

# Tatto

## ASPETTI ANATOMICI

Il sistema tattile umano, a differenza degli altri sistemi sensoriali, non è localizzato in organi o apparati specifici, ma è diffuso in varie parti del corpo: la cute, i muscoli, i tendini, lo scheletro, l'apparato viscerale; si parla quindi di *punti tattili esterni e viscerali*. Essi sono distribuiti in modo non uniforme sulle varie parti del corpo e si identificano con i recettori tattili. Questi raccolgono stimoli di diversa natura, i quali, convogliati attraverso le fibre nervose periferiche, raggiungono il midollo spinale. Tali fibre nervose si legano al midollo nei gangli dorsali e in quelli ventrali attraverso la radice ventrale e dorsale; queste connessioni raccolgono le informazioni e le fanno proseguire, attraverso i cordoni spinali, verso l'encefalo, oppure le elaborano e stimolano i "circuiti" di arco riflesso per dar vita alle reazioni necessarie. La più grande innervazione sensoriale è quella della testa che raggiunge l'encefalo attraverso il V nervo cranico (*trigeminale*). Mentre i maggiori nervi periferici, come il *mediano* e lo *sciatico*, sono un misto di assoni sensoriali, motori e post-gangliari simpatici, da cui nascono nervi muscolari, articolari e cutanei. Anche i nervi cutanei, come il *safeno* e il *surale*, non trasportano lo stesso tipo di informazione, poiché contengono sia assoni sensoriali che assoni del sistema simpatico.

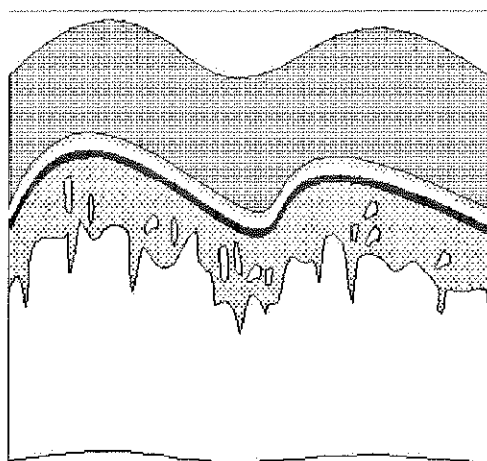
## Il sistema tattile periferico

Il sistema tattile è caratterizzato essenzialmente dai recettori tattili inseriti all'interno di un tessuto epiteliale e da una forte innervazione di fibre afferenti, infatti è stato accertato che proprio l'alto numero di recettori e l'estesa rete neuronale che li collega al cervello è la chiave delle complesse funzioni tattili umane. Il tessuto epiteliale assume caratteristiche diverse in funzione della regione corporea a cui appartiene, tuttavia i maggiori studi nel campo del tatto sono stati compiuti sulla pelle e sui recettori in essa situati. Il tessuto epiteliale riveste un ruolo importante per il tatto, infatti esso condiziona, con le proprie caratteristiche, le risposte dei recettori agli stimoli. Gli studi sul senso del tatto hanno messo in evidenza anche il fatto che le vie nervose, costituenti la rete neuronale di collegamento tra centro e periferia, sono specifiche e fortemente parallele in modo da

evitare che un loro danneggiamento distrugga parte dell'insostituibile funzione tattile.

## La pelle e la sua struttura

La pelle o cute è il rivestimento esterno del corpo umano, quindi assolve a numerosi compiti: difesa dall'ambiente esterno, termoregolazione, eliminazione di sostanze tossiche, produzione di anticorpi e di sostanze vitaminosimili, contatti con l'ambiente esterno. Essa costituisce la principale sorgente d'ingresso sensoriale verso il sistema nervoso centrale e può fornire informazioni sia riguardo all'ambiente (per distanze ravvicinate) attraverso il contatto, sia riguardo a sorgenti remote attraverso l'effetto della radiazione (temperatura).



**FIGURA IX.1** Disegno schematico degli strati della cute. La fascia bianca è il derma, quella colorata è l'epidermide con i suoi cinque strati. La frastagliatura dello strato germinale è dovuta alla presenza dei peduncoli.

morfologicamente differenti che formano cinque strati: basale, spinoso, granuloso, lucido e corneo. Lo *strato corneo* (a contatto col derma) è costituito da un'unica fila di cellule prismatiche ancorate con peduncoli al derma, queste hanno la capacità di riprodursi, permettendo il rinnovamento dell'intero tessuto epiteliale. Lo *strato spinoso* (immediatamente sopra) è formato da cellule legate fra loro con prolungamenti citoplasmatici a forma di spina e quindi ha una funzione strettamente meccanica dovuta agli stretti legami tra cellule. Lo *strato granuloso* è ricco di granuli di cheratina contenuti in cellule a forma di rombo, esso ha la funzione di rendere opaca la pelle che altrimenti sarebbe trasparente. Lo *strato lucido* è composto da cellule con nuclei atrofici. Lo *strato corneo* (a contatto con l'ambiente esterno) è formato da cellule fortemente appiattite, sprovviste di nucleo e costituite di creatina.

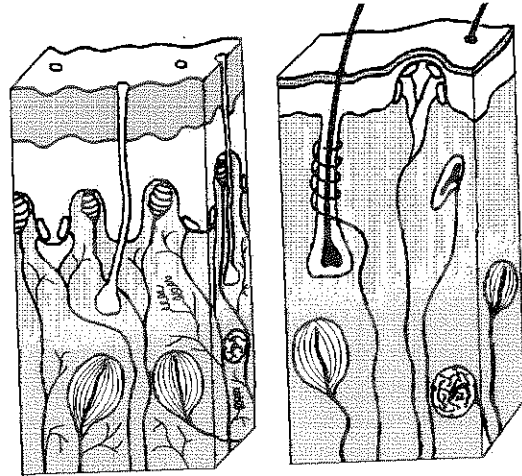
La cute è formata da due strati (figura IX.1): il *derma* in profondità e l'*epidermide* in superficie; sotto la cute si trova un ulteriore strato chiamato *ipoderma* o *sottocute* che è uno strato grasso con funzioni di riserva energetica per l'organismo.

Il *derma* è uno strato spesso, robusto e formato principalmente da tessuto connettivale elastico ricco di fibre di collagene; in esso arrivano numerosi vasi sanguigni e linfatici ed una grande quantità di fibre nervose, contiene le ghiandole sudorifere e sebacee, i bulbi piliferi e i recettori tattili.

L'*epidermide* dipende, per nutrizione e sensibilità, dal derma, in quanto ad essa non arrivano né vasi, né fibre nervose; è costituita da cellule

## Terminazioni nervose periferiche

Le fibre sensoriali che entrano nella pelle generalmente terminano nel derma al confine con l'epidermide (figura IX.2). All'interno del derma formano plessi associati con i vasi sanguigni più piccoli, oppure si diramano senza perdere la loro identità individuale. Ogni fibra afferente termina elemento sensorio, chiamato genericamente *recettore*, il quale può essere morfologicamente complesso ed individuabile come entità corpuscolare a sé (*recettore propriamente detto* o *terminazione corpuscolare*), oppure può essere una semplice terminazione nervosa nuda (*terminazione libera* o *nuda*).



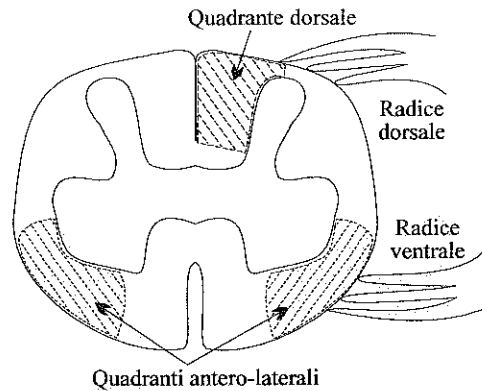
**FIGURA IX.2** Rappresentazione della struttura del derma e degli elementi in esso contenuti.

I recettori non sono distribuiti in modo uniforme sulla superficie corporea e apparentemente non sembrano avere una organizzazione spaziale logica e strutturata. Gli assoni che raggiungono la maggioranza delle terminazioni corpuscolari sono mielinati, mentre le terminazioni libere possono essere amieliniche o mieliniche. Le terminazioni libere amieliniche non sembrano avere una specializzazione microscopica visibile, tuttavia possono funzionare come trasduttori di stimoli naturali liberati nella pelle. Quelle mieliniche sembrano fornire informazioni essenziali per funzioni meno raffinate, come la repulsione di oggetti dannosi all'organismo. I recettori, invece, sono deputati ad una analisi raffinata e differenziata degli stimoli e per questo fanno parte di loops con un'elevata velocità di risposta (la velocità di conduzione delle fibre nervose è correlata al calibro: maggiore è il diametro della fibra più elevata è la sua velocità di conduzione).

## Le vie nervose afferenti

Nella tabella IX.1 è riportata la classificazione dei tipi di fibre afferenti che entrano nel midollo spinale. Procedendo dalle più grosse alle più piccole, queste fibre sono incluse in quattro gruppi designati con numeri romani da I a IV (una classificazione alternativa è quella di chiamarle nell'ordine:  $A\alpha$ ,  $A\beta$  e  $A\delta$ ,  $A\gamma$ , C). Le fibre del gruppo I sono fibre di grosso calibro e nascono dai fusi neuromuscolari e dagli organi tendinei; esse trasportano informazioni tattili e cinestetiche. Il gruppo II comprende grosse fibre mielinate che trasportano informazioni tattili e cinestetiche. Il gruppo III include piccole fibre mielinate che trasportano informazioni di tatto, di temperatura e nocicettive. Il gruppo IV è costituito da piccole fibre non mielinate che trasportano informazioni di tatto, nocicettive, e, forse, di temperatura. Le fibre dei gruppi I, II e III hanno il loro corpo cellulare nei gangli delle *radici dorsali*, mentre la maggioranza delle fibre del gruppo IV entrano nel midollo spinale attraverso le *radici ventrali*. La tabella IX.1 indica

anche le relazione tra le modalità sensoriali (tatto, cinestesia, temperatura e dolore), i tipi di fibre ed il sistema spinale a cui sono associate. Infatti nel midollo spinale, tra le fibre che ascendono al cervello, si riconoscono due principali tratti ascendenti: i cordoni dorsali che formano il *sistema dei cordoni dorsali* e i cordoni antero-laterali che formano il *sistema antero-laterale* (figura IX.3). Le fibre del gruppo II sono in relazione al sistema dei cordoni dorsali, mentre quelle dei gruppi III e IV partecipano al sistema antero-laterale. Di conseguenza il tatto è la sola modalità rappresentata in entrambi i sistemi. Le informazioni cinestetiche che originano nei fusi neuromuscolari e negli organi tendinei sono trasmesse quasi esclusivamente attraverso il sistema dei cordoni dorsali. Le informazioni termiche e nocicettive sono trasmesse solo attraverso il sistema antero-laterale.



**FIGURA IX.3** Schema della connessione delle fibre tattili al midollo spinale. Sono messi in evidenza le radici dorsale e ventrale ed i quadranti dorsali ed antero-laterali.

**TABELLA IX.1** Catalogazione delle fibre afferenti nel sistema sensoriale tattile.

Modalità	Gruppo I A $\alpha$	Gruppo II A $\beta$ e A $\delta$	Gruppo III A $\gamma$	Gruppo IV C
Tatto	Z	Z	Z	Z
Cinestesia	Z	Z		
Temperatura			Z	Z
Dolore			Z	Z
Sistema spinale	Dorsale	Dorsale	Antero-laterale	Antero-laterale

## I recettori cutanei

Studi morfologici ed elettrofisiologici hanno permesso di mettere in evidenza tre grandi classi di recettori: i *meccanorecettori* che rispondono a stimolazioni di tipo meccanico (tatto e cinestesia), i *termorecettori* che rispondono a stimolazioni termiche e i *nocicettori* che rispondono a stimoli ambientali potenzialmente nocivi e sono responsabili del dolore. Nonostante la possibilità di classificare piuttosto nettamente i vari tipi di recettori la classe dei meccano-recettori risponde anche a stimoli di natura chimica o termica, tuttavia tale risposta viene eliminata al livello di fibre afferenti superiori.

## Meccanorecettori

I meccano-recettori hanno un'alta sensibilità alla penetrazione, alla pressione sulla pelle o al movimento dei peli. Questi tipi di recettori possono essere suddivisi in due tipi fondamentali in base alla loro risposta (figure IX.4): *recettori ad adattamento rapido* (RA) e *recettori ad adattamento lento* (SA).

RA

nente nella pelle. I recettori sono incapsulati e si trovano nel derma della pelle pelosa e glabra, risiedendo spesso ad una profondità maggiore delle terminazioni di Meissner e di Krause.

- I *meccanorecettori C* sono caratterizzati da piccoli campi recettivi (circa 3×2 mm nella pelle con peli) e possono dare una scarica SA quando la pelle viene compressa (figura IX.4) o quando i peli vengono mossi. Se vengono stimolati ripetitivamente, tuttavia, c'è una rapida caduta nell'eccitabilità e, dopo 20-30 s, i recettori non riescono più a rispondere. Questo comportamento è in netto contrasto con quello dei meccanorecettori SA1 e SA2 che invece possono rispondere "indefinitamente". La regola di funzionamento di questi meccanorecettori C non è ancora nota, tuttavia sembra che essi contribuiscano alla sensazione di prurito.

## Termorecettori

I termorecettori generano una scarica continua di impulsi se la pelle è mantenuta a temperatura costante, mentre producono un incremento o decremento del numero di impulsi, quando la temperatura cambia. Essi rispondono solo alle variazioni di temperatura e sono insensibili agli stimoli meccanici e a quelli che provocano dolore. In generale, i campi recettivi dei singoli assoni sono superfici di 1 mm<sup>2</sup>

e corrispondono ai *punti caldi* e ai *punti freddi*, trovati durante test sensoriali nei soggetti umani. Ci sono due classi di termorecettori: *recettori del freddo* con risposta massima nel range di 25-30 °C e *recettori del caldo* con risposta massimamente a 40-42 °C. Le fibre del freddo presentano pacchetti d'impulsi, la cui presenza e numero dipende dalla temperatura, mentre le fibre del caldo scaricano impulsi ad intervalli regolari.

La frequenza di scarica aumenta nei recettori del freddo quando la temperatura sta diminuendo e viceversa per i recettori del caldo. Questa sensitività dinamica è alta e permette ai recettori di rispondere a piccoli e lenti cambiamenti (meno di 1 °C in 30 s) nella temperatura della pelle. I recettori del freddo presentano una inattività durante un aumento in temperatura, tuttavia è importante osservare che essi possono diventare inattivi quando la temperatura sta crescendo anche in range termici nei quali l'unità sarebbe attiva se la temperatura fosse mantenuta costante. Le risposte dinamiche (cioè l'entità di scarica durante i cambiamenti di temperatura) per recettori del caldo e del freddo sono rappresentate in figura IX.10), esse sono simili a quelle statiche anche se la velocità di scarica può essere fino a dieci volte inferiore in relazione all'entità del cambiamento di temperatura.

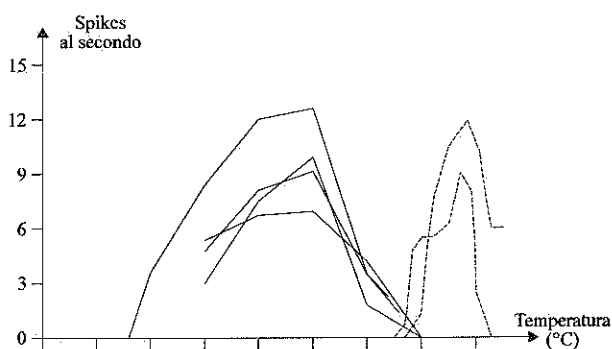
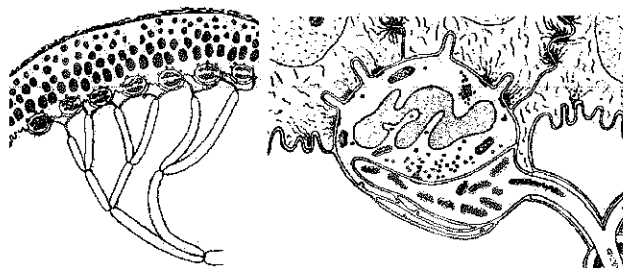


FIGURA IX.10 Grafici delle risposte dinamiche per termorecettori cutanei del caldo (linee tratteggiate) e del freddo (linee continue).

I *meccanorecettori ad adattamento lento (SA)* sono meccanorecettori di posizione, come i rilevatori di velocità rispondono durante lo spostamento della pelle, ma in aggiunta sostengono una scarica di impulsi quando la pelle è mantenuta in una nuova posizione (figura IX.4). In contrasto con i recettori RA possono fornire una informazione circa i cambiamenti a lungo termine nelle condizioni meccaniche nella pelle. Durante il plateau della pressione in figura IX.4, la velocità di scarica diminuisce fino a raggiungere un valore caratteristico per ogni recettore SA proporzionale all'ammontare della pressione stessa. Ancora una volta questo soddisfa una funzione di potenza  $R=aS^b$  (dove  $R$  è la risposta,  $S$  è l'intensità dello stimolo e  $a$  e  $b$  sono costanti empiriche), così che i recettori SA possono codificare lo stimolo come una frequenza di scarica. Ci sono tre tipi di meccanorecettori ad adattamento lento: SA1 e SA2 (con assoni mielinati) e i meccanorecettori C (con assoni non mielinati). Le unità SA1 sono normalmente silenti in assenza di uno stimolo meccanico applicato, mentre producono impulsi con andamento irregolare se la superficie della pelle è accarezzata rapidamente. Le SA2, al contrario, portano spesso una scarica di riposo tra 2 e 20 impulsi al secondo, sono facilmente eccitate dall'allungamento della pelle e producono impulsi con andamento regolare. La frequenza della risposta dei recettori SA ad una deformazione mantenuta stabilmente può essere aumentata raffreddando la pelle, tuttavia, la risposta dinamica rimane solo pochi secondi, a differenza di quella dei termorecettori la cui scarica dinamica continua per un minuto. Questo effetto della temperatura della pelle sulle risposte dei recettori SA spiega l'illusione di Weber, cioè l'osservazione che oggetti freddi sembrano più pesanti di oggetti caldi dello stesso peso.

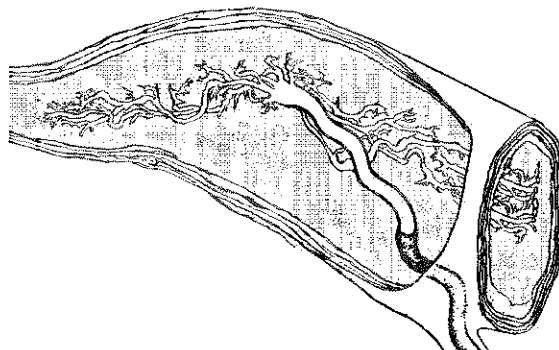
- Le *cellule di Merkel* e le terminazioni nervose associate (figura IX.8) formano un recettore SA1. Le cellule di Merkel sono alla base della epidermide, hanno nuclei con molti lobi,



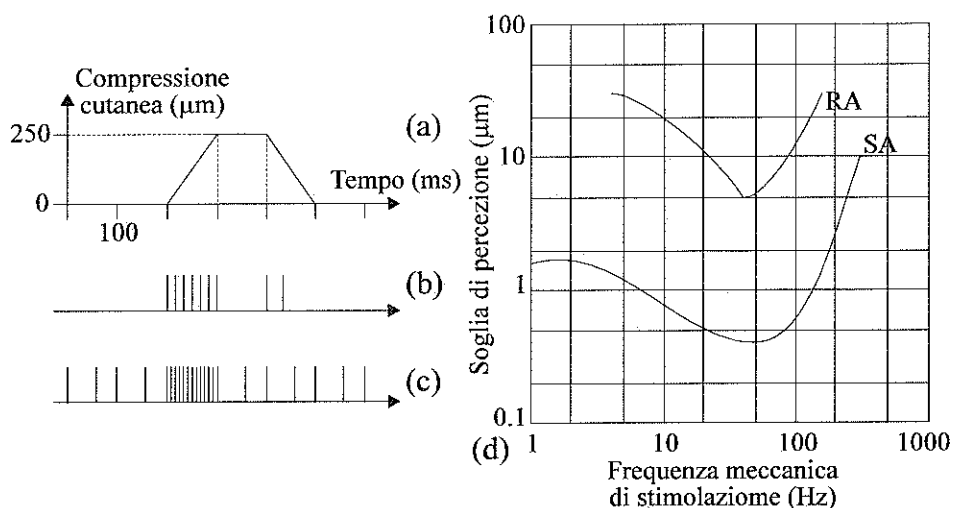
**FIGURA IX.8** Rappresentazione della disposizione delle cellule di Merkel (sinistra) e di un disco di Merkel (destra).

proiezioni come bastoni (microvilli) sulla superficie epidermica. Alla base di ogni cellula di Merkel l'assone mielinato sensorio forma un'espansione a forma di disco, chiamato disco di Merkel.

- Le *terminazioni di Ruffini* furono identificate erroneamente come termorecettori del caldo, in realtà sono unità SA2 (figura IX.9). Esse possono fornire una continua indicazione dell'entità della pressione o tensione perma-

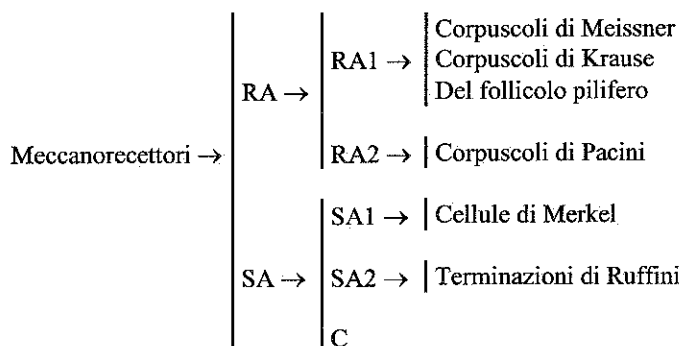


**FIGURA IX.9** Rappresentazione di una terminazione di Ruffini.



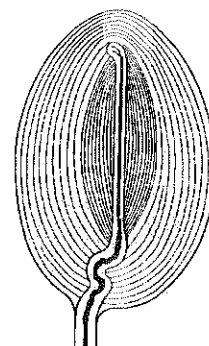
**FIGURA IX.4** Rappresentazione delle scariche neurali nelle fibre di meccanorecettori. (a) Andamento dello stimolo continuo. (b) Risposta dei meccanorecettori RA. (c) Risposta dei meccanorecettori SA. (d) Risposta in frequenza per SA ed RA.

Ognuna delle classi è divisa in sottoclassi secondo lo schema seguente:



I *meccanorecettori ad adattamento veloce (RA)* sono eccitati dal movimento della pelle e ne codificano la velocità nella frequenza di scarica. Se viene fornito alla pelle uno stimolo a rampa seguito da uno stimolo costante (figura IX.4), essi rispondono solo durante il movimento e non quando la pelle è mantenuta costante nella nuova posizione. Ad una velocità costante di penetrazione le unità afferenti RA scaricano un treno di impulsi a frequenza proporzionale alla velocità di spostamento. Questa relazione viene approssimata bene da una relazione di potenza della forma  $R=aS^b$ , dove  $R$  è la risposta,  $S$  è l'intensità dello stimolo e  $a$  e  $b$  sono costanti empiriche. I recettori di questo tipo sono presenti nella pelle con peli e nella pelle glabra. Essi includono diverse specie di recettori che possono essere suddivisi in due sottoclassi: RA1 che reagiscono meglio a stimoli di velocità e RA2 che reagiscono meglio a stimoli di accelerazione.

- I *corpuscoli di Pacini* sono una speciale classe RA2 e sono situati negli strati più profondi della pelle glabra e di quella con peli. Essi hanno una struttura a forma di piccola perla grigia formata da tessuto non nervoso, lamellata e simile ad una cipolla; la loro lunghezza varia



**FIGURA IX.5** Sezione longitudinale di un corpuscolo di Pacini.

tra 0.5 e 2 mm e contengono al centro un terminale nervoso allungato (figura IX.5). La fibra afferente è mielinata, con l'ultimo nodo di Ranvier incapsulato nel recettore. La terminazione del nervo ha una sezione trasversale ovoidale, contiene un array circolare di mitocondri e un abbondante reticolo di microtuboli posizionato sotto la membrana del recettore.

- I *corpuscoli di Meissner* (figura IX.6) sono recettori RA1 incapsulati con una fibra afferente mielinata. Sono situati nel derma della pelle glabra dell'uomo, ripiegati nelle papille dermiche che riempiono le scanalature nella pelle. La capsula è formata da diversi strati distinti di tessuto nervoso. Le terminazioni nervose sono formate da lamine avvolte ad elica lungo l'asse del corpuscolo separate da cellule di Schwann. Le fibre di collagene collegano la metà distale del recettore all'epidermide sovrapposta, la quale è modificata strutturalmente per permettere un legame meccanico effettivo capace di trasmettere i movimenti alle terminazioni nervose nel recettore. Il corpuscolo di Meissner è un meccanorecettore sensibile alla velocità e quindi scarica impulsi solo durante il movimento della pelle. Il range effettivo di frequenza di uno stimolo vibratorio percepibile da questo recettore è compreso tra i 10 e i 200 Hz.

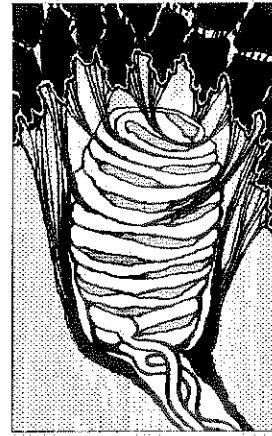


FIGURA IX.6 Disegno dei corpuscoli di Meissner.

- I *corpuscoli di Krause* esistono in due varietà, cilindriche e globulari, si trovano anche nella pelle glabra e sono maggiormente comuni nei mammiferi non primati. Il loro assone termina nella capsula semplicemente lamellata del recettore con disposizione lineare nella varietà cilindrica e a spirale nella varietà globulare. I recettori di Krause venivano considerati erroneamente recettori del freddo, in realtà si è dimostrato che sono recettori tattili rilevatori di velocità (RA1), infatti sono maggiormente sensibili ad un range di frequenze superiore ai 10-100 Hz e non danno risposte ad una pressione mantenuta stabilmente sulla pelle.

- I *recettori del follicolo pilifero* sono innervati da fibre afferenti mielinate che terminano in un complesso di terminazioni organizzate circolarmente intorno alla guaina della radice del pelo sotto le ghiandole sebacee. Queste terminazioni hanno forma di bastone avvolto ad elica intorno al pelo, sono chiuse in cellule di Schwann e sono in contatto: da una parte con la membrana basale della radice del pelo e dall'altra con il collagene (figura IX.7). Le unità afferenti del follicolo pilifero sono meccanorecettori RA1, scaricano impulsi solo quando il pelo viene mosso e possono segnalare: l'ampiezza, l'entità e la direzione dello spostamento meccanico sia ad alte che basse frequenze. Ne esistono vari tipi che differiscono in sensitività, velocità di scarica e grandezza del campo recettivo (*tipi D, G, T*).

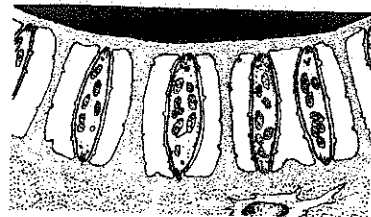


FIGURA IX.7 Sezione trasversale di un follicolo pilifero. Si osservano le fibre nervose disposte a raggiera.



## Nocicettori

Quando vengono applicati alla pelle stimoli d'intensità dannosa o potenzialmente dannosa, i sistemi meccanici e termorecettori possono essere eccitati fortemente, tuttavia essi sono portati alla massima attività già da stimoli meno intensi, cioè innocui. Questi recettori, comunque, non possono mediare dolore, sebbene essi possano contribuire alla qualità sensoria dell'esperienza dolorosa. I sistemi recettivi che analizzano e segnalano le alte intensità di stimolazione formano una classe distinta di organi sensoriali, definiti nocicettori, cioè rilevatori di "dolore periferico". Essi hanno terminazioni libere non incapsulate. I nocicettori rispondono a stimoli meccanici e termici severi; essi rispondono anche a prodotti chimici organici, tuttavia, in questo caso, è difficile stabilire una chiara classificazione sistematica basata sulle azioni eccitatorie di questi agenti, poiché i prodotti chimici eccitano, in diversi gradi, una varietà di recettori includendo sia i meccanorecettori che i nocicettori. Ci sono due principali categorie di nocicettori: *nocicettori meccanici* che rispondono a punture di spillo, a compressioni e schiacciamenti della pelle e *nocicettori termici* o *meccano-termici* che rispondono a severi stimoli meccanici e ad alte e/o basse temperature della pelle.

I *nocicettori meccanici* hanno fibre afferenti mielinate e non mielinate. Essi rispondono ad una pressione stabile dovuta a compressione della pelle o a penetrazione dell'epidermide da parte di oggetti affilati come forbici e punte aguzze; rispondono inoltre a temperature pulsanti superiori a 50 °C. Invece sono quasi indifferenti a carezze leggere della pelle, e non sono nemmeno immediatamente eccitati da temperature costanti della pelle. Inoltre, la risposta presenta una latenza maggiore a 30 s. Questi recettori possono dare un avvertimento molto rapido di dolore fisico, poiché gli assoni più veloci conducono a velocità di 50 m/s e formano il sistema segnalatore del *dolore rapido* o *primo dolore*.

I *nocicettori termo-meccanici* possono essere eccitati sia da stimoli termici che da stimoli meccanici, ma la caratteristica che li distingue dagli altri è una risposta immediata e vigorosa a severi stimoli termici con temperatura superiore ai 43-45 °C o molto bassa 2-3 °C. Alla periferia, questi recettori sono fibre non mielinate, mentre vicino al nervo periferico hanno una piccola porzione di guaina mielinica. La velocità massima di conduzione di queste fibre è comunque inferiore a 10 m/s, quindi esse segnalano il *dolore lento* o *secondo dolore*.

## MECCANISMO DI TRASDUZIONE

Gli stimoli fisici che giungono attraverso la pelle ai recettori hanno diversa natura, tuttavia il sistema nervoso è in grado di fornire una sensazione corrispondente a tali stimoli, infatti il prodotto finale dell'operazione del sistema nervoso cutaneo è la percezione di sensazioni distinte, come la pressione, la vibrazione, il caldo, il freddo e così via. L'input afferente che proviene dalla vasta popolazione dei recettori è il "materiale" dal quale sono derivate le sensazioni cutanee dell'uo-

mo e che gli forniscono la capacità di capire la locazione, l'estensione, l'entità e la durata di uno stimolo applicato alla pelle. In quest'ottica, gli studi sul meccanismo di trasduzione dell'informazione tattile (nel senso esteso del termine) sono rivolti essenzialmente al modo con cui le informazioni provenienti dai recettori vengono integrate alla periferia e al modo con cui le diverse informazioni vengono assemblate nel cervello per dare vita alla complessa percezione tattile.

## Caratteristiche della sensazione

La sensazione non è legata a un singolo recettore, ma sperimentalmente è possibile osservare che nella pelle vengono stimolati non meno di dieci unità. In base a questo si può definire il *campo recettivo* di un meccanorecettore come la superficie (generalmente di forma circolare o ellissoidale) all'interno della quale uno stimolo puntiforme di una specifica intensità può eccitare il recettore. Alcune unità di stimolazione tattile hanno un campo recettivo dell'ordine di 1-2 mm<sup>2</sup>, altre hanno un campo recettivo di circa 4-5 cm<sup>2</sup>. I campi recettivi non sono mai isolati bensì sono sia parzialmente sovrapposti che inclusi in altri. Johansson e Vallbo hanno valutato che la stimolazione localizzata in 2 mm (nel dito di una mano) eccita circa 100 unità RA e 30 SA, mentre in 50 micron può eccitare 10 unità RA e nessuna SA. È difficile, in generale, stabilire quale meccanorecettore sia responsabile di una data sensazione, tuttavia questo è possibile nel caso di vibrazioni a frequenza superiore a 60 Hz in quanto solo le unità RA1 possono rilevare tali vibrazioni. A frequenze più basse parecchi tipi di recettori sono attivati contemporaneamente ed è difficile capire se la sensazione percepita sia di pressione o di contatto. La risoluzione spaziale, di circa 1 mm, che si ha nei polpastrelli della mano umana, sembra però indicare che, a causa della diversa distribuzione nella pelle, siano soprattutto le unità SA e RA2 quelle responsabili della ricostruzione delle forme fini degli oggetti in contatto.

La capacità di individuare la posizione di uno stimolo puntiforme è detta *capacità di localizzazione*. Nell'uomo, per definire questa grandezza, si preme con una punta una qualche zona del corpo di un soggetto, al quale viene poi chiesto di localizzare, su di un disegno, la zona della puntura. Gli stimoli nocicettivi danno la massima accuratezza di localizzazione, mentre gli stimoli termici sono localizzati con cura solo se accompagnati da stimoli pressori.

La *discriminazione spaziale* è la capacità di percepire come distinti due stimoli prodotti da due punte separate. Due punti della cute sono stimolati simultaneamente usando un apposito compasso; la distanza tra le punte a partire dalla quale il soggetto non ha più sensazioni distinte viene definita *soglia di discriminazione spaziale*. Questa va da 2.3 mm nella punta delle dita a 67 mm nella coscia. Si osserva che, se la stimolazione è accompagnata da un riscaldamento del punto di applicazione, la capacità di discriminazione aumenta.

Inoltre, sono stati individuati i segnali guida che indicano all'uomo lo scorrimento di un oggetto tra le sue dita (*scivolamento incipiente*); infatti, le unità RA2, ovvero i recettori di accelerazione, rispondono solo durante lo slittamento.

## **Analisi dell'informazione tattile**

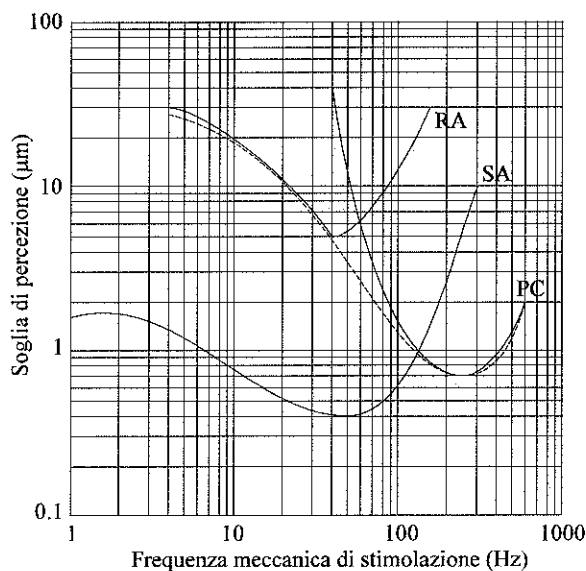
L'esatta correlazione tra sensazione e input afferente non è ben conosciuta e ciò è dovuto al fatto che, per limitazioni di carattere tecnologico, non è ancora stato possibile misurare il potenziale di azione nelle singole fibre nervose afferenti. Infatti, le moderne attrezzature non consentono ancora di restringere le misure alle piccolissime fibre che innervano i singoli recettori, ma si raggiungono solo quelle che ne innervano una molteplicità piuttosto elevata. Questo porta a valutare codifiche già filtrate da una integrazione periferica piuttosto forte, quindi si rendono necessari studi di altra natura per stabilire le funzioni di integrazione e il ruolo delle fibre nervose afferenti.

## Classificazione dell'informazione tattile

L'informazione tattile è fondamentale nell'uomo per capire posizione, velocità ed accelerazione delle articolazione, ma anche per stimare lo sforzo muscolare e tendineo. Se si considerano poi tutte le informazioni viscerali, il sistema sensoriale tattile rappresenta uno dei maggiori input dell'elaborazione celebrale per il controllo dell'intero organismo. Sulla base di questa osservazione si parla di diversi aspetti della sensazione tattile ed in particolare si tende a suddividere la sensibilità a certi stimoli in tre classi: la *sensibilità interocettiva* che deriva da tessuti e organi interni (dai visceri); la *sensibilità esteroceettiva* che deriva dalla cute e fornisce informazioni sul mondo esterno; la *sensibilità propriocettiva* che fornisce l'informazione dello sforzo compiuto nella contrazione tendineo-muscolare e sulle grandezze cinematiche (posizione, velocità, accelerazione) dei segmenti articolari. La parte delle sensazioni propriocettive che dà informazioni cinematiche costituisce la *sensibilità cinestetica*, mentre si parla di *sensibilità aptica* considerando la parte delle sensazioni propriocettive ed esteroceettive che danno le capacità necessarie alla percezione di un oggetto sia nella sua forma tridimensionale sia nei suoi particolari fini. L'informazione tattile fornisce la percezione della trama e dei dettagli della superficie di contatto, ovvero permette la discriminazione della *forma fine*; quando si parla di forma fine si intendono quelle caratteristiche superficiali degli oggetti (presenza di spigoli, angoli, curvatura della superficie, tessitura, ecc.) che nel corso di una manipolazione entrano in gioco con piccole estensioni della zona di contatto tra la forma dell'oggetto e l'organo tattile.

## Il ruolo dei meccanorecettori

La specificità dei meccanorecettori è legata soprattutto alle caratteristiche di variabilità temporale dello stimolo, mentre sono le fibre afferenti che innervano i meccanorecettori a selezionare la natura dello stimolo stesso. Ciò è confermato



**FIGURA IX.11** Grafico delle risposte in frequenza dei meccanorecettori valutate attraverso la soglia di detenzione.

dal fatto che se un singolo recettore viene eccitato con stimoli di natura meccanica, termica e chimica, esso risponde con una scarica di impulsi per ognuno di essi (ad esempio un recettore SA1 risponde con una scarica di 1200 impulsi al secondo ad una stimolazione meccanica, con 100 impulsi al secondo ad una stimolazione termica e con 40 impulsi al secondo ad una stimolazione chimica); tuttavia tenendo conto del massimo numero di impulsi al secondo trasmissibile dalle fibre (nelle fibre mielinate con diametro superiore ai 12  $\mu\text{m}$  è di 1000 impulsi al secon-

do, mentre negli assoni non mielinati è di soli 300 impulsi al secondo) e delle caratteristiche di risposta sinaptica, si trova che gli output sensoriali provenienti da fibre legate a meccanorecettori sono esclusivamente risposte a stimolazioni meccaniche; è presumibile, inoltre, che entri in gioco in tale filtraggio il notevole dislivello tra le frequenze di scarica delle stimolazioni meccaniche e delle altre stimolazioni.

Analisi sperimentali hanno stabilito che le conseguenze sensoriali della stimolazione vibratoria della pelle sono dovute all'eccitazione dei recettori di Pacini e di Meissner. La figura IX.11 riporta la sensitività meccanica dei tre meccanorecettori cutanei (corpuscoli di Pacini, corpuscoli di Meissner e recettori SA1) nella pelle glabra (linee continue), misurate a frequenze diverse di vibrazione (da 0 a 800 Hz). Vengono anche riportate le soglie sensoriali in soggetti consci (linea tratteggiata) per sensazione di battimento (5-50 Hz) e di vibrazione (50-600 Hz). C'è uno stretto accordo tra soglie del corpuscolo di Pacini e le soglie sensoriali vibratorie ad alte frequenze; e tra il recettore di Meissner e le soglie sensoriali di battimento a frequenze intermedie. Non c'è correlazione tra le soglie sensoriali vibratorie e di battimento e le soglie dei recettori SA.

Differenti meccanorecettori possono contribuire in vario modo ad una data sensazione come la sensazione di vibrazione battente (toccamento) evocata facendo vibrare la pelle. Questa sensazione è rilevabile nel range di frequenza tra 5 e 400 Hz, e, alle diverse frequenze, l'ampiezza di soglia della vibrazione cambia in modo sistematico, essendo più alta alle frequenze estreme e più bassa a 200-300 Hz (figura IX.11). Studi paralleli sui meccanorecettori cutanei mostrano che il range di frequenza più alto e più basso dipendono dal diverso tipo di unità afferente, infatti, nell'uomo, le soglie sensorie a bassa frequenza sono legate alle soglie delle unità RA2 (corpuscoli di Meissner nella pelle glabra e follicolo pilifero), mentre quelle ad alta frequenza alle soglie delle unità RA1 (corpuscolo di Pacini). Tutto ciò è rafforzato dall'esistenza nella corteccia somatosensoriale di neuroni corticali che rispondono separatamente: a stimolazione cutanea sinusoidale a 5-80 Hz, a stimolazione sinusoidale a 80-400 Hz e a stimolazione pressoria costante.

## Il ruolo dei termorecettori

La struttura e le funzionalità precise dei termorecettori sono poco note. Si è visto che molte fibre nervose del III gruppo e alcune del IV trasportano informazioni termiche e queste informazioni rimangono separate anche nel sistema centrale. Non è chiaro, invece, se esse vengano elaborate totalmente al livello superiore o se venga effettuato un pre-processing locale quale si registra nei fenomeni di arco riflesso, i quali permettono un rapido allontanamento degli arti in presenza di sensazioni dolorose dovute a temperature troppo alte o troppo basse. Questo processo, tuttavia, viene spesso influenzato dal fatto che i termorecettori non rivelano soltanto la temperatura dell'oggetto, ma anche il passaggio di calore tra i due corpi, quindi oggetti aventi stessa temperatura, ma con capacità termiche elevate appaiono più freddi di altri con capacità termiche minori. Tale evidenza deve essere valutata alla luce del fatto che il sistema termorecettoriale, più che fornire informazioni fini sulla temperatura degli oggetti deve rivelare la velocità con cui i tessuti liberano o assorbono calore per rendere

efficiente il processo di omeostasi termica. Le temperature inferiori ai 5 °C o superiori ai 45 °C vengono rilevate dai nocicettori poiché, a tali temperature, iniziano le prime degenerazioni tessutali e quindi legate alla nocicezione.

## La sensazione del dolore

Mancano informazioni sulla struttura e le funzionalità strette dei nocicettori, ma anche dati utili che permettano di interpretare la capacità individuale e momentanea di percepire o meno certi dolori.

La concezione moderna sul dolore considera due tipi di sensazioni dolorose: il *dolore rapido* e il *dolore lento*.

Il *dolore rapido* o *primo dolore* è una sensazione breve, ben localizzata e in stretta relazione con lo stimolo: la sensazione inizia e termina bruscamente, quando lo stimolo viene applicato e rimosso. Questo tipo di dolore è rivelato dai mecano-nocicettori, la cui non specificità per la natura dello stimolo (meccanico, termico o chimico) fa ipotizzare che il meccanismo di trasduzione sia simile a quello dei meccanorecettori seguito da un diverso filtraggio delle fibre nervose.

Il *dolore lento* è una sensazione sgradevole di tipo urente, scarsamente localizzata e con relazioni meno specifiche con lo stimolo, spesso ha lunghe latenze o permanenze (ore o giorni). Il meccanismo di rivelazione sembra essere legato al danneggiamento tessutale o comunque alla liberazione nei tessuti di sostanze chimiche in grado di eccitare i nocicettori (ad esempio, in seguito a ferite o a punture d'insetto si aggregano vicino alla ferita molti polipeptidi i quali sono in grado di attivare i nocicettori). La permanenza del dolore sembra legata al lungo periodo di rigenerazione tessutale e al lento riassorbimento dei polipeptidi.

Spesso si parla anche di *dolore riferito*, cioè di dolore non legato direttamente alla zona colpita dall'agente nocivo. Tale fenomeno sembra essere dovuto direttamente alle vie afferenti del dolore, infatti in generale il dolore riferito è proiettato in zone corporee innervate dalla stessa fibra che innerva l'organo o la parte danneggiata; tuttavia il fenomeno potrebbe essere anche il risultato di interpretazioni ed elaborazioni al livello cerebrale

## Vie neurali parallele

È stato possibile accertare sperimentalmente la specificità delle grosse fibre mielinate per la pressione, la cinestesia (velocità e accelerazione), la temperatura ed il dolore. Tale separazione delle informazioni sembra essere parzialmente mantenuta anche al livello cerebrale, poiché l'elaborazione delle singole informazioni sembra essere in gran parte associabile direttamente a zone encefaliche separate.

L'informazione dai recettori cutanei viscerali e propriocettivi può raggiungere la corteccia cerebrale da due o più vie principali con un minimo di due neuroni per via. In aggiunta a queste vie dirette ci sono altre vie polineurali attraverso nuclei reticolari del ceppo cerebrale. Nessuna via neurale ha un'unica funzione sensoria, quindi ciò permette di proteggere il sistema cutaneo somatoestesico dalla completa disabilità provocata da traumi. Infatti, in un caso clinico di spina dorsale schiacciata al livello del terzo segmento toracico e danneggiata completamente eccetto che in uno dei quadranti antero-laterali, si è visto che il paziente presentava una completa paralisi motoria sotto la lesione. La perdita sensoriale era

ristretta all'assenza di sensazioni di temperatura e di dolore nelle zone anterolaterali danneggiate; era inoltre assente la sensitività alla vibrazione, in quanto erano stati danneggiati anche i cordoni dorsali. I risultati inaspettati erano che il paziente poteva riconoscere e localizzare stimoli tattili e meccanici di entrambe le parti del corpo sebbene ad una soglia più alta del normale; che il movimento passivo poteva essere rilevato sulla stessa parte della lesione; che il dolore poteva essere evocato da entrambe le parti. È chiaro da casi come questo che le vie parallele possono essere importanti nel conservare qualche grado di capacità sensoriale quando alcune di esse sono danneggiate.

Una lesione o una stimolazione diretta di qualche nervo può provocare una varietà di azioni senza rapporto; tale effetto si pensa sia dovuto al fatto che i nervi cutanei periferici hanno anche importanti azioni trofiche sulla pelle. Questi nervi e i recettori periferici associati sono l'unica sorgente d'ingresso sensoriale dalla pelle al sistema nervoso centrale. Se un nervo cutaneo viene tagliato e impedito a rigenerarsi c'è una completa e immediata perdita di input sensoriale dalla pelle che viene innervata da quella fibra. Ci può essere un lento e parziale recupero della sensazione, ma questo è dovuto alla crescita di nervi sensoriali intorno alla pelle innervata; ci possono anche essere sensazioni anormali associate all'attività del moncone centrale del nervo tagliato.

## Localizzazione sensoriale

Le stimolazioni tattili della pelle sono accuratamente localizzate da un soggetto bendato e questa abilità è dovuta all'abbondanza dei meccanorecettori nella pelle e alla proiezione ben ordinata delle loro fibre afferenti verso i neuroni nelle vie tattili. Il caldo e il freddo sono molto meno localizzati, sebbene ci siano anche zone calde e fredde nella pelle, probabilmente a causa della più estesa convergenza delle fibre afferenti verso i neuroni sulle vie termosensoriali. Comunque, la localizzazione è ragionevolmente accurata, e quello che manca è un'abilità nel riconoscere due separati stimoli termici se sono vicini sulla pelle, così che la risoluzione spaziale del sistema termosensoriale è bassa. Stimoli dolorosi sono ancora meno bene localizzati, in parte perché il dolore, anche quello provocato da una punta affilata, ha una qualità radiativa e propagativa. Punture superficiali sono localizzate con maggior accuratezza, mentre stimoli dolorifici su tessuti più profondi o stimoli termici più nocivi inflitti alla pelle sono scarsamente localizzati. Questo è strano se consideriamo il punto di vista dei recettori, poiché tutti i tipi di nocicettori hanno piccoli campi recettivi, tuttavia il paradosso è risolto quando vengono considerati i campi recettivi dei neuroni nelle vie sensoriali. La localizzazione degli stimoli di dolore può derivare anche dall'eccitazione concorrente di meccanorecettori e vie afferenti termosensoriali, infatti gli stimoli nocivi superano spesso le soglie di meccanorecettori e termorecettori.

L'acuità sensoriale di diverse regioni del corpo non è uguale. Test sensoriali come la discriminazione di due punti (l'abilità di riconoscere due stimoli come separati anziché come uno solo) mostra che la schiena è meno sensitiva e regioni come le labbra, la lingua e la punta delle dita hanno un'acuità molto alta. Queste differenze in acuità tattile sono in parte attribuibili alla bassa densità di innervazioni sensoriali sulla schiena, ma anche all'entità del campo recettivo. Un

ulteriore fattore è rappresentato dal tipo di recettore presente nelle diverse regioni del corpo, infatti la pelle delle punta delle dita contiene molti tipi di meccanorecettori molto sensitivi e così può fornire un range di informazioni circa gli stimoli tattili di contatto. Alcune variazioni sensoriali nelle regioni diverse del corpo possono essere dovute alle variazioni nelle proprietà delle unità afferenti, tuttavia dobbiamo tener presente che il sistema nervoso centrale ha un potere considerevole per modificare i messaggi che vanno ai più alti livelli del cervello.

## TATTO ARTIFICIALE

Nel mondo dell'ingegneria la continua scansione di forze di contatto variabili che compaiono durante l'esplorazione e la manipolazione di oggetti, mediante sensori miniaturizzati e sensori ad array, sta diventando sempre più importante nella robotica avanzata per teleoperazioni e telepresenza, per protesi mediche e ortesi di arto. Nell'ultimo decennio la pressione esercitata da questi settori ha fatto compiere alla ricerca e allo sviluppo sul senso tattile una crescita impressionante, tuttavia la complessità nel riprodurre in un unico sistema le caratteristiche di quello umano è tutt'oggi un limite notevole.

Nell'uomo l'alto grado di abilità che caratterizza le funzioni di presa e manipolazione e la sofisticata capacità di riconoscere gli oggetti sono il risultato di una potente integrazione sensorio-motoria che sfrutta la ricchezza dell'informazione portata dai sistemi neurali afferenti cutanei e cinestetici. La mano umana ha 32 gradi di libertà, mentre un attuale robot nel suo complesso ne ha al più 9-12 e il suo organo terminale al più 6. Questo dato tecnico riflette la difficoltà di progettare arti meccanici dotati di forza, versatilità, leggerezza e sensibilità. Questo implica integrazione di sensazione cutanea e forza, di spostamento e posizionamento dei sensori da allocare in muscoli, tendini e articolazioni (cinestesia). Gli attuatori degli arti meccanici si differenziano a seconda della funzione da svolgere e a seconda del peso, della forma, della fragilità, della durezza e dell'inerzia degli oggetti da manipolare. In ogni caso devono avere elevata presa, versatilità ed idoneità nello svolgere azioni ripetibili ed accurate, quindi si rende necessaria la presenza di numerosi sensori per la retroazione. Da questo punto di vista uno degli ostacoli è rappresentato dal controllo ad anello aperto usato dalla maggior parte dei robot, tuttavia anche l'utilizzazione di un controllo a retroazione non eliminerebbe le piccole oscillazioni limite a causa della complessità del sistema; queste limitazioni del controllo possono essere superate solo affinando e potenziando la capacità di rilevazione ed elaborazione delle informazioni tattili provenienti dal mondo esterno.

Lo sviluppo di sistemi di protesi e ortesi efficienti intesi a sostituire o aiutare nel ripristinare funzioni meccanorecettive e manipolative perse a causa di ferite o malattie, dipende dalle scoperte della tecnologia nel campo del senso tattile artificiale e in quello delle interfacce biologiche. Tuttavia, rigidi requisiti di cosmetica e accettabilità funzionale limitano severamente l'uso di dispositivi correntemente disponibili. I limiti più sostanziali sono causati dalla inabilità a trasferire l'informazione tattile al sistema neurale afferente ed all'uso impraticabile di



sensori in sostituzione di canali sensoriali. Come risultato la maggior parte delle protesi della mano sono oggi semplici dispositivi fatti di elementi di presa con uno o due gradi di libertà che lavorano sotto controllo visivo.

La teleoperazione e la telepresenza rendono in grado l'uomo di estendere la sua abilità manipolativa o proiettare la sua presenza attiva in locazioni remote. I teleoperatori devono conciliare non solo l'abilità di percezione dell'informazione aptica, ma anche il trasporto e la sua riproduzione. Infatti l'informazione tattile proveniente dal robot deve arrivare all'operatore umano, il quale, attraverso strutture adatte (guanti e apparati visivi sono progetti realizzati da Heer e Bejczy nel 1983, ma solo nel 1993 iniziano i primi esperimenti effettivi di teleoperazioni su cavi tra Milano e New York), coordina il proprio sistema senso-motorio ed elabora le azioni consequenziali che a loro volta devono essere ritrasmesse al robot. Ciò fa capire che teleoperazione e telepresenza implicano necessariamente una stretta interazione tra operatore umano e macchina. In quest'area, si pensa che il senso del tatto sia importante, tuttavia è ancora difficile presentare all'operatore l'informazione tattile in modo da avere una risposta in tempo reale.

## Caratteristiche di un sistema tattile artificiale

Lo sviluppo di generazioni future di robots capaci di operare in un ambiente non strutturato o intesi a sostituire l'uomo in locazioni azzardate o inaccessibili richiede l'implementazione di capacità sensoriali più sofisticate, molto lontane da quelle disponibili negli attuali robots industriali. Accanto alle capacità sensoriali occorre anche un potente sistema di elaborazione che coordini ed integri le informazioni tra loro. In quest'ottica è possibile considerare il sistema tattile artificiale strutturato in due sottosistemi: uno "periferico" che preleva l'informazione e ne effettua un primo pre-processing rivolto soprattutto alla sintesi dell'informazione, ed uno "centrale" che estrae le informazioni, le integra e produce gli stimoli di coordinamento motorio per i robot o per altri tipi di risposta in funzione dell'applicazione del sistema tattile. Nel sistema "periferico" il maggior peso nella determinazione delle caratteristiche è determinato dalle capacità sensoriali e quindi dalle specifiche dei sensori tattili, mentre nel sistema "centrale" le risposte risultano più o meno adeguate in relazione alle conoscenze sui fenomeni e alla

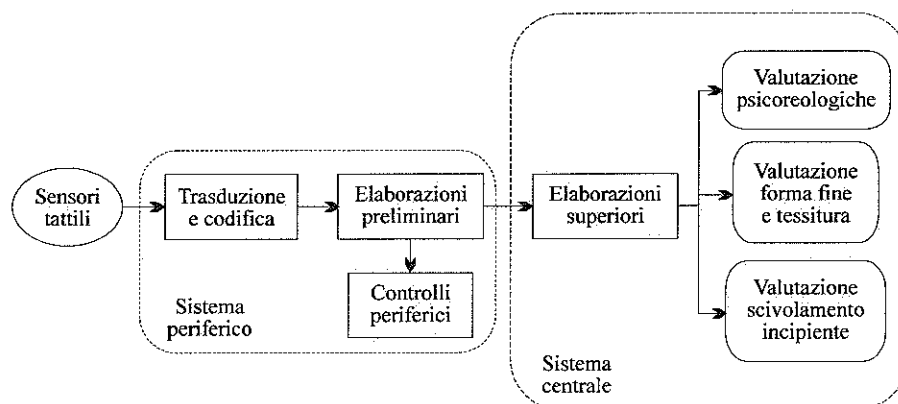


FIGURA IX.12 Schema a blocchi di un processo tattile.

capacità di tradurle in algoritmi efficienti.

In figura IX.12 viene rappresentato un sistema tattile artificiale nel quale vengono evidenziati alcuni elementi di base del processo che porta dalla realtà alla percezione tattile cutanea. Ognuna delle operazioni presenti, sia al livello periferico che al livello superiore, è svolta da sistemi fisici o algoritmi di calcolo, quindi occorre prendere in considerazione le specifiche dei sistemi fisici e i modelli sui quali costruire gli algoritmi.

## I sensori tattili e la trasduzione

Una tecnica vantaggiosa nella realizzazione di sensori tattili è quella di progettare un sistema "skin-like", ovvero con struttura simile a quella della pelle umana. I sensori della pelle artificiale dovrebbero avere alta sensibilità, veloce risposta e uscita variabile in modo continuo con lo stimolo; dovrebbero dissipare poca potenza, trattare localmente i segnali generati, avere caratteristiche di economicità, accoppiabilità e lunga durata; dovrebbero inoltre essere multicomponenti, per poter rilevare tutte le diverse informazioni che entrano in gioco in una manipolazione. Inoltre, per l'uso di sensori da inserire nelle mani e nei piedi umani in sostituzione di quelli naturali, il sensore deve essere flessibile, morbido, compatto, confortevole e non invasivo. Queste caratteristiche, desiderabili per applicazioni robotiche, sono anche le caratteristiche ideali per una protesi biomedica. Sulla base di queste considerazioni e delle caratteristiche fisiologiche e anatomiche del tatto, L. Harmon ha elaborato una tabella di specifiche tecniche che caratterizza il sensore di tatto ideale:

- La *risoluzione spaziale* dovrebbe essere di 1-2 mm. Questa è approssimativamente la discriminazione spaziale del dito umano. Alcune applicazioni però, come i robot per l'assemblaggio automatico, potrebbero richiedere una risoluzione migliore di quella del dito umano.
- La *sensibilità alla forza* dovrebbe essere di 0.5-10 g. Certamente il grado di sensibilità richiesto dipende dalla massa, dalla velocità e dall'accelerazione dell'oggetto manipolato, dalla risposta nel tempo del sensore e dalla tenacia dei materiali che lo compongono.
- È desiderabile un *range dinamico* di 1000:1 con risposta logaritmica, in quanto è più importante avere un'alta sensibilità per piccole forze che per grandi forze.
- La *banda* del sensore dovrebbe estendersi dalla continua fino ad almeno 100 Hz, anche se alcune applicazioni robotiche potrebbero richiedere una banda di 1 KHz.
- È desiderabile una buona *linearità*, anche se è tollerabile una modesta non linearità (in un sensore dotato di una buona stabilità e ripetitività le non linearità possono essere compensate).
- L'*isteresi* deve essere bassa, cioè l'uscita deve essere priva di memoria delle passate configurazioni.
- Il sensore deve avere una *elevata resistenza* per poter essere compatibile con l'ambiente e con i processi industriali. Infatti, applicazioni specializzate potrebbero richiedere lunga durata all'esposizione al calore, alle radiazioni, ad interferenze elettriche, al fumo e a stress meccanico.

- La *bassa dissipazione di potenza* è importante specialmente per dispositivi ad alimentazione autonoma.

Uno degli aspetti più delicati nella progettazione dei sensori tattili è il *packaging*, infatti la rottura delle connessioni è un problema molto comune. I fili di interconnessione non devono essere soggetti a forze che tendono a spezzarli e devono essere sufficientemente flessibili per permettere i movimenti richiesti. Per ridurre al minimo il numero di fili, la maggior parte l'elettronica deve essere disposta all'interno del sensore stesso. Le plastiche, le gomme e le fibre di carbonio hanno trovato, non a caso, un largo uso nei sensori tattili per la loro adattabilità meccanica e robustezza, combinate con la loro abilità di assumere forme complicate. Anche alcuni polimeri e composti plastici possiedono proprietà di trasduzione intrinseche (piezoresistività, piezoelettricità, fotoelasticità, magnetoelettricità, ecc.) che rendono questi materiali particolarmente attraenti per il senso tattile.

Negli ultimi anni sono diventati commercialmente disponibili alcuni tipi di sensori per misurare forze di contatto. Questi corrispondono a cinque tipi di tecnologie:

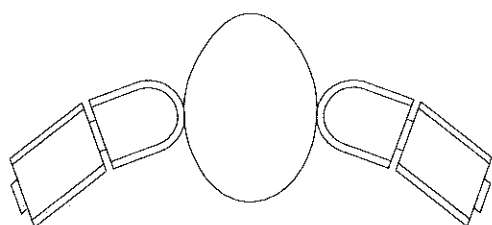
- I *sensori ottici* nei quali le forze muovono membrane a cui sono collegati diaframmi che, spostandosi, modulano la luce, la quale viene trasdotta in segnale elettrico per mezzo di un fotorivelatore.
- I *sensori piezoresistivi* che misurano forze per mezzo del cambiamento di resistenza di un polimero conduttore (elastomeri conduttori).
- Gli *strain-gauge* in cui le forze vengono misurate attraverso variazioni di resistenza del sensore stesso.
- I *sensori capacitivi*, il cui principio di trasduzione è basato sulla variazione di capacità dovuta all'applicazione di una tensione meccanica.
- I *sensori piezoelettrici* che sfruttano l'effetto piezoelettrico per la misura di forze (allo studio vi sono particolari sensori che sfruttano la tecnologia dei polimeri piezoelettrici).

Dovrebbe essere chiaro comunque, che la richiesta esatta di un particolare sensore dipende dal suo uso specifico.

In questo contesto occorre considerare anche gli effetti termici, a causa del loro uso per rilevare sensazioni di tipo termico e della loro inevitabile interferenza con i sensi meccanici. Il senso termico è una sensazione esteroceettiva addizionale per la discriminazione dei materiali, poiché non è usata solo per sentire la temperatura. Infatti i recettori termici percepiscono le differenze nella conduttività e nella diffusività termica di oggetti alla stessa temperatura. Il senso termico nei robot è stato studiato usando elementi singoli e sensori ad array. Negli esperimenti condotti con array piroelettrici e termistori (supportati da una sorgente di calore termostata) sono state misurate mappe dinamiche di cambiamenti di temperatura generati dal contatto tra sensore e oggetto, permettendo discriminazioni tra materiali diversi con buona accuratezza.

## Apparati e supporti meccanici

Per l'analisi e il design di sistemi aptici artificiali sono assolutamente necessarie considerazioni basate sulla cinematica e la dinamica dei corpi rigidi e sulle meccaniche del contatto. Sebbene queste discipline siano ben affermate, le loro



**FIGURA IX.13** Schematica rappresentazione delle falangi di due dita meccaniche nell'atto di prendere un uovo che per la sua struttura rotondeggiante e fragile rappresenta un simbolo delle capacità di presa.

assicurare una presa stabile ed evitare lo scivolamento o il danneggiamento dell'oggetto.

I modelli di contatto assunti in una analisi del genere sono punti idealizzati, linee, contatti planari e "soft-finger" (contatto puntuale). Nel 1984 è stato proposto un metodo per ottenere il set di informazioni che è il più rilevante per questi modelli. Questo metodo consiste nel rilevare la presenza e il tipo di contatto, basandosi sulla misura della forza e del momento risultante in una zona lontana dall'area di contatto e viene applicato in modo esatto solo nel caso di contatto puntuale. Recentemente è stata sviluppata la *teoria del contatto intrinseco* che permette di avere risultati esatti anche per casi più generali. Le caratteristiche salienti dei sistemi sensoriali per il contatto intrinseco sono: la capacità di rilevare le componenti normale e tangenziale (attrito) delle forze di contatto, la capacità di rilevare la coppia resistente che si oppone allo slittamento rotazionale e la possibilità di definire un punto di riferimento, chiamato *centroide di contatto*, in cui si può pensare concentrata tutta l'area di contatto (esso sta nella più piccola porzione convessa della superficie della punta del dito che racchiude tutta l'area di contatto). In realtà, i contatti non possono essere considerati puntuali, ma quanto meno estesi ad una linea o ad una superficie, quindi per localizzare e definire tali zone occorre sviluppare un sistema di "senso attivo". Questo richiede che la terminazione sensoriale possa effettuare piccoli movimenti di esplorazione (mantenendo il contatto), mentre i sensori ad essa associati effettuano registrazioni ripetute. Un esempio di una terminazione tattile è rappresentata in figura IX.13.

## Modelli di rilevamento d'attrito e di scivolamento incipiente

Prenderemo in considerazione il problema dello scivolamento nel caso di modelli di attrito nell'interazione dito-oggetto.

applicazioni ai robots e al senso tattile sono state limitate, e solo negli ultimi anni studi specifici appaiono nella letteratura specializzata.

I primi lavori sulla capacità di presa hanno studiato il contatto tra oggetti ed effettori terminali, sulla base di argomenti puramente cinematici; infatti furono stabiliti criteri per la selezione delle forze applicate dagli attuatori agli effettori terminali, in quanto si voleva

assicurare una presa stabile ed evitare lo scivolamento o il danneggiamento dell'oggetto.

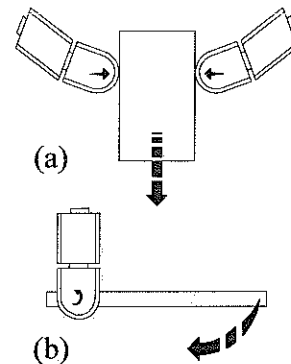
Le richieste di aree di contatto relativamente larghe e superfici di presa deformabili, fatte di materiali come la gomma per una presa stabile, forzano l'analisi oltre il singolo punto e le modalità della linea di contatto e l'attrito coulombiano. Sono stati studiati modelli di attrito non coulombiano nel caso di materiali come la gomma in contatto con corpi rigidi, sviluppando modalità di comportamento per un contatto dinamico semplificato e ottenendo condizioni limite che permettono di prevenire il rotolamento (figura IX.13) e lo scivolamento sotto taglio lineare (figura IX.14a) o stress di torsione (figura IX.14b).

È stato esaminato il comportamento dei contatti soft-finger e very-soft-finger sotto l'azione combinata di una torsione e un peso di taglio lineare e identificò i limiti di scivolamento, usando un modello nel quale l'attrito è considerato proporzionale alla forza normale elevata ad esponente 2/3. È stato riportato un semplice limite operativo di scivolamento, espresso dalla seguente relazione:

$$f_{\parallel} + A|m_{\perp}| \leq \mu|f_{\perp}|$$

dove  $f_{\parallel}$  e  $f_{\perp}$  sono rispettivamente le forze di contatto tangenziale e normale,  $m_{\perp}$  è il momento angolare,  $\mu$  è il coefficiente di attrito e  $A$  è una funzione del raggio di contatto che tiene conto della proporzionalità tra torsione e limiti di taglio (si è stimato che  $A$  dipende dalla geometria del contatto).

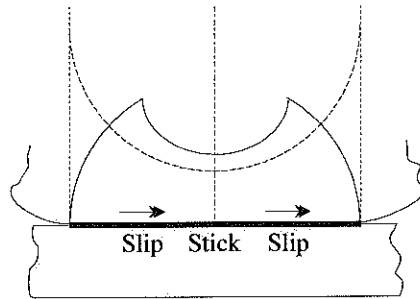
Un'analisi più rigorosa dello scivolamento incipiente sotto sforzo tangenziale ha messo in evidenza la natura irreversibile di questi fenomeni e il presentarsi di cambiamenti dinamici delle regioni di contatto di "stick" e "slip" (figura IX.15). Quando, in un contatto non conforme con attrito, uno sforzo tangenziale è sovrapposto a forze normali di contatto, sorgono trazioni tangenziali superficiali che causano microscivolamento ai bordi dell'area di contatto dove la trazione tangenziale è alta e la forza normale bassa. Una zona di stick si sviluppa nella zona centrale, dove la trazione tangenziale è più bassa e la forza normale è più alta. Un ulteriore incremento delle forze tangenziali (ancora sotto l'azione della forza normale costante) provoca la propagazione della zona di slip all'interno e il restringimento della zona di stick fino a che la trazione tangenziale di superficie non può essere più sostenuta e l'oggetto comincia a scivolare (figura IX.15).



**FIGURA IX.14** Possibilità di scivolamento. (a) Sotto taglio lineare (b) Sotto torsione.

Da questo segue che per assicurare una presa stabile, il rilevare lo scivolamento incipiente non può essere effettuato attraverso il solo senso cinestetico. Per assicurare una presa stabile e controllare lo scivolamento nella manipolazione sono necessari sensori tattili distribuiti sulla superficie, capaci di rilevare le forze di contatto normali e di taglio, in modo da effettuare la stima della grandezza e della locazione dell'area di contatto.

Sono stati descritti molti dispositivi capaci di valutare lo scivolamento tra l'oggetto afferrato e l'effettore terminale. Esiste un sensore di scivolamento fatto di sfere miniaturizzate incorporate in una complessa base protettiva, i cui movimenti rotativi, indotti da un contatto di scivolamento, potevano essere rilevati elettronicamente. Sono stati usati altri effetti di trasduzione per rilevare contatti di scivolamento, come emissioni acustiche, vibrazioni rilevate da elementi fotoelastici e accelerazioni della pelle. Tutti questi sensori, comunque, rivelano un segnale che è generato solo quando un movimento relativo è già insorto, riducendo notevolmente il loro utilizzo nel controllo della presa di un servomeccanismo. È stato proposto l'uso di un array di dipoli magnetici in un'imbottitura elastica, la cui posizione e il cui orientamento possono essere evidenziati da elementi magnetoresistivi; in alternativa è stato proposto anche un sensore tattile ad array a componenti selettive di stress, costituito da una combinazione di elementi polimerici piezoelettrici.

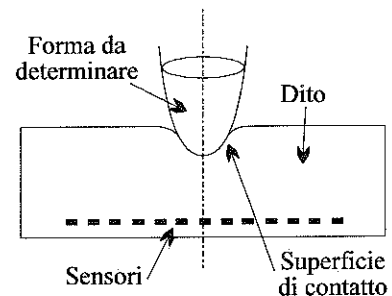


**FIGURA IX.15** Superficie sottoposta a pressione in cui si generano zone di stick e slip nell'area di contatto. La curva tratteggiata mostra il caso di assenza di slip, mentre la curva continua mostra il caso con parziale slip.

## Meccanica del contatto e discriminazione della forma fine

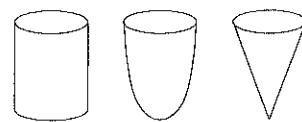
La discriminazione spaziale tattile nell'uomo raggiunge il suo massimo sulla punta delle dita, dove l'alta densità di meccanorecettori specializzati permette un'alta risoluzione e sofisticati modelli neurali, per questo si tende a costruire sensori tattili ad array con alta densità spaziale che permettono di replicare queste funzioni.

Sono state suggerite metodologie per rilevare lo stress di contatto generato dall'aderenza di un oggetto con la superficie di copertura del dito. Nello stabilire la forza di presa si è rivelato più utile determinare lo stress di contatto piuttosto che i profili. Tale stress può essere calcolato misurando la distribuzione spaziale discreta dello stress e dello strain, in un piano incassato nella copertura elastica del dito. Il problema così formulato, fa parte della classe dei problemi inversi del contatto elastico, dove la distribuzione delle forze agenti agli estremi del sensore dovrebbe essere provocata dalla conoscenza spaziale discreta del campo di stress sulla superficie del sensore. Questo è un



**FIGURA IX.16** Schematica rappresentazione di un sensore tattile per l'identificazione di forme simmetriche (indenter) rispetto ad un asse rotazionale.

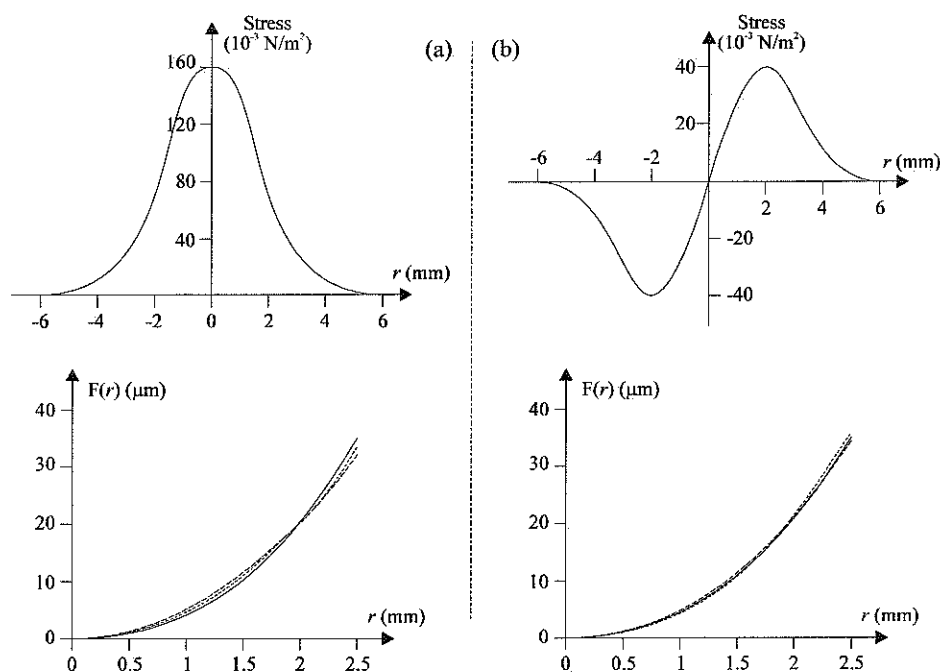
problema mal posto, poiché in esso l'esistenza, l'unicità e la stabilità della soluzione non sono garantite; tuttavia, una soluzione funzionale può essere trovata imponendo alcune limitazioni, formulate sulla base di considerazioni fisiche e informazioni complementari. In generale, si semplifica il problema trascurando l'attrito, considerando un contatto non conforme tra un oggetto rigido (*indenter*) e assumendo che la copertura del dito sia un mezzo elastico semi-infinito, omogeneo, isotropo (figura IX.16).



Nei problemi diretti del contatto, viene usata una limitata classe di indenter (figura IX.17), si ricavano le relazioni necessarie attraverso la teoria degli elementi finiti e si risolvono tali relazioni con passaggi al limite. Tali problemi ci permettono di ricavare lo strain nel mezzo in termini di stress (o strain) di superficie, profilo dell'indenter e forza risultante. La trattazione porta ad un'equazione esprimibile nella forma seguente:

$$Tx = y$$

dove  $x$  e  $y$  sono funzioni reali legate allo stress (o allo strain) di superficie e alle forze risultanti, mentre  $T$  è un operatore integrale in forma minima che tiene conto delle superfici di contatto, in generale tale operatore è una matrice singolare. Poiché i sensori tattili ad array effettuano un campionamento bidimensionale



**FIGURA IX.18** Grafici inerenti alla ricostruzione della forma fine per mezzo di algoritmi software. **(a)** Calcolo dello stress normale in funzione delle risposte sensoriali e della relativa forma dell'indenter. **(b)** Calcolo dello stress tangenziale in funzione delle risposte sensoriali e della relativa forma dell'indenter.

discreto dello stress (o dello strain), il metodo inverso consiste nel risolvere equazioni lineari associate alla convoluzione discreta come soluzione inversa generalizzata:

$$x = T^{-1}y$$

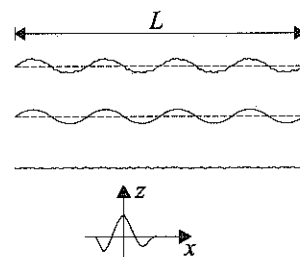
dove  $x$  è un vettore di dimensione uguale al numero di campioni di superficie,  $y$  un vettore di dimensione pari al numero dei sensori e  $T^{-1}$  è l'operatore pseudoinverso di  $T$ . Soluzioni di questo problema inverso possono essere valutate con diverse metodologie, sfruttando l'ausilio di mezzi software, simulazioni fatte usando i dati d'ingresso dalla soluzione teorica del caso inverso mostrano ricostruzioni accurate per profili dell'indenter (conico, parabolico e circolare a base piatta) anche in presenza di rumore gaussiano aggiunto ai dati (figura IX.18).

## Sondaggio e presa di superfici dalla trama

Gli uomini fanno largo uso dell'informazione sulla trama superficiale per classificare gli oggetti, capirne la forma e per adattare la forza di presa. Il senso di ondulazione e rugosità si affidano all'esplorazione tangenziale attiva, nella quale i meccanorecettori e i loro associati processi neurali estraggono andamenti topografici medi delle asperità di superficie. Questa forma di senso può essere interpretata in termini di sensazione cutanea e processo periferico, essendo largamente determinata e codificata dall'entità di scarica neurale delle differenti popolazioni di meccanorecettori nella pelle (adattamento rapido, adattamento lento e Paciniano).

La rilevazione dell'ondulazione e della rugosità è sicuramente utile nella discriminazione dell'oggetto, ma ancora di più nella preparazione, nell'effettuazione della presa e nel controllo dello scivolamento durante la manipolazione.

Nel caso di oggetti con superfici ondulate è importante determinare l'evoluzione dell'area reale di contatto sotto forze di contatto variabili. Per il calcolo possiamo riferirci alla teoria classica di Hertz, la quale ipotizza, per questo caso, che l'area reale di contatto è proporzionale al peso normale elevato alla  $2/3$ ; tuttavia questa teoria dà solo un risultato asintotico per piccole trazioni superficiali e non vale per elevate pressioni di contatto, in quanto l'area di contatto cresce più velocemente di quanto previsto. Inoltre, la trama della superficie può essere analizzata con questa metodologia, quando l'ampiezza delle ondulazioni di superficie è piccola rispetto alla loro lunghezza d'onda spaziale caratteristica, altrimenti non si ha nessuna discriminazione. L'analisi della rugosità con intenti esplorativi e discriminativi (per esempio nella selezione dell'oggetto), dovrebbe essere basata su descrizioni topografiche di superfici rugose e modelli realistici di fenomeni di trasduzione. In relazione alla figura IX.19, definiamo quindi, la rugosità media lungo un segmento di linea  $L$ , la seguente espressione:



**FIGURA IX.19** Esempio di possibile tessitura e delle componenti che la compongono.



$$R_a \triangleq \frac{1}{L} \int_0^L z(x) dx$$

dove  $z(x)$  rappresenta l'altezza locale dell'asperità riferita alla linea centrale della superficie. Si possono considerare dunque alcuni parametri per la descrizione della rugosità: la deviazione standard  $\sigma_s$  dell'altezza della superficie dalla linea centrale, la radice quadrata della pendenza  $\sigma_m$  e la radice quadrata della curvatura  $\sigma_k$  del profilo superficiale (o la massima curvatura media  $\overline{K_s}$ ). Quando superfici ruvide sono messe in contatto, il loro comportamento è governato da queste quantità (o dalle loro derivate) e dalla densità di asperità  $\eta_s$ .

Importante è l'analisi degli effetti della rugosità su contatti planari. Nel caso di contatto planare con una superficie irregolarmente rugosa gli effetti non sono ben conosciuti, tuttavia è possibile utilizzare la legge degli stati di attrito di Amontons per il calcolo della superficie di contatto, tale legge afferma che l'area reale di contatto cresce proporzionalmente al peso normale, e il coefficiente di attrito limite può essere usato per definire criteri per lo scivolamento. Una situazione più complessa è presente nel contatto elastico di superfici rugose non planari.

Nel caso di una sfera liscia di raggio  $R$  in contatto con un piano, la cui rugosità superficiale segue una distribuzione normale gaussiana di altezze di asperità, la distribuzione della pressione e l'effettivo raggio di contatto dipendono da due parametri adimensionali indipendenti:

$$\alpha = \frac{\sigma_s R}{a^2} \quad \mu = \frac{8}{3} \eta_s \sigma_s \sqrt{\frac{2R}{\overline{K_s}}}$$

dove  $a$  è il raggio di contatto calcolato per superfici piatte (*raggio di Hertz*). La deviazione dal comportamento Hertziano è graficata in figura IX.20 in funzione di  $\alpha$  e  $\mu$ , si vede che essa dipende soprattutto da  $\alpha$  e meno marcatamente da  $\mu$ . Questi due fattori possono influenzare considerevolmente le forze di presa e di controllo, inoltre la loro influenza nella misurazione e quantizzazione della rugosità di superficie risulta essere un grave problema nel senso tattile. Un approccio più ragionevole per tenere conto della rugosità di superficie nell'oggetto manipolato potrebbe risiedere nel monitorare la dinamica delle regioni di "stick" e "slip".

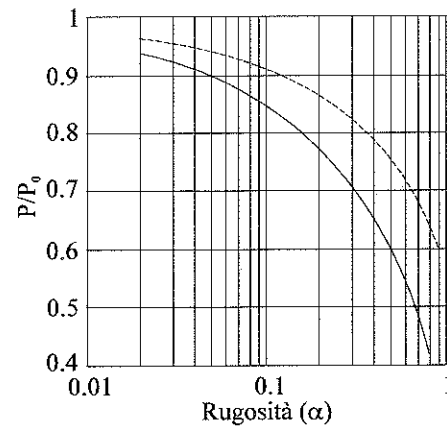


FIGURA IX.20 Influenza della rugosità  $\alpha$  e del parametro  $\mu$  legato alla superficie di contatto sulla pressione di contatto  $p(0)$  comparata col massimo della pressione Hertziana  $p_0$ .