

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Desarrollo de un sensor de ultrasonidos para la valoración ambulatoria de la marcha.



Máster Universitario en
Ingeniería de Telecomunicación

Trabajo Fin de Máster

ITZIAR UZQUEDA ESTEBAN

ALICIA MARTÍNEZ REMÍREZ

Pamplona, Junio 2017



**DESARROLLO DE UN SENSOR DE ULTRASONIDOS PARA LA
VALORACIÓN AMBULATORIA DE LA MARCHA**



Autora: Itziar Uzqueda Esteban
Tutora: Alicia Martínez Ramírez

Departamento de Matemáticas
Universidad Pública de Navarra

Junio de 2017

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todo el equipo de Movalsys S.L. por haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto con ellos y ayudarme siempre que lo he necesitado. Me he sentido muy integrada desde el principio y ha sido una experiencia de aprendizaje que sin duda resultará de gran utilidad para mi futuro.

Resumen

Abstract — Human gait analysis is commonly used in rehabilitation, sport training and functional diagnosis. Ambulatory systems for assessing human movements must be portable, ergonomic and economically viable.

The main aim of this work is to design an ultrasound based wireless measuring system to calculate step distances during walking.

The low-cost ultrasonic sensor developed allows us to calculate step distances. The distance has been achieved by merging data provided by our measurement system and by commercial inertial sensors. To ensure the best performance of the system, the accuracy of the ultrasonic sensor has been estimated.

Our results will be very useful in areas such as neurorehabilitation as they provide objective measurements of the rehabilitation and improvement degree in patients with stroke.

Key words — Inertial sensor, Ultrasonic sensor, Step distance measurement, Stroke.

Resumen

Resumen — El análisis de la marcha es habitual en áreas como rehabilitación, entrenamiento deportivo y diagnóstico funcional. Los sistemas de medida ambulatorios deben ser portátiles, ergonómicos y de bajo coste.

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de un sistema de medida basado en la tecnología de ultrasonido para calcular la distancia de separación entre pasos durante la marcha.

El sensor de ultrasonido desarrollado permite calcular dicha distancia combinando los datos del sensor de ultrasonido con los proporcionados por sensores inerciales comerciales. Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema se ha evaluado la precisión del sensor de ultrasonidos diseñado.

Los resultados serán de gran utilidad en el campo de la neuro-rehabilitación debido a que permiten obtener datos objetivos sobre el grado de mejora en pacientes que han sufrido un ictus.

Palabras clave — Sensor inercial, Sensor ultrasonido, Distancia de paso, Ictus.

Índice general

1. Introducción	3
1.1. Objetivo	5
1.2. Estructura del documento	5
2. Estado del Arte	7
2.1. Sistemas de medida de distancia entre pasos	7
2.1.1. Observación clínica	7
2.1.2. Videocámaras	8
2.1.3. Sistemas optoelectrónicos	8
2.1.4. Tapices instrumentados	9
2.1.5. Zapatos instrumentados	10
3. Metodología	13
3.1. Sistema de medida	14
3.2. Sensores inerciales	15
3.2.1. Principio de funcionamiento	15
3.2.2. Sensores inerciales propuestos	17
3.3. Sensor de ultrasonido	18
3.3.1. Principio de funcionamiento	18
3.3.2. Sensor de ultrasonido propuesto	20
3.3.3. Comunicación del sensor	21
3.4. Procedimiento de medida	23
3.4.1. Set-up de medida	23

ÍNDICE GENERAL

3.4.2. Captura de datos	26
3.4.3. Sincronización	26
3.4.4. Obtención de distancia	26
4. Resultados y análisis	35
4.1. Resultados	36
4.1.1. Medidas en estático	36
4.1.2. Medidas en dinámico	38
4.2. Análisis de resultados	39
5. Conclusiones y líneas futuras	41
Bibliografía	43

Índice de tablas

4.1. Tabla medidas en estático	39
4.2. Tabla medidas en dinámico	40

Índice de figuras

2.1. Sistema de medida mediante cámaras	8
2.2. Sistema de medida optoelectrónico	9
2.3. Sistema de medida GaitRite®	10
2.4. Zapatos instrumentados	10
3.1. Esquema general del sistema propuesto	14
3.2. Esquema jerárquico del diseño	15
3.3. Funcionamiento de IMU	16
3.4. Sensor Xsens y dongle Awinda	17
3.5. Sensor Xsens y dongle Awinda	18
3.6. Principio de funcionamiento de sensor de ultrasonidos.	19
3.7. Prototipo de sensor de ultrasonidos	20
3.8. Esquema de conexión del sensor de ultrasonido	21
3.9. Módulo Bluetooth HC-05	22
3.10. Dongle Bluetooth 4.0 WhiteLabel	22
3.11. Software de captura de sensor de ultrasonidos	23
3.12. Set-up de medida de un paso de 43 cm	24
3.13. Set-up de medida de un paso de 80.5 cm	24
3.14. Colocación de los sensores para la medida	25
3.15. Ejemplo de paso para la medida	25
3.16. Ejemplo de deriva en la señal	27

3.17. Recta para la corrección de la deriva	28
3.18. Ejemplo eliminación de la deriva	29
3.19. Ejemplo eliminación de la deriva	29
3.20. Setup medida estática de sensor de ultrasonido	31
3.21. Colocación de sensor para medidas en dinámico	31
3.22. Cálculo final de distancia de separación entre pasos	32
4.1. Medida de sensor de ultrasonido en estático.	36
4.2. Medida de sensor de ultrasonido en estático.	37
4.3. Medida de sensor de ultrasonido en estático.	37
4.4. Medida sensor de ultrasonido en dinámico	38
4.5. Medida sensor de ultrasonido en dinámico	39
4.6. Validación del sensor de ultrasonidos en dinámico	40

1

Introducción

Según datos del Grupo de Estudio de Enfermedades Cerebrovasculares de la Sociedad Española de Neurología, el ictus es la primera causa de mortalidad entre las mujeres españolas y la segunda en hombres [1].

Se conoce como ictus al conjunto de enfermedades que afectan a los vasos sanguíneos encargados de suministrar la sangre al cerebro. Este grupo de patologías, conocidas popularmente como embolias, también se denominan accidentes cerebrovasculares (ACV) y se manifiestan súbitamente. Según la causa del accidente cerebrovascular, pueden clasificarse en dos tipos: los hemorrágicos (o hemorragias cerebrales) y los isquémicos (o infartos cerebrales). Los ictus hemorrágicos se producen cuando un vaso sanguíneo se rompe y los ictus isquémicos ocurren cuando una arteria se obstruye por la presencia de un coágulo de sangre que a menudo

se origina en el corazón y se desplaza hasta el cerebro interrumpiendo el flujo sanguíneo. Tras un ictus, el daño cerebral adquirido puede ser irreparable y dejar secuelas graves que repercutan de forma notable en la calidad de vida de los afectados [2].

Las secuelas que sufren los pacientes tras padecer un ictus se reflejan en múltiples aspectos como [3] :

- Secuelas y complicaciones físicas: hemiplejia, hemiparesia...
- Alteraciones del humor: depresión.
- Alteraciones cognitivas: percepción, memoria y atención.
- Alteraciones para las actividades de la vida diaria.

Para poder lograr minimizar las discapacidades que experimentan estos pacientes al sufrir un ictus y poder así facilitar la integración social de estas personas, la rehabilitación juega un papel fundamental. Una de las funciones que se intenta recuperar con dicha rehabilitación es la marcha ya que en el 80% de los casos se ve limitada. Por ello, disponer de sistemas de medida que permitan obtener datos objetivos de parámetros relativos a la marcha permite una caracterización más detallada de la misma. Así, el personal sanitario encargado de su rehabilitación podrá implementar protocolos clínicos más efectivos y personalizados a cada paciente. Además, el poder optimizar la rehabilitación permite un ahorro en el gasto sanitario el cual supone entre un 7% y 10% en el caso de España [4].

Para determinar de la evolución de la rehabilitación de la marcha uno de los parámetros considerados relevantes es el de la distancia de separación entre pasos. Conociendo dicho dato se puede obtener una valoración objetiva de la estabilidad y ajustar la rehabilitación a las condiciones del paciente.

Dado que el traslado de pacientes con movilidad reducida a laboratorios de biomecánica es costoso y complicado [4], diseñar sistemas de medida portables y de alta precisión supone un gran reto. Estos sistemas permitirían realizar una rehabilitación más personalizada, y por tanto,

más eficaz, mejorando la calidad de vida de los pacientes y también reducir la inversión que estas personas necesitan

1.1. Objetivo

Se pretende realizar el diseño de un sistema inalámbrico de medida que permita obtener datos de la distancia entre pasos en pacientes de neuro-rehabilitación que han sufrido un ictus. El objetivo final es obtener una valoración objetiva de la evolución de su recuperación.

En su diseño, se tendrá en cuenta: La ergonomía del mismo, la autonomía y el coste. Asimismo deberá cumplir con unas especificaciones de resolución óptimas para poder obtener datos fiables.

1.2. Estructura del documento

El documento consta de los siguientes capítulos:

- CAPÍTULO 1: Introducción.
- CAPÍTULO 2: Estado del arte.
- CAPÍTULO 3: Metodología.
- CAPÍTULO 4: Resultados.
- CAPÍTULO 5: Conclusiones.

2

Estado del Arte

En la actualidad existen diferentes sistemas que permiten la medida de la separación entre pasos. En este capítulo se detalla el estudio realizado sobre estos sistemas.

2.1. Sistemas de medida de distancia entre pasos

2.1.1. Observación clínica

Este sistema consiste en la observación clínica para evaluar el estado de los pacientes. El profesional tiene que ser capaz de caracterizar la marcha del paciente. Las principales

limitaciones de este método son la falta de experiencia y la subjetividad del sistema visual humano.

2.1.2. Videocámaras

El análisis de vídeo puede realizarse tanto empleando marcadores en el sujeto como prescindiendo de ellos [6]. Durante el estudio puede utilizarse una sola cámara dando lugar a un análisis en dos dimensiones o dos cámaras para lograr un análisis en tres dimensiones (ver Figura 2.1). La desventaja de un estudio en dos dimensiones es el error que puede producirse por el movimiento en planos no captados por la imagen. Al introducir una segunda cámara se palía este efecto pero es necesario que ambas cámaras capturen los puntos de estudio para la reconstrucción del movimiento [7].



Figura 2.1: Sistema de medida mediante cámaras

2.1.3. Sistemas optoelectrónicos

Los sistemas optoelectrónicos captan señales luminosas de marcadores colocados en el cuerpo del sujeto a medir y las convierten en señales eléctricas (ver Figura 2.2). A pesar de que se trata de un completo y minucioso método de análisis de la marcha, no resulta muy práctico en el ámbito del análisis clínico. Al alto coste y complejidad del equipo hay que añadir

el amplio espacio de trabajo necesario para mantener una línea de visión libre de obstáculos entre el sujeto y los sistemas de medida. Además, la complejidad y lentitud provocan que resulte tedioso el tomar varias medidas [5, 8].



Figura 2.2: Sistema de medida optoelectrónico

2.1.4. Tapices instrumentados

Existen sistemas como el GaitRite[®] que permiten la medida de diferentes parámetros de la marcha, entre ellos la medida de distancia entre pasos [9]. En la Figura 2.3 se observa dicho sistema el cual consiste en un tapiz instrumentado. Tiene como ventaja la portabilidad y la facilidad de manejo, así como el ahorro de tiempo debido a la automatización en el cálculo de los parámetros obtenidos. Sin embargo, existen ciertas limitaciones, dado que sólo se obtiene información de la presión ejercida sobre los sensores, sin tener en cuenta la dirección ni las componentes del vector de fuerza [5].



Figura 2.3: Sistema de medida GaitRite®

2.1.5. Zapatos instrumentados

[10] Existe un sistema de medida integrado en zapatos que combina la utilización de sensores inerciales así como sensores de fuerza que completan la medida de los parámetros de la marcha. Se trata de un diseño compacto y que puede ser utilizado en entornos diferentes. En la Figura 2.4 aparece representado el diseño del zapato utilizado.



Figura 2.4: Zapatos instrumentados

Cada uno de los zapatos tienen un peso de aproximadamente 1.1Kg por lo que pueden afectar en la marcha a los pacientes ya que existe gran probabilidad de que hayan perdido fuerza en alguno de los lados. Además, únicamente con estos zapatos no es posible el cálculo de la distancia entre pasos por lo que aparecen nuevas versiones en las que se añaden sensores de ultrasonidos y por tanto reducen la ergonomía del sistema [10] .

3

Metodología

En este capítulo se detalla la metodología empleada para el diseño del sistema adaptado al contexto en el que se aplica. Se describe cada uno de los componentes que forman parte del sistema de medición así como el procesado posterior de los datos para obtener la distancia entre pasos(Matlab[®]). En el diseño intervienen sensores inerciales (Xsens Technologies B.V, The Netherlands) y se propone el diseño de un sensor de ultrasonido de bajo coste basado en la tecnología Arduino.

3.1. Sistema de medida

En la Figura 3.1 aparece representado un esquema general de la metodología empleada. Mediante el sensor de ultrasonidos se obtiene la distancia $D1$ y con los sensores inerciales se obtiene la distancia $D2$ aplicando a cada una de las señales el procesado que se detallará en posteriores apartados.

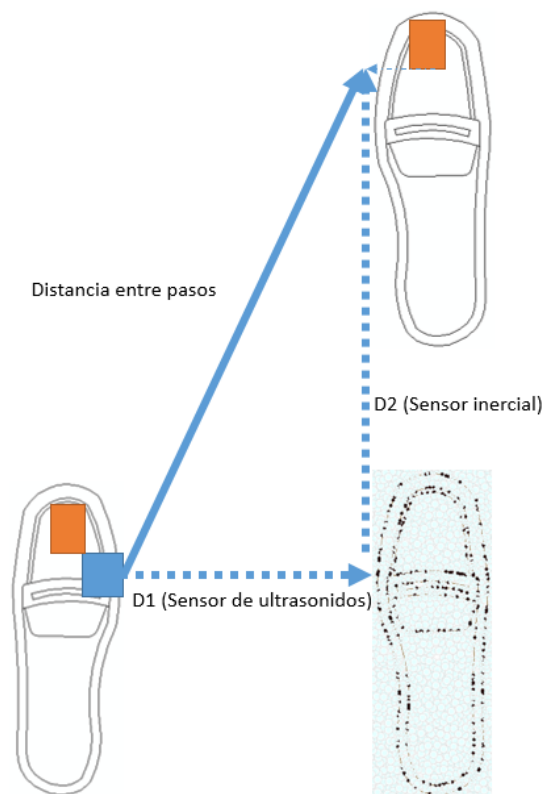


Figura 3.1: Esquema general del sistema propuesto

Por tanto, el diseño del sistema puede descomponerse en dos niveles de jerarquía (ver Figura 3.2). El primero de ellos, a más bajo nivel, es el diseño del sensor de ultrasonidos y la obtención de las señales necesarias para el cálculo de cada una de las distancias de ambos sensores. El segundo de los niveles es el correspondiente al de la sincronización y post-procesado de los datos para determinar la distancia entre pasos.

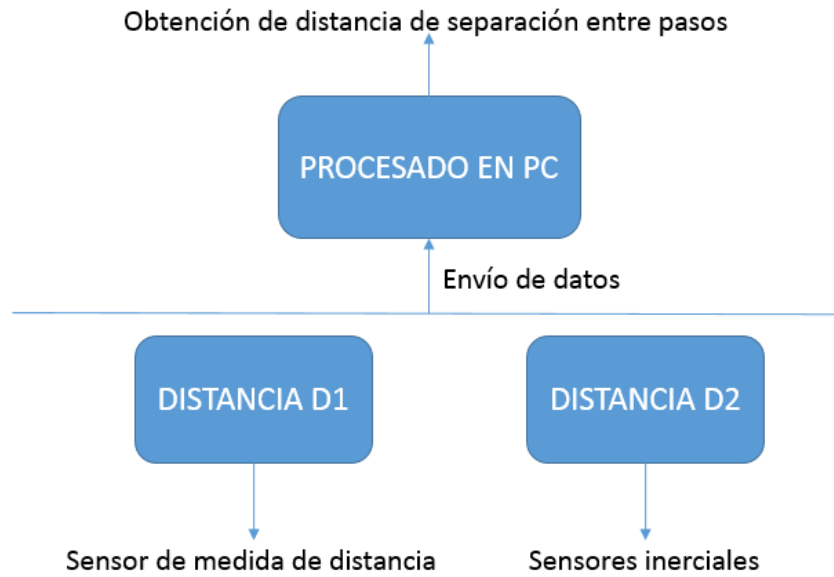


Figura 3.2: Esquema jerárquico del diseño

Con el post-procesado de las señales obtenidas por cada uno de los sensores se obtendrán las distancias $D1$ y $D2$ que permitirán el cálculo de la distancia objetivo mediante la ecuación 3.1 (Teorema de Pitágoras).

$$Dist.sep.pasos = \sqrt{D1^2 + D2^2} \quad (3.1)$$

En los siguientes apartados se especifican cada uno de los componentes que intervienen en el sistema.

3.2. Sensores inerciales

3.2.1. Principio de funcionamiento

Un sistema de referencia inercial se trata de un sistema de referencia regido por las leyes de movimiento de Newton. Por tanto, un sensor capaz de medir valores respecto a dicho sistema

de referencia es lo que se conoce como un sensor inercial.

Una unidad inercial o IMU (Inertial Magnetic Unit) es un dispositivo que se compone de tres giróscopos (para determinar la orientación), tres acelerómetros y un reloj que permite asignar tiempo a los valores medidos por los sensores inerciales. Dichas unidades inerciales presentan tres ejes y cada uno de ellos presenta un acelerómetro y un giróscopo.

Por tanto, la información que se recoge de las unidades inerciales son aceleraciones lineales, velocidades angulares y tiempo común para los tres ejes que llevan dicha información de aceleración y velocidad angular (ver Figura 3.3).

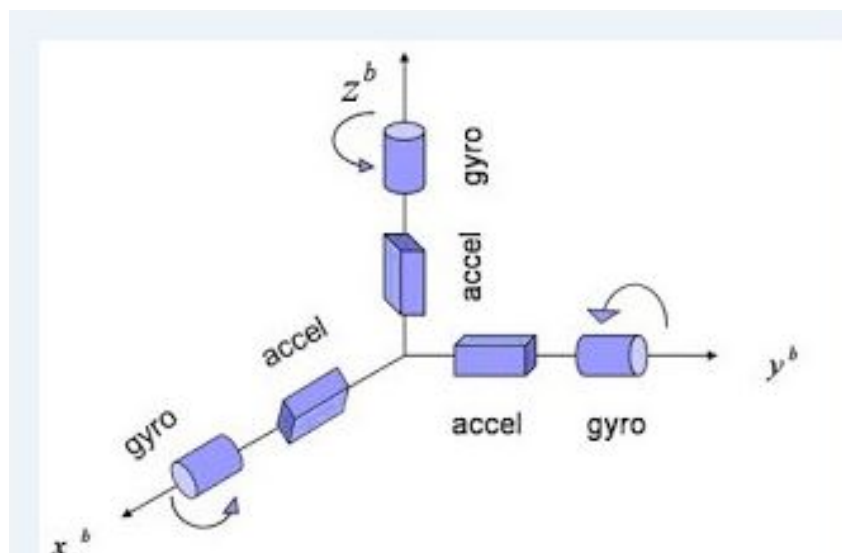


Figura 3.3: Funcionamiento de IMU

El tiempo requerido para la implementación del sistema de medida puede influir en la marcha de los pacientes y por tanto en la obtención de los parámetros [5]. Los sensores inerciales utilizados permiten realizar las mediciones de una manera sencilla y rápida lo cual resulta beneficioso en el contexto ambulatorio tanto para los pacientes como para el personal sanitario

3.2.2. Sensores inerciales propuestos

Los sensores inerciales utilizados para el sistema son el modelo MTw Awinda (Xsens Technologies B.V, The Netherlands) pueden verse representados en la Figura 3.4



Figura 3.4: Sensor Xsens y dongle Awinda

Su tamaño es de 47 x 30 x 13mm y 16g de peso por lo que puede definirse como un sistema compacto y ergonómico que será de utilidad para el sistema propuesto en este trabajo. Dispone de unas bandas de sujeción que permiten colocar el sensor en el lugar necesario y por tanto dota de versatilidad al diseño.

Además, se incluye un software de captura que resultará útil para obtener las señales para su posterior procesado. La comunicación de los sensores con el software emplea un protocolo propietario que aparece representado en la Figura 3.5.

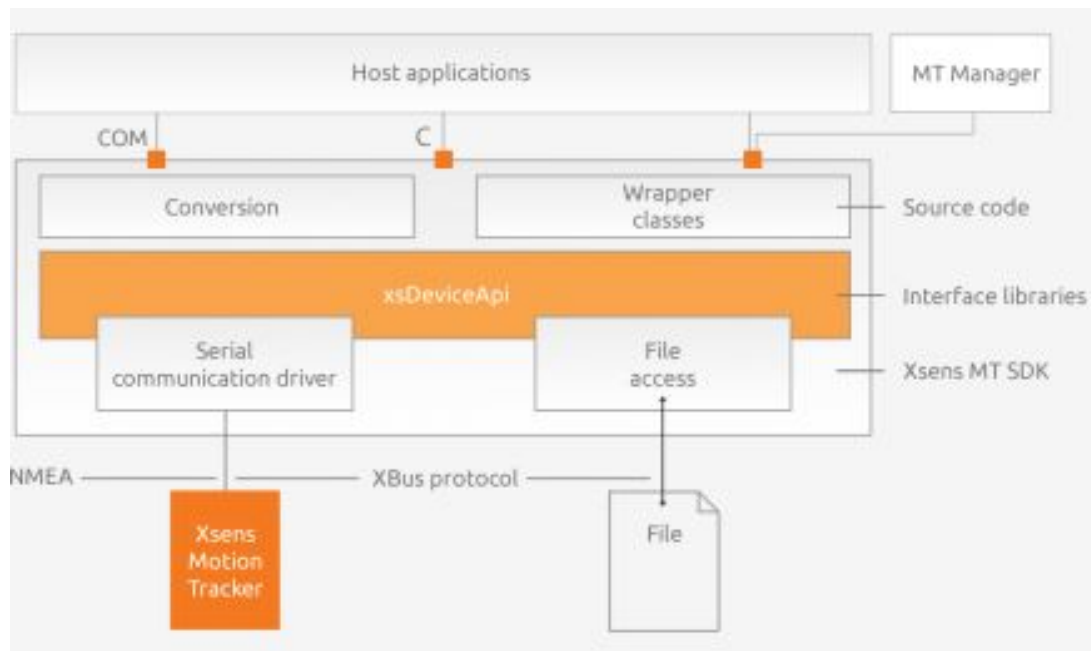


Figura 3.5: Sensor Xsens y dongle Awinda

3.3. Sensor de ultrasonido

3.3.1. Principio de funcionamiento

Un sistema de ultrasonidos tiene como principio de funcionamiento el fenómeno físico por el cual recibe ese nombre, las ondas de ultrasonidos.

Se envía un pulso de 40 KHz que incide sobre un obstáculo y se recibe con un retardo que se corresponde con el tiempo que tarda la onda desde que se envía hasta que se recibe, es decir el 'Time of Flight' (ToF). Por tanto, puede hallarse la distancia mediante la

En la Figura 3.6 se observa dicho funcionamiento.

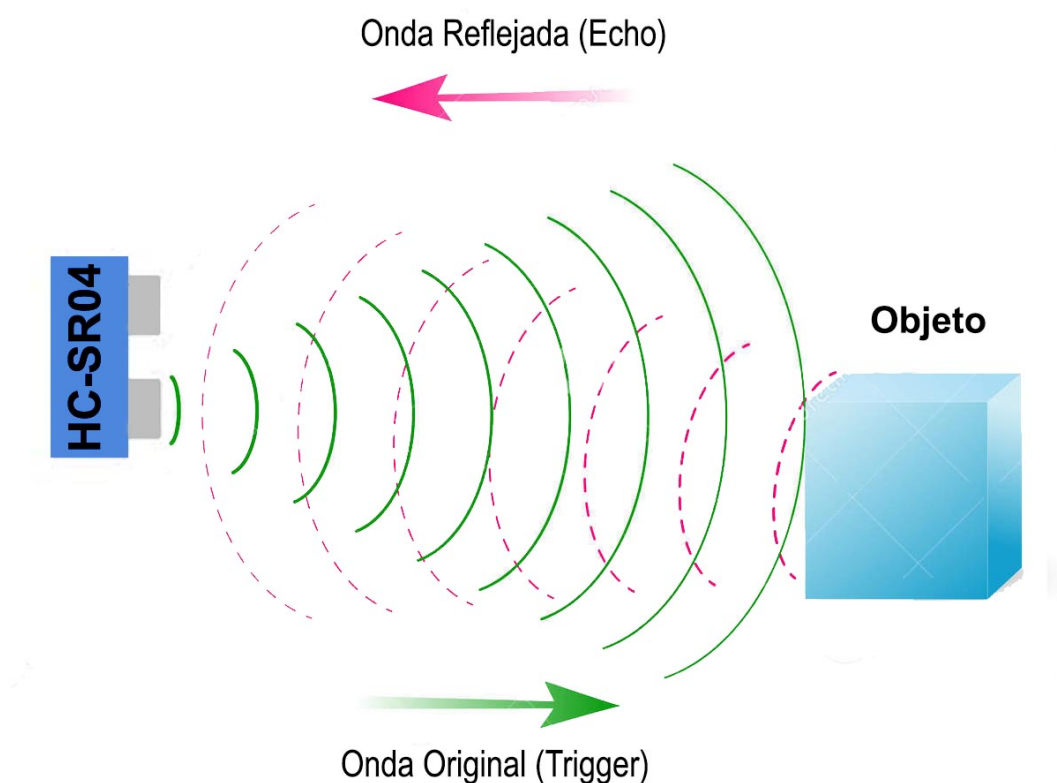


Figura 3.6: Principio de funcionamiento de sensor de ultrasonidos.

La distancia entre dos puntos puede hallarse mediante la ecuación 3.2

$$D = (ToF/2)V_{sonido} \quad (3.2)$$

Una alternativa al sistema de ultrasonidos es usar la tecnología de infrarrojos. Su principal ventaja es su rápida respuesta y por ello resulta beneficioso para aplicaciones en tiempo real como pueden ser los sensores de proximidad. La principal desventaja es que presentan no linealidades procedentes de su dependencia con la superficie de reflexión. Es necesario un conocimiento a priori de las características de dispersión, absorción etc. del material sobre el que incide la onda emitida para poder realizar una medida de distancia correcta.

Teniendo en cuenta las características de ambos sensores, se decidió que el sensor más apropiado para la aplicación clínica de este trabajo es el sensor de ultrasonidos, ya que su coste

no es elevado y su resolución y su latencia son aceptables. Se ha descartado el uso de un sensor de infrarrojos, por un lado, porque la velocidad no es un factor crítico y por otro lado, realizar una medida de distancia con este tipo de sensores supone la necesidad de conocer a priori el material del calzado de cada paciente o añadir una superficie con un material concreto en uno de los zapatos del paciente lo cual hace que el diseño resulte menos ergonómico. Finalmente añadir que aunque existen sensores de infrarrojo basados en la medida de desfase que podrían utilizarse como sensores de distancia, su precio es realmente elevado para las características necesarias en este trabajo [11]

3.3.2. Sensor de ultrasonido propuesto

El principal objetivo en el diseño del sensor es optimizar el compromiso entre bajo coste y precisión. En la Figura 3.7 puede verse el prototipo del sensor. Este primer prototipo está compuesto por un sensor de ultrasonidos HC-SR04 (1), un módulo Bluetooth (2) para el envío de datos a un PC, una placa Arduino UNO (3) para el procesamiento de la información del sensor, y la alimentación mediante una pila recargable de 9V (4) para dotar de autonomía al sistema.

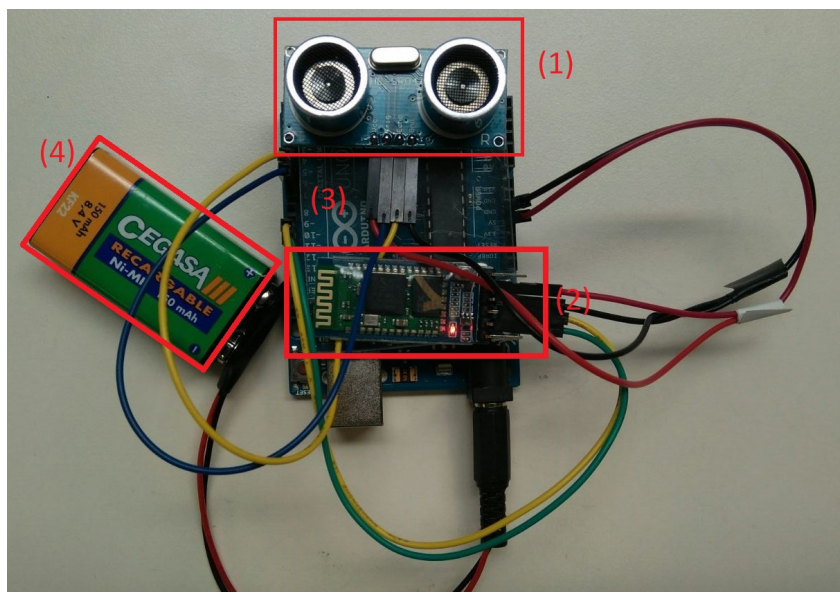


Figura 3.7: Prototipo de sensor de ultrasonidos

Conexión del sensor

El conexionado del prototipo (apartado 3.3.2), aparece representado de manera esquemática en la Figura 3.8 con el fin de clarificar las conexiones. En un futuro diseño más compacto, la placa utilizada, así como algunos de los componentes, serán modificados manteniendo el enfoque de bajo coste, ergonomía y precisión. Por ello las conexiones podrán ser modificadas según sea necesario.

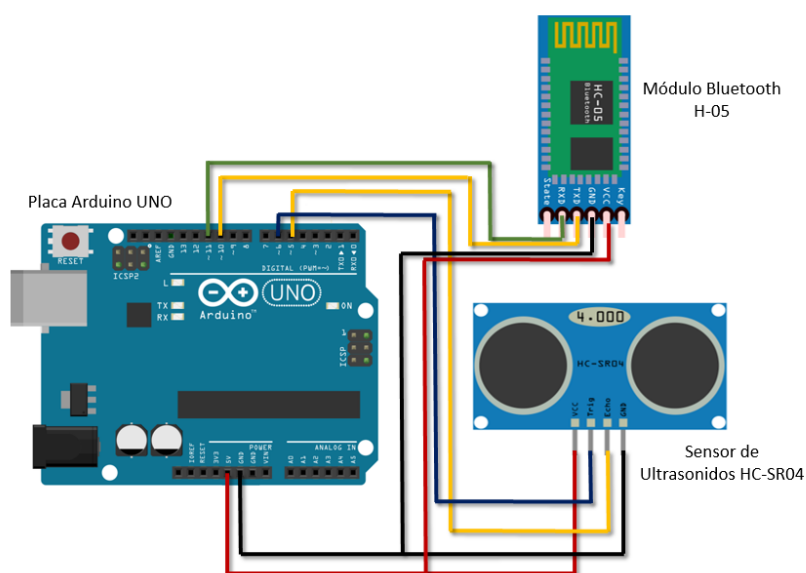


Figura 3.8: Esquema de conexión del sensor de ultrasonido

3.3.3. Comunicación del sensor

Bluetooth

Para el envío de la información de distancia desde la placa Arduino hasta el PC donde se van a procesar los datos, se ha elegido el módulo comercial Bluetooth H-05 que aparece representado en la Figura 3.9.

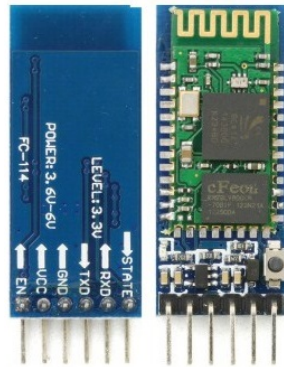


Figura 3.9: Módulo Bluetooth HC-05

Dicho módulo se comunicará con un dongle USB 4.0 en el PC ya que éste no dispone de interfaz Bluetooth de serie (ver Figura 3.10). Además es compatible con estándares anteriores (2.0, 3.0) por lo que resulta apropiado para el diseño.



Figura 3.10: Dongle Bluetooth 4.0 WhiteLabel

Software de captura

En este trabajo se ha diseñado un software de captura (Figura 3.11) para la obtención de los datos de distancia suministrados por el sensor.



Figura 3.11: Software de captura de sensor de ultrasonidos

Las funcionalidades principales de este software son:

1. Creación del interfaz Bluetooth para la comunicación con Matlab.
2. Representación de los datos recogidos en tiempo real.
3. Posibilidad de guardar los datos en un archivo.
4. Posibilidad de cargar un archivo y representarlo offline.

3.4. Procedimiento de medida

3.4.1. Set-up de medida

Para demostrar la viabilidad del sistema en cuanto a su capacidad para medir la distancia de separación entre pasos, se proponen dos set-ups que consisten en establecer unas marcas en

el suelo a una distancia conocida para así, una vez realizado el procesado de las señales, poder determinar si los resultados son correctos. El primer set-up consta de una medida de paso de 43 cm (ver Figura 3.12) y el segundo para una de 80.5 cm (ver Figura 3.13).

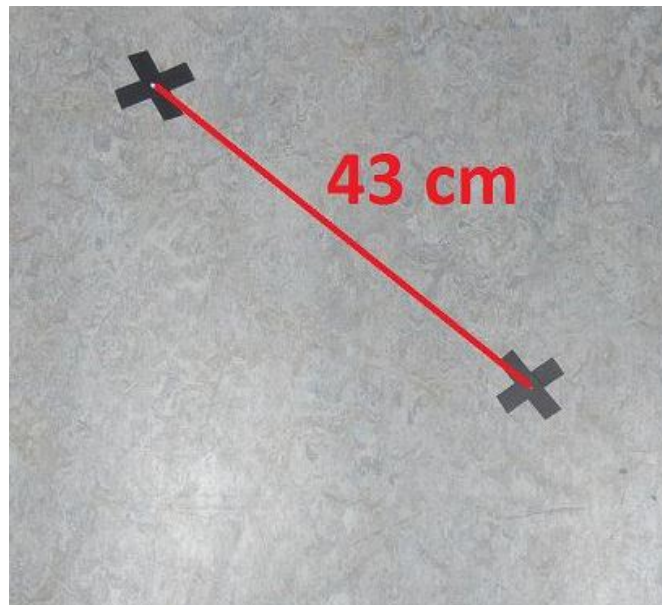


Figura 3.12: Set-up de medida de un paso de 43 cm

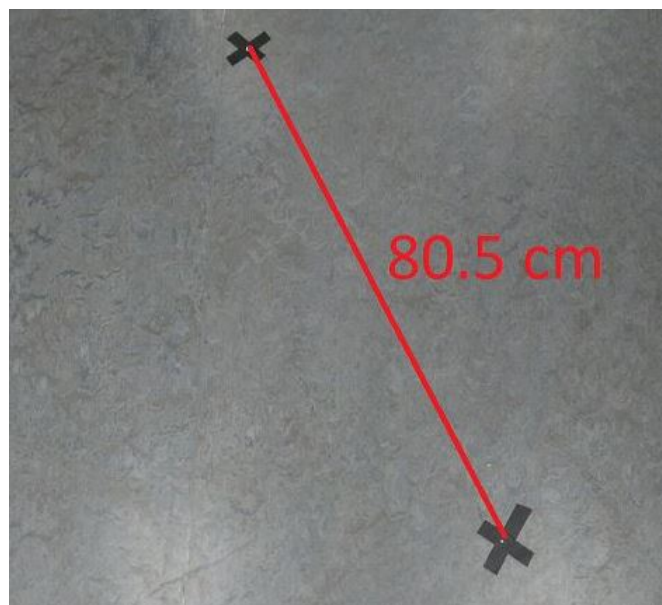


Figura 3.13: Set-up de medida de un paso de 80.5 cm

Este montaje permitirá el poder medir un la distancia de un paso para verificar que el tanto el

funcionamiento como el procesado con correctos. Se dejará como línea futura el poder realizar el procesado de forma automática y para varios pasos. Para realizar las medidas se ha colocado un sensor inercial en cada pie y el sensor de ultrasonidos en el tobillo según se representa en la Figura 3.14 y 3.15.

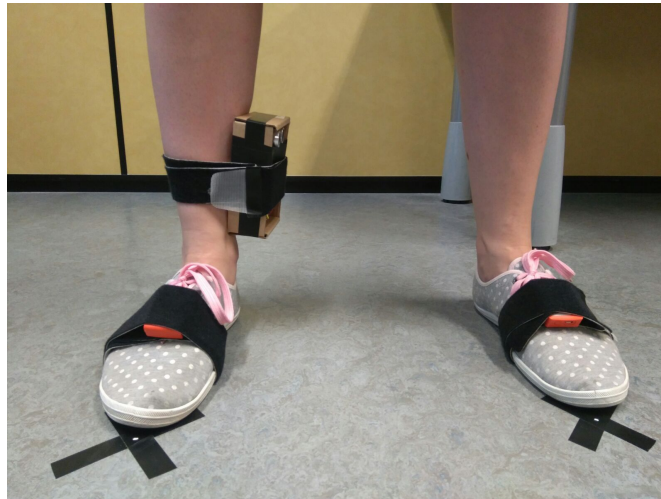


Figura 3.14: Colocación de los sensores para la medida

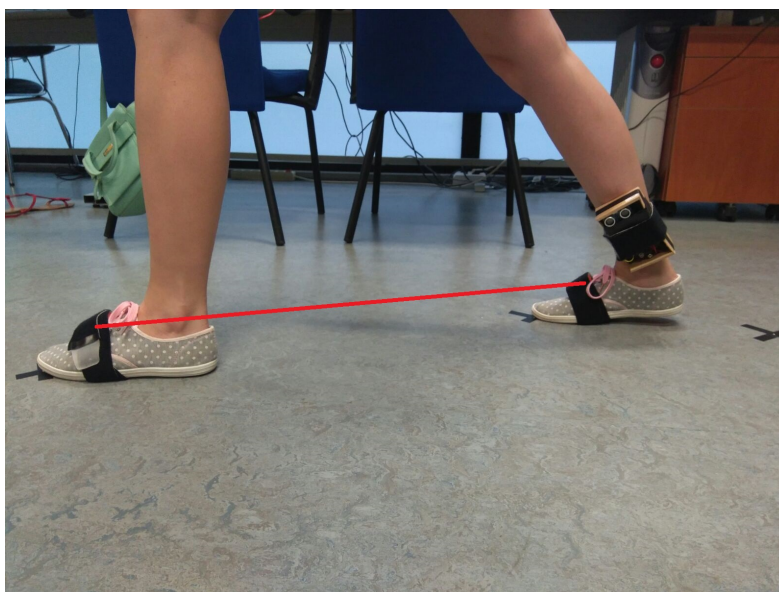


Figura 3.15: Ejemplo de paso para la medida

3.4.2. Captura de datos

Para llevar a cabo la medida se colocará un sensor inercial en cada pie y el sensor de ultrasonidos en uno de ellos. A continuación, se capturarán los datos de los sensores inerciales mediante el software específico MTManager de Xsens y los datos del sensor de ultrasonido mediante el software realizado con MATLAB®

3.4.3. Sincronización

Una de las etapas clave del diseño del sistema a tiempo real es el de la sincronización de ambos sensores. En este trabajo, para una demostración de funcionamiento, el procesado de las señales de ambos sensores se realizará por separado de forma que se pueda demostrar el funcionamiento del sistema y se dejará como línea futura de investigación la sincronización.

Se pretende conseguir una lectura de los datos del sensor de ultrasonido en el PC con un tiempo de muestreo constante. En este punto del trabajo se encuentran dificultades con la forma en que Matlab lee los datos. Los datos enviados por el sensor son constantes pero la lectura hace ese tiempo variable. Si se consigue un tiempo constante, mediante procesados como la interpolación podría sincronizarse con los sensores inerciales. Además, debido a que se utilizan dos programas de captura, es necesario establecer un inicio que se considere como principio tanto para las señales de los sensores inerciales como el de ultrasonidos.

3.4.4. Obtención de distancia

Para la obtención de la distancia de separación entre pasos existen tres scripts realizados con la herramienta software Matlab®

Mediante un software en Matlab® se cargan las señales y se realiza el post-procesado para obtener cada una de las distancias que van a permitir la obtención de la distancia de separación entre pasos.

Se procesará el cálculo de las distancias deseadas de los sensores inerciales y del de ultrasonido y dichas informaciones se utilizarán para la obtención de la distancia de separación entre pasos.

Sensores inerciales

Para la obtención del dato de distancia a partir de las señales proporcionados por los sensores inerciales es necesario tener en cuenta que la distancia se recorre en el plano en el que se produce el avance, que es este caso es el plano XY.

Para obtener la posición en este plano a partir de la aceleración en los tres ejes XYZ proporcionada por los sensores inerciales, es necesaria una doble integración. Posteriormente se elimina la deriva existente en las señales debido a esta integración. A continuación se describen los cálculos realizados

■ Obtención de la velocidad

Se realiza una primera integración de la aceleración en el eje X y en el eje Y de donde se obtiene la velocidad tal y como aparece en la Figura 3.16

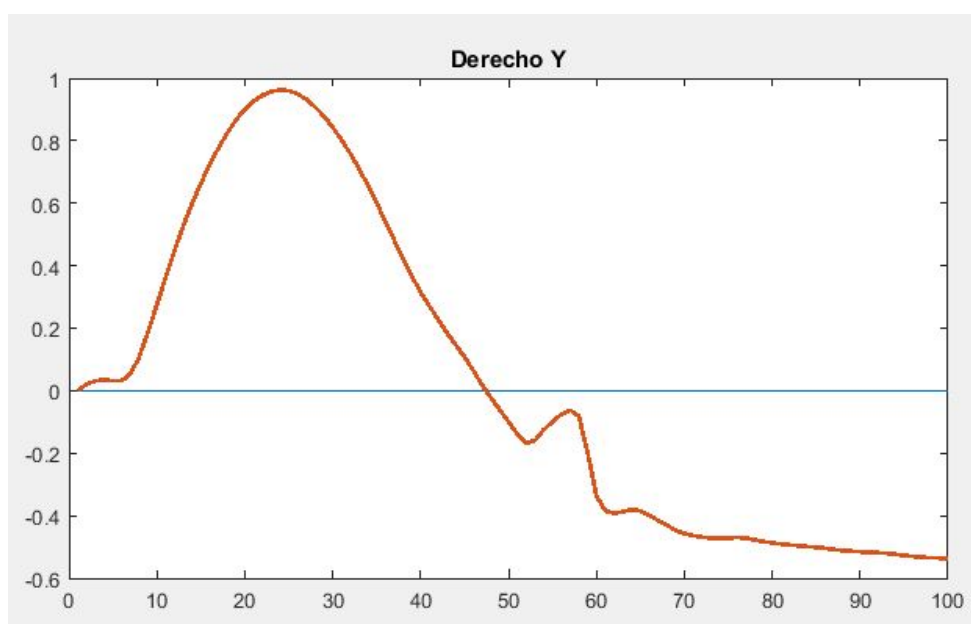


Figura 3.16: Ejemplo de deriva en la señal

■ **Obtención de la velocidad sin deriva**

En el instante de inicio y fin del paso, cuando el pie permanece apoyado, la velocidad debe ser cero.. Para lograr eliminar la deriva en la señal se propone utilizar la ecuación de la recta (color morado) que aparece en la Figura 3.17 . Dicha recta entre dos puntos A(a1, a2) y B(b1,b2) se define mediante la ecuación 3.3

$$y = \left(\frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} \right) * (x - a_1) + b_1 \quad (3.3)$$

;donde:

- b2: coordenada y del último punto escogido (B)
- b1: coordenada x del último punto escogido (B)
- a2: coordenada x del primer punto escogido (A)
- a1: coordenada y del primer punto escogido (A)

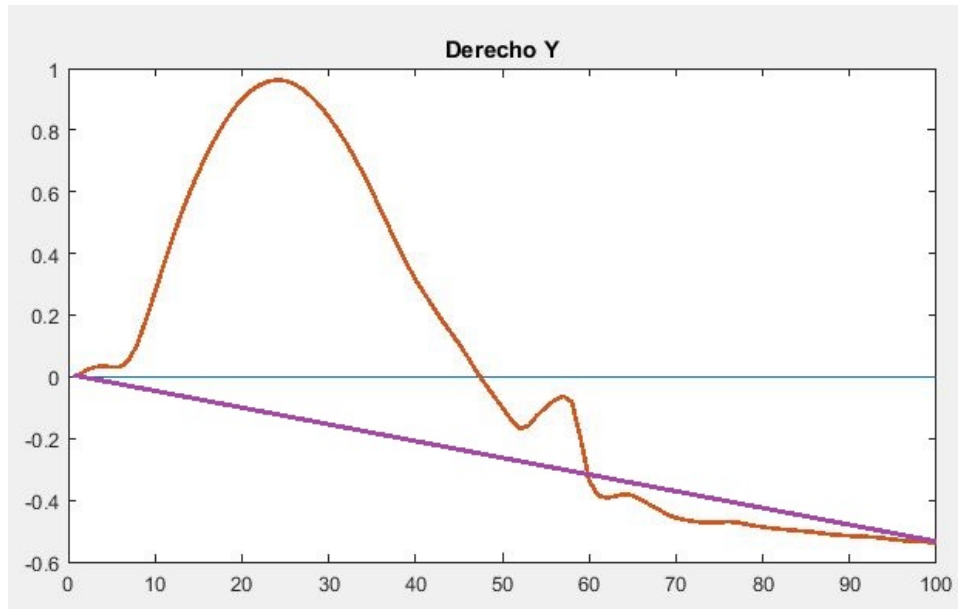


Figura 3.17: Recta para la corrección de la deriva

De esta forma restando a la señal de velocidad la recta calculada, el resultado es el que aparece en la Figura 3.18 donde se representa la velocidad sin deriva.

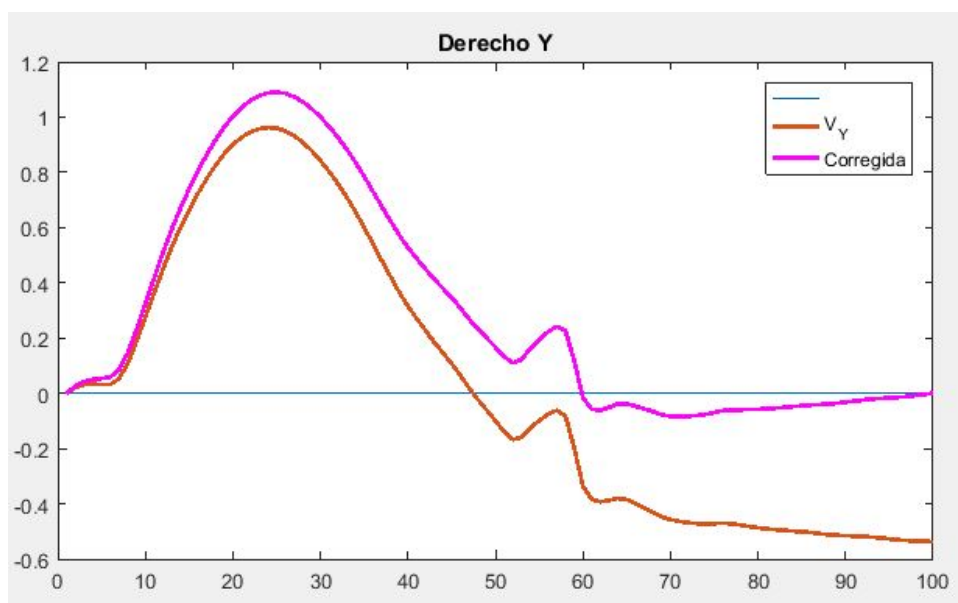


Figura 3.18: Ejemplo eliminación de la deriva

■ Obtención de distancia D2 de sensores inerciales

Una vez corregida la deriva en las velocidades X e Y de los sensores izquierdo y derecho es necesaria una segunda integración para hallar la posición en cada uno de los ejes. A continuación se representa la posición en el eje X con respecto al eje Y para calcular la distancia total en el plano XY (ver Figura 3.19)

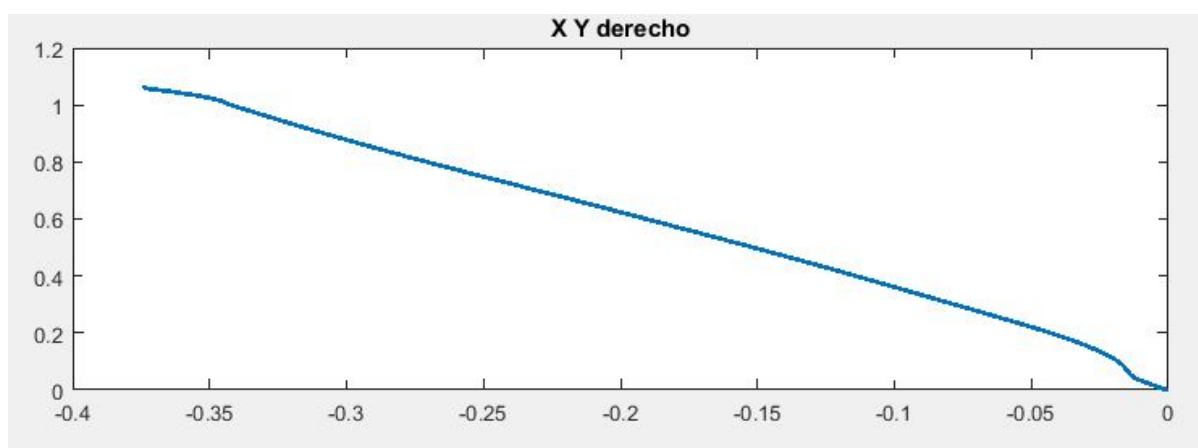


Figura 3.19: Ejemplo eliminación de la deriva

Para el cálculo de la distancia será necesario la eliminación de la deriva en la posición.

La distancia (D2) ahora será la distancia entre los puntos inicial y final de la Figura 3.19, una vez corregida la deriva, que se calculará mediante la ecuación 3.4

$$Distancia = \sqrt{(b_1 - a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2} \quad (3.4)$$

$$B = [b_1, b_2] \quad (3.5)$$

$$A = [a_1, a_2] \quad (3.6)$$

;donde:

- b2: coordenada y del último punto escogido (B)
- b1: coordenada x del último punto escogido (B)
- a2: coordenada x del primer punto escogido (A)
- a1: coordenada y del primer punto escogido (A)

Sensor de ultrasonido

Previamente a la obtención de la distancia que se desea obtener usando el sensor de ultrasonido, se realiza una comprobación del correcto funcionamiento tanto del dispositivo como del envío de datos al PC vía Bluetooth. Inicialmente se realizan medidas con el sensor en estático. Para ello se propone el set-up de medida que aparece representado en la Figura 3.20.

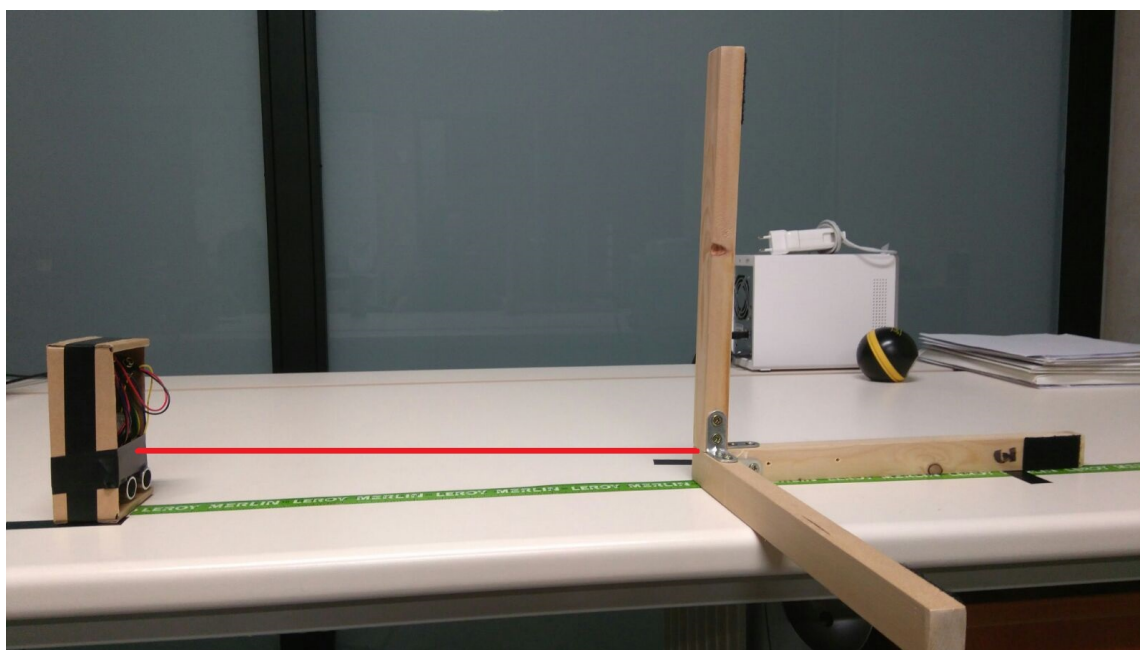


Figura 3.20: Setup medida estática de sensor de ultrasonido

Para estimar la precisión y el correcto funcionamiento del sensor se ha calculado el error absoluto y relativo de cada una de las medidas realizadas.

Una vez hecha dicha comprobación en estático, se añade al sistema de medida completo. Para ello se coloca el sensor en el tobillo y con el sensor orientado hacia la otra pierna (ver Figura 3.21).



Figura 3.21: Colocación de sensor para medidas en dinámico

Obtención de distancia de separación entre pasos

Una vez calculadas las distancias necesarias, se procede al cálculo de la distancia de separación entre pasos. En la Figura 3.22 se representa dicho cálculo. La distancia D2 es la correspondiente al cálculo de la distancia con el sensor inercial izquierdo en este caso, la distancia D1 es la distancia calculada mediante el sensor de ultrasonido.

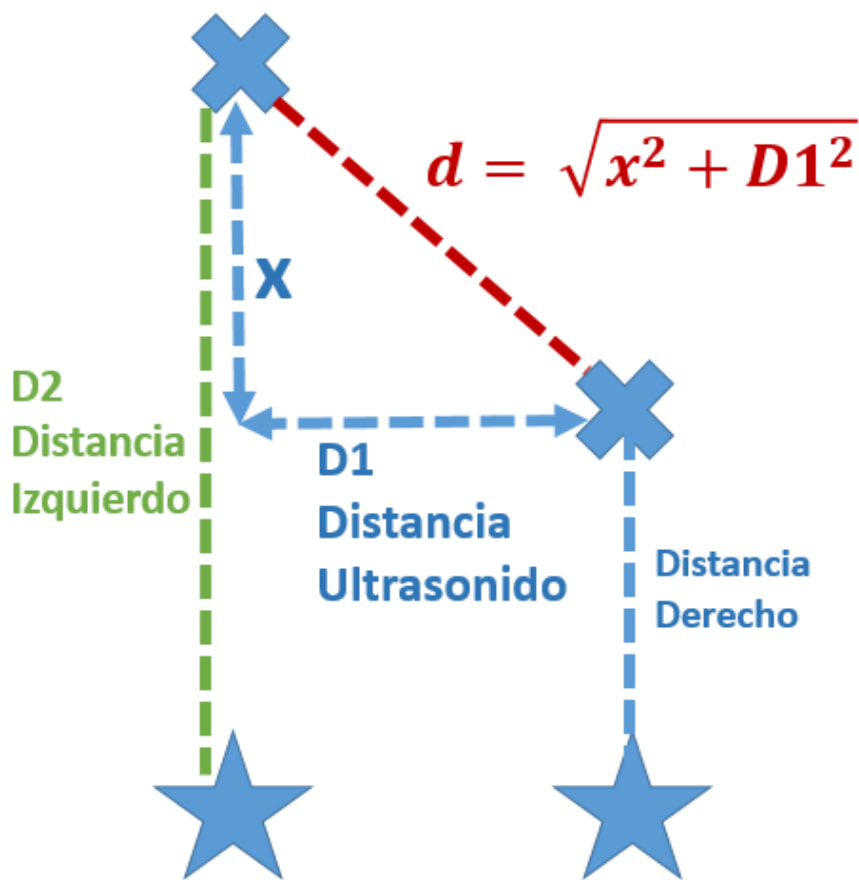


Figura 3.22: Cálculo final de distancia de separación entre pasos

Por tanto, para obtener X se utiliza la ecuación 3.7

$$x = D2 - DistanciaDerecho \tag{3.7}$$

En el caso de que el primero de los pasos se comenzase con el izquierdo la ecuación es la relativa a la DistanciaIzquierdo.

Para determinar la distancia, se utiliza por tanto, la ecuación 3.8

$$d = \sqrt{x^2 + D1^2} \quad (3.8)$$

4

Resultados y análisis

En este capítulo se detallan las medidas para la comprobación del sensor de ultrasonido. Para ello, se han realizado primero medidas en estático que han permitido la comprobación de la conectividad del sensor con el PC y a continuación se han realizado en dinámico para comprobar que es viable la medida de separación entre piernas para poder después medir la distancia de separación entre pasos.

4.1. Resultados

4.1.1. Medidas en estático

Mediante el set-up de medida representado en anteriores apartados se realizan pruebas en estático del sensor de ultrasonidos para verificar que funciona correctamente. Para ello, se realizaron medidas a una distancia de 5 cm, de 35 cm y de 60 cm. No se consideraron distancias mayores ya que creemos que la separación entre piernas no superará ese rango de distancias.

■ Medida de 5 cm

En la Figura 4.1 aparece representada la medida para una distancia de 5 cm.

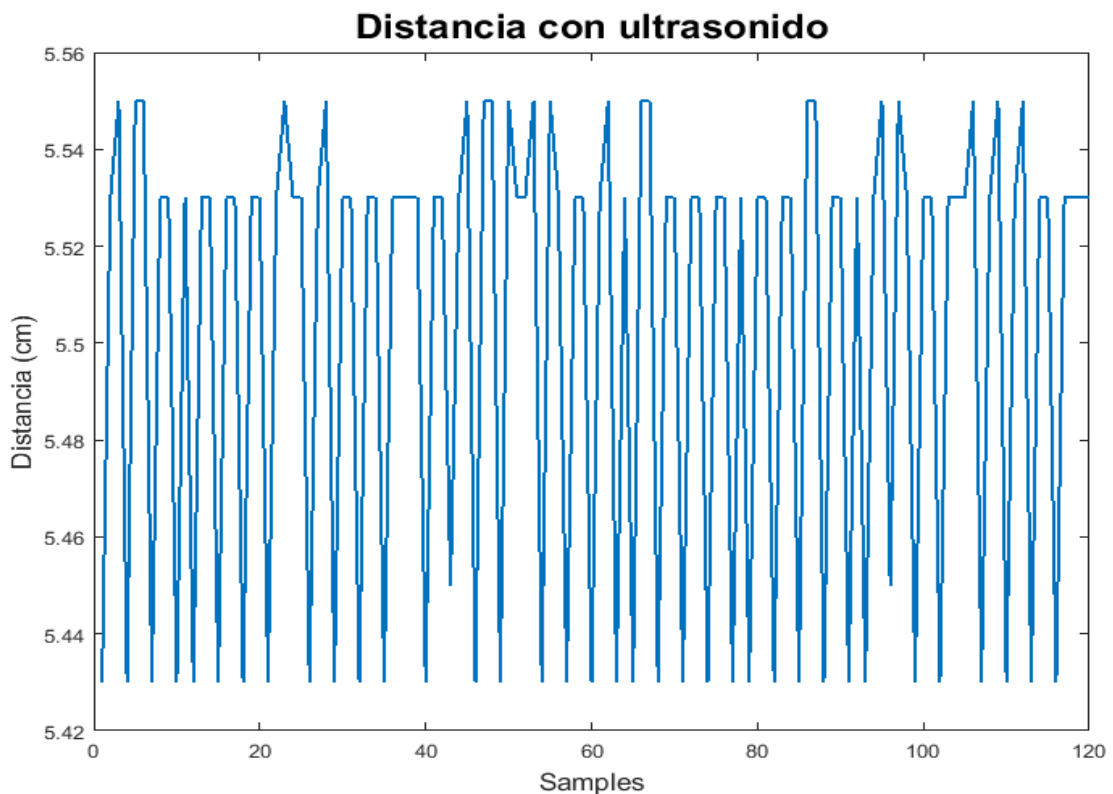


Figura 4.1: Medida de sensor de ultrasonido en estático.

■ Medida de 35 cm

En la Figura 4.2 se representa una medida con un obstáculo situado a 35 cm del sensor.

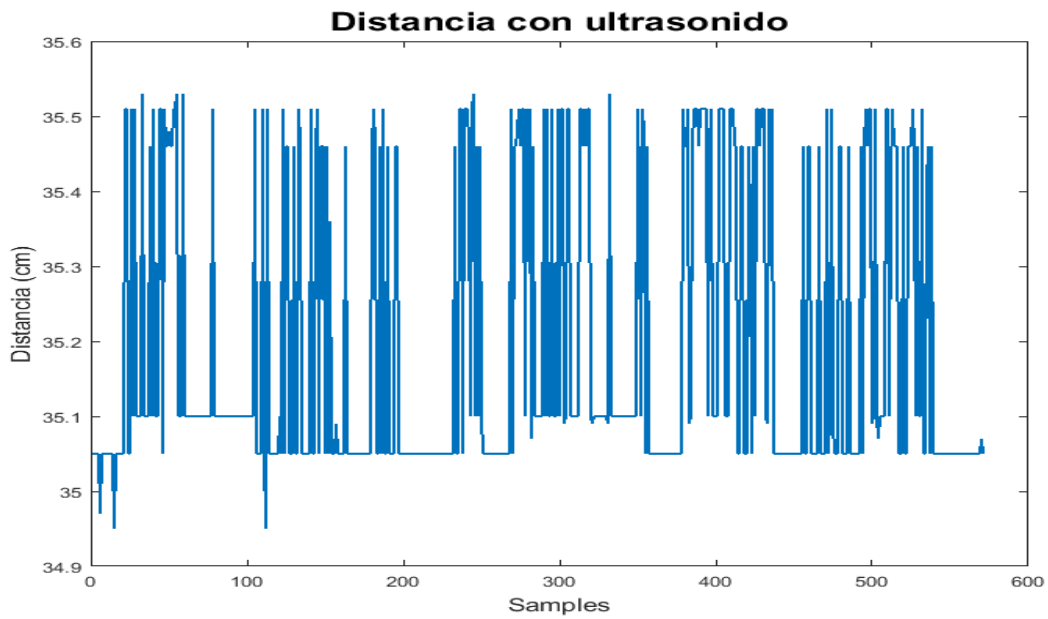


Figura 4.2: Medida de sensor de ultrasonido en estático.

■ **Medida de 60 cm**

En la Figura 4.3 se representa la medida realizada a 60 cm.

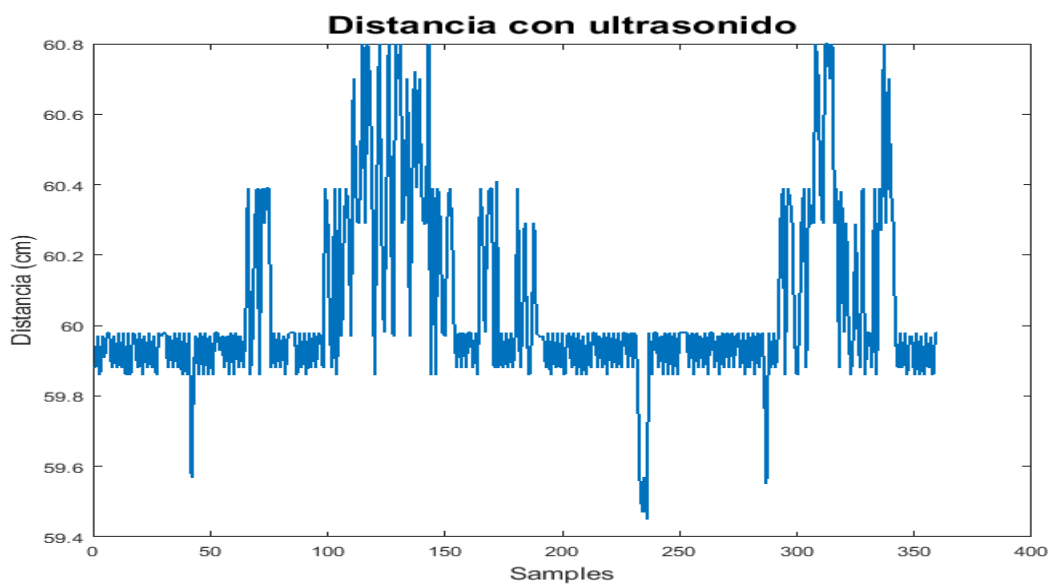


Figura 4.3: Medida de sensor de ultrasonido en estático.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para estimar la precisión del sistema se han calculado tanto errores absolutos como relativos de cada una de las medidas.

4.1.2. Medidas en dinámico

En la Figura 4.4 se observa cómo la distancia es de 28,38 cm. Dicho resultado se ha obtenido cuando la persona a la que se medía daba un paso.

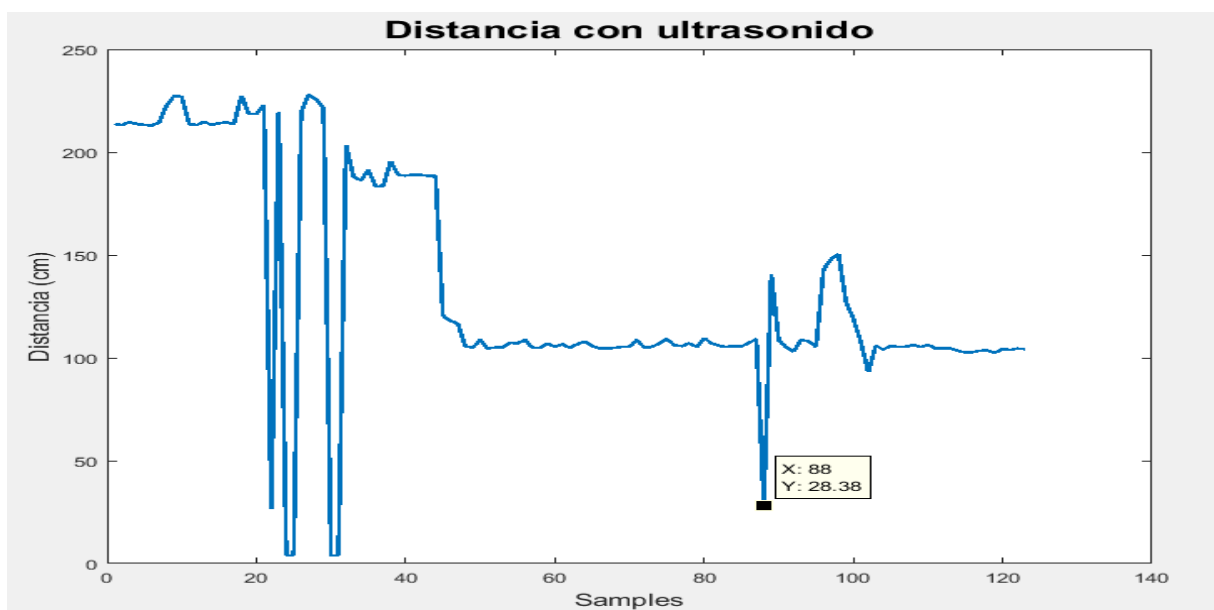


Figura 4.4: Medida sensor de ultrasonido en dinámico

En la Figura 4.5 se representa otra medida realizada por diferente sujeto y dando un paso de diferente longitud. En este caso también la distancia entre las piernas es de 24,55 cm

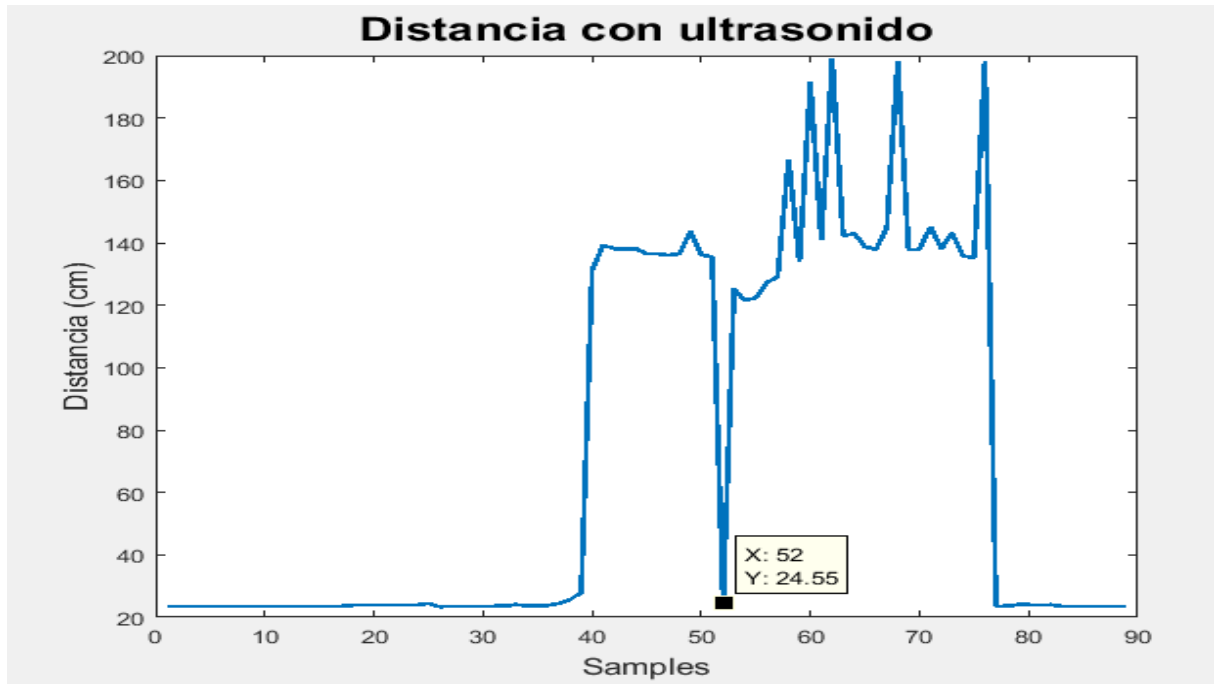


Figura 4.5: Medida sensor de ultrasonido en dinámico

Con los datos de distancia calculados mediante los diferentes sensores se puede calcular la distancia de separación entre pasos mediante lo detallado en el Capítulo 3.

4.2. Análisis de resultados

En la Tabla 4.1 aparecen representados los datos obtenidos en las medidas con el sensor en estático. Se observa como la precisión es mayor en valores intermedios de distancia, es decir en aquellos valores en los que estará comprendido el valor de distancia de separación entre piernas. El mayor error se da para el caso de 5 cm pero en este contexto la distancia que se desea medir será mayor a ese valor.

	Medida 1 (5 cm)	Medida 2 (35 cm)	Medida 3 (60 cm)
Medida	5 cm	35 cm	60 cm
Error absoluto	0.5022 cm	0.1870 cm	0.1906 cm
Error relativo	10,0433 %	0.5342 %	0.2816 %

Tabla 4.1: Tabla medidas en estático

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 4.2 se representan cinco medidas realizadas a diferentes sujetos con el sensor mientras se efectúa un paso.

Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
28,38 cm	24,55 cm	23,42 cm	24,89 cm	26,55 cm

Tabla 4.2: Tabla medidas en dinámico

Para determinar la validez y fiabilidad de los medidas realizadas en dinámico se pidió a los sujetos que participaron en la validación que realizarán pasos sobre marcas en el suelo, situadas a distancias fijas. Estas marcas simulan diferentes longitudes de paso (Figura 4.6). D1 es de aproximadamente 25 cm pero dependiendo del sujeto puede variar.

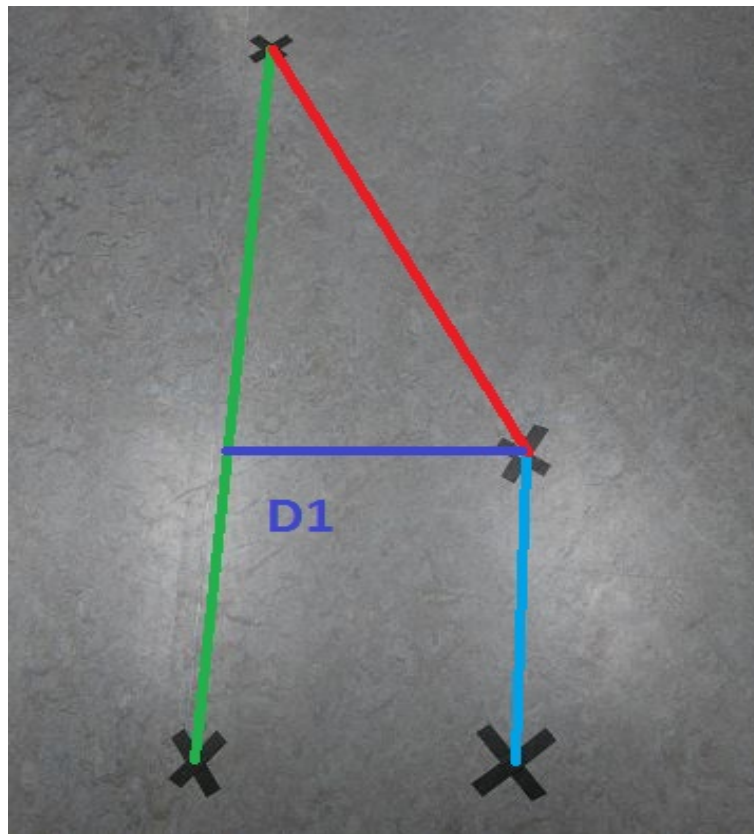


Figura 4.6: Validación del sensor de ultrasonidos en dinámico

5

Conclusiones y líneas futuras

Se ha diseñado un sensor de ultrasonido para medir la distancia de separación entre piernas para una posterior implementación en un sistema que permita la medida de la distancia de separación entre pasos.

Una vez realizadas las distintas medidas de la distancia de separación, tanto en estático como en dinámico, puede concluirse que el sistema propuesto es adecuado para la determinar la distancia entre piernas de un sujeto al caminar.

Los resultados de este trabajo han sido útiles para determinar la viabilidad al realizar un primer prototipo como solución al problema planteado.

Con el fin de lograr una mayor precisión en las medidas, debido a que la velocidad del

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

sonido depende de la temperatura según la ecuación 5.1, se propone como línea futura añadir un sensor de temperatura.

$$V_{sonido} = 331,4 + 0,6 * T_c \quad (5.1)$$

Por otra parte, será necesario trabajar en el diseño de un sensor más compacto para mejorar su funcionalidad y conseguir un diseño más ergonómico.

Además, como línea futura se pretende crear un prototipo que pueda procesarse en tiempo real permitiendo al personal sanitario obtener información instantánea que ayude en la valoración de la evolución del paciente. Así, se deberán automatizar los algoritmos de los que se dispone actualmente y también desarrollar un software que permita la sincronización de los sensores inerciales con el de ultrasonidos para llevar a cabo el procesado on-line.

También se intentará hacer una futura validación del sistema comparando las medidas de la distancia entre pasos usando el sensor de ultrasonidos y las obtenidas con tapices de presión o instrumentalizados.

Por último, para poder realizar la medida objetivo de la distancia de separación entre pasos, será necesario incluir un algoritmo de corrección de deriva en la posición que permita determinar las distancias de los sensores inerciales de forma precisa.

Bibliografía

- [1] *Ictus Datos*. Federación española de Ictus. URL: <https://ictusfederacion.es/infoictus>.
- [2] *Ictus*. Observatorio del ictus. URL: <http://www.observatoriodelictus.com/index.php/que-es-un-ictus>.
- [3] *Secuelas y complicaciones tras ictus*. URL: http://www.guiasalud.es/egpc/ictus_ap/resumida/apartado06/manejo_alta03.html.
- [4] *Gasto asociado al cuidado de un enfermo*. URL: <http://www.elmundo.es/suplementos/salud/2007/733/1196463608.html>.
- [5] Begoña Rodero Lasheras. *Procesado de señales proporcionadas por sensores inerciales: Evaluación de la marcha post-ictus*. URL: http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/21879/TFG_MB_Rodero_Lasheras.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [6] S. E. M. Lawson R.G. Morris. *A review and evaluation of available gait analysis technologies, and their potential for the measurement of impact transmission*. Newcastle University.
- [7] Henk C. Schamhardt Hilary M. Clayton. *Measurement Techniques for Gait Analysis*. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.1447&rep=rep1&type=pdf>.

BIBLIOGRAFÍA

- [8] F Patanè P Cappa R Di Marco S Rossi. *Technical quality assessment of an optoelectronic system for movement analysis*. University of Tuscia, Viterbo, Italy.
- [9] Julian A. Feller Kate E. Webster Joanne E. Wittwer. *Validity of the GAITRite1 walkway system for the measurement of averaged and individual step parameters of gait*.
- [10] Jaap H-Buurke Bert-Jan F. Van Baijnum Peter H. Veltink Fokke B. Van Meulen Dirk Weenk. *Ambulatory assessment of walking balance after stroke using instrumented shoes*. URL: <http://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12984-016-0146-5>.
- [11] J.E. Simó P. Pérez G. Benet F. Blanes. *Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots*. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/79ce/8e7294c2125749da28c85cdfa28f5c802f02.pdf>.

