

Posicionament *indoor* i detecció d'obstacles mitjançant sensors d'ultrasons

Treball Final de Màster

14/06/2016

Autor del treball: Eric Vidal Grau

Director del treball: Dr. Antoni Pérez Navarro

Doctorand del treball: Sergio Sosa Sesma

Índex

1. Títol.....	3
2. Autors.....	3
3. Resum.....	3
4. Introducció.....	3
5. Estat de l'art.....	4
5.1. Conceptes bàsics.....	4
5.1.1. Ultrasons.....	4
5.1.2. TDoA i ToA (o TOF).....	5
5.1.3. Trilateració i multilateració.....	5
5.1.4. <i>Hop-by-hop</i>	5
5.1.5. RSSI.....	5
5.2. Sistemes de posicionament <i>indoor</i> d'ultrasons.....	5
5.2.1. Principals sistemes de posicionament <i>indoor</i> que utilitzen ultrasons.....	6
5.2.2. Anàlisi dels sistemes de posicionament <i>indoor</i> que utilitzen ultrasons.....	8
5.3. Usos comercials del posicionament per ultrasons.....	9
5.4. Conclusions de l'estat de l'art.....	9
6. Prototip.....	10
6.1. Definició del prototip.....	11
6.2. Esquema de connexions del prototip.....	11
6.3. Programació del prototip.....	12
6.4. Detecció d'obstacles.....	12
6.4.1. Prototip sense moviment.....	12
6.4.2. Prototip en moviment.....	15
7. Conclusions.....	19
8. Annex.....	20
8.1. Annex 1. Codi Arduino del prototip.....	20
9. Referències.....	24

1. Títol

Posicionament *indoor* i detecció d'obstacles mitjançant sensors d'ultrasons

2. Autors

Autor del treball: Eric Vidal Grau (evidalgr@uoc.edu).

Director del treball: Dr. Antoni Pérez Navarro (aperezn@uoc.edu).

Doctorand del treball: Sergio Sosa Sesma (ssosas@uoc.edu).

3. Resum

Aquest projecte se centra en el posicionament *indoor*, concretament en la detecció d'obstacles mitjançant un dispositiu *Arduino* amb detectors d'ultrasons, i la posterior comunicació amb un altre dispositiu *Android* mitjançant *bluetooth*, que informará sobre les dades preses pels sensors. En primera instància es planteja com vèncer les interferències entre les ones ultrasonores emeses pels sensors i com afecta en el moment de la captació de dades. També es vol establir en quines situacions el dispositiu té més problemes per a captar les dades correctament; enmig d'una habitació, als racons, en funció de la seva orientació respecte l'obstacle etc.

4. Introducció

Actualment, els sistemes utilitzats per al posicionament en exteriors no funcionen per entorns *indoor*, siguin edificis o entorns urbans. Existeixen raons de pes per a tenir controlades les coordenades de persones o objectes en edificis de la mateixa manera que es pot fer amb un GPS en entorns *outdoor*. Hi ha sistemes que utilitzen senyals wifi o en radiofreqüència per a ubicar persones o objectes en entorns *indoor* per qüestions de seguretat, control d'estocs, etc. D'aquí neix la necessitat de desenvolupar nous mètodes per a ubicar dispositius en entorns *indoor*. Aquest projecte es centra en els sistemes de posicionament *indoor* mitjançant ultrasons, en el que s'arriba a crear un prototip per a detectar obstacles.

Els objectius plantejats en aquest projecte són els següents:

- Realització d'un estat de l'art dels sistemes de posicionament *indoor* mitjançant ultrasons.
- Construcció d'un prototip format per 4 sensors d'ultrasons en forma de creu (esquerra, dreta, davant i darrere) i una placa de comunicació *bluetooth* en una placa *Arduino*.
- Estudi del funcionament del prototip

En l'apartat d'anàlisi de l'estat de l'art desenvolupat en aquest projecte, es comenten diversos sistemes de posicionament *indoor* mitjançant ultrasons. Els principals sistemes existents permeten calcular la posició absoluta d'un dispositiu en un entorn conegut, és a dir les seves coordenades x,y,z . Per a una correcta ubicació en les tres dimensions, el dispositiu calcula la seva posició mitjançant dos tipus d'algorismes, la multilateració i la trilateració. A més a més, aquests tipus de mètodes de posicionament *indoor* mitjançant ultrasons solen necessitar senyals auxiliars, generalment en radiofreqüència.

A continuació, es presenta un nou sistema de posicionament *indoor* mitjançant ultrasons. El mètode de posicionament proposat en aquest projecte no utilitza cap node de referència i per tant, tampoc no necessita cap senyal auxiliar per a sincronitzar-se. Es tracta d'un dispositiu que integra quatre sensors d'ultrasons en forma de creu per a localitzar obstacles en quatre direccions (esquerra, dreta, davant i darrere). Al no utilitzar nodes, només es pot conèixer la seva posició relativa en un entorn *indoor*, però és un sistema que no requereix cap desplegament d'infraestructura extra cada vegada que es canvia l'entorn on es vol ubicar, ni necessita utilitzar cap mena d'algorisme per a posicionar-se. Amb el temps que triga cada senyal enviat pel sensor des que és emès fins que retorna, ja n'hi ha prou per establir la distància calculada. A més a més, s'integra al dispositiu una placa *bluetooth* que permet comunicar les dades calculades en cada presa de dades a un dispositiu *Android* vinculat. Per a comprovar la robustesa d'aquest

sistema, es fan proves amb el dispositiu en moviment i quiet, per tal de d'observar en quines situacions el càlcul es pot considerar vàlid i quines necessita millorar.

A continuació, es presenta el treball. En l'apartat 5 es fa l'anàlisi de l'estat de l'art. A continuació, en l'apartat 6 es presenta el prototip, els elements que el componen, com s'han programat i es fa un estudi del seu funcionament. En l'apartat 7 es fan les conclusions del projecte. En l'apartat 8 s'hi adjunta el codi del prototip, i per acabar, en l'apartat 9 hi ha les referències utilitzades en aquest treball.

5. Estat de l'art

En aquest apartat es comenten sistemes de posicionament *indoor* que utilitzen els ultrasons com a eina principal de detecció i els usos comercials que tenen aquests tipus de sistemes. El primer punt és a mode d'explicació de conceptes que apareixen a continuació.

5.1. Conceptes bàsics

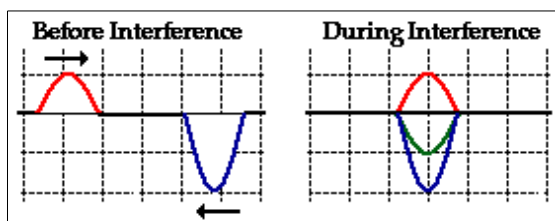
Els conceptes explicats en aquest apartat es consideren necessaris per a entendre els sistemes de posicionament *indoor* mitjançant ultrasons que s'expliquen en aquest estat de l'art. Primerament s'explica què són els ultrasons. A continuació es presenten les dues maneres utilitzades pels principals sistemes de posicionament *indoor* per a calcular la distància entre dos punts, el *Time of Flight* i el *Time Difference of Arrival*. Llavors, en funció de com es calcula la distància entre els punts que componen un sistema, s'utilitza una algorisme o un altre, o bé la trilateració o bé la multilateració.

Per acabar, es comenta el mètode de comunicació *hop-by-hop*, utilitzat en la comunicació entre nodes pel sistema *DOLPHIN*, i el concepte RSSI, que és la manera que té el sistema *TELIAMADE* d'analitzar la proximitat dels nodes respecte un altre node.

5.1.1. Ultrasons

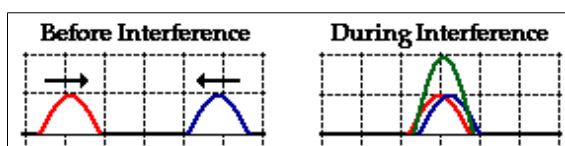
Els éssers humans poden arribar a sentir un ventall de freqüències sonores que oscil·len entre els 20Hz i els 20kHz. Les ones sonores són un tipus d'ona mecànica perquè necessita un medi per on desplaçar-se. Tota ona sonora que supera els 20kHz, no audible per una persona, es considera ultrasonora.

Com tots els tipus d'ones [1], les ones ultrasonores poden experimentar interferències quan interactuen amb d'altres ones del seu mateix tipus (sonores) en l'entorn que es desplacen. Segons el principi de superposició d'ones, es poden trobar interferències constructives, en les que les ones que interactuen es desplacen en el mateix sentit i generen una ona resultant que és la suma del seu moviment. Quan les ones que s'interfereixen es desplacen en un sentit oposat, l'ona resultant és la diferència. Per aquests casos, es tracta d'una interferència destructiva.



Imatge 1: Exemple d'interferència destructiva

Font: <http://www.physicsclassroom.com/Class/waves/u10l3c4.gif>



Imatge 2: Exemple d'interferència constructiva

Font: <http://www.physicsclassroom.com/Class/waves/u10l3c1.gif>

Per una altra banda, el fet que les ones sonores s'han de desplaçar en un medi degut a la seva condició de tipus d'ona mecànica, fa que a mesura que es desplacen s'atenuïn. Quan el medi pel qual es desplacen és l'aire, aquesta atenuació [2] dependrà de la temperatura, la pressió, la humitat i la freqüència del so.

5.1.2. TDoA i ToA (o TOF)

A partir de la distància que recorre un senyal o més des del punt d'emissió fins al punt de recepció es pot saber la distància que hi ha entre aquests dos punts.

Per una banda, es pot esbrinar la distància entre dos punts a partir de la diferència d'arribada a un receptor entre dos senyals emesos al mateix moment des d'un punt d'origen, en anglès *Time Difference of Arrival* (TDoA) [3] [4] [5]. Es tracta d'un sistema que no necessita que l'emissor i el receptor estiguin sincronitzats degut a que els senyals s'emeten al mateix moment des d'un node emissor que per la seva banda s'encarrega que els senyals en RF i ultrasonor sí que estiguin sincronitzats a l'hora de ser emesos. El sistema de posicionament *indoor Cricket* utilitza aquest mètode per a calcular la distància entre dos punts.

Per l'altra banda, també es pot saber la distància entre dos punts a partir del temps que triga a viatjar un sol senyal des d'un punt a un altre, en anglès es pot anomenar *Time Of Flight* (TOF) o *Time of Arrival* (ToA) [3] [4] [5]. Per aquest cas, l'emissor i el receptor han d'estar sincronitzats per definir l'instant d'emissió del senyal. *Active Bat* o *TELIAMADE* són exemples de sistemes de posicionament *indoor* que utilitzen aquest sistema per a calcular la distància entre dos punts.

5.1.3. Trilateració i multilateració

Coneguda la distància d'un punt desconegut respecte uns d'altres amb ubicació coneguda en una sala, es poden calcular també les seves coordenades. Hi ha principalment dos algorismes que ho permeten, la trilateració i la multilateració [4] [5].

La trilateració permet calcular la ubicació d'un punt a partir de la distància d'aquest respecte d'altres punts coneguts (de referència). Per a fer aquest càlcul en un entorn de tres dimensions es necessita un mínim de quatre punts de referència en diferents plans. Les distàncies en la trilateració es defineixen mitjançant el TOF.

Per la seva banda, la multilateració funciona igual que la trilateració amb l'única diferència que la distància entre el punt a definir en un entorn respecte els altres de referència es calcula mitjançant el TDoA.

5.1.4. Hop-by-hop

Hop-by-hop [6] és un sistema de comunicació de dades en una xarxa on no tots els nodes han d'estar connectats directament entre ells. El fet que tots els nodes comparteixin la seva informació i la de la resta amb tots els altres, permet que dos nodes que no tenen connexió directa es comuniquin via tercers nodes. El sistema de posicionament *indoor DOLPHIN* utilitza aquest sistema per a la comunicació entre nodes.

5.1.5. RSSI

Received Signal Strength Indicator o RSSI [4] [5] és un indicador de la potència de senyal rebut per part d'un punt respecte un altre que estigui emetent senyal. A partir d'aquest valor calculat en un node, es pot saber quins emissors hi ha al seu voltant i la seva proximitat o possibilitats de comunicació. El sistema de posicionament *TELIAMADE* utilitza aquest valor en el seu algorisme.

5.2. Sistemes de posicionament *indoor* d'ultrasons

Si bé existeixen sistemes de posicionament *indoor* que utilitzen d'altres eines per a localitzar dispositius en una sala, com els infrarojos, aquest apartat es centra en els que utilitzen els ultrasons. Aquests sistemes solen requerir d'altres tipus de senyals per a tenir una referència amb què calcular la distància entre nodes o senzillament que estiguin sincronitzats entre ells. Aquest senyal sol ser en radiofreqüència.

5.2.1. Principals sistemes de posicionament *indoor* que utilitzen ultrasons

A partir de la recerca d'informació feta, es comenten els sistemes de posicionament *indoor* que utilitzen ultrasons que es consideren més significatius; *Cricket*, *Active Bat*, *TELIAMADE* i *DOLPHIN*.

Pel que respecta als sistemes *Cricket* i *Active Bat*, se'ls considera importants degut a que són els primers projectes de posicionament *indoor* que van començar a utilitzar ultrasons. A més a més, la majoria d'articles que parlen de posicionament *indoor*, els utilitzen com a referència.

Pel que respecta als sistemes *TELIAMADE* i *DOLPHIN*, es decideix afegir-los en aquest estat de l'art perquè són projectes de creació recent i incorporen millores respecte *Cricket* i *Active Bat*. *DOLPHIN* utilitza el sistema *hop-by-hop*, que permet que tots els nodes estiguin permanentment informats de les dades de la resta a mesura que el sistema s'actualitza. *TELIAMADE* per la seva banda, utilitza el sistema RSSI, que li permet saber quins nodes són els que hi ha més a prop del node a ubicar i utilitza només els necessaris.

a) *Cricket*

El sistema de posicionament *indoor Cricket* [7] [8] utilitza una sèrie de punts de referència o balises (en anglès *beacons*) ubicats als elements estructurals d'una habitació com el sostre, que emeten senyals de forma periòdica. A partir d'aquests punts de referència es defineixen les coordenades x,y,z a l'habitació per part d'un receptor anomenat *listener*. Si bé les balises i els receptors són el mateix tipus de dispositiu, quan treballen com a receptors no emeten mai cap tipus de senyal, així doncs només el receptor coneix la seva ubicació. Els receptors poden mesurar distàncies amb una precisió de 5 cm, i les balises poden detectar els obstacles amb una precisió d'1cm. Amb aquestes condicions, el sistema de posicionament *indoor Cricket* permet estimar la posició d'un objecte amb 10 cm de precisió i la seva orientació amb una precisió de 3 graus.

Cada balisa emet dos senyals de forma periòdica, un en radiofreqüència (RF) que conté informació pròpia de la balisa com la seva id única o les seves coordenades, i un senyal en ultrasons, que no conté cap informació. Val a dir que, a diferència de les ones en RF, les ones ultrasonores es veuen afectades pels obstacles. Per tant, només s'utilitzen com a punt de referència les balises que aconsegueixen enviar els dos senyals al receptor.

El receptor rep els senyals de cada balisa, i la distància respecte cadascuna es calcula a partir de la diferència d'arribada (TDoA o *Time Difference of Arrival*) dels senyals en RF i ultrasons, ja que l'ona en RF viatja a més velocitat. Concretament, una ona en RF viatja a la velocitat de la llum i una ona ultrasonora a la velocitat del so. A continuació, el receptor avalua la informació que li han enviat les diferents balises i en funció de la ubicació d'aquestes i la distància a la que està de cada balisa, calcula la seva posició i orientació a la sala mitjançant un algorisme de multilateració.

b) *Active bat*

El sistema *Active Bat* és un projecte derivat d'un altre anomenat *Active Badges* [9], que és un sistema de posicionament *indoor* basat en comunicació via senyals infrarojos. Pot ubicar un dispositiu amb una precisió de 3 cm en les coordenades x,y,z .

Active Bat [10] [11] basa el seu funcionament en un dispositiu mòbil a ubicar en una sala, que emet senyals ultrasonors que incideixen en punts coneguts al sostre de la sala que fan de receptors. A partir de l'estona que ha estat viatjant el senyal per arribar al receptor (TOF, *Time of Flight* o ToA, *Time of Arrival*) es pot saber a la distància de la que el dispositiu mòbil està dels receptors. Aquests receptors estan connectats en xarxa a una estació base, que tracta les dades rebudes per ubicar dins la sala l'emissor mitjançant un algorisme de trilateració, en la mesura que ha rebut informació de tres o més receptors. Per a que un emissor s'activi, l'estació base li ha d'enviar un senyal en radiofreqüència. Llavors, és quan l'emissor envia senyals ultrasonors per a ser ubicat i orientat dins la sala. Per a establir el TOF, es pren com a temps inicial el moment que s'envia el senyal en RF d'activació, i com a temps final, el moment d'arribada de dades al receptor. Per a sales amb més d'un dispositiu a ubicar, cadascun ha d'operar per separat i s'ha d'esperar un temps prudencial per a activar el següent dispositiu. Amb aquest sistema s'evita que els rebots dels senyals ultrasonors emesos per a detectar el primer dispositiu no provoquin interferències al següent a ubicar.

c) TELIAMADE

TELIAMADE [12] [13] és un sistema de posicionament *indoor* resultat de la combinació entre senyals ultrasonors i en RF. Per a ubicar un dispositiu en moviment en una sala, el node mòbil, fan falta una sèrie de punts o nodes de referència, i són dispositius exactament iguals a nivell electrònic, treballin de referència o mòbils. Només en varia la programació. Aquests dos tipus de nodes, estan connectats en xarxa amb topologia d'estrella a un node central o màster, que està connectat a un PC que coordina el funcionament de tot el sistema. La precisió d'ubicació del dispositiu és de menys d'1 mil·límetre,

Per a ser ubicat, el receptor envia periòdicament un senyal en RF a tots els nodes de referència, i a partir d'aquest senyal els receptors calculen la força del senyal rebut (RSSI o *Received Signal Strength Indicator*) i retornen aquest valor al receptor també via RF. En la mesura que els nodes de referència estan més a prop, el valor RSSI és més alt. A continuació, quan el node central vol ubicar el receptor, demana els valors RSSI al receptor via missatge en RF per a saber quins nodes de referència té més a prop i els dona ordre d'ubicar el receptor. El següent pas per part dels nodes de referència escollits és emetre un senyal en ultrasons al receptor. El receptor calcula l'estona que ha estat a arribar-li cada ona (TOF o *Time Of Flight*) des que s'ha enviat l'ordre en RF des del node màster i li envia aquestes dades. A partir de la distància a la qual està el receptor de cada node de referència s'utilitza un algorisme de trilateració per a ubicar-lo dins la sala.

Amb *TELIAMADE* es pot decidir entre dos tipus de funcionament per part dels receptors, síncron o asíncron. Pel mètode síncron, en el moment d'enviar el senyal ultrasònic per ubicar el receptor, els nodes de referència emeten aquest senyal alhora. Pel mètode asíncron ho fan seqüencialment (l'un després de l'altre). Tot i que amb el segon mètode s'està alentint el temps de detecció, no s'està provocant interferències entre senyals, i això fa la detecció encara més fiable.

d) DOLPHIN

El sistema de posicionament *indoor DOLPHIN* [14] també utilitza senyals en RF i ultrasonors per a ubicar un dispositiu en un entorn *indoor*. Hi ha dos tipus d'elements: els nodes de referència, que estan ubicats en una posició fixa i coneguda; i els nodes normals, que són els nodes en moviment a ubicar dins la sala. Cada node té una ID única per a la comunicació en RF amb els altres nodes, i pot exercir tres rols en el procés de posicionament: màster, emissor o receptor. Té una precisió d'ubicació de 15 cm.

El funcionament de *DOLPHIN* es basa en que cada node té una taula amb les posicions d'altres nodes coneguts. En la mesura que el sistema de posicionament va actualitzant les ubicacions dels altres nodes, aquests s'afegeixen a les taules de cada node si encara no hi eren, o actualitzen les seves dades. És un sistema basat en el principi *hop-by-hop*, on encara que entre dos nodes no hi hagi comunicació directa, es serviran de tercers nodes per a fer-los arribar informació amb la seva ubicació.

El posicionament dels elements en la sala es tracta d'un procés periòdic, on un primer node, exercint la seva funció de màster, envia un senyal en RF a un altre node de la seva taula de punts coneguts per a que treballi d'emissor. Aquest, emet senyals ultrasonors a la resta de nodes, que actuen de receptors. Es pren com a temps inicial el senyal RF emès pel màster, i com a temps d'arribada l'instant en que els receptors reben l'ona ultrasònica emesa per l'emissor. A partir del TOF, els receptors que han rebut el senyal ultrasònic, poden calcular la distància a la que estan de l'emissor, que passat un temps per garantir que el senyal ultrasònic ha arribat a tots els receptors i aquests han pogut fer els càlculs corresponents, envia a tots els nodes un senyal RF amb dades sobre la seva ubicació per a convertir-se en punt de referència per als receptors. A continuació, els nodes que tenen tres punts de referència coneguts o més, calculen la seva ubicació i l'envien a la resta de nodes via senyal RF per a que puguin actualitzar-ne les dades o incorporar-los a la seva taula de nodes coneguts. Un cop acabat aquest procés, es torna a repetir, amb un node màster diferent, per així anar ubicant i actualitzant la informació de tots els nodes en la sala, estiguin o no en moviment.

Respecte d'altres sistemes ja comentats, el sistema de posicionament *indoor DOLPHIN* no necessita tants punts de referència, ja que els nodes fixes i els nodes mòbils es poden ajudar entre ells per a calcular la seva ubicació.

5.2.2. Anàlisi dels sistemes de posicionament *indoor* que utilitzen ultrasons

Els sistemes de posicionament comentats en el punt anterior tenen els seus pros i contres, i la seva pròpia manera de resoldre una sèrie de conflictes en la seva operabilitat. Aquests es comenten a continuació:

a) Senyals auxiliars

Tots 4 sistemes necessiten un senyal de sincronia en RF per a coordinar el sistema de posicionament o per a comunicar els nodes. El sistema *ICKON* [15] és una proposta de sistema de posicionament *indoor* que mitjançant els nodes de referència pot localitzar un node mòbil amb el TDoA dels senyals ultrasonors rebuts. Cada node es comunica amb una base central mitjançant connexió LAN.

b) Eficiència energètica

Pel que respecta a l'eficiència energètica d'aquests sistemes, tant *Cricket* com *Active Bat* es podrien considerar poc eficients, ja que tots els nodes fixes emeten els senyals en radiofreqüència i ultrasonor de forma periòdica, sense considerar la proximitat del dispositiu a localitzar. *TELIAMADE* i *DOLPHIN* utilitzen només els nodes més propers al dispositiu a ubicar. Amb la comunicació *hop-by-hop*, *DOLPHIN* encara millora més aquesta eficiència, ja que actualitza constantment les ubicacions de tots els dispositius en cada comunicació.

c) Interferències

En quant a les interferències, en aquest article, els autors Johann Borenstein i Yoram Koren consideren que n'hi pot haver de tres tipus [16]:

- Soroll ambiental.
- Soroll rebut de rebots de senyals emesos per d'altres sensors ultrasonors.
- Soroll provocat per coincidència d'àrea d'emissió de senyal de dos o més sensors, anomenat *crosstalk*.

Segons aquest altre article [17], els autors Bernhard Wirnitzer, Wolfgang M. Grimm, Hauke Schmidt i Roland Klinnert proposen els següents mètodes per a reduir o cancel·lar les interferències:

- Multiplexar en el temps, o executar en sèrie els detectors d'ultrasons. En aquest article [16], també es proposa comparar dues lectures consecutives d'un mateix sensor.
- Multiplexar en freqüència els senyals ultrasonors, com fa el sistema *3D-LOCUS* [18] [19].
- Codificar els senyals per a filtrar-los en la seva recepció. Els autors d'aquest article [17] proposen afegir un senyal de soroll aleatori al senyal original i després filtrar-lo.

Destacar també el sistema de posicionament *indoor* que es proposa en el següent article [20], on es pot veure un sistema de detecció d'obstacles incorporat a un *drone* que utilitza 12 sensors d'ultrasons. Per a evitar que els sensors es provoquin interferències entre ells, s'executen en tres grups separats en el temps, on cada grup de quatre sensors emet a 90° del sensor més proper que hi hagi treballant. El temps de treball de cada grup és de 30 ms, sent de 90 ms la durada de cada cicle de posicionament del *drone*. Els autors consideren que la separació de 90° entre els sensors del mateix grup, és la disposició que permet evitar millor les interferències. El fet d'utilitzar 12 sensors ofereix millor fiabilitat respecte el prototip que es proposa en aquest projecte, que n'utilitza 4. De totes maneres, si es volgués adaptar el prototip d'aquest projecte a 12 sensors, per qüestions de programació només pot funcionar un sensor a la vegada. Per tant, l'augment de la durada del cicle de funcionament de tots els sensors comprometria la velocitat d'actualització de tot el procés de posicionament.

La disposició dels sensors en diverses direccions també és present en el sistema *SpiderBat* [21], on cada node utilitza 4 emissors i 4 receptors d'ultrasons per a ser més precís.

Respecte els sistemes de posicionament *indoor* comentats en l'apartat anterior, cadascun té la seva manera de vèncer les interferències ultrasonores entre sensors. Pel cas de *Cricket*, al ser els nodes fixes els que emeten senyals constantment, es posicionen a una distància prudencial entre ells per a que no es puguin interferir. Pel cas d'*Active Bat* i *TELIAMADE*, cada node mòbil a ubicar emet per separat, decidint quin opera a cada moment un controlador central. A més a més, *TELIAMADE* permet que els nodes emissors de senyals ultrasonors treballin de forma asíncrona, evitant que hi hagi més d'un emissor enviant senyals ultrasonors alhora. Aquesta estratègia té l'inconvenient que el procés d'ubicació és més llarg, ja que els emissors emeten el senyal l'un rere l'altre. La solució de *DOLPHIN* és un altre cop la més eficient, on en cada període d'ubicació els dispositius intercanvien els papers entre ells (màster, emissor i receptor).

d) Nodes fixes i nodes mòbils

Pel que fa a la mobilitat dels nodes, es pot considerar *DOLPHIN* el més flexible, ja que no necessita tants punts de referència degut al mètode de comunicació *hop-by-hop*, on els seus nodes estan en contacte constantment. Pel que respecta a d'altres sistemes de posicionament *indoor*, en aquest article [22], Cyril Brignone, Tim Connors, Geoff Lyon, Salil Pradhan presenten el sistema de posicionament *SmartLOCUS*, que permet que els nodes fixes es puguin moure, si bé no poden tornar a ser utilitzats com a referència fins que tornen a estar quietos i estan ubicats dins la sala amb coordenades conegudes. En aquest altre article [23], Carl Fischer, Kavitha Muthukrishnan, Mike Hazas i Hans Gellersen proposen un sistema de posicionament *indoor* per a entorns desconeguts, on a mesura que una persona es mou dins d'un edifici ha de col·locar al terra diferents receptors per a que el guïi quan faci el camí de tornada. És una proposta orientada als bombers per a poder guiar-se en edificis quan hi ha un incendi.

Per la seva banda, en aquest article [24] Nobuo Nakajima i Kiyohiko Hattori presenten un sistema de posicionament *indoor* que no utilitza cap node de referència. Es tracta d'un sistema que utilitza un emissor d'ultrasons en una sabata i el seu receptor en l'altra sabata de la persona que porta aquest sistema de detecció, i un dispositiu dotat amb un girocompàs i un sensor de camp magnètic terrestre. A partir de la distància de cada passa calculada pel sensor d'ultrasons, i l'orientació de la persona, es pot saber la seva posició en una sala.

5.3. Usos comercials del posicionament per ultrasons

Amb l'ús generalitzat de dispositius mòbils i la seva millora tecnològica constant, cada dia s'incorporen noves tecnologies de connectivitat. De totes maneres en entorns *indoor*, els smartphones queden limitats degut a que les tecnologies de posicionament *outdoor* no són fiables. En aquest article [25] Viacheslav Filonenko, Charlie Cullen i James Carswell es plantegen si un mòbil es pot utilitzar en sistemes de posicionament *indoor* mitjançant ultrasons exercint la funció de node emissor de senyals ultrasonors. Aquest fet queda evidenciat amb aquest altre article [26], on els mateixos autors de l'anterior article presenten un nou sistema de posicionament *indoor* que utilitza el telèfon mòbil com a emissor d'ultrasons per a ubicar al seu portador en un edifici.

Per una altra banda, hi ha edificis on l'ús del telèfon mòbil pot estar prohibit o restringit per les persones, o que es vulgui identificar un objecte en moviment. Tal és el cas dels hospitals, que per qüestions de seguretat poden tenir interès en tenir ubicat al seu personal i pacients en tot moment dins del seu edifici, o senzillament tenir un control sobre material susceptible de ser robat. Les empreses *Stanley Healthcare* [27] o *Sonitor* [28] ofereixen aquests tipus de serveis.

Una altra oferta que hi ha al mercat basada en ultrasons és la de detecció d'obstacles per als vehicles com les que ofereixen les empreses *Brigade* [29] o *Bosch* [30]. Mitjançant sensors d'ultrasons, es pot informar al conductor d'un vehicle de la proximitat d'un obstacle al seu perímetre. Aquest seria un sistema vàlid tant per interior com exterior.

També existeixen mètodes desenvolupats en articles científics que poden tenir espai al mercat. En aquest article [31] S.A. Pullano, A. La Gatta, F. Ruberto i A.S. Fiorillo implementen un sistema de seguretat interior al vehicle dels passatgers, amb un sistema de 4 sensors d'ultrasons per a ubicar de forma segura cada passatger del vehicle. En aquest altre article [32] els autors Byeong-Seok Shin i Cheol-Su Lim presenten un sistema de detecció d'obstacles per a persones cegues, on una sèrie de sensors ultrasònics estudien l'entorn i si troben obstacles, ho notifiquen al portador del dispositiu mitjançant una vibració.

5.4. Conclusions de l'estat de l'art

Així doncs, en aquest anàlisi de l'estat de l'art del posicionament *indoor* mitjançant ultrasons queda palès que per a conèixer la posició absoluta d'un objecte en un entorn *indoor* és necessari desplegar una sèrie de punts de referència. Aquests punts de referència, juntament amb els nodes mòbils a ubicar, necessiten estar sincronitzats per tenir una referència en el temps i poder calcular la distància recorreguda per l'ona ultrasonora. La sincronització d'aquests nodes sol ser mitjançant un senyal en RF. A més a més, per a evitar que les ones ultrasonores emeses pels nodes fixes i mòbils s'interfereixin entre elles, es necessita que estiguin a una certa distància per que els camps d'emissió no coincideixi en algun punt, o bé multiplexar la seva execució en el temps.

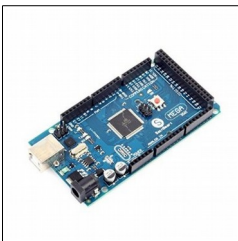
Si bé es poden conèixer les coordenades d'un dispositiu, aquestes sempre són en un entorn al cent per cent conegut, i no pot reconèixer cap mena de variació dels seus elements estructurals o la incorporació de nous elements sense haver-los identificat amb algun tipus de node de referència prèviament. És a dir, en un entorn *indoor* es pot saber la distància d'un dispositiu a ubicar respecte la paret, però si entre la paret i el dispositiu s'hi ubica un nou obstacle (objecte o persona), a través dels sistemes de posicionament *indoor* comentats no es pot saber. Així doncs, el sistema que es proposa en aquest projecte, si s'afegeix en un sistema de posicionament *indoor* com els que es comenten en aquest estat de l'art, suposa una millora substancial en el reconeixement de l'entorn per part del dispositiu a ubicar, ja que li aporta informació d'obstacles no contemplats en el desplegament de nodes fixes.

6. Prototip

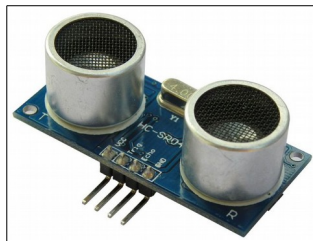
En aquest projecte es planteja crear un prototip que permet detectar obstacles en les quatre direccions (esquerra, dreta, davant i darrere) i que comunica les dades calculades a un dispositiu Android mitjançant comunicació *bluetooth*. Les metodologies utilitzades són *Design and Creation* i *Experiments*.

Pel que respecta a la metodologia *Design and Creation*, s'ha creat un prototip o artefacte que amb elements de programació i electrònics ja existents es pretén resoldre un nou conflicte. En quant als elements de programació, s'ha utilitzat l'entorn de programació propi d'*Arduino*, un *software* anomenat *ArduinoStudio*, que té el seu propi llenguatge de programació basat en C. Els elements electrònics utilitzats s'enumeren a continuació:

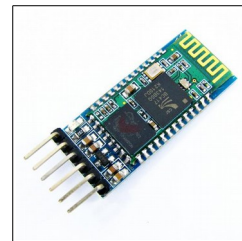
- Placa *SainSmart* Mega 2560 [33] compatible amb *Arduino*
- 4 sensors d'ultrasons HC-SR04 [34]
- Placa HC-05 *Bluetooth Arduino* [35]



Imatge 3: Placa SainSmart Mega 2560



Imatge 4: Sensor d'ultrasons HC-SR04



Imatge 5: Placa bluetooth HC-05

Font imatge 3: <http://movitek.cl/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/s/a/sainsmart-mega-2560-board-for-arduino-uno-mega-nan-55e6f3bfc3ab580ff223180a8d95db0a.jpg>

Font imatge 4: <http://cdn.instructables.com/F90JYNW/H7UR7RCS/F90JYNWH7UR7RCS.MEDIUM.jpg>

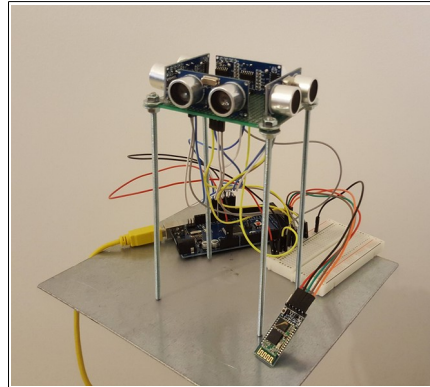
Font imatge 5: http://botscience.net/store/image/cache/data/products/MODCOM/TELO001/Bluetooth_Module_bb-500x500.jpg

Per a provar el prototip, s'ha utilitzat la metodologia *Experiments*. S'han establert una sèrie de situacions en les que es pot trobar el prototip en el seu funcionament normal i s'ha analitzat la seva reacció.

A continuació s'explica com s'han connectat els elements electrònics, com s'ha fet la seva programació i les proves que s'han realitzat amb el prototip.

6.1. Definició del prototip

El prototip és una placa amb 4 sensors d'ultrasons ubicats en forma de creu connectats a una placa *Arduino* Mega ADK. Les dades captades es comuniquen via bluetooth a un dispositiu *Android* amb una placa *bluetooth* connectada a la placa *Arduino*.

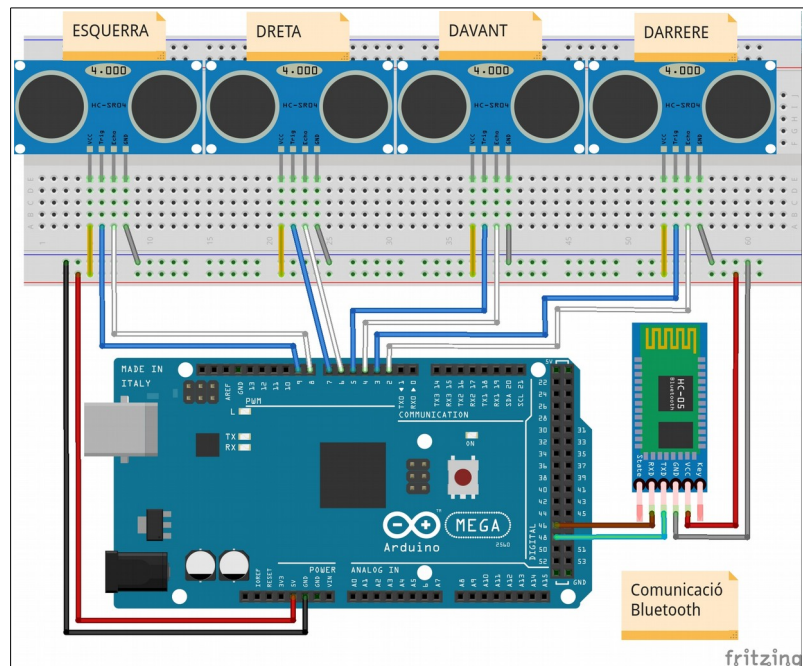


Imatge 6: Fotografia del prototip

6.2. Esquema de connexions del prototip

En la següent imatge, es pot observar l'esquema de connexions del prototip. Pel que respecta als sensors ultrasonors, cada sensor té un pin VCC i un altre GND, que s'han connectat als pins corresponents de la placa *Arduino* mitjançant la placa protoboard, i en la imatge estan representats pels cables groc i gris respectivament. Els sensors també incorporen dos pins més, *Trigger* i *Echo*, connectats mitjançant cables blau i blanc respectivament. Es connecten a la placa *Arduino* als pins 9 i 8 els *Trigger* i *Echo* corresponents al sensor esquerre, els pins 7 i 6 al sensor dret, els pins 5 i 4 al sensor del davant, i els pins 3 i 2 al sensor del darrere. Es connecten d'aquesta manera per facilitar la connexió de cables i la ubicació dels elements en la placa pre-perforada.

Per la seva banda, en la placa *bluetooth*, es connecta el pin RxD al pin 46, el TxD al pin 48, i els VCC i GND es connecten a la placa *Arduino* mitjançant la placa protoboard.



Imatge 7: Esquema de connexions del prototip

6.3. Programació del prototip

La programació d'*Arduino* no permet que els quatre sensors funcionin alhora. Fins que un sensor no ha acabat el seu cicle d'execució no en pot funcionar cap més. Aquesta condició evita interferències entre sensors, degut a que l'execució dels sensors és multiplexada en el temps. Per tant, el fet que l'execució dels sensors és seqüencial i que en funció de la distància mesurada la durada del cicle de funcionament de cada sensor varia, el cicle d'execució complet del prototip no serà constant. En la mesura que un sensor emet un senyal ultrasonor, aquest no donarà per finalitzat el seu cicle de funcionament fins que li arribi un rebot d'aquest senyal emès o venci el seu temps límit d'execució. Pel càlcul de la distància s'estableix que la velocitat del so és fixa i és de 340 m/s, i en la mesura que el TOF calculat per cada sensor inclou el viatge d'anada i de tornada, la fórmula per a calcular la distància que hi ha entre el sensor i un obstacle és la següent:

$$distancia = (TOF * 0,034) / 2$$

La distància es representa en cm, i el TOF dels sensors es retorna en microsegons, d'aquí el valor constant de 0,034 (cm/microsegons).

Pel que respecta a la comunicació *bluetooth*, s'utilitza una llibreria especial pròpia d'*Arduino* anomenada *SoftwareSerial.h*. La seva funció és que en acabar cada cicle de lectura dels quatre sensors, la placa *bluetooth* envia el seu senyal als dispositius connectats.

Per a saber el temps que funciona cada sensor, s'afegeixen al codi variables que permeten emmagatzemar el moment inicial i final d'execució. Aquesta informació s'envia juntament amb les distàncies calculades en acabar cada procés.

6.4. Detecció d'obstacles

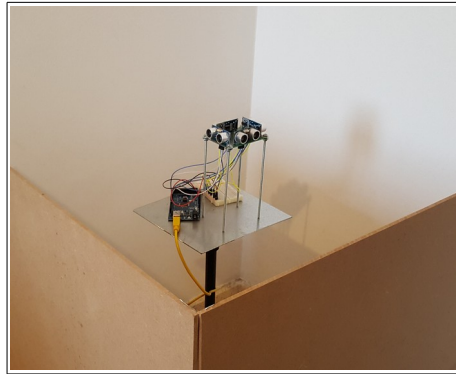
Per a comprovar el funcionament i avaluar la reacció dels sensors davant els obstacles en funció de la posició i orientació del prototip, es plantegen dues situacions, una en la que el dispositiu està quiet, i una altra en la que el dispositiu està en moviment. Pel que respecta a la comprovació de la robustesa dels sensors, per cada situació es plantegen dues posicions dels sensors respecte els obstacles, amb el senyal incidint a 45° i a 90°. La incidència perpendicular respecte un obstacle és a priori la més ideal, ja que el senyal ultrasonor viatja en línia recta i el seu rebot pot retornar sempre al dispositiu. Pel que respecta a la incidència a 45°, s'escull perquè es considera una orientació que pot donar problemes en el rebot del senyal en les quatre direccions pels escenaris que es plantegen.

S'estableix 30 cm com a distància mínima a la que un dispositiu que incorpori aquest prototip pot estar de la paret en la mesura que està pensat per a funcionar en *drones* i aquests duen hèlices que podrien xocar contra la paret.

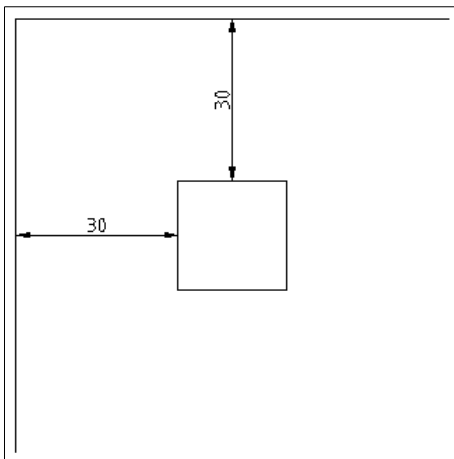
6.4.1. Prototip sense moviment

En aquest cas, s'ubica el prototip en un racó d'una habitació per a comprovar el comportament dels sensors davant la proximitat d'obstacles. Per a fer aquestes proves, s'han captat les dades amb la comunicació sèrie de la placa amb l'ordinador per a fer més fàcil el seu tractament.

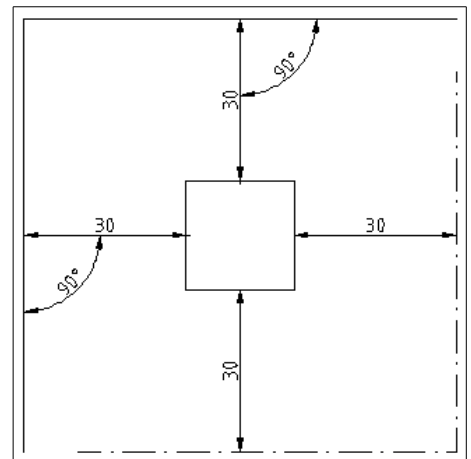
En un primer entorn de proves es pretén que els sensors del davant i de l'esquerra siguin els que enfoquin a cada paret del racó de l'habitació a una distància de 30 cm i de forma perpendicular, tal com es pot observar en la imatge 9. Els sensors del darrere i de la dreta tenen un obstacle a 100 cm de distància. En una segona fase en les proves de posicionament del prototip sense moviment, es pot observar en la imatge 10 com s'envolta en un entorn quadrat amb dos taulons que fan d'obstacle als sensors del darrere i de l'esquerra a una distància de 30 cm. Per a comprovar la robustesa del sistema, es realitzen les proves comentades amb els sensors enfocant-los a 45° dels obstacles (imatges 11 i 12).



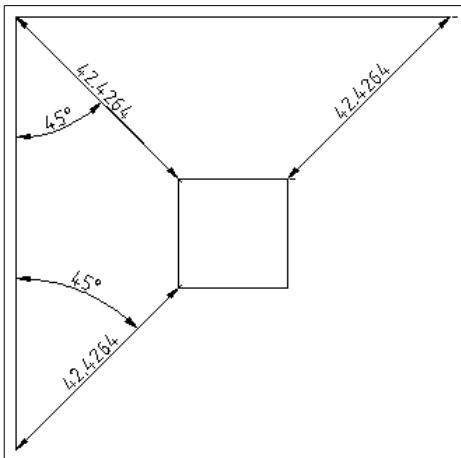
Imatge 8: Prototip envoltat d'obstacles



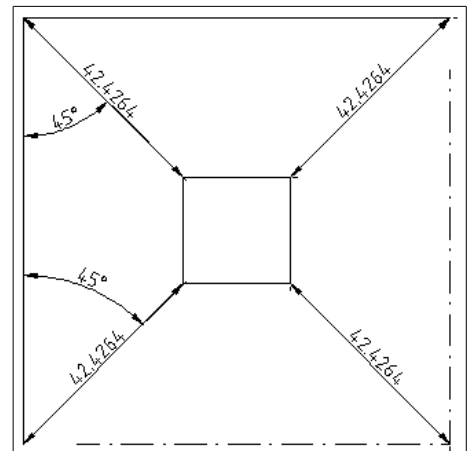
Imatge 9: Emissió a 90° dels sensors esquerra i davant, i obstacles a més de 100 cm dels sensors dret i darrere



Imatge 10: Obstacles a 90° dels 4 sensors i a la mateixa distància



Imatge 11: Emissió a 45° dels sensors esquerra i davant, i obstacles a més de 100 cm dels sensors dret i darrere



Imatge 12: Obstacles a 45° dels 4 sensors i a la mateixa distància

Al ser un cas en el qual el prototip no es mou, per garantir la fiabilitat de les dades calculades, per cada cas es fan 1000 lectures seguides. Es registren la distància i el temps de procés de cada sensor. A partir d'aquí es calcula la mitjana estadística, la moda i l'error relatiu per cadascun dels paràmetres registrats.

TAULA DE MITJANES										
Situació	Dist. Esquerra	Dist. Dreta	Dist. Davant	Dist. Darrere	T. procés esquerra	T. procés dreta	T. procés davant	T. procés darrere	T. procés total	
90° en un quadrat	29,63	30,97	30,00	29,12	2,24	2,32	2,29	2,27	9,12	
90° en un racó	30,00	100,54	30,00	100,44	2,29	6,47	2,27	6,47	17,50	
45° en un quadrat	43,80	42,74	41,02	42,25	3,12	3,05	2,97	3,02	12,16	
45° en un racó	43,07	99,41	185,23	108,06	3,09	6,41	43,98	7,89	61,37	

Taula 1: Taula de mitjanes estadístiques amb el prototip sense moviment

TAULA DE MODES ESTADÍSTIQUES										
Situació	Dist. Esquerra	Dist. Dreta	Dist. Davant	Dist. Darrere	T. procés esquerra	T. procés dreta	T. procés davant	T. procés darrere	T. procés total	
90° en un quadrat	30	31	30	29	2	2	2	2	8,00	
90° en un racó	30	100	30	100	2	6	2	6	16,00	
45° en un quadrat	44	43	41	42	3	3	3	3	12,00	
45° en un racó	43	99	400	109	3	6	11	7	27,00	

Taula 2: Taula de modes estadístiques amb el prototip sense moviment

TAULA D'ERRORS RELATIUS				
Situació	Error Esquerra	Error Dreta	Error Davant	Error Darrere
90° en un quadrat	1,23%	3,23%	0,00%	2,94%
90° en un racó	0,02%	0,54%	0,00%	0,44%
45° en un quadrat	3,26%	0,74%	3,31%	0,39%
45° en un racó	1,52%	134,34%	336,65%	154,73%

Taula 3: Taula d'errors relatius amb el prototip sense moviment

Es pot observar que per als obstacles amb una incidència a 90° de l'emissor d'ultrasons, el càlcul és força real i no té massa desviacions. La desviació màxima és del 3.23% i s'observa en el sensor dret quan el prototip s'ubica en un quadrat. La desviació mínima es pot observar pels dos casos d'incidència a 90° en el sensor del davant, amb un 0% d'error. Pel que respecta a les modes estadístiques només hi ha dos sensors els quals el seu valor més repetit no és el teòric. Són el de la dreta i el del darrere en l'entorn en el que el sensor està envoltat per un quadrat. Aquest error és d'un cm, que és la mesura mínima que pot calcular el sensor ultrasonor.

Pels casos en que l'emissió dels sensors és a 45° de l'obstacle més proper es produeixen lectures incorrectes. Això es pot observar en el cas del prototip ubicat en un racó. Només el sensor que apunta al racó de la paret pot calcular la seva distància correctament, amb un error del 1.54%. La resta de sensors no acaben de calcular correctament la distància de cap obstacle i es produeixen casos en que no reben cap retorn de senyal. En aquests casos es produeix un temps d'espera per acabar el seu cicle de funcionament per a donar pas al següent sensor. Tal com es pot observar, això afecta directament al seu temps de procés respecte la resta de casos pràctics, sigui amb el valor extret de les modes estadístiques, 27 ms, o amb el de les mitjanes estadístiques, 61,37 ms. El temps de procés extret de la moda i de la mitjana disten tant degut a que pels casos en els que el sensor no rep el senyal de retorn s'espera el temps màxim fins a finalitzar el seu cicle. Per aquests casos, s'ha establert que la distància calculada és el màxim que pot calcular el sensor, 400 cm ja que si hi ha un obstacle a més distància el sensor tampoc ho podria identificar, per tant, mentre el sensor no ho pugui calcular, es considera que a aquesta distància hi ha un obstacle. A més a més, en una situació real no es podria saber si realment hi ha algun obstacle a prop del prototip o bé el senyal emès pel sensor no està orientat correctament respecte l'obstacle. Pel que respecta a les modes estadístiques calculades, en aquest cas només el sensor esquerra s'apropa al valor real de 42,42 cm amb un valor calculat de 43 cm. La resta de sensors no ofereixen resultats fiables, i pel cas del sensor del davant, té majoritàriament mesures falses en les que el valor es limita a ser el màxim, 400 cm.

Els errors observats en les lectures fetes en un racó amb una incidència de 45° es corregeixen quan s'envolta el prototip en un quadrat, ja que els senyals emesos tenen on rebotar i retornar al sensor d'ultrasons. L'error màxim observat és del 3.31% i l'error mínim del 0.39%. Són valors força similars als errors màxim i mínim observats en les lectures a 90° de la paret. Pel que respecta a les modes estadístiques calculades, en aquest cas són força realistes, ja que oscil·len entre els 41 i els 44 cm i el valor real és de 42,42 cm.

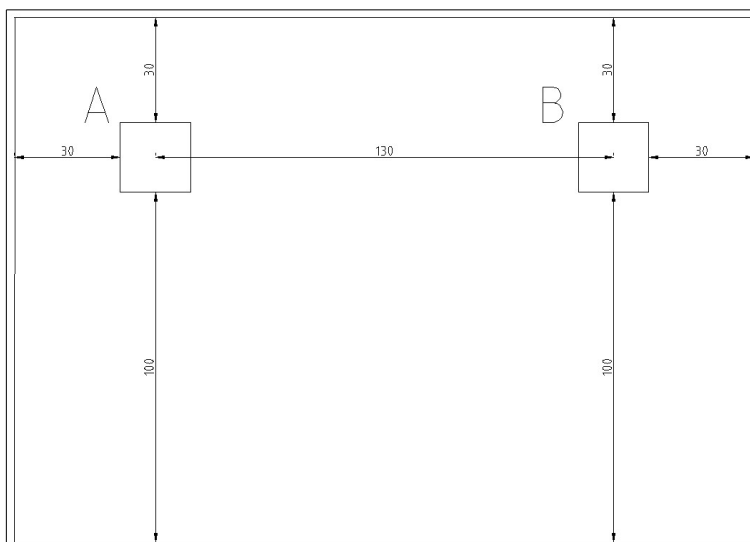
Pel que respecta als temps d'execució, aquests depenen de la distància calculada, en la mesura que hi hagi obstacles prop dels quatre sensors del prototip, més ràpid serà el seu cicle de detecció. En canvi, si es troba en un entorn sense obstacles, el cicle de funcionament dels quatre sensors serà el màxim, tal com

s'ha comentat en la situació del prototip en un racó a 45° respecte de la paret.

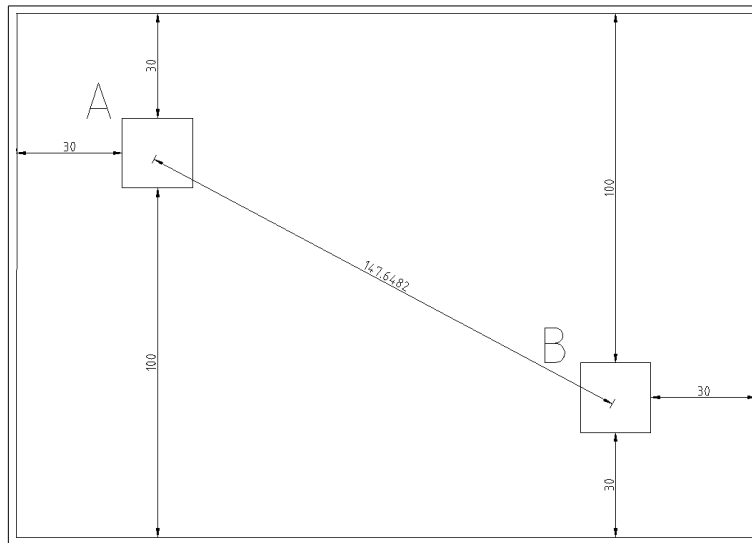
6.4.2. Prototip en moviment

Es comprova la reacció del prototip en moviment i en les dues inclinacions respecte la paret que es mantenen al llarg del desplaçament, a 90° i 45°. En un primer cas (imatge 13), el desplaçament és en línia recta i el prototip es desplaça des del punt A fins el punt B. El punt A està situat a 30 cm de la paret esquerra i de la del davant, i a 100 cm de la paret del darrere. Acaba el seu trajecte a 30 cm de la paret dreta i de la del davant, i a 100 cm de la paret del darrere, que és una situació igual a la inicial, en la qual els obstacles més propers són a 30 cm del prototip. El prototip es desplaça 130 cm en 10 segons. El següent cas pràctic de prototip en moviment és un desplaçament en diagonal, tal com es pot observar en la imatge 14. En aquest cas, el dispositiu es mou des del punt A al B, on A també és a 30 cm de la paret de davant i de l'esquerra i a 100 cm de la paret del darrere. El punt B està situat a 30 cm de la paret dreta i de la paret del darrere i a 100 cm de la paret del davant. Per aquest cas el dispositiu es desplaça 147,65 cm en 10 segons. Si bé es recorren distàncies diferents en els dos casos, s'ha decidit que el temps de recorregut sigui el mateix per a obtenir un número de mostres similar. El desplaçament del prototip és manual, i es fa mitjançant un cronòmetre i movent-lo a mà.

En els següents apartats, per cada cas pràctic s'ajunten gràfics amb els valors teòrics i els reals. En aquests gràfics s'hi pot observar la distància en cm calculada per cada sensor en cada mostreig que el dispositiu ha fet al llarg del desplaçament.



Imatge 13: Desplaçament en línia recta



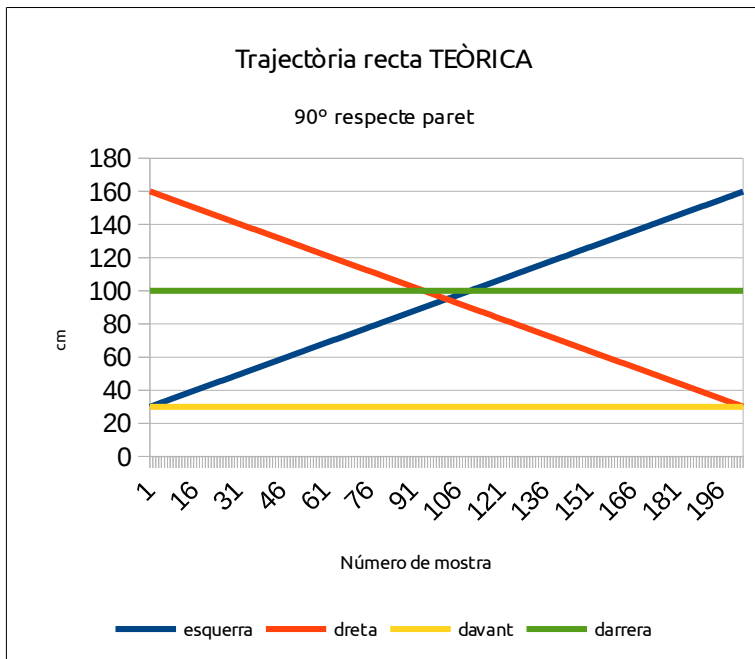
Imatge 14: Desplaçament en diagonal

a) Orientació a 90° respecte paret

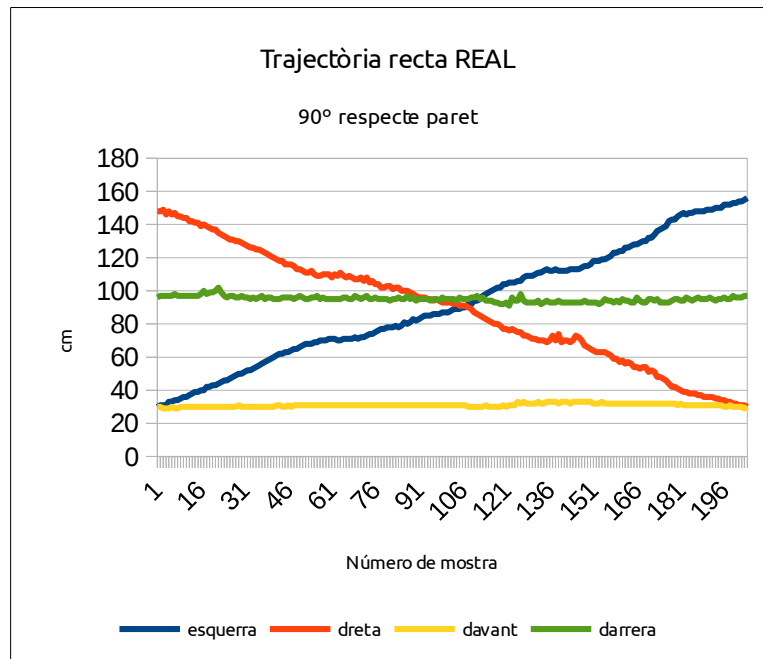
Tant per la trajectòria recta com per la diagonal, es parteix de la mateixa situació inicial, en la que els sensors esquerra i davant són a 30 cm de cada paret del racó, el sensor del darrere és a 100 cm de la seva paret, i el dret, a 160 cm.

Per la trajectòria recta, s'espera que els sensors del davant i del darrere es mantinguin constants a 30 cm i a 100 cm respectivament. El sensor esquerre ha d'augmentar progressivament la distància mesurada de 30 cm a 160 cm, i el dret l'ha de reduir de 160 cm a 30 cm.

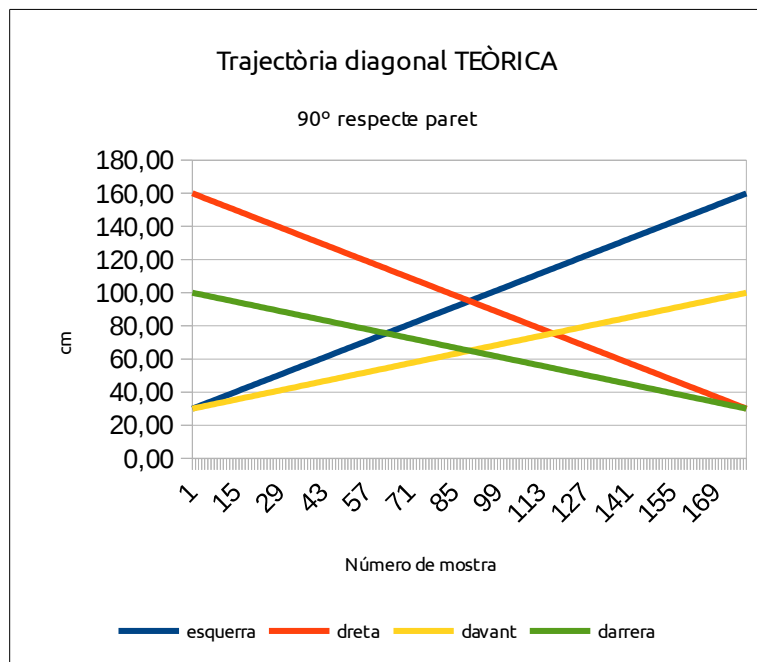
Pel que respecta a la trajectòria diagonal, no hi ha cap sensor que mantingui el valor de la seva lectura constant. El sensor esquerre parteix d'una distància calculada de 30 cm i ha d'acabar mesurant 160 cm. El sensor dret fa el contrari, de 160 cm calculats inicialment, ha d'acabar en 30 cm. El sensor del davant, comença calculant 30 cm, i ha d'acabar calculant-ne 100. I el sensor del darrere fa el càlcul oposat del sensor del davant, de 100 cm calculats ha de passar a 30.



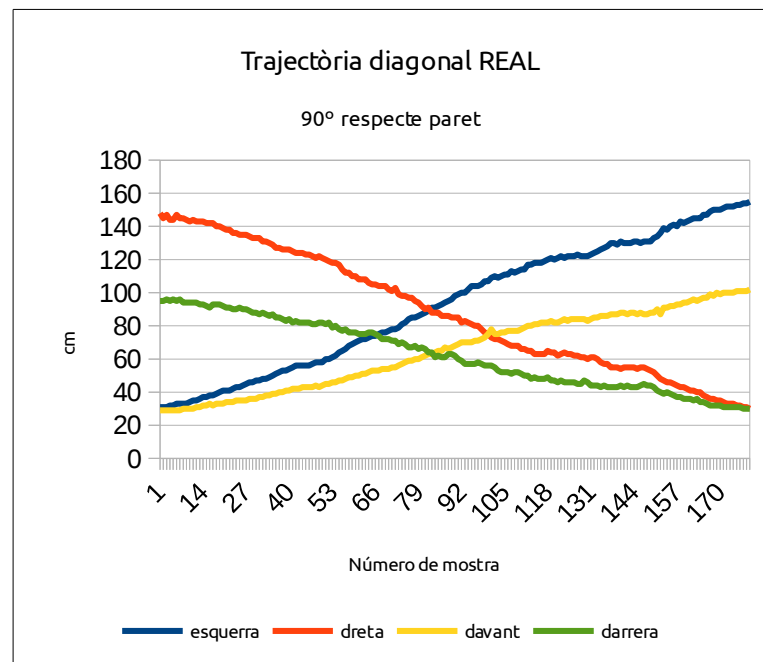
Imatge 15: Gràfic amb els valors teòrics de la trajectòria recta a 90°



Imatge 16: Gràfic amb els valors calculats de la trajectòria recta a 90°



Imatge 17: Gràfic amb els valors teòrics de la trajectòria diagonal a 90°



Imatge 18: Gràfic amb els valors reals de la trajectòria diagonal a 90°

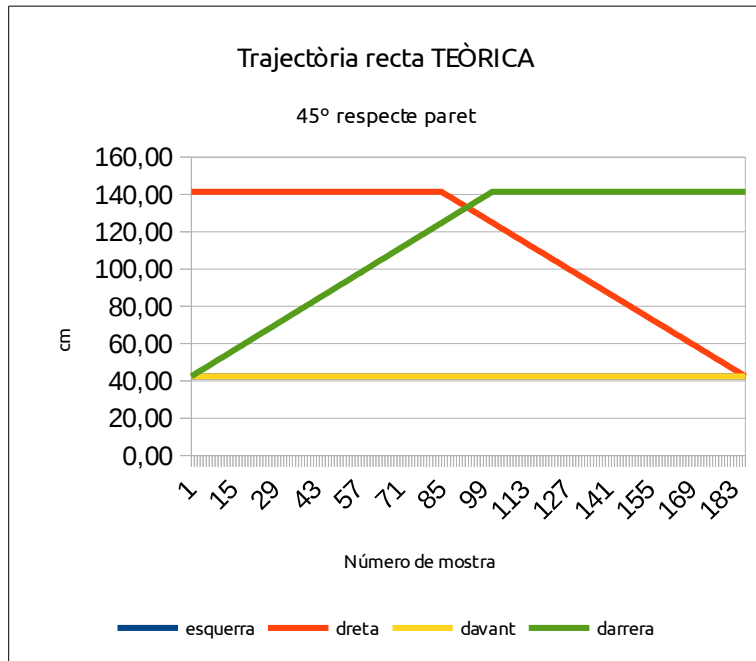
En la mesura que els sensors tenen un cert marge d'error, i més en moviment, el resultat previst en comparació el real es considera realista i força aproximat.

b) Orientació a 45° respecte paret

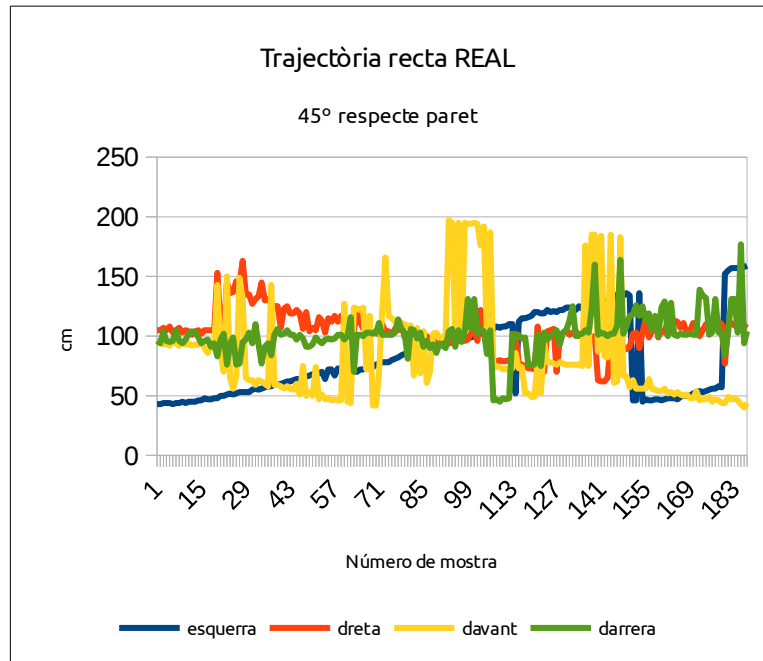
Per les situacions en les que l'orientació dels sensors és de 45° també es preveuen les mateixes distàncies inicials calculades. Els sensors esquerra, davant i darrera han de calcular 42,42 cm, que és la distància d'incidència directa respecte la paret que tenen al davant. Pel que respecta al sensor dret, ha de calcular una distància inicial de 141,42 cm.

En la trajectòria recta, s'espera que els sensors esquerra i davant estiguin permanentment calculant 42,42 cm, ja que no es separa el prototip de la paret. Pel que respecta al sensor dret, en la mesura que es desplaça paral·lel a la paret, calcula una distància constant de 141,42 cm fins que la línia d'incidència directa arriba al racó. En aquest punt, la distància calculada s'ha de reduir a 42,42 cm progressivament. El sensor del darrera té un comportament contrari al sensor dret. La seva distància calculada augmenta de 42,42 cm a 141,42 cm fins a arribar al racó de la paret, i aquesta distància es manté constant fins al final.

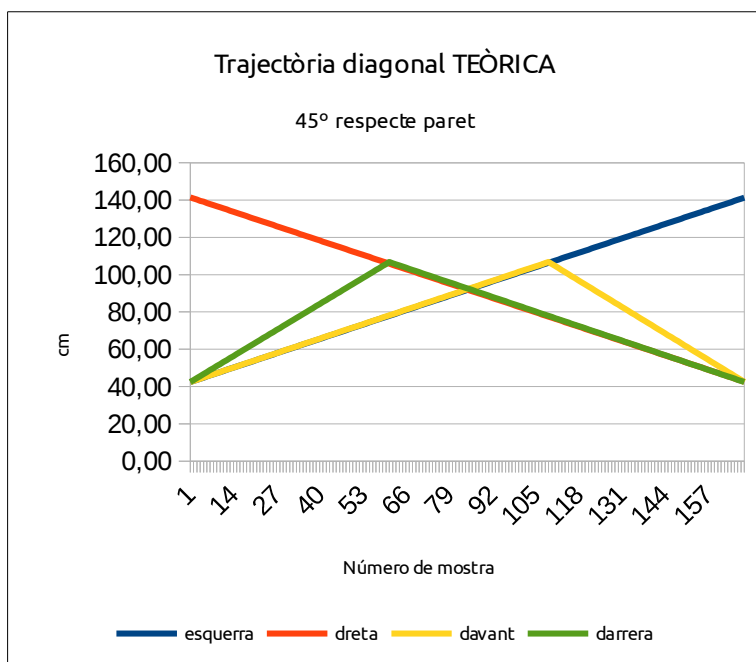
En la trajectòria diagonal el sensor esquerra ha de començar calculant 42,42 cm i augmentar aquest valor fins a 141,42 cm. El sensor dret fa el contrari, redueix la distància calculada de 141,42 a 42,42 cm. El sensor del davant a mesura que avança el prototip i l'ona sonora incident no arriba al racó ha d'augmentar la seva distància calculada de 42,42 cm a 106,77 cm. Un cop l'ona incident canvia de paret, aquesta distància de 106,77 es redueix de 106,77 cm a 42,42 cm. Pel que respecta al sensor del darrera, ofereix el mateix comportament que el sensor del davant però al revés.



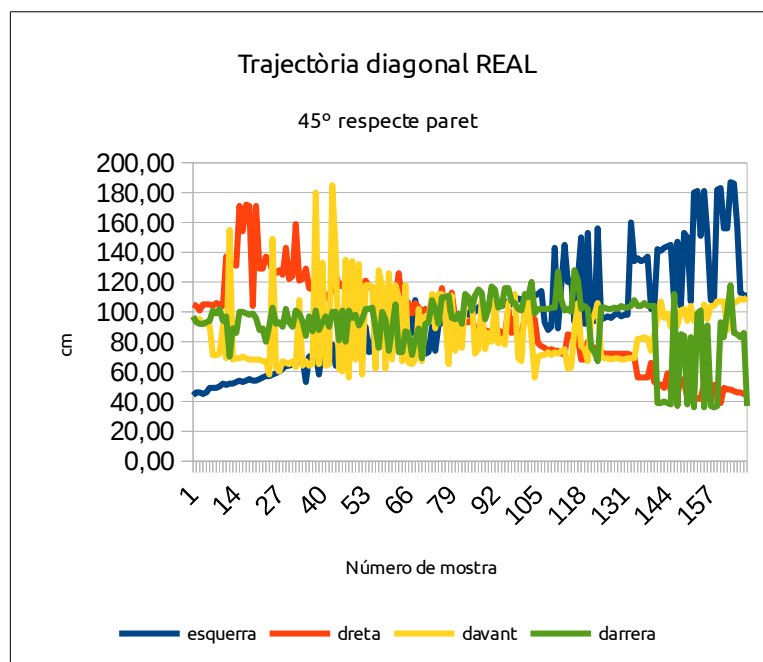
Imatge 19: Gràfic amb els valors teòrics de la trajectòria recta a 45°



Imatge 20: Gràfic amb els valors reals de la trajectòria recta a 45°



Imatge 21: Gràfic amb els valors teòrics de la trajectòria diagonal a 45°



Imatge 22: Imatge 19: Gràfic amb els valors reals de la trajectòria diagonal a 45°

Tal com es pot observar en els gràfics, hi ha moltes lectures incorrectes. Només en els punts en els que l'ona incident té un altre obstacle proper on rebotar per a retornar al sensor, el càlcul és més o menys real. Això es pot observar amb els sensors esquerra i dret en la trajectòria diagonal. Com que l'ona sonora incident arriba al racó de la paret a mesura que el sensor s'hi apropa, les mesures reals coincideixen amb les mesures previstes. En la mesura que el sensor s'allunya, les dades perden exactitud.

7. Conclusions

Tal com es pot observar en l'estat de l'art d'aquest projecte, els principals sistemes de posicionament *indoor* basats en ultrasons tenen una sèrie de particularitats, com el fet que necessiten nodes de referència i senyals extra per a sincronitzar tot el procés d'ubicació d'un dispositiu. Per tant, es fa necessari un desplegament d'infraestructura per a garantir que el posicionament es fa correctament.

En aquest projecte es presenta un dispositiu que no necessita cap mena d'element al seu voltant. Si bé el posicionament d'aquest dispositiu és relatiu respecte la resta d'obstacles, permet la correcta circulació d'un element mòbil en una sala sense necessitat de desplegar cap mena de node de referència. A més a més, els principals sistemes comentats en l'estat de l'art no serveixen per a reconèixer obstacles al voltant del dispositiu a posicionar, només li assignen unes coordenades x,y,z sense plantejar si hi ha obstacles, fixes o en moviment.

En la part pràctica es presenten els diferents elements que componen el dispositiu creat en aquest projecte. Pel que respecta a la placa utilitzada, una *SainSmart Mega 2560*, és una versió de la placa *Arduino Mega ADK* més econòmica i ofereix suficients pins per a poder connectar els diferents elements del projecte. S'utilitzen 4 sensors d'ultrasons, model *HC-SR04*, amb unes característiques pròpies que estableixen les limitacions del dispositiu, com el temps de procés o les distàncies mínima i màxima que es poden calcular. A més a més, pel que respecta a la seva programació, no és possible que cada sensor funcioni alhora, per tant, aquesta multiplexació en el temps del funcionament de cada sensor és una solució forçada per evitar interferències entre sensors. Per a enviar dades via *bluetooth* a qualsevol dispositiu *Android*, s'utilitza una placa *HC-05 bluetooth Arduino*.

A continuació es procedeix a fer proves amb el dispositiu en moviment i aturat, i col·locant-lo en dues orientacions diferents respecte la paret. Es pot observar que tant en moviment com aturat, el dispositiu retorna dades força similars respecte les teòriques quan els sensors incideixen perpendicularment respecte la paret. En canvi, pel que respecta a les dades calculades a partir dels sensors quan la seva inclinació respecte la paret és de 45° , només es calcula un valor aproximat al teòric en els punts on hi ha racons on el senyal pot rebotar i retornar el sensor. Per la resta de situacions, que en són la majoria, el senyal o bé es perd o retorna d'un rebot posterior. Això fa que la distància mesurada sigui incorrecta. A més a més, a aquesta lectura incorrecta s'hi afegeix que el temps de procés de cada sensor és més elevat, ja que l'ona ultrasonora viatja més distància. També s'observa que el sensor ofereix resultats més fiables a distàncies curtes. Aquest fet es pot observar quan el sensor sense moviment s'ubica a un racó de l'habitació incidint les ones ultrasonores perpendicularment a la paret. Per les distàncies de 30 cm, l'error és mínim, molt proper al 0%. En canvi, per les distàncies de 100 cm, el sensor té un error proper al 0,5%

Pel que respecta a noves línies de recerca respecte aquest projecte, es pot plantejar millorar els càlculs aconseguits en situacions en les que el sensor ultrasonor no incideix perpendicularment sobre l'obstacle. Això es pot fer mitjançant un filtrat de senyal i/o afegint més sensors ultrasonors per a cobrir més angles en el posicionament del dispositiu, tenint en compte que a més dispositius, més temps de procés. També es pot afegir un mètode per a que la velocitat del so tingui en compte la temperatura de l'entorn, ja que ni la velocitat del so és constant ni ho seran les diferents temperatures en les que es trobaria un dispositiu que utilitzi el sistema desenvolupat en aquest projecte.

8. Annex

8.1. Annex 1. Codi Arduino del prototip

```
/* Detecció d'obstacles mitjançant 4 detectors d'ultrasons i comunicació via bluetooth
*/

/* Eric Vidal - 02/06/2016 */

/* Llibreria que inclou funcions per al funcionament del dispositiu bluetooth */
#include <SoftwareSerial.h>

/*
esquerra
  trig 9
  echo 8

dreta
  trig 7
  echo 6

davant
  trig 5
  echo 4

darrere
  trig 3
  echo 2
*/

/* Definició del número dels pins pels trigger i echo dels sensors d'ultrasons */
#define triggerPinLeft 9
#define echoPinLeft 8
#define triggerPinRight 7
#define echoPinRight 6
#define triggerPinFront 5
#define echoPinFront 4
#define triggerPinBack 3
#define echoPinBack 2

/* Definició del número dels pins per al dispositiu bluetooth */
#define RxD 46
#define TxD 48
```

```
/* Definició del dispositiu bluetooth */
SoftwareSerial Blue(TxD,RxD);

/* Calcular els temps d'execució de cada sensor */
unsigned long tempsAnterior;
unsigned long ara;
unsigned long difTempsRight, difTempsLeft, difTempsBack, difTempsFront;

/* Definició de les distàncies màxima i mínima a mesurar */
int maximumRange = 400; // Màxim
int minimumRange = 0; // Mínim

/* Definició de variables de la distància calculada a partir del TOF */
long leftDistancia, rightDistancia, frontDistancia, backDistancia;

void setup() {
  /* Definició dels pins per als sensors d'ultrasons */
  /* Esquerra */
  pinMode(triggerPinLeft, OUTPUT);
  pinMode(echoPinLeft, INPUT);
  /* Dreta */
  pinMode(triggerPinRight, OUTPUT);
  pinMode(echoPinRight, INPUT);
  /* Davant */
  pinMode(triggerPinFront, OUTPUT);
  pinMode(echoPinFront, INPUT);
  /* Darrere */
  pinMode(triggerPinBack, OUTPUT);
  pinMode(echoPinBack, INPUT);

  /* Inici comunicació bluetooth */
  Blue.begin(9600);
}
```

```
void loop() {  
    /* Crida de la funció per calcular les distàncies i el temps d'execució de cada sensor */  
    for (int i=1;i<=4;i++){  
        tempsAnterior = millis();  
        switch (i){  
            case 1:  
                leftDistancia = sensorUltraso(triggerPinLeft,echoPinLeft);  
                ara = millis();  
                difTempsLeft = ara - tempsAnterior;  
                break;  
  
            case 2:  
                rightDistancia = sensorUltraso(triggerPinRight,echoPinRight);  
                ara = millis();  
                difTempsRight = ara - tempsAnterior;  
                break;  
  
            case 3:  
                frontDistancia = sensorUltraso(triggerPinFront,echoPinFront);  
                ara = millis();  
                difTempsFront = ara - tempsAnterior;  
                break;  
  
            case 4:  
                backDistancia = sensorUltraso(triggerPinBack,echoPinBack);  
                ara = millis();  
                difTempsBack = ara - tempsAnterior;  
                break;  
        }  
    }  
  
    /* bluetooth */  
    char comando = Blue.read();  
    Blue.print("Esquerra: ");  
    Blue.print(leftDistancia);  
    Blue.print(" Dreta: ");  
    Blue.print(rightDistancia);  
    Blue.print(" Davant: ");
```

```

    Blue.print(frontDistancia);
    Blue.print("  Darrere: ");
    Blue.print(backDistancia);
    Blue.print(" --- T. Esquerra: ");
    Blue.print(difTempsLeft);
    Blue.print(" T. Dreta: ");
    Blue.print(difTempsRight);
    Blue.print(" T. Davant: ");
    Blue.print(difTempsFront);
    Blue.print(" T. Darrere: ");
    Blue.print(difTempsBack);
    Blue.println(" ");

    /* Temps d'espera entre cicles */
    delay(30);
}

/* Funció per executar i calcula la distància d'un sensor d'ultrasons */
long sensorUltraso(int trigger, int echo){
    long TOF, distancia;
    digitalWrite(trigger, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trigger, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigger, LOW);
    TOF = pulseIn(echo, HIGH);
    distancia = (TOF * 0.034) / 2;

    /* Si la distància està per sobre del màxim, es marca el màxim, si està per sota, es
marca el mínim */
    if (distancia >= maximumRange) {
        distancia = maximumRange;
    }
    else if (distancia <= minimumRange){
        distancia = minimumRange;
    }
    return distancia;
}

```

9. Referències

1. Tom Henderson, *The Physics Classroom*, espai web
Enllaç: <http://www.physicsclassroom.com/>
2. L. Jakevičius , A. Demčenko, "Ultrasound attenuation dependence on air temperature in closed chambers", *ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS (ULTRASOUND)*, Vol. 63, No.1, 2008
3. Guowei Shen, Rudolf Zetik, Reiner S. Thomä, "Performance comparison of TOA and TDoA based location estimation algorithms in LOS environment", *PROCEEDINGS OF THE 5th WORKSHOP ON POSITIONING, NAVIGATION AND COMMUNICATION 2008*, 2008
4. Eva M. García Polo, "Técnicas de Localización en Redes Inalámbricas de Sensores", Treball publicat l'espai web de la Universidad de Castilla-La Mancha, 2008
5. Francisco Santos, "Localization in Wireless Sensor Networks", *ACM Journal Name, Vol. V, No. N*, 2008
6. Yung Yi and Sanjay Shakkottai, "Hop-by-hop Congestion Control over a Wireless Multi-hop Network", *IEEE/ACM Transactions on Networking (Volume:15, Issue: 1)*, 2007
7. Hari Balakrishnan, Dorothy Curtis, Erik Demaine, Michel Goraczko, Allen Miu, David Moore, Michael Newman, Bodhi Priyantha, Adam Smith, Ken Steele, Seth Teller, Arvind Thiagarajan, Rui Viana, JD Zamfirescu, "The Cricket Indoor Location System", espai web, 2004
Enllaç: <http://cricket.csail.mit.edu/>
8. Nissanka Bodhi Priyantha, "The Cricket Indoor Location System", *article publicat a l'espai web de Massachusetts Institute of Technology*, 2005
9. Andy Hopper, Roy Want, Andy Harter, Tom Blackie, Mark Copping, Damian Gilmurray, Frazer Bennet, "The Active Badge system", espai web, 2002
Enllaç: <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/ab.html>
10. Andy Ward, Pete Steggles, Rupert Curwen, Paul Webster, Mike Addlesee, Joe Newman, Paul Osborn, Steve Hodges, "The bat ultrasonic location system", espai web, 2002
Enllaç: <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/>
11. Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggles, Andy Ward, Paul Webster, "The Anatomy of a Context-Aware Application", *Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM'99, Seattle, Washington*, 1999
12. C. Medina, I. Alvarez, J.C. Segura, A. de la Torre, and C. Benítez, "TELIAMADE ULTRASONIC INDOOR LOCATION SYSTEM: APPLICATION AS A TEACHING TOOL", Article publicat a l'espai web de la universitat de Granada, 2012
Enllaç: <http://www.ugr.es/~segura/pdffdocs/icassp2012.pdf>
13. C. Medina, José C. Segura, Ángel de la Torre, "TELIAMADE: Sistema de localización en interiores basado en ultrasonido y RF", *25th Simp. Nacional URSI (Union Radio-Scientifique Internationale), At Bilbao, Spain, Volume: no. 39*, 2010
14. Yasuhiro Fukuju, Masateru Minami, Hiroyuki Morikawa, Tomonori Aoyama, "DOLPHIN: An autonomous indoor positioning system in ubiquitous computing environment", 2003
15. Ugur Yayan, Hikmet Yucel, Ahmet Yazici, "A low cost ultrasonic based positioning system for the indoor navigation of mobile robots", *Journal of Intelligent & Robotic Systems, June 2015, Volume 78, Issue 3, pp 541-552*, 2014
16. Johann Borenstein, Yoram Koren, "Noise rejection for ultrasonic sensors in mobile robot applications", *Proceedings of the 1992 IEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France*, 1992

17. Bernhard Wirnitzer, Wolfgang M. Grimm, Hauke Schmidt, Roland Klinnert, "Interference Cancellation in Ultrasonic Sensor Arrays by Stochastic Coding and Adaptive Filtering", *1998 IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, 1998

18. José Carlos Prieto, Antonio R. Jiménez, Jorge I. Guevara, Joao L. Ealo, Fernando A. Seco, Javier O. Roa, Francisco X. Ramos, "Subcentimeter-accuracy localization through broadband acoustic transducers", *IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing 10/2007*, 2007

19. José Carlos Prieto, Antonio Ramón Jiménez, Jorge I. Guevara Rosas, Joao Ealo, Fernando Seco Granja, Javier O. Roa, "Performance evaluation of 3D-LOCUS advanced acoustic LPS", *IEEE T. Instrumentation and Measurement 01/2009*; 58:2385-2395, 2009

20. Nils Gageik, Thilo Müller, Sergio Montenegro, "Obstacle detection and collision avoidance using ultrasonic distance sensors for an autonomous quadcopter", Article publicat a l'espai web de la universitat de Würzburg, 2012

Enllaç:

http://www8.informatik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/10030800/user_upload/quadcopter/Paper/Gageik_Mueller_Montenegro_2012_OBSTACLE_DETECTION_AND_COLLISION_AVOIDANCE_USING_ULTRASONIC_DISTANCE_SENSORS_FOR_AN_AUTONOMOUS_QUADROPTER.pdf

21. Georg Oberholzer, Philipp Sommer, Roger Wattenhoffer, "The SpiderBat Ultrasound Positioning System", *SenSys'10, November 3–5, 2010, Zurich, Switzerland*, 2010

22. Cyril Brignone, Tim Connors, Geoff Lyon, Salil Pradhan, "SmartLOCUS: An autonomous, self-assembling sensor network for indoor asset and systems management", Article publicat a l'espai web de Hewlett-Packard, 2005

Enllaç: <http://www.hpl.hp.com/techreports/2003/HPL-2003-41.pdf>

23. Carl Fischer, Kavitha Muthukrishnan, Mike Hazas, Hans Gellersen, "Ultrasound-Aided Pedestrian Dead Reckoning for Indoor Navigation", Article publicat a l'espai web de la universitat de Lancaster, 2008

Enllaç: <http://eprints.lancs.ac.uk/41917/1/melt32003-fischer.pdf>

24. Nobuo Nakajima, Kiyohiko Hattori, "Autonomous Pedestrian Positioning Using Ultrasound Sensor for Stride Measurement", *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 13-16 October 2015, Banff, Alberta, Canada*, 2015

25. Viacheslav Filonenko, Charlie Cullen, James Carswell, "Investigating Ultrasonic Positioning on Mobile Phones", *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 15-17 September 2010, Zürich, Switzerland*, 2010

26. Viacheslav Filonenko, Charlie Cullen, James Carswell, "Indoor Positioning for Smartphones Using Asynchronous Ultrasound Trilateration", *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2013, 2013

27. *STANLEY Healthcare*, espai web

Enllaç: <http://www.stanleyhealthcare.com/>

28. *Sonitor*, espai web

Enllaç: <http://www.sonitor.com/>

29. *Brigade*, espai web

Enllaç: <http://brigade-inc.com/>

30. *Bosch mobility solutions*, espai web

Enllaç: <http://products.bosch-mobility-solutions.com/>

31. S.A. Pullano, A. La Gatta, F. Ruberto, A.S. Fiorillo, "Real-time ultrasound system for driver monitoring: an innovative application", *Transport Research Arena 2014, Paris*, 2014

32. Byeong-Seok Shin, Cheol-Su Lim, "Obstacle Detection and Avoidance System for Visually Impaired People", *I. Oakley and S. Brewster (Eds.): HAID 2007, LNCS 4813, pp. 78-85, 2007, 2007*

33. Placa SainSmart 2560

Enllaç: <http://www.sainsmart.com/sainsmart-mega2560-development-board-for-arduino.html>

34. Sensor d'ultrasons HC-SR04

Enllaç: <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>

35. Placa bluetooth HC-05

Enllaç: http://www.robotshop.com/media/files/pdf/rb-ite-12-bluetooth_hc05.pdf