

Corso di Robotica (ROB)

Modulo Robotica Bioispirata

Il sistema somatosensoriale umano

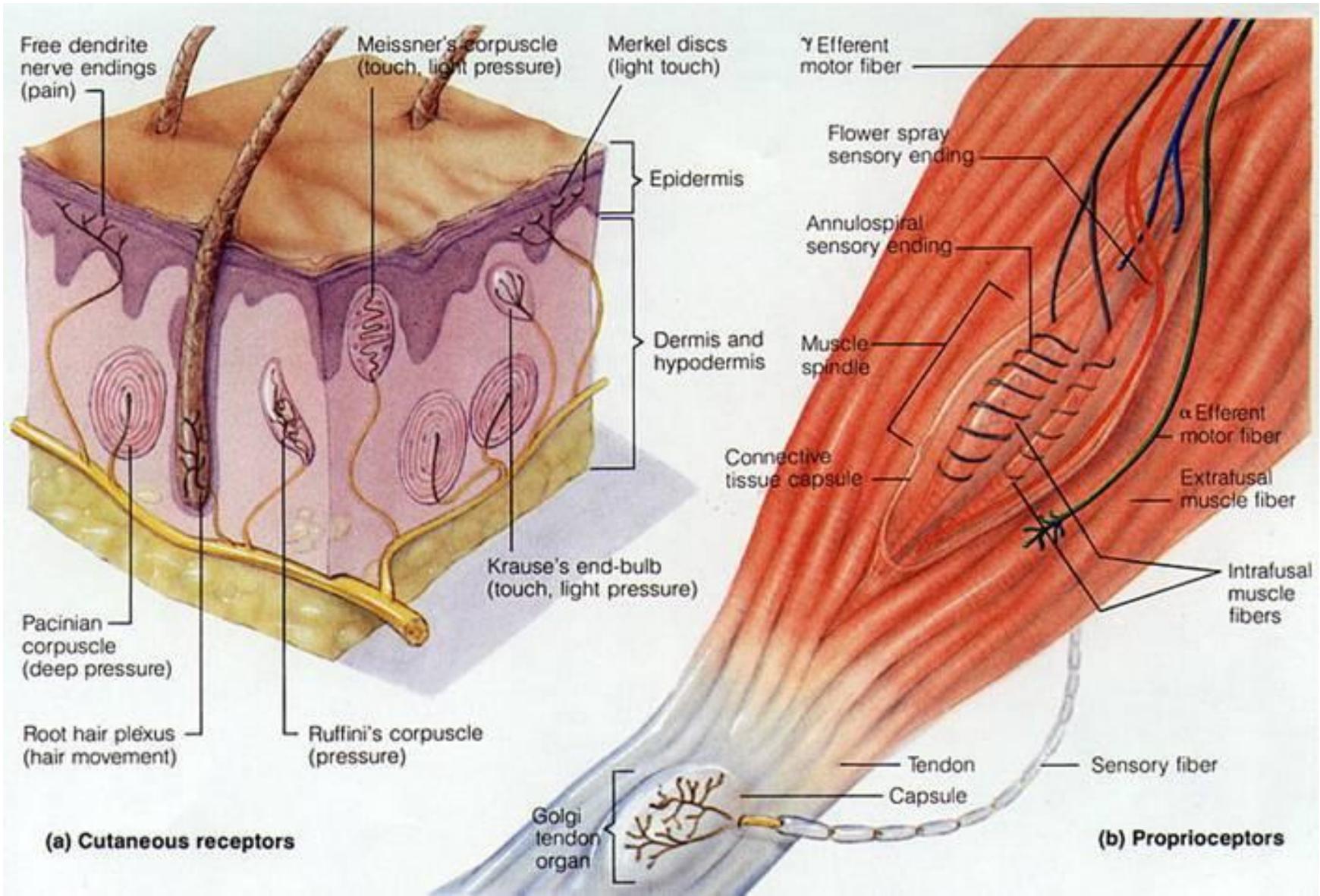
Cecilia Laschi

Istituto di BioRobotica, Scuola Superiore Sant'Anna

cecilia.laschi@sssup.it

050-883486

Il sistema somatosensoriale umano



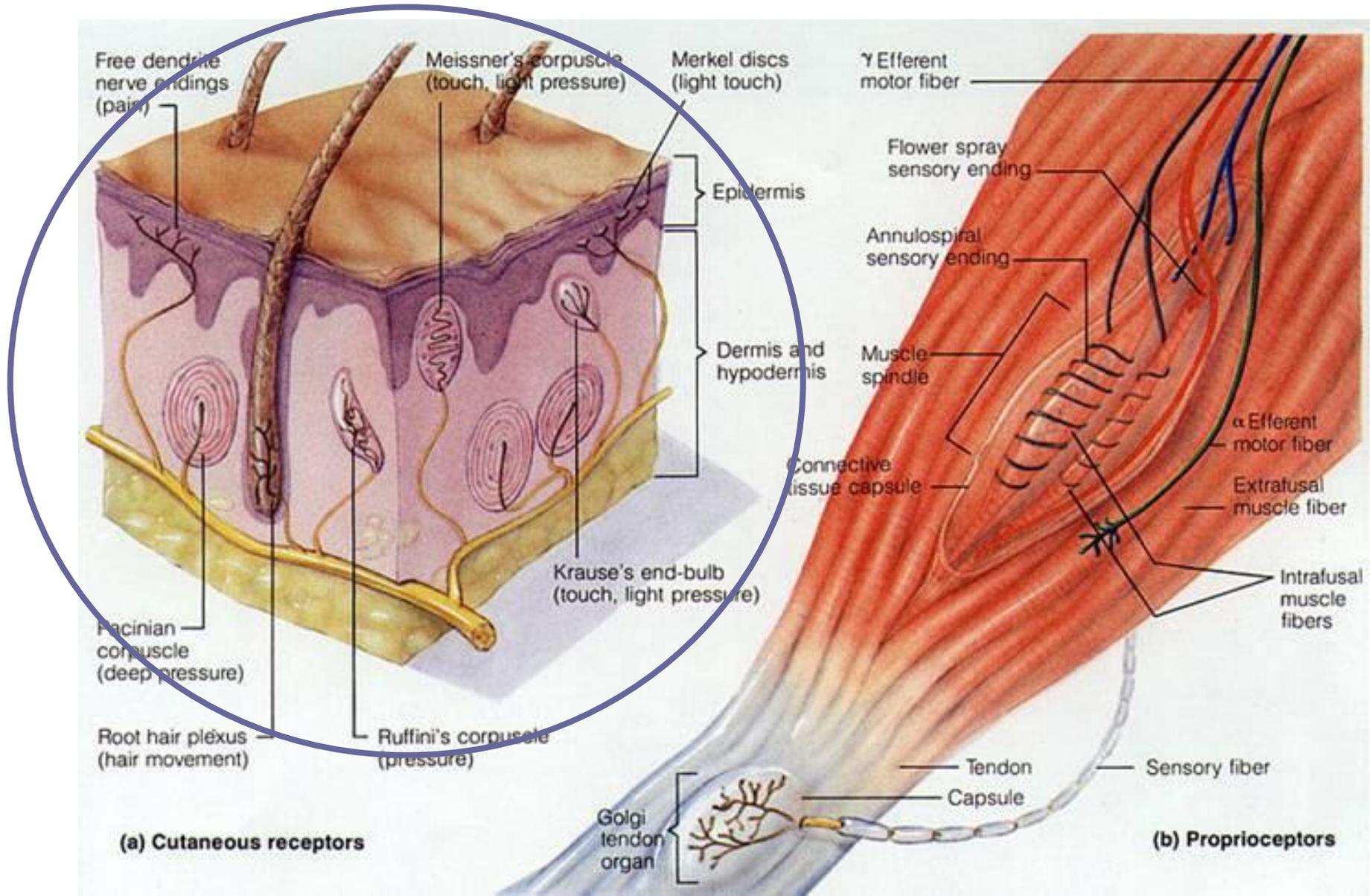
Sommario della lezione

- I recettori tattili e loro caratterizzazione
- Il polpastrello come organo sensoriale nel controllo della presa
- Caratteristiche principali dei recettori propriocettivi
- Le vie afferenti somatiche e i meccanismi di trasmissione delle informazioni sensoriali dalla periferia alle aree centrali

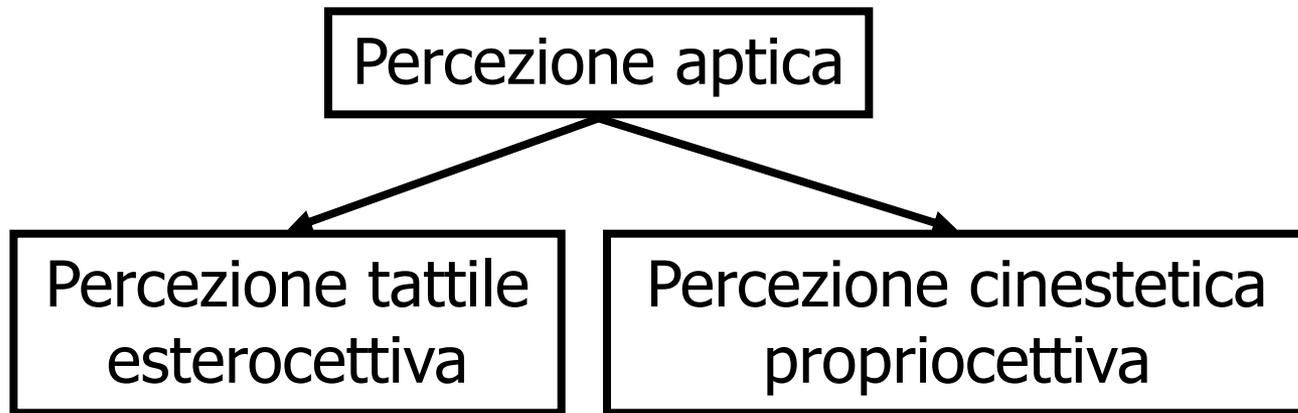
Sommario della lezione

- **I recettori tattili e loro caratterizzazione**
- Il polpastrello come organo sensoriale nel controllo della presa
- Caratteristiche principali dei recettori propriocettivi
- Le vie afferenti somatiche e i meccanismi di trasmissione delle informazioni sensoriali dalla periferia alle aree centrali

Il sistema somatosensoriale umano



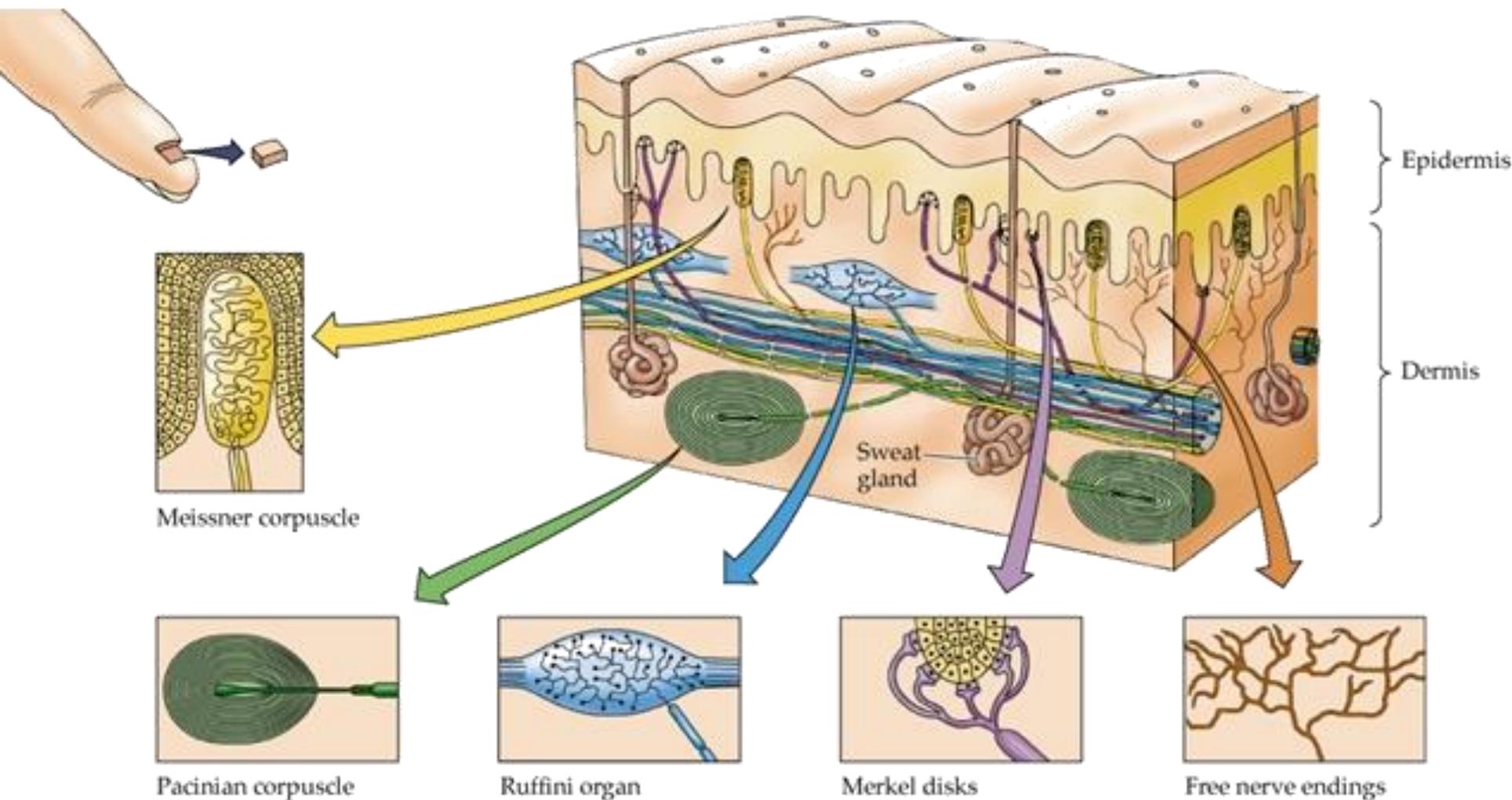
Il sistema somatosensoriale umano



Integrazione di:

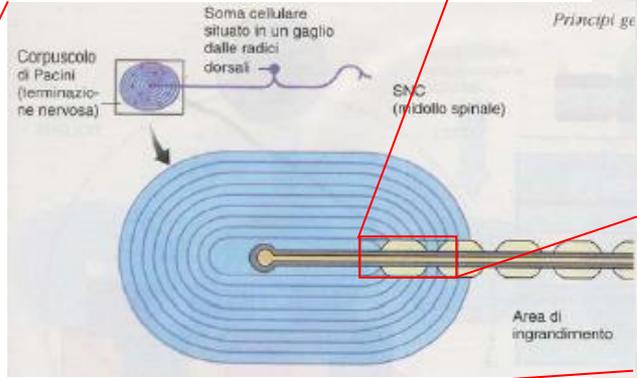
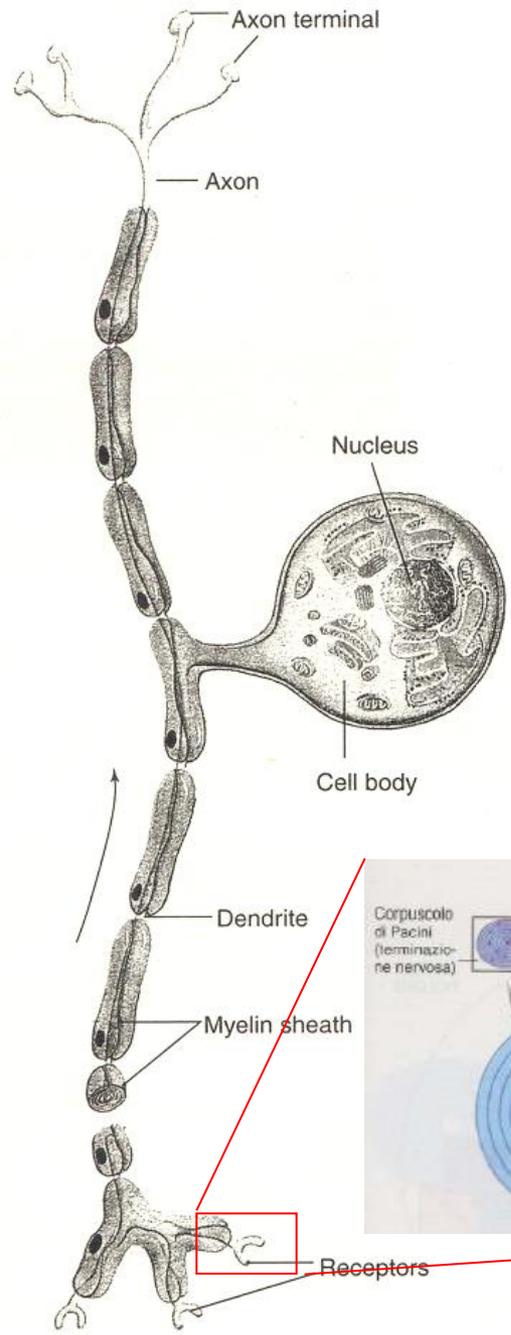
- **Esterocezione** (o percezione tattile):
percezione di quantità fisiche misurate nell'ambiente esterno, come forze, temperature, ecc.
- **Propriocezione** (o percezione cinestetica):
percezione di quantità fisiche che indicano lo stato interno del corpo umano, come livello di contrazione muscolare, stiramento di tendini e legamenti, ecc.

I meccanicocettori nella pelle glabra

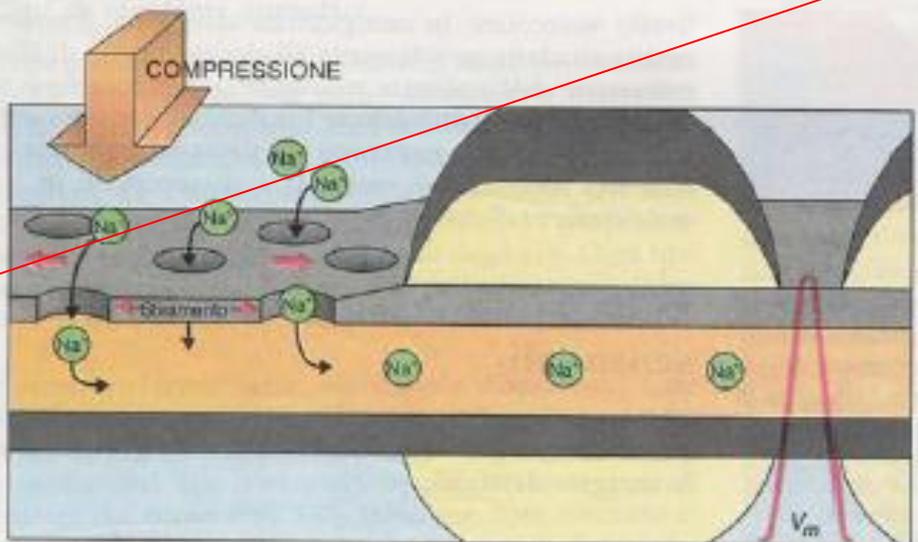
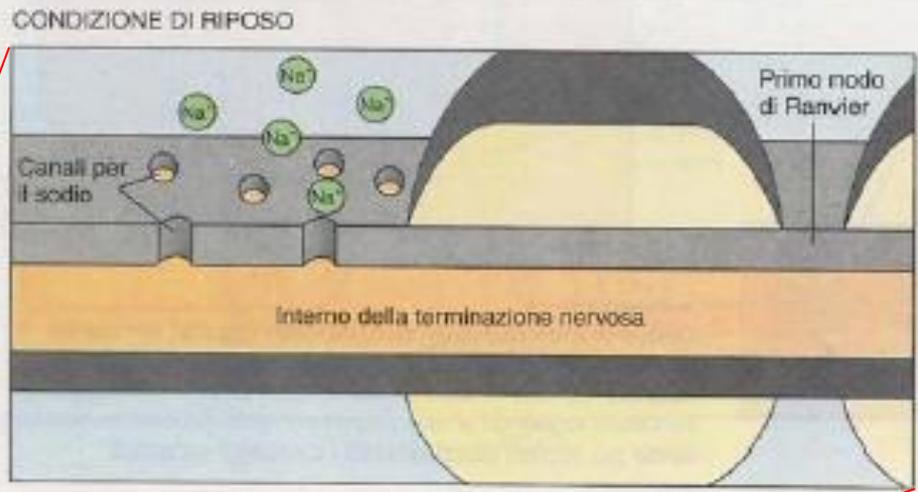


Meccanismo di stimolazione meccanica

Afferent (sensory) neuron



Principi ge

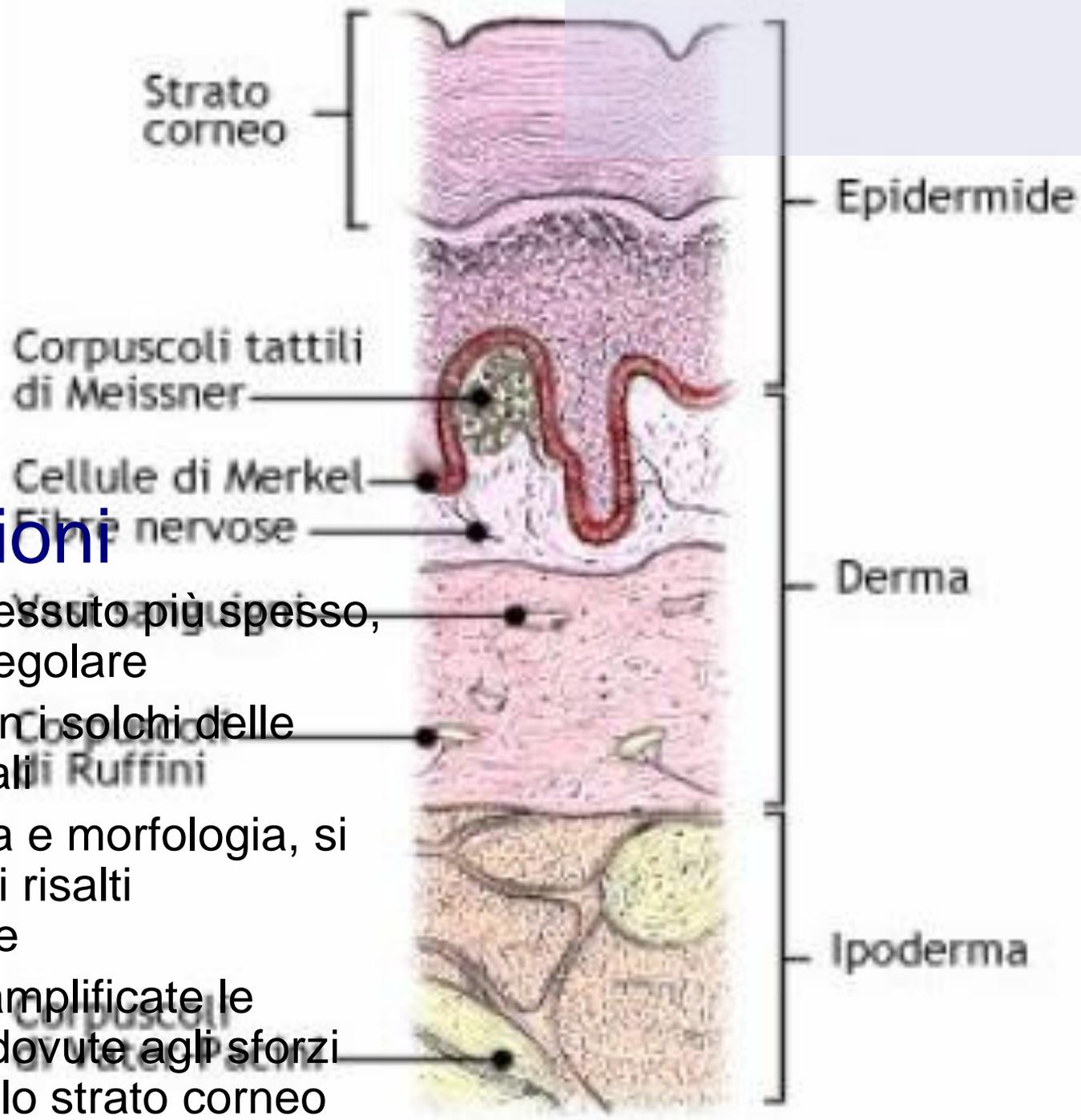


Strato cor

- Cellule robuste l'alto dal processo del tessuto
- Le sue caratteristiche meccaniche e distribuzione zone sottostanti

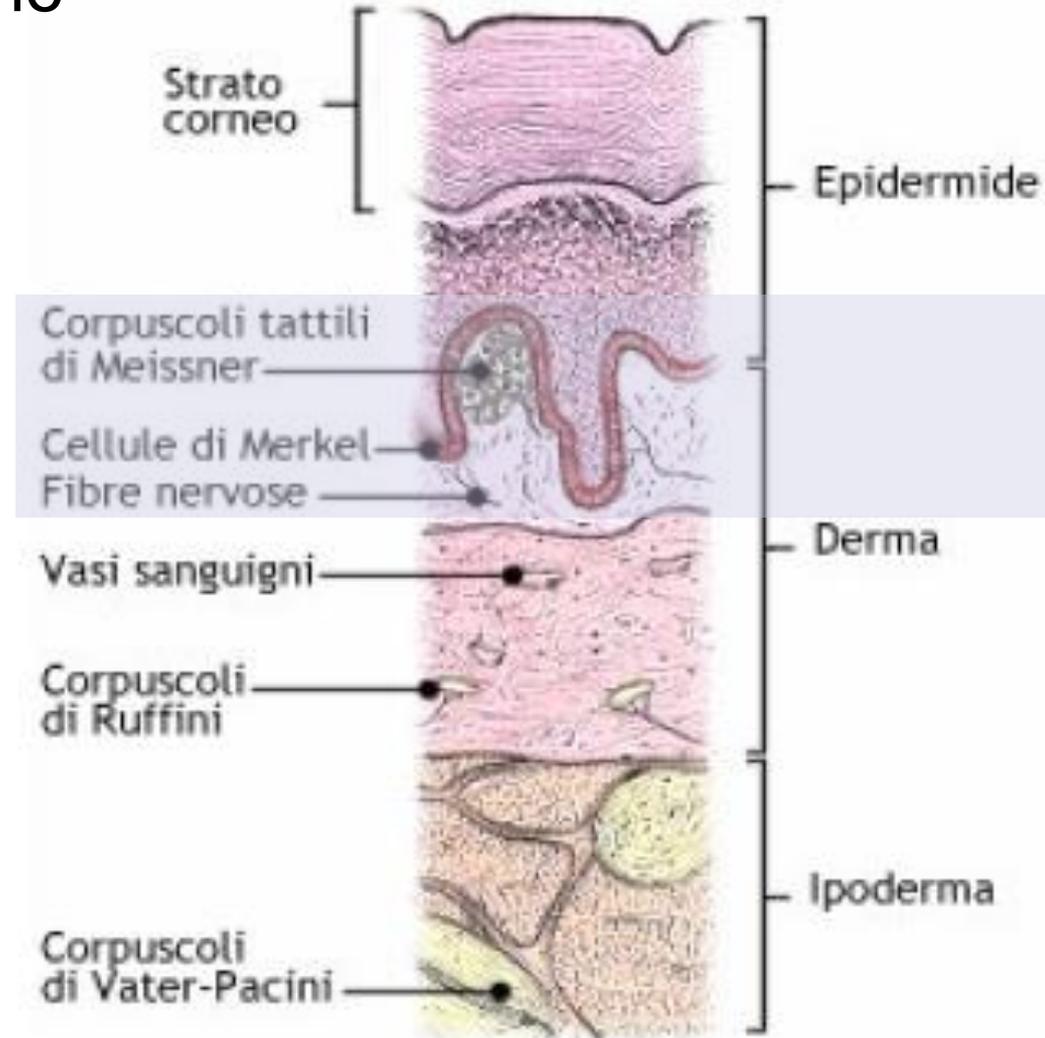
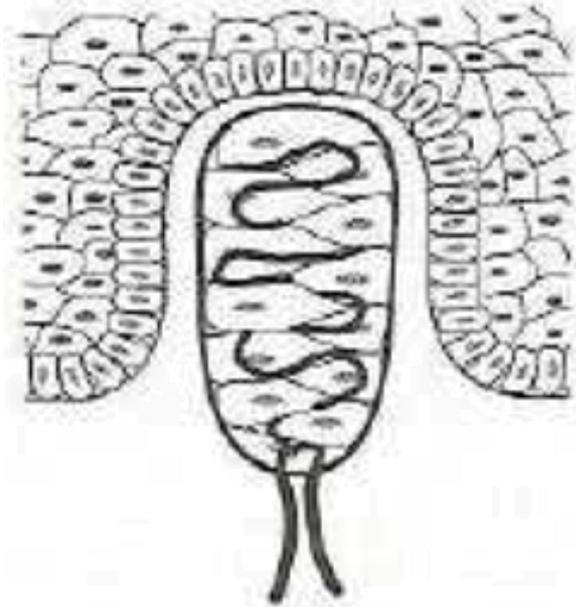
Estroflessioni

- Costituite da tessuto più spesso, dalla forma irregolare
- Coincidenti con i solchi delle impronte digitali
- Per loro natura e morfologia, si muovono con i risalti dell'epidermide
- Trasmettono amplificate le deformazioni dovute agli sforzi tangenziali sullo strato corneo

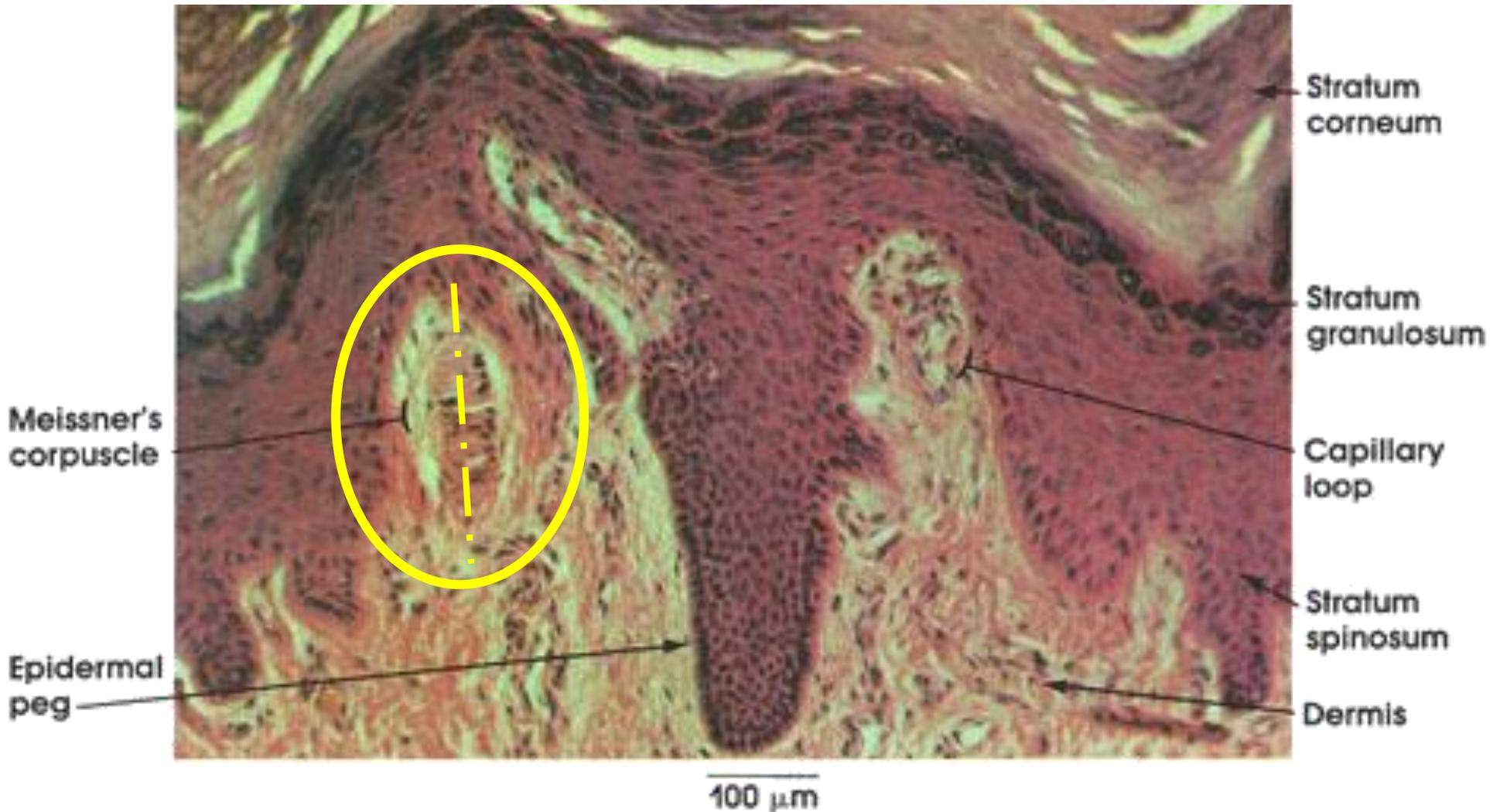


Corpuscoli di Meissner

- 43% unità tattili della mano
- dimensioni: 80 x 30 μm
- asse maggiore perpendicolare alla superficie della pelle
- soglia: 10,2 mN/mm^2

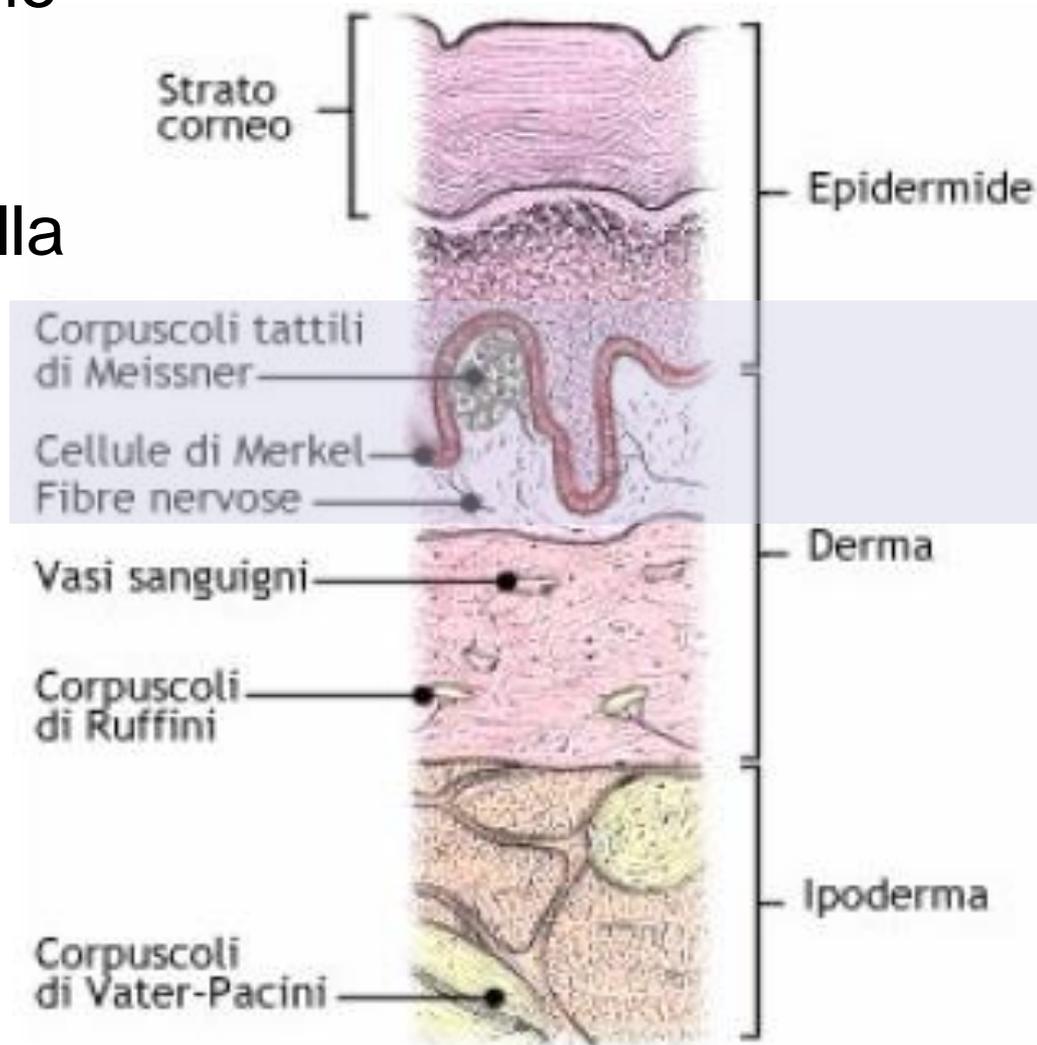
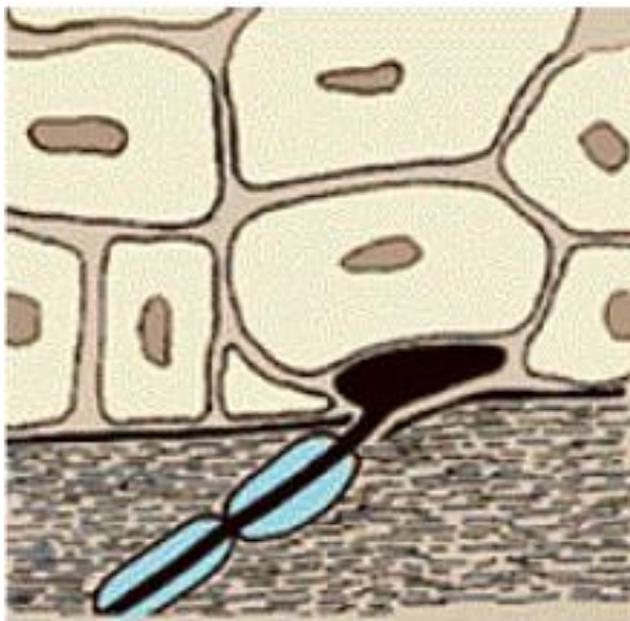


Corpuscoli di Meissner



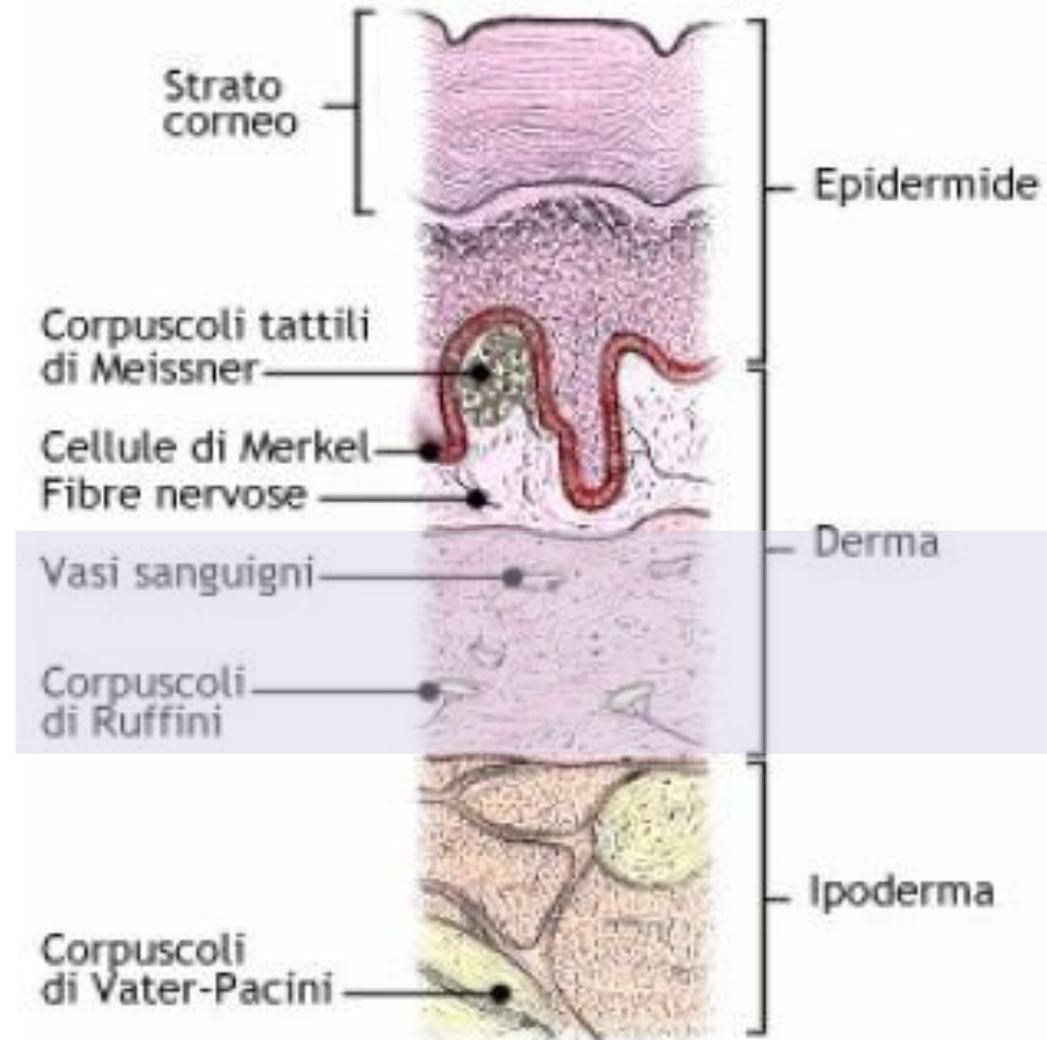
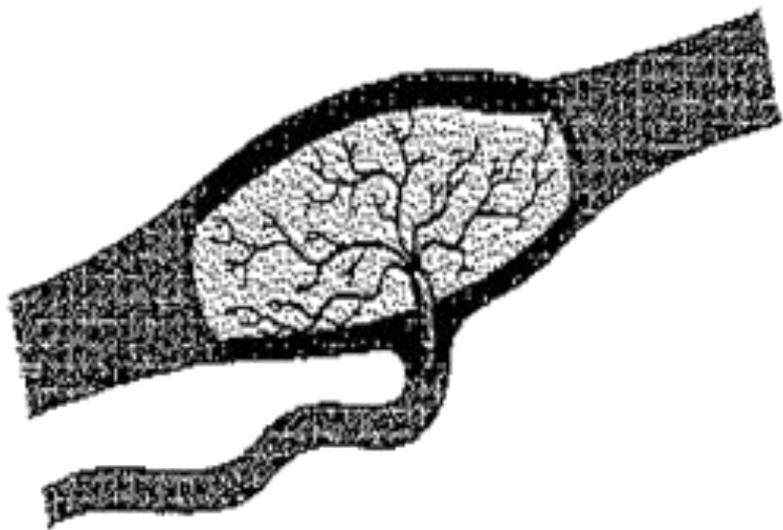
Dischi di Merkel

- 25% unità tattili della mano
- struttura discoforme
- 10-15 μm di diametro
- disposti parallelamente alla superficie della pelle
- soglia: 22,8 mN/mm^2



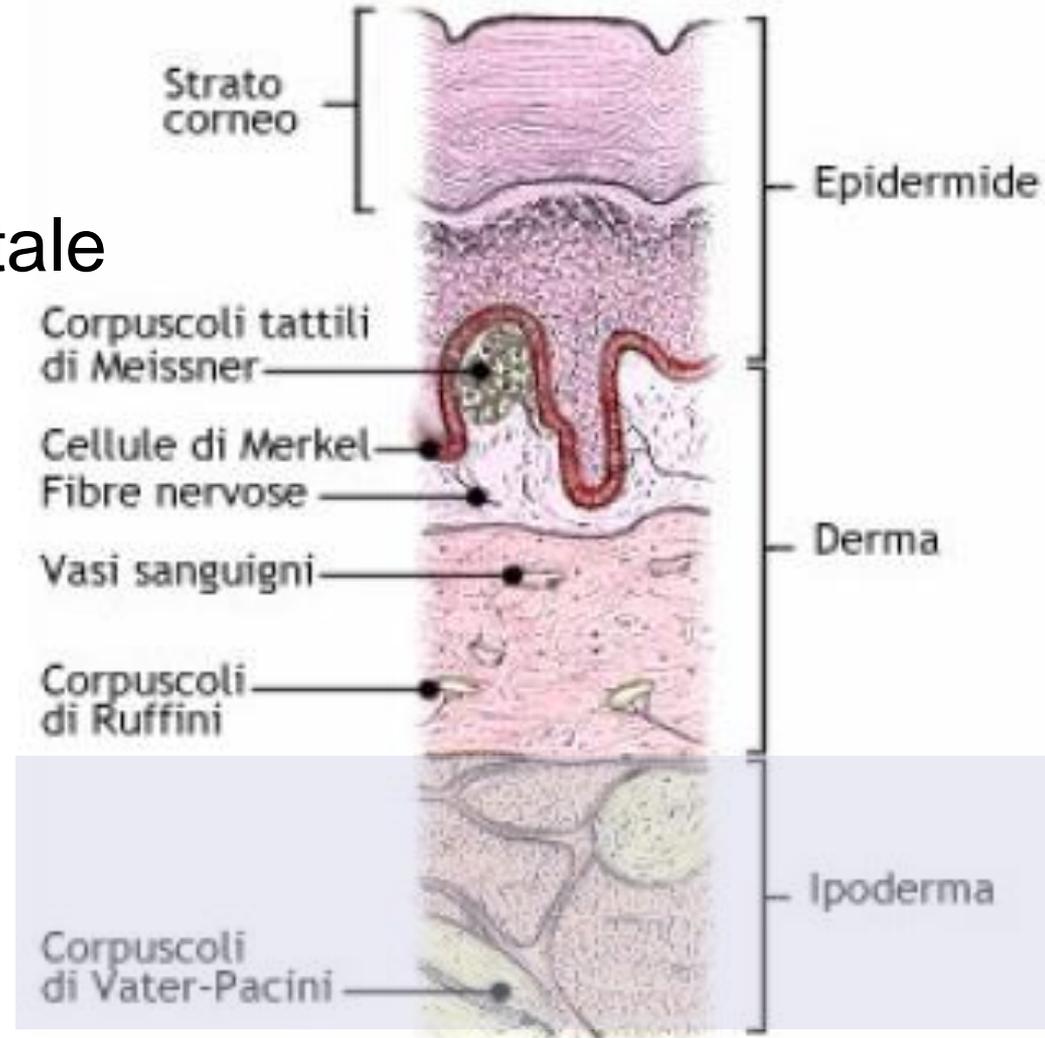
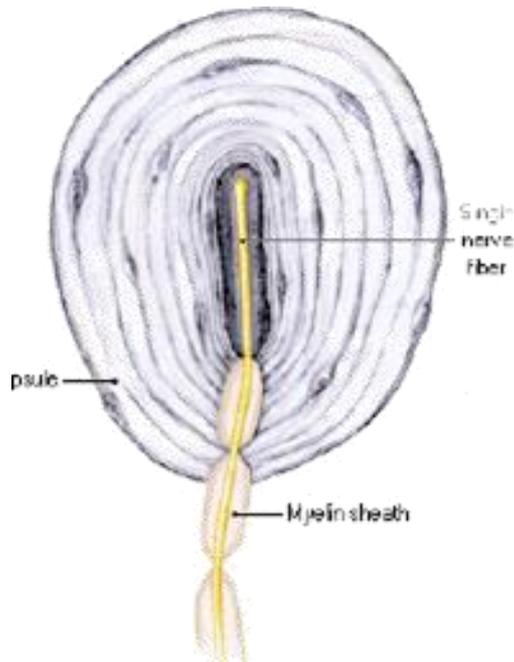
Corpuscoli di Ruffini

- 19% unità tattili della mano
- soglia: 131,6 mN/mm²



Corpuscoli di Pacini

- 13% unità tattili della mano
- lunghezza: 1-4 mm
- diametro: 0,5-1 mm
- asse maggiore orizzontale
- soglia: $9,5 \text{ mN/mm}^2$

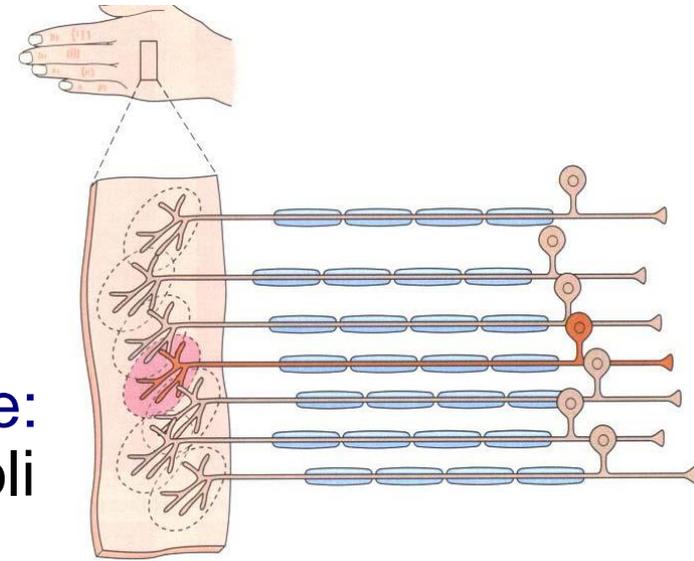


Corpuscoli di Pacini



Campi recettivi

- Campo recettivo di un recettore: area cutanea dalla quale il recettore riceve stimoli
- Campo recettivo di un neurone afferente: area cutanea dalla quale ricevono stimoli i suoi recettori

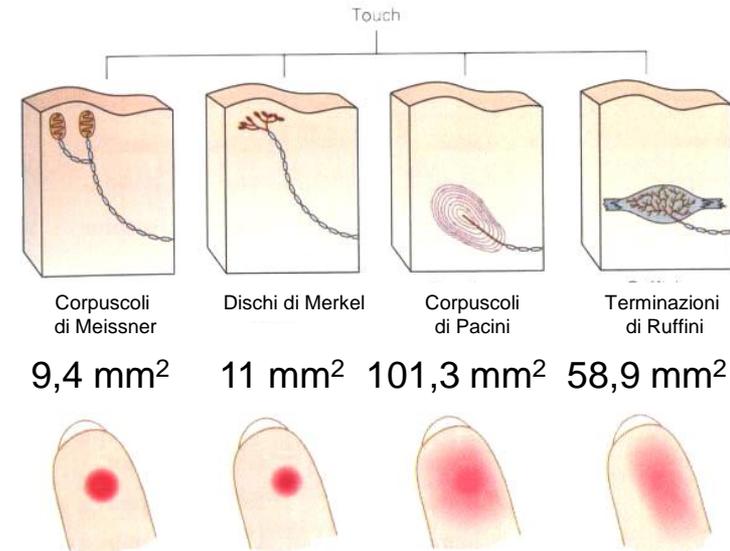


Se la pelle viene stimolata in due punti appartenenti allo stesso campo recettivo, la differenza spaziale non viene percepita

⇒ La dimensione del campo recettivo determina la risoluzione spaziale con cui gli stimoli sono percepiti

La sovrapposizione tra campi recettivi aumenta la risoluzione spaziale, fino a 2 mm sul polpastrello

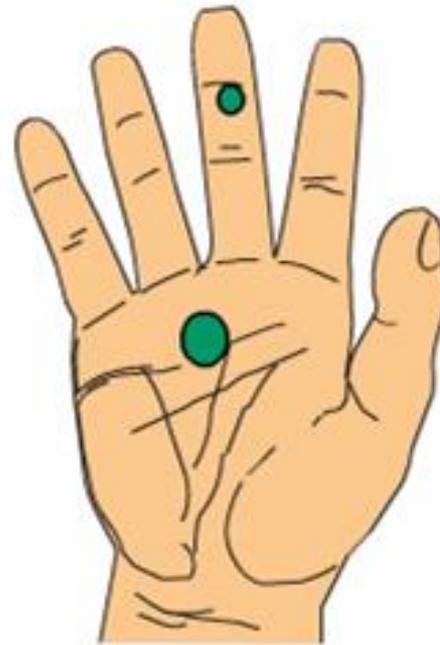
- La dimensione del campo recettivo di un **recettore** aumenta con la profondità del recettore nell'epidermide



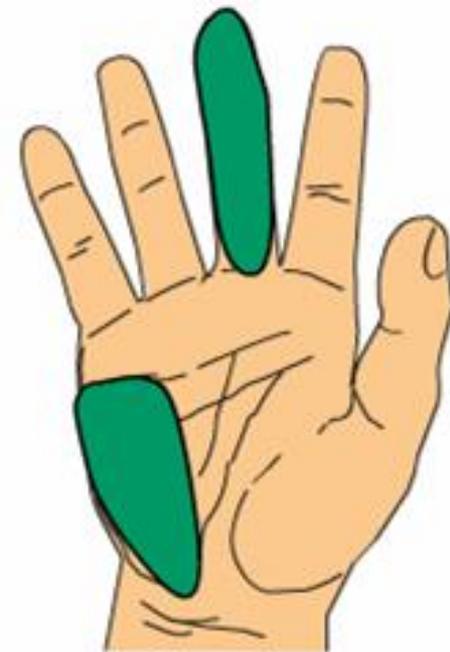
Dimensione dei campi recettivi

Receptive field size increases with the receptor's depth in skin.

Pacinian receptors are deep in the skin and have the largest receptive fields (r.f.).

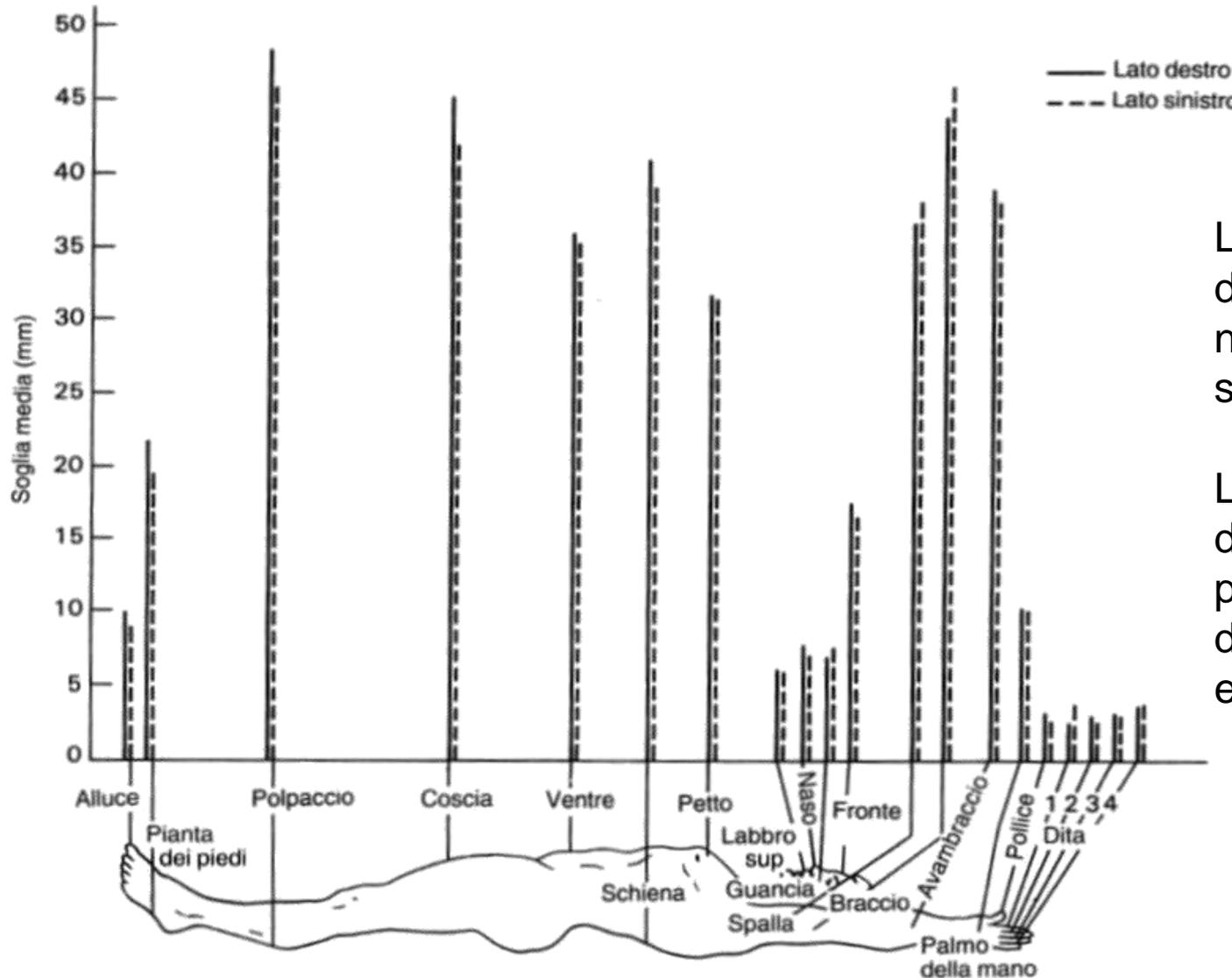


small r.f.
Meissner



large r.f.
Pacinian

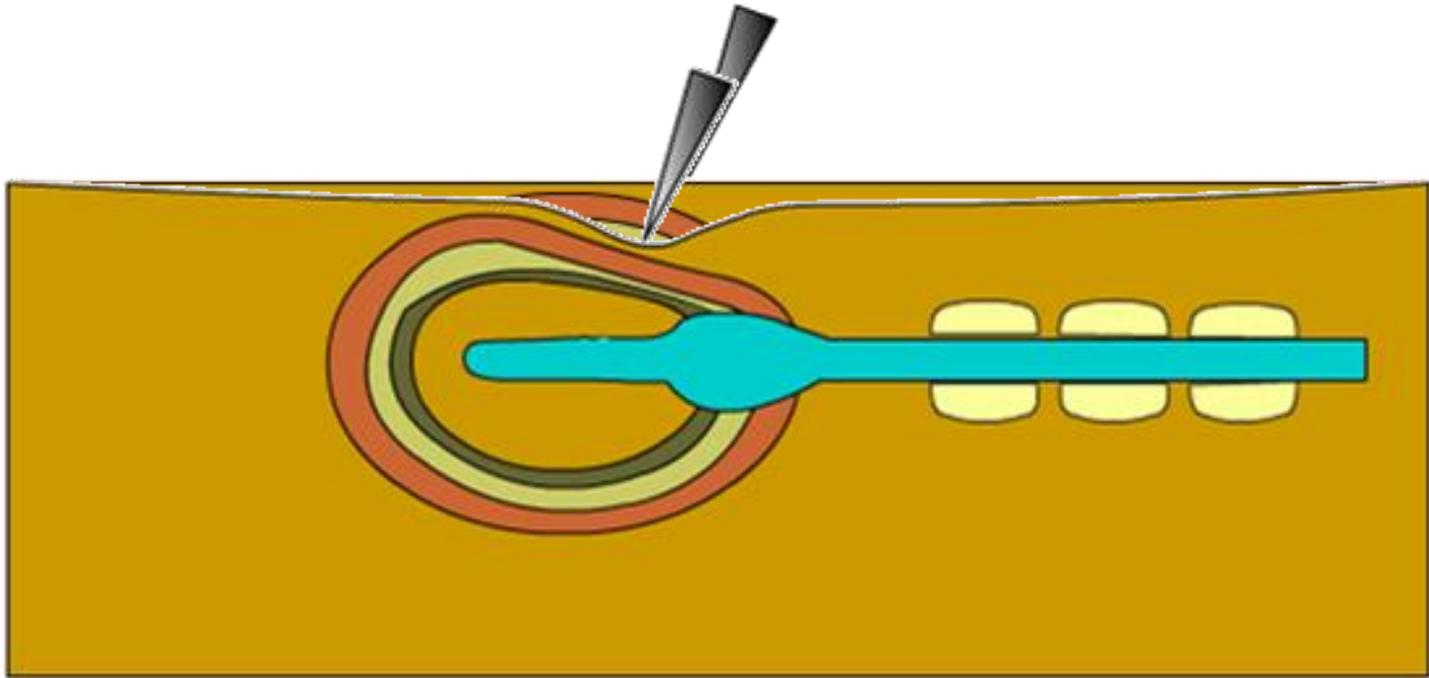
Dimensione dei campi recettivi



La discriminazione dei due punti è diversa nelle varie zone della superficie corporea.

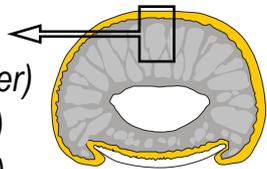
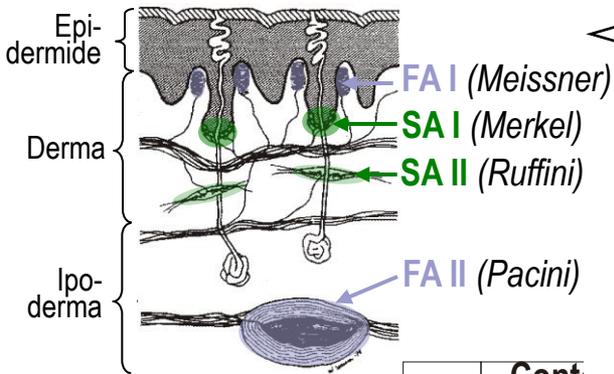
La massima capacità discriminativa è posseduta dalla punta delle dita, dalle labbra e dalla lingua

Meccanismo di adattamento allo stimolo



La capacità e la velocità di adattamento allo stimolo dipendono dalla morfologia e dalle proprietà meccaniche (elasticità) dei tessuti che rivestono la terminazione nervosa

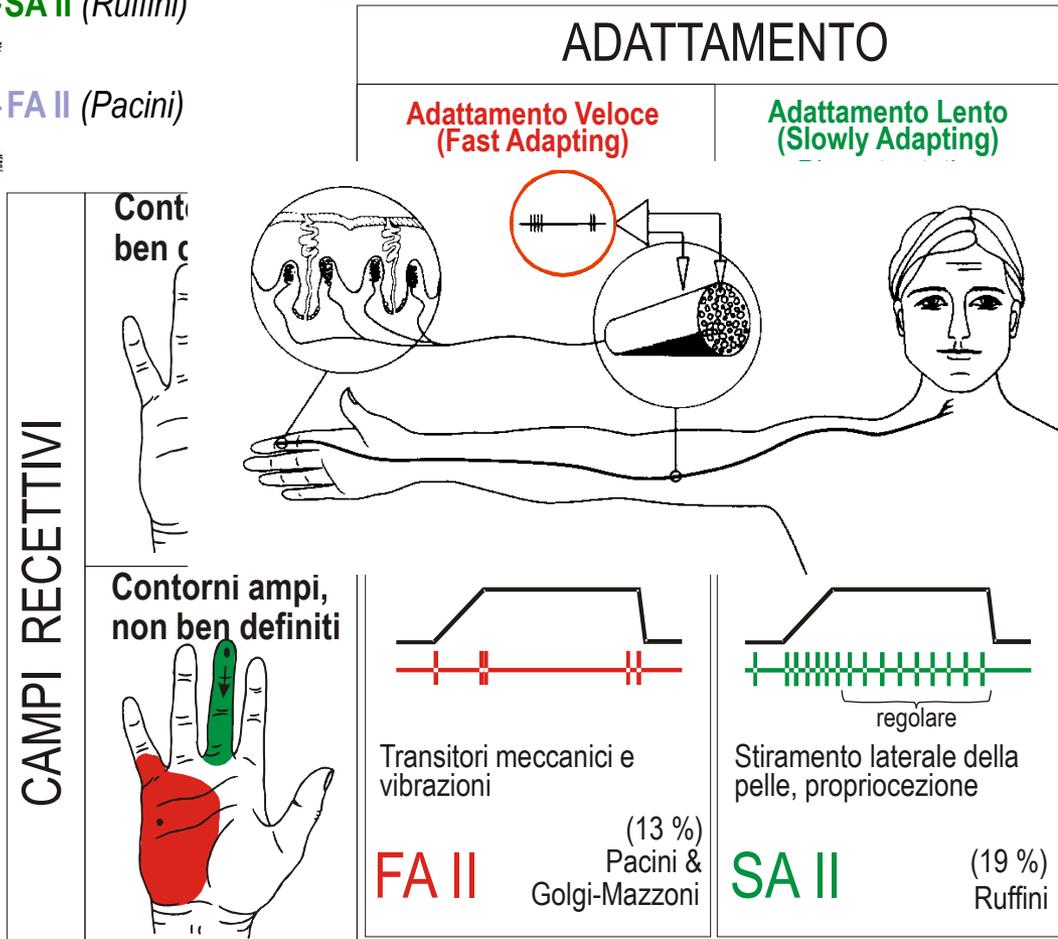
Classificazione dei meccanocettori



Complessi meccanismi di filtraggio da parte dei tessuti, che determinano le proprietà di codifica dei recettori



Quattro tipi di recettori codificano aspetti diversi della deformazione dei polpastrelli



Caratterizzazione quantitativa della sensibilità tattile umana

- **Soglia appena percettibile** (JND = Just Noticeable Difference): minima differenza percepibile tra due stimoli

$$\text{JND} = K m$$

con K costante e m = stimolo minore

- Legge di Weber-Fechner: modello della **sensazione di intensità**

$$S = K \log m$$

⇒ la sensazione di variazione è la stessa per variazioni proporzionali dello stimolo, indipendentemente dall'intensità degli stimoli

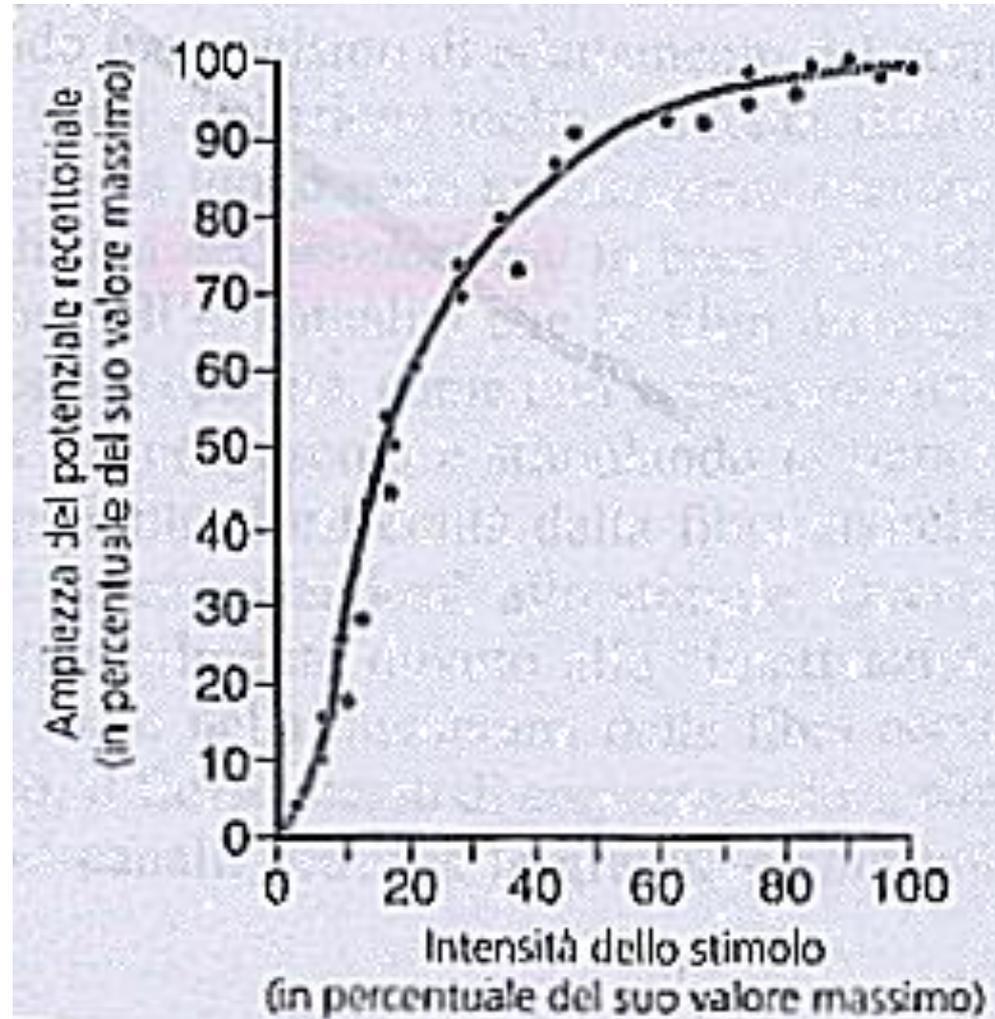
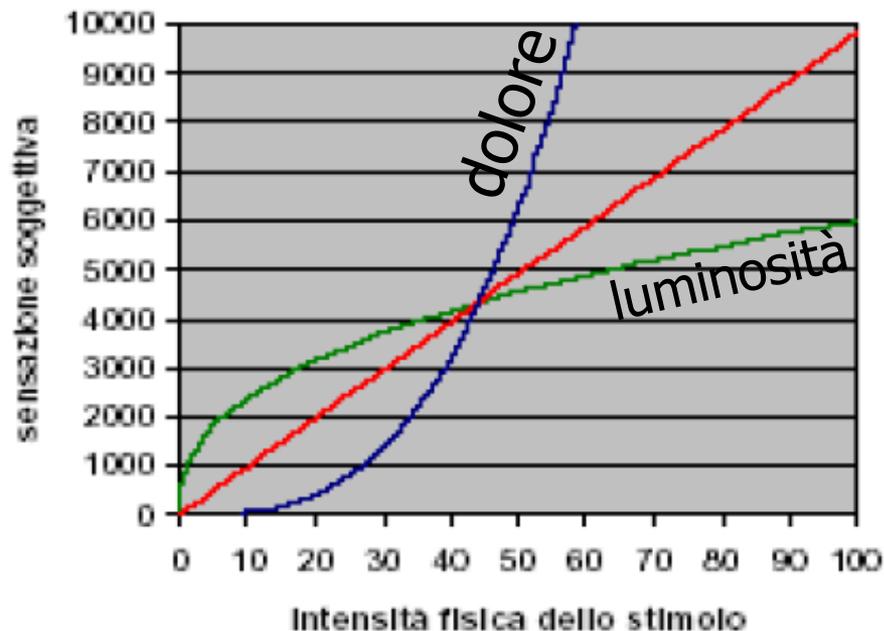
- Modifica di Stevens:

$$S = K m^b$$

con b compreso tra 0 e 1

Relazione tra intensità dello stimolo e potenziale recettoriale

- La sensibilità tattile è maggiore per stimoli di minore intensità



Sintesi delle caratteristiche dei meccanocettori

AFFERENTE TATTILE	CLASSE	CAMPO RECETTIVO (diametro)	FUNZIONE	FREQUENZA	SOGLIA DI RISPOSTA* (pressione)	RUOLO
MEISSNER	FA-I	9,4 mm ² (3,4 mm)	BORDI SOTTILI, BEN DEFINITI	8-64 Hz	0,58 mN (10,2 mN/mm ²)	SCIVOLAMENTO INCIPIENTE, FORME LOCALI, FORZE SUL POLPASTRELLO, VARIAZIONI DELLA FORZA E VELOCITA' DI VARIAZIONE
MERKEL	SA-I	11 mm ² (3,7 mm)	BORDI SOTTILI, BEN DEFINITI	2-32 Hz	1,3 mN (22,8 mN/mm ²)	CONTORNI DEGLI OGGETTI, FORZE SUL POLPASTRELLO, INTENSITA', VIBRAZIONI
RUFFINI	SA-II	58,9 mm ² (8,7 mm)	BORDI AMPI, NON BEN DEFINITI	< 8 Hz	7,5 mN (131,6 mN/mm ²)	STIRAMENTI LATERALI DELLA PELLE, FORZE SUL POLPASTRELLO
PACINI	FA-II	101,3 mm ² (11,4 mm)	BORDI AMPI, NON BEN DEFINITI	64-400 Hz	0,54 mN (9,5 mN/mm ²)	TRANSITORI MECCANICI, VIBRAZIONI

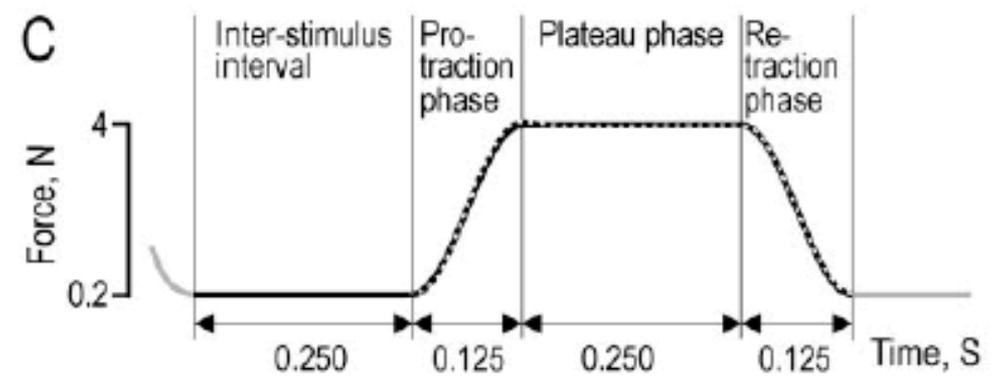
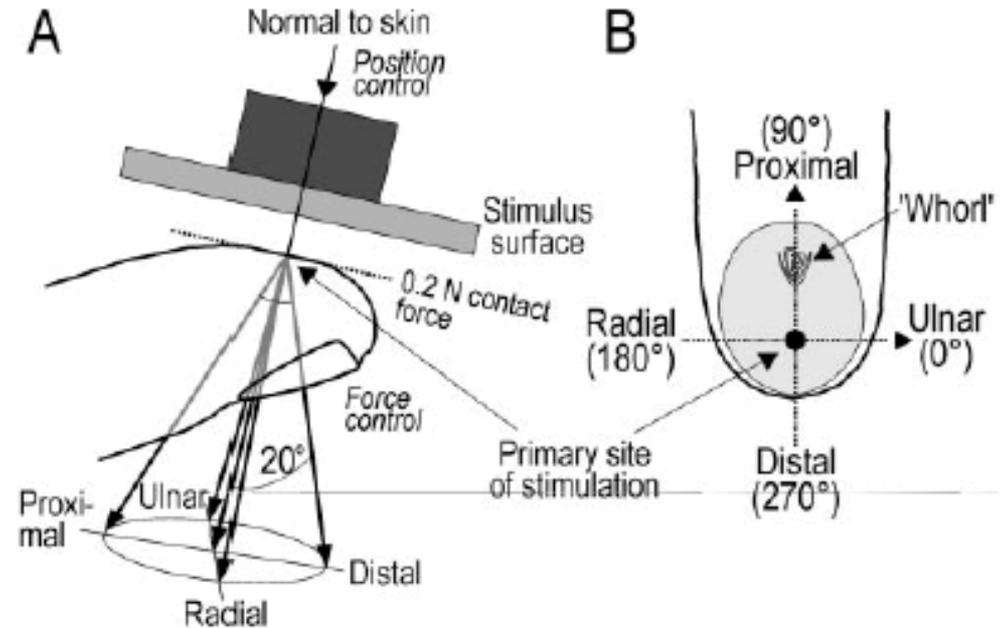
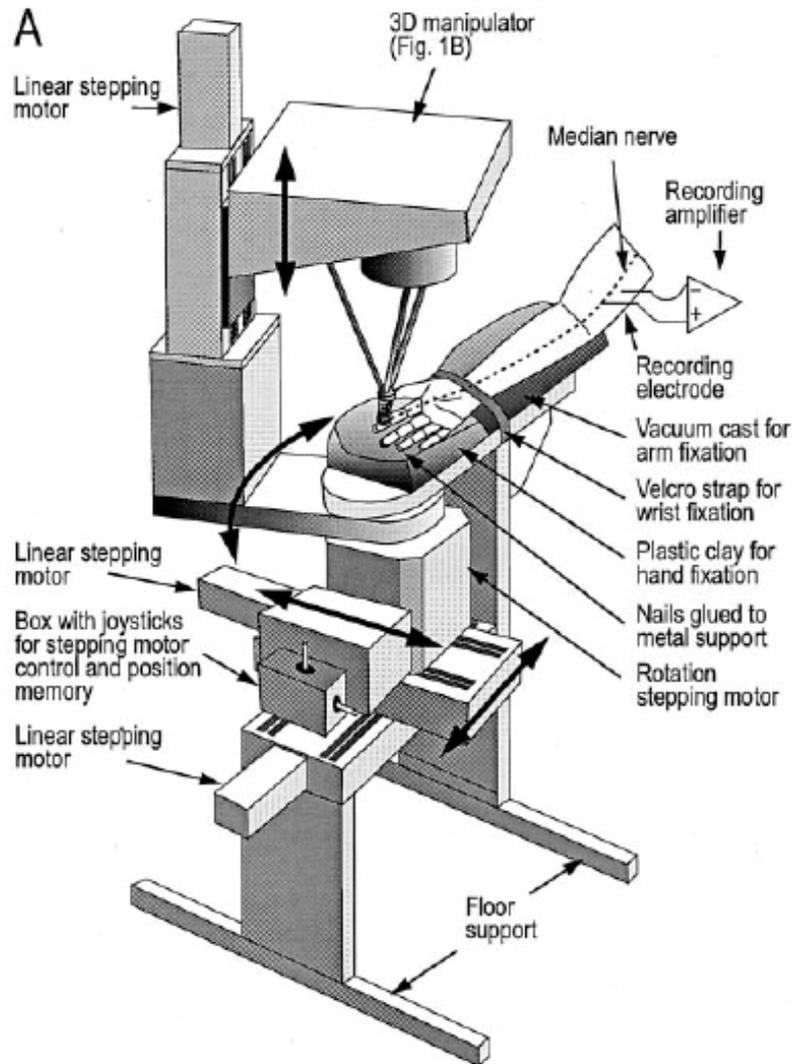
Il 90% dei recettori di tipo SA-I e FA-I risponde a uno stimolo di 5 mN*, ovvero di 87mN/mm²

*forza applicata con un Von Frey hair, del diametro di 0,27 mm

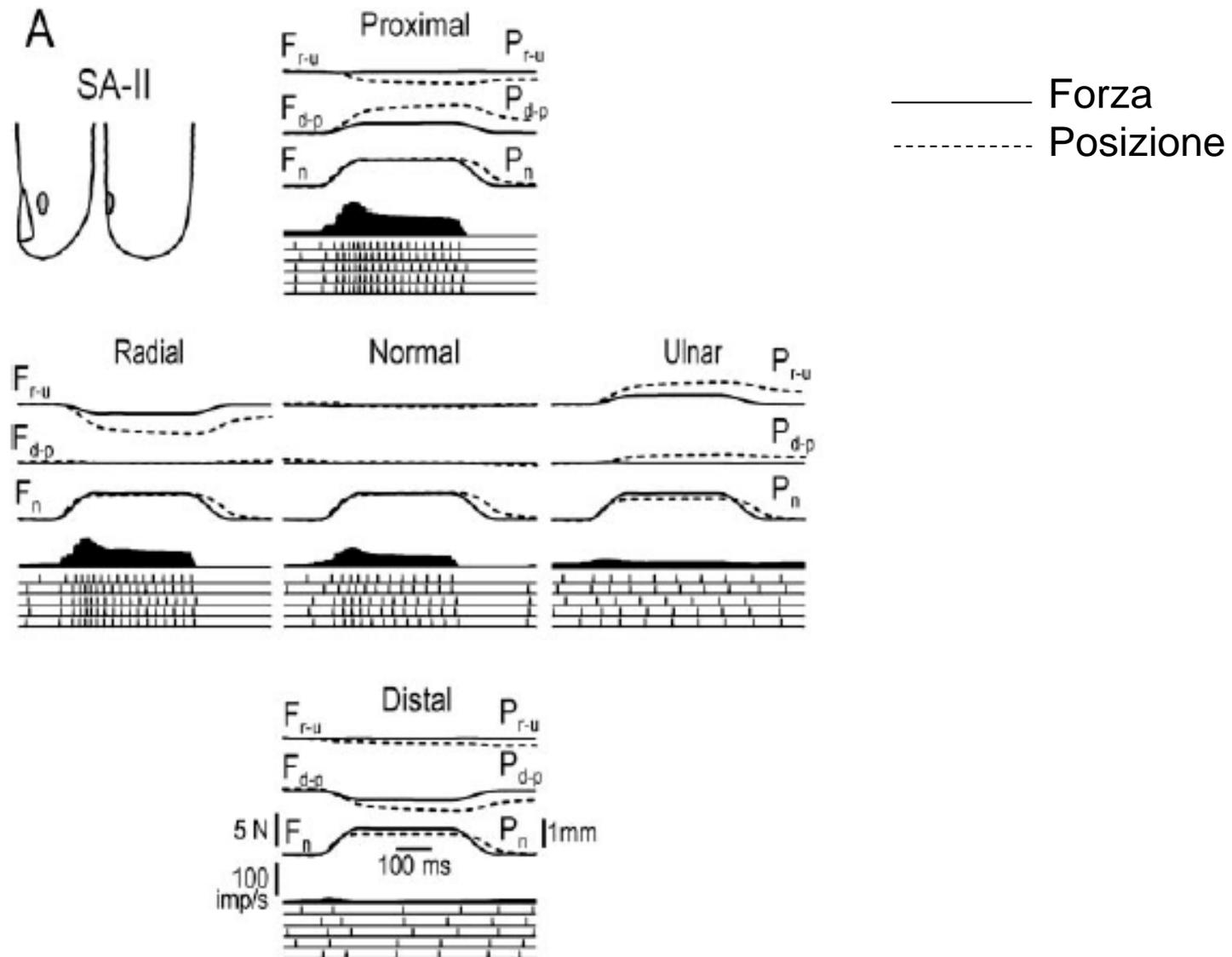
Sommario della lezione

- I recettori tattili e loro caratterizzazione
- Il polpastrello come organo sensoriale nel controllo della presa
- Caratteristiche principali dei recettori propriocettivi
- Le vie afferenti somatiche e i meccanismi di trasmissione delle informazioni sensoriali dalla periferia alle aree centrali

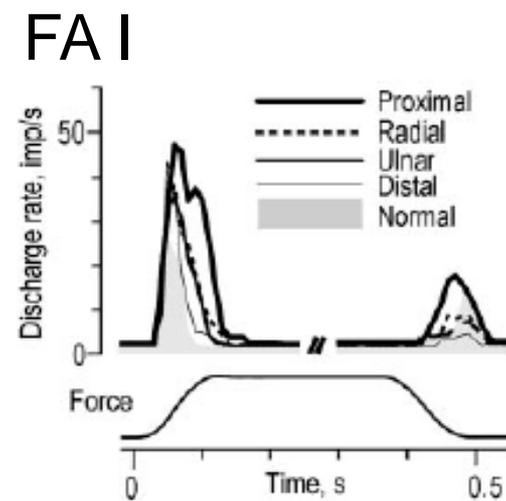
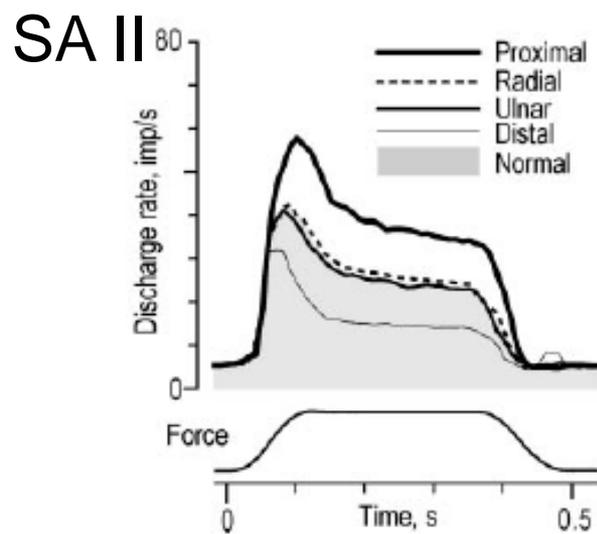
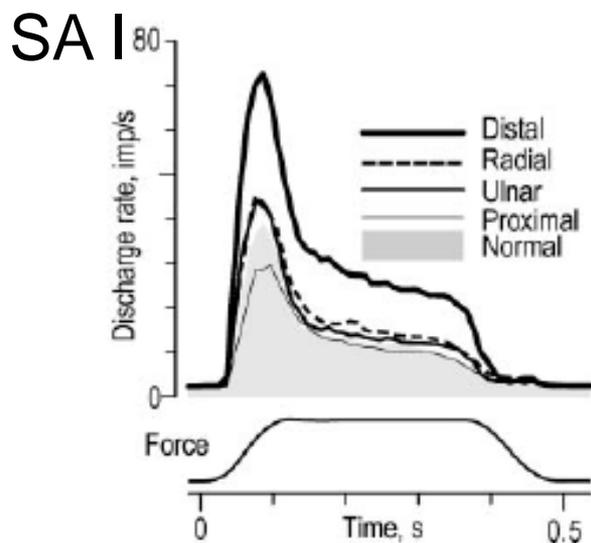
Caratterizzazione delle risposte alla forza applicata sulla punta delle dita



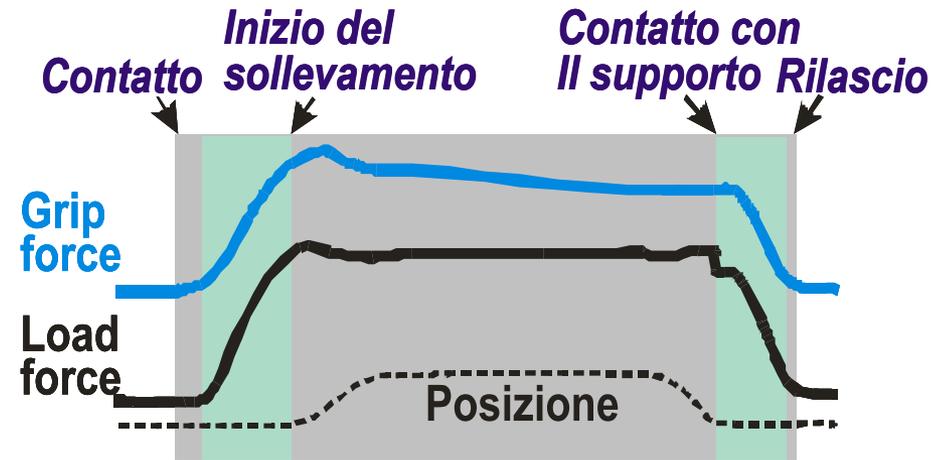
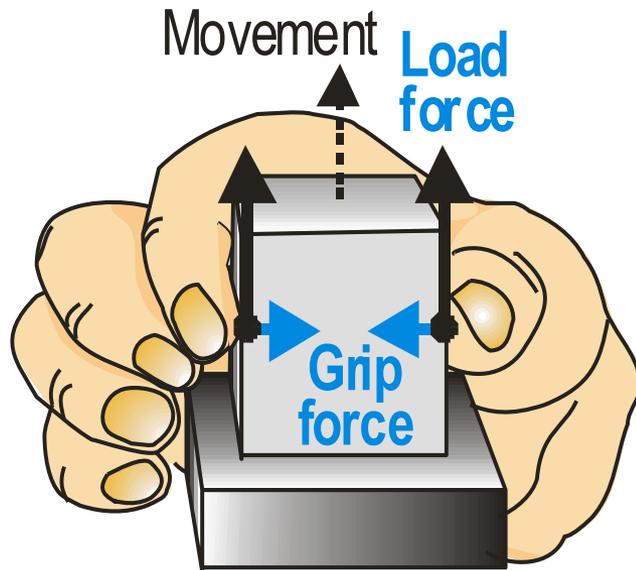
Risposte dei recettori SA-I, FA-I e SA-II alla forza applicata sulla punta delle dita



Risposte dei recettori SA-I, FA-I e SA-II alla forza applicata sulla punta delle dita

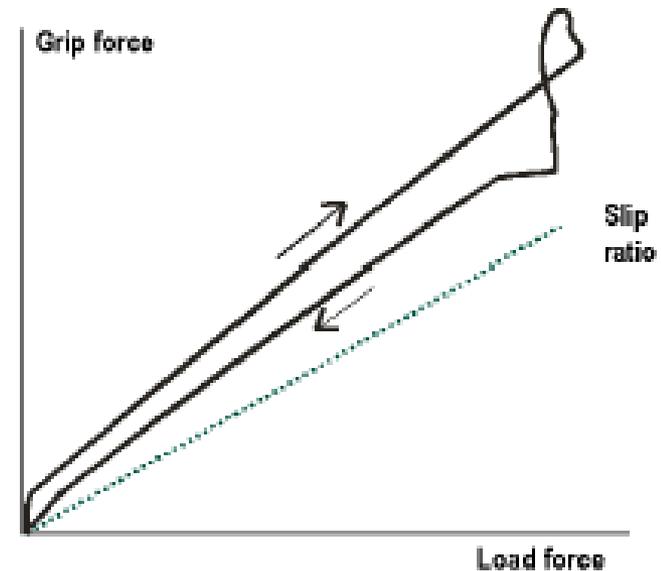


Il ruolo del tatto nel controllo della presa

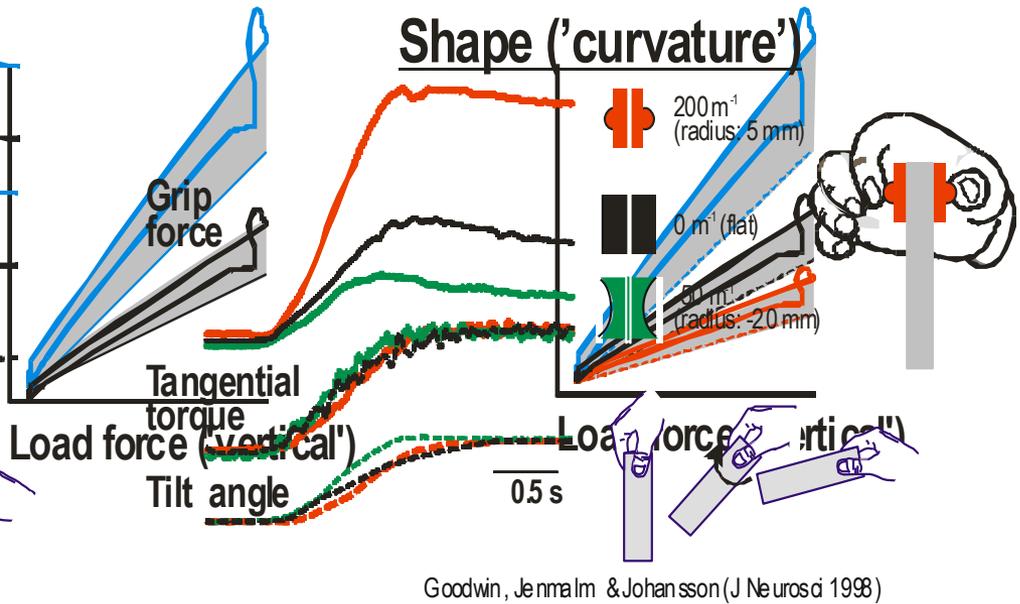
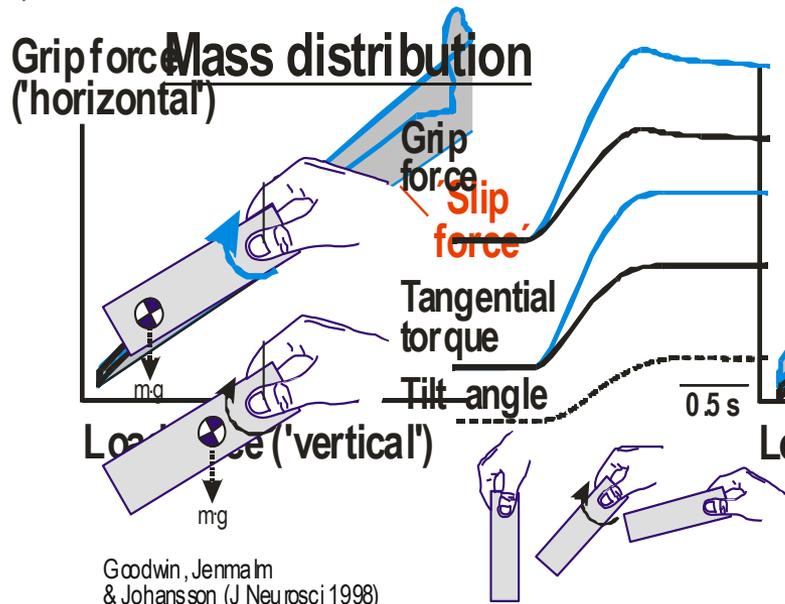
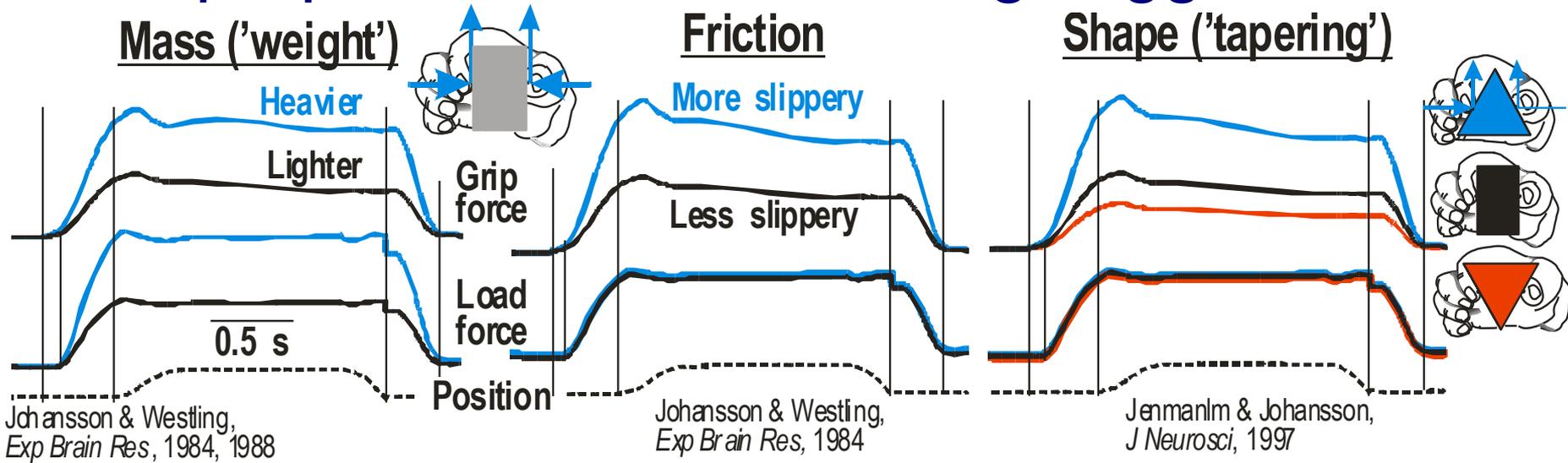


Adattamento parametrico delle fasi di azione alle proprietà meccaniche degli oggetti:

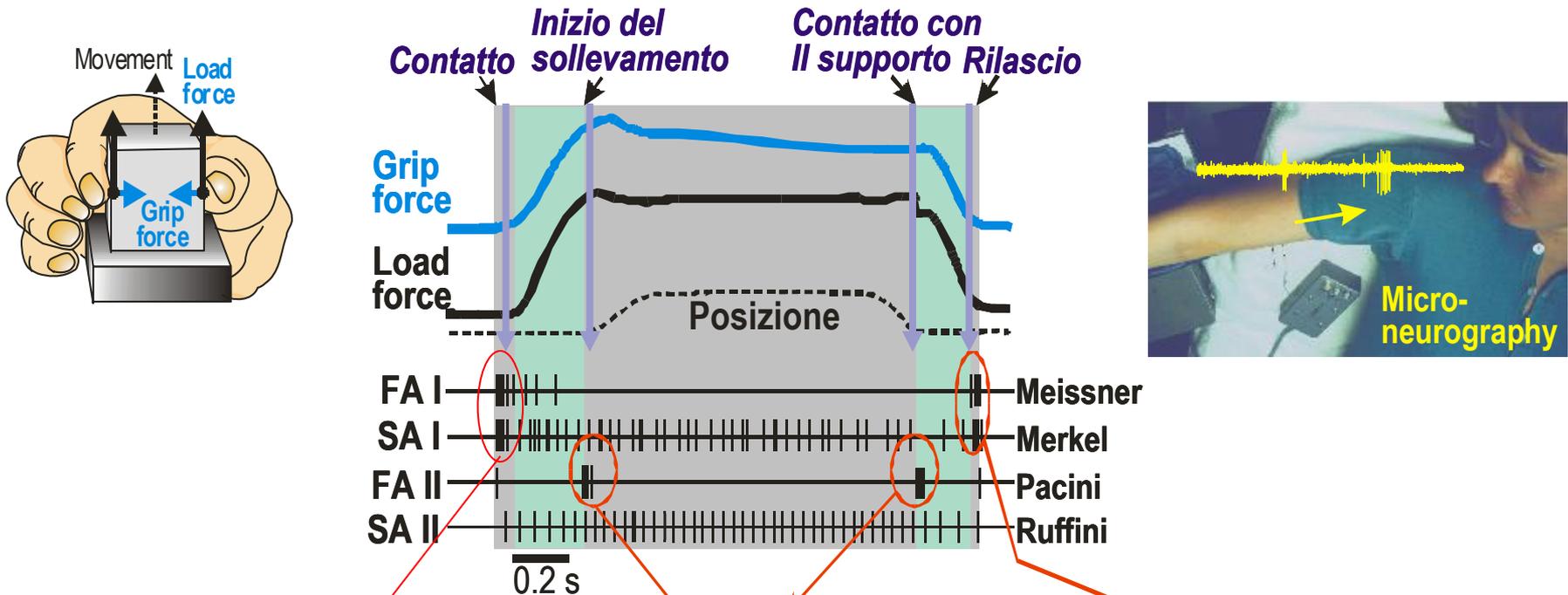
- Massa
- Attrito
- Forma
- Distribuzione della massa
- Curvatura



Adattamento parametrico delle fasi di azione alle proprietà meccaniche degli oggetti



Risposta dei recettori tattili in un compito prototipale di sollevamento di un oggetto



Risposta al contatto

- **Tempo** del contatto
- **Posizione** del contatto sul polpastrello
- **Vettore di forza** sul polpastrello

Transitori meccanici

- **Inizio e fine del contatto** tra l'oggetto afferrato e altri oggetti

Risposta al rilascio

- **Fine del contatto** tra il dito e l'oggetto

‘Punti di controllo tattile’ per lo svolgimento del compito

Il polpastrello come organo sensoriale

Popolazioni di afferenti tattili codificano:

- Forza sul polpastrello:

- intensità
- direzione
- distribuzione spaziale

- Forma locale del contatto (curvatura della superficie dell'oggetto)

- Eventi di controllo tattile:

- scivolamenti
- inizio e fine del contatto
- inizio e fine del contatto dell'oggetto afferrato con altri oggetti (es. piano di appoggio)



Flat



Curved
($r = 10 \text{ mm}$)



Curved
($r = 5 \text{ mm}$)

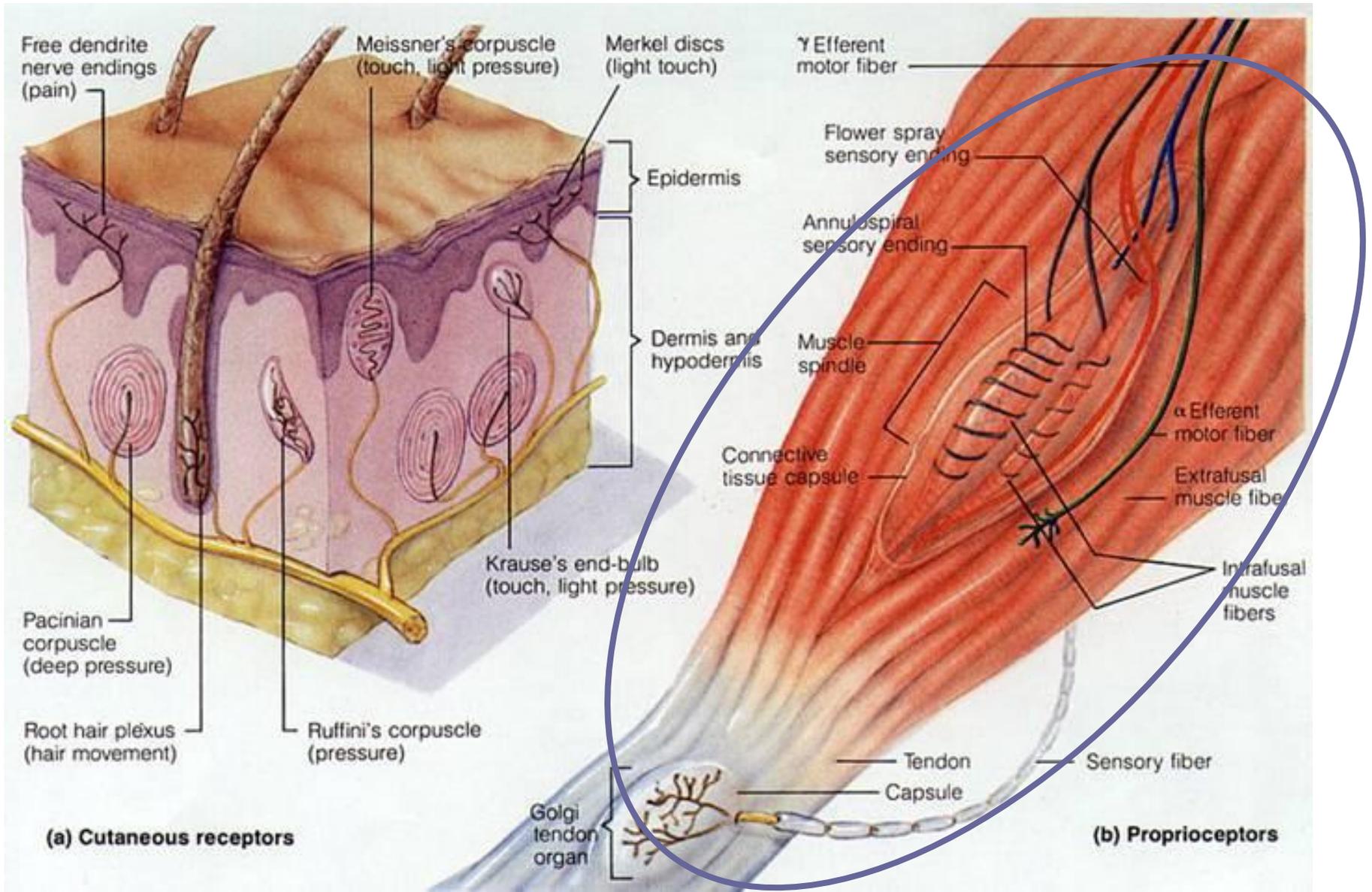
Sintesi delle caratteristiche del senso del tatto

AFFERENTE TATTILE	CLASSE	DIMENSIONI	CAMPO RECETTIVO (diametro)	SOGLIA DI RISPOSTA* (pressione)	FREQUENZA	FUNZIONE	RUOLO NEL CONTROLLO DELLA PRESA (POLPASTRELLO)
MEISSNER	FA-I	80x30 μm	9,4 mm^2 (3,4 mm)	0,58 mN (10,2 mN/mm^2)	8-64 Hz	BORDI SOTTILI, BEN DEFINITI, VARIAZIONE E VELOCITA' DI VARIAZIONE DELLA PRESSIONE	CONTATTO, FORME LOCALI, FORZE SUL POLPASTRELLO
MERKEL	SA-I	10-15 μm (diametro)	11 mm^2 (3,7 mm)	1,3 mN (22,8 mN/mm^2)	2-32 Hz	BORDI SOTTILI, BEN DEFINITI, INTENSITA' DELLA PRESSIONE	CONTATTO, FORZE SUL POLPASTRELLO
RUFFINI	SA-II		58,9 mm^2 (8,7 mm)	7,5 mN (131,6 mN/mm^2)	< 8 Hz	BORDI AMPI, NON BEN DEFINITI, INTENSITA' DELLA PRESSIONE	STIRAMENTI LATERALI DELLA PELLE, FORZE SUL POLPASTRELLO
PACINI	FA-II	1-4 mm x 0,5-1 mm	101,3 mm^2 (11,4 mm)	0,54 mN (9,5 mN/mm^2)	64-400 Hz	BORDI AMPI, NON BEN DEFINITI, VIBRAZIONI	TRANSITORI MECCANICI
POLPASTRELLO						<ul style="list-style-type: none"> ■ FORZA SUL POLPASTRELLO: INTENSITÀ E DIREZIONE ■ FORMA LOCALE DEL CONTATTO (CURVATURA DELLA SUPERFICIE DELL'OGGETTO) ■ EVENTI DI CONTROLLO TATTILE: SCIVOLAMENTI, INIZIO E FINE DEL CONTATTO, INIZIO E FINE DEL CONTATTO DELL'OGGETTO CON L'AMBIENTE 	

Il 90% dei recettori di tipo SA-I e FA-I risponde a uno stimolo di 5 mN*, o di 87mN/mm²

*forza applicata con un Von Frey hair, del diametro di 0,27 mm

Il sistema somatosensoriale umano



Recettori propriocettivi

Receptors which signal the position and movement of limbs:

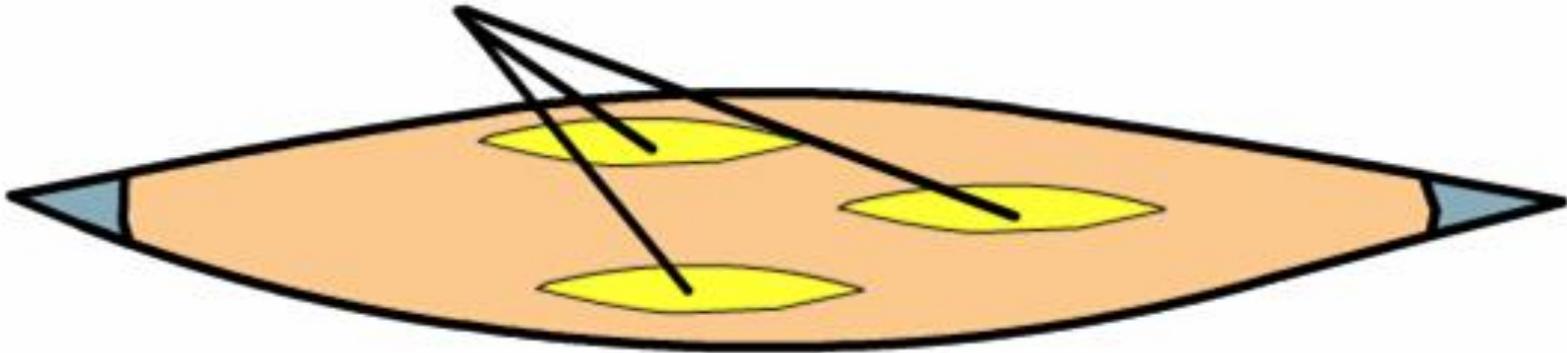
- i) **joint afferents** are located in the joints and are most sensitive to position at extreme joint angles
- ii) **muscle spindles** are located in the muscle and are very important afferent for position and movement (velocity)
- iii) **golgi tendon organ** are located in the muscle tendon and detect tension
- iv) **tactile receptors** in muscle and overlying skin

What else might affect one's sense of position?

When you command your hand to move you can estimate its position by the internal sense of effort. This signal is called **corollary discharge**.

Fusi neuromuscolari

Spindles



Muscle spindles are located in parallel with the regular muscle fibers.

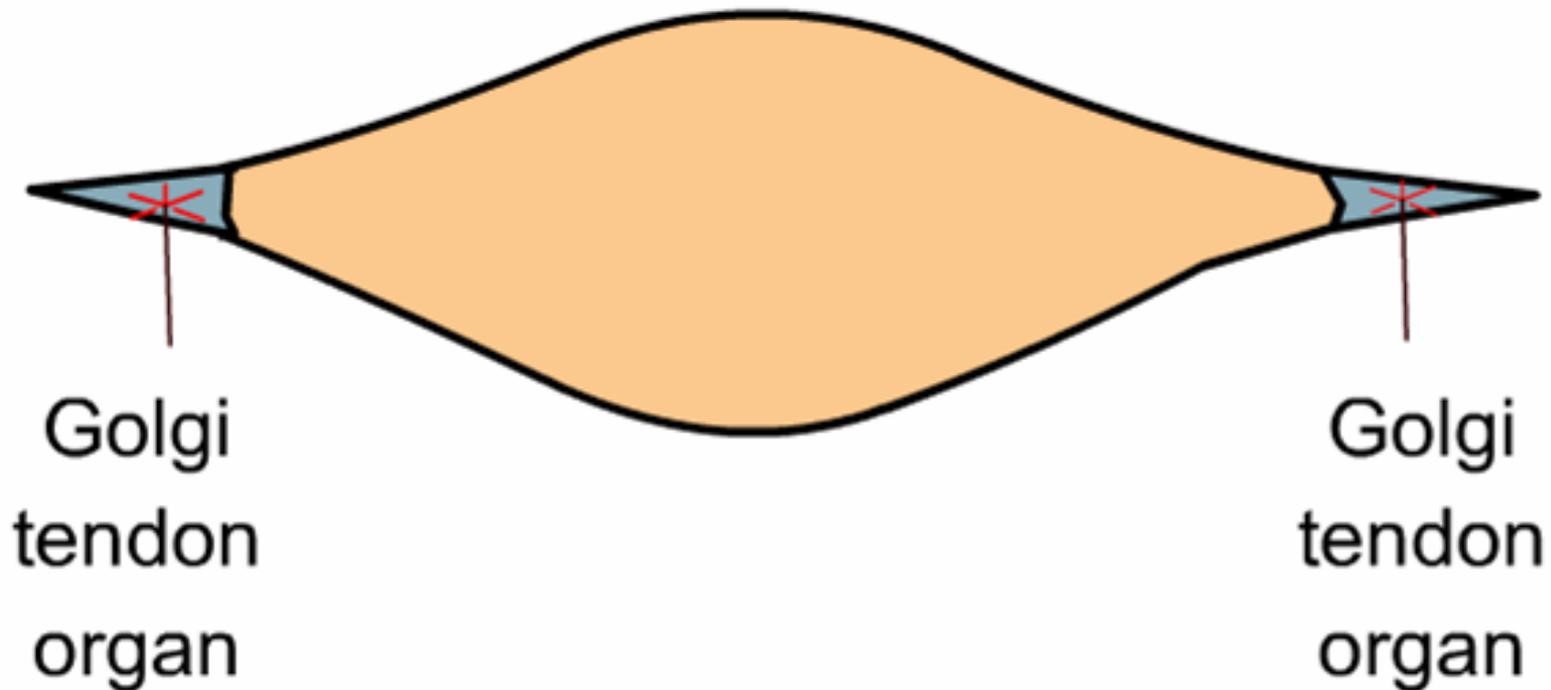
Here they undergo the same length changes as the rest of the muscle.

Organi di Golgi

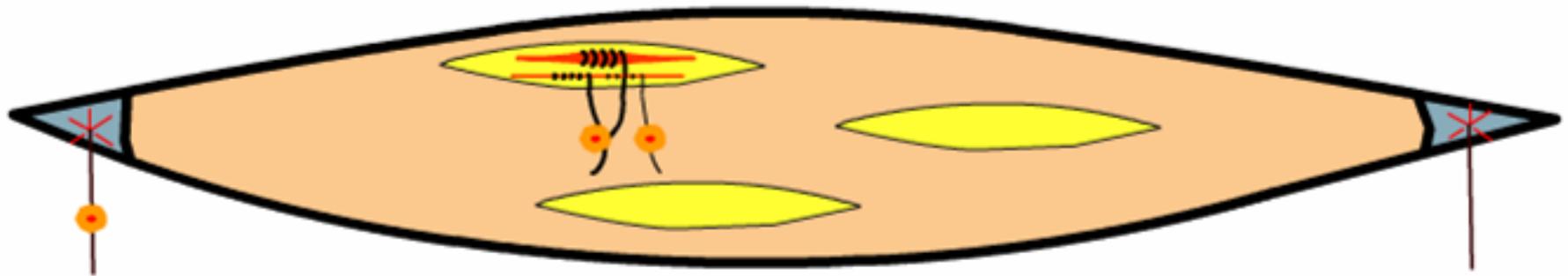
Golgi tendon organs (Ib) are located in the tendon of the muscle, in series with the muscle fibers.

Here they become stretched when the muscle contracts.

Thus they sense the force the muscle exerts



Comparing the response of spindles & Golgi tendon organs to passive stretch.

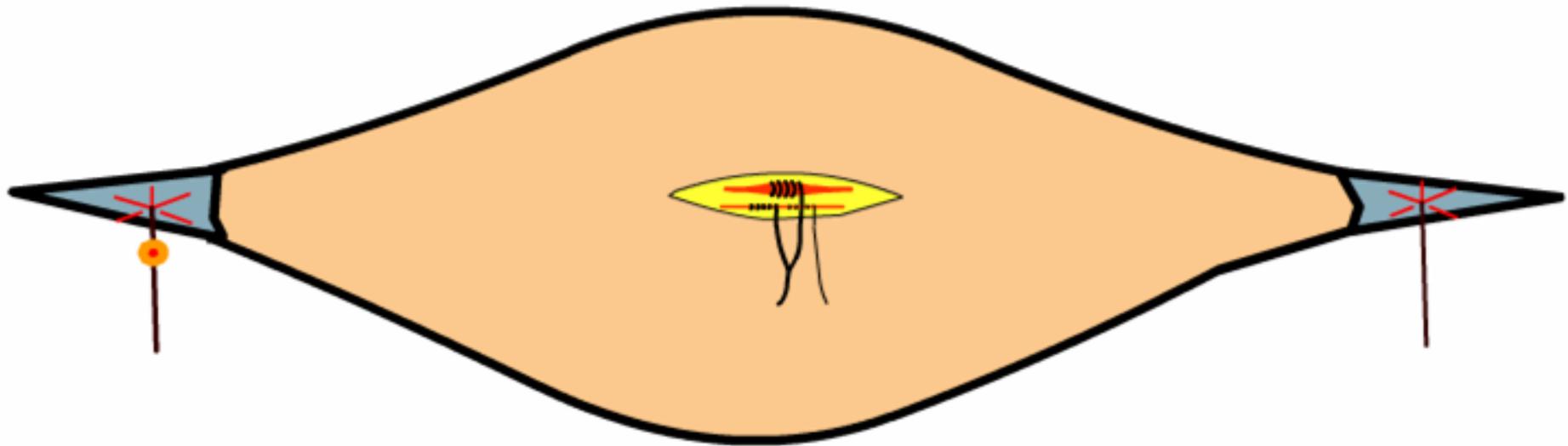


The thin II afferents come from chain fibers and are therefore sensitive to position.

Ia afferents come from both bag and chain fibers and are therefore sensitive to velocity (phasic response) as well as to position (tonic response).
(They are also very sensitive to vibration.)

Ib afferents change little, primarily because the external force acting on the tendon during passive stretch is small.

Comparing the response of spindles & Golgi tendon organs to active contraction.



Contraction causes the tendon to stretch and the spindles to shorten.
Spindles become silent.

Golgi tendon organs are very sensitive to active contraction.

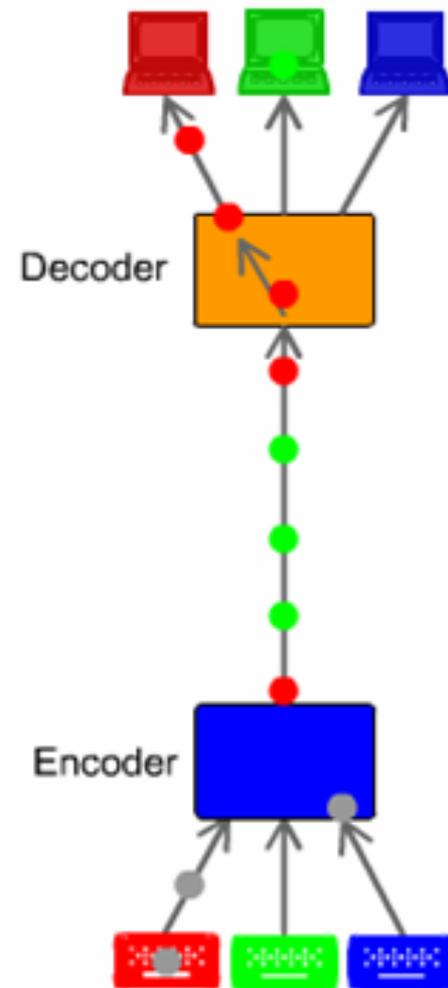
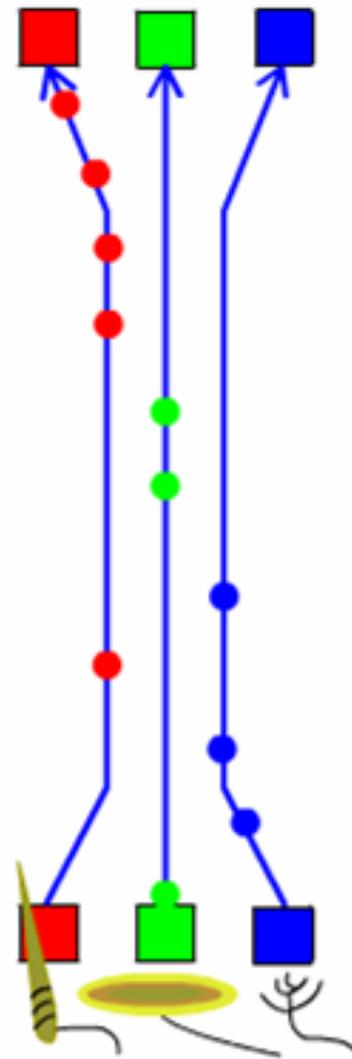
Note: Comparing the change in activity during passive and active contraction is a good technique for identifying the fibre type.

In the brain, the same response often signals
very different sensations.

How do we know what the stimulus is?

The sense of touch solves this same problem in a different way. It gives each type of touch sensor its own private line.

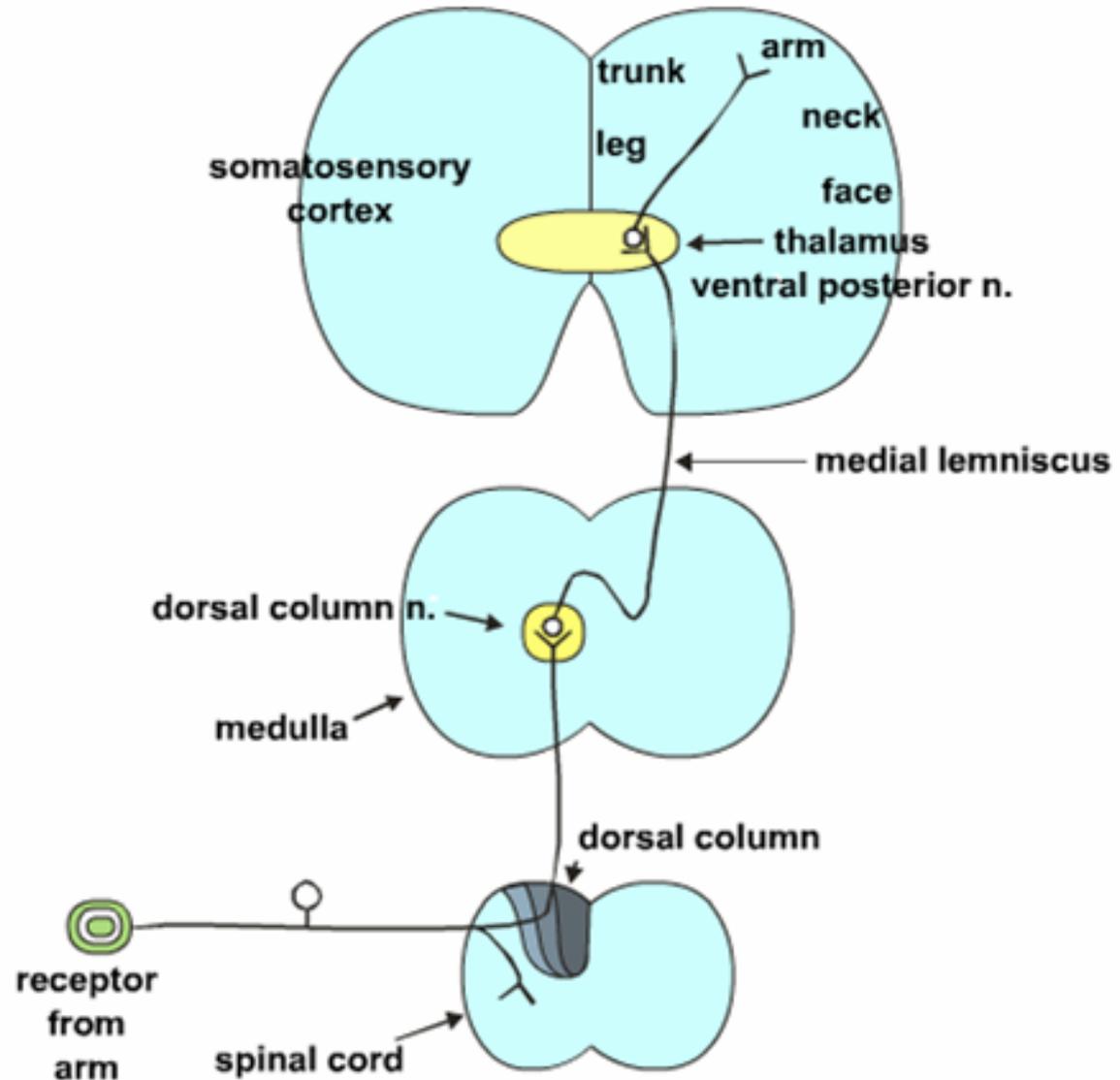
This is called its labeled line. Because of this, there is no reason for encoding and decoding each packet of information. But you do need lots of lines in your spinal cord.



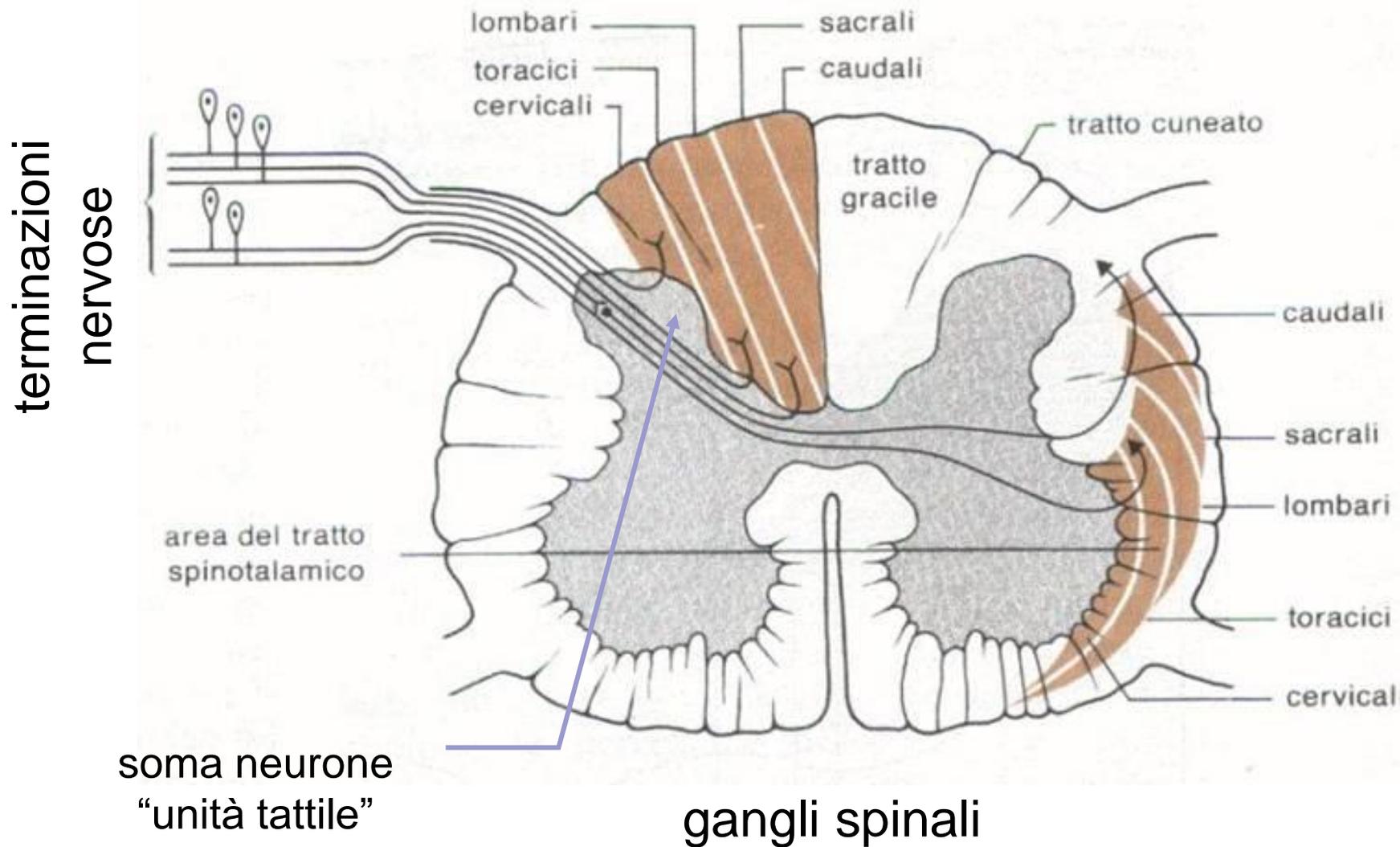
The pathway for transmission of pressure information from the finger to the primary sensory cortex.

This is the dorsal column medial lemniscal system.

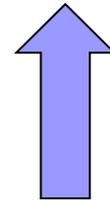
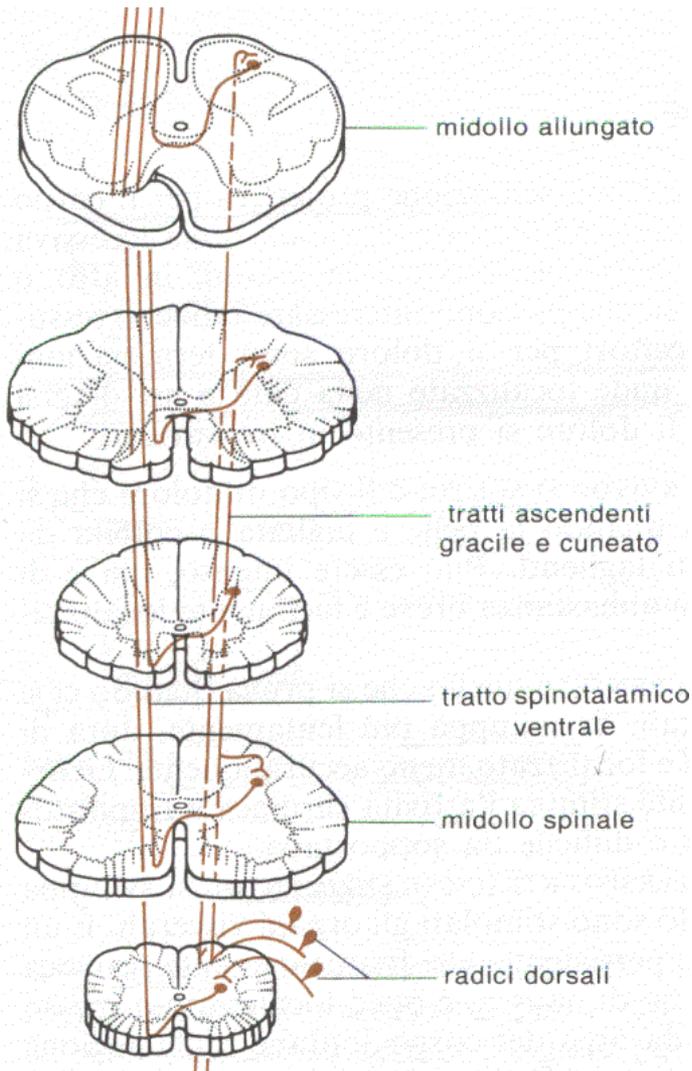
This is the path for the labeled line to the cortex ie the path from an RA afferent, deep in the skin (Pacinian) located on the arm to the first stage in the cortex.



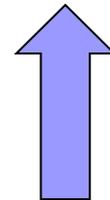
Le vie afferenti somatiche



Le vie afferenti somatiche

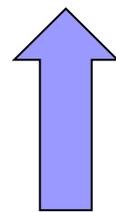
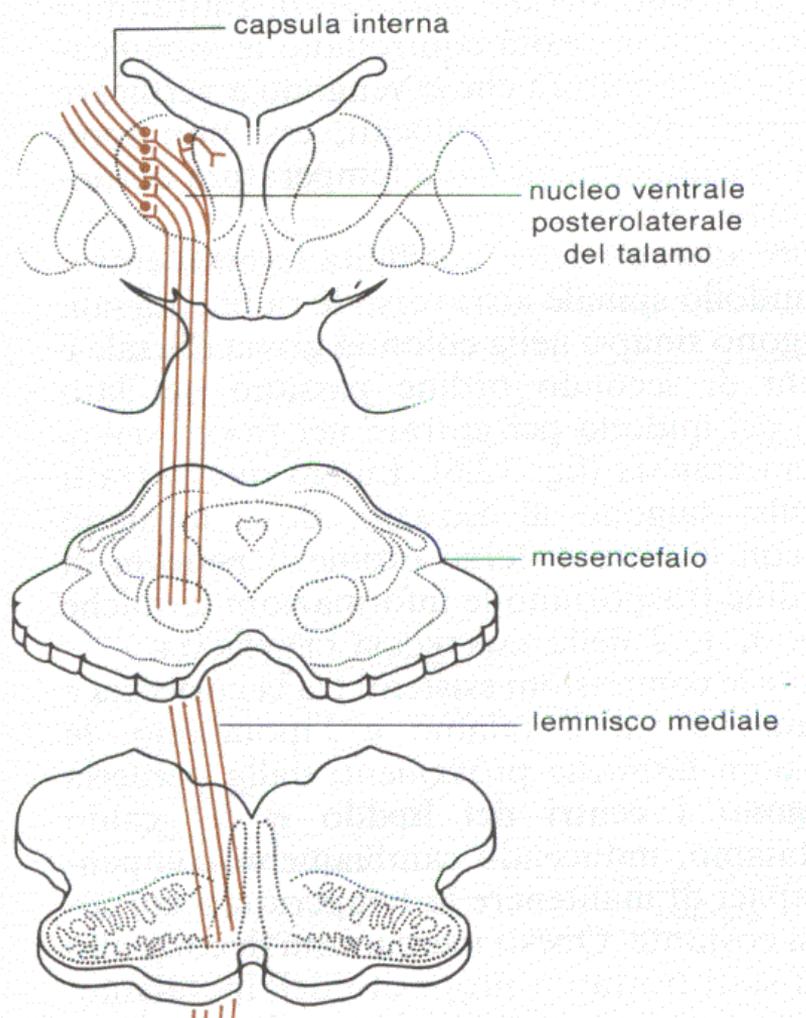


*Le informazioni
viaggiano su vie parallele
per mantenere
spazialmente distinti gli
stimoli percepiti sulla
pelle*

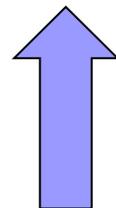
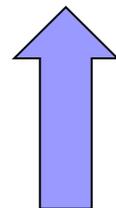


dai gangli spinali

Le vie afferenti somatiche



al talamo



dal midollo allungato

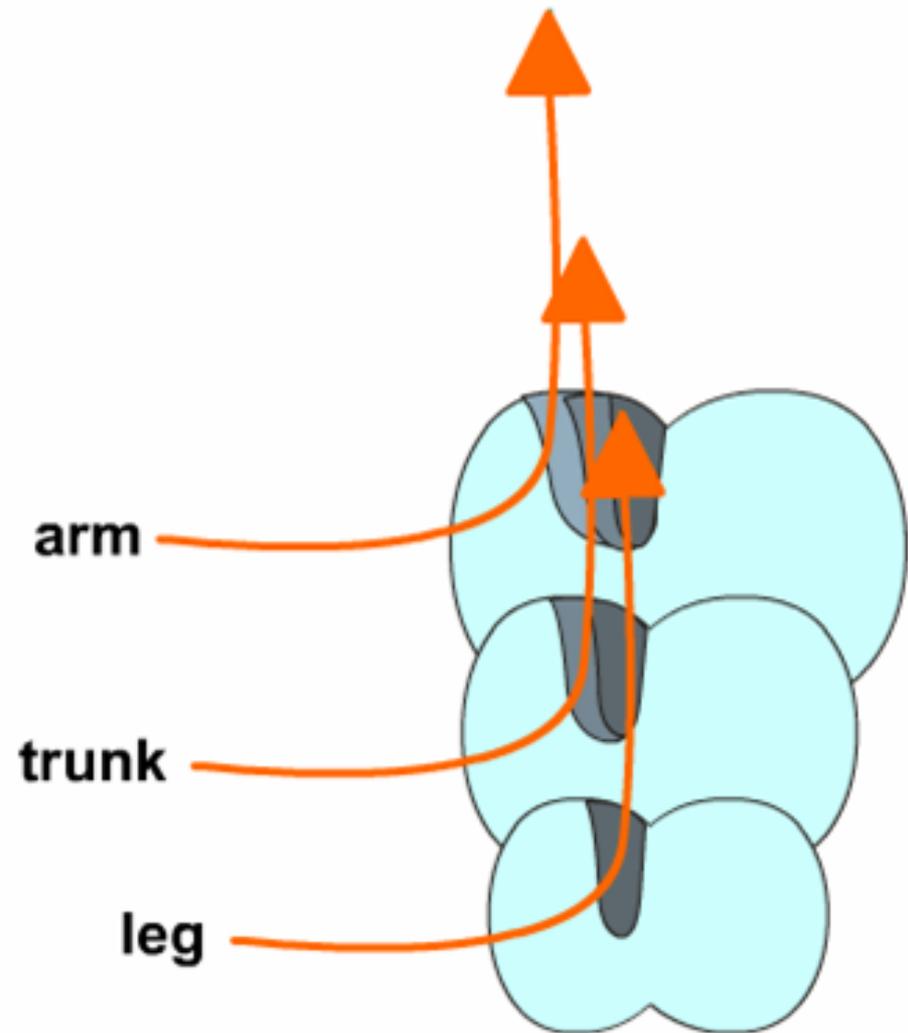
The pathway for transmission of pressure information from the finger to the primary sensory cortex.

In the spinal cord, the dorsal column has a somatotopic organization.

In the lower segments, only afferents from the leg are found.

As one moves up the spinal cord new afferents enter laterally.

Thus in high segments of the spinal cord one finds that leg afferents are medial, arm afferents lateral, and trunk afferents in the middle.

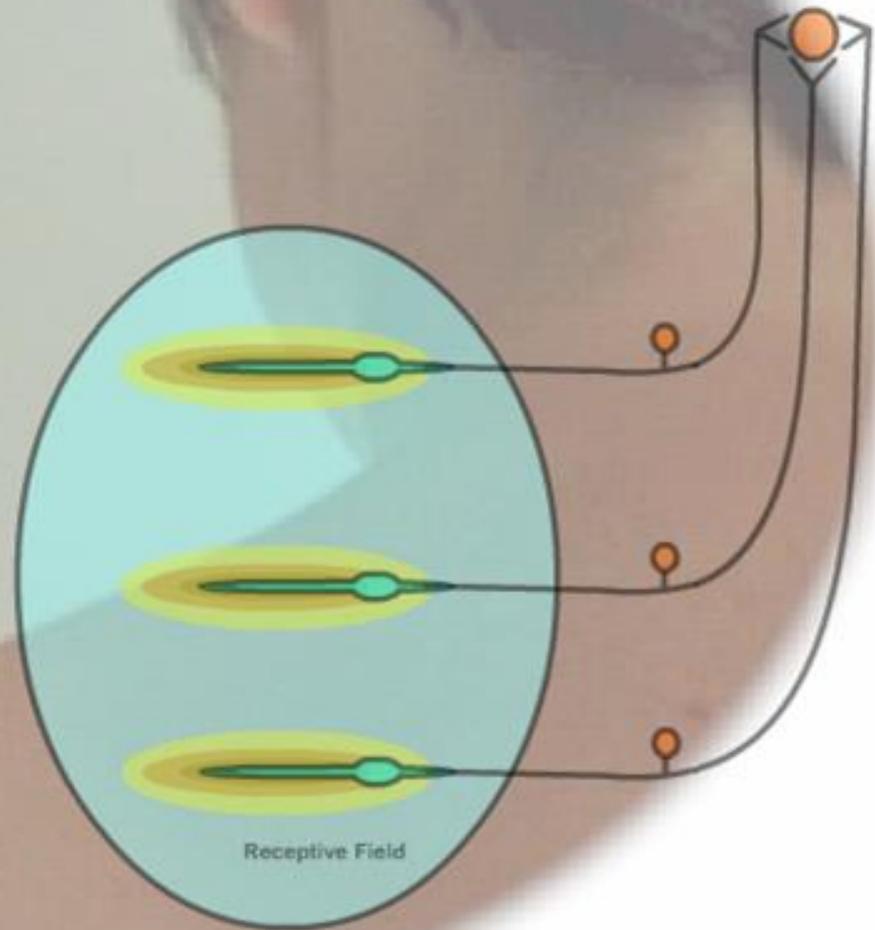


Function 1 of the DCN: Convergence (DCN = Dorsal Column Nuclei)

The skin on your back has a low afferent density. Many afferents convergence onto a single DCN neuron.

Thus only a few DCN neurons are required to represent a given area of skin.

The consequence is large receptive fields and a low tactile discrimination (like the peripheral retina).

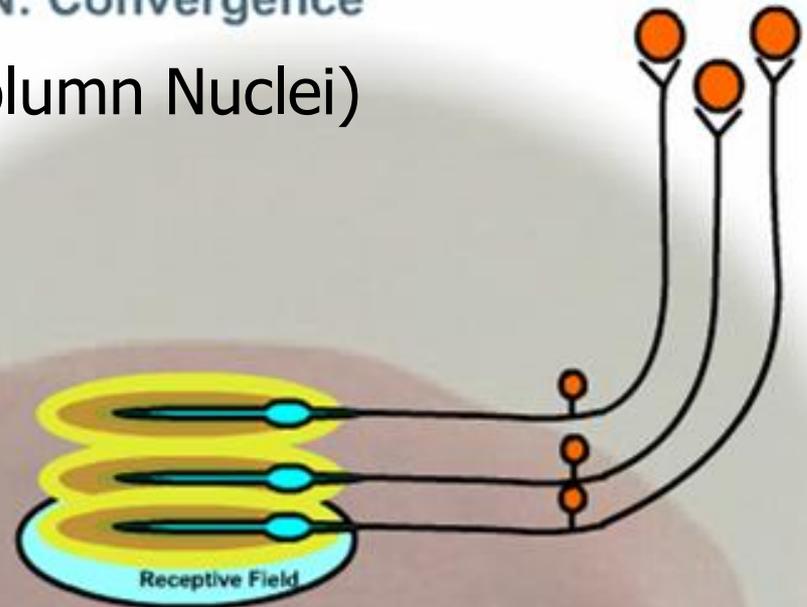


Function 1 of the DCN: Convergence (DCN = Dorsal Column Nuclei)

The skin on your finger tip has a high afferent density which have a low convergence in the DCN.

Thus many DCN neurons are required to represent a given area of skin.

The consequence is small receptive fields and a high tactile discrimination (like fovea).



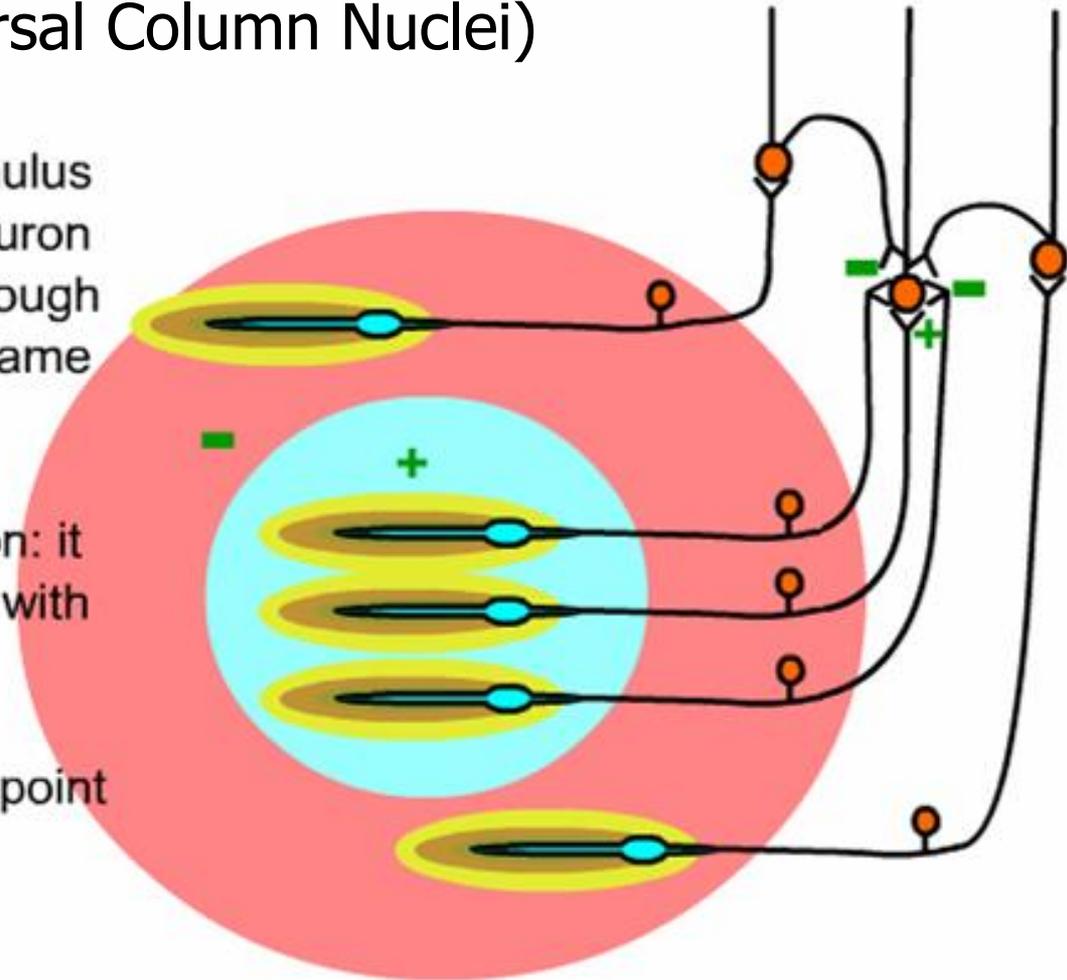
Function 2 of the DCN: Inhibitory surround

(DCN = Dorsal Column Nuclei)

As with retinal ganglion cells, a stimulus in the center will activate a DCN neuron while a stimulus in the surround, through inhibitory feedback, will inhibit the same DCN neuron.

The function is the same as in vision: it accentuates the activity associated with the edge of an object.

In this manner it also enhances two-point discrimination.



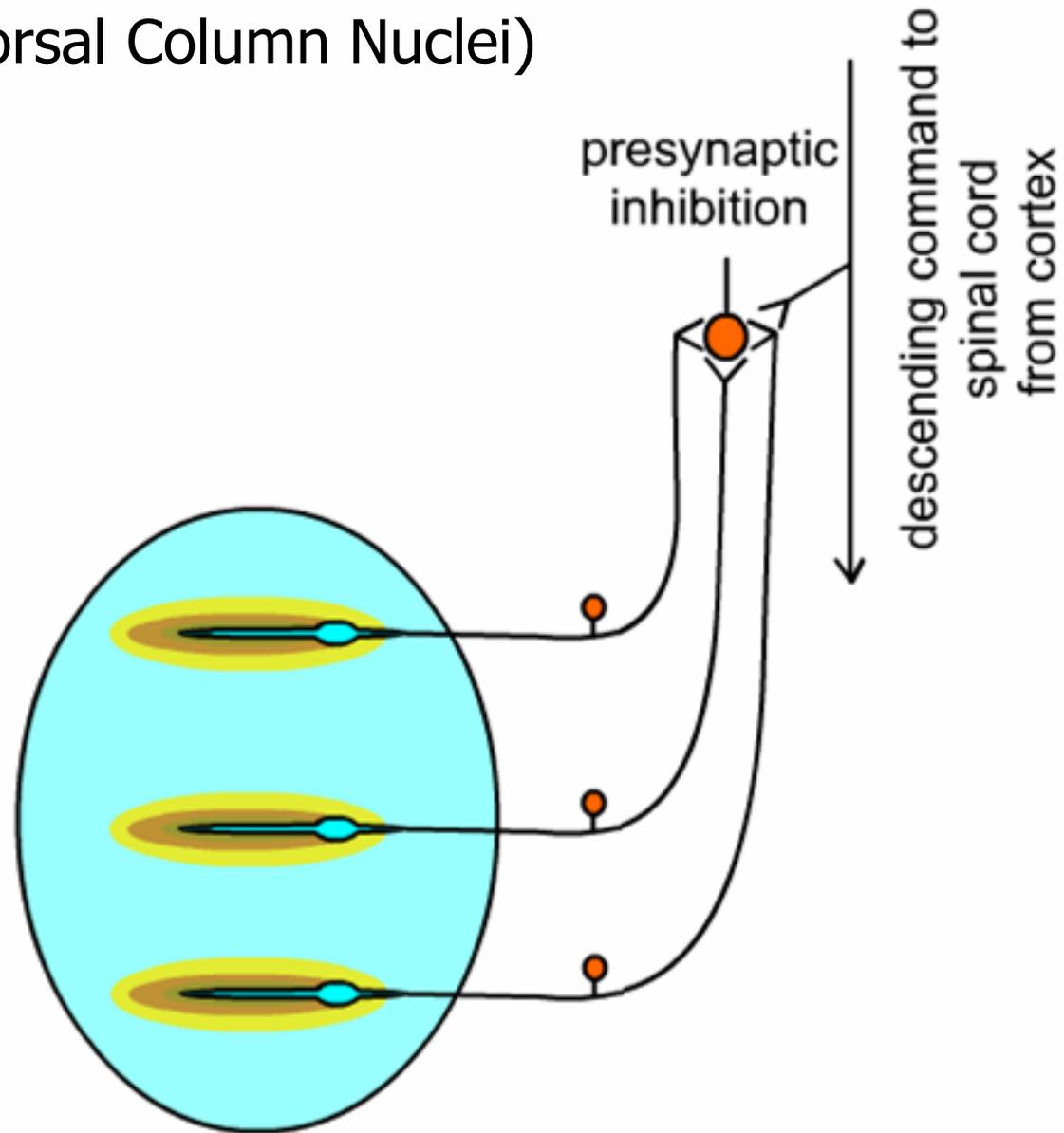
Function 3 of the DCN: Cortical Gating (DCN = Dorsal Column Nuclei)

Presynaptic inhibition from the cortex can selectively turn off the stimulus coming from one afferent and thus allow you to focus in on the others.

Why presynaptic?

Post synaptic inhibition directly on the DCN neuron would turn off all three.

Only presynaptic inhibition is selective to one.



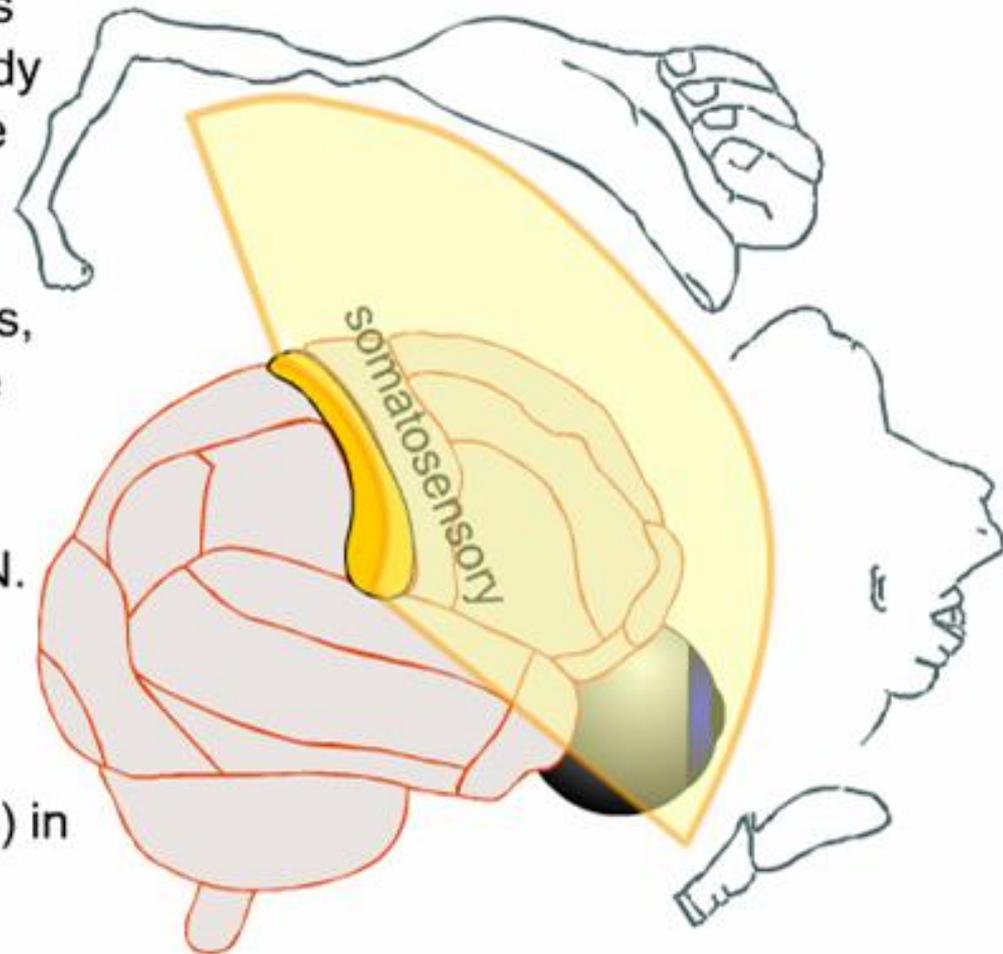
The three major features of the organization of somato sensory cortex. Feature 1: Somatotopic organization.

Primary somatosensory cortex (S1) is somatotopically organized with the body surface laid down sequentially on the postcentral gyrus.

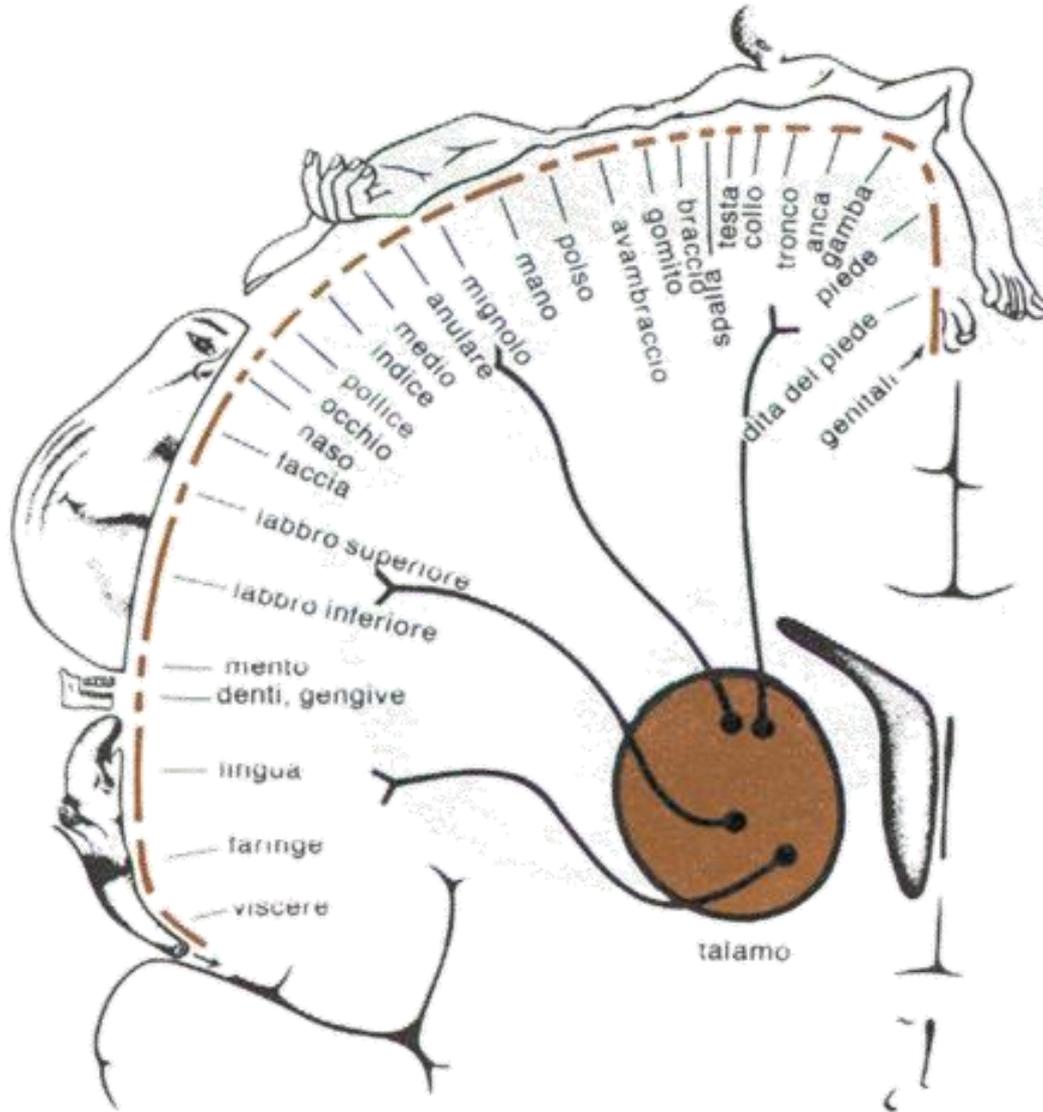
This body map is distorted with the lips, tongue and finger tips having a large representation.

This distortion reflects that of the DCN.

The skin of the back has a small representation because of the high convergence (and large receptive fields) in DCN neurons.



La corteccia somato-sensoriale



Le fibre parallele di conduzione delle informazioni permettono di mantenere una rappresentazione completa e topograficamente organizzata degli stimoli percepiti sulla superficie corporea

Conclusioni

■ Il sistema tattile umano:

□ a livello del recettore

- rileva pressioni e variazioni di pressione
- ha elevate prestazioni soprattutto in termini di risoluzione spaziale (2mm), sensibilità (87 mN/mm² attivano il 90% dei recettori)

□ non ha un organo sensoriale localizzato, ma il polpastrello può essere visto come tale

- misura la forza applicata (3 componenti)
- svolge un ruolo importante nel controllo della presa, rilevando gli eventi fondamentali:
 - le vibrazioni (legate agli scivolamenti) (frequenza 400Hz)
 - il contatto con l'oggetto
 - il contatto dell'oggetto con altri oggetti