

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 646 915**

51 Int. Cl.:

G06K 9/00	(2006.01)
G06K 9/44	(2006.01)
B64D 47/08	(2006.01)
G06K 9/46	(2006.01)
G08G 5/00	(2006.01)
G06K 9/62	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.11.2013 PCT/GB2013/052961**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.05.2014 WO14072737**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.11.2013 E 13789895 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.09.2017 EP 2917874**

54 Título: **Detección de características de las nubes**

30 Prioridad:

12.11.2012 GB 201220316
12.11.2012 EP 12275171

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.12.2017

73 Titular/es:

BAE SYSTEMS PLC (100.0%)
6 Carlton Gardens
London SW1Y 5AD, GB

72 Inventor/es:

BUCHANAN, RODERICK y
REVELL, JAMES DUNCAN

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 646 915 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Detección de características de las nubes.

Campo de la invención

La presente invención está relacionada con la detección de características de las nubes.

5 Antecedentes

En situaciones tales como el control autónomo de aeronaves puede ser deseable detectar características de las nubes de forma automática sin tener que depender de la vista o aporte humano. Un sistema que detecta las características de las nubes se puede combinar con un planificador de ruta o similar para ayudar a una aeronave a evitar el mal clima u otras aeronaves u objetos que puedan estar ocultos en las nubes. Además, es difícil obtener información de telemetría relacionada con las características de las nubes debido al movimiento de las nubes y a la típicamente pequeña línea de base de triangulación. El documento "EO/IR Due Regard Capability for UAS Based on Intelligent Cloud Detection and Avoidance" por Hieu Nguyen et al, AIAA Infotech at Aerospace, 22 de abril de 2010 (2010-04-22), XP008161698, Atlanta, Georgia, US DOI: 10.2514/6.2010-3338, ISBN: 978-1-60086-743-9, describe un método para detectar características de las nubes según el estado de la técnica.

15 Compendio de la invención

Según un primer aspecto, la presente invención provee un método para detectar características de las nubes según la reivindicación 1. Según un aspecto adicional, la presente invención provee un aparato para detectar características de las nubes según la reivindicación 16. Según un aspecto adicional, la presente invención provee una aeronave (p.ej. una aeronave autónoma o no tripulada) que comprende un aparato según el aspecto anterior.

20 Según un aspecto adicional, la presente invención provee un programa o una pluralidad de programas instalados según la reivindicación 18. Según un aspecto adicional, la presente invención provee un medio de almacenamiento legible por ordenador según la reivindicación 19. Los aspectos de la invención están destinados a solucionar al menos algunos de los problemas mencionados anteriormente. Los aspectos de la presente invención pueden realizar segmentación y clasificación de escenas para determinar las regiones donde hay nubes, suponiendo típicamente que solo hay cielo y nubes en la imagen por encima del horizonte y solo nubes y superficie/suelo por debajo. Como el cielo y las nubes pueden tener colores muy parecidos, los aspectos de la presente invención pueden utilizar información basada en texturas y gradientes para separar el cielo de las nubes. Así se puede mantener un modelo basado en colores en base a la apariencia de la nube observada por encima del horizonte, y se podrá utilizar para clasificar lo observado por debajo del horizonte. Este planteamiento puede ser relativamente rápido y obtiene resultados razonables en una serie de escenarios y condiciones lumínicas.

25 Se pueden generar estimaciones de telemetría por medio de realizaciones de la invención que utilizan uno o dos métodos complementarios para localizar características. El primero se puede basar en las divergencias del flujo óptico en el ámbito local, y se obtiene midiendo la expansión de los características de una imagen local a través del tiempo. El segundo método puede utilizar la velocidad y la dirección actual del viento, que se obtiene por medio de los sensores atmosféricos de la aeronave. Esto permite inferir el movimiento de las nubes en altitudes similares, y hace posible estimar la telemetría de una característica en movimiento en base a técnicas de triangulación.

35 Si bien en la presente se describen en detalle realizaciones ilustrativas de la invención en referencia a los dibujos que la acompañan, se ha de comprender que la presente invención no está limitada por estas realizaciones precisas.

40 Más aún, se contempla que una característica particular descrita tanto de forma individual o como parte de una realización se puede combinar con otras características descritas de forma individual, o con partes de otras realizaciones, incluso si las otras características y realizaciones no hacen mención a dicha característica particular.

Breve descripción de los dibujos

45 La invención se puede llevar a cabo de varias formas, y, solo a modo de ejemplo, se describen a continuación las realizaciones de la invención en referencia a los dibujos que las acompañan, donde:

La figura 1 es un diagrama de bloque de una realización con conexión del sistema de detección de características de las nubes;

La figura 2 es un diagrama de bloque de una realización sin conexión del sistema de detección de características de las nubes;

50 La figura 3 es un ejemplo de una visualización en pantalla producida por una realización del sistema;

La figura 4 es un diagrama de flujo que muestra las etapas que se llevan a cabo en la realización;

ES 2 646 915 T3

La figura 5 muestra un ejemplo de una malla utilizada en la realización;

La figura 6 muestra un cálculo geométrico llevado a cabo en la realización; y

La figura 7 muestra un cálculo de viento transversal utilizado en algunas realizaciones.

Descripción detallada

5 Las realizaciones del sistema son capaces de operar en modos con conexión o sin conexión. Los diagramas del sistema para estos modos de operación se muestran en las figuras 1 y 2, respectivamente. Normalmente, las realizaciones del sistema que operan en el modo con conexión incluyen componentes en base a una aeronave, que pueden ser al menos parcialmente autónoma. El sistema 101 incluye un dispositivo informático 100, que incluye un procesador y una memoria configurados con un código que ejecuta los métodos como se describen en la presente memoria. Se pueden crear las realizaciones del sistema en MATLAB™, utilizando herramientas disponibles en el mercado para la adquisición de datos de vídeo y para las entradas/salidas de UDP (protocolo de datagrama de usuario). El dispositivo informático puede recibir entradas de datos de fuentes de datos o de dispositivos a través de enlaces de comunicación por cable o inalámbricos. El sistema puede recibir como entradas de datos los datos de navegación y de vídeo de la plataforma, tanto de un archivo de registro (en el modo sin conexión) o directamente a través de una interfaz de red (en el modo con conexión). Se puede apreciar que la disposición de los componentes que se muestran en las figuras es solo a nivel de ejemplo, y que las funciones realizadas por varios de los componentes se pueden integrar o distribuir de forma distinta.

20 En la realización con conexión de la figura 1, el dispositivo informático 100 recibe como entrada de datos una imagen de un dispositivo de cámara 102, así como datos de navegación (p. ej. en el conocido formato UDP) de una aplicación de interfaz SOI 104 opcional, que comprende software de comunicación de soporte intermedio utilizado para enviar y recibir datos entre sistemas. Los datos de navegación pueden incluir datos de latitud, longitud, altitud, barrido, inclinación, alabeo y de tasas al menos en relación a la aeronave en el momento en el que se capturan los datos de imagen.

25 La aplicación 104 recibe los datos de un fichero de registro de navegación 106 (en el conocido formato de datos .csv). La cámara 102 es típicamente una cámara de vídeo, pero puede ser por lo general cualquier dispositivo capaz de producir una secuencia de datos basados en imágenes de cualquier manera apropiada y en cualquier formato de datos. En la realización sin conexión de la figura 2, el dispositivo informático 100 recibe entradas de datos de una fuente de datos 202 en el formato de un fichero de registro de navegación y vídeo (en el conocido formato de datos .ice, en el ejemplo).

30 El sistema puede proveer datos en el formato de un tipo de datos de nubes personalizados, que puede ser en la forma de una malla gruesa no uniforme sobre la imagen. A continuación se muestra un ejemplo de datos:

Nombre del campo	Tipo:	Descripción
tipo_nube		
marcadetiempo	uint64	Nanosegundos desde 1970
etiqueta_validez	int32	Validación (0 = nulo, 1 = normal, 2 = prueba, 3 = sin datos)
número_de_elementos_nube	int32	Número de celdas en la malla en los elementos_nube
elementos_nube	tipos_disposición_celda_nube (typedef tipo_celda_nube [20])	
tipo_celda_nube		
número-celdas	int32	
clasificación_nubes	float32	Fracción de la celda clasificada como nube

Nombre del campo	Tipo:	Descripción
tipo_nube		
validez_telemetría	int32	Comprueba si se ha calculado correctamente la telemetría estimada de las nubes en esta celda.
telemetría	float32	Telemetría media estimada de las nubes en esta celda (metros)
desv_estandar_telem	float32	Desviación estándar estimada de la telemetría media de las nubes en esta celda (metros)
azimut_centroide_celda	float32	Ángulo (en rad) del centroide de la celda medido en el plano horizontal desde el norte (positivo en la dirección de la agujas del reloj)
elevación_centroide_celda	float32	Ángulo (en rad) del centroide de la celda sobre el plano horizontal (positivo hacia arriba)

5 En algunas realizaciones, cada celda en la malla/red tendrá una clasificación (la fracción de nube que llena esa celda) y contendrá información de la telemetría obtenida de las características de las nubes localizadas. Si no se ha podido determinar la información de telemetría, se pondrá una bandera de invalidado para esa celda. Además de la red, también se incluirá una bandera binaria que representa si existen características bien localizadas sobre la superficie de la tierra, que indica si la superficie es visible. Se definirá la estructura de la malla en el fichero de configuración del sistema.

10 Para las operaciones con conexión, se podrán enviar estas salidas de datos por medio de UPD, mientras que para las operaciones sin conexión, simplemente se podrán mostrar y/o comparar estos datos con la verificación en tierra 204 (información verificada por humanos en relación a la posición real de las nubes). En las operaciones sin conexión, no se utilizará el fichero de registro de navegación externo y, en cambio, se utilizarán los datos de navegación obtenidos del archivo de registro .ice. En las dos realizaciones de las figuras 1 y 2, el dispositivo informático 104 está conectado a un dispositivo de visualización 108. El dispositivo de visualización se podrá utilizar para mostrar una visualización similar a la de la figura 3, que provee información sobre las posiciones de las nubes detectadas. Un piloto o navegador a bordo de la aeronave podrá utilizar esta información en la realización con conexión de la figura 1 como ayuda para volar la aeronave. Como se muestra en la figura 3, las áreas de nubes detectadas se pueden mostrar como regiones transparentes 301 (rojas); las regiones de características localizadas de telemetrías de menos de 10 km serán puntos 302 (azules), con las telemetrías estimadas asociadas dadas en metros (porcentaje de error estimado provisto entre paréntesis); la línea del horizonte 303 se muestra como una línea continua (gris); los límites de más/menos cuatro grados se muestran como líneas discontinuas 304 (grises). Se puede apreciar que las técnicas de presentación de información descritas son solo a modo de ejemplo, y que puede haber muchas otras posibles, p. ej., no es necesario superponer la información de las características de las nubes sobre una imagen real, y podría ser, en cambio, una vista en planta que muestre las aproximaciones gráficas de las características de las nubes con respecto a una representación gráfica de la aeronave.

25 La figura 4 muestra un proceso de desarrollo de una realización del sistema de detección y seguimiento 101 que incluye un módulo de detección de aeronaves, además del sistema de detección de características de las nubes. El sistema de detección de aeronaves es opcional/por separado, y no se describe en detalle en la presente memoria. Los módulos centrales (etapas 402, 404, 406) son comunes para aeronaves y para la detección de nubes, mientras que los módulos en la parte derecha (408, 409, 410) se utilizan solo para la detección de nubes. Un experto en la técnica puede apreciar que estas etapas son solo a modo de ejemplo, y que se pueden omitir y/o reordenar en realizaciones alternativas de la invención. Asimismo, el método se puede implementar utilizando cualquier hardware, lenguaje de programación y estructura de datos adecuados.

35 Como se explica arriba, el sistema 101 recibe los datos 401 de vídeo y de navegación como entradas de datos, que están disponible tanto como datos Live (en vivo) o datos Logged (registrados). En algunas realizaciones, la cámara 102 toma y envía imágenes de 5 megapíxeles a una tasa de 15Hz. Los datos de navegación se pueden enviar a una tasa de 50Hz. Los ficheros de registro contienen datos capturados a tasas similares. En realizaciones con conexión, la cámara transmite los datos de vídeo en vivo con el protocolo de visión GiGE, y se puede adquirir por medio del Matlab Image Acquisition Toolbox. Los datos de navegación se pueden transmitir a través de una interfaz UPD y se pueden adquirir con el Matlab Image Acquisition Toolbox. Para las realizaciones sin conexión, la principal fuente de

datos registrados puede ser un fichero de registro .ice que contiene datos de vídeo y de navegación. Estas fuentes de datos se pueden introducir al mismo tiempo y pueden tener un margen de error de sincronización de hasta 5ms. En realizaciones alternativas, se pueden añadir formatos de archivo de vídeo (p. ej. mp4) y/o el formato de archivo de registro Nav (p.ej., .csv).

5 La entrada de datos 401 se procesa por medio de una etapa de adquisición y sincronización de datos 402. Como parte del proceso de sincronización de datos, cuando se combinan fuentes múltiples de datos (que pueden operar a tasas distintas), es preferible presentar un paquete de datos sincronizado. Éste contiene los paquetes de datos adecuados que están mejor alineados unos con otros en cuanto a tiempo. La construcción de este paquete se activa cuando se reciben nuevos fotogramas de vídeo. Puede haber tres modos operacionales en los que la interpretación del tiempo difiere: la operación en vivo, la reproducción en vivo de datos registrados, y la reproducción independiente.

- El modo de operación en vivo corresponde a operar con conexión, y el sistema adquiere datos tan rápido como puede procesarlos. El sistema no almacenará en memoria temporal los datos que no pueda procesar, y los descartará.

15 - En el modo de reproducción en vivo de datos registrados, los datos se reproducirán en las tasas a las que se capturaron. Hay una relación de uno a uno entre el tiempo simulado del sistema y el tiempo real. Si los componentes algorítmicos del sistema tardan demasiado tiempo en operar, los datos que se hubieran reproducido durante ese tiempo se descartarán y no se procesarán. Se puede utilizar este modo para analizar el rendimiento que puede alcanzar un sistema en vivo.

20 - En el modo de reproducción independiente, los datos se reproducirán a una tasa diferente (variable) de la que se capturaron. Esto permite al sistema procesar todos los datos o una fracción específica, según se desee. Las realizaciones sin conexión típicamente operan de este modo.

En la etapa 402, el sistema 101 ejecuta una etapa 404 de segmentación y clasificación de imagen. Eso puede involucrar uniformizar la imagen, extraer el horizonte y segmentar la imagen para detectar regiones del cielo, las nubes y la superficie. La parte de la etapa que incluye uniformizar y hacer un muestreo descendente de la imagen hace uniforme el ruido de las imágenes de alta resolución para producir imágenes más uniformes en resoluciones más bajas. Típicamente, se utiliza un factor de 1/4 o 1/6 y se promedian los píxeles para formar la imagen más pequeña. La parte de la etapa que incluye la extracción del horizonte calcula la posición del horizonte, p. ej., a partir de la posición global conocida del sensor a bordo de la aeronave, y la proyecta en la imagen. Esto permite separar dos regiones de la imagen antes de intentar clasificar la escena. En la parte de la etapa que incluye la segmentación y clasificación de la escena, se puede segmentar cada imagen en cielo, nubes y superficie. Esto se lleva cabo suponiendo que solo existen el cielo y las nubes en la imagen por encima del horizonte, y que solo existen nubes y superficie por debajo del horizonte. Como puede parecer que el cielo y las nubes tienen colores muy similares, se utiliza información basada en texturas y gradientes para separar el cielo de las nubes. Se determina entonces un modelo de identificación en base a la apariencia de las nubes que se observan por encima del horizonte. En esta realización, el modelo de identificación es un modelo basado en colores como se describe luego en más detalle en referencia a la figura 6. Este modelo de colores luego se usa para clasificar las características por debajo del horizonte como nubes. Este planteamiento suele ser relativamente rápido comparado con técnicas convencionales. Asimismo, a medida que cambian los colores/la apariencia de las nubes dependiendo de las condiciones lumínicas, la hora del día, las condiciones climáticas/medioambientales, etc., al utilizar características por encima del horizonte que se identifican como nubes para determinar un modelo de colores para identificar las nubes por debajo del horizonte, el método descrito en la presente memoria suele ser muy ventajoso en una variedad de escenarios y condiciones lumínicas.

En la etapa 406 se ejecuta una etapa de detección y seguimiento de características, donde se extraen, asocian y se siguen las características de una imagen a lo largo del tiempo utilizando la información de navegación para formar seguimientos a través del plano de la imagen. La parte de esta etapa de extracción de características detecta las características visibles más prominentes en las versiones de las imágenes en escalas de grises. Un algoritmo de detección busca en escalas múltiples y extrae partes de imágenes que contienen la textura y los picos de intensidad locales. Se descartan las otras características que se encuentren en una región que se haya clasificado antes como cielo. Se mantienen todas las otras características. En la parte de la etapa de la asociación de características, se asocian características de la imagen en fotogramas múltiples utilizando los datos de navegación para realizar una búsqueda local de un área similar en base a técnicas estándar de procesamiento de imágenes. El uso de datos de navegación hace posible que haya desplazamientos angulares y de posición relativamente amplios entre distintos fotogramas, al mismo tiempo que mantiene una asociación de características fiable. Esto permite al sistema operar a una tasa de fotograma más baja sin disminuir el rendimiento de manera significativa. En la parte de la etapa de seguimiento de características, se utilizan las asociaciones entre características para producir seguimientos temporales del movimiento de las características a través del espacio de la imagen. Esto hace posible seleccionar características fiables para procesarlas en más detalle. En este punto, los seguimientos pueden ser de características ubicados en frentes de nubes o en la superficie del suelo. Algunas realizaciones de la invención pueden identificar solo características de nubes en la región que está por encima del horizonte para reducir el procesamiento.

En la etapa 408 se ejecuta un proceso de localización y telemetría. Suele resultar difícil obtener información de telemetría sobre características de las nubes debido al movimiento de las nubes y a la típicamente pequeña línea de base de triangulación. Esta etapa puede emplear uno de dos métodos de localización de características. El primero se basa en divergencias del flujo óptico en el ámbito local (ver, por ejemplo, Y. Barniv, "Passive Ranging Using Image Expansion", IEEE Trans.) Aerospace and Electronic Systems Vol. 31, No. 1 1995 y C. Raju, S. Zabuawala, S. Krishna & J. Yadegar, "A Hybrid System for Information Fusion with Application to Passive Ranging", In Proc. Int. Conf. on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition, 2007) y se obtiene midiendo las escalas y convirtiendo una región de características anterior en una posterior. Cuanto mayor sea el cambio de escalas, más grande será la característica y más cerca se encontrará el objeto.

5 El segundo método utiliza una opción de configuración introducida por el usuario que especifica la velocidad y la dirección actuales del viento (que se obtienen por medio de los sensores atmosféricos de la aeronave). La velocidad del viento se utiliza como una entrada de datos cuando no se puede observar la telemetría de una característica que se mueve en el mismo plano que un sensor en movimiento que solo detecta orientación (p. ej., la nube está a la misma altitud que la aeronave) (ver S. Avidan & A. Shashua, "Trajectory Triangulation of Lines: Reconstruction of a 3D Point Moving Along a Line from a Monocular Image Sequence", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000). Para determinar si la superficie del suelo es visible y si los objetos sobre ella se pueden discernir, se realiza una comprobación de cualquier característica visible prominente que esté bien localizada y a una altitud cercana al nivel de la tierra/el mar.

10 La salida de datos del tipo de nubes 410 que produce la etapa 408 puede comprender una malla gruesa no uniforme sobre la imagen. Cada celda en la red puede tener una clasificación (la fracción de la celda clasificada como nube) y contener información de telemetría obtenida de las características de nubes localizadas. Además de la red, también podrá incluir una bandera binaria que representa si existen características bien localizadas sobre la superficie de la tierra, que indica si la superficie es visible. La figura 5 muestra un ejemplo de una malla. En la figura 5, la malla es más densa en áreas de la imagen que tienen la misma altitud que la aeronave cuando está volando recto y horizontal.

15 Debajo se ofrece una descripción detallada de las técnicas y los fundamentos matemáticos de las etapas realizadas por el sistema 101, con referencia las figuras 6 en adelante. Un experto en la técnica podrá apreciar que es posible implementar realizaciones del método en base a las ecuaciones y cálculos dados a continuación o a cualquier equivalente matemático.

20 Se calibra la cámara 102 montada en la aeronave como parte del modelo de sistema. Los datos intrínsecos de calibración especifican los parámetros internos de la cámara para instanciar un modelo de cámara estenopeica realista. Este modelo mapea un punto en el marco local de la cámara $c = [c_x, c_y, c_z]^T$ a un punto de la imagen $u = [u_x, u_y, 1]^T$ a través de la transformación no lineal

$$(1) \quad u = Mc'$$

25 donde $c' = [c_x/c_z, c_y/c_z, 1]^T$ y la matriz intrínseca M de la cámara se construyen a partir de la distancia focal, la relación de aspecto focal, y las coordenadas de imagen en el eje óptico. El sistema de coordenadas locales de la cámara se define con "z" en el eje óptico, "y" apuntando hacia arriba, "x" hacia la izquierda y el origen como el punto focal. La coordenada "z" de un punto se referirá a menudo como la profundidad del punto. Los ejes de coordenadas de la imagen se originan en el píxel de arriba a la izquierda en la imagen y "x" positivo hacia la derecha e "y" positivo hacia abajo. El mapeo (1) se puede invertir si se conoce la profundidad del punto.

$$(2) \quad c = c_z M^{-1} u$$

30 Las pruebas han demostrado que las distorsiones de lente, que pueden causar que las ubicaciones reales del píxel difieran de las que predice la ecuación (1), son pequeñas en comparación con los errores que introducen los parámetros extrínsecos, y no se han incorporado al sistema. Si en el futuro se desea incorporar el modelo de distorsión de lente al sistema, se puede llevar a cabo una etapa de rectificación de imagen antes de realizar todas las otras operaciones, sin realizar ningún otra modificación.

35 De igual manera, se puede realizar una estimación de la ubicación y la rotación de la cámara en la aeronave con respecto a las plataformas del sistema de navegación inercial (INS) para la calibración extrínseca. Esto permite definir un vector de traslación T_a y una matriz de rotación R_a que mapean un punto en el marco local de la aeronave $a = [a_x, a_y, a_z]^T$ al marco local de la cámara c

$$(3) \quad C = R_a (a - T_a)$$

40 El vector de traslación se construye a partir de la ubicación de la cámara con respecto del marco de coordenadas de INS $T = [T_x, T_y, T_z]^T$, mientras que la matriz de rotación se construye a partir de las rotaciones necesarias alrededor de los ejes x, y, z, para transformar el sistema de ejes de INS en los de la cámara, y se puede construir utilizando los componentes de la matriz individual de rotación $R_a = R_x(\theta_x)R_y(\theta_y)R_z(\theta_z)$. En la presente memoria, el origen del sistema de coordenadas de la aeronave se centra en la antena de INS y tiene el eje "x" apuntando hacia adelante a

lo largo del eje de la aeronave, mientras que el eje "y" apunta hacia fuera sobre el ala derecha y el eje "z" apunta hacia abajo a través del suelo de la aeronave.

Se realiza una operación similar para desarrollar un mapeo a partir de un sistema de coordenadas mundiales al marco de la aeronave. El sistema de coordenadas mundiales en uso actualmente es UTM y supone que el viaje tiene lugar dentro de una sola zona. El sistema de ejes define el norte como el eje "x", el este como el eje "y", y abajo como el eje "z". Se puede construir un vector de traslación T_w y una matriz de rotación R_w a partir de la latitud, longitud, altitud, alabeo, cabeceo y guiñada de la aeronave, y se puede utilizar para mapear un punto en el mundo $w = [w_x, w_y, w_z]^T$ a un punto en el marco de la aeronave a

$$(4) \quad a = R_w (w - T_w)$$

Este permite construir un solo componente de traslación y rotación para la cámara que encapsula la solución INS y la compensación del montaje de la cámara,

$$(5) \quad \begin{aligned} c &= R_c (R_w (w - T_w) - T_c) \\ &= R (w - T) \end{aligned}$$

donde $R = R_c R_w$ y $T = T_w - R_w^{-1} T_c$.

Para realizar la detección de nubes (parte de la etapa 404 de la figura 4), primero se divide la imagen al proyectar la ubicación del horizonte sobre la imagen utilizando la ubicación y rotación estimadas de la cámara a partir de la información de calibración extrínseca y de la solución INS. Esto permite extraer dos regiones que corresponden a las regiones por encima y por debajo del horizonte. Se han estudiado varias técnicas de clasificación para clasificar estas dos regiones en cielo, nubes y superficie utilizando una variedad de imágenes de características con información de textura y color, y los inventores han hecho una selección en base a la velocidad y el rendimiento de la clasificación. Esto utiliza un modelo de dominio específico calibrado para extraer el cielo, y un modelo de nubes aprendido y refinado en línea a partir de las áreas restantes que no son cielo y están por encima del horizonte (nubes). Luego se utiliza este modelo para clasificar la región por debajo del horizonte para determinar otras áreas donde hay nubes. Este método no intenta modelar la apariencia del suelo, que puede variar en gran medida.

Para segmentar y clasificar el cielo (también parte de la etapa 404), las propiedades de lo azul y uniforme del cielo se pueden aprovechar para clasificar la región por encima del horizonte de la manera siguiente.

En primer lugar, se pueden identificar o extraer las regiones uniformes de la porción por encima del horizonte. En esta realización, el término "uniforme" se refiere a una región en la que, por cada celda/píxel en esa región, el gradiente RGB a través de esa celda/píxel (p. ej. tanto en la dirección vertical como horizontal) tiene un valor por debajo de un umbral predeterminado. En algunas realizaciones de la invención, se utiliza una definición diferente de uniforme.

En segundo lugar, en esta realización, las regiones identificadas como "uniformes" de la parte por encima del horizonte se clasifican como cielo si contienen píxeles de un color azul fuerte. En otras realizaciones, se podrán utilizar uno o más criterios diferentes de colores para clasificar una región como cielo. La apariencia/color del cielo puede depender, por ejemplo, de la hora local del día, de las condiciones climáticas locales, etc. Por ejemplo, a ciertas horas del día, el cielo puede tener un color violeta, rosa u otro color en lugar de azul fuerte. De esta manera, dependiendo de la hora del día o de otro parámetro, se podrá seleccionar y utilizar un criterio de colores para clasificar el cielo. Asimismo, en algunas realizaciones, se utilizan uno o más criterios distintos en lugar de uno o más criterios de colores, o además de dichos criterios. Por ejemplo, en otras realizaciones de la invención, se puede utilizar un criterio basado en tonalidad, saturación, propiedades de iluminación/luminosidad, o cualquier otra propiedad de la imagen para clasificar el cielo.

Se ha llegado a la conclusión de que, en general, el cielo tiende a ser más uniforme en la dirección paralela al horizonte en comparación con una dirección que es perpendicular al horizonte. Por lo tanto, en esta realización, los gradientes de las imágenes se calculan por separado para los canales RGB de la imagen en las direcciones tangenciales (R_T, G_T, B_T) y normales (R_N, G_N, B_N) respecto a la línea del horizonte. En esta realización, esto se llevará a cabo de la forma siguiente. Primero, se utiliza una imagen para calcular una primera dirección, que es paralela a la línea del horizonte en la imagen. Segundo, se calculan gradientes de la imagen en la primera dirección para cada una de las celdas/píxeles de la imagen y para cada uno de los canales de color de la imagen (p. ej., para cada uno de los canales de color rojo, verde y azul). Tercero, se utiliza una imagen para calcular una segunda dirección, que es perpendicular a la línea del horizonte en la imagen. Cuarto, se calculan gradientes de la imagen en la segunda dirección para cada una de las celdas/píxeles de la imagen y para cada uno de los canales de color de la imagen.

Se podrá uniformizar más aún los gradientes de los canales RGB separados que han sido calculados realizando un promedio sobre una región local circular. Luego de uniformizarlos, los canales RGB se suman para producir un valor

de uniformidad combinado de un píxel en las direcciones tangencial y normal. Se marcan entonces como umbrales para extraer conjuntos de píxeles conectados que pertenecen a regiones de uniformidad variable.

Como una nube también puede tener regiones de uniformidad variable, no siempre se puede utilizar solo la propiedad de uniformidad para detectar regiones del cielo. En esta realización, solo se marcan como cielo aquellas regiones que contengan píxeles de un color azul fuerte. En la presente, azul fuerte se define utilizando dos técnicas heurísticas: (i) el color azul tiene que ser el componente RGB más fuerte del píxel, y (ii) el valor de saturación del píxel, que se define para cada píxel como $1 - \min(R, G, B) / \max(R, G, B)$, debe estar por encima de un umbral predeterminado. El valor del umbral se puede determinar empíricamente a partir de experimentos y puede ser un valor controlado por el usuario para permitir que el operador lo "modifique".

Una limitación de este planteamiento puede ocasionar que no se consiga detectar el borde entre el cielo y una nube debido a la mala identificación (p. ej. por niebla) de los bordes de la nube. Una opción para mejorar el rendimiento bajo estas circunstancias consiste en combinar el método con un esquema de clasificación basado en un campo aleatorio de Markov que puede determinar con más éxito los límites entre las clases y aplicar restricciones globales.

Para la segmentación y clasificación de nubes (también parte de la etapa 404), se supone que la región por encima del horizonte que no se clasifica como cielo es nube, y se utiliza para construir y mantener un modelo de colores para la apariencia visible de las nubes. Este modelo permite detectar nubes por debajo del horizonte. El modelo consiste en una serie de distribuciones gaussianas ponderadas en un espacio tridimensional RGB y captura las variaciones en colores que se han observado recientemente en las nubes por encima del horizonte, y permite detectar regiones similares por debajo del horizonte. Se basa en el planteamiento de aprendizaje de supervisión propia de H. Dahlkamp, A. Kaehler, D. Stavens, S. Thrun, & G. Bradski, "Self-supervised Monocular Road Detection in Desert Terrain", In Proc. of Robotics: Science and Systems, 2006, y permite clasificar si la imagen por debajo del horizonte es una nube o no. Se puede encontrar un planteamiento similar al algoritmo de detección de objetos en base a colores en S. McKenna, Y. Rajab, S. Gong, "Tracking colour objects using adaptive mixture models", Image and Vision Computing, Vol. 17, 1999, que también se puede utilizar.

En esta realización, el modelo de identificación determinado a partir de las nubes por encima del horizonte y utilizado para clasificar las regiones por debajo del horizonte es un modelo de colores. Sin embargo, en otras realizaciones de la invención, uno o más tipos de modelos de identificación se pueden utilizar en lugar del modelo de colores, o además de dicho modelo. Por ejemplo, en otras realizaciones, se puede utilizar un modelo basado en tonalidad, saturación, propiedades de luminosidad/iluminación, o cualquier otra propiedad para modelar la apariencia visible de las nubes.

En esta realización, el modelo de colores toma como entrada de datos los valores RGB de todos los píxeles por encima del horizonte y no del cielo. Se utiliza un algoritmo de agrupamiento k-promedios a partir de estos datos para producir un conjunto de puntos agrupados. Esta agrupación permite construir un modelo de mezcla gaussiana que resume las nubes observadas en promedios y covarianzas en el espacio RGB. Este modelo se produce a partir de la imagen actual y se utiliza para actualizar un modelo de mezcla gaussiana distinto que persiste durante toda la operación del sistema y que sigue lentamente el cambio de las características visibles de las nubes observadas. El artículo de Dahlkamp mencionado más arriba contiene los detalles de la inicialización y el esquema de actualización.

De manera opcional, para mejorar el rendimiento del sistema de clasificación y para clasificar correctamente las nubes por debajo del horizonte que tienen un aspecto muy diferente al de aquellas por encima del horizonte, el modelo de apariencia se puede actualizar en base a las regiones de imágenes detectadas que se hayan seguido y localizado correctamente, y que se sepa que no se encuentran sobre la superficie de la tierra (ver bucle de retroalimentación en la figura 4). Esto depende de la capacidad para localizar correctamente las características, algo que sin embargo ha resultado difícil en las pruebas preliminares. El rendimiento del sistema para realizar clasificaciones se puede mejorar clasificando la neblina por separado, que suele suceder cerca del horizonte y comparte colores parecidos al de algunas nubes. Esto se puede llevar a cabo por medio de condiciones de uniformidad en una manera similar a la del cielo.

Esta fase de segmentación y detección de imagen se puede caracterizar de forma manual segmentando un conjunto de imágenes repartidas esporádicamente en los conjuntos de datos suministrados. Se pueden calcular las tasas de falsos positivos para las clases por encima y por debajo del horizonte a partir de este conjunto de datos. Así se obtienen resultados que miden la capacidad de separar el cielo y las nubes en base al modelo de cielo modificado, y a la habilidad del modelo de colores determinado/aprendido para clasificar nubes por debajo del horizonte.

La etapa 460 de detección y seguimiento de características puede involucrar etapas de detección de características en imágenes, asociación y seguimiento de características. Durante la detección de características en imágenes, se extraen y localizan características para desarrollar telemetrías estimadas de las características detectadas. Para localizar características arbitrarias en un espacio 3D a partir de un sensor que detecta solo orientación, como puede ser una cámara, se pueden observar las características a través del tiempo y utilizar la información para obtener su posición. Las regiones con características prominentes se extraen a partir de la intensidad en la escala de grises de una imagen utilizando el determinante Hessiano de invariancia de escala (ver M. Sonka, "Image Processing, Analysis, and Machine Vision", Brooks/Cole, 2007). Esto determina de forma automática la ubicación y la escala de

5 textura de intensidad prominente en la imagen. Las regiones de imagen cuadradas se extraen de la imagen y se almacenan para su uso posterior en el algoritmo de seguimiento. Este proceso es similar al del detector de características empleado en el algoritmo SURF (detección acelerada de características prominentes) (H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, & L.V. Gool, "SURF: Speeded Up Robust Features", Computer Vision and Image Understanding, Vol. 110, No. 3, pp. 346–359, 2008). Se espera que los patrones de características extraídos utilizando este planteamiento se produzcan gracias a la textura que se suele encontrar en las superficies de las nubes. Estas texturas se producen debido al reflejo difuso de la luz sobre su superficie irregular, y se espera que se sean relativamente invariables respecto al ángulo de visión. Estas propiedades son fundamentales para el sistema robusto y preciso de seguimiento y localización de características.

10 En ocasiones se detectan características en el cielo que resultan de la interacción entre el gradiente de intensidad natural del cielo y los bordes de las nubes. Estas características no existen en una superficie de un objeto físico, y deben descartarse. Esto se consigue comprobando y eliminando todas las características que se encuentran en una región que ha sido clasificada como cielo previamente. Se mantienen todas las otras características.

15 La etapa de extracción de características mencionada arriba se lleva a cabo para cada imagen nueva recibida. Se realizan seguimientos asociando características repetidamente a través de fotogramas consecutivos. El proceso de asociación de características tiene tres fases: asociación aproximada, alineamiento de características y verificación de características. El primero de estas fases utiliza la información de navegación de la aeronave para predecir donde se encontrará el conjunto previo de características observadas en el fotograma siguiente, mientras que las otras dos fases comprueban las características visibles para alinear y validar las correspondencias aproximadas.

20 Durante la etapa de asociación aproximada, primero se proyectan las características que se siguen en un fotograma al fotograma nuevo teniendo en cuenta la estimación del movimiento relativo de la cámara respecto a una imagen inmóvil, que provee la información de navegación. Como generalmente no se conoce la profundidad, la proyección forma un segmento de línea en la imagen nueva definida por la línea epipolar. Primero se realiza la asociación generando una matriz de costes de asignación entre los seguimientos proyectados y las nuevas características extraídas. El coste de asociación para cada par de característica/seguimiento es la suma ponderada de la distancia de la característica al final de la línea epipolar (que representa la característica proyectada a una profundidad infinita) y la distancia perpendicular desde la línea. Se imponen restricciones que rechazan coincidencias físicamente imposibles en base al número máximo de incertidumbre esperadas en el movimiento de las nubes y los errores de posicionamiento de aeronaves. Se asocian las características nuevas a seguimientos previos por medio de un algoritmo creciente que asigna nuevas características, empezando por el par de coste mínimo y siguiendo hasta que ya no existan más asignaciones válidas.

30 Durante la alineación de características, las características que se han correspondido de forma aproximada a un seguimiento se alinean luego para corregir las discrepancias menores entre las ubicaciones de los puntos de características extraídas en un objeto. Este proceso utiliza el planteamiento incremental de Kanade-Lucas-Tomasi (se puede encontrar en la referencia de Sonka más arriba) para descubrir la compensación óptima entre dos regiones de imágenes a partir de las características que se han correspondido de forma aproximada. Este planteamiento es similar al de H. Nguyen, J. Porway, P. Ramu, A. Ganguli & J. Yadegar, "EO/IR Due Regard Capability for UAS Based on Intelligent Cloud Detection and Avoidance", AIAA Infotech@Aerospace 2010, pero se utiliza solo una capa de uniformidad. Esta combinación de la correspondencia aproximada en base al conocido movimiento relativo de la cámara respecto a una imagen inmóvil y al alineamiento preciso de regiones permite seguir una característica de forma fiable a través de secuencias de vídeo capturadas a una tasa de fotograma baja con gran movimiento entre cada fotograma.

35 Durante la validación de características, para asegurarse de que la apariencia de una nueva característica es coherente con el seguimiento actual y no pertenece a una característica totalmente distinto, se realiza una validación visual para asegurarse de que las regiones alineadas de la característica coinciden correctamente. Esta validación se realiza calculando la correlación cruzada normalizada (ver la referencia de Sonka). La correlación cruzada normalizada es válida en condiciones lumínicas distintas y varía entre un valor 1 para una correspondencia perfecta y 0 cuando no hay correspondencia (se puede dar un valor negativo cuando hay correlaciones negativas). Se detectan y se descartan las correspondencias insuficientes utilizando un umbral de valores para la correlación cruzada normalizada.

50 Se compilan las características asociadas, alineadas y validadas en el tiempo y se realizan seguimientos a través del espacio de las imágenes. Los sistemas de localización y telemetría utilizan estos seguimientos durante el proceso de seguimiento (parte de la etapa 406).

55 Como parte de la etapa de localización y telemetría 408, se puede localizar una característica estacionaria en el espacio 3D a partir de dos o más imágenes adquiridas en ubicaciones distintas. Un ejemplo de dicha solución de localización y telemetría se da en la referencia de Nguyen mencionada más arriba. Sin embargo, si la característica está en movimiento, como las nubes suelen estar, no se podrá utilizar este planteamiento. Se conoce que, bajo ciertas condiciones específicas, se puede reconstruir la trayectoria de una característica en movimiento con una velocidad indeterminada a partir de una cámara en movimiento (ver la referencia al artículo de Avidan más arriba), sin embargo, para el caso de una nube en movimiento en el mismo plano horizontal que una aeronave, el problema

es degenerado y la telemetría no se puede observar. Este problema se puede solucionar si se supone que el movimiento de todas las nubes es constante y que todas las nubes se pueden seguir de forma conjunta, lo que permite estimar la velocidad de las nubes a distintas altitudes y utilizar dicha información para inferir la velocidad de las nubes a la misma altitud. Sin embargo, es improbable que esta suposición sea correcta ya que se sabe que las masas de aire en diferentes altitudes se mueven a diferentes velocidades.

Para solucionar este problema introducido por una velocidad desconocida que hace imposible la observación, se han implementado y estudiado dos métodos de localización de características. Ambos métodos se han creado para nubes en altitudes similares a las de la aeronave. Los dos métodos proveen funcionalidad complementaria, y cada uno de ellos es capaz de localizar características bajo condiciones en los que se sabe que el otro no tiene éxito. Algunas realizaciones de la invención pueden usar una o ambas técnicas.

El método de estimación de telemetría por expansión de objeto hace uso de la expansión observable de objetos a medida que se mueven hacia la cámara, y se basa en el trabajo de Y. Barniv, "Passive Ranging Using Image Expansion", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems Vol. 31, No. 1 1995; C. Raju, S. Zabuawala, S. Krishna & J. Yadegar, "A Hybrid System for Information Fusion with Application to Passive Ranging", In Proc. Int. Conf. on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition, 2007, y R. Brimble, J. Will & P. Chhabra, "AA022 Driveable Terrain Detection: Final Report", Systems Engineering for Autonomous Systems Defence Technology Centre, TES107479, 2011. Es especialmente bueno para estimar la telemetría de características en la dirección de vuelo, pero insuficiente para estimar la telemetría de características a los lados, por encima o por debajo de la aeronave. Cuando se presentan los detalles de este método, se supone que el punto de característica existe en el mundo en una ubicación $p = [p_x, p_y, p_z]^T$ y se encuentra en una superficie plana local con la normal $n = [n_x, n_y, n_z]^T$. Esta característica se observa desde dos ubicaciones, como muestran C_0 y C_1 . Sin limitación de la generalidad, se asume que se posiciona C_0 en el origen, y por tanto p y n se definen en el sistema de coordenadas local de C_0 . La ubicación y orientación de C_1 , con respecto a C_0 , se definen por medio de las matrices de rotación y traslación T y R respectivamente. En la parte (a) de la figura 6, se muestra la geometría de las observaciones de la característica p y un punto circundante x que se encuentra en un plano con la normal n , mientras que en la parte (b), se capturan imágenes a partir de los dos puntos de observación, tomando nota de que la forma del patrón observado sobre el plano alrededor de la característica se va a deformar cuando se observe en la segunda imagen. De esta manera la características aparece en las imágenes C_0 y C_1 en las coordenadas

$$(6) \quad u_0^p = M\bar{p} \text{ and } u_1^p = M[R(p-T)]$$

Debido al movimiento del punto p , estas dos ecuaciones no se pueden usar para obtener la ubicación de la característica. Para desarrollar el método de expansión, se define x como un punto cerca de la característica p en la superficie del plano y aparece en C_0 y C_1 en las coordenadas

$$(7) \quad u_0^x = M\bar{x} \text{ and } u_1^x = M[R(x-T)]$$

Se desea encontrar una expresión para definir cómo la diferencia entre $u_1^p - u_1^x$ cambia como una función de (entre otras cosas) la telemetría de la característica y la diferencia entre $u_0^p - u_0^x$.

Para empezar, obsérvese que el punto x se encuentra en la superficie del plano y así

$$(8) \quad n^T p = n^T x.$$

Se define la profundidad de la característica p desde la cámara C_0 como $\gamma_p (= p_z)$, y de forma similar se define γ como la profundidad x . Así, p se puede escribir como $\gamma_p M^{-1} u_0^p$ y x se puede escribir como $\gamma_x M^{-1} u_0^x$. lo que hace posible reescribir (8) como:

$$(9) \quad n^T \gamma_p M^{-1} u_0^p = n^T \gamma_x M^{-1} u_0^x.$$

Así pues, γ se convierte en

$$(10) \quad \gamma_x = \gamma_p \frac{n^T M^{-1} u_0^p}{n^T M^{-1} u_0^x}.$$

Ahora, x se puede escribir como

$$(11) \quad x = \gamma_p \frac{n^T M^{-1} u_0^p}{n^T M^{-1} u_0^x} M^{-1} u_0^x.$$

Obsérvese que no se puede simplificar esta fórmula debido a la multiplicación de la matriz y el vector. Así, el punto u_i^x ahora se puede escribir como

$$(12) \quad u_i^x = M \left[R \left(\gamma_p \frac{n^T M^{-1} u_0^p}{n^T M^{-1} u_0^x} M^{-1} u_0^x - T \right) \right] \\ = f(u_0^p, u_0^x, n, \gamma_p, M, R, T)$$

Ahora bien, tomando una expansión de 1er orden de una serie de Taylor en torno a $u_0^x = u_0^p + \Delta u_0$ para $\Delta H_0 \approx 0$ da

$$(13) \quad u_i^x = f(u_0^p, u_0^x, n, \gamma_p, M, R, T) \Big|_{u_0^x = u_0^p} + \frac{\partial f}{\partial u_0^x}(u_0^p, u_0^x, n, \gamma_p, M, R, T) \Big|_{u_0^x = u_0^p} \Delta u_0 \\ = u_i^p + A \Delta u_0$$

5

Donde A es la matriz jacobiana de f y es una función de $(u_0^p, n, \gamma_p, M, R, T)_{n, \gamma_p, M, R, T}$

La forma de la matriz jacobiana determina cómo un patrón visible en la superficie del plano alrededor de la características se transforma cuando se ve desde una ubicación distinta. Particularmente, como solo se consideran los términos de primer orden esto define una transformación afín de este patrón, p. ej., se pierde el componente de la perspectiva. Este método es robusto para el movimiento de la característica ya que son las diferencia *locales* entre los puntos en la imagen las que se utilizan en lugar de los desplazamientos globales. La forma jacobiana se ha calculado utilizando MATLAB's Symbolic Toolbox. La forma general es muy compleja y no se reproducirá en la presente. Sin embargo, bajo ciertas condiciones específicas, la forma jacobiana se convierte en:

10

$$(14) \quad A = \frac{\gamma_p}{\gamma_p - T_z} R_z(\theta_z)$$

15 donde T_z es el componente z del vector de traslación, es decir, la traslación en el eje óptico de C_0 y $R_z(\theta_z)$ es la matriz de rotación producida por una rotación alrededor del eje óptico. Esta forma es válida para una serie de casos:

- La traslación sucede solo en dirección hacia la característica y la cámara no rota. Es decir, $R = I_{3 \times 3}$ (i.e.) y $T \propto p$; y cualquier n arbitrario, y n^p). Esto corresponde con la aeronave volando en línea recta hacia una característica de la nube.

20 - Se permite la rotación alrededor del eje óptico y se obtiene la forma completa de (14) si la característica está limitada al eje óptico, es decir, si la cámara está montada para estar alineada a la dirección de vuelo.

- La normal de la superficie es paralela al eje óptico y la cámara no rota, es decir $n = [0, 0, 1]^T$ y $R = I_{3 \times 3}$ (es decir, $\theta_z = 0$). Esta forma es válida para cualquier n^p y T arbitrarios. Esto corresponde a una aeronave acercándose al frente de nubes que tiene la forma de una pared vertical perpendicular a la dirección de vuelo. Esta aproximación es válida para todos los puntos del frente de nubes, y no solo para los puntos en la dirección de vuelo.

25

En general, ninguna de estas condiciones es válida para el movimiento general de una aeronave. Obsérvese que la aproximación es especialmente insuficiente para características en la tierra, que normalmente exhiben una superficie normal perpendicular a la dirección de vuelo (y al eje óptico de la cámara) y no suelen estar en la misma dirección de vuelo.

30 En el método de expansión de estimación y telemetría, se puede estimar la telemetría de la característica si la matriz A de deformación afín se puede estimar a partir de la apariencia visible de la región de la imagen alrededor de la característica en fotogramas distintos. Se asume entonces que A tiene la forma definida en (14). El método de estimación de deformación se basa en el estudio de Barniv mencionado más arriba, y está relacionado con la solución de un problema de optimización no lineal que tiende a deformar progresivamente una región de una imagen cuando intenta hacerla coincidir con el original. Este planteamiento asume que la matriz de deformación afín tiene la forma:

35

$$(15) \quad A = sR_s(\theta),$$

e incluye un término de compensación para realizar ajustes de precisión de las traslaciones entre las características para tener en cuenta otros errores acumulados. La optimización se limita solo a considerar la compensación y medición de escalas s como variables libres, y la rotación se fija en torno a un valor obtenido de los datos de navegación conocidos de la aeronave. Para mejorar las propiedades de convergencia de la optimización no lineal, la información del gradiente de las imágenes se hace uniforme. Esto permite al algoritmo convergir y obtener las escalas cuando se inicializa con un error más grande. A partir del factor de escalas s , la profundidad γ_p la telemetría se pueden obtener utilizando la traslación conocida entre los fotogramas

40

$$(16) \quad \gamma_p = \frac{s}{s-1} T_z \cdot$$

5 Obsérvese que las traslaciones y los factores de escalas más grandes darán estimaciones de telemetría más precisas. Como parte de la fase de caracterización, se ha estudiado la precisión de qué s se puede estimar solucionando el problema de optimización no lineal. Esto permite generar estimaciones de error para la telemetría calculada. Más adelante se podrá encontrar una expresión analítica más simple de A para la A jacobiana, que cuando se combina con un método de estimación de deformación aún más general (p. ej. J. Shi & C. Tomasi, "Good Features to Track", IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 1994), permite estimar y compensar el efecto de la normal de la superficie, lo que permite obtener una mejor precisión de telemetría bajo una serie de condiciones más amplia.

10 En el método de triangulación con velocidad del viento conocida, si se conoce a priori la velocidad a la que se mueve una característica, la estimación de su ubicación actual es equivalente a la triangulación con una característica estacionaria. Se debe observar que este método de triangulación de una característica en movimiento tiene los mismos defectos que la triangulación normal de características estacionarias y requiere que el ángulo de observación cambie para poder obtener la ubicación de la característica. Esto es complementario con el método anterior basado en expansión que requiere que el ángulo permanezca constante.

15 Se espera que la velocidad a la que la aeronave se mueve en el aire se pueda obtener de las mediciones de presión y la temperatura atmosférica, y de la velocidad indicada por la aeronave. Esta información en combinación con la guiñada de la aeronave y la velocidad real obtenida del GPS (asumiendo un deslizamiento cero) permite estimar la velocidad real a la que se mueve el aire. Una vez que se conoce la velocidad de la masa de aire y se utiliza para inferir el movimiento de características de nubes, el problema de ubicación de características se transforma de nuevo en un simple problema de triangulación, y se puede resolver de una manera similar al caso de una característica estacionaria.

20 Obsérvese que la velocidad de la masa de aire varía en función de la altitud, por lo que este método solo se puede aplicar estrictamente a nubes que están a la misma altitud que la aeronave. Esto se puede extender utilizando un modelo de corte de viento y estimando de forma explícita la velocidad de la masa de aire a diferentes altitudes.

25 En el método de estimación de viento transversal, como la mayor parte de los datos utilizados para estimar el movimiento de la masa de aire no están disponibles en los datos de registros actuales, ni se espera tenerlos en pruebas de vuelo a corto plazo, este método incluye la velocidad del aire definida manualmente como una opción de configuración. Como una alternativa rudimentaria, el componente de viento transversal de la velocidad del aire, es decir, el componente perpendicular al eje principal de la aeronave, se puede estimar a partir de la diferencia entre la guiñada de la aeronave y el vector de velocidad derivado del GPS (ángulo de deriva), como se muestra en la figura 7. Esto captura el efecto principal que tiene la velocidad del viento en el problema de telemetría. Sin embargo, esto aún constituye una aproximación y se debería utilizar el vector de velocidad total si estuviese disponible.

30 Cuando se estiman las ubicaciones de las características de nubes se realizan las siguientes suposiciones:

35 - Cada característica se sigue de forma independiente, es decir, se ignora la correlación entre las estimaciones de características introducidas por la solución de navegación común.

- La posición y orientación estimadas y la incertidumbre asociada de la cámara está disponible para cada fotograma (latitud, longitud, altitud, alabeo, cabeceo, guiñada) y se supone que no está relacionada en el tiempo. (Esto incluye errores introducidos por la sincronización de las fuentes de datos de vídeo y de navegación).

40 - La velocidad estimada del viento está disponible, tanto por medio del esquema de estimación del viento transversal mencionado antes o de un método de estimación más preciso que utilice datos que no se encuentran disponibles actualmente. Se asume que esta estimación está en el plano horizontal y que tiene un margen de incertidumbre conocido y se asume que no está relacionada en el tiempo.

45 El seguimiento y localización de una característica dado se consigue utilizando un filtro de Kalman extendido estándar. El estado espacial se define como la ubicación de la característica 3D $p = [p_x, p_y, p_z]^T$, cuya ubicación futura se predice utilizando la velocidad estimada del viento, que se denota con $\omega = [\omega_x, \omega_y, 0]$, y se aumenta en cada ciclo de actualización con la solución de navegación de la cámara, que se denota con $\eta = [\eta_x, \eta_y, \eta_z, \eta_{alabeo}, \eta_{cabeceo}, \eta_{guiñada}]^T$

50 **Predicción** - Para una estimación dada de la ubicación de la característica $\hat{p}^{k|k}$ y covarianza $P^{k|k}$, en un tiempo t^k y que contiene todas las observaciones hasta un tiempo t^k , la estimación proyectada en un tiempo posterior $t^{k+1} = t^k + \Delta t^k$ se puede calcular utilizando la velocidad estimada del viento $\hat{\omega}^k$, que tiene una covarianza conocida P_{ω}^k por medio de:

$$(17) \quad \begin{aligned} \hat{p}^{k+1k} &= \hat{p}^k + \hat{\omega}^k \Delta t^k \\ P_p^{k+1k} &= P_p^{k+1k} + P_{\omega}^k (\Delta t^k)^2 \end{aligned}$$

Actualización de la observación - Para un tiempo t^k dado, la ecuación de observación de la característica se obtiene con

$$(18) \quad u = h(p, \eta) = M[\overline{R(p-T)}],$$

5 donde tanto R como T son funciones de la solución de navegación actual η . Las jacobianas de esta función de observación se denotan con $H = [H_p, H_\eta]$. Se puede obtener la estimación actualizada formando el estado intermedio

$$(19) \quad \hat{y} = [\hat{p}^T, \hat{\eta}^T]^T,$$

que tiene una covarianza

$$(20) \quad P_y = \begin{bmatrix} P_p & 0 \\ 0 & P_\eta \end{bmatrix},$$

10 Se pueden obtener el estado estimado y la covarianza utilizando las ecuaciones de actualización de filtro de Kalman estándar

$$(21) \quad \begin{aligned} \hat{y}^{k+1k+1} &= \hat{y}^{k+1k} + K^{k+1} [u^{k+1} - h(\hat{y}^{k+1k})] \\ P_y^{k+1k+1} &= P_y^{k+1k} - K^{k+1} H^{k+1} P_y^{k+1k} \end{aligned}$$

donde la ganancia de Kalman es

$$K^{k+1} = P_y^{k+1k} [H^{k+1}]^T [S^{k+1}]^{-1},$$

15 y

$$S^{k+1} = H^{k+1} P^{k+1k} [H^{k+1}]^T + R^{k+1}.$$

Aquí R^{k+1} es el ruido de la observación y se obtiene de los errores cuando se asocian y se alinean las características extraídas.

20 - **Inicialización del seguimiento** - Cuando se observa una característica nueva que no está asociada a ningún otro seguimiento se crea un nuevo seguimiento. Esto se realiza de manera sencilla proyectando la observación en el sistema de coordenadas mundial. Esto se realiza a una telemetría nominal con incertidumbre nominal. A pesar de que esta inicialización será incorrecta por lo general, debido a la precisión de la posición de la cámara (es decir, un P_η normalmente pequeño), la estimación generalmente converge rápidamente con la estimación correcta y el procedimiento de inicialización hace poca diferencia.

25 El marco del filtro de Kalman básico que se describe arriba permite comprobar y validar el marco de estimación. Sin embargo, se puede mejorar de varias maneras:

30 - Utilizando un procedimiento de inicialización de hipótesis de características múltiples, que instancia estimaciones gaussianas múltiples a diferentes ángulos. Se espera que esto mejore la velocidad de convergencia y elimine alguno de los primeros errores de linearización. Se puede encontrar un ejemplo de dicho método en J. Sola, A. Monin, M. Devy & T. Lemaire, "Undelayed Initialization in Bearing Only SLAM", In Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2005.

- Reemplazando el marco de Kalman con un filtro de partículas. Así se eliminan todos los problemas con la instanciación de características y los errores de linearización, pero se espera que el proceso sea más lento.

35 - Realizando estimaciones conjuntas de características. Así se aprovecha el hecho de que cada imagen captura información relativa muy precisa sobre las orientaciones entre las distintas características. Así se mejoran las estimaciones de la posición de las características y también se pueden corregir los errores de rotación en la solución INS.

- Para mejorar la capacidad del sistema para seguir características en distintas altitudes, se debe utilizar un modelo de corte de viento y estimar de forma explícita la velocidad de la características dentro del marco de filtros.

El método de telemetría basado en expansión descrito arriba funciona mejor para objetos en la trayectoria de vuelo de la aeronave. Este método es complementario al método basado en la triangulación que también se ha descrito antes, que requiere observar las características desde diferentes ángulos y que solo se puede utilizar para determinar la telemetría de objetos opuestos a la dirección de vuelo. Estos métodos se pueden implementar por separado, pero se podrán combinar de forma beneficiosa. Se podrá realizar simplemente utilizando un conmutador en base al ángulo entre la observación de la característica y el vector de velocidad actual. Sin embargo, también se pueden considerar métodos más avanzados que combinan de forma estadística las estimaciones de los distintos métodos en base a la incertidumbre estimada provista por ambos métodos. Obsérvese que para una aeronave que vuela recto y a la misma altura, ambos métodos producen resultados insuficientes cuando localizan características que están a alturas muy distintas a la del avión. Esto causa una retroalimentación en el algoritmo de clasificación, que también suele ser insuficiente para clasificar nubes que se encuentran por debajo del horizonte y que tienen aspectos muy diferentes al de las nubes por encima del horizonte. Como se ha mencionado arriba, se puede solucionar esta insuficiencia utilizando modelos de corte de viento para poder combinar la velocidad del viento en altitudes más bajas con el marco de estimación de ubicación de características.

A pesar de que se asume de forma implícita que el área debajo del horizonte que no se clasifica como nube es una superficie, no se espera que esto sea suficiente para cumplir con la condición de que "la superficie es visible", según las normas de las condiciones meteorológicas visibles y las reglas de vuelo visual. Esta condición requiere que la superficie sea visible y que todos los objetos sobre dicha superficie se puedan discernir. Para detectar esta condición se utiliza el marco de filtros de Kalman descrito arriba, pero ignorando la etapa de predicción. Si se localiza de forma precisa cualquier característica que está cerca del nivel del suelo/mar, se levanta una bandera de alerta. Esto indica que la aeronave puede volar más cerca de las nubes, mientras se mantiene bajo las reglas de vuelo visual, comparado con cuando las características de la superficie no se pueden discernir.

REIVINDICACIONES

1. Un método para detectar características de nubes, que comprende:
- 5 obtener (402) datos de imagen (401);
- identificar (404) regiones en los datos de imagen que corresponden a una región por debajo del horizonte y a una región por encima del horizonte;
- clasificar una o más partes de la región por encima del horizonte como cielo;
- clasificar (404) como característica de nube cada parte de la región por encima del horizonte que no ha sido clasificada como cielo;
- 10 determinar un modelo identificación que especifica una apariencia visible de alguna o de todas las partes de la región por encima del horizonte que han sido clasificadas como una característica de nube; y
- utilizando el modelo de identificación determinado, clasificar como característica de nubes aquellas regiones de la región por debajo del horizonte cuya apariencia se especifica en el modelo de especificación; en donde
- la etapa de clasificar una o más partes de la región por encima del horizonte como cielo comprende:
- seleccionar una parte de la región por encima del horizonte; y
- 15 clasificar la parte seleccionada como cielo si las propiedades de los píxeles dentro de la parte seleccionada cumplen uno o más de los criterios predeterminados;
- caracterizado por que la etapa de clasificar una o más partes de la región por encima del horizonte como cielo además comprende:
- 20 calcular los gradientes de las imágenes para los canales rojo-verde-azul de los datos de imagen en las direcciones tangencial y normal respecto de la línea del horizonte;
- uniformizar los gradientes de la imagen calculados para los canales rojo-verde-azul realizando un promedio sobre una región local circular; y sumar los gradientes de la imagen de los canales rojo-verde-azul uniformizados para producir un valor de uniformidad combinado de cada píxel en la dirección tangencial a la línea del horizonte, y para producir un valor de uniformidad combinado de cada píxel en la dirección normal a la línea del horizonte;
- 25 en donde, para cada píxel de la parte seleccionada de la región por encima del horizonte, los valores de uniformidad combinados de ese píxel en la direcciones tangencial y normal a la línea del horizonte tienen un valor por debajo de un umbral predeterminado.
2. Un método según la reivindicación 1, en donde se seleccionan uno o más criterios predeterminados dependiendo de uno o más parámetros escogidos de un grupo de parámetros que consiste en: la hora del día, las condiciones lumínicas, las condiciones medioambientales.
- 30 3. Un método según la reivindicación 1 o 2, en donde las propiedades de los píxeles son propiedades de los colores de los píxeles.
4. Un método según la reivindicación 3, en donde la etapa de clasificar la parte seleccionada como cielo si las propiedades de los píxeles dentro de la parte seleccionada cumplen con uno o más criterios predeterminados comprende clasificar la parte seleccionada como cielo si los píxeles dentro de esa parte tienen un color azul fuerte.
- 35 5. Un método según la reivindicación 4, en donde se determina que un píxel en la parte seleccionada tiene un color azul fuerte si:
- (i) el color azul es el componente RGB más fuerte del píxel, y
- (ii) el valor de saturación del píxel se encuentra por encima de un umbral predeterminado.
- 40 6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde la etapa de calcular el gradiente de una imagen en las direcciones tangencial y normal al horizonte incluye:
- utilizando datos de imagen, determinar una línea del horizonte;
- determinar una primera dirección paralela a la línea del horizonte;
- calcular los gradientes de la imagen en una dirección paralela a la primera dirección;
- 45 determinar una segunda dirección perpendicular a la línea del horizonte;

- calcular los gradientes de la imagen en una dirección paralela a la segunda dirección;
7. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que además comprende:
uniformizar cada uno de los canales realizando un promedio sobre una región local circular; y
sumar los canales para producir un valor de uniformidad combinado de un píxel en las direcciones tangencial y normal.
8. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, que además incluye clasificar (404) partes de la región debajo del horizonte como superficie.
9. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde el modelo de identificación es un modelo basado en colores en base a la apariencia de al menos una de dichas nubes en la región por encima del horizonte.
10. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, que incluye una etapa de extracción de características (406) para detectar características visibles que corresponden a dicha característica de nube posible en una versión de los datos de imagen en escala de grises.
11. Un método según la reivindicación 10, en donde la detección de extracción de características (406) incluye buscar en escalas múltiples y extraer partes de imágenes que contienen la textura y los picos de intensidad locales.
12. Un método según la reivindicación 10 u 11, que incluye asociar dichas características visibles en fotogramas múltiples utilizando los datos de navegación.
13. Un método según la reivindicación 12, en donde se utiliza la asociación de características visibles para producir seguimientos temporales del movimiento de las características visibles por el espacio de la imagen.
14. Un método según la reivindicación 13, que incluye generar información de la telemetría de dicha nube calculando la escala de dicha característica visible que corresponde a la nube de un fotograma anterior dado a un fotograma posterior dado.
15. Un método según la reivindicación 13 o 14, que incluye además generar información de la telemetría de dicha característica nube por medio de lo siguiente:
estimar la velocidad de desplazamiento del aire en donde se encuentra la característica de nube;
- 25 obtener información sobre la posición y la velocidad de una aeronave que produce los datos de imagen en el momento que corresponde al fotograma de los datos de imagen, y
utilizar técnicas de triangulación en base a la velocidad estimada, la posición de la aeronave, y la velocidad de la aeronave para determinar la telemetría de la nube.
16. Aparato para detectar nubes que incluye:
- 30 una o más cámaras configuradas para obtener (402) datos de imágenes (401); y
uno o más procesadores que operan en combinación con la o las cámaras, y que están configurados para:
identificar (404) regiones en los datos de imagen que corresponden a una región por debajo del horizonte y a una región por encima del horizonte;
clasificar una o más partes de la región por encima del horizonte como cielo;
- 35 clasificar (404), como característica de nube, cada parte de la región por encima del horizonte que no ha sido clasificada como cielo;
determinar un modelo de identificación que especifica una apariencia visible de alguna o de todas las partes de la región por encima del horizonte que han sido clasificadas como una característica de nube; y
utilizando el modelo de identificación determinado, clasificar como características de nubes aquellas regiones de la región por debajo del horizonte, cuya apariencia se especifica en el modelo de especificación; en donde
- 40 el o los procesadores también están configurados para:
seleccionar una parte de la región por encima del horizonte; y
clasificar la parte seleccionada como cielo si las propiedades de los píxeles dentro de la parte seleccionada cumplen uno o más de los criterios predeterminados;

caracterizado por que el o los procesadores también están configurados para

calcular los gradientes de las imágenes para los canales rojo-verde-azul de los datos de imagen en las direcciones tangencial y normal respecto de la línea del horizonte;

5 uniformizar los gradientes de la imagen calculados para los canales rojo-verde-azul realizando un promedio sobre una región local circular; y sumar los gradientes de la imagen de los canales rojo-verde-azul uniformizados para producir un valor de uniformidad combinado de cada píxel en la dirección tangencial a la línea del horizonte, y para producir un valor de uniformidad combinado de cada píxel en la dirección normal a la línea del horizonte;

10 en donde, para cada píxel de la parte seleccionada de la región por encima del horizonte, los valores de uniformidad combinados de ese píxel en las direcciones tangencial y normal a la línea del horizonte tienen un valor por debajo de un umbral predeterminado.

17. Una aeronave que comprende el aparato según la reivindicación 16.

18. Un programa o una pluralidad de programas organizados para que cuando un sistema informático o uno o más procesadores los ejecuten, los programas hagan que el sistema informático o el/los procesadores operen según el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15.

15 19. Un medio de almacenamiento legible por ordenador que almacena el programa o la pluralidad de programas según la reivindicación 18.

Fig. 1

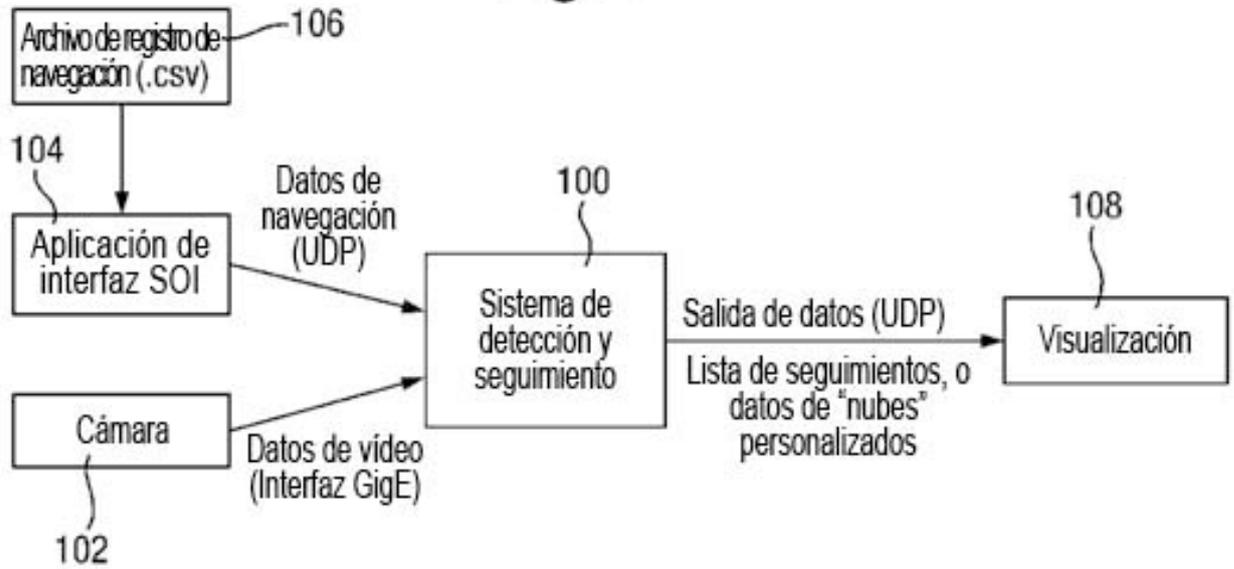


Fig. 2

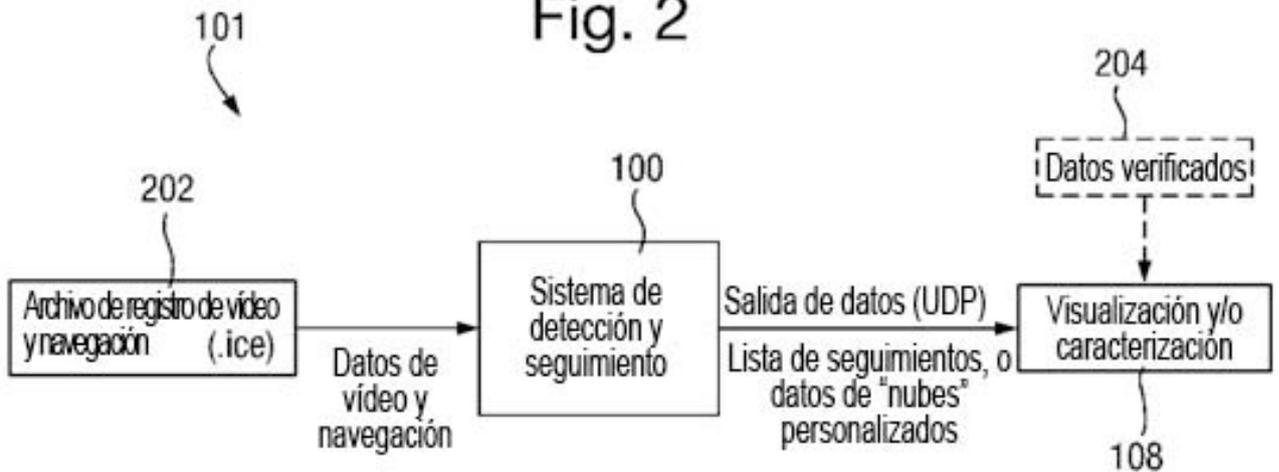


Fig. 3

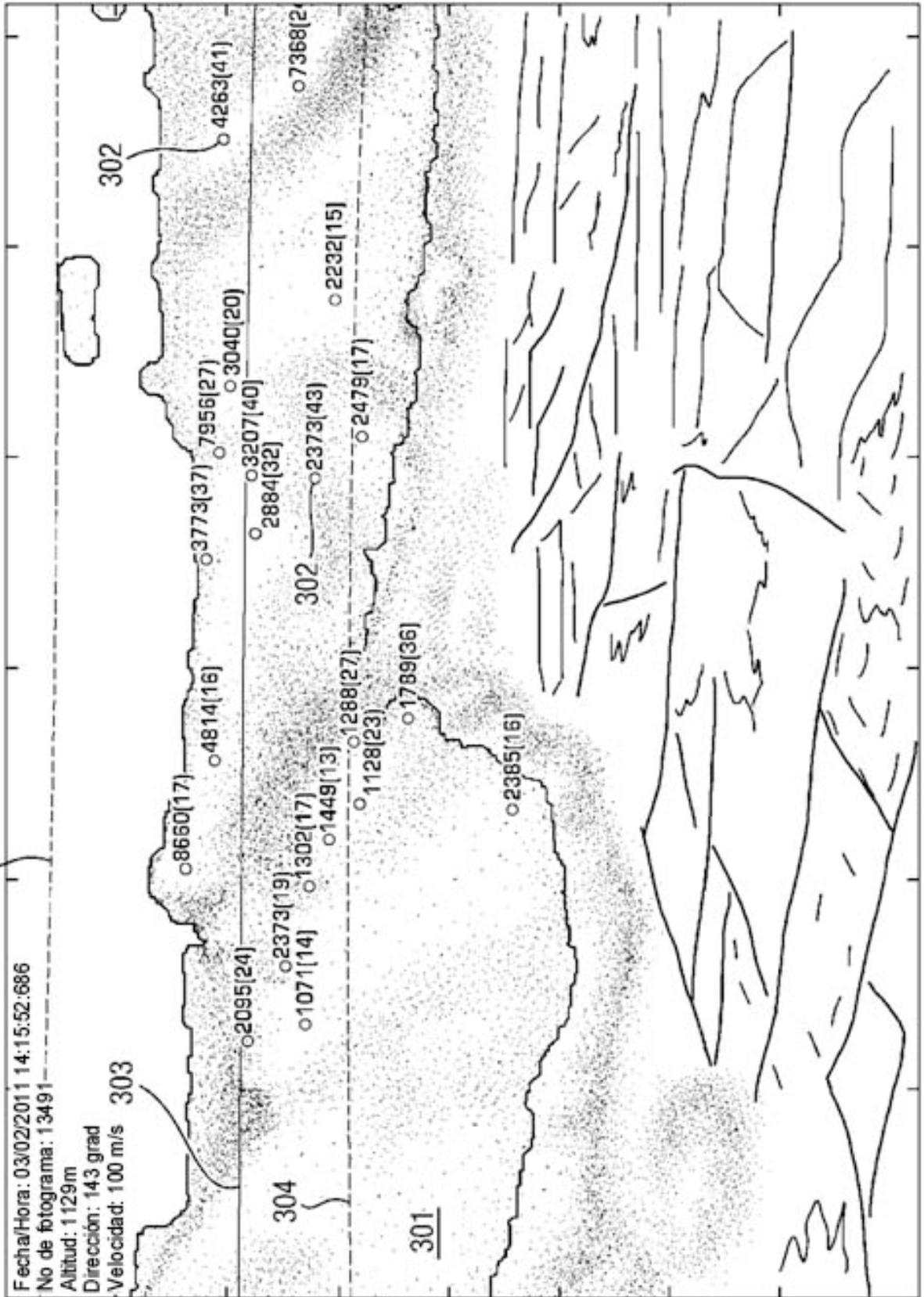


Fig. 4

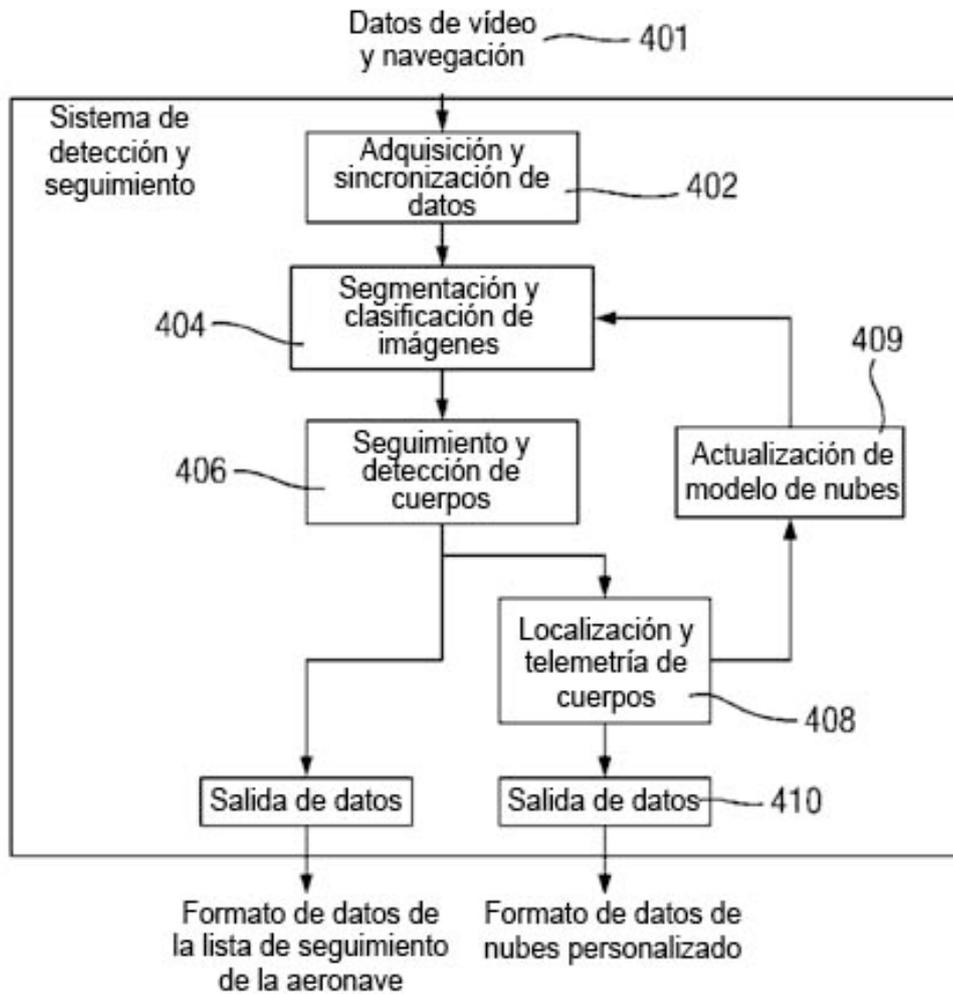


Fig. 5

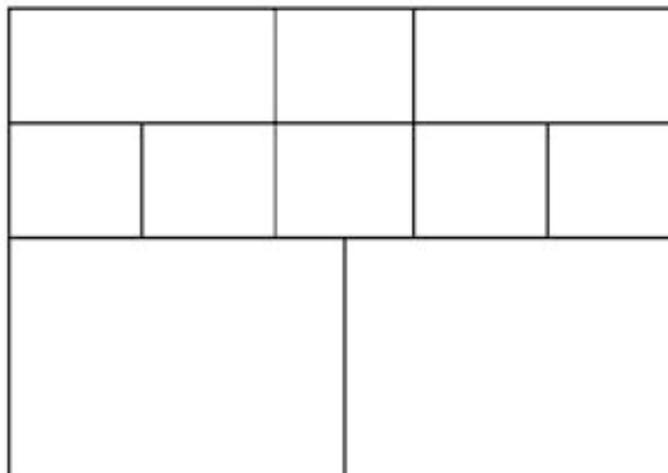


Fig. 6(a)

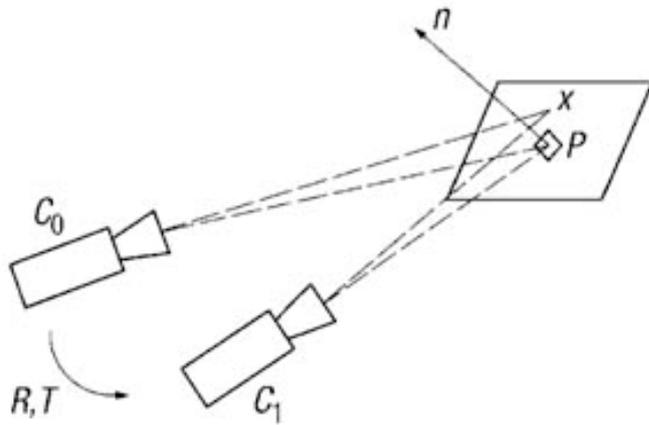


Fig. 6(b)

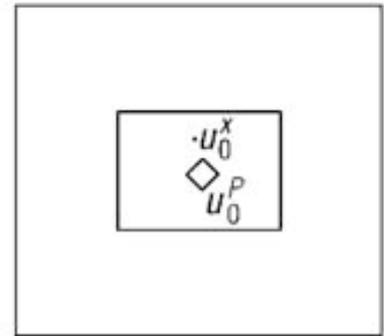


Imagen de C_0

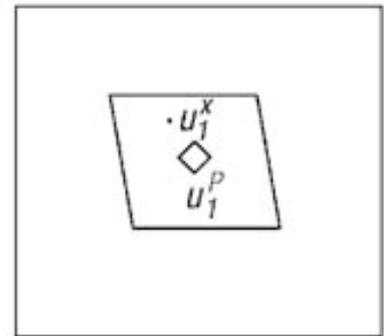


Imagen de C_1

Fig. 7

