

DESCRIPCIÓN

PREDICCIÓN DE COBERTURA DE NUBES A CORTO PLAZO UTILIZANDO IMÁGENES DE TODO EL CIELO CON BASE EN TIERRA

Campo técnico

5 La presente invención se relaciona en general con métodos, sistemas, y aparatos para predecir la cobertura de nubes utilizando una cámara de imágenes de todo el cielo con base en tierra. Los métodos, sistemas, y aparatos divulgados pueden aplicarse para, por ejemplo, proporcionar predicciones cortas de la salida de los sistemas con base en la energía solar.

10 Antecedentes

La integración de la energía solar en el suministro de energía reduce el coste de generar corriente de otras fuentes pero introduce su propio desafío y coste. Los desafíos son principalmente debido a la variación de la energía solar. El factor principal que impacta en la variable de energía solar es la condición del cielo. Con el fin de predecir la salida del sistema con base en la energía solar, es por lo tanto necesario, entender las condiciones del cielo dentro de un rango temporal.

15 Las nubes son uno de los elementos claves en el cielo que ocasionan la variación de la energía solar. La radiación solar directa e indirecta depende en gran medida de la cobertura de nubes. Por ejemplo, cuando el sol está cubierto significativamente por nubes, la radiación solar que cae directamente en la red de energía disminuye a la vez que cuando el sol está claro, hay una casi constante energía que se recibe en la ubicación eléctrica.

20 Para predecir la cobertura futura de nubes, deben determinarse las ubicaciones futuras tanto como de las nubes como del sol. Este último está fácilmente disponible, por ejemplo, de fuentes tales como un almanaque astronómico. De manera similar, el estado actual del cielo con relación a las nubes es observable, por ejemplo, utilizando formación de imágenes visuales. En consecuencia, se desea combinar la información disponible en la posición futura del sol y el estado actual del cielo para proporcionar una predicción exacta de la radiación solar directa e indirecta.

30 Resumen

Las realizaciones de la presente invención dirigen y superan una o más de las deficiencias e inconvenientes anteriores, por los métodos, sistemas, y aparatos para predecir la cobertura del cielo utilizado una cámara de imágenes de todo el cielo con base en tierra. Esta tecnología es particularmente muy adecuada para, pero no significa limitada a, las aplicaciones de energía solar.

35 De acuerdo con algunas aplicaciones de la presente invención, un método para predecir la cobertura de nubes a corto plazo, incluye un ordenador que calcula un campo de velocidad de nubes estimado en un valor tiempo actual con base en imágenes del cielo. El ordenador determina un patrón de nubes segmentado con base en las imágenes del cielo, una ubicación futura del sol correspondiente con un valor de tiempo futuro (por ejemplo, usando datos de un almanaque astronómico) y ubicaciones de píxel del sol en un valor de tiempo futuro con base en la ubicación futura del sol. Luego, el ordenador aplica un algoritmo de retropropagación a las ubicaciones de píxel del sol utilizando el campo de velocidad de nubes estimado para producir las ubicaciones de píxel del sol propagadas correspondientes a un valor de tiempo anterior. Luego, el ordenador predice la cobertura de nubes para la ubicación del sol futura con base en las ubicaciones de píxel del sol propagadas y el patrón de nubes segmentado.

La implementación del algoritmo de retropropagación que se utiliza en el método anteriormente mencionado, puede variar de acuerdo con las diferentes realizaciones de la presente invención. En una realización, el algoritmo de retropropagación incluye, determinar un medio del campo de velocidad de nubes estimado, retropropagar cada una de las ubicaciones de píxel del sol con la media del campo de velocidad de nubes estimado, e identificar las ubicaciones de píxel del sol propagadas con base en las ubicaciones de píxel del sol. Se puede aplicar un filtro de suavizado a la media del campo de velocidad de nubes estimado antes de retropropagar cada una de las ubicaciones de píxel del sol. En otras realizaciones, el algoritmo de retropropagación incluye identificar los componentes del campo de velocidad en el campo de velocidad de nubes estimado, cada respectivo componente de campo de velocidad corresponde a una ubicación de píxel del sol respectiva. Luego, las ubicaciones de píxel del sol se retropropagan con base en los componentes del campo de velocidad y se identifican las ubicaciones de píxel del sol propagadas con base en las ubicaciones de píxel del sol. En otras realizaciones, el algoritmo de retropropagación incluye la disminución de la resolución del campo de velocidad de nubes estimado de una resolución original a una resolución menor, produciendo un campo de velocidad de nubes de resolución reducida. A continuación se aplica un filtro de suavizado al campo de velocidad de nubes de resolución reducida y el campo de velocidad de nubes de resolución reducida se interpola de la resolución baja a la resolución original, produciendo un campo de velocidad filtrado suave. Luego, se identifican los componentes del campo de velocidad en el campo de velocidad filtrado suave local. Cada componente del campo de velocidad corresponde a una ubicación respectiva de píxel del sol. A continuación, cada una de las ubicaciones del píxel del sol se retropropagan con base en la velocidad de los componentes de campo para producir las ubicaciones de píxel del sol propagadas. En otras realizaciones, el algoritmo de retropropagación incluye un muestreo aleatorio, para cada una de las ubicaciones de píxel del sol, un número predeterminado de componentes de campo de velocidad vecinas dentro de un radio predeterminado en el campo de velocidad de nubes estimado con base en la ubicación de píxel del sol respectiva. Luego, cada una de las ubicaciones del sol se retropropagan con base en su respectivo número predeterminado de componentes del campo de velocidad vecinos para producir las ubicaciones de píxel del sol propagadas.

El método anteriormente mencionado para predecir la cobertura de nubes a corto plazo puede también incluir características y/o refinamientos adicionales, de acuerdo con diferentes realizaciones de la presente invención. Por ejemplo, en una realización el patrón de nubes segmentado se determina procesando cada una de las imágenes para clasificar cada píxel de imagen en una respectiva imagen del cielo ya sea con base en las nubes o el cielo en una o más características de la respectiva imagen del cielo. Una o más de las características pueden incluir, por ejemplo y sin limitación, valores del espectro de colores, una proporción de los canales de color rojo y los canales de color azul, valores de diferencia, y valores de entropía.

En algunas realizaciones, la cobertura de nubes para la ubicación del sol futura, se predice determinando primero una región del sol del patrón de nubes segmentado, utilizando las ubicaciones propagadas de píxel del sol. Luego, se identifica un número de píxeles de las nubes dentro de la región del sol y se calcula un valor de cobertura de nubes binario igual a una proporción del número de píxeles de nubes a un número total de píxeles de imagen en la región del sol. En otras realizaciones, se determina la cobertura de las nubes para la ubicación del sol futura determinando primero un conjunto de valores de probabilidad de píxel, con cada valor de probabilidad correspondiente a una probabilidad de abundancia de nubes para un respectivo píxel del sol propagado en las ubicaciones de píxel del sol propagadas. Luego, se identifica un número de píxeles de nubes en el patrón de nubes segmentado utilizando las ubicaciones de píxel del sol

propagadas. A continuación, se identifica una suma de valores de probabilidad de píxel y se utiliza para calcular un valor de probabilidad de cobertura de nubes. En una realización, esto es igual a una proporción entre la suma de los valores de probabilidad de píxel al número de píxeles de nubes.

- 5 En algunas realizaciones, se pueden aplicar una o más características del método anteriormente mencionado en diversos aparatos, artículos de manufactura y sistemas. Por ejemplo, en una realización, un artículo de manufactura para predecir la cobertura de nubes a corto plazo comprende un medio legible por ordenador, tangible, no transitorio que almacena las instrucciones ejecutables por ordenador para realizar el método
- 10 anteriormente mencionado, con o sin las características adicionales divulgadas anteriormente. En otras realizaciones, un sistema para predecir la cobertura de nubes a corto plazo, incluye un módulo de flujo y seguimiento, un módulo de segmentación de nubes, un módulo de predicción de ubicación del sol. El módulo de flujo y seguimiento está configurado para calcular un campo de velocidad de nubes estimado en un valor de
- 15 tiempo actual con base en las imágenes del cielo. El módulo de segmentación de nubes está configurado para determinar un patrón de nubes segmentado con base en las imágenes del cielo. El módulo de predicción de la ubicación del sol está configurado para determinar una ubicación del sol futura correspondiente a un valor de tiempo futuro. El módulo de previsión de oclusión del sol está configurado para determinar ubicaciones de
- 20 píxel del sol en un valor de tiempo futuro con base en la ubicación futura del sol, aplicar un algoritmo de retropropagación a las ubicaciones de píxel del sol que utiliza el campo de velocidad de nubes estimado para producir ubicaciones del píxel del sol propagadas correspondientes a un valor de tiempo previo, y predecir la cobertura de las nubes para la ubicación futura del sol con base en las ubicaciones de píxel del sol propagadas y el
- 25 patrón de nubes segmentado. En algunas realizaciones, el sistema también incluye una cámara de video exterior horizonte a horizonte configurada para capturar las imágenes del cielo.

Serán evidentes características y ventajas adicionales de la invención a partir de la siguiente descripción detallada de realizaciones ilustrativas que proceden con referencia

30 en los dibujos acompañantes.

Breve descripción de los dibujos

El precedente y otros aspectos de la presente invención se entienden mejor a partir de la siguiente descripción detallada cuando se lee en conexión con los dibujos acompañantes. Para el propósito de ilustrar la invención, se muestran en los dibujos las realizaciones que

35 actualmente se prefieren, entendiéndose, sin embargo, que la invención no se limita a los instrumentos específicos que se divulgan. Las siguientes figuras se incluyen en los dibujos:

La Fig. 1 proporciona una visión general de un sistema para predecir cobertura de nubes de una posición del sol futura, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

40

La Fig. 2 proporciona una visión general de un sistema de procesamiento del Módulo de Predicción de Ubicación del Sol, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

La Fig. 3 proporciona una visión general de una ilustración del sistema de predicción, como se utiliza en algunas realizaciones de la presente invención;

45

La Fig. 4 proporciona una visión general de una ilustración del Módulo de Seguimiento/Flujo, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

La Fig. 5 representa un ejemplo de un proceso que se puede usar para generar el campo de velocidad filtrado que utiliza filtración Kalman, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

5 La Fig. 6 proporciona una vista general de un proceso para predecir cobertura de nubes de una posición futura del sol, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención; y

La Fig. 7 ilustra un ambiente de computación de ejemplo dentro del cual se pueden implementar las realizaciones de la invención.

Descripción detallada

10 La siguiente divulgación describe la presente invención de acuerdo con varias realizaciones dirigidas como métodos, sistemas, y aparatos para proporcionar predicciones a corto plazo de la oclusión del sol en un tiempo futuro con base en imágenes del cielo adquiridas, la velocidad de las nubes medida con base en aquellas
15 imágenes, y el conocimiento de una posición futura del sol. Por ejemplo, en una realización, el proceso general de predicción funciona como sigue: la velocidad de las nubes estimadas en un tiempo t_0 se determina a partir del algoritmo de flujo regularizado, se obtiene la posición del sol en la imagen en un tiempo t_0+dt , donde dt es el rango temporal que se desea predecir. A continuación, se utiliza un algoritmo de retropropagación para propagar la ubicación del sol en un tiempo t_0 utilizando la
20 información de velocidad en el tiempo t_0 . Luego, se puede utilizar el módulo de segmentación para calcular la cobertura de nubes en la región del sol en el tiempo t_0+dt (tierra verdadera) y un tiempo t_0 (predicción). La medición del error de predicción es la diferencia absoluta entre la cobertura estimada del sol en la región del sol y la cobertura en la región del sol retropropagada. Las técnicas que se describen en esta, realizan una
25 suposición razonable de que la radiación solar depende en gran medida de la cobertura de las nubes y por lo tanto una predicción precisa de la cobertura de las nubes conlleva a la predicción precisa de la radiación solar. Con esta suposición y simplificación, se predice entonces la oclusión del sol en diferentes rangos temporales. El sistema incluye adquisición de datos, estimación de la velocidad de las nubes, retropropagación de la
30 ubicación del sol, el módulo de segmentación de las nubes y el módulo de predicción.

La Fig. 1 proporciona una vista general de un sistema 100 para predecir la cobertura de nubes de una posición futura del sol, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención. El sistema incluye un sistema 115 de procesamiento de datos que
35 recibe una entrada a partir de una pluralidad de fuentes, que incluyen una cámara 105. La cámara 105 puede usarse para capturar imágenes del cielo en intervalos de tiempo predeterminados (por ejemplo, 5 segundos). Antes del uso, la cámara se puede calibrar utilizando software especializado, Datos 110 de Ubicación de la Cámara, y Datos 125 de Calibración del Sensor para producir una matriz intrínseca de la cámara y un patrón de cámara de ojo de pez. Las imágenes capturadas por la cámara 105 pueden
40 entonces proyectarse a partir del espacio de imagen al espacio del cielo. Los parámetros necesarios para esta proyección están disponibles después de la calibración de la cámara.

El sistema 100 utiliza un patrón de segmentación de nubes entrenado para identificar nubes en los datos de la imagen. Para construir los datos de entrenamiento utilizados por
45 el patrón, un número predeterminado de nubes y píxeles del cielo (por ejemplo, 10,000 de cada uno) se muestrean aleatoriamente a partir de imágenes comentadas. El sistema 100 incluye un Ordenador 120 de Entrada del Usuario el cual permite a los usuarios ver las imágenes del cielo y seleccionar los píxeles como "nubes" o "cielo" (por ejemplo, sin nubes). Esta selección se puede realizar, por ejemplo, seleccionando el usuario
50 porciones individuales de la imagen y proporcionar una indicación si las porciones

seleccionadas representan una nube. Los datos que se suministran por el Ordenador 120 de Entrada del Usuario se reciben y se procesan por un Módulo 115D de Comentario de Datos el cual agrega datos de comentarios del usuario y los suministra al Módulo 115A de Segmentación de Nubes. El módulo 115A de Segmentación de Nubes construye
5 entonces un clasificador binario el cual puede clasificar nuevos píxeles en un tiempo de ejecución como nubes o el cielo con base en el patrón de entrenamiento.

Las características utilizadas por el Módulo 115A de Segmentación de Nubes para representar los píxeles del cielo y de las nubes pueden incluir, por ejemplo, valores del espectro de color y una proporción de los canales de color rojo y azul. Con respecto a los
10 valores del espectro de color, en una realización, se utilizan el espacio de color de matiz (H), Saturación (S), y Valor (V). Se puede observar que los valores de píxel de cielo y nubes se encuentran en diferentes espectros en H. De manera similar los píxeles del cielo tienen más saturación en comparación con los píxeles de las nubes. V se puede usar para representar el brillo. Con relación a la proporción de los canales de color rojo y
15 azul, se entiende en la técnica que el cielo despejado dispersa intensidades de azul a la vez que las nubes dispersan las intensidades de azul y rojo de manera igual. Por consiguiente, puede usarse una proporción de las intensidades de color azul y rojo en las imágenes para distinguir entre los píxeles del cielo y de las nubes. En una realización, se utiliza una proporción simple del canal rojo (r) y azul (b):

$$RBR = \frac{b}{r} \quad (1)$$

En otras realizaciones, se utiliza una proporción normalizada del canal rojo y azul:

$$RBRn = \frac{b - r}{b + r} \quad (2)$$

En aún otra realización, una proporción normalizada diferente de los canales dada por la proporción del canal rojo al máximo del canal rojo y azul.

$$RBRn2 = \frac{r}{\max(r, b)} \quad (3)$$

En otra realización, se emplea una diferencia entre el valor del canal rojo y el canal azul.

$$RBRdiff = (r - b) \quad (4)$$

Las características usadas por el Módulo 115A de Segmentación de Nubes para representar los píxeles del cielo y las nubes pueden incluir valores de varianza y/o
30 valores de entropía. La varianza proporciona la medida de propagación de los valores de píxeles. En otra realización, para cada píxel en la región de las nubes o del cielo, se calcula la varianza en la vecindad $N \times N$. Para el cálculo rápido de la varianza, se pueden usar las imágenes integrales para la sumar la imagen así como un cuadrado de intensidades de la imagen. La entropía proporciona la información de la textura acerca de
35 la imagen. Similar a la varianza, para cada píxel en la región de las nubes o el cielo, la entropía en el vecindario $N \times N$ puede definirse como sigue a continuación:

$$Entropía = - \sum_{i \in (0.255)} p_i \log(p_i) \quad (5)$$

donde p_i se calcula utilizando el histograma de las intensidades de la imagen.

Al utilizar la velocidad de las nubes, la posición futura del sol se puede retropropagar revirtiendo los componentes de la velocidad. Por ejemplo, si el tiempo actual es t_0 y se desea una predicción de cobertura de nubes en $t_0 + dt$, la ubicación del sol en el tiempo $t_0 + dt$ se puede determinar primero. Luego, el sol se propaga a t_0 con base en la
5 velocidad que se calcula en t_0 . En algunas realizaciones, para simplificar el procesamiento, se asume la velocidad del viento como constante y la evolución de las nubes locales no se considera durante el periodo de predicción.

De regreso a la Fig. 1, en el tiempo de ejecución, un Módulo 115C de Predicción de Ubicación del Sol predice la ubicación del sol en un punto futuro en el tiempo. En el
10 ejemplo de la Fig. 1, la ubicación del sol se predice con base en los Datos 130 del Almanaque Astronómico. Sin embargo, en otras realizaciones, se pueden utilizar diferentes técnicas para predecir la posición del sol tal como, sin limitación, el modelamiento matemático con base en constantes geofísicas conocidas. La cámara 105
15 captura múltiples imágenes del cielo las cuales se utilizan por un Módulo 115B de Seguimiento/Flujo para calcular un campo de velocidad para el cielo. Luego, un módulo 115E de Previsión de Oclusión del Sol utiliza la ubicación futura del sol y el campo de velocidad para determinar la cobertura de nubes de la ubicación futura. Más
específicamente, se designan un grupo de píxeles en la ubicación futura del sol como las “ubicaciones de píxel del sol”. Al utilizar el campo de velocidad, el Módulo 115E de
20 Previsión de Oclusión del Sol retropropaga la ubicación de píxel del sol invirtiendo los componentes de la velocidad. Por ejemplo, si el tiempo actual es t_0 y se desea una predicción de cobertura de nubes en $t_0 + dt$, se puede determinar la ubicación del sol en el tiempo $t_0 + dt$. Luego, los píxeles correspondientes a esa ubicación, se propagan a t_0
con base en la velocidad calculada en t_0 . En algunas realizaciones, para simplificar el
25 procesamiento, se asume la velocidad del viento como constante y no se considera la evolución de las nubes local durante el período de predicción. Luego, el Módulo 115A de Segmentación de Nubes, utiliza el clasificador anteriormente mencionado para determinar si estas ubicaciones de píxel incluyen nubes. Si los píxeles no incluyen nubes, la
ubicación del sol futura se considera ocluida. Al seguir cada clasificación, o en otros
30 intervalos, se pueden extraer los datos 135 de rendimiento del sistema los cuales se pueden usar, por ejemplo, para una evaluación comparativa.

La Fig. 2 proporciona una vista 200 general del sistema de procesamiento del Módulo 115C de Predicción de la Ubicación del Sol, de acuerdo con algunas realizaciones de la
presente invención. El módulo 115C de Predicción de Ubicación del Sol recibe las
35 siguientes entradas: una o más imágenes de cámara, una indicación de la ubicación geográfica de la cámara, un valor de tiempo futuro para el cual se busca una predicción, y datos del almanaque astronómico. Un algoritmo 205 de Predicción de la Ubicación del Sol obtiene la posición del sol en el mundo en 3D a partir de los datos de un almanaque
astronómico en términos de tiempo futuro y la ubicación geográfica de la cámara. La
40 posición del sol en el mundo en 3D puede entonces utilizarse para encontrar la posición correspondiente en el espacio de imagen mediante la proyección extrínseca y el patrón de cámara. Se utiliza un patrón de cámara con una Matriz 210 Extrínseca Calculada para el mapeado de la posición del sol en el mundo en 3D. En una realización, se obtiene la
Matriz 210 Extrínseca Calculada utilizando 55 comentarios de diferentes puntos de
45 tiempo con el error de re-proyección de 2.1+/- 1.3 píxeles.

La Fig. 3 proporciona una ilustración 300 de vista general del sistema de predicción, como se utiliza en algunas realizaciones de la presente invención. Las predicciones de la
oclusión del sol se desarrollan a través de un Módulo 115E de Previsión de la Oclusión del Sol. Las entradas en el Módulo 115E de Previsión de Oclusión del Sol incluyen una
50 imagen del cielo en el tiempo 305 t_0 , una imagen 310 segmentada que muestra una segmentación binaria de las nubes y el cielo, y una estimación de velocidad de las nubes en el tiempo 315 t_0 . La imagen 320 muestra la imagen del cielo en un tiempo futuro, $t_0 +$

dt. El círculo 320A transparente representa la ubicación actual del sol en el tiempo $t_0 + dt$ como se determina, por ejemplo, mediante el Módulo 115C de Predicción de Ubicación del Sol. Conceptualmente, la salida del Módulo 115E de Previsión de Oclusión del Sol es una predicción de la apariencia 325 y una predicción de la cobertura de las nubes que se muestra en la imagen 330. El elemento 325A es la ubicación del píxel del sol en $t+t_0$ (que se muestra por un círculo 320A transparente en la imagen 320) que se retropropaga utilizando la información 315 de velocidad en el tiempo t_0 . La imagen 330 muestra la imagen 310 segmentada destacando la ubicación 330A de píxel del sol retropropagada.

La Fig. 4 proporciona una ilustración 400 de vista general del Módulo 115B de Seguimiento/Flujo, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención. Un patrón 405 de Cámara recibe las imágenes que se capturan por la cámara 105 la cual proyecta estas imágenes del espacio de la imagen al espacio del cielo. En algunas realizaciones, el Módulo 115B de Seguimiento/Flujo utiliza su propio patrón de cámara, a la vez que en otras realizaciones estas comparten un patrón de cámara con otro módulo. Por ejemplo, en una realización, el Patrón 405 de Cámara es el mismo patrón de cámara que se muestra en 210 en la Figura 2. La velocidad de las nubes se estima entre una pareja de imágenes que utilizan un algoritmo de flujo óptico regularizado espacial, que se representa como el módulo 410 de Determinación de Flujo Regularizado en la Fig. 4. Esto resulta en la salida del campo de velocidad para el cielo completo.

Las observaciones del flujo ente una pareja de imágenes puede ser ruidoso. Para estabilizar el proceso de seguimiento y para incorporar información temporal en la observación actual, en algunas realizaciones se emplea un filtro Kalman. La Fig. 5 representa un ejemplo de un proceso 500 que puede usarse para generar el campo de velocidad filtrado utilizando filtración Kalman, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención. En 505, se recibe el campo de velocidad regularizado, de grano fino en t_0 . Luego, en 510, el campo se muestrea de manera descendente por un factor predeterminado (por ejemplo, 4). En 515, se aplica un Filtro Kalman de Modo Píxel en el campo de velocidad muestreado de manera descendente para generar un campo de velocidad filtrado de baja resolución. El Filtro Kalman de Modo Píxel se parece a un algoritmo corrector vaticinador. Este proporciona una estimación del estado del proceso en un tiempo particular y luego actualiza los valores predichos que incorporan las mediciones recibidas en este tiempo particular. En una realización, el Filtro Kalman de Modo Píxel se define con 2 parámetros dinámicos y 2 parámetros de medición. Los parámetros dinámicos y de medición son los vectores de velocidad en las direcciones x y y respectivamente. De regreso a la Fig. 5, en 520, el campo de velocidad filtrado de baja resolución muestrea de manera ascendente a la resolución original. Esto resulta en un campo de velocidad filtrado suave local que se puede usar en 525 para retropropagar la ubicación del sol en el tiempo $t_0 + dt$.

Se pueden usar diversos algoritmos para retropropagación del sol dentro del alcance de la presente invención. Por ejemplo, los algoritmos pueden diferenciarse en cómo se modela la información de la velocidad observada y/o cómo filtran la información temporal. En algunas realizaciones, el algoritmo de retropropagación utiliza un campo de velocidad de media global. Más específicamente, este algoritmo constituye la media de la velocidad regularizada observada en el tiempo t_0 . Al utilizar este algoritmo, cada píxel en la ubicación del sol en el tiempo $t_0 + dt$ se retropropaga con la misma velocidad media que se obtiene en el tiempo t_0 . En otra realización, este algoritmo se modifica adicionalmente mediante el uso de un filtro Kalman, que incorpora información temporal adicional de la pareja de cuadros previos para proporcionar suavidad, removiendo por lo tanto el ruido en la estimación de velocidad. En otras realizaciones, el algoritmo de retropropagación utiliza el campo de velocidad completa. Este método utiliza un patrón de grano fino para la propagación de la velocidad para una mejor captura del comportamiento no global del movimiento de las nubes. Específicamente, la ubicación del sol en el tiempo $t_0 + dt$ se

propaga con el campo de velocidad en cada píxel en el tiempo $t0$. En otras realizaciones, el algoritmo de retropropagación utiliza el campo de velocidad completa con el filtro Kalman local y global. Este incorpora la velocidad media global así como la velocidad local de grano fino con filtración Kalman que utiliza el patrón de suma del peso simple.

- 5 Una variación adicional del algoritmo de retropropagación que se implementa en algunas implementaciones, es utilizar el campo de velocidad completo con una aproximación Monte Carlo. La velocidad filtrada local proporciona información suave temporal y espacialmente local para retropropagación de la ubicación del sol. Sin embargo, esta es sensible al ruido en la estimación. Por lo tanto, la retropropagación se puede modelar como una aproximación de perturbación del tipo Monte Carlo. Cada píxel se propaga con la velocidad de puntos N muestreados aleatoriamente del vecindario con un radio r . El proceso de retropropagación es el mismo que el algoritmo de retropropagación de flujo completo ya sea con o sin el filtro Kalman. Esto resulta en N ubicaciones propagadas finales en $t0$. La cobertura de nubes predicha se determina por $\sum_{i=1}^N w_i c_i$, donde c_i es la cobertura de nubes en una ubicación propagada y w_i es un factor de ponderación. En una realización, el factor de ponderación se define como $w_i = 1/N$.

La Fig. 6 proporciona una vista general de un proceso 600 para predecir la cobertura de las nubes de una posición futura del sol, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención. En 605, se calcula un campo de velocidad de nubes estimada en un valor de tiempo actual, con base en una pluralidad de imágenes del cielo. Luego, en 610 se determina un patrón de nubes segmentado con base en la pluralidad de imágenes del cielo. A continuación, en 615, se determina una ubicación futura del sol correspondiente a un valor de tiempo futuro.

Continuando con referencia en la Fig. 6, en 620, se determinan ubicaciones de píxel del sol en un valor de tiempo futuro con base en la ubicación futura del sol. Luego, en 625, se aplica un algoritmo de retropropagación a las ubicaciones de píxel del sol utilizando el campo de velocidad de nubes estimado para producir una pluralidad de ubicaciones de píxel del sol propagadas correspondientes a un valor de tiempo previo. A continuación, en 630, se predice la cobertura de las nubes para la ubicación futura del sol con base en la pluralidad de ubicaciones de píxel del sol propagadas y el patrón de nubes segmentado. En algunas realizaciones, la medida de evaluación es la diferencia en la predicción contra la oclusión del sol verdadera terrestre con base en las nubes. Se pueden usar las siguientes definiciones de cobertura de nubes o de oclusión del sol:

$$\text{cobertura de nubes}_{\text{binario}} = N_c / N_s \quad (6)$$

donde N_c es el número de píxeles de nubes en la región del sol y N_s es el número total del píxeles en la región del sol, y/o

$$\text{cobertura de nubes}_{\text{probabilidad}} = P_c / N_s \quad (7)$$

donde $P_c = \sum_{i \in (1, N_s)} p_i$ y p_i es la probabilidad de abundancia de nubes en el píxel i .

Se pueden hacer refinamientos adicionales a las técnicas que se describen en la Fig. 6 para compensar por los artefactos de imagen que afectan el rendimiento del sistema. Por ejemplo, en algunas imágenes del cielo, puede aparecer una banda vertical de brillo en el centro del sol (ver, por ejemplo, la imagen 320 en la Fig. 3). La banda vertical puede resultar en la subestimación de flujo e impacta la segmentación de nubes. Para mitigar este desafío, en algunas realizaciones, se detecta automáticamente la banda convirtiendo la imagen en un mapa de borde ejecutando un detector de bordes y enmascarando la región/banda que tiene la intensidad máxima en la dirección vertical. Adicionalmente, debido al brillo del sol cerca de la región circunsolar, existe una probabilidad elevada que

el cielo azul se detecte falsamente como nuboso. La limitación adaptiva para clasificación de las nubes para superar este problema a menudo conlleva a la detección errónea de nubes más densas. Para impedir este problema en la evaluación del sistema, en algunas realizaciones, el sol se cambia a una posición fuera del sol asumiendo un sol virtual en esa ubicación. Esto no cambia la geometría y reduce las variables en la evaluación de los métodos de retropropagación que se describen en este documento.

La Fig. 7 ilustra un ambiente 700 de computación de ejemplo dentro del cual se pueden implementar las realizaciones de la invención. Por ejemplo, se puede usar el ambiente 700 de computación para implementar uno o más componentes del sistema 100 que se muestran en la Fig. 1. Los ordenadores y los ambientes de computación, tales como un sistema 710 de ordenador y un ambiente 700 de computación, son conocidos por aquellos con habilidades en la técnica y en consecuencia se describen brevemente aquí.

Como se muestra en la Fig. 7, el sistema 710 de ordenador puede incluir un mecanismo de comunicación tal como un bus 721 del sistema u otro mecanismo de comunicación para comunicar información dentro del sistema 710 de ordenador. El sistema 710 de ordenador incluye adicionalmente uno o más procesadores 720 acoplados con el bus 721 del sistema para procesamiento de la información.

Los procesadores 720 pueden incluir una o más unidades de procesamiento central (CPUs), unidades de procesamiento gráfico (GPUs), o cualquier otro procesador conocido en la técnica. Más en general, un procesador como se utiliza aquí, es un dispositivo para ejecutar instrucciones legibles por máquina almacenadas en un medio legible por ordenador, para llevar a cabo tareas y puede comprender cualquiera o una combinación de, hardware y firmware. Un procesador puede también comprender una memoria que almacene instrucciones legibles por ordenador ejecutables para realizar tareas. Un procesador actúa sobre la información, manipulándola, analizándola, modificándola, convirtiéndola o transmitiendo información para uso por un procedimiento ejecutable o un dispositivo de información, y/o dirigiendo la información a un dispositivo de salida. Un procesador puede utilizar o comprender las capacidades de un ordenador, un controlador o un microprocesador, por ejemplo, y estar condicionado utilizando instrucciones ejecutables para realizar funciones de propósito especial no desarrolladas por un ordenador de propósito general. Un procesador puede estar acoplado (de manera eléctrica y/o comprendiendo componentes ejecutables) con cualquier otro procesador que permita a interacción y/o la comunicación entre sí. Un procesador o generador de interfaz de usuario es un elemento conocido que comprende circuitos electrónicos o software o una combinación de ambos para generar imágenes de presentación o porciones de estas. Una interfaz de usuario comprende una o más imágenes que permiten la interacción del usuario con un procesador u otro dispositivo.

Continuando con referencia en la Fig. 7, el sistema 710 de ordenador incluye también una memoria 730 del sistema acoplada al bus 721 del sistema para almacenar información e instrucciones para ejecutarse por los procesadores 720. La memoria 730 del sistema puede incluir medios de almacenamiento legibles por ordenador en la forma de memoria volátil y/o no volátil, tal como memoria 731 de sólo lectura (ROM) y/o memoria 732 de acceso aleatorio (RAM). La RAM 732 puede incluir otro(s) dispositivo(s) de almacenamiento dinámico (por ejemplo, RAM dinámica, RAM estática, y DRAM sincrónica). La ROM 731 puede incluir otro(s) dispositivo(s) de almacenamiento estático (por ejemplo, ROM programable, PROM borrable, y PROM borrable de manera eléctrica). Además, la memoria 730 del sistema puede usarse para almacenar variables temporales u otra información intermedia durante la ejecución de instrucciones por los procesadores 720. Un sistema 733 de entrada/salida básica (BIOS) que contiene las rutinas básicas que ayudan a transferir información entre los elementos dentro del sistema 710 de ordenador, tal como durante el inicio, se pueden almacenar en la ROM 731. La RAM 732

puede contener datos y/o módulos de programa que son accesibles inmediatamente a y/o que se operan actualmente por los procesadores 720. La memoria 730 del sistema puede incluir adicionalmente, por ejemplo, el sistema 734 operativo, los programas 735 de aplicación, otros módulos 736 del programa y datos 737 del programa.

5 El sistema 710 de ordenador también incluye un controlador 750 de disco acoplado al bus 721 del sistema para controlar uno o más dispositivos para almacenar información e instrucciones, tales como un disco 741 duro magnético y una **unidad 742** de medios desmontable (por ejemplo una unidad de disquetes, una unidad de discos compactos, una unidad de cintas y/o una unidad de estado sólido). Los dispositivos de
10 almacenamiento pueden agregarse al sistema 710 de ordenador utilizando una interfaz de dispositivo apropiada (por ejemplo, una interfaz de sistema de ordenador pequeño (SCSI), la electrónica de dispositivos integrados (IDE), un Bus en Serie Universal (USB), o un Cable de Fuego).

El sistema 710 de ordenador puede también incluir un controlador 765 de visualización acoplado al bus 721 del sistema para controlar una pantalla o monitor 766, tal como una
15 pantalla de tubos de rayos catódicos (CRT) o una pantalla de cristal líquido (LCD), para visualizar la información a un usuario de ordenador. El sistema de ordenador incluye una interfaz 760 de entrada y uno o más dispositivos de entrada, tales como un teclado 762 y un dispositivo 761 señalador, para interactuar con un usuario de ordenador y
20 proporcionar información a los procesadores 720. El dispositivo 761 señalador, por ejemplo, puede ser un ratón, una pluma ligera, una bola rastreadora, o un palo señalador para comunicar información de dirección y selecciones de comandos a los procesadores 720 y para controlar el movimiento del cursor en la pantalla 766. La pantalla 766 puede proporcionar una interfaz de pantalla táctil la cual permite una entrada como suplementar
25 o reemplazar la comunicación de la información de dirección y las selecciones de comando del dispositivo 761 señalador.

El sistema 710 de ordenador puede realizar una porción de todas las etapas de procesamiento de las realizaciones de la invención en respuesta a que los procesadores
30 720 que ejecutan una o más secuencias de una o más instrucciones que se contienen en una memoria, tal como la memoria 730 del sistema. Dichas instrucciones se pueden leer en la memoria 730 del sistema a partir de otro medio legible por ordenador, tal como un disco 741 duro magnético o una unidad 742 de medios desmontable. El disco 741 duro magnético puede contener uno o más almacenes de datos y archivos de datos utilizados por las realizaciones de la presente invención. Los contenidos de los almacenes de datos
35 y los archivos de datos pueden cifrarse para mejorar la seguridad. Los procesadores 720 pueden también emplearse en una disposición de multiprocesamiento para ejecutar una o más secuencias de las instrucciones que se contienen en la memoria 730 del sistema. En realizaciones alternativas, se pueden usar los circuitos cableados en lugar de o en combinación con las instrucciones de software. En consecuencia, las realizaciones no
40 están limitadas a cualquier combinación específica de circuitos de hardware y software.

Como se indica anteriormente, el sistema 710 de ordenador puede incluir al menos un medio o memoria legible por ordenador para mantener instrucciones programadas de acuerdo con las realizaciones de la invención y para contener estructuras de datos, tablas, registros, u otros datos descritos aquí. El término “medio legible por ordenador”
45 como se usa aquí se refiere a cualquier medio que participa en proporcionar instrucciones a los procesadores 720 para ejecución. Un medio legible por ordenador puede tomar cualquiera de las formas que incluyen, pero no están limitadas a, medios no transitorios, medios no volátiles, medios volátiles, y medios de transmisión. Los ejemplos no limitantes de los medios no volátiles incluyen discos ópticos, dispositivos de estado sólido, discos magnéticos, y discos magneto-ópticos, tales como el disco 741 duro magnético o la
50 unidad 742 de medios desmontable. Los ejemplos no limitantes del medio volátil incluyen

una memoria dinámica, tal como la memoria 730 del sistema. Los ejemplos no limitantes de los medios de transmisión incluyen cables coaxiales, alambres de cobre, y fibras ópticas, que incluyen los cables que constituyen el bus 721 del sistema. Los medios de transmisión pueden también tomar la forma de ondas acústicas o ligeras, tales como aquellas que se generan durante ondas de radio y comunicaciones de datos infrarrojas.

El ambiente 700 de computación puede además incluir el sistema 710 de ordenador que opera en un ambiente en red que utiliza conexiones lógicas a uno o más ordenadores remotos, tal como el dispositivo 780 de computación remoto. El dispositivo 780 de computación remoto puede ser un ordenador personal (ordenador portátil u ordenador de mesa), un dispositivo móvil, un servidor, un enrutador, un ordenador de red, un dispositivo similar u otro nodo de red común, y típicamente incluye diversos o todos los elementos que se describen anteriormente con relación al sistema 710 de ordenador. Cuando se utiliza en un ambiente de red, el sistema 710 de ordenador puede incluir un módem 772 para establecer comunicaciones sobre una red 771, tal como la Internet. El módem 772 puede estar conectado a un bus 721 del sistema a través de una interfaz 770 de red de usuario, o a través de otro mecanismo apropiado.

La red 771 puede ser cualquier red o sistema en general conocido en la técnica, que incluye la Internet, una intranet, una red de área local (LAN), una red de área amplia (WAN), una red de área metropolitana (MAN), una conexión directa de una serie de conexiones, una red de telefonía celular, o cualquier otra red o medio capaz de facilitar la comunicación entre el sistema 710 de ordenador y otros ordenadores (por ejemplo, el dispositivo 780 de computación remoto). La red 771 puede ser cableada, inalámbrica o una combinación de estas. Las conexiones cableadas pueden implementarse utilizando la Ethernet, un Bus en Serie Universal (USB), RJ-6, o cualquier otra conexión por cable conocida en general en la técnica. Las conexiones inalámbricas pueden implementarse utilizando Wi-Fi, WiMAX, y Bluetooth, redes celulares infrarrojas, satélites, o cualquier otra metodología de conexión inalámbrica en general conocida en la técnica. Adicionalmente, varias redes pueden trabajar independientes o en comunicación entre sí para facilitar la comunicación en la red 771.

Una aplicación ejecutable, como se utiliza aquí, comprende un código o instrucciones legibles por máquina para condicionar el procesador para implementar funciones predeterminadas, tales como las de un sistema operativo, un sistema de adquisición de datos de contexto u otro sistema de procesamiento de información, por ejemplo, en respuesta al comando o entrada del usuario. Un procedimiento ejecutable es un segmento del código o la instrucción legible por máquina, una subrutina, u otra sección distinta del código o una porción de una aplicación ejecutable para realizar uno o más procesos particulares. Estos procesos pueden incluir recibir datos de entrada y/o parámetros, que realizan operaciones en los datos de entrada recibidos y/o realizar funciones en respuesta a los parámetros de entrada recibidos, y proporcionar datos y/o parámetros de salida resultantes.

Una interfaz de usuario gráfica (GUI), como se usa aquí, comprende una o más imágenes de presentación, generadas por un procesador de visualización y permitiendo la interacción del usuario con un procesador u otro dispositivo y la adquisición de datos asociados y las funciones de procesamiento. El GUI incluye también un procedimiento ejecutable o aplicación ejecutable. El procedimiento ejecutable o aplicación ejecutable condiciona el procesador de visualización para generar señales que representan las imágenes de presentación GUI. Estas señales se suministran a un dispositivo de visualización el cual muestra la imagen para ser vista por el usuario. El procesador, bajo el control de un procedimiento ejecutable o aplicación ejecutable, manipula las imágenes de presentación GUI en respuesta a las señales recibidas a partir de los dispositivos de entrada. De esta forma, el usuario puede interactuar con la imagen de presentación que

utiliza los dispositivos de entrada, permitiendo la interacción del usuario con el procesador u otro dispositivo.

5 Las funciones y etapas del proceso de este documento pueden realizarse automáticamente o total o parcialmente en respuesta al comando del usuario. Una actividad (que incluye una etapa) que se realiza automáticamente se desarrolla en respuesta a una o más instrucciones ejecutables u operación del dispositivo sin la iniciación de actividad directa del usuario.

10 El sistema y los procesos de las figuras no son exclusivos. Se pueden derivar otros sistemas, procesos y menús, de acuerdo con los principios de la invención para cumplir los mismos objetivos. Aunque esta invención se ha descrito con referencia en las realizaciones particulares, se ha de entender que las realizaciones y variaciones que se muestran y describen aquí son sólo para propósitos de ilustración. Se pueden implementar modificaciones en el diseño actual por aquellos con habilidades en la técnica, sin apartarse del alcance de la invención. Como se describe aquí, se pueden
15 implementar los diversos sistemas, subsistemas, agentes, directores, y procesos, utilizando componentes de hardware, componentes de software, y/o una combinación de estos. Ningún elemento de reivindicación aquí debe interpretarse bajo las provisiones de 35 U.S.C. 112, parágrafo sexto, a menos que el elemento sea recitado expresamente utilizando la frase “medio para”.

20