

Introducció

Podríem dir que els sistemes sensorials són omnipresents. Els trobem en una infinitat nombre d'aplicacions començant pel nostre cos, a objectes que utilitzem: cotxes, avions, telèfons, ..., plantes químiques, plantes de mecanitzat, ... Sense l'ús de sensors no fora possible l'automatització.

Definició:

- ▶ Un dispositiu que proporciona una sortida utilitzable en resposta a una mesura específica.
- ▶ Els sensors són dispositius que produeixen un senyal de sortida amb el propòsit de detectar un fenomen físic.
- ▶ Els sensors també es coneixen com a transductors.

La sortida del sensor és generalment en la forma de canvi de resistència o canvi de voltatge o canvi de capacítància o canvi de corrent quan es canvia la quantitat d'entrada. Es requereix un circuit adequat per mesurar els canvis anteriors.

Introducció

Ens podem trobar diferents tipus de sensors:

- ▶ **Sensors analògics:** Transformen la magnitud física que mesuren en un valor de tensió o de corrent amb un rang continu de valors.
 - ▶ 0 - 10 V
 - ▶ 4 - 20 mA (preferibles)
- ▶ **Sensors digitals:** Transformen la magnitud física que mesuren en un senyal digital codificat en un codi determinat. Per exemple els encoders o codificadors.
 - ▶ 0 - 5 V
 - ▶ 0 - 24 V
 - ▶ Tren de polsos
- ▶ **Sensors tot/res:** Indiquen només quan la variable física supera un determinat valor llindar. Es poden considerar com a sensors digitals que només codifiquen dos estats. Per exemple els finals de carrera.
- ▶ **Sensors actius:** Necessita font d'alimentació independent per obtenir la sortida.
- ▶ **Sensors passius:** Són de generació pròpia en el sentit que produeixen senyals (elèctriques) quan se sotmeten a la quantitat detectada. Piezoelèctric, termoelèctrica, radioactiu,

Sensors en robòtica

Els sensors en robòtica intenten emular els sentits dels humans¹:

Sense:

- Vision
- Audition
- Gustation
- Olfaction
- Tactition

Sensor:

- Eyes
- Ears
- Tongue
- Nose
- Skin



Figura: Comparació amb els sensors humans

¹Imatge extreta de

Sensibilitat

És la capacitat dels instruments de mesura per respondre als canvis de la variable mesurada. Equivalentment, és la relació que hi ha entre un canvi de la sortida respecte a un canvi de l'entrada. La constant K de sensibilitat es defineix com la ràtio de canvi de la sortida (O) respecte a un canvi a l'entrada (I), és el pendent de la corba de calibratge.

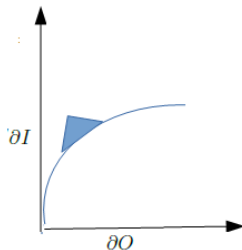
$$\text{Sensibilitat} = \partial O / \partial I$$

En el cas de sensors lineals:

$$\partial O / \partial I = K$$

En el cas de sensors no lineals:

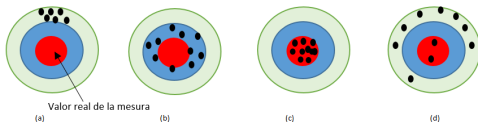
$$\partial O / \partial I = K + a_1 * I + a_2 * I^2 + a_3 * I^3 + \dots$$



Un sensor molt sensible és aquell que proporciona una resposta que varia molt amb un petit canvi de la variable mesurada.

Qualitat del sensor

- ▶ **Resolució:** Es defineix com l'increment més petit en el valor mesurat que es pot detectar. Amb altres paraules, la resolució ΔI_R es defineix com el canvi més gran en l'entrada (I) que poden ocórrer sense un canvi corresponent a la sortida (O).
- ▶ **Exactitud:** És una mesura de la diferència entre el valor mesurat i el valor real. Generalment, es defineix com a percentatge de valor real.
- ▶ **Precisió:** La precisió és la capacitat d'un instrument per reproduir un determinat conjunt de lectures dins d'una desviació donada.



(a) poca precisió amb poca exactitud, (b) bona mitjana en la precisió amb poca exactitud, (c) gran precisió amb gran exactitud, i (d) poca precisió amb poca exactitud

Altres característiques

- ▶ **Repetibilitat:** És la capacitat de reproduir exactament el senyal de sortida quan s'aplica la mateixa quantitat mesura repetidament en les mateixes condicions ambientals.
- ▶ **Rang:** El rang de senyals físic d'entrada que poden ser convertits en senyals elèctrics pel sensor.
- ▶ **Camp de mesura (Span)** és l'interval de valors de la variable mesurada (entrada o estímul) detectable pel sensor, valor màxim menys el valor mínim de la d'entrada.
- ▶ **Estabilitat (deriva):** És la capacitat de donar el mateix de sortida quan es mesura una entrada constant durant un període de temps. Drift o deriva s'expressa com un percentatge del rang de sortida.

Errors i no linealitats

La discrepància entre la lectura de l'instrument i el valor real s'anomena error (l'error mesura la precisió 'accuracy'). Podem definir dos tipus d'error: error absolut i el relatiu:

$$ErrorAbsolut = ValorMesurat - ValorReal$$

$$ErrorRelatiu = ErrorAbsolut / ValorReal$$

Per a molts transductors es considera una relació lineal entre l'entrada i la sortida en el rang de treball. En la realitat, però, són pocs els transductors que mantenen una relació lineal i, per tant, els errors s'esdevenen sovint com a resultat de considerar una relació lineal. Per expressar numèricament un error no lineal s'utilitzen diversos mètodes:

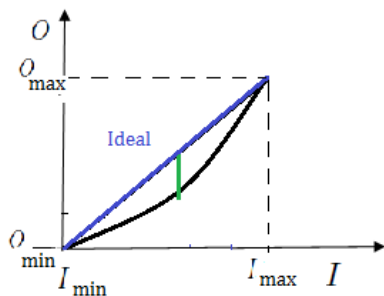
- ▶ Els valors de final de rang
- ▶ Millor línia recta per a tots els valors
- ▶ Millor línia recta a través del punt zero

Exemple de no linealitat: càlcul de l'error

L'error de no-linealitat és: $N(I) = O(I) - O_{ideal}(I) = O(I) - (K * I + a)$

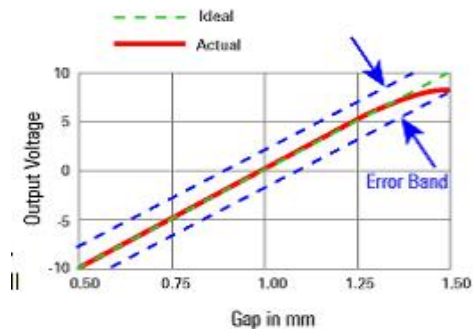
La màxima no-linealitat determinada en funció del rang val:

$$N_{max} = \frac{\hat{N}_{max}}{(O_{max} - O_{min})} \times 100$$



Errors i no linealitats

La majoria de les vegades, l'error s'avalua en funció d'una banda d'error. Aquesta banda d'error es determina com l'error esperat més gran entre els senyals de sortida reals i ideals.



Altres no linealitats

- ▶ **Banda o zona morta:** És l'interval de valors d'entrada per a les quals no hi ha sortida.
- ▶ **Backlash:** Es defineix com la distància màxima o angle a través del qual qualsevol part d'un sistema mecànic pot ser mogut en una direcció sense causar cap moviment de la part adjunta.
- ▶ **Histèresis:** Diferents sortides corresponent a un únic valor de l'entrada. Es presenta quan en realitzar un gràfic sortida/entrada, primer en sentit ascendent i posteriorment en sentit descendent, les dues corbes que s'obtenen no coincideixen. L'àrea tancada entre les dues corbes serà tant més gran com més histèresi hi hagi.
- ▶ **Saturació:** Apareix en els límits del camp de mesura.
- ▶ **Soroll:** El soroll és una pertorbació aleatòria dels valors de la sortida del sensor respecte del seu valor teòric a causa de causes externes o internes.

Característiques estàtiques i dinàmiques

Les **característiques estàtiques** són els valors que dona el sensor quan la variable mesurada està en estat estacionari. Si l'entrada no varia la sortida s'ha de mantenir constant, si aquesta canvia es deu a la **deriva**. Les **característiques dinàmiques** es refereixen al com varia la sortida del sensor quan la variable mesurada varia en el temps. Les característiques dinàmiques del sensor són causades per:

- ▶ **Temps de resposta:** el temps que transcorre d'ençà que es produeix un canvi graó a l'entrada fins que el sensor arriba a la sortida corresponent segons un percentatge especificat del seu valor d'estat estacionari per exemple, 95%.
- ▶ **Constant de temps:** aquest és mesura com el temps que transcorre fins a assolir el 63.2 % de la resposta.
- ▶ **Temps de pujada:** Temps requerit per a la sortida per passar del 10% al 90% de la resposta, en el cas de respostes sobre esmorteïdes. En el cas de respostes subesmorteïdes, temps requerit perquè la sortida assoleixi per primera vegada el valor d'estat estacionari.

Sensors per a sistemes intel·ligents

- ▶ En general, la resposta d'un sistema intel·ligent pot trobar-se en cinc categories: aparells mecànics, elèctrics, magnètics, tèrmics o químics. La resposta elèctrica és la més fàcil de mesurar i analitzar.
- ▶ En el camp de la robòtica els sistemes sensorials se'ls anomena sistemes de percepció i se'ls classifica com a sensors interns o externs. Els interns mesuren variables internes i els externs les variables d'entorn.

Comparativa entre sentits i tipus de sensors:

Sense:

- Equilibrioception
- Proprioception
- Magnetoception
- Electroception
- Echolocation
- Pressure gradient

Sensor:

- Accelerometer
- Encoders
- Magnetometer
- Voltage sensor
- Sonar
- Array of pressure sensors



Codificadors

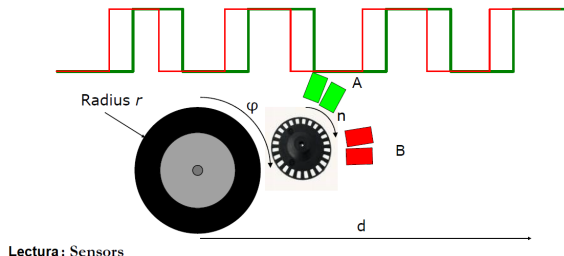
- ▶ Un codificador és un dispositiu electromecànic que converteix la posició angular o lineal en informació útil. S'utilitzen per mesurar posició (lineal/angular), velocitat (lineal/angular), sentit o distància.
- ▶ El principi físic pot ser resistiu (pistes amb escombretes), mecànic, òptic, magnètic, ... La sortida pot ser analògica o digital. Els codificadors poden ser incrementals o absoluts.
- ▶ Són molt utilitzats en control industrial i robòtica.

Codificadors incrementals

- ▶ Els codificadors de posició incrementals tenen un element lineal o un disc que es desplaça solidari a la peça de la qual es vol determinar la posició.
- ▶ Aquesta peça disposa de dues zones o sectors distribuïts en formes alternatives i equidistants.
- ▶ Un increment de posició dona lloc a un canvi definit a la sortida si aquest canvi es detecta mitjançant un dispositiu de lectura fixa.
- ▶ Per exemple, la resolució d'un sensor angular, donada com el nombre d'impulsos de sortida, és: $N = \frac{\pi D}{2X}$ a on D és el diàmetre del disc i X l'amplada de cada sector codificat.
- ▶ La sortida bàsica sol ser un tren de polsos i la resolució del codificador depèn del nombre d'impulsos per revolució.
- ▶ Per conèixer la posició inicial, poden portar un canal addicional que genera un pols per volta (posició zero). Com a resultat podem conèixer el nombre de voltes més una fracció d'aquesta.

Codificadors incrementals

Lectura d'un codificador òptic amb dos emissors receptors, A i B:



Us dels codificadors?

A la pràctica la utilització dels codificadors planteja una sèrie d'interrogants:

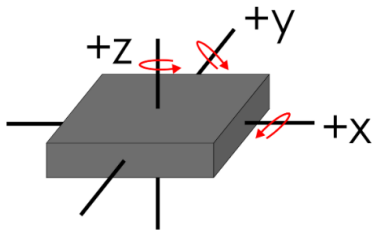
- ▶ En el cas dels codificadors incrementals, l'electrònica ens permet fer el recompte dels polsos;
- ▶ Cal estimar la velocitat de les rodes a partir del recompte del codificador;
- ▶ Com podem aconseguir la velocitat del vehicle amb la velocitat de roda? (cal conèixer la cinemàtica).

Giròscopi

- ▶ Els giròscopis s'utilitzen per mesurar la velocitat angular: la rapidesa amb què gira un objecte.
- ▶ Conceptualment un giròscopi és:
 - ▶ una roda de filat en què l'eix de rotació té llibertat per assumir qualsevol orientació:
 - ▶ quan gira, l'orientació d'aquest eix no es veu afectada per la inclinació o rotació del muntatge, segons la conservació del moment angular.
- ▶ A causa d'aquest principi, un giròscopi pot emprar-se per mesurar de l'orientació i la velocitat de canvis.
- ▶ Avui en dia, s'estan utilitzant giròscopis basats en diferents principis operatius.
 - ▶ A l'aviació s'utilitzen principalment els giròscopis MEMS (Micro-machined Electro-Mechanical Systems) o els làsers d'anell sòlid i els giròscopis de fibra òptica.
 - ▶ En la robòtica, s'utilitzen els giròscopis MEMS.

Giròscopi

- ▶ Els giroscopis també s'anomenen "gyros".
- ▶ Es pot considerar que es troba al centre d'una roda giratòria i es mesurarà és la velocitat angular de l'eix z del gir.
- ▶ Els altres dos eixos no mesuraran cap rotació o canvi d'aquest.



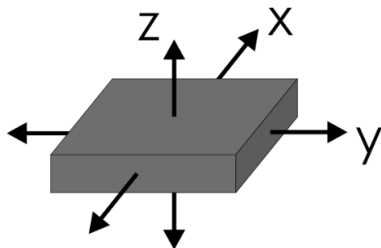
- ▶ Els giroscopis s'han de calibrar abans de ser utilitzats.
- ▶ El principal problema dels gyros és l'existència de l'efecte biaix. Aquest efecte fa desaconsellable el seu ús per a la integració del senyal.

Acceleròmetre

- ▶ Els acceleròmetres són dispositius que mesuren l'acceleració pròpia ('g-force').
 - ▶ L'acceleració pròpia no és igual a l'acceleració en coordenades (velocitat de canvi de la velocitat).
 - ▶ Per exemple, un acceleròmetre en repòs a la superfície de la Terra mesurarà una acceleració $g = 9,81m/s^2$ cap amunt. Per contra, els acceleròmetres en caiguda lliure que orbiten i acceleren a causa de la gravetat de la Terra mesuraran zero.
- ▶ Són dispositius electromecànics capaços de mesurar forces d'acceleració estàtiques i/o dinàmiques. Les forces estàtiques inclouen la gravetat, mentre que les forces dinàmiques poden incloure vibracions i moviment.

Acceleròmetre

- ▶ Els acceleròmetres poden mesurar l'acceleració en 1, 2 o 3 eixos. Actualment, els dispositius de 3 eixos són els més utilitzats a causa de la gran reducció de costos.



<http://www.kostasalexis.com/inertial-sensors.html>.

Inertial Measurement Unit (IMU)

- ▶ Combinació de sensors: giroscopis, acceleròmetres i algunes vegades magnetòmetres.
- ▶ Alta velocitat en l'adquisició de dades i proporciona informació molt útil, especialment sobre el moviment instantani d'un cos.
- ▶ Utilitzat en telèfons, drons, ...

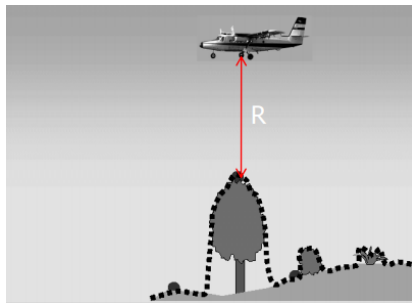


LiDar

- ▶ És un acrònim de Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging.
- ▶ És un mètode de detecció remota que utilitza la llum en forma d'un làser polsat per mesurar els intervals (distàncies variables) a la Terra. Aquests polsos de llum, combinats amb altres dades registrades pel sistema aerotransportat, generen informació precisa i tridimensional sobre la forma de la Terra i les seves característiques de superfície.
- ▶ El LiDar topogràfic utilitza un làser infraroig proper per cartografiar la terra,
- ▶ El LiDar batimètric utilitza llum verda que penetra aigua i permet mesurar les elevacions del fons marí i del llit del riu.

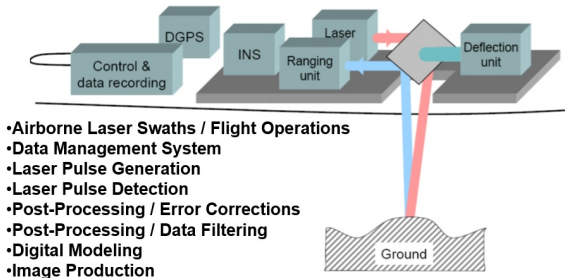
LiDar

El principi de la mesura a distància: $R = c * t/2$, a on R és la distància del sensor a l'objecte, c és la velocitat de la llum (300.000 km/s) i t és el temps transcorregut entre l'emissor del pols i la recepció del retorn.



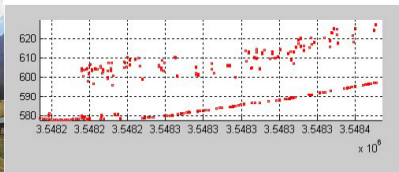
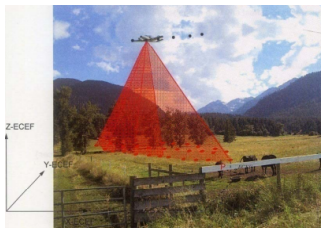
Components bàsic del LiDar

- ▶ Un instrument LIDAR consta principalment d'un làser, un escàner i un receptor GPS especialitzat.

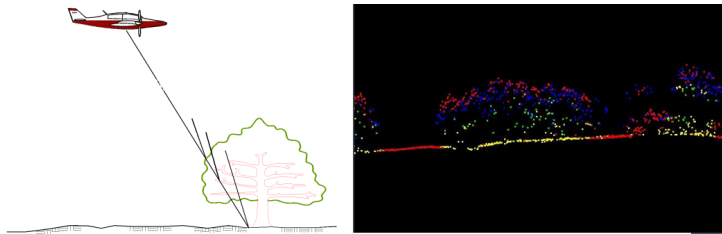


https://www.wou.edu/las/physci/taylor/g407/lidar_overview.ppt

Informació recollida per LiDar



Informació recollida per LiDar



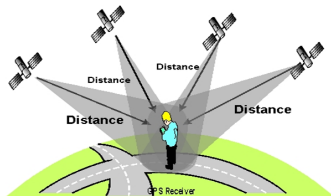
<https://cdn.ymaws.com/www.kyengcenter.org/resource/resmgr/imported/airbornelidar.pdf>

GPS

- ▶ El GPS és un sistema de navegació per satèl·lit compost per una xarxa de 24 satèl·lits col·locats en òrbita pel Departament de Defensa dels Estats Units.
 - ▶ Originalment, estava destinat a aplicacions militars, però en la dècada de 1980, el govern va fer que el sistema estigués disponible per a ús civil.
 - ▶ Funciona en qualsevol condició climàtica, arreu del món, les 24 hores del dia.
 - ▶ No hi ha tarifes de subscripció ni càrrecs de configuració per utilitzar GPS.

GPS

- ▶ Els satèl·lits del GPS circumden la terra dues vegades al dia en una òrbita molt exacta i transmeten la informació del senyal a la terra.
- ▶ Els receptors GPS capten aquesta informació i mitjançant la triangulació es pot calcular la ubicació exacta de l'usuari.
 - ▶ El receptor GPS compara el temps que un senyal es tramés per un satèl·lit amb el temps que aquest és rebut. La diferència de temps indica al receptor GPS a on està el satèl·lit.



GPS

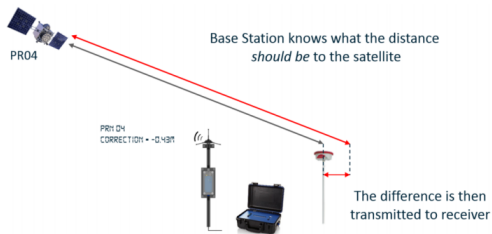
- ▶ Un receptor GPS ha d'estar connectat a tres satèl·lits per calcular una posició 2D (latitud i longitud) i el moviment. Amb quatre o més satèl·lits a la vista, el receptor pot determinar la posició 3D de l'usuari (latitud, longitud i altitud).
- ▶ Una vegada que s'ha determinat la posició de l'usuari, la unitat GPS pot calcular altra informació, com velocitat, rumb, distància de viatge, distància a la destinació, hora de sortida i posta del sol i més.

Motius que degraden l'exactitud de les posicions calculades per els receptors GPS:

- ▶ Fenòmens atmosfèrics varien el temps de desplaçament dels senyals;
- ▶ quan un senyal GPS passa per la ionosfera i la troposfera es refracta, fent que la velocitat del senyal sigui diferent de la velocitat d'un senyal GPS a l'espai;
- ▶ el soroll o la distorsió del senyal que provoca interferències elèctriques o errors inherents al propi receptor GPS;
- ▶ la informació sobre les òrbites de satèl·lit també pot produir errors en el càlcul de les posicions, informació incorrecta de la posició dels satèl·lits;
- ▶ les petites variacions dels rellotges atòmics a bord dels satèl·lits poden traduir-se a errors de grans dimensions, per exemple un error de rellotge d'1 nanosegon es tradueix en un error de 0.3 metres a terra;
- ▶ es produeix un efecte multiplicador quan els senyals transmesos des dels satèl·lits reboten una superfície reflectant abans d'arribar a l'antena del receptor, durant aquest procés, el receptor obté el senyal en la ruta recta i la ruta retardada (diverses rutes).

Differential Global Positioning System (DGPS)

- ▶ Un receptor GPS actua com a estació base, configurat en una ubicació coneguda amb exactitud.
- ▶ El receptor de l'estació base calcula la seva posició basada en senyals de satèl·lit i compara aquesta ubicació amb la ubicació coneguda.
- ▶ Per a cada satèl·lit, aquesta diferència s'envia com a senyal de correcció al receptor GPS.
- ▶ Els errors del GPS comercials són d'alguns metres.
- ▶ L'error del DGPS $\leq 1\text{m}$



Radar

- ▶ El RADAR que és l'abreviació de 'Radio Detection and Ranging' utilitza ones de ràdio per calcular la velocitat i/o la distància d'un objecte.
- ▶ Les ones de ràdio tenen menys absorció (per tant, menys atenuació) que les ones de llum quan es posen en contacte amb els objectes, de manera que poden treballar a una distància més llarga.
- ▶ S'utilitzen per a la detecció d'obstacles petits.

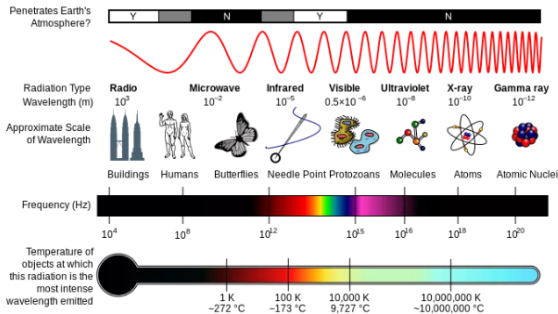


Figura: Espectre