

Corso di Percezione Robotica (PRo)

Modulo C. Percezione Attiva

Percezione vestibolare

Cecilia Laschi
ARTS Lab, Scuola Superiore Sant'Anna
cecilia.laschi@sssup.it
050-883486

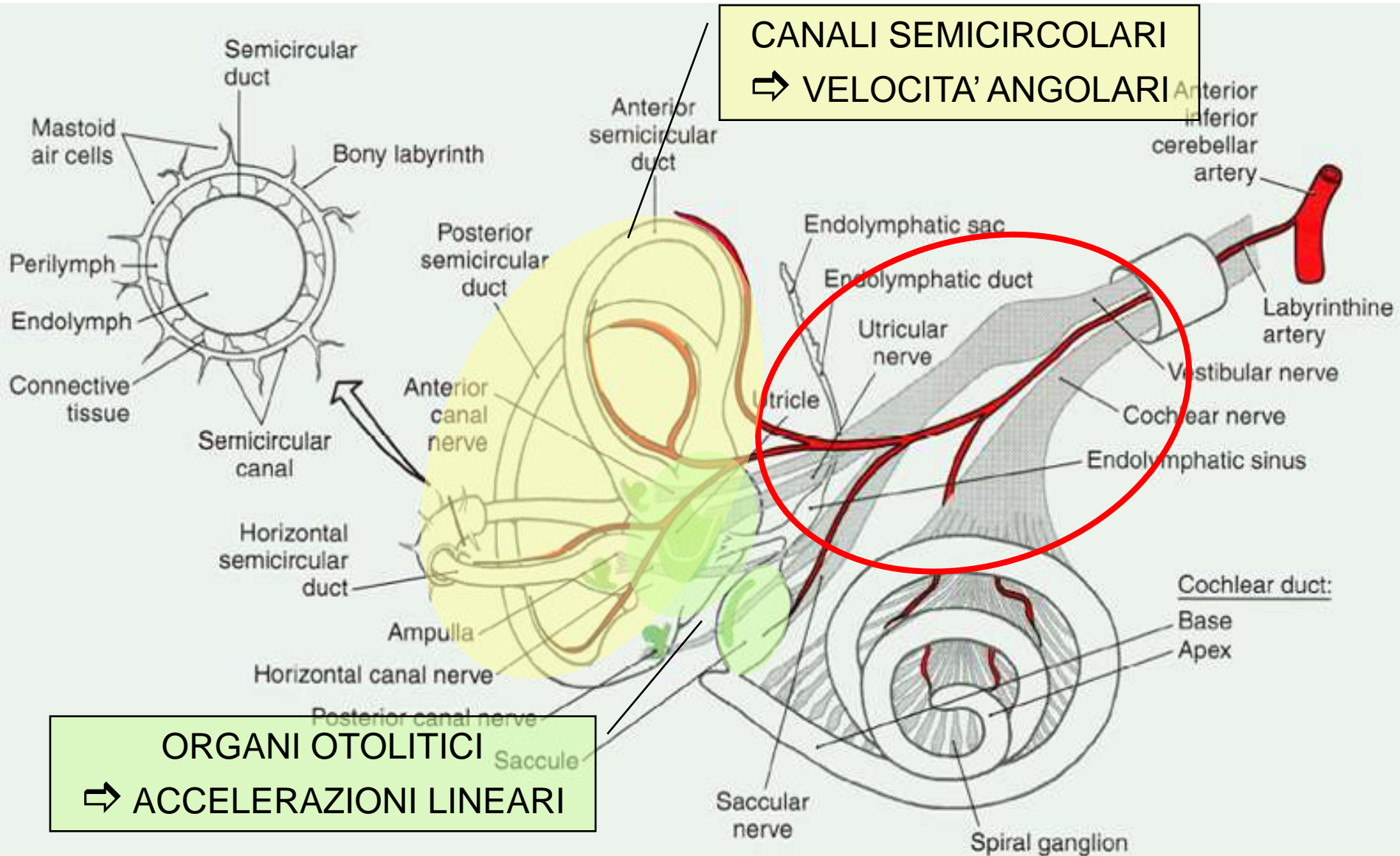
Sommario della lezione

- Il sistema vestibolare nell'Uomo:
 - Funzioni e ruolo del sistema vestibolare nell'Uomo
 - Anatomia e neurofisiologia del sistema vestibolare
- Sistemi vestibolari artificiali
 - Dispositivi sensoriali funzionalmente analoghi:
 - accelerometri
 - giroscopi
- Possibili applicazioni dei sistemi vestibolari artificiali in biorobotica

Sistema vestibolare

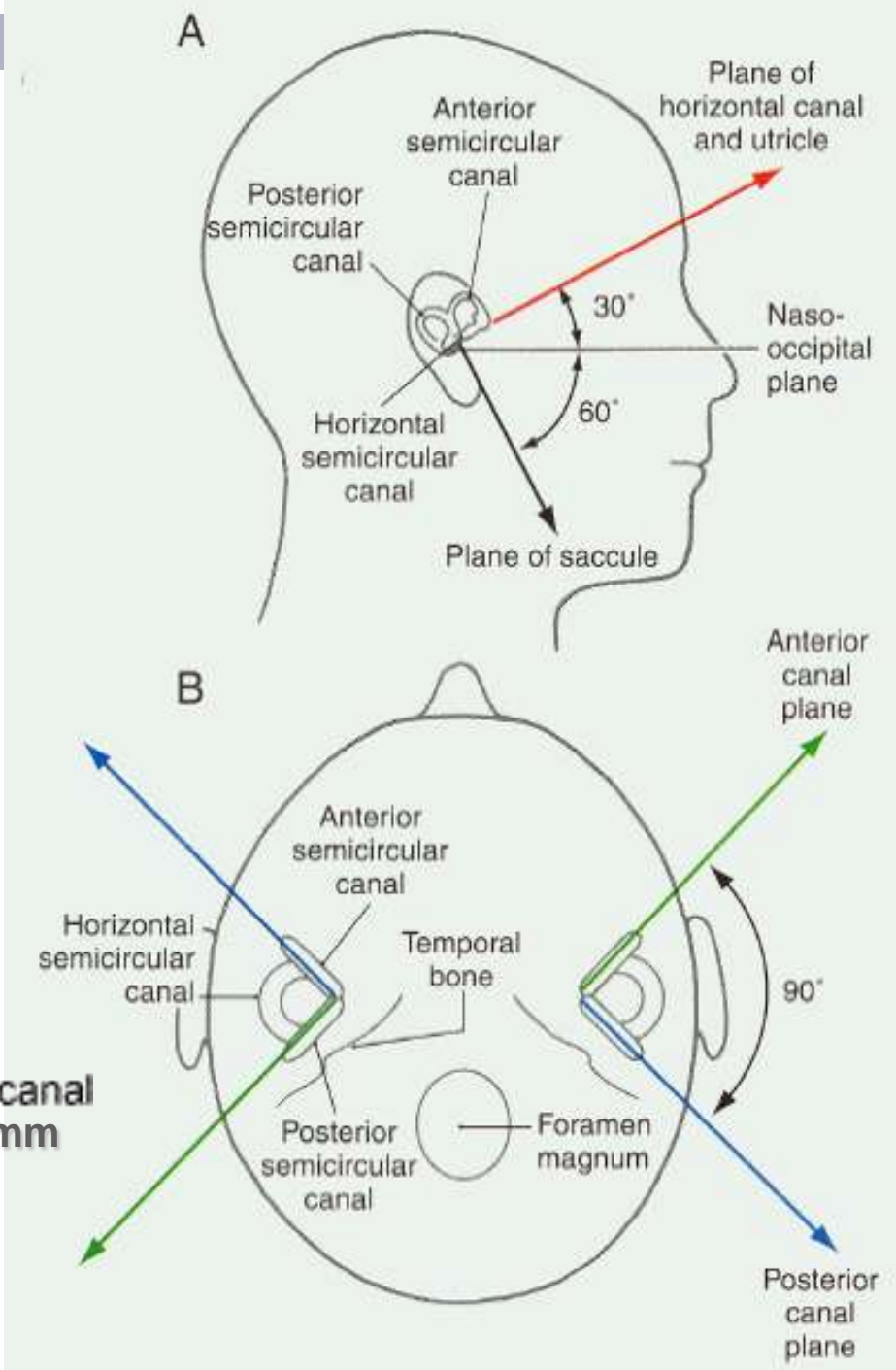
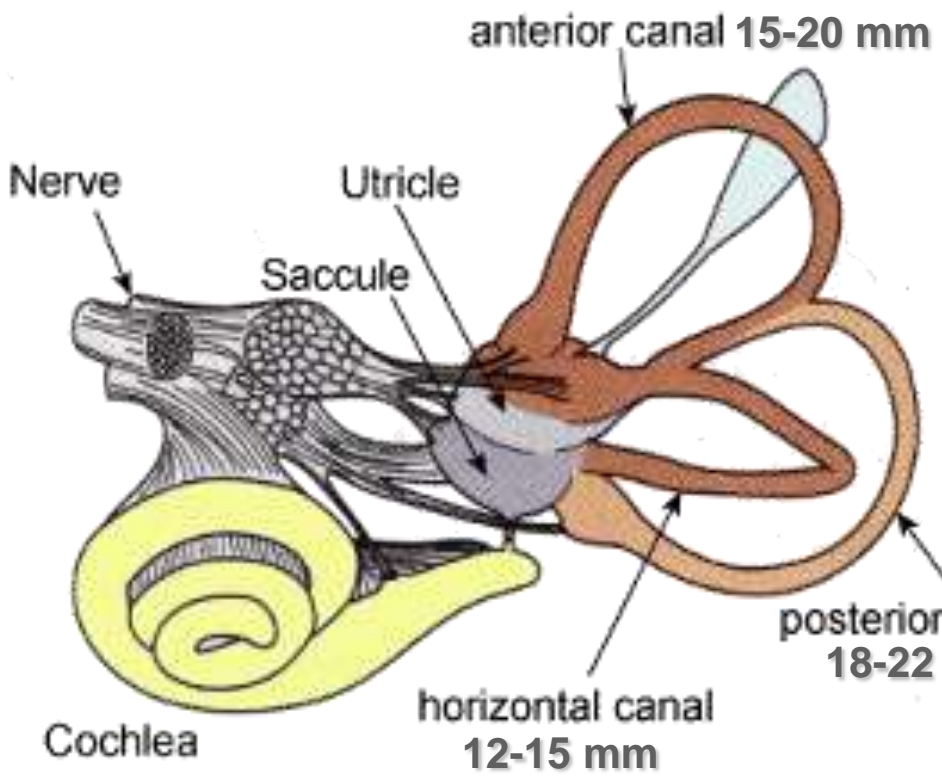
- “Organo dell’equilibrio”
- Sensibile a:
 - movimenti della testa
 - posizione della testa nello spazio
- Misura:
 - velocità angolari
 - accelerazioni lineari
- Ruolo fondamentale, a livello inconscio, in varie funzioni motorie:
 - controllo della postura
 - coordinazione dei movimenti
 - controllo dei movimenti oculari

Il sistema vestibolare umano

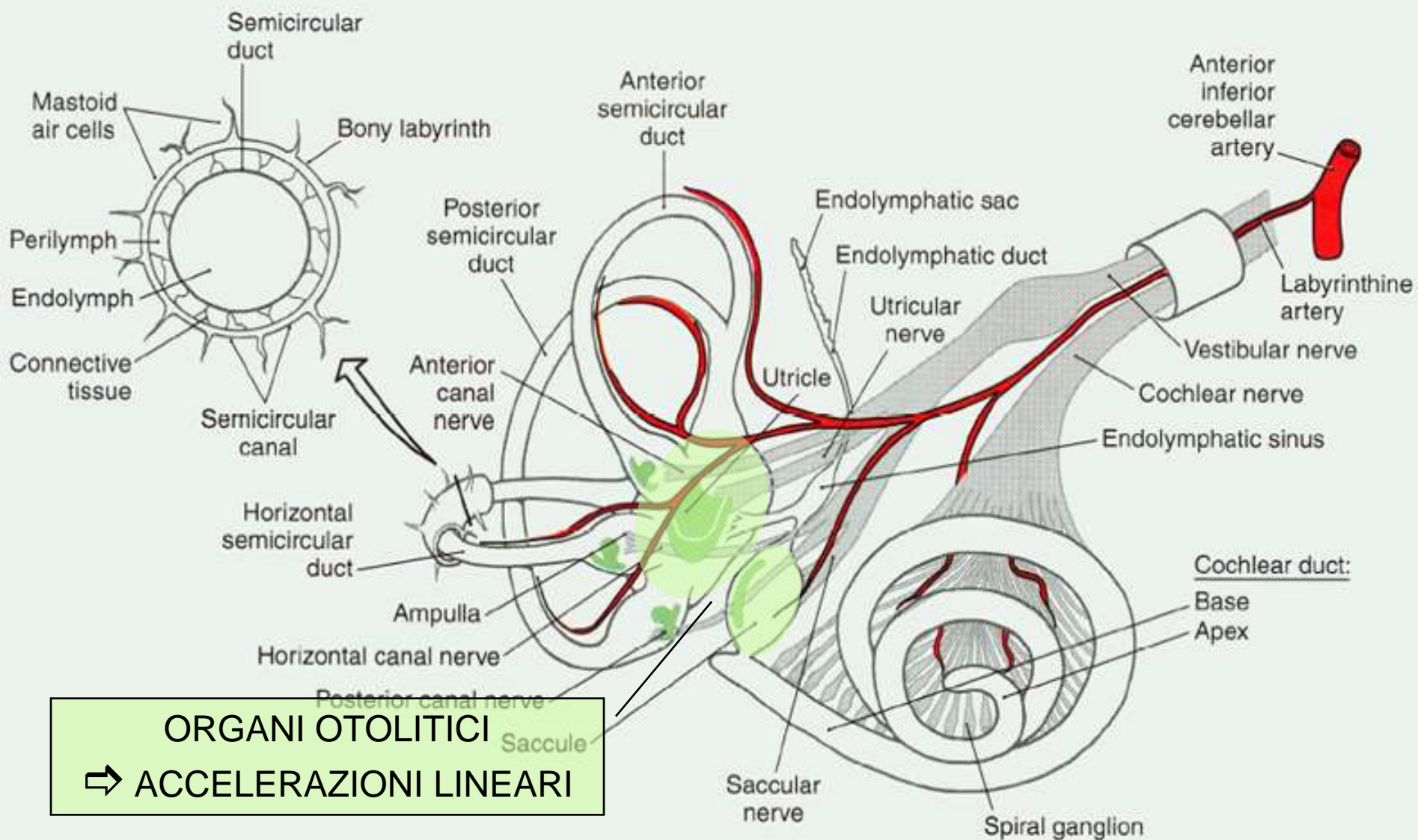


I canali semicircolari

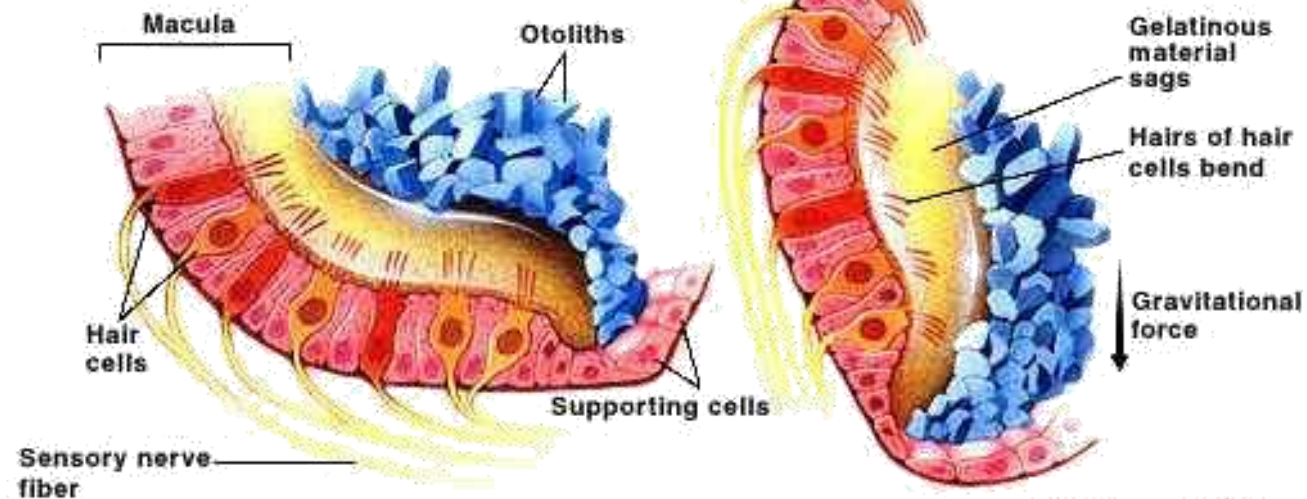
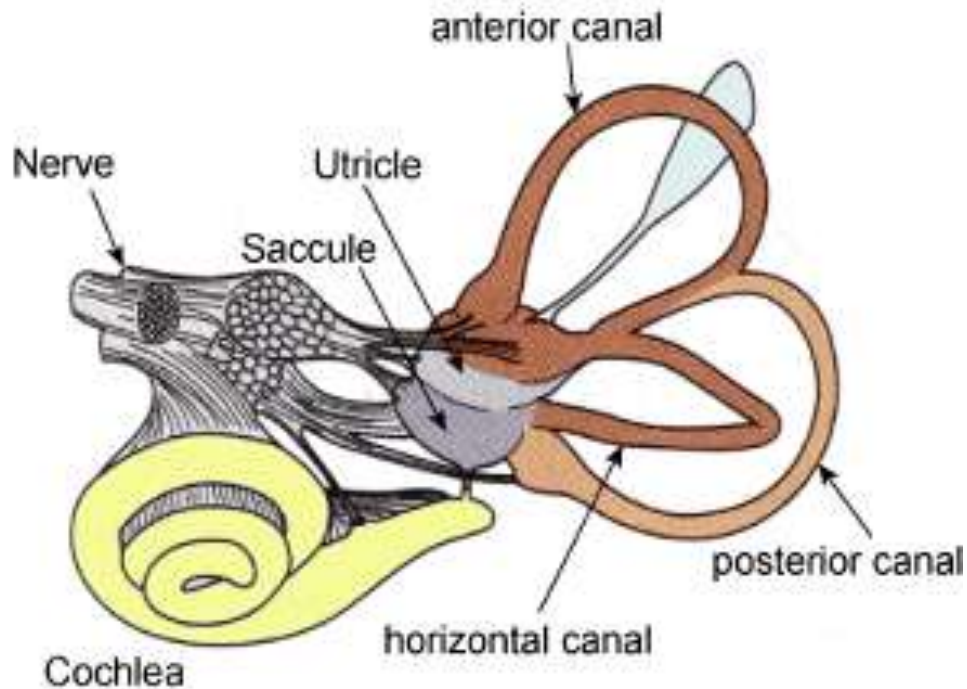
2/3 di circonferenza di diametro 6,5 mm
diametro interno: 0,4 mm



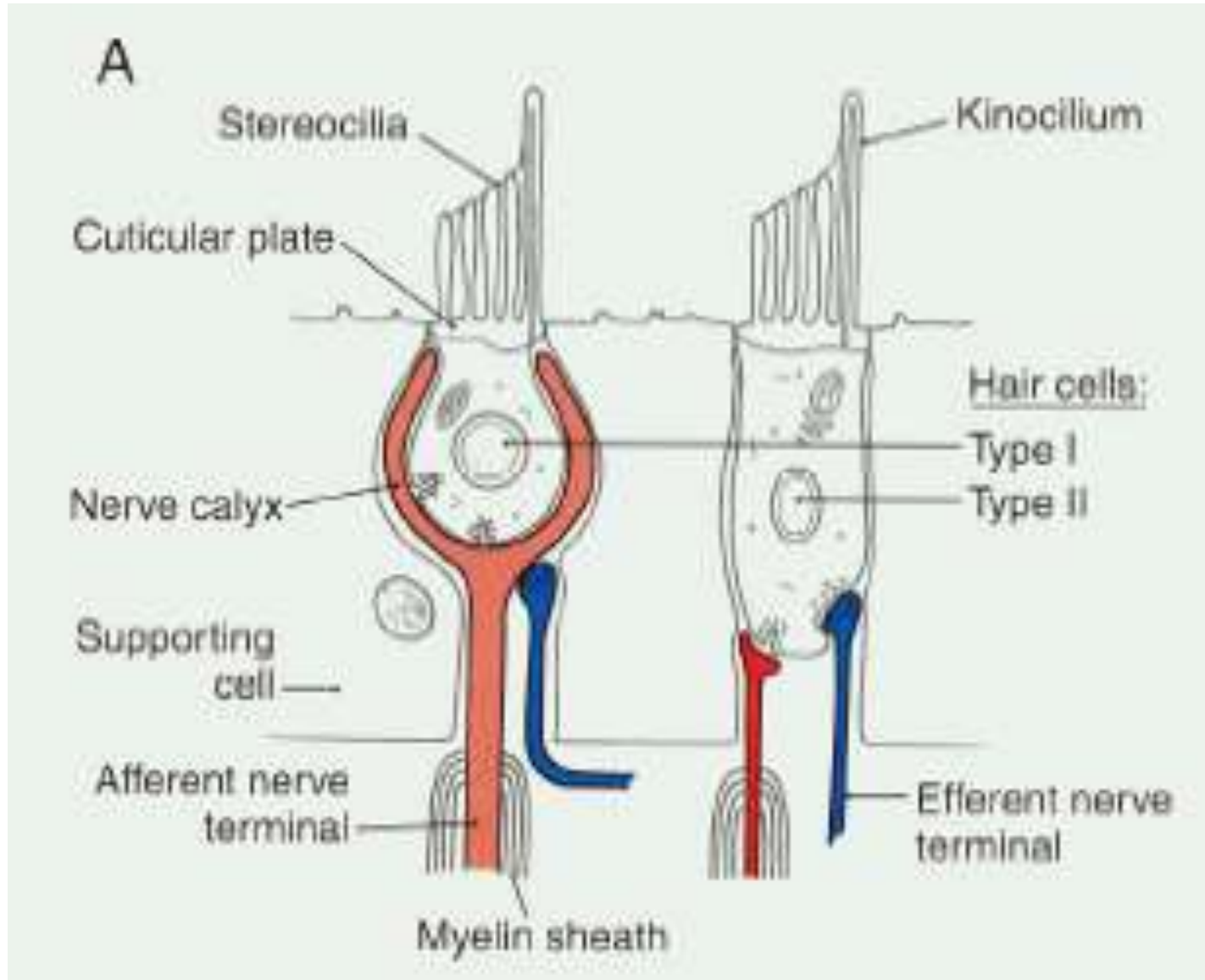
Gli organi otolitici



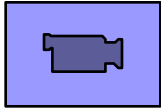
Gli organi otolitici



I recettori vestibolari



I recettori vestibolari



How is motion transduced into neural firing?

The steps are.

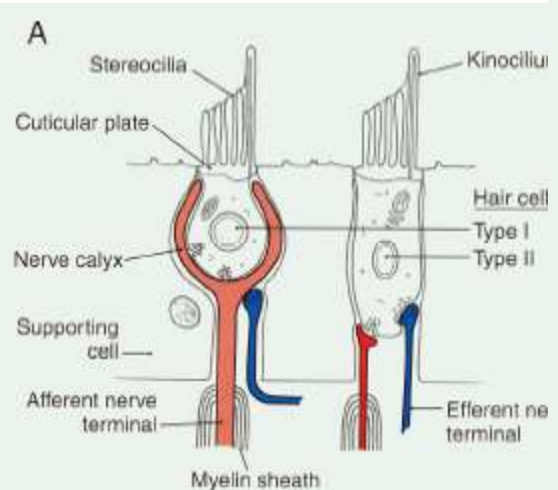
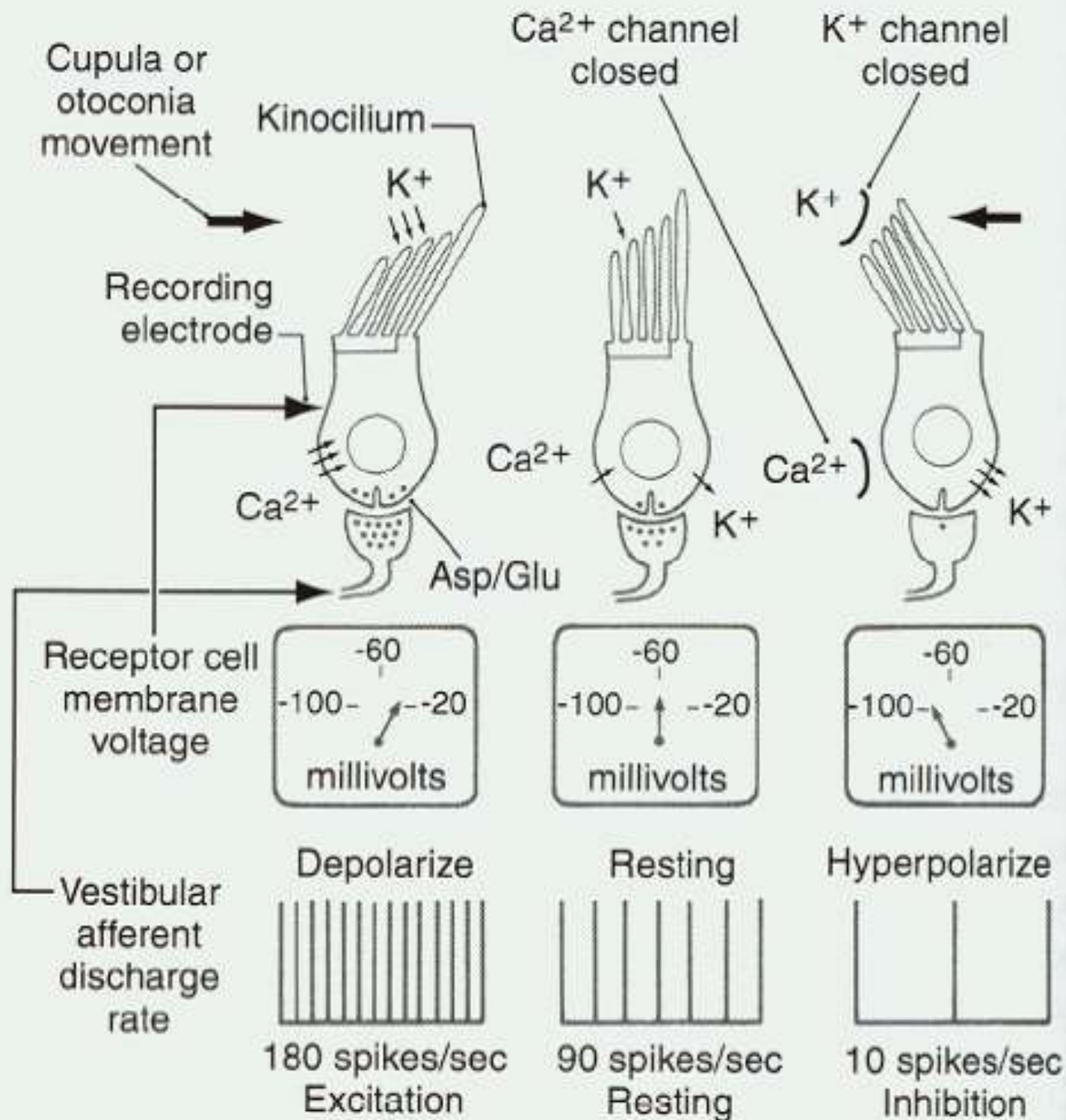
- 1) As in auditory hair cells, motion bends the hairs.
- 2) The filament between adjacent hairs opens ion channels allowing K^+ to enter the hair cell.
- 3) The hair cell depolarizes, releasing neurotransmitter.
- 4) There is an increase in the frequency of AP's in the bipolar 8th nerve afferent.



Start Labyrinth Otoliths Canals VOR Dizzy Plasticity End



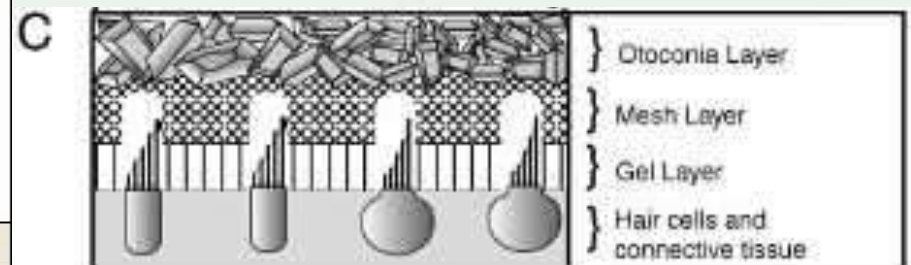
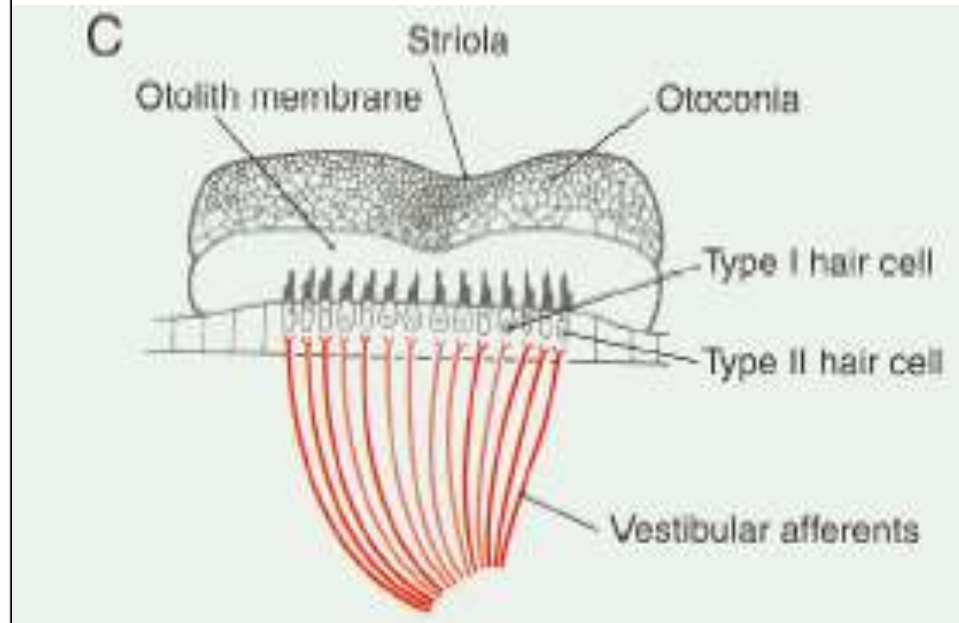
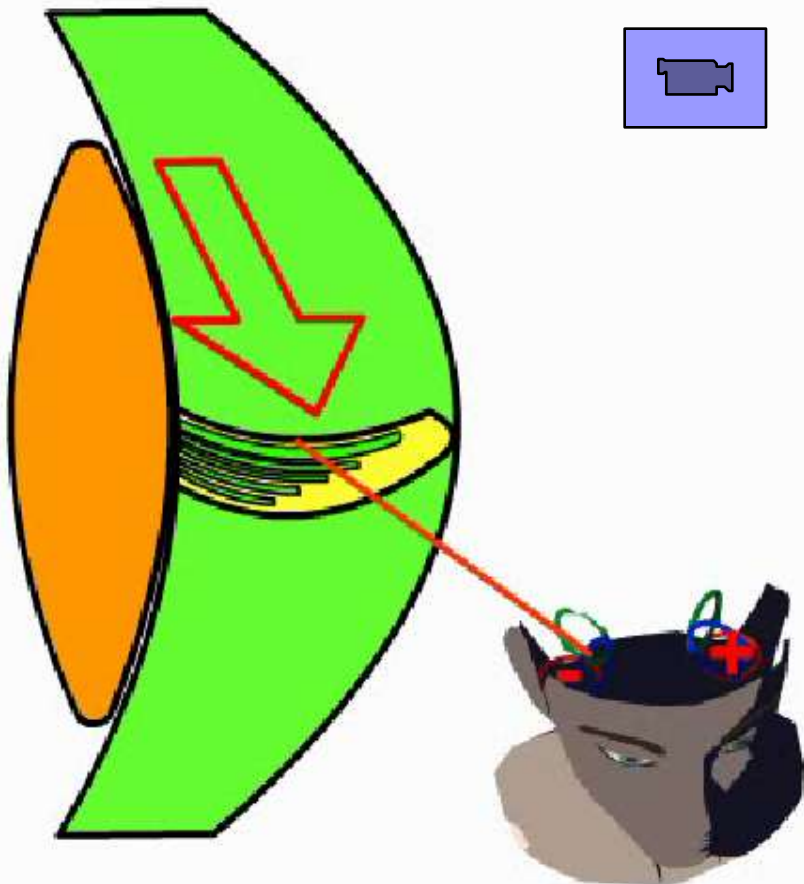
I recettori vestibolari



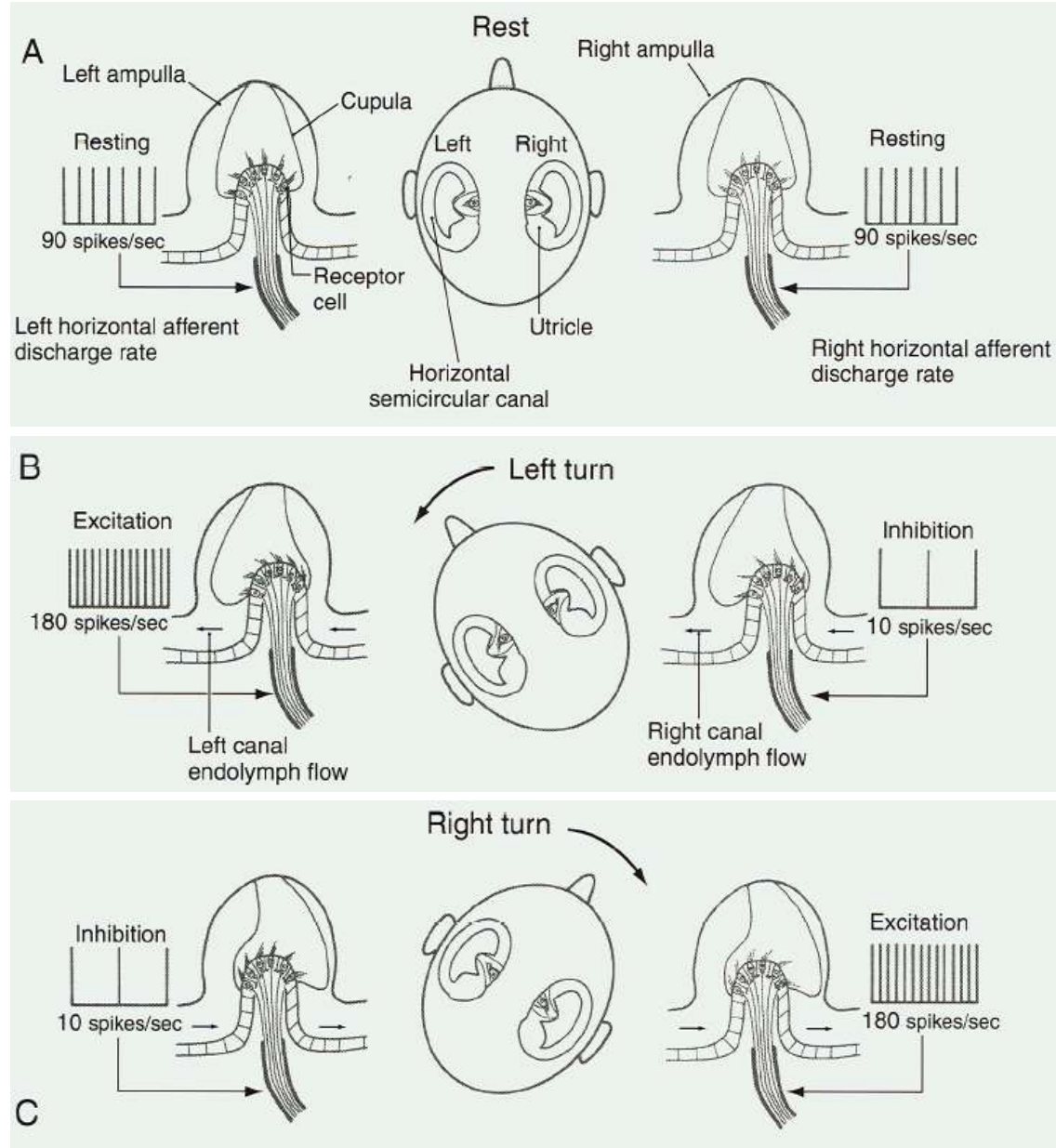
I recettori vestibolari nei canali semicircolari e negli organi otolitici

■ Canali semicircolari

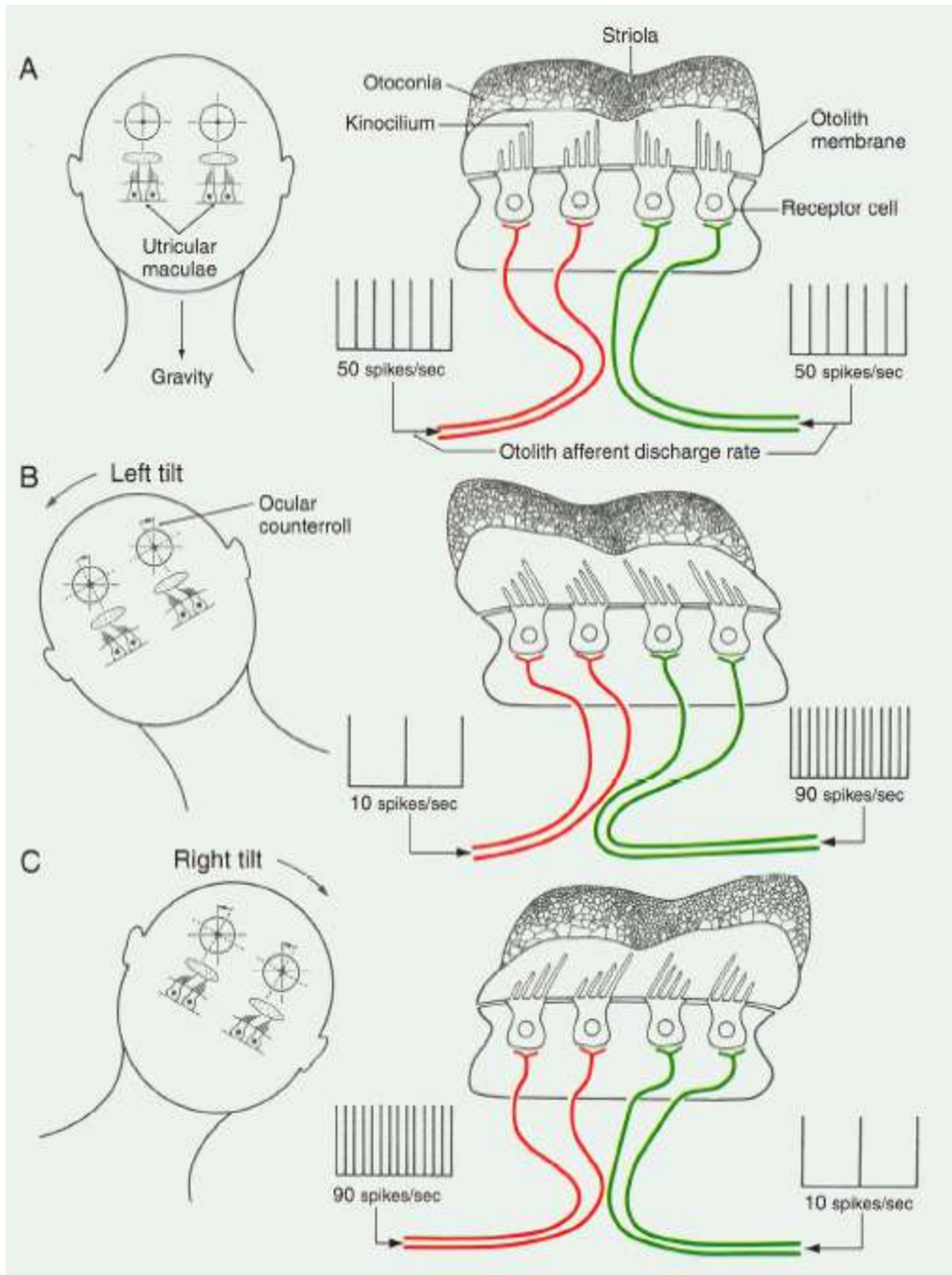
■ Organi otolitici



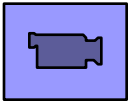
Meccanismo di risposta dei canali semicircolari alle rotazioni della testa



Meccanismo di risposta degli organi otolitici alle inclinazioni della testa



Human Vestibular System



Canals work in pairs.

The canals are arranged such that each canal has a partner on the other side of the head.

When one partner is maximally excited, the other is maximally inhibited.

This is called push-pull organization.

When the head rotates rightward, excitation occurs in the right horizontal canal on the right side of the head and inhibition occurs in the left.

The anterior canal on one side and the posterior on the other also form push-pull pairs.



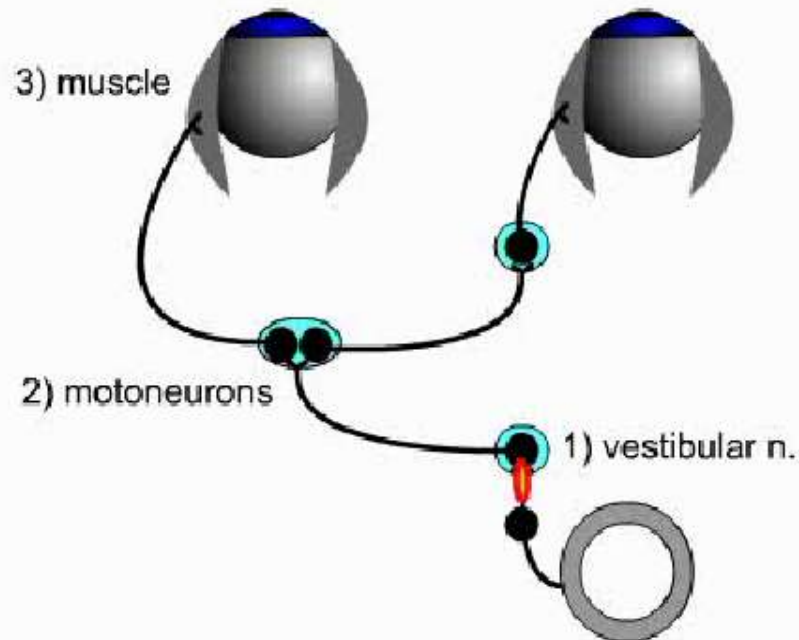
Start Labyrinth Otoliths Canals VOR Dizzy Plasticity End



Il Riflesso Vestibulo-Oculare (VOR)

Explain the neural mechanism for a horizontal VOR.

The direct path is a short reflex with 3 synapses.



Start Labyrinth Otoliths Canals VOR Dizzy Plasticity End



Il Riflesso Vestibulo-Oculare (VOR)

Explain the neural mechanism for a horizontal VOR.



When the head rotates rightward the following occurs.

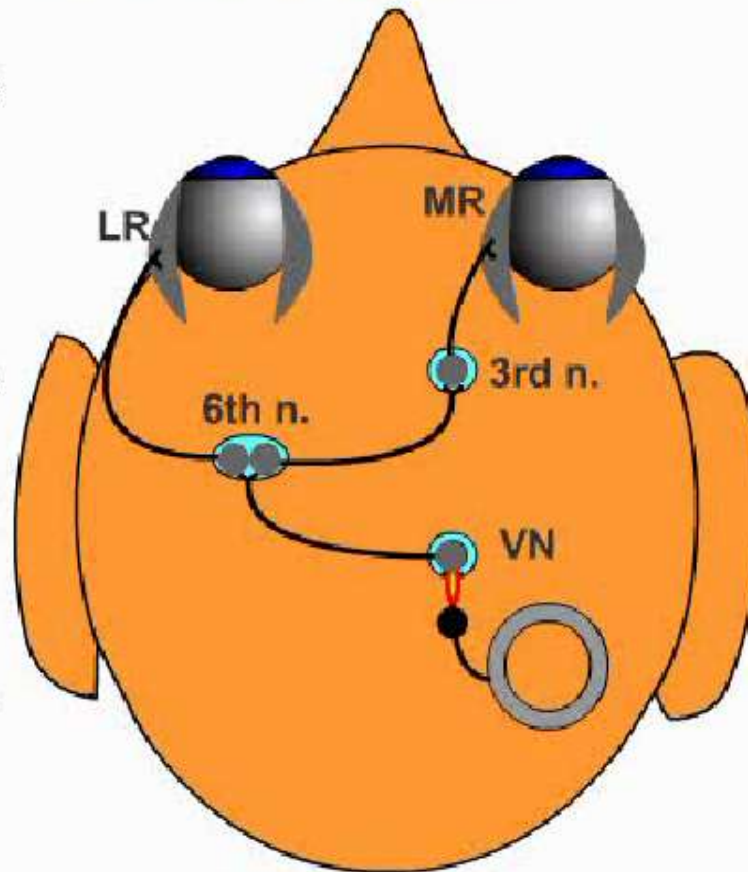
The right horizontal canal hair cells depolarize.

The right vestibular nucleus (VN) firing rate increases.

The motoneurons (in the right 3rd and left 6th nuclei) fire at a higher frequency.

The left lateral rectus (LR) extraocular muscle and the right medial rectus (MR) contract.

Both eyes rotate leftward.



Start Labyrinth Otoliths Canals VOR Dizzy Plasticity End



Il Riflesso Vestibulo-Oculare (VOR)

Explain the neural mechanism for a horizontal VOR.

The VOR is a push-pull reflex.
Neurons on other side do the opposite.

When the **head rotates rightward** the following occurs.

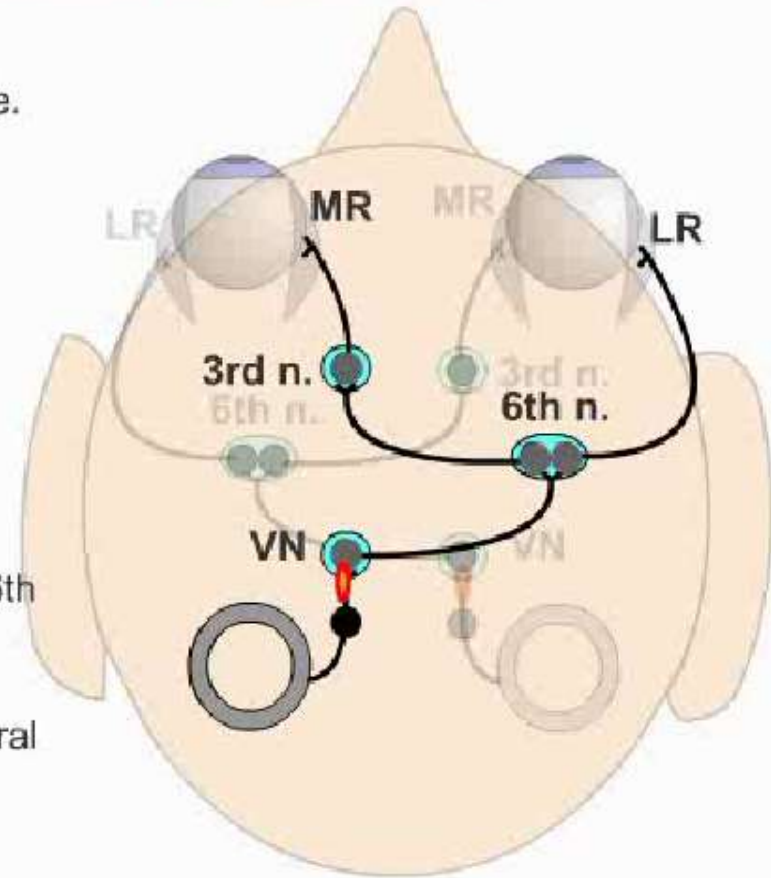
The left horizontal canal hair cells hyperpolarize.

The left vestibular nucleus firing rate decreases.

Motor neurons in the left 3rd and right 6th nuclei fire at a lower frequency.

The left medial rectus and the right lateral rectus relax.

This helps the **eyes rotate leftward**.



Sommario della lezione

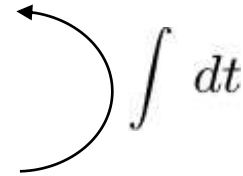
- Il sistema vestibolare nell'Uomo:
 - Funzioni e ruolo del sistema vestibolare nell'Uomo
 - Anatomia e neurofisiologia del sistema vestibolare
- **Sistemi vestibolari artificiali**
 - **Dispositivi sensoriali funzionalmente analoghi:**
 - accelerometri
 - giroscopi
- Possibili applicazioni dei sistemi vestibolari artificiali in biorobotica

Quantità cinematiche

■ Posizione

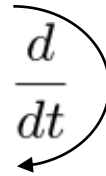
- $x(t); \theta(t)$

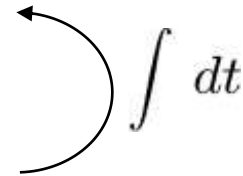
A curved arrow pointing downwards, containing the mathematical expression $\frac{d}{dt}$.

A curved arrow pointing upwards, containing the mathematical expression $\int dt$.

■ Velocità

- $v(t); \omega(t)$

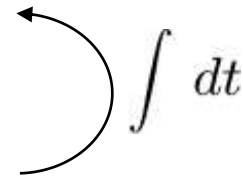
A curved arrow pointing downwards, containing the mathematical expression $\frac{d}{dt}$.

A curved arrow pointing upwards, containing the mathematical expression $\int dt$.

■ Accelerazione

- $a(t); \alpha(t)$

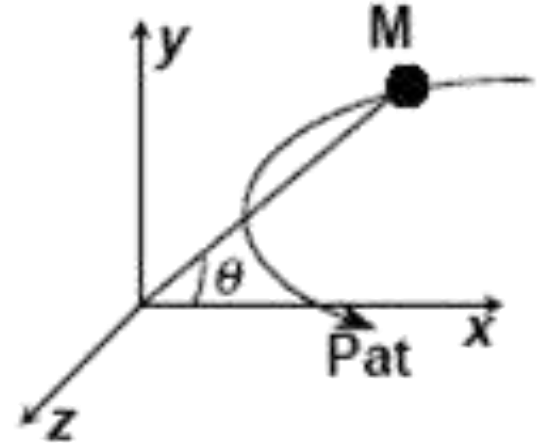
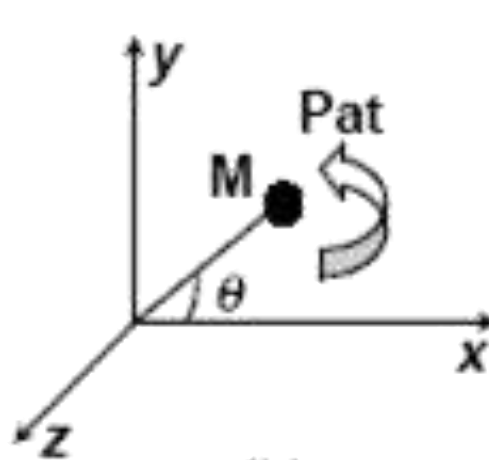
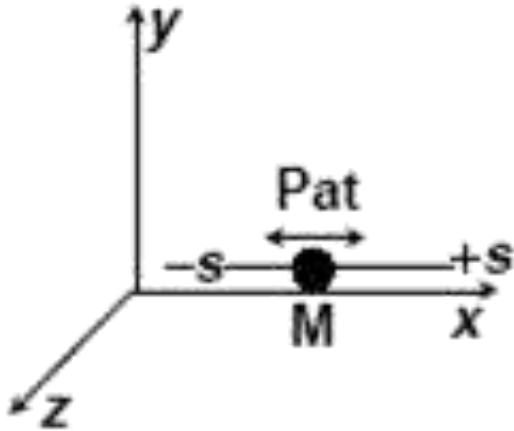
A curved arrow pointing downwards, containing the mathematical expression $\frac{d}{dt}$.

A curved arrow pointing upwards, containing the mathematical expression $\int dt$.

■ Jerk

- ...

Tipi di moto



■ Rettilineo:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(ds/dt)}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$$

■ Angolare:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d(d\theta/dt)}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

■ Curvilineo:

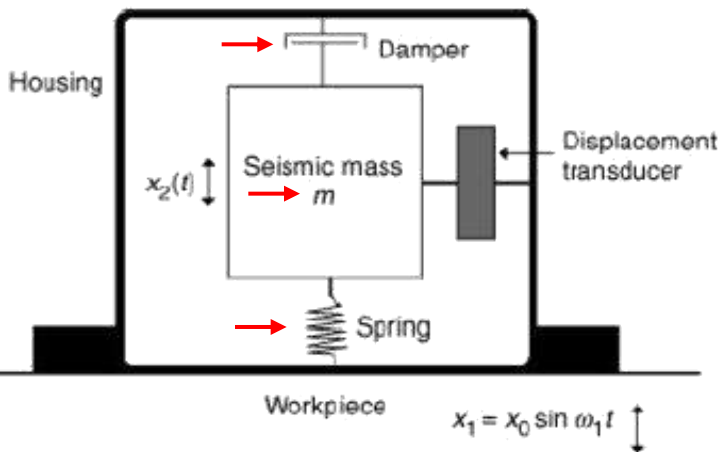
$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}\mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\mathbf{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\mathbf{k}$$

Misura dell'accelerazione

- Metodi DIRETTI: si utilizzano **accelerometri**
 - Preferibili in caso di moti rettilinei o angolari
- Metodi INDIRETTI: si deriva la velocità
 - Preferibili in caso di moti curvilinei

Principio di funzionamento generale tipico degli accelerometri

- La vibrazione è un fenomeno meccanico caratterizzata da un moto oscillatorio periodico attorno a una posizione di riferimento



- Un accelerometro è un dispositivo costituito da:

- Massa m (*seismic mass*)
- Elemento di supporto con caratteristiche elastiche (*springlike system*)
- Elemento smorzatore (*damper*)

- Capace di rilevare le forze esterne (compresa $E_{gravità}$) agenti sul sistema attraverso l'inerzia della massa interna sottoposta all'accelerazione e spostata proporzionalmente dalla posizione di riposo

- Un sensore traduce lo spostamento in segnale elettrico acquisibile dal sistema di misura

$$f(t) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c \frac{dz}{dt} + kz = mg \cos(\theta) - m \frac{d^2 x_1}{dt^2}$$

$$z = x_2 - x_1$$

$$\theta = \text{angolo rispetto alla gravità}$$

Classificazione e Tecnologie per accelerometri

Classificazione degli accelerometri sulla base del principio di funzionamento del sensore usato per la rilevazione dello spostamento

Principali Tecnologie

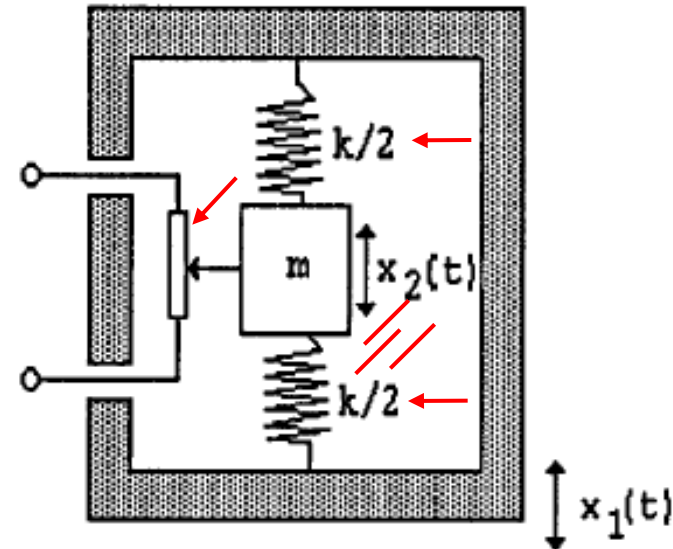
- Inerziali e meccaniche
- Piezoelettriche
- Piezoresistive: accelerometri a Strain - Gauges
- Capacitive
- Induttive (LVDT)
- Micro- e nano-fabbricazione

Accelerometri Meccanici

- **Sistema Massa - Molla - Smorzatore + sistema meccanico per la trasduzione esterna**

Accelerometro Potenzimetrico

- La massa sismica è fissata alla struttura con due molle
 - L'elemento smorzatore (*damper*) è costituito da un liquido viscoso che interagisce con la massa in movimento
 - Il potenziometro fissato alla massa tramite uno dei terminali legge gli spostamenti come una variazione della resistenza
- Bassa frequenza di operazione (< a 100 Hz)
 - Soprattutto per le accelerazioni con variazioni lente e vibrazioni a bassa frequenza
 - Range dinamico tipico: $\pm 1g$ to $\pm 50g$ fs.
 - Frequenze naturali: 12 - 89 Hz,
 - Rapporto di smorzamento ζ : 0.5 - 0.8
 - Resistenza del potenziometro: 1000–10000 Ω
 - Risoluzione corrispondente: 0.45–0.25% fs.
 - Sensibilità cross-assiale: $< \pm 1\%$.
 - Accuratezza: $\pm 1\%$ fs a temperatura ambiente
 - Dimensioni: 50mm³ (<0.1 gr.)



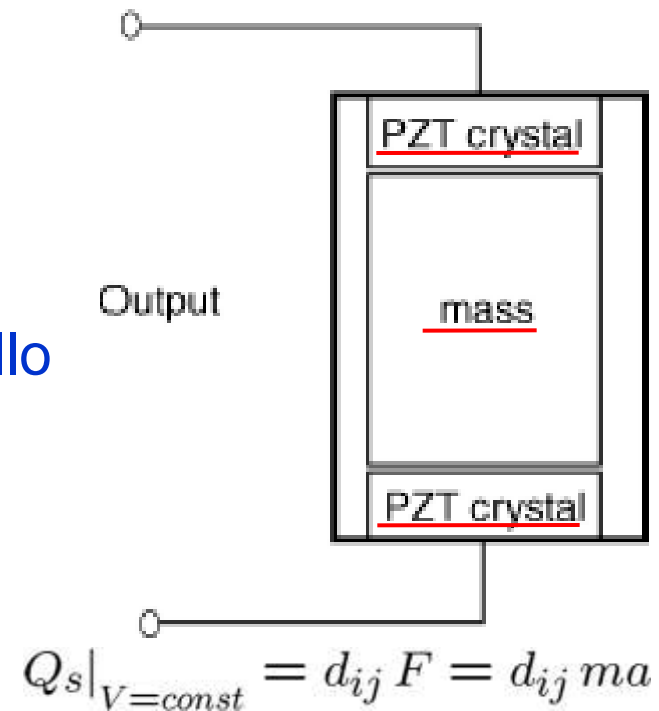
Accelerometri Piezoelettrici

Effetto Piezoelettrico: generazione di una differenza di potenziale con flusso di cariche ai capi di un cristallo sottoposto a stress meccanico

■ Massa Sismica a contatto diretto con Cristallo Piezoelettrico

- Il cristallo, o altro elemento piezoelettrico, funziona sia da sensore che da elemento elastico di supporto alla massa
- La forza esterna causa uno spostamento della massa che agisce comprimendo il cristallo
- La compressione del cristallo induce direttamente la produzione di un segnale elettrico proporzionale

conversione diretta di energia meccanica in energia elettrica



$$Q_s|_{V=const} = d_{ij} F = d_{ij} ma$$

F : forza agente sul sistema

d_{ij} : costante piezoelettrica

Q_s : carica generata

Accelerometri Piezoelettrici

■ Caratteristiche

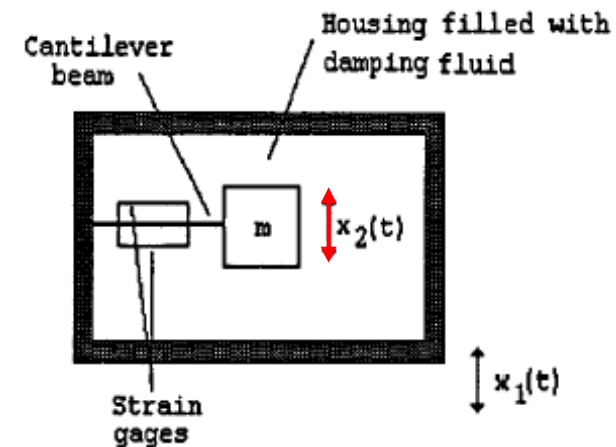
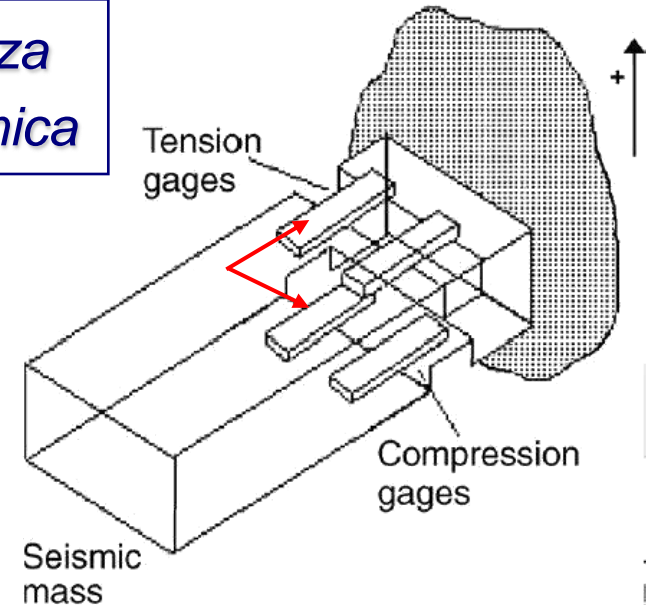
- Elevata linearità
- Utili soprattutto per applicazioni ad alte frequenze (*f lavoro* 2Hz - 5 KHz)
- Dimensioni ridotte (3 x 3 mm, ~ 0.5 g, cavi inclusi)
 - Strutture miniaturizzate integrate: anima in silicone e deposito di un sottile strato di titanato conduttivo
- Ampio range di temperature (fino a 120°)
- Resistenza a radiazioni (applicazioni in reattori nucleari)
- Buona reiezione al rumore
- Non rilevano accelerazioni continue o statiche
- Elementi sensibili: Cristalli di Quarzo o Ceramiche Conduttive (Titanato di Bario, Zirconite Titanato conduttivo - PZT, Metaniobite conduttiva)

Accelerometri Piezoresistivi

Effetto Piezoresistivo: variazione della resistenza elettrica in seguito ad una deformazione meccanica

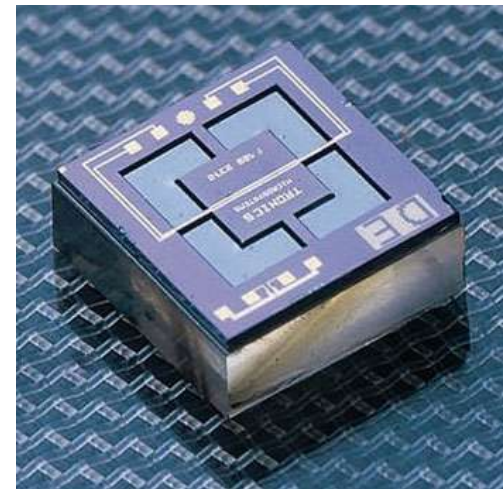
▪ Massa Sismica connessa ad un sostegno elastico con Strain-Gauge e fluido viscoelastico come smorzatore

- Gli strain-gauge sono fissati ai lati dell'elemento elastico
- Lo *strain* misurato è direttamente connesso all'ampiezza e al rate di spostamento e quindi all'accelerazione
- Il segnale di output è acquisito da un sistema connesso a un apposito circuito (ponte di wheatston)



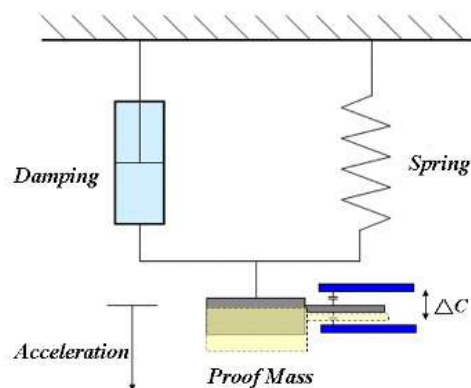
Accelerometri Piezoresistivi

- Caratteristiche
- Si usano semiconduttori con elevato fattore di gauge
- La sensibilità del sensore è legata alla risposta elastica della struttura e alla resistività del materiale
- Utili soprattutto per applicazioni a basse frequenze (*f lavoro* 1Hz - 20 KHz)
- Frequenza naturale ~ 300 Hz
- Con buon design resistono fino a 10.000 g
- Utile microfabbricazione integrata per uniformare caratteristiche degli strain-gauge al sistema (resistenza a T°)
- Leggeri: 1 – 10 g

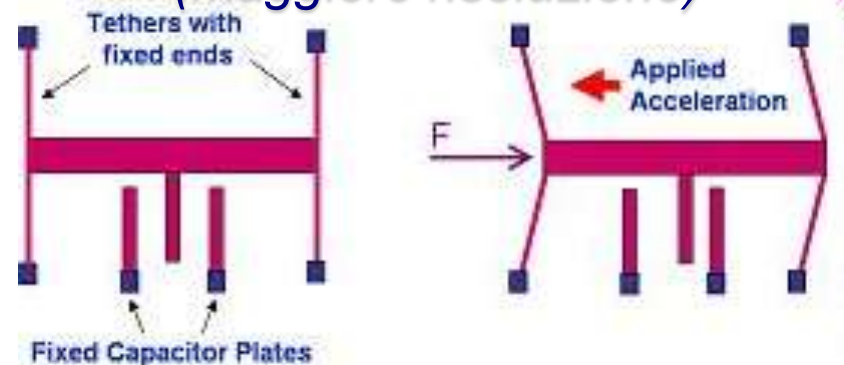


Accelerometri Capacitivi

- **Massa Sismica costituita da una delle armature del condensatore**
 - La massa, realizzata con materiale conduttivo, è fissata al supporto elastico (tipicamente una membrana)
 - L'altra armatura è realizzata sul supporto fisso (*housing*) nelle immediate vicinanze
 - Un apposito circuito rileva la capacità del condensatore e genera un segnale elettrico proporzionale allo spostamento della massa.

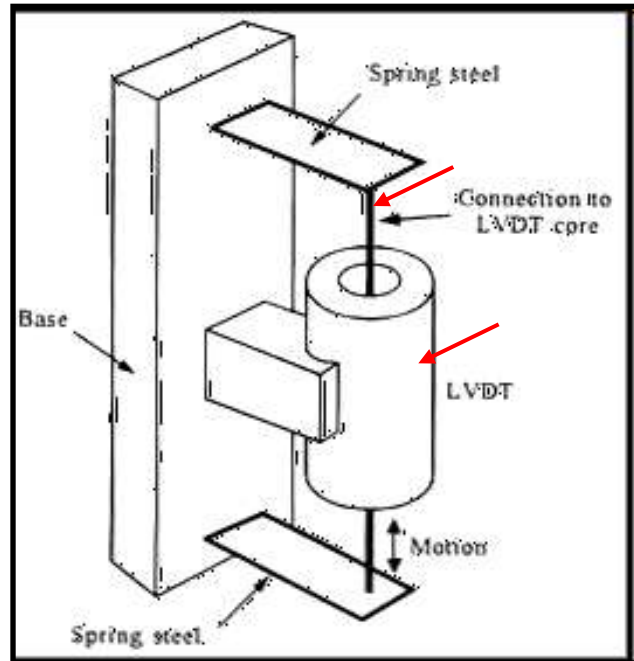


Accelerometro Capacitivo Differenziale (maggiore risoluzione)



Accelerometri Induttivi

- **Massa Sismica costituisce il nucleo ferromagnetico del sensore**
 - Un sensore LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) è integrato all'interno della struttura dell'accelerometro stesso
 - La massa è sospesa su molle o altri elementi elastici e scorre in un canale attorno cui sono avvolte le bobine
 - Lo spostamento della massa rispetto alle bobine è rilevato da un apposito circuito che genera un segnale elettrico proporzionale allo spostamento rispetto alla posizione di riposo.



Accelerometri Induttivi

■ Caratteristiche

- Alte frequenze naturali
- Maggiore risoluzione
 - Minore resistenza ai movimenti
- Range: $\pm 2-700$ g
- Frequenza naturale: 35-620 Hz
- Non linearità: 1% di fondo scala
- FS output ~ 1 V con eccitazione di LVDT di 10 V @ 2000 Hz
- Rapporto di smorzamento: 0.6-0.7
- Voltaggio residuo a zero: 1%
- Isteresi $< 1\%$ fondo scala
- Dimensioni ~ 50 mm³

Accelerometri Termici

*Trasferimento di Energia Termica
attraverso Convezione*

- **CONVEZIONE NATURALE:** il movimento del fluido (o gas) è provocato da gradienti locali di densità indotti da differenze di temperatura tra la superficie solida e il fluido
- **CONVEZIONE FORZATA:** il fluido (o gas) è in movimento rispetto alla superficie solida con velocità imposta da un propulsore esterno o da una forza esterna

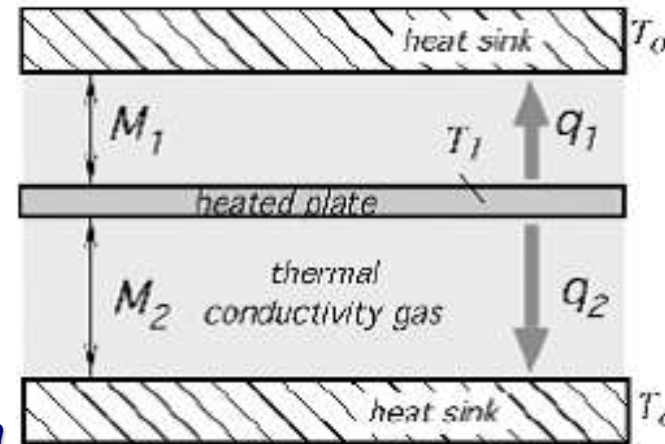
$$H = \alpha A(T_1 - T_2)$$

H : flusso termico
α : coefficiente di convezione termica
A : area
T₁ e ***T₂*** : Temperature

Accelerometri Termici

HPA: Heated Plate Accelerometer

- **Massa sismica sospesa attraverso una trave sottile vicino a uno o due dissipatori termici** (*Trasferimento di energia termica efficace e veloce in base a materiale e geometria*)



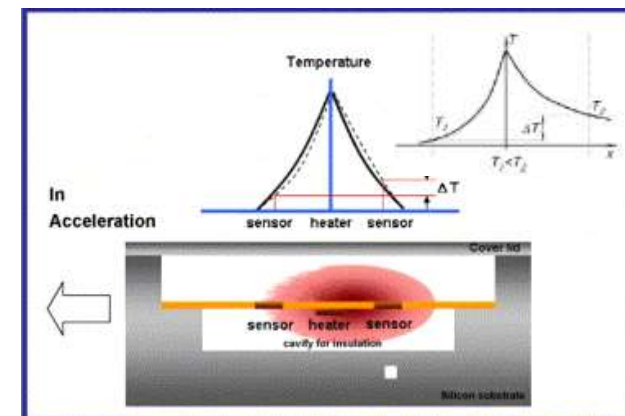
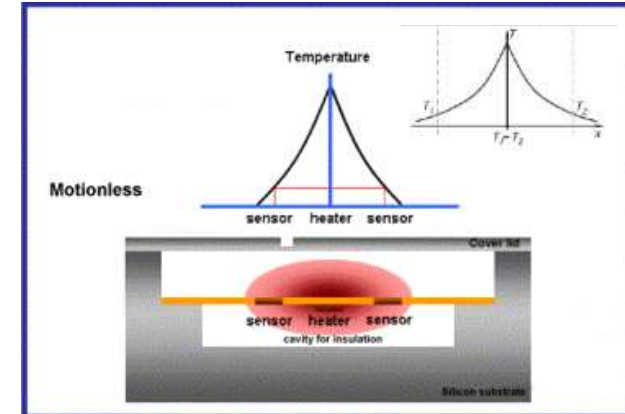
- Tecnologie di micro-fabbricazione per la massa e il sostegno
- Lo spazio tra la massa e i dissipatori è riempito con un gas ad elevata conducibilità termica
- La massa sismica viene scaldata e mantenuta alla temperatura di riferimento T_r
- Se non sottoposto ad accelerazione la massa e i dissipatori sono in equilibrio termico
- I flussi di calore (q_1 e q_2) scambiati tra la massa e i dissipatori attraverso il gas sono funzione delle distanze M_1 e M_2
- La variazione di temperatura può essere misurata con un sensore di temperatura

Accelerometri Termici

HGA: Heated Gas Accelerometer

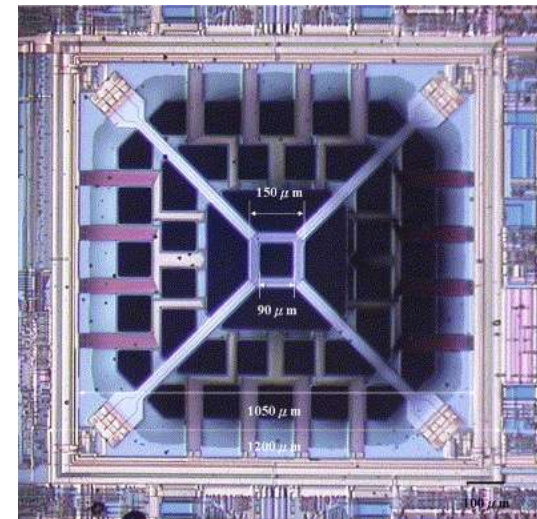
- **Non usano massa sismica: c'è sorgente di calore sospesa all'interno del chip**
 - In caso di assenza di moto la distribuzione del calore ha forma simmetrica e la temperatura è la stessa tra gli array di termocoppie
 - Se si sottopone il sistema ad un'accelerazione il flusso di calore viene spostato verso un lato delle termocoppie attraverso una convezione forzata di calore, con un'asimmetria in direzione dell'accelerazione
 - La differenza di temperatura è proporzionale all'ampiezza dell'accelerazione e viene misurata per l'effetto Seebeck con le termocoppie

(Trasferimento di energia termica per convezione forzata)



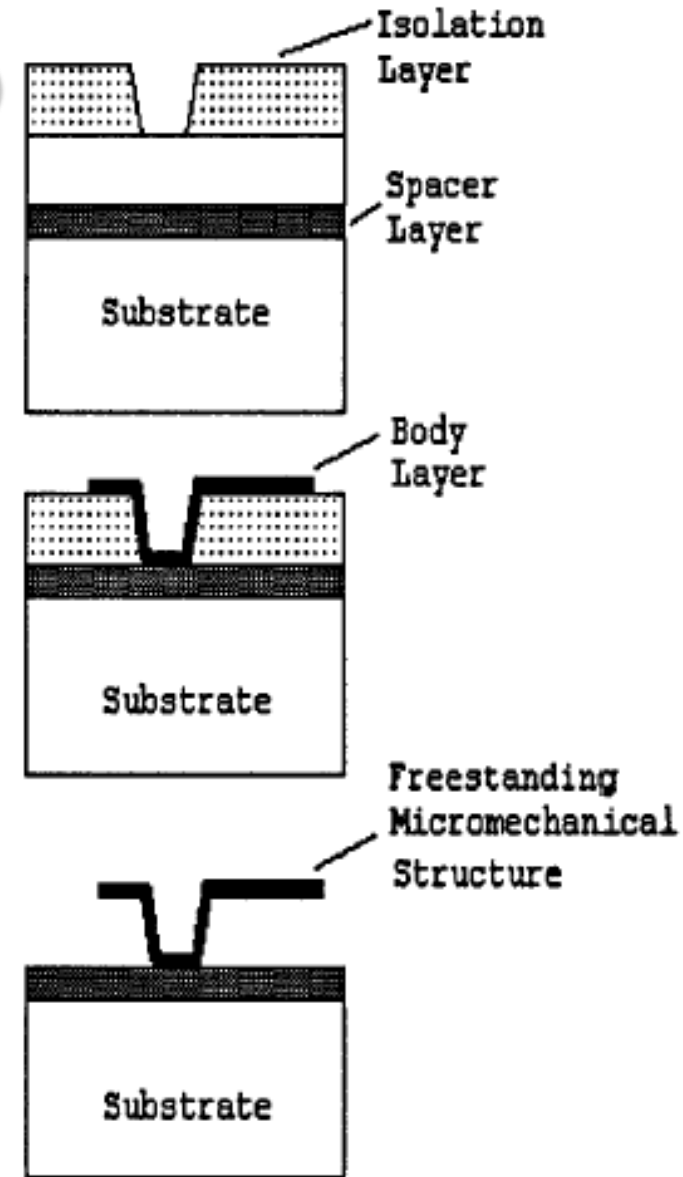
Accelerometri Termici

- Caratteristiche
- Innovativi
- Low Cost
- Low Noise (minore sensibilità a disturbi esterni rispetto agli accelerometri con massa sismica)
- Banda Passante < 100 Hz
- Resistenza fino 50.000 g
- Convezione forzata più efficiente rispetto a convezione naturale
- MEMS e NEMS Technology



Micro-accelerometers

- Utilizzo di tecnologia di circuiti integrati (IC) per la fabbricazione di strutture elettromeccandiche 3D
- Primo accelerometro: 1979
- Si sfruttano le proprietà della struttura cristallina del silicio per ottenere stabilità e robustezza
- Etching di film depositati su wafer di silicio
- Possibilità di integrare su un singolo chip più accelerometri in modo da misurare le accelerazioni nello spazio 3D (\underline{a}_x , \underline{a}_y , \underline{a}_z)
- Misurazione degli spostamenti con tecnologie capacitive, piezoelettriche o piezoresistive e tecnologia CMOS

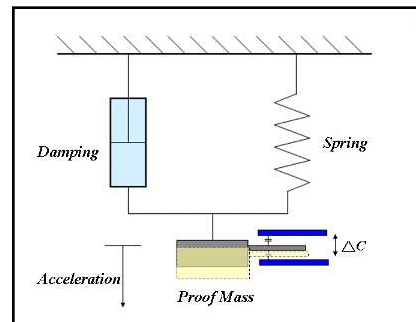
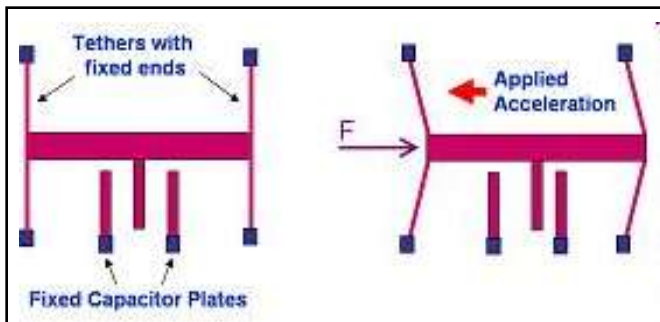


Practical examples: *Nintendo Wii*

The Wii Remote has the ability to sense acceleration along three axes through the use of an ADXL330 accelerometer



The sensor is a polysilicon surface micromachined structure built on top of a silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. Acceleration deflects the moving mass and unbalances the differential capacitor resulting in a sensor output whose amplitude is proportional to acceleration.



Misura della velocità

- Metodi basati su un riferimento

- Misure effettuate sia sull'oggetto in movimento che su un riferimento
- Si misura la velocità media

$$v_{avg} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

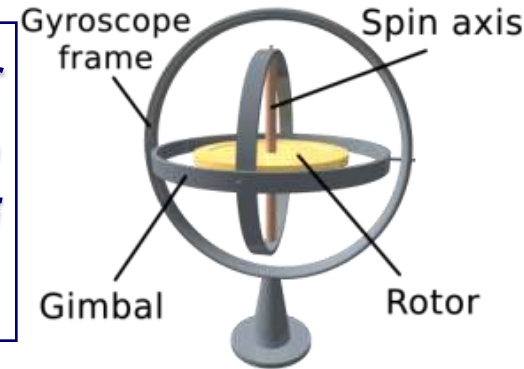
- Metodi inerziali

- Non richiedono il contatto con un riferimento
- Si misura la velocità relativa alla velocità iniziale del sensore

$$v(t) = v_i + \int_{t_i}^t a(\tau) d\tau$$

Giroscopi per la misura della velocità angolare

Il giroscopio è un dispositivo fisico rotante che, per effetto della legge di conservazione del momento angolare, tende a mantenere il suo asse di rotazione orientato in una direzione fissa

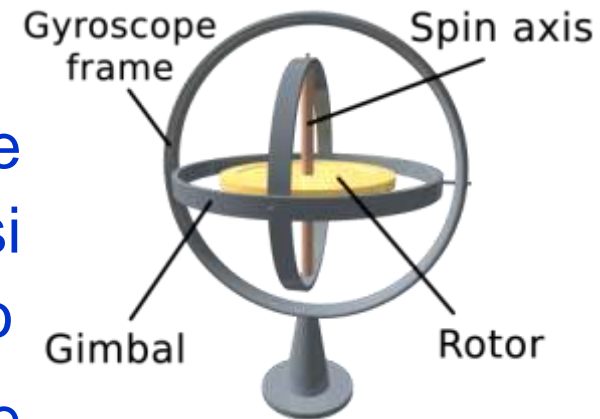


■ Caratteristiche fondamentali del sistema

- Elevata inerzia e permanenza dell'asse di rotazione: *una volta messo in rotazione, in assenza di forze esterne, tende a mantenere fissa nello spazio la direzione del suo asse di rotazione*
- **Precessione:** *movimento dovuto all'azione congiunta della forza applicata per mutare la direzione dell'asse e del momento angolare, l'asse tende a disporsi lungo la direzione perpendicolare al piano individuato dalla forza applicata e dall'asse medesimo descrivendo un cono ideale*

Principio di funzionamento generale tipico dei giroscopi

- Un **giroscopio** è un dispositivo costituito da:
 - Rotore a forma di toroide che ruota attorno al proprio asse (*Spin axis*)
 - Sospensione cardanica (*Gimbal*) che permette al rotore di orientarsi liberamente nelle tre direzioni dello spazio
 - Se il rotore è in rotazione il suo asse tende a mantenersi orientato nella stessa direzione anche se il supporto cambia orientamento

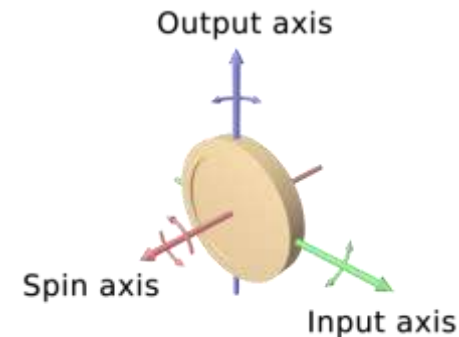
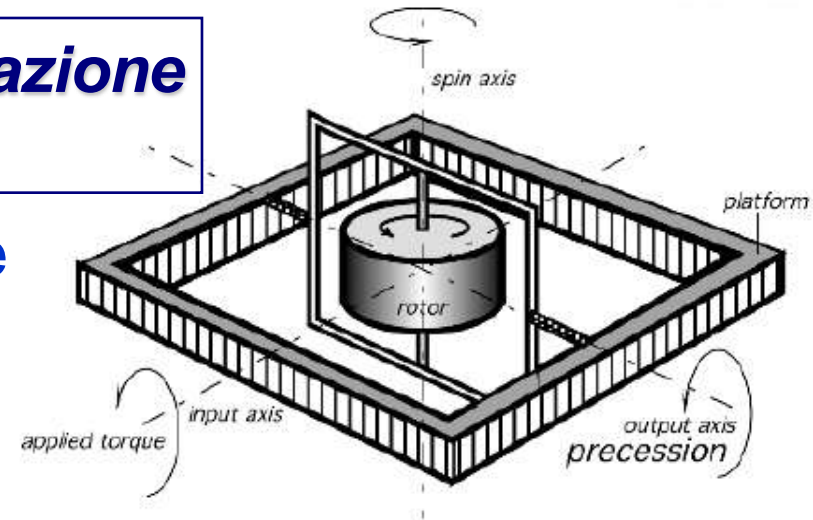


(meccanismo inventato nel 1852 dal fisico Jean Bernard Léon Foucault nell'ambito dei suoi studi sulla rotazione terrestre)

Giroscopio meccanico rotante

Basato sul principio di conservazione del momento angolare

- Un disco (rotore) è libero di ruotare rispetto a uno/due assi di *spin* (giroscopio a 1/2 DOF)
- Se viene applicata una rotazione al supporto del giroscopio attorno all'asse di *input*, il giroscopio viene spinto a ruotare attorno a un'asse perpendicolare (di *output*)
- Il giroscopio può generare un segnale in uscita proporzionale alla velocità angolare di un'asse perpendicolare all'asse di *spin*



$$T = I\omega\Omega$$

***T* : torsione applicata**

***I* : inerzia**

***ω* : velocità rotore mantenuta costante**

***Ω* : velocità angolare intorno all'asse di output**

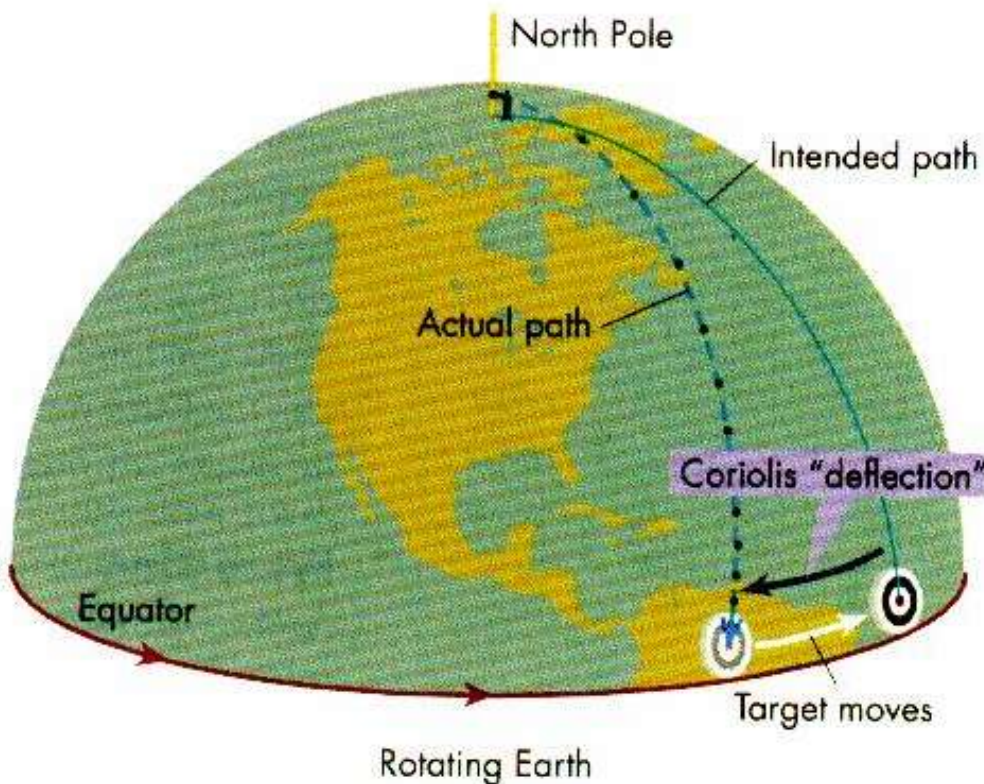
Giroscopio meccanico rotante

- L'accuratezza dipende dalla presenza di effetti che possono aggiungere rotazioni aggiuntive indesiderate e causa di drift (es. attrito, rotori sbilanciati, campi magnetici)
 - **Sospensione del rotore in liquido viscoso ad alta densità (*fluorocarburi*):** serve controllo per temperatura e deterioramento
 - Gas di supporto per la sospensione del rotore: elio, idrogeno o aria ad alta pressione
 - **Giroscopi Elettrostatici:** rotore sospeso nel vuoto applicando un campo elettrico
 - **Giroscopi Magnetici o Cryogenici:** il sistema viene raffreddato con cryogeno e il rotore (superconduttore) viene mantenuto sospeso con l'applicazione di campo magnetico
 - Limiti di riduzione del costo
 - Limiti per la Miniaturizzazione

Effetto Coriolis

(effetto descritto nel 1835
dall'ingegnere e matematico francese
Gustave-Gaspard Coriolis)

La Forza di Coriolis è una forza apparente, a cui un corpo risulta soggetto quando si osserva il suo moto da un sistema di riferimento che sia in moto circolare rispetto a un sistema di riferimento inerziale.



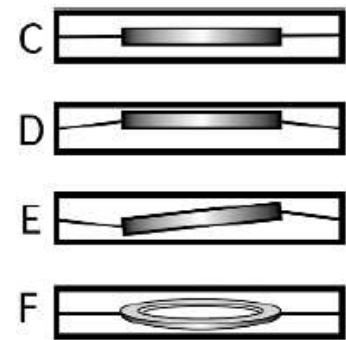
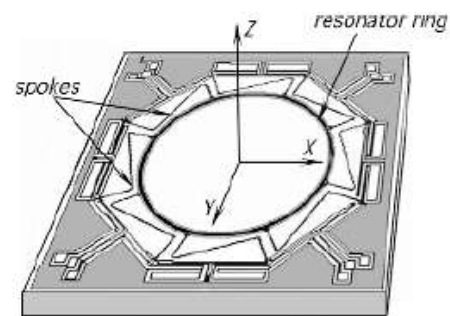
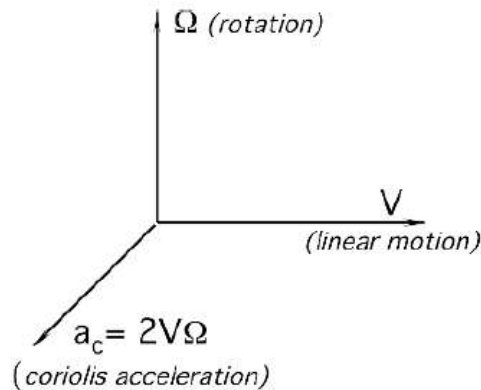
La formula matematica che esprime la **forza di Coriolis** è la seguente:

$$\vec{F}_C = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega})$$

\vec{F}_C è la forza di Coriolis,
 m è la massa,
 \vec{v} è la velocità lineare,
 $\vec{\omega}$ è la velocità angolare del sistema in rotazione

Giroscopi basati sull'accelerazione di Coriolis

MEMS con elemento vibrante (Quarzo), al posto del rotore, che viene fatto muovere linearmente di moto armonico



- L'accelerazione di Coriolis si manifesta in un corpo quando si muove linearmente in un sistema di riferimento che ruota attorno ad un'asse perpendicolare a quella del moto lineare
- L'accelerazione risultante, direttamente proporzionale alla velocità di rotazione, si genera in direzione del terzo asse perpendicolare al piano definito dagli altri due

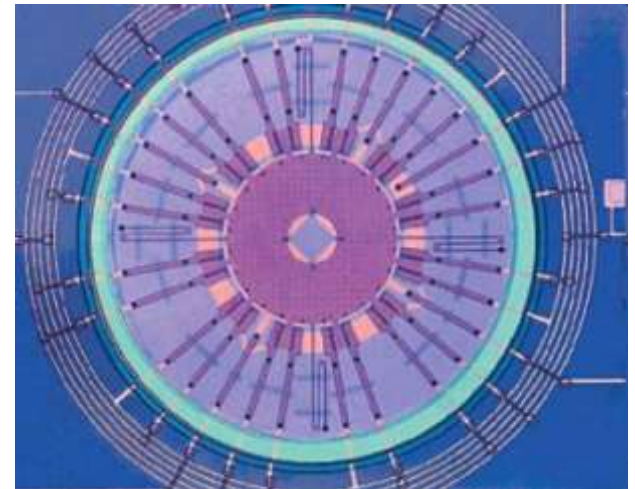
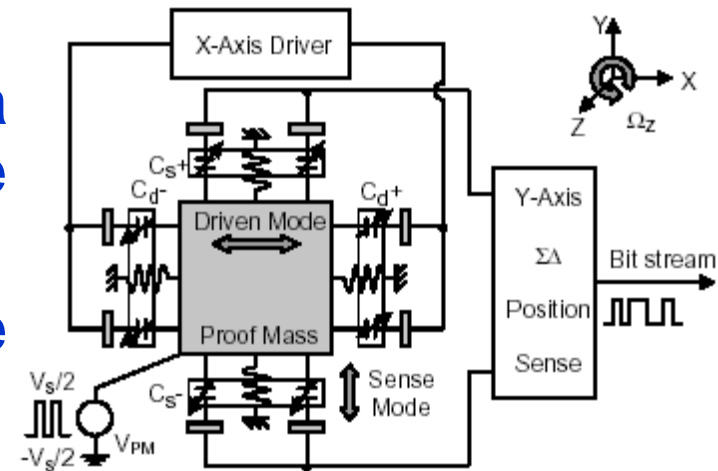
Giroscopi basati sull'accelerazione di Coriolis

- L'elemento vibrante genera una seconda vibrazione in direzione perpendicolare alla prima
- Misurando la vibrazione indotta è possibile ottenere il grado di rotazione

■ Caratteristiche

- Maggiore robustezza
- Miniaturizzazione
- Produzione su larga scala e in ambienti particolari (applicazioni aerospaziali, militari, marine, ...)

A polysilicon surface-micromachined vibrating wheel gyro, designed at the Berkeley Sensors and Actuators Centre



Practical examples: *xsens*

The MTi is a miniature size and low weight 3DOF Attitude and Heading Reference System (AHRS).



- **3D Gyroscopes**
- **3D Accelerometers**
- **3D Magnetometers**

The gyroscopes are used to calculate orientation. Integration drift is inevitable whilst using gyroscopes. To compensate for drift completely, the MTi corrects its orientation every sample using the gravity and the earth magnetic field as reference vectors.

MTi

short movie

Miniature Attitude and
Heading Reference System

Progettazione di un sistema vestibolare per una testa robotica



Functional specifications for the artificial vestibular system

From a functional point of view, the human vestibular system provides:

- linear acceleration
- angular velocity

of a rigid body (the head) in a 3D space

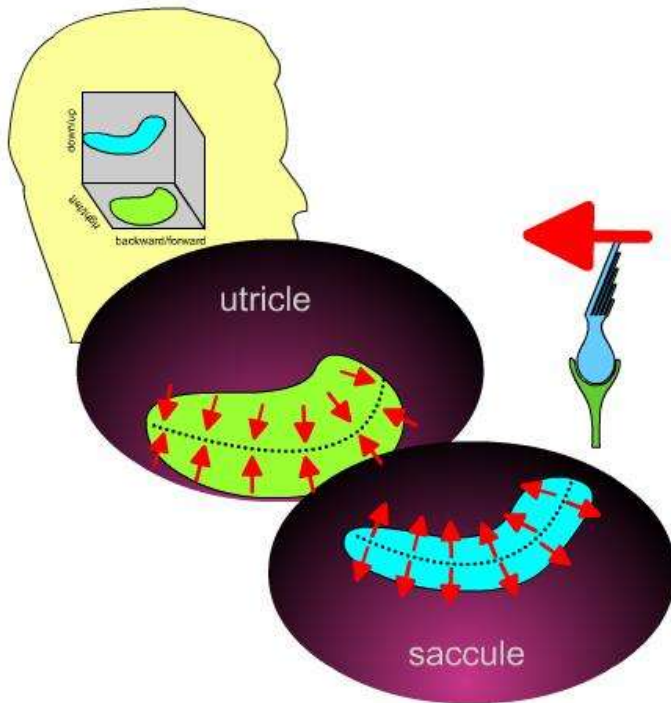
A biologically inspired artificial vestibular system has to be able to detect:

- angular velocity in 3-orthogonal directions,
- direction and magnitude of gravity,
- transient linear accelerations due to head motion



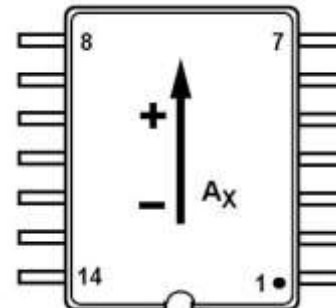
- Pitch, Roll and Yaw angular velocity
- Direction and magnitude of gravity
- X, Y and Z-direction transient acceleration

Artificial Vestibular System



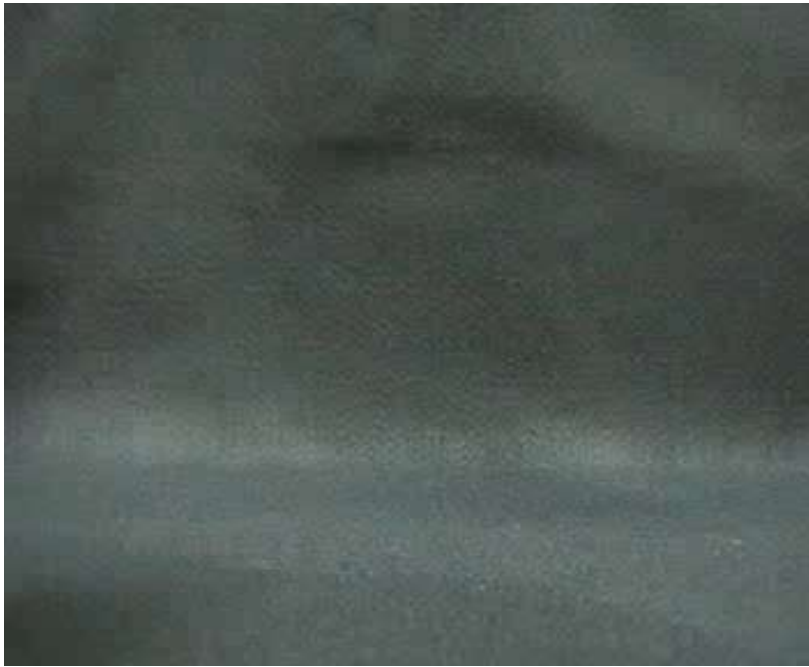
As well as the Human Vestibular System does, the Artificial Vestibular System has to be able to detect angular velocity in 3-orthogonal directions of the head and **direction and magnitude of gravity**, as well as **transient linear acceleration** due to movement.

Acceleration detector:
Accelerometer

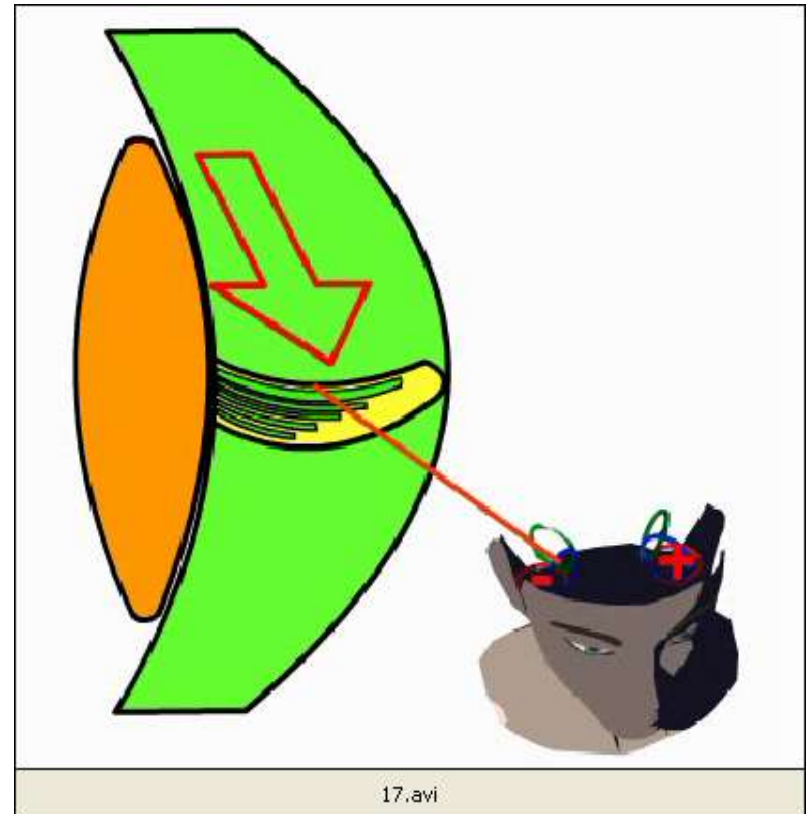


Artificial Vestibular System

As well as the Human Vestibular System does, the Artificial Vestibular System has to be able to detect **angular velocity in 3-orthogonal directions** of the head and direction and magnitude of gravity, as well as transient linear acceleration due to movement.

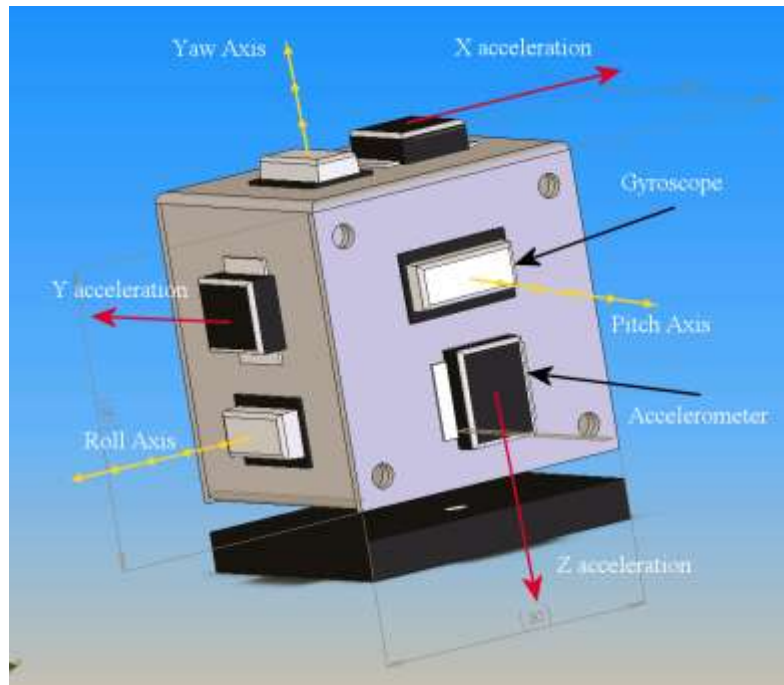


Angular velocity
detector: Gyroscope



Artificial Vestibular System I

Accelerometers can play the role of the otholitic organs,
Gyroscopes can play the role of the semicircular canals



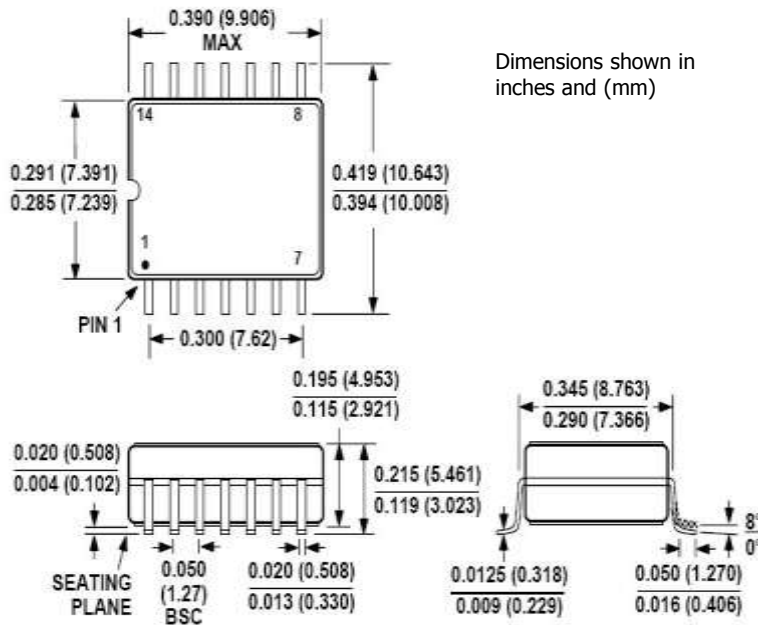
3 mono-axial Piezoelectric
Vibrating Gyroscopes

3 mono-axial accelerometers

In order to obtain a 3-axial inertial sensor system, these six devices are mounted on three orthogonal surface of a few-millimeter-sized cubic mass

Accelerometer Features

ADXL150 Single Axis ImemS Accelerometers by ANALOG DEVICES



Parameter	Conditions	Units
SENSOR Guaranteed Full-Scale Range	Min ± 40 , Max ± 50	g
Sensitivity	Min 33.0 Typ 38.0 Max 43.0	mV/g
Frequency Response -3 dB Bandwidth	Min 900, Max 1000	Hz
Power Supply (Vs) Functional Voltage Range Quiescent Supply Current	Min 4.0 Max 6.0 Typ 1.8 Max 3.0	V mA

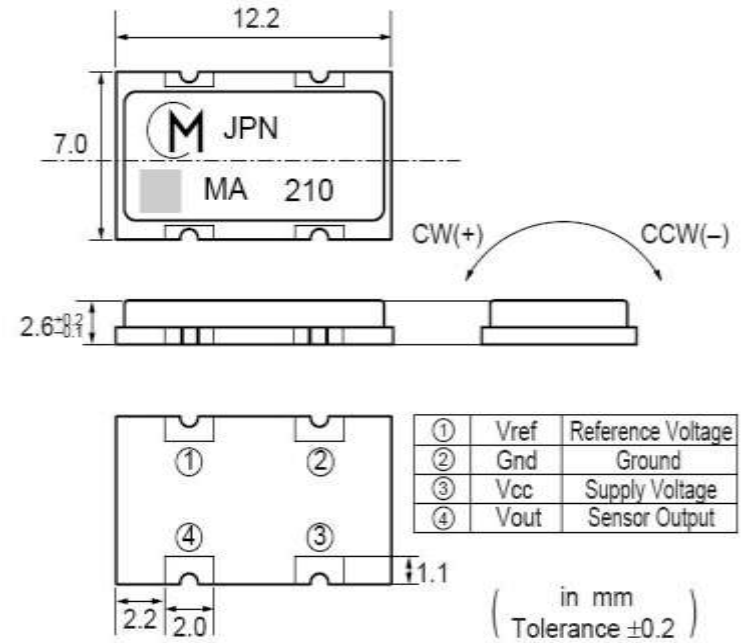
The ADXL150 is third generation $\pm 50 g$ surface micromachined accelerometers. It offers lower noise, wider dynamic range, reduced power consumption and improved zero g bias drift. Thanks to its features, this device is particularly appropriate for detecting head accelerations involved in gaze position control and tracking of the objects.

Gyroscope Features

Piezoelectric Vibrating Gyroscopes by Murata

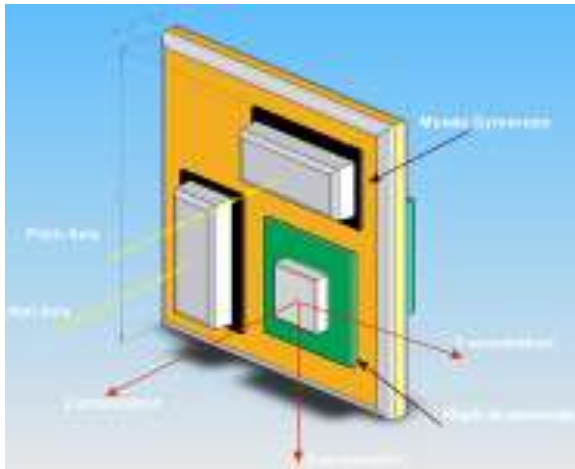
This product is an angular velocity sensor that uses the phenomenon of Coriolis force and achieve an ultra-small size of about 0.2cc. Its small and lightweight shape increase flexibility of installment and let the apparatus to be downsized.

Thanks to its features, this device is particularly appropriate for detecting head angular velocities involved in gaze position control and tracking of the objects.

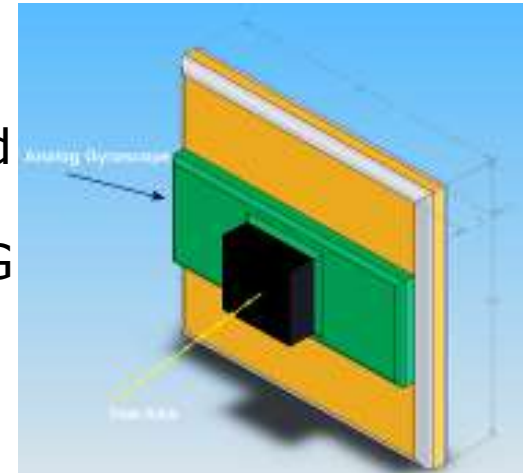


Supply Voltage (Vdc)	Maximum Angular Velocity (deg./sec.)	Output (at Angular Velocity=0) (Vdc)	Scale Factor (mV/deg./sec.)	Response (Hz)	Weight (g)
2.7-5.25	+/-300	1.35	0.67	50 max.	0.4

Second Prototype



The Gyroscopes by muRata are used for angular velocity detection around the Pitch and the Roll axis, while the mono-axial gyroscope ADXRS300ABG by Analog Device is employed for detecting the angular velocity around the Yaw axis.



The introduction of the ultrasmall tri-axial accelerometer module H48C by Hitachi allows a strong reduction of the total system size.

The new prototype of the artificial vestibular system will be smaller and lighter than the previous model

The ADXRS300ABG measures the angular velocity around an axis orthogonal to its mounting surface. In this way, all the 3 gyroscopes can be integrated on a single plane.

Second Prototype

Hitachi H48C 3-axis acceleration

- (1) Compact and slim (world's thinnest)
Package size: $4.8 \times 4.8 \times 1.3$ mm.
- (2) High detection sensitivity (1.5 times greater than earlier sensors)
Triaxial, analog, simultaneous output sensors with sensitivity increased from 333mV/G to 500mV/G.
- (3) Low power consumption (2/3 that of earlier sensors)
Low current drain of 3V/0.4mA when operating.



3. Specifications

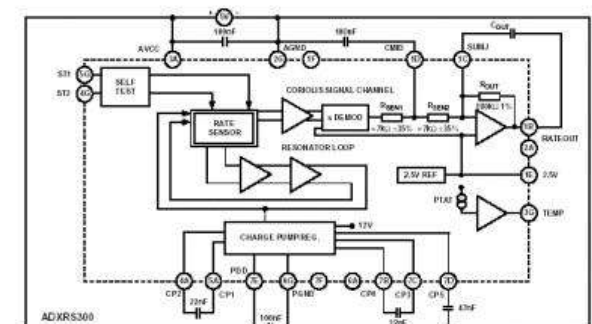
	Unit	Standard products	Newly developed sensor	Remarks
Package size	mm	4.8×4.8	4.8×4.8	
Package thickness	mm	1.5	1.3	
Acceleration detection range	G	± 3	± 2	
Power-source voltage	V	2.2 to 3.6	2.2 to 3.6	
Current drain	mA	0.6	0.4	Power source voltage 3V
Detection sensitivity	mV/G	333	500	Power source voltage 3V
Shock durability	G	5000	5000	Duration of action: 0.2ms

Analog Device Yaw rate Gyroscope

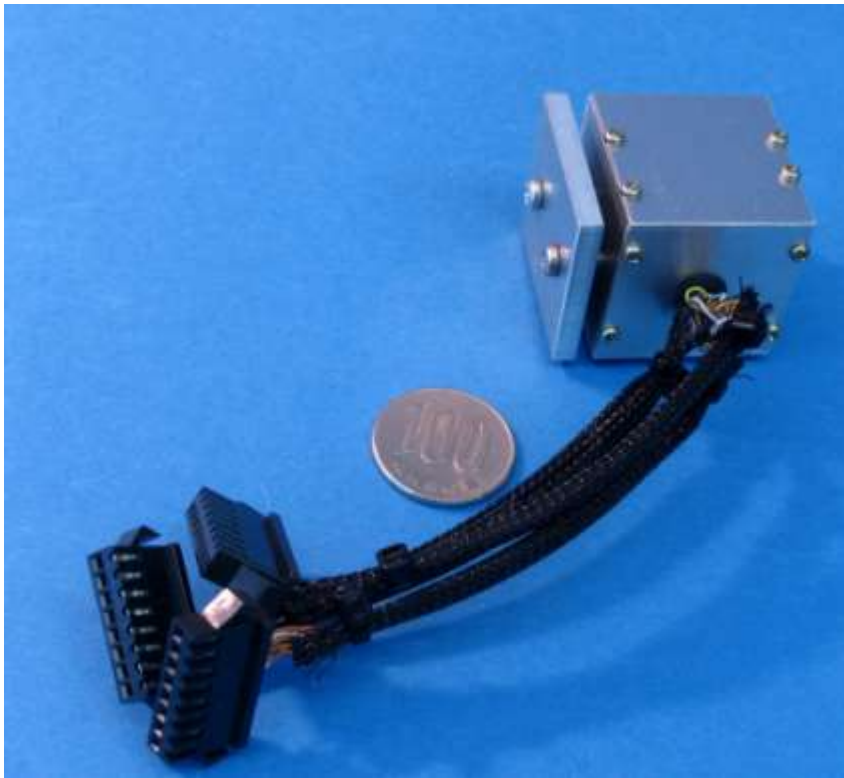
- Complete rate gyroscope on a single chip
- Z-axis (yaw rate) response
- High vibration rejection over wide frequency
- 2000 g powered shock operation
- Self-test on digital command
- Temperature sensor output
- Precision voltage reference output
- Absolute rate output for precision applications
- 5 V single-supply operation
- Ultrasmall and light (<0.15 cc, <0.5 gram)

Specifications	
Range	$\pm 1 - 300$ °/s
Sensitivity	5mV/°/s
Bandwidth	0.04kHz
Noise Density (°/s/√Hz)	0.1
Nonlinearity	0.1% of FS
Temp Sensor	Yes
Voltage Reference	Yes
Supply Voltage	4.75 to 5.25
Supply Current	6mA
Temp Range	-40 to 85°C
Package	32-BGA

Functional Block Diagram



Artificial Vestibular System II



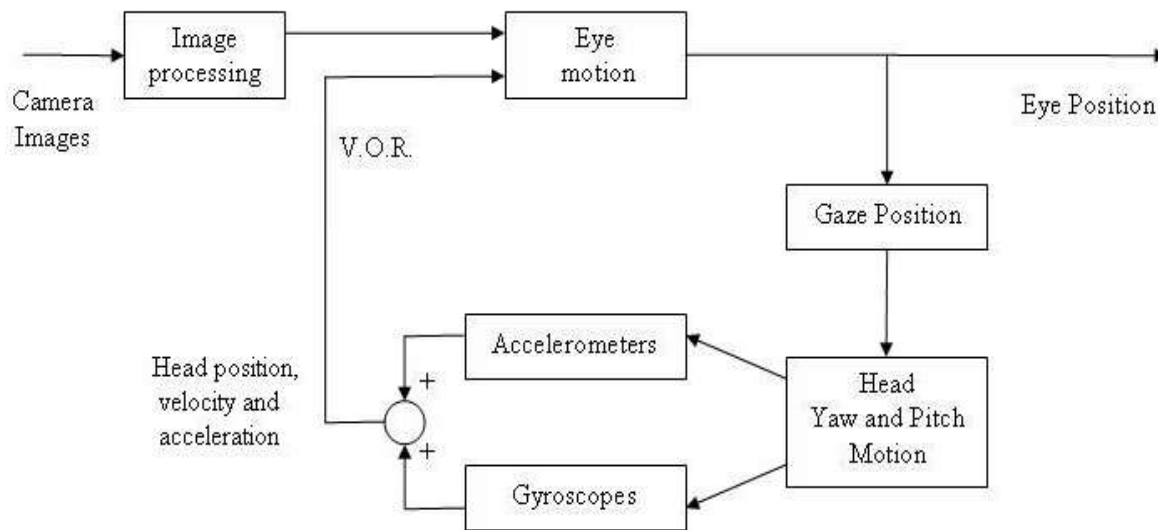
Data coming from the six devices need to be further processed and integrated in order to calculate orientation and position of the head during motion

- Orientation is estimated from the angular velocity sensor signals by integration
- The resulting head orientation as a function of time can be subsequently used to express the 3D accelerometer signals in inertial coordinates using a coordinate transformation

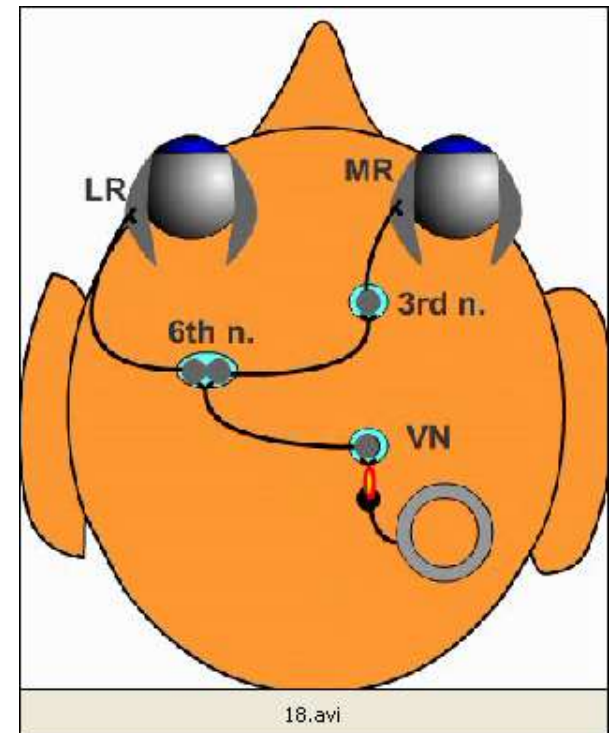
An accurate estimation of accelerations in 3D-space supposes fusing information of the accelerometers and angular velocity sensors

Outline of the artificial vestibulo-ocular reflexes

Artificial Vestibulo-ocular Reflex

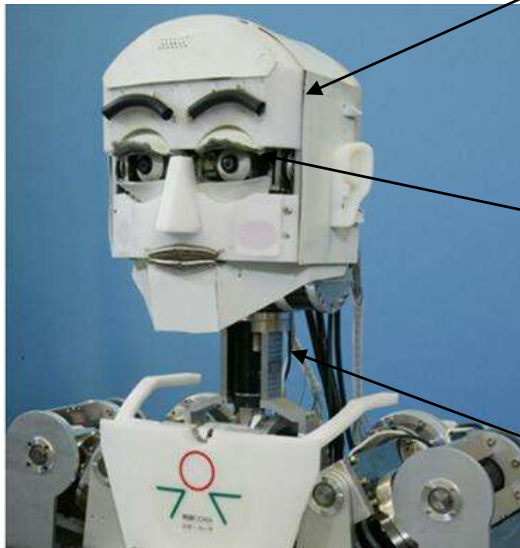


Human Vestibulo-ocular Reflex



Experimental tests in detecting robotic head motion

WE-4RII



Artificial vestibular system

3 dof for eye movements

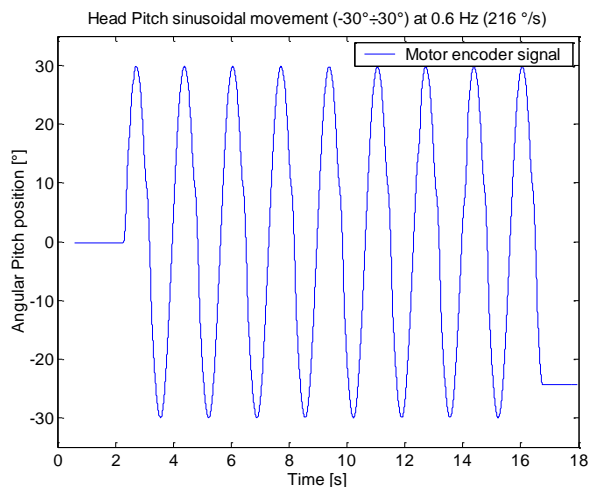
4 dof for neck movements

- Impose movements to head (neck):
 - Upper pitch
 - Roll
 - Yaw
- Record the encoder signal
- Record the vestibular system signal
- Compare the two signals

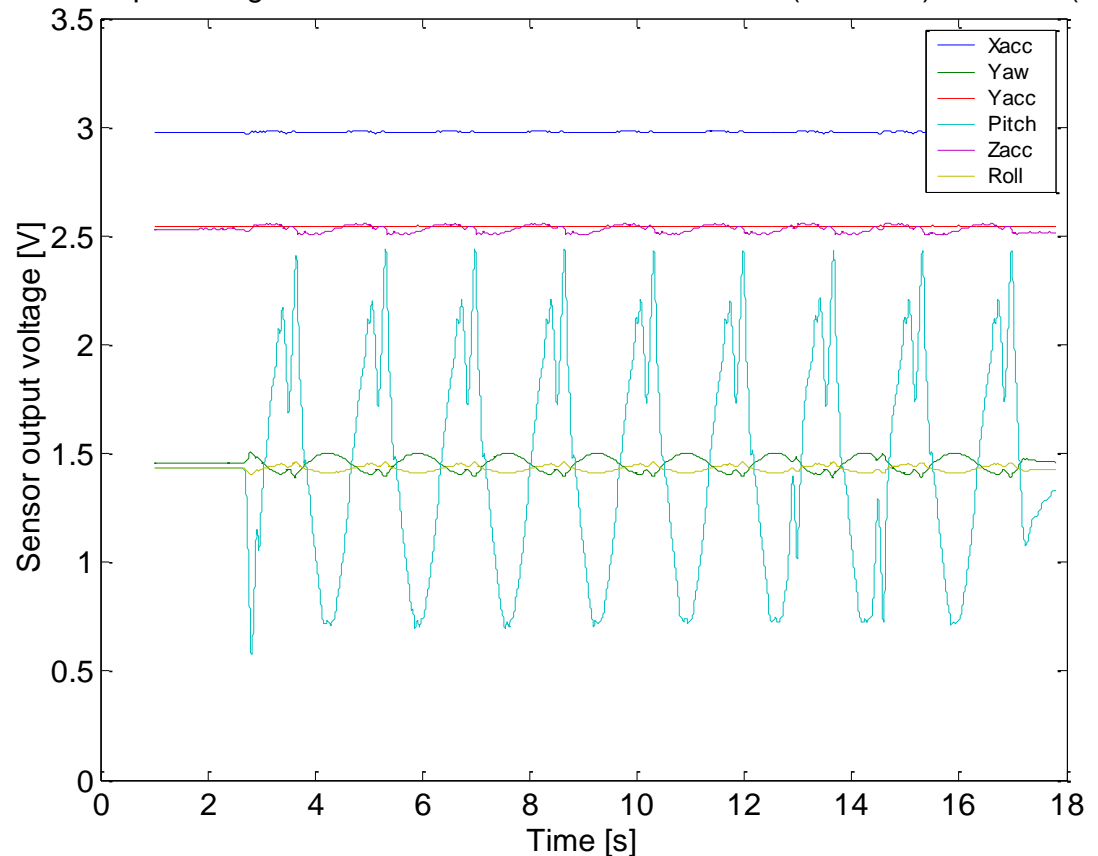
Experimental results in the detection of the WE-4RII robotic head motion

Upper Pitch

Good correlation, in terms of frequency response
Most significant signal from the gyro around the pitch axis
Largest variation from the accelerometer along the Z-direction, in relation to gravity



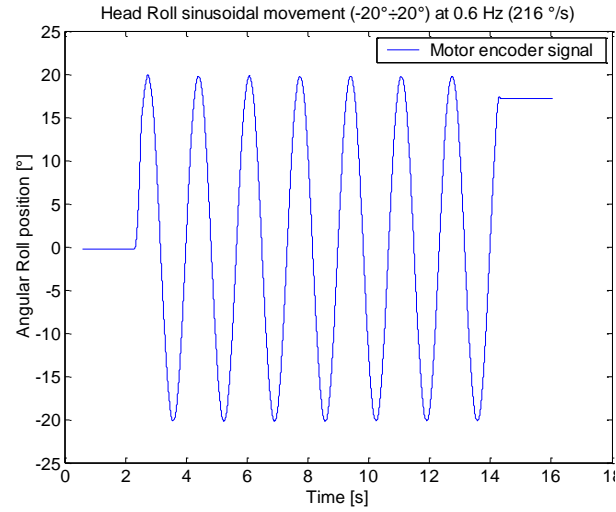
Sensor output voltage for Head Pitch sinusoidal movement (-30°÷30°) at 0.6 Hz (216°/s)



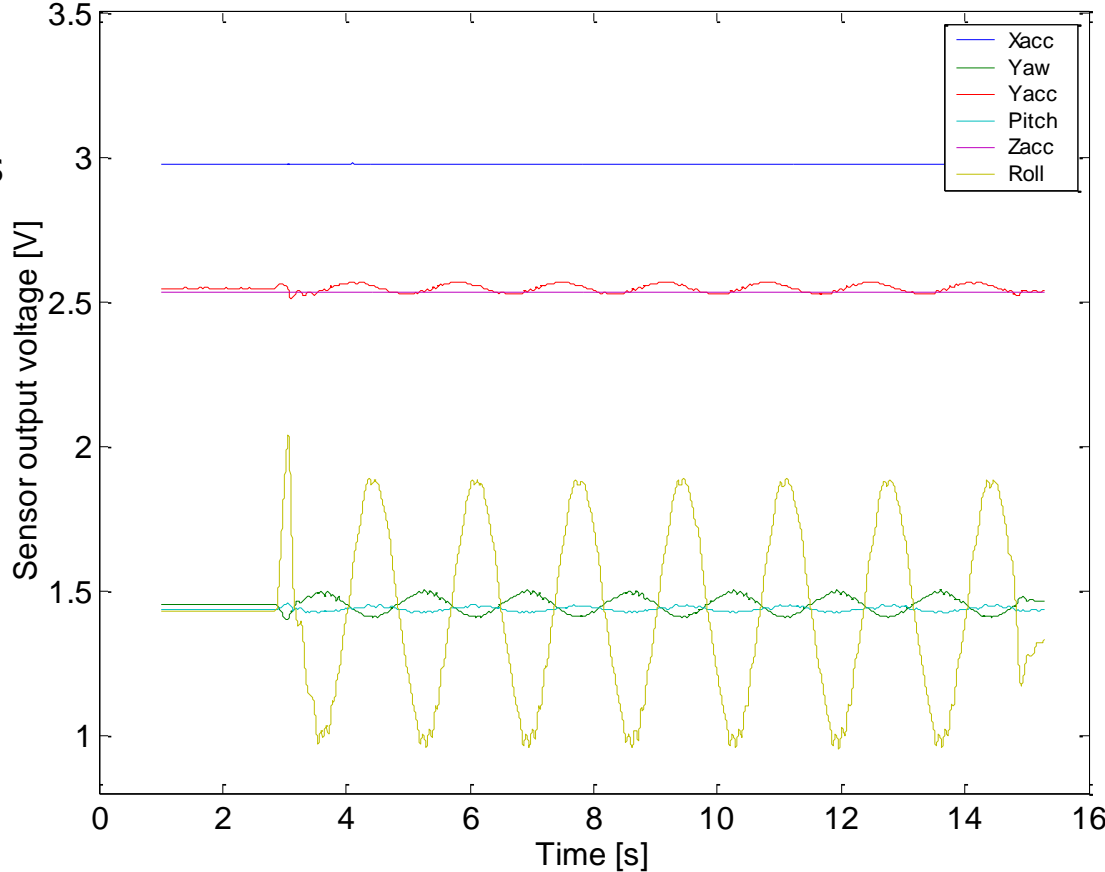
Experimental results in the detection of the WE-4RII robotic head motion

Roll

Roll gyro sensor output in phase with the motor encoder signal
The accelerometer along the Y-direction detected the variation of its sensitive axis in relation to gravity



Sensor output voltage for Head Roll sinusoidal movement (-30°±30°) at 0.6 Hz (216°/s)

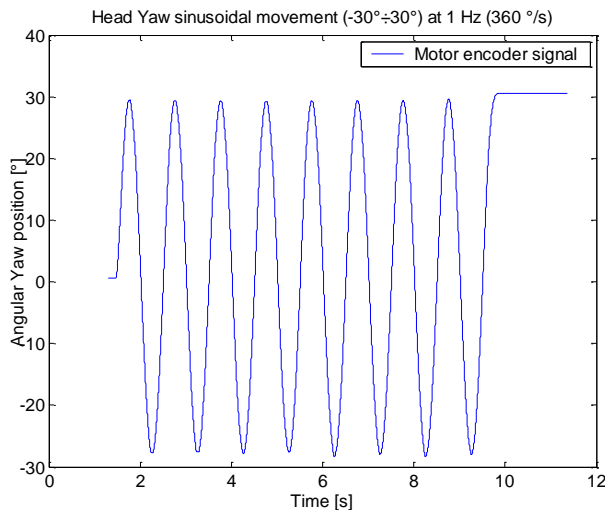


Experimental results in the detection of the WE-4RII robotic head motion

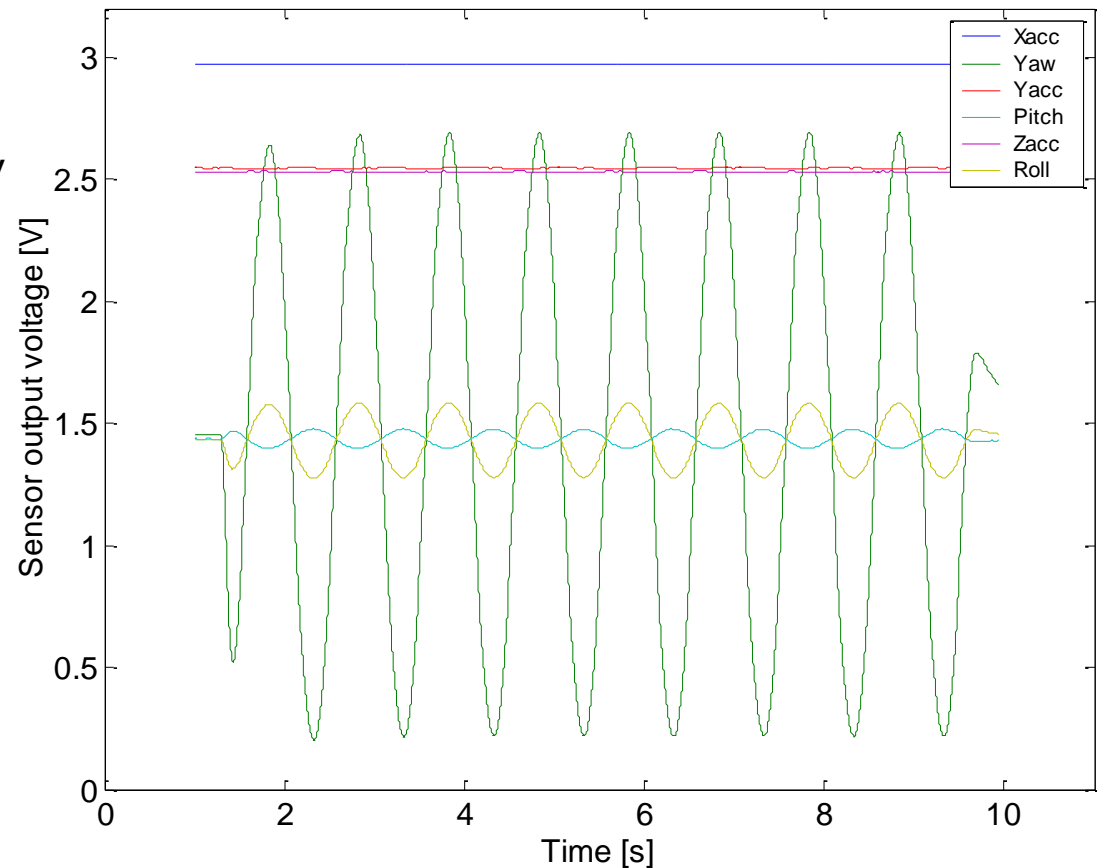
Yaw

Smoother and clearer sensor output signals (no movement obstruction by wires, causing vibration during the upper pitch and roll movements)

All accelerometers silent

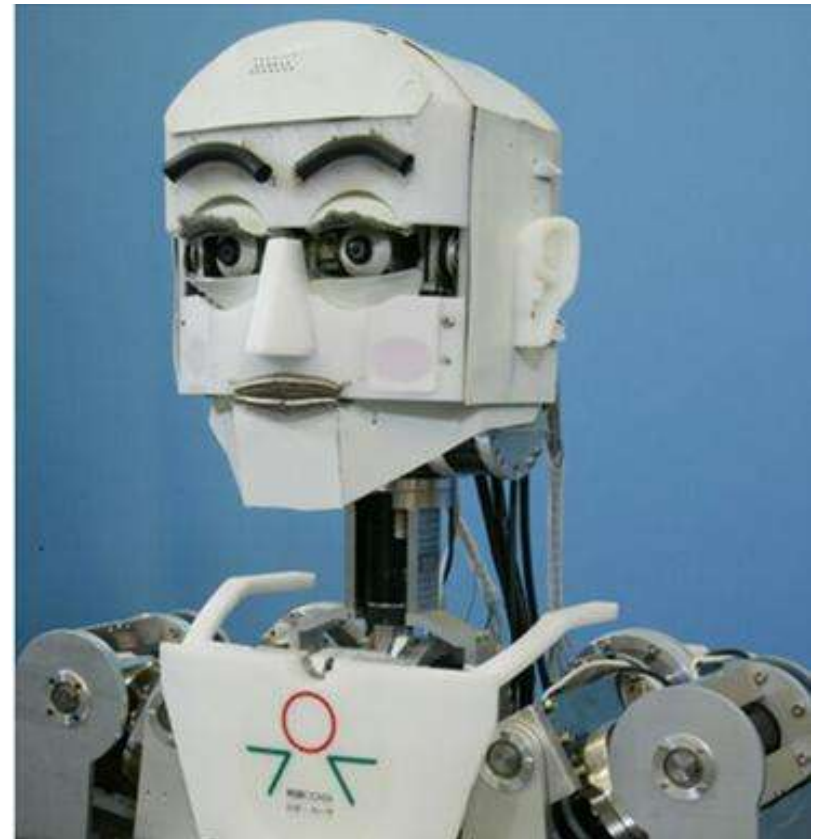
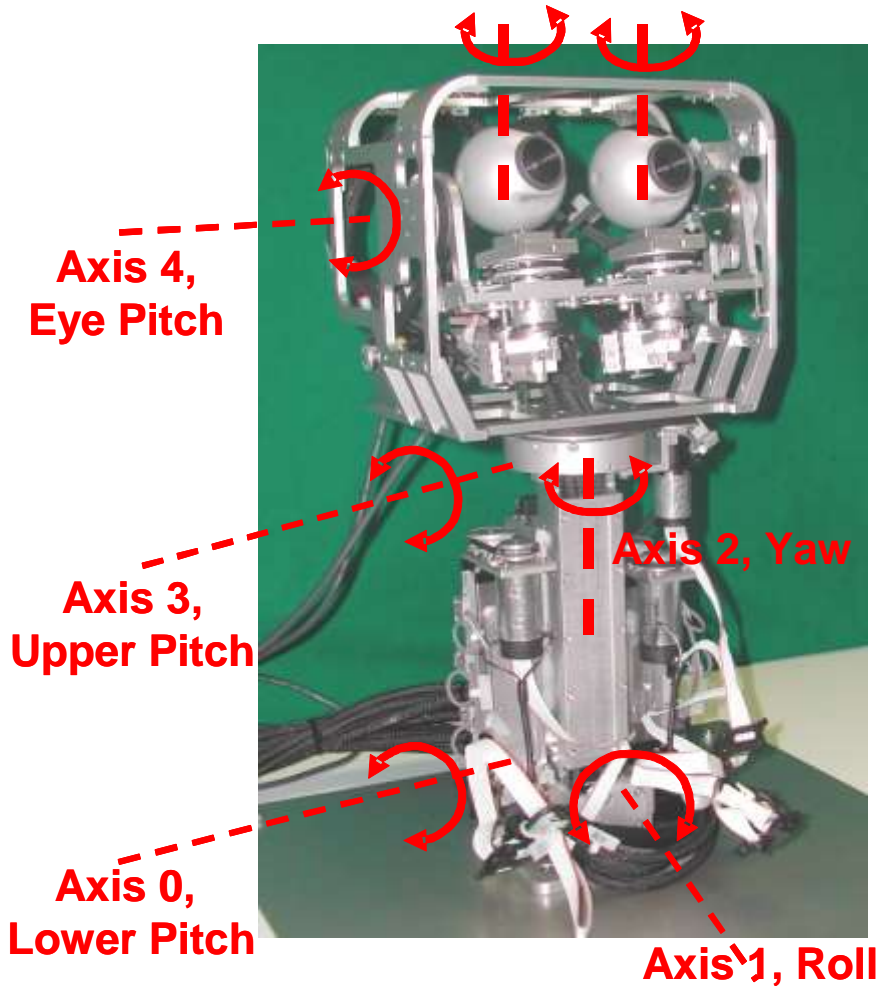


Sensor output voltage for Head Yaw sinusoidal movement (-30°÷30°) at 1 Hz (360°/s)



Experimental validation with two Robotic Heads

Axes 5 and 6, Right and Left Eye Pitch

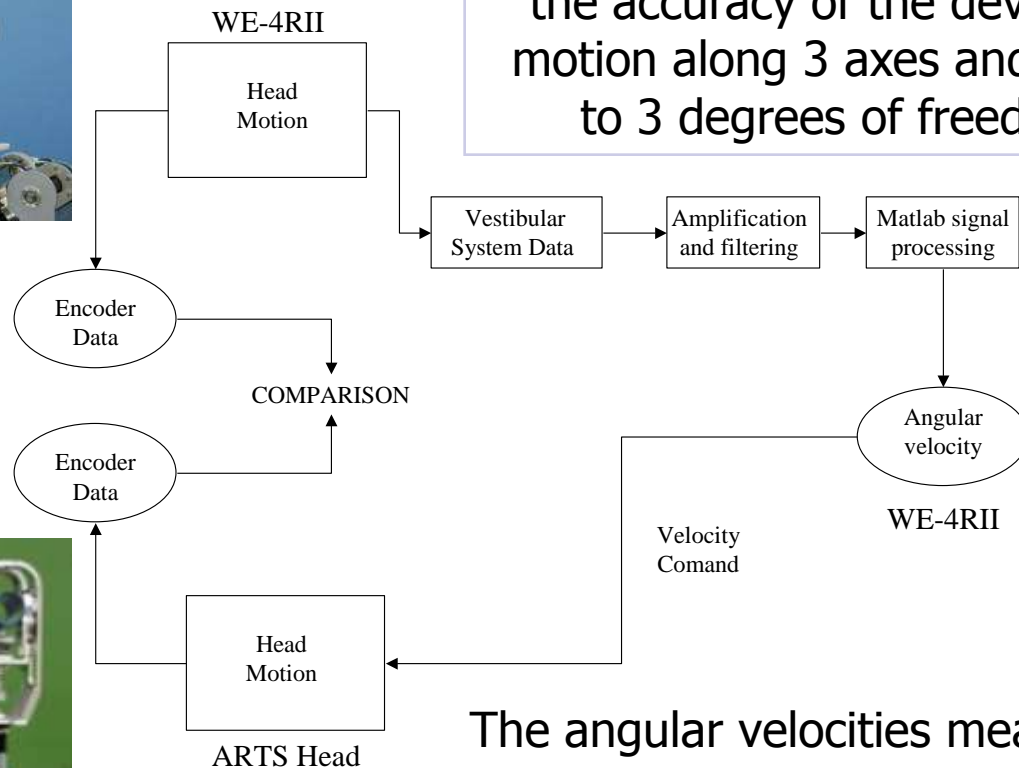
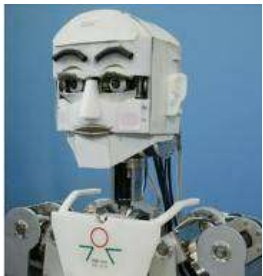


Validation Experiments

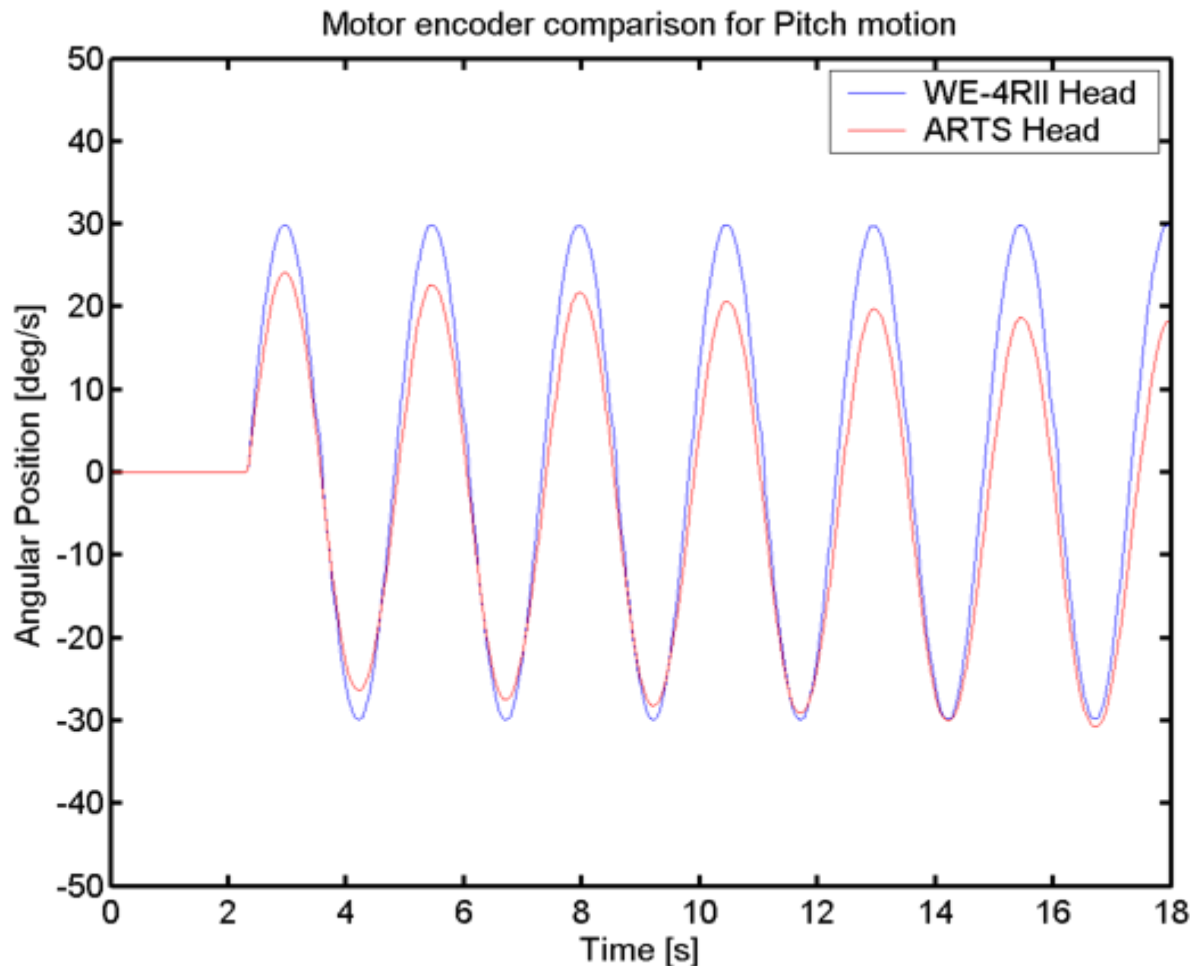
The objective of the experiments is to investigate the accuracy of the developed system to detect motion along 3 axes and to transmit such motion to 3 degrees of freedom of a robotic head.

The artificial vestibular system was integrated on the WE-4RII robotic platform and the measured sensory data were used as an external command for the ARTS robotic platform.

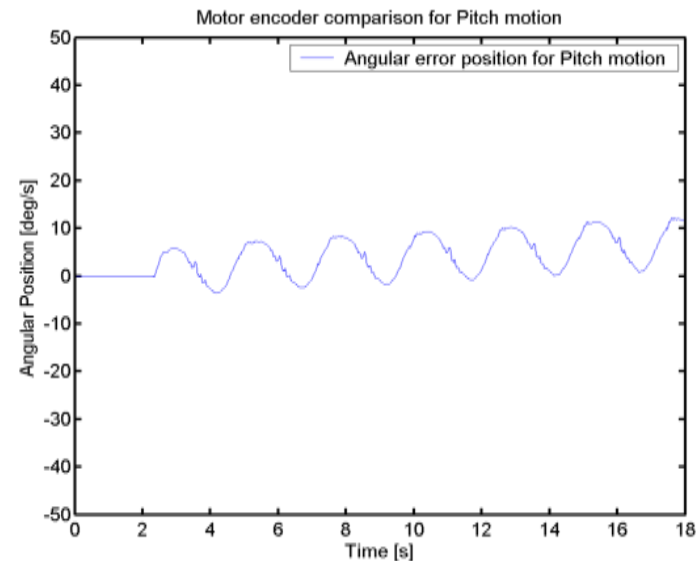
The angular velocities measured by the artificial system were used as external input commands for the ARTS robotic head, directly in **velocity domain**, overcoming all the artifices due to the numerical integration of system outputs.



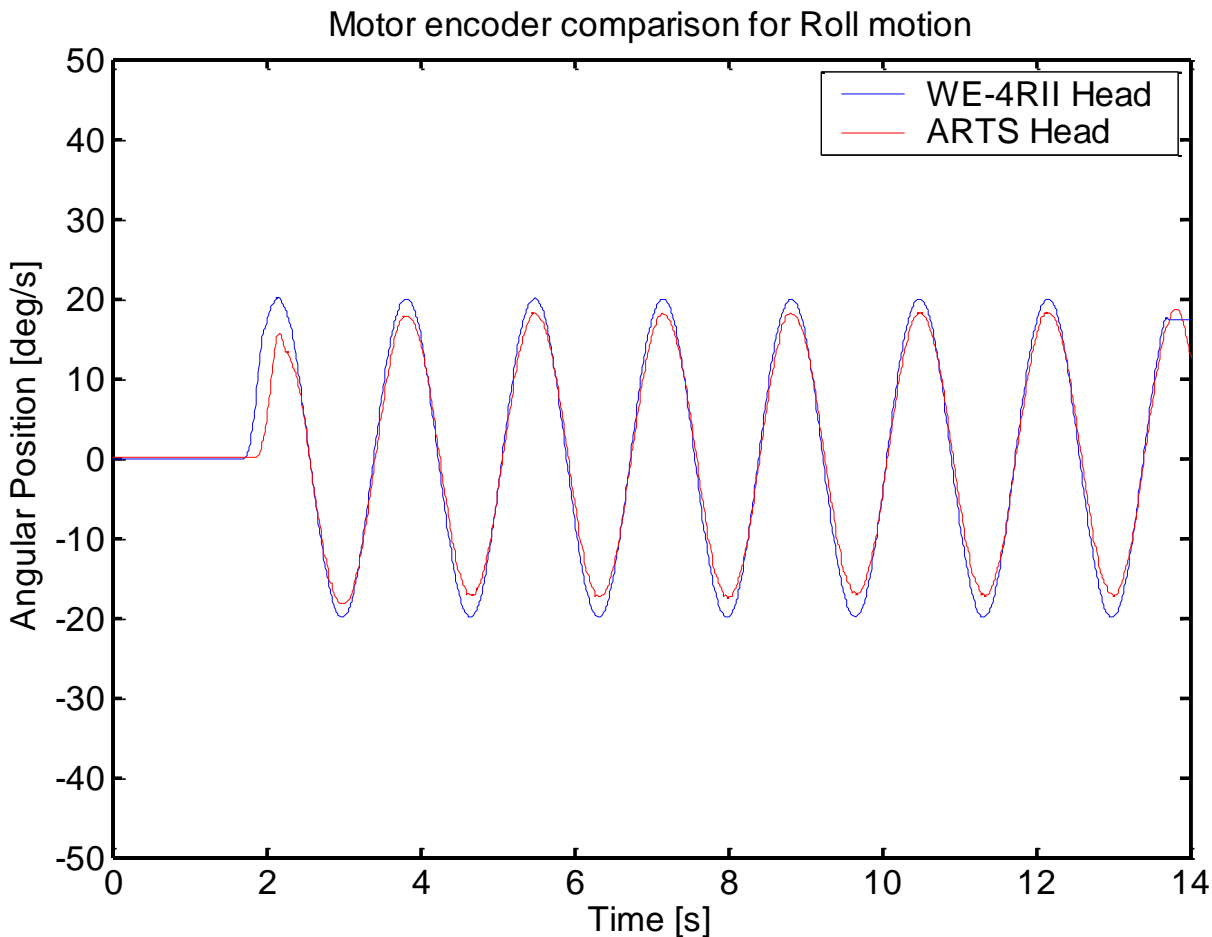
Motor encoder comparison for Upper Pitch movements



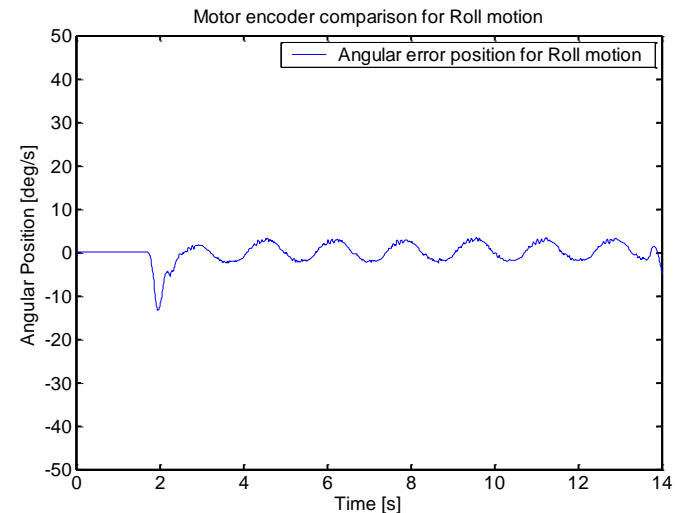
Angular error position during Upper Pitch movements



Motor encoder comparison for Roll movements

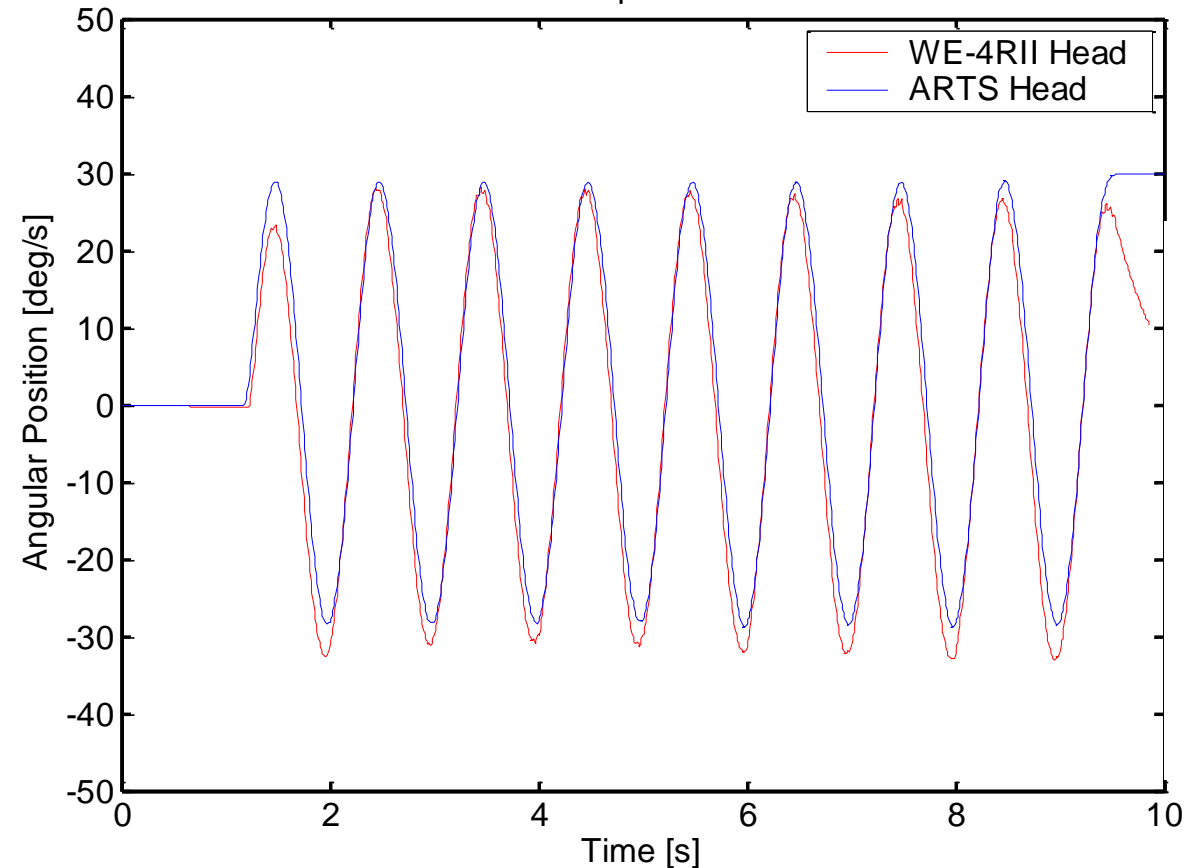


Angular error position during Roll movements



Motor encoder comparison for Yaw movements

Motor encoder comparison for Yaw motion



Angular error position during Yaw movements

