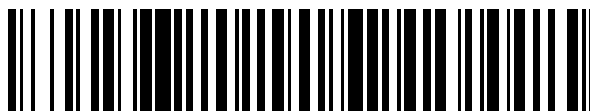


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 522 283**

51 Int. Cl.:

**A61B 19/00** (2006.01)

**A61B 17/34** (2006.01)

**A61F 2/10** (2006.01)

**A61B 17/3205** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.09.2006 E 06804246 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.10.2014 EP 1928340**

54 Título: **Sistemas automatizados para recolectar e implantar unidades foliculares**

30 Prioridad:

**30.09.2005 US 722521 P 22.12.2005 US 753602 P**

**31.01.2006 US 764173 P 28.04.2006 US 380903**

**28.04.2006 US 380907 28.04.2006 US 380911**

**31.05.2006 US 421438 31.05.2006 US 421443**

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

**14.11.2014**

73 Titular/es:

**RESTORATION ROBOTICS, INC. (100.0%)**

**128 Baytech Drive**

**San Jose, CA 95134, US**

72 Inventor/es:

**BODDULURI, MOHAN;**

**GILDENBERG, PHILIP L.;**

**CADDES, DONALD E. y**

**HSEI, PAUL K.**

74 Agente/Representante:

**LAZCANO GAINZA, Jesús**

**ES 2 522 283 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**

Sistemas automatizados para recolectar e implantar unidades foliculares

5 Campo de la invención

Esta invención se relaciona generalmente con un sistema robótico guiado por imágenes para llevar a cabo procedimientos médicos terapéuticos y de diagnóstico de precisión.

10 Antecedentes

15 Los procedimientos de trasplante de cabello se conocen bien, y típicamente involucran (por ejemplo, en un paciente que presenta un patrón de calvicie masculina) recolectar injertos de cabello donados por las áreas de los lados y trasera ("áreas donantes") del cuero cabelludo del paciente, e implantar las unidades foliculares recolectadas en un área superior y calva ("área receptora"). Históricamente, los injertos recolectados eran relativamente largos (3-5 mm), aunque más recientemente, los injertos donantes pueden ser unidades foliculares individuales, que se agregan de manera natural de 1-3 (y mucho menos comúnmente, 4-5) folículos pilosos poco separados que se distribuyen aleatoriamente sobre la superficie del cuero cabelludo.

20 En un proceso bien conocido, una porción lineal del cuero cabelludo se retira de un área donante utilizando un escalpelo cortando en el tejido subcutáneo graso. La tira se disecciona (bajo un microscopio) en unidades de componentes foliculares, las cuales después se implantan en un área receptora en las perforaciones respectivas hechas usando una aguja. Pueden usarse fórceps para sujetar y colocar los injertos individuales de unidad folicular en los lugares perforados por la aguja, aunque otros instrumentos y métodos se conocen para llevar a cabo esta tarea.

25 En "Androgenetic Alopecia" (Springer 1996), M. Inaba & Y. Inaba se divulga y describe un método para recolectar unidades foliculares singulares al colocar una aguja de punción hueca que tiene un borde cortante y una cavidad interior con un diámetro de 1 mm, que es aproximadamente igual al diámetro de las partes anatómicas críticas de una unidad folicular. El punzón de la aguja se alinea axialmente con un eje de una unidad folicular que se va a extraer y después avanza sobre el cuero cabelludo para cortar el cuero cabelludo alrededor de la circunferencia de la unidad folicular seleccionada. Después de eso, la unidades foliculares se retiran fácilmente, por ejemplo, usando fórceps, para el implante posterior en un sitio del receptor con una aguja de inserción especialmente diseñada.

30 La solicitud de patente de Estados Unidos publicada 20050203545 (Cole) describe un instrumento para la extracción de unidades foliculares individuales que supuestamente permite una profundidad y ángulo de penetración más precisos con respecto a la superficie de la piel, de la piel de un paciente.

35 La solicitud de patente de Estados Unidos publicada 20050267506 (Harris) describe un método y un aparato para la extracción de unidades foliculares al marcar primero las capas exteriores de la piel con un punzón afilado, y después insertar un punzón romo separado en la incisión para separar la unidad folicular pilosa del tejido circundante y la capa grasa.

40 La patente de Estados Unidos núm. 6,585,746 (Gildenberg) describe un sistema de trasplante de cabello usando un robot, que incluye un brazo robótico y un introductor de folículo piloso asociado con el brazo robótico. Un sistema de vídeo se usa para producir una imagen virtual tridimensional del cuero cabelludo del paciente, la cual se usa para estudiar los lugares del cuero cabelludo que recibirán injertos de cabellos implantados por el introductor de folículo bajo el control del brazo robótico. Sin embargo, existen muchas mejoras tanto para proporcionar un sistema automatizado (por ejemplo, robótico) como métodos para su uso para recolectar e implantar unidades foliculares pilosas, colectivamente, "trasplantar" cuando se refiere a la recolección de una unidad folicular de una región donante de una superficie del cuerpo e implantar la unidad recolectada en una región del receptor de la superficie del cuerpo como parte de un mismo procedimiento.

50 Resumen

La invención reivindicada se define en la reivindicación independiente anexa 1. Las modalidades preferidas se describen en las reivindicaciones dependientes.

55 De acuerdo con un aspecto general de las invenciones descritas en la presente, un sistema automatizado, tal como un sistema robótico guiado por imágenes, se emplea para llevar a cabo la recolección e implante de unidades foliculares pilosas controlados con precisión. En algunas modalidades, el sistema automatizado incluye un brazo móvil, una herramienta montada en el brazo móvil, una o más cámaras montadas en el brazo móvil, un procesador configurado para recibir y procesar imágenes obtenidas por la una o más cámaras, y un controlador asociado operativamente con el

procesador y configurado para posicionar el brazo móvil en base, al menos en parte, a imágenes procesadas obtenidas por la una o más cámaras, en donde el brazo móvil puede posicionarse de manera que la herramienta puede posicionarse en una orientación deseada en relación con una superficie del cuerpo adyacente.

5 A modo de ejemplo no limitante, el sistema automatizado puede ser un sistema robótico, en donde el brazo móvil es un brazo robótico, y en donde el procesador y el controlador pueden configurarse para posicionar la herramienta mediante control visual del brazo robótico. En algunas modalidades, puede emplearse una sola cámara, en donde el procesador se configura para registrar un sistema de coordenadas de referencia de la cámara con un sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta del brazo robótico. Por ejemplo, el procesador puede registrar el sistema de  
10 coordenadas de referencia de la cámara con el sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta en base a imágenes de un objetivo de calibración fijo que se obtienen mientras el brazo robótico se mueve a lo largo de uno o más ejes del sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta. A modo de otro ejemplo, un par de cámaras pueden montarse en el brazo robótico, en donde el procesador se configura para registrar los respectivos sistemas de coordenadas de referencia de las cámaras entre sí y con un sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta del brazo robótico. Nuevamente, el procesador puede registrar el respectivo sistema de coordenadas de referencia de las cámaras con el sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta en base a imágenes de un objetivo de calibración fijo que se obtienen mientras el brazo robótico se mueve a lo largo de uno o más ejes del sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta. A modo aún de otro ejemplo, la una o más cámaras comprenden los primer y segundo pares respectivos de cámaras montadas en el brazo robótico, el primer par enfocado en obtener  
20 imágenes de un primer campo de visión, y el segundo par enfocado en obtener imágenes de un segundo campo de visión sustancialmente más estrecho que el primer campo de visión. En esta modalidad, el procesador puede configurarse para registrar los respectivos sistemas de coordenadas de referencia del primer y segundo pares de cámaras entre sí y con un sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta del brazo robótico. Nuevamente, el procesador puede registrar el respectivo sistema de coordenadas de referencia de las cámaras con el sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta en base a imágenes de un objetivo de calibración fija que se obtienen mientras el brazo robótico se mueve a lo largo de uno o más ejes del sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta.

En varias modalidades, la herramienta comprende una o ambas de una herramienta de recolección de unidad folicular y una herramienta de implante de unidad folicular. En varias modalidades, el procesador puede configurarse para identificar los límites físicos aproximados de una unidad folicular en una imagen obtenidos por la una o más cámaras. Por ejemplo, el procesador puede configurarse para identificar los límites físicos aproximados de una unidad folicular capturada en una imagen obtenida, que incluye una región de base subcutánea incrustada en la superficie del cuerpo y una región de punta distal que se extiende alejándose de la superficie del cuerpo, en donde las imágenes incluyen imágenes subcutáneas. En aún otra modalidad, un chorro de aire se proporciona en el brazo móvil para dirigir una corriente de aire a la superficie del cuerpo. En aún otra modalidad, se proporciona una interfaz de usuario para que un usuario introduzca instrucciones a uno o ambos del procesador y el controlador con respecto a una o más de un lugar, posición, orientación, y profundidad de una unidad folicular que se va a implantar.

Se describe además un método para recolectar unidades foliculares de una superficie del cuerpo el cual incluye (i) obtener imágenes de una superficie del cuerpo; (ii) procesar las imágenes obtenidas para identificar una unidad folicular en la superficie del cuerpo y para determinar una posición y orientación relativas de la unidad folicular identificada; (iii) usar un sistema automatizado que incluye un brazo móvil para posicionar una herramienta de recolección montada en el brazo móvil adyacente a la unidad folicular identificada, basado, al menos en parte, en datos procesados de la imagen, de manera que un eje longitudinal de la herramienta de recolección se alinee con un eje longitudinal de la unidad folicular; y (iv) recolectar la  
45 unidad folicular mediante el movimiento de la herramienta de recolección en relación con la superficie del cuerpo, en donde las imágenes se obtienen de una o más cámaras montadas en el brazo móvil.

En una modalidad, el sistema automatizado puede ser un sistema robótico, en donde el brazo móvil es un brazo robótico. En dicha modalidad, las imágenes pueden obtenerse de una sola cámara montada en el brazo robótico, el método comprende además registrar un sistema de coordenadas de referencia de la cámara con un sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta del brazo robótico. Por ejemplo, el sistema de coordenadas de referencia de la cámara puede registrarse con el sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta del brazo robótico en base a imágenes de un objetivo de calibración fija que se obtienen mientras el brazo robótico se mueve a lo largo de uno o más ejes del sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta del brazo robótico. En otra modalidad de este tipo, las imágenes pueden obtenerse de un par de cámaras montadas en el brazo robótico, el método comprende además registrar los respectivos sistemas de coordenadas de referencia de las cámaras entre sí y con un sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta del brazo robótico. En aún otra modalidad de este tipo, las imágenes pueden obtenerse usando los respectivos primer y segundo pares de cámaras montadas en el brazo robótico, el primer par enfocado en obtener datos de imágenes de un primer campo de visión, y el segundo par enfocado en obtener datos de  
50 imágenes de un segundo campo de visión sustancialmente más estrecho que el primer campo de visión. En aún otra

modalidad adicional de este tipo, el método puede comprender además identificar los límites físicos aproximados de la unidad folicular identificada, que incluye (a modo de ejemplo no limitante) identificar una región de base subcutánea incrustada en la superficie del cuerpo y una región de punta distal que se extiende alejándose de la superficie del cuerpo.

5 Se describe además un método para implantar unidades foliculares en una superficie del cuerpo la cual incluye (i) obtener y procesar imágenes de una superficie del cuerpo para identificar un lugar para el implante; (ii) usar un sistema automatizado que incluye un brazo móvil para posicionar una herramienta de implante montada en el brazo móvil a un lugar adyacente al lugar del implante; y (iii) implantar una unidad folicular en la superficie del cuerpo mediante el movimiento de la herramienta de implante en relación con la superficie del cuerpo, en donde las imágenes se obtienen de una o más cámaras montadas  
10 en el brazo móvil.

A modo de ejemplo no limitante, el sistema automatizado puede ser un sistema robótico, y el brazo móvil puede ser un brazo robótico, en donde la herramienta de implante puede posicionarse en el lugar para el implante mediante control visual del brazo robótico. En varias modalidades, la unidad folicular se puede portar en la herramienta de implante antes del implante. En varias modalidades, la unidad folicular se implanta en una posición y orientaciones deseadas en relación con la superficie del cuerpo, y también se puede implantar a una profundidad deseada en la superficie del cuerpo. En algunas modalidades, el método puede incluir además dirigir una corriente de aire al lugar del implante antes o al mismo tiempo del implante de la unidad folicular, por ejemplo, para eliminar los cabellos vecinos y/o la sangre de implantes adyacentes. En algunas modalidades, el método puede incluir también introducir a través de una interfaz de usuario del sistema automatizado instrucciones con respecto a una o más de un lugar, posición, orientación, y profundidad de una unidad folicular que se va a implantar.  
15  
20

Se describe además un método para el trasplante de unidades foliculares el cual incluye (i) obtener y procesar imágenes de una primera área de una superficie del cuerpo para identificar y determinar una posición y orientación relativas de una unidad folicular a recolectar; (ii) usar un sistema automatizado que incluye un brazo móvil para posicionar una herramienta de recolección montada en un brazo móvil adyacente a la unidad folicular identificada, de manera que un eje longitudinal de la herramienta de recolección se alinee con un eje longitudinal de la unidad folicular; (iii) recolectar la unidad folicular mediante el movimiento de la herramienta de recolección en relación con la superficie del cuerpo; (iv) obtener y procesar las imágenes de una segunda área de la superficie del cuerpo para identificar un lugar para el implante; (v) usar el sistema automatizado para posicionar una herramienta de implante montada en el brazo móvil adyacente al lugar para el implante, y (vi) implantar la unidad folicular mediante el movimiento de la herramienta de implante en relación con la superficie del cuerpo, en donde las respectivas imágenes se obtienen de una o más cámaras montadas en el brazo móvil.  
25  
30

Además, se proporciona un ensamble de herramienta multipartes para la recolección e implante de unidades foliculares pilosas en una superficie del cuerpo, tal como un cuero cabelludo humano. En una modalidad, el ensamble de herramienta comprende un par de cánulas dispuestas axialmente posicionadas en una manera alterna, que incluye una cánula exterior de "implante" que tiene una cavidad interior y un extremo distal de perforación del tejido, abierto, y una cánula interior de "recolección" posicionada en la cavidad de la cánula de implante. La cánula de recolección tiene un extremo distal de extracción de muestras del tejido, abierto y una cavidad interior dimensionada para acoplar por fricción y retener una unidad folicular. El ensamble de herramienta se puede manual y posicionar. De manera alterna, el ensamble de herramienta se puede anexas, y posicionar por, un brazo móvil de un sistema automatizado, por ejemplo, un sistema de brazo robótico. El movimiento de una o ambas cánulas de recolección e implante relacionadas entre sí y/o con el resto del ensamble de herramienta (manuales o portadas por un sistema de posicionamiento automatizado) puede proporcionarse por un número de diferentes sistemas y mecanismos mecánicos, electromecánicos, neumáticos, hidráulicos, magnéticos, y otros, para efectuar el movimiento controlador de las respectivas cánulas. Mientras las cánulas de recolección e implante se alinean preferentemente de manera axial, otras modalidades son posibles.  
35  
40  
45

Para la recolección, un eje longitudinal de la cánula de recolección se alinea axialmente con un eje longitudinal de una unidad folicular seleccionada a recolectar. Dependiendo de la modalidad, el posicionamiento de la cánula de recolección en relación con la unidad folicular seleccionada puede ser manual o completamente automatizado. En una modalidad, un sistema robótico guiado por imágenes que incluye un brazo robótico se usa para posicionar y alinear las respectivas cánula de recolección y unidad folicular. La cánula de recolección avanza sobre la unidad folicular, con su extremo distal de extracción de muestras que penetra en la superficie del cuerpo en la capa subcutánea grasa que rodea y subyace la unidad folicular. La cánula de recolección se retira entonces de la superficie del cuerpo para de esta manera extraer la unidad folicular, la cual se porta en la cavidad de la cánula de recolección.  
50  
55

El movimiento de la cánula de recolección en relación con la superficie del cuerpo puede ser manual, semiautomatizada, o completamente automatizada. La cánula de recolección se puede fijar o mover independientemente en relación con el resto del ensamble de herramienta, si el ensamble de herramienta es manual o se anexa a un brazo móvil. En modalidades en las cuales el ensamble de herramienta se porta en un brazo automatizado (por ejemplo, robótico), el movimiento de la cánula de  
60

recolección en relación con la superficie del cuerpo puede llevarse a cabo mediante el movimiento del brazo en relación con la superficie del cuerpo, el movimiento de la cánula de recolección en relación con el brazo automatizado, o una combinación de cada uno. De manera similar, en modalidades manuales, el movimiento de la cánula de recolección en relación con la superficie del cuerpo puede llevarse a cabo mediante el movimiento del brazo del operador en relación con la superficie del cuerpo, el movimiento de la cánula de recolección en relación con el ensamble de herramienta, o una combinación de cada uno. En algunas modalidades, la cánula de recolección gira alrededor de su eje longitudinal mientras penetra la superficie del cuerpo para mejorar su efectividad de extracción de muestras del tejido. En algunas modalidades, la pared de la cavidad de la cánula de recolección puede texturizarse con el fin de facilitar la sujeción y extracción de la unidad folicular. En algunas modalidades, puede colocarse una fuente de vacío selectivamente en comunicación con la cavidad de la cánula de recolección para aplicar una fuerza "de empuje" dirigida proximalmente para facilitar la sujeción y extracción de las unidades foliculares. Estas características pueden ser también de ayuda en la retención de la unidad folicular en la cavidad de la cánula de recolección después de que se recolecte.

Para el implante, el ensamble de herramienta se reposiciona (ya sea manualmente o mediante el uso de un sistema automatizado) a un lugar para el implante seleccionado en un área receptora en la superficie del cuerpo. Un eje longitudinal de la cánula de implante puede alinearse con una orientación deseada de la unidad folicular, una vez implantada. Nuevamente, este alineamiento puede llevarse a cabo manualmente o mediante un sistema automatizado, por ejemplo, mediante el uso de un sistema robótico guiado por imágenes en una modalidad. El extremo distal de perforación del tejido de la cánula de implante avanza sobre la superficie del cuerpo, lo que crea una cavidad subcutánea de implante de una profundidad y tamaño adecuados para recibir una unidad folicular que se va a implantar. Este "movimiento de perforación" por la cánula de implante es preferentemente muy rápido con el fin de minimizar el trauma a la superficie del tejido en la cavidad de implante, por ejemplo, similar al movimiento de un dispositivo de punción del dedo con resorte que se usa para obtener pequeñas cantidades de sangre para las pruebas.

En una modalidad, una unidad folicular se mueve axialmente desde la cavidad de la cánula de recolección (donde se ha mantenido sin perturbar desde que se recolectó) en la porción del extremo distal de la cavidad de la cánula de implante por un obturador (émbolo) dispuesto en la cavidad de la cánula de recolección. Este reposicionamiento de la unidad folicular puede tomar lugar antes, durante o después de que la cánula de implante perfora la superficie del cuerpo. A partir de entonces el obturador mantiene la posición relativa de la unidad folicular en la cavidad de implante mientras la cánula de implante se retira de la superficie del cuerpo mediante un movimiento de traslación en relación con el obturador. En otra modalidad, la unidad folicular se deposita directamente desde la cavidad de la cánula de recolección en la cavidad de implante, por ejemplo, mediante el obturador, o al aplicar una fuerza "de empuje" dirigida distalmente que usa una fuente de aire a presión que se coloca en comunicación con la cavidad de la cánula de recolección.

Se describe además un método de trasplante de una unidad folicular pilosa que usa un ensamble de herramienta multipartes el cual incluye (i) alinear un eje longitudinal de una cánula ("recolección") interior con un eje longitudinal de una unidad folicular seleccionada a recolectar de un área donante de una superficie del cuerpo; (ii) hacer avanzar la cánula de recolección en relación con la superficie del cuerpo de manera que un extremo distal de extracción de muestras del tejido, abierto de la cánula de recolección penetre la superficie del cuerpo que rodea la unidad folicular seleccionada a una profundidad suficiente para encapsular sustancialmente la unidad folicular; (iii) retirar la cánula de recolección de la superficie del cuerpo con la unidad folicular acoplada y retenida en una cavidad interior de la misma; (iv) hacer avanzar una cánula ("implante") exterior sobre la cánula de recolección dispuesta coaxialmente de manera que un extremo distal de tejido perforado de la cánula de implante perfora un área receptora de la superficie del cuerpo y forme una cavidad de implante ahí; y (v) desplazar la unidad folicular desde la cavidad de la cánula de recolección en la cavidad de implante.

Breve descripción de las figuras

La invención se muestra a modo de ejemplo y no limitante en las figuras de los dibujos adjuntos, en los cuales las mismas referencias indican elementos similares, y en los cuales:

La Fig. 1 es una vista en perspectiva de un sistema de brazo robótico que se usa para posicionar y orientar un par de cánulas dispuestas coaxialmente que se extienden desde una abertura distal de una carcasa del ensamble de herramienta portada por el brazo robótico y que se usa para recolectar e implantar unidades foliculares pilosas humano.

La Fig. 2 es una aproximación de la porción distal de la carcasa del ensamble de herramienta mostrada en la Fig. 1.

La Fig. 2A es una aproximación de la porción del extremo distal de una modalidad alterna del sistema de brazo robótico de la Fig. 1, en la cual el primer y segundo pares de cámaras estéreo se aseguran al brazo robótico y se usan para capturar datos de imágenes de múltiples campos de vista para guiar el movimiento del brazo robótico y el ensamble de herramienta anexo.

La Fig. 3 es una vista en perspectiva de una herramienta multipartes para usar en el ensamble de herramienta en el sistema de la Fig. 1.

La Fig. 4 es una vista en sección longitudinal de la herramienta multipartes de la Fig. 3.

La Fig. 5 es una vista en perspectiva de un ensamble de accionamiento del motor para acoplar operativamente con la herramienta multipartes de la Fig. 3 en el ensamble de herramienta del sistema de la Fig. 1.

Las Figs. 6A y 6B son vistas en corte parcial simplificado de procedimientos de implante alternativos portados usando la herramienta de tres partes de la Fig. 3.

La Fig. 7 es una vista en perspectiva parcial, esquemática parcial de una modalidad del ensamble de herramienta del sistema robótico en la Fig. 1.

La Fig. 8 es una vista seccional en corte parcial de una unidad de soporte localizada en un ensamble de accionamiento del motor en el ensamble de herramienta de la Fig. 7.

La Fig. 9A es una vista en sección longitudinal de una herramienta multipartes para usar en el ensamble de herramienta en el sistema de la Fig. 7.

Las Figs. 9B-9D muestran variaciones de un extremo distal de una aguja de la cánula de recolección de unidad folicular del ensamble de herramienta de la Fig. 9A.

La Fig. 10 muestra la herramienta multipartes de la Fig. 9A operativamente acoplada con la unidad de soporte de la Fig. 8.

Las Figs. 11A-D muestran un proceso para implantar una unidad folicular, de acuerdo con algunas modalidades.

La Fig. 12 muestra un diagrama de fuerzas que representa una fuerza experimentada por una cánula de recolección, de acuerdo con algunas modalidades.

La Fig. 13 es un diagrama de flujo de un procedimiento para calibrar un eje óptico y un marco de referencia de la cámara asociada de una sola cámara con un marco de la herramienta establecido en el extremo (de trabajo) distal del brazo robótico al cual la cámara se anexa.

La Fig. 14 es un diagrama de flujo de un procedimiento iterativo para alinear (tanto la posición y orientación) un instrumento alargado que se usa para recolectar y/o implantar folículos pilosos con una unidad folicular pilosa seleccionada.

La Fig. 15 representa una imagen de la cámara de unidades foliculares pilosas en una región de interés en un cuero cabelludo humano.

La Fig. 16 muestra la posición y orientación, es decir, definida por desplazamientos en x, y y ángulos en el plano y fuera del plano, de una unidad folicular pilosa en relación con el marco de referencia de la cámara.

La Fig. 17 es un diagrama de flujo de un procedimiento automatizado para identificar una posición y orientación de cada una de una variedad de unidades foliculares en una región de interés en un cuero cabelludo humano, y entonces recolectar algunas o todas las unidades foliculares identificadas.

La Fig. 18 es un diagrama de flujo de un algoritmo que usa imágenes obtenidas de un par de cámaras estéreo para identificar unidades foliculares en una región de interés, y entonces estima las posiciones y orientaciones respectivas de las unidades foliculares identificadas.

La Fig. 19 es un diagrama de flujo de un algoritmo que usa puntos de control para diseñar una línea de cabellos (implantada) de apariencia natural.

La Fig. 20 es un diagrama de flujo de un algoritmo que usa puntos de control para proporcionar aleatoriedad de apariencia natural a lugares de injerto de cabello implantado.

La Fig. 21 es un diagrama de flujo que muestra una función de guía automática de un sistema robótico guiado por imágenes.

#### Descripción detallada de las modalidades ilustradas

La Fig. 1 representa un sistema robótico guiado por imágenes 25, que incluye un brazo robótico 27, con un ensamble de herramienta 30 unido a una placa de la herramienta distal 20. El brazo robótico 27 es preferentemente programable y de un tipo tal como los fabricados y distribuidos por Adept Technology, Inc. ([www.adept.com](http://www.adept.com)). Otra fuente de ensambles de brazos robóticos adecuados para las modalidades de la invención se producen y distribuyen por Kuka Robot Group ([www.kuka.com](http://www.kuka.com)). El brazo robótico 27 proporciona el movimiento preciso controlado de la placa de extremo distal 20 en seis grados de libertad (x, y, z,  $\omega$ ,  $\rho$ , r), como se conoce bien en la técnica. Dicho movimiento de la placa distal se proporciona con un alto grado de repetibilidad y precisión (por ejemplo, a 20 micras) por los motores y codificadores respectivos localizados en las respectivas articulaciones del brazo 21 del brazo robótico 27.

Una variedad de diferentes herramientas y/o ensambles efectores finales pueden unirse a la placa de extremo distal en el brazo robótico 27 para llevar a cabo varios procedimientos en un paciente humano o animal. A modo de ejemplo, el ensamble de herramienta 30 mostrado en las Figs. 1-2 se diseña para la recolección e implante de folículos pilosos de/en un cuero cabelludo humano u otra superficie del cuerpo, e incluye cánulas de recolección e implante dispuestas coaxialmente 38 y 36, respectivamente, que se extienden desde una extensión tubular 24 de una carcasa 22. Las cánulas 36 y 38 son rígidas axialmente, por ejemplo, hechas de metal duro o plástico, y paredes delgadas para facilitar la penetración del tejido. La cánula de implante 36 tiene preferentemente una punta de perforación del tejido en forma de aguja, y la cánula de recolección tiene preferentemente una punta de extracción de muestras del tejido (por ejemplo, dentada). El brazo robótico

27 posiciona de manera automática y precisa las respectivas cánulas de recolección e implante 38 y 36 en los lugares deseados, y en orientaciones deseadas, a lo largo de una superficie del cuerpo (por ejemplo, un cuero cabelludo) de un paciente en base a señales de control derivadas, al menos en parte, de datos de imágenes obtenidas por una o más cámaras 28 anexadas a la carcasa del ensamble de herramienta 22.

5

En particular, y como se describe en mayor detalle en la presente, el movimiento del brazo robótico 27 se rige por un controlador del sistema (no mostrado), en respuesta a señales de control derivadas de datos de imágenes obtenidos por un par de cámaras "estéreo" 28 anexado al extremo distal del brazo robótico (próximo al ensamble de herramienta 30). En modalidades alternas, sólo se necesita usar una cámara para la obtención de imágenes. De manera alterna, como se representa en la Fig. 2A, y como se describe en mayor detalle en la presente, múltiples pares de cámaras estereo 28A y 28B pueden usarse con el fin de capturar diferentes (es decir, más anchos y más estrechos) campos de vista. En modalidades adicionales, una sola cámara puede usarse para capturar un primer (es decir, ancho) campo de visión, y una segunda cámara puede usarse para capturar un segundo (es decir, estrecho) campo de visión. Otras configuraciones de la cámara son posibles también.

10

15

Los datos de imágenes obtenidos por la(s) cámara(s) 28 se procesan en un ordenador (no mostrado en la Fig. 1) asociada con el sistema robótico 25, el cual proporciona señales de control al controlador del sistema para dirigir el movimiento del brazo robótico 27. En particular, las imágenes se obtienen de cada cámara del par 28 a una ampliación deseada (por ejemplo, en un rango de 6x a 10x en una modalidad) y a un ciclo de trabajo (por ejemplo, 30 hertz en una modalidad). Las imágenes obtenidas se digitalizan mediante técnicas de segmentación de imágenes conocidas implementadas en software en el ordenador con el fin de identificar la(s) posición(es) y orientación(es) de objetos de interés. En el caso de procedimientos que involucran retirar o implantar folículos pilosos, puede ser deseable matar los folículos pilosos de interés con un color oscuro antes de un procedimiento, con el fin de aumentar la efectividad de las técnicas de procesamiento de imagen. Puede ser deseable también cortar los folículos pilosos en la(s) región(es) de interés a una longitud sustancialmente uniforme antes del procedimiento.

20

25

Como se apreciará por aquellos expertos en la técnica, uno puede visualizar debajo de la superficie de la piel mediante el ajuste de la iluminación, los filtros en las cámaras, y varias técnicas de procesamiento de imagen. Esto se debe a que la reflexión y absorción de luz por la superficie de la piel cambiará de acuerdo con la longitud de onda de la luz que se use. Además, la profundidad de penetración de la propia luz en la piel también cambia de acuerdo con la longitud de onda. Mediante la comprensión de estas propiedades básicas de la luz, pueden obtenerse imágenes de las porciones subcutáneas de las unidades foliculares (folículos pilosos) usando respectivas longitudes de onda de la luz apropiadas, que incluyen el espectro de luz visible e infrarrojo, capturando las diferentes longitudes de onda de la luz al usar diferentes filtros de imagen, y sustrayendo y/o combinando imágenes durante el procesamiento de imagen. Este enfoque permite a uno visualizar el tallo del cabello de la unidad folicular, tanto por fuera de la piel, como por debajo de la superficie de la piel, incluyendo toda la trayectoria hasta el bulbo.

30

35

Más particularmente, el sistema robótico 25 es capaz de seguir con precisión el movimiento de la placa de extremo distal (y herramienta o ensamble efectores finales) en cada uno de los seis grados de libertad (x, y, z,  $\omega$ ,  $\rho$ , r) en relación con tres marcos de referencia diferentes. Un "marco global" tiene su origen de coordenadas x, y, z en un punto central de la base 29 del brazo robótico 27, con las coordenadas x-y que se extienden a lo largo de un plano en una superficie de una tabla 23 en la cual se une la base 29 del brazo robótico 27. El eje z del marco global se extiende ortogonalmente a la superficie de la tabla a través de una primera sección del brazo robótico 27. Un "marco de la herramienta" tiene establecido su origen de coordenadas x, y, z en la placa de la herramienta de extremo distal. Por último, un "marco de la base" puede registrarse en relación con los marcos globales y de herramienta. Cada cámara tiene también un sistema (bidimensional) de coordenadas de cámara ("marco de la cámara"), en el cual el eje óptico de la cámara ("eje de la cámara") pasa a través del origen de las coordenadas x, y. Mediante el alineamiento de los respectivos marco global, marco de la herramienta, marco de la base y marcos de la cámara, el controlador del sistema puede posicionar y orientar con precisión un objeto asegurado a la placa de la herramienta (por ejemplo, una aguja) en relación con otro objeto, tal como una unidad folicular pilosa que se extiende fuera de la superficie de la piel de un paciente.

40

45

50

Con el fin de alinear físicamente el eje de la cámara con un eje de una herramienta del efector de extremo (por ejemplo, una cánula de aguja alargada) que se fija a la placa de la herramienta distal del brazo robótico 25, es de importancia práctica ser capaz de calibrar, y por lo tanto disponer de la información para compensar los desplazamientos de posición y rotación entre el "eje de la herramienta" del efector de extremo y el eje de la cámara, así como la desviación de la paralela de estos respectivos ejes. Como una cuestión inicial, la base proximal 29 del brazo robótico 27 se monta en la superficie de la tabla 23, de manera que la superficie de la tabla 23 se alinee con el plano de coordenadas x-y del marco global del sistema robótico. Por lo tanto, un punto situado en la superficie de la tabla tiene una posición de las coordenadas x-y en el marco global, la cual se puede identificar en términos de valores de desplazamiento de x e y (por ejemplo, medidos en mm) desde

55

el origen del marco global localizado en un punto central de la interfaz de la base proximal del brazo robótico con la superficie de la tabla 23, con la posición de la coordenada z del punto igual a cero en el marco global.

5 Con referencia a la Fig. 13, un ejemplo de dicho procedimiento de calibración es como sigue: En la etapa 160, el eje de la cámara de una sola cámara que se fija a la placa de la herramienta de extremo distal del brazo del robot 27 se alinea con un "punto de calibración" fijo localizado en la superficie de la tabla 23. Después se inicia el marco de la base del sistema robótico, lo que significa que el origen del marco de la base se fija en el "punto de calibración" y el eje de la cámara se alinea con el punto de calibración en la superficie de la tabla. Esta posición inicial se llama posición y orientación de "punto de partida", y el brazo del robot 27 siempre inicia desde esta posición, incluso en ausencia del punto de calibración. En la 10 etapa 162, se determina entonces un ajuste y orientación de la imagen de la cámara en relación con el marco de la base, primeramente, al mover el brazo robótico 27 (y, por lo tanto, la cámara) una distancia fija (por ejemplo, 5 mm) a lo largo del eje x del marco de la base, de manera que el punto de calibración todavía se capture en la imagen resultante, pero ya no está alineado con el eje de la cámara. Debido a que los ejes x-y del marco de la cámara no está alineados con los ejes x-y del marco de la base, el movimiento a lo largo del eje x del marco de la base resulta en el movimiento en ambas direcciones x e y en el marco de la cámara, y la nueva posición del punto de calibración se mide en el marco de la cámara como un 15 número de píxeles de la imagen en cada una de las direcciones x e y entre el pixel que contiene el eje reposicionado de la cámara y el pixel que contiene el punto de calibración.

20 Este proceso se repite al mover el brazo robótico 27 (y la cámara) una distancia fija (por ejemplo, 5 mm) a lo largo del eje y del marco de la base, y nuevamente al medir los desplazamientos x, y en el marco de la cámara de la nueva posición del punto de calibración. Como se apreciará por aquellos expertos en la técnica, estas mediciones permiten ajustar el movimiento físico del robot/cámara (en mm) al movimiento de un objeto en la imagen de la cámara (en píxeles), así como la orientación en el plano de los ejes x-y del marco de la cámara en relación con los ejes x-y del marco de la base. Se apreciará además que el proceso de ajuste y orientación de las etapas 160 y 162 se repite para cada cámara en un sistema 25 de múltiples cámaras, por lo que también pueden determinarse y calibrar las variaciones en el movimiento de la imagen entre las respectivas cámaras.

30 En la etapa 164, una vez que el marco de la cámara se calibra con respecto al marco de la base, el eje de la cámara se alinea nuevamente con un punto fijo de calibración situado en la superficie de la tabla 23, en donde el marco de la base se regresa a su posición y orientación de "punto de partida" (0,0,0,0,0,0). El brazo robótico 27 se mueve entonces en uno o más de los seis grados de libertad (x, y, z,  $\omega$ ,  $\rho$ , r), de manera que una herramienta del efector de extremo (por ejemplo, la punta de la aguja) unida a la placa de la herramienta haga contacto con el punto de calibración. Al seguir con precisión el movimiento del brazo robótico 27 desde la posición/orientación del punto de partida inicial del marco de la herramienta hasta su posición/orientación donde la punta de la herramienta hace contacto con el punto de calibración, el controlador del sistema calcula los desplazamientos de rotación y traslación entre la posición inicial del punto de partida y el eje de la 35 cámara. Debido a que la cámara se fija a la placa de la herramienta, los desplazamientos medidos serán constantes, y se usan durante todo el procedimiento para el alineamiento del marco de la herramienta con el marco de la cámara (y, por extensión, el marco de la base).

40 Como se describirá en mayor detalle en la presente, cuando se usa un par de cámaras estéreo, por ejemplo, el par de cámaras 28 de la Fig. 1, los ejes ópticos respectivos (y los marcos de la cámara) de las cámaras no se suelen instalar o mantener en paralelo, sino que se acercan ligeramente, por ejemplo, aproximadamente diez grados, lo cual se puede compensar mediante técnicas de procesamiento de imagen conocidas. En particular, los respectivos marcos de la cámara se alinean para tener un eje x en común (horizontal), por lo que una posición y orientación (que incluye la profundidad en el 45 plano) de objetos capturados en las imágenes paralelas puede alinearse mediante técnicas de procesamiento de imagen. Una ventaja de usar un par de cámaras estéreo 28 es que una "profundidad" en el marco de la cámara de un objeto identificado se puede calcular en base a las diferencias de los desplazamientos de posición en x, y del objeto en los respectivos (izquierdo v. derecho) marcos de la cámara. En particular, la profundidad de implante de una unidad folicular pilosa ("injerto") es importante para el resultado estético y es un reto lograrlo manualmente, particularmente con el 50 cansancio del operador que puede resultar de implantar un gran número de injertos. Si el injerto se implanta demasiado profundo, resulta una apariencia en forma de hueco; si se implanta demasiado superficial, resulta un bulto o el injerto puede que no se mantenga en la posición.

55 Con el fin de calcular una profundidad de un objeto seleccionado, tal como una unidad folicular pilosa, primeramente deben alinearse las imágenes izquierda y derecha obtenidas del par de cámaras estéreo. Debido a que las respectivas imágenes de la cámara se alinean horizontalmente, los mismos objetos aparecerán en las mismas líneas de exploración horizontales de las dos imágenes. Y, debido a que la profundidad de un objeto fotografiado en relación con las lentes de la cámara está dentro de un rango conocido (por ejemplo, establecido por las distancias focales de las respectivas cámaras), un objeto seleccionado en una primera imagen (por ejemplo, una unidad folicular pilosa) puede coincidir con él mismo en la segunda 60 imagen (para de ese modo alinear las imágenes entre sí) mediante el cálculo de una profundidad efectiva del objeto cuando



se compara con los posibles objetos candidatos en la segunda imagen (es decir, en la misma línea de exploración) para determinar qué "par" tiene una profundidad calculada en el rango posible.

Otra ventaja de usar un par de cámaras estéreo 28 es la capacidad de obtener datos de imágenes con respecto a la posición y orientación de una herramienta del efector de extremo (por ejemplo, una cánula de recolección de unidad folicular pilosa 38 mostrada en las Figs. 1-2) en un mismo marco de referencia en el que se obtienen datos de imágenes con respecto a la posición y orientación de objetos de interés (por ejemplo, folículos pilosos, arrugas, tatuajes, lunares, etc.) en la superficie de la piel. Los respectivos marcos izquierdo y derecho de la cámara se calibran con el marco de la herramienta de la misma manera como se describe anteriormente para un solo marco de la cámara. Una vez que se establecen estos desplazamientos, las posiciones y orientaciones relativas de la herramienta del efector de extremo y de los objetos en la superficie de la piel (por ejemplo, unidades foliculares pilosas) pueden determinarse y seguir en el marco de la herramienta.

La Fig. 14 es un diagrama de flujo simplificado de un procedimiento de acuerdo con una modalidad de la invención para alinear la posición y orientación de un eje alargado de la cánula de recolección de unidad folicular 38 con un eje alargado del tallo de una unidad folicular pilosa que se extiende desde el cuero cabelludo, usando solamente una cámara para la obtención de imágenes. Como se describe en mayor detalle más abajo, la cánula de recolección 38 generalmente comprende una cánula tubular, hueca que tiene un extremo distal dentado para perforar la epidermis y la dermis inmediatamente alrededor de una circunferencia exterior de una unidad folicular con el fin de envolver, capturar y retirar toda la unidad folicular de los tejidos subcutáneos grasos que subyacen la dermis, por ejemplo, mediante la rotación de la cánula 38 en un movimiento en forma de perforación, o mediante un empuje rápido alterno a lo largo de su eje longitudinal. La cánula de recolección 38 puede avanzar y retirarse mediante su propio movimiento longitudinal (es decir, en relación con la placa de la herramienta a la cual se anexa), o mediante el movimiento longitudinal del brazo robótico 27, o una combinación de ambos, con el fin de extraer y retirar las respectivas unidades foliculares, por ejemplo, por fricción y/o con la ayuda de un vacío débil. Por ejemplo, el ensamble de herramienta 30 puede tener su propio sistema de control y accionamiento separado del sistema robótico 25.

Una descripción más detallada del ensamble de herramienta de recolección e implante folicular 30 se proporciona más abajo, en ensamble con la descripción de las modalidades de las Figs. 3-11. También deberá apreciarse que el proceso de posicionamiento y orientación que se usa para alinear el eje alargado de la cánula de recolección 38 con el eje alargado de una unidad folicular pilosa tendrá una aplicación mucho más amplia que sólo para procedimientos de retiro y/o implante de cabello. A modo de ejemplos no limitantes, los procedimientos de posicionamiento y orientación sustancialmente similares pueden usarse para alinear un láser, o una aguja de inyección, con características y/o lugares físicos deseados en una superficie de la piel de un paciente en una manera oportuna y precisa.

Después de que el sistema robótico 25 se ha iniciado y calibrado de manera que el marco de la cámara se alinea con el marco de la herramienta (descrito anteriormente en ensamble con la Fig. 13), se obtienen y procesan los datos de imágenes mediante el ordenador del sistema para identificar objetos de interés en el marco de la cámara. A modo de ejemplo, la Fig. 15 representa una imagen de la cámara de unidades foliculares pilosas en una región de interés 150 en un cuero cabelludo humano. A partir de imágenes de esta región de interés 150, el software de segmentación y proyección de imagen que reside en el ordenador identifica y selecciona una o más unidades foliculares particulares de interés para recolectar del cuero cabelludo. Con referencia a la Fig. 16, una posición de una unidad folicular pilosa seleccionada 152 se identifica en términos de sus coordenadas de desplazamiento  $x$ ,  $y$  en el marco de la cámara (el eje  $z$  es el eje óptico de la cámara el cual se alinea de preferencia sustancialmente ortogonal a la superficie del cuero cabelludo en la región 150). A menos de que el eje de la cámara esté exactamente alineado con el eje longitudinal de la unidad folicular 152 (en cuyo caso la unidad folicular aparecerá como un punto circular que representa una vista posterior del tallo del cabello), la imagen de la unidad folicular tendrá forma de una línea alargada que tiene una longitud "aparente" que dependerá del ángulo del marco de la cámara en relación con la unidad folicular. Debido a las características físicas de una unidad folicular pilosa, su base (es decir, el extremo que emerge de la dermis) se puede distinguir inmediatamente de su punta como parte del proceso de segmentación de imagen. Por ejemplo, la porción de la base tiene un perfil diferente y es generalmente más gruesa que la porción de la punta distal. También, una sombra de la unidad folicular se puede identificar típicamente la cual, por definición, se "anexa" a la base.

Entonces se calculan las posiciones  $x$ ,  $y$  de la base de la unidad folicular en el marco de la cámara y representan los desplazamientos de la posición de la base del cabello. Los desplazamientos de la orientación de la unidad folicular 152 también se calculan en términos de (i) un ángulo  $\alpha$  en el plano formado por el tallo de la unidad folicular identificada en relación con,  $y$  en el mismo plano que, el eje  $x$  (o  $y$ ) del marco de la cámara; y (ii) un ángulo  $\delta$  fuera del plano que es un ángulo "aparente" formado entre el tallo de la unidad folicular y el cuero cabelludo, es decir, entre la unidad folicular y el plano de los ejes  $x$ ,  $y$  del marco de la cámara. Como se señaló anteriormente, el tallo del cabello se recorta preferentemente antes del procedimiento a una longitud sustancialmente conocida, por ejemplo, 2 mm, de manera que el ángulo  $\delta$  fuera del

plano se pueda calcular en base a una relación de una longitud aparente medida de la imagen de la unidad folicular con su longitud actual supuesta, cuya relación es igual al coseno del ángulo  $\delta$  fuera del plano.

5 Con referencia nuevamente a la Fig. 14, en la etapa 142, los desplazamientos de posición y orientación en x, y se identifican para una unidad folicular pilosa seleccionada, como se describe anteriormente. Entonces el ordenador calcula los movimientos necesarios del brazo robótico 27 para lograr que el eje de la cámara se alinee en la misma posición y orientación de los desplazamientos calculados. El marco de la base y el marco de la herramienta se "mueven" también por los mismos desplazamientos de x, y y de rotación (es decir, hasta que los ángulos  $\alpha$  y  $\delta$  sean ambos iguales a 0), de manera que los marcos de la cámara, la base y la herramienta permanezcan alineados en la nueva posición y orientación del eje de la cámara. Debido a las posibles variaciones y errores inherentes en el sistema y asumiendo que (por ejemplo, con respecto a la longitud de la unidad folicular pilosa) la posición y orientación actual de la unidad folicular pilosa puede no coincidir con los valores calculados. Por lo tanto, una vez que el brazo robótico 27 (y el eje de la cámara) se mueve por los desplazamientos calculados de posición y rotación, la unidad folicular se fotografía nuevamente y (en la etapa 146) se determina si el eje de la cámara debe alinearse con la posición y orientación de la unidad folicular dentro de las tolerancias aceptables. Si el eje de la cámara se alinea adecuadamente con la unidad folicular, el brazo robótico 27 se mueve una última vez (en la etapa 148) con el fin de alinear la cánula de recolección 38 en la posición "confirmada" del eje de la cámara (es decir, en base a los desplazamientos obtenidos en el proceso de calibración anteriormente descrito). Sin embargo, si (en la etapa 146) el eje de la cámara no se alinea adecuadamente con la unidad folicular pilosa, se repiten los procedimientos en las etapas 142-146, iniciando en la nueva posición del eje de la cámara.

20 Como se apreciará por aquellos expertos en la técnica, en modalidades de la invención, el ciclo de trabajo de la obtención y procesamiento de imágenes es sustancialmente más rápido que el movimiento del brazo robótico 27, y el proceso de identificar y calcular los desplazamientos de posición y orientación de las unidades foliculares pilosas seleccionadas en relación con el eje de la cámara puede realizarse de manera efectiva "sobre la marcha," mientras el brazo robótico se mueve. Por lo tanto, el destino final (es decir, la posición y orientación) del brazo robótico 27 (y la cánula de recolección 38) puede ajustarse (opcionalmente) constantemente (es decir, ajustar) mientras la cánula de recolección 38 se mueve para acoplarse con la unidad folicular. Debido a que dichos ajustes se realizan de manera inmediata, el movimiento del brazo robótico 27 es más fluido y menos brusco. Este proceso iterativo de retroalimentación, referido como "control visual," calcula y perfecciona continuamente la posición y orientación deseada de la cánula de recolección 38, con el fin de minimizar la imagen de la unidad folicular pilosa, es decir, hasta que la imagen se transforma de una línea en un punto.

30 Por lo tanto, el sistema robótico guiado por imágenes 25 puede usarse para llevar a cabo procedimientos automatizados o semiautomatizados para identificar la posición y la orientación de un gran número de unidades foliculares pilosas en una región de interés en el cuero cabelludo de un paciente, y después recolectar con precisión algunas o todas las unidades foliculares. Una o más cámaras anexadas al extremo distal de trabajo del brazo robótico capturan imágenes a una ampliación deseada de un área seleccionada del cuero cabelludo del paciente. Un sistema informático procesa las imágenes e identifica (a través técnicas conocidas de segmentación y de umbral) las unidades foliculares individuales de cabello, así como sus respectivas posiciones y orientaciones en relación con el marco de la cámara. A través de una interfaz de usuario (por ejemplo, un monitor y un ratón estándar de ordenador), un cirujano a cargo puede definir una región en el cuero cabelludo en la cual unidades foliculares pilosas se recolectarán y definen un patrón de recolección, tal como, por ejemplo, tomar cada otra unidad folicular pilosa en la región, dejar un número definido de unidades foliculares entre unidades foliculares recolectadas, tomar un cierto porcentaje de unidades foliculares, dejar detrás un patrón estéticamente aceptable, etc.

45 Por ejemplo, las imágenes obtenidas de un amplio campo de visión del par de cámaras estéreo pueden usarse por el médico a cargo para localizar generalmente una región de interés, mientras que las imágenes obtenidas de un estrecho campo de visión del par de cámaras estéreo se usan para guiar con precisión la herramienta de recolección con las unidades foliculares individuales seleccionadas. Una vez que las unidades foliculares pilosas a recolectar se han identificado, el sistema robótico alinea sistemáticamente una herramienta de recolección (por ejemplo, la cánula de recolección 38) con cada cabello a recolectar; los respectivos folículos pilosos se recolectan, y el proceso se repite para todas las unidades foliculares seleccionadas en la región de recolección definida. Podrá apreciarse que en algunos casos, las unidades foliculares individuales de cabello que se recolectan se implantan entonces en otra porción del cuero cabelludo del paciente, mientras que en otros casos las unidades foliculares pilosas recolectadas se descartan. También podrá apreciarse que, en lugar de una herramienta de recolección de extracción de muestras, tal como una cánula 38, otro tipo de herramienta del efector de extremo para retirar cabello puede emplearse, tal como, por ejemplo, un láser. Podrá apreciarse además que las técnicas anteriormente descritas para alinear el marco de la cámara con el marco de la herramienta del robot para alinear con precisión una herramienta del efector de extremo pueden aplicarse de igual manera a otros tipos de herramientas efectoras finales, tales como una aguja de inyección (o una variedad de agujas de inyección) que se usa para inyectar tinta para hacer tatuajes en una superficie de la piel de un paciente.

La Fig. 17 es un diagrama de flujo de un procedimiento automatizado (o semiautomatizado) para identificar una posición y orientación de todas las unidades foliculares en una región de interés en el cuero cabelludo de un paciente, y después recolectar con precisión algunas o todas las unidades foliculares identificadas. La Fig. 18 es un diagrama de flujo de un procedimiento que usa un par de cámaras estéreo para identificar unidades foliculares individuales en una región de interés en el cuero cabelludo de un paciente, y después estima una posición y orientación de cada una en los respectivos marcos de la cámara y marco de la herramienta del robot. El procedimiento inicia cuando se calibra el par de cámaras estéreo para identificar ambos parámetros intrínsecos y extrínsecos, de acuerdo con técnicas bien conocidas. Los parámetros intrínsecos son intrínsecos a la cámara individual, tales como la óptica interna, distorsión, ajuste, y similares. Los parámetros extrínsecos se refieren a las características entre las dos cámaras, por ejemplo, diferencias en el alineamiento de sus respectivos ejes ópticos (los cuales son idealmente paralelos entre sí, pero dado que esto es poco probable en la práctica, se requiere compensación matemática). La calibración de los parámetros intrínsecos y extrínsecos se conoce bien en el campo del procesamiento de imágenes estéreo y no se explicará a detalle en la presente.

Como se discutió anteriormente, las ubicaciones de los centros de los folículos pilosos se identifican y se hacen coincidir en ambas imágenes, la izquierda y la derecha, rectificadas. Entonces la cabeza y la cola de cada folículo piloso se identifican en ambas imágenes, la izquierda y la derecha, en donde se pueden calcular las coordenadas tridimensionales de la cabeza y la cola del folículo piloso. Finalmente, el desplazamiento relativo de la posición y orientación del folículo piloso y de la cánula se determinan mediante las imágenes de las cámaras las cuales observan tanto la cánula como el folículo piloso, de acuerdo con técnicas bien conocidas de procesamiento de imágenes estéreo.

El resultado estético de un procedimiento de trasplante de cabello depende en parte en implantar los injertos en patrones de apariencia natural. El ordenador puede "amplificar" eficientemente la habilidad del cirujano al "rellenar los espacios en blanco" a lo largo de una pequeña fracción de los lugares para el implante para lo cual el cirujano determina la posición y orientación del injerto. Es particularmente importante para un buen resultado estético lograr una línea de cabello de apariencia natural. En lugar de realizar incisiones cuidadosamente para todos los lugares de implante cercanos a la línea de cabello, el cirujano indica unas pocas posiciones y orientaciones para el implante de la línea de cabello y el ordenador rellena el resto interpolando entre los lugares designados, usando el sistema de procesamiento de imágenes para identificar y evitar unidades foliculares existentes. La Fig. 19 muestra un algoritmo que usa los puntos de control para diseñar una línea de cabello de apariencia natural. Se diseña una curva con los puntos de control en base a, por ejemplo, polinomios de interpolación segmentaria cúbica. Los puntos de control se especifican por el operador. Se especifica la orientación del cabello en cada uno de los puntos de control. Los puntos a lo largo de la curva se identifican a una separación dada, por ejemplo, por interpolación. Las ubicaciones de los puntos a lo largo de la curva pueden ser aleatorias para lograr una línea de cabello de apariencia natural. El nivel de aleatorización se puede especificar por el usuario o generar con el ordenador. Se prefiere que las orientaciones de la unidad folicular no sean aleatorias sino interpoladas, por ejemplo, de la misma manera que se genera una curva de interpolación segmentaria cúbica. La aleatorización de la ubicación y la interpolación de la orientación crean más implantes de apariencia natural.

La aleatoriedad de la apariencia natural es importante tanto en la región crítica de la línea de cabello como en el balance de los sitios del receptor. Esto puede lograrse mediante el procedimiento mostrado en la Fig. 20, en donde una superficie se diseña usando puntos de control en base a, por ejemplo, superficies de interpolación segmentaria cúbica. Nuevamente, se especifica la orientación del cabello en cada uno de los puntos de control. Los puntos de implante se identifican a lo largo de la superficie a una separación dada. Las ubicaciones de los puntos a lo largo de la superficie pueden ser aleatorias para lograr una distribución de cabello de apariencia natural. El nivel de aleatorización se puede especificar por el usuario o generar con el ordenador. Nuevamente, se prefiere que la orientación de las respectivas unidades foliculares no sea aleatoria, sino interpolada de la misma manera que se genera una superficie de interpolación segmentaria cúbica. Los esquemas de aleatorización e interpolación se conocen en la técnica, y pueden adaptarse para este método.

A menudo es deseable dejar el cabello existente en su longitud natural en la región del receptor, el cual puede interferir con el acceso del sistema de visión a sitios individuales del receptor. Esto se puede lograr mediante un chorro suave de aire dirigido al sitio del receptor, lo que causa que el cabello en esa región se dirija lejos del sitio objetivo. De ser necesario, el cabello se puede humedecer para facilitar esta etapa. El chorro de aire puede dispersar también la sangre que emerge del sitio del receptor de la incisión, por lo tanto mantener acceso visual durante el implante del injerto. Dicho chorro de aire puede ser parte de un ensamble de herramienta más complejo unido a la placa de la herramienta del brazo robótico.

El sistema robótico 25 usa información en tiempo real del sistema de visión para monitorear la posición del paciente (típicamente usando marcadores de referencia en la región del receptor del cuero cabelludo), de la herramienta de implante, y de las unidades foliculares existentes para guiar la herramienta de implante al lugar donde se va a hacer la incisión del sitio del receptor e implantar el injerto. La Fig. 21 muestra un ejemplo de la función de guía automática del sistema robótico, que incluye la etapa de planeación de las posiciones y orientaciones de los implantes con respecto a puntos de referencia

globales (por ejemplo, cabellos existentes, tatuajes, u otras características distintivas). El robot se mueve entonces para registrar puntos de referencia en el paciente. La información de registro se puede almacenar en memoria para referencias. El robot puede hacer uso de los puntos de referencia registrados como puntos de referencia para reconocer su posición en relación con la superficie de trabajo. El robot se mueve a cada posición y orientación de implante con respecto a los puntos de referencia globales. Los puntos de referencia globales proporcionan una referencia global para movimientos globales. La posición y la orientación se ajustan en base a los puntos de referencia cercanos tales como cabellos vecinos ya existentes o cabellos implantados recientemente. Los puntos de referencia cercanos proporcionan una referencia local para movimientos locales.

El trasplante de cabello generalmente incluye tres etapas: recolectar la unidad folicular, hacer una incisión en el sitio del receptor, y colocar la unidad folicular en la incisión. La Fig. 3 muestra una modalidad de una herramienta de tres partes 32 que se usa para llevar a cabo todas estas tres funciones. Aunque la siguiente descripción de la herramienta de tres partes 32 es con referencia a su uso como parte del ensamble de herramienta 30 portadas en el brazo robótico 27 en el sistema 25 de la Fig. 1, podrá apreciarse que también son posibles modalidades manuales y operadas de la herramienta de tres partes 32. Más particularmente, la herramienta de tres partes 32 incluye una cánula ("implante") exterior 36 que tiene un extremo distal 37 (por ejemplo, biselado) de perforación del tejido, abierto que se usa para realizar incisiones en los sitios (implante) del receptor en una superficie del cuerpo. Una cánula ("recolección") interior 38 se posiciona coaxialmente en una cavidad interior de la cánula de implante 36, y tiene un extremo distal 40 (por ejemplo, áspero o dentado) de extracción de muestras del tejido, abierto. La cánula de recolección 38 tiene una cavidad interior dimensionada apropiadamente para recolectar unidades foliculares individuales de cabello humano mediante la extracción de muestras de las respectivas unidades foliculares y extrayéndolas de una superficie del cuerpo (típica pero no necesariamente un cuero cabelludo).

A modo de ejemplos no limitantes, las modalidades de la cánula de recolección 38 pueden tener cavidades interiores que van desde aproximadamente 0.3 milímetros hasta 2.0 milímetros de diámetro. En una modalidad, la cavidad de la cánula de recolección tiene un diámetro de aproximadamente 1 milímetro. Notablemente, diferentes cánulas dimensionadas de recolección 38 pueden usarse para recolectar unidades foliculares de folículo individual que para recolectar unidades foliculares de folículos múltiples. En cualquier caso, una superficie de pared interior de la cavidad de la cánula de recolección puede texturizarse para facilitar el agarre por fricción de las respectivas unidades foliculares para la extracción de la superficie del cuerpo después de extraer las muestras.

Con referencia también a las Figs. 4 y 5, el ensamble de herramienta 30 incluye un ensamble de accionamiento del motor 60 que se monta en la carcasa 22 y configura para recibir y acoplar operativamente las partes que componen la herramienta de tres partes 32. En particular, la cánula de implante 36 se anexa de manera fija a un cono proximal 34, que incluye una porción cónica frontal distal 34a y una porción de acoplamiento dirigida proximalmente 34b. La porción de acoplamiento 34b puede acoplarse de manera desmontable (a presión) con un sujetador elástico 63 que se extiende desde un manguito tubular 65 en el ensamble de accionamiento del motor 60. En la modalidad ilustrada, el sujetador 63 comprende una variedad de miembros elásticos 67 del brazo que se unen a o se integran con el manguito tubular 65. Podrá apreciarse que otros mecanismos de acoplamiento desmontable pueden emplearse en modalidades alternas. El manguito tubular 65 se acopla a un mecanismo de accionamiento por cremallera y piñón 81 accionado por un primer motor 62 del ensamble de accionamiento del motor 60, de manera que, cuando el cono 34 se acople al sujetador 63, el motor 62/ del mecanismo de accionamiento 81 proporcione un movimiento (es decir, alterno) axial de la cánula de implante 36 en relación con la cánula de recolección 38 (y también en relación con la carcasa del ensamble de herramienta 22/24).

La cánula de recolección 38 se extiende proximalmente a través de un orificio 45 del cono de la cánula de implante 34 y de la cánula de implante 36, y se une de manera fija a la porción distal del mandril 43a de un portabrocas 43 asentado en, y que puede girar en relación con, un orificio del cono 34. Un cuerpo alargado 46 se asienta en, y se une de manera fija a, el portabrocas 43, e incluye una o más pestañas que se extienden radialmente hacia afuera 48 que se acoplan a un ensamble correspondiente de ranuras (no mostrado) en un elemento tubular de accionamiento que sobresale distalmente (no mostrado - se extiende internamente a través de la carcasa 93) que se acopla a un engranaje de salida 87 accionado por un segundo motor 64 del ensamble de accionamiento del motor 60 para de ese modo girar el respectivo cuerpo alargado 46 y la cánula de recolección 38, respectivamente, alrededor de un eje longitudinal de la cánula de recolección 38. Como podrá apreciarse, un accionamiento por correa u otros medios para girar el elemento tubular de accionamiento (y, por lo tanto, la cánula de recolección 38) puede usarse en modalidades alternas. El cuerpo alargado 46 incluye además una sección ahuecada 44 que se localiza proximalmente de las pestañas 48, la cual se asienta en un elemento anular de retención 50 para un acoplamiento desmontable (a través de una conexión de tipo de ajuste a presión) con el elemento de accionamiento tubular (proximal de las ranuras que se acoplan a las pestañas 48), por lo tanto retener la cánula de recolección 38 en posición cuando la herramienta 32 se acopla con el ensamble de accionamiento del motor 60.

Un obturador alargado 52 se coloca de manera corrediza en una cavidad interior de la cánula de recolección 38, y tiene un extremo proximal unido a un miembro de asiento 54 que se acopla a un mecanismo ("accionamiento del tornillo") lineal de

accionamiento (no mostrado) accionado por un tercer motor 66 del ensamble de accionamiento del motor 60 para proporcionar selectivamente un fuerza "de empuje" dirigida distalmente sobre el obturador 52 en relación con la cánula de recolección 38. Un resorte 53 se asienta en un hueco anular 49 que se forma en un tapón extremo proximal 51 del cuerpo alargado 46, y se extiende (sobre el obturador 52) al lado distal del miembro de asiento 54. El resorte 53 ejerce una fuerza "de empuje" dirigida proximalmente sobre el miembro de asiento, para de ese modo empujar el obturador contra el accionamiento del tornillo.

El ensamble de accionamiento del motor incluye además un motor de "liberación" 67, que ejerce una fuerza (de empuje) dirigida distalmente contra el tapón extremo 51 a través de un elemento tubular de liberación 86, lo que hace que los acoplamientos unidos (es decir, el cono de la cánula de implante 34b y el sujetador 63, y el elemento de retención de la cánula de recolección 50 y el elemento de accionamiento tubular) se desacoplen para quitar la herramienta 32 del ensamble de herramienta 30, por ejemplo, para reemplazar una o ambas de las cánulas de recolección e implante 36 y 38. De esta manera, la herramienta multipartes 32 se puede cargar en el ensamble de herramienta 30 por inserción (en la dirección proximal) de la herramienta 32 ("retrocargada") a través la extensión tubular 24 de la carcasa 22, hasta que los respectivos acoplamientos 34b y 50 encajen en sus contrapartes en el ensamble de accionamiento del motor 60, y se liberen al ejercer el motor 67 una fuerza suficiente sobre el elemento de liberación 86 para desacoplar los respectivos acoplamientos. Un elemento de tope 55 se une al obturador 52 que colinda con el lado distal del tapón extremo mientras el elemento de liberación 86 ejerce una fuerza hacia abajo sobre el tapón extremo 51, de manera que el obturador 52 acompaña el resto de la herramienta 32 a medida que se libera del ensamble de accionamiento del motor 60 (y del ensamble de herramienta 30).

El ensamble de accionamiento del motor 60 comprende además circuitería de control para controlar la operación de los respectivos motores 62, 64, 66, y 67. La circuitería de control puede incluir un procesador independiente (no mostrado) que se asocia con el ensamble de accionamiento del motor 60, el cual recibe como entradas la información del sistema robótico 25, que incluye pero no limita datos de posicionamiento que se obtienen de las imágenes obtenidas de las respectivas cánulas 36, 38 y la superficie del cuerpo/objetos (por ejemplo, folículos pilosos). De manera adicional o alterna, un respectivo codificador puede acoplarse operativamente con uno o más de los motores 62, 64, 66, y 67 para seguir el movimiento relativo y, por lo tanto, la información de la posición de la cánula de implante 36, de la cánula de recolección 38, y/o del obturador 52.

Para recolectar una unidad folicular de una superficie del cuerpo (por ejemplo, un cuero cabelludo), el brazo robótico 27 posiciona y alinea la cánula de recolección 38 con un eje longitudinal de una unidad folicular seleccionada que se va a recolectar. Entonces la cánula de recolección 38 avanza sobre la unidad folicular seleccionada mediante el movimiento del brazo robótico 27, acompañado de un movimiento simultáneo de rotación de la cánula de recolección 38 alrededor de su eje longitudinal por el motor 64, con el extremo distal abierto 40 de la cánula 38 penetrando la superficie del cuerpo en la capa subcutánea grasa que rodea y subyace la unidad folicular. En modalidades alternas, un mecanismo lineal de accionamiento puede proporcionarse adicionalmente en el ensamble de accionamiento del motor 60 para proporcionar una traslación axial independientemente controlada de la cánula de recolección 38 en relación con la carcasa del ensamble de herramienta 20 (y la cánula de implante 36). La cánula de recolección 38 se retira entonces de la superficie del cuerpo mediante el movimiento del brazo robótico 27 para de esta manera extraer la unidad folicular, la cual se porta en la cavidad de la cánula de recolección. En algunas modalidades, puede colocarse una fuente de vacío selectivamente en comunicación con la cavidad de la cánula de recolección para aplicar una fuerza "de empuje" dirigida proximalmente para facilitar la sujeción y extracción de la unidad folicular, así como para ayudar a retener la unidad folicular en la cavidad de la cánula de recolección después de que se recolecte.

Para el implante, el ensamble de herramienta 30 se reposiciona mediante el brazo robótico 27 a un lugar para el implante seleccionado en la superficie del cuerpo. En el lugar para el implante, un eje longitudinal de la cánula de implante 36 se alinea preferentemente con una orientación deseada de la unidad folicular, una vez implantada. Con referencia a la Figs. 6A-B, el extremo distal de perforación del tejido 37 de la cánula de implante 36 avanza sobre la cánula de recolección 38 y sobre la superficie del cuerpo 68, lo que crea una cavidad subcutánea de implante 70 de una profundidad y tamaño adecuados para recibir la unidad folicular recolectada 72. Este movimiento de perforación por la cánula 36 se controla automáticamente por el motor 62, y es preferentemente muy rápido con el fin de minimizar el trauma a la superficie del tejido 74 de la cavidad de implante 70.

En una modalidad (mostrada en la Fig. 6A), la unidad folicular 72 se mueve axialmente mediante el obturador 52 (bajo el control del motor 66) desde la cavidad de la cánula de recolección 76, donde se ha mantenido sin perturbar desde que se recolectó, en una porción del extremo distal de la cavidad de la cánula de implante 78. Este reposicionamiento de la unidad folicular 72 desde la cavidad de la cánula de recolección 76 en la cavidad de la cánula de implante 78 puede tomar lugar antes, durante o después de que la cánula de implante 36 ha perforado la superficie del cuerpo 68. A partir de entonces el obturador mantiene la unidad folicular 72 en la cavidad de implante 70 mientras la cánula de implante 36 se retira de la superficie del cuerpo 68 mediante un movimiento de traslación en relación con el obturador 52. Una vez que la cánula de

implante 36 se retira, el obturador 52 también se retira, con la unidad folicular 72 implantada en la superficie del cuerpo. Un extremo frontal distal 80 del obturador 52 es preferentemente ahuecada para dar espacio a uno o más folículos pilosos 82 que sobresalen de la unidad folicular 72.

5 En otra modalidad (mostrada en la Fig. 6B), los respectivos extremos distales de las cánulas de recolección e implante 36 y 38 se alinean (es decir, mediante el movimiento relativo de la cánula de implante 36) de manera que sus respectivos extremos distales 37 y 40 tienen aproximadamente la misma extensión. Este alineamiento de los respectivos extremos distales 37 y 40 de la cánula puede tomar lugar antes, durante o después de que la cánula de implante penetra la superficie del cuerpo para formar la cavidad de implante 70. A partir de entonces, las respectivas cánulas 36 y 38 se retiran de la cavidad de implante 70, mientras que la unidad folicular 72 se mantiene ahí, es decir, mediante el movimiento simultáneo del brazo robótico 27 lejos de la superficie del cuerpo 68 y del obturador 52 hacia la superficie del cuerpo 68. En modalidades alternas tener un mecanismo lineal de accionamiento en el ensamble de accionamiento del motor 60 para proporcionar una traslación axial independientemente controlada de la cánula de recolección 38 en relación con la carcasa del ensamble de herramienta 20 (y la cánula de implante 36), las respectivas cánulas 36 y 38 pueden retirarse de la cavidad de implante 70 en relación con (y sin requerir del movimiento simultáneo de) el obturador 52 mediante la operación del ensamble de accionamiento del motor 60. En otras modalidades alternas, una fuente de aire presurizado selectivamente colocada en comunicación con la cavidad de la cánula de recolección 76 puede usarse para retener la unidad folicular 72 en la cavidad de implante 70 mientras se retiran las cánulas 36 y 38.

20 La Fig. 7 muestra una porción distal del sistema robótico 25 de acuerdo con algunas modalidades de la invención. Un sensor de fuerza 100 se asegura a un brazo 104, una placa 102 montada en el sensor de fuerza 100, y un accionamiento de motor, o ensamble de "posicionamiento" 106 asegurado a la placa 102. Alternativamente, la placa 102 se podría asegurar directamente al brazo 104, en cuyos casos, el sensor de fuerza 100 se puede asegurar entre el ensamble de posicionamiento 106 y la placa 102. Alternativamente, el sensor de fuerza 100 se puede localizar dentro del ensamble de posicionamiento 106. El sensor de fuerza 100 se configura para detectar tres fuerzas  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  en tres direcciones ortogonales diferentes X, Y, Z, y tres momentos ortogonales  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . En otras modalidades, el sensor de fuerza 100 puede configurarse para detectar una o dos de las fuerzas  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , y/o uno o dos de los momentos  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . Como se muestra en la figura, el sensor de fuerza 100 se acopla a un ordenador 120, el cual recibe datos del sensor de fuerza 100 que representan las fuerza(s) y/o momento(s) detectados. En otras modalidades, los datos del sensor de fuerza pueden ir directamente al robot.

35 Durante el proceso anterior de recolección e implante, el sensor de fuerza 100 monitorea una o más componentes de fuerza/momento transmitidas desde el ensamble de posicionamiento 106. Por ejemplo, el sensor de fuerza 100 puede monitorear una fuerza  $F_z$ , la cual tiene un vector direccional que es aproximadamente paralelo a un eje de una cánula de recolección 200. La fuerza detectada  $F_z$  se transmite al ordenador 120, el cual determina si una magnitud de la fuerza detectada  $F_z$  está dentro de un límite aceptable. En algunas modalidades, el ordenador 120 se configura (por ejemplo, se programa) para detener un proceso de recolección o un proceso de implante si la fuerza detectada  $F_z$  excede un límite prescrito, lo que puede indicar, por ejemplo, que la cánula de recolección 200 o la cánula de implante 202 se presiona contra el cráneo. Como tal, el sensor de fuerza 100 proporciona una función de seguridad que evita que la cánula de recolección 200 y la cánula de implante 202 lastimen de manera no intencional a un paciente.

45 En lugar de, o además de, usar el sensor de fuerza 100 como una función de seguridad, el sensor de fuerza 100 también puede usarse para controlar un posicionamiento de la cánula de recolección 200 y/o de la cánula de implante 202. Mientras la cánula de recolección 200 avanza a través de la piel y en el tejido debajo de la piel, esta experimenta una fuerza  $F_z$ , la que representa una resistencia para la aguja de extracción de muestras 200. La Fig. 12 muestra un diagrama de fuerzas que representa una resistencia a la fuerza  $F_z$  detectada por la cánula de recolección 200 a medida que avanza a través de la piel y en el tejido. Dicha fuerza  $F_z$  se transmite por los varios componentes dentro del ensamble de posicionamiento 106 al sensor de fuerza 100, el cual mide dicha fuerza  $F_z$  y transmite los datos de la fuerza al ordenador 120. Debido a que la superficie de la piel es relativamente dura, inicialmente, mientras la cánula de recolección 200 hace presión contra la piel, no penetrará inmediatamente la piel, y experimentará una resistencia a la fuerza  $F_z$  proporcionada por la superficie de la piel. La resistencia a la fuerza  $F_z$  aumenta de cero a un valor  $F_p$ , en cuyo punto, la cánula de recolección 200 penetra a través la piel. Debido a que el tejido debajo de la piel es relativamente más suave que la piel, la resistencia a la fuerza  $F_z$  experimentada por la cánula de recolección 200 será menor que  $F_p$  después de la penetración de la piel.

55 Como se muestra en la Fig. 12, después de alcanzar el valor  $F_p$ , la curva de la fuerza desciende a un segundo valor  $F_s$ , el cual representa la resistencia a la fuerza detectada por la aguja de extracción de muestras 200 después de que esta ha penetrado la superficie de la piel. La fuerza  $F_z$  continuará aumentando desde ese punto mientras la cánula de recolección 200 continúe avanzando en el tejido. Esto se debe a que mientras mayor sea la porción de la cánula de recolección 200 que avanza en el tejido, mayor será el tejido contactado que está debajo de la piel, aumentando así una cantidad de superficie de fricción entre la cánula de recolección 200 y el tejido. En algunos casos, si la cánula de recolección 200 choca con un

hueso, el diagrama de fuerzas alcanzará un máximo (mostrado como una línea punteada en la figura). El ordenador 120 puede programarse para monitorear la curva de la fuerza que se genera mientras la cánula de recolección 200 avanza durante el proceso de recolección, y controla la cánula de recolección 200 en base a la curva de la fuerza. Por ejemplo, en algunas modalidades, el ordenador 120 activa un posicionador en el ensamble de posicionamiento 106 para avanzar la cánula de recolección 200 a una primera velocidad hasta que se observa una caída en la curva de la fuerza, lo que indica que la cánula de recolección 200 ha penetrado la piel. Entonces el ordenador 120 activa el posicionador para avanzar la cánula de recolección 200 a una segunda velocidad hasta que se logra una profundidad deseada de penetración. En algunas modalidades, la primera velocidad puede ser mayor que la segunda velocidad.

En las modalidades ilustradas, el ensamble de posicionamiento 106 incluye una unidad de soporte 109 para acoplar a un ensamble de cánula 110, y a una variedad de posicionadores 107a-107c. La unidad de soporte 109 se configura para acoplarse con diferentes partes del ensamble de cánula 110 de manera que el ensamble de cánula 110, como un todo, puede posicionarse mediante el ensamble de posicionamiento 106. La unidad de soporte 109 permite también controlar diferentes componentes del ensamble de cánula 110 después de que el ensamble de cánula 110 se acople con la unidad de soporte 109. Los posicionadores 107a-107c se configuran para mover diferentes componentes del ensamble de cánula 110 después de que se acopla con la unidad de soporte. Aunque se muestran tres posicionadores 107a-107c, en otras modalidades, el ensamble de posicionamiento 106 puede incluir más o menos de tres posicionadores 107. En algunas modalidades, el ensamble de posicionamiento 106 puede incluir el ensamble de accionamiento del motor de la Fig. 5, el cual incluye tres motores (posicionadores) para mover diferentes componentes del ensamble de cánula 110, además de un motor adicional para desacoplar el ensamble de cánula 110 del ensamble de posicionamiento.

La Fig. 8 muestra una unidad de soporte 109 construida de acuerdo con algunas modalidades. La unidad de soporte 109 incluye una primera porción de acoplamiento 122 para acoplar una primera porción del ensamble de cánula 110, una segunda porción de acoplamiento 124 para acoplar una segunda porción del ensamble de cánula 110, y una tercera porción de acoplamiento 126 para acoplar una tercera porción del ensamble de cánula 110.

La Fig. 9A muestra el ensamble de cánula 110 de acuerdo con algunas modalidades. El ensamble de cánula 110 tiene una configuración similar como la herramienta 32 mostrada en las Figs. 3-4. El ensamble de cánula 110 incluye una cánula de recolección 200, una cánula de implante 202, y un émbolo (obturador) 204. La cánula de recolección 200 tiene un extremo proximal 212, un extremo distal 214, un cuerpo 215 que se extiende entre los extremos proximal y distal 212, 214, y una cavidad 217 definida, al menos parcialmente, por el cuerpo 215. En las modalidades ilustradas, la cavidad 217 tiene una dimensión de sección transversal entre 0.3 milímetros y 2.0 milímetros, y más preferentemente, aproximadamente 1 milímetro. El ensamble de cánula 110 incluye además un tallo 216 que tiene un extremo proximal 218, un extremo distal 220, y una cavidad 222 que se extiende entre los extremos proximal y distal 218, 220. El extremo proximal 212 de la cánula de recolección 200 se asegura al extremo distal 220 del tallo 216. La cánula de implante 202 tiene un extremo proximal 232, un extremo distal 234, un cuerpo 230 que se extiende entre los extremos proximal y distal 232, 234, y una cavidad 236 dentro del cuerpo 230. La cavidad 236 tiene una dimensión de sección transversal dimensionada para acomodar al menos una porción de la cánula de recolección 200, y para permitir que la cánula de recolección 200 se deslice en relación con la cánula de implante 202. El extremo distal 234 de la cánula de implante 202 tiene una punta afilada 250 para perforar el tejido.

En las modalidades ilustradas, el extremo distal 214 de la cánula de recolección 200 tiene una configuración tubular (Fig. 9B). En dichos casos, el borde 252 de la cánula de recolección 200 puede tener una configuración afilada para permitir que la cánula de recolección 200 penetre el tejido. En otras modalidades, el extremo distal 214 de la cánula de recolección 200 puede tener una configuración de arco (Fig. 9C). En dichos casos, los extremos 254 de la porción en arco pueden tener una configuración afilada para permitir a la cánula de recolección 200 cortar tejido mientras la cánula de recolección 200 rota alrededor de su eje. En modalidades adicionales, el extremo distal 214 de la cánula de recolección 200 puede incluir una variedad de porciones de corte 256, donde cada porción de corte 256 tiene un borde afilado 258 para cortar el tejido (Fig. 9D). Cabe señalar que el extremo distal 214 de la cánula de recolección 200 no se limita a los ejemplos descritos previamente, y que el extremo distal 214 puede tener otras configuraciones en otras modalidades, mientras pueda extraer muestras del tejido.

El ensamble de cánula 110 incluye además una primera porción de acoplamiento 238 y una segunda porción de acoplamiento 240. La primera porción de acoplamiento 238 tiene una configuración tubular, y se asegura al tallo 216. La segunda porción de acoplamiento también tiene una configuración tubular, y se asegura al extremo proximal 232 de la cánula de implante 202. Las porciones, primera y segunda, de acoplamiento 238, 240 se dimensionan y moldean para acoplar con los componentes correspondientes de la unidad de soporte 109. Cabe señalar que las porciones, primera y segunda, de acoplamiento 238, 240 no se limitan al ejemplo de la configuración ilustrada, y que las porciones de acoplamiento 238, 240 pueden tener otras configuraciones en otras modalidades. Por ejemplo, en modalidades alternas, la porción de acoplamiento 238 no tiene una configuración tubular. En dichos casos, la porción de acoplamiento 238 puede ser

una estructura que se asegura a, o se extiende desde, una superficie del tallo 216. De manera similar, en otras modalidades, la porción de acoplamiento 240 puede ser una estructura que se asegura a, o se extiende desde, una superficie de la cánula de implante 202, y no necesita tener una configuración tubular. Como se muestra en la figura, el ensamble de cánula 110 incluye también un conector 248 asegurado al tallo 216. El conector 248 tiene una forma que se asemeja a una esfera, pero puede tener otras formas en otras modalidades.

El émbolo 204 tiene un extremo proximal 242 y un extremo distal 244. El émbolo 204 se localiza, al menos parcialmente, dentro de la cavidad 217 de la cánula de recolección 200, y es corredizo en relación con la cánula de recolección 200. El ensamble de cánula 110 incluye además un resorte 246 acoplado al émbolo 204 para empujar el émbolo 204 en una dirección proximal en relación con la cánula de recolección 200. En las modalidades ilustradas, se describe el émbolo 204 como un componente del ensamble de cánula 110. En otras modalidades, el émbolo 204 no es parte del ensamble de cánula 110. Por ejemplo, el émbolo 204 puede ser un componente del ensamble de posicionamiento 106.

La Fig. 10 muestra el ensamble de cánula 110 que se ha acoplado al ensamble de posicionamiento 106. Cuando el ensamble de cánula 110 se encaja en el ensamble de posicionamiento 106, la primera porción de acoplamiento 122 de la unidad de soporte 109 se acopla con el conector 248, la segunda porción de acoplamiento 124 se acopla con la primera porción de acoplamiento 238 del ensamble de cánula 110, y la tercera porción de acoplamiento 126 se acopla con la segunda porción de acoplamiento 240 del ensamble de cánula. El conector 248 permite que el ensamble de cánula 110 se asegure de manera desmontable al ensamble de posicionamiento 106. La primera porción de acoplamiento 122 de la unidad de soporte 109 se acopla al primer posicionador 107a. En algunas modalidades, la cánula de recolección 200 no es trasladable. En modalidades alternas, el primer posicionador 107a se configura para trasladar (por ejemplo, avanzar o retroceder) la cánula de recolección 200. La segunda porción de acoplamiento 124 de la unidad de soporte 109 se acopla al segundo posicionador 107b, el cual se configura para girar la cánula de recolección 200 alrededor de su eje. La tercera porción de acoplamiento 126 de la unidad de soporte 109 se acopla al tercer posicionador 107c, el cual se configura para trasladar (por ejemplo, avanzar o retroceder) la cánula de implante 202.

En otras modalidades, la segunda porción de acoplamiento 124 de la unidad de soporte 109 puede acoplarse tanto al primer posicionador 107a como al segundo posicionador 107b. En dichos casos, el primer posicionador 107a se configura para trasladar la porción de acoplamiento 124 para así avanzar o retroceder la cánula de recolección 200, y el segundo posicionador 107b se configura para girar la porción de acoplamiento 124 para así girar la cánula de recolección 200 alrededor de su eje. En modalidades adicionales, no es necesario el segundo posicionador 107b, y el ensamble de cánula 110 no incluye la porción de acoplamiento 238. En dichos casos, el ensamble de posicionamiento 106 no se configura para rotar la cánula de recolección 200, sino para avanzar y retroceder la cánula de recolección 200 en un movimiento confiable hacia adelante y hacia atrás. Aún en modalidades adicionales, no se necesita el tercer posicionador 107c, y la tercera porción de acoplamiento 126 se asegura de manera fija a la unidad de soporte 109. En dichos casos, la cánula de implante 202 puede posicionarse mediante el brazo robótico 27, y la cánula de recolección 200 puede posicionarse en relación con la cánula de implante 202 usando el primer posicionador 107a.

Cuando se usa el ensamble de cánula 110 para recolectar una unidad folicular, el ensamble de cánula 110 primero se acopla al ensamble de posicionamiento 106. Esto puede llevarse a cabo manualmente al encajar el ensamble de cánula 110 en el ensamble de posicionamiento 106. Alternativamente, el ensamble de cánula 110 se puede mantener vertical mediante un soporte (no mostrado). En dichos casos, el brazo robótico 27 puede usarse para mover el ensamble de posicionamiento 106 para "agarrar" el ensamble de cánula 110 del soporte. La(s) cámara(s) 28 puede(n) usarse para proporcionar información con respecto a una posición del ensamble de cánula 110 al procesador 120, el cual controla el brazo robótico 27 en base a la información, colocando así el ensamble de posicionamiento 106 en posición de acoplamiento en relación con el ensamble de cánula 110.

A continuación, un plan de tratamiento se introduce en el ordenador 120. En algunas modalidades, el plan de tratamiento es un plan prescrito diseñado para trasplantar unidades foliculares pilosas de una primera región (región de recolección) a una región objetivo (región de implante). En dichos casos, el plan de tratamiento puede incluir uno o más parámetros, tales como un número de unidades foliculares pilosas a retirar/implantar, ubicación de la región de recolección, ubicación de la región de implante, un grado de aleatoriedad asociado con lugares objetivos de implante, separación entre lugares objetivos de implante adyacentes, profundidad de foliculo, profundidad de implante, identificación del paciente, perfil geométrico de la región de recolección, perfil geométrico de la región de implante, ubicaciones del marcador(es), y densidad de los lugares objetivos de implante. Pueden usarse varias técnicas para introducir el plan de tratamiento en el ordenador 120. En las modalidades ilustradas, el plan de tratamiento se puede introducir usando una interfaz de usuario que incluye un monitor 122 y un teclado 124. Alternativamente, el plan de tratamiento se puede introducir usando un dispositivo de almacenamiento, tal como un disquete o un disco compacto. En otras modalidades, el plan de tratamiento se puede descargar de un servidor remoto. En modalidades adicionales, el plan de tratamiento se puede introducir usando una combinación de las técnicas anteriores. Por ejemplo, algunos parámetros se pueden introducir en el ordenador 120 usando



un disquete, mientras otros parámetros se pueden introducir usando la interfaz de usuario. En algunas modalidades, uno o más parámetros del plan de tratamiento pueden determinarse en tiempo real (por ejemplo, durante una sesión de tratamiento).

5 Después de que el plan de tratamiento se ha introducido en el ordenador 120, el ordenador 120 entonces registra el plan de tratamiento con un paciente. En algunas modalidades, esto puede llevarse a cabo usando la(s) cámara(s) 28 para identificar uno o más marcadores en el paciente. El marcador puede ser un reflector seguro para el paciente, una marca dibujada con tinta en el paciente, o una anatomía del paciente. Los marcadores identificados pueden usarse para determinar una posición y/o orientación de una región objetivo en el paciente. En las modalidades ilustradas, el plan de tratamiento incluye una posición de la región (o donante) de recolección. Mediante el uso de la entrada de la(s) cámara(s) 28, el ordenador 120 identifica el lugar de la región de recolección en el paciente, y una unidad folicular objetivo en la región de recolección. Entonces el ordenador 120 maneja el brazo robótico 27 para colocar el extremo distal 214 de la cánula de recolección 200 próximo a la unidad folicular objetivo. En algunas modalidades, la cánula de recolección 200 se posiciona coaxialmente con la unidad folicular objetivo.

15 A continuación, la cánula de recolección 200 se usa para recolectar la unidad folicular objetivo. En algunas modalidades, esto puede llevarse a cabo al activar un posicionador dentro del ensamble de posicionamiento 106 para girar la cánula de recolección 200. Mientras se gira la cánula de recolección 200, la cánula de recolección 200 puede avanzar distalmente (por ejemplo, al activar otro posicionador dentro del ensamble de posicionamiento 106, o al mover el ensamble de posicionamiento 106 usando el brazo robótico 27). En otras modalidades, la recolección de la unidad folicular objetivo 302 puede llevarse a cabo al empujar la cánula de recolección 200 hacia adelante y hacia atrás. Mientras que la cánula de recolección 200 se usa para extraer las muestras fuera de la unidad folicular 302, la cánula de implante 202 se ubica proximalmente lejos del extremo distal 214 de la cánula de recolección 200 para así evitar interferencia con el procedimiento de recolección. Esto puede llevarse a cabo al avanzar distalmente la cánula de recolección 200 en relación con la cánula de implante 202, o de manera alterna, al retroceder proximalmente la cánula de implante 202 en relación con la cánula de recolección 200 (si puede posicionarse la cánula de implante 202).

30 Cuando el extremo distal 214 de la cánula de recolección 200 ha avanzado dentro de una profundidad prescrita, por ejemplo, 5 milímetros, debajo de la superficie de la piel, entonces la cánula de recolección 200 retrocede y se retira del paciente. La(s) cámara(s) 28 puede(n) usarse para monitorear el proceso de recolección para así determinar cuán lejos ha avanzado la cánula de recolección 200 debajo de la superficie de la piel 306. En algunas modalidades, el exterior de la cánula de recolección 200 puede incluir líneas de marcador para así permitir a la(s) cámara(s) 28 o a un médico "ver" cuánto ha avanzado la cánula de recolección 200 en el paciente. En algunas modalidades, la superficie de fricción en la interfaz entre la unidad folicular 302 y la superficie interior 304 dentro de la cavidad 217 retendrá la unidad folicular 302 mientras la cánula de recolección 200 se retira del paciente, recolectando así la unidad folicular 302.

40 En otras modalidades, la superficie interior 304 puede estar texturizada (por ejemplo, tener uno o más salientes o protrusiones) para permitir así que el extremo distal 214 se sostenga más fácilmente sobre la unidad folicular 302 mientras la cánula de recolección 200 se retira del paciente. En modalidades adicionales, un extremo proximal del ensamble de cánula 110 puede acoplarse a una unidad de vacío (no mostrada) ubicada dentro del ensamble de posicionamiento 106. En dichos casos, la unidad de vacío crea una succión dentro de la cavidad 217 de la cánula de recolección 200, para así alejar la unidad folicular objetivo 302 de su tejido subyacente mientras la cánula de recolección 200 se retira del paciente.

45 Después de que la unidad folicular 302 se ha recolectado, el ensamble de posicionamiento 106 retrocede proximalmente la cánula de recolección 200 hasta que el extremo distal 214 es proximal al extremo distal 234 de la cánula de implante 202. Alternativamente, si la cánula de implante 202 puede posicionarse, la cánula de implante 202 puede avanzar distalmente hasta que el extremo distal 234 es distal al extremo distal 214 de la cánula de recolección 200. A continuación, el ordenador 120 maneja el brazo robótico 27 para colocar el extremo distal 234 de la cánula de implante 202 adyacente a una ubicación objetivo dentro de una región de implante del paciente según lo prescrito por el plan de tratamiento. Entonces la cánula de implante 202 avanza (por ejemplo, al activar un posicionador dentro del ensamble de posicionamiento 106, o al mover distalmente el ensamble de posicionamiento 106 hacia la ubicación objetivo) para perforar a través de la piel 310 a la región de implante (Fig. 11A). La cánula de implante 202 avanza hasta que la profundidad penetrada 312 es, al menos, igual a la profundidad de la extracción de muestras 300. En algunas modalidades, la(s) cámara(s) 28 y el ordenador 120 pueden usarse para determinar una cantidad de la cánula de implante 202 que ha avanzado en el paciente. Por ejemplo, la cánula de implante 202 puede incluir una variedad de líneas de marcador para permitir a la(s) cámara(s) 28 o al médico "ver" cuánto se ha insertado de la cánula de implante 202 en el paciente. Como se muestra en la figura, la cánula de implante 202 crea una abertura 314 debajo de la piel del paciente 314, en la cual puede colocarse la unidad folicular 302.

60 A continuación, la cánula de recolección 200, la cual contiene la unidad folicular recolectada 302, avanza dentro de la cavidad 236 de la cánula de implante 202, hasta que una superficie superior 320 de la unidad folicular 302 está en o debajo

de la piel 310 en la región de implante (Fig. 11B). A continuación, el émbolo 204 puede avanzar distalmente (por ejemplo, al usar otro posicionador dentro del ensamble de posicionamiento 106) hasta que su extremo distal 244 se acopla con la unidad folicular 302 ubicada dentro de la cánula de recolección 200 (Fig. 11 C). Entonces la cánula de implante 202 y la cánula de recolección 200 retroceden proximalmente en relación con el émbolo 204, dejando así la unidad folicular 302 implantada en la ubicación objetivo en la región de implante (Fig. 11D). En otras modalidades, el ensamble de cánula 110 no incluye el émbolo 204. En dichos casos, un generador de presión (no mostrado) ubicado dentro del ensamble de posicionamiento 106 puede usarse para crear una presión dentro de la cavidad 217 de la cánula de recolección 200, empujando así la unidad folicular 302 hacia el paciente mientras retroceden la cánula de implante 202 y la cánula de recolección 200. Dicha técnica provocará que la unidad folicular 302 se descargue de la cánula de recolección 200 mientras la cánula de recolección 200 se retira del paciente.

Después de que la primera unidad folicular 302 se ha implantado en la región de implante, la cánula de recolección 200 avanza distalmente hasta que su extremo distal 214 es distal al extremo distal 234 de la cánula de implante 202. Entonces el ordenador 120 maneja nuevamente el brazo robótico 27 para colocar la cánula de recolección 200 próxima a otra unidad folicular objetivo 302 a recolectar. Entonces el proceso descrito anteriormente se repite para recolectar la próxima unidad folicular 302, e implantar la unidad folicular 302. La selección de la unidad folicular 302 puede determinarse mediante el ordenador 120. Por ejemplo, en algunas modalidades, en base a un lugar y geometría de la región de recolección prescrita, el ordenador 120 selecciona una unidad folicular 302 sólo si esta está dentro de la región de recolección prescrita. En algunas modalidades, el proceso anterior se repite hasta que un número de unidades foliculares prescrito 302 se ha implantado en la región de implante, hasta que una densidad de las unidades foliculares implantadas 302 alcanza una densidad prescrita, o hasta que no haya más unidades foliculares 302 disponibles en la región de recolección.

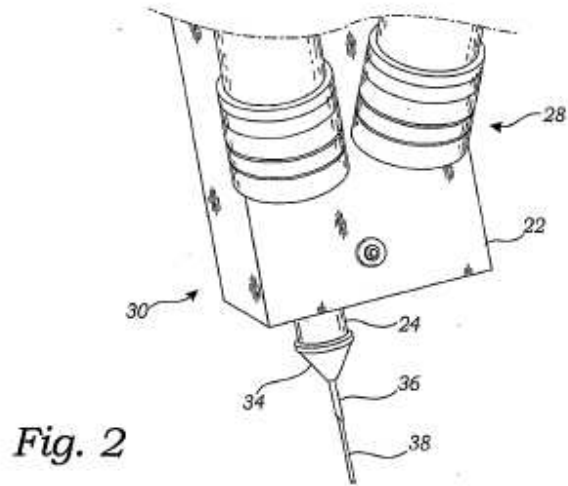
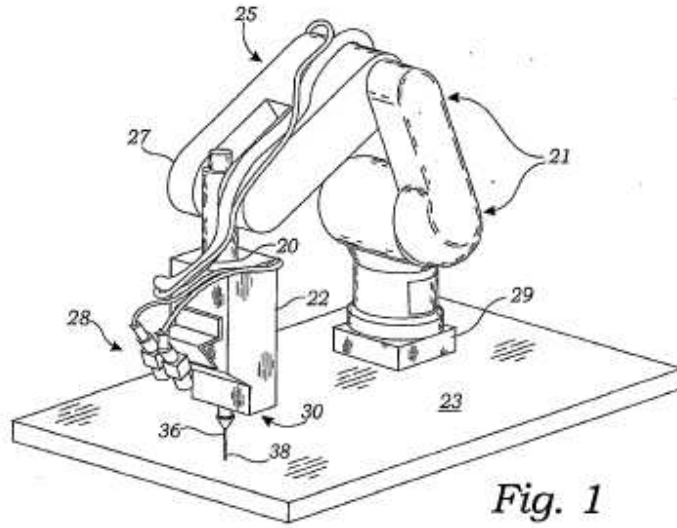
En algunas modalidades de la invención que emplean un sistema de posicionamiento automatizado, un médico a cargo u operador puede especificar dónde se necesita implantar una unidad folicular y en qué ángulo, es decir, su ubicación relativa (o "lugar para el implante"), orientación, y profundidad. Por ejemplo, la especificación de un lugar, orientación, y/o profundidad de una unidad folicular que se va a implantar puede llevarse a cabo mediante un sistema de planificación del tratamiento. Alternativamente, durante el modo de implante, cuando la(s) cámara(s) están viendo el área receptora del cuero cabelludo, el operador a cargo puede usar una interfaz de usuario (por ejemplo, un ratón de ordenador convencional) para especificar el lugar del implante y/o posición y/o orientación y/o profundidad del implante. Alternativamente, el operador puede puntualizar el lugar en el cuero cabelludo mediante la colocación de una marca temporal, tal como una marca de tinta o un puntero que puede visualizarse, identificarse, y medirse por el sistema de procesamiento de imagen. Adicionalmente, la orientación puede especificarse directamente en el monitor del ordenador como una combinación de dos ángulos, tal como rotación alrededor del eje x y una rotación alrededor del eje y (suponiendo que el eje z sea a lo largo de la cánula), o al colocar un puntero alargado en el cuero cabelludo, que puede visualizarse por el sistema de procesamiento de imagen y medir los ángulos.

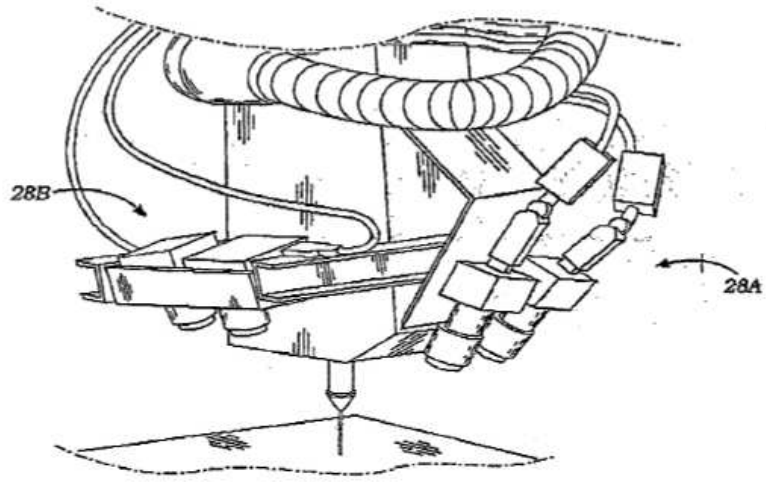
En cualquier caso, el control del brazo robótico ahora se convierte en dos etapas. Primero, en base la especificación de la posición y orientación del lugar del implante, el procesador del ordenador dirige el brazo robótico para mover la cánula de implante a una posición y orientación deseada. Segundo, el avance real de la cánula de implante en la superficie de la piel tiene lugar, solamente mediante la activación del mecanismo, o por una combinación del movimiento del brazo robótico y el mecanismo de activación, en el cual se alcanza la profundidad deseada del implante. Otra forma de especificar la orientación de la unidad folicular implantada es hacer que el sistema correlacione con la orientación del uno o más folículos pilosos que se extienden de ahí hasta la orientación de los folículos pilosos existentes en el área del implante. El sistema, después de posicionar la cánula de implante en el lugar del implante, visualiza y mide la orientación de los folículos pilosos vecinos, y usa esta información para determinar una orientación adecuada de la unidad folicular que se va a implantar. En el caso de que los folículos pilosos vecinos tengan diferentes orientaciones, el sistema puede, por ejemplo, obtener un promedio ponderado de las distintas orientaciones para determinar una orientación de la unidad folicular que se va a implantar.

Reivindicaciones

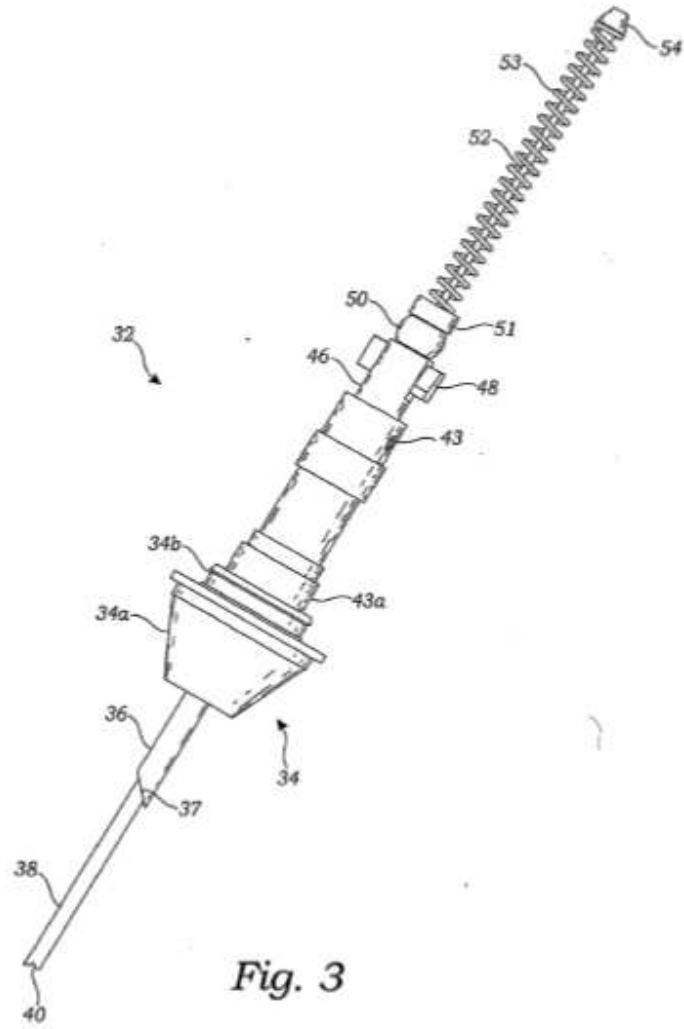
- 5
1. Un sistema automatizado (25) para retirar y/o implantar unidades foliculares, que comprende:
- un brazo móvil (27);  
 una herramienta (32, 36, 38, 200, 202) ubicada en el brazo móvil (27);  
 una o más cámaras (28) montadas en el brazo móvil (27);  
 un procesador configurado para recibir y procesar imágenes obtenidas por la una o más cámaras (28); y  
 un controlador asociado operativamente con el procesador y configurado para posicionar el brazo móvil (27)  
 10 en base, al menos en parte, a imágenes procesadas obtenidas por la una o más cámaras (28);  
 en donde el brazo móvil (27) es maniobrable de manera que la herramienta (32, 36, 38, 200, 202) puede  
 posicionarse en una orientación deseada en relación con una superficie que contiene unidades foliculares, y  
 15 en donde la una o más cámaras (28) se configuran para obtener imágenes usando luz de diferentes  
 longitudes de onda y en donde el procesador se configura para abstraer y/o combinar las imágenes durante  
 el procesamiento de imagen para visualizar una porción de un folículo piloso debajo de la superficie.
- 20
2. El sistema de la reivindicación 1, en donde el sistema automatizado es un sistema robótico, y en donde el brazo  
 móvil es un brazo robótico.
3. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-2, en donde la una o más cámaras comprende una sola cámara,  
 y en donde el procesador se configura para registrar un sistema de coordenadas de referencia de la cámara con un  
 sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta del brazo móvil.
- 25
4. El sistema de la reivindicación 3, en donde el procesador registra el sistema de coordenadas de referencia de la  
 cámara con el sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta basado en imágenes de un  
 objetivo de calibración fijo que se obtienen mientras el brazo móvil se mueve a lo largo de uno o más ejes del  
 sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta.
- 30
5. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-2, en donde la una o más cámaras comprende un par de  
 cámaras posicionadas en el brazo móvil, y en donde el procesador se configura para registrar los respectivos  
 sistemas de coordenadas de referencia de las cámaras entre sí y con un sistema de coordenadas de referencia del  
 marco de la herramienta del brazo móvil.
- 35
6. El sistema de la reivindicación 5, en donde el procesador registra los respectivos sistemas de coordenadas de  
 referencia de las cámaras con el sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta basado en  
 imágenes de un objetivo de calibración fija que se obtienen mientras el brazo móvil se mueve a lo largo de uno o  
 40 más ejes del sistema de coordenadas de referencia del marco de la herramienta.
7. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-2, en donde la una o más cámaras comprende los respectivos  
 primer y segundo pares de cámaras posicionadas en el brazo móvil, el primer par enfocado en obtener imágenes  
 de un primer campo de visión, y el segundo par enfocado en obtener imágenes de un segundo campo de visión  
 sustancialmente más estrecho que el primer campo de visión.
- 45
8. El sistema de la reivindicación 7, en donde el procesador se configura para registrar los respectivos sistemas de  
 coordenadas de referencia del primer y segundo pares de cámaras entre sí y con un sistema de coordenadas de  
 referencia del marco de la herramienta del brazo móvil basado en imágenes de un objetivo de calibración fija que  
 se obtienen mientras el brazo móvil se mueve a lo largo de uno o más ejes del sistema de coordenadas de  
 50 referencia del marco de la herramienta.
9. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-8, en donde la herramienta comprende una o ambas de las  
 herramientas de retiro de unidad folicular y herramienta de implante de unidad folicular.
- 55
10. El sistema de la reivindicación 9, en donde la herramienta de retiro de unidad folicular y la herramienta de implante  
 de unidad folicular son parte de un ensamble integrado.

- 5
- 10
- 15
- 20
11. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-10, en donde la herramienta se selecciona de un grupo que comprende una aguja de inyección, una cánula de recolección, una cánula de implante, un ensamble de cánula, y un láser.
  12. El sistema de la reivindicación 2, en donde el procesador y el controlador se configuran para posicionar la herramienta mediante control visual del brazo robótico.
  13. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-12, en donde el folículo piloso comprende un bulbo, y en donde el procesamiento de imagen comprende identificación de, al menos, una porción del bulbo.
  14. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-12, en donde la una o más cámaras detectan luz en un espectro infrarrojo y/o espectro visible.
  15. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-14, que comprende además un chorro de aire configurado para dirigir una corriente de aire en la superficie que contiene unidades foliculares.
  16. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-15, que comprende además una interfaz de usuario para permitir a un usuario que introduzca instrucciones tanto al procesador como al controlador con respecto a uno o más de un lugar, posición, orientación, y profundidad de una unidad folicular que se va a implantar.
  17. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-16, en donde el procesador se configura además para calcular una profundidad de penetración de la herramienta en la superficie del cuerpo.





*Fig. 2A*



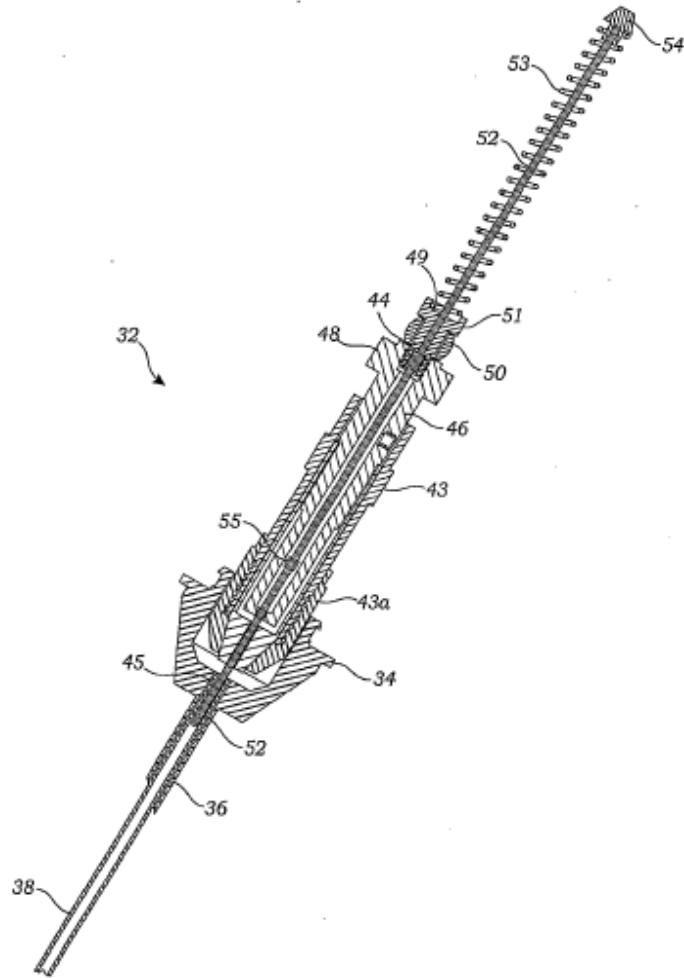
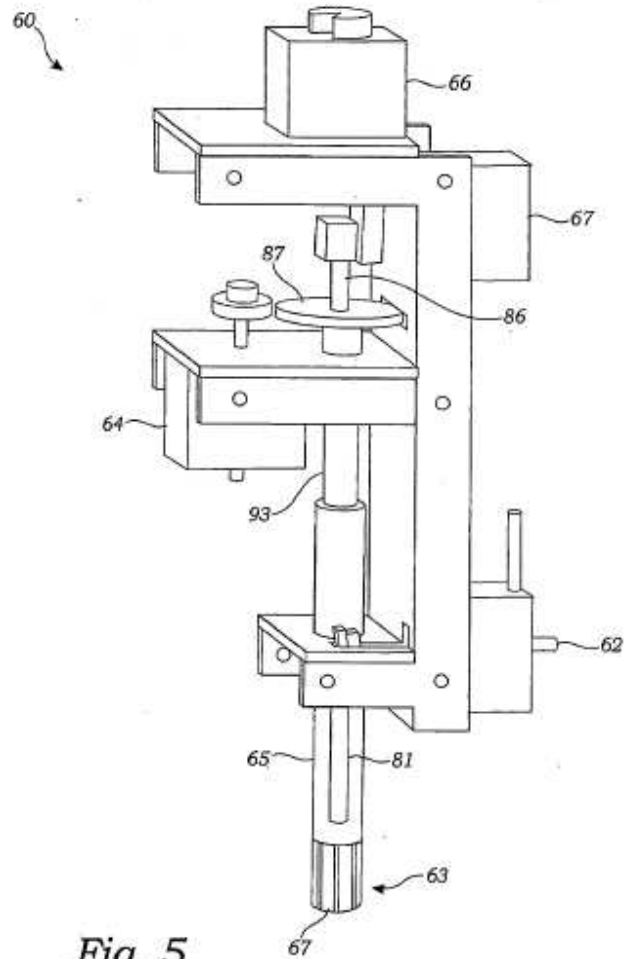
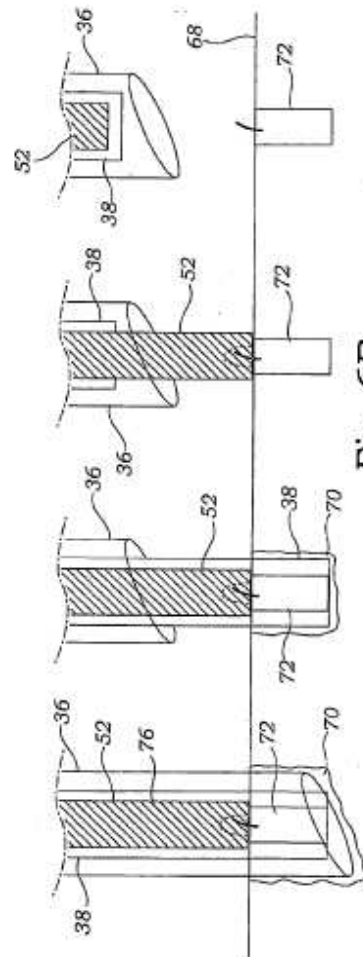
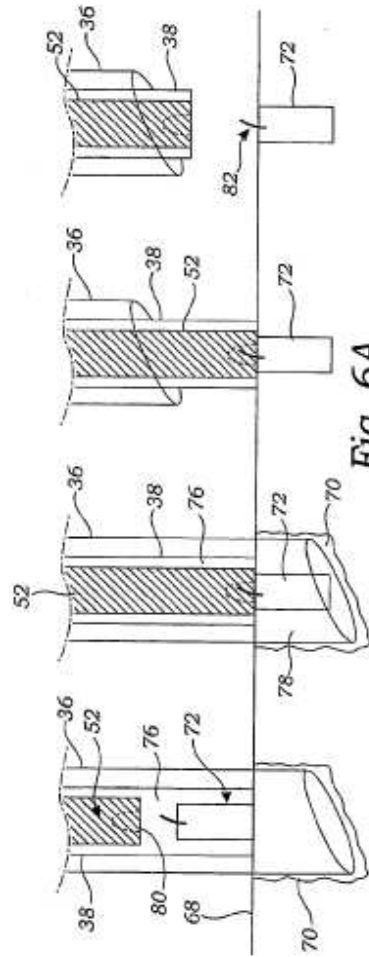


Fig. 4







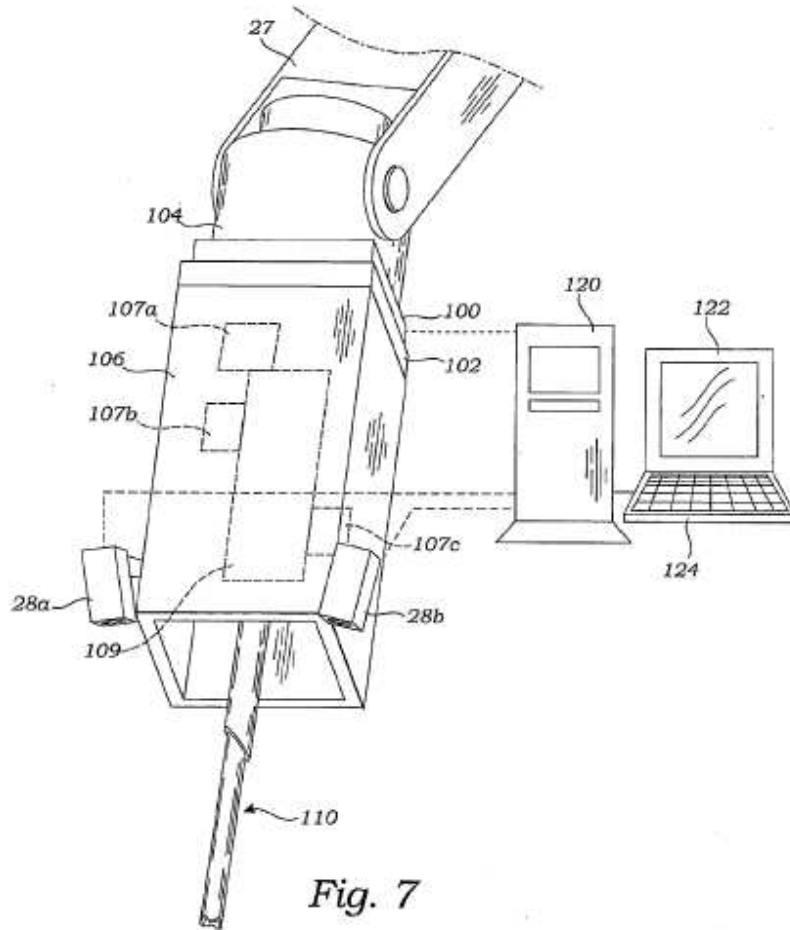


Fig. 7

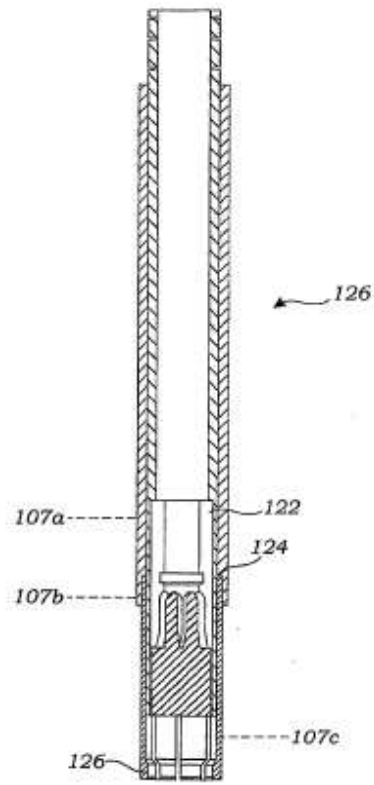


Fig. 8

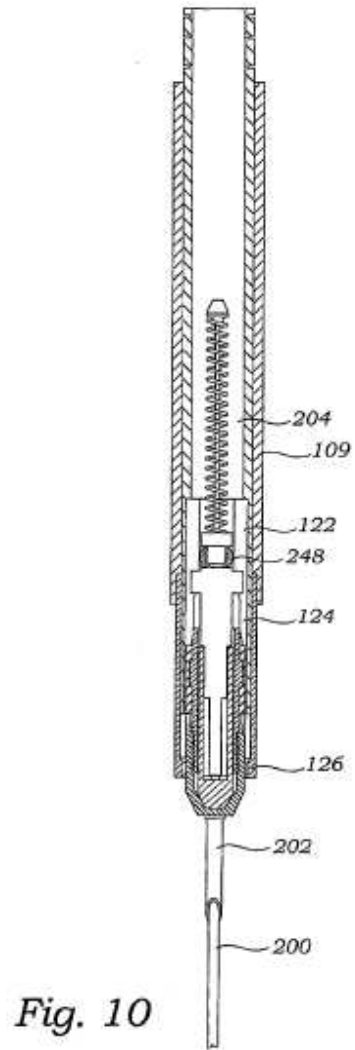


Fig. 10

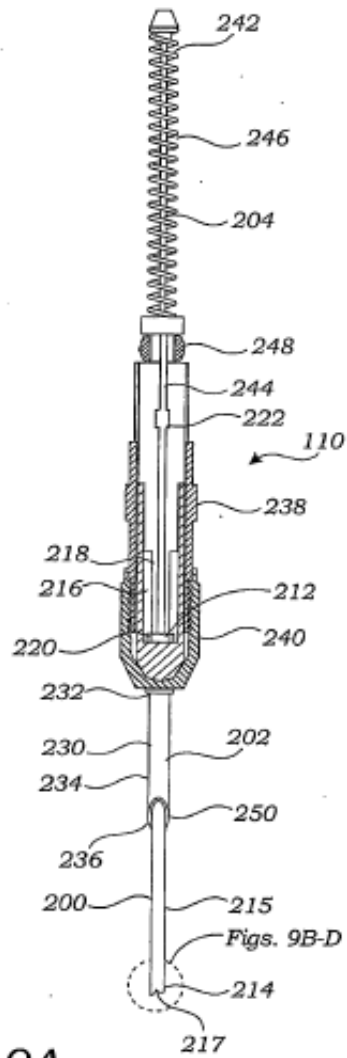
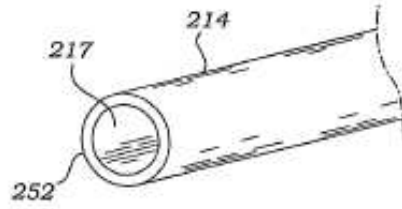
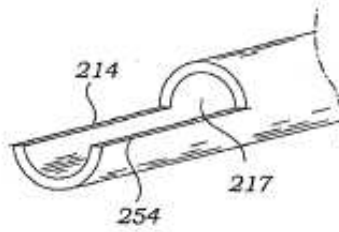


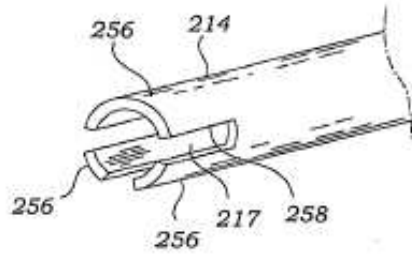
Fig. 9A



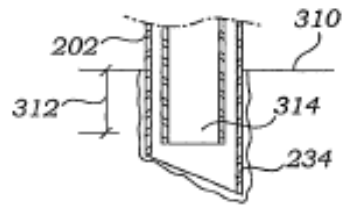
*Fig. 9B*



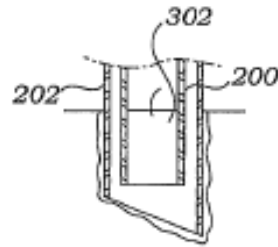
*Fig. 9C*



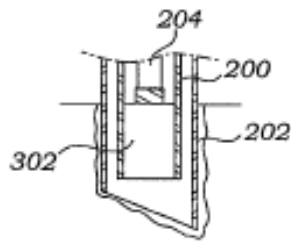
*Fig. 9D*



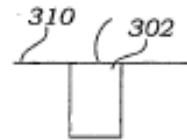
*Fig. 11A*



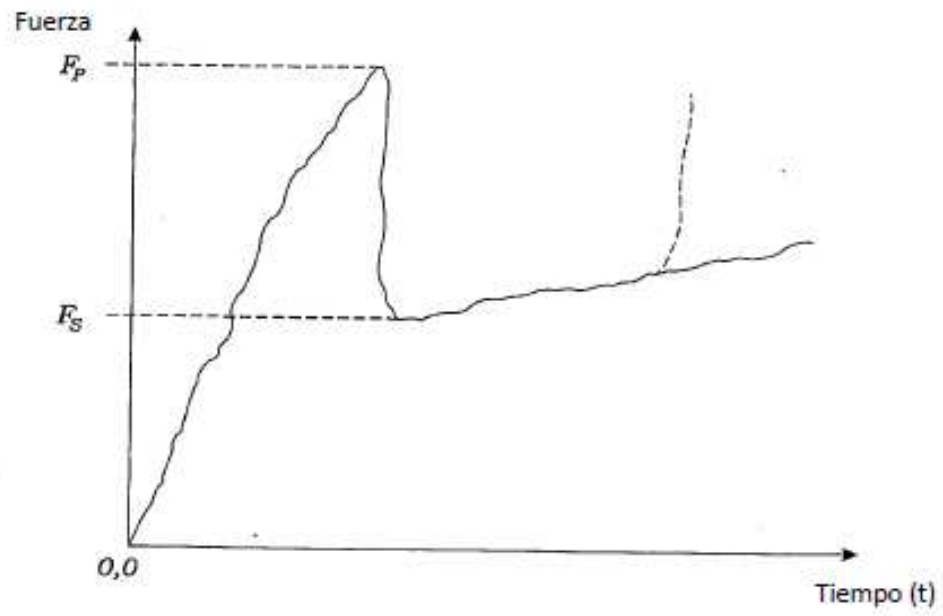
*Fig. 11B*



*Fig. 11C*

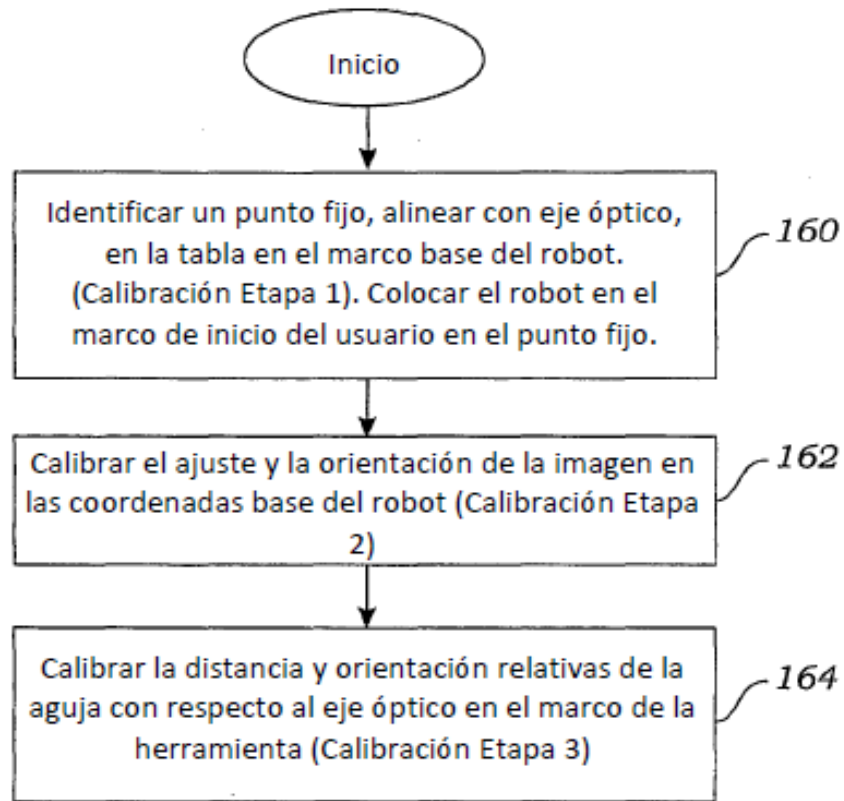


*Fig. 11D*

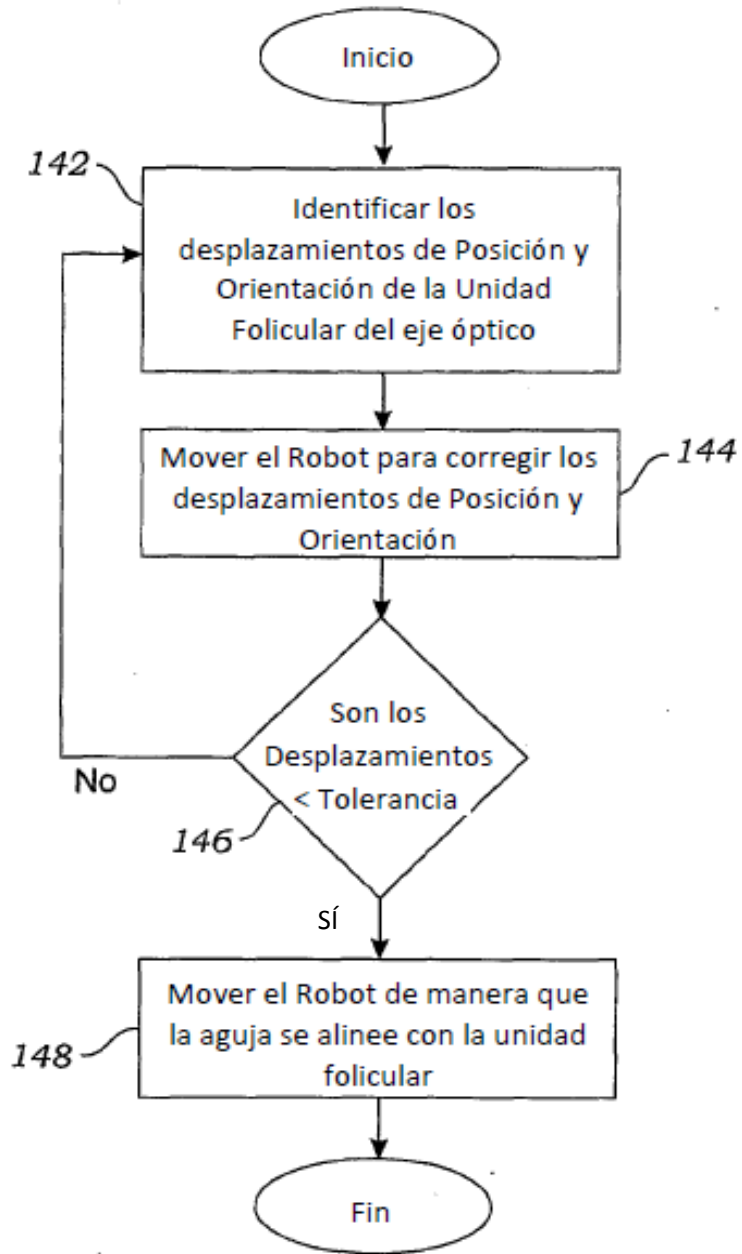


*Fig. 12*

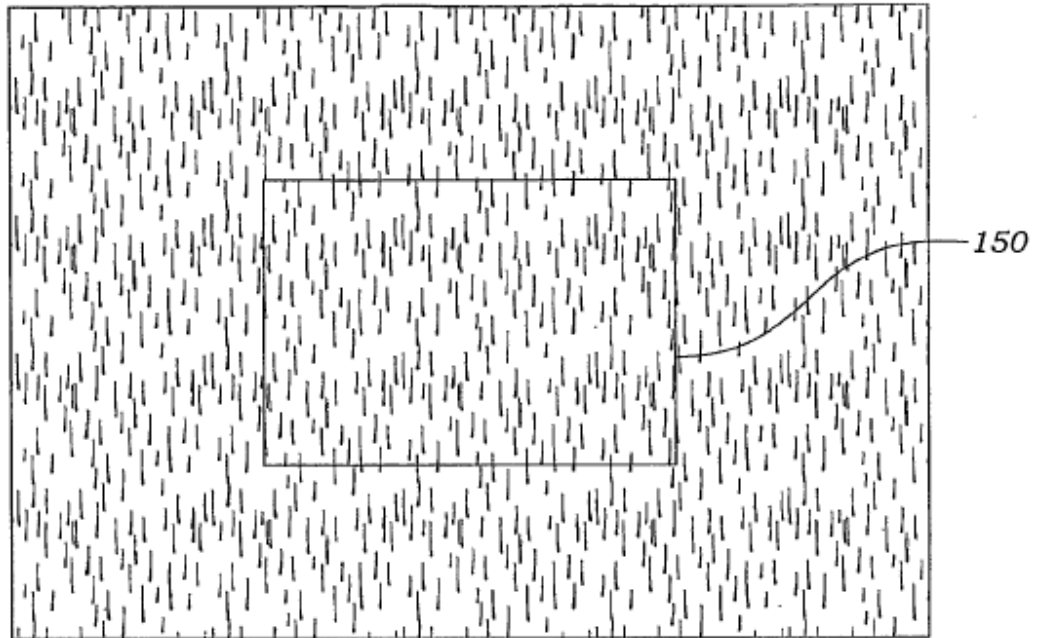




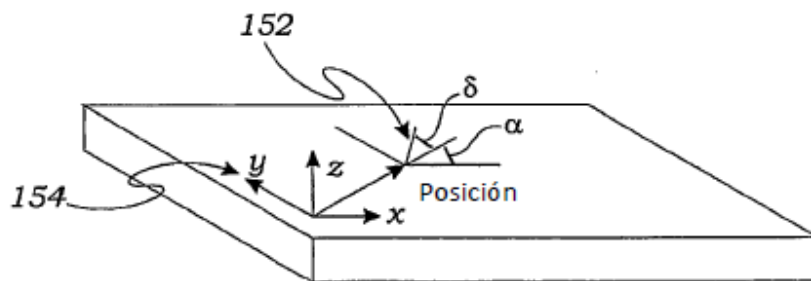
*Fig. 13*



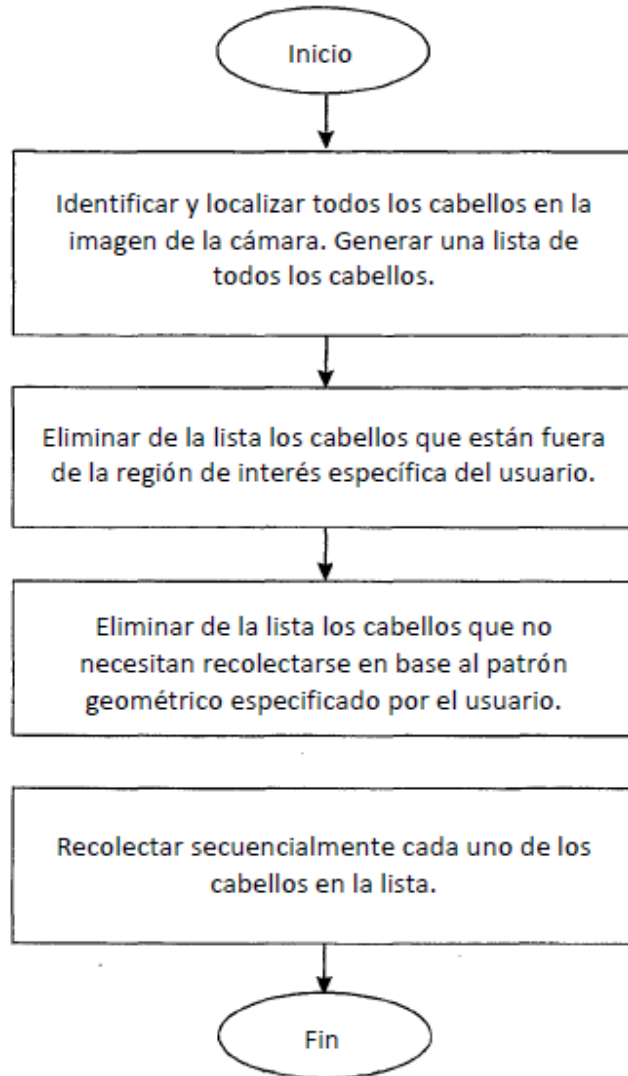
*Fig. 14*



*Fig. 15*



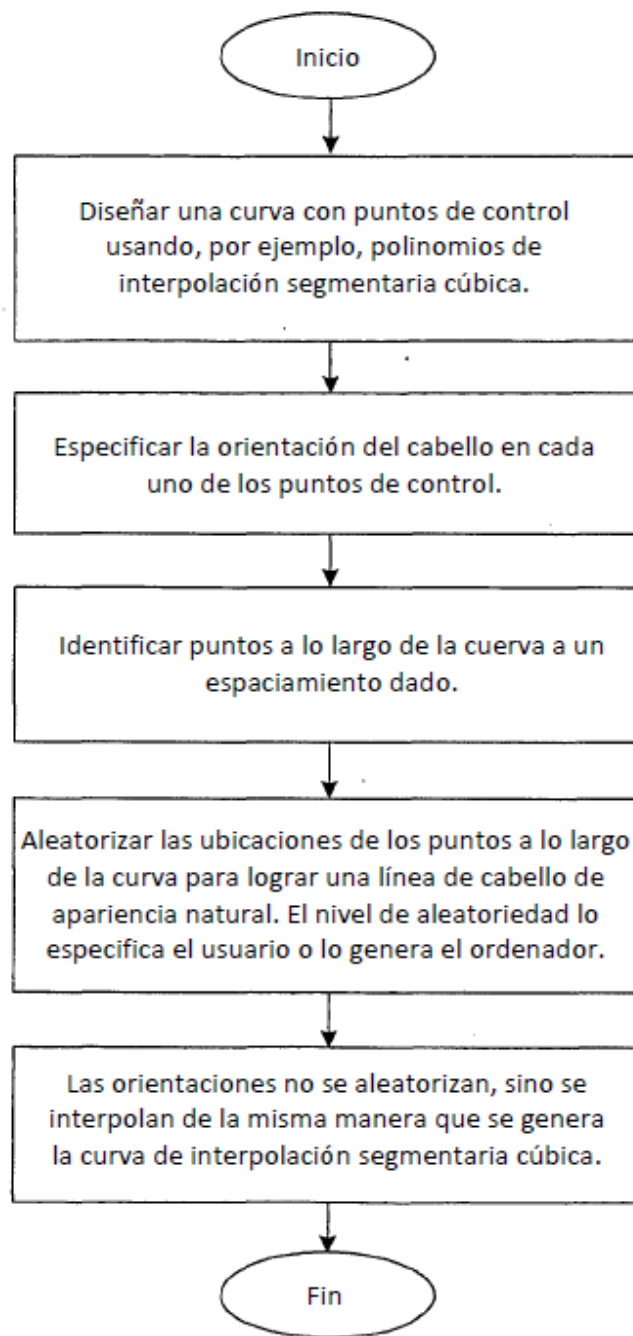
*Fig. 16*



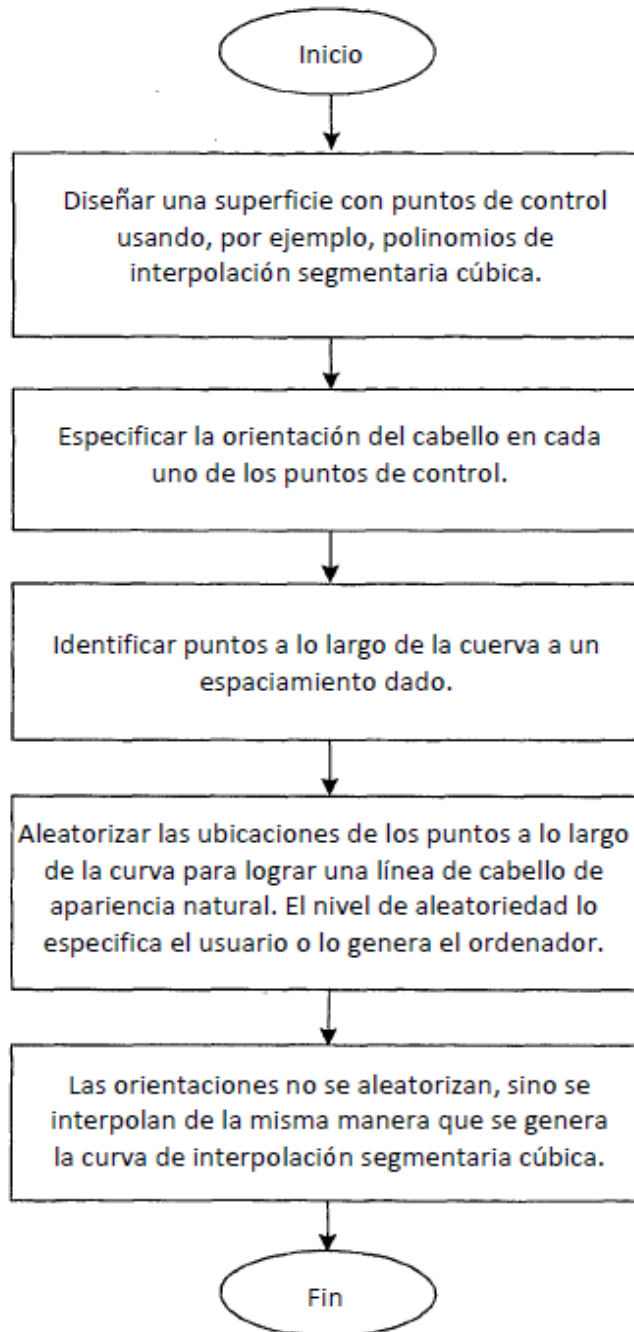
*Fig. 17*



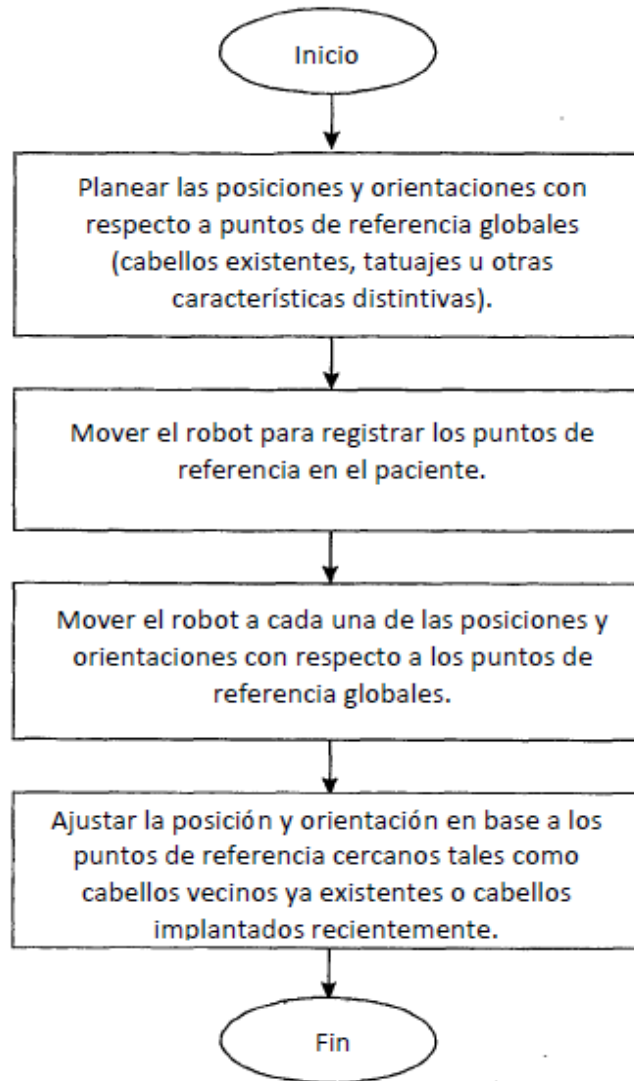
*Fig. 18*



*Fig. 19*



*Fig. 20*



*Fig. 21*