

Sistema de posicionament en alçada per ultrasons amb Arduino en un sistema de posicionament *indoor*

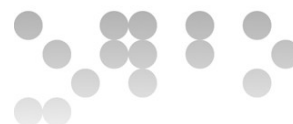
Projecte Final de Màster

14 de gener de 2016

Director del treball de recerca: Dr. Antoni Pérez Navarro

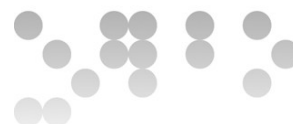
Doctorand del treball de recerca: Sergio Sosa Sesma

Realització del treball de recerca: Manuel Macías Valanzuela

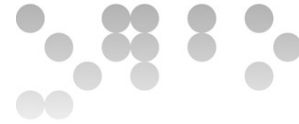


Índex

1. Títol.....	4
2. Autors.....	4
3. Resum.....	4
4. Introducció.....	5
5. Estat de l'art.....	7
5.1. Tecnologia dels sistemes de posicionament <i>indoor</i>	7
5.1.1. Sistemes de posicionament basats en infrarojos (IR).....	8
5.1.2. Sistemes de posicionament basats en ultrasons.....	9
5.1.3. Sistemes de posicionament basats en radiofreqüència (RF).....	11
5.1.4. Sistemes de posicionament magnètics.....	16
5.1.5. Sistemes de posicionament basats en la visió.....	16
5.1.6. Sistemes de posicionament basats en el so audible.....	17
5.1.7. Sistemes de posicionament híbrids.....	17
5.1.8. Sistemes de posicionament <i>indoor</i> en alçada.....	19
5.2. Tècniques utilitzades per al càlcul de la posició en els sistemes de posicionament <i>indoor</i>	19
5.2.1. Càlcul de la distància o angle des de cada node.....	19
5.2.2. Càlcul de la posició combinant els resultats de la primera fase.....	20
5.2.3. Càlcul de la posició amb ultrasons.....	21
6. Metodologia.....	22
6.1. Descripció de l'equipament.....	23
6.1.1. Arduino.....	23
6.1.2. Sensor HC-SR04.....	25
6.1.3. Connexió dels dispositius.....	26
6.2. Càlcul de l'alçada.....	27
6.3. Factors que contribueixen a la millora de la mesura de l'alçada.....	30
6.3.1. Temperatura.....	30
6.3.2. Materials de l'objecte a mesurar.....	32
6.3.3. Gir del sensor.....	40



6.4. Moviment de l'objecte.....	42
6.4.1. Càlcul de l'alçada a partir de la velocitat.....	42
6.4.2. Filtre de Kalman.....	45
7. Conclusions.....	49
8. Annexos.....	51
Annex 1. Algorisme utilitzat per al càlcul bàsic de l'alçada del sensor respecte del terra.....	51
Annex 2. Algorisme utilitzat per al càlcul bàsic de l'alçada del sensor respecte del terra tenint en compte la temperatura ambient.....	53
Annex 3. Algorisme que calcula l'alçada del sensor respecte del terra tenint en compte la velocitat de moviment i aplicant el Filtre de Kalman.....	55
9. Referències.....	58



1. Títol

Sistema de posicionament en alçada per ultrasons amb Arduino en un sistema de posicionament *indoor*.

2. Autors

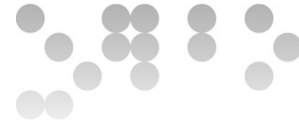
- Director del treball de recerca: Dr. Antoni Pérez Navarro (aparezn@uoc.edu).
- Doctorand del treball de recerca: Sergio Sosa Sesma (ssosas@uoc.edu).
- Realització del treball de recerca: Manuel Macías Valanzuela (mmacias5@uoc.edu).

3. Resum

Els dispositius mòbils actuals permeten ubicar-se i navegar amb una precisió de pocs metres o, fins i tot, de centímetres, gràcies a sistemes globals de posicionament i navegació (més coneguts per les seves sigles angleses, GNSS). El més conegut d'aquests sistemes, el GPS, està actualment incorporat en multitud de dispositius: telèfons mòbils, navegadors, etc.

Els GNSS només serveixen en espais oberts, i fracassen en canons urbans o interiors d'edificis, on el senyal de GPS arriba, però no amb la qualitat necessària per al posicionament. Per a interiors, s'han proposat diversos sistemes de posicionament: la utilització de balises, sistemes de posicionament inercials que fan servir diversos aparells propis del mòbil, sistemes de localització en interiors basats en radiofreqüència, tecnologies acústiques, tecnologies òptiques, etc.

Tot i que diversos sistemes han assolit fins a 1 metre de precisió, encara queda el posicionament en la coordenada z com un repte pendent.



En aquest treball de recerca es proposa estudiar la possibilitat de posicionar en la coordenada z mitjançant un sistema d'ultrasons amb un dispositiu Arduino, amb l'objectiu de fer-lo servir en un sistema de posicionament *indoor*.

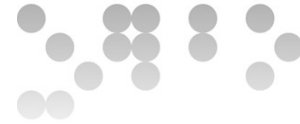
4. Introducció

Els sistemes de posicionament *outdoor* i *indoor* s'acostumen a observar des de punts de vista diferents, possiblement perquè els mètodes que s'apliquen als sistemes de posicionament *outdoor* no funcionen correctament en els sistemes *indoor*.

Els dispositius mòbils actuals permeten ubicar-se i navegar amb una precisió de pocs metres o, fins i tot, de centímetres, gràcies a sistemes globals de posicionament i navegació (més coneguts per les seves sigles angleses *Global Navigation Satellite System*, GNSS). El més conegut d'aquests sistemes, el GPS [1], està actualment incorporat en multitud de dispositius: telèfons mòbils, navegadors, etc. Els GNSS només serveixen en espais oberts, i fracassen en canons urbans o interiors d'edificis, on el senyal de GPS no arriba.

Hi ha molts factors que promouen el desenvolupament de sistemes de posicionament o localització *indoor*, com ara els beneficis que es poden obtenir implementant aquest tipus de sistemes en museus, aeroports, hospitals, universitats, etc. Atès que el GPS fracassa en interiors d'edificis, cal proposar un sistema de posicionament alternatiu. Per a interiors, s'han proposat diversos sistemes de posicionament: la utilització de balises [2], sistemes de posicionament inercials que fan servir diversos aparells propis del mòbil [3], sistemes de localització en interiors basats en radiofreqüència [4] i [5], tecnologies acústiques [6], tecnologies òptiques [7-10], etc. Per tant, el mercat exigeix sistemes, serveis i protocols basats en el posicionament i localització *indoor* en les generacions futures de les xarxes de comunicacions [11-13].

Els avantatges que es poden obtenir amb el desenvolupament i implementació de sistemes de posicionament i localització *indoor* són molt diversos, com ara saber la localització exacta d'un usuari del sistema [14-15], poder donar indicacions exactes a l'usuari de la ruta a seguir a l'hora de localitzar un servei o un lloc determinat [7],



mostrar informació extra d'un punt concret d'una instal·lació [16], entre d'altres, amb l'objectiu d'estendre moltes funcionalitats *outdoor* a entorns *indoor*.

Els sistemes de posicionament i localització *indoor*, comparats amb els sistemes *outdoor*, són entorns molt més complexos, ja que generalment estan formats per multitud d'obstacles, com ara parets, instal·lacions, objectes, persones, etc. Aquests obstacles, juntament amb altres paràmetres com les condicions atmosfèriques d'humitat i temperatura, tenen una notable influència en la propagació de les ones electromagnètiques, provocant sorolls i interferències, les quals degraden significativament la precisió del posicionament o localització [17].

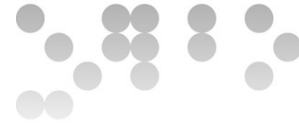
Alguns autors [11], [18], [19], [20], fan un estudi de l'estat de l'art sobre les diferents opcions tecnològiques disponibles per al disseny de sistemes de posicionament *indoor*, com per exemple infrarojos (IR), ultrasons, identificació de radiofreqüència (RFID), *wireless local area network* (WLAN), Bluetooth, sensors de xarxa, ultra-wideband (UWB), senyals magnètics, anàlisi de la visió, so audible, i el *fingerprinting* per Wi-Fi i per camp magnètic. Gràcies a l'existència d'aquestes tecnologies, s'han desenvolupat nombrosos sistemes de posicionament *indoor* basats en aquestes tecnologies bàsiques, cadascun dels quals presenta unes característiques pel fet d'utilitzar una determinada tecnologia, i altres combinen més d'una tecnologia per oferir més avantatges a l'hora de calcular la posició.

L'objectiu principal del tema de recerca és dissenyar un sistema de posicionament en alçada mitjançant ultrasons amb Arduino. Aquest sistema s'haurà d'incorporar a un sistema de posicionament *indoor*.

Per assolir aquest objectiu, s'han proposat diversos objectius secundaris:

- Fer un estat de l'art de models de dades *indoor*.
- Connectar un emissor i un sensor d'ultrasons a una placa d'Arduino.
- Dissenyar un sistema que permeti saber a quina distància està el terra.
- Incorporar aquesta alçada a un sistema de posicionament *indoor* i estudiar com pot millorar el posicionament.

Per a la realització del projecte de recerca s'han utilitzat principalment dues metodologies: *design and creation*, i *experiment*.



En les següents seccions s'exposa el treball de recerca. En la secció 5 es fa un estudi exhaustiu de l'estat de l'art, incloent les diferents metodologies emprades i les diferents tècniques emprades per al posicionament. En la secció 6 s'exposa la metodologia emprada en el treball d'investigació. Per últim, en l'apartat 7 es mostren les conclusions obtingudes, i en l'apartat 8 tot el llistat de referències consultades.

5. Estat de l'art

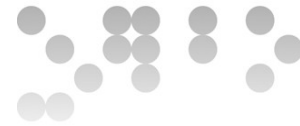
En la següent secció es classifiquen les diferents tecnologies que es poden utilitzar en els sistemes de posicionament *indoor*, i s'exemplifiquen alguns dels sistemes de posicionament *indoor* que s'han analitzat en la bibliografia [18].

5.1. Tecnologia dels sistemes de posicionament *indoor*

En el desenvolupament de sistemes de posicionament *indoor* es poden utilitzar diferents tecnologies i tècniques, que seran descrites a continuació. Per poder avaluar els diferents sistemes de posicionament *indoor* que podem trobar analitzant l'estat de l'art actual, així com poder comparar els avantatges i inconvenients que presenten tant els sistemes com les tecnologies emprades, s'utilitzen criteris diversos [21-25], entre els que destaquen: la seguretat i la privacitat, el cost, el rendiment, la robustesa i tolerància a errors, la complexitat, les preferències de l'usuari, la disponibilitat comercial, i les limitacions.

Aquests sistemes de posicionament es focalitzen en les necessitats privades i socials de l'usuari, el qual generalment vol tenir control total sobre la utilització de la informació de la seva localització i sobre l'historial de localitzacions. Respecte al cost, s'ha de tenir en compte el cost dels components que formen la infraestructura, el cost del dispositiu de posicionament que ha d'obtenir l'usuari i el cost de la instal·lació del sistema i el manteniment. El rendiment fa referència a la precisió en el posicionament estimat.

A continuació es fa un anàlisi dels avantatges i limitacions de les diferents tecnologies emprades, així com també es citen, per a cada tecnologia emprada, alguns sistemes de



posicionament *indoor* desenvolupats, comentant també els avantatges i limitacions que ofereixen.

5.1.1. Sistemes de posicionament basats en infrarojos (IR)

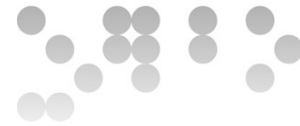
Els sistemes basats en tecnologia infraroja (IR) són uns dels sistemes més comuns de posicionament, ja que la tecnologia infraroja està disponible en la majoria de dispositius cablejats i sense cable, com ara telèfons mòbils, ordinadors, impressores, PDAs, televisors, etc.

Els avantatges de la tecnologia IR són:

- Ofereix un nivell de precisió alt en les mesures.
- Els emissors d'infrarojos que s'utilitzen són petits i molt lleugers, i, per tant, són ideals per poder ser portats per una persona.
- L'arquitectura del sistema no sol ser complexa.
- No requereix gaire temps en la instal·lació.
- Requereix poc manteniment.

Pel que fa a les limitacions d'aquesta tecnologia:

- No ofereix seguretat ni privacitat a l'usuari.
- La tecnologia IR és susceptible de distorsions degut a interferències provinents de la llum fluorescent o la llum del Sol [27], tot i que es pot solucionar en part gràcies a la utilització de filtres òptics i electrònics [28].
- Les instal·lacions hardware tendeixen a ser cares, i per tant fan pujar el cost del sistema, tot i que els emissors IR són barats.
- La instal·lació es complica una mica, ja que ha d'haver un emissor o transmissor en cada lloc a mesurar, i a més es necessita cablejat especial per a connectar els diferents emissors i receptors IR.
- Els emissors o receptors IR han d'estar alineats en la mateixa línia de visió, ja que els senyals IR no poden travessar materials opacs.



Exemples de sistemes de posicionament que utilitzen tecnologia IR són:

- The Active Badge [28-31]
- Firefly [32-33]
- OptoTrak PROseries [34-35]
- Infrared Indoor Scour Local Positioning System (IRIS_LPS) [36].

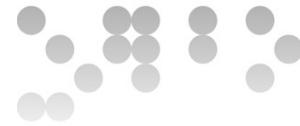
5.1.2. Sistemes de posicionament basats en ultrasons

Els sistemes basats en ultrasons [37-44] estan inspirats en els ultrasons que utilitzen els ratpenats a la nit per orientar-se. Aquests sistemes presenten els següents avantatges:

- Són sistemes econòmics.
- Amb la utilització d'ultrasons s'incrementa l'àrea a la qual es pot utilitzar el sistema.

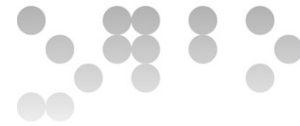
En canvi, presenten alguns inconvenients que cal tenir en compte:

- Generalment necessiten ser combinats amb senyals de radiofreqüència (RF), cosa que implica la implementació de processos de sincronització i coordinació entre el sistema de radiofreqüència i el sistema d'ultrasons.
- Els ultrasons tenen un nivell de precisió una mica inferior respecte a altres sistemes com ara els basats en infrarojos, ja que mentre els sistemes d'ultrasons ofereixen un nivell de precisió de l'ordre d'uns pocs centímetres, els sistemes basats en infrarojos són capaços d'oferir un nivell de precisió d'uns pocs mil·límetres.
- Són influenciats per senyals d'ultrasons que s'han reflectit, i interferències degudes a soroll com ara metal, certs objectes, etc. Les reflexions i els obstacles entre emissor i receptor impedeixen la comunicació o no contribueixen a oferir un nivell de precisió acceptable.
- Per implementar un sistema amb ultrasons cal un nombre elevat de sensors, el que fa que la instal·lació sigui costosa temporalment parlant.



Alguns exemples de sistemes de posicionament *indoor* que utilitzen tecnologia d'ultrasons són:

- *Active Bat positioning system* [45-46].
- *Cricket system* [47-49].
- *Sonitor* [50].
- Els autors Mike Hazas i Andy Hopper [51] investiguen la utilització d'emissió d'ultrasons per a calcular el posicionament *indoor*. Per aconseguir-ho, es construeixen les unitats emissor i receptor, les quals s'utilitzen per a construir dos sistemes de posicionament amb diferents arquitectures. En aquest cas s'opta per la utilització d'ultrasons justificant que els transductors són barats, i que la computació dels senyals no requereix grans requeriments, aconseguint sistema simple i barat. En l'article s'analitzen també els principals problemes que presenta utilitzar tecnologia amb ultrasons, com ara la emissió de diferents senyals per part de diferents transmissors al mateix temps, la dificultat per a diferenciar els senyals d'un emissor a un altre, i la sensibilitat al soroll. Els autors desenvolupen un prototip d'emissor i receptor anomenat *Dolphin*, utilitzant elements transductors barats i utilitzant un mètode compacte de muntatge, els quals proveeixen senyal de qualitat. Aquestes unitats s'utilitzen per crear dos sistemes de localització per ultrasons, un sistema centralitzat que arriba a mostrar un nivell de precisió de l'ordre de 2 cm, i un sistema orientat a la privacitat, que ofereix un nivell de precisió una mica inferior a l'anterior.
- L'article [39] descriu un nou sistema de posicionament *indoor* anomenat *Teliemade*. Aquest sistema està basat en la tecnologia dels ultrasons i aplica la tècnica *time-of-flight* (ToF) per poder calcular la distància entre un sensor emissor i un sensor receptor.
- L'article [40] millora les tècniques de medició amb ultrasons conegudes fins al moment.
- L'article [52] descriu un nou sistema de posicionament *indoor* basat en ultrasons, el qual implementa la tècnica *time difference of arrival* (TDoA) utilitzant la tècnica *code division multiple access*. El sistema que s'implementa està format per un o dos transmissors, els quals envien senyals ultrasons utilitzant

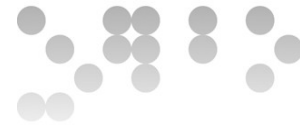


transductors piezoelèctrics convencionals. En canvi, en el receptor un transductor MEMS converteix els senyals d'ultrasons en senyals elèctrics, els quals són processats per tal d'aplicar estimacions de rangs.

- En l'article [53] s'investiga un nou mètode amb la tecnologia d'ultrasons de banda ampla utilitzant salts de freqüència més amples i filtres de resposta d'impuls finit, comparant els resultats amb altres mètodes ja existents fins al moment.
- L'article [41] implementa un sistema de posicionament *indoor* basat en ultrasons i es combina amb un sistema basat en la visió.
- Els articles [42] i [54] expliquen el disseny de *SpiderBat*, un sistema de posicionament *indoor* basat en ultrasons. En l'article [55] es proposa un altre sistema que utilitza sensors d'ultrasons.
- L'article [43] proposa millores als algorismes per calcular la posició dels nodes en sistemes de posicionament que utilitzen ultrasons.
- En la tesi de Tayyab Javed [44] s'investiga la utilització de la tecnologia dels ultrasons com a medi de comunicació per poder assistir als usuaris en la recerca i localització d'espais situats en un ambient *indoor*. L'autor proposa un prototip de sistema de posicionament *indoor*, demostrant la seva efectivitat en la localització en interiors utilitzant dispositius mòbils.

5.1.3. Sistemes de posicionament basats en radiofreqüència (RF)

En els sistemes de posicionament basats en radiofreqüència (RF) [4-5], els senyals RF poden travessar parets i el cos humà fàcilment, cosa que altres tecnologies no poden oferir. Amb la utilització d'aquesta tecnologia, també s'augmenta l'àrea de cobertura dels senyals, i és necessari menys hardware per a la instal·lació. Un dels grans avantatges que ofereix és la reutilització de tecnologia RF existent en la instal·lació, ja que es poden reutilitzar, per exemple, els punts d'accés de la instal·lació inalàmbrica WLAN. Generalment, utilitza les tècniques de triangulació i "fingerprinting" per a la localització *indoor*.



Exemples de tecnologies que utilitzen com a tecnologia bàsica la radiofreqüència (RF) són: la Identificació de radiofreqüència (RFID) wireless local area network (WLAN), Bluetooth, xarxes de sensors, i Ultra-wideband (UWB), les quals seran desenvolupades en les seccions següents.

a) Radio Frequency Identificacion (RFID)

La tecnologia RFID [56-58] proposa utilitzar transmissors lleugers i petits, tot i que calen una gran quantitat de components per dur a terme la instal·lació i el manteniment.

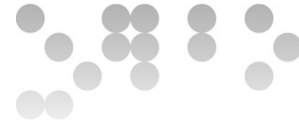
Un exemple de sistema de posicionament indoor que utilitzi RFID és WhereNet [59-60], el qual aconsegueix una precisió d'entre 2 i 3 m. És un sistema molt complex, el qual requereix una gran quantitat de components que cal instal·lar, la qual cosa fa que costi molt de temps instal·lar-lo.

b) Wireless Local Area Network (WLAN)

Com a avantatges més importants, cal comentar que reutilitzen la infraestructura existent a nivell de WLAN, la qual cosa provoca que el cost del sistema sigui molt baix. En canvi, les limitacions que produeix pel que fa al nivell de precisió obtingut són importants. El nivell de precisió queda afectat pel moviment de les persones, l'encavalcament de les diferents àrees de cobertura dels punts d'accés, dels dispositius mòbils que estan sent localitzats o seguits a prop, i altres objectes com parets, portes, etc. El nivell de precisió que es sol obtenir amb sistemes que implementen només tecnologia WLAN sol ser de l'ordre de pocs metres.

Alguns sistemes de posicionament *indoor* que utilitzen tecnologia WLAN són:

- RADAR [61]. Reutilitza la WLAN existent, disposa de poques estacions, i és fàcil d'establir. Presenta algunes limitacions, com per exemple, per a poder localitzar un objecte, aquest ha d'estar equipat amb tecnologia WLAN. No contempla requisits de privadesa, i presenta limitacions degudes a la tècnica emprada anomenada *Received Signal Strength* (RSS) per al posicionament [5].
- Ekahau [62]. Es presenta com un sistema de posicionament WLAN barat i flexible, i, al igual que RADAR, reutilitza la WLAN existent en la instal·lació.



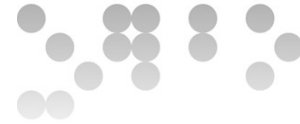
Com a millores, és capaç de controlar milers de dispositius, i els emissors són petits i lleugers. També es millora la duració de la bateria en uns 5 anys aproximadament. Com a limitació, es segueix obtenint un valor no suficient de precisió en les mesures, de l'ordre d'1 metre utilitzant tres o més punts d'accés.

- COMPAS [63]. És un sistema econòmic, ja que reutilitza la infraestructura WLAN. Permet arribar a un ordre de precisió de 1,65 m. Està basat en dues tècniques per a dur a terme la localització: *Received Signal Strength (RSS)* i *Fingerprinting*. Com a greu limitació respecte als anteriors, només és capaç de localitzar o controlar un sol usuari simultàniament.

c) Bluetooth

La tecnologia Bluetooth [64-76] ofereix un rang més ampli de cobertura que la tecnologia IR, arribant als 100 metres, i sorgeix per a reemplaçar els ports d'infrarojos dels dispositius. Els xips de Bluetooth són econòmics, la qual cosa fa que els dispositius on s'implementen els xips per a ser rastrejats tinguin un baix preu. El Bluetooth permet reutilitzar els dispositius que existeixen en la xarxa amb aquesta tecnologia, i per tant proporciona un cost d'instal·lació baix i es necessita poca potència. Les limitacions d'aquesta tecnologia són importants, i ofereix una precisió que es situa entre els 2 i 3 m, i un retard en el càlcul de la posició amb una mitjana de 20 segons.

Un sistema de posicionament *indoor* que utilitza la tecnologia Bluetooth és Topaz [77]. És un sistema que ofereix localització 2D, amb una precisió d'error estimada en uns 2 m, per tant, no ofereix una bona precisió a nivell d'habitació. Concretament, aquest sistema combina la tècnica Bluetooth i la basada en infrarojos, aprofitant-se dels avantatges de cadascuna, ja que els sistemes IR no poden travessar parets, el que fa que es pugui oferir un millor nivell de precisió dins d'una habitació. És capaç de rastrejar fins a 100 objectes simultàniament. Com a limitacions importants, les bateries dels dispositius s'han de canviar una vegada a la setmana, i es produeix un retard a l'hora de calcular la posició, de l'ordre d'entre 10 i 30 segons, temps molt superior al que seria desitjable.



d) Sensors Networks

La tecnologia *Sensors Networks* [78-79], presenta un cost baix, gràcies al preu i la mida dels sensors petita. Ofereix una bona relació pel que fa al consum de potència. En canvi no proporciona un nivell acceptable de precisió en les mesures, i la vida útil de la bateria es veu afectada quan es realitzen mesures de navegació en temps real.

Un sistema de posicionament *indoor* que utilitza la tecnologia *Sensors Networks* és Online Person Tracking [80]. Aquest sistema presenta un cost baix, gràcies als petits i barats sensors que utilitza, anomenats T-mote [81]. Utilitza la tècnica *Received Signal Strength* (RSS) per al posicionament, combinada amb la triangulació amb l'algorisme «min mean square error», obtenint uns resultats de nivell de precisió d'entre 1,5 i 3,8 m. La instal·lació i el manteniment dels sensors comporta molt de temps.

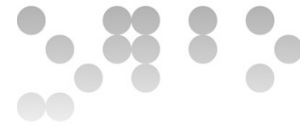
El projecte descrit en l'article [15] utilitza aquest tipus de tecnologia, i la combina amb filtres de Kalman.

En l'article [82], els autors fan una introducció als sensors que s'utilitzen en la xarxa per a aconseguir la localització *indoor*; i presenten una tècnica anomenada AHLoS (Ad-Hoc Localization System), la qual permet als mateixos nodes descobrir la seva localització dinàmicament.

e) Ultra-wideband (UWB)

Els sistemes de posicionament basats en la tecnologia Ultra-wideband [83] queda afectada per les reflexions del senyal que sofreix a causa de parets i altres objectes típics d'un entorn en interiors, tot i que aquests sistemes són capaços de diferenciar les senyals normals de les reflectides, gràcies a que la duració de les pulsacions de senyal que és capaç d'enviar és inferior a 1 ns. És un sistema que és capaç d'adquirir un nivell de precisió de molts pocs centímetres [84]. A més, presenta molts més avantatges que altres tecnologies:

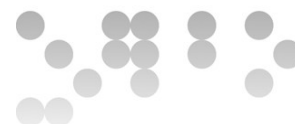
- No es requereix línia de visió directa entre emissor i receptor.
- Es produeixen menys interferències.
- Tenen l'habilitat de penetrar a través d'alguns objectes.



- Els xips ultra-wideband són molt barats, i per tant el sistema és de cost molt baix i fàcilment escalable.

Alguns exemples de sistemes de posicionament *indoor* basats en la tecnologia Ultra-wideband són els següents:

- El sistema Ubisense Ltd. [85] és un sistema de posicionament *indoor* basat en la tecnologia Ultrawideband. Aquest sistema utilitza la tècnica de triangulació basada en la diferència de temps d'arribada dels senyals (TDOA) i en el càlcul dels angles d'arribada (AOA). És un sistema ideal per poder mesurar posicionament d'objectes en entorns *indoor* complexos, formats per moltes parets, portes i altres objectes. Ofereix un nivell de precisió de l'ordre d'unes poques desenes de centímetres (10-50 centímetres) en 2D, i uns 15 centímetres en 3D. Els sensors són capaços de mesurar unes 20 vegades per segon, cosa que permet controlar en un nivell de precisió suficient la navegació. L'àrea que es pot cobrir amb pocs sensors és molt gran, ja que per exemple, amb quatre sensors es pot cobrir una àrea d'uns 400 m². Els dispositius utilitzats en la navegació són inalàmbrics, i de pes molt lleuger, d'uns 45 grams, i les bateries d'aquests dispositius són de llarga duració i poden arribar a un any. La limitació més important que té aquest sistema és el cost, ja que aproximadament pot costar uns 16.875 dòlars.
- En l'article [86], els autors fan un estudi exhaustiu de la tècnica geomètrica de la multilateració aplicada a la tecnologia ultra-wideband (UWB), proposant una nova solució al problema del càlcul de la posició d'un objecte, a la qual anomenen time-reflection-of-arrival (TROA).
- El projecte desenvolupat en l'article [87] proposa un sistema de navegació *indoor* basat en la tecnologia ultra-wideband (UWB), el qual permet aconseguir resoldre el problema del posicionament i localització d'interiors en uns nivells de precisió òptims, en aquest cas utilitzant un robot mòbil.
- Pozyx [88] és un dels primers artefactes hardware creats per a solucionar el tema del posicionament i la navegació en entorns *indoor*, i proveeix un nivell de precisió excel·lent de pocs centímetres. És un hardware dissenyat per a incorporar-se a una placa Arduino, tot i que també pot funcionar per ell sol. El



El sistema Pozyx utilitza els senyals de radiofreqüència anomenats ultrawideband (UWB).

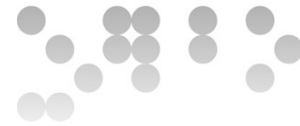
5.1.4. Sistemes de posicionament magnètics

Els sistemes de posicionament basats en senyals magnètics [89] són sistemes clàssics utilitzats per al posicionament i la navegació, els quals ofereixen un bon nivell de precisió en les mesures. Una de les principals característiques que el fan recomanable és que no necessiten línia de visió directa entre emissor i receptor, per tant poden funcionar tot i que hi hagi obstacles o parets entre els dos.

El sistema MotionStar Wireless [90] és un exemple de sistema de posicionament que utilitza la tecnologia dels senyals magnètics. Aquest sistema és petit en mida, robust i econòmic. És capaç de controlar múltiples posicions d'objectes i controlar la navegació d'aquests simultàniament. Algunes limitacions importants d'aquest sistema són la limitada àrea de cobertura que ofereix, ja que cada transmissor és capaç de cobrir només uns 3 m, i les interferències que es produeixen en les mesures degudes a la presència de metalls. En el cas de la navegació controlada, les bateries duren molt poc, entre 1 i 2 hores.

5.1.5. Sistemes de posicionament basats en la visió

En els sistemes de posicionament basats en la visió [7], [91-93], es fa servir una tècnica utilitzada també per poder fer el seguiment de localitzacions de persones o dispositius en entorns *indoor*. Sol ser un sistema econòmic, ja que les càmeres tenen un preu reduït, i cobreixen una àrea molt gran. Una de les característiques particulars d'aquest sistema és que els usuaris no necessiten portar cap dispositiu de localització al damunt, i es respecta la privacitat dels usuaris, ja que no s'emmagatzema el seguiment fet a l'usuari a cap base de dades. És un sistema recomanat en entorns que pràcticament no canvien, i per tant, no és adequat implementar-lo en entorns que estan contínuament canviant. Per



contra, ofereixen algunes limitacions, com ara les interferències degudes al clima, la llum, etc.

Un exemple d'aquest tipus de sistemes de posicionament és Easy Living de l'empresa Microsoft [94]. És un sistema molt adequat per als usuaris, però és un sistema que necessita prou potència per a processar les imatges captades per les càmeres, degut a que s'apliquen tècniques complexes. A més a més, no garanteix un nivell de precisió adequat, degut als canvis de l'entorn i les limitacions que ofereixen aquest tipus de sistemes comentades anteriorment.

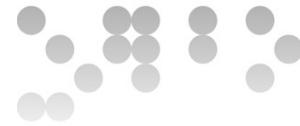
5.1.6. Sistemes de posicionament basats en el so audible

Els sistemes de posicionament basats en el so audible [95], presenten alguns avantatges davant altres sistemes, com ara el fet de que poden reutilitzar dispositius que els usuaris disposen habitualment, com per exemple telèfons mòbils. En aquest cas, no es necessiten dispositius addicionals per fer el seguiment, ja que amb els telèfons mòbils seria suficient, i per tant aquest fet contribueix a fer un sistema molt més econòmic. Per contra, també presenta limitacions degudes a les interferències provocades pels sorolls ambientals.

Un exemple d'aquest tipus de sistema de posicionament és l'anomenat Beep [96-97], en el qual s'obté un nivell de precisió d'uns 40 cm en el 90% de les mesures realitzades de mitjana, i garanteix la privacitat dels usuaris, ja que no fa un seguiment automàtic de la navegació dels usuaris. Els sensors que calen per fer operatiu el sistema són també molt econòmics. Presenta la limitació típica que presenten aquest tipus de sistemes, que són les interferències provocades pels sorolls ambientals.

5.1.7. Sistemes de posicionament híbrids

Un altre tipus de sistemes de posicionament *indoor* que es presenten són els híbrids. Aquests són els més utilitzats avui en dia, ja que amb la combinació de diferents

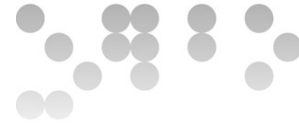


tècniques de les anteriors (Wi-Fi/UWB, Wi-Fi/INS, etc.) es poden millorar els nivells de precisió en les mesures.

Alguns exemples de sistemes de posicionament *indoor* híbrids són:

- El sistema de posicionament Medusa [82] és un exemple de sistema híbrid que utilitza senyals RF i ultrasons.
- El sistema exposat en [98] utilitza una combinació de les tecnologies GPS i UWB.
- El sistema exposat en [14] utilitza una combinació de les tecnologies WiFi, PDR, landmarks, i Kalman filter.
- El sistema exposat en [37] utilitza una combinació de les tecnologies de radiofreqüència amb ultrasons.
- El sistema exposat en [38] combina quatre tècniques: foot-mounted IMU (Inertial Motion Unit), ultrasons, filtre de partícules i navegació basada en model.
- Uns altres sistemes utilitzats en sistemes de posicionament *indoor* són els sistemes inercials, dels quals els articles [3] i [99] són un clar exemple. En l'article [99], concretament, els autors desenvolupen un sistema de navegació per a entorns urbans i interiors d'edificis amb múltiples sensors, anomenat NavCube.
- En l'article [41], els autors analitzen el problema de la navegació en temps real d'un entorn *indoor*, i proposen un sistema de posicionament i localització *indoor* basat en la combinació de dos tecnologies: sistema basat en la visió, i sensors ultrasons.
- El sistema Cricket presentat en l'article [47] utilitza la combinació de senyals de radiofreqüència i ultrasons.

Existeixen altres tècniques utilitzades per al posicionament i localització *indoor*. En l'article [16] es proposa un sistema de navegació *indoor* basat en la tecnologia *Near Field Communication* (NFC), al qual els autors anomenen *NFC Internal*. Aquest sistema permet als usuaris la navegació a través de l'interior d'un edifici, així com la localització dels propis usuaris. Els usuaris utilitzen el seu telèfon mòbil, i per a ser guiats o localitzats aproximen el seu telèfon a unes etiquetes que estan repartides per tot l'edifici.



5.1.8. Sistemes de posicionament *indoor* en alçada

Els sistemes de posicionament *indoor* en alçada és el tipus de sistemes en el qual es basa aquest projecte de recerca. Certament, els estudis en aquest tipus de sistemes són bastant recents. Aquests sistemes es basen en calcular amb exacta precisió l'altura a la qual està situat un objecte respecte del terra.

En l'article [100] es comenta que, tradicionalment, els dispositius que típicament s'han utilitzat fins ara per poder obtenir informació de l'altura són els baròmetres. Tanmateix, la majoria dels dispositius mòbils actuals estan equipats amb sensors inercials, però no porten incorporats baròmetres. Els autors realitzen un estudi per a diferents casos que es poden plantejar dins d'un edifici amb diferents plantes. L'article [101] és un altre exemple d'aquest tipus de posicionament.

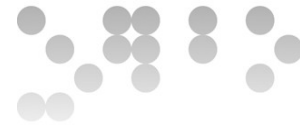
5.2. Tècniques utilitzades per al càlcul de la posició en els sistemes de posicionament *indoor*

La majoria dels sistemes de posicionament *indoor* realitzen dues fases per a obtenir la posició d'un objecte [24]. En primer lloc es calcula la distància o angle des de cada node, i en segon lloc es fa una determinada combinació d'aquestes distàncies o angles per calcular la posició del node.

5.2.1. Càlcul de la distància o angle des de cada node

Per a la primera fase, els mètodes més utilitzats per calcular la distància que existeix entre dos nodes són: Received Signal Strength Indicator (RSSI), Time-of-arrival (ToA), Time-difference-of-arrival (TDoA) o Angle-of-Arrival (AoA).

- **Received Signal Strength Indicator (RSSI).** Aquest mètode [56] mesura la potència del senyal que arriba del emissor al receptor, i coneixent la pèrdua de



potència des del emissor al receptor, es calcula la distància estimada que existeix. Aquest mètode s'utilitza principalment en la tecnologia de senyals de radiofreqüència (RF).

- **Time-of-arrival (ToA) o Time-difference-of-arrival (TdoA).** Coneixent el temps d'arribada [24], o la diferència del temps d'arribada, el temps de propagació es pot transformar per calcular la distància entre nodes, sabent la velocitat de propagació del senyal. Aquest mètode s'aplica en moltes de les tecnologies descrites en l'apartat 2.2, com ara senyals de radiofreqüència (RF), senyals acústiques, senyals d'infrarojos (RI) i ultrasons.

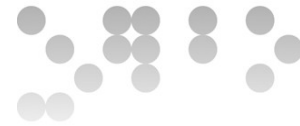
Com a novetat, en l'article [11], els autors fan un estudi exhaustiu de la tècnica geomètrica de la multilateració aplicada a la tecnologia ultra-wideband (UWB), proposant una nova solució al problema del càlcul de la posició d'un objecte, a la qual anomenen timereflection-of-arrival (TROA).

En l'article [18], els autors persegueixen obtenir un temps diferencial d'arribada (*timedifference-of-arrival*, TdoA) dels senyals suficient gran per a facilitar el càlcul de la distància, amb la combinació de dues tecnologies: sistema basat en la visió, i ultrasons.

- **Angle-of-Arrival (AoA).** Aquest mètode calcula l'angle d'arribada del senyal utilitzant relacions geomètriques simples per calcular la posició del node emissor.

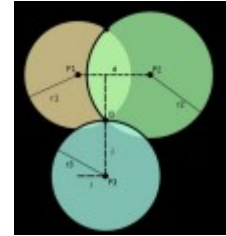
5.2.2. Càlcul de la posició combinant els resultats de la primera fase

Per a realitzar la combinació de les distàncies o angles obtingudes en la primera fase i poder calcular la posició del node, existeixen diferents tècniques: trilateratització hiperbòlica, triangulació, *Maximum Likelihood* (ML).



- **Trilateratització hiperbòlica.** Es basa en la intersecció de tres cercles. Els articles [5] i [26] són exemples de sistemes de posicionament que utilitzen aquest mètode per al càlcul de la posició.

Font: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6e/Trilateration.svg/300px-Trilateration.svg.png>

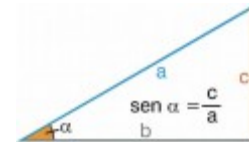


*Il·lustració 1.
Trilateratització
hiperbòlica*

- **Triangulació.** En aquest mètode, s'apliquen les lleis de trigonometria de sinus o cosinus.

Font: <http://blogdemates.files.wordpress.com/2010/02/trigonom.gif>

- **Maximum Likelihood.** Es minimitzen les diferències entre les distàncies mesurades i les distàncies estimades.

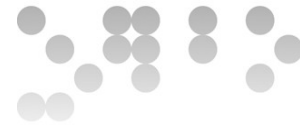


*Il·lustració 2.
Triangulació*

5.2.3. Càlcul de la posició amb ultrasons

Els sensors d'ultrasons es poden utilitzar per a mesurar distàncies o superar obstacles, entre d'altres moltes funcions. Per a mesurar distàncies, s'envia un ultrasò (el qual l'oïda humana no és capaç de sentir, ja que utilitza una freqüència molt alta) a través d'un de la parella de cilindres que formen el sensor (un transductor) i s'espera a que aquest so reboti sobre un objecte i torni. Aquesta senyal de tornada és captada per l'altre cilindre. El rang de distàncies dependrà del sensor en concret que s'utilitzi, i la precisió sol ser d'uns 3 mm.

Una vegada s'ha rebut la senyal al cilindre, el paràmetre que es rep és el temps que ha passat des de l'enviament fins la recepció del ultrasò. Per traduir aquest temps en distància, s'ha de conèixer a la velocitat que aquest ultrasò viatja en l'aire, el qual és de 343 metres/segon en condicions normals a 20° de temperatura, o 0,0343 cm/microsegon.



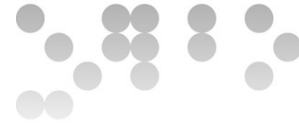
Per a calcular la distància, cal saber que la velocitat es mesura en distància recorreguda en un cert temps (velocitat = distància / temps).

De la fórmula anterior, es dedueix que la distància que es vol calcular serà igual a la velocitat dels ultrasons dividit pel temps que ha trigat el senyal en anar i tornar. Aquest valor caldrà dividir-ho entre 2, ja que només ens interessa la distància d'anada (i no de tornada).

6. Metodologia

Per a la realització del projecte de recerca s'han utilitzat principalment dues metodologies: *design and creation*, i *experiment*. La metodologia *design and creation* consisteix en el disseny i desenvolupament de nous productes tecnològics o artefactes amb l'objectiu de solucionar problemes a la societat, anomenat també habitualment com l'art del pensament constructiu. En aquest projecte s'ha dissenyat i creat un sistema de posicionament *indoor* en alçada, basat en ultrasons. Amb aquest sistema s'amplia l'àrea de coneixement dels sistemes de posicionament *indoor*. En aquest treball de recerca també s'ha fet ús de la metodologia *experiment*, ja que aquesta es basa en la investigació, en la formulació d'hipòtesis, en la recerca de proves per demostrar o contradir les hipòtesis, i en les relacions causa-efecte. Sempre que s'apliqui aquesta metodologia, hi haurà una mesura del coneixement que es té d'un determinat aspecte, abans i després de la realització de les proves. La metodologia *experiment* és la que es seguirà per validar l'artefacte.

En les següents seccions es detalla la metodologia i procediments seguits. En la secció 6.1 descriu el *hardware* utilitzat i les connexions entre els diferents dispositius. En les seccions 6.2, 6.3 i 6.4 es proposa el mètode utilitzat per calcular l'alçada de l'artefacte respecte del terra, els factors que afecten als resultats, i l'estudi del moviment de l'artefacte.



6.1. Descripció de l'equipament

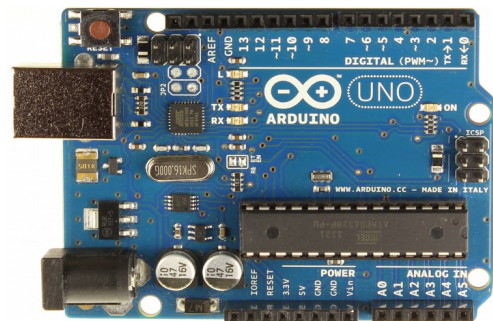
En les seccions següents es descriuen els dos dispositius utilitzats en el projecte: la placa Arduino i el sensor d'ultrasons HC-SR04. Posteriorment, també es descriu la forma en que s'han interconnectat els dos dispositius.

6.1.1. Arduino

Arduino és una placa amb un microcontrolador de la marca Atmel i amb tota la circuiteria de suport, que inclou reguladors de tensió, i un port USB (en els últims models, ja que l'original utilitzava un port sèrie) connectat a un mòdul adaptador USB-Sèrie que permet programar el microcontrolador des de qualsevol ordinador i realitzar proves de comunicació amb el propi xip, entre d'altres.

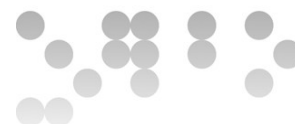


Il·lustració 3. Placa Arduino



Il·lustració 4. Pins de l'Arduino UNO

Disposa de 14 pins que poden configurar-se com a entrada o sortida, i als quals es pot connectar qualsevol dispositiu que sigui capaç de transmetre o rebre senyals digitals de 0 i 5 V. També disposa d'entrades i sortides analògiques. Mitjançant les entrades



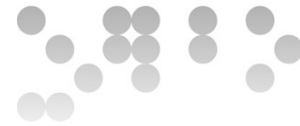
analògiques es poden obtenir dades de sensors en forma de variacions contínues d'un voltatge. Les sortides analògiques solen utilitzar-se per enviar senyals de control. Cadascun dels 14 pins digitals es pot utilitzar com a entrada o com a sortida. Funcionen a 5 V, i cada pin pot subministrar fins a 40 mA. La intensitat màxima d'entrada també és de 40 mA.

Arduino pot alimentar-se directament a través del propi cable USB o mitjançant una font d'alimentació externa, com per exemple un petit transformador o una pila de 9 V. Els límits estan entre els 6 i els 12 V. L'alimentació pot connectar-se mitjançant un connector de 2,1 mm amb el positiu en el centre o directament als pins Vin i GND marcats sobre la placa.

En la taula 1 es mostra un resum de les característiques tècniques d'Arduino.

Microcontrolador	Atmega328
Voltatge d'operació	5 V
Voltatge d'entrada (recomanat)	7 – 12 V
Voltatge d'entrada (límit)	6 – 20 V
Pins d'entrada/sortida digital	14 (6 poden utilitzar-se com a sortida de PWM)
Pins d'entrada analògica	6
Corrent continu per pin IO	40 mA
Corrent continu en el pin 3.3V	50 mA
Memòria Flash	32 KB (0,5 KB ocupats per el bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Freqüència de rellotge	16 MHz

Taula 1. Característiques tècniques d'Arduino



6.1.2. Sensor HC-SR04

Els sensors d'ultrasons s'emmarquen dins del grup de sensors amb la funció de poder mesurar distàncies o superar obstacles, entre d'altres. En concret, el sensor HC-SR04 és un sensor de distàncies per ultrasons capaç de detectar objectes i calcular la distància a la que es troben en un rang de 2 a 500 cm. El sensor funciona amb ultrasons i disposa de tota l'electrònica encarregada per fer la mesura. El seu ús és prou senzill, ja que només cal enviar una pulsació d'inici i mesurar l'ample de la pulsació de retorn.

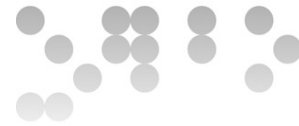


Il·lustració 5. Sensor HC-SR04

Aquest sensor és de mida petita, 43 x 20 x 17 mm, i destaca pel seu baix consum, gran precisió i un preu reduït. Treballa amb un voltatge d'alimentació de 5V DC, té un angle de cobertura de 15° i ofereix una resolució de 0,3 cm. Disposa de quatre pins per realitzar les connexions: VCC (Voltatge), Trig (enviament del senyal d'ultrasò), Echo (recepció del senyal d'ultrasò) i GND (terra).

El procediment bàsic per realitzar una medició amb el sensor HC-SR04 és senzill. En primer lloc, cal establir el pin Trig a nivell alt per un temps de 10 μ s o superior, i així, s'aconsegueix enviar un senyal d'activació del sensor d'ultrasons. A continuació, cal esperar una pulsació de retorn al pin Echo. Com a resultat, la duració de la pulsació de sortida al pin Echo és proporcional a la distància mesurada, tenint en compte la velocitat a la que es propaguen els senyals de so o d'ultrasò, 340 m/s. Aquest procediment s'explicarà de manera més detallada en la secció 6.2 quan s'aplicarà per a calcular l'alçada del sensor respecte al terra.

En la següent secció s'explica com s'han dut a terme les connexions entre la placa Arduino i el sensor d'ultrasons HC-SR04.

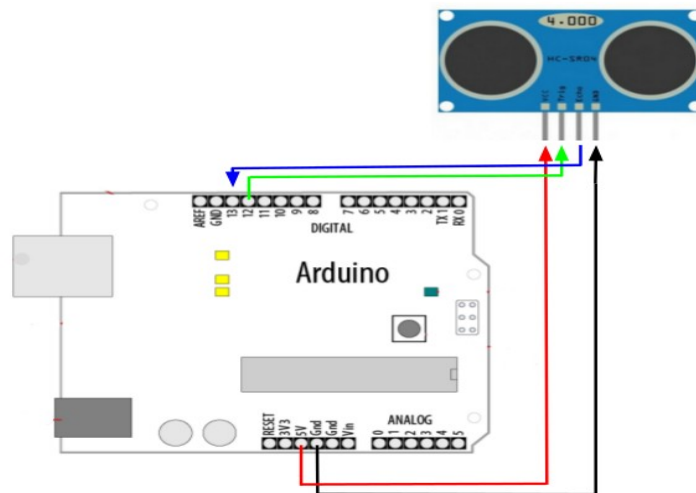


6.1.3. Connexió dels dispositius

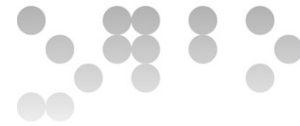
Tal com s'ha explicat en la secció 6.1.2, el sensor HC-SR04 disposa de quatre pins per realitzar les connexions: VCC (Voltatge), Trig (enviament del senyal d'ultrasò), Echo (recepció del senyal d'ultrasò) i GND (terra). Per poder dur a terme les mesures, cal connectar cada pin d'aquest sensor a un determinat pin de l'Arduino. Hi han diferents possibilitats en aquest punt, però s'ha optat per la següent configuració:

- VCC: connectat al pin de sortida de voltatge de l'Arduino marcat com a 5 V.
- GND: connectat al pin de terra de l'Arduino marcat com a GND.
- Trig: connectat al pin 12 de l'Arduino.
- Echo: connectat al pin 13 de l'Arduino.

En la il·lustració 6 es mostra l'esquema de connexió utilitzat.



Il·lustració 6. Esquema de connexió entre Arduino i el sensor HC-SR04



6.2. Càlcul de l'alçada

En aquesta secció s'explica l'algorisme bàsic que s'ha implementat per calcular l'alçada del sensor respecte del terra, utilitzant l'esquema de connexió de l'Arduino i del sensor HC-SR04 explicat en la secció anterior.

Per poder assegurar l'alçada del sensor respecte del terra, s'han muntat els dos dispositius (Arduino i sensor) en una barra de ferro, i s'ha situat aquesta barra paral·lela al terra amb l'ajuda de dos trípodos. També s'ha anivellat de manera adient el sensor i la barra. En les il·lustracions 7 i 8 es mostra el muntatge experimental realitzat.

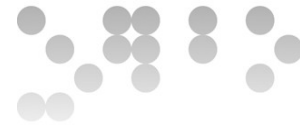


Il·lustració 7: Muntatge d'Arduino i sensor HC-SR04 a la barra de ferro

L'algorisme bàsic implementat per mesurar la distància des del sensor d'ultrasons fins al terra queda exposat en l'annex 1. Utilitzant el procediment bàsic explicat en la secció 6.1.2 per a poder enviar un senyal d'ultrasò a través del pin Trig i rebre el rebot al pin Echo, el sensor mesura el temps en



Il·lustració 8. Muntatge per l'assegurament de l'alçada del sensor



microsegons que tarda el senyal en arribar del sensor al terra i en tornar a rebre's al sensor.

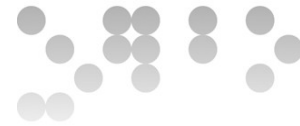
El següent pas és calcular la distància, però abans cal tenir en compte la velocitat dels ultrasons (equivalent a la velocitat del so), que són 343 m/s. Cal afegir que interessa treballar amb precisió de cm i de microsegons, per tant cal convertir aquesta velocitat de m/s a cm/ μ s, obtenint una velocitat de 0,034 cm/ μ s segons la fórmula 1.

$$343 \text{ m/s} = \frac{343 \cdot 100 \text{ cm}}{1 \cdot 1000000 \mu\text{s}} = 0,0343 \text{ cm}/\mu\text{s} \quad [1]$$

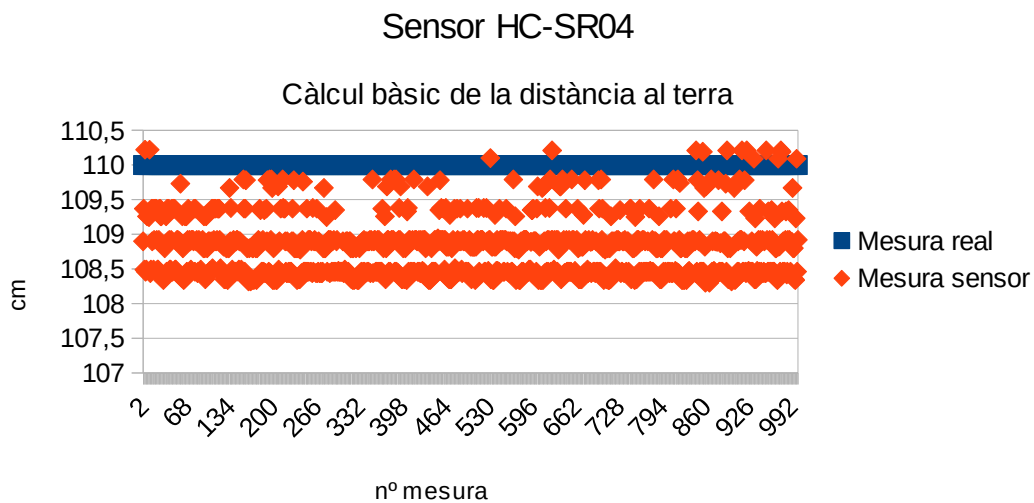
Una vegada és té la velocitat del so en cm/ μ s, la distància s'obté multiplicant el temps que tarda el senyal d'ultrasò en anar i tornar del sensor al terra, per la velocitat del so en cm/ μ s, i dividint per 2, fet que s'expressa en la fórmula 2. El motiu de dividir per 2 és que la mesura realitzada correspon al temps que tarda el senyal d'ultrasò en anar des del sensor al terra, juntament amb el temps que tarda en rebotar el senyal d'ultrasò i anar des del terra fins al sensor. Com realment només interessa la distància entre el sensor i el terra, cal quedar-se només amb la meitat d'aquesta mesura.

$$\text{Distància} = \frac{\text{Temps} \cdot 0,0343}{2} \text{ cm} \quad [2]$$

En l'algorisme implementat també es té en compte si la distància que s'obté està dins del rang de mesura del sensor. En aquest cas és el fabricant qui ens facilita el rang d'operació del sensor, i és entre 2 i 500 cm. En cas d'obtenir una distància fora del rang permès, s'informa d'aquest fet, ja que d'altra manera s'obtenen mesures que distorsionen els resultats. Per exemple, si s'intenta mesurar a menys de 2 cm, el sensor segueix indicant un mínim de 2 cm, i això provocaria errors en els càlculs estadístics. Per tant, s'opta per eliminar aquest tipus de mesures. De totes maneres, com que es vol mesurar de manera estàtica a una alçada en concret de 110 cm, aquest fet no afectaria als resultats.

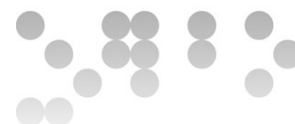


Cal també indicar que entre cada mesura s'espera un temps de retard suficient perquè es puguin restablir entre cada mesura els estats dels voltatges dels diferents pins. En principi, per a mesures estàtiques no afecta, ja que simplement seria el temps que es tardaria entre dues mesures consecutives. Però en el cas de voler realitzar mesures de forma dinàmica com es realitzarà en la secció 6.4, aquest temps de retard és important que sigui suficient ràpid per tal de no perdre mesures mentre es mou l'artefacte. Després de realitzar diferents proves de moviment, es considera que $100 \mu\text{s}$ és un retard excessiu per fer mesures en moviment, i un retard inferior a $30 \mu\text{s}$ podria provocar que el sensor no tingués suficient temps per restablir els senyals d'inicialització que es porten a terme en cada mesura, tal com es descriu en la secció 6.1.2 on es comenten les característiques del sensor. Per tant, després de realitzar suficients proves, un retard de $30 \mu\text{s}$ produeix el major nombre de mesures en el menor temps, però amb el suficient temps perquè el sensor sempre estigui correctament calibrat en cada mesura.



Il·lustració 9. Càlcul de l'alçada del sensor al terra amb HC-SR04

Per verificar els resultats, les mesures s'han portat a terme situant el sensor a una distància d'exactament 110 cm fins al terra. S'han realitzat 1000 mesures consecutives, les quals es mostren de manera gràfica en la il·lustració 9, obtenint una mitjana de 108,8



cm. Per tant l'error relatiu de la mitjana és de 1,2 cm, equivalent al 1,0936%. És interessant observar que la moda (valor més repetit) és de 108,46 cm, amb un error relatiu de 1,4%. La mida màxima obtinguda ha sigut de 110,22 cm, i la mínima de 108,3 cm.

Dels resultats també s'extreu que la diferència entre el màxim i el mínim és de 1,92 cm. A més, també s'observa que la major part dels punts mesurats es concentren en la franja entre 108,3 cm i 109,5 cm. S'observen poques mesures per damunt de la mesura real, tot i que en la següent secció s'introdueixen una sèrie de millores que aconseguen resultats més acurats.

En la secció següent es descriuen els factors estudiats que contribueixen a millorar el càlcul de l'alçada del sensor respecte del terra, sempre des d'un punt de vista estàtic.

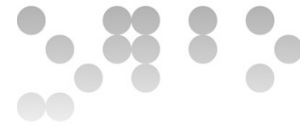
6.3. Factors que contribueixen a la millora de la mesura de l'alçada

En aquesta secció s'estudien la modificació dels paràmetres de tres factors que contribueixen a millorar els resultats en el càlcul de l'alçada del sensor respecte del terra: la temperatura, els diferents materials del terra i el gir de l'artefacte per tal de variar l'angle d'incidència que vindrà determinat pel patró de radiació oferit pel sensor.

6.3.1. Temperatura

En aquesta secció s'estudia de manera bàsica com afecta la variació de temperatura en el càlcul de l'alçada del sensor respecte del terra. Aquest és un tema prou ampli, i aquí es realitza un estudi senzill, deixant el tòpic obert per futures línies de recerca.

La velocitat del so és la velocitat de propagació de les ones mecàniques, produïdes per variacions de pressió del medi. Aquesta velocitat depèn de les característiques del medi en el que es realitza la propagació, i de la temperatura del medi. En aquest projecte només es considera com a medi de propagació l'aire, considerant la velocitat del so a través de l'aire de 343 m/s a una temperatura de 20 °C, tal com es va explicar en la



secció 6.2. Les propietats físiques de l'aire, com ho són la seva pressió i humitat entre d'altres, són factors que afecten a la velocitat. Per exemple, a major temperatura de l'aire major és la velocitat de propagació.

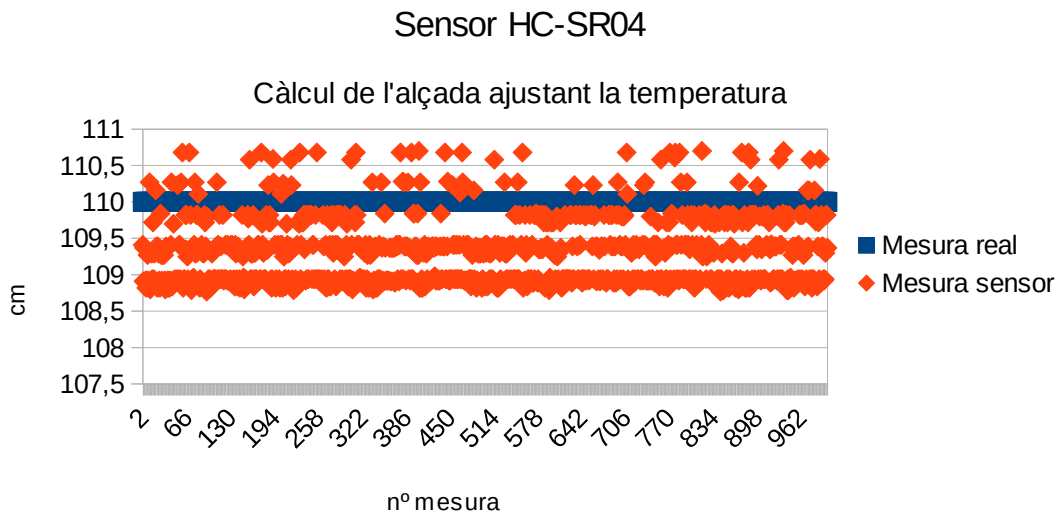
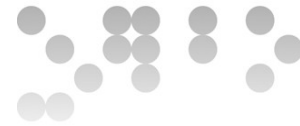
Una equació més exacta [102] per calcular la velocitat del so, ve donada per la fórmula 3:

$$velocitat = \sqrt{\frac{k \cdot R \cdot T}{m}} \quad [3]$$

on R és la constant dels gasos, m és el pes molecular mitjà de l'aire ($R/m = 287 \text{ J/kg}$) per a l'aire, k és la raó dels calors específics (1,4 per a l'aire) i T és la temperatura absoluta en Kelvin. En una atmosfera estàndard es considera que T és 293,15 Kelvin. Aquesta fórmula suposa que la transmissió del so es realitza sense pèrdues d'energia en el medi, que és una aproximació acceptable.

Tenint en compte la fórmula 3, s'ha afegit el factor temperatura a l'algorisme inicial, per poder millorar el càlcul de l'alçada del sensor respecte del terra, obtenint com a resultat l'algorisme indicat en l'annex 2 (línia 47). Aplicant aquesta millora al mateix escenari inicial i tenint en compte que la temperatura ambiental de l'escenari és de 22 °C, s'han tornat a realitzar 1000 mesures consecutives, amb el sensor situat a una distància d'exactament 110 cm al terra. En la il·lustració 10 es mostren de manera gràfica aquestes mesures, obtenint una mitjana de 109,29 cm. Per tant l'error relatiu de la mitjana és de 0,71 cm, equivalent al 0,6461%. És interessant observar que la moda (valor més repetit) és de 108,94 cm, amb un error relatiu de 0,9636%. La mida màxima obtinguda ha sigut de 110,7 cm, i la mínima de 108,77 cm.

Dels resultats també s'extreu que la diferència entre el màxim i el mínim és de 1,93 cm. A més, també s'observa que la major part dels punts mesurats es concentren en la franja entre 108,75 cm i 109,75 cm.



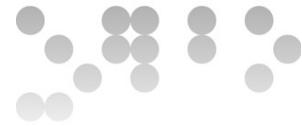
Il·lustració 10. Càlcul de l'alçada del sensor al terra tenint en compte la temperatura ambient

En la següent secció s'estudia com afecten els diferents materials amb els que està format l'objecte a mesurar a les mesures obtingudes.

6.3.2. Materials de l'objecte a mesurar

En aquesta secció s'estudien diferents materials respecte els quals es mesura la distància, que en el cas estudiat una alçada, i com afecta aquest factor a les mesures obtingudes. Els materials que s'han estudiat són: paviment de gres, metacrilat, cartró, vidre, fusta, ouera i esponja.

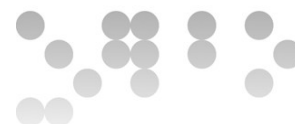
El paviment de gres ja ha quedat exposat en els apartats 6.2 i 6.3.1, ja que les mesures realitzades en aquests apartats es van realitzar calculant la distància entre el sensor i el terra, i el terra mesurat és de paviment de gres. Per tant, aquesta secció es dedicarà a estudiar la resta de materials. En tots els casos, i a l'igual que en les anteriors seccions, s'han realitzat 1000 mesures consecutives, i els objectes s'han disposat al terra. La



distància entre el sensor HC-SR04 i el terra és la mateixa que en les seccions anteriors, 110 cm. Per tant la mesura real s'obté restant 110 cm menys l'altura de l'objecte. En la il·lustració 11 es mostra exactament la distància que existeix entre el sensor i el terra. El muntatge utilitzat és el mateix que en les seccions anteriors, i que queda mostrat en les il·lustracions 7 i 8. En totes les mesures realitzades s'ha tingut en compte l'angle d'obertura del sensor per assegurar-se de que només es mesura el material estudiat.



Il·lustració 11. Distància de 110 cm entre el sensor i el terra



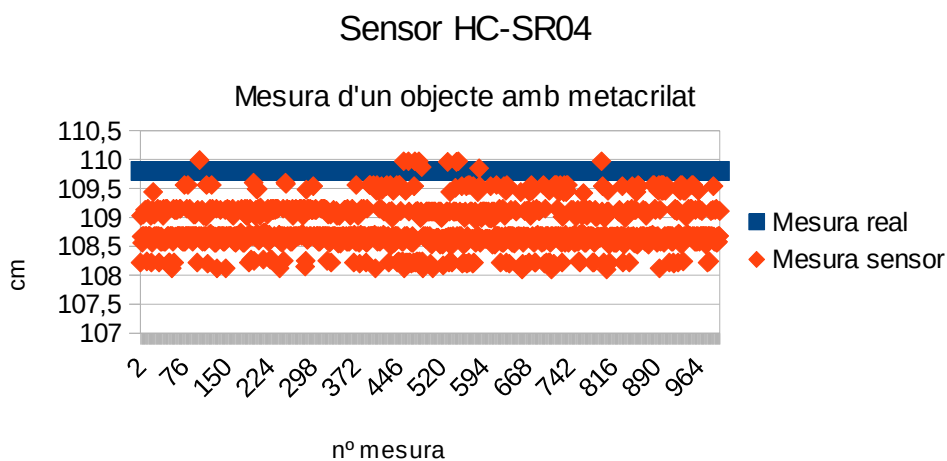
a) Metacrilat

El primer pas ha sigut utilitzar un plat de metacrilat situat en el terra, el qual té un gruix de 2 mm. Amb aquest escenari s'han realitzat 1000 mesures consecutives, amb el sensor situat a una distància d'exactament 110 cm al terra, i per tant a una distància de 109,8 cm de l'objecte. En la il·lustració 13 es mostren de manera gràfica aquestes mesures, obtenint una mitjana de 108,82 cm. Per tant l'error relatiu de la mitjana és de 0,98 cm, equivalent al 0,8910%. És interessant observar que la moda (valor més repetit) és de 108,68 cm, amb un error relatiu de 1,02%. La mida màxima obtinguda ha sigut de 109,99 cm, i la mínima de 108,1 cm.

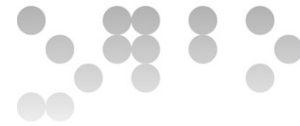


Il·lustració 12. Plat de metacrilat

Dels resultats també s'extreu que la diferència entre el màxim i el mínim és de 1,89 cm. A més, també s'observa que la major part dels punts mesurats es concentren en la franja entre 108,5 cm i 109,2 cm.



Il·lustració 13. Mesura d'un objecte amb metacrilat



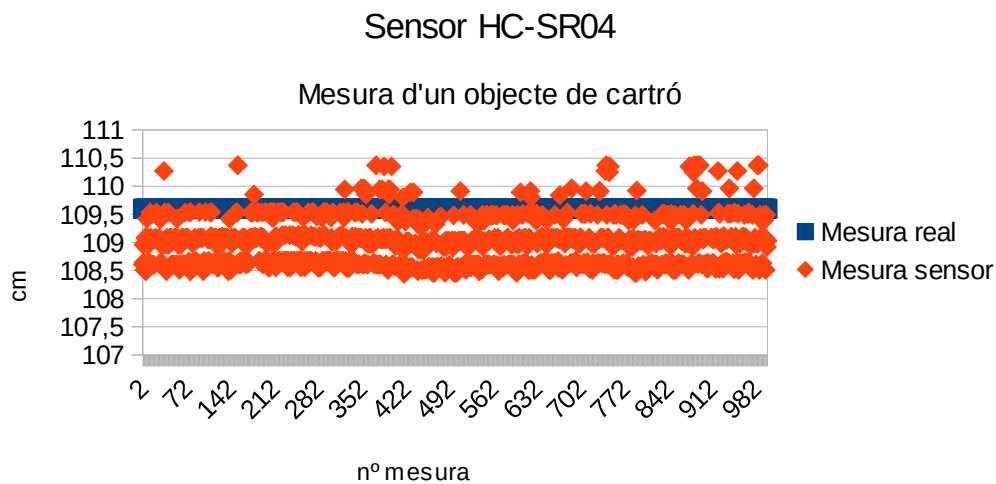
b) Cartró

En aquesta prova s'ha col·locat una tapa de cartró de forma plana al terra, de 4 mm de gruix, el qual es mostra en la il·lustració 14. Amb aquest escenari s'han realitzat 1000 mesures consecutives, amb el sensor situat a una distància d'exactament 110 cm al terra, i per tant a una distància de 109,6 cm de l'objecte. En la il·lustració 15 es mostren de manera gràfica aquestes mesures, obtenint una mitjana de 108,98 cm. Per tant l'error relatiu de la mitjana és de 0,62 cm, equivalent al 0,5662%. És interessant observar que la moda (valor més repetit) és de 108,44 cm, amb un error relatiu de 0,4745%. La mida màxima obtinguda ha sigut de 110,37 cm, i la mínima de 108,44 cm.

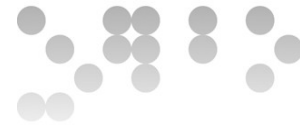


Il·lustració 14. Tapa de cartró

Dels resultats també s'extreu que la diferència entre el màxim i el mínim és de 1,93 cm. A més, també s'observa que la major part dels punts mesurats es concentren en la franja entre 108,5 cm i 109,5 cm.



Il·lustració 15. Mesura d'un objecte de cartró



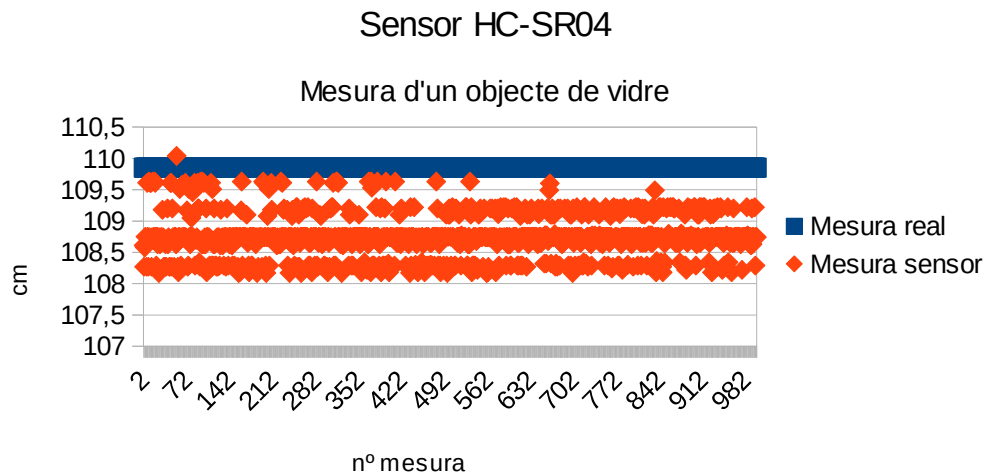
c) Vidre

En aquesta prova s'ha col·locat un fragment de vidre al terra, d'1,5 mm de gruix, el qual es mostra en la il·lustració 16. Amb aquest escenari s'han realitzat 1000 mesures consecutives, amb el sensor situat a una distància d'exactament 110 cm al terra, i per tant a una distància de 109,85 cm de l'objecte. En la il·lustració 17 es mostren de manera gràfica aquestes mesures, obtenint una mitjana de 108,75 cm. Per tant l'error relatiu de la mitjana és de 1,1 cm, equivalent al 0,9985%. És interessant observar que la moda (valor més repetit) és de 108,75 cm, amb un error relatiu de 1,0014%. La mida màxima obtinguda ha sigut de 110,04 cm, i la mínima de 108,17 cm.

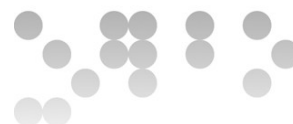


Il·lustració 16. Fragment de vidre

Dels resultats també s'extreu que la diferència entre el màxim i el mínim és de 1,87 cm. A més, també s'observa que la major part dels punts mesurats es concentren en la franja entre 108,25 cm i 109,25 cm, destacant una important agrupació de punts als 108,75 cm.



Il·lustració 17. Mesura d'un objecte de vidre



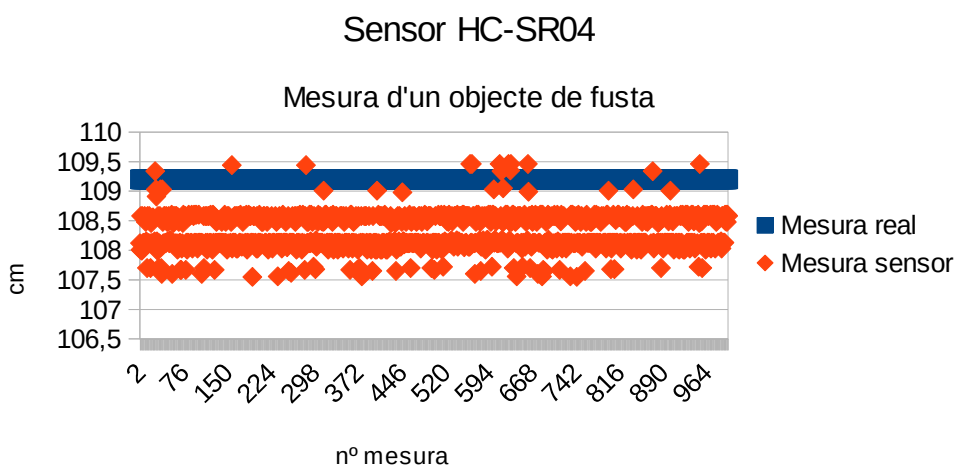
d) Fusta

En aquesta prova s'ha col·locat una raqueta petita de fusta al terra, de 8 mm de gruix, la qual es mostra en la il·lustració 18. Amb aquest escenari s'han realitzat 1000 mesures consecutives, amb el sensor situat a una distància d'exactament 110 cm al terra, i per tant a una distància de 109,2 cm de l'objecte. En la il·lustració 19 es mostren de manera gràfica aquestes mesures, obtenint una mitjana de 108,29 cm. Per tant l'error relatiu de la mitjana és de 0,91 cm, equivalent al 0,8359%. És interessant observar que la moda (valor més repetit) és de 108,13 cm, amb un error relatiu de 0,9799%. La mida màxima obtinguda ha sigut de 109,46 cm, i la mínima de 107,55 cm.

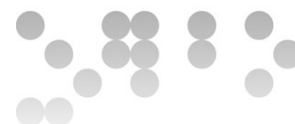


Il·lustració 18. Raqueta de fusta

Dels resultats també s'extreu que la diferència entre el màxim i el mínim és de 1,91 cm. A més, també s'observa que la major part dels punts mesurats es concentren en la franja entre 108,1 cm i 108,6 cm, destacant una important agrupació de punts en aquests dos extrems.



Il·lustració 19. Mesura d'un objecte de fusta



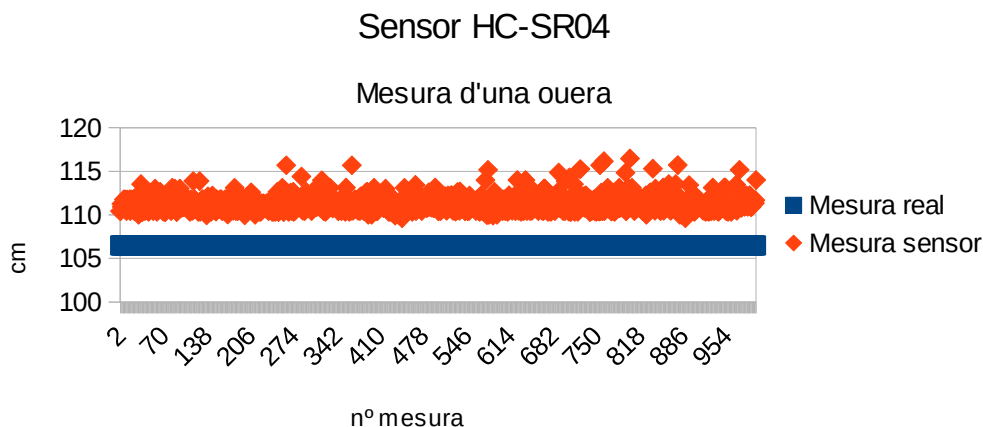
e) Ouera

En aquesta prova s'ha utilitzat una ouera d'emmagatzemar ous, material típicament utilitzat per a l'aïllament acústic de sales d'assaig de grups musicals, de 3,5 cm de gruix, la qual es mostra en la il·lustració 20. Amb aquest escenari s'han realitzat 1000 mesures consecutives, amb el sensor situat a una distància d'exactament 110 cm al terra, i per tant a una distància de 106,5 cm de l'objecte. En la il·lustració 21 es mostren de manera gràfica aquestes mesures, obtenint una mitjana de 111,31 cm. Per tant l'error relatiu de la mitjana és de -4,81 cm, equivalent al -4,5207% (els valors negatius indiquen que els valors obtinguts són majors que la mesura real). És interessant observar que la moda (valor més repetit) és de 110,9 cm, amb un error relatiu de -4,1315%. La mida màxima obtinguda ha sigut de 116,47 cm, i la mínima de 109,63 cm.

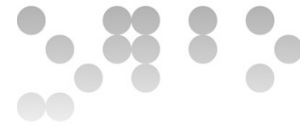


Il·lustració 20. Ouera

Dels resultats també s'extreu que la diferència entre el màxim i el mínim és de 6,84 cm. A més, també s'observa que la major part dels punts mesurats es concentren en la franja entre 110 cm i 112 cm.



Il·lustració 21. Mesura d'una ouera



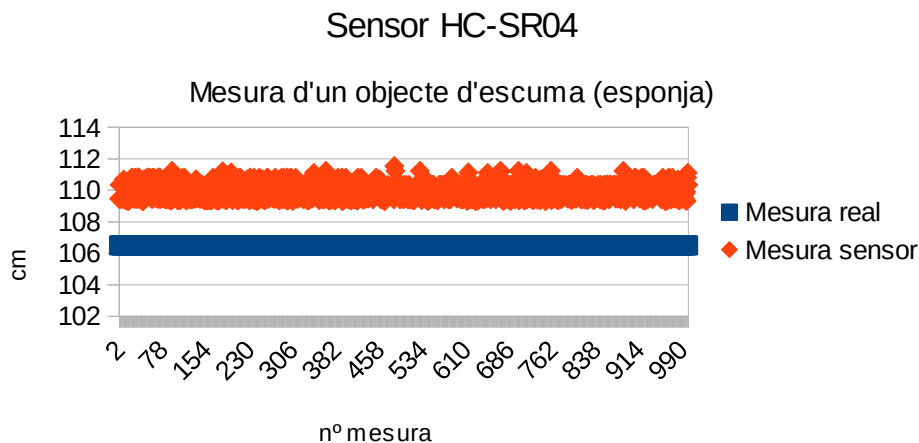
f) Escuma

Per a poder treballar amb escuma s'ha utilitzat una esponja de bany, de 3,5 cm de gruix, la qual es mostra en la il·lustració 22. Amb aquest escenari s'han realitzat 1000 mesures consecutives, amb el sensor situat a una distància d'exactament 110 cm al terra, i per tant a una distància de 106,5 cm de l'objecte. En la il·lustració 23 es mostren de manera gràfica aquestes mesures, obtenint una mitjana de 109,97 cm. Per tant l'error relatiu de la mitjana és de -3,47 cm, equivalent al -3,2578% (els valors negatius indiquen que els valors obtinguts són majors que la mesura real). És interessant observar que la moda (valor més repetit) és de 110,35 cm, amb un error relatiu de -3,615%. La mida màxima obtinguda ha sigut de 111,54 cm, i la mínima de 109,3 cm.

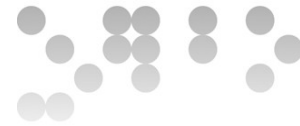


Il·lustració 22.
Esponja d'escuma

Dels resultats també s'extreu que la diferència entre el màxim i el mínim és de 2,24 cm. A més, també s'observa que la major part dels punts mesurats es concentren en la franja entre 109,25 cm i 110,25 cm.



Il·lustració 23. Mesura d'un objecte d'escuma (esponja)



6.3.3. Gir del sensor

En aquesta secció s'exposa de manera teòrica l'angle efectiu del sensor HC-SR04, i a continuació s'exemplifica de manera pràctica com s'han realitzat les proves per verificar l'angle efectiu de treball, tant en un entorn obert com un entorn més limitat.

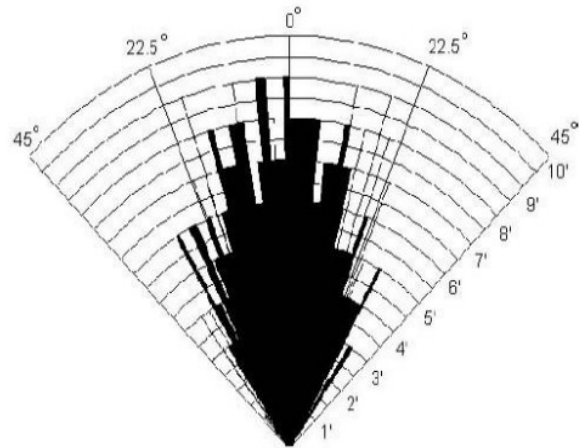
El sensor HC-SR04 presenta una gràfica de treball respecte a l'angle efectiu molt similar a la d'un patró de radiació. Aquesta informació és

molt important, ja que es podrà saber quin és l'angle per tal d'obtenir millors resultats en les lectures respecte d'una referència inicial. El patró de radiació és una gràfica que presenta propietats importants respecte a coordenades especials, generalment esfèriques. La propietat més important d'aquest tipus de gràfica és la distribució de l'energia al llarg d'un radi que no canvia. En el cas que ens ocupa serà fonamental per determinar a quina distància es pot detectar un objecte en funció de l'angle.

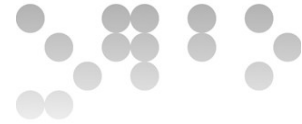
L'angle efectiu d'aquest sensor és de 15° , això indica que el sensor serà capaç de detectar objectes en un rang de 30° , 15° cap a l'esquerra i 15° cap a la dreta de l'angle 0° . En la il·lustració 24, extracte del full d'especificacions tècniques del fabricant del sensor (ftp://imall.iteadstudio.com/Modules/IM120628012_HC_SR04/DS_IM120628012_HC_SR04.pdf), es mostra com, per a un angle menor a 15° , les lectures són generalment bones.

Efectivament, en la prova que s'ha portat a terme, es comprova que, en un entorn obert i lliures d'obstacles a menys d'1 metre, al girar el sensor formant fins un angle d'entre 15° i 20° , les mesures són correctes. També es comprova que en sobrepassar aproximadament el límit de $22,5^\circ$ les mesures són incoherents.

En canvi, en un entorn més tancat i limitat hi ha algunes variacions. Per poder provar el sensor en un entorn limitat per parets molt pròximes, s'ha fet la simulació amb un tub de



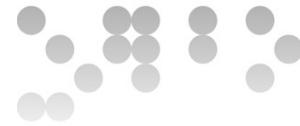
Il·lustració 24. Angle efectiu del sensor HC-SR04



PVC. El tub s'ha situat verticalment en direcció al terra, i el sensor s'ha situat en la part superior del tub mirant a dintre. En aquest punt, s'han fet proves de gir del sensor, i es constata que l'angle efectiu del sensor augmenta fins a 45° degut a les parets del tub. En la il·lustració 25 es mostra l'escenari utilitzat per a realitzar aquestes proves.



Il·lustració 25. Gir del sensor dins d'un tub de PVC



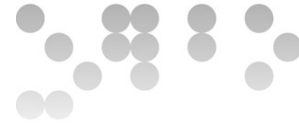
6.4. Moviment de l'objecte

Fins aquí, s'ha fet l'estudi amb l'objecte estàtic. En aquesta secció s'estudia el moviment de l'artefacte respecte del terra. Es parteix del càlcul bàsic de la distància des del sensor fins al terra aplicant l'algorisme inicial descrit en l'annex 2, al qual se li faran petites modificacions descrites en les seccions següents.

6.4.1. Càlcul de l'alçada a partir de la velocitat

L'objectiu d'aquesta secció és calcular l'alçada quan l'artefacte està en moviment respecte al terra. El primer problema que apareix és el retard entre les diferents mesures. Si el retard entre l'execució d'una mesura i la següent és molt gran, al moure l'artefacte, es perden moltes mesures intermèdies. Per tant, cal ajustar a un valor òptim l'espai de temps entre mesures consecutives. Després de realitzar diferents proves de moviment, es considera que $100\ \mu\text{s}$ és un retard excessiu per fer mesures en moviment, i un retard inferior a $30\ \mu\text{s}$ podria provocar que el sensor no tingués suficient temps per restablir els senyals d'inicialització que es porten a terme en cada mesura, tal com es descriu en la secció 6.1.2 on es comenten les característiques del sensor. Per tant, després de realitzar suficients proves, un retard de $30\ \mu\text{s}$ produeix el major nombre de mesures en el menor temps, però amb el suficient temps perquè el sensor sempre estigui correctament calibrat en cada mesura. D'aquesta manera, s'aconsegueix que quan es mou l'artefacte, les mesures obtingudes són graduals, i no hi han grans salts.

El següent pas és intentar millorar la precisió de les mesures. Cal recordar que s'ha programat el sensor HC-SR04 perquè enviï una pulsació a nivell alt a través del pin Trig durant $10\ \mu\text{s}$, es rep pel pin Echo el senyal de resposta, i es mesura el temps que es tarda des de que es va enviar el senyal fins rebre'l per poder calcular la distància (dividint-la entre dos). El problema que es presenta quan es mou l'artefacte és que la referència inicial des d'on s'envia el senyal d'ultrasò pel pin Trig no serà exactament la referència final on es rebrà el senyal d'ultrasò al pin Echo, ja que l'artefacte està en moviment i per tant la posició inicial haurà canviat. Aquest mateix error s'anirà produint en totes les



mesures mentre l'artefacte estigui en moviment, i per tant les mesures tenen un petit marge d'error.

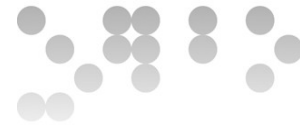
Aquest fet es pot millorar aplicant una solució diferent en el càlcul de l'alçada per a alguns casos en particular. Assumint el fet de que si es produeixen deu mesures consecutives en un mateix sentit (ascendent o descendent) respecte del terra significa que l'objecte s'està movent en aquella direcció, i assumint també que la velocitat és constant, es pot calcular aquesta velocitat i aplicar-la per calcular la posició següent, tenint en compte que el temps entre dues mesures consecutives és de 30 µs.

Per aplicar aquesta millora, en primer lloc cal utilitzar dos comptadors que comptaran el nombre de vegades que es repeteixen mesures en una determinada direcció. Si l'artefacte s'allunya del terra, s'augmentarà el comptador associat a l'allunyament de l'artefacte (quan la distància creix), i es reiniciarà a zero l'altre comptador. Si per contra l'artefacte s'apropa al terra, s'augmentarà el comptador associat a l'apropament de l'artefacte al terra (quan la distància decreix), i es reiniciarà a zero l'altre comptador. Aquests dos fets es realitzaran sempre que encara no hagi arribat a superar 10 cap comptador, fet que indicaria que l'artefacte s'està movent en una determinada direcció. Evidentment, s'han d'emmagatzemar dos valors més de distància, el valor últim i el valor penúltim, ja que s'hauran d'utilitzar per comparar amb la distància actual.

En el cas de que algun comptador superi 10 mesures consecutives en una determinada direcció, es pot calcular la distància nova a partir de la velocitat i del temps entre mesures (retard). La velocitat de moviment ve donada per la fórmula 4, tenint en compte que l'ordre de la resta es pot invertir depenent de la direcció del moviment de l'artefacte respecte del terra:

$$velocitat\ de\ moviment = \frac{\text{última distància} - \text{penúltima distància}}{\text{retard}} \quad [4]$$

Finalment, per calcular la distància per aquest mètode, s'assumeix que la velocitat és constant, i per tant, cal comprovar aquest fet. Val a dir que poden sorgir petites imperfeccions al moure l'artefacte i produir que la velocitat no sigui del tot constant. De fet, cal considerar que la velocitat és constant amb un petit marge d'error. Per calcular



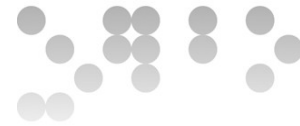
aquest marge d'error, cal verificar quin és el marge d'error que produeix el sensor HC-SR04. Per obtenir aquest marge d'error, es mesuren 1000 mesures consecutives, movent l'artefacte a una velocitat i alçada constants. L'alçada constant s'assegura fixant l'artefacte a l'extrem d'un regle, i és el regle el que es mou per sobre de la taula a una velocitat constant, de tal forma que el sensor queda fora de la taula apuntant al terra a una alçada de 73,8 cm. A partir de les mesures realitzades, s'obtenen els diferents marges d'error per a cada mesura en temes absoluts. Una vegada que s'han calculat els marges d'error per a les 1000 mesures consecutives, s'extreu el màxim marge d'error produït, que és 2,41%. Es considera que multiplicant aquest valor per 3 s'obté un marge d'error de seguretat suficient. Per tant, s'assumeix que el marge d'error adequat serà de 7,24%.

Una vegada calculades les distàncies última i penúltima, i calculades les respectives velocitats de moviment última i penúltima, el marge d'error de seguretat anterior s'utilitzarà per determinar si les dues velocitats són constants o no. En el cas de ser-ho, la nova distància vindrà donada per la fórmula 5:

$$\text{distància} = (\text{velocitat de moviment} \cdot \text{retard}) + \text{última distància} \quad [5]$$

En l'annex 3 es descriu l'algorisme inicial modificat amb la implementació d'aquesta millora. A continuació es mostra un extracte de l'algorisme que implementa la millora descrita en aquesta secció.

```
if ( comptador_dist_creix<=10 && comptador_dist_decreix<=10 ) {
  Serial.println(distancia);
  if ( distancia>distancia_anterior_ult ) {
    comptador_dist_creix++;
    comptador_dist_decreix=0;
  } else {
    if ( distancia<distancia_anterior_ult ) {
      comptador_dist_decreix++;
      comptador_dist_creix=0;
    } else {
      comptador_dist_decreix=0;
      comptador_dist_creix=0;
    }
  }
}
distancia_anterior_penult=distancia_anterior_ult;
distancia_anterior_ult=distancia;
```



```

    } else {
        velocitat_moviment_anterior = velocitat_moviment;
        if ( comptador_dist_creix>10 ) { /* s'està allunyant el sensor de l'objecte */
            velocitat_moviment = ( distancia_anterior_ult - distancia_anterior_penult ) / retard;
            comptador_dist_creix--;
        } else { /* comptador_dist_decreix>10 ; s'està apropant el sensor de l'objecte */
            velocitat_moviment = ( distancia_anterior_penult - distancia_anterior_ult ) / retard;
            comptador_dist_decreix--;
        }
    }

    if ( ( velocitat_moviment < (velocitat_moviment_anterior+(velocitat_moviment_anterior*7.24/100) ) )
    || (velocitat_moviment > velocitat_moviment_anterior-(velocitat_moviment_anterior*7.24/100)) ) {
        distancia = ( velocitat_moviment * retard ) + distancia_anterior_ult;
    }
    Serial.println(distancia);
}

```

6.4.2. Filtre de Kalman

En l'algorisme de la secció anterior també s'ha implementat el filtre de Kalman, per corregir els possibles errors al temps que l'artefacte es va movent en l'alçada.

El filtre de Kalman és un algorisme desenvolupat per Rudolf E. Kalman l'any 1960 que serveix per poder identificar l'estat ocult o no mesurable d'un sistema dinàmic lineal, i ve donat per la fórmula 6.

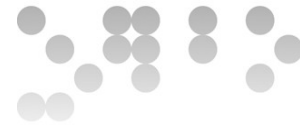
$$x(k)=F \cdot x(k-1)+G \cdot a(k) \quad [6]$$

on:

- $x(k)$ és un vector de 1x2 format per la posició en l'instant k i la velocitat en l'instant k .
- F és la matriu 2x2 donada per la fórmula 7:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & retard \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad [7]$$

- *retard* és el temps que espera el sensor entre dues mesures consecutives.



- $x(k-1)$ és un vector de 1×2 format per la posició en l'instant $k-1$ (instant anterior) i la velocitat en l'instant $k-1$, donat per la fórmula 8:

$$x(k-1) = \begin{pmatrix} \text{posició}(k-1) \\ \text{velocitat}(k-1) \end{pmatrix} \quad [8]$$

- G és un vector de 1×2 donat per la fórmula 9:

$$G = \begin{pmatrix} \frac{\text{retard}^2}{2} \\ \text{retard} \end{pmatrix} \quad [9]$$

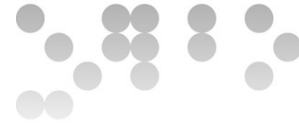
- $a(k)$ és l'acceleració en l'instant k . En el present cas valdrà zero, ja que s'assumeix que la velocitat és constant, donat que s'aplica la velocitat de l'instant $k-1$ per tal de calcular la posició en l'instant k . Com que la velocitat és constant, $\text{velocitat}(k)$ serà igual a $\text{velocitat}(k-1)$.

Per tant, després del que s'acaba d'exposar, la fórmula inicial (6) quedaria resumida en la fórmula 10:

$$\begin{pmatrix} \text{posició}(k) \\ \text{velocitat}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \text{retard} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{posició}(k-1) \\ \text{velocitat} \end{pmatrix} \quad [10]$$

Realitzant l'operació de multiplicació de les dos matrius de la part dreta, esdevé la fórmula 11:

$$\begin{pmatrix} \text{posició}(k) \\ \text{velocitat}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 \cdot \text{posició}(k-1)) + \text{retard} \cdot \text{velocitat} \\ (0 \cdot \text{posició}(k-1)) + 1 \cdot \text{velocitat} \end{pmatrix} \quad [11]$$

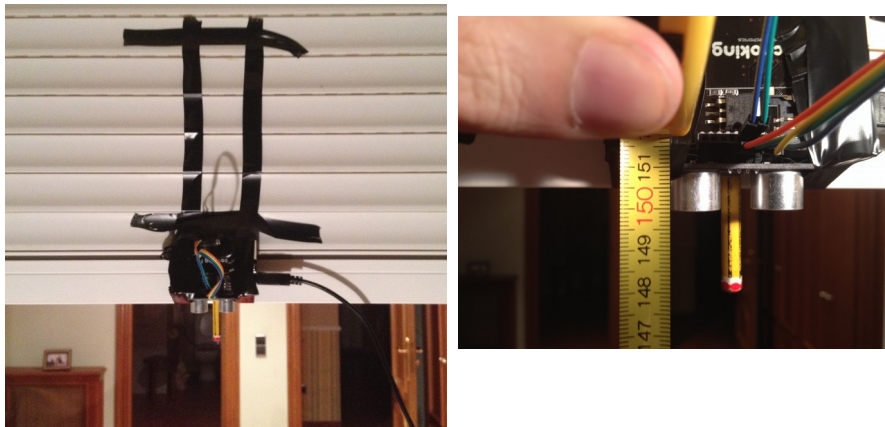


Per tant, la posició en l'instant k ve donada per la fórmula 12:

$$x(k) = (1 \cdot \text{posició}(k-1)) + (\text{retard} \cdot \text{velocitat}) \quad [12]$$

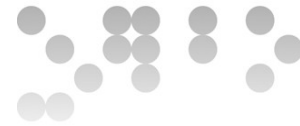
Aquesta millora queda implementada en l'algorisme emprat en l'annex 3.

Per comprovar les millores en l'algorisme, s'ha instal·lat l'artefacte amb el sensor en l'extrem inferior d'una persiana automàtica, per poder mesurar la distància entre el sensor i el terra a mesura que la persiana va baixant. En la il·lustració 26 es mostra el muntatge realitzat.

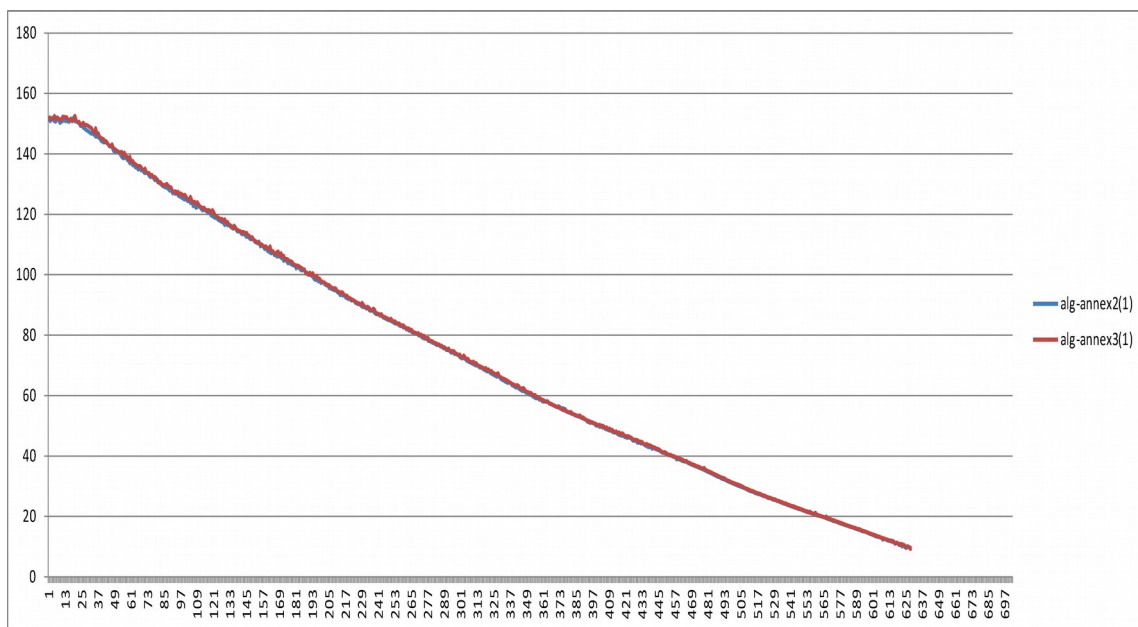


Il·lustració 26. Instal·lació de l'artefacte a una persiana per mesurar en moviment

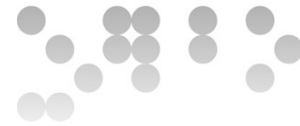
La persiana està situada inicialment de forma que la distància entre el sensor i l'objecte situat al terra és de 150 cm, i va baixant a una velocitat constant fins que arriba a una distància de 10 cm. S'ha instal·lat un objecte de fusta al terra per assegurar que la superfície del terra estigui correctament a nivell. Concretament, s'han realitzat tres proves amb l'algorisme inicial de l'annex 2, i tres proves amb l'algorisme descrit en



l'annex 3 amb les millores implementades. En la il·lustració 27 mostra una gràfica que representa l'alçada de l'artefacte en funció de totes les mesures consecutives que realitza el sensor durant la baixada de la persiana, i es compara la primera prova realitzada per a cada algorisme, ja que en les altres dues les gràfiques són molt semblants. Com es pot observar, la diferència no és gens gran, tot i que amb l'aplicació de les millores en el moviment amb el càlcul a partir de la velocitat i l'aplicació del filtre de Kalman (línia roja), les mesures s'aproximen més al que s'espera d'una baixada a velocitat constant, aconseguint una línia més contínua.



Il·lustració 27. Mesura a velocitat constant de 150 cm a 10 cm aplicant els dos algorismes descrits

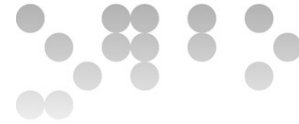


7. Conclusions

Els sistemes globals de posicionament i navegació (GNSS) estan actualment incorporats en multitud de dispositius, com ara telèfons mòbils, navegadors, etc. Els GNSS funcionen de manera òptima en espais oberts, però fracassen en interiors d'edificis per la pèrdua de qualitat del senyal necessària per al posicionament. Per a interiors, s'han proposat diversos sistemes de posicionament, com ara la utilització de balises, sistemes de posicionament inercials, sistemes de localització en interiors basats en radiofreqüència, tecnologies acústiques, tecnologies òptiques, etc.

En aquest treball de recerca s'estudia la possibilitat de posicionar en la coordenada z mitjançant un sistema d'ultrasons amb una placa Arduino, amb l'objectiu d'obtenir dades que ajudin a permetre millorar el posicionament *indoor*. I per tant, es dissenya un sistema de posicionament en alçada mitjançant ultrasons i Arduino. Prèviament, es fa un estudi de l'estat de l'art actual, fent una revisió exhaustiva de les diferents tecnologies emprades en els sistemes de posicionament *indoor*: infrarojos, ultrasons, radiofreqüència, magnètics, basats en la visió, basats en el so audible i híbrids. També es revisen les tècniques habituals utilitzades per al càlcul de la posició en aquests sistemes de posicionament, fent èmfasi a les tècniques utilitzades per a calcular la posició utilitzant ultrasons.

En primer lloc es descriu el hardware utilitzat: una placa Arduino i el sensor d'ultrasons HC-SR04. També es descriu com es porten a terme les connexions dels dos dispositius. A continuació, es proposa un algorisme bàsic per mesurar l'alçada de l'artefacte respecte del terra, només tenint en compte el temps que tarda el senyal d'ultrasò en viatjar des del sensor fins al terra, i es mostren de manera gràfica els resultats obtinguts. A partir d'aquest algorisme, s'estudien diferents factors que contribueixen a obtenir un nivell de precisió major en els resultats. Concretament, s'introdueix una millora bàsica respecte a la temperatura ambient, i es demostra que la velocitat amb la qual viatgen els senyals d'ultrasons depenen de la temperatura. Posteriorment es fa un estudi més detallat de

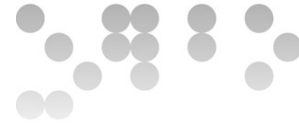


diferents materials que es poden trobar en el terra o parets, com ara paviment de gres, metacrilat, cartró, vidre, fusta, ouera i escuma. En especial, es constata que molts d'aquests materials, com ara el gres, metacrilat, cartró, vidre i fusta, donen un nivell de precisió molt alt en les mesures obtingudes. En canvi, els estudis en l'ouera i escuma demostren que les formes particulars d'aquests objectes distorsionen les mesures, donant lloc a mesures totalment errònies.

Seguidament s'estudia quin és l'angle efectiu del sensor HC-SR04, tant en entorns totalment oberts i lliures d'obstacles, com en un entorn molt més tancat i limitat, com és un tub de PVC. L'angle efectiu de treball d'aquest sensor en un entorn obert és d'uns $22,5^\circ$ com a màxim per a cada costat, però en canvi es constata que en entorn més limitat aquest angle pot arribar fins a 45° .

Per últim, s'estudia de manera breu quins resultats s'obtenen al posar en moviment l'artefacte, i es proposa millorar els resultats obtinguts prèviament amb el càlcul de la distància a partir de la velocitat constant que porta l'artefacte, juntament amb l'aplicació del filtre de Kalman. Es comprova que existeixen lleus diferències, i que es suavitza el comportament del sensor davant d'una baixada a velocitat constant en l'alçada.

Futures línies de recerca en base a aquest projecte són estudiar més a fons com afecten diferents temperatures a les distàncies obtingudes, i estudiar com pot afectar l'acceleració a les mesures, variant la velocitat de moviment.



8. Annexos

En aquesta secció s'exemplifiquen els diferents algorismes utilitzats per a programar la placa Arduino i el sensor HC-SR04.

Annex 1. Algorisme utilitzat per al càlcul bàsic de l'alçada del sensor respecte del terra

```

/* Càlcul de la distància amb sensor d'ultrasons HC-SR04
 * Manu Macías
 */

/* Definició de constants
 * TRIG_PIN és la connexió del pin TRIG realitzada al port digital 12
 * ECHO_PIN és la connexió del pin ECHO realitzada al port digital 13
 */
#define TRIG_PIN 12
#define ECHO_PIN 13

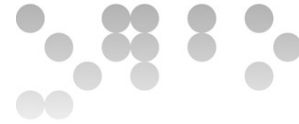
void setup() {
  /* Inicialització comunicació sèrie */
  Serial.begin (9600);
  /* Inicialització dels pins */
  pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
}

void loop() {
  double temps, distancia;

  /* ENVIAMENT DE L'ULTRASÓ */
  /* Assegurem que el pin TRIG està a nivell baix durant 2 microsegons */
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  /* S'envia un ultrasó durant 10 microsegons */
  digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH); // Pin TRIG a nivell alt
  delayMicroseconds(10); // Duració durant la qual el pin TRIG està a nivell alt
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW); // Pin TRIG a nivell baix

  /* RECEPCIÓ DE L'ULTRASÓ */
  temps = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH); // Temps que tarda el ultrasó en anar i tornar, en
microsegons

```

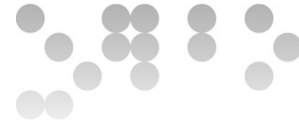


```

/* Càlcul de la distància */
/* Velocitat dels ultrasons = 340 m/s
 * Com que ens interessa treballar en cm i en microsegons, convertim la velocitat:
 * 340 m/s = 340*100 cm/s = (340*100) / (1*1000000) cm/microsegons = 0,034
cm/microsegons
*/
distancia = (temps * 0.034) / 2;
/* distancia = (temps * 0,034) / 2, ja que només ens interessa la meitat de la
distància mesurada.
 * ja que s'ha mesurat el temps que tarda en anar i tornar fins al terra
*/

/* IMPRESSIÓ DELS VALORS OBTESOS */
/* El sensor HC-SR04 només medeix distàncies entre 2 cm i 500 cm, per tant caldrà
informar
 * quan la mesura obtesa no estigui en aquest rang, ja que podria ser errònia.
*/
if ( distancia >= 500 ) {
  Serial.println("FORA DE RANG - Distancia >= 500");
} else {
  if ( distancia <= 2 ) {
    Serial.println("FORA DE RANG - Distancia <= 2");
  }
  else {
    Serial.println(distancia);
  }
}
/* Cal introduir un retard entre cada cicle loop en microsegons */
delay(30);
}

```



Annex 2. Algorisme utilitzat per al càlcul bàsic de l'alçada del sensor respecte del terra tenint en compte la temperatura ambient

```

/* Càlcul de la distància amb sensor d'ultrasons HC-SR04
 * Manu Macías
 */

/* Definició de constants
 * TRIG_PIN és la connexió del pin TRIG realitzada al port digital 12
 * ECHO_PIN és la connexió del pin ECHO realitzada al port digital 13
 */
#define TRIG_PIN 12
#define ECHO_PIN 13

/* Estudi de la temperatura */
#define K 1.4
#define R_M 287
#define TEMP_KELVIN 293.15
#define TEMP_CELSIUS 18.00

void setup() {
  /* Inicialització comunicació sèrie */
  Serial.begin (9600);
  /* Inicialització dels pins */
  pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
}

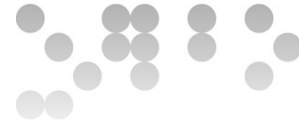
void loop() {
  double temps, distancia, velocitat;

  /* ENVIAMENT DE L'ULTRASÓ */
  /* Assegurem que el pin TRIG està a nivell baix durant 2 microsegons */
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  /* S'envia un ultrasó durant 10 microsegons */
  digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH); // Pin TRIG a nivell alt
  delayMicroseconds(10); // Duració durant la qual el pin TRIG està a nivell alt
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW); // Pin TRIG a nivell baix

  /* RECEPCIÓ DE L'ULTRASÓ */
  temps = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH); // Temps que tarda el ultrasó en anar i tornar, en
microsegons

  /* velocitat més exacta = sqrt (k*R*T/m)
   * on k = factor dels calors específics, 1.4 per a l'aire
   * on R/m = 287 per a l'aire

```



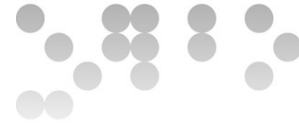
```

    * T = 293,15 Kelvin per a l'aire per a 20 graus --> en les proves realitzades amb 16
    graus --> T = 289.15 Kelvin
    */
    velocitat = sqrt (K * R_M *(TEMP_KELVIN - 20 + TEMP_CELSIUS))*100/1000000;

    distancia = (temps * velocitat) / 2;
    /* distancia = (temps * 0,034) / 2, ja que només ens interessa la meitat de la
    distància mesurada.
    * ja que s'ha mesurat el temps que tarda en anar i tornar fins al terra
    */

    /* IMPRESSIÓ DELS VALORS OBTESOS */
    /* El sensor HC-SR04 només medeix distàncies entre 2 cm i 500 cm, per tant caldrà
    informar
    * quan la mesura obtesa no estigui en aquest rang, ja que podria ser errònia.
    */
    if ( distancia >= 500 ) {
        Serial.println("FORA DE RANG - Distancia >= 500");
    } else {
        if ( distancia <= 2 ) {
            Serial.println("FORA DE RANG - Distancia <= 2");
        }
        else {
            Serial.println(distancia);
        }
    }
    /* Cal introduir un retard entre cada cicle loop en microsegons */
    delay(30);
}

```



Annex 3. Algorisme que calcula l'alçada del sensor respecte del terra tenint en compte la velocitat de moviment i aplicant el Filtre de Kalman

```

/* Càlcul de la distància amb sensor d'ultrasons HC-SR04
 * Manu Macías
 */

/* Definició de constants
 * TRIG_PIN és la connexió del pin TRIG realitzada al port digital 12
 * ECHO_PIN és la connexió del pin ECHO realitzada al port digital 13
 */
#define TRIG_PIN 12
#define ECHO_PIN 13

/* Estudi de la temperatura */
#define K 1.4
#define R_M 287
#define TEMP_KELVIN 293.15
#define TEMP_CELSIUS 18.00

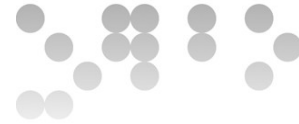
/* Aquest comptador compta el nombre de vegades
 * que s'ha fet una mesura en el mateixa direcció
 * En cas d'arribar a 10, s'aplicaria el càlcul per velocitat
 */
int comptador_dist_creix=0;
int comptador_dist_decreix=0;

double          distancia_anterior_ult=0,          distancia_anterior_penult=0,
velocitat_moviment_anterior;
int retard=30;

void setup() {
  /* Inicialització comunicació sèrie */
  Serial.begin (9600);
  /* Inicialització dels pins */
  pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
}

void loop() {
  double temps, distancia, velocitat, velocitat_moviment=0, t_kelvin=293.15,
t_celsius=16.00;
  /* ENVIAMENT DE L'ULTRASÓ */
  /* Assegurem que el pin TRIG està a nivell baix durant 2 microsegons */
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  /* S'envia un ultrasó durant 10 microsegons */

```



```

digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH); // Pin TRIG a nivell alt
delayMicroseconds(10); // Duració durant la qual el pin TRIG està a nivell alt
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW); // Pin TRIG a nivell baix

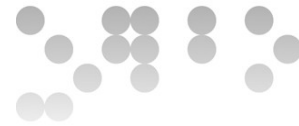
/* RECEPCIÓ DE L'ULTRASÓ */
temps = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH); // Temps que tarda el ultrasó en anar i tornar, en
microsegons

/* velocitat més exacta = sqrt (k*R*T/m)
 * on k = factor dels calors específics, 1.4 per a l'aire
 * on R/m = 287 per a l'aire
 * T = 293,15 Kelvin per a l'aire per a 20 graus --> en les proves realitzades amb 16
graus --> T = 289.15 Kelvin
 */
velocitat = sqrt (K * R_M *(TEMP_KELVIN - 20 + TEMP_CELSIUS))*100/1000000;

distancia = (temps * velocitat) / 2;
/* distancia = (temps * 0,034) / 2, ja que només ens interessa la meitat de la
distància mesurada.
 * ja que s'ha mesurat el temps que tarda en anar i tornar fins al terra
 */

/* IMPRESSIÓ DELS VALORS OBTESOS */
/* El sensor HC-SR04 només medeix distàncies entre 2 cm i 500 cm, per tant caldrà
informar
 * quan la mesura obtesa no estigui en aquest rang, ja que podria ser errònia.
 */
if ( distancia >= 500 ) {
  Serial.println("FORA DE RANG - Distancia >= 500");
} else {
  if ( distancia <= 2 ) {
    Serial.println("FORA DE RANG - Distancia <= 2");
  }
  else {
    if ( comptador_dist_creix<=10 && comptador_dist_decreix<=10 ) {
      Serial.println(distancia);
      if ( distancia>distancia_anterior_ult ) {
        comptador_dist_creix++;
        comptador_dist_decreix=0;
      } else {
        if ( distancia<distancia_anterior_ult ) {
          comptador_dist_decreix++;
          comptador_dist_creix=0;
        } else {
          comptador_dist_decreix=0;
          comptador_dist_creix=0;
        }
      }
    }
    distancia_anterior_penult=distancia_anterior_ult;
    distancia_anterior_ult=distancia;
  } else {

```

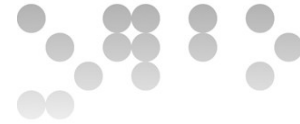
```

    velocitat_moviment_anterior = velocitat_moviment;
    if ( comptador_dist_creix>10 ) { /* s'està allunyant el sensor de l'objecte
*/
        velocitat_moviment = ( distancia_anterior_ult -
distancia_anterior_penult ) / retard;
        comptador_dist_creix--;
    } else { /* comptador_dist_decreix>10 ; s'està apropant el sensor de
l'objecte */
        velocitat_moviment = ( distancia_anterior_penult -
distancia_anterior_ult ) / retard;
        comptador_dist_decreix--;
    }

    if ( ( ( velocitat_moviment < (velocitat_moviment_anterior+
(velocitat_moviment_anterior*7.24/100) ) ) || (velocitat_moviment >
velocitat_moviment_anterior-(velocitat_moviment_anterior*7.24/100)) ) ) {
        distancia = ( velocitat_moviment * retard ) + distancia_anterior_ult;
    }
    Serial.println(distancia);
}
}
}

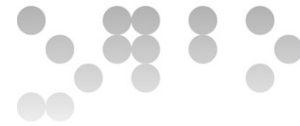
/* Cal introduir un retard entre cada cicle loop en microsegons */
delay(retard);
}

```

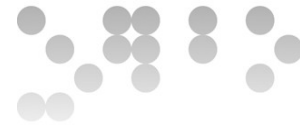


9. Referències

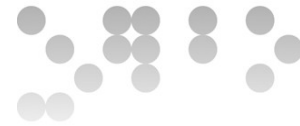
1. B. Hofmann, H. Wellinhof, and H. Lichtenegger, "GPS: Theory and Practice", Springer-Verlag, Vienna, 1997.
2. Jack Brassil. *Improving Indoor Positioning Accuracy with Dense, Cooperating Beacons*. Procedia computer science [1877-0509], 2014.
3. Lucian Ioan Iozan, Jussi Collin, Jarmo Takala, Corneliu Rusu. *Inertial Indoor Navigation System*.
4. T. Lin and P. Lin, "Performance comparison of indoor positioning techniques based on location fingerprinting in wireless networks", *Proc. International Conference Wireless Network, Communications and Mobile Computing*, vol. 2, June, 2005, pp. 1569-1574.
5. K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, "Properties of indoor received signal strength for WLAN location fingerprinting", *Proc. 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MobiQuitous '04)*, Boston, Mass, USA, August 2004, pp. 14-23.
6. A. Madhavapeddy, D. Scott, and R. Sharp, "Context-Aware Computing with Sound," *Proc. 5th Intl Conference on Ubiquitous Computing*, October 2003.
7. Claudia Barberis, Andrea Bottino, Giovanni Malnati. *Experiencing Indoor Navigation on Mobile Devices*.
8. J. Krumm, S. Harris, B. Meyers, B. Brumitt, M. Hale, and S. Shafer, "Multi-Camera Multi-Person Tracking for Easy Living", *Proc. 3rd IEEE Int'l Workshop Visual Surveillance*, IEEE Press, Piscataway, 2000.
9. D. Focken and R. Stiefelhagen, "Towards vision-based 3-D people tracking in a smart room", *Proc. 4th IEEE Intl Conference on Multimodal Interfaces*, October 2002.
10. V. Paelke and C. Reimann, "Vision-Based Interaction - A First Glance at Playing MR Games in the Real-World Around Us", *Proc. 3rd Intl Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE 2005)*, 2005.



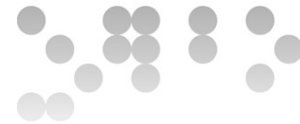
11. M. Vossiek, L. Wiebking, P. Gulden, J. Wiehardt, C. Hoffmann, and P. Heide, "Wireless Local Positioning", *IEEE Microwave Mag.*, vol. 4, Issue 4, December 2003, pp. 77-86.
12. C. di Flora, M. Ficco, S. Russo, and V. Vecchio, "Indoor and outdoor location based services for portable wireless devices", *Proc. 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 2005.
13. K. Muthukrishnan, M. E. Lijding, and P. J. M. Havinga, "Towards Smart Surroundings: Enabling Techniques and Technologies for Localization", *Proc. International Workshop on Location-and Context-Awareness*, Berlin, Germany, 2005.
14. Zhenghua Chen, Han Zou, Hao Jiang, Qingchang Zhu, Yeng Chai Soh, Lihua Xie. *Fusion of WiFi, Smartphone Sensors and Landmarks Using the Kalman Filter for Indoor Localization*.
15. Alessio Colombo, Daniele Fontanelli, David Macii, Luigi Palopoli. *Flexible Indoor Localization and Tracking Based on a Wearable Platform and Sensor Data Fusion*.
16. Busra Ozdenizci, Vedat Coskun, Kerem Ok. *NFC internal: an indoor navigation system*.
17. J. A. M. Ladd, K. E. Bekris, A. P. Rudys, D. S. Wallach, and L. E. Kavraki, "On the Feasibility of Using Wireless Ethernet for Indoor Localization", *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 5, no. 10, October 2006, pp. 555-559.
18. Gu. Yanying, A. Lo, I. Niemegeers. *A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks*.
19. J. Hightower and G. Borriello, "Location sensing techniques", Technical Report UW CSE 2001-07-30, Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 2001.
20. J. Hightower and G. Borriello, "Location Systems for Ubiquitous Computing", *IEEE Computer Society Press*, vol. 34, no. 8, 2001, pp. 57-66.



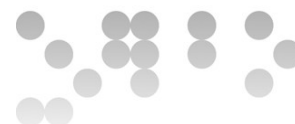
21. A. Smailagic and D. Kogan, "Location sensing and privacy in a contextaware computing environment," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 9, no. 5, 2002, pp. 10-17.
22. T. Mundt, "Two methods of authenticated positioning", *Proc. 2nd ACM International Workshop on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks*, Malaga, Spain, October 2006.
23. S. A. Zekavat, H. Tong, and J. Tan, "A Novel Wireless Local Positioning System for Airport (Indoor) Security", *Proc. SPIE*, 2004.
24. B. Brandherm and T. Schwartz, "Geo Referenced Dynamic Bayesian Networks for User Positioning on Mobile Systems", *Proc. International Workshop on Location-and Context-Awareness*, Berlin, Germany, 2005.
25. C. Delakouridis, L. Kazatzopoulos, G. P. Marias, and P. Georgiadis, "Share the Secret: Enabling Location Privacy in Ubiquitous Environments", *Proc. International Workshop on Location-and Context- Awareness*, Berlin, Germany, 2005.
26. X. Fernando, S. Krishnan, H. Sun, and K. Kazemi-Moud, "Adaptive denoising at Infrared wireless receivers", *Proc. SPIE*, 2003.
27. C. Lee, Y. Chang, G. Park, J. Ryu, S. Jeong, and S. Park, "Indoor Positioning System Based on Incident Angles of Infrared Emitters", *Industrial Electronics Society*, 2004.
28. R. Want, A. Hopper, V. Falcao, J. Gibbons, "The Active Badge Location System", *ACM Trans. Information Systems*, vol. 10, no. 1, January 1992, pp. 91-102.
29. A. Harter and A. Hopper, "A distributed location system for the active office", *IEEE Network*, vol. 8, no.1, 1994, pp. 62-70.
30. A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward and P. Webster, "The Anatomy of a Context-Aware Application," *Proc. 5th Ann. Intl Conf. Mobile Computing and Networking (Mobicom 99)*, New York, 1999, pp. 59-68.
31. Active Badge System, Web Site, 2008,
<http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attachive/ab.html>



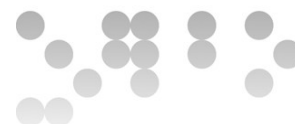
32. Cybernet Interactive, Firefly Motion Capture System, 2008,
<http://www.cybernet.com/interactive/firefly/index.html>
33. "Firefly Motion Tracking System User's guide", 1999,
<http://www.gesturecentral.com/firefly/FireflyUserGuide.pdf>
34. Northen Digital Inc. Website, Optotrak, 2008, <http://www.ndigital.com/>
35. R. States and E. Pappas, "Precision and repeatability of the Optotrak 3020 motion measurement system", *J. Medical Engineering and Technology*, vol. 30, no. 1, 2006, pp. 1-16.
36. E. Aitenbichler, M. Mhlhuser, "An IR Local Positioning System for Smart Items and Devices", *Proc. 23rd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (IWSAWC03)*, 2003.
37. Viacheslav Filonenko, Charlie Cullen, James D. Carswell. *Indoor Positioning for Smartphones Using Asynchronous Ultrasound Trilateration*.
38. Gabriel Girard, Stéphane Côté, Sisi Zlatanova, Yannick Barette, Johanne St-Pierre, Peter Van Oosterom. *Indoor Pedestrian Navigation Using Foot-Mounted IMU and Portable Ultrasound Range Sensors*.
39. Carlos Medina, José Carlos Segura, Ángel De la Torre. *Ultrasound Indoor Positioning System Based on a Low-Power Wireless Sensor Network Providing Sub-Centimeter Accuracy*.
40. Hubert Piontek, Matthias Seyffer, Jörg Kaiser. *Improving the accuracy of ultrasound-based localisation systems*.
41. I. Marin Garcia, P. Chavez Burbano, A. Munoz Arcentles, V. Calero Bravo, R. Pérez Jiménez. *Indoor location technique based on visible light communications and ultrasound emitters*.
42. Georg Oberholzer, Philipp Sommer, Roger Wattenhofer. *The SpiderBat ultrasound positioning system*.
43. A. Runge, M. Baunach, R. Kolla. *Precise self-calibration of ultrasound based indoor localization systems*.
44. Tayyab Javed. *Enabling indoor location-based services using ultrasound*.



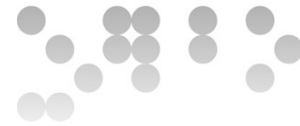
45. Active Bat website, 2008, <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/>
46. A. Ward, A. Jones, and A. Hopper, "A New Location Technique for the Active Office", *IEEE Personal Communications*, vol. 4, no. 5, October 1997, pp. 42-47.
47. Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, Hari Balakrishnan. *The Cricket Location-Support System*.
48. N. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The cricket location-support system", *Proc. ACM Conference on Mobile Computing and Networking*, 2000.
49. N. B. Priyantha, "The Cricket Indoor Location System", PhD thesis, MIT, 2005.
50. Sonitor System Website, 2008, <http://www.sonitor.com/>
51. Mike Hazas, Andy Hopper. *Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning*.
52. Laurent Segers, David Van Bavegem, Sam De Winne, An Braeken, Abdellah Touhafi, Kris Steenhaut. *An Ultrasonic Multiple-Access Ranging Core Based on Frequency Shift Keying Towards Indoor Localization*.
53. Laurent Segers, Jelmer Tiete, An Braeken, Abdellah Touhafi. *Ultrasonic multiple-access ranging system using spread spectrum and MEMS technology for indoor localization*.
54. Georg Oberholzer, Philipp Sommer, Roger Wattenhofer. *SpiderBat: Augmenting Wireless Sensor Networks with Distance and Angle Information*.
55. Ashish Pandharipande, David Caicedo. *User localization using ultrasonic presence sensing systems*.
56. L. M. Ni and Y. Liu, "LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID", *Proc. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2003, pp. 407-416.
57. H. D. Chon, S. Jun, H. Jung, and S. W. An, "Using RFID for Accurate Positioning," *Proc. International Symposium on GNSS*, Sydney, Australia, December, 2004.



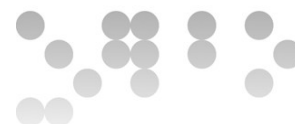
58. K. Finkenzeller, "RFID-Handbuch", Hanser Fachbuch, 1999. Also available in English as RFID Handbook: Radio-Frequency Identification Fundamentals and Applications, John Wiley and Sons, 2000.
59. Zebra Technology Company Web Site, 2008, <http://www.wherenet.com/>
60. WhereNet Web Site, 2008, <http://edu.symbol.com/docentauthorware/WhereNet/intro/intro1.asp>
61. P. Bahl and V. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF based user location and tracking system", *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 2, March 2000, pp. 775-784.
62. Ekahau, 2008, <http://www.ekahau.com/>
63. T. King, S. Kopf, T. Haenselmann, C. Lubberger and W. Effelsberg, "COMPASS: A Probabilistic Indoor Positioning System Based on 802.11 and Digital Compasses", *Proc. First ACM Intl Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation and CHaracterization (WiNTECH)*, Los Angeles, CA, USA, September, 2006.
64. P. Prasithsangaree, P. Krishnamurthi, and P. K. Chrysanthis, "On indoor position location with wireless LANs", *Proc. 13th IEEE Intl Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, September 2002.
65. C. Gentile and L. Klein-Berndt, "Robust location using system dynamics and motion constraints", *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, vol. 3, June 2004, pp. 1360 - 1364.
66. M. Youssef, A. Agrawala, "Handling samples correlation in the Horus system", *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 2, 7-11 March 2004, pp. 1023-1031.
67. Y. Chen, Q. Yang, J. Yin, and X. Chai, "Power-Efficient Access-Point Selection for Indoor Location Estimation", *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering*, vol. 18, no. 7, 2006, pp. 877-888.
68. D. Madigan, E. Elnahrawy, R. P. Martin, W. Ju, P. Krishnan and A. S. Krishnakuman, "Bayesian Indoor Positioning Systems", *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 2, 2005, pp. 1217-1227.



70. H. Satoh, S. Ito, and N. Kawaguchi, "Position Estimation of Wireless Access Point Using Directional Antennas", *Proc. Intl Workshop on Location-and Context-Awareness*, Berlin, Germany, 2005.
71. S. Thongthammacharl and H. Olesen, "Bluetooth Enables In-door Mobile Location Services," *Proc. Vehicular Technology Conference*, vol. 3, April 2003, pp. 2023-2027.
72. R. Bruno and F. Delmastro, "Design and Analysis of a Bluetooth-Based Indoor Localization System", *Proc. Personal Wireless Communication (PWC 2003)*, Venezia, Italy, September 2003.
73. M. Rodriguez, J. P. Pece, and C. J. Escudero, "In-building location using Bluetooth", *Proc. IWWAN*, 2005.
74. J. Hallberg, M. Nilsson, and K. Synnes, "Positioning with Bluetooth", *Proc. 10th Intl Conference on Telecommunications*, 2003.
75. A. Genco, "Three step bluetooth positioning", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3479, 2005, pp. 52-62.
76. S. Kawakubo, A. Chansavang, S. Tanaka, T. Iwasaki, K. Sasaki, T. Hirota, H. Hosaka, and H. Ando, "Wireless Network System for Indoor Human Positioning", *Proc. 1st Intl Symposium on Wireless Pervasive Computing*, 2006, pp. 1-6.
77. Topaz, 2004, www.tadlys.com/pages/Productcontent.asp?iGlobalId=2
78. J. C. F. Michel, M. Christmann, M. Fiegert, P. Gulden, and M. Vossiek, "Multisensor Based Indoor Vehicle Localization System for Production and Logistic", *Proc. IEEE Intl Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Heidelberg*, Germany, September 2006, pp. 553-558.
79. D. Niculescu and R. University, "Positioning in Ad Hoc Sensor Networks", *IEEE Network Magazine*, vol. 18, no. 4, July/August 2004.
80. X. An, R. Venkatesha Prasad, J. Wang, and I. G. M. Niemegeers, "OPT: Online Person Tracking System for Context-awareness in Wireless Personal Network", *Proc. Mobihoc*, 2006.
81. Tmote Sky, 2008, www.moteiv.com



82. Andreas Savvides, Chih-Chieh Han, Mani B. Strivastava. *Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors*.
83. S. J. Ingram, D. Harmer and M. Quinlan, "UltraWideBand Indoor Positioning Systems and their Use in Emergencies," *Proc. IEEE Conference on Position Location and Navigation Symposium*, April 2004, pp.706-715.
84. Y. Zhang, W. Liu, Y. Fang, and D. Wu, "Secure localization and authentication in ultra-wideband sensor networks", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 4, 2006, pp. 829-835.
85. Ubisense, 2008, <http://www.ubisense.net>
86. Oladimeji Onalaja, Mounir Adjrad, Mohammad Ghavami. *Ultra-wideband-based multilateration technique for indoor localisation*.
87. M. Segura, V. Mut, C. Sistema. *Ultra wideband indoor navigation system*.
88. Samuel Van de Velde, Vadim Vermeiren, Koen Verheyen, Michael Van de Velde. *Pozyx: accurate indoor positioning for Arduino*.
89. F. Raab, E. B. Blood, T. O. Steiner, and H. R. Jones, "Magnetic Position and Orientation Tracking System", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-15, no. 5, September 1979, pp. 709-718.
90. MotionStar Wireless Wbsite, 2007, <http://www.ascensiontech.com/products/motionstarwireless.php>.
91. J. Krumm, S. Harris, B. Meyers, B. Brumitt, M. Hale, and S. Shafer, "Multi-Camera Multi-Person Tracking for Easy Living", *Proc. 3rd IEEE Int'l Workshop Visual Surveillance*, IEEE Press, Piscataway, 2000.
92. D. Focken and R. Stiefelhagen, "Towards vision-based 3-D people tracking in a smart room", *Proc. 4th IEEE Intl Conference on Multimodal Interfaces*, October 2002.
93. V. Paelke and C. Reimann, "Vision-Based Interaction - A First Glance at Playing MR Games in the Real-World Around Us", *Proc. 3rd Intl Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE 2005)*, 2005.



94. B. Brumitt, B. Meyers, J. Krumm, A. Kern, and S. Shafer, "Easyliving: Technologies for intelligent environments", *Handheld and Ubiquitous Computing*, 2000.
95. A. Madhavapeddy, D. Scott, and R. Sharp, "Context-Aware Computing with Sound," *Proc. 5th Intl Conference on Ubiquitous Computing*, October 2003.
96. C. V. Lopes, A. Haghighat, A. Mandal, T. Givargis, and P. Baldi, "Localization of Off-the-Shelf Mobile Devices Using Audible Sound: Architectures, Protocols and Performance Assessment", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review*, vol. 10, Issue 2, April 2006.
97. A. Mandal, C. V. Lopes, T. Givargis, A. Haghighat, R. Jurdak, and P. Baldi, "Beep: 3D Indoor Positioning Using Audible Sound", *Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, Las Vegas, January 2005.
98. A. Belakbir, M. Amghar, N. Sbiti. *Sensor data fusion for an indoor and outdoor localization*.
99. Aiden Morrison, Valérie Renaudin, Jared B. Bancroft, Gérard Lachapelle. *Design and Testing of a Multi-Sensor Pedestrian Location and Navigation Platform*.
100. B. Kazemipur, Z. Syed, J. Georgy, N. El-Sheimy. *Vision-based context and height estimation for 3D indoor location*. 2014.
101. Lan, Kun-Chan. *Using smart-phones and floor plans for indoor location tracking*. 2014.
102. Michael E. Bacon. *Speed of Sound Versus Temperature Using PVC Pipes Open at Both Ends*, 2012.