

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 633 217**

51 Int. Cl.:

**B64C 39/02** (2006.01)

**B64C 29/00** (2006.01)

**B64C 29/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.06.2013 E 13171364 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.04.2017 EP 2813428**

54 Título: **Vehículo aéreo de despegue y aterrizaje vertical**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**19.09.2017**

73 Titular/es:

**ECOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE  
LAUSANNE (EPFL) (100.0%)  
EPFL-TTO Quartier de l'Innovation J  
1015 Lausanne, CH**

72 Inventor/es:

**BRIOD, ADRIEN;  
KORNATOWSKI, PRZEMYSŁAW MARIUSZ;  
KLAPTOCZ, ADAM;  
ZUFFEREY, JEAN-CHRISTOPHE y  
FLOREANO, DARIO**

74 Agente/Representante:

**LÓPEZ CAMBA, María Emilia**

**ES 2 633 217 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**

Vehículo aéreo de despegue y aterrizaje vertical.

**5 INTRODUCCIÓN**

La presente invención se refiere a un vehículo aéreo VTOL (despegue y aterrizaje vertical), como el mostrado en el documento de la técnica anterior US 2010 224 723, que comprende un bastidor interior, un sistema de cardán y un bastidor exterior. El sistema de cardán permite que el bastidor exterior gire de forma pasiva independientemente del bastidor interior, lo que reduce las perturbaciones provocadas por un contacto con un objeto externo, permite rodar sobre obstáculos y permite el despegue desde cualquier orientación. Los vehículos aéreos VTOL generalmente vuelan gracias a un sistema de propulsión (por ejemplo, una o más hélices) que genera una fuerza ascendente (elevación) para contrarrestar la gravedad. Tales vehículos son capaces de hacer un vuelo lento (vuelo estacionario), despegue vertical o aterrizaje vertical, y tienen generalmente un sistema de control para controlar su orientación o dirección con el fin de permanecer en una orientación estable o moverse lateralmente. Cuando el vehículo aéreo no está en una orientación estable, por ejemplo, su sistema de propulsión crea una fuerza que no apunta en su mayor parte hacia arriba, el vehículo aéreo puede perder rápidamente la elevación, o ganar velocidad hacia la dirección en la que el sistema de propulsión crea una fuerza.

Cuando un vehículo aéreo entra en contacto con un obstáculo, los pares y fuerzas exteriores relativamente grandes pueden alterar la orientación del vehículo aéreo. Mientras que un sistema de control a bordo (mecánico y/o software) puede contrarrestar una cierta cantidad de perturbaciones y devolver al vehículo aéreo a una orientación estable, tales sistemas de control son a menudo incapaces de corregir rápidamente las grandes perturbaciones que se producen después de un contacto con objetos externos. Tales contactos pueden provocar así grandes perturbaciones de la orientación o trayectoria del vehículo aéreo, o incluso provocar un choque al suelo. La mayoría de los vehículos aéreos se mantienen siempre alejados de los obstáculos, para evitar cualquier contacto con los obstáculos. Además, la mayoría de los vehículos aéreos sólo pueden despegar de una orientación de reposo, en la que el sistema de propulsión puede crear una fuerza hacia arriba, lo que limita su capacidad de despegue desde terreno irregular, o después de aterrizar en otras orientaciones.

La presente invención propone un sistema mecánico que reduce las perturbaciones provocadas por un contacto con un objeto externo, lo que permite que los vehículos aéreos choquen con obstáculos mientras permanecen en una orientación estable la mayor parte del tiempo. La invención permite que la plataforma permanezca en contacto con un obstáculo, ya sea por debajo, lateralmente o por encima de la plataforma, y se mueva con respecto al obstáculo mientras permanece en contacto con él, que se describe como rodando sobre éste. Finalmente, la invención permite al vehículo aéreo despegar desde cualquier orientación, incluso en terreno irregular.

**BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION**

La presente invención propone un vehículo aéreo de despegue y aterrizaje vertical, según la reivindicación 1, que comprende un bastidor interior, un sistema de cardán y un bastidor exterior, comprendiendo dicho bastidor interior un sistema de propulsión y un sistema de control, siendo dicho sistema de propulsión capaz de generar una fuerza de elevación, pudiendo controlar dicho sistema de control la orientación del bastidor interior, conectando dicho sistema de cardán con el bastidor interior al bastidor exterior con al menos dos ejes de rotación, permitiendo que la libertad de rotación entre el bastidor exterior gire independientemente del bastidor interior.

El principio general es desacoplar mecánicamente un bastidor exterior de un bastidor interior con un sistema de cardán, de manera que el bastidor exterior pueda girar pasivamente alrededor del bastidor interior. El bastidor interior contiene el sistema de propulsión y el sistema de control que mantiene el vehículo aéreo en alto generando una fuerza ascendente y rechazando pequeñas perturbaciones, mientras que el bastidor externo impide que los objetos externos toquen el bastidor interior y afecten a su orientación.

El sistema de cardán permite que el bastidor exterior gire de forma pasiva alrededor del bastidor interior alrededor de dos o más ejes de rotación. Por lo tanto, algunos o todos los pares aplicados al bastidor exterior provocarán su rotación en torno a estos ejes, pero no afectarán al bastidor interior, de manera que el sistema de propulsión permanezca en una orientación estable para volar en vuelo. Por lo tanto, un vehículo aéreo equipado con la invención propuesta puede colisionar con obstáculos mientras su armazón interior permanece en una orientación estable, lo que evita que se produzcan grandes inestabilidades o choques del vehículo aéreo cuando el sistema de propulsión experimenta importantes perturbaciones de orientación.

Dado que la orientación del bastidor interior no está limitada cuando el bastidor exterior está en contacto con obstáculos, el sistema de control es capaz de hacer que el vehículo aéreo se mueva hacia los lados, hacia arriba o hacia abajo, mientras el bastidor exterior permanece en contacto constante con los obstáculos. Esto permite que el vehículo aéreo pueda volar hacia diferentes direcciones mientras permanece en contacto con objetos externos, paredes o techos (es decir, puede rodar sobre los obstáculos).

El sistema propuesto también es útil para despegar desde cualquier orientación: cuando está en el suelo, el bastidor interior puede girar libremente dentro del bastidor exterior y, por lo tanto, un mecanismo puede girar el bastidor interior hasta una orientación apropiada para el despegue (por ejemplo, con la propulsión capaz de generar una fuerza hacia arriba). La rotación del bastidor interior se puede conseguir colocando el centro de masa del bastidor interior de manera que la gravedad lo tire en la orientación deseada, o utilizando el sistema de control del bastidor interior.

Se proponen diferentes diseños para la estructura de bastidor exterior con el fin de reducir las fuerzas que se producen durante una colisión con obstáculos.

## BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La presente invención se entenderá mejor gracias a las figuras adjuntas en las que:

- La Figura 1 ilustra varios vehículos aéreos VTOL que comprenden un sistema de propulsión y un sistema de control,
- la figura 2 a) ilustra un vehículo aéreo convencional equipado con un bastidor protector unido rígidamente al sistema de control y de propulsión chocando contra las vigas,
- la figura 2b) ilustra una representación bidimensional del vehículo aéreo en el plano de colisión,
- La figura 3 ilustra cada componente principal de un vehículo aéreo, y una realización de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán que permite que el bastidor exterior gire de acuerdo con tres ejes de rotación
- La figura 4 ilustra una realización de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán que permite que el bastidor exterior gire de acuerdo con dos ejes de rotación,
- La figura 5 ilustra una vista lateral de dos situaciones en las que un vehículo aéreo choca con un objeto externo,
- La figura 6 ilustra una vista lateral del vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán chocando con un obstáculo,
- la figura 7 ilustra una realización de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán e imanes para impedir que los cardanes alcancen una posición de bloqueo de cardán,
- la figura 8 ilustra una realización de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán y accionadores,
- la figura 9 ilustra una vista lateral de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán que rueda sobre terreno irregular,
- la figura 10 ilustra una vista superior de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán que rueda sobre obstáculos verticales,
- la figura 11 a) ilustra un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán está descansando sobre el suelo en una orientación no apropiada para el despegue,
- la figura 11b) ilustra un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán listo para despegar,
- la figura 12 a) ilustra un ejemplo de un bastidor exterior protector basado en vigas que delimitan un poliedro esférico, en particular un icosaedro truncado en este caso,
- la figura 12b) ilustra un ejemplo de un bastidor exterior de protección que utiliza paragolpes tetraédricos hechos de tres vigas flexibles unidas a una base rígida,
- la figura 13 ilustra vehículos aéreos equipados con un sistema de cardán y un poliedro esférico como bastidor exterior. a) el bastidor interior comprende un diseño coaxial con superficies de control. b) el bastidor interior comprende un rotor múltiple,
- la figura 14 ilustra vehículos aéreos equipados con un sistema de cardán y paragolpes tetraédricos que protegen el bastidor exterior. a) el bastidor interior comprende un diseño coaxial con superficies de control. b) el bastidor interior comprende un rotor múltiple.

## ANTECEDENTES

### *Estado de la técnica*

Los vehículos aéreos VTOL que se mantienen en alto gracias a un sistema de propulsión y un sistema de control existen en varias configuraciones. Los ejemplos de tales vehículos aéreos VTOL que comprenden un sistema de propulsión y un sistema de control se representan en la figura 1 para referencia (existen muchos más tipos pero no se ilustran en la figura 1). El sistema de propulsión generalmente comprende una o más hélices 101, y proporciona la fuerza de elevación que mantiene el vehículo aéreo en el aire. El sistema de control puede adoptar diversas formas y, por lo general, comprende algo de electrónica de control 102 y posiblemente accionadores adicionales no utilizados para generar elevación, sino más bien para generar fuerzas o pares en torno al eje de alabeo 110, inclinación 111 o guiñada 112, con el fin de controlar el movimiento de alabeo 113, inclinación 114 y guiñada 115, o en otras palabras, la orientación del vehículo aéreo y, por lo tanto, la dirección de la fuerza de elevación. Estos vehículos aéreos se mantienen en el aire permaneciendo en una orientación en la que el sistema de propulsión genera una fuerza mayormente hacia arriba (usualmente haciendo que las hélices giren aproximadamente en el plano horizontal), y se mueven lateralmente inclinándose ligeramente.

a) Rotor múltiple (representado: cuadricóptero): Este vehículo aéreo utiliza un sistema de propulsión que comprende varias hélices horizontales 101 que generan elevación. El sistema de control determina la velocidad de cada hélice

individual para estabilizar el vehículo aéreo en una orientación estable o para inclinarlo de manera que se mueva lateralmente. El accionamiento diferencial de las hélices opuestas genera pares alrededor de los ejes de inclinación y alabeo. El accionamiento diferencial de las hélices que giran en direcciones opuestas genera un par en torno al eje de guiñada.

5 b) Helicóptero: Este vehículo aéreo utiliza una hélice horizontal principal 101 como sistema de propulsión para generar elevación. El sistema de control controla los movimientos de inclinación y alabeo del vehículo aéreo gracias a una placa oscilante 104 que acciona la inclinación de las palas de la hélice principal y estabiliza la inclinación y el alabeo del vehículo aéreo, o lo inclina para desplazarse lateralmente. Se utiliza una hélice de cola vertical 103 para controlar el ángulo de guiñada.

10 c) Diseño coaxial con barra estabilizadora: Tal vehículo aéreo utiliza dos hélices horizontales 101 que giran en direcciones opuestas como un sistema de propulsión. El sistema de control comprende una barra estabilizadora 105 que mantiene los ángulos de inclinación y alabeo estables. La barra estabilizadora es una varilla rígida con un momento de inercia relativamente alto que gira junto con la hélice superior y permanece horizontal gracias a la inercia. Está mecánicamente unida a la inclinación de las palas de la hélice superior de modo que cuando se altera la orientación del vehículo aéreo, la hélice crea un par que devuelve el vehículo aéreo a una orientación estable. El accionamiento diferencial de las dos hélices permite controlar el ángulo de guiñada. La hélice inferior puede equiparse con una placa oscilante para controlar los movimientos de inclinación y alabeo, y así mover el vehículo aéreo lateralmente.

15 d) Diseño coaxial con superficies de control: Este vehículo aéreo utiliza dos hélices horizontales 101 que giran en direcciones opuestas como un sistema de propulsión. El sistema de control utiliza un par de superficies de control 108 para controlar el movimiento de inclinación y otro par de superficies de control 106 para controlar el movimiento de alabeo. Las superficies de control son accionadas por dos accionadores 107, y generan fuerzas desviando el flujo de aire generado por el sistema de propulsión. El accionamiento diferencial de las dos hélices permite controlar el ángulo de guiñada.

20 Los vehículos aéreos diseñados para volar cerca de obstáculos están a menudo equipados con estructuras protectoras que rodean típicamente el sistema de propulsión y el sistema de control. Estas estructuras de protección evitan que objetos externos dañen partes sensibles tales como hélices rotativas o superficies de control, o absorban energía de colisión cuando el vehículo aéreo choca contra obstáculos o cae al suelo. Generalmente se construyen de manera que las aberturas permiten que el flujo de aire pase a través de la estructura sin afectar demasiado a la fuerza de elevación generada por el sistema de propulsión. La forma de las estructuras de protección puede diseñarse de manera que el vehículo aéreo se mantenga vertical de forma pasiva con respecto a una orientación de despegue vertical cuando se encuentre sobre un terreno plano [1].

25 Algunos vehículos aéreos VTOL existentes utilizan estructuras de protección con partes móviles para mejorar la interacción con el medio ambiente. En [2], un VTOL de doble motor está equipado con dos ruedas de rotación pasivas que protegen a los rotores del contacto, y se pueden utilizar para rodar por el suelo o incluso a lo largo de la pared cuando está en vuelo. Sin embargo, las ruedas sólo pueden proteger el bastidor interior del vehículo aéreo de tocar obstáculos planos, y el vehículo aéreo sólo puede rodar hacia una única dirección. En [3], una jaula protectora puede girar pasivamente en torno a un eje y ofrece una mejor protección, lo que permite que el vehículo aéreo VTOL ruede sobre terreno irregular hacia una única dirección. Mientras estos vehículos aéreos demuestran estructuras protectoras que giran pasivamente para rodar sobre un obstáculo, su dirección de rodadura está limitada a una única dirección debido al único eje de rotación. Además, estos mecanismos no abordan el problema de reducir las perturbaciones que se producen a partir de colisiones en vuelo con obstáculos.

30 Se debe mencionar un vehículo aéreo descrito en [4], ya que presenta una estructura protectora que puede girar en torno a dos ejes diferentes. Sin embargo, los ejes de rotación son totalmente accionados y controlados en todo momento por motores, los cuales no ofrecen las capacidades presentadas en la presente invención. De hecho, el objetivo y la implementación de [4] son muy diferentes de lo que se propone. La rotación activamente controlada de la estructura sólo permite la estabilización del vehículo aéreo durante el vuelo cambiando la posición del centro de masa de la estructura de protección. Este diseño no permite la reducción de las perturbaciones cuando al chocar en vuelo con obstáculos, o para rodar sobre obstáculos.

### 55 **Modelo de colisión**

Se puede encontrar muy poco en la literatura sobre el análisis de colisiones entre vehículos aéreos y objetos externos. Puesto que la presente invención se refiere a un sistema para reducir las perturbaciones de colisiones, es importante comprenderlas. Normalmente, es interesante saber cómo las velocidades lineales y angulares del vehículo aéreo se ven afectadas después de un impacto. Un modelo desarrollado en [5] describe las colisiones de bolas semielásticas sobre diversos tipos de superficies, y se puede adaptar al caso de los vehículos aéreos después de hacer algunas suposiciones.

60 Se estudian las velocidades lineales y angulares instantáneas justo antes y justo después del impacto. El caso con una velocidad angular nula justo antes del impacto se considera por razones de simplificación. Se supone que sólo hay un punto de contacto entre el vehículo aéreo y el obstáculo externo. Además, se supone que no se aplica ninguna otra fuerza significativa sobre el vehículo aéreo durante el impacto, es decir, las aceleraciones lineales y

angulares generadas por los sistemas de propulsión y estabilización durante la colisión se consideran despreciables en comparación con la fuerza de impacto. Finalmente, se asume que la colisión puede estudiarse en dos dimensiones en el plano de colisión C 204, que se define como conteniendo el punto de contacto P 207 y el vector de velocidad inicial  $\mathbf{v}$  208, cuyo origen está en el centro de masa (COM) 203. La figura 2a muestra un vehículo aéreo convencional equipado con un bastidor protector 201 que choca con un objeto externo 202 en el punto P, y el plano de colisión 204 que contiene tanto P 207 como  $\mathbf{v}$  208. La fuerza  $\mathbf{F}$  209 es la fuerza media aplicada por el objeto externo En el vehículo aéreo durante el impacto y se supone que está contenido en C.

La figura 2 a) ilustra un vehículo aéreo convencional equipado con un bastidor protector 201 fijado rígidamente al sistema de control y de propulsión que choca en una viga 202. El plano de colisión 204 se define como que contiene el punto de contacto P 207 y el vector de velocidad inicial  $\mathbf{v}$  208 cuyo origen está en el centro de masa (COM) 203. La figura 2b) ilustra una representación bidimensional del vehículo aéreo sobre el plano de colisión, cuyo sistema de coordenadas se define con el origen en el punto de contacto P y el eje Y 206 apuntando hacia el COM. El eje X 205 se denomina eje paralelo a horizontal, y eje Y el eje perpendicular o vertical.  $r$  211 es la distancia entre el punto de contacto P y el COM. La estructura de protección del vehículo aéreo se representa como un círculo 210, pero podría ser de cualquier forma, implicando simplemente una variable  $r$  que depende de la posición del punto de contacto. Se muestran la velocidad  $\mathbf{v}'$  212 y la velocidad de rotación  $\boldsymbol{\omega}'$  213 justo después de la colisión. La velocidad después del impacto  $\mathbf{v}'$  212 se supone que está contenida en C y el vector de velocidad angular después del impacto  $\boldsymbol{\omega}'$  se supone que es normal a C (sólo la dirección de rotación se representa en 213).

Una colisión de un vehículo aéreo con un obstáculo externo puede tener resultados muy diferentes, dependiendo de la elasticidad de la estructura protectora del vehículo aéreo, de la fricción con el obstáculo, de la rigidez del obstáculo, etc. Típicamente, la fuerza de contacto hará que el vehículo aéreo rebote lejos del obstáculo hasta cierto punto dependiendo de la elasticidad de la estructura protectora y de la rigidez del obstáculo. Aunque esto altera la trayectoria del vehículo aéreo, las mayores perturbaciones son el par aplicado al centro de masa del vehículo aéreo, porque podría alcanzar una orientación inestable donde el sistema de propulsión ya no está generando una fuerza mayormente hacia arriba. Típicamente, si la velocidad inicial no apunta hacia el punto de impacto y el contacto no es sin fricción, la fuerza de colisión en el punto de impacto genera un par y provoca así una cierta cantidad de giro del vehículo aéreo dependiendo de la fricción entre la estructura protectora y el obstáculo.

Si bien la dinámica de la interacción que se produce durante el impacto es bastante complicada e implica deslizamiento, agarre o rebote, los detalles pueden ignorarse gracias a la introducción de dos coeficientes de restitución (COR),  $e_x$  y  $e_y$  [5]:

$$e_y = -\frac{v'_y}{v_y} \tag{1}$$

$$e_x = -\frac{v'_x - r \omega'}{v_x} \tag{2}$$

El COR vertical  $e_y$  puede variar entre 0 y 1 y describe la cantidad de elasticidad en la estructura protectora y el obstáculo externo, y permite determinar la velocidad a la que el vehículo aéreo rebota lejos del obstáculo. Si  $e_y$  es igual a 1, la colisión es totalmente elástica y el vehículo aéreo rebotará en la pared con un signo invertido para la velocidad perpendicular, mientras que si  $e_y$  es igual a 0, el vehículo aéreo permanecerá contra la pared. El COR  $e_x$  horizontal puede variar entre -1 y 1 y describe la cantidad de fricción entre la estructura protectora y el obstáculo externo, así como cierta elasticidad, y permite determinar cuánto giro se da al vehículo aéreo. Si  $e_x$  es igual a -1, simula un contacto sin fricción que no genera ningún giro. Si  $e_x$  es igual a 0, simula un contacto en el que el vehículo aéreo se agarra a las superficies y el punto de contacto llega a un reposo, provocando así un giro.

$$\omega' = \frac{v'_y}{r}$$

Si  $e_x$  es igual a 1, el punto de contacto rebote de nuevo con una velocidad opuesta que provoca un giro aún mayor. Si bien estos coeficientes son difíciles de obtener y varían de una situación a otra, permiten adoptar un enfoque genérico y, en general, no es necesario obtener la mayoría de los puntos de análisis.

La velocidad inmediatamente después del impacto  $\mathbf{v}'$ , la velocidad angular inmediatamente después del impacto  $\boldsymbol{\omega}'$  y la fuerza de contacto media durante el impacto  $\mathbf{F}$  pueden obtenerse conociendo la velocidad  $\mathbf{v}$  justo antes del impacto gracias a la segunda ley de Newton, como tal:

$$\omega' = v_x \frac{1(e_x + 1)}{r(\alpha + 1)} \tag{3}$$

$$v'_x = v_x \frac{1 - \alpha e_x}{\alpha + 1} \tag{4}$$

$$v_y' = -e_y v_y \quad (5)$$

$$F_x = -\frac{m v_x}{\Delta t} \frac{\alpha}{(\alpha + 1)(e_x + 1)} \quad (6)$$

$$F_y = -\frac{m v_y}{\Delta t} [(e_y + 1)] \quad (7)$$

5 Donde

$$\alpha = \frac{I}{m r^2}$$

10 es un parámetro sin escalas que describe la distribución de masa del vehículo aéreo y es probable que esté entre 0,3 y 0,5 para vehículos aéreos convencionales de cualquier tamaño.  $I$  es el momento de inercia del vehículo aéreo sobre el eje normal al plano de colisión en el centro de masa 203,  $m$  es la masa del vehículo aéreo,  $r$  211 es la distancia entre el punto de contacto  $P$  207 y el centro de la masa, y  $\Delta t$  es la duración del impacto.

15 Resulta interesante observar que  $\omega'$  213 escala de manera inversamente proporcional a  $r$ , lo que significa que para vehículos aéreos similares de diferentes tamaños que chocan a la misma velocidad con un objeto externo, la velocidad de rotación después de una colisión es mayor para vehículos aéreos más pequeños.

20 Además, cuanto mayor sea el momento de inercia  $I$ , mayor será  $F_x$  y menor será  $v_x'$ , lo que significa que para momentos de inercia elevados, el vehículo aéreo experimentará una fuerza mayor y se ralentizará más en la dirección a lo largo del eje  $Y$ . Inversamente, un momento de inercia inferior reduce la fuerza de fricción  $F_x$  lo que significa que la velocidad y la trayectoria del vehículo aéreo no se verán afectadas tanto por la colisión.

25 En caso de colisión sin fricción ( $e_x = -1$ ), la velocidad de rotación justo después del impacto  $\omega'$  es cero, así como la fuerza de fricción  $F_x$ .

### DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

30 La presente invención se refiere a un vehículo aéreo VTOL (despegue y aterrizaje vertical), que comprende un bastidor interior, un sistema de cardán y un bastidor exterior. El sistema de cardán reduce las perturbaciones provocadas por un contacto con un objeto externo, permite rodar sobre obstáculos y permite el despegue desde cualquier orientación.

35 El principio general es desacoplar mecánicamente un bastidor exterior de un bastidor interior con un sistema de cardán, de manera que el bastidor exterior pueda girar pasivamente alrededor del bastidor interior. El bastidor interior contiene el sistema de propulsión y el sistema de control (por ejemplo, uno de los representados en la figura 1), que mantienen el vehículo aéreo en alto generando una fuerza ascendente y rechazando pequeñas perturbaciones, mientras que el bastidor externo impide que los objetos externos toquen el bastidor interior y afecten a su orientación. El sistema de cardán permite que el bastidor exterior gire de forma pasiva alrededor del bastidor interior alrededor de uno o más ejes de rotación y no necesita ser accionado o controlado activamente (por ejemplo, con motores).

40 La figura 3 ilustra cada componente principal de un vehículo aéreo que comprende un bastidor interior 312, un sistema de cardán 301 y un bastidor exterior 304, así como el conjunto final. El bastidor interior 312 que comprende los sistemas de propulsión y control está montado dentro de dos cardanes 302 y 303, alrededor de los cuales está montado el bastidor exterior 304. El bastidor exterior puede girar pasiva y libremente alrededor del bastidor interior en torno a cada uno de los 3 ejes de rotación 305, 306 y 307. Los sistemas de propulsión y control comprendidos en el bastidor interior pueden ser de cualquier tipo (por ejemplo, uno de los representados en la figura 1) y no necesariamente el que se representa. Además, el bastidor exterior puede ser cualquier tipo de estructura protectora la que se representa.

45 Un mecanismo típico que utiliza dos cardanes que permiten tres grados de libertad de rotación se propone y se ilustra en la figura 3. El sistema de cardán 301 comprende tres ejes de rotación 305, 306 y 307, tres pares de juntas de rotación 309, 310 y 311 y dos cardanes 302 y 303, estando dicho primer eje de rotación 305 creado por dicho primer par de juntas de rotación 309, estando cada junta alineada entre sí y fijada en lados opuestos del bastidor interior en los puntos de fijación 313 y en lados opuestos del primer cardán 302, siendo dicho segundo eje de rotación 306 creado por dicho segundo par de juntas de rotación 310, estando cada junta alineada y fijada en lados opuestos del primer cardán 302 y en lados opuestos del segundo cardán 303, de manera que dicho segundo eje de rotación 306 es perpendicular a dicho primer eje de rotación 305, siendo dicho tercer eje de rotación 307 creado por dicho tercer par de juntas de rotación 311, estando cada junta alineada y fijada en lados opuestos del segundo cardán 303 y en lados opuestos del bastidor exterior 304 en los puntos de fijación 314, para que dicho tercer eje de rotación 307 sea perpendicular a dicho segundo eje de rotación 306, siendo dichas juntas de rotación piezas

mecánicas que permiten una única rotación entre las dos partes fijadas a la junta.

Una realización de un vehículo aéreo equipado con un cardán que permite dos grados de libertad de giro se muestra en la figura 4. Esta realización es particularmente apropiada cuando los dos ejes de rotación pueden mantenerse en el plano horizontal antes de las colisiones (por ejemplo, con uno de los mecanismos presentados más adelante), de manera que el único eje restringido está alrededor del eje de guiñada, alrededor del cual el bastidor interior puede girar sin afectar gravemente a la estabilidad de la plataforma, ya que las perturbaciones en el alabeo y la inclinación son las más graves para la estabilidad. En la figura 4 se ilustra una realización de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán que permite que el bastidor exterior gire de acuerdo con dos ejes de rotación 305 y 306. El sistema cardán utiliza un cardán 302 y dos pares de juntas de rotación 309 y 310.

**Reducir las perturbaciones de los contactos con objetos externos**

En vehículos aéreos convencionales, la estructura de protección (si existe) está rígidamente unida a los sistemas de propulsión y control. El contacto con un objeto externo generará de este modo un par y, por lo tanto, una rotación de todo el vehículo aéreo, incluyendo el sistema de propulsión, de acuerdo con la ecuación (3). Esto podría tener un impacto tan fuerte en la capacidad del vehículo aéreo de mantenerse estable en el aire porque el sistema de propulsión podría no generar ya una fuerza mayormente hacia arriba, y más bien propulsar el vehículo aéreo lateralmente mientras pierde altura. Sin embargo, el desacoplamiento del bastidor interior del bastidor exterior con un sistema de cardán permite que el bastidor interior permanezca independiente de la rotación del bastidor exterior. El contacto con un objeto externo generará así una rotación del bastidor exterior, mientras que el bastidor interior y el sistema de propulsión permanecen en una orientación estable. La figura 5 muestra un ejemplo de colisión con un obstáculo externo 510, describiendo las diferencias entre un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán a) y un vehículo aéreo convencional b). Aunque la figura 5 muestra un ejemplo en 2 dimensiones, el principio es el mismo en 3 dimensiones para contactos en cualquier parte del bastidor exterior.

La figura 5 ilustra una vista lateral de dos situaciones en las que un vehículo aéreo choca con un objeto externo. a) Trayectoria ejemplar 501 de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán 507 desacoplando la rotación del bastidor exterior 506 del bastidor interior 508 y colisionando con un obstáculo 510. El vehículo aéreo rebota del obstáculo debido a la elasticidad del impacto y es así ligeramente desviado de su trayectoria original. El bastidor exterior 506 gana una cierta velocidad angular 515 después del impacto, pero el bastidor interior 508 que contiene los sistemas de propulsión y control permanece en su orientación original, en la que el sistema de propulsión genera una fuerza de elevación 513 apuntando sobre todo hacia arriba, y el vehículo aéreo puede así continuar hacia la dirección prevista. b) Trayectoria ejemplar 503 de un vehículo aéreo convencional, cuyos sistemas de control y propulsión 511 están conectados rígidamente a un bastidor protector 512, chocando con un obstáculo 510. El impacto genera un par 505 que hace girar el vehículo aéreo en una orientación en la que el sistema de propulsión genera una fuerza 514 que no apunta principalmente hacia arriba. El vehículo aéreo pierde así elevación y va en la dirección hacia la que el sistema de propulsión está generando una fuerza. En la mayoría de las situaciones, el sistema de control no es capaz de estabilizar la orientación del vehículo aéreo lo suficientemente rápido, lo que provoca una gran perturbación en la trayectoria, o incluso un choque contra el suelo.

Suponiendo un sistema de cardán sin fricción en las juntas de rotación que comprenden cardanes de un momento de inercia inapreciable, sólo el momento de inercia del bastidor exterior necesita ser considerado en las ecuaciones (3-7), puesto que sólo el bastidor exterior está girando después de una colisión. Esta reducción del momento de inercia implica que la fuerza  $F$  aplicada al vehículo aéreo se reduce y el vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán no se ralentiza tanto como un vehículo aéreo convencional después de una colisión. Por lo tanto, el sistema cardán ayuda, no sólo a reducir el par aplicado al bastidor interior por objetos externos, sino también a la fuerza, ayudando así al vehículo aéreo a ir hacia su dirección prevista sin ralentizarse tanto.

Como se describe en la figura 6, la fuerza  $F$  aplicada por el objeto externo sobre el bastidor externo 601 de un vehículo aéreo que vuela a una velocidad  $v$  609 equipado con un sistema de cardán 602 se transmite al bastidor interior 603 a través de cada eje descrito en la figura 3, y el vector de fuerza  $F$  608 tiene su origen en el cruce 605 de los ejes de rotación. Si el centro de masa del bastidor interior 604 está desalineado con uno o más de los ejes, el centro de masa experimenta un par

$$\tau = Fd \quad 607,$$

con  $d$  606 la distancia entre el vector de fuerza y el COM. Para reducir el par con el fin minimizar las perturbaciones que afectan a la orientación del bastidor interior, el COM debe alinearse con todos los ejes del sistema de cardán. En la figura 3, la COM debe estar así en el cruce de los 3 ejes.

La figura 6 ilustra una vista lateral del vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán 602 chocando con un obstáculo 610. El par 607 generado en el centro de masa 604 del bastidor interior debido a un desalineamiento del COM se representa con respecto al punto de cruce 605 de los ejes de rotación del sistema de cardán. La fuerza 608 aplicada por el objeto externo sobre el vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán se aplica al bastidor interior a través de los ejes de rotación del sistema de cardán. El par es proporcional al brazo de palanca  $d$  606, la

distancia entre el vector de fuerza y el COM. Para reducir el par,  $d$  debe minimizarse.

Después de un impacto, el bastidor exterior gira a una velocidad angular definida por la ecuación (3), con un eje de rotación perpendicular al plano de colisión. La rotación del bastidor exterior dura indefinidamente si no hay fricción en las juntas pasivas del sistema de cardán. Si el COM del bastidor exterior está desalineado con respecto al cruce de los ejes del sistema de cardán, la rotación del bastidor exterior generará una fuerza centrífuga que podría perturbar el bastidor interior. Por lo tanto, se puede minimizar esta perturbación alineando el COM del bastidor exterior con el cruce de los ejes de rotación del sistema de cardán.

Cuando dos ejes de un sistema de cardán están alineados entre sí, pierde un grado de libertad, y el bastidor interior no está totalmente desacoplado del bastidor exterior. Esta situación, denominada bloqueo de cardán, podría impedir que el sistema de cardán reduzca las perturbaciones de un contacto con un objeto externo, especialmente si se pierde un eje de rotación en el plano horizontal, ya que los ejes de inclinación y alabeo son los más críticos para mantener la fuerza de elevación producida por el sistema de propulsión en su mayor parte hacia arriba. Las soluciones a este problema incluyen: la adición de un cardán o grado de libertad y/o el accionamiento de algún cardan para controlar su posición lejos de un bloqueo de cardán, la adición de elementos repelentes o atrayentes como imanes, con el fin de favorecer la posición de los cardanes lejos de un bloqueo de cardán. Si se utilizan accionadores, éstos deben ser reversibles o capaces de apagarse de manera que permitan una rotación libre con baja fricción cuando se produzca una colisión.

Una realización ilustrada en la figura 7 muestra un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán cuyos cardanes 302 y 303 y el armazón exterior 304 están equipados con imanes 701 a 703 para evitar que los cardanes alcancen una posición de bloqueo de cardán y/o para favorecer una cierta orientación relativa entre el bastidor interior y el bastidor exterior. En la realización, se propone una disposición sugerida de imanes, en la que un par de imanes 701 está fijado al primer cardán 302, y otro par de imanes 702 está fijado al segundo cardán 303. Los polos norte y sur de los imanes 701 y 702 están orientados de manera que se repelen entre sí, impidiendo así que el primer y segundo cardanes estén en el mismo plano en la situación de bloqueo de cardán. Con el fin de favorecer una cierta orientación relativa del bastidor exterior con respecto al bastidor interior, se pueden fijar otros imanes 703 al bastidor exterior 304 de modo que se atraigan a los imanes 701. La atracción debe ajustarse de modo que el bastidor exterior esté suficientemente libre para girar en caso de contacto con un objeto externo para mantener bajo el par en el bastidor interior.

Una realización representada en la figura 8 muestra un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán y accionadores 801, 802 y 803 para controlar la rotación de los tres ejes de rotación 305, 306 y 307, respectivamente. El bastidor exterior está equipado con un sensor de orientación 810, así como con la electrónica de control 102, que permite medir la orientación relativa entre el bastidor exterior y el bastidor interior. El primer accionador 801 puede accionar la rotación del primer eje de rotación 305, el segundo accionador 802 puede accionar la rotación del segundo eje de rotación 306 y el tercer accionador 803 puede accionar la rotación del tercer eje de rotación 307. Para conocer la orientación relativa entre el bastidor exterior y el bastidor interior, se puede fijar un sensor de orientación 810 (por ejemplo, IMU) al bastidor exterior y otro sensor de orientación en la electrónica de control 102, y la orientación relativa obtenida correlacionando las señales de los dos sensores de orientación. Conocer la orientación relativa del bastidor exterior con respecto al bastidor exterior permite conocer la posición de cada cardán y, por lo tanto, permite generar órdenes adecuadas para los accionadores.

#### **Rodadura sobre los obstáculos**

Dado que la orientación del bastidor interior 903 no está limitada cuando el bastidor exterior 901 está en contacto con obstáculos, el sistema de control es capaz de hacer que el vehículo aéreo se mueva hacia los lados, hacia arriba o hacia abajo, mientras el bastidor exterior permanece en contacto constante con los obstáculos. Esto permite que el vehículo aéreo ruede sobre obstáculos controlando un movimiento hacia cualquier dirección deseada y manteniendo una componente de la fuerza de control hacia el obstáculo para permanecer en contacto. Esto suele ser útil para sortear obstáculos de formas complejas sin necesidad de un control adicional para seguir trayectorias complejas. Las figuras 9 y 10 muestran ejemplos de tales comportamientos.

La figura 9 ilustra una vista lateral de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán 902 que rueda sobre un terreno desigual 905 a lo largo de una trayectoria hacia la derecha 904 controlando un movimiento hacia la derecha manteniendo una fuerza hacia abajo (por ejemplo, generando una fuerza de elevación con el sistema de propulsión que es inferior a la fuerza de despegue) para permanecer en contacto con el obstáculo. Mientras que el bastidor interior 903 permanece en la orientación controlada por el sistema de control, el bastidor externo 901 gira con una cierta velocidad angular 906.

La figura 10 ilustra una vista desde arriba de un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán 1002 que rueda contra las paredes verticales 1005 u obstáculos 1007 controlando un movimiento lateral hacia la dirección paralela a las paredes, mientras permanece en contacto con el obstáculo controlando una fuerza lateral hacia el obstáculo. Mientras que el bastidor interior 1003 permanece en la orientación controlada por el sistema de control, el bastidor externo 1001 gira con una cierta velocidad angular 1006. Este comportamiento permite al vehículo aéreo seguir los

contornos del entorno, lo cual es útil cuando se buscan aberturas como una puerta 1009. Este comportamiento no requiere un control o detección complejos, ya que es suficiente con volar hacia una dirección (por ejemplo, dada por la dirección magnética 1008).

5 Mientras se rueda contra obstáculos, el uso de retroalimentación a partir de un sensor de orientación 810 montado en el bastidor exterior permite controlar la velocidad de rodadura, así como cuando el vehículo aéreo ya no está rodando porque está atascado en unos mínimos locales (por ejemplo, una esquina).

### ***Despegue desde cualquier orientación***

10 El sistema propuesto es también útil para despegar desde cualquier orientación: cuando está en el suelo, el bastidor interior 1103 puede girar fácilmente dentro del bastidor exterior 1101 gracias al sistema de cardán 1102 y un mecanismo puede girar así el bastidor interior hasta una orientación apropiada para el despegue. Si el centro de masa se coloca en el cruce de los ejes de rotación del cardán, el bastidor interior puede girar en la orientación deseada con pares mínimos (lo suficiente para superar la fricción en el sistema de cardán). El sistema de control del bastidor interior se puede utilizar típicamente para girar el bastidor interior en una orientación de despegue. La figura 11 muestra tal maniobra.

15 La figura 11 a) ilustra un vehículo aéreo equipado con un sistema de cardán 1102 está descansando sobre el suelo 1105 en una orientación no apropiada para el despegue. Por lo tanto, utiliza su sistema de control para generar suficiente par  $\tau$  1104 para hacer girar el bastidor interior 1103 con respecto a una orientación vertical mientras el bastidor exterior permanece estático. b) El vehículo aéreo está ahora listo para despegar porque el sistema de propulsión está en una orientación en la que es capaz de generar una fuerza apuntando hacia arriba. c) El sistema de propulsión genera un empuje vertical  $T$  1106 que hace que el vehículo aéreo despegue.

20

### ***Estructuras protectoras***

25 El bastidor exterior debe evitar que los objetos externos toquen el bastidor interior o el sistema de cardán y no debe afectar en gran medida al sistema de propulsión, típicamente obstruyendo el flujo de aire. Además, al ser ligero, el bastidor exterior debe ser capaz de absorber la energía de la colisión sin romperse, y debe ser suficientemente rígido para proteger el sistema de cardán y el bastidor interior, pero lo suficientemente flexible como para reducir la fuerza de contacto máxima y, por lo tanto, la tensión del resto del sistema. Se proponen y se representan dos diseños diferentes para el bastidor exterior en la figura 12.

30 El primer diseño para el bastidor exterior mostrado en la figura 12 a) se basa en vigas 1201 fijadas entre sí en los puntos de conexión 1202, y dispuestas de manera que cada viga defina un borde de un poliedro esférico. Cuando se aplica una fuerza sobre un poliedro esférico, la carga se comparte entre todas las vigas de la estructura. Dicha estructura es así capaz de absorber una energía de colisión relativamente alta para su peso. Además, las numerosas vigas evitan que la mayoría de los objetos externos toquen el sistema de cardán o el bastidor interior. Finalmente, la forma esférica es ventajosa para rodar sobre un obstáculo.

35 El segundo diseño para el bastidor exterior ilustrado en la figura 12 b) se basa en una base relativamente rígida 1203 sobre la cual están montadas estructuras tetraédricas hechas de tres vigas flexibles 1204 con las articulaciones giratorias 1205 y 1206 para actuar como paragolpes elásticos que absorben la energía de la colisión. La disposición tetraédrica permite tener al menos uno de los trabajos de viga en modo de pandeo cuando se aplica una fuerza sobre la estructura. El pandeo permite maximizar la energía que una única viga puede absorber, porque la fuerza de deformación está cercana al máximo desde el principio hasta el final de la deformación.

40 La figura 12: a) ilustra un ejemplo de un bastidor exterior protector basado en vigas 1201 que delimitan un poliedro esférico, en particular un icosaedro truncado en este caso. Tal bastidor permite obtener una rigidez adecuada con un peso mínimo. b) Ejemplo de un bastidor exterior protector utilizando paragolpes tetraédricos hechos de tres vigas flexibles 1204 unidas a una base rígida 1203 con articulaciones giratorias 1205 y 1206 para proporcionar flexibilidad. Gracias a la disposición tetraédrica, las vigas trabajan en modo de pandeo, lo que permite maximizar la absorción de energía para una viga determinada.

45

### ***Vehículos aéreos***

50 Para que una carga útil sea transportada, la elección óptima para el sistema de propulsión es generalmente la que tiene la mejor relación fuerza de elevación-área, ya que el tamaño del sistema de propulsión determinará el tamaño, por lo tanto, el peso del sistema de cardán y el bastidor exterior, que debe minimizarse. Típicamente, las configuraciones coaxiales como las presentadas en las figuras 1 c) y d) tienen una buena relación fuerza de elevación-área y se recomiendan.

55 Las realizaciones mostradas en las figuras 13 y 14 muestran ejemplos de vehículos aéreos equipados con las estructuras protectoras descritas anteriormente.

60

La figura 13 ilustra vehículos aéreos equipados con un sistema de cardán y un poliedro esférico como bastidor exterior. a) el bastidor interior comprende un diseño coaxial con superficies de control. b) el bastidor interior comprende un rotor múltiple.

- 5 La figura 14 ilustra vehículos aéreos equipados con un sistema de cardán y paragolpes tetraédricos que protegen el bastidor exterior. a) el bastidor interior comprende un diseño coaxial con superficies de control. b) el bastidor interior comprende un rotor múltiple.

**REIVINDICACIONES**

1. Un vehículo aéreo de despegue y aterrizaje vertical que comprende un bastidor interior (312), un sistema de control (106, 108) un sistema de cardán (301) y un bastidor exterior (304), comprendiendo dicho bastidor interior (312) una propulsión, siendo dicho sistema de propulsión capaz de generar una fuerza de elevación, siendo dicho sistema de control capaz de controlar la orientación del bastidor interior (312), conectando dicho sistema de cardán el bastidor interior (312) al bastidor exterior (304) con al menos dos ejes de rotación (305, 306, 307) que permiten que la libertad de rotación entre el bastidor exterior (304) gire independientemente del bastidor interior (312), **caracterizado por que el bastidor interior comprende el sistema de control (106, 108) y el centro de masa del bastidor interior está alineado con cada eje de rotación (305, 306, 307).**
2. Vehículo aéreo de la reivindicación 1, en el que los dos ejes (305-307) definen un plano sustancialmente perpendicular a la fuerza de elevación.
3. Vehículo aéreo de la reivindicación 1, en el que el sistema de cardán comprende al menos tres ejes de rotación (305, 306, 307), en los que dos ejes (305, 306) definen un plano sustancialmente perpendicular a la fuerza de elevación y el tercer eje (307) es sustancialmente paralelo a la fuerza de elevación.
4. Vehículo aéreo de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que los ejes de rotación (305-307) se están cruzando.
5. Vehículo aéreo de la reivindicación 1, en el que el centro de masa del bastidor exterior está alineado con cada eje de rotación.
6. Vehículo aéreo de una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6, en el que el sistema de cardán comprende tres ejes de rotación (305-307), tres pares de juntas de rotación (309, 310, 311) y dos cardanes (302, 303), dichos primeros (305) creados por dicho primer par de juntas de rotación (309), estando cada junta alineada entre sí y fijada en lados opuestos del bastidor interior y en lados opuestos del primer cardán (302), siendo dicho segundo eje de giro (306) creado por dicho segundo par de juntas de rotación (310), estando cada junta alineada y fijada en lados opuestos del primer cardán (302) y en lados opuestos del segundo cardán (303) de modo que dicho segundo eje de rotación (306) es perpendicular a dicho primer eje de rotación (305), siendo dicho tercer eje de rotación (307) creado por dicho tercer par de juntas de rotación (311), estando cada junta alineada y fijada en lados opuestos del segundo cardán (303) y en lados opuestos de la parte exterior (304) de modo que dicho tercer eje de rotación (307) sea perpendicular a dicho segundo eje de rotación (306), siendo dichas juntas de rotación (309, 310, 311) partes mecánicas que permiten una única rotación entre las dos partes fijadas a la junta.
7. Vehículo aéreo de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que el sistema de propulsión está constituido por dos hélices coaxiales que giran en direcciones opuestas en planos paralelos.
8. Vehículo aéreo de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el bastidor exterior (304) está hecho de una vigas (1201) conectadas entre sí y dispuestas de manera que cada viga define un borde de un poliedro esférico o un icosaedro truncado.
9. Vehículo aéreo de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el bastidor exterior (304) está hecho de una estructura rígida y paragolpes elásticos, comprendiendo dichos paragolpes elásticos al menos tres vigas flexibles (1204) fijadas al menos a tres puntos diferentes (1202) de la estructura rígida, estando cada viga flexible (1204) fijada a la estructura rígida con una articulación giratoria (1205, 1206) en un extremo y conectada a las otras vigas flexibles (1204) con articulaciones giratorias (1205, 1206) en el otro extremo, de tal forma que las vigas flexibles (1204) describen una forma de pirámide.
10. Vehículo aéreo de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que el bastidor exterior (304) está equipado con un sensor de orientación (810).
11. Vehículo aéreo de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que el bastidor exterior (304) puede girarse activamente hasta una orientación deseada con respecto al bastidor interior **usando** uno o más accionadores (801, 802, 803).
12. **Vehículo aéreo de la reivindicación 11, en el que la orientación deseada del bastidor exterior (304) se gira activamente además usando el sensor de orientación (810).**
13. Vehículo aéreo de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en el que la orientación del bastidor exterior con respecto al bastidor interior está afectada por imanes (701, 702, 703), estando situados dichos imanes (701, 702, 703) sobre el bastidor exterior (304) y el bastidor interior (312) de manera que se atraen o rechazan entre sí cuando se acercan unos a otros.
14. Vehículo aéreo de la reivindicación 11 o 12, en el que los **accionadores (801, 802, 803)** están

controlados activamente de manera que ningún eje de rotación del sistema de cardán está alineado entre sí.

15. Vehículo aéreo de la reivindicación 13, en el que los imanes (701, 702, 703) están situados de manera que **ningún eje de rotación del sistema de cardán está alineado entre sí.**

5

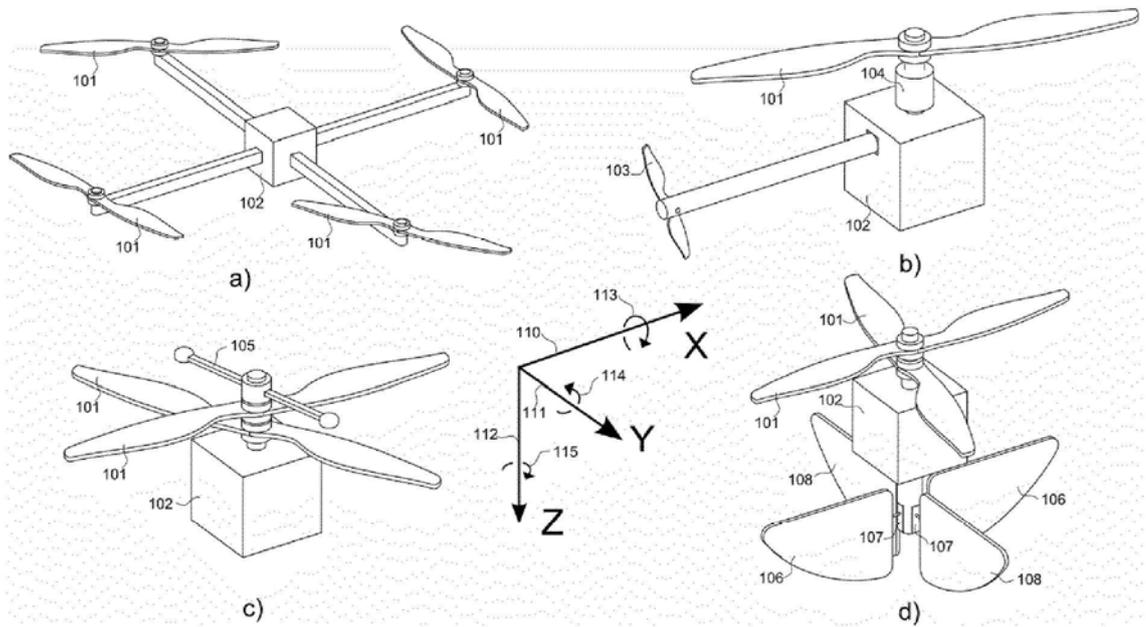


Fig. 1

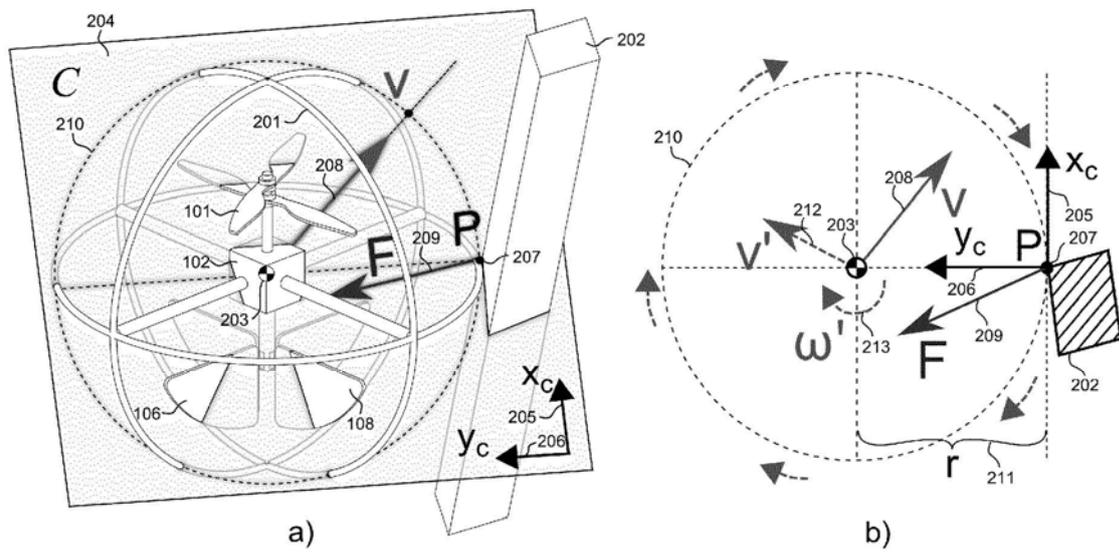


Fig. 2

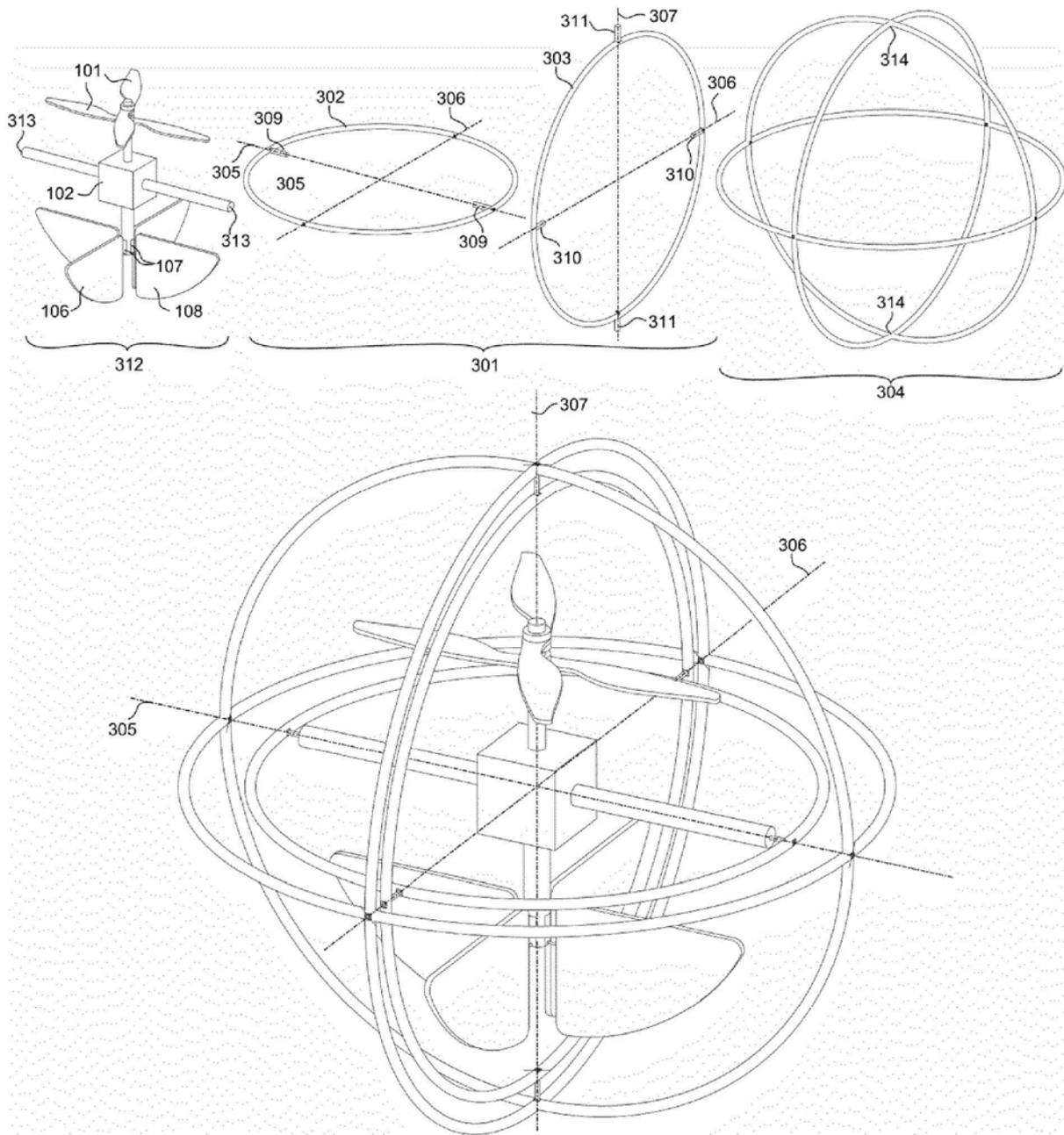


Fig. 3

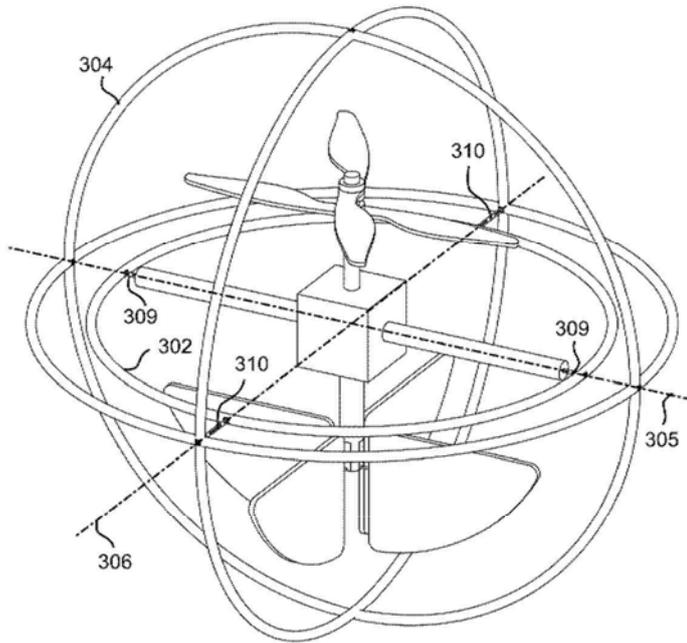


Fig. 4

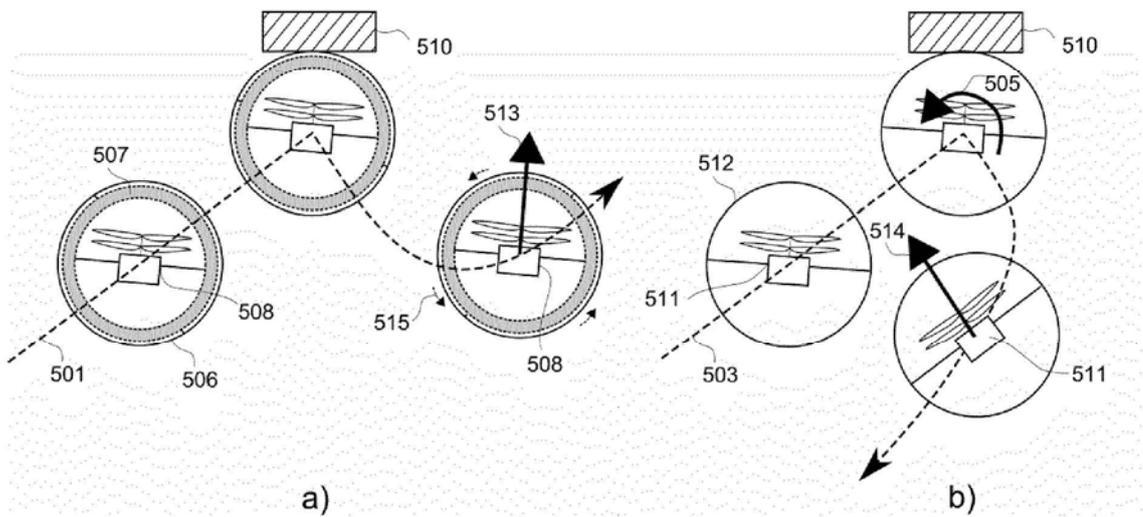


Fig. 5

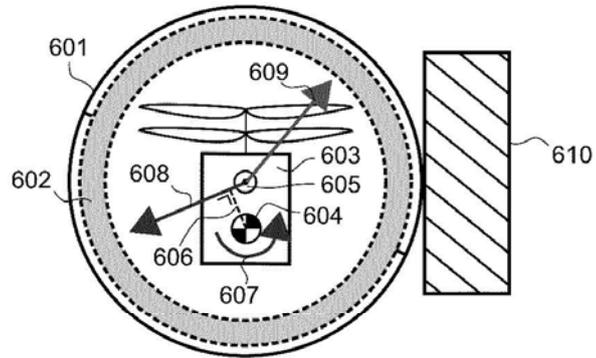


Fig. 6

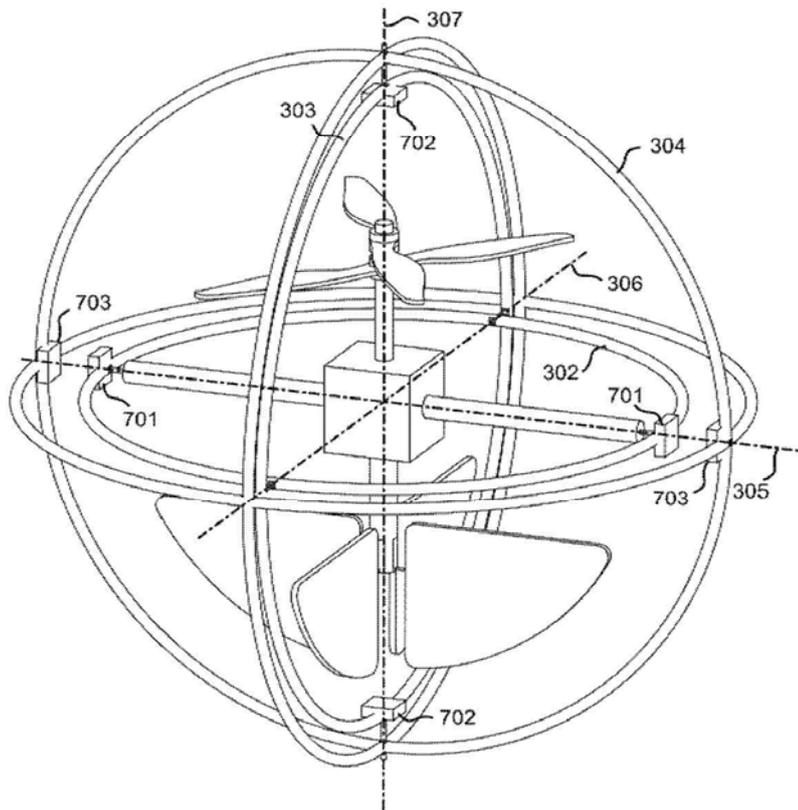


Fig. 7

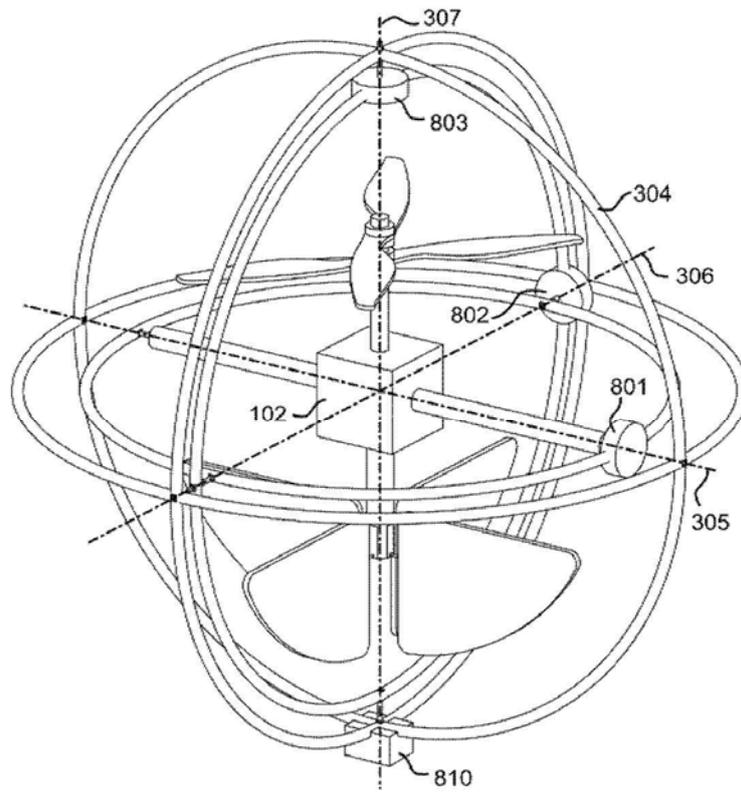


Fig. 8

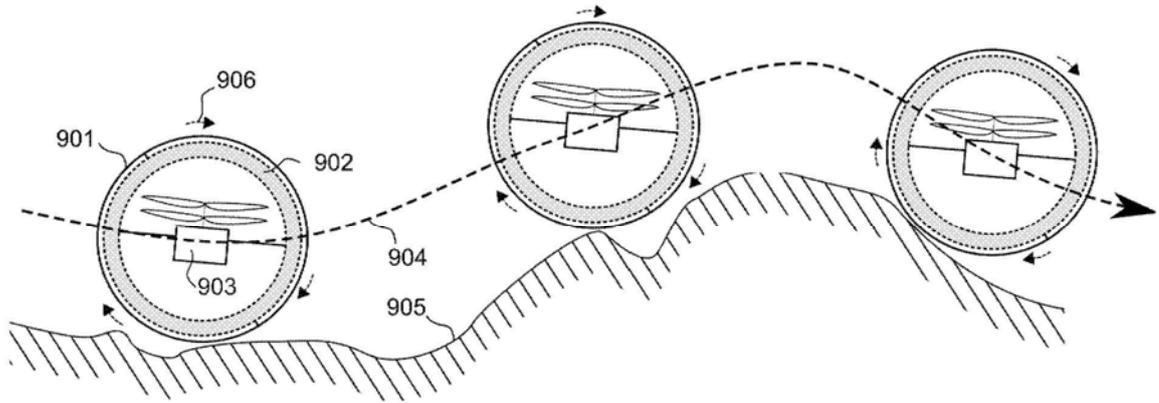


Fig. 9

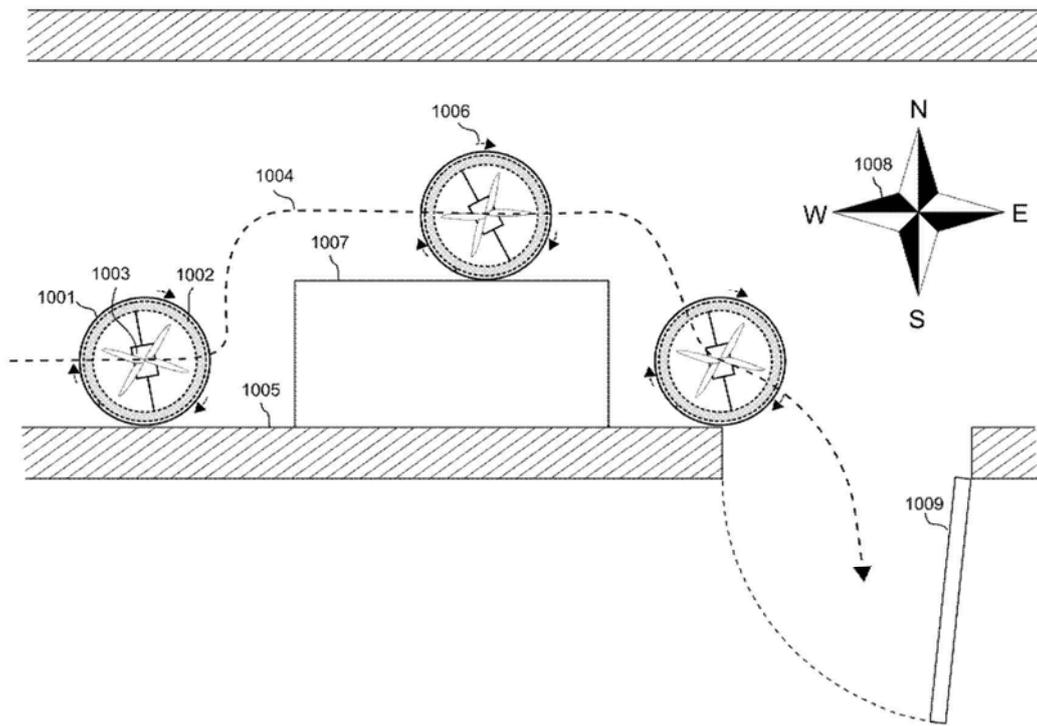


Fig. 10

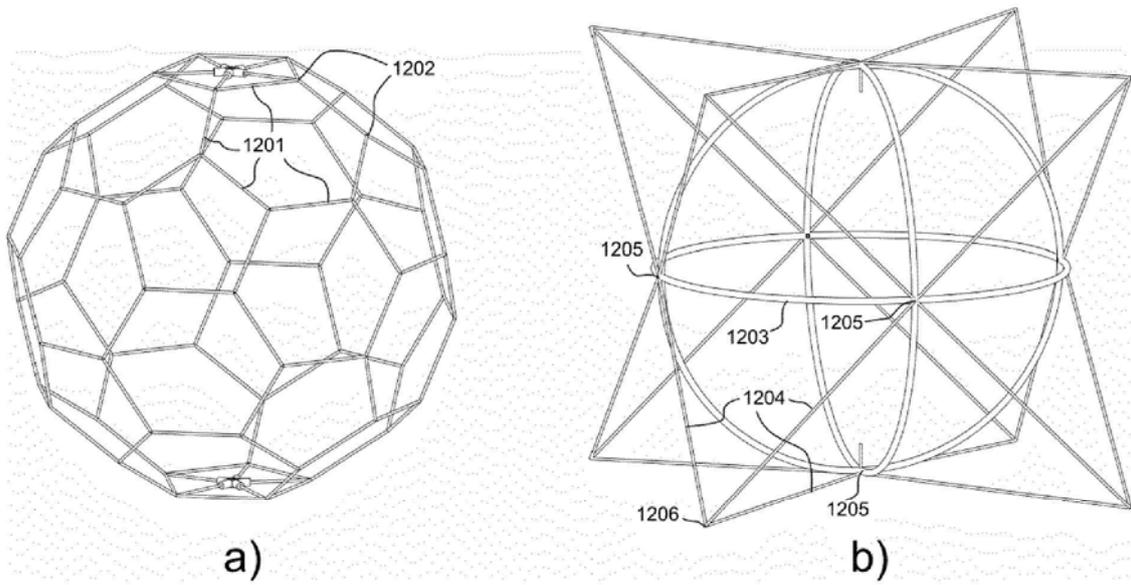
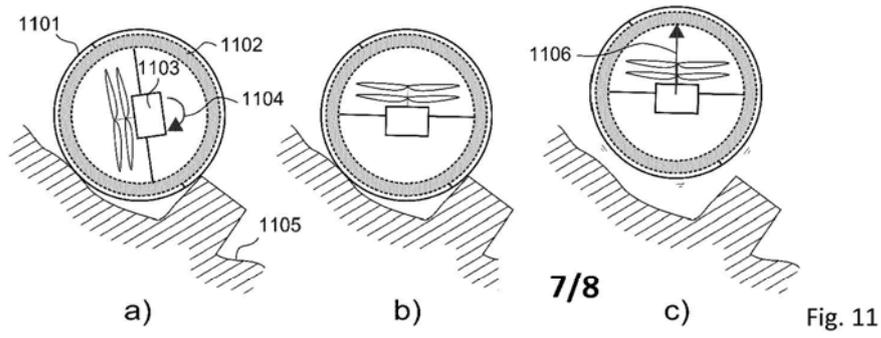


Fig. 12

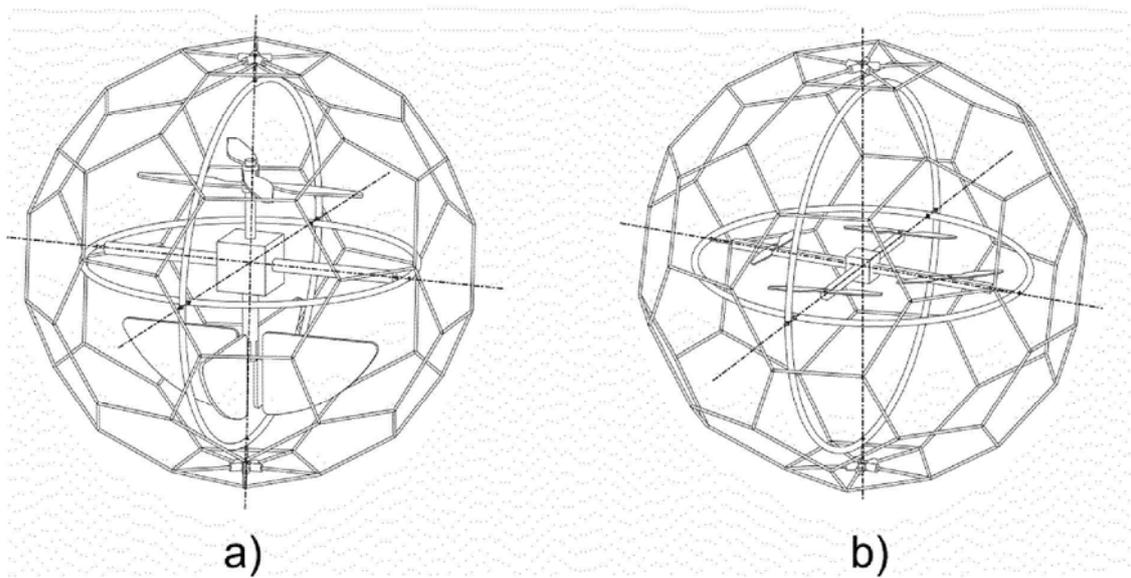


Fig. 13

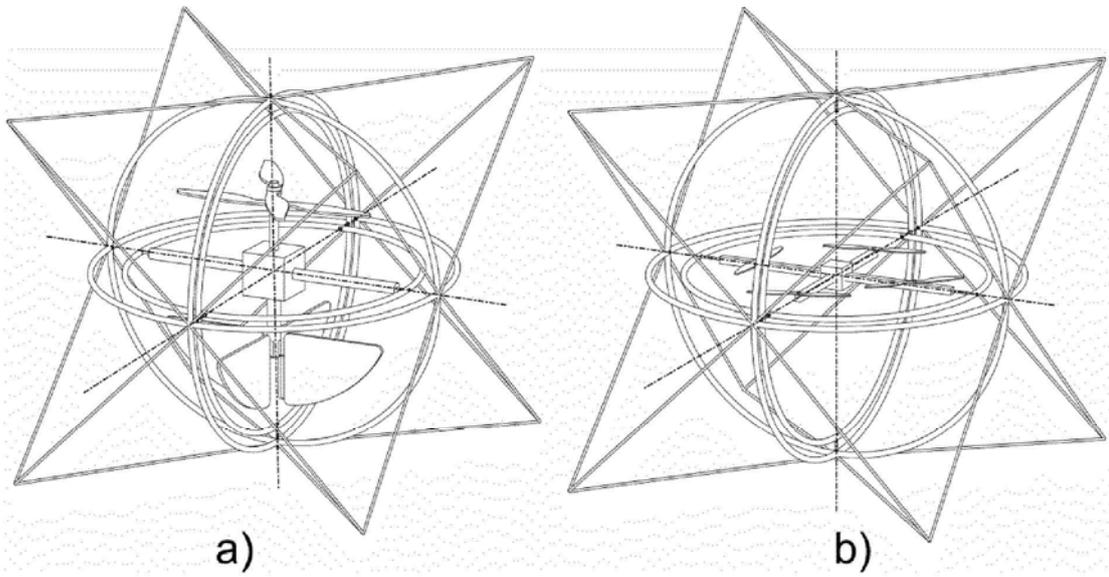


Fig. 14