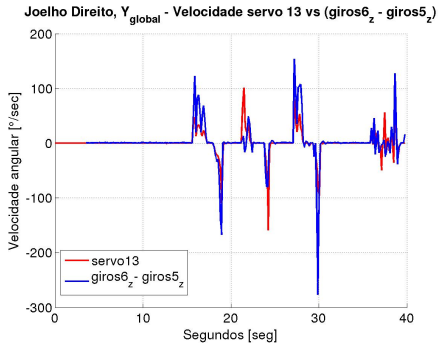
$$pitch = \arctan \left( \frac{-r_{z,x}}{\sqrt{r_{z,y}^2 + r_{z,z}^2}} \right) \quad (5)$$

$$roll = \arctan \left( \frac{r_{z,y}}{r_{z,z}} \right) \quad (6)$$

# Velocidade angular - Agachamento



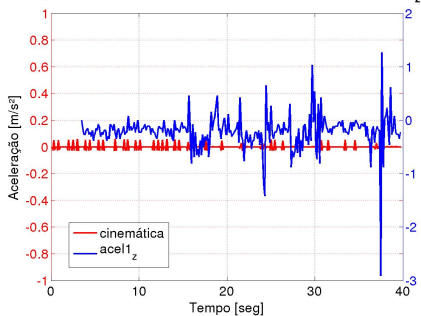
Velocidade angular na zona da tíbia.



Velocidade angular na zona do joelho.

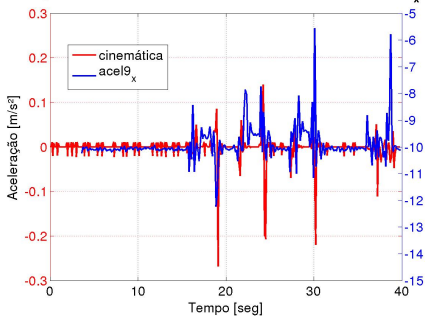
# Aceleração Linear - Agachamento

Agachamento - anca dir. - acel. linear Y - cinemática & acel1<sub>z</sub>



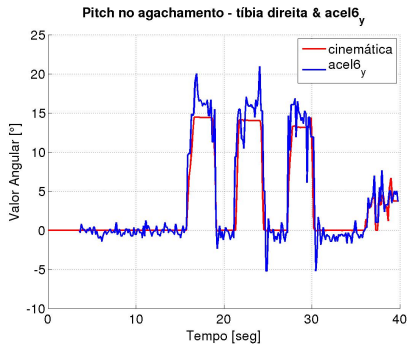
Aceleração linear na zona da anca - acelerómetro 1.

Agachamento - anca dir. - acel. linear Z - cinemática & acel9<sub>x</sub>

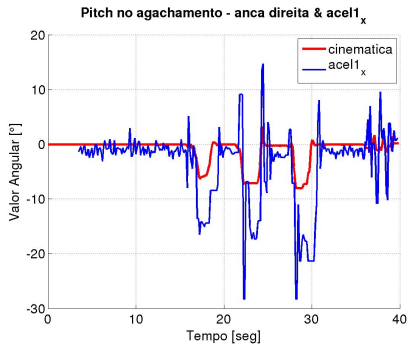


Aceleração linear na zona da anca - acelerómetro 9.

# Inclinação - Agachamento



*Pitch* na zona da tíbia - acelerómetro 6.

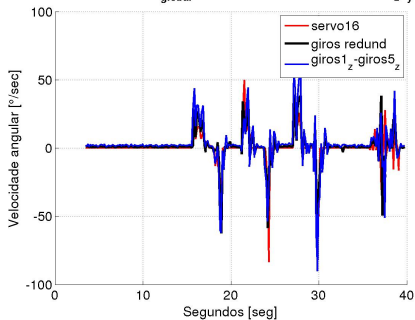


*Pitch* na zona da anca - acelerómetro 1.



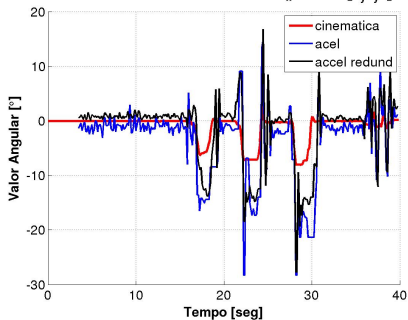
# Redundância Sensorial - Agachamento

Agachamento - anca  $Y_{global}$  - redundância sensorial giros  $(1_z, 2_y, 3_y, 4_z)$



Velocidade angular na anca - redundância.

Pitch no agachamento - anca &  $acel_{1_x}$  &  $(acel_{1_z}, 2_y, 3_y, 4_z)$



*Pitch* na anca - redundância.

## Resultados Obtidos

Situação	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Vel. Ang. Tibia	168.58	0.74	1.42	0.70
Vel. Ang. Joelho	506.19	0.77	1.25	1.15
Acel. Lin. Anca Y	0.15	0.01	0.25	-0.22
Acel. Lin. Anca Z	98.9	0.01	0.19	-9.93
<i>Pitch</i> Tibia	4.64	0.95	1.13	-0.07
<i>Pitch</i> Anca	46.51	0.64	2.14	-0.15
Redund. Vel. Ang.	84.63 *(149.77)	0.67 *(0.63)	0.75 *(0.86)	0.84 *(2.19)
Redund. <i>Pitch</i> Anca	21.27 *(36.37)	0.82 *(0.75)	2.18 *(2.2)	0.73 *(1.28)

Parâmetros de avaliação para as curvas apresentadas.

\* valores para a mesma situação, apenas com 1 sensor.

## Resultados Obtidos

- A técnica da medição da velocidade angular revelou-se bem sucedida, com os padrões dos giroscópios a corresponder aos dos servomotores, embora com amplitudes diferentes.
- Embora as curvas da aceleração linear, por vezes, apresentem comportamentos da mesma natureza face aos valores da cinemática, as amplitudes e ordens de grandeza são completamente díspares.
- Medição das inclinações revelou-se bem sucedida, no entanto, alguns gráficos apresentam disparidades em que apenas a referência da cinemática não é suficiente para justificar.
- A redundância sensorial apresentou pequenas melhorias nos resultados apresentados.

## Conclusões

- Desenvolvimento da rede de sensores inerciais bem sucedido.
- Modularidade da rede bem sucedida.
- Módulo de aquisição de dados da rede desenvolvido.
- Experiência da rede implementada no robô demonstrou esta como funcional:
  - Acelerómetros mostraram-se fiáveis para a medição de amplitudes angulares ou deslocamentos angulares, para situações consideradas estáticas.
  - Giroscópios mostram-se fiáveis nas suas medições.
- Acelerómetros não se encontram, de momento, aptos para o cálculo de deslocamento no espaço cartesiano.
- ROS mostrou-se uma grande ajuda na execução e gestão de processos multi-modulares.

## Trabalho Futuro

- Concepção de nova placa de circuito impresso, fisicamente mais robusta;
- Realização de novos testes para avaliação de acelerómetros, envolvendo maiores acelerações;
- Agilizar *firmware* e *software*, e com possibilidade de *hardware* para maior taxa de aquisição (atualmente a 7 Hz);
- Prosseguir com estudo de algoritmos que recorram aos dados da rede, para o controlo do robô, visando a capacidade de este se equilibrar.
- Testar a implementação de filtros suavizantes nos dados dos sensores da rede.

# Rede de Sensores Inerciais para Equilíbrio de um Robô Humanóide

Telmo Filipe de Jesus Rafeiro

Universidade de Aveiro

*rafeiro@ua.pt*

15 de Dezembro de 2013