

## Elaborazione di dati e segnali biomedici

### Introduzione

Lo scopo del corso è acquisire gli strumenti conoscitivi e metodologici per:

1. estrarre l'informazione utile da un segnale biomedico;
2. interpretare il risultato;
3. convalidare i descrittori alla luce di elementi di conoscenza del sistema biologico coinvolto;
4. produrre innovazione nell'ambito del miglioramento delle conoscenze fisiologiche, della produzione di nuove apparecchiature mediche "intelligenti", e della definizione di nuovi protocolli clinici di prevenzione, diagnosi e cura.

Il procedimento è quindi quello di partire da un determinato numero  $N$  di campioni di un segnale analizzato, di elaborarlo per estrarne un'informazione, ad esempio  $M$  parametri che lo caratterizzano. Ottenuti i parametri, si devono interpretare i risultati ottenuti e convalidarli alla luce della fisiologia, controllando se il contenuto informativo è spendibile a livello clinico, e infine apportare nuova conoscenza, innovazione o nuovi protocolli clinici.

Programma del corso:

#### 1. Introduzione alla Teoria dei Segnali e Tecniche di Analisi nel Dominio del Tempo

Classificazione dei segnali. Segnali, dati ed informazione. Algoritmi per la detezione di eventi ed il riconoscimento di forme d'onda. Tecniche di confronto con un template. Filtri matched. Casi di studio: cardiografometro, contapassi.

#### 2. Tecniche di Analisi nel Dominio della Frequenza: Analisi Spettrale

Tecniche non-parametriche classiche (metodi diretti ed indiretti). Il metodo di Welch. Tecniche parametriche (modelli autoregressivi). L'algoritmo di Yule-Walker. Esempi di analisi spettrale per segnali biomedici rappresentativi (ECG, EEG, HRV).

#### 3. Tecniche di Analisi nei Domini Tempo-Frequenza e Tempo-Scala

Le trasformazioni tempo-frequenza lineari e quadratiche. La short-time-Fourier-transform e lo spettrogramma. L'analisi multirisoluzione. La trasformata Wavelet continua (CWT) e discreta (DWT). L'implementazione della DWT con filtri in quadratura. La trasformata di Hilbert-Huang. Esempi di applicazione ai segnali biomedici.

#### 4. Strumenti Statistici per l'Ausilio alla Decisione Clinica

Elementi di teoria delle probabilità. Il teorema di Bayes. Il processo diagnostico e l'Evidence-Based Medicine. Valutazione della bontà di un test. Statistica campionaria e test delle ipotesi. Sintesi e descrizione dei dati. Test delle ipotesi. Analisi della Varianza. Introduzione all'analisi statistica multivariata. Analisi delle Componenti Principali. Il classificatore lineare bayesiano. Introduzione alle tecniche di machine learning. L'Intelligenza Artificiale in medicina.

#### 5. Rassegna dei Principali Segnali Biomedici

I principali segnali elettrofisiologici, emodinamici e biomeccanici. Proprietà e genesi di alcuni segnali notevoli: potenziale d'azione, segnali neurali, ECG, EMG, EEG, potenziali evocati. Segnali spontanei ed indotti. Razionale per il trattamento dei segnali biomedici. Analisi di alcuni segnali biomedici in ambiente Matlab.

### Dai segnali all'informazione

Si parla di segnale quando ci si occupa di trasmettere o acquisire informazioni, quindi segnale e informazione sono concetti strettamente legati, un segnale si acquisisce al fine di avere un'informazione, per acquisire o trasmettere informazioni.

Un segnale è una grandezza che varia nel tempo, è un fenomeno fisico alla cui evoluzione ed alle cui caratteristiche attribuiamo un contenuto informativo.

Un segnale è caratterizzato da una sorgente, quindi si deve conoscere la strumentazione con cui è stato acquisito per poterne conoscere le caratteristiche.

Analizzando il segnale nel tempo è possibile estrarre anomalie, in base ai canali, all'analisi in frequenza, alla latenza...

Un segnale può essere definito come una funzione o una grandezza che contiene informazione, in genere riguardo allo stato o al comportamento di un sistema fisico. Anche se i segnali possono rappresentarsi in molti modi, l'informazione è sempre contenuta nelle variazioni (o nella mancanza di variazioni) di una o più grandezze in qualche dominio (tempo, spazio,...).

Matematicamente un segnale è rappresentato come una funzione di una o più variabili indipendenti. È convenzione diffusa considerare il tempo come variabile indipendente della rappresentazione matematica di un segnale monodimensionale. Un segnale può essere definito come una funzione di una o più variabili, che contiene informazioni relative ad un fenomeno fisico. Ad esempio immagini e video sono anch'essi segnali, in cui viene considerata anche la dimensione dello spazio.

Con il termine segnale si indica una funzione, generalmente del tempo, che rappresenta la legge di variazione di una grandezza fisica (acustica, elettrica, ottica, etc.) e che trasporta un'informazione.

Esempi di segnali sono: la pressione prodotta da un suono, il campo elettromagnetico irradiato da un'antenna, la tensione in uscita da un microfono, l'intensità luminosa di una scena televisiva, la temperatura di un processo chimico, la pressione dell'aria in un punto dello spazio, la velocità di un punto della crosta terrestre, la velocità angolare di un albero motore.

Esempi:

- Suono: segnale monodimensionale definito in ampiezza e variabile in funzione del tempo  $t$ ;
- Immagine: segnale bidimensionale definito in termini di luminosità e colore in funzione delle coordinate spaziali  $(x,y)$ ;
- Video: segnale tridimensionale espresso come luminosità e colore in funzione delle coordinate spaziali e in funzione del tempo  $(x,y,t)$ .

#### Caratteristiche di un segnale

Dato un segnale che è funzione continua del tempo e dell'ampiezza, ad esempio una sinusoide  $y(x)=A*\sin(2\pi fx + \phi)$ , questa è determinata da:

- $A$ : ampiezza, indica il massimo valore della grandezza rappresentativa dell'onda in un periodo;
- $F$ : frequenza ( $f = \frac{2\pi}{\tau}$ ) [Hz], indica quante volte un segnale si ripete nell'unità di tempo;
- $\tau$ : periodo (ciclo) [s], è l'inverso della frequenza, espresso come  $\tau = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$ ;
- $\omega$ : pulsazione, velocità angolare: indica quanti periodi esistono dentro un intervallo di  $2\pi$ .

Con l'informazione estratta dal segnale si vogliono prendere decisioni, quindi supportare la decisione. Dai dati si ottiene un database da fornire ad un classificatore.

Ad esempio dai dati un accelerometro si possono estrarre informazioni sulla caduta di un soggetto, per cui l'equipe clinica può prendere decisioni su farmaci, sullo stato del paziente, sulla riabilitazione...

Informazione: si ha informazione quando si viene a sapere qualcosa di interesse che prima non si conosceva, quindi può essere vista come aumento della conoscenza e diminuzione dell'incertezza.

Perché ci sia informazione occorre che ci sia comunicazione, quindi un segnale è un veicolo di informazione. L'informazione va interpretata e comunicata.

Rumore: è tutto ciò che è associato al segnale, ma non porta informazione, quindi disturba la ricezione del segnale e l'estrazione dell'informazione.

Un segnale si può scomporre in parte utile e parte rumorosa, quest'ultima si filtra ed elimina, dopo aver quantificato il Rapporto segnale-rumore (SNR). A determinare cosa è segnale e cosa è rumore è l'informazione che è cercata in un dato fenomeno.

Nell'ambito biomedico la parte di filtraggio e preprocessing della catena di misura è fondamentale nell'ottenere segnale utile, è fondamentale avere protocolli e linee guida per acquisire il segnale più pulito possibile.

L'elaborazione dei segnali è l'insieme delle tecniche e delle procedure utilizzate per:

- migliorare il rapporto segnale-rumore;
- estrarre l'informazione dal segnale.

L'elaborazione non deve comportare perdite d'informazione.

### I segnali biomedici

Un segnale in medicina è definito come: un fenomeno che permette il monitoraggio del funzionamento di un organo o di un suo sottoinsieme.

Un segnale biomedico è un fenomeno che trasporta informazione relativamente ad uno o più sistemi biologici, è una grandezza variabile nel tempo, misurata sul corpo umano. Può essere un segnale che è funzione variabile nel tempo o un'immagine.

Si possono trovare segnali biomedici alle diverse scale di osservazione:

- a livello di popolazione (ad esempio per lo studio quantitativo degli indicatori di morbilità e mortalità o di propagazione di un'epidemia);
- a livello funzionale d'organo (cuore, cervello, reni, etc.);
- a livello di sistema (sistema cardiovascolare, sistema nervoso centrale, sistema endocrino-metabolico, etc.);
- a livello molecolare o cellulare (ad es. attività cellulari).

Analisi dei segnali biomedici: l'analisi di segnali e immagini biomediche ha oggi assunto un ruolo fondamentale nell'ambito della diagnostica e del monitoraggio terapeutico. Trova grande utilizzo nelle problematiche relative alla telemedicina, tele-diagnostica e tele-assistenza, e fornisce assistenza all'operatore sanitario nell'estrazione di dati ed informazioni utili al processo diagnostico. Lo scopo è quindi fornire ausilio all'equipe clinica.

I blocchi della catena di acquisizione ed analisi sono:

- Acquisizione
  - Sorgente
  - Trasduttore
  - Amplificazione e filtraggio (pre-processing)
  - Conversione A/D
- Elaborazione
  - Filtraggio
  - Riconoscimento di eventi
- Analisi
  - Estrazione di parametri
  - Classificazione

### Classificazione dei segnali biomedici

Caratteristiche dei segnali biomedici => Le caratteristiche fondamentali che contraddistinguono i segnali biomedici sono le seguenti:

- Segnali derivanti da sistemi dinamici che sono singolarmente caratterizzati da comportamenti molto diversi e con vari gradi di complessità.  
Un sistema dinamico è un sistema che evolve nel tempo, indicando con questo termine che sia l'ingresso  $u$  che l'uscita  $y$  si sviluppino nel tempo. In generale l'uscita all'istante  $t$  di un sistema dinamico non dipende solo dall'ingresso del sistema allo stesso istante, ma anche dal suo stato  $x$ , che rappresenta la storia passata degli ingressi del sistema.
- Segnali che molto spesso derivano da un'interazione tra più sistemi biologici;
- Segnali caratterizzati da grande variabilità (inter- ed intra-individuale);
- Segnali corrotti da rumore (spesso con SNR molto basso), anche il rumore sovrapposto è un processo complesso con contributi endogeni ed esogeni rispetto al sistema biologico in esame.

I segnali biomedici possono essere annotati da un operatore, che segna cosa succede, ad esempio se un paziente apre o chiude gli occhi in un EEG.

Da un segnale si potrebbero ricavare più tipi di informazione, come il respiro dall'ECG.

Cross-talk tra segnali: rilevando un segnale se ne acquisisce anche un altro, che si può individuare e rimuovere. Un esempio è quando si rileva EMG sul torace dove si ha sovrapposizione dell'ECG, che può essere individuato e rimosso (in questo caso è considerato rumore).

#### Contesti operativi:

- Estrazione di parametri informativi importanti dal punto di vista clinico
- Classificazione diagnostica
- Monitoraggio del paziente in fase critica o per scopi diagnostici
- Sorveglianza di soggetti esposti ad episodi acuti (es. neonati, anziani=)
- Controllo di patologie croniche
- Sistemi di monitoraggio extraclinico (es. ergonomia, sicurezza attiva alla guida, interfacce MMI...)
- Brain computer interfaces (BCI)
- Analisi delle risposte evocate

Razionale per il trattamento di dati e segnali biomedici => non esiste un unico modo di elaborare i segnali, ma una molteplicità di approcci, anche molto diversi, che saranno scelti in base:

- Agli obiettivi (quale informazione interessa)
- Al protocollo sperimentale
- Alle informazioni disponibili a priori
- Al rapporto costo/prestazione (da ottimizzare)
- Alla collocazione del segnale nella tassonomia

#### Classificazione dei segnali biomedici:

- In base alla loro origine biologica
  - Spontanei = generati autonomamente da un organismo
  - Indotti = evocati in risposta ad uno stimolo/energia
- In base alla loro origine fisica
  - Elettrici (potenziali, correnti, capacità, resistenze,...)
  - Meccanici (forze, pressioni, deformazioni,...)
  - Termodinamici (temperature, calore,...)
  - Chimici (concentrazione, pH,...)
- In base alle loro caratteristiche matematiche
  - Monodimensionali o pluridimensionali
  - Deterministici o aleatori
  - Periodici o non periodici
  - Continui o discreti

Il segnale biomedico può essere disponibile sotto forma di potenziale elettrico variabile nel tempo, oppure può essere disponibile sotto altre forme di energia (meccanica, termica, chimica,...) ed il potenziale elettrico corrispondente al segnale viene trasdotto mediante opportuni sensori. Esso può essere generato spontaneamente dal sistema oppure la risposta del sistema ad una sollecitazione esterna.

#### 1. Origine biologica

- a. Spontanei: sono segnali generati dal sistema biologico durante il suo funzionamento, sono generati in maniera spontanea perché generati dal sistema biologico durante il normale funzionamento -> Emissione spontanea di energia da parte del corpo. In questi casi, tranne il segnale elettrico, il sensore rivelatore è preposto a trasformare grandezze non elettriche in segnali elettrici. Il segnale elettrico si può sempre inserire nella categoria di segnale spontaneo. Ad esempio: velocità del flusso sanguigno nell'arteria cerebrale, EMG

(contrazione e rilassamento della lingua), angolo di rotazione del ginocchio, ECG, EEG, frequenza cardiaca istantanea in battiti al minuto, potenziale d'azione. Si distinguono poi in base all'origine fisica del segnale, in relazione alla sorgente.

- i. Segnali elettrici, segnali che si manifestano come variazioni di campo elettrico
  - ii. Segnali magnetici, misurano attività magnetica delle cellule, es. magnetoencefalogramma (MEG), magnetocardiogramma (MCG), spettrogramma a risonanza magnetica nucleare
  - iii. Segnali impedenzimetrici, variazione di impedenza dei tessuti, es. pletismogramma, pneumogramma
  - iv. Segnali chimici, gas disciolti nel sangue, pressione parziale, pH
  - v. Segnali acustici, emissione sonora, es. fonocardiogramma (FCG)
  - vi. Segnali meccanici, pressioni, deformazioni, es. angoli articolari, accelerazione, velocità...
- b. Indotti: generati artificialmente come risposta dell'interazione tra una forma di energia esterna inviata al tessuto e il tessuto stesso. In base alle dimensioni, il segnale può essere bidimensionale (x,y), tridimensionale (x,y,z), a 4 dimensioni (x,y,z,t).  
Ad esempio le bioimmagini: Tomografia Assiale Computerizzata (raggi X), Risonanza Magnetica (campo magnetico), Tomografia ad Emissione di Positroni (isotopo tracciante), potenziali evocati (EP), elettroencefalogramma (EEG), elettroretinogramma (ERG),...
- Si può avere interazione con energia inviata sul corpo (es. TAC, RX, RM, ecografia), oppure interazione mirata a specifiche strutture mediante mezzi di contrasto (scintigrafia planare, SPECT, PET).
2. Origine fisica: i segnali biomedici si dividono in segnali rappresentabili sotto forma di potenziale elettrico variabile nel tempo oppure segnali disponibili sotto altre forme di energia, in questo secondo caso il potenziale elettrico, cioè il segnale biomedico, viene prodotto per mezzo di un sensore (trasduttore di pressione, velocità, meccanico, chimico, acustico, elettromagnetico)
- a. Segnali elettrici -> si manifestano come variazione di campo elettrico: campo di forze generato nello spazio dalla presenza di carica elettrica o campo magnetico variabile nel tempo
- Esempi di segnali elettrici:
- Potenziale d'azione (PdA): evento di breve durata in cui il potenziale elettrico di membrana di una cellula aumenta rapidamente e scende, seguendo una traiettoria coerente
  - Elettroencefalogramma (EEG): corrisponde a una rappresentazione grafica delle variazioni spaziali e temporali dei campi elettrici registrati sulla superficie del cranio. Il segnale EEG, generato dai neuroni posti sulla superficie corticale, rappresenta le fluttuazioni spontanee dei potenziali di membrana a livello delle sinapsi cerebrali. L'EEG permette di valutare l'attività elettrica cerebrale, spontanea o evocata, in condizioni di normalità e in situazioni patologiche. Per la misurazione si utilizzano elettrodi di superficie, con il sistema internazionale 10-20.
  - Potenziali evocati (PE): i potenziali evocati vengono utilizzati per misurare l'attività elettrica in alcune aree del cervello e del midollo spinale. L'attività elettrica è prodotta dalla stimolazione di specifiche vie nervose sensoriali. Questi test vengono utilizzati in combinazione con altri test diagnostici per aiutare nella diagnosi dei disturbi neurologici. I potenziali evocati permettono di valutare quanto velocemente i segnali nervosi raggiungono il cervello. Vengono utilizzati per identificare problemi lungo le vie nervose difficilmente identificabili durante un esame neurologico.  
Con i PE si misurano le risposte generate nel sistema nervoso centrale (o periferico) a seguito di stimolazioni di varia natura:
    - Sensoriali -> PE somato-sensoriali (PESS o SEPS), ottenibili dalla stimolazione di un nervo periferico al polso o alla caviglia
    - Acustiche -> PE acustici

- Visive -> PE visivi
- Motorie -> PE motori
- Elettromiogramma (EMG): misura i potenziali d'azione che si generano durante la contrazione volontaria di un muscolo. Questo esame viene effettuato normalmente grazie all'uso di elettrodi superficiali che amplificano e registrano l'impulso nervoso, es. valutazione dell'attivazione muscolare durante la masticazione (EMG di superficie del muscolo masseter), valutazione dell'attività motoria residua in soggetti con lesioni midollari
- Elettrocardiogramma (ECG): le onde si hanno a causa di movimenti particolari del cuore, cioè contrazioni e rilassamenti legati alla polarizzazione e depolarizzazione.
  - Onda P = contrazione atriale
  - Intervallo PR = tempo affinché l'eccitazione si trasmetta dal nodo seno-atriale (SA) attraverso l'atrio e al muscolo ventricolare attraverso il fascio di His
  - QRS = contrazione ventricolare (depolarizzazione)
  - Segmento ST = rilassamento ventricolare
  - Onda T = ripolarizzazione ventricolare

In un soggetto sano, l'ECG si potrebbe considerare deterministico, quasi periodico.

Biopotenziale	Ampiezza	Frequenza
Potenziale d'azione di una cellula muscolare o nervosa (AP)	100mV	2KHz
Elettroencefalogramma (ENG)	5 $\mu$ V-10mV	1KHz
Elettroretinogramma (ERG)	0.5 $\mu$ V-1mV	0.2-200Hz
Elettrooculogramma (EOG)	10 $\mu$ V-1mV	0-100Hz
Elettroencefalogramma (EEG)	2-100 $\mu$ V	0.5-60Hz
Potenziali evocati (EP)	0.1-10 $\mu$ V	1-3000Hz
Elettromiogramma (EMG)	50 $\mu$ V-5mV	2-500Hz
Elettrocardiogramma (ECG)	0.5-5mV	0.05-100Hz
Elettrogastrogramma (EGG)	10 $\mu$ V-1mV	0.01-0.5Hz
Risposta galvanica della pelle (GSR)	1mV	0.5Hz

- b. Segnali biomagnetici -> misura l'attività magnetica delle cellule
  - Magnetoencefalogramma (MEG): misura l'attività magnetica delle cellule nervose e del cervello (maggiori informazioni rispetto all'EEG)
  - Magnetocardiogramma (MCG): misura l'attività magnetica del cuore
  - Spettrogramma a risonanza magnetica nucleare: misura la presenza di composti biochimici direttamente sul paziente
- c. Segnali impedenziometrici -> si basano su una variazione di impedenza (grandezza complessa, funzione della frequenza)
  - Pletismogramma: volume di gas intratoracici, stima i volumi periferici (dita, braccia, gambe, testa, torace, fegato)
  - Pneumogramma: variazione della circonferenza toracica – movimenti respiratori, stima i volumi d'aria polmonare. La variazione di impedenza toracica, dalla piena inspirazione alla massima espirazione vale circa 20 (resistiva), intervallo di frequenza 50-600 kHz

L'impedenza del tessuto varia con il tempo a causa di diversi fenomeni, ad es. variazione del volume del sangue, distribuzione del sangue, pressione, attività endocrina del sistema nervoso autonomo...
- d. Segnali acustici -> misura un'emissione sonora
  - Fonocardiogramma (FCG – toni e rumori cardiaci): misura i suoni generati dal cuore (valvole) e dai grandi vasi. Si usa un microfono inserito nel cuore o nel vaso (misura invasiva) oppure il microfono si appoggia sulla superficie del torace (misura non invasiva, rumore). Banda del segnale: 20-1000 Hz

- Suoni all'auscultazione (caratteri della respirazione)
  - Parola/parlato (alterazione della laringe)
  - Suoni di Kotorkoff (valutazione del collasso di vasi nello sfigmomanometro)
- e. Segnali meccanici
- Pneumotacogramma: stima del flusso respiratorio
  - Pressione del sangue (endocavitaria, venosa, arteriosa)
  - Apexcardiogramma (movimenti del precordio)
  - Gittata, portata cardiaca (volume di sangue nel tempo)
- Segnale di pressione: l'andamento della pressione nel sistema cardiovascolare è misurato mediante l'inserimento di un trasduttore di pressione all'interno dei vasi o delle cavità cardiache (es. pressione uterina: frequenza che varia dalla continua a 50 KHz. L'elaborazione si basa su metodi di riconoscimento delle sequenze).
- f. Segnali biochimici:
- Pressione parziale di gas nel sangue: pressione che esso eserciterebbe qualora fosse presente da solo nel recipiente che contiene la miscela di gas – misura la pressione di gas disciolti nel sangue
  - Cromotogramma

### 3. Caratteristiche matematiche

- a. Segnali monodimensionali o pluridimensionali
- Segnali monodimensionali: variano in funzione di una sola grandezza (per esempio, la temperatura o il segnale EEG)
  - Segnali pluridimensionali: possono essere di tipo bidimensionale (immagini radiografiche) o tridimensionali (ecografia 3D)
- b. Segnali continui o discreti nel tempo
- CT-Continuous Time –  $x(t)$ : segnali che hanno come dominio della variabile  $t$  l'insieme dei numeri reali. Es. pressione sanguigna, torsione ad una giuntura. Sono definiti per ogni istante di tempo, spesso vengono campionati per valori multipli di un incremento base.
  - DT-Discrete Time –  $x[n]$ : segnali che hanno come dominio della variabile indipendente l'insieme dei numeri relativi (interi con segno). Es. pressione sanguigna ad ogni battito, valori di temperatura corporea ogni ora, potenziali d'azione di un neurone ogni secondo, ecc. L'argomento della funzione assume solo valori interi ( $-2T, -T, 0, T, 2T$ ). Un segnale a tempo discreto  $x[n]$  si ottiene campionando  $x(t)$  cioè prendendo solo alcuni valori di  $x(t)$ , uniformemente spazati nel tempo.
- c. Segnali continui in ampiezza o quantizzati: la variabile indipendente può essere definita in un insieme continuo (segnale continuo) o in un insieme discreto (segnale discreto). Nel caso in cui la variabile indipendente sia il tempo si parla di segnali continui e/o discreti nel tempo. Se, oltre alla variabile indipendente, anche il valore del segnale è definito in un insieme discreto, diciamo che il segnale è numerico. Se ambedue sono definiti in un insieme continuo, il segnale è detto analogico.

In base alla natura del codominio si distinguono:

- Segnali ad ampiezza continua: il codominio è rappresentato dall'insieme dei numeri reali
- Segnali ad ampiezza discreta: hanno per codominio un insieme discreto

Codominio e dominio definiscono:

Segnale analogico: segnale a tempo continuo e ad ampiezza continua

Segnale campionato: segnale a tempo discreto e ad ampiezza continua

Segnale quantizzato: segnale a tempo continuo e ad ampiezza discreta

Segnale numerico: segnale a tempo discreto e ad ampiezza discreta

## d. Segnali deterministici e non deterministici

- Deterministici: valori futuri possono essere predetti con esattezza se è disponibile la quantità di informazione necessaria. Es: noto un ciclo di un'onda sinusoidale posso predirne i valori futuri ad ogni istante. Sono quindi un tipo di fenomeno fisico dove è possibile prevedere, con un'accuratezza ragionevole, l'andamento futuro della grandezza in esame basandosi sul valore assunto dalla grandezza stessa negli istanti appena trascorsi. Il segnale è associato ad una funzione matematica, conoscendo la quale è possibile prevedere a priori il valore di tale segnale in un istante definito. Esempi:

- Segnale armonico: somma di più componenti armoniche
- Segnale quasi-periodico: somma di più componenti armoniche di periodo incommensurabile
- Segnale pseudo-periodico: pur contenendo infinite frequenze (nel periodo) si ripete periodicamente
- Segnale transitorio: all'istante iniziale assume un valore finito e si azzerizza dopo un tempo sufficientemente lungo dall'istante iniziale

Segnali periodici: si ripetono nel tempo (sinusoide, onda quadra, treno di impulsi)

Segnali aperiodici: non si ripetono nel tempo (es. gradino, esponenziale)

- Aleatori/stocastici: non è possibile predirne i valori futuri con esattezza, in quanto sono presenti componenti aleatorie dovute alla strumentazione di misura, alle irregolarità intrinseche del segnale, alla parte di segnale di cui non sappiamo spiegare il funzionamento. Per molti fenomeni fisici di interesse ingegneristico, ciascuna osservazione fornisce una storia temporale unica ed irripetibile, che non era prevedibile a priori e che non consente di fare previsioni sul valore che verrà assunto in un istante futuro, dati di questo tipo, così come i fenomeni che li generano, vengono definiti stocastici. Un segnale stocastico è un segnale assolutamente casuale, al punto che, pur conoscendone il valore all'istante  $t$ , non è possibile fare alcuna previsione sul suo valore nell'istante immediatamente successivo  $t+dt$ .

I segnali biomedici sono quasi sempre affetti da rumore (componente di disturbo), che può essere ridotto con tecniche opportune (filtraggio). A volte si desidera misurare e non ridurre il rumore, ad esempio se vogliamo quantificare tale componente in quanto indice di patologia (irregolarità sul segnale). Altri segnali assomigliano a rumore pur non essendo tali (segnale caotico), o avere un comportamento "autosomigliante" su scale diverse, ma non predicibile (frattali).

Segnali stocastici stazionari: le proprietà statistiche (media e varianza) non variano nel tempo.

Si studiano su "finestre" di segnali in cui è verificata la stazionarietà attraverso:

- Trasformata di Fourier
- Modelli parametrici
- Wavelets

Respiro: deterministico (quasi) periodico

ECG: deterministico quasi periodico

Potenziale d'azione: deterministico transiente

EEG: stocastico stazionario (su brevi periodi)

EMG: stocastico non stazionario

EEG+PE: deterministico transiente + stocastico stazionario