

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 536 180**

51 Int. Cl.:

F03D 5/00 (2006.01)

F03D 5/06 (2006.01)

F03D 11/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.05.2007 E 07736828 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.02.2015 EP 2021624**

54 Título: **Sistema de control automático y proceso para el vuelo de cometas**

30 Prioridad:

23.05.2006 IT TO20060372

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

21.05.2015

73 Titular/es:

**KITE GEN RESEARCH S.R.L. (100.0%)
VIA B. TELESIO 2
20145 MILANO, IT**

72 Inventor/es:

**MILANESE, MARIO y
IPPOLITO, MASSIMO**

74 Agente/Representante:

LAZCANO GAINZA, Jesús

ES 2 536 180 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

Sistema de control automático y proceso para el vuelo de cometas.

5 La presente invención se refiere a un sistema de control automático y el proceso para el vuelo de cometas, en particular, para la optimización de la conversión de la energía eólica en energía eléctrica o mecánica a través del vuelo de cometas conectadas a través de cables a los dispositivos de conversión en tierra.

10 De hecho, a partir de algunas patentes anteriores, se conocen los procesos de conversión a partir de la energía eólica en energía eléctrica o mecánica a través de dispositivos que son capaces de convertir la energía mecánica generada por la fuente de viento en otra forma de energía, por lo general en energía eléctrica, que sustrae la energía eólica al viento mediante el uso de perfiles de energía del viento (genéricamente designado con el término "cometa") conectados a la misma a través de cables. En particular, IT-A-TO2003A000945 and EP-A- 04028646.0, que reivindicán la prioridad de la primera, en el nombre de Ippolito Massimo, revelan un sistema para convertir la energía cinética de las corrientes de viento en energía eléctrica a través del control de vuelo de cometas conectados a un sistema del tipo "carrusel". En tal sistema, sería deseable utilizar un sistema de control automático y proceso para el vuelo de las cometas utilizadas, que permitan la conducción en tiempo real de las propias cometas según los modos revelados en las patentes anteriores. En la técnica actual, sin embargo, no se conocen sistemas que permitan controlar el vuelo de las cometas utilizadas en el sistema de tipo "carrusel" de una manera eficiente.

20 También se conocen sistemas (tales como los revelados en US-B1-6254034, US 2002/040948 A1 and US-A-5931416) para convertir la energía cinética de las corrientes de viento en energía eléctrica, en el que al menos una cometa está conectada a través de cables a la unidad de generación de energía y de conducción fijada en tierra: en tales sistemas, la cometa se toma de forma cíclica a través de una etapa de tracción en la que asciende, se empuja por el viento, y durante la cual los cables de desenrollado hacen girar un generador de la unidad en tierra adaptada para generar energía eléctrica, y una etapa de recuperación en la que se recupera la cometa y después se impulsa con el fin de capturar de nuevo el viento. También en estos casos, la técnica no propone sistemas que permitan de manera eficiente el control del vuelo de cometas con el fin de garantizar la optimización de la producción de energía eléctrica, y en particular maximizar la energía mecánica transmitida a tierra a través de cables.

30 En el pasado, también se han propuesto diferentes configuraciones, relacionadas con el arrastre de barcos por medio de dispositivos que captan las corrientes de viento a través de cometas, como las descritas en particular en el documento GB-A-2,098,951, US-A- 5,056,447, en US-A-5,435,259, en WO-A-03097448, en US-A-2004035345, en US-A-2004200396, en WO-A-2005100147, en WO-A-2005100148, en WO-A-2005100149, y en DE-A-102004018814.

35 También en estos casos, de todos modos, en la técnica actual no se conocen sistemas y/o procesos que permiten controlar el vuelo de las cometas utilizadas para la propulsión de barcos de una manera eficiente.

40 En cualquier caso, de todos modos, la aplicación, a bordo de los sistemas de conversión citados anteriormente, de algoritmos clásicos de control predictivo basados en modelos de dinámica de vuelo de la cometa para proveer un control automático del vuelo de cometas, requeriría una complejidad de computación y los gastos generales que son poco adecuados con las necesidades del uso de procesadores informáticos pequeños, con costos aceptables, y de proveer instrucciones de comando en tiempo real.

45 Por lo tanto, el objeto de la presente invención es resolver los problemas anteriores de la técnica anterior proporcionando un sistema de control automático y de procedimiento para el vuelo de cometas que permitan de forma eficiente la optimización de la conversión de la energía eólica en energía eléctrica o mecánica y/o maximizar la energía transmitida a tierra por las propias cometas a través de cables.

50 Otro objeto de la presente invención es proveer un proceso de control automático del vuelo de cometas que permite una implementación eficiente y compatible computacionalmente con la necesidad de un control en tiempo real, de los algoritmos de control predictivo basados en un modelo de dinámica del vuelo de la cometa.

55 Los objetos anteriores y otros y las ventajas de la invención, como resultará de la siguiente descripción, se obtienen mediante un proceso de control automático para el vuelo de las cometas como se reivindica en la reivindicación 1.

60 Por otra parte, los objetos anteriores y otros y las ventajas de la invención se obtienen con un sistema de control automático para el vuelo de las cometas como se reivindica en la reivindicación 5.

65 Las realizaciones preferidas y las variaciones no triviales de la presente invención son la materia objeto de las reivindicaciones dependientes.

La presente invención se describirá mejor mediante algunas realizaciones preferidas de la misma, proporcionada como ejemplo no limitante, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- La Figura 1 muestra un diagrama de bloques que muestra los componentes principales del sistema de control automático para el vuelo de las cometas de acuerdo con la presente invención;
- 5 - La Figura 2 muestra una vista superior del sistema conocido como "carrusel" en algunas etapas del vuelo de una cometa; y
- La Figura 3 muestra un diagrama que muestra un sistema de referencia en coordenadas esféricas relacionadas con una cometa constreñida a una unidad de accionamiento que se mueve a lo largo de una trayectoria asignada.
- 10 En la siguiente descripción, se supondrá que el vuelo de al menos un cometa 2 es impulsado por al menos una unidad de accionamiento 4 equipada con tornos motorizados alternativamente a los que la propia cometa está conectada a través de cables de accionamiento 6, como la revelada sustancialmente en IT-A-TO2003A00094 and en EP-A-04028646.0. En consecuencia, debido a cuestiones de brevedad obvia, para una descripción detallada de los componentes que se mencionaran a continuación y común con el sistema de "carrusel", se debe hacer referencia a las patentes anteriores. Es totalmente evidente de todos modos, como se verá claramente a partir de la siguiente descripción, que el sistema y el proceso de acuerdo con la presente invención se pueden utilizar también para otras aplicaciones, diferentes del sistema de "carrusel", realizando modificaciones dentro del alcance de cualquier persona experta en la técnica.
- 15
- 20 Con referencia por lo tanto a la FIG. 1, es posible observar que el sistema de control automático 1, para el vuelo de al menos una cometa 2, de acuerdo con la presente invención comprende:
 - los primeros medios de detección 3 a bordo de la cometa 2, adaptados para detectar los primeros fragmentos de información relacionados con al menos la posición y orientación en el espacio de la cometa 2 en sí misma y las aceleraciones tri-axiales a las que está sometida;
 - 25
 - los segundos medios de detección 5 en tierra, adaptados para detectar los segundos fragmentos de información relacionados con al menos la cantidad de tensión en los cables de accionamiento de la cometa 2 y su posición relativa, la dirección y la intensidad de la corriente de viento W dentro de la cual, la cometa 2 se sumerge, y posiblemente, la posición y los movimientos de la unidad de accionamiento 4 a lo largo de una trayectoria de movimiento de la misma;
 - 30
 - medios de proceso y de control 7 del primer y segundo fragmento de información, adaptado para transformar los contenidos de esa información en un comando mecánico que opera en los tornos de la unidad de accionamiento 4 para accionar la cometa 2 a lo largo de una trayectoria de vuelo que maximiza la cantidad de energía cinética sustraída de la corriente de viento W. En general, los medios de proceso y de control 7 reciben como entrada las señales generadas por el primer 3 y segundo 5 medios de detección que detectan respectivamente, el primer y segundo fragmento de información que representan sustancialmente los diversos parámetros P, que caracterizan las condiciones de funcionamiento del "sistema de dinámica del vuelo de las cometas" y las condiciones de viento y realizan una función de control U de la cometa 2 que se transforma en el comando mecánico para ser transmitida a la unidad de accionamiento 4. A continuación en este documento, se supondrá que tal función U se llevará a cabo principalmente a través del control diferencial de la posición de los cables 6 que controlan la cometa 2. En cualquier caso, los detalles de construcción específicos para realizar el control no son necesarios *per se* para la disposición descrita en el presente documento. Las personas expertas en la técnica comprenderán que tal tarea de procesamiento se puede realizar fácilmente, en los medios de control y de proceso 7, tanto por un procesador exclusivo (de cualquier tipo conocido), y por un procesador programado de propósito general (de acuerdo con criterios conocidos *per se*) con un producto de la información correspondiente;
 - 35
 - 40
 - 45
 - un sistema de transmisión, de los primero fragmentos de información a los medios de tratamiento y de control 7.
 - 50
 - Preferiblemente, con el fin de deducir la posición y la orientación de una cometa 2 en el espacio y las aceleraciones a las que se somete, los primeros medios de detección 3 comprenden acelerómetros tri-axiales del tipo MEMS en combinación con al menos una brújula electrónica, este último hecho, por ejemplo, con un magnetómetro, del tipo Fluxgate u otro tipo. En particular, la cometa 2 está equipada con al menos un magnetómetro y al menos dos acelerómetros tri-axiales colocados en los extremos de la cometa 2, preferiblemente junto a la unión con los cables de accionamiento 6.
 - 55
 - Como se ha indicado, los segundos medios de detección 5, entre otras cosas, están adaptados para detectar los segundos fragmentos de información 5a se ocupan al menos con la cantidad de tensión en los cables de accionamiento 6 de la cometa 2 y su posición relativa, real o emulada por los tornos de unidad de accionamiento 4. Los segundos medios de detección 5, por lo tanto pueden comprender medidores de deformación para medir la deflexión de los cables de accionamiento y los codificadores en los tornos de unidad de accionamiento; tales codificadores, posiblemente asociados con un motor-alternador, también se pueden utilizar para la detección de la longitud del cable de conducción 6 desenrollado de los tornos, y por consiguiente la distancia de la cometa 2 de la unidad de accionamiento 4, y la longitud diferencial entre los dos cables de accionamiento 6 de una misma cometa
 - 60
 - 65

2. Además, los segundos medios de detección 5 comprenden al menos un anemómetro y al menos un anemoscopio adaptado para detectar, respectivamente, la cantidad y dirección del viento actual W.

5 Por otra parte, los segundos medios de detección 5 también pueden comprender el sistema de visualización a tierra, del tipo óptico o microondas, para la posición de la cometa.

10 El sistema de transmisión de los primeros fragmentos de información entre la cometa 2 y los medios de control y de procesamiento 7, obviamente se puede realizar con diferentes tecnologías, tales como por ejemplo a través de fibras ópticas, transmisión inalámbrica, etc.

15 Como se indica en el preámbulo de la descripción, el sistema y proceso de acuerdo con la presente invención se puede aplicar ventajosamente a los dos modos diferentes conocidos para la conversión de la energía eólica.

20 En un primer modo, la unidad de accionamiento está fijado con respecto a la tierra. Por lo tanto, la generación de energía se produce a través de la ejecución periódica de ciclos compuestos de dos etapas principales, designados como etapas de tracción y recuperación. La unidad de accionamiento recoge y libera los cables a través de los tornos movidos por dos accionadores eléctricos, impulsados por los medios de procesamiento y de control, que pueden funcionar tanto como motores o como generadores. En la etapa de tracción, el control está diseñado para que la cometa, a partir de una longitud mínima asignada por el cable, extiende su anchura, de manera que los accionadores eléctricos se hacen girar a través de los tornos, generando la energía eléctrica. Cuando los cables llegan a su longitud máxima, la etapa de recuperación se inicia, en la cual la cometa es operada desde una zona en la que los cables pueden ser recuperados por los accionadores eléctricos que consumen una pequeña fracción de la energía generada durante la etapa de tracción. Cuando los cables alcanzan la longitud mínima preestablecida, la etapa de recuperación se inicia de nuevo. El sistema de acuerdo con la presente invención permite la maximización de la energía generada en la etapa de tracción y la minimización de la energía consumida para la recuperación de la cometa

25 En un segundo modo, la unidad de accionamiento es capaz de moverse con respecto a la tierra a lo largo de una trayectoria conocida y la energía se genera mediante la transmisión de este movimiento a un accionador electromecánico. Como ejemplo, una trayectoria circular se tiene en cuenta en el presente documento, como la que se puede realizar en la configuración en la que las cometas se utilizan junto con el sistema de "carrusel" 20. El proceso provee la ejecución periódica de ciclos compuestos de cuatro etapas, gráficamente mostrados en la FIG. 2 como la etapa I de tracción con las paredes de la derecha, la etapa II de suspensión de tracción y el cambio de la pared II, la etapa III de tracción con las paredes de la izquierda y la etapa IV del cambio de pared. Tales etapas se ubican en función de un ángulo α que señala la posición de la unidad de conducción 4 en el diagrama circular, en relación con la dirección actual de la corriente del viento W. Se supone que el movimiento del "carrusel" 20 se produce en sentido horario y los ángulos son considerados como positivos a lo largo de esta dirección. Se tiene en cuenta además que el generador eléctrico movido por el "carrusel" 20 se controla con un sistema de ajuste apropiado de forma que la velocidad de rotación $\alpha = \alpha^{ref}$ es constante. La etapa de tracción con las paredes de la derecha comienza para $\alpha = 0$ y el sistema de acuerdo con la presente invención permite que la cometa 2 imprima una rotación en sentido horario para el "carrusel" 20, maximizando la potencia que se puede obtener en las diferentes posiciones de la trayectoria. Esta etapa termina para $\alpha = \bar{\alpha}$, el ángulo en el que la cometa 2 no es capaz de proveer más de un momento positivo. Entonces, la etapa de la suspensión de tracción y el cambio de la pared comienza. Durante esta etapa, la cometa 2 no es capaz de producir energía hasta el siguiente ángulo $\alpha = \bar{\alpha}$, en el que se inicia la etapa de tracción con paredes de la izquierda.

30 Por lo tanto, el sistema de acuerdo con la presente invención conduce a la cometa 2 a una zona en la que ofrece su resistencia mínima y junto al ángulo $\alpha = \bar{\alpha}$ que realiza el cambio de la pared, para el funcionamiento de la transición a la siguiente etapa de tracción con las paredes de la izquierda. En esta etapa, la cometa 2 es de nuevo capaz de imprimir un momento en sentido horario positiva al "carrusel" 20 y el sistema de acuerdo con la presente invención permite la maximización de la potencia que se puede obtener en las diferentes posiciones de la trayectoria, hasta $\alpha = 0$. Ahora la etapa de cambio a las paredes de la derecha se realiza, minimizando la energía necesaria para dicha operación y el ciclo puede iniciar de nuevo desde una etapa de tracción con las paredes de la derecha.

35 La presente invención además se refiere a un proceso de control automático para el vuelo de cometas, en particular dirigido a optimizar la conversión de la energía eólica en energía eléctrica o mecánica a través de un sistema como el descrito previamente, utilizando los parámetros P, que caracterizan las condiciones de funcionamiento del "sistema de dinámica del vuelo de las cometas" y las condiciones de viento y la realización de una función de control U, de la cometa. En particular, el proceso de acuerdo con la presente invención realiza el control de la cometa mediante el uso de una metodología de Modelo Predictivo de Control (MPC), basado en un modelo de dinámica del vuelo de la cometa expresado con las ecuaciones de tiempo discretos, descritas, para un período de muestreo asignado Δt , como:

$$x_{t+1} = g(x_t, u_t, W_t, v_t^{ref})$$

$$F_t = h(x_t, u_t)$$

donde:

- 5 - W_t es un vector de velocidad del viento o corriente del viento W , cuyos valores son detectados por los medios de detección del sistema de acuerdo con la presente invención y se transmiten a los medios de control y de proceso;
- V_t^{ref} es una función de diseño asignado descrita a continuación;
- 10 - u_t es la acción de control efectivo definida en el tiempo t , por el proceso de acuerdo con la presente invención;
- $x_t = [\vartheta_t \phi_t r_t \Delta \vartheta_t \Delta \phi_t \Delta r_t s_t \Delta s_t]$ es un vector de estado compuesto, en el tiempo t , de las posiciones y las variaciones de posición del baricentro de la cometa 2, expresado en coordenadas esféricas, como se muestra en la FIG. 3, para un sistema de referencia integral con la unidad de accionamiento 4, y de las posiciones y las variaciones de posición
- 15 de la unidad de accionamiento 4, en las coordenadas curvilíneas en la trayectoria del movimiento T siendo tenidas en cuenta (se supone como ejemplo circular) detectado por los medios de detección del sistema de acuerdo con la presente invención y se transmite a los medios de proceso y de control; y
- 20 - F_t es la fuerza útil transmitidas por los cables para la generación de energía.

Como ya se ha indicado, la generación de energía provee la ejecución periódica de ciclos compuestos de diferentes etapas. La generación de energía se produce en algunas de estas etapas, durante las cuales la tarea del proceso, que opera a través del sistema de acuerdo con la presente invención, es la maximización de la energía útil generada. Las otras etapas se utilizan para desarrollar las transiciones de una etapa útil a la otra y el propósito del sistema y del proceso de acuerdo con la presente invención es el desarrollo de tales transiciones, reduciendo al

mínimo la energía necesaria.

En cada uno de estas etapas, el control se calcula con la técnica MPC, que provee reducir al mínimo, en cada tiempo de muestreo, una función de coste J , que define los objetivos de control para cada etapa. Tal minimización debe además ser, sometida a las condiciones en las variables de control y de estado que definen las restricciones que estas variables deben cumplir necesariamente (por ejemplo, que la altura de la cometa desde el suelo debe ser positiva o que la variable de control y su tasa de variación en el tiempo no puede, debido a restricciones físicas, ser mayor que los valores asignados).

Al definir el horizonte de predicción como N_p y el horizonte de control como $N_c \leq N_p$, la función de costo J se puede expresar como:

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} L(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}, W_{t+k}, v_{t+k}^{ref})$$

40 donde:

$x_{t+k|t}$ designa el estado predicho por el modelo, dado en la secuencia de entrada $u_{t|t}, \dots, u_{t+k-1|t}$ y el estado "inicial", $x_{t|t} = x_t$, $U = [u_{t|t}, u_{t+1|t}, \dots, u_{t+N_c-1|t}]^T$ es la secuencia de control a ser optimizada y L es una función adecuadamente definido para representar los objetivos de control de está examinando la etapa específica. Si $N_c < N_p$, se hace la siguiente elección:

$$u_{t+k|t} = u_{t+N_c-k|t}, \quad k = N_c, N_c + 1, \dots, N_p - 1.$$

50 Las restricciones se expresan para cada etapa operativa específica por disecciones de la forma:

$$F x_{t+k} + G u_{t+k} \leq H, \quad k = 0, \dots, N_p - 1$$

donde las matrices F , G y H señalan las condiciones de restricción.

Aplicando el algoritmo de control predictivo en una forma clásica de la misma, la ley de control de cada etapa de operación individual sería obtenida aplicando la siguiente estrategia de "retroceso-horizonte":

- 5 1. en el instante t , obtener x_t ;
2. resolver el problema de optimización:

$$\min_U J(U, x_{t|t}, N_p, N_c)$$

- 10 sujeto a las condiciones indicadas anteriormente;
- 15 3. aplicar el primer elemento de la secuencia de la solución de U del problema de optimización como acción del control actual:

$$u_t = u_{t|t}$$

4. repetir todo el procedimiento en el momento $t + 1$.
- 20 Para cada etapa individual de uno de los dos modos de generación descritos, se utilizan los cambios apropiados de la función de costo J y las matrices F , G y H que señalan las condiciones de restricción.

Como ejemplo, se incluyen posibles cambios para el primer modo de generación de energía antes mencionado. En este modo, la fuerza útil F_t es la fuerza de tracción del cable. Además, puesto que la unidad de accionamiento se fija, $\alpha = 0$, $\alpha = 0$ y por lo tanto estas dos variables no aparecen en las ecuaciones del modelo. Dejar que \underline{L} y \bar{L} sean las longitudes mínimas y máximas de los cables durante las etapas de vuelo. Debe tenerse en cuenta que el viento sopla a lo largo de la dirección X . Las condiciones de restricción son las mismas para ambas etapas de tracción y de recuperación, por ejemplo:

$$\vartheta_t \leq \bar{\vartheta} < \pi/2$$

$$|u_t| \leq \bar{u}, \quad |u_t - u_{t-1}| \leq \Delta$$

30 La primera condición muestra que, durante el vuelo, la cometa no debe acercarse excesivamente al suelo. La segunda condición muestra que el control diferencial de la posición del cable debido a razones físicas no puede ser mayor que los valores asignados, tanto como valor absoluto y como la variación entre un tiempo de muestreo y otro.

35 La etapa de tracción comienza con la cometa en una posición de partida asignada $\vartheta = \vartheta_t, \phi = 0, r = \underline{L}$. Durante esta etapa, el control provee que la cometa ejerce una fuerza de tracción F en los cables, extendiendo su longitud, de manera que los actuadores eléctricos son arrastrados por los tornos que generan la energía eléctrica. Los actuadores del sistema 1, obviamente, pueden ser controlados por un sistema de ajuste apropiado, de modo que la tasa de desenrollado es constante y, por lo tanto $\dot{r} = \bar{v}^{ref}$, con $\bar{v}^{ref} > 0$ asignado. Como función de coste, en esta etapa de tracción, se utiliza la siguiente:

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = - \sum_{k=0}^{N_p-1} \Delta r_{t+k} F_{t+k}$$

45 cuya minimización provoca una maximización de la energía eléctrica generada durante el intervalo de predicción.

La etapa de tracción termina cuando los cables llegan a su longitud máxima, es decir, $r = \bar{L}$, condición a partir de la que se inicia la etapa de recuperación. El objetivo de esta etapa es llevar de nuevo la cometa a la posición inicial $\vartheta = \vartheta_t, \phi = 0, r = \underline{L}$, a partir de la cual se puede iniciar una nueva etapa de tracción, consumiendo la cantidad mínima de

energía. Esto se obtiene mediante el accionamiento de tres sub-etapas. En el primera sub-etapa, se elige $v_t^{ref} = \bar{v}^{ref} e^{-\lambda t}$, $\lambda > 0$ y:

$$J(U, x_{it}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} [\vartheta_{t+k}^2 + (|\phi_{t+k} - \pi/2|)^2]$$

5 La minimización de esta función es lo mismo que tomar la cometa en una zona donde ϑ es pequeño y ϕ es cerca de $\pi/2$, la zona de la cual es posible recuperar los cables con un pequeño consumo de energía. Esta primera sub-etapa de recuperación termina cuando J ha alcanzado un valor "suficientemente pequeño", y la segunda sub-etapa comienza, cuando se reduce la longitud del cable.

10

Por lo tanto, se elige $v_t^{ref} = \underline{v}^{ref} (e^{-\lambda t} - 1)$, $\lambda > 0$, $\underline{v}^{ref} > 0$ y, como índice para ser minimizado:

$$J(U, x_{it}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} |\Delta r_{t+k}| F_{t+k}$$

15 que mide la energía requerida para enrollar los cables durante el intervalo de predicción. Esta segunda sub-etapa de recuperación termina cuando la longitud del cable ha alcanzado la longitud mínima \underline{r} . A continuación, la tercera subetapa empieza, cuyo propósito es aceptar la devolución de la cometa en la posición a partir de la cual tiene que volver a iniciar una nueva etapa de tracción. Por lo tanto, se elige

20 $v_t^{ref} = -\underline{v}^{ref} e^{-\lambda t}$, $\lambda > 0$ y:

$$J(U, x_{it}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} [(\vartheta_{t+k} - \vartheta_j)^2 + \phi_{t+k}^2]$$

25 Esta tercer y última sub-etapa termina cuando J ha alcanzado un valor "suficientemente pequeño", poniendo fin a la etapa de recuperación y permitiendo iniciar un nuevo ciclo de tracción/recuperación.

En el segundo modo de generación de energía con trayectoria circular mencionado anteriormente, la "fuerza útil" F_t es el componente tangencial a la trayectoria de la fuerza de tracción de los cables. Los accionadores eléctricos, arrastrados por el brazo del "carrusel" 20 al cual están conectados los cables, se controlan con un sistema de ajuste apropiado de modo que la velocidad de rotación del carrusel 20 es constante $\alpha = \bar{\alpha}$, con $\bar{\alpha} > 0$ asignado, y se considera $v_t^{ref} = \bar{v} \forall t$. Se considera, además, que la longitud del cable es constante. Las condiciones de restricción son las mismas para todas las etapas, por ejemplo:

35
$$\vartheta_t \leq \bar{\vartheta} < \pi/2$$

$$|u_t| \leq \bar{u}, \quad |u_t - u_{t-1}| \leq \Delta$$

40 La etapa de tracción con las paredes de la derecha comienza a $\alpha = 0$ y con la cometa en una posición inicial asignado $\vartheta = \vartheta_1$, $\phi = \phi_1$

Como función de costo, en esta etapa de tracción, se utiliza la siguiente:

$$J(U, x_{it}, N_p, N_c) = - \sum_{k=0}^{N_p-1} R \Delta \alpha_{t+k} F_{t+k}$$

45 cuya minimización provoca una maximización de la energía eléctrica generada durante el intervalo de predicción.

Esta etapa termina para el ángulo $\alpha = \bar{\alpha}$, en el cual la cometa no es capaz de proveer más de un momento positivo. Entonces se inicia la etapa de suspensión de tracción con el cambio de la pared, que se compone de dos sub-etapas. En la primera sub-etapa, el control acciona el vuelo de la cometa, con el fin de proveer una resistencia mínima. Esto se obtiene eligiendo como función:

50

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} R \Delta \alpha_{t+k} F_{t+k}$$

5 Este etapa termina para $\alpha = \bar{\alpha}_c < \bar{\alpha}$, en donde comienza la segunda sub-etapa, en la que el sistema lleva la cometa a la posición $\vartheta = \vartheta_{II}$, $\phi = \phi_{II}$, apropiada para el inicio de la siguiente etapa de tracción con las paredes de la izquierda. Esto se obtiene mediante la elección de:

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} [(\vartheta_{t+k} - \vartheta_{II})^2 + (\phi_{t+k} - \phi_{II})^2]$$

10 para $\alpha = \bar{\alpha}$, la etapa de tracción comienza con las paredes de la izquierda, en la cual, con el fin de maximizar la energía generada, se utiliza la misma función J como la etapa de tracción anterior. Este etapa de tracción termina para $\alpha = 0$, en la cual se produce el cambio de pared. En esta etapa, se elige la siguiente:

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} [(\vartheta_{t+k} - \vartheta_I)^2 + (\phi_{t+k} - \phi_I)^2]$$

15 El etapa termina cuando J ha alcanzado un valor "suficientemente pequeño", mostrando que la posición de la cometa es apropiada para el inicio de una nueva etapa de tracción con las paredes de la derecha.

20 La aplicación clásica de los procedimientos anteriores requiere la solución al problema de la optimización de la función de coste J en cada tiempo de muestreo, siendo tal tarea difícil de llevar a cabo en tiempo real en los tiempos de muestreo requeridos (del orden de 0.1 a 0.2 seg.), mediante los medios de proceso con un costo aceptable y en función de los tiempos de reacción necesarios para un control eficiente del vuelo de una cometa.

25 Con el fin de resolver ventajosamente tal inconveniente, para la aplicación del proceso de acuerdo con la presente invención, se debe tener en cuenta que el control MPC, u_t es una función no lineal del estado x_t , a saber:

$$u_t = f(x_t, W_t, v_t^{ref}) = f(z_t)$$

30 La función $f(z)$ no se conoce de manera explícita, pero un cierto número de valores de $f(z)$ se puede conocer a través de un procedimiento de MPC fuera de línea, a partir de los valores asignados $\tilde{z}_k, k = 1, \dots, M$

Por lo tanto, el proceso de acuerdo con la presente invención comprende las etapas de:

- calcular:

$$35 \quad \tilde{u}_k = f(\tilde{z}_k), \quad k = 1, \dots, M$$

- a partir de los valores $\tilde{z}_k, \tilde{u}_k, k = 1, \dots, M$, obtenidos de una aproximación \hat{f} de f . Esto puede ocurrir con técnicas de aproximación de función a partir de un cierto número finito de correspondencias. Tal procesamiento se puede realizar de diferentes maneras (*per se* sustancialmente conocido), por ejemplo mediante el uso de redes neuronales. Sin embargo, estos métodos tienen algunos problemas debido al hecho de que normalmente la función de la aproximación se obtiene mediante un algoritmo de optimización no lineal, y no es posible saber, al final del algoritmo, si el nivel de aproximación obtenido es apropiado o si el número M de valores calculados fuera de la línea es suficiente.

45 Con el fin de superar estas limitaciones, se procede de la siguiente manera.

Se definen las siguientes funciones:

$$50 \quad f_u(z, \gamma) = \min_{k=1, \dots, M} (\tilde{u}_k + \gamma \|z - \tilde{z}_k\|)$$

$$f_l(z, \gamma) = \max_{k=1, \dots, M} (\tilde{u}_k - \gamma \|z - \tilde{z}_k\|)$$

5 A continuación se calcula:

$$\gamma^* = \inf_{\gamma: f_u(\tilde{z}_k, \gamma) \geq \tilde{u}_k, k=1, \dots, M} \gamma$$

10 Por consiguiente, la estimación de \hat{f} de f viene dada por:

$$\hat{f}(z) = \frac{1}{2} [f_u(z, \gamma^*) + f_l(z, \gamma^*)]$$

15 Suponemos, para simplificar, que los puntos \tilde{z}_k son elegidos en una cuadrícula uniforme de una región rectangular Z que comprende los intervalos en los que operan las variables x , W , v^{ef} . Entonces, se obtiene la siguiente:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} |f(z) - \hat{f}(z)| = 0, \quad \forall z \in Z$$

20 Por otra parte, para un M dado, el error de estimación de $f(z) - \hat{f}(z)$, está limitado como:

$$|f(z) - \hat{f}(z)| \leq \frac{1}{2} [f_u(z, \gamma^*) - f_l(z, \gamma^*)], \quad \forall z \in Z$$

25 Esto permite verificar si \hat{f} proporciona una aproximación suficiente de f o si un valor mayor de M es necesario.

El control MPC puede entonces ser implementado en línea, siempre que los medios de control y de proceso calculen, dependiendo de las señales recibidas desde el sistema de periferia 1, la función $\hat{f}(z)$ en cada instante de muestreo: $u_t = \hat{f}(z_t)$

30 En otras palabras, operando de esta manera, es posible calcular la aproximación anterior resolviendo los problemas de optimización fuera de línea M , por lo tanto, sin ser objeto de restricciones particulares, ni en términos de poder de procesamiento disponible, ni en términos de tiempo de procesamiento.

35 La aproximación calculada de esta manera se puede hacer disponible mediante el almacenamiento en una memoria asociada con los medios de proceso y de control de la aproximación \hat{f} pf de la norma de control.

Los medios de proceso y de control pueden entonces controlar en tiempo real del vuelo de la cometa mediante el uso de la aproximación \hat{f} , en lugar de la norma de control f .

40 Es totalmente evidente que la presente invención se refiere además a un programa de ordenador que comprende un código de programa informático adaptado para realizar todas o parte de las etapas del proceso descritas anteriormente, cuando dicho programa se realiza en un ordenador o, por ejemplo, por los medios de proceso y de control del sistema 1 de acuerdo con la presente invención.

45 En una realización alternativa de la misma, el sistema y/o el proceso de acuerdo con la presente invención puede encontrar una aplicación válida también en el sector marítimo, para arrastrar barcos mediante la explotación de la energía eólica.

50 En tal caso, todos los componentes del sistema descrito anteriormente de acuerdo con la presente invención se colocan en un barco de motor o velero. A diferencia de la aplicación descrita anteriormente, el objetivo del sistema principal no consiste más en la conversión de la energía eólica en energía eléctrica, pero si en la explotación de la fuerza del viento para arrastrar un barco, y por lo tanto para la conversión de la energía eólica en energía mecánica.

55 El sistema de control está programado para maximizar la energía que la cometa es capaz de extraer del viento con el fin de optimizar continuamente la explotación de las corrientes de viento, pero evitando que la carga del cable se haga excesiva y dañe los componentes del sistema. Por lo tanto, la transmisión de potencia no se produce más a través del accionamiento de un generador mediante la rotación de un torno, pero limitando tanto como sea posible el

ES 2 536 180 T3

desenrollado de los cables de manera que la cometa este siempre en la proa del barco, al cual está conectada la cometa a través de los mismos cables, y el barco se mueve con respecto a un sistema de referencia fijo.

REIVINDICACIONES

1. Proceso de control automático para el vuelo de cometas (2), siendo dichas cometas (2) impulsadas por cables de accionamiento (6), adaptadas para ser utilizadas juntas con un sistema de tipo "carrusel" (20) y adaptadas para generar energía a través de una ejecución periódica de una etapa de tracción y una etapa de recuperación realizada sobre dichas cometas (2), dicho proceso que comprende las etapas de:

- detectar los primeros fragmentos de información relacionados con al menos una posición y una orientación en el espacio de las cometas (2) y las aceleraciones a las que dichas cometas (2) están sometidas;

- detectar los segundos fragmentos de información relacionados con al menos una cantidad de tensión sobre dichos cables de accionamiento (6) de dichas cometas (2) y su posición relativa, una dirección y una intensidad de una corriente de viento W dentro de la cual dichas cometas (2) están inmersas;

- transformar un contenido de dicho primer y segundo fragmento de información (P) en un comando mecánico relacionado con una función de control (U) para accionar dichas cometas (2) a lo largo de una trayectoria de vuelo maximizando una cantidad de energía cinética restada de dicha corriente de viento W; y

- transmitir dichos primeros fragmentos de información para el medio de control y de proceso (7) de dichas cometas (2);

caracterizado porque dicho proceso de control automático realiza la función de control (U) utilizando una metodología de control predictivo basado en un modelo de dinámica del vuelo de dichas cometas (2) a partir de dichos fragmentos de información (P), dicho modelo de dinámica del vuelo de dichas cometas (2) que se define como:

$$x_{t+1} = g(x_t, u_t, W_t, v_t^{ref})$$

$$F_t = h(x_t, u_t) ,$$

y

$$u_t = f(x_t, W_t, v_t^{ref}) = f(z_t)$$

siendo dicha función de control (U) expresada como $u_t = \hat{f}(z_t)$ aproximada por una función \hat{f} tal que $u_t = \hat{f}(z_t)$, donde:

- W_t es un vector de velocidad del viento o corriente de viento W;

- v_t^{ref} es una función de diseño asignada;

- U_t es la acción de control efectivo definido en el tiempo t;

- $X_t = [\theta_t \phi_t r_t \Delta \theta_t \Delta \phi_t \Delta r_t s_t \Delta s_t]$ es un vector de estado compuesto, en el tiempo t, de las posiciones y variaciones de posición de la cometa (2) baricentro, expresado en coordenadas esféricas, y de las posiciones y variaciones de posición en coordenadas curvilíneas de la trayectoria de movimiento T que se tienen en cuenta; y

F_t es la fuerza útil transmitida por los cables para la generación de energía.

2. Proceso de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** dicha función de control (U) expresada como $u_t = \hat{f}(z_t)$ se calcula fuera de línea.

3. Proceso de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** dicha función f aproximada se estima como:

$$\hat{f}(z) = \frac{1}{2} [f_u(z, \gamma^*) + f_l(z, \gamma^*)]$$

donde:

$$f_u(z, \gamma) = \min_{k=1, \dots, M} (\tilde{u}_k + \gamma \|z - \tilde{z}_k\|)$$

$$f_l(z, \gamma) = \max_{k=1, \dots, M} (\tilde{u}_k - \gamma \|z - \tilde{z}_k\|)$$

$$\gamma^* = \inf_{\gamma: f_u(\tilde{z}_k, \gamma) \geq \tilde{u}_k, k=1, \dots, M} \gamma$$

4. Proceso de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque comprende las etapas de:

- 5 a) definir un período de muestreo Δt ;
- b) proveer un vector W_t ;
- 10 c) proveer una función v^{ref}_t ;
- d) proveer un vector de estado $X_t = [\vartheta_t \ \phi_t \ r_t \ \Delta \vartheta_t \ \Delta \phi_t \ \Delta r_t \ s_t \ \Delta s_t]$
- e) definir las restricciones $Fx_{t+k} + Gu_{t+k} \leq H, k = 0, \dots, N_p - 1$;
- 15 f) definir un horizonte de predicción N_p y un horizonte de control tal que $N_c \leq N_p$;
- g) minimizar una función de coste $J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_c-1} L(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}, W_{t+k}, v_{t+k}^{ref})$ y obtener al menos una secuencia de control $u_k, k=1, \dots, M$;
- 20 h) proveer una secuencia de valores $\tilde{z}_k, k = 1, \dots, M$;
- i) calcular $\hat{u}_k = \hat{f}(\tilde{z}_k), k = 1, \dots, M$ de dicho valores asignados $\tilde{z}_k, k = 1, \dots, M$;
- 25 j) a partir de dicho $\tilde{z}_k, \tilde{u}_k, k = 1, \dots, M$, obtener dicha aproximación \hat{f} de dicha f ;
- k) calcular fuera de línea $u_t = \hat{f}(z_t)$, en cada instante de muestreo Δt ;
- l) almacenar dicho u_t en los medios de proceso y de control (7).

5. Sistema de control automático (1) para un vuelo de al menos una cometa (2), estando dicha cometa (2) adaptada para ser utilizada junto con un sistema de tipo "carrusel" (20), siendo dicha cometa (2) controlada por una unidad de accionamiento (4) equipada con dos tornos a los que dicha cometa (2) está conectada a través de dos cables de accionamiento respectivos (6), dicho sistema de control automático (1) que comprende:

- 35 - los primeros medios de detección (3) en un tablero de dicha cometa (2) adaptados para detectar los primeros fragmentos de información relacionados con al menos a una posición y una orientación en el espacio de dicha cometa (2) y las aceleraciones a las que dicha cometa (2) se somete;
- 40 - Los segundos medios de detección (5) sobre la tierra adaptados para detectar los segundos fragmentos de información relacionados con al menos una cantidad de una tensión sobre dichos cables de conducción (6) de dicha cometa (2) y su posición relativa, una dirección y una intensidad de una corriente de viento W dentro del cual dicha cometa (2) está inmersa;
- 45 - Medios de control y de proceso (7) de dichos primer y segundo fragmento de información (P), adaptado para transformar un contenido de dicha información (P) en un comando mecánico relacionado con una función de control (U) que opera sobre dichos tornos de dichas unidades de accionamiento (4) para accionar dicha cometa (2) a lo largo de una trayectoria de vuelo que maximiza una cantidad de energía cinética restada de dicha corriente de viento W; y

- un sistema de transmisión de dichos primeros fragmentos de información al dicho medio de procesamiento y de control (7); **caracterizado porque** dichos medios de control y de proceso (7) de dicho sistema de control automático (1) están adaptados para realizar un proceso de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4.

- 5 **6.** Sistema (1) de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado porque** dichos segundos fragmentos de información se ocupan de la posición y los movimientos de dicha unidad de accionamiento (4) a lo largo de una trayectoria de movimiento de la misma, dichos segundos fragmentos de información están adaptados para ser transmitidos por dicho sistema de transmisión a dichos medios de control y de proceso (7).
- 10 **7.** Sistema (1) de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado porque** dichos primeros medios de detección (3) comprenden acelerómetros tri-axiales, en particular de un tipo MEMS.
- 15 **8.** Sistema (1) de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado porque** dichos primeros medios de detección (3) comprenden una brújula electrónica, en particular un magnetómetro Fluxgate.
- 20 **9.** Sistema (1) de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** cada uno de dichos acelerómetros tri-axiales se coloca en un extremo respectivo de dicha cometa (2) junto a un empalme de dichos cables de accionamiento (6) con las paredes de dicha cometa (2).
- 25 **10.** Sistema (1) de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado porque** dichos segundos medios de detección (5) comprenden medidores de deformación adaptados para medir una deflexión de dichos cables de accionamiento (6).
- 30 **11.** Sistema (1) de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado porque** dichos segundos medios de detección (5) comprenden codificadores en dichos tornos de dicha unidad de accionamiento (4).
- 35 **12.** Sistema (1) de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado porque** dichos segundos medios de detección (5) comprenden al menos un anemómetro, o al menos un anemoscopio, o un sistema de visualización artificial en tierra.
- 13.** Sistema (1) de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado porque** dicho sistema de transmisión es con fibras ópticas o inalámbrico.
- 14.** Un programa de ordenador que comprende un medio de código de programa de ordenador adaptado para realizar las etapas de dicho proceso de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.
- 15.** Un programa de ordenador de acuerdo con la reivindicación 14 y contenido en un medio legible por ordenador.

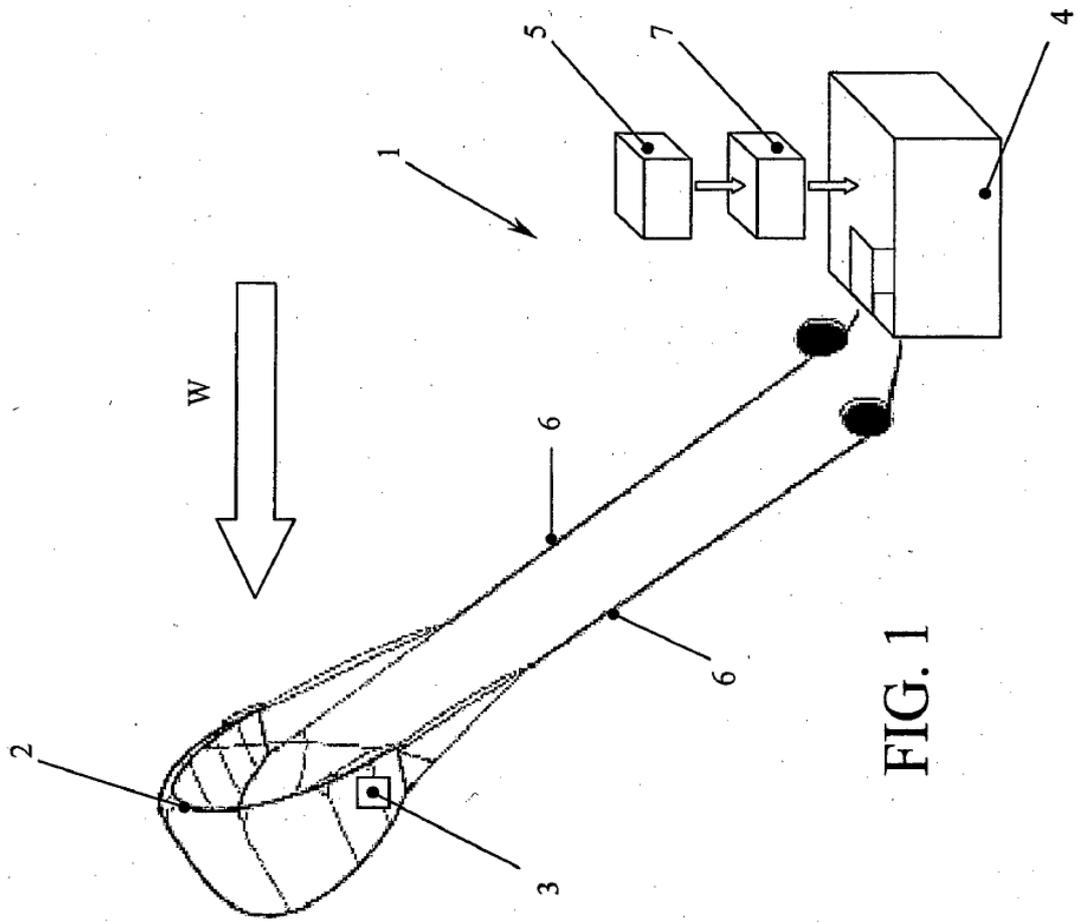


FIG. 1

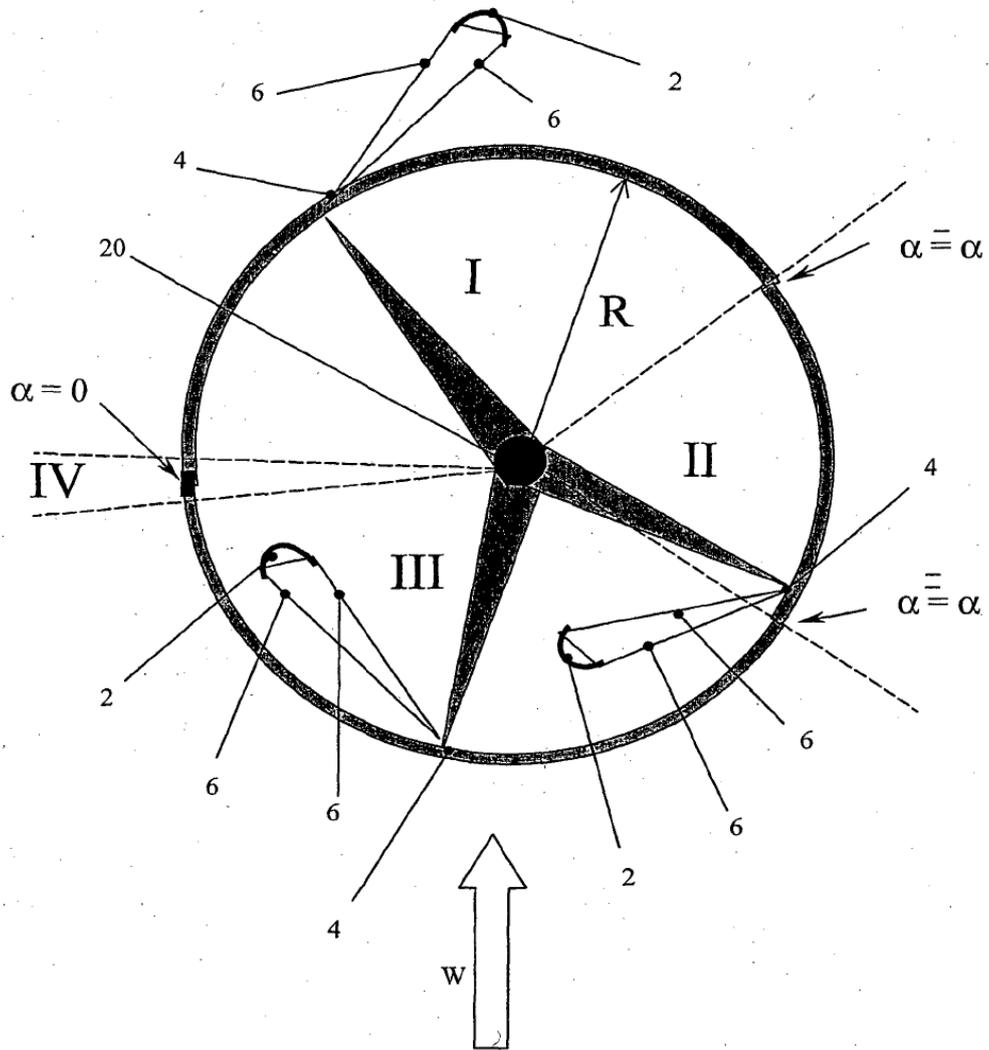


FIG. 2

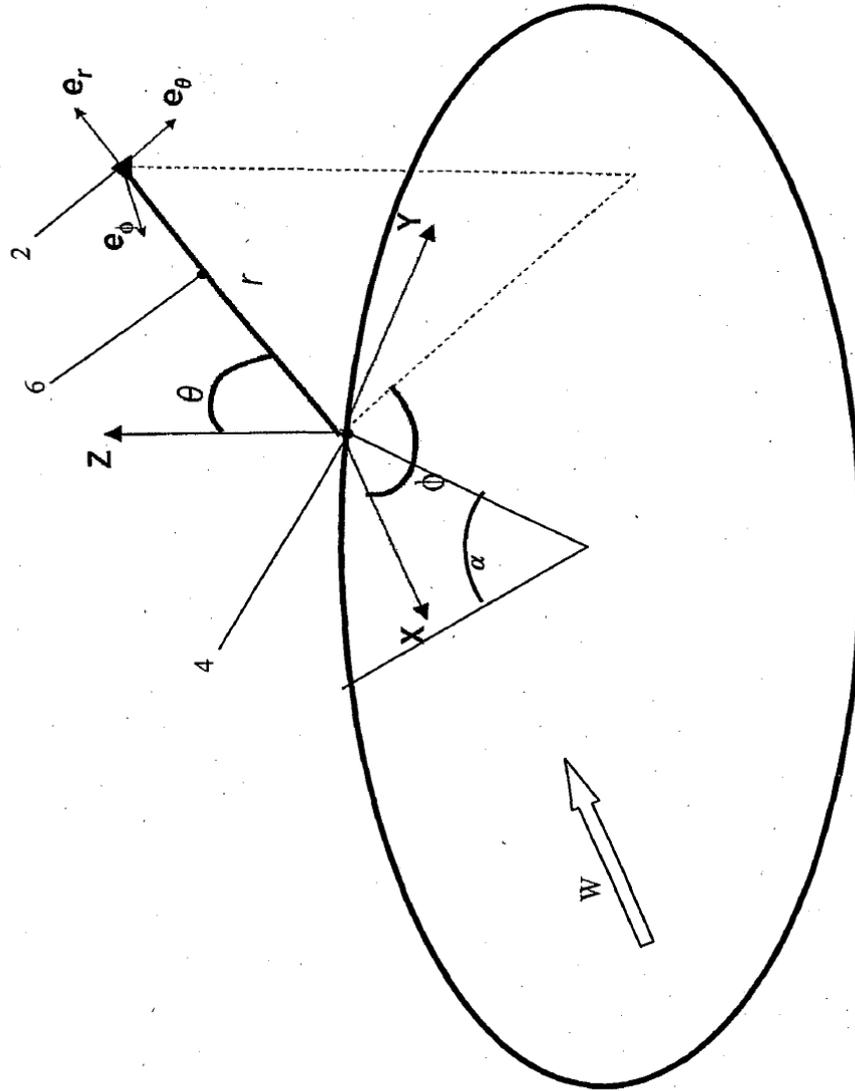


FIG. 3