



Algunos algoritmos de correspondencia de mapas para navegación personal asistentes

Christopher E. White ^a, David Bernstein ^{b,*}, Alain L. Kornhauser ^a

^a Departamento de Investigación de Operaciones e Ingeniería Financiera, Universidad de Princeton, Princetown, NJ 08540, EE. UU.

^b Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad James Madison, MSC 143 Harrisonburg, VA 22807, EE. UU.

Resumen

Los asistentes personales de navegación (PNA) de tercera generación (es decir, los que proporcionan un mapa, la ubicación actual del usuario y las direcciones) deben poder conciliar la ubicación del usuario con el mapa subyacente. Este proceso se conoce como correspondencia de mapas. La mayor parte de la investigación existente se ha centrado en la coincidencia de mapas cuando tanto la ubicación del usuario como el mapa se conocen con un alto grado de precisión. Sin embargo, hay muchas situaciones en las que es poco probable que sea así. Por lo tanto, este documento considera algoritmos de correspondencia de mapas que se pueden usar para reconciliar datos de ubicación inexactos con un mapa / red inexactos. Ó 2000 Publicado por Elsevier Science Ltd.

1. Introducción

Hay tres tipos diferentes de asistentes personales de navegación (ANP). Los PNA de primera generación simplemente proporcionan al usuario un mapa y la capacidad de buscar en el mapa de diversas formas (por ejemplo, buscar una dirección, buscar un punto de referencia, desplazarse y desplazarse). Los ANP de segunda generación proporcionan tanto un mapa como la ubicación / posición actual del usuario. Los ANP de tercera generación proporcionan un mapa, la ubicación del usuario y direcciones de algún tipo.

Debe quedar claro por qué distinguimos los ANP de primera generación de los sistemas de segunda y tercera generación. Claramente, un sistema que proporciona la ubicación actual del usuario es mucho más complicado que uno que no lo hace, y generalmente requiere hardware y software adicionales. Lo que puede no estar claro es por qué distinguimos entre ANP de segunda y tercera generación.

La razón fundamental para hacerlo es bastante simple. En los sistemas de segunda generación, la ubicación que se proporciona al usuario no tiene por qué coincidir con el sistema de calles (o el sistema de metro, etc.).

* Autor correspondiente. Tel. : + 1-540-568-1671; fax: + 1-540-568-2745.

Dirección de correo electrónico: bernstdh@jmu.edu (D. Bernstein).

Sin embargo, para proporcionar direcciones, la ubicación del usuario debe coincidir con una calle (o línea de metro, etc.) cuando sea apropiado.

En esencia, existen tres formas diferentes de determinar la ubicación del usuario. La primera es utilizar alguna forma de navegación a estima (RD) en la que la velocidad de movimiento del usuario, la dirección del movimiento, etc. se utiliza continuamente para actualizar su ubicación (Collier, 1990). El segundo es utilizar alguna forma de Faro que transmite su ubicación a los usuarios cercanos (Iwaki et al., 1989). El tercero es utilizar alguna forma de sistema de posicionamiento por radio / satélite que transmite información que la PNA puede utilizar para determinar la ubicación del usuario. Este último enfoque es, con mucho, el más popular, muchas ANP utilizan el sistema de posicionamiento global (GPS) para determinar la ubicación del usuario (Hofmann-Wellenho ?? et al., 1994).

Dado un receptor GPS, es casi trivial convertir un ANP de primera generación en un ANP de segunda generación (es decir, uno que proporcione tanto un mapa como la ubicación del usuario), y muchas personas lo han hecho. Sin embargo, conciliar la ubicación del usuario con el mapa (o la red) subyacente puede ser mucho más complicado. En otras palabras, convertir un PNA de segunda generación en un PNA de tercera generación puede ser bastante difícil.

Cuando tanto la ubicación del usuario como la red subyacente son muy precisas, se cree que el problema de conciliación es sencillo: simplemente "ajusta" la ubicación obtenida del receptor GPS al nodo o arco más cercano de la red. Por lo tanto, no es sorprendente que varias personas estén trabajando para mejorar la precisión tanto de la red subyacente como del sistema de posicionamiento. Para desarrollar mapas / redes más precisos, se están realizando enormes esfuerzos de "topografía" (Deretsky y Rodny, 1993; Schi ??, 1993; Shibata, 1994). Algunos de estos esfuerzos están siendo realizados por agencias gubernamentales y otros están siendo realizados por empresas privadas. Para desarrollar sistemas de posicionamiento más precisos, se está prestando mucha atención a la combinación de datos de múltiples fuentes.

Estamos interesados en situaciones en las que no es posible o deseable mejorar la precisión del mapa / red y la ubicación del usuario lo suficiente como para hacer factible un simple algoritmo de "ajuste". Tales situaciones surgen por muchas razones. En primer lugar, no todos los ANP se basan en vehículos. Por lo tanto, puede que no sea posible utilizar DR u otras fuentes de datos. En segundo lugar, incluso si es posible desarrollar una red / mapa que sea lo suficientemente preciso, es posible que dicha red no siempre esté disponible. Por ejemplo, el PNA puede no tener la capacidad suficiente para almacenar la red completa y precisa en todo momento y, por lo tanto, puede necesitar almacenar redes inexactas / incompletas o descargar redes menos detalladas desde un servidor local o central. En tercer lugar, muchas instalaciones probablemente nunca estarán disponibles a través de proveedores de mapas / redes y deberán obtenerse sobre la marcha en las instalaciones, probablemente con una precisión limitada. Por ejemplo, es posible que los proveedores no proporcionen redes / mapas detallados de aeropuertos, campus (tanto corporativos como universitarios), grandes estacionamientos y centros comerciales.

Por lo tanto, el propósito de este artículo es discutir algunos algoritmos de correspondencia de mapas que se puede utilizar para conciliar datos de ubicación inexactos con un mapa / red inexactos. Comenzamos en la siguiente sección con una definición formal del problema. Luego discutimos la coincidencia punto a punto, punto a curva y curva a curva. En los tres casos, consideramos algoritmos que solo usan

información geométrica y algoritmos que también utilizan información topológica. Luego, consideramos el rendimiento de cada uno de los algoritmos en la práctica (en un número de pruebas ciertamente limitado). Finalmente, concluimos con una discusión de posibles direcciones futuras de investigación.

Nuestro objetivo en este artículo no es proporcionar una evaluación definitiva de diferentes algoritmos de correspondencia de mapas. Más bien, nuestro objetivo es describir algunos algoritmos simples y considerar, tanto teóricamente como en un pequeño número de pruebas, por qué podrían o no funcionar bien en la práctica.

2. Enunciado del problema

Nuestra preocupación es con una persona (o vehículo) que se mueve a lo largo de un sistema (o conjunto) de calles, NORTE. En un número de fin de semana, T , de puntos en el tiempo, denotados por $F_0; 1; \dots; T$ gramos, estamos provistos ^{mid} con una estimación de la ubicación de esta persona. La ubicación real de la persona en t soy $m_i t$ se denota by $PAG t$ y la estimación es denotado por $PAG t$. Nuestro objetivo es determinar la calle en norte eso contiene $PAG t$. Es decir, queremos determinar la calle en la que se encuentra la persona en ese momento, t . Por supuesto, no conocemos el sistema de calles, NORTE, exactamente. En cambio, como se ilustra en la Fig.1, tenemos unrepresentación de la red, NORTE, que consta de un conjunto de curvas en R_2 , cada uno de los cuales se llama un arco. Se supone que cada arco es lineal por partes. Por lo tanto, arco A_2 norte se puede caracterizar completamente por una secuencia de puntos finita $A_0; A_1; \dots; A_{norteA}$ (es decir, los puntos finales de los segmentos de línea individuales que comprenden A), cada uno de los cuales está en R_2 . Los puntos A_0 y A_{norteA} se conocen como nodos tiempo $A_1; A_2; \dots; A_{norteA}1$ se conocen como puntos de forma. Un nodo es un punto en el que un arco termina / comienza (por ejemplo, correspondiente a un callejón sin salida en el sistema de calles) o un punto en el que es posible moverse de un arco a otro (por ejemplo, correspondiente a una intersección en el sistema de calles).

Este problema se llama problema de coincidencia de mapas porque el objetivo es $matChtél$ Ubicación estimada, $PAG t$, con un arco, A en el " mapa " $NORTE$, y luego determinar la calle, A_2 $NORTE$, que corresponde a la persona $ubicación$ actual, $PAG t$. Un objetivo secundario es determinar la posición en A que mejor corresponde a $PAG t$.¹

Para simplificar la exposición, ^{wmis}suponga que hay una correspondencia uno a uno entre los arcos en norte y las calles en NORTE. Sin embargo, esta suposición se puede relajar fácilmente (y a menudo no se mantiene en la práctica).

3. Algoritmos de correspondencia de mapas

Hay varias formas diferentes de abordar el problema de la correspondencia de mapas, cada una de las cuales tiene ventajas y desventajas. Discutiremos brevemente varios de ellos antes de pasar a la discusión de los algoritmos específicos que consideramos.

¹ No es sorprendente que el problema considerado aquí sea similar al problema de correspondencia de mapas en la robótica móvil. Allí, el problema es establecer una correspondencia entre un mapa local actual y un mapa global almacenado.

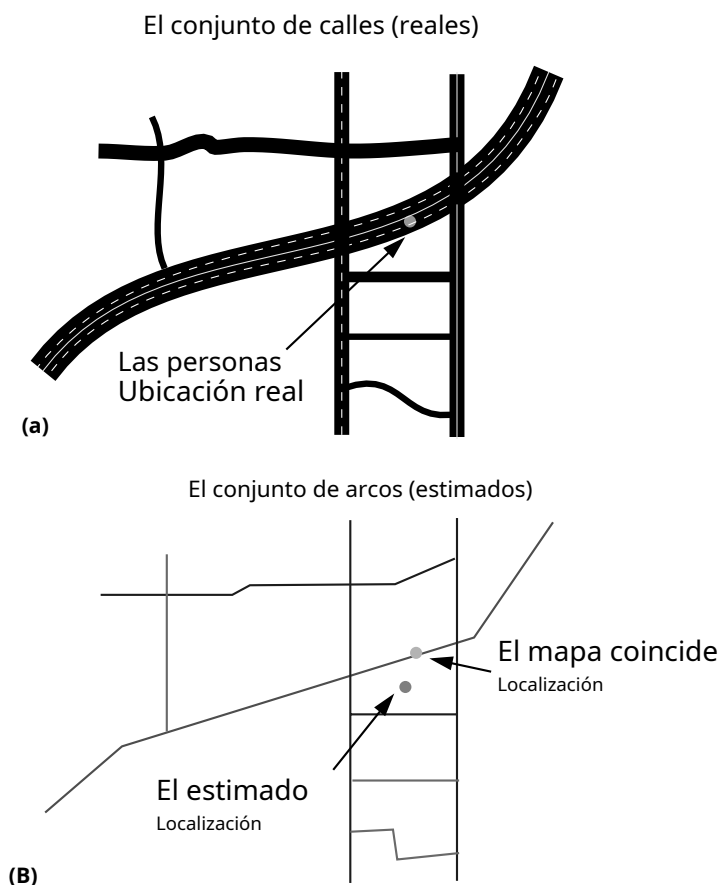


Fig. 1. El problema de la correspondencia de mapas.

3.1. La coincidencia de mapas como problema de búsqueda

Se puede ver el problema de correspondencia de mapas como un simple problema de búsqueda. Entonces el problema es coincidir PAG_t al nodo o punto de forma "más cercano" en la red.

Existen varias estructuras de datos y algoritmos (ver, por ejemplo, Bentley y Maurer, 1980; Fuchs et al., 1980) para identificar todos los puntos "cerca" de un punto dado (a menudo llamado consulta de rango). Entonces es una cuestión sencilla encontrar la distancia entre PAG_t y cada nodo y punto de forma que esté dentro de una distancia "razonable" de él (independientemente de la métrica utilizada), y seleccione el más cercano.

Si bien este enfoque es razonablemente fácil de implementar y rápido, tiene muchos problemas en la práctica. Quizás lo más importante es que depende fundamentalmente de la forma en que se utilizan los puntos de forma en la red. Para ver esto, considere el ejemplo que se muestra en la Fig. 2. Aquí, PAG_t está mucho más cerca de B_1 de lo que es para cualquiera A_0 o A_1 , por lo tanto, se emparejará con el arco B aunque es intuitivamente claro que debe coincidir con el arco UNA. Por tanto, este tipo de algoritmo es muy sensible a la forma en que se digitalizó la red. Es decir, en igualdad de condiciones, es más probable que coincidan los arcos con más puntos de forma.

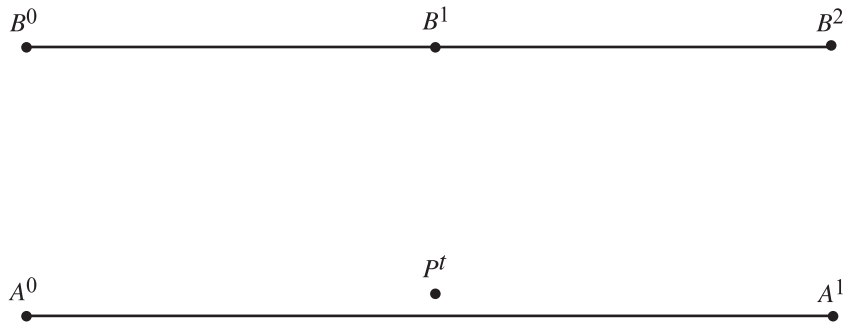


Fig. 2. Un problema con la coincidencia punto a punto.

Se podría argumentar que este problema podría superarse simplemente incluyendo más puntos de forma para cada arco. Desafortunadamente, esto aumenta drásticamente el tamaño de la red y no se garantiza que corrija el problema.

3.2. Coincidencia de mapas como estimación estadística

También se puede ver la correspondencia de mapas como un problema de estimación estadística. En este enfoque, se considera una secuencia de puntos PAG_s, \dots, PAG_t e intenta hacer una curva hacia ellos. Esta curva está limitada a situarse en la red.

Este tipo de enfoque ha sido explorado en numerosos artículos (ver, por ejemplo, Krakiwsky et al., 1988; Scott y Drane, 1994; Jo et al., 1996) y es bastante atractivo. Es particularmente elegante cuando el modelo que describe la "física del movimiento" es simple (por ejemplo, el movimiento solo es posible a lo largo de una línea recta). Desafortunadamente, en la mayoría de las aplicaciones prácticas, la física del movimiento está dictada por (o restringida por) la red. Esto hace que sea bastante difícil de modelar.

Para comprender por qué esto es importante, considere la red que se muestra en la Fig. 3. En este ejemplo, las posiciones $PAG_1 \dots PAG_7$ ha sido grabado. Nuestro objetivo es trazar una curva hacia estos puntos, pero la curva está restringida a situarse en la red. En este caso, hay dos curvas candidatas, A y B (ignoramos el resto de la red por simplicidad).

En general (es decir, independientemente de la métrica), la curva PAG está más cerca de la curva B que a la curva UNA. Por lo tanto, si uno usa un modelo simple de movimiento, se verá llevado a igualar PAG a B en lugar de UNA.

4. Algoritmos utilizados en este estudio

Nuestro objetivo en este estudio fue combinar la simplicidad del enfoque de búsqueda simple con algunas de las ideas del enfoque estadístico. Al final, implementamos y probamos cuatro algoritmos diferentes.

El algoritmo 1 es muy simple. Encuentra los nodos que están cerca del "tic" del GPS y une el conjunto de arcos que inciden en estos nodos. Luego encuentra el más cercano de estos arcos y proyecta el punto en

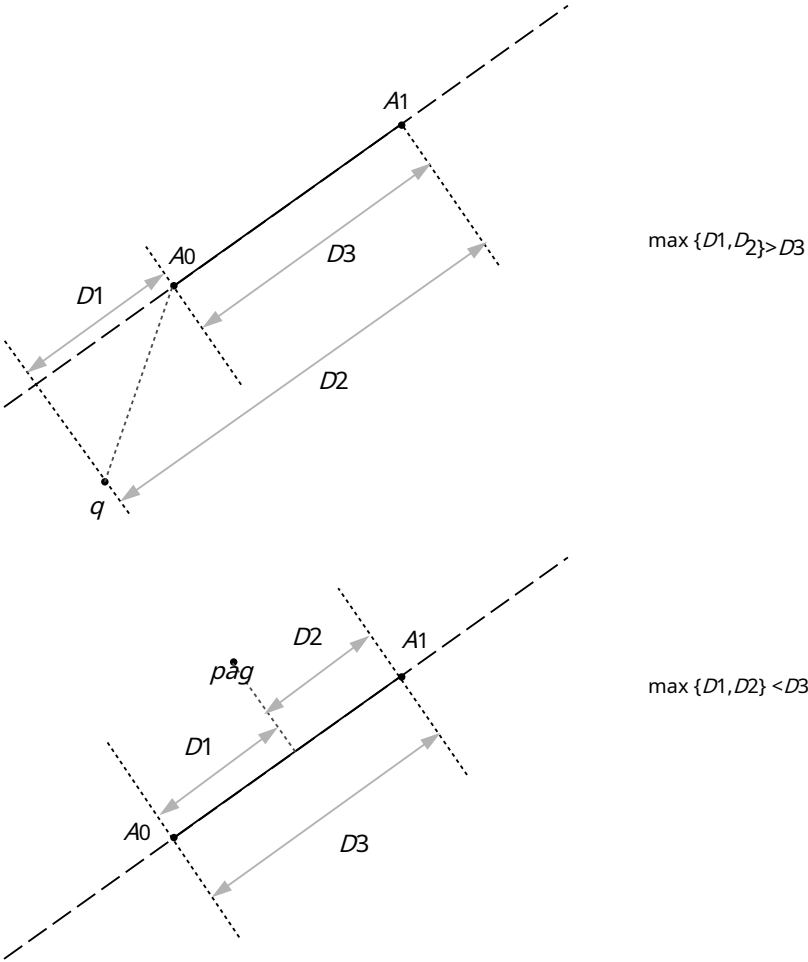


Fig. 4. La distancia entre un punto y un segmento.

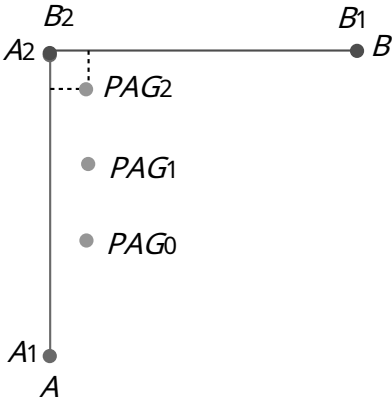


Fig. 5. Un problema con la coincidencia punto a curva.

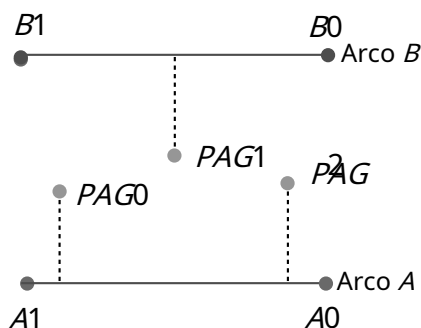


Fig. 6. Otro problema con la coincidencia punto a curva.

por ejemplo, una marca de GPS no coincidirá con un arco que sea perpendicular a la dirección actual de viaje (como ocurrió en el ejemplo de la Fig. 3). Nuevamente, este algoritmo se incluye principalmente como un hombre de paja.

El algoritmo 3 es una variante del algoritmo 2 que utiliza información topológica. En particular, mientras que los algoritmos 1 y 2 solo usan una consulta de rango para ubicar nodos candidatos (y, por lo tanto, arcos candidatos), el algoritmo 3 también usa información de conectividad. Específicamente, si el algoritmo tiene confianza en la coincidencia anterior, utilizará la topología de la red para ubicar los nodos candidatos para la siguiente coincidencia. Es decir, solo considerará los arcos que sean alcanzables (en un sentido topológico) desde el arco "actual". Por otro lado, si el algoritmo no tiene confianza en la coincidencia anterior, utilizará una consulta de rango. Un partido se considera "bueno" si el error es inferior al mínimo de 0,15 km y el doble del error medio en los partidos obtenidos hasta el momento.

Quizás la forma más fácil de entender cómo se puede usar la información topológica es considerar el ejemplo que se muestra en la Fig. 7. Suponga que sabemos que la persona estaba inicialmente en PAG_0 . Entonces sabemos

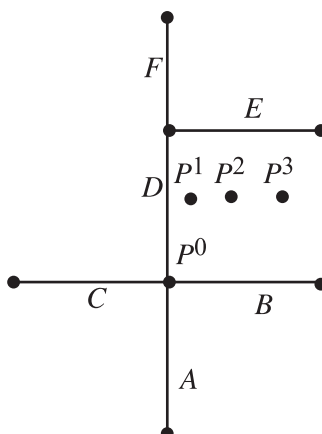


Fig. 7. Utilización de información topológica.

que PAG_1 solo puede estar encendido A B C, o D. De hecho, dada una cantidad de tiempo suficientemente pequeña entre mediciones, también podríamos saber que PAG_3 solo se puede emparejar con A B C, o D. Este tipo de información podría evitar que hagamos coincidir por error PAG_3 decir MI.

Esta es, en nuestra opinión, la forma más fácil de incorporar la física del movimiento en un algoritmo basado en búsquedas. Si bien no es tan sofisticado como los algoritmos de filtrado discutidos anteriormente, tiene el potencial de evitar muchos tipos de errores. Por supuesto, puede ser bastante sensible al umbral que se utilice. Es decir, una mala coincidencia en la que tenga confianza puede llevar a una secuencia de malas coincidencias. Por otro lado, si hace que sea difícil calificar una coincidencia como buena, entonces se comportará de manera muy similar al algoritmo 2. El umbral que elegimos (es decir, 0.15 km) se basó en un error de GPS "esperado" de 0,10 m.

El algoritmo 4 utiliza la coincidencia de curva a curva. En primer lugar, ubica los nodos candidatos utilizando las mismas técnicas que en el algoritmo 3. Luego, dado un nodo candidato, construye curvas lineales por partes a partir del conjunto de caminos que se originan en ese nodo. En segundo lugar, construye una curva lineal por partes utilizando los puntos PAG_s, \dots, PAG_t y calcula la distancia entre esta curva y las curvas correspondientes a la red. Finalmente, selecciona la curva más cercana y proyecta el punto sobre esa curva.

Los detalles de este algoritmo se ilustran en la Fig.8. PAG_1 y PAG_2 representan los puntos anterior y actual, respectivamente. El punto PAG_0 es un nodo candidato. La línea punteada es la curva lineal por partes, PAG , construido a partir de PAG_0 , PAG_1 , y PAG_2 . Los dos segmentos de esta curva lineal por partes tienen 8 y 5 unidades de longitud, respectivamente.

Hay muchas formas de calcular la distancia entre dos curvas. De particular importancia en este contexto es la forma en que se manejan las curvas de diferentes longitudes. Como se muestra en la Fig.9, uno puede calcular la distancia entre las dos curvas usando sus longitudes reales, o calcular la distancia entre "subcurvas" de igual longitud. Usamos el último enfoque.

Específicamente, volviendo a la Fig.8, para calcular la distancia entre la curva y A usamos los puntos a y B. a es el punto que tiene 8 unidades a lo largo del arco A empezando desde PAG_0 y B es el punto que

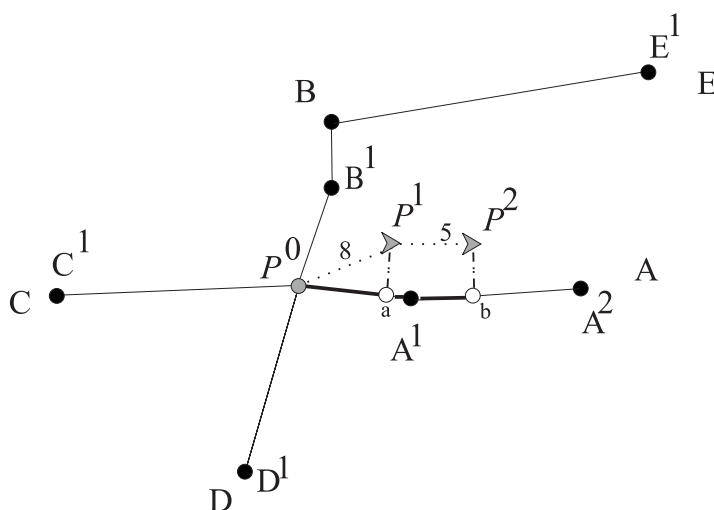


Fig. 8. Distancias curva a curva.

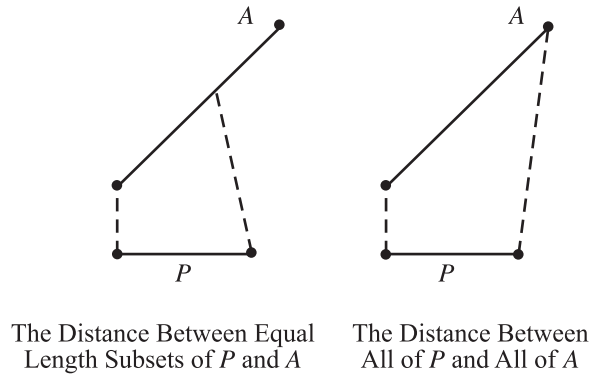


Fig. 9. La distancia entre curvas de diferente longitud.

es de 5 unidades para metro a a lo largo del arco UNA. La distancia entre PAG y A luego se calcula como $kPAG_1$ y ak_2 ?? $kPAG_2$ y Bk_2 .

Se utiliza un proceso similar para todos C y D, y para los otros nodos candidatos. PAG₂ luego se proyecta sobre el más cercano.

5. Rendimiento de los algoritmos

Desafortunadamente, no existen conjuntos de datos estándar que se puedan utilizar para evaluar los algoritmos de coincidencia de mapas. De hecho, se han comunicado muy pocas evaluaciones. Esto se debe en parte a la naturaleza patentada de gran parte de esta investigación y en parte a la dificultad de realizar este tipo de evaluación. Por lo tanto, construimos nuestro propio banco de pruebas de cuatro rutas.

Evidentemente, no se pueden extraer conclusiones de esta evaluación, reconocidamente limitada. No obstante, creemos que los resultados son interesantes.

5.1. Recopilación de datos

La red de calles que usamos para este estudio se tomó de los TIGER / Line® de 1997 para el condado de Mercer, Nueva Jersey. Recopilamos datos mientras viajábamos por cuatro rutas predeterminadas. Todas las rutas eran "dentro de la ciudad". Es decir, no involucraron carreteras ni arterias.

Determinamos nuestra ubicación real indicando manualmente a la ANP que registrara la hora del sistema a medida que ingresábamos a cada enlace. Determinamos nuestra ubicación estimada usando un receptor GPS que fue fabricado por TravRoute usando un chipset de Rockwell (12 canales, la corrección diferencial se desactivó). Ejecutamos el receptor en modo NMEA-0183 y usamos las sentencias GPRMC (que incluyen información sobre el tiempo, latitud y longitud, velocidad, rumbo y recuento de satélites). Registramos un tic de GPS por segundo, junto con la hora del sistema cuando se generó.

Tenga en cuenta que, dado este esquema de muestreo, los datos estarán sesgados espacialmente. Desafortunadamente, dada la tecnología actual, no es posible obtener una muestra espacialmente imparcial por dos razones. En primer lugar, los propios satélites transmiten mensajes en un horario predeterminado (temporal). En segundo lugar, el receptor GPS no puede saber cuándo ha viajado una distancia determinada e, incluso si

tabla 1

Información general de ruta

Ruta	No. de arcos	Promedio longitud del arco (km)
1	12	0.1706
2	12	0.2249
3	14	0.1928
4	dieciséis	0,6083

podría, no necesariamente poder determinar su ubicación en ese momento. Por tanto, un algoritmo que no puede funcionar bien en presencia del sesgo espacial no es un buen algoritmo para nuestros propósitos.

Tenga en cuenta también que el receptor GPS no nos proporcionó información satelital sin procesar; dejamos que el receptor GPS realice todo el procesamiento que pueda en el tiempo disponible. De hecho, el receptor "suavizó" las señales de GPS que usamos. Por supuesto, este filtrado introduce un error que preferiríamos evitar. Desafortunadamente, no está claro cómo evitar este tipo de error. En particular, el sistema casi siempre está sub-identificado (es decir, menos de cuatro satélites son visibles) o sobre-identificado (es decir, más de cuatro satélites son visibles). No podemos ignorar todas estas observaciones porque, en la práctica, ocurren con frecuencia (de hecho, a veces durante un viaje completo). Dado que cada método para manejar el problema de identificación introduce errores, optamos por utilizar el esquema de filtrado que Rockwell incorporó a su conjunto de chips.

La Tabla 1 proporciona información sobre las rutas que se utilizaron. Las cuatro rutas tenían entre 12 y 16 arcos, la mayoría de los cuales tenían un límite de velocidad de 25 mph. El límite de velocidad nunca se excedió mientras se recopilaban los datos, pero con frecuencia no se alcanzó debido a que había otros vehículos en la carretera. Las rutas 1, 2 y 3 tienen longitudes de arco medias similares. La ruta 4 tiene una longitud de arco media considerablemente más larga porque incluía algunos enlaces "largos".

5.2. La métrica de evaluación

Para evaluar los algoritmos, calculamos el porcentaje de coincidencias correctas en una ruta determinada. Es decir, cada ubicación estimada se emparejó con un arco en la red. Se consideró que la coincidencia era correcta si ese arco en realidad se estaba atravesando en ese momento y, de lo contrario, se consideró incorrecto. Si bien esta métrica claramente no es ideal, es difícil desarrollar una mejor alternativa porque es muy difícil medir la ubicación "verdadera" de la ANP en cada momento.³

5.3. Resultados

Desafortunadamente, el espacio nos impide presentar mapas de todos los resultados. En cambio, intentaremos resumirlos. Dado el pequeño número y variabilidad limitada de rutas en la prueba de campo,

³ Por supuesto, es posible registrar la verdadera ubicación de la ANP en una pista de prueba cerrada. Desafortunadamente, las únicas pistas de prueba disponibles para nosotros eran pequeñas y tenían topologías simples. Casi todos los algoritmos funcionan bien en pistas de prueba.

han optado por no presentar un análisis estadístico de los datos. De hecho, advertimos que no se saquen conclusiones sólidas de estos resultados.

La Tabla 2 muestra, para cada una de las cuatro rutas planificadas previamente utilizadas en el estudio, el porcentaje de coincidencias correctas logradas por cada algoritmo.

En general, el mejor algoritmo solo coincide correctamente entre el 66% y el 86% de los tics del GPS, sin embargo, esto no es tan malo como podría parecer. Recuerde que se generó un tic de GPS cada segundo. Esto significa que se generan relativamente más marcas cerca de las intersecciones (porque las velocidades siempre son más bajas cerca de las intersecciones y algunas veces son cero) y el problema de coincidencia de mapas es mucho más difícil cerca de las intersecciones, ya que varios arcos están muy cerca de cada intersección. Además, el propio receptor GPS funciona mucho peor cerca de las intersecciones porque la velocidad del vehículo es menor. Por lo tanto, el error en las marcas de GPS es mucho mayor en las intersecciones.

Esto es relativamente fácil de ver en un mapa. La Fig. 10 contiene una parte de los arcos que componen la Ruta 1. En la figura, hay dos conjuntos de puntas de flecha. Las puntas de flecha más claras representan las marcas de GPS y las puntas de flecha más oscuras representan las ubicaciones coincidentes del mapa que fueron producidas por el algoritmo 1. Como puede ver, la mayoría de los problemas ocurren en intersecciones.

Tabla 2

Tasas coincidentes para pares de ruta / algoritmo

Algoritmo	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
1	0,534	0,677	0,618	0,608
2	0,663	0,736	0,855	0,681
3	0,661	0,707	0,858	0,664
4	0,617	0,726	0,771	0,687

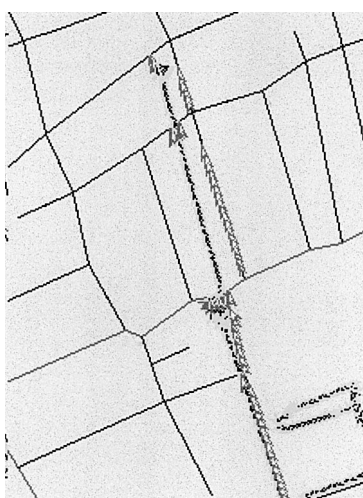


Fig. 10. Resultados coincidentes del algoritmo 1 en una parte de la ruta 1.

Como era de esperar, el algoritmo 1 tiene el peor rendimiento. Por el contrario, el algoritmo 2 funciona razonablemente bien. Curiosamente, el algoritmo 3 no supera al algoritmo 2. Con referencia a las cifras @, el algoritmo 3 logra el mejor rendimiento en la ruta 3 (ligeramente superior al algoritmo 2), el segundo mejor rendimiento en la ruta 1 (un poco menos que el algoritmo 2), y el tercero mejor en las Rutas 2 y 4. El algoritmo más complejo, el algoritmo 4, no supera sistemáticamente al algoritmo 2 ni al algoritmo 3.

Parte de la diferencia en el desempeño se debe claramente al desempeño en las intersecciones. La Fig. 11 muestra los mismos "tics" en la misma porción de la Ruta 1 que en la Fig. 10 excepto que las puntas de flecha más oscuras en esta figura fueron producidas por el Algoritmo 2. Como puede ver, estos dos algoritmos tenían resultados comparables rendimiento lejos de las intersecciones. Sin embargo, debido a que el algoritmo 2 usa información de rumbo, se desempeña mucho mejor cerca de las intersecciones, aunque la información de rumbo a veces es inexacta a velocidades más bajas. Este resultado se mantiene en general.

Estábamos, por decir lo mínimo, decepcionados por el desempeño relativamente pobre de los algoritmos 3 y 4. A pesar de nuestras expectativas, no superaron el algoritmo 2, que es considerablemente más simple.

A continuación, uno se pregunta cuándo los algoritmos funcionaron bien y cuándo funcionaron mal. Consideramos seis factores: la longitud del arco emparejado, la velocidad del PNA, la distancia desde

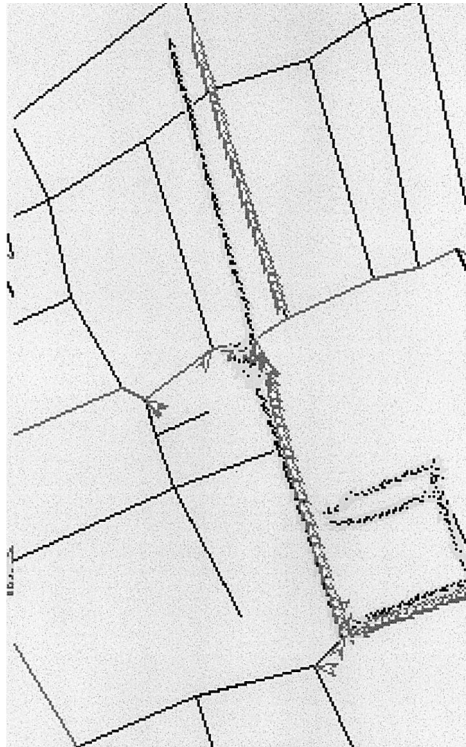


Fig. 11. Resultados coincidentes del algoritmo 2 en una parte de la ruta 1.

Tabla 3

Rendimiento detallado del algoritmo 1 (coincidencia punto a curva)

Algoritmo 1						
Atributo	Partido		Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
Longitud del arco (km)	Correcto	Significar	0,246	0,290	0,268	1.12
		Dakota del Sur	0,074	0,089	0,072	1.12
	Incorrecto	Significar	0,146	0,239	0,191	0.345
		Dakota del Sur	0,098	0,116	0,115	0.375
Velocidad (mph)	Correcto	Significar	21,8	21,5	22,2	32,8
		Dakota del Sur	5.43	5,92	4.69	14,4
	Incorrecto	Significar	15,8	17,8	15,2	32,4
		Dakota del Sur	6.16	7.12	6.16	38,1
Arco más cercano (km)	Correcto	Significar	0,025	0,020	0,021	0,025
		Dakota del Sur	0,019	0,023	0,019	0,022
	Incorrecto	Significar	0,020	0,023	0,020	0,079
		Dakota del Sur	0,013	0,022	0,015	0,096
Siguiente arco más cercano (km)	Correcto	Significar	0,065	0,061	0,069	0,144
		Dakota del Sur	0,027	0,032	0,032	0,087
	Incorrecto	Significar	0,040	0,037	0,039	0,122
		Dakota del Sur	0,019	0,024	0,019	0,107
Correlación en serie	Correcto	Significar	10,3	18,6	12,8	16,7
		Dakota del Sur	2.13	2.02	1,92	4.33
	Incorrecto	Significar	8.18	8,88	7,91	11,5
		Dakota del Sur	3,43	3.12	2,49	3,55
Intersección más cercana (km)	Correcto	Significar	0,073	0,076	0,079	0,173
		Dakota del Sur	0,042	0,047	0,047	0,127
	Incorrecto	Significar	0,040	0,035	0,038	0,063
		Dakota del Sur	0,022	0,025	0,024	0,060

la marca de GPS al arco coincidente, la distancia desde la marca de GPS al siguiente mejor arco, la serie correlación en las marcas de GPS y la distancia desde la marca de GPS a la intersección más cercana. Esta información se resume en las Tablas 3 ± 6.

Como puede ver, es más probable que todos los algoritmos produzcan una coincidencia incorrecta cuando el PNA atraviesa un tramo de carretera relativamente corto. Es casi seguro que esto se deba a que la ANP nunca está lejos de una intersección.

Como era de esperar, todos los algoritmos funcionaron mejor con ticks de GPS " mejores " (es decir, cuando la distancia entre la aproximación de la ubicación y el arco más cercano es relativamente pequeña). Sin embargo, tenga en cuenta que debido a errores en la base de datos del mapa, esto no significa necesariamente que un receptor GPS más preciso (por ejemplo, un receptor DGPS) producirá mejores resultados.

La velocidad también puede influir y puede asociarse con la longitud del arco. De hecho, las coincidencias correctas tienden a ocurrir a mayor velocidad que las coincidencias incorrectas. Esto puede deberse simplemente a que la velocidad media de viaje es mayor en arcos más largos (y, por lo tanto, las lecturas del GPS tienden a ser mejores). Sin embargo, en el caso del algoritmo 4, también puede ser un resultado directo de la inclusión de información topológica. Curiosamente, sin embargo, el algoritmo 4 parece funcionar mal a altas velocidades en la ruta 4.

Cuadro 4

Rendimiento detallado del algoritmo 2 (coincidencia punto a curva complementada con información de rumbo)

Algoritmo 2						
Atributo	Partido		Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
Longitud del arco (km)	Correcto	Significar	0,223	0,284	0,246	0,098
		Dakota del Sur	0,084	0,094	0,097	1,043
	Incorrecto	Significar	0,153	0,246	0,192	0,466
		Dakota del Sur	0,111	0,115	0,094	0,706
Velocidad (mph)	Correcto	Significar	21,2	21,8	20,4	30,9
		Dakota del Sur	5,70	5,62	5,85	11,0
	Incorrecto	Significar	14,7	16,0	14,3	36,5
		Dakota del Sur	5,79	7,08	6,21	43,6
Arco más cercano (km)	Correcto	Significar	0,030	0,023	0,028	0,032
		Dakota del Sur	0,020	0,024	0,022	0,032
	Incorrecto	Significar	0,048	0,042	0,050	0,175
		Dakota del Sur	0,073	0,061	0,072	0,197
Siguiente arco más cercano (km)	Correcto	Significar	0,073	0,066	0,072	0,186
		Dakota del Sur	0,031	0,035	0,028	0,143
	Incorrecto	Significar	0,093	0,066	0,070	0,259
		Dakota del Sur	0,10	0,081	0,099	0,23
Correlación en serie	Correcto	Significar	10,7	12,5	16,3	20,0
		Dakota del Sur	1,91	2,86	3,52	3,90
	Incorrecto	Significar	5,00	4,46	2,75	9,36
		Dakota del Sur	3,04	1,65	0,94	3,48
Intersección más cercana (km)	Correcto	Significar	0,065	0,076	0,063	0,145
		Dakota del Sur	0,044	0,048	0,049	0,116
	Incorrecto	Significar	0,054	0,047	0,038	0,094
		Dakota del Sur	0,076	0,064	0,072	0,147

6. Conclusiones e investigaciones futuras

En este artículo, hemos descrito varios algoritmos (o partes de algoritmos) para hacer coincidir una posición estimada con una representación de red del sistema de calles y hemos intentado evaluar cuatro de ellos. Obviamente, se necesita hacer más trabajo.

En primer lugar, se debe prestar más atención a cómo se pueden comparar empíricamente diferentes algoritmos. Este es un problema particularmente espinoso porque es bastante difícil medir la "posición real" fuera de un laboratorio o pista de prueba. Además, no está claro de inmediato qué medidas de desempeño son las más apropiadas o qué escenarios deben evaluarse. En un sentido abstracto, está claro que nos gustaría que el algoritmo funcionara perfectamente cuando los errores llegaran a cero, pero no está del todo claro qué significa eso en la práctica.

En segundo lugar, es necesario evaluar una variedad más amplia de algoritmos. Se debe prestar especial atención a los problemas que surgen en las intersecciones. Si bien hay muchas cosas que se pueden probar (incluido apagar el algoritmo cuando las velocidades son muy bajas), no es inmediatamente obvio qué enfoque funcionará mejor. Además, se puede argumentar que las intersecciones son la parte más importante de la red, ya que la mayoría de los cambios de ruta ocurren en las intersecciones. Actualmente estamos en el

Cuadro 5

Rendimiento detallado del algoritmo 3 (coincidencia punto a curva complementada con información de rumbo y conexión actividad)

Algoritmo 3						
Atributo	Partido		Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
Longitud del arco (km)	Correcto	Significar	0,219	0,279	0,250	0,942
		Dakota del Sur	0,082	0,092	0,098	1,02
	Incorrecto	Significar	0,163	0,267	0,177	0,569
		Dakota del Sur	0,117	0,117	0,073	0,846
Velocidad (mph)	Correcto	Significar	21,2	21,3	20,1	31,1
		Dakota del Sur	5,78	5,84	5,97	11,1
	Incorrecto	Significar	15,6	18,4	16,6	35,7
		Dakota del Sur	5,78	7,60	7,00	42,6
Arco más cercano (km)	Correcto	Significar	0,029	0,019	0,029	0,033
		Dakota del Sur	0,020	0,021	0,023	0,033
	Incorrecto	Significar	0,035	0,058	0,051	0,158
		Dakota del Sur	0,032	0,062	0,066	0,178
Siguiente arco más cercano (km)	Correcto	Significar	0,106	0,116	0,119	0,639
		Dakota del Sur	0,059	0,084	0,059	0,633
	Incorrecto	Significar	0,079	0,105	0,098	0,258
		Dakota del Sur	0,053	0,104	0,105	0,217
Correlación en serie	Correcto	Significar	10,3	16,9	19,3	22,8
		Dakota del Sur	1,81	2,69	3,35	3,33
	Incorrecto	Significar	4,85	7,00	3,20	12,5
		Dakota del Sur	3,01	2,75	2,46	3,45
Intersección más cercana (km)	Correcto	Significar	0,061	0,071	0,059	0,288
		Dakota del Sur	0,04	0,046	0,045	0,385
	Incorrecto	Significar	0,033	0,044	0,019	0,084
		Dakota del Sur	0,039	0,059	0,056	0,140

proceso de desarrollo y probar tanto algoritmos estadísticos como algoritmos basados en búsquedas que hacer uso de información adicional (por ejemplo, velocidades y límites de velocidad, preferencias para giros de diferentes tipos y clasificación de carreteras).

En tercer lugar, aún no sabemos si estos resultados serán válidos para otros esquemas de filtrado. Es posible que, en la práctica, sea necesario utilizar diferentes algoritmos de correspondencia de mapas con diferentes tipos de esquemas de filtrado (y, por lo tanto, hardware). Esto requiere más estudio.

En cuarto lugar, los algoritmos deben evaluarse en una gama más amplia de rutas. Nuestra discusión aquí se centró en las rutas dentro de la ciudad en lugar de en las rutas de las carreteras porque la mayoría de los algoritmos funcionan bien en las carreteras. Sin embargo, se deberían considerar más rutas dentro de la ciudad. Además, es importante considerar recorridos verdaderamente urbanos por los problemas que surgen en los "cañones urbanos". También es importante considerar el impacto de las condiciones climáticas, la estación (es decir, la cantidad de follaje que bloquea la vista del cielo), la hora del día y otros factores. El número limitado y la variedad de rutas aquí consideradas obviamente nos impiden sacar conclusiones reales.

Finalmente, es necesario trabajar más en las formas en que los errores en la correspondencia de mapas influyen en el desempeño general del ANP. En algunas situaciones, las direcciones no cambian mucho como resultado

Tabla 6
Rendimiento detallado del algoritmo 4 (coincidencia curva a curva)

Algoritmo 4						
Atributo	Partido		Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
Longitud del arco (km)	Correcto	Significar	0,233	0,288	0,250	1.04
		Dakota del Sur	0.081	0.087	0,094	1.08
	Incorrecto	Significar	0,147	0,238	0,199	0.347
		Dakota del Sur	0.106	0,124	0.104	0,416
Velocidad (mph)	Correcto	Significar	21,4	21,2	21,0	31,5
		Dakota del Sur	5.30	6.12	5,64	10,7
	Incorrecto	Significar	16,0	19,2	15,8	36,0
		Dakota del Sur	6.19	6.51	5.78	44,3
Arco más cercano (km)	Correcto	Significar	0,03	0.021	0,028	0,031
		Dakota del Sur	0.022	0.022	0.022	0,031
	Incorrecto	Significar	0,035	0,037	0.051	0,166
		Dakota del Sur	0,028	0,027	0,058	0,153
Siguiendo arco más cercano (km)	Correcto	Significar	0,00	0,00	0,00	0,00
		Dakota del Sur	0,00	0,00	0,00	0,00
	Incorrecto	Significar	0,00	0,00	0,00	0,00
		Dakota del Sur	0,00	0,00	0,00	0,00
Correlación en serie	Correcto	Significar	9,67	15,6	10,8	21,5
		Dakota del Sur	2.14	3,17	2,58	4.48
	Incorrecto	Significar	5.54	5.9	3,19	9,77
		Dakota del Sur	2,78	2,25	1,10	4,00
Intersección más cercana (km)	Correcto	Significar	0,067	0,076	0,065	0,289
		Dakota del Sur	0,045	0,048	0,046	0.379
	Incorrecto	Significar	0,027	0,027	0,036	0,125
		Dakota del Sur	0,037	0,03	0,063	0,153

de pequeños errores en la ubicación coincidente del mapa. En otros casos, las direcciones cambian drásticamente. Por lo tanto, es necesario trabajar tanto en algoritmos de búsqueda de rutas más robustos como en la variación del algoritmo de correspondencia de mapas en diferentes situaciones.

Agradecimientos

Esta investigación fue patrocinada por el Centro de Información de Transporte e Ingeniería de Decisiones de Nueva Jersey (www.njtide.org) y la Comisión de Ciencia y Tecnología de Nueva Jersey. Los autores desean agradecer a los árbitros anónimos por sus útiles comentarios sobre un borrador anterior de este documento.

Referencias

Abousalem, MA, Krakiwsky, EJ, 1993. Un enfoque de control de calidad para la ubicación automática de vehículos basada en GPS y sistemas de navegación. En: Actas de la Conferencia sobre sistemas de información y navegación de vehículos, págs. 466 ± 470.

- Bentley, JL, Maurer, HA, 1980. Estructuras de datos eficientes en el peor de los casos para la búsqueda de rangos. *Acta Inf.* 13, 155 ± 168.
- Blackwell, EG, 1986. Descripción general de métodos GPS diferenciales. *Sistema de posicionamiento global*. 3, 89 ± 100.
- Collier, WC, 1990. Sistemas de guía de ruta en vehículos que utilizan mapas a estima. En: *Actas de IEEE Simposio sobre ubicación y navegación*, págs. 359 ± 363.
- Degawa, H., 1992. Un nuevo sistema de navegación con múltiples fuentes de información. En: *Actas del vehículo Conferencia sobre sistemas de información y navegación*, págs. 143 ± 149.
- Deretsky, Z., U. Rodny, 1993. Con tation automático de mapas digitales: cómo manejar datos incomparables. En: *Actas de la Conferencia sobre sistemas de información y navegación para vehículos*, págs. A27 ± A29.
- Fuchs, H., Kedem, ZM, Naylor, BF, 1980. Sobre la generación de superficies visibles mediante estructuras arbóreas a priori. *Computación. Gráficos* 14, 124 ± 133.
- Hofmann-Wellenho ??, B., Lichtenegger, H., Collins, J., 1994. *GPS: Teoría y práctica*. Springer, Berlín.
- Iwaki, F., Kakihari, M., Sasaki, M., 1989. Reconocimiento de la ubicación del vehículo para la navegación. En: *Actas del Conferencia sobre sistemas de información y navegación de vehículos*, págs. 131 ± 138.
- Jo, T., Haseyamai, M., Kitajima, H., 1996. Un método de correspondencia de mapas con la innovación de la filtración Kalman®. *IEICE Trans. Fondo. Electrón. Comm. Computación. Sci.* E79-A, 1853 ± 1855.
- Kim, J.-S., 1996. Algoritmo de correspondencia de mapas basado en nodos para sistemas de navegación de automóviles. En: *Proceedings of the International Simposio sobre tecnología y automatización automotriz*, págs. 121 ± 126.
- Krakiwsky, EJ, Harris, CB, Wong, RVC, 1988. Un filtro de Kalman® para integrar la navegación a estima, mapa coincidencia y posicionamiento GPS. En: *Actas del Simposio de ubicación y navegación de IEEE*, págs. 39 ± 46.
- Mattos, PG, 1994. GPS integrado y navegación a estima para la navegación y el seguimiento de vehículos de bajo costo. En: *Actas de la Conferencia sobre sistemas de información y navegación de vehículos*, págs. 569 ± 574.
- Scott, CA, Drane, CR, 1994. Mayor precisión en la estimación de la posición de los vehículos de motor mediante la utilización de datos de mapas, vehículos dinámica y otras fuentes de información. En: *Actas de la Conferencia sobre sistemas de información y navegación de vehículos*, págs. 585 ± 590.
- Schi ??, TH, 1993. Fuentes de datos y métodos de consolidación para crear, mejorar y mantener la navegación bases de datos, en: *Actas de la Conferencia sobre sistemas de información y navegación de vehículos*, págs. 3 ± 7.
- Shibata, M., 1994. Actualización de hoja de ruta digital. En: *Actas de los sistemas de información y navegación de vehículos Conferencia*, págs. 547 ± 550.
- Tanaka, J., 1990. Sistema de navegación con método de correspondencia de mapas. En: *Actas del Congreso Internacional SAE y Exposición*, págs. 45 ± 50.
- Watanabe, K., Kobayashi, K., Munekata, F., 1994. Fusión de sensores múltiples para sistemas de navegación. En: *Actas de la Conferencia sobre sistemas de información y navegación de vehículos*, págs. 575 ± 578.