

Tesis doctoral
2013

Resumen en castellano

Redes de sensores adaptativas para localización y seguimiento de objetivos móviles

David Moreno Salinas
Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial

Departamento de Informática y Automática
E.T.S.I. Informática, UNED

Director: Joaquín Aranda Almansa
Codirector: António M. Pascoal

Índice general

Índice general	iii
1. Resumen	1
1.1. Capítulo 1: Introducción	1
1.1.1. Sistemas acústicos de posicionamiento y navegación submarina	3
1.2. Capítulo 2: Localización de un objetivo en espacios de 2 dimensiones con medidas de distancia	5
1.3. Capítulo 3: Localización de múltiples objetivos en espacios de 2 dimensiones con medidas de distancia	6
1.4. Capítulo 4: Localización de un objetivo en espacios de 3 dimensiones con medidas de distancia	7
1.5. Capítulo 5: Localización de múltiples objetivos en espacios de 3 dimensiones con medidas de distancia	8
1.6. Capítulo 6: Localización de un objetivo en espacios de 3 dimensiones con medidas de ángulos	9
1.7. Capítulo 7: Localización de un objetivo submarino mediante un único sensor de superficie	10
1.8. Capítulo 8: Conclusiones	11
Bibliografía	15

RESUMEN

Este documento es un resumen en castellano de la tesis titulada “Adaptive Sensor Networks for Target Localization and Tracking” cuya memoria está escrita en inglés. El documento se encuentra estructurado en secciones, siendo cada una de ellas un resumen de un capítulo del manuscrito original de la tesis.

1.1. Capítulo 1: Introducción

El agua es el principal componente de la superficie de nuestro planeta, tal que el 70 por ciento de la superficie del mismo se encuentra cubierta por este líquido elemento, el cual lo podemos encontrar en diferentes formas, como ríos, lagos y principalmente océanos. Los océanos son aún unos grandes desconocidos a pesar de que poseen las mayores reservas minerales, energéticas y alimentarias del planeta, además de desempeñar un papel fundamental en la regulación del clima. Por estas razones, en los últimos años, el estudio de los mismos está creciendo de forma exponencial en busca de métodos y herramientas para su explotación, tanto en áreas científicas como comerciales. Los últimos avances realizados en el campo de la robótica marina, sensores, computadores, comunicaciones y sistemas de información se están aplicando para desarrollar nuevas tecnologías que nos conduzcan a formas de investigar los océanos más seguras, rápidas y mucho más eficientes, especialmente en ambientes adversos.

Como parte de esta tendencia, existe un creciente interés en el desarrollo de vehículos autónomos submarinos (AUVs) capaces de explorar los océanos libremente, recolectando grandes cantidades de datos y reaccionando de forma automática y en tiempo real a los diferentes eventos que puedan encontrarse. Las áreas en las que los robots marinos están incrementando su campo de aplicación, debido a la versatilidad y buen funcionamiento que demuestran en un elevado número de aplicaciones, cubren un amplio rango que va desde la inspección de tuberías de gas y petróleo hasta la investigación biológica, así como la preservación de la herencia cultural sumergida. Una de las tareas más interesantes e importantes en las que podemos aplicar los robots marinos es en las tareas colaborativas entre dichos robots, e incluso con humanos. En este último caso los robots pueden desarrollar el rol

de guardianes guiando a los operarios humanos o actuando como vehículos de transporte del equipamiento necesario para dichos operarios. De esta manera, este es un momento crucial en el que los océanos y sus recursos pueden entenderse y explotarse como nunca antes se había hecho, y al mismo tiempo, es el momento de construir las políticas necesarias para un correcto aprovechamiento y conservación de los mismos.

Los requerimientos técnicos de los robots marinos son muy exigentes. Estas exigencias vienen impuestas por multitud de factores como la operación durante periodos de tiempo largos en condiciones adversas, ambientes agresivos, limitación en los sistemas de comunicación, etc. Este último problema es uno de los más importantes ya que los sistemas de comunicación habituales no son válidos para vehículos submarinos, de modo que el determinar la posición de un robot y/o un buzo en un espacio tridimensional mientras están realizando una determinada misión se vuelve un problema de difícil solución. Este problema se encuentra unido al hecho de que actualmente el paradigma de las operaciones con robots marinos está cambiando desde los habituales sistemas con un único y complejo robot equipado con una gran cantidad de sensores, hacia sistemas más simples y fáciles de desarrollar en los que varios vehículos están funcionando en cooperación para la realización de una determinada tarea, e incluso interactuando con humanos.

El rápido desarrollo de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y las tecnologías ligadas a los mismos y su uso en multitud de sistemas comerciales como receptores GPS, brújulas y acelerómetros en teléfonos móviles, coches o incluso controles de videojuegos puede hacer que pensemos que es un problema prácticamente resuelto y que sólo será un problema real en un número muy limitado de situaciones. Sin embargo, existen muchos escenarios en donde el GPS común no es válido.

- Entornos *indoor*: Las señales GPS se ven bloqueadas dentro de edificios, [46], [73].
- Entornos urbanos: Las señales GPS son bloqueadas por edificios cercanos o incluso totalmente bloqueadas dentro de túneles, [19].
- Cuevas: en tierra o submarinas, [26].
- Espacio: Aunque existen algunos trabajos experimentales en GPS exteriores a la tierra, por lo general, las señales GPS no están disponibles en el espacio, [59].
- Entornos submarinos: el GPS es bloqueado por la superficie del agua, [50], [45].

De esta manera, está claro que el problema de localización en aquellas áreas donde el GPS común no está disponible es un problema creciente en los últimos años. La localización de un objetivo submarino se realiza mediante la recolección de unas determinadas señales mediante una red de sensores convenientemente diseñada. El objetivo de este trabajo es determinar la posición de los sensores para que la información obtenida sobre la fuente emisora u objetivo sea máxima, es decir, determinar la colocación de los sensores con la que se obtiene un posicionamiento del objetivo lo más preciso posible. Puede ser que nos encontremos con restricciones con respecto a las posiciones que los sensores pueden ocupar, por ejemplo, en un posicionamiento submarino con una red de sensores de superficie los sensores se encuentran restringidos al plano de superficie.

La importancia de un posicionamiento preciso es clara en varios escenarios de aplicación como radar, sónar, comunicaciones móviles inalámbricas, astronomía, seismología, acústica, geofísica, etc. La precisión de la estimación del objetivo se puede comprobar considerando

la cercanía de la estimación con la posición real. Hay una gran cantidad de algoritmos para determinar la posición de un objetivo. Estas técnicas dependen de la información disponible para la red de sensores, pudiendo ser el nivel de energía de la señal entre objetivo y sensores, conocida como energía de la señal recibida (RSS) [71], [17], diferencia de tiempo de llegada (TDOA) y tiempos de llegada (TOA) [57], [45], [87], [2], [10]; ángulo de llegada (AOA) [9], información angular (BI) [35], [52], [63], o medidas de distancias (RM) [3], [41], [5], [60], [61]. Estas técnicas de localización requieren un conocimiento preciso de la posición de los sensores, ya que cualquier error en dichas posiciones se traslada de forma directa a la estimación de la posición del objetivo.

En este trabajo, como en la mayoría de los trabajos que se pueden encontrar en la literatura, el posicionamiento óptimo de los sensores se realiza minimizando el límite teórico determinando por el Cramer-Rao Lower Bound (CRLB), que es un límite inferior en la varianza de estimación, o de forma equivalente, optimizando cualquier indicador basado en la Matriz de Información de Fisher (FIM), ya que $CRLB = FIM^{-1}$. De forma resumida, la información de Fisher es una manera de medir la cantidad de información que una variable aleatoria observable, en este trabajo medidas de distancia (*range*) o de ángulos (*bearings*), contiene sobre un parámetro desconocido, la posición del objetivo, del cual depende la probabilidad de la variable aleatoria observable. Por lo tanto, los sensores deben estar en posiciones tales que la información recolectada por ellos maximice la precisión con la que la posición del objetivo es estimada.

Esta tesis doctoral está centrada en el problema de posicionamiento submarino. Este problema es de máxima importancia para el desarrollo de sistemas de posicionamiento con los que poder localizar múltiples objetivos submarinos con la máxima precisión posible. Estos sensores, además, deben ser capaces de seguir los movimientos de los objetivos para mantener la precisión en la localización requerida en cada momento de la misión. El criterio de optimización utilizado en este trabajo para determinar la formación óptima será el determinante de la matriz de Fisher o la traza de la matriz del CRLB.

1.1.1. Sistemas acústicos de posicionamiento y navegación submarina

Las aplicaciones relacionadas con el posicionamiento y navegación submarina mediante señales acústicas cubren tanto actividades científicas como comerciales, tales como exploración biológica o arqueológica, estudio del hábitat marino, inspección de instalaciones submarinas de gas y petróleo, por citar algunos ejemplos. La disponibilidad de sistemas de posicionamiento submarino es algo básico para un gran número de AUVs, de tal manera que se pueda seguir el progreso de una misión o, si se dispone de modems acústicos, utilizarlo como ayuda de navegación para los vehículos. Los mismos comentarios son aplicables a una nueva generación de sistemas de posicionamiento para ayudar en el seguimiento de uno o más buzos, como se propone en el contexto del proyecto CO3AUVs [8]. Existe una gran diversidad de sistemas de posicionamiento para diferentes tareas y con diferentes grados de precisión, la mayoría de ellos basados en el cálculo de distancias o ángulos a fuentes acústicas con posiciones conocidas, midiendo el tiempo de llegada de las señales (TOA) o la diferencia en el tiempo de llegada (TDOA) de las señales acústicas [57], [45], [87], [2], [10]. Los sistemas de posicionamiento submarino más comunes son:

- *Ultra Short Baseline System, USBL.*

Este sistema es uno de los más usados para sistemas de posicionamiento submarino. Está basado en un transmisor-receptor (transceptor) montado en el casco de un barco y un transmisor-responder (transponedor) fijado en el objetivo submarino a seguir. Un pulso acústico se emite por el transceptor y se recibe por el transponedor, que responde al primero. Es posible medir el tiempo que lleva esta comunicación, TOA, y calcular la distancia de separación. El término USBL se debe al hecho de que el transceptor está formado por un conjunto de 3 o más receptores que están separados por distancias cortas (unos 10 cm). Midiendo el desfase de los tiempos de llegada de las señales acústicas, los ángulos de elevación y de azimut pueden medirse. La precisión de la estimación de la posición del vehículo submarino es altamente dependiente de la instalación y calibración de los diferentes elementos, así como de la precisión con que la posición del barco pueda determinarse, usando por ejemplo un sistema GPS.

En este sistema se requieren técnicas de procesamiento de señales avanzadas. La verdadera posición y altura del transductor debe conocerse con precisión para calcular la posición absoluta del objetivo. Generalmente, estas unidades contienen un INS, junto con la entrada de un receptor GPS, cuya antena se encuentra en una posición conocida con respecto al transductor. La correcta calibración del sistema es un elemento crucial porque cualquier error debido a una mala calibración se traduce automáticamente en error de estimación en la posición del objetivo.

Existe una configuración alternativa llamada USBL invertido en la cual el vehículo lleva el transductor USBL y navega usando un emisor acústico con posición conocida [64], [88].

Los sistemas USBL se usan habitualmente ya que son muy sencillos de manejar y tienen un coste relativamente moderado comparado con otros sistemas. Los errores de estimación resultantes suelen ser mayores que en otros sistemas con distancias entre sensores mayores, y muy sensibles a la calibración del transductor.

■ *Short Baseline System, SBL.*

Los hidrófonos de este tipo de sistemas se encuentran separados por distancias que se encuentran en el rango de 1-100 metros y están montados rígidamente en el casco de un barco, con un emisor en el vehículo submarino [80]. Los hidrófonos emiten un pulso acústico que llega al emisor del AUV y éste viaja de vuelta a los hidrófonos. Las distancias se calculan y la posición relativa del objetivo se determina. La distancia entre los sensores es mucho más pequeña que la distancia entre sensores y objetivo. Cuanto más exacta sea la localización de los hidrófonos, más precisa será la localización del objetivo. En barcos mayores, la distancia entre sensores podrá ser también mayor para mejorar las medidas de TOA.

Esta clase de sistemas proporciona sólo una estimación de la posición relativa entre los hidrófonos y el vehículo submarino. Para la estimación de una posición absoluta, es necesario conocer la posición y orientación absolutas de la estructura donde los hidrófonos se encuentran montados.

■ *Long Baseline System, LBL.*

Esta clase de sistemas de posicionamiento proporciona la localización de objetivos submarinos más precisa de los tres sistemas vistos hasta el momento. Además, este sistema es el más utilizado y está compuesto por un conjunto de balizas que están fijas en el fondo del océano y separadas por grandes distancias (de varios kilómetros). El objetivo submarino lleva un transponedor que interroga a las balizas de forma secuencial, las balizas contestan al

objetivo y el tiempo de vuelo es medido [37], [12]. Por lo general, los sistemas LBL se usan para distancias grandes y para cubrir áreas amplias. La precisión depende de la frecuencia de operación. Como en los sistemas USBL los errores de calibración en las balizas se traducen directamente en errores de estimación de la posición del objetivo. Los costes operacionales de una misión con este tipo de sistemas son elevados, ya que incluyen la colocación, calibración y recuperación de las balizas, lo que remarca la necesidad de mejores sistemas de navegación submarina.

- *GPS Intelligent Buoys System, GIB.*

Las características más importantes de un sistema GPS común son su capacidad para cubrir grandes áreas, el poder dar datos de navegación a múltiples vehículos, requisitos de energía relativamente pequeños, miniaturización de receptores y el ser poco dañino con el medio ambiente en el sentido de que sus señales no interfieren significativamente en el ecosistema. Los sistemas acústicos de posicionamiento submarino son básicamente lo contrario: área de operación reducida, no son escalables para ser usados con muchos vehículos, requisitos de energía altos, y un impacto de moderado a alto en el medio ambiente en términos de polución acústica. De esta manera, la búsqueda de un sistema de posicionamiento del tipo GPS para entornos submarinos es una línea de investigación muy activa.

En este sentido se desarrolló comercialmente el sistema GPS con boyas inteligentes (GIB). La explicación que sigue proviene básicamente de una adaptación de [3] y la idea original fue introducida por [96]. El sistema GIB consiste en un conjunto de boyas de superficie con receptores GPS, hidrófonos sumergidos y radio modems. Los tiempos de llegada de las señales acústicas emitidas por un emisor instalado en el vehículo submarino (sincronizado con el tiempo GPS antes de ser puesto en funcionamiento) son guardados por las boyas y enviados en tiempo real a través de una comunicación por radio a una unidad de control [4] (que estará a bordo de un barco de soporte, donde los datos son procesados y se calculará una posición). A diferencia de un sistema LBL, la información de la posición sólo está disponible en la unidad de control y por tanto, el sistema no se puede aplicar directamente para navegación. Si se deseara usar para navegación en tiempo real, sería necesario emplear modems acústicos para informar al vehículo sobre su posición. Este tipo de sistemas son también denominados LBL invertido, ya que en este caso, los transpondedores del fondo del mar son reemplazados por las boyas de superficie y la información fluye de forma opuesta a como lo haría en un sistema LBL clásico.

La ventaja de este tipo de sistemas es que los costes operacionales se reducen porque no es necesaria la colocación, calibración y recuperación de balizas del lecho marino, a la vez que proporciona una buena precisión de estimación, del orden de unos pocos metros.

1.2. Capítulo 2: Localización de un objetivo en espacios de 2 dimensiones con medidas de distancia

En este capítulo, siguiendo desarrollos similares en el campo de la robótica *indoor* de dos dimensiones, se estudia el problema de diseño óptimo de redes de sensores para la localización de un único objetivo en espacios de dos dimensiones. En particular, el interés se encuentra en determinar la configuración óptima que maximice la información disponible en las medidas de distancia obtenidas por los sensores. En este problema se asume que

las medidas de distancia están corruptas por ruido Gaussiano cuya covarianza puede ser dependiente de la distancia.

Para determinar la configuración óptima se usa el determinante de la matriz de Fisher como indicador de la precisión con la que el objetivo es localizado. De esta manera, maximizando su determinante obtendremos dicha configuración óptima.

En este sentido, se ha determinado analíticamente la matriz de Fisher, que proporciona el máximo determinante posible. Una vez determinada de forma analítica la expresión de la FIM, las condiciones que debe cumplir una configuración de sensores óptima se pueden derivar fácilmente y usarse para diseñar las distintas soluciones dependiendo de las restricciones impuestas por la misión en curso. A lo largo del capítulo se estudian diferentes ejemplos con covarianza constante y covarianza dependiente de la distancia, en donde los sensores pueden estar sometidos a diversas restricciones con respecto a la posición que pueden ocupar.

Una vez que estas configuraciones óptimas se han definido de una forma rigurosa para el caso en el que la posición del objetivo es conocida, este estudio se extiende al escenario más realista en el que la posición del objetivo es conocida con incertidumbre. Esta incertidumbre vendrá determinada por la elección de una función de densidad de probabilidad adecuada para la misión que se esté llevando a cabo. El análisis inicial para una posición conocida del objetivo nos permite conocer cómo deben ser las configuraciones óptimas en el caso ideal, entender cómo debe ser una configuración adecuada de sensores y para poder generar una solución inicial para el caso en el que el objetivo tiene una posición conocida con incertidumbre. En este último caso la solución no se puede definir de forma analítica por lo que es necesario recurrir a algoritmos de optimización. Para ello se ha recurrido a una optimización por gradiente, en el que la solución inicial usada como semilla del algoritmo es la solución para el caso ideal cuando el objetivo se considera situado en el centro de la región de incertidumbre. Los ejemplos mostrados en el capítulo realzan la idoneidad del enfoque adoptado, ya que se consigue una precisión para toda la región de incertidumbre similar a la que se hubiera obtenido en la posición del objetivo en el caso ideal. Es más, ambas soluciones son muy parecidas, por lo que también nos indica la idoneidad de utilizar la solución del caso ideal como germen del algoritmo de optimización, ya que su cercanía dará una rápida convergencia a la solución deseada.

1.3. Capítulo 3: Localización de múltiples objetivos en espacios de 2 dimensiones con medidas de distancia

En el tercer capítulo nos encontramos con el problema de localizar varios objetivos simultáneamente en un espacio de dos dimensiones. Este problema, a pesar de la importancia que presenta, no ha sido abordado explícitamente hasta el momento. De la misma manera que en el capítulo anterior, se estudia tanto la situación en la que la covarianza es constante como el caso en el que la covarianza es dependiente de la distancia. La diferencia principal de estos enfoques, en este caso particular de localización de múltiples objetivos, es que para el escenario de covarianza constante es posible determinar una solución de forma analítica y que proporcione la máxima precisión para todos los objetivos, mientras que en el escenario de covarianza dependiente de la distancia es necesario recurrir a técnicas de optimización y a soluciones de compromiso al no poder obtener la máxima precisión para todos.

Como se ha comentado, en el escenario de covarianza constante es posible determinar

de forma analítica la configuración óptima de los sensores. Es más, en la mayoría de los casos se pueden definir configuraciones que proporcionan la máxima precisión de estimación teórica posible para todos los objetivos involucrados en la misión. Sin embargo, existen algunas configuraciones de objetivos que, dependiendo del número de sensores utilizados, no permiten obtener la máxima precisión para todos los objetivos. A pesar de ello, es posible obtener una precisión muy similar a la máxima para todos ellos. Múltiples ejemplos de esta situación se estudian en detalle en el capítulo.

El segundo escenario analizado, con covarianza dependiente de la distancia, no permite definir de forma analítica la solución óptima. De esta manera se recurre a técnicas de optimización, en particular a las técnicas de Pareto. No es difícil imaginar una situación en la que hay que determinar la posición de varios objetivos, pero en la que, sin embargo, la precisión con la que deben ser localizados no es la misma para todos, es decir, hay objetivos más importantes que otros. Es más, en la mayoría de las situaciones, no es posible aumentar la precisión de localización de un objetivo sin empeorar la de otro, por lo que el uso de las técnicas de Pareto se hace más evidente y útil para determinar situaciones de compromiso. El estudio de varios ejemplos a lo largo del capítulo muestra las posibles soluciones de compromiso que se pueden adoptar para diferentes configuraciones de objetivos y cuando la importancia de los mismos se modifica.

Finalmente, de la misma forma a como se hizo en el capítulo anterior, todo el estudio anteriormente realizado se extiende a la situación en que las posiciones de los objetivos se conocen con incertidumbre, siendo ésta una situación más cercana a la realidad. Para esta situación, la única solución posible es numérica por lo que se utiliza una optimización por gradiente empleando las técnicas de Pareto para determinar las configuraciones óptimas. Se han realizado diferentes ejemplos, tanto para covarianza constante como dependiente de la distancia, que muestran el potencial de la metodología desarrollada.

1.4. Capítulo 4: Localización de un objetivo en espacios de 3 dimensiones con medidas de distancia

En este capítulo el estudio realizado en el capítulo dos se extiende para escenarios tridimensionales, mostrando cómo la obtención de soluciones óptimas es más compleja de lo que se ha visto hasta el momento y el porqué es conveniente un estudio separado de ambos casos. De nuevo los casos de covarianza constante y covarianza dependiente de la distancia se estudian por separado, haciendo especial énfasis en el escenario de aplicación de una red de sensores de superficie realizando tareas de localización submarina.

Como paso previo al análisis de los diferentes escenarios comentados, se determina de forma analítica la expresión de la matriz de Fisher óptima que maximiza, de forma genérica, el determinante para los dos casos de estudio. De esta matriz óptima es posible derivar las condiciones que deben cumplir las redes de sensores para ser óptimas y por tanto para desarrollar estrategias de diseño en función de la tarea a desarrollar.

En el primer caso, el de covarianza constante, se determinan las condiciones de optimalidad que debe cumplir toda red de sensores para proporcionar una máxima precisión en la localización del objetivo. De acuerdo a estas condiciones, se realiza una caracterización geométrica de todas las posibles soluciones que se pueden generar en 3D, así como el desarrollo de una metodología para el diseño de redes óptimas dependiendo de las restricciones impuestas a las posiciones de los sensores. En línea con esto último, se estudia en detalle

el caso particular en el que los sensores están todos situados en un plano, análogamente a como ocurre con una red de sensores de superficie que está realizando localización submarina. La formación óptima para este caso particular se obtiene analíticamente y, de forma complementaria, se estudia también el caso en el que la profundidad del objetivo es conocida de forma adicional por sensores de presión, por lo que no es necesario estimarla (algo muy común en localización submarina). Este último análisis nos muestra claramente la conexión entre las soluciones en 2D y en 3D y cómo las últimas pueden derivar en las primeras cuando el objetivo se encuentra en el mismo plano que la red de sensores.

Tras esto se estudia el caso en el que la covarianza es dependiente de la distancia. En este caso se determinan de nuevo de forma analítica las condiciones que los sensores deben cumplir, pero a diferencia del caso anterior, sólo se pueden estudiar casos particulares, no generales, ya que en el caso general los sensores tienden a estar lo más cerca posible del objetivo para reducir el ruido añadido por la distancia entre sensores y objetivo. De lo anterior se deduce que debemos introducir restricciones al posicionamiento de los sensores para poder determinar soluciones óptimas de forma práctica. De esta manera se estudian dos situaciones, cuando los sensores están todos situados a la misma distancia del objetivo, proporcionando una situación análoga a la de covarianza constante y por tanto, unas soluciones equivalentes, y cuando los sensores están situados todos en el mismo plano. Este último ejemplo intenta reproducir de nuevo la situación de una red de sensores de superficie realizando una tarea de posicionamiento submarino. De nuevo, la solución se determina analíticamente y se estudia el caso en el que la profundidad es conocida por sensores de presión y no es necesaria estimarla, mostrando la conexión entre las soluciones en 2D y 3D. En estos ejemplos se puede ver como la dependencia de la covarianza de la distancia que separa los sensores y objetivo afecta a la solución óptima y hace que los sensores estén más cerca del objetivo para reducir este error adicional, siendo la formación óptima dependiente del modelo de ruido usado.

Finalmente, los dos escenarios anteriores son estudiados cuando la posición del objetivo es conocida con incertidumbre y el caso particular de posicionamiento submarino es estudiado en detalle. La solución no se puede determinar analíticamente, por lo que se ha recurrido a algoritmos de optimización por gradiente para determinar la colocación óptima de los sensores, usando como solución inicial la obtenida para el caso ideal en el que la posición del objetivo es conocida. De nuevo se puede ver en este caso la similitud de ambas soluciones y la importancia de la solución teórica del caso ideal para una rápida convergencia del algoritmo de optimización. Respecto al caso de posicionamiento submarino, se estudian dos situaciones de interés práctico, cuando todos los sensores son de superficie, y cuando una parte de los sensores está en la superficie y otra parte en el fondo, demostrando que para mejorar la precisión de posicionamiento dentro de un determinado volumen (posicionamiento con incertidumbre) es más adecuado repartir los sensores entre dos planos diferentes, dando una precisión mayor y más homogénea dentro del volumen de interés. Todos estos resultados son ilustrados con diversos ejemplos.

1.5. Capítulo 5: Localización de múltiples objetivos en espacios de 3 dimensiones con medidas de distancia

En el quinto capítulo de la tesis se aborda el problema de posicionamiento de múltiples objetivos en tres dimensiones. Éste es un problema de suma importancia, ya que como se comentó en la introducción, la tendencia en la robótica marina es sustituir un sistema único,

costoso y complejo por un conjunto de vehículos de bajo coste actuando en cooperación. De esta manera, es necesario poder realizar el posicionamiento de varios objetivos a la vez, los cuales están cooperando para llevar a cabo una misión. Este problema no ha sido estudiado explícitamente en la literatura, por lo que en este capítulo se hace un estudio inicial del mismo y cómo pueden desarrollarse diferentes configuraciones óptimas. De nuevo se estudian los casos en los que las medidas de distancia están afectadas por un ruido Gaussiano de covarianza constante y cuando la covarianza depende de la distancia que separa sensores y objetivos.

En el primer caso, es posible diseñar formaciones óptimas que proporcionan una estimación de los objetivos cercana a la ideal para cada uno de ellos, tanto en el caso en el que los sensores pueden estar colocados libremente en el espacio tridimensional como en el caso de aplicación estudiado a lo largo de la tesis en donde los sensores están situados en la superficie para localizar objetivos submarinos. Este hecho se estudia a través de varios ejemplos.

Cuando la covarianza es dependiente de la distancia, los sensores tienden a estar lo más cerca posible de los objetivos para reducir el ruido adicional dependiente de la distancia. En este caso, al existir varios objetivos, no se puede reducir la distancia a todos ellos, por lo que, incluso en el caso en el que los sensores pueden posicionarse libremente, se debe adoptar una situación de compromiso. Es más, en este caso no es posible aumentar la precisión de estimación de un objetivo sin reducir la de otro, por lo que se recurre a técnicas de optimización de Pareto para determinar las configuraciones óptimas, así como las diferentes situaciones de compromiso que se pueden dar dependiendo de la importancia o precisión de estimación dada a cada uno de los objetivos. Evidentemente, en un caso práctico, esta importancia puede variar a lo largo de la misión, por lo que la red de sensores debería ser capaz de modificar su configuración para ajustar la precisión de estimación de cada objetivo a los requerimientos de la misión conforme ésta avanza. Se han desarrollado diferentes ejemplos que exponen cómo la formación varía dependiendo de los factores comentados.

Nuevamente, el estudio realizado se extiende al caso en el que las posiciones de los objetivos son conocidas con incertidumbre. De este modo la configuración óptima tiene que maximizar la precisión de estimación para volúmenes asociados a los objetivos. Diferentes casos se han estudiado, tanto cuando los sensores se pueden colocar de forma libre como cuando están restringidos al plano de superficie. Se ha demostrado a través de varios ejemplos cómo la solución proporcionada por el caso ideal, en el que las posiciones de los objetivos son conocidas, proporciona una semilla para el algoritmo de optimización muy cercana a la solución óptima, por lo que la convergencia del algoritmo es muy rápida.

1.6. Capítulo 6: Localización de un objetivo en espacios de 3 dimensiones con medidas de ángulos

El capítulo seis de la tesis trata sobre el posicionamiento de objetivos en espacios tridimensionales mediante medidas de ángulos, en particular, midiendo el ángulo de elevación, que es el ángulo formado por el vector que une el sensor y el objetivo con respecto al eje Z, y el ángulo de azimut, que es el ángulo formado por la proyección del vector anterior en el plano XY con el eje X. La gran ventaja de este enfoque es que no es necesario el intercambio de información entre sensor y objetivo, por lo que se puede observar la evolución del objetivo sin ser detectado por el mismo.

En este capítulo, a diferencia de los anteriores, se utiliza la traza de la matriz del CRLB para determinar la configuración óptima. Esto es debido a que, al tratar con ángulos, existen configuraciones de sensores que hacen que ciertas funciones trigonométricas de la FIM proporcionen valores del determinante muy altos, pero siendo claramente estas configuraciones no óptimas, como por ejemplo, con todos los sensores situados en el mismo punto a una cierta distancia del objetivo. Este problema se evita utilizando la traza del CRLB como función de coste en el problema de optimización.

Nuevamente los casos de covarianza constante y covarianza dependiente de la distancia son estudiados. Sin embargo, para las medidas de ángulo, la distancia siempre afecta a la solución, por lo que es necesario introducir restricciones en el posicionamiento de los sensores para evitar que colapsen sobre el objetivo en un intento de aumentar la información disponible. De esta manera, se estudian dos casos a modo de ejemplo, el primero, cuando los sensores están todos situados a la misma distancia del objetivo y el segundo, cuando se considera una red de sensores de superficie. Diversos ejemplos de estos casos se han estudiado, demostrando cómo dependiendo de las restricciones y del modelo de ruido considerado, la formación óptima cambia.

Finalmente el estudio anterior se extiende para la situación en la que el objetivo está situado en una posición conocida con un cierto grado de incertidumbre definido por una determinada función de densidad de probabilidad. En este caso, nuevamente, no se puede definir la solución de forma analítica por lo que se obtiene de forma numérica mediante algoritmos de optimización por gradiente. Los ejemplos realizados muestran diferentes soluciones óptimas para varios casos, mostrando cómo las soluciones obtenidas son muy similares a las definidas analíticamente para el caso ideal y cómo la solución obtenida para este último caso es una semilla apropiada al estar cercana a la solución óptima, obteniéndose una rápida convergencia a la misma.

1.7. Capítulo 7: Localización de un objetivo submarino mediante un único sensor de superficie

En el capítulo siete se realiza un estudio de un caso de aplicación particular y que ha ido adquiriendo un especial interés en los últimos años, como es el problema de posicionamiento o navegación con un único sensor. Una cuestión central al problema de las redes de sensores para posicionamiento es el número de sensores necesarios para poder realizar de forma adecuada la estimación de la posición del objetivo. En un plano, el número mínimo de medidas para determinar una posición son 3 no co-lineales y en el espacio, 4 medidas no co-planares. Para el caso en cuestión de posicionamiento submarino por redes de superficie, sólo tres medidas son necesarias, ya que la ambigüedad de la posición del objetivo se resuelve con el simple conocimiento de que es submarino.

De esta manera, podemos ver el interés en reducir al máximo el número de sensores utilizados, ya que conlleva una simplificación de la infraestructura necesaria para la realización de la misión y una disminución notable de los costes. Así, el objetivo de este capítulo es estudiar la diversidad espacial y temporal de un sensor de superficie en movimiento, de tal manera que se planifique la trayectoria a seguir por el mismo, en función de la recogida de datos que realice y su velocidad, para posicionar con la máxima precisión posible el objetivo submarino. Para este problema se estudia sólo el caso de covarianza constante.

Este análisis se hace para dos enfoques diferentes, es decir, mediante dos algoritmos

cuyo uso se decidirá en función de los requisitos de la misión. De este modo, el primer algoritmo calcula el siguiente punto de la trayectoria que proporciona un mayor incremento del determinante de la matriz de Fisher, considerando que la matriz de Fisher se calcula con un número fijo de puntos, y por tanto, que el nuevo punto sustituirá al más antiguo. El segundo algoritmo consiste en planificar la trayectoria completa para el conjunto de puntos usado para calcular la FIM. De esta manera, se irán enlazando trayectorias óptimas, donde el punto inicial de una trayectoria es el punto final de la trayectoria inmediatamente anterior.

Ambos algoritmos se han estudiado para los casos en los que el objetivo se considera estático y cuando éste se mueve con una velocidad constante pero inferior a la del sensor de superficie. Para un objetivo estático ambos algoritmos proporcionan resultados y precisiones muy similares, siendo el primero de ellos bastante más simple de implementar, aunque el segundo converge considerablemente más rápido en la solución óptima. Para el caso en el que el objetivo se mueve a una velocidad constante, el primer algoritmo sólo proporciona resultados válidos cuando se usan muchos puntos para el cómputo de la FIM o cuando la velocidad del sensor es mucho mayor que la del objetivo, en caso contrario los resultados proporcionados se alejan de lo que se podría esperar como óptimo. Esto es debido a que la planificación de sólo el siguiente punto no permite un movimiento adecuado del sensor de superficie para conseguir el posicionamiento óptimo. Para el segundo algoritmo, a pesar de su mayor complejidad, la situación es diferente ya que proporciona muy buenos resultados aunque se usen pocos puntos para la construcción de la FIM y aunque la diferencia de velocidades no sea demasiado grande, consiguiéndose una convergencia muy rápida con la trayectoria óptima y dando unos resultados de precisión muy similares a los obtenidos cuando el objetivo se consideró estático.

1.8. Capítulo 8: Conclusiones

Este trabajo se ha centrado en el estudio de diversos problemas relevantes en el campo del posicionamiento, centrándose en el caso de posicionamiento submarino. Sin embargo, los problemas estudiados tienen importancia práctica en numerosos campos, como robótica indoor, entornos urbanos o navegación espacial, donde las medidas de GPS no están disponibles o no son válidas y se requieren métodos alternativos de localización. De esta manera, en este trabajo se han definido teóricamente las condiciones que las redes de sensores deben cumplir para maximizar la precisión en la estimación de la posición de uno o varios objetivos, siendo aplicables, tanto la metodología como las configuraciones obtenidas, a diversos casos prácticos.

En este sentido, se ha ofrecido una caracterización de las soluciones al problema de configuración óptima de sensores con medidas acústicas en 2D y 3D cuando se considera un único objetivo, poniendo un especial énfasis en el escenario de aplicación de posicionamiento submarino mediante una red de sensores de superficie. Asumiendo que las medidas de distancia entre objetivo y sensores están corrompidas por ruido Gaussiano con covarianza dependiente de la distancia, se han derivado las condiciones bajo las cuales las redes de sensores maximizan la información relacionada con las medidas de distancia disponibles para el posicionamiento. Para ello se han usado herramientas de la teoría de la estimación de tal modo que el problema se ha convertido en el de maximizar el determinante de la matriz de información de Fisher. El núcleo de los resultados obtenidos fue una caracterización analítica de las condiciones que una red de sensores genérica debe cumplir en 2D y 3D para ser óptima.

Este resultado es un instrumento para desarrollar estrategias con las que manejar situaciones prácticas en las que, dependiendo de la misión que se esté realizando, la red de sensores debe ajustarse a diversas restricciones. En este sentido, uno de los escenarios prácticos con restricciones estudiados es el de posicionamiento submarino, en el que la red de sensores puede estar completamente sumergida o en la superficie, o incluso una parte situada en la superficie y otra parte en el fondo del océano. Además la relación entre las soluciones en 2D y 3D se ha esclarecido. Se ha demostrado que las configuraciones óptimas pueden explicarse mediante una interpretación geométrica y que la distribución de los sensores depende directamente de la intensidad del ruido de medida y la distribución de probabilidad que define la incertidumbre en la posición del objetivo. Numerosos ejemplos se han realizado para mostrar la aplicación de la metodología desarrollada para diferentes escenarios.

El análisis anterior se extendió para el problema de posicionamiento de múltiples objetivos, con la finalidad de determinar la configuración óptima de los sensores para maximizar la información disponible en las medidas de las distancias. Para esto, se asume de nuevo que las medidas se encuentran corruptas por ruido Gaussiano de covarianza dependiente de la distancia. En contraste con lo que ha sido publicado en la literatura, se ha abordado explícitamente el problema de localización en 2D y 3D usando redes de sensores tanto en 2D como en 3D. El escenario particular de posicionamiento submarino mediante una red de sensores de superficie se ha estudiado en detalle como caso de aplicación de la metodología desarrollada. Como base de las técnicas usadas para la resolución de este problema se han usado los conceptos y métodos de la optimización de Pareto y de la teoría de la estimación. Desde un punto de vista matemático, el problema resuelto ha sido el de maximizar, mediante la adecuada elección de la configuración geométrica de los sensores, combinaciones convexas de los logaritmos de los determinantes de las matrices de información de Fisher correspondientes a problemas de estimación para cada uno de los objetivos por separado. Para ello se recurrió a un algoritmo de optimización iterativo. La metodología desarrollada permite un estudio en profundidad de los compromisos inherentes a un problema de localización múltiple. Los ejemplos de simulación recogidos en el texto muestran claramente como la formación óptima depende del tamaño del área en el que los objetivos trabajan, el tipo de ruido de medida y el nivel de importancia dado a cada uno de los objetivos. Este último aspecto busca representar el hecho de que una solución de compromiso es inevitable y, por tanto, que se puede requerir diferentes niveles de precisión para diferentes objetivos. Todo el análisis se ha extendido a la situación en el que el conocimiento previo sobre la posición de los objetivos se describe mediante funciones de densidad de probabilidad, y se ha mostrado que la distribución de los sensores depende explícitamente de la intensidad del ruido de medida y de la distribución de probabilidad que define la posición de los objetivos.

El escenario en el que la posición del objetivo debe determinarse a través de medidas angulares en 3D se ha estudiado también como extensión natural del análisis previo. Las medidas de los ángulos de elevación y azimut se consideran corruptas por ruido Gaussiano de covarianza dependiente de la distancia y las condiciones que deben cumplir las configuraciones de sensores para maximizar la información relativa a los ángulos medidos se han derivado analíticamente. Las soluciones y conclusiones derivadas son muy similares a las obtenidas para el caso de distancias, por lo que sólo las soluciones para escenarios 3D se han estudiado para evitar la repetición de los mismos argumentos de capítulos anteriores.

Finalmente, se ha abordado el problema de posicionamiento de un objetivo submarino por un único sensor de superficie moviéndose a velocidad constante. Para el estudio de este

problema se han considerado dos enfoques diferentes. El primero cuando sólo se optimiza el siguiente punto de medida, es decir, se calcula el siguiente movimiento del sensor de superficie que maximiza la información, de tal manera que la FIM se actualiza con la nueva medida de distancia tomada, eliminando la más antigua. El segundo enfoque optimiza un número dado de puntos de medida, de tal manera que se optimiza la trayectoria a seguir por el sensor y se van enlazando trayectorias óptimas que maximizan el determinante de la FIM. Ambos enfoques se han estudiado considerando el objetivo estático y moviéndose a velocidad constante. Para un objetivo estático, ambos enfoques proporcionan resultados muy similares, siendo el primero más simple de implementar y el segundo más rápido en converger con la solución óptima. Para el caso de un objetivo móvil, el primer enfoque no proporciona buenos resultados a no ser que la diferencia de velocidades entre sensor y objetivo sea muy grande o se usen muchos puntos para la construcción de la FIM. Sin embargo para el segundo enfoque, los resultados sí son satisfactorios dando un resultado muy similar al obtenido para un objetivo estático.

Por tanto, el problema de posicionamiento para uno o múltiples objetivos se ha estudiado para escenarios tanto 2D como 3D. Se han definido soluciones analíticas y numéricas para determinar configuraciones óptimas de sensores y trayectorias óptimas en el caso de un único sensor. Además, se ha considerado el hecho de que la covarianza en el ruido de medida sea dependiente de la distancia. El potencial de la metodología desarrollada se ha demostrado a través de múltiples ejemplos a lo largo de la tesis, poniendo un especial interés en el problema de aplicación de posicionamiento submarino con una red de sensores de superficie.

Bibliografía

- [1] Abel, J. S. Optimal sensor placement for passive source localization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Albuquerque, NM, 1990.
- [2] Alcocer, A.; Oliveira, P.; Pascoal, A. Study and Implementation of an EKF GIB-based Underwater Positioning System. *IFAC Journal of Control Engineering Practice*, Vol. 15, no. 6, pp. 689-701, Elsevier, 2007.
- [3] Alcocer, A. Positioning and Navigation Systems for Robotic Underwater Vehicles. *PhD Thesis*, Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portugal, 2009.
- [4] A. Alcocer, P. Oliveira, and A. Pascoal. Underwater Acoustic Positioning Systems Based on Buoys with GPS. In *Proceedings of Eighth European Conference on Underwater Acoustics ECUA'06*, Carvoeiro, Portugal, June 2006.
- [5] Aranda, S. E. , Martinez, S., & Bullo, F. 2005. On optimal sensor placement and motion coordination for target tracking. In *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pages 4544-4549.
- [6] Bar-Shalom, Y., Li, X. R., & Kirubarajan, T. *Estimation with Application to Tracking and Navigation*. John Wiley, New York, NY, 2001.
- [7] R. Been, W. L. de Koning and J- H. de Vlieger On improving target motion analysis trough own ship maneuvering. *Digital Signal Processing* -91, Elsevier, 1991.
- [8] Birk, A., Antonelli, G., Caiti, A., Casalino, G., Indiveri, G., Pascoal, A., & Caffaz, A. *The CO3AUVs (COoperative COgnitive COntrol for Autonomous Underwater Vehicles) Project: overview and current progresses*. In *Proceedings of OCEANS 2011*, Santander, Spain, 2011.
- [9] Bishop, A.N., Fidan, B., Anderson, B.D.O., Dogancay, K., & Pathirana, P.N. Optimality Analysis of Sensor-Target Geometries in Passive Localization: Part 1 - Bearing-Only Localization. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks, and Information Processing (ISSNIP'07)*, pages 7-12, Melbourne, Australia, 2007.

- [10] Bishop, A.N., Fidan, B., Anderson, B.D.O., Dogancay, K., & Pathirana, P.N. Optimality Analysis of Sensor-Target Geometries in Passive Localization: Part 2 - Time-of-Arrival Based Localization. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks, and Information Processing (ISSNIP'07)*, pages 13-18, Melbourne, Australia, 2007.
- [11] Boyd, S., and Vandenberghe, L. *Convex Optimization*, Cambridge University Press 2004.
- [12] D. Carta. Optimal estimation of undersea acoustic transponder locations. In *Proc. OCEANS*, volume 10, pages 466–471, 1978.
- [13] Casey, T., Guimond, B. and Hu, J. Underwater Vehicle Positioning Based on Time of Arrival Measurements from a Single Beacon. In *Proc. OCEANS 2007*, sept. 29 - Oct. 4, 2007.
- [14] Chaffee, J.; & Abel, J. GDOP and the Cramer-Rao bound, in *Proc. IEEE Symposium on Position Location and Navigation*, Las Vegas, NV, USA, 1994.
- [15] Krishnendu Chakrabarty, sitharama S. Iyengar, Hairong Qi, Eungchun Cho Coding theory framework for target location in distributed sensor networks. In *Proceedings. International Conference on Information Technology: Coding and Computing*, 2001.
- [16] S.G. Chappell, J.C. Jalbert, P. Pietryka, and J. Duchesney. Acoustic communication between two autonomous underwater vehicles. In *Proc. of the 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology AUV'94*, pages 462–469, Jul 1994.
- [17] Stella-Rita Chioma Ibeawuchi Optimum sensor placement for source localization and monitoring from received signal strength PhD Thesis, University of Iowa, 2010.
- [18] F. Cretollier and P. Morvan. Use of a Rangemeter in Advanced and Modular Subsea Positioning Solutions. In *Proc. of MCMC2006 - 7th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Lisbon, Portugal, 2006.
- [19] Y. Cui and S.S. Ge. Autonomous vehicle positioning with gps in urban canyon environments. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19:15–25, February 2003.
- [20] J. Curcio, J. Leonard, J. Vaganay, A. Patrikalakis, A. Bahr, D. Battle, H. Schmidt, and M. Grund. Experiments in Moving Baseline navigation using autonomous surface craft. In *Proc. IEEE OCEANS'05*, Washington, D.C., 2005.
- [21] Da Cunha, N.O.; & Polak, E. Constrained Minimization under Vector-Valued Criteria in Topological Spaces. *Math. Theory Contr., Proc. USC Conf., A.V. Balakrishnan and L. W. Neustad*, Eds. New York: Academic, 1967, pp. 96-108.
- [22] S. Dasgupta S. Dandach, B. Fidan and B. Anderson. Adaptive Source Localization by Mobile Agents. In *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, USA, pages 2045–2050, December 2006.
- [23] Dennis, J.E. & Schnabel, R. B. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*. SIAM, 1996.

-
- [24] Kutluyil Dogancay and Hatem Hmam On optimal sensor placement for time-difference-of-arrival localization utilizing uncertainty minimization In *Proceedings of 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009)* Glasgow, Scotland, August 24-28, 2009
- [25] R. Eustice, L. Whitcomb, H. Singh, and M. Grund. Experimental Results in Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles. In *Proc. of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, April 2007.
- [26] N. Fairfield, G. Kantor, and D. Wettergreen. Real-time slam with octree evidence grids for exploration in underwater tunnels. *Journal of Field Robotics, Special Issue on SLAM in the Field*, 24(1-2):03–21, February 2007.
- [27] E. Fiorelli, N.E. Leonard, P. Bhatta, D. Paley, R. Bachmayer, and D.M. Fratantoni. Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(4):935–948, October 2006.
- [28] A. Gadre. Observability Analysis in Navigation Systems with an Underwater Vehicle Application. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, January 2007.
- [29] A. Gadre and D. Stilwell. Toward Underwater Navigation Based on Range Measurements From a Single Location. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, pages 4472–4477, 2004.
- [30] A. Gadre and D. Stilwell. A Complete Solution to Underwater Navigation In the Presence of Unknown Currents Based On Range Measurements From a Single Location. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Edmonton AB, Canada, 2005.
- [31] Ghabcheloo, R.; Aguiar, A.; Pascoal, A.; Silvestre, C.; Kaminer, I.; Hespanha, J. Coordinated path-following in the presence of communication losses and time delays. *SIAM - Journal on Control and Optimization*, Vol. 48, No. 1, pp. 234-265, 2009.
- [32] R. Ghabcheloo, A. Aguiar, A. Pascoal, and C. Silvestre. Coordinated pathfollowing control of multiple auvs in the presence of communication failures and time delays. In *Proc. of MCMC2006 - 7th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Lisbon, Portugal, 2006.
- [33] Hartley, R. I.; & Sturm, P. Triangulation. *Computer Vision and Image Understanding*, Volume 68, Issue 2, November 1997, Pages 146-157.
- [34] J. Hartsfield. Single transponder range only navigation geometry (strong) applied to remus autonomous under water vehicles. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology and the Woods Hole Oceanographic Institution, August 2005.
- [35] Hawkes, M.; Nehorai, A. Acoustic vector-sensor beamforming and capon direction estimation. *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 46, nº9, September 1998.
- [36] Howell, K. B. *Principles of Fourier Analysis*. CRC Press, 2001.
-

- [37] M.M. Hunt, W.M. Marquet, D.A. Moller, K.R. Peal, W.K. Smith, and R.C. Spindell. An Acoustic Navigation System. Technical Report WHOI-74-6, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts 02543 USA, December 1974.
- [38] Isaacs, J. T.; Klein, D. J.; Hespanha, J. P. Optimal sensor placement for time difference of arrival localization. In *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, 2009.
- [39] S. Jesus, M. Porter, Y. Stephane, X. Demoulin, O. Rodriguez, and E. Coelho. Single Hydrophone Source Localization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25(3):337–346, 2000.
- [40] J. Jouffroy and J. Reger. An algebraic perspective to single-transponder underwater navigation. In *Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications*, Munich, Germany, October 2006.
- [41] Jourdan, D. B. & Roy, N. Optimal Sensor Placement for Agent Localization. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, Volume 4, Article No. 13, 2008.
- [42] Kamath, S.; Meisner, E.; Isler, V.; Triangulation Based Multi Target Tracking with Mobile Sensor Networks. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pages 4544-4549, April 2007.
- [43] Kenneth W.K. Lui, H.C. So A study of two-dimensional sensor placement using time-difference-of-arrival measurements *Digital Signal Processing* 19, 2009.
- [44] Khargonekar, P., & Rotea, M. Multiple Objective Optimal Control of Linear Systems: The Quadratic Norm Case. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 36, No.1, January 1991, pp. 14-24.
- [45] J.C. Kinsey, R. Eustice, and L.L. Whitcomb. Survey of Underwater Vehicle Navigation: Recent Advances and New Challenges. In *Proc. of MCMC2006 -7th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Lisbon, Portugal, 2006.
- [46] A.M. Ladd, K.E. Bekris, A.P. Rudys, D.S. Wallach, and L.E. Kavraki. On the feasibility of using wireless ethernet for indoor localization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20:555–559, June 2004.
- [47] C. LaPointe. Virtual long baseline (vbl) autonomous underwater vehicle navigation using a single transponder. Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technology and the Woods Hole Oceanographic Institution, June 2006.
- [48] M.B. Larsen. Autonomous Navigation of Underwater Vehicles. PhD thesis, Department of Automation, Technical University of Denmark, February 2001.
- [49] M.B. Larsen. Synthetic long baseline navigation of underwater vehicles. In *Proc. IEEE OCEANS’00*, Providence, RI, USA, pages 2043–2050, September 2000.
- [50] J. Leonard, A. Bennett, C. Smith, and H. Feder. Autonomous underwater vehicle navigation. *MIT Marine Robotics Laboratory Technical Memorandum* 98-1. 1998.
- [51] Levanon, N. 2000. Lowest GDOP in 2-D scenarios. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation* vol.147, no.3, pp.149-155.

-
- [52] Li, T.; Nehorai, A. Maximum likelihood direction-of-arrival estimation of underwater acoustic signals containing sinusoidal components. *to appear in IEEE Trans. on Signal Processing*.
- [53] J.R. Magnus and H. Neudecker. Matrix Differential Calculus With Applications in Statistics and Econometrics. Wiley Series in Probability and Statistics, Chichester, 1988.
- [54] Martinez, S. & Bullo, F. 2006. Optimal Sensor Placement and Motion Coordination for Target Tracking. *Automatica*, 42(4):661–668.
- [55] McKay, J. B.; & Pachter, M. Geometry optimization for GPS navigation. *in Proc. IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, CA, USA, 1997.
- [56] Middlebrook, D. L. Bearing-Only Tracking Automation for a Single Unmanned Underwater Vehicle. *Master Thesis*, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [57] P. H. Milne. Underwater Acoustic Positioning Systems. Gulf Publishing, Houston, 1983.
- [58] A Rama Mohan Rao and Ganesh Anandakumar Optimal placement of sensors for structural system identification and health monitoring using a hybrid swarm intelligence technique. *Smart Mater. Struct.* 16, 2007.
- [59] M.C. Moreau, E.P. Davis, J.R. Carpenter, D. Kelbel, G.W. Davis, and P. Axelrad. Results from the gps flight experiment on the high earth orbit amsatoscar-40 spacecraft. In *Proceedings of the ION GPS*, 2002.
- [60] Moreno-Salinas, D; Pascoal, A. M.; Alcocer, A.; Aranda, J. Optimal Sensor Placement for Underwater Target Positioning with Noisy Range Measurements. In *Proceedings of the 8th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, CAMS 2010*, Rostock, Germany, 2010..
- [61] Moreno-Salinas, D; Pascoal, A. M.; Aranda, J. Optimal Sensor Placement for Underwater Positioning with Uncertainty in the Target Location *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011)*, Shanghai, China.
- [62] Moreno-Salinas, D; Pascoal, A. M.; Aranda, J. Optimal Sensor Placement for Multiple Underwater Target Localization with Acoustic Range Measurements *2011 IFAC World Congress (IFAC 2011)*, Milano, Italy.
- [63] Moreno-Salinas, D; Pascoal, A. M.; Aranda, J. Surface Sensor Networks for Underwater Vehicle Positioning with Bearings-Only Measurements. *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012)*, Vila-Moura, Portugal.
- [64] M. Morgado, P. Oliveira, C. Silvestre, and J. Vasconcelos. USBL/INS Integration Technique for Underwater Vehicles. In *In Proc. of MCMC2006 - 7th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Lisbon, Portugal, 2006.
-

- [65] Mubashir Alam, Volkan Cevher, James H. McClellan, Fellow, Gregg D. Larson, Waymond R. Scott Jr. Optimal Maneuvering of Seismic Sensors for Localization of Subsurface Targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, num. 5, p. 1247-1257, 2007.
- [66] Neering, J.; Fischer, C.; Bordier, M.; Maizi, N. Optimal sensor configuration for passive position estimation. In *Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION*, pages 951 - 960, 5-8, May, 2008.
- [67] Sven Nordebo and Mats Gustafsson. On the Design of Optimal Measurements for Antenna Near-Field Imaging Problems. *Mathematical modelling of wave phenomena: 2nd Conference on Mathematical Modeling of Wave Phenomena. AIP Conference Proceedings*, Volume 834, pp. 234-249 (2006).
- [68] E. Olson, J. Leonard, and S. Teller. Robust range-only beacon localization. In *IEEE Journal of Oceanic Engineering*,, 31(4):949–958, October 2006.
- [69] Y. Oshman and P. Davidson. Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, NO. 3, July 1999.
- [70] J.M. Passerieux and D. Van Cappel. Optimal observer maneuver for bearings-only tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 34, NO. 5, July 1998.
- [71] Neal Patwari, Alfred O. Hero III, and Jose A. Costa. Learning Sensor Location from Signal Strength and Connectivity. *Secure Localization and Time Synchronization for Wireless Sensor and Ad Hoc Networks, Advances in Information Security*, Volume 30, Part I, 57-81, 2007.
- [72] D. Popaf, A. Sandersont, R. Komerskat, S. Mupparapd, D. Blidberg, and S. Chappelf. Adaptive sampling algorithms for multiple autonomous underwater vehicles. In *Proc. IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles AUV'04*, 2004.
- [73] N. Priyantha. The Cricket Indoor Location System. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2005.
- [74] Rosa, J. Optimal sensor placement for multiple underwater target positioning. Master Thesis, Instituto Superior Tecnico, Lisboa, Portugal, 2011.
- [75] A. Ross and J. Jouffroy. Remarks on the observability of single beacon underwater navigation. In *Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST'05)*. Durham, NH., 2005.
- [76] J. Saude and P. Aguiar. Single Beacon Acoustic Navigation for an AUV in the Presence of Unknown Ocean Currents. In *Proc. of the 8th IFAC International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Brazil, 2009.
- [77] Scherbatyuk, A.P. The AUV positioning using ranges from one transponder LBL. In *Proc. OCEANS 95*, 9-12 October, 1995.

-
- [78] Scherbatyuk, A.P. and Dubrovin, F.S. Some algorithms of AUV positioning based on one moving beacon. In *IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles*, Porto, Portugal, 10-12 April, 2012.
- [79] Schikora, M.; Bender, D.; Cremers, D. & Koch, W. Passive Multi-Object Localization and Tracking Using Bearing Data *Information Fusion (FUSION), 2010 13th Conference on*, 2010.
- [80] S. Smith and D. Kronen. Experimental results of an inexpensive short baseline acoustic positioning system for AUV navigation. In *Proceedings of MTS/IEEE Conference OCEANS 97*, Halifax, NS, pages 714–720, 1997.
- [81] T. Song. Observability of Target Tracking with Range-Only Measurements. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(3):383–387, 1999.
- [82] T. Song. Observability of Target Tracking with Bearings-Only Measurements. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 32, NO. 4, October 1996.
- [83] Tao Jia & Buehrer, R. M. A New Cramer-Rao Lower Bound for TOA-based Localization. 2008.
- [84] Ucinsky, D. *Optimal measurement methods for distributed parameter system identification*. CRC Press, 2005.
- [85] J. Vaganay, P. Baccou, and B. Jouvencel. Homing by acoustic ranging to a single beacon. In *Proc. IEEE OCEANS'00*, Providence, RI, USA, pages 1457–1461, September 2000.
- [86] Van Trees, H. L. *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Vol. 1*. Wiley, 2001.
- [87] K. Vickery. Acoustic positioning systems. A practical overview of current systems. In *Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, Fort Lauderdale, FL, USA., pages 5–17, August 1998.
- [88] K. Vickery. Acoustic positioning systems. New concepts-the future. In *Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, Fort Lauderdale, FL, USA., pages 103–110, August 1998.
- [89] Vincent, T. L.; & Grantham, W. J. *Optimality in Parametric Systems*. New York: Wiley, 1981.
- [90] Michael P. Vitus, Claire J. Tomlin *Sensor Placement for Improved Robotic Navigation*. 2010.
- [91] L.L. Whitcomb, D.R. Yoerger, and H. Singh. Combined Doppler/LBL Based Navigation of Underwater Vehicles. In *Proc. 11th UUST*, Durham, New Hampshire, USA, August 1999.
- [92] R. Williams. Design and experimental evaluation of an autonomous surface craft to support auv operations. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, February 2007.
-

- [93] Yang, B. & Scheuing, J. 2005. Cramer-Rao Bound and optimum sensor array for source location from time differences of arrival. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005 (ICASSP '05)*, March, 2005, pages iv/961 - iv/964 Vol. 4, 18-23.
- [94] Bin Yang Different sensor placement strategies for TDOA based localization In *Proceedings of ICASSP 2007*.
- [95] D. Yoerger and D. Mindell. Precise navigation and control of an rov at 2200 meters depth. In *Proceedings of Intervention/ROV 92*, San Diego, USA., June 1992.
- [96] James W. Youngberg. Method for extending GPS to Underwater Applications. US Patent 5,119,341, June 2 1992, 1992.
- [97] Natalie Zayats and David M. Steinberg Optimal design of experiments when factors affect detection capability. *Pakistan Journal of Statistics*, Vol.26(1), 15-37, 2010.
- [98] Zhang, H. Two-dimensional optimal sensor placement. In *Proceedings of the IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, 25, 5, 1995.