

Posición, Navegación y Temporización de Precisión Sin el Sistema de Posicionamiento Global

MAYOR (USAF) KENNETH A. FISHER, PHD
DR. JOHN F. RAQUET, PHD*

EL SISTEMA DE Posicionamiento Global (GPS) de NAVSTAR ha revolucionado la guerra moderna. Desde 2005 casi todas las municiones con guía de precisión estadounidenses han usado datos de selección de objetivos GPS.¹ En consecuencia, los sistemas de direccionamiento de armas pueden atacar blancos enemigos con precisión, a menudo con mínimo o ningún daño colateral. Además, casi todos los activos militares, incluyendo aeronaves, tanques, barcos, misiles, granadas de morteros, cajas de carga, y soldados a pie dependen de la determinación de posición precisa que les proporciona el GPS.

Los usuarios militares de este sistema encuentran dos limitaciones principales. Primero, el sistema depende de la línea visual — es decir, los satélites deben estar a la “vista” de la antena del receptor para que éste pueda adquirir las señales. Esta limitación es más pronunciada en lugares cerrados (incluyendo lugares subterráneos) y en áreas urbanas, presentando importantes desafíos de navegación para las fuerzas de tierra, aeronaves a control remoto y municiones de precisión. Los edificios altos en las áreas urbanas bloquean la vista de los satélites y crean señales reflejadas o de “múltiples rutas” que confunden a los receptores GPS. En interiores, las señales GPS están presentes pero son bastante atenuadas; como resultado, las fuerzas de tierra tienen dificultades para obtener una posición GPS fiable.

Segundo, los adversarios pueden interferir fácilmente las señales del sistema usando téc-

nicas simples y equipos de fácil obtención. Cuando los adversarios emiten señales que interfieren con las señales GPS de baja intensidad relativa se produce una “perturbación”. Supuestamente, China ha desplegado dispositivos de interferencia GPS en una flota de camionetas, y varios sitios Internet ofrecen dispositivos pequeños y de poco costo para contrarrestar el rastreo de vehículos basado en GPS.²

Finalmente, un escenario de negación más grave pero menos probable involucra a naciones que usen tecnología antisatélite para incapacitar o destruir uno o varios satélites de la constelación GPS. Ya hay tres naciones que poseen esa tecnología: Estados Unidos, Rusia y China, esta última demostró una capacidad antisatélite con un ataque sorpresivo contra uno de sus propios satélites meteorológicos en 2007.³

Independientemente de la razón, cuando la capacidad GPS se degrada o queda fuera de servicio, los militares necesitan una alternativa de navegación que les ofrezca precisión y utilidad comparable. Los investigadores del Centro de Tecnología de Navegación Avanzada (ANT) del Instituto de Tecnología de la Fuerza Aérea (AFIT) están trabajando para lograr precisión similar a GPS sin el uso de GPS. El Centro ANT está investigando métodos para calcular la posición usando balizas, señales de oportunidad (SoOP) creadas por el hombre y que ocurren de forma natural (incluyendo campos magnéticos), y ayudas visuales. En el futuro, una alternativa robusta al GPS probablemente empleará una combinación de estas

*El Mayor Fisher, un profesor asistente de ingeniería eléctrica en el Instituto de Tecnología de la Fuerza Aérea (AFIT), se desempeña como subdirector del Centro de Tecnología de Navegación Avanzada (ANT), un Centro de Excelencia de AFIT. El Dr. Raquet, un profesor asociado de ingeniería eléctrica en AFIT, se desempeña como director del Centro ANT.

técnicas. Una revisión de los conceptos básicos de navegación ayudará a poner en perspectiva estos métodos diferentes de GPS.

Navegación: Una descripción general

¿Qué es navegación?

A comienzos de la historia, el ser humano se interesaba principalmente en la navegación localizada, que significa determinar una posición en la vecindad de un área habitable local. La gente navegaba mayormente identificando puntos de interés y usando sus propias ubicaciones conocidas para determinar la posición. Posteriormente, especialmente cuando el viaje en barco amplió en gran medida la movilidad, los viajeros necesitaron un medio de navegación global.⁴ Los primeros marinos navegaban llevando cuenta de la dirección y la distancia recorrida en cada tramo del viaje, una técnica conocida como *navegación a estima*.⁵ Aunque la navegación ha mejorado dramáticamente, muchos sistemas modernos (por ejemplo el sistema de navegación inercial [INS]) aún se basan en la navegación a estima (desde la perspectiva de comenzar en una posición asumida y llevar cuenta de los cambios en posición, velocidad, dirección, y/o distancia en el tiempo).

Tendencias de la navegación

Aunque el INS moderno puede ser bastante preciso en períodos de tiempo cortos, la navegación y coordinación precisa sobre vastas regiones requiere información de posición sumamente rigurosa—de allí la necesidad de la tecnología GPS. El GPS se ha convertido en la piedra angular de la navegación moderna, y las mejoras en su tecnología durante los últimos 20 a 30 años ofrecen a los usuarios del sistema no sólo la capacidad de navegar con una precisión de pies, e incluso pulgadas, del destino previsto, sino también sincronizar sistemas operativos y equipos para lograr una extraordinaria eficiencia. Para los usuarios militares, estas eficiencias se traducen en ventaja operativa a través de economía de fuerza, masa y el elemento de sorpresa. El Departamento de Defensa y la industria comercial están utili-

zando más y más sistemas en los que múltiples vehículos interdependientes trabajan juntos para lograr una meta o misión (a menudo automáticamente), un objetivo que casi siempre requiere navegación confiable. De hecho, varios sistemas necesitan GPS para funcionar (no simplemente navegar), y dan por sentado que el sistema existe. Además, las mejoras en la precisión del GPS (tanto el equipo como los algoritmos que lo apoyan, por ejemplo el GPS diferencial) pueden eliminar la mayoría de los errores encontrados en sus señales. Hoy en día, los usuarios pueden lograr rutinariamente precisión de posición casi al centímetro en aplicaciones tales como aterrizaje de precisión y, en el futuro, se espera el reabastecimiento aéreo automatizado de combustible de aeronaves militares. A medida que aumenta el grupo de “clientes” potenciales de la tecnología GPS, el mercado responde con receptores más pequeños y de menor costo para satisfacer la demanda. La ubicuidad del GPS ha incrementado la inclinación de los usuarios (especialmente los militares) para rastrear muchas cosas—todos los aerotécnicos o soldados que participan en operaciones de combate, toda pieza de equipo del campo de aviación, todo vehículo, etc. En el pasado nos contentábamos con rastrear sólo los principales elementos del equipo, como las aeronaves, debido al tamaño y gasto de los dispositivos de navegación tradicionales y los primeros receptores GPS. Hoy, casi todos los soldados pueden llevar un receptor GPS en su mochila.

A medida que aumenta la dependencia militar y comercial en el GPS, también aumenta la vulnerabilidad a la interrupción o perturbación del sistema. Por lo tanto, los usuarios necesitan equipo con capacidad de navegación y sincronización de reserva para situaciones en las que no funcione el GPS. El científico jefe de la Fuerza Aérea identificó recientemente a “PNT [posición, navegación y tiempo] en los entornos de navegación GPS” como una de las 12 áreas de investigación más importantes (en términos de prioridad) que debemos enfatizar en el futuro cercano.⁶ Los investigadores del Centro ANT se centran exactamente en este problema considerando métodos de navegación que no dependan de GPS.

Como en la mayoría de situaciones el sistema no ofrece PNT exacto, una alternativa conveniente que usualmente demanda combinar dos o más sensores usando un algoritmo de navegación. El resto de este artículo explica los conceptos generales que sustentan los algoritmos de navegación y la integración de sensores, y luego describe cuatro técnicas diferentes de navegación diferente de GPS que se investigan en el centro ANT.

Algoritmos de navegación e integración de sensores

Un algoritmo de navegación combina información, convenientemente expresada a través de un ciclo de *predicción-observación-comparación* (fig. 1). “Estado de navegación”, en la parte inferior derecha de la figura, representa el estado de navegación actual del usuario o toda la información sobre su posición, velocidad, etc., así como los estimados de la calidad de esa información. Se puede imaginar este estado como la mejor conjetura del sistema sobre la posición del usuario, y la estimación del sistema sobre la precisión de esa conjetura. Como se describe en el cuadro “Sensor”, el sistema mide u observa datos que le permiten entender el estado de navegación del usuario. Para GPS, el sistema observa el intervalo hasta un satélite. También utiliza un modelo del mundo real, representado como el cuadro “Modelo del mundo”. En el caso del GPS, este modelo puede comprender las ubicaciones (órbitas) de los satélites GPS.

Durante la fase de *predicción*, el sistema utiliza el modelo del mundo y el estado de navegación para predecir lo que el sistema espera observar; el cuadro “Algoritmo de predicción” en la figura representa este proceso. Durante la fase de *observación*, el sistema recibe una medida degradada por el ruido del mundo real. Durante la fase de *comparación*, el algoritmo hace coincidir la medida prevista con la actual y usa las discrepancias para mejorar el estado de navegación y posiblemente el modelo del mundo.

Consideremos el siguiente ejemplo simplificado de navegación: un usuario trata de de-

terminar su posición desde una pared. Usando la vista para juzgar la distancia, *predice* que está a unos 9 metros. (En este punto, el estado de navegación es 9 metros con alta incertidumbre.) A continuación el usuario mide u *observa* la distancia como 9,4 metros, basándose en el cálculo de un indicador de distancias de precisión láser. A continuación, *compara* la predicción con la observación, descartando rápidamente la primera y confiando en la segunda porque el usuario confía en la observación basada en láser mucho más que en el estado de navegación actual (basado en su vista).

Las aplicaciones más interesantes combinan predicción con observación, una condición que surge cuando existe un grado de confianza comparable en ambas, aunque no estén de acuerdo. Para manejar esta combinación, las aplicaciones típicas de INS/GPS usan un filtro Kalman para realizar el ciclo de predicción-observación-comparación.⁷ INS predice la posición del usuario llevando cuenta de sus movimientos, y luego el receptor GPS “observa” la posición del usuario usando las mediciones de los satélites del sistema. Finalmente, un filtro Kalman compara la predicción INS con la observación GPS, generando una solución combinada basada en la calidad relativa de los dos resultados.

Los sistemas de navegación moderna típicos combinan un INS con actualizaciones GPS para producir un estimado de navegación robusto—“robusto” porque las entradas dobles se complementan entre sí. El INS provee un estimado preciso, casi continuo del movimiento del vehículo pero acumula errores en el transcurso del tiempo. Por ejemplo, hasta el INS más preciso inicializado muy cerca a la posición real eventualmente acumulará errores que hacen que su estimado de posición no sea utilizable. Inversamente, las actualizaciones de GPS ocurren con menos frecuencia, pero no se acumulan errores. Usados en tandem, el INS provee un estimado de navegación preciso en el corto plazo mientras que el GPS provee una solución precisa en el largo plazo. En otras palabras, el sensor GPS limita la deriva de los errores del INS.

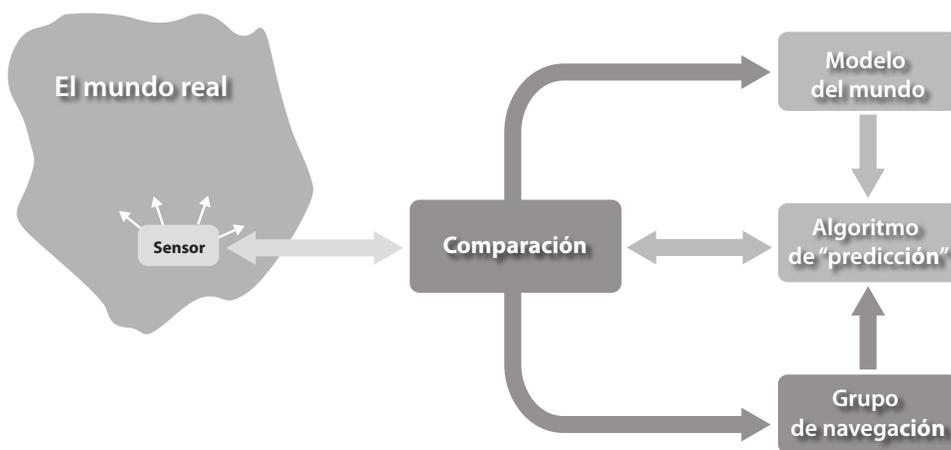


Figura 1. Algoritmo de navegación teórico

Cuatro técnicas de navegación prometedoras para posición, navegación y temporización en entornos de navegación de GPS

Navegación usando balizas

Las balizas (fuentes de señales creadas por el hombre emitidas para fines de navegación que aumentan o reemplazan a las señales GPS) pueden contrarrestar los efectos de los entornos de interferencia intencional o de señal débil. La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (DARPA) instituyó un programa para “demostrar el uso de seudosatélites (transmisores del tipo GPS de alta potencia aerotransportados), para emitir una potente señal GPS de reemplazo que ‘pasa a través’ de los dispositivos interferentes y restablece la navegación GPS sobre un teatro de operaciones”.⁸ Las demostraciones reales de campo han probado que los seudosatélites aerotransportados podrían reemplazar las emisiones de satélite, proporcionando señales de navegación de alta calidad a los receptores GPS militares realizando solamente modificaciones de software en los receptores.

Otros investigadores utilizan balizas para transmitir señales únicas que requieren receptores diseñados específicamente para navega-

ción, utilizando esas señales. Una empresa utiliza balizas terrestres colocadas en un área local para asistir al GPS o para navegar sin ese sistema.⁹ Incluso se puede usar estas balizas para ubicar la posición de una persona dentro de un complejo de minas subterráneas; además, las balizas podrían resultar útiles para las tropas de tierra que operan en lugares cerrados. Desde un punto de vista operativo, este enfoque requiere el despliegue de transmisores desde instalaciones de tierra o desde plataformas aerotransportadas.

Navegación usando señales de oportunidad creadas por el hombre

La navegación GPS hace el seguimiento de señales transmitidas desde satélites. La navegación con SoOP aprovecha este concepto, excepto que la navegación SoOP hace el seguimiento de señales transmitidas para fines distintos de la navegación (por ejemplo, radio AM y FM, radio satélite, televisión, transmisiones de teléfonos celulares, redes inalámbricas de computadoras, y numerosas señales de satélite). Los Investigadores del Centro ANT han explorado las señales de televisión, señales de radio AM, emisiones de audio/video digital, y redes inalámbricas.¹⁰ Dada la amplia variedad de los SoOP disponibles, los investigadores han desarrollado una herramienta matemática para determinar la utilidad de tal señal para la navegación.¹¹

La navegación SoOP tiene varias ventajas sobre GPS. Primero, las SoOP son abundantes, asegurándose la disponibilidad de suficientes señales para determinar la posición y reducir el error de posición. Segundo, las SoOP a menudo se reciben con mayor intensidad de señal que las señales GPS.¹² (A diferencia de las señales GPS, las señales de las estaciones de radio FM o de teléfonos celulares con frecuencia están disponibles y se pueden usar en ambientes cerrados.) Finalmente, el usuario de navegación no incurre en costos de desarrollo ni gastos de operación relacionados con los SoOP. (Por supuesto, al igual que los receptores GPS, se tendrían que diseñar y fabricar los receptores móviles para desplegar tal sistema.)

No obstante, el uso de los SoOP para propósitos de navegación tiene desventajas. Como el sistema no tenía previsto que se utilizaran estas señales para navegación, su temporización no está necesariamente vinculada ni sincronizada. Además, el usuario de navegación podría no saber exactamente lo que se transmitió. Para aliviar estos dos problemas, los escenarios típicos de navegación SoOP emplean una estación base—un receptor en un lugar conocido dentro de la vecindad del receptor del usuario. La estación base habilita al último dispositivo para extraer características de SoOP, haciendo que los problemas de temporización sean menos severos. La mayoría de algoritmos también asume que el transmisor de SoOP (por ejemplo, la torre de la estación de radio o el enrutador inalámbrico) ocupa una ubicación conocida, aunque existen métodos para determinar esta información. Con frecuencia es difícil eliminar las señales de rutas múltiples o reflejadas—fuentes de error predominantes en la navegación SoOP.

La multiplexión ortogonal con división de frecuencias representa una estructura de señales SoOP particularmente prometedora usada para emisiones de audio y video digital y en muchos dispositivos de red inalámbrica. Estas señales presentan beneficios de navegación no encontrados en otras señales, como la información redundante intercalada dentro de las señales, desde las cuales un usuario puede obtener datos de navegación mediante

intercepción (es decir, escuchando pasivamente una señal) sin usar una estación base.¹³ Otra investigación estrechamente relacionada incluye intentos de usar identificación de radiofrecuencia para asociar cada señal con un transmisor en particular.¹⁴

También hay métodos de navegación SoOP distintos de los que usan información de temporización obtenida rastreando una SoOP (similar a la navegación GPS). Por ejemplo, podemos hacer uso de los datos del ángulo de llegada (encontrado típicamente usando múltiples antenas) para la navegación dividiendo múltiples ángulos de llegada para determinar la posición del receptor por triangulación. Adicionalmente, podemos utilizar la intensidad de la señal recibida (RSS) de SoOP para estimar la distancia hasta un transmisor en particular. Un vendedor comercial incluso ofrece una base de datos de ubicaciones de redes inalámbricas y potencia transmitida para uso en cálculos de RSS.¹⁵

Navegación usando señales de oportunidad que ocurren naturalmente

Aunque las SoOP creadas por el hombre representan un rico campo de estudio, también se dispone de las SoOP que ocurren naturalmente. Fundamentalmente, cualquier fuente que permita distinguir una posición de otra en la tierra es adecuada para navegación. A menudo la utilidad de un fenómeno para determinar posición depende de la confiabilidad con que podamos medirlo; lo bien que la medición corresponda a la posición del usuario; y el tamaño, peso y potencia del sensor. Numerosas SoOP que ocurren naturalmente podrían ser adecuadas para navegación, incluyendo campos magnéticos, campos gravitacionales y descargas de rayos; sin embargo, la navegación basada en campos magnéticos sigue siendo la más prometedora para las aplicaciones militares.

Encontramos campos magnéticos (de intensidades variables) en cualquier parte de la tierra. Además del campo magnético de la tierra, otros campos similares ocurren en cualquier material conductor (tales como barras de refuerzo, travesaños de pared hechos de acero, tuberías, cableado, etc.). Por lo tanto,

la intensidad del campo magnético en un punto específico de un pasillo en particular de un edificio en particular es única. Los investigadores del Centro ANT han probado la factibilidad de usar tales intensidades para ayudar a los sistemas de navegación en interiores comparando primero las mediciones desde un magnetómetro pequeño (aproximadamente del tamaño de un mazo de naipes) con un mapa de campo magnético del área interior determinado previamente.¹⁶ Después, determinaron la posición del usuario encontrando la ubicación en el mapa que tiene la más alta correlación con la medida del magnetómetro. Aunque los resultados fueron bastante prometedores, hay un par de áreas que requieren más investigación. Primero, el sistema se apoyó en un mapa de campo magnético determinado con anterioridad. Como no podemos esperar de forma realista que los combatientes de guerra analicen un área, se están realizando estudios para crear un mapa de campo magnético a medida que se muevan. Segundo, los investigadores están explorando las variaciones de los campos magnéticos con el tiempo y la resistencia del algoritmo de navegación del campo magnético a las grandes desviaciones en el campo observado (lo que puede ocurrir con la adición o el retiro de objetos metálicos de la escena).

Navegación asistida por visión

La navegación asistida por visión utiliza cámaras para producir un sistema altamente complementario que restrinja la deriva inercial. En lugar de calcular directamente la ubicación del vehículo, los sistemas de visión utilizan el movimiento percibido por sensores de imagen para asistir al INS. Por ejemplo, suponga que una persona gira al sentarse en una silla. Fisiológicamente, el sistema vestibular detecta la rotación; sin embargo, la vista puede ayudar a estimar la rotación observando el movimiento de indicadores visuales. De manera similar, los sensores de visión pueden ayudar a un INS y por consiguiente mejorar la navegación.

Aparte del mejor rendimiento, los sistemas de navegación asistida por visión tienen varias ventajas. Primero, las técnicas de visión por

computadora son inmunes a los ataques que incapacitan al GPS (aunque las herramientas basadas en la visión tienen sus propias limitaciones, tales como las impuestas por la niebla o el humo). Segundo, a medida que las cámaras y computadoras se hacen más potentes y menos costosas, la visión computacional se vuelve rápidamente una solución realizable y económica. Tercero, una cámara usada para navegación también puede recoger inteligencia. Igualmente, una cámara usada para recopilación de inteligencia puede también servir para navegación. Además, podemos integrar datos con información de mapas de la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial o de proveedores de imágenes comerciales como Google Maps.

Debido a la complejidad de la computación, los algoritmos típicos de asistencia visual emplean características seleccionadas de una imagen en lugar de la imagen completa. El algoritmo hace coincidir características entre imágenes sucesivas para estimar el movimiento relativo de la plataforma. La calidad de la coincidencia de características depende de la caracterización e identificación de las características en las imágenes subsiguientes. Podemos reducir más la complejidad de cómputo limitando el análisis a una pequeña parte de una imagen. Estas mejoras de computación nos permiten utilizar sistemas visuales en plataformas relativamente pequeñas. Los investigadores del Centro ANT han combinado un algoritmo de rastreo de características más rápido pero menos robusto con un INS de grado comercial para lograr rendimiento de tiempo real en una pequeña aeronave a control remoto de interiores.¹⁷

La distancia desde la cámara hasta una característica (por ejemplo, percepción de profundidad) representa un aspecto clave de la navegación asistida por imágenes. Los investigadores del Centro ANT han imitado la vista humana usando dos cámaras de navegación estéreo asistidas por imágenes y han demostrado sus algoritmos en tiempo casi real.¹⁸ Desgraciadamente, este método depende de la separación física entre las cámaras, de modo que no podemos emplearlo fácilmente

en aplicaciones en miniatura (por ejemplo, en un vehículo aéreo diminuto).

Si se le aumenta a la cámara un sensor de rango láser pequeño tipo giroscopio se evitan los requisitos físicos de los sistemas de visión estéreo. El Centro ANT ha usado tal sensor para medir la profundidad hasta cualquier objeto cercano dentro del campo visual de una cámara.¹⁹ Estos sensores, junto con un sensor inercial, pueden ayudar a dirigir un vehículo aéreo diminuto sin usar GPS —una configuración ideal para exploración en interiores y misiones de mapeo. Además de proporcionar una solución de navegación diferente de GPS, esta combinación de sensor pequeño y ligero puede localizar y crear imágenes de objetos para uso en aplicaciones de inteligencia o selección de blancos.

A diferencia de la selección de características, el renderizado predictivo—otra área de investigación activa en la navegación asistida por visión—utiliza el conocimiento de un objeto para estimar el movimiento de una plataforma. Los investigadores del Centro ANT están aplicando este método a escenarios de reabastecimiento aéreo de combustible. Específicamente, un modelo tridimensional del avión tanquero permite a las computadoras predecir una imagen del avión desde la perspectiva de la plataforma del receptor. Después que las cámaras capturan una imagen real, un algoritmo compara la imagen prevista con la observada. Este esquema de navegación utiliza técnicas de procesamiento de imágenes que simplifican la correlación entre imágenes previstas y reales (es decir, la medida en la que las dos imágenes coinciden).²⁰

Combinación de un dispositivo de comunicaciones/navegación con un sistema de navegación inercial asistido por visión

Un concepto prometedor podría ofrecer al combatiente de guerra un dispositivo portátil integrado para comunicaciones y navegación. Los soldados a pie con frecuencia llevan un radio portátil y un receptor GPS. La combina-

ción de estos dispositivos en una unidad permitiría que esos soldados utilicen el enlace de comunicaciones entre las radios para que el posicionamiento dependa menos del GPS. Además, un INS asistido por visión a bordo ofrece información de estabilidad y actitud de corto plazo. Así como el INS asistido por GPS combina la estabilidad de largo plazo de las soluciones GPS con la estabilidad de corto plazo de un INS, es posible que el dispositivo integrado propuesto tenga potencial para navegación precisa diferente de GPS de plazo relativamente largo.

Los investigadores del Centro ANT y Raytheon Corporation están usando medidas de alcance basadas en un aparato de comunicación portátil Raytheon DH-500 para determinar la posición del usuario sin recurrir al GPS.²¹ Ese sistema de radio compacto tiene capacidad de alcance además de comunicación robusta. Recientemente, el Centro ANT combinó las mediciones de alcance por radio del Raytheon DH-500 con un INS asistido por visión para navegación precisa diferente de GPS.²²

Este tipo de investigación sirve como entrada a una clase de problemas más amplia —particularmente, el uso de dispositivos portátiles de navegación/comunicaciones combinados aumentados con otros sensores para navegar y comunicarse de forma sinérgica. Estos dispositivos pueden también permitir que varias plataformas cooperen dentro de una red, ofreciendo aún más información para navegar.

Un tamaño no sirve para todos

En la gran mayoría de aplicaciones militares, GPS (o GPS con INS) cumple los requisitos de rendimiento de la navegación cuando está disponible. Si el sistema no está disponible, tenemos que recurrir a métodos de navegación alternativos como los descritos anteriormente. Sin embargo, comparados con el GPS, los otros métodos tienen desventajas importantes. Por ejemplo, la navegación basada en baliza no se aplica a nivel mundial y requiere el despliegue de balizas. La navegación usando SoOP debe tener acceso a las clases

correctas de señales (es también susceptible a las otras desventajas descritas previamente). La navegación basada en visión no funciona bien en niebla o en el océano. La navegación basada en alcance de radio funciona sólo en el contexto de varios vehículos. En consecuencia, ningún método individual serviría como alternativa al GPS en todos los entornos. Es importante continuar la investigación que desarrolla nuestra capacidad de navegar usando señales diferentes de GPS. Sin embargo, el hecho simple de tener más opciones no ofrece una respuesta completa.

El camino a seguir: Navegación que utilice todas las fuentes

La Fuerza Aérea debe adoptar un método de navegación que utilice todas las fuentes para resolver la navegación de precisión sin GPS.²³ Un algoritmo de navegación que utilice todas las fuentes calcula una solución precisa desde la dinámica de la plataforma, utilizando toda la información disponible. La Figura 2 representa un escenario teórico que se apoya en un INS y utiliza la siguiente infor-

mación adicional de sensor: GPS, SoOP, visión, detección de luz y alcance, campos magnéticos, gravedad, y radar. Observe la inclusión intencional del GPS (un sistema de navegación que utilice todas las fuentes deberá usar ese sistema cuando esté disponible). Por tanto, el sistema combina toda la información disponible y emplea un subconjunto reducido de sensores cuando algunos sensores no están disponibles.

El Centro ANT está desarrollando sistemas que se pueden adaptar fácilmente a situaciones específicas usando los sensores más apropiados. Por ejemplo, la navegación basada en imágenes puede resultar adecuada para un entorno urbano durante el día, mientras que un método menos preciso basado en el campo de la gravedad podría ser el más apropiado para la navegación sobre el océano. Evidentemente, diferentes situaciones requieren diferentes grupos de sensores. Sin embargo, las arquitecturas de integración actuales generalmente no permiten el intercambio fácil de sensores de navegación. Debido a que la mayoría de sistemas de navegación integrados se diseñan específicamente para un conjunto particular de sensores, la adición de un sensor

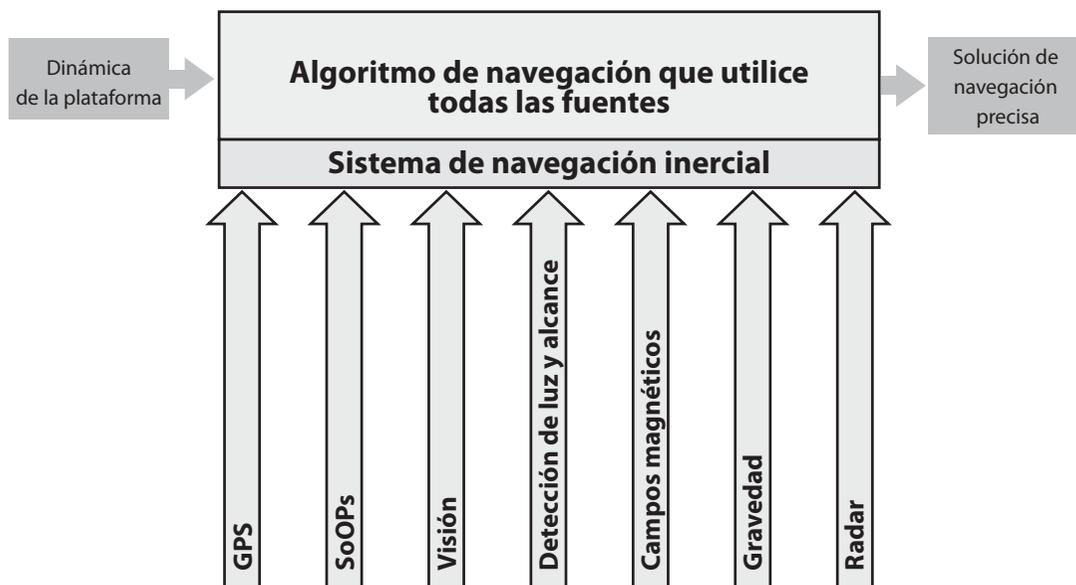


Figura 2. Algoritmo teórico de navegación que utilice todas las fuentes

genera mucho trabajo. Es posible crear un sistema compuesto de una multitud de sensores GPS y diferentes de GPS, que pueda funcionar en casi todos los entornos, pero tal sistema sería sumamente inmanejable en términos de tamaño, peso y potencia, así como de la complejidad de cómputo. En realidad, diferentes misiones exigen diferentes grupos de sensores; por lo tanto, al cambiar las misiones, estos grupos de sensores también deberán cambiar. Idealmente, podríamos simplemente conectar cualquier grupo de sensores de navegación que necesitemos para una misión en particular a un procesador de integración central a fin de hacer coincidir las capacidades con las necesidades de la misión.

Sin embargo, la implementación de tal sistema de navegación “plug and play” requiere investigación y desarrollo en los algoritmos de integración subyacentes así como en la arquitectura de integración (incluyendo hardware y software) que conecta y combina las entradas de múltiples sensores físicos. La comunidad de investigación en navegación tiene un interés creciente en este tema. Por ejemplo, DARPA acaba de publicar un anuncio general para un programa que busca “desarrollar las arquitecturas, el método de abstracción y los algoritmos de filtrado de navegación necesarios para la integración y reconfiguración rápida de cualquier combinación de sensores”.²⁴ Aunque la integración de sistemas flexibles es un reto difícil, la recompensa será importante para los usuarios militares si podemos crear sistemas capaces de navegar en casi todos los entornos—pero esos sistemas deben también ser prácticos en términos de tamaño, peso, potencia y costo.

Los investigadores del Centro ANT han desarrollado tecnologías que comenzarán a producir el algoritmo de navegación que utilice todas las fuentes y el grupo de sensores que necesitamos para desplegar un sistema de navegación que utilice todas las fuentes. La Fuerza Aérea debe continuar invirtiendo en algoritmos de integración, capacidades de sensores, y tecnologías modulares si queremos tener éxito en mantener la navegación de precisión en entornos de navegación de GPS.

Wright-Patterson AFB, Ohio

Notas

1. John W. Moyle, “The Space and Air Force: One Pathway to the Future (El Espacio y la Fuerza Aérea: Un Camino al Futuro)”, *Air and Space Power Journal: Chronicles Online Journal*, consultado el 15 de marzo de 2011, <http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/cc/moyle.html>.

2. Alan Cameron, “Perspectivas—Junio de 2008,” 24 de junio de 2008, *GPS World*, <http://www.gpsworld.com/gnss-system/perspectives-june-2008-7254>.

3. Michael P. Pillsbury, PhD, *An Assessment of China's Anti-satellite and Space Warfare Programs, Policies and Doctrines (Una Evaluación de los Programas, Políticas y Doctrinas Antisatélite y de Guerra Espacial de China)*, Informe para la Comisión de Revisión Económica y de Seguridad Entre Estados Unidos y China, 19 de enero de 2007, http://www.uscc.gov/researchpapers/2007/FINAL_REPORT_1-19-2007_REVISIED_BY_MPP.pdf.

4. El término *navegar* significa “registrar, planear, y controlar la posición y el curso de un [barco o aeronave]”. Se deriva del latín *navigare*, que viene de *navis* o “barco” y *agere*, “dirigir”. *Webster's II: New Riverside University Dictionary*, 1988, s.v. “navigate.”

5. Una herramienta común para la búsqueda de direcciones—la brújula magnética—fue introducida en China en el siglo doce. La gente usualmente determinaba la distancia anotando la velocidad y el tiempo del barco. Véase Pratap Misra y Per Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance (Sistema de Posicionamiento Global: Señales, Medidas y Rendimiento)* (Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2001).

6. Científico Jefe de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (AF/ST), *Report on Technology Horizons: A Vision for Air Force Science and Technology during 2010–2030 (Informe sobre los Horizontes de la Tecnología: Una Visión para la Ciencia y Tecnología de la Fuerza Aérea durante 2010-2030)*, vol. 1, AF/ST-TR-10-01-PR (Washington, DC: Cuartel General de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, Oficina del Científico Jefe de la USAF, 15 de mayo de 2010), 76, http://www.aviationweek.com/media/pdf/Check6/USAF_Technology_Horizons_report.pdf.

7. El filtro se nombró en homenaje a Rudolph Kalman, quien publicó primero su algoritmo de predicción-observación-comparación en “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems (Un Nuevo Método para Problemas de Filtrado y Predicción Lineal)”, *Transactions of the ASME [American Society of Mechanical Engineers]—Journal of Basic Engineering* 82 (1960): 35–45, <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>.

8. Senado, *Declaración de la Dra. Jane A. Alexander, Directora Encargada, Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa ante el Subcomité de Amenazas y Capacidades Emergentes, Comité sobre los Servicios Armados, Senado de los Estados Unidos*, 107th Cong., Ira. sesión, 5 de junio de 2001, 9, <http://armed-services.senate.gov/statemnt/2001/010605alex.pdf>.

9. Locata, un proveedor comercial, detalla un sistema basado en balizas en Joel Barnes y otros, “LocataNet: A New Positioning Technology for High Precision Indoor and Outdoor Positioning” (presentación, 16 Reunión Téc-

nica Internacional de la División de Satélites del Instituto de Navegación de los Estados Unidos, Portland, OR, 9–12 de septiembre de 2003), 1119–28, <http://www.locatacorp.com/docs/2-%20UNSW%20Locata%20ION%20Paper%20presented%20Portland%20Sep%2011,%202003.pdf>.

10. Ryan J. Eggert y John F. Raquet, “Evaluating the Navigation Potential of the NTSC Analog Television Broadcast Signal” (presentación, Actas de la 17 Reunión Técnica Internacional de la División de Satélites del Instituto de Navegación de los Estados Unidos [ION GNSS 2004], Long Beach, CA, 21–24 de septiembre de 2004), 2436–46; Jonathan McElroy, John F. Raquet, y Michael A. Temple, “Use of a Software Radio to Evaluate Signals of Opportunity for Navigation” (presentación, Actas de ION GNSS 2006, Fort Worth, TX, 26–29 de septiembre de 2006); Richard K. Martin, Jamie S. Velotta, y John F. Raquet, “Bandwidth Efficient Cooperative TDOA Computation for Multicarrier Signals of Opportunity,” *IEEE [Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos] Transactions on Signal Processing* 57, no. 6 (Junio de 2009): 2311–22; y Wilfred Noel, “Indoor Navigation Using OFDM [Orthogonal Frequency-Division Multiplexing] Signals” (tesis de maestría, Instituto de Tecnología de la Fuerza Aérea, AFIT/GE/ENG/11-30, marzo de 2011).

11. El potencial de navegación fue desarrollado inicialmente en Kenneth A. Fisher y John F. Raquet, “Navigation Potential of Signals Modeled with Multipath Effects and Noise” (presentación, Actas de la Reunión Técnica Internacional de la División de Satélites del Instituto de Navegación de 2005 [ION NTM], San Diego, CA, 24–26 de enero de 2005), 320–31.

12. Para demostraciones del mundo real de la navegación basada en estaciones de radio AM comparada con la navegación basada en GPS, véase Timothy D. Hall, Charles C. Counselman III, y Pratap Misra, “Instantaneous Radiolocation Using AM Broadcast Signals” (presentación, Actas de ION NTM, Long Beach, CA, 22–24 de enero de 2001), 93–99.

13. Uno de tales esquemas se detalla en Jason Crosby, “Fusion of Inertial Sensors and Orthogonal Frequency Division Multiplexed (OFDM) Signals of Opportunity for Unassisted Navigation” (tesis de maestría, Instituto de Tecnología de la Fuerza Aérea, AFIT/GE/ENG/09-11, marzo de 2009).

14. Para usar una señal con el fin de determinar la posición, es necesario conocer su origen. La identificación de radiofrecuencias ayuda a asociar las señales con su transmisor particular. Véase William C. Suski y otros, “Using Spectral Fingerprints to Improve Wireless Network Security (Uso de Identificación Espectral para Mejorar la Seguridad de Redes Inalámbricas)” (presentación, Conferencia Global en Telecomunicaciones, 2008: IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, LA, diciembre de 2008).

15. Skyhook, <http://www.skyhookwireless.com/howitworks/>.

16. William F. Storms y John F. Raquet, “Magnetic Field Aided Vehicle Tracking (Rastreo de Vehículos con Asistencia de Campos Magnéticos)” (presentación, Actas

de ION GNSS 2009, Savannah, GA, 22–25 de septiembre de 2009).

17. Jeffery Gray y Michael Veth, “Deeply-Integrated Feature Tracking for Embedded Navigation (Rastreo Altamente Integrado de Características para Navegación Incorporada)” (presentación, Actas de la Reunión Técnica Internacional del Instituto de Navegación de 2009, Anaheim, CA, 26–28 de enero de 2009), 1018–25.

18. Michael Veth y John Raquet, “Fusing Low-Cost Image and Inertial Sensors for Passive Navigation (Fusión de Sensores de Imágenes e Inerciales de Bajo Costo para Navegación Pasiva)”, *Navigation* 54, no. 1 (Primavera de 2007): 11–20.

19. Subteniente Don J. Yates, “Monocular Vision Localization Using a Gimbaled Laser Range Sensor (Localización de Visión Monocular Utilizando un Sensor de Rango Láser de Cardán)” (tesis de maestría, Instituto de Tecnología de la Fuerza Aérea, AFIT/GE/ENG/10-31, marzo de 2010), <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA524323&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>.

20. Capitán Adam D. Weaver, “Predictive Rendering: A New Vision-Aided Approach for Autonomous Aerial Refueling (Renderizado Predictivo: Un Nuevo Enfoque Asistido por Visión para Reabastecimiento Aéreo Autónomo de Combustible)” (tesis de maestría, Instituto de Tecnología de la Fuerza Aérea, AFIT/GE/ENG/09-45, marzo de 2009).

21. Raytheon provee el sistema de comunicación por radio para el programa Land Warrior que actualmente funciona con el Cuarto Equipo de la Brigada de Combate Stryker en Irak. El Centro ANT y Raytheon operan mediante un acuerdo de investigación y desarrollo cooperativo para desarrollar soluciones de navegación diferentes de GPS.

22. Subteniente Erich Lichtfuss, “Indoor Navigation Using Vision and Radio Ranging (Navegación en Interiores Usando Visión y Alcance de Radio)” (tesis de maestría, Instituto de Tecnología de la Fuerza Aérea, AFIT/GE/ENG/11-23, marzo de 2011).

23. El término *navegación que utiliza todas las fuentes* es una adaptación de *inteligencia de todas las fuentes*, que combina datos de inteligencia a través de varias plataformas para generar una imagen más completa que cualquier imagen basada en una sola fuente.

24. Oficina de Tecnología Estratégica, *Broad Agency Announcement: All Source Positioning and Navigation (ASP)* (Anuncio Para Todas las Agencias: Posicionamiento y Navegación Que Utilice Todas las Fuentes (ASP)), DARPA-BAA-11-14 (Arlington, VA: Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa, Oficina de Tecnología Estratégica, noviembre de 2010), 5, [https://www.fbo.gov/download/b9e/b9e293bc25ab6cc1f7ad0601415bf5df/DARPA_BAA_11-14_All_Source_Positioning_and_Navigation_\(ASP\).pdf](https://www.fbo.gov/download/b9e/b9e293bc25ab6cc1f7ad0601415bf5df/DARPA_BAA_11-14_All_Source_Positioning_and_Navigation_(ASP).pdf).