

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 389 549**

51 Int. Cl.:  
**G05D 1/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **08737907 .9**  
96 Fecha de presentación: **18.04.2008**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2274658**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **19.01.2011**

54 Título: **Piloto automático visual para vuelo con obstáculo cercano**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**29.10.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**29.10.2012**

73 Titular/es:  
**ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE  
LAUSANNE (EPFL) (100.0%)  
EPFL-TTO Quartier de l'innovation - J  
1015 Lausanne, CH**

72 Inventor/es:  
**ZUFFEREY, JEAN-CHRISTOPHE;  
BEYELER, ANTOINE y  
FLOREANO, DARIO**

74 Agente/Representante:  
**TOMAS GIL, Tesifonte Enrique**

**ES 2 389 549 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

5 Piloto automático visual para vuelo con obstáculo cercano

## Introducción

10 [0001] Esta presente invención describe una nueva estrategia de control basada en visión para vuelo de crucero autónomo en ambientes posiblemente cargados tales como - pero no limitados a - ciudades, bosques, valles o montañas.

## Técnica anterior

15 [0002] Hasta el momento, la gran mayoría de pilotos automáticos para aviones autónomos dependen de una estimación completa de sus estados de 6 grados de libertad, incluyendo su posición angular y espacial, usando un conjunto de sensores que comprende un GPS y una unidad de medida inercial (IMU). Si bien tal método muestra rendimiento muy bueno para control de vuelo a altitud alta, no permite detección de obstáculo y evitación, y falla en casos donde señales GPS no están disponibles. Mientras tales sistemas se pueden usar para una gama amplia de misiones en lo alto del cielo, algunas tareas requieren vuelo de obstáculo cercano, por ejemplo vigilancia o formación de imágenes en ambientes urbanos o control de ambiente en paisajes naturales. Volar a altitud baja en tales ambientes requiere la capacidad de controlar continuamente obstáculos y reaccionar rápidamente para evitarlos. Para conseguir esto, nos inspiramos de insectos y pájaros, que no usan GPS, pero se basan principalmente en la visión y, en particular, flujo óptico (Egelhaaf and Kern, 2002, Davies and Green, 1994). Este papel propone una manera nueva y simple de mapear señales de flujo óptico para controlar el avión sin estimación de estado en ambientes posiblemente cargados. El método propuesto se puede implementar en un embalaje ligero y de bajo consumo que es adecuado para una amplia gama de aviones, a partir de modelos de juguete a vehículos capaces de misión.

30 [0003] En un sistema de movimiento, el flujo óptico puede servir como un medio para estimar proximidad de obstáculos circundantes (Gibson, 1950, Whiteside and Samuel, 1970, Koenderink and van Doorn, 1987) y así ser usado para evitarlos. No obstante, estimación de proximidad que usa flujo óptico es posible sólo si la egomoción del observador es conocida. Para una aeronave, la egomoción se puede dividir en componentes traslacionales y rotacionales. Índices de rotación sobre los 3 ejes (figura 1) pueden fácilmente ser medidos usando medios de detección de rotación ligeros y poco costosos (por ejemplo giroscopio de índice o, potencialmente, usando el campo de flujo óptico mismo). Los componentes del vector de traslación son en cambio mucho más difícil de medir en una plataforma de vuelo libre. No obstante, en la mayoría de los casos traslación se puede derivar de las dinámicas de la aeronave. Aeronaves de ala fija típicamente tienen desplazamientos laterales o verticales insignificantes, volando esencialmente a lo largo de su eje longitudinal (eje x en la figura 1). El comportamiento de aeronave de alas giratorias es similar a las plataformas de ala fija cuando vuelan a velocidad de vuelo (como oposición a modo casi estacionario donde los modelos de traslación pueden ser más complejos). Por lo tanto restringimos nuestra estrategia de control a los casos en que se supone que el vector de traslación puede ser alineado con el eje longitudinal del avión. Por simplicidad, usamos el término crucero para identificar este régimen de vuelo. Hay que tener en cuenta que en el crucero la amplitud del vector de traslación puede ser medida fácilmente por medio de un sensor de velocidad a bordo (por ejemplo, un tubo pitot, un anemómetro, etc.). La observación que el vector de traslación tiene una dirección fija con respecto al avión permite directamente interpretar mediciones de flujo ópticas como estimaciones de proximidad, que pueden luego ser usadas para evitación de obstáculo. Mientras que en la práctica, hay pequeñas variaciones en la dirección de traslación, están suficientemente limitadas para ser ignoradas.

50 [0004] Otra característica común de la mayoría de las aeronaves de crucero es la manera en que estas dirigen. La mayor parte de éstas tienen una o más alas de producción de elevación (fijadas, giratorias o de aleteo) sobre las que pueden cabecear y alabeo (ver Figura 1 para las convenciones de nombre de eje). En el vuelo de crucero estándar, la conducción se consigue por una combinación de alabeo en la dirección del giro deseado y luego el cabeceo hacia arriba. Es por lo tanto generalmente suficiente generar sólo dos señales de control para girar el avión correspondiente a los ejes controlados por alabeo y cabeceo.

60 [0005] Recientemente, intentos se han hecho para añadir capacidades de evitación de obstáculo para vehículos aéreos no tripulados. Por ejemplo, Scherer, Singh, Chamberlain, y Saripalli (2007) introdujeron un telémetro de láser de 3-kg en un helicóptero autónomo de 95-kg. No obstante, sensores activos como telémetros ultrasónicos de láser, o radares tienden a ser pesados y consumidores de energía, y así excluyen el desarrollo de plataformas ligeras que son ágiles y suficientemente seguras para operar a altitud baja en ambientes cargados.

65 [0006] Flujo óptico, al contrario, requiere sólo un sensor pasivo vision para ser extraído, y contiene información sobre la distancia a los alrededores que puede utilizarse para detectar y evitar obstáculos. Por ejemplo, Muratet, Doncieux, Brière, y Meyer (2005), Barber, Griffiths, McLain, y Beard (2005) y Griffiths, Saunders, Curtis, McLain, y Beard (2007) usaron sensores de flujo ópticos para percibir proximidad de obstáculos. No obstante ambos sistemas todavía

requerían GPS e IMU para control de altitud y de actitud. Otros estudios incluyeron flujo óptico en el control de plataformas volantes (Barrows et al., 2001, Green et al., 2003, Chahl et al., 2004), pero las aeronaves eran sólo parcialmente autónomas, regulando exclusivamente altitud o dirección y requiriendo así todavía control manual parcial. Flujo óptico ha recibido alguna atención para sistemas para interiores para los que GPS es indisponible y limitaciones de pesos son incluso más fuertes ((Ruffier y Franceschini, 2005, Zufferey et al., 2007), pero aún tiene que ser demostrada autonomía completa. Finalmente, Neumann and Bühlhoff (2002) propusieron un piloto automático completo basado en señales visuales, pero el sistema todavía se basaba en un mecanismo de estabilización de actitud separado que requeriría un medio adicional para medir verticalidad (por ejemplo, un IMU).

[0007] En el documento Green W. et al "Optic-Flow-Based Collision Avoidance", IEEE Robotics & Automation magazine, IEEE Service center, Piscataway, NJ, US vol. 14, N° 1, March 2008, el flujo óptico se utiliza para sentir cuando un obstáculo está dentro de dos radios de rotación del avión, que evita la colisión desviando completamente el timón. El flujo óptico se pasa a un detector de umbral y actúa en el timón cuando el valor excede el umbral. Un ángulo de observación se utiliza para actuar en el timón en un lado y el otro ángulo de observación se utiliza para actuar sobre el timón por otro lado. Los flujos ópticos de diferentes direcciones de vista no son por lo tanto combinados para controlar el eje de guiñada. Esta estrategia de control fallaría tan pronto como más de un obstáculo estuviera produciéndose alrededor de la trayectoria de vuelo. Además, un inconveniente de esta estrategia de control simplificada es que no permite controlar diferentes ejes tal como la posición y la altitud del avión.

Breve descripción de la invención

[0008] A diferencia de estos resultados, el planteamiento de la presente invención es un piloto automático que se basa exclusivamente en la información giroscópica y visual, sin requisito para estimación explícita de estado ni mecanismos de estabilización adicionales.

[0009] Este planteamiento se basa en un método y un dispositivo para evitar colisión con obstáculos por un avión con un eje longitudinal definido por su dirección de vuelo como se describe por reivindicación 1, respectivamente por reivindicación 9.

Breve descripción de las figuras

[0010] La presente invención será mejor entendida gracias a las figuras adjuntas en las que:

- Figura 1: sistema de coordenadas aerodinámico del marco de referencia de avión. Para conveniencia, también se ha indicado el nombre de las tres direcciones de rotación.

- Figura 2: visión de conjunto de los pasos requeridos para mapeo de los datos proporcionada por un dispositivo de imagen y medios de detección de índice en señales de control

- figuras 3a-c: un campo-de-visión grande es deseable para detectar obstáculos potencialmente peligrosos en la trayectoria de aeronave.

- Figura 3a: una imagen de ejemplo en el campo de visión frontal tomada con una lente de ojo de pez.

- Figura 3b: el sistema de coordenadas de plano de imagen usado en todo este texto.  $\Psi$  es el ángulo acimutal ( $\Psi \in [0;2\pi]$ ), con  $\Psi = 0$  correspondiente a la parte dorsal del campo de visión y en extensión positiva hacia la izquierda.  $\theta$  es el ángulo polar ( $\theta \in [0;\pi]$ ).

- Figura 3c: dibujo en perspectiva del mismo sistema de visión.

- Figura 4: representación subjetiva de la región donde estimaciones de proximidad son útiles y posibles para anticipación y evitación de obstáculo. La imagen de ojo de pez original es desvanecida donde no es útil.

- Figura 5: muestreo del campo de visión. N puntos de muestreo están uniformemente distanciados en un círculo de

radio  $\hat{\theta}$ . En esta ilustración,  $N=16$  and  $\theta = 45^\circ$ .

- Figura 6: visión de conjunto o la arquitectura de control.

- Figura 7a: distribución cualitativa de pesos  $w_k^P$  para la generación de la señal de control de cabeceo. La flecha en el centro indica la dirección de cabeceo para una señal positiva.

- Figura 7b: distribución de peso según ecuación (4).

Figura 8a: distribución cualitativa de pesos  $w_k^R$  para la generación de la señal de control de alabeo. La flecha en el centro indica la dirección de alabeo para una señal positiva.

- Figura 8b: distribución de peso según ecuación (5).

- Figura 9: trayectoria de aeronave simulada cuando se libera 80 m sobre una superficie plana, orientado boca abajo, con un cabeceo morro abajo de  $45^\circ$  y velocidad cero.

- Figura 10: imagen del entorno simulado, que comprende obstáculos de tamaño 80x80 m y altura 150 m rodeados

por paredes grandes.

- Figura 11: trayectorias de aeronaves simuladas en el entorno de prueba.

- Figura 12: versión genérica de la arquitectura de control propuesta en este papel.

5 2 Descripción detallada de la invención

[0011] La estrategia de control propuesta basada en visión requiere los pasos ilustrados en figura 2 para mapeo de los datos proporcionados por los sensores introducidos (típicamente un dispositivo de imagen - también llamado sistema de visión - mirando hacia adelante con un campo de visión grande (p. ej. figura 3a) y tres giroscopios de índice ortogonales como medios de detección de índice) en señales que pueden utilizarse para conducir los ejes controlados del avión. Primero, el flujo óptico debe ser extraído de la información proporcionada por el sistema de visión introducido.

15 **2.1 Estimación de proximidad usando flujo óptico inducido por traslación**

[0012] La propiedad fundamental de flujo óptico que habilita estimación de proximidad es frecuentemente llamada paralaje de movimiento (Whiteside y Samuel, 1970). Esencialmente, declara que el componente de flujo óptico que se induce por movimiento de traslación (llamado de aquí en adelante flujo óptico traslacional o flujo óptico inducido por traslación) es proporcional a la magnitud de este movimiento e inversamente proporcional a la distancia para obstáculos en el entorno. Es también proporcional al seno del ángulo  $\alpha$  entre la dirección de traslación y la dirección de búsqueda.

Esto puede ser escrito

$$p_T(\theta, \psi) = \frac{|\mathbf{T}| \sin(\alpha)}{D(\theta, \psi)} \quad (1)$$

donde  $p_T(\theta, \psi)$  es la amplitud de flujo óptico inducido por traslación visto en dirección  $(\theta, \psi)$  (ver figura 3 para el convenio de sistema de coordenadas),  $\mathbf{T}$  es el vector de traslación,  $D(\theta, \psi)$  es la distancia al obstáculo visto en dirección  $(\theta, \psi)$  y  $\alpha$  es el ángulo entre el vector de traslación  $\mathbf{T}$  y el ángulo de observación  $(\theta, \psi)$ .

[0013] Consecuentemente, para estimar proximidad de obstáculos, se recomienda excluir el componente de flujo óptico debido a rotaciones, un procesado conocido como derotación e implementado por algún medio de procesamiento. En una aeronave, esto se puede conseguir prediciendo el flujo óptico generado por rotación señalada por giroscopios de índice o inferida de campo de flujo óptico, y luego substrayendo esta predicción del flujo óptico total extraído de datos de visión. Alternativamente, el sistema de visión puede ser activamente girado para contrarrestar los movimientos del avión.

[0014] En el contexto de vuelo de crucero, el vector de traslación es esencialmente alineado con el eje principal de la aeronave todo el tiempo.

Si el sistema de visión se fija a su plataforma de tal manera que su eje óptico se alinea con la dirección de traslación, el ángulo  $\alpha$  en ecuación (1) es igual al ángulo polar  $\psi$  (también llamado excentricidad). La ecuación (1) puede después ser reordenada para expresar la proximidad al obstáculo  $\mu$  (es decir inverso a distancia, alguna vez también referido como acercamiento):

$$\mu(\theta, \psi) = \frac{1}{D(\theta, \psi)} \propto \frac{p_T(\theta, \psi)}{\sin(\theta)} \quad (2)$$

[0015] Esto significa que la magnitud de flujo óptico inducido por traslación en un ángulo de observación, como generado por algún medio de procesamiento, puede ser directamente interpretado por algunos medios de cálculo como una medida de proximidad de obstáculos en esa dirección, a escala con el seno de excentricidad  $\psi$  en el ángulo de observación.

50 **2.2 Ángulos de observación e integración espacial**

[0016] La siguiente cuestión se refiere a la selección de los ángulos de observación en los que el flujo óptico inducido por traslación debería ser medido, cuántas mediciones deberían ser tomadas, y como deberían ser combinadas estas mediciones para generar señales de control para la aeronave. Para reducir los requisitos computacionales, es deseable reducir el número de mediciones en la medida de lo posible. Resulta que no todos los ángulos de observación en el campo de visión tienen la misma relevancia para control de vuelo. Para  $\psi > 90^\circ$  estas estimaciones corresponden a obstáculos que están detrás de la aeronave y no requieren anticipación o evitación. Para  $\psi$  valores cerca 0, la magnitud de mediciones de flujo óptico se irá reduciendo hasta cero (es decir en el centro del campo de visión, porque es proporcional a  $\sin^2(\psi)$  (ver ecuación (1)). Ya que la resolución de sistema de visión

limitará la capacidad para medir cantidades pequeñas de flujo óptico, la estimación de proximidad no será preciso a excentricidades pequeñas. Estas limitaciones definen un dominio en el campo de visión abarcando aproximadamente ángulos polares de alrededor de  $\theta = 45^\circ$ , ilustrado en figura 4, donde medición de flujo óptico son significativas para el control del curso de una aeronave.

[0017] Proponemos medir ecuación (2) a puntos N uniformemente extendidos en un círculo definido por un ángulo polar dado  $\hat{\theta}$ . Estos puntos N se definen por ángulos

$$(\theta_k; \psi_k) = (\hat{\theta}; k \frac{2\pi}{N}), k = 0, 1, \dots, N-1$$

Este muestreo se ilustra en figura 5.

[0018] Las señales de control del avión, tales como alabeo y cabeceo, se pueden generar a partir de una suma lineal de las mediciones ponderadas:

$$c^j = \frac{\kappa^j}{N \cdot \text{sen}(\hat{\theta})} \cdot \sum_k p_T(\hat{\theta}, k \frac{2\pi}{N}) \cdot w_k^j \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

donde  $c^j$  es la  $j^{\text{th}}$  señal de control,  $w_k^j$  el conjunto asociado de pesos y  $\kappa^j$  una ganancia para ajustar la amplitud de la señal de control. Este proceso de suma es similar a lo que es creído que pasa en las células tangenciales de insectos de vuelo (Krapp et al., 1998); a saber, una integración de campo amplio de un número relativamente grande de estimaciones de movimiento en un número reducido de señales relevantes de control.

[0019] De una manera más genérica, este proceso se puede ver como una transformación de dos etapas de proximidades en señales de control. Primero, las proximidades son convertidas individualmente usando una función de conversión específica implementada por algunos medios de conversión (p. ej. una multiplicación por un peso). Segundo, las proximidades convertidas se combinan por algunos medios de combinación (p. ej. usando una suma) en una señal de control. Finalmente, las señales de control son luego usadas por algunos medios de accionamiento para conducir los ejes controlados del avión. Mientras este método de suma ponderada simple es suficiente para autopilotos funcionales implementados, puede existir la necesidad de usar más funciones y combinaciones de conversión más compleja, posiblemente no lineales.

### 2.3 Ejes controlados de alabeo y cabeceo

[0020] La mayoría de aviones son dirigidos usando principalmente dos señales de control correspondientes a rotaciones de alabeo y cabeceo (tener en cuenta que señales de control adicionales, por ejemplo para eje de guiñada, se puede generar de forma similar). Para usar el planteamiento descrito en la sección precedente, dos

conjuntos de pesos  $w_k^R$  y

$w_k^P$  deben ser concebidos, para control de alabeo y, respectivamente, control de cabeceo. Con un controlador de velocidad para regular velocidad de crucero, este sistema forma un piloto automático completo como ilustrado en figura 6. Datos del dispositivo de imagen y medios de detección de rotación se utilizan para extraer flujo óptico inducido por traslación. Las mediciones de flujo óptico  $p_T$  son luego combinadas linealmente usando dos conjuntos

de pesos  $w_k^R$  y  $w_k^P$ , correspondientes a los ejes controlados por cabeceo y alabeo. En paralelo, el impulso se controla por un simple regulador para mantener velocidad de crucero, basado en mediciones de un sensor de velocidad.

[0021] Vamos a considerar primero la señal de control de cabeceo  $c^P$  (Figura 7). Señales de proximidad en la región ventral (es decir  $\theta$  cerca de  $180^\circ$ , ver figura 3 para convenios angulares) corresponden a la presencia de obstáculos en la parte ventral del avión. Pesos correspondientes deberían así ser positivos para generar una señal de control positiva que a su vez producirá una maniobra de cabeceo hacia arriba que conduce a evitación del obstáculo. Asimismo, pesos en la región dorsal correspondientes al área sobre la aeronave (es decir  $\theta$  cerca de  $0^\circ$ ) deberían ser negativos para generar maniobras de cabeceo hacia abajo. Estimaciones de proximidad laterales (es decir  $\theta$  cerca de  $\pm 90^\circ$ ) no deberían influir el comportamiento de cabeceo, y así pesos correspondientes deberían ser

establecidos a cero. Una vía posible de que determina estos pesos se da por (figura 7b):

$$w_k^P = -\cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{N}\right) \quad (4)$$

5 [0022] Usando el mismo razonamiento, puede ser derivada la distribución cualitativa necesaria para los pesos relacionado con la señal de alabeo (figura 8). Los pesos correspondientes a la izquierda del avión deberían ser positivos, para iniciar un giro hacia la derecha en reacción a la detección de un obstáculo a la izquierda. Inversamente, los pesos a la derecha deberían ser negativos. Puesto que los obstáculos en la región ventral ( $\psi = 180^\circ$ ) se evitan solo por señal de cabeceo, los pesos en esta región deberían ser establecidos a cero. A primera vista, el mismo razonamiento debería aplicarse para la región dorsal. No obstante, haciéndolo de esa manera sería problemático cuando el avión está en una posición boca abajo (es decir con la parte ventral hacia el cielo). En tales situaciones, puede ser deseable dirigir el avión de nuevo a una actitud vertical y nivelar. Esto se puede conseguir extendiendo los pesos no nulos de las regiones laterales hasta el campo-de-visión dorsal, como ilustrado en la figura 8a. Estos pesos, combinados a la proximidad del suelo en la región dorsal, generarán una señal de alabeo conduciendo a la nivelación del avión. La siguiente ecuación es una vía para implementar tal distribución de peso (figura 8b):

$$w_k^R = \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{N}\right) \quad (5)$$

### 3 Comprobación de concepto

25 [0023] Para valorar el rendimiento del piloto automático completo descrito arriba (figura 6), lo evaluamos en dos ambientes simulados. El primero, un entorno plano, sin obstáculos se utiliza para mostrar la capacidad del piloto automático para recuperar de situaciones extremas y regular vuelo a una altitud y actitud estable. El segundo entorno, imitando un entorno urbano, se utiliza para demostrar el rendimiento de evitación de obstáculo completo.

#### 3.1 Disposición de simulación

30 [0024] Para probar la estrategia de control, usamos un embalaje de simulación llamado Enlil que se basa en OpenGL para rendición de datos de imagen y el Open Dynamics Engine (ODE) para la simulación de la física.

35 [0025] Usamos un modelo de dinámica desarrollado a medida en base a los derivados de estabilidad aerodinámica (Cooke et al., 1992) para una plataforma de ala de vuelo disponible comercialmente llamada Swift que nosotros usamos como plataforma para investigación robótica aérea en nuestro laboratorio (Leven et al, 2007). Los derivados asocian un coeficiente para cada aportación aerodinámica para cada una de las 6 fuerzas y momentos que actúan sobre el avión y los suman linealmente. Las fuerzas son luego pasadas a ODE para la integración cinemática. Hasta el momento, estos coeficientes han sido sintonizados a mano para reproducir el comportamiento de la plataforma real. Mientras el modelo resultante no puede ser muy preciso, no exhibe dinámicas que son pertinentes para esta especie de aeronave y es así suficiente para demostrar el rendimiento de nuestro piloto automático.

45 [0026] Hay muchos algoritmos de extracción de flujo óptico que han sido desarrollados y podrían ser usados (Horn and Schunck, 1981, Nagel, 1982, Barron et al., 1994). El que nosotros usamos se llama algoritmo de interpolación de imagen (I2A) (Srinivasan, 1994). Para desrotar las estimaciones de flujo óptico, es decir, eliminar la parte inducida por rotación para mantener solo el componente traslacional como discutido en la sección anterior, simplemente sustraímos el valor de la velocidad de rotación del robot, como sería proporcionado por giroscopios de índice en una plataforma real.

50 [0027] Tabla 1 resume los parámetros que fueron usados en la simulación presentada en este documento. El regulador de velocidad fue un regulador proporcional simple con ganancia establecida en 0,1 y punto de ajuste en 25 m/s.

Tabla 1: Valores de parámetro usados en la simulaciones

Parámetro	Valor
$\theta, \delta$	45°
$N$	16
$\kappa^E$	5
$\kappa^A$	60
$w_k^E$	según la ec (4)
$w_k^A$	según la ec. (5)

3.2 Volar sobre un suelo plano

5 [0028] La prueba inicial para nuestra estrategia de control consistió en volar sobre un suelo infinitamente plano sin obstáculos. El resultado de una simulación de esta situación se muestra en figura 9. Para probar la capacidad del controlador para recuperar de situaciones extremas, el avión comenzó boca abajo, con una posición de 45° morro-abajo y una velocidad nula. Inmediatamente, el avión recuperó una posición de nivel y alcanzó su velocidad nominal. Aunque altitud no era explícitamente regulada en nuestra arquitectura de control, el sistema rápidamente estabilizó y mantuvo una altitud constante (de aproximadamente 50 m sobre el suelo en este caso). Tal comportamiento surge del equilibrio entre la gravedad que tira el avión en dirección al suelo y el accionamiento ascendente del controlador que detecta el suelo como un obstáculo.

15 [0029] En la figura 9, se ilustró la aeronave cuando liberada 80 m sobre una superficie plana, inicializada boca abajo con posición de 45° morro-abajo y velocidad nula. Al cabo de unos segundos, la aeronave se recupera de esta actitud y comienza a volar a lo largo de una trayectoria recta, como se ha visto en el gráfico superior. El gráfico central muestra que al principio, el avión pierde rápidamente algo de altitud debido al hecho de que comienza un velocidad cero y posición de morro-abajo, y luego se recupera y mantiene una altitud constante. El gráfico inferior muestra la distribución de flujo óptico traslacional alrededor del campo de visión (puntos más luminosos significan flujo óptico inducido por traslación más alto). La distribución rápidamente cambia de la región dorsal a la región ventral como el avión se recupera de la posición boca abajo. El controlador luego mantiene el valor máximo de la distribución en la región ventral para el resto de la prueba.

3.3 Volar entre edificios

25 [0030] Para probar la capacidad de evitación de obstáculo de la estrategia de control, ejecutamos simulaciones en un entorno de prueba de 500x500-m rodeado por paredes grandes comprendiendo obstáculo de tamaño 80x80 m y altura 150 m (figura 10). Obstáculos del tamaño de edificios fueron colocados a intervalos regulares dentro de esta escenario (cuadrados rojos en figura 11). La aeronave se inició en lugares al azar, por debajo de la altura de los obstáculos y entre éstos, y con una velocidad nula. Fue luego controlada usando el piloto automático durante 20 segundos. La proyecciones en 2D de 512 trayectorias se muestran en figura 11. Este resultado ilustra la capacidad de nuestra estrategia de control para evitar los obstáculos en este entorno, independientemente de su posición relativa con respecto al avión. Los casos raros (menos que 10) en los que el avión se acercó mucho o cruzó los obstáculos no corresponden a colisiones, ya que el avión a veces vuela encima de éstos.

4 Discusión

40 [0031] En esta sección nosotros discutimos varias extensiones de la arquitectura de control presentada arriba, que se puede usar para atender necesidades específicas de otras plataformas o ambientes.

4.1 Estimación de flujo óptico traslacional

45 [0032] Mientras la estrategia de control que nosotros proponemos tiene un requisito de potencia de computación limitada, los algoritmos de extracción de flujo óptico pueden ser computacionalmente costosos. Por otra parte, se recomienda un sistema de visión con un campo-de-visión relativamente amplio - típicamente más de 100° - para adquirir datos visuales que son pertinentes para control (ver figura 4). Por lo tanto, se precisará diseño de hardware bien hecho para limitar consumo y peso. El desarrollo inicial en nuestro laboratorio muestra que un sistema de visión de aproximadamente 10 g de peso y sistema electrónico de 30 g de peso y que consume aproximadamente 2 W son suficientes para ejecutar nuestro sistema, permitiendo que se desarrolle una plataforma con un peso total inferior a 300 g.

[0033] Para hacer sistemas incluso más ligeros, podrían ser usados planteamientos alternativos para extracción de flujo óptico usando diferentes tipos de dispositivos de imágenes. Primero, pueden utilizarse chips de flujo óptico diseñados a medida que computan flujo óptico al nivel del sensor de visión (p. ej. Moeckel and Liu, 2007) para descargar el sistema electrónico de la extracción de flujo óptico. Esto permitiría el uso de microcontroladores más pequeños para poner en práctica el resto de la estrategia de control. También, el dispositivo de imágenes puede ser hecho de un conjunto de los chips ópticos encontrados en los ratones de ordenador de módem, siendo dedicado cada chip a un único ángulo de observación. Estos chips se basan en la detección de desplazamiento de imagen, que es esencialmente flujo óptico, y podrían potencialmente ser usados para aligerar más el juego de sensor eliminando el requisito de una lente de gran ángulo de visión.

[0034] Finalmente, cualquier extracción de flujo óptico realista es posible que contenga alguna cantidad de ruido. Este ruido puede surgir de diferentes fuentes, incluyendo ausencia de contraste, solapamiento (en el caso de texturas con frecuencias espaciales altas) y el problema de apertura (ver por ejemplo Mallot, 2000). Además, el movimiento de objetos en la escena pueden también generar flujo óptico falso que se puede considerar como ruido. Para alcanzar la media del ruido, un gran número de ángulos de observación y estimaciones de flujo óptico inducido por traslación correspondientes se pueden requerir para obtener una simulación estable.

#### 4.2 Movimiento sacádico

[0035] En la mayoría de situaciones, el comportamiento simétrico es deseable. Por esta razón, muchos conjuntos útiles de pesos (o más generalmente, funciones de conversión) serán simétricos también, como es el caso para las distribuciones propuestas en ecuación (4) y ecuación (5). No obstante, al enfrentar situaciones determinadas - como volar perpendicularmente en dirección a una superficie plana - las señales de control generadas pueden quedar a un valor muy bajo, aunque el avión esté acercándose a un obstáculo. Aunque este problema ocurre raramente en la práctica, puede ser necesario enfrentarlo explícitamente. Esta situación típicamente mostrará un aumento de flujo óptico masivo, global en todas direcciones, y puede ser detectada usando una señal de control adicional  $c^s$  con

pesos correspondientes  $w_k^s = 1$  para todos k. Un movimiento sacádico de emergencia, es decir una secuencia de evitación de bucle abierto que ejecuta un giro rápido, se puede desencadenar cuando esta señal alcanza un umbral. Durante el movimiento sacádico, la señal de emergencia  $c^s$  se puede monitorear y la maniobra puede ser abortada tan pronto como  $c^s$  disminuye por debajo del umbral.

#### 4.3 Muestreo alternativo del campo de visión

[0036] Por simplicidad, previamente sugerimos el uso de un conjunto simple de ángulos de observación, a lo largo de un único círculo a  $\theta = \hat{\theta}_i$  para seleccionar los lugares donde son realizadas la estimación de proximidad. Los resultados muestran que este planteamiento es suficiente para obtener el comportamiento deseado. No obstante, algunos tipos de plataformas o ambientes pueden requerir un conjunto más denso de ángulos de observación. Esto puede también ser útil para alcanzar la media del ruido en estimación de flujo óptico, como se ha mencionado anteriormente. Hay algunos de los muchos planteamientos que pueden ser usados.

- Una posibilidad es usar diferentes círculos a  $\theta = \hat{\theta}_i, i = 1, \dots, M$ . Hacer esto hace posible reutilizar simplemente el mismo conjunto de pesos para cada círculo, aumentando eficazmente la cobertura visual con menor aumento de la complejidad de control.
- Algunos algoritmos de extracción de flujo óptico típicamente proporcionan estimaciones que son regularmente distanciadas en una red en la imagen. Mientras tal esquema de muestreo no es tan intuitivo como el circular que nosotros proponemos, puede todavía ser usado fácilmente seleccionando sólo las estimaciones que caen dentro de la región de interés descrita en sección 2.2. Usando las mismas distribuciones como dadas en ecuación (4), los pesos correspondientes al control de cabeceo se convierten en:

$$w_k^p = -\cos(\psi_k) \quad (6)$$

donde  $\psi_k$  es el ángulo acimutal para el punto de muestreo  $k^{\text{th}}$ . Los otros conjuntos de pesos pueden ser adaptados de forma similar. Las señales de control son luego computadas de la siguiente manera:

$$c^j = \frac{\kappa^j}{N} \sum_k \frac{P_{T,k}}{\text{sen}(\theta_k)} \cdot w_k^j \quad (7)$$

donde  $\theta_k$  es el ángulo polar para el punto de muestreo  $k^{\text{th}}$ .

- Puede ser deseable comportarse de forma diferente para obstáculos en el centro del campo de visión que para obstáculos que son más excéntricos a la trayectoria de vuelo, por ejemplo porque es más probable que se encuentren en la trayectoria del avión. Por esta razón, puede, en general, ser útil distribuir pesos de manera que sea dependiente de  $\theta_k$  al igual que  $\psi_k$ , es decir:

$$w_k^j = f^j(\theta_k, \psi_k) \quad (8)$$

donde  $(\theta_k; \psi_k)$  son las coordenadas de la estimación de flujo óptico  $k^{\text{th}}$ .

#### 4.4 Conjunto mínimo de ángulos de observación

[0037] En aras a generalizar, hemos considerado hasta el momento N ángulos de observación, donde N debería ser tan grande como permita la puesta en práctica. No obstante, en caso de limitaciones muy fuertes, el número mínimo de ángulos de observación para un avión completamente autónomo, simétrico es 3: izquierda, derecha y hacia abajo. El par de izquierda/derecha de ángulo de observación se utiliza para conducir el eje controlado de alabeo, mientras que el ángulo de observación de fondo se utiliza para conducir el eje controlado de cabeceo. Para esta puesta en práctica minimalista, el ángulo de observación superior puede ser omitido en base a la suposición de que no es probable que ningún obstáculo sea encontrado sobre el avión, como es el caso en la mayoría de los ambientes.

#### 4.5 Regulación de velocidad

[0038] En nuestra descripción, silenciosamente asumimos que la velocidad hacia adelante es mantenida constante en todo momento. Mientras tal regulación puede ser puesta en práctica relativamente fácil en plataformas reales, puede a veces ser deseable volar a velocidades diferentes dependiendo de los requisitos de la tarea. Nosotros discutimos aquí los dos planteamientos que se pueden usar en este caso.

[0039] La opción más simple es ignorar variaciones de velocidad y considerar estimación de proximidad como una información de tiempo-a-contacto (Lee, 1976, Ancona and Poggio, 1993). Para una distancia dada al obstáculo, una velocidad más rápida producirá un valor de flujo óptico más alto que una velocidad reducida (ecuación (1)). El avión luego evitara obstáculos a una distancia superior cuando está volando más rápido lo que es un comportamiento perfectamente razonable (Zufferey, 2005).

[0040] Alternativamente, la velocidad hacia adelante se puede medir por el sensor de velocidad y explícitamente tomada en consideración en la computación de las señales de control dividiéndolas por la amplitud de traslación  $|T|$ . Por ejemplo, ecuación (3) se convierte en:

$$c^j = \frac{\kappa^j}{|T| \cdot N \cdot \text{sen}(\theta)} \cdot \sum_k p_T(\hat{\theta}, k \frac{2\pi}{N}) \cdot w_k^j \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

#### Referencias

[0041]

N. Ancona and T. Poggio. Optical flow from 1D correlation: Application to a simple time-to-crash detector. In Proceedings of Fourth International Conference on Computer Vision, Berlin, pages 209-214, 1993.

D.B. Barber, S. Griffiths, T.W. McLain, and R.W. Beard. Autonomous landing of miniature aerial vehicles. In AIAA Infotech@Aerospace, 2005 .

J.L. Barron, D.J. Fleet, and S.S. Beauchemin. Performance of optical flow techniques. International Journal of Computer Vision, 12 (1):43-77, 1994 .

G.L. Barrows, C. Neely, and K.T. Miller. Optic flow sensors for MAV navigation. In Thomas J. Mueller, editor, Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications, volume 195 of Progress in Astronautics and Aeronautics, pages 557-574. AIAA, 2001 .

J.S. Chahl, M.V. Srinivasan, and H. Zhang. Landing strategies in honeybees and applications to uninhabited airborne

- vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 23 (2):101-110, 2004 .
- J.M. Cooke, M.J. Zyda, D.R. Pratt, and R.B. McGhee. Npsnet: Flight simulation dynamic modeling using quaternions. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1 (4):404-420, 1992 .
- 5 M. N. O. Davies and P. R. Green. *Perception and Motor Control in Birds*. Springer-Verlag, 1994 .
- M. Egelhaaf and R. Kern. Vision in flying insects. *Current Opinion in Neurobiology*, 12(6): 699-706, 2002 .
- 10 J.J. Gibson. *The Perception of the Visual World*. Houghton Mifflin, Boston, 1950 .
- W.E. Green, P.Y. Oh, K. Sevcik, and G.L. Barrows. Autonomous landing for indoor flying robots using optic flow. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Washington, D.C., volume 2, pages 1347-1352, 2003 .
- 15 S. Griffiths, J. Saunders, A. Curtis, T. McLain, and R. Beard. Obstacle and Terrain Avoidance for Miniature Aerial Vehicles, volume 33 of *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering*, chapter I.7, pages 213-244. Springer, 2007.
- 20 B.K. Horn and P. Schunck. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17:185-203, 1981 .
- J.J. Koenderink and A.J. van Doorn. Facts on optic flow. *Biological Cybernetics*, 56:247-254, 1987 .
- 25 H.G. Krapp, B. Hengstenberg, and R. Hengstenberg. Dendritic structure and receptive-field organization of optic flow processing interneurons in the fly. *Journal of Neurophysiology*, 79:1902-1917, 1998 .
- D.N. Lee. A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5:437-459, 1976 .
- 30 S. Leven, J.-C. Zufferey, D. Floreano. A low-cost, safe and easy-to-use flying platform for outdoor robotic research and education. In *International Symposium on Flying Insects and Robots*. Switzerland, 2007 .
- H.A. Mallot. *Computational Vision: Information Processing in Perception and Visual Behavior*. The MIT Press, 2000 .
- 35 R. Moeckel and S.-C. Liu. Motion Detection Circuits for a Time-To-Travel Algorithm. In *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 3079-3082. 2007 .
- L. Muratet, S. Doncieux, Y. Briere, and J.A. Meyer. A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4): 195-209, 2005 .
- 40 H.H. Nagel. On change detection and displacement vector estimation in image sequences. *Pattern Recognition Letters*, 1: 55-59, 1982 .
- T.R. Neumann and H.H. Bülthoff. Behavior-oriented vision for biomimetic flight control. In *Proceedings of the EPSRC/BBSRC International Workshop on Biologically Inspired Robotics*, pages 196-203, 2002 .
- 45 F. Ruffier and N. Franceschini. Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4): 177-194, 2005 .
- 50 S. Scherer, S. Singh, L. Chamberlain, and S. Saripalli. Flying fast and low among obstacles. In *Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Robotics and Automation*, pages 2023-2029, 2007 .
- M.V. Srinivasan. An image-interpolation technique for the computation of optic flow and egomotion. *Biological Cybernetics*, 71:401-416, 1994 .
- 55 J.H. van Hateren and C. Schilstra. Blowfly flight and optic flow. II. head movements during flight. *Journal of Experimental Biology*, 202:1491-1500, 1999 .
- T.C. Whiteside and G.D. Samuel. Blur zone. *Nature*, 225:94-95, 1970.
- 60 J.-C. Zufferey. Bio-inspired vision-based flying robots. Ph.D. thesis, EPFL, 2005 .
- J.-C. Zufferey, A. Klaptocz, A. Beyeler, J.-D. Nicoud, and D. Floreano. A 10-gram vision-based flying robot. *Advanced Robotics, Journal of the Robotics Society of Japan*, 21(14):1671-1684, 2007 .
- 65

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para evitar colisión de un avión con obstáculos con un eje longitudinal definido por su dirección de vuelo comprendiendo los pasos de:
- 5 a) definir al menos tres ángulos de observación extendidos dentro de campo de visión frontal  
b) adquirir índices de rotación del avión por medios de detección de rotación,  
c) adquirir datos visuales en al menos dichos ángulos de observación por al menos un dispositivo de imagen,  
10 d) determinar flujo óptico inducido por traslación en dichos ángulos de observación en base a los índices de rotación y los datos visuales,  
e) para cada ángulo de observación, estimar la proximidad de obstáculos de dicho ángulo de observación en base a al menos el flujo óptico inducido por traslación relacionado con dicho ángulo de observación,  
f) para cada eje controlado (cabeceo, alabeo y/o guiñada), definir para cada proximidad, una función de conversión para producir una proximidad convertida relacionada con dicho eje controlado,  
15 g) determinar una señal de control para cada eje controlado combinando linealmente las proximidades convertidas usando un conjunto de pesos por eje,  
h) usar dichas señales de control para conducir los ejes controlados del avión.
2. Método según la reivindicación 1, comprendiendo además el paso de:
- 20 - adquirir una imagen por el dispositivo de imagen que incluye los ángulos de observación y extraer los datos visuales relacionados con cada ángulo de observación.
3. Método según la reivindicación 1, en el que el dispositivo de imagen es hecho de un conjunto de sensores de flujo óptico, cada uno dedicado a cada ángulo de observación.
- 25 4. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, donde el medio de detección de rotación es hecho de medios giroscópicos y/o sensores inerciales.
5. Método según cualquiera de reivindicaciones 1 a 3, donde el medio de detección de rotación está usando el dispositivo de imagen, viniendo determinados los datos de rotación por tratamiento del flujo óptico extraído de los datos visuales.
- 30 6. Método según cualquiera de reivindicaciones 1 a 5, donde los ángulos de observación se extienden a una excentricidad dada con respecto al eje longitudinal del avión, y cada función de conversión es una multiplicación por una ganancia específica.
- 35 7. Método según cualquiera de reivindicaciones 1 a 5, donde los ángulos de observación se extienden a varias excentricidades con respecto al eje longitudinal del avión, y cada función de conversión es una multiplicación por una ganancia específica y una división por el seno de la excentricidad del ángulo de observación correspondiente.
- 40 8. Método según cualquiera de reivindicaciones 1 a 7, donde la combinación de las proximidades convertidas es una función de promedio.
9. Dispositivo para evitar colisión con obstáculos por un avión con un eje longitudinal definido por su dirección de vuelo comprendiendo:
- 45 a) medios para definir al menos tres ángulos de observación extendidos dentro de campo de visión frontal visual,  
b) medios de detección para adquirir índices de rotación del avión,  
c) al menos un dispositivo de imagen para adquirir datos visuales en dichos ángulos de observación,  
50 d) medios de procesamiento para determinar flujo óptico inducido por traslación en dicho ángulo de observación en base a los índices de rotación y los datos visuales adquiridos,  
e) medios de cálculo para estimar para cada ángulo de observación la proximidad de obstáculos de dicho ángulo de observación en base a al menos el flujo óptico inducido por traslación relacionado con dicho ángulo de observación,  
f) medios para definir para cada proximidad, para cada eje controlado (cabeceo, alabeo y/o guiñada), una función de conversión para producir una proximidad convertida relacionada con dicho eje controlado,  
55 g) medios para determinar una señal de control para cada eje controlado combinando linealmente las proximidades convertidas usando un conjunto de pesos por eje,  
h) medios de accionamiento para usar dichas señales de control para conducir los ejes controlados del avión.
10. Dispositivo según la reivindicación 9, en el que el dispositivo de imagen es hecho de un conjunto de sensores de flujo óptico, cada uno dedicado a cada ángulo de observación.
- 60 11. Dispositivo según las reivindicaciones 9 o 10, donde los medios de detección de rotación son hechos de sensores giroscópicos y/o inerciales.

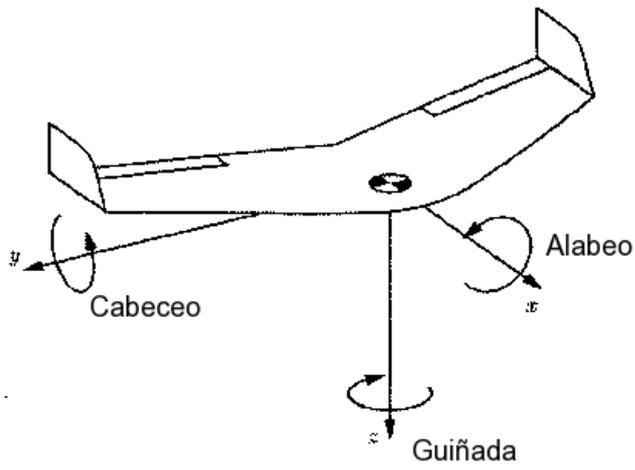


Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3a

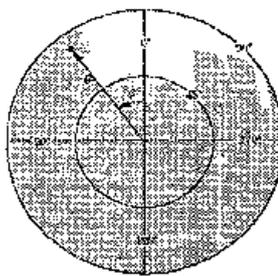


Fig. 3b

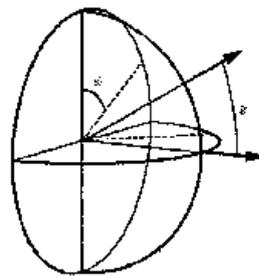


Fig. 3c

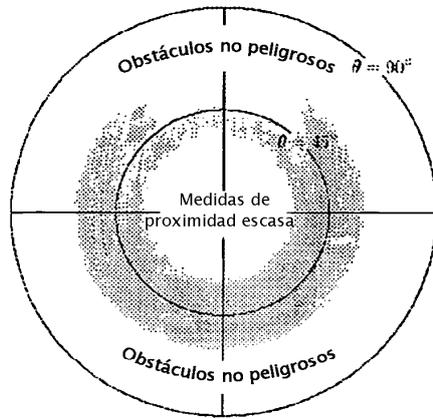


Fig. 4

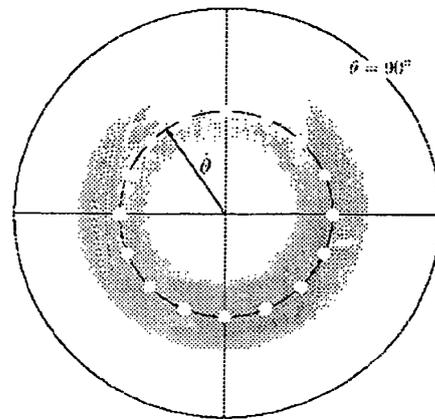


Fig. 5

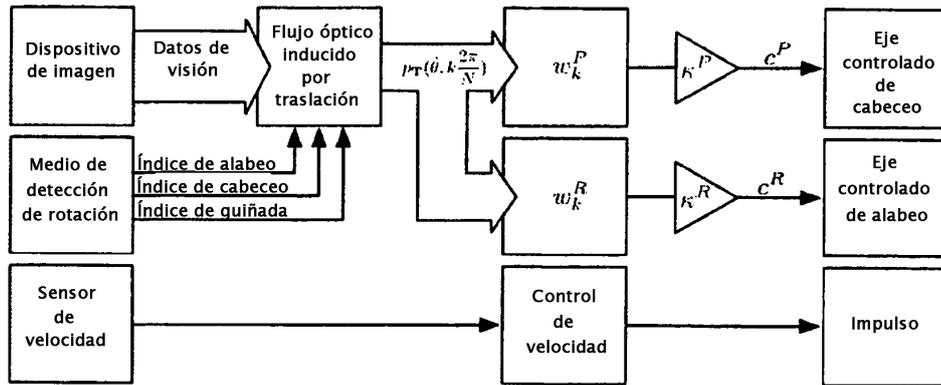


Fig. 6

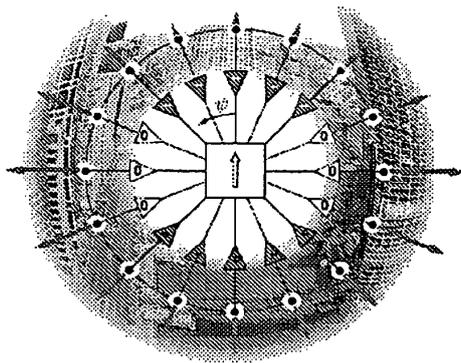


Fig. 7a

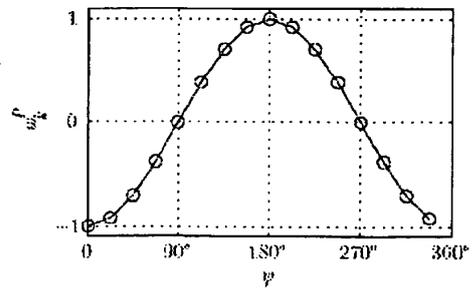


Fig. 7b

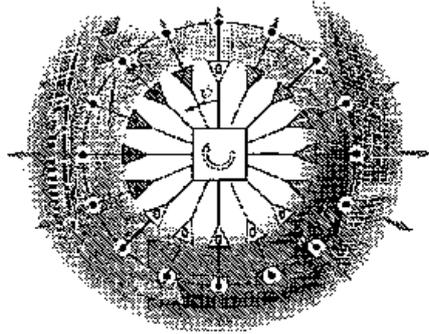


Fig. 8a

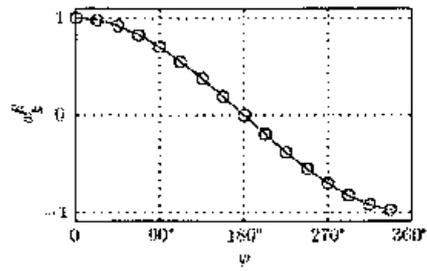


Fig. 8b

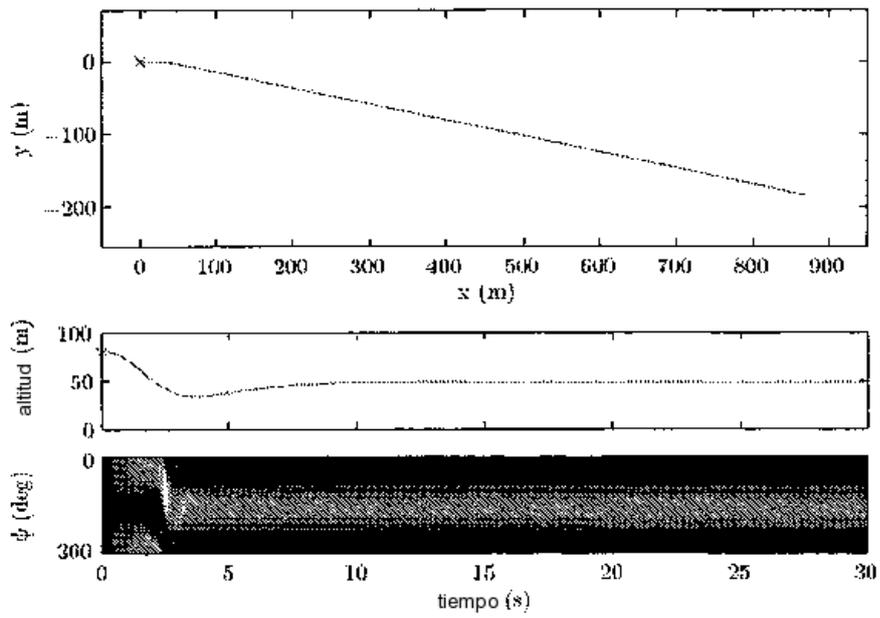


Fig. 9

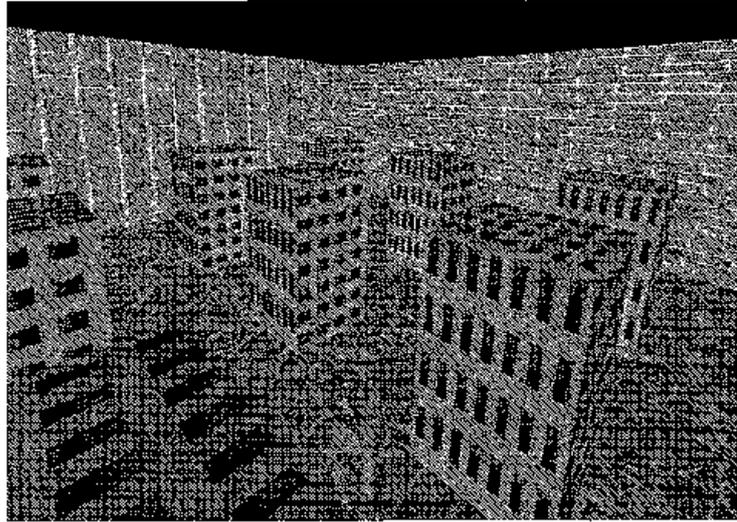


Fig. 10

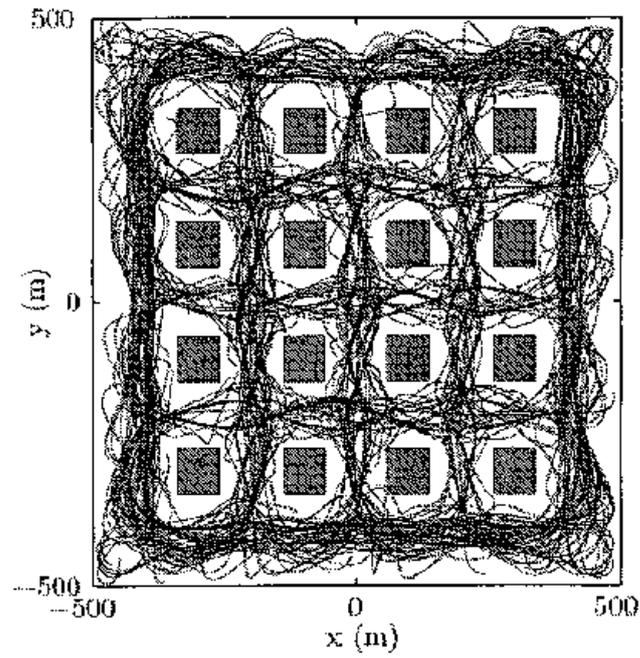


Fig. 11

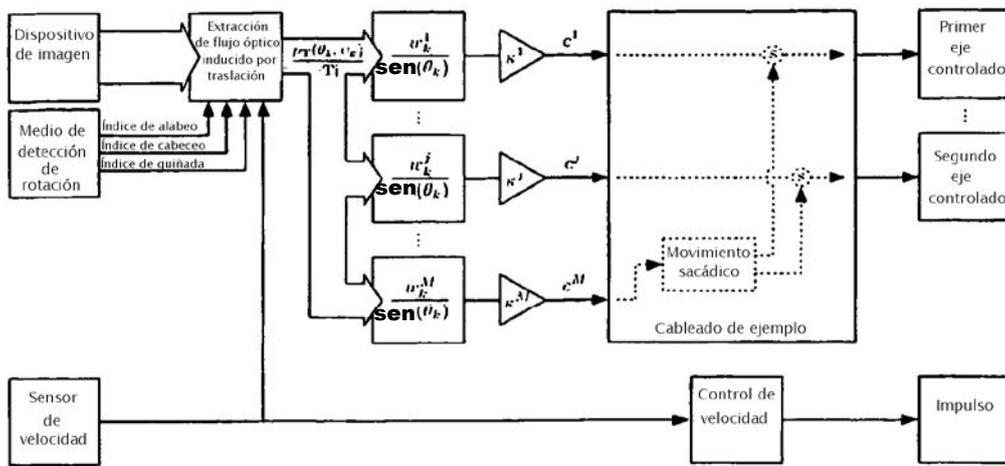


Fig. 12