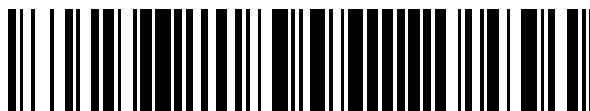


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 879 847**

51 Int. Cl.:

B29C 64/209 (2007.01)

B29C 64/118 (2007.01)

E04B 1/348 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.10.2014 PCT/US2014/062514**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.05.2015 WO15065936**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.10.2014 E 14859196 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.03.2021 EP 3063341**

54 Título: **Fabricación aditiva de edificios y otras estructuras**

30 Prioridad:

30.10.2013 US 201361897309 P

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

23.11.2021

73 Titular/es:

**BRANCH TECHNOLOGY, INC. (100.0%)
1530 Riverside Dr.
Chattanooga, TN 37406, US**

72 Inventor/es:

BOYD IV, R. PLATT

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 879 847 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

Fabricación aditiva de edificios y otras estructuras

5 CAMPO DE LA INVENCIÓN

Esta invención se refiere a la fabricación aditiva, equipo de fabricación y productos, incluyendo el diseño y producción de edificios y otras estructuras de todo tipo.

10 ANTECEDENTES

La fabricación aditiva se ha utilizado durante algún tiempo mediante la cual los objetos se construyen con pequeñas capas de diversos materiales a lo largo del tiempo. Entre otros, los procedimientos de fabricación aditiva incluyen el modelado por deposición fundida, la sinterización selectiva por láser y la estereolitografía para formar estas capas.

15 Todos estos procedimientos crean un objeto «cortando» el objeto virtual en capas que a continuación se depositan una encima de la otra hasta que se forma el objeto final.

Los procedimientos típicos para formar una estructura incluyen la adición de objetos preformados juntos en secuencia para formar un edificio más grande u otro objeto. Los edificios se han construido utilizando sistemas de materiales que se combinan para formar un conjunto compuesto que tiene muchas características beneficiosas, como soporte

20 estructural, aislamiento, resistencia al agua y superficies acabadas.

La construcción convencional de objetos o edificios involucra materiales que se moldean, cortan, mecanizan o extruyen en varias formas y a continuación se combinan para formar el objeto o edificio final. Muchos componentes se cortan o personalizan en el campo quitando material de la pieza para que encaje en el conjunto. Dentro de un edificio típico, la forma de una viga o pared se calcula para resistir su carga máxima y a continuación toda la viga o pared tiene una forma y profundidad uniformes para tener en cuenta la carga máxima. Este procedimiento de diseño y construcción de edificios se ha utilizado desde que se construyeron los primeros edificios. Por el contrario, en un sistema natural, el material es un bien escaso y, por lo tanto, la forma de un objeto se optimiza para un uso mínimo del material. La práctica actual de la construcción ignora en gran medida el ejemplo de la naturaleza. Los elementos de construcción están diseñados para acelerar la fabricación y la construcción de edificios; en gran parte sin tener en cuenta la eficiencia del material o la flexibilidad de forma. Las formas o estructuras personalizadas son caras y, por lo tanto, rara vez se utilizan en la práctica actual de la construcción.

35 Actualmente, las técnicas de fabricación aditiva tienen un uso muy limitado para producir grandes estructuras.

Por ejemplo, un juguete utilizado para la fabricación aditiva de forma libre utiliza un filamento de plástico que se funde y se empuja a través de una boquilla calentada para extruir en un espacio abierto. Es útil solo como juguete sin mucho control sobre la temperatura, la tasa de extrusión o la materia prima.

40

La sinterización metálica de forma libre también se utiliza para un procedimiento llamado Deposición Directa de Metales (DMD) mediante la cual las partículas de metal se expulsan desde una boquilla mientras un láser de alta potencia fusiona las partículas al sustrato previamente construido mientras es controlado por un brazo robótico.

45 Un ejemplo a mayor escala implica el uso de partes de plástico modulares similares a ladrillos producidas con una estrategia de Modelado por Deposición Fundida (FDM) aumentado a escala y en capas. Estas unidades se combinan a continuación con otras partes para formar un edificio más grande. Otro procedimiento consiste en adoptar una estrategia similar con ladrillos de arcilla modulares que se imprimen en 3D con una extrusora montada en un brazo robótico.

50

Al menos otros dos procedimientos utilizan grandes grúas pórtico para depositar material. Uno produce un edificio mediante la deposición en capas de cemento con un mecanismo de grúa pórtico que es más grande que el edificio que se está construyendo. Otra estrategia produce una gran estructura mediante el uso de material de piedra en polvo dispuesto en capas con un aglutinante polimérico.

55

Otro procedimiento conecta una extrusora de plástico a un brazo robótico y se utiliza para producir elementos de tensión similares a capullos o telas de araña sobre una estructura metálica. Otro esfuerzo similar utiliza un mecanismo con una extrusora de filamentos en el extremo de una armadura robótica para producir paredes de hormigón de un

solo material donde la malla actúa como «encofrado con fugas» y las extrusiones actúan como lazos de pared horizontales entre las caras de la pared.

La tecnología de impresión 3D existente produce objetos que se construyen en un formato en capas a través de diferentes medios y materiales, pero se limitan a pequeños volúmenes y una acumulación de material por capas. La mayoría de los ejemplos utilizan exclusivamente el material impreso en 3D para construir una estructura y están limitados al volumen de construcción del mecanismo de impresión empleado. La publicación de NORMAN HACK ET AL: «Overcoming Repetition: Robotic fabrication processes at a large scale», INTERNATIONAL JOURNAL OF ARCHITECTURAL COMPUTING, vol. 11, n.º 3, 1 de septiembre de 2013 (01-09-2013), páginas 285-300, XP055355008, ISSN: 1478-0771 describe un aparato para extrudir componentes estructurales.

RESUMEN

Los términos «invención», «la invención», «esta invención» y «la presente invención» usados en esta patente pretenden referirse ampliamente a la totalidad del asunto de esta patente y a las reivindicaciones de la patente a continuación. Debe entenderse que las declaraciones que contienen estos términos no limitan el asunto descrito en esta invención ni limitan el significado o el alcance de las reivindicaciones de la patente a continuación. Las realizaciones cubiertas de la invención por esta patente se definen mediante las reivindicaciones a continuación, no mediante este resumen. Este resumen es una descripción general de alto nivel de diversos aspectos de la invención e introduce algunos de los conceptos que se describen con más detalle en la sección Descripción detallada a continuación. Este resumen no pretende identificar las características claves o esenciales del asunto reivindicado, ni se pretende que se utilice aisladamente para limitar el alcance del asunto reivindicado. El asunto debe entenderse como referencia a las porciones apropiadas de la memoria descriptiva completa de esta patente, cualquiera o todos los dibujos y a cada reivindicación. Los títulos de esta invención se proporcionan para facilitar la referencia y, de la misma forma, no pretenden identificar características clave o esenciales y no pretenden limitar el alcance del asunto reivindicado.

Esta invención se refiere a un aparato y procedimiento de fabricación aditiva de forma libre para crear estructuras que se utilizan como un andamio sobre el que se aplican otros materiales. Incluye una extrusora que posiciona o deposita material solidificado o que se solidificará en breve en un espacio abierto para crear objetos conectando puntos para crear rutas con un mecanismo de movimiento. Como se usa aquí, los términos «construcción» y «estructura» y términos relacionados se utilizan en sus sentidos más amplios, que van desde la construcción de una estructura molecular hasta la fabricación de estructuras de edificios, barcos y aviones de línea. La invención proporciona un aparato según la reivindicación 1 adjunta y un procedimiento según la reivindicación 9 adjunta.

Los aspectos de esta divulgación replican la manera en que los sistemas estructurales naturales se forman sobre una base celular y se rellenan con otros materiales proporcionando aparatos y procedimientos para construir estructuras similares en teoría a la formación natural utilizando materiales y procedimientos rentables.

40 **Objetivo principal**

Uno de los principales objetivos de este aparato y procedimiento es crear estructuras a varias escalas de manera eficiente. Esto permite la construcción de edificios de una manera más creativa y eficiente que los procedimientos convencionales. Estos se pueden aplicar a estructuras de menor y mayor escala, porque el aparato y el procedimiento son independientes de la escala.

En una realización de este aparato, una extrusora está unida a un mecanismo de movimiento que mueve la extrusora (o una boquilla unida a la extrusora) entre puntos para crear rutas extruidas de forma libre con el fin de fabricar una matriz celular que actúa como un andamio sobre el cual se pueden aplicar materiales adicionales.

50 **Extrusora**

Una extrusora calienta el material para hacerlo fluido, o mezcla o manipula materiales que son al menos transitoriamente fluidos, dispensando el fluido desde una boquilla de una manera controlada que, al salir de la boquilla, se solidifica rápidamente para convertirse en un segmento dentro de una matriz celular. La extrusora puede usar varios medios como calentamiento, mezcla o flujo de aire para controlar el procedimiento de solidificación o puede controlarse de otra manera, por ejemplo, mediante el uso de composiciones químicas que se solidifican mediante reticulación molecular, catálisis u otros mecanismos.

60 **Mecanismo de movimiento**

Mientras la extrusora está funcionando y el material se dispensa desde la boquilla, el troquel u otra estructura, la boquilla se mueve de un punto a otro para crear "rutas" de forma libre o elementos de producto extruido. Idealmente, la velocidad de extrusión y la velocidad de movimiento están sincronizadas. Un procedimiento para mover la boquilla es utilizar un robot industrial multieje.

Matriz celular

Una «matriz celular», como se usa aquí, es un objeto más grande formado por volúmenes modulares conectados donde una porción de esos volúmenes está delimitada por segmentos conectados de producto extruido. Esto es similar a un diagrama 3D u otra representación de células vegetales o animales o las estructuras químicas de minerales o fluidos. Las versiones más simples son como cerchas tridimensionales, que se extienden en todas las direcciones en lugar de en un solo plano. Ejemplos adicionales de matrices celulares que se encuentran en la naturaleza incluyen estructuras de panal, cristalinas, de plantas, huesos, espuma, telas de arañas, diagrama de voronio o teselación, y células humanas.

Solución mínima

A diferencia de otros procedimientos de fabricación que utilizan extrusión, en un aspecto esta invención busca ahorrar tiempo y materiales. El objetivo fundamental no es el uso máximo de un material o procedimiento, sino el uso de la menor cantidad de material posible para producir una estructura particular.

Si bien las técnicas, estructuras y materiales de esta invención pueden utilizarse para crear estructuras sólidas o máximas, es ventajoso producir estructuras utilizando cantidades mínimas de un material dado. Por ejemplo, el objetivo puede ser diseñar y producir una estructura que esté optimizada para la resistencia pero que sea razonablemente económica al usar la menor cantidad posible de material para proporcionar la resistencia necesaria y otras características beneficiosas. Por otro lado, un «máximo» podría conceptualizarse como una estructura de profundidad sólida o constante que no está optimizada para sus condiciones de carga. Cuando otros procedimientos buscan utilizar su procedimiento para crear estructuras máximas, una estrategia útil con esta invención busca perseguir estructuras mínimas optimizadas.

En estos procedimientos de construcción, el espacio entre las rutas se llena con otros materiales. Estos otros materiales pueden tener (y normalmente tendrán) características completamente diferentes a las de los materiales de las rutas. Estos otros materiales pueden convertirse en una carcasa exterior, una estructura interior, un medio aislante, un medio conductor, un espacio de aire u otro uso ventajoso del espacio.

Debido a la naturaleza modular de una estructura de matriz celular donde cada módulo no tiene que ser el mismo, es posible una mayor flexibilidad de diseño, lo que permite la producción de diferentes estructuras y estructuras con diferentes componentes y funciones. Un árbol proporciona una analogía de origen natural; la misma célula básica constituye toda la estructura, pero no hay dos árboles que sean exactamente iguales. Debido a la naturaleza de forma libre de las rutas, es posible fabricar estructuras que serían imposibles o demasiado costosas de producir con los procedimientos de construcción normales.

Esto permite el diseño arquitectónico de edificios de forma libre y otras estructuras, cuando los procedimientos de construcción tradicionales serían imposibles o prohibitivamente costosos. Más específicamente, esta estrategia permite una mayor flexibilidad de diseño y la creación de estructuras de forma libre que de otro modo no serían posibles utilizando productos convencionales de vigas o láminas. Los aspectos de esta divulgación permiten el diseño y la construcción de estructuras similares a las estructuras naturales que se ven en el cuerpo humano, animales, insectos, plantas o formaciones minerales.

Los elementos de esta divulgación pueden usarse en un lugar de trabajo o en una fábrica. Estos procedimientos son en su mayoría de naturaleza aditiva en lugar de sustractiva, lo que permite que los materiales se depositen donde sea necesario para las características beneficiosas de estructura o forma, pero cuando no se necesitan materiales, el procedimiento puede ser eficiente en cuanto al material.

Procedimiento

La práctica de esta invención puede comenzar con un objeto o estructura diseñado, típicamente utilizando un programa CAD. Se aplica un patrón de matriz celular dado al volumen del objeto o paredes de la estructura. El diseño de esta matriz celular tiene en cuenta las profundidades de los materiales a aplicar y los procedimientos de aplicación. Esta

matriz a continuación se traduce a una ruta secuencial para construir cada segmento con la extrusora y el mecanismo de movimiento, que se puede controlar mediante código robótico. Este procedimiento mueve el extremo de la extrusora a lo largo de las rutas prescritas para crear los segmentos extruidos de la matriz celular. En cada unión con el producto extruido u otro sustrato, el calor del producto extruido (u otro mecanismo apropiado) fusiona o conecta o une el producto extruido para crear una junta sólida. Con este procedimiento, la forma general de la estructura se crea como un andamio sobre el que se agregan otros materiales. La estructura compuesta se crea agregando, curando y terminando otros materiales.

Materiales

La matriz celular puede ser útil por sí sola, pero se puede crear un conjunto compuesto mucho más fuerte mediante la adición de otros materiales que adapten y llenen algunos o todos los espacios abiertos en la matriz, en algunos casos formando una unión integral con el o los materiales de la matriz celular. En un ejemplo de construcción de edificios, se utilizan materiales aislantes de espuma en aerosol, hormigón y yeso para rellenar la matriz celular. Pueden crearse capas dentro de los materiales añadidos mediante la adición de barreras dentro de la matriz celular. Por ejemplo, se puede soplar espuma en aerosol en la matriz desde el lado interior de la pared con una capa de tabique que evita que la espuma líquida penetre significativamente más en el conjunto de la pared. Esto permite que la espuma en aerosol se eleve en una dirección hasta una cierta profundidad para un valor R deseado. También se pueden incorporar múltiples capas de tabique para diversos fines.

El material utilizado en la extrusora puede ser casi cualquier material que se pueda calentar y enfriar para convertirse en un sólido o que de otra manera se pueda extruir en forma fluida y luego solidificar. Algunos de los materiales posibles incluyen materiales termoplásticos, termoendurecibles, metálicos, orgánicos u otros, incluyendo materiales que pueden pulverizarse y recombinarse con un aglutinante. Se pueden utilizar la mayoría de los materiales comúnmente utilizados en extrusión. Por ejemplo, la resina plástica de acrilonitrilo butadieno estireno («ABS») se puede alimentar a la extrusora en forma de gránulos. También se puede utilizar plástico de ABS en forma de filamento. La adición de una fibra que mejora estructuralmente dentro de la masa fundida también se puede utilizar, como una fibra de vidrio, cerámica, carbono u otra fibra que sea continua o mezclada por separado en el compuesto de resina de ABS.

Extrusora

Una versión de una extrusora de esta divulgación procesa una resina plástica con un tornillo de extrusión accionado por un motor. Los gránulos de plástico se introducen en un barril donde se pulverizan y se funden mediante fricción y fuentes de calor externas a una temperatura controlada. Una vez que el plástico es fluido, pasa a través de un conjunto de boquilla donde se regula y se le da una forma determinada. Justo antes de salir y/o al salir de la boquilla, se elimina el calor del producto extruido para que se solidifique en un espacio abierto. El calor puede eliminarse a través de varios medios, que incluyen, sin limitación, el flujo de aire dentro o alrededor de la boquilla y después de que el producto extruido alcance el orificio de la boquilla. Otro procedimiento de eliminación de calor puede incluir la circulación de un fluido de transferencia de calor, ya sea líquido o gaseoso o ambos, incluyendo los fluidos que cambian de fase durante el uso.

Normalmente es deseable que la temperatura del producto extruido sea lo suficientemente alta como para que el producto extruido se fusione con otras partes y al mismo tiempo permita que el producto extruido se solidifique en un espacio abierto sin soporte adicional. Normalmente, el producto extruido se produce en cantidad y forma suficientes para ser autoportante desde una junta fundida hasta un punto en el que se realizan cambios de dirección o unión por fusión a otro segmento del producto extruido.

También son posibles procedimientos alternativos de unión de producto extruido a producto extruido, que incluyen, por ejemplo, adhesión o unión química, mecánica o de otro tipo.

Los aspectos de esta invención proporcionan un aparato y un procedimiento que utiliza materiales de manera eficiente para producir rápidamente edificios y otras estructuras con un rendimiento estructural óptimo y una gran capacidad de personalización.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Las realizaciones ilustrativas de la presente invención se describen en detalle a continuación con referencia a las siguientes figuras de los dibujos:

- La Figura 1 es una vista en perspectiva de una realización de esta invención.
 La Figura 2 es una vista axonométrica de un mecanismo de extrusora ejemplar de esta invención.
 La Figura 3 es una vista axonométrica en despiece del mecanismo de extrusora que se muestra en la Figura 2.
 La Figura 4 es una sección a través del eje largo de la extrusora que se muestra en la Figura 2.
 5 La figura 5 es una vista de un lado de la extrusora que se muestra en la Figura 2.
 La Figura 6 es una vista de la parte frontal de la extrusora que se muestra en la Figura 2.
 La Figura 7 es una vista superior de la extrusora que se muestra en la Figura 2.
 La Figura 8 es una vista inferior de la extrusora que se muestra en la Figura 2.
 Las Figuras 9-12 representan variaciones de transferencia de calor de la boquilla.
 10 La Figura 13 representa formas alternativas de producto extruido.
 La Figura 14 representa una boquilla con múltiples orificios.
 La Figura 15 representa una boquilla con múltiples fuentes de material.
 La Figura 16 representa una boquilla con múltiples orificios alimentados por múltiples fuentes de materiales.
 La Figura 17 representa una boquilla ejemplar que controla materia prima en forma de filamento.
 15 La Figura 18 representa una boquilla que extruye materiales junto con una fibra.
 La Figura 19 es una vista isométrica ejemplar de segmentos de acuerdo con esta invención.
 La Figura 20 es una vista isométrica de un movimiento de robot ejemplar.
 La Figura 21 es una vista isométrica de una pared ejemplar que ilustra intervalos de programación de patrones dentro de una pared.
 20 La Figura 22 es una vista en perspectiva de un objeto que se está construyendo con un mecanismo de movimiento capaz de múltiples grados de movimiento.
 La Figura 23 representa una plataforma móvil para manipular una extrusora.
 La Figura 24 representa una extrusora manual que no forma parte de la invención reivindicada.
 Las Figuras 25-30 son representaciones esquemáticas de estructuras celulares ejemplares de varios aspectos de
 25 esta divulgación.
 La Figura 31 es una vista esquemática en perspectiva de una estructura de un aspecto de esta divulgación.
 La Figura 32 es una vista isométrica de una plataforma móvil en uso de acuerdo con un aspecto de esta divulgación que forma una estructura de pared.
 La Figura 33 representa las etapas de un procedimiento ejemplar de esta invención.

30

DESCRIPCIÓN DETALLADA

EXTRUSORA

- 35 En una realización de esta invención, representada en la Figura 1, un conjunto de extrusora 101 es manipulado por un sistema de armadura robótica 102 para fabricar una estructura 103. El extremo de la boquilla 104 del conjunto de la extrusora 101 se mueve a lo largo de una ruta 105 mientras se dispensa material desde el orificio 106 de la boquilla 104 a una tasa controlada. Una vez que el material sale del orificio 106, se enfría rápidamente mediante chorros de
 40 aire que endurecen el producto extruido a un sólido que se puede formar sin soporte para una longitud de segmento determinada. A medida que la extrusora 101 dispensa material, el movimiento de la extrusora a través del espacio a una velocidad controlada se coordina con la tasa de extrusión, de modo que el material se distribuye a lo largo de una ruta de manera controlada. La tasa de deposición puede ser más rápida o más lenta que el movimiento inducido para crear efectos variables. El movimiento se programa o controla mediante un ordenador 108 que está acoplado a un controlador 109 que controla el movimiento del robot 102. La temperatura se controla mediante un controlador de
 45 temperatura termostático 110 unido a los elementos calefactores de la extrusora 101. La presión de aire y el movimiento de aire son suministrados por un compresor de aire 111 alimentado a la extrusora a través de una manguera 112. El material se alimenta al mecanismo de extrusión 101 desde una fuente de suministro 113 a través de un sistema de alimentación de material 114.
- 50 Como se ilustra en las Figuras 2-8, una extrusora 101 ejemplar mantiene el material 201 en forma de gránulos temporalmente en una tolva 202 que alimenta el material al cilindro 203 de la extrusora a través de una abertura 204. Dentro del cilindro 203, un tornillo 205 se gira para pulverizar, fundir parcialmente y dispensar el material. El tornillo está diseñado preferiblemente para el procedimiento de extrusión particular en uso. La rotación del tornillo es impulsada por un conjunto de motor 206 que puede incluir un conjunto de engranajes 207 para controlar la velocidad
 55 del motor y un controlador de motor 208 para regular la velocidad del motor 206.

El motor 206 puede montarse en el conjunto de cojinete de empuje 209 con el eje de transmisión del motor 210 conectado al tornillo mediante un acoplamiento 211. El conjunto de cojinete de empuje contiene medios para resistir el empuje del tornillo con un cojinete de empuje rotatorio 212.

60

A medida que el tornillo de extrusión empuja el material a lo largo, se aplica calor para facilitar el procedimiento de fusión por varios medios, tales como bandas calentadoras de resistencia 213 montadas alrededor de la extrusora en varios lugares. Otros procedimientos para agregar calor pueden incluir otros procedimientos de calor de la resistencia, como calentadores de cartucho o calentadores de bobina. Pueden usarse otros procedimientos tales como aire caliente, fluidos calientes, vibración, ultrasonidos, infrarrojos, interacción de corriente continua o láseres. La temperatura puede controlarse mediante termopares 214 y controlarse termostáticamente en cada banda calentadora 213.

Se puede usar una placa rompedora 215 con orificios en una variedad de patrones para generar contrapresión en el barril y asegurar una mezcla consistente en el producto extruido. Puede emplearse una válvula de cierre 216 que controle el flujo del producto extruido. La válvula 216 puede funcionar en coordinación con las presiones inducidas por la rotación del tornillo 205 para abrir y cerrar un mecanismo de apertura accionado por resorte, o puede controlarse de otras formas, como neumáticamente.

Una extrusora puede ser monitoreada en cuanto a ubicación, temperatura, tasa de flujo y de otro modo con gran precisión, lo que permite la manipulación de la extrusora y el control del producto extruido que produce con una precisión igualmente grande. Por ejemplo, se puede usar un transductor de presión para monitorear la presión interna dentro del barril. Se pueden usar sensores de temperatura dentro del cilindro y o dentro de la masa fundida para controlar con precisión la temperatura del material.

Boquilla

La boquilla 217 (a veces llamada «troquel») forma la forma del material y lo dispensa desde un orificio 218. El calor puede eliminarse del material por medio del flujo de aire 219 que se enfría a través de la boquilla 217 y fuera de la misma a través de la abertura 220 de modo que el aire fluya alrededor del producto extruido 221. El aire también puede usarse para eliminar el calor dentro de la boquilla sin fluir sobre el producto extruido 221.

Las Figuras 9-12 representan estructuras que utilizan otros fluidos que también pueden recircular fuera de las boquillas y que pueden incluir sistemas suplementarios de calefacción y refrigeración. Estos conductos de fluido pueden ser internos o externos a las boquillas.

La Figura 9 ilustra un sistema en el que se introduce un fluido 901 en la boquilla 217 que circula alrededor del material 201 mientras se mueve a través de la boquilla 217. Este fluido sale a continuación de la boquilla 217 y fluye sobre el producto extruido 221. El fluido puede ser un líquido o un gas.

La Figura 10 emplea un fluido similar al de la Figura 9 excepto que el fluido 901 recircula y no fluye sobre el producto extruido 221. La Figura 11 ilustra una estrategia similar a la de las Figuras 9 y 10, pero el fluido 901 sale de la boquilla y no fluye directamente sobre el producto extruido 221. La Figura 12 ilustra una estrategia similar a la de la Figura 9 excepto que el fluido 901 circula fuera de la boquilla y no fluye dentro de la boquilla propiamente dicha. El fluido 901 puede circular alrededor de la boquilla y fluir sobre el producto extruido 221.

La velocidad del motor, el funcionamiento de la válvula, el control de temperatura y la eliminación de calor pueden controlarse y funcionar en coordinación entre sí o pueden controlarse por separado.

La forma del producto extruido 221 puede ajustarse mediante varios procedimientos, ya sea cambiando las boquillas, ajustando dinámicamente la forma del producto extruido 221 o cambiando la velocidad de movimiento que hace que el material se acumule o se estire como se muestra en la Figura 13. La forma del producto extruido puede modularse para que sea más gruesa 1301 o más delgada 1302 en ciertas áreas o la sección transversal puede cambiarse de una forma 1303 a otra forma 1304 o 1305.

Las Figuras 14, 15 y 16 representan variaciones de boquillas, incluidas boquillas que dispensan producto extruido desde múltiples orificios simultáneamente, boquillas que dispensan producto extruido de dos componentes y o en diferentes momentos de una manera conectada o desconectada.

La Figura 14 ilustra una boquilla 217 con múltiples orificios 218 que extruye de una fuente de material 201. La Figura 15 ilustra una boquilla 217 con un orificio 218 que combina múltiples fuentes de material 201a y 201b que pueden mezclarse antes de salir del orificio 218 o extruirse en un formato laminado. La Figura 16 ilustra una boquilla 217 con múltiples orificios 218a y 218b que se suministran desde múltiples fuentes de materiales 201a y 201b que pueden controlarse juntas o por separado.

Filamento

La Figura 17 representa un conjunto de extrusora alternativo 1700 que funciona de manera similar a una impresora 3D común por medio del cual el filamento 1701 se alimenta a una cámara de calentamiento 1702, se funde y se extruye desde la boquilla 1703. La boquilla 1703 funcionaría de manera similar a la descripción de boquillas en las Figuras 9-12, excepto que el material del que se forma el producto extruido está inicialmente en forma de filamento en lugar de en forma de gránulos.

Materiales

Entre muchos otros materiales existentes, la resina plástica de ABS se vuelve fluida dentro de un intervalo de temperaturas, pero de manera controlada dependiendo del resultado deseado. Puede usarse ABS con un aditivo fibroso u otro aditivo para cambiar ciertas propiedades del producto extruido. Se pueden utilizar varios otros termoplásticos para lograr resultados similares.

Se puede usar cualquier otro material que pueda extruirse a través de un orificio y a continuación solidificarse rápidamente. Algunos de estos pueden ser termoplásticos, termoendurecibles, epoxis, cera, poliméricos, metálicos, espuma, orgánicos, cementosos, cerámicos, biológicos u otros materiales existentes y desarrollados posteriormente. Algunos de estos materiales son fluidos por encima de ciertas temperaturas y se solidifican rápidamente cuando su temperatura desciende.

Otros materiales utilizables pueden solidificarse como resultado de procedimientos químicos, como materiales de dos partes, como algunos epoxis que se reticulan y solidifican después de que las dos partes se combinen, u otros materiales que se reticulan después de la introducción de un catalizador, o la exposición a la humedad o luz ultravioleta. Algunos de estos materiales se unen a sí mismos, al menos cuando el contacto se produce por encima de ciertas temperaturas o antes de que se produzca por completo el enlace de cadenas u otras reacciones químicas. Otros sistemas de materiales pueden utilizar un producto extruido estructural y un material de unión suministrado por separado o un agente dispensado en los puntos de contacto del producto extruido estructural, tal como un cianoacrilato u otro adhesivo de acción rápida.

Un procedimiento para reforzar el producto extruido es mediante la adición de hebra o hebras continuas o rotas de refuerzo de fibra. Los materiales comunes utilizados para esto pueden incluir fibra de vidrio, fibra cerámica, alambre metálico o hebras de fibra de carbono. Como se muestra en la Figura 18, la fibra 1801 se incorpora a la masa fundida 1802 de manera que la masa fundida puede encapsular la hebra de fibra 1801 para reforzar cada segmento de la matriz celular fabricada a partir de la fibra 1801 y el producto extruido 1803 de la masa fundida 1802.

También se pueden emplear otras técnicas de extrusión existentes y futuras para combinar materiales o mejorar la extrusión, incluyendo el uso de un mandril o aire u otro fluido o mediante, por ejemplo, la utilización de técnicas de extrusión por flujo laminar con paletas o película soplada.

MOVIMIENTO

El movimiento de la boquilla de la extrusora se puede lograr de cualquier manera que sitúe la boquilla donde deba estar en un momento determinado. En una realización, como se representa en general en la Figura 1, el movimiento de la extrusora y la boquilla es proporcionado por un robot industrial 102 de múltiples ejes. La extrusora 101 se une al robot 102 por medio de un conjunto de soporte 222 mostrado en las Figuras 2, 3, 4 y 6 que se monta en el extremo de la armadura 223 que se muestra en las Figuras 4 y 6.

El robot 102 es controlado programáticamente por una computadora 108 para ejecutar el movimiento necesario para crear las rutas de matriz celular deseadas. Un procedimiento para producir este movimiento es dibujar la matriz celular en un programa CAD que a continuación se traduce en un procedimiento de movimiento secuencial, para controlar el robot 102. Este movimiento está programado para incluir información que coordina la velocidad de extrusión, el control de temperatura, el mecanismo de enfriamiento y otros parámetros para la extrusión.

Un programa de control de movimiento básico de este tipo permite que el mecanismo de movimiento se mueva de un punto a otro punto a lo largo de una ruta prescrita a una cierta velocidad, como se muestra con referencia a formas tridimensionales ejemplares en las Figuras 19 y 20. Mientras el robot 102 está ejecutando tal movimiento de la extrusora 101 y la boquilla adjunta 217, el motor de la extrusora 208 también puede activarse a una velocidad prescrita, se puede abrir una válvula de cierre de material 216, la temperatura de varias porciones del aparato y el material puede ser monitoreada y el o los mecanismos de calentamiento o enfriamiento pueden encenderse o apagarse según

corresponda. El movimiento del robot puede detenerse para crear (como se muestra en la Figura 20) un nodo 2001 o una junta 2002 construida con el producto extruido 2003. Los sistemas de enfriamiento o calentamiento pueden apagarse o encenderse para modular la solidez en la viscosidad del producto extruido 2003 u otras características de flujo. La velocidad del motor 206 también se puede cambiar para aumentar o disminuir el flujo de producto extruido que sale de la extrusora 101. La tasa de extrusión, tasa de movimiento, transferencia de calor, enfriamiento, calentamiento y fusión se coordinan para producir un filamento sólido de la forma y el tamaño deseados a lo largo de la ruta prescrita unida a otros filamentos u otras estructuras donde se desee.

Secuencia

Como se muestra en las Figuras 19 y 20, la secuencia del programa y el movimiento de la boquilla resultante permite que se agregue material que se conecta al material depositado previamente en las juntas sin pasar de regreso a través del material aplicado previamente. Esta programación determina la forma general de la estructura final junto con todos los segmentos secuenciales interconectados que forman parte de ella.

Segmentos

Cada uno de estos segmentos, como los segmentos 2004 y 2005 en la Figura 20, puede derivarse descomponiendo la matriz celular en rutas como la ruta 2-3 y la junta 1, 5. A cada ruta se le asignan características como la velocidad de extrusión, velocidad de movimiento, temperatura y enfriamiento. Estas características determinan cómo se construirán elementos como los segmentos 2004 y 2005 y la estructura resultante comprendida por esos elementos. Una vez que se completa una región de la matriz celular (como las celdas representadas en las Figuras 19 y 20), se agrega material adicional para construir la estructura de manera horizontal y/o vertical mediante la adición de más celdas.

Programación de intervalo

Otro procedimiento para construir la matriz celular en lugar de una programación de rutas discretas se ilustra en la Figura 21. En esta técnica, ciertos patrones de deposición de material 2101, 2102 o 2103 se aplican a volúmenes de espacio estructurados de manera similar. El programa puede dictar la aplicación de un determinado patrón celular en un intervalo particular sin tener que programar cada etapa de movimiento discreto. De esta manera, una estructura puede dividirse en intervalos que informarían acerca de la formación del patrón por parte del robot y la programación de movimiento puede simplificarse sustancialmente.

La pared de ejemplo ilustrada en la Figura 21 tiene ciertas características físicas y tensiones internas como resultado de su diseño. La aplicación de la matriz celular y la programación de control de movimiento resultante pueden automatizarse algorítmicamente para responder a la geometría y tensiones dentro de la pared asignando ciertos patrones de formación 2201, 2202 o 2203 a ciertos intervalos dentro de la pared. En un área de mayor tensión, la geometría 2101 se puede aplicar al intervalo A1, pero en un área de menor tensión, la geometría 2102 se puede aplicar al intervalo B2. Este procedimiento de responder algorítmicamente a los requisitos necesarios de un área de pared determinada puede simplificar significativamente la programación y reducir el uso de material al optimizar la estructura interna para las tensiones necesarias a resistir.

Sensores de retroalimentación

Para asegurar la precisión en la estructura construida, se pueden emplear mecanismos de retroalimentación y ajuste que detecten las condiciones reales de las juntas y otros materiales aplicados previamente, a diferencia de las condiciones ideales de diseño de las juntas y material aplicado previamente. Dado que la deflexión, la fluencia del material, el viento, la temperatura y otras condiciones del mundo real afectarán las áreas previamente extruidas, se pueden emplear procedimientos para ajustar dinámicamente los parámetros de movimiento y extrusión para adaptarse a estos factores para aumentar la precisión del resultado final. Algunos de los procedimientos pueden incluir determinación de intervalos, retroalimentación óptica, detección de movimiento, fotogrametría, captura de movimiento, sonar, lidar, entre otros mecanismos de retroalimentación.

Procedimientos de movimiento

Como se muestra en los dibujos, se pueden emplear procedimientos alternativos para mover la extrusora. Estos pueden incluir, sin limitación, un sistema de pórtico, un sistema CNC o impresoras 3D tradicionales con ejes de control adicionales como se ilustra en la Figura 22, equipo hidráulico como se representa en la Figura 23.

Según lo explicado anteriormente, el propósito de la extrusora y el mecanismo de movimiento es conectar puntos para crear una ruta a lo largo de la cual se deposita el material. Cada ruta se suma a otras para finalmente crear la matriz celular que forma la estructura interna del edificio u objeto final.

5 Matriz celular

La matriz celular se crea aplicando un patrón celular dado al volumen interno de un sólido como se ilustra con los ejemplos de las Figuras 25-30. El patrón celular puede autorrepetirse o puede ser diferente de una celda o grupo de celdas a otra. Se pueden utilizar versiones idealizadas de las estructuras de moléculas, células vegetales, animales o humanas, minerales, espumas, patrones de origen natural, fórmulas matemáticas, poliédricos, marcos espaciales, cerchas u otros patrones para modularizar el volumen interno de la estructura general. El propósito de la matriz celular es crear un equilibrio entre el material utilizado, el espacio ocupado y la resistencia derivada de un patrón determinado. El material, el diámetro, la forma y la longitud de cada segmento extruido determinarán la densidad de la matriz celular. Al igual que con las construcciones celulares naturales, se pueden modular varias cualidades para lograr diversos resultados, pero pueden incluir estructuras para agregar resistencia, separación, flexibilidad, apertura, rigidez y especificidad de función, entre otras cualidades beneficiosas.

Además de los procedimientos de construcción de la matriz celular descritos e ilustrados anteriormente, existen otros procedimientos de fabricación de la matriz celular que no incluyen extrusión, pero que pueden producir resultados finales sustancialmente similares. Por ejemplo, la cristalización de la espuma, el cultivo de estructuras orgánicas, el procedimiento de secado dentro de un medio, ladrillos modulares, caras conectadas de una estructura con paneles o el uso de fabricación aditiva convencional para hacer las estructuras especificadas en esta patente.

MATERIALES AÑADIDOS

La resistencia y durabilidad de una estructura puede ser una función del material extruido solo, pero se pueden obtener beneficios adicionales utilizando la matriz celular como un andamio sobre el cual se aplican otros materiales para llenar los huecos entre los segmentos individuales. Similar a una estructura celular viva, las paredes celulares por sí solas brindan algo de resistencia, pero en la mayoría de los casos sin el material de relleno de volumen interno, la estructura no se sostendría. Al igual que la presión del agua en los cuerpos humanos, la calcificación en los huesos o la presión de turgencia en las plantas, el material que llena las celdas proporciona resistencia adicional para el soporte estructural. En un aspecto de la presente divulgación, un procedimiento de construcción similar utiliza material que llena la matriz celular para fortalecer adicionalmente la estructura general.

Se pueden usar otros procedimientos para combinar materiales con la matriz celular, como la unión de materiales a las caras exteriores o que crezcan en los huecos de la estructura.

Paredes y edificios

En una estructura utilizada como edificio, se puede describir un procedimiento para llenar la matriz celular con referencia a la Figura 31, donde la estructura interna 3101 de una pared 3100 incluye una capa de tabique 3102 que separa un área de la pared de las otras áreas. Pueden utilizarse múltiples tabiques 3102, pero en este ejemplo se utiliza una capa de tabique 3102. El aislamiento de espuma en aerosol se aplica desde el lado interior 3112 de la pared y la capa de tabique 3102 impide que penetre más en el conjunto de pared. La espuma en aerosol 3103 llena una profundidad determinada por referencia al valor R deseado del conjunto de pared 3100.

La siguiente etapa es la aplicación de hormigón 3104 desde el lado exterior 3113 por medio de hormigón proyectado, bombeo u otro mecanismo o técnica de aplicación adecuada. El hormigón 3104 se puede aplicar de modo que toda la matriz 3101 se rellene con hormigón 3104 y a continuación se termine o el hormigón 3104 se puede aplicar en un espesor que deje la rejilla de la cara exterior 3105 parcialmente expuesta. A continuación, se puede aplicar un acabado de estuco 3106 utilizando la cara exterior 3105 de la matriz celular como torno al que se fija el estuco. También se pueden utilizar otros acabados exteriores que se unen al hormigón 3104 y la rejilla 3105 utilizando prácticas y productos de construcción existentes o aún por desarrollar. Una vez que el hormigón 3104 se cura, puede servir como un elemento estructural significativo del edificio, como es común en la construcción de hormigón de capa delgada. En este caso, sin embargo, la matriz celular 3101 actúa como una forma y como parte del refuerzo de tracción del hormigón. Después de un curado suficiente del hormigón 3104, el yeso 3107 aplicado por pulverización se puede aplicar a la cara interior 3112 de la estructura, quitar con una herramienta, lijar suavemente y terminar como es común con otros acabados de paredes interiores. También se pueden utilizar muchos otros acabados de superficies interiores.

Ciertas áreas o porciones 3108 de la matriz celular pueden extruirse de manera sólida para crear elementos de adorno

decorativos 3108, juntas o para ayudar a integrar otros accesorios o equipos en el conjunto de la pared. Los conductos, canales, cableado, conductos de ventilación y tuberías pueden imprimirse in situ o integrarse después de que el hormigón se cure. Si se completa después del curado del hormigón, los espacios pueden enrutarse en la espuma 3103, y normalmente los conductos/tuberías se pueden situar en los huecos enrutados y a continuación volverse a aislar, si se desea, antes de la aplicación del acabado interior.

Un procedimiento opcional para aumentar la resistencia de la estructura es aplicar un material de refuerzo rociado que recubre las superficies externas del producto extruido y comienza a acumularse en las juntas para redondear y reforzar la matriz celular. El material de refuerzo rociado puede proporcionar una envoltura rígida alrededor del producto extruido, añadiendo resistencia sin añadir peso sustancial. Esta técnica de refuerzo podría asimilarse al procedimiento de calcificación que utilizan ciertas criaturas marinas microscópicas para construir sus esqueletos.

La adición de materiales a la matriz celular puede lograrse con procedimientos manuales normales convencionales, puede automatizarse utilizando los mecanismos de movimiento descritos aquí o por cualquier otra técnica que consiga la adición deseada de materiales a la matriz.

Escala y utilización

Los ejemplos de construcción de edificios descritos aquí son simplemente ejemplares; son posibles muchos otros usos, que incluyen, entre otros, el uso en los campos de la construcción de edificios, la fabricación, la agricultura, la automoción, la industria aeroespacial, la moda, la impresión tridimensional, el mobiliario y la medicina, entre muchos otros. La escala en la industria de la construcción puede estar entre 12,7-152,4 mm (0,5-6 pulgadas) o más por segmento. Los segmentos de menor escala pueden ser tan pequeños como los producidos al omitir capas en una impresora 3D del orden de 0,0508 mm (0,002 pulgadas). Las estructuras de mayor escala pueden incorporar volúmenes y vanos de varios pies o más. Los vanos posibles y deseables dependen de las propiedades del material, las propiedades de la sección del producto extruido y la forma del segmento.

Se puede construir un pequeño dispositivo con las técnicas descritas aquí. Por ejemplo, se puede fabricar un objeto con vacíos interiores huecos y recubrir el exterior con esmalte de porcelana para formar una taza de café. Un ejemplo a mayor escala podría ser la estructura de la pared interna de un avión de línea donde el revestimiento exterior se sitúa sobre una matriz celular con un espacio interno compuesto por aislamiento, una membrana de recipiente a presión hermética y acabados interiores.

Con la armadura robótica u otros mecanismos de movimiento, se puede obtener escala adicional y flexibilidad de movimiento montando el mecanismo en un sistema de rieles que permita un mayor grado de movimiento. Se puede habilitar un procedimiento más flexible montando un brazo robótico en una plataforma móvil para producir una plataforma controlada robóticamente que tiene un intervalo de movimiento infinito, como se muestra en la Figura 32.

40 Flujo lógico

La Figura 33 es un diagrama de flujo lógico. Esta es una descripción general básica y ejemplar de las etapas que se pueden tomar para producir una estructura determinada. Pueden ser posibles y deseables numerosas sustituciones, alteraciones, modificaciones, omisiones y similares dependiendo de la naturaleza de la estructura que se fabrique y de los materiales que se utilicen. En el procedimiento de la Figura 33:

Un objeto o estructura se concibe y documenta preferiblemente con un programa CAD en la etapa 3300.

El volumen de este diseño se llena con una matriz celular que tiene propiedades deseables para la estructura final en la etapa 3301.

En la etapa 3302 se deriva una ruta secuencial que rastrea cada segmento de la matriz.

El mecanismo de movimiento se programa con esta ruta de movimiento secuencial en la etapa 3303. Información adicional relacionada con velocidades, temperaturas, detención/inicio, flujo, y otras propiedades se pueden ingresar con la programación.

El programa se ejecuta, induciendo movimiento y extrusión para crear la estructura en la etapa 3304.

Una vez que se completan las porciones o el conjunto, se pueden añadir otros materiales a la estructura en la etapa

3305.

Son posibles distintas disposiciones de los componentes y actividades representados en los dibujos o descritos anteriormente, así como componentes y etapas que no se muestran ni describen. De manera similar, algunas características y subcombinaciones son útiles y pueden emplearse sin referencia a otras características y subcombinaciones. Se han descrito realizaciones de la invención con fines ilustrativos y no restrictivos, y las realizaciones alternativas resultarán evidentes para los lectores de esta patente. Por consiguiente, la presente invención no se limita a las realizaciones descritas anteriormente o representadas en los dibujos, y se pueden realizar diversas realizaciones y modificaciones sin apartarse del alcance de las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato (3200) de fabricación aditiva de forma libre para construir una estructura (103, 221, 2010, 2102, 2103, 3101), comprendiendo el aparato (3200):
- 5
- a. una extrusora (101) que comprende una boquilla (217) para extruir componentes estructurales,
 - b. un dispositivo de movimiento (102) para mover la extrusora a lo largo de múltiples trayectorias predeterminadas mientras la extrusora (101) está extruyendo componentes estructurales para situar los componentes estructurales en las posiciones deseadas y conectados a aquellos seleccionados de los otros componentes a medida que se producen los componentes, y
 - c. un controlador (109) para mover la extrusora (101) y controlar el funcionamiento de la extrusora (101)
- 10 **caracterizado porque** se proporcionan medios para eliminar el calor del producto extruido antes de salir de la boquilla (217) y, opcionalmente, al salir de la boquilla para facilitar así la solidificación del producto extruido (221) en un espacio abierto.
- 15
2. Aparato (3200) según la reivindicación 1, donde los para eliminar el calor de la boquilla de producto extruido (217) comprenden un paso para que un fluido fluya a través de la boquilla (217) y salga a través de ella de modo que el fluido fluya sobre el producto extruido (221).
- 20 3. Aparato (3200) según la reivindicación 2, donde el fluido es aire que fluye a través de la boquilla (217) y sale a través de ella a través de la abertura de la boquilla (220) de modo que el aire fluye alrededor del producto extruido (221).
4. Aparato (3200) según la reivindicación 1, donde los medios para eliminar el calor de la boquilla de producto extruido (217) comprenden un paso para que un fluido fluya a través y salga sin fluir directamente sobre el producto extruido (221).
- 25
5. Aparato (3200) según la reivindicación 1, donde los medios para eliminar el calor de la boquilla de producto extruido (217) comprenden un paso para que un fluido recircule a través del mismo.
- 30
6. Aparato (3200) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la boquilla (217) comprende múltiples orificios (218).
7. Aparato (3200) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un dispositivo de colocación para situar material intersticial dentro de al menos una porción de la estructura de componentes extruidos.
- 35
8. Aparato (3200) según la reivindicación 7, donde el dispositivo de colocación comprende un pulverizador para espuma aislante polimérica.
- 40
9. Un procedimiento de fabricación aditiva de forma libre para diseñar y construir una estructura, comprendiendo el método:
- a. diseñar o seleccionar un diseño de estructura,
 - b. diseñar una estructura celular que tenga espacios intersticiales para al menos algunos de los componentes estructurales del diseño de la estructura,
 - c. proporcionar un programa para controlar el movimiento y el funcionamiento de una extrusora en un aparato según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, para producir la estructura celular para al menos algunos componentes estructurales,
 - d. hacer funcionar la extrusora controlada por el programa para producir la estructura celular,
 - e. llenar al menos una porción de los espacios intersticiales con un material de relleno de baja densidad, y
 - f. aplicar un material de acabado a al menos algunos de los componentes estructurales.
- 45
- 50
10. Un procedimiento según la reivindicación 9, que comprende además aplicar un segundo material de acabado a al menos algunos de los componentes estructurales.
- 55
11. Un procedimiento según la reivindicación 10, que comprende además extruir porciones de la matriz celular para crear elementos de adorno decorativos (3108), juntas, conductos, canales, cableado, conductos de aire o tuberías
- 60

12. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde la estructura celular comprende un patrón autorrepetitivo.

13. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde la estructura celular comprende un patrón que es diferente de una celda o grupo de celdas a otra.

14. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde la estructura celular está modularizada y comprende un patrón que comprende uno o más marcos espaciales.

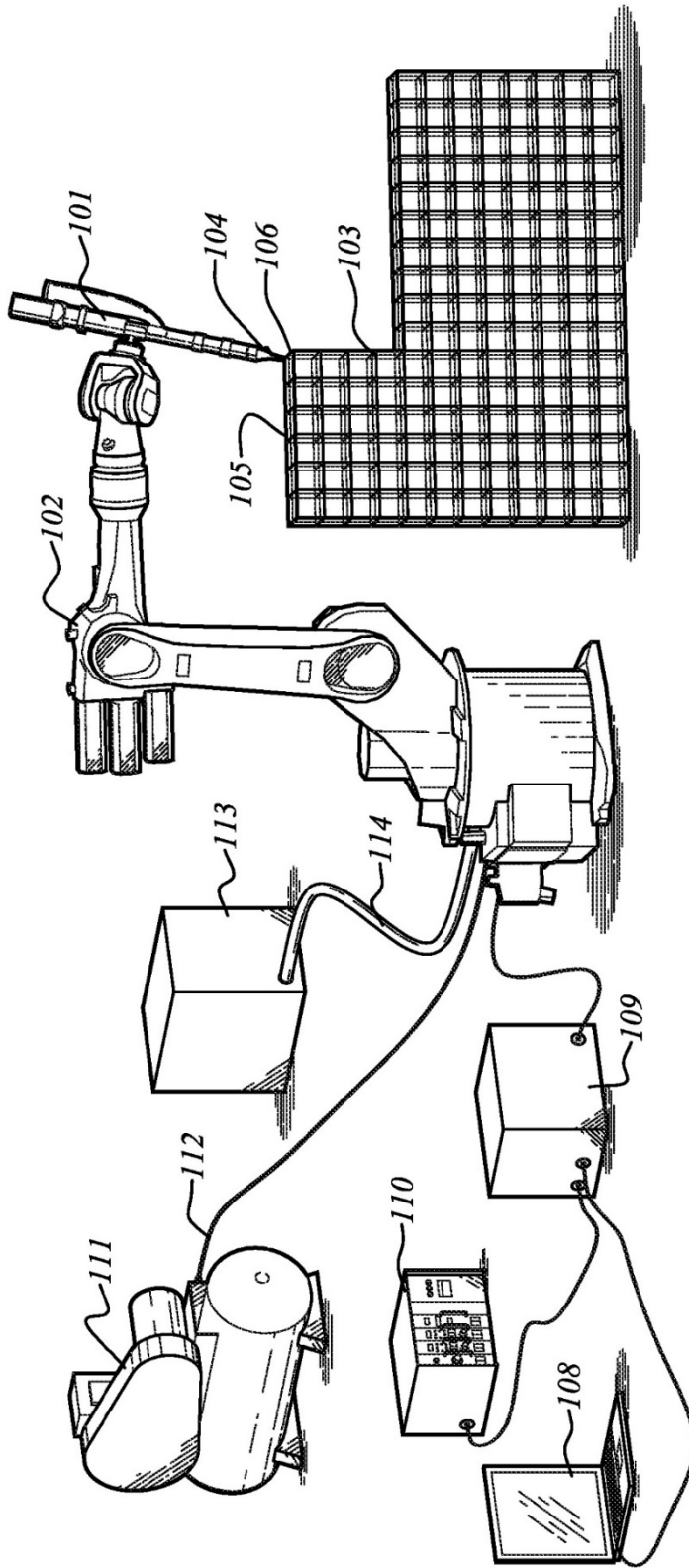


Fig 1

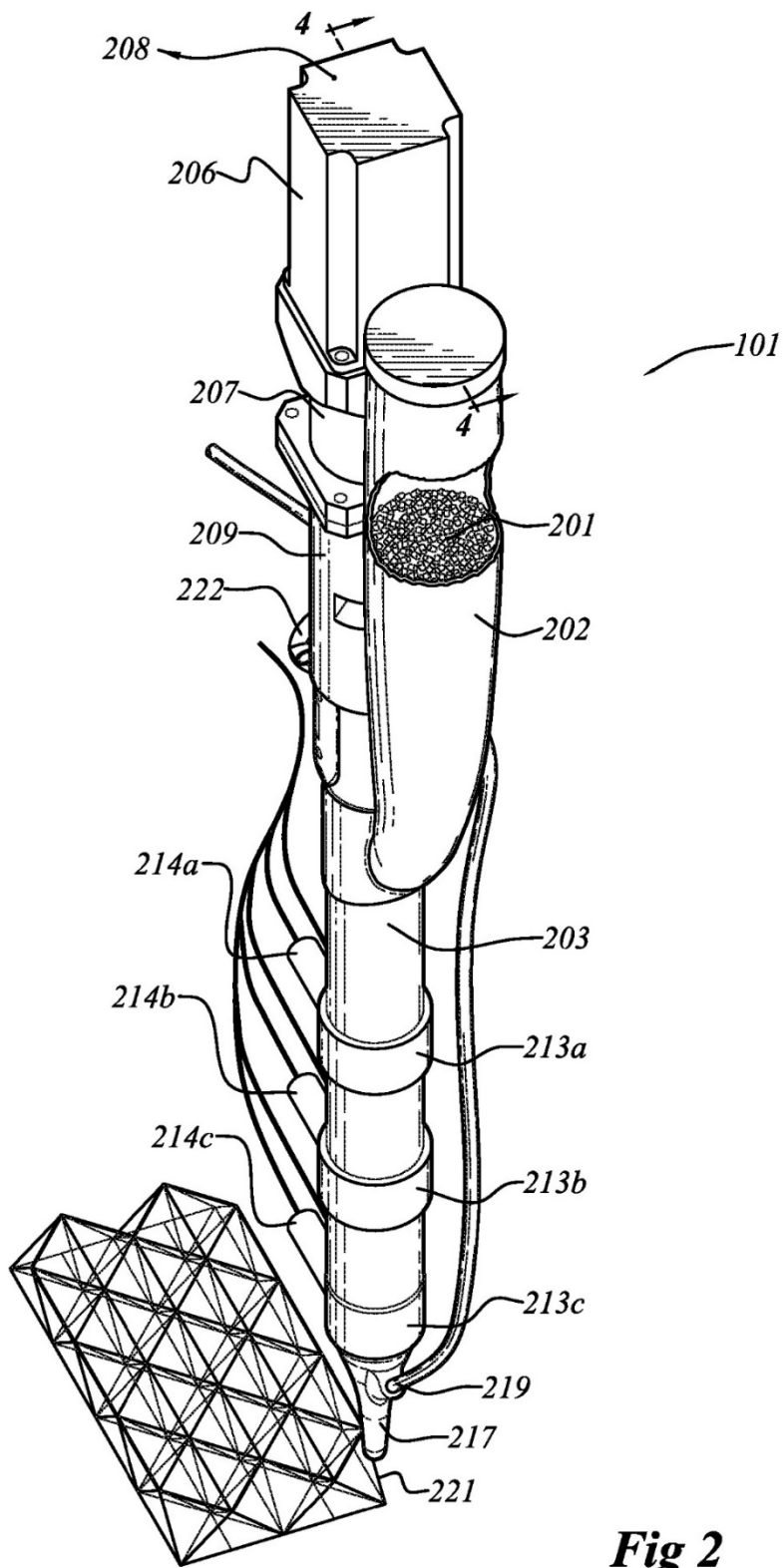


Fig 2

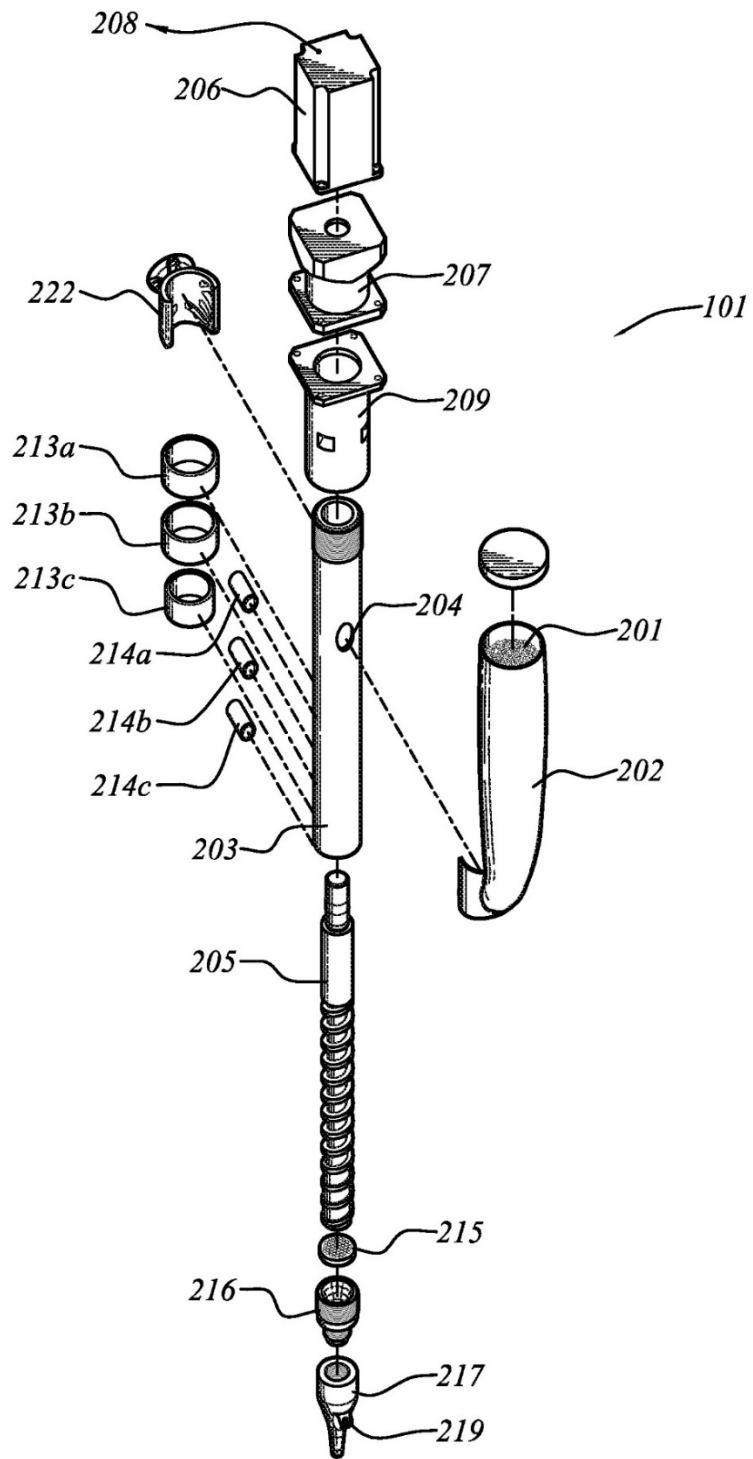
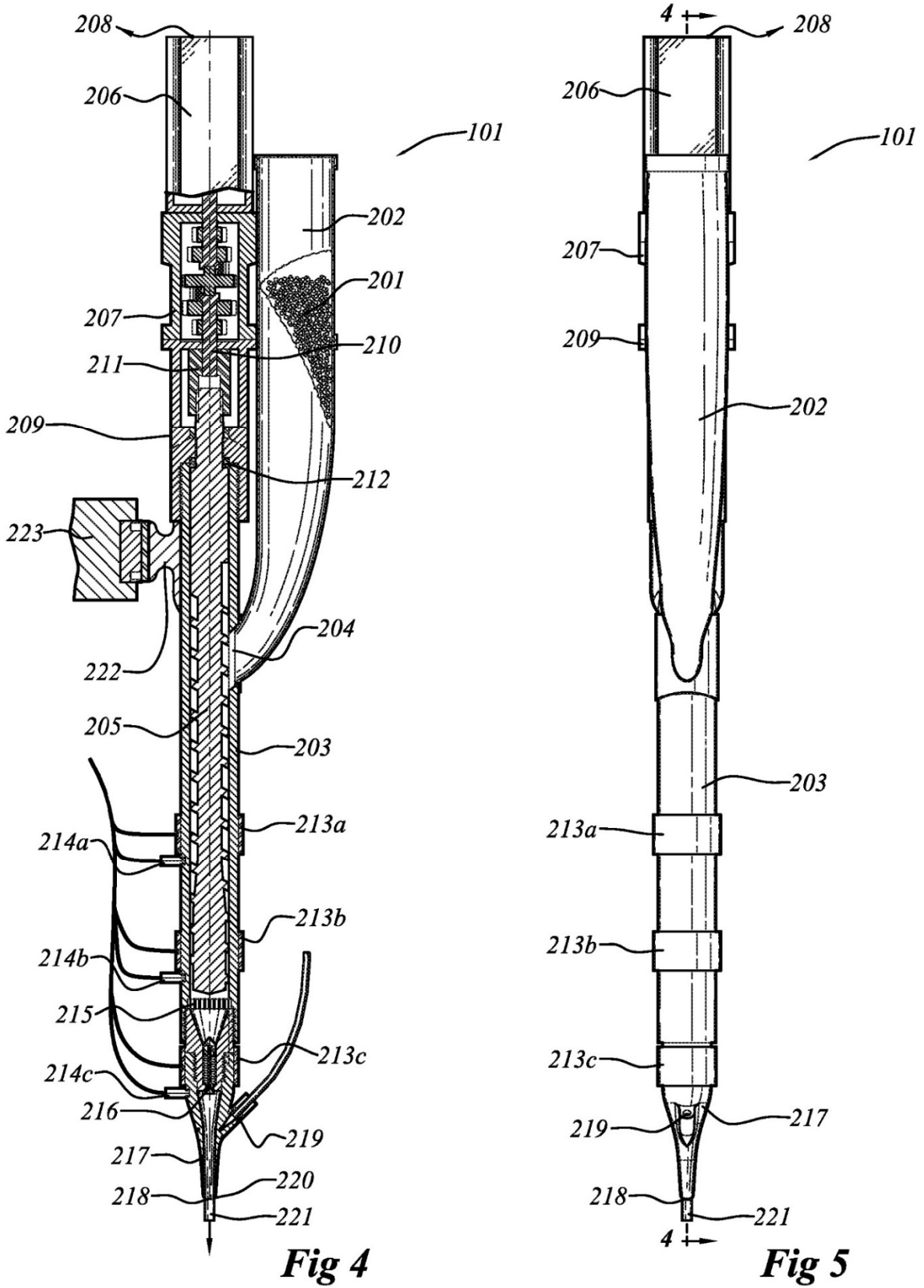


Fig 3



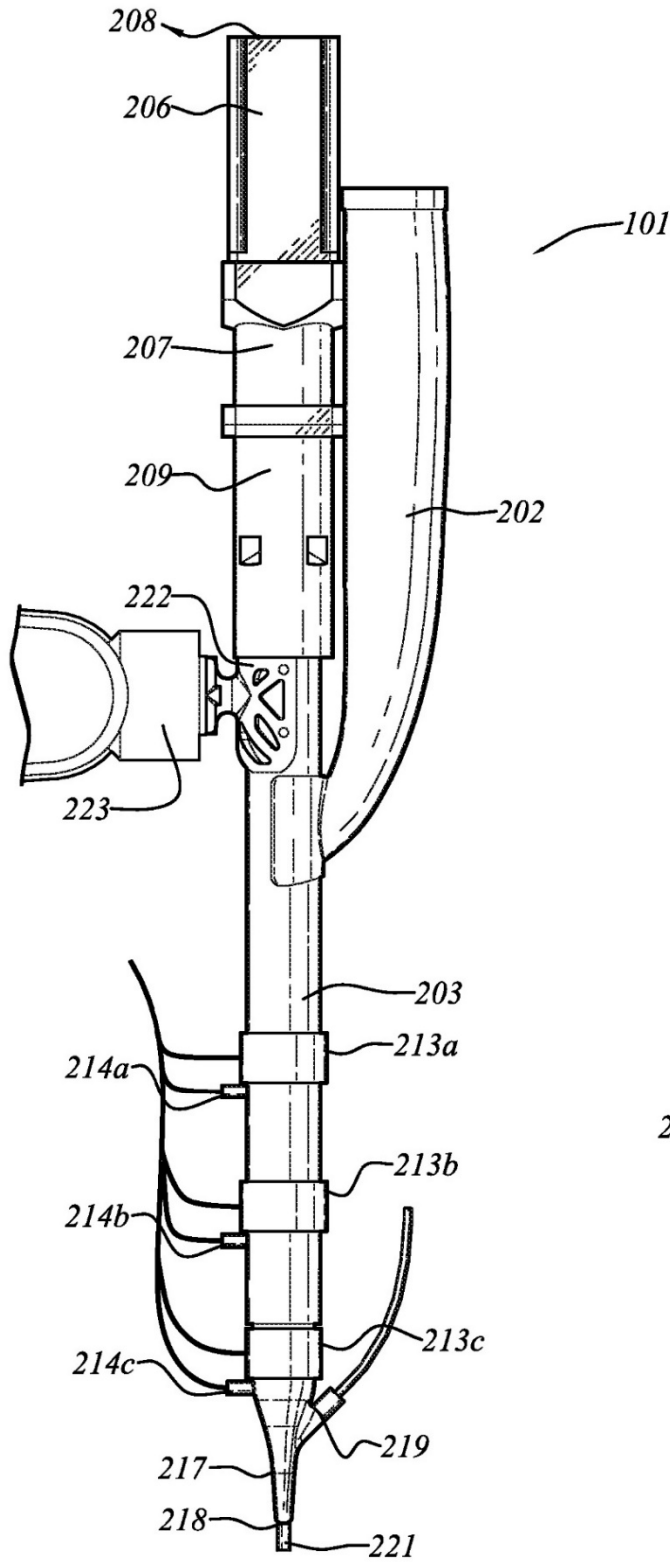


Fig 6

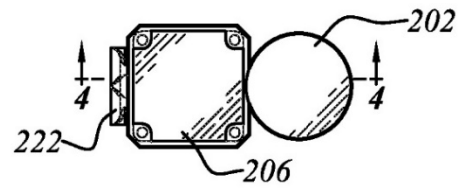


Fig 7

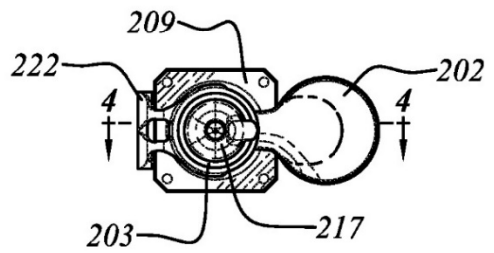


Fig 8

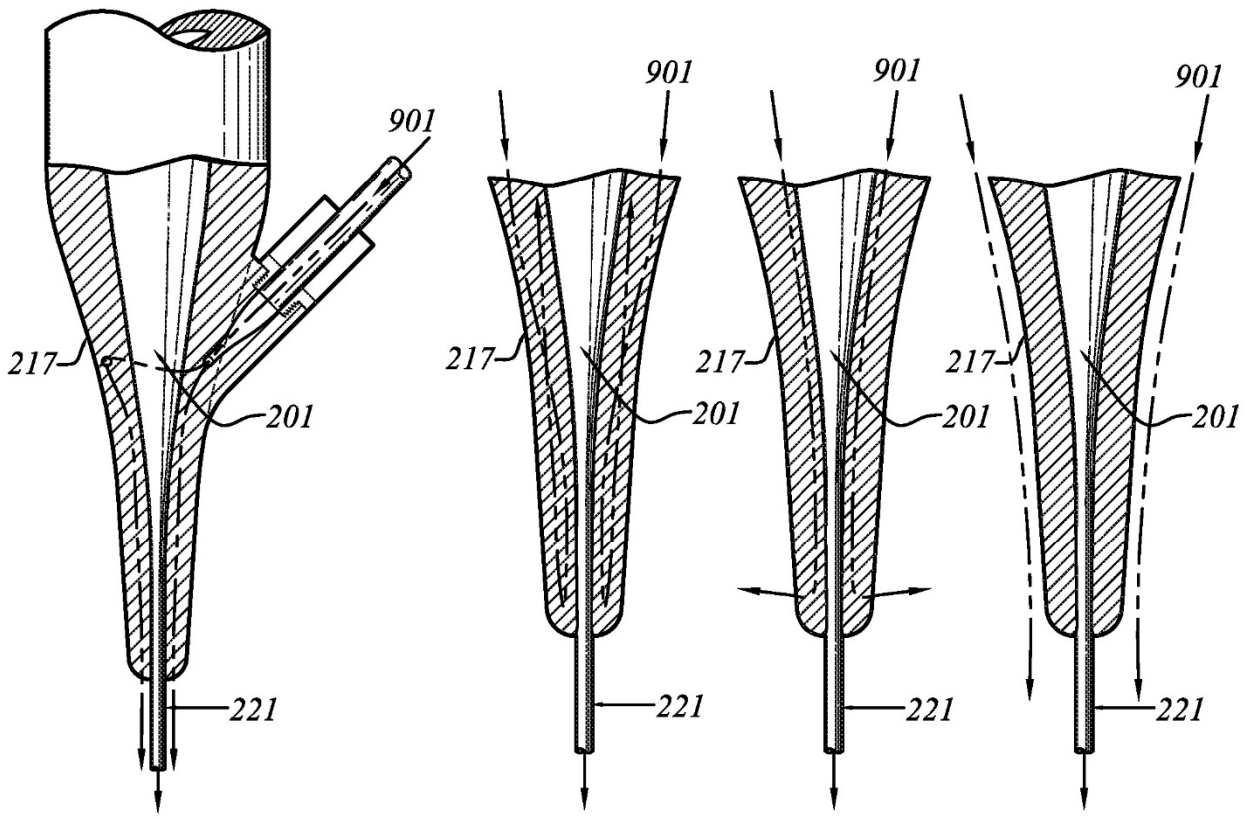


Fig 9

Fig 10

Fig 11

Fig 12

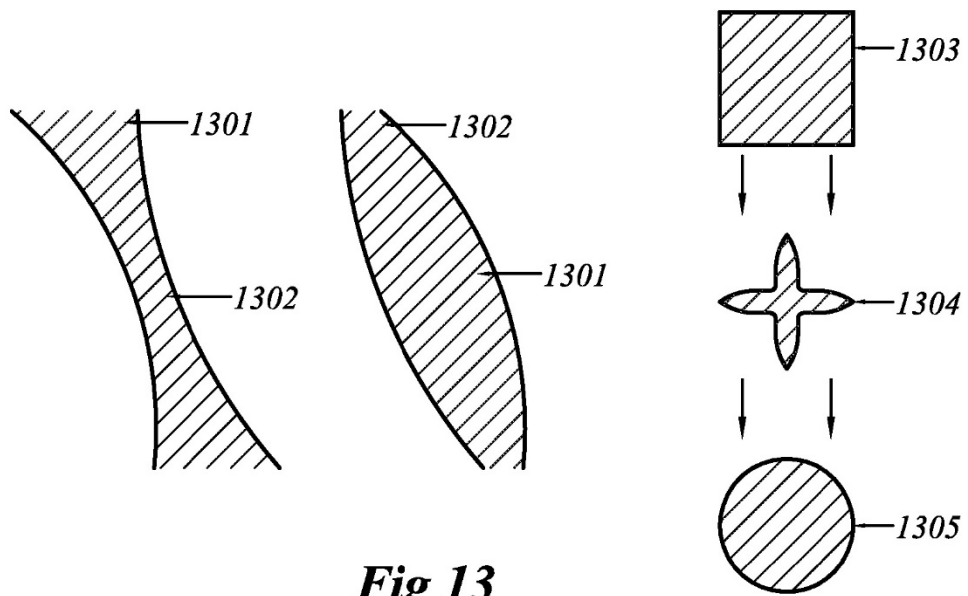


Fig 13

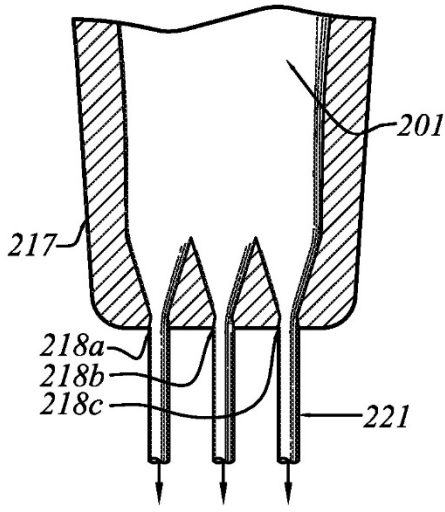


Fig 14

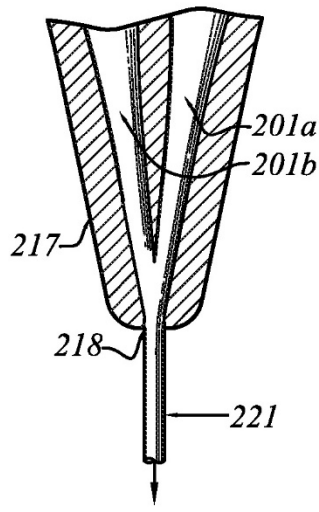


Fig 15

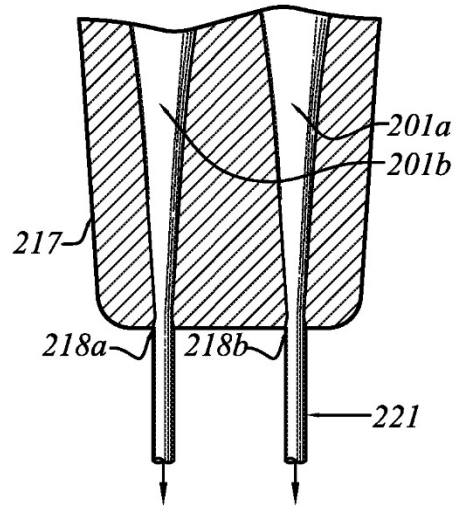


Fig 16

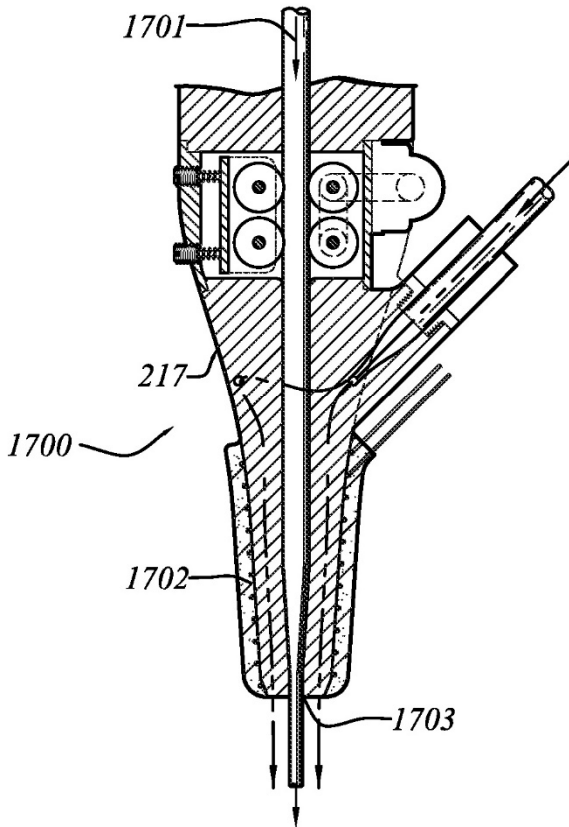


Fig 17

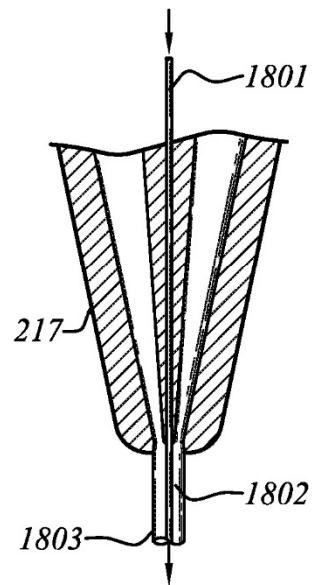


Fig 18

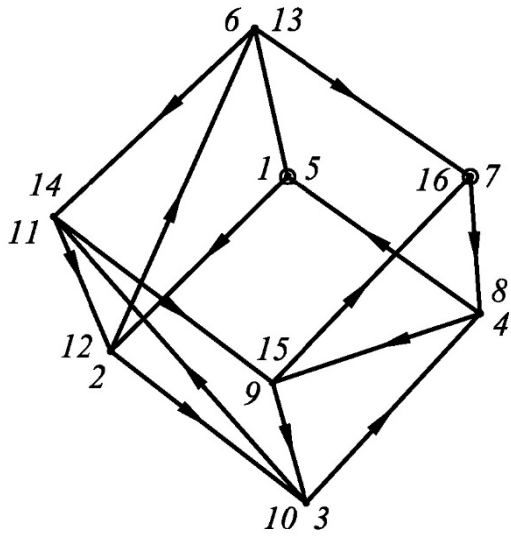


Fig 19

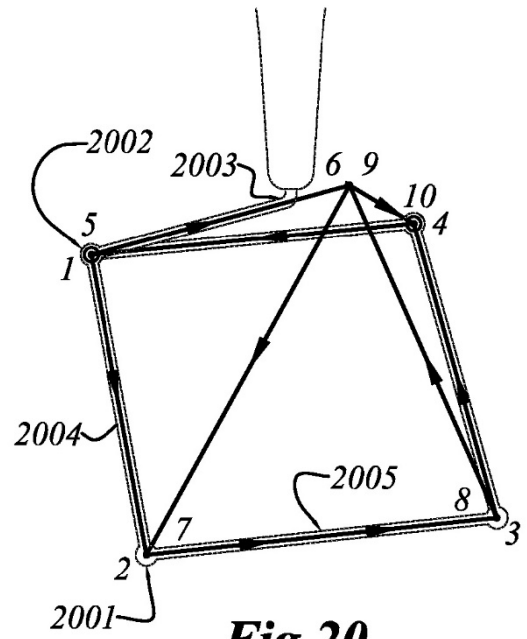


Fig 20

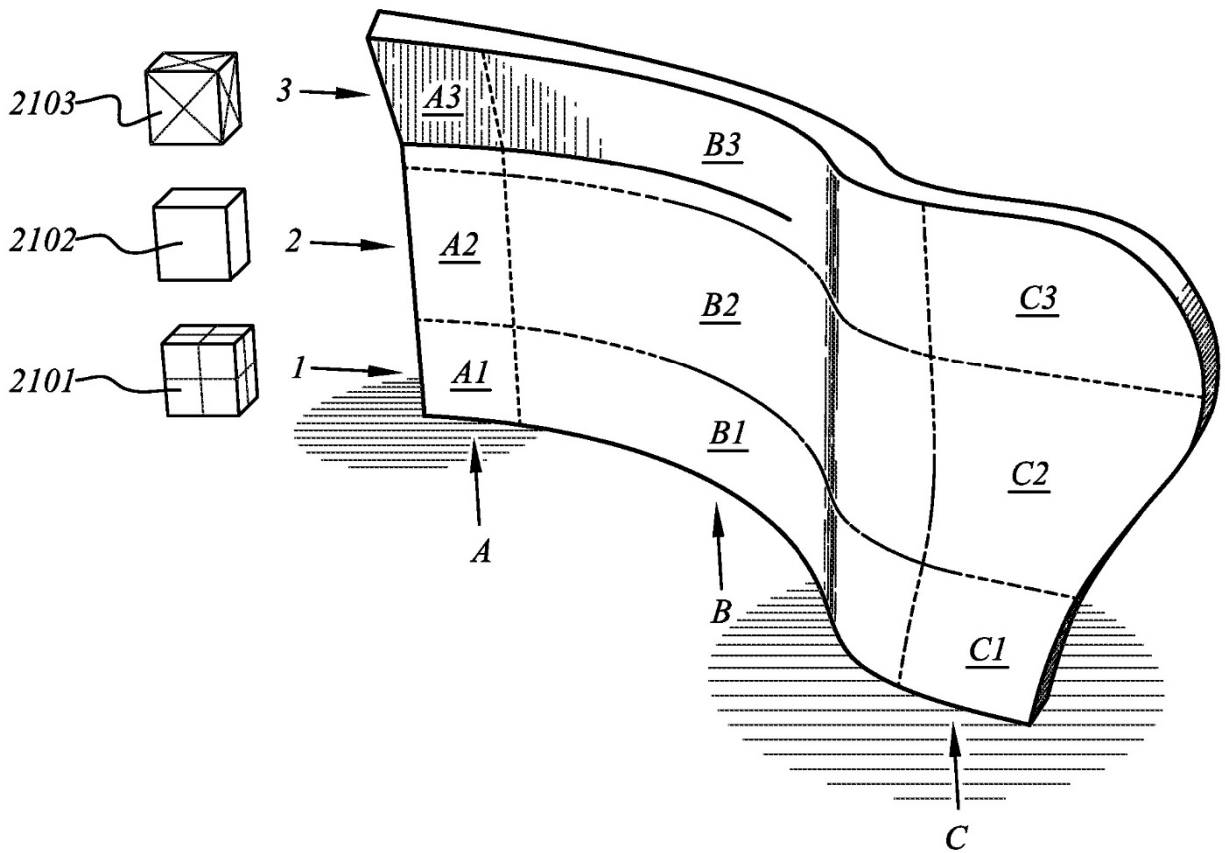


Fig 21

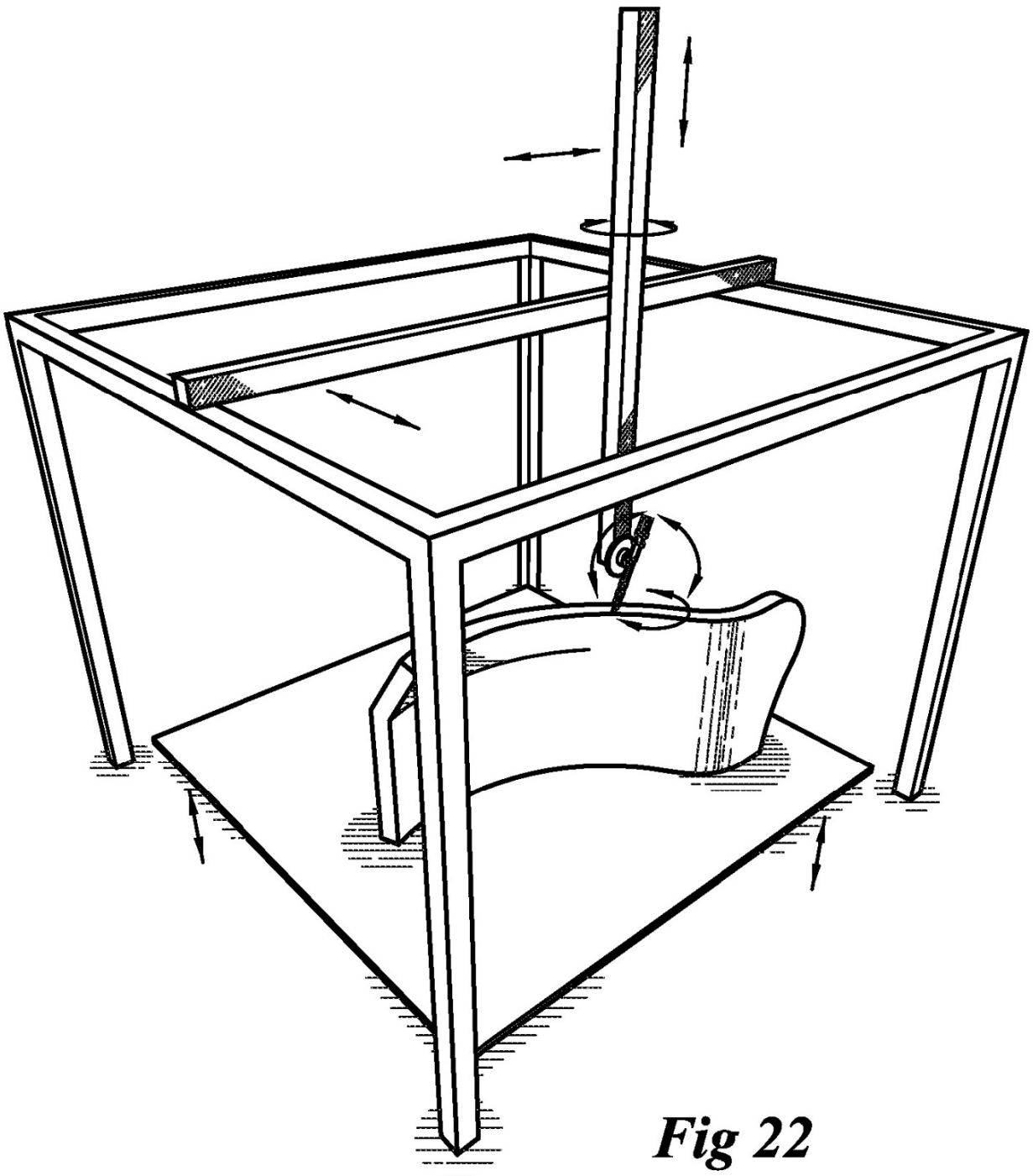


Fig 22

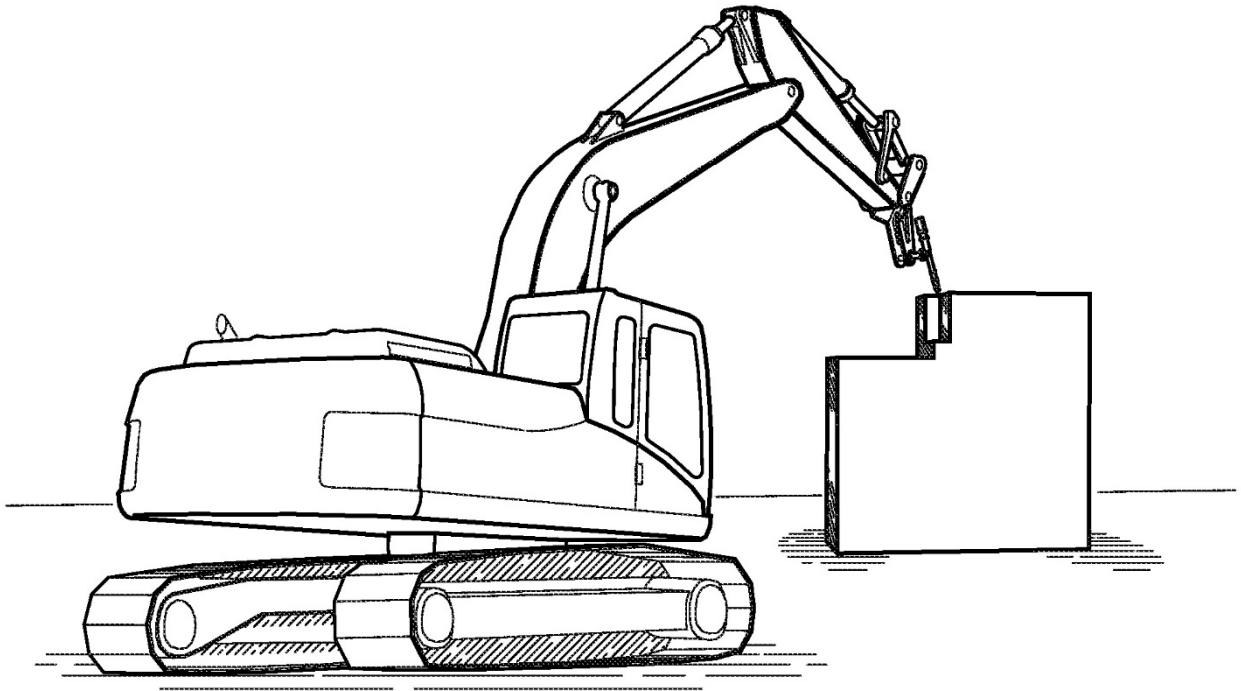


Fig 23

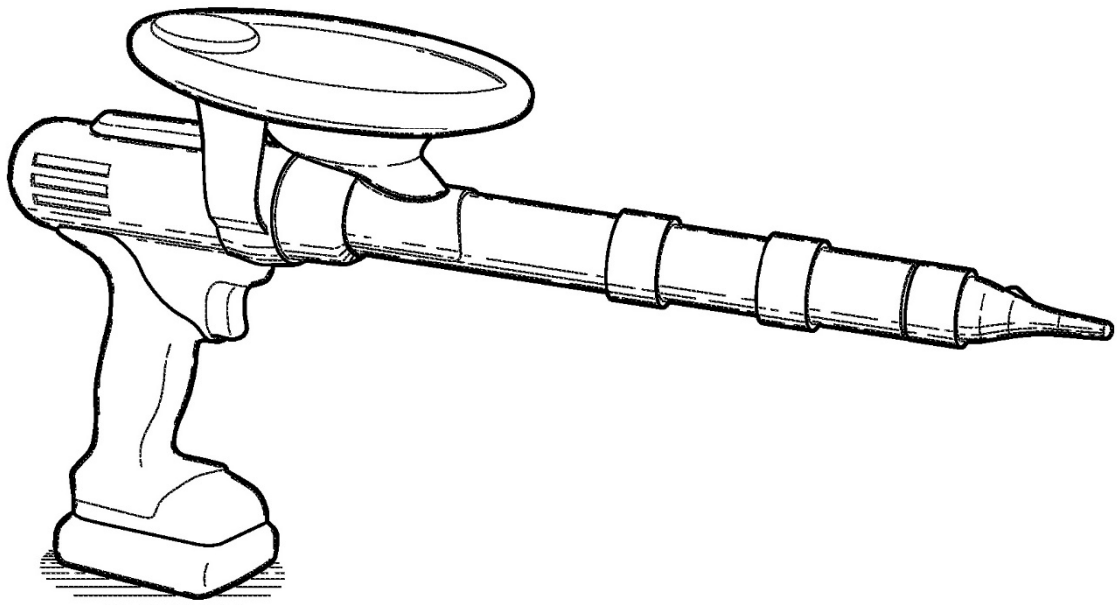


Fig 24

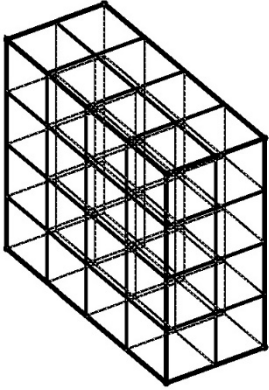


Fig 25

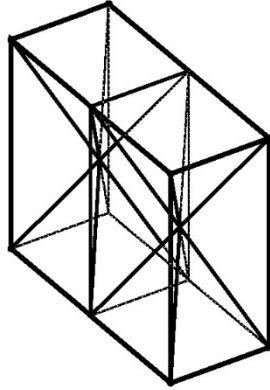


Fig 26

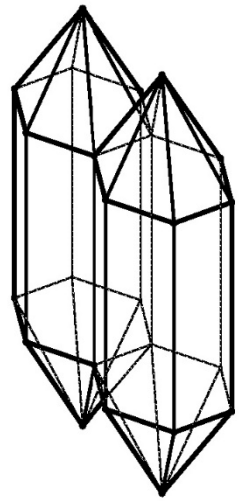


Fig 27

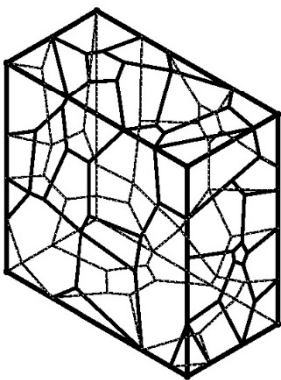


Fig 28

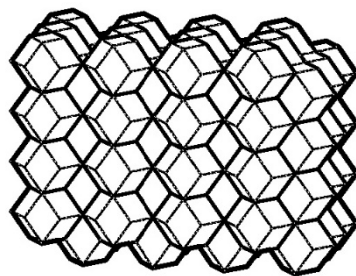


Fig 29

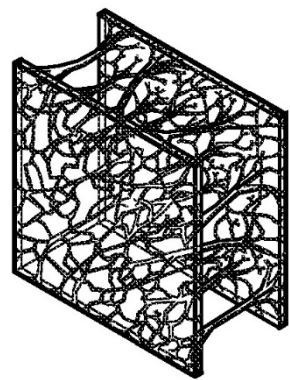


Fig 30

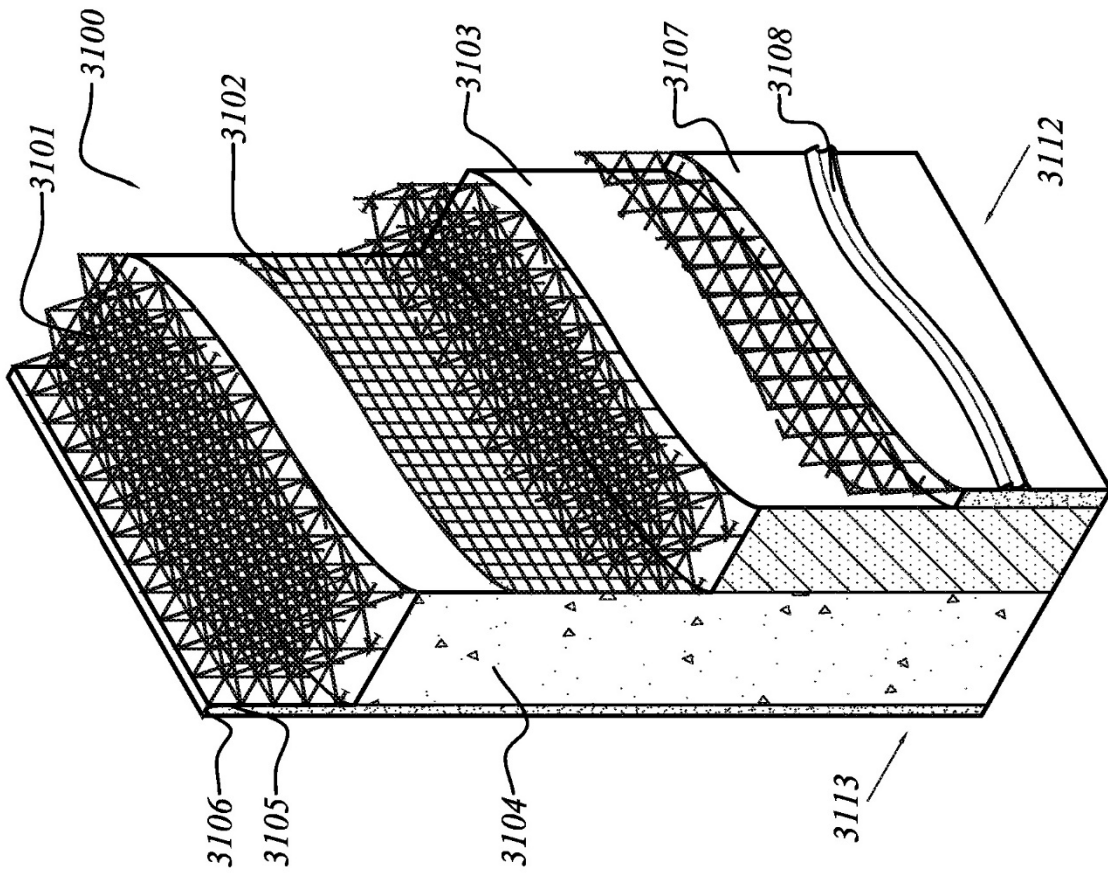


Fig 31

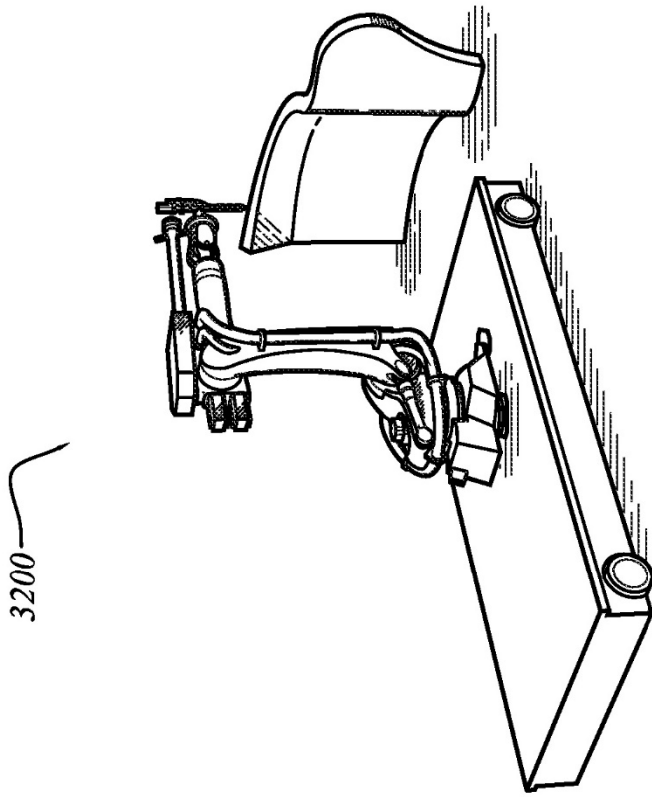


Fig 32

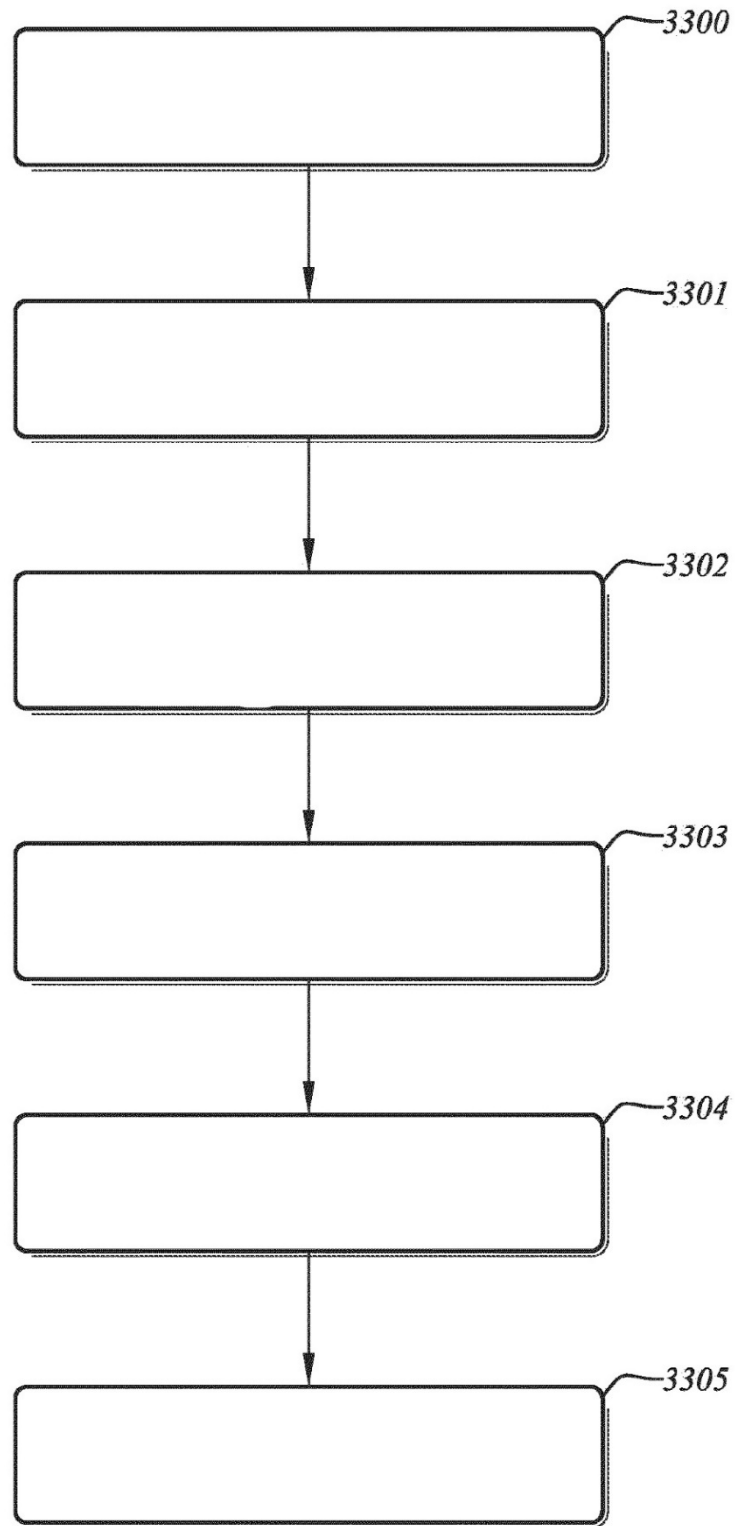


Fig 33