

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 586 148**

51 Int. Cl.:

B23K 26/04	(2006.01)	B23K 26/30	(2014.01)
B23K 26/00	(2014.01)		
C21D 7/06	(2006.01)		
C21D 1/09	(2006.01)		
B23K 26/073	(2006.01)		
B23K 26/08	(2006.01)		
B23K 26/14	(2006.01)		
G02B 27/09	(2006.01)		
G02B 27/28	(2006.01)		
B23K 26/06	(2006.01)		

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.03.2011 E 11769234 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.05.2016 EP 2558242**

54 Título: **Sistema de suministro de haz flexible para sistemas láser de alta potencia**

30 Prioridad:

16.04.2010 US 342578 P
12.11.2010 US 945713

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

11.10.2016

73 Titular/es:

METAL IMPROVEMENT COMPANY, LLC. (100.0%)
80 Route 4 East, Suite 310
Paramus, New Jersey 07652, US

72 Inventor/es:

DANE, BRENT, C.;
LAO, EDWARD, W., H.;
HARRIS, FRITZ, B.;
HURD, RANDALL, L.;
RANKIN, JON, E. y
FOCHS, SCOTT, N.

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 586 148 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistema de suministro de haz flexible para sistemas láser de alta potencia

5 Antecedentes de la invención

Campo de la invención

10 La presente invención se refiere a sistemas láser de alta energía, a sistemas de suministro de haz y a sistemas de granallado por láser adecuados para su uso con dianas estacionarias.

Descripción de la técnica relacionada

15 El uso de descargas mecánicas para formar metales y para mejorar sus propiedades superficiales se ha conseguido durante años. En la práctica industrial actual, un tratamiento de granallado de superficies metálicas se logra muy a menudo usando una descarga de alta velocidad. El tratamiento mejora las propiedades de superficie y, de manera más importante para muchas aplicaciones, tiene como resultado que una pieza muestre una resistencia significativamente mejorada a la fatiga y al fallo por corrosión. Un amplio intervalo de piezas a máquina se granallan en la industria aeroespacial y automotriz. Sin embargo, para muchas aplicaciones, el granallado no proporciona un tratamiento suficientemente intenso o profundo, no proporciona un control suficiente de la intensidad o profundidad, o no puede usarse debido a su efecto perjudicial en el acabado de la superficie.

20 Con la invención del láser, se reconoció rápidamente que las descargas intensas requeridas para el granallado podrían lograrse mediante plasma apisonado accionado por láser. B.P. Fairand, et al., "*Laser Shot Induced Microstructural and Mechanical Property Changes in 7075 Aluminum*", *Journal of Applied Physics*, Vol. 43, n.º 9, página 3893, septiembre de 1972. Normalmente, una descarga de plasma de 10 kV a 30 kV se genera en superficies metálicas mediante láseres de densidad de alta energía (aproximadamente 200 J/cm²), y longitud de pulso corto (10-30 nanosegundos). Una fina capa de cinta metálica, pintura negra u otro material absorbente en la superficie metálica se usa a menudo para proporcionar un absorbente para evitar la ablación del metal. Un material de confinación o apisonado tal como agua cubre la capa de superficie proporcionando una descarga de intensidad incrementada. Estas descargas han demostrado transmitir tensiones de compresión, más profundas y más intensas, que el granallado estándar. En los ensayos, este tratamiento ha demostrado ser superior para reforzar piezas a máquina para la fatiga y el fallo por corrosión. El granallado por láser también se usa para formar y texturar superficies.

35 Un sistema láser que se ha utilizado para este fin se describe en la anterior patente de Estados Unidos n.º 5.239.408, titulada, AMPLIFICADOR REGENERATIVO DE ALTA POTENCIA Y ALTA CALIDAD DE HAZ. El sistema láser descrito en la patente '408 antes mencionada comprende un amplificador de alta potencia en una configuración de oscilador maestro/amplificador de potencia MOPA capaz de producir pulsos de salida mayores de 20 julios por pulso con la anchura de pulso en el orden de 10 a 30 nanosegundos o menor usando una configuración de corrección de frente de onda basada en un conjugador de fase/sistema de espejo de dispersión estimulada de Brillouin (SBS).

45 En la mayoría de procesos de granallado por láser de alta energía, la posición del haz láser se mantiene en una ubicación fija. La pieza de trabajo que se trata se mueve en relación con la línea de haz láser para crear el patrón de lugar aplicado mientras se mantienen los ángulos de incidencia deseados, los tamaños del lugar y las orientaciones. Esto requiere automatización y elementos fijos de sujeción de la pieza de trabajo para agarrar la pieza de trabajo y moverla a través de sus posiciones programadas. El método se vuelve tanto costosamente como altamente específico para la pieza de trabajo, necesitando una ingeniería considerable para desarrollar procesos para nuevas piezas a máquina. Además, el tamaño de la pieza de trabajo se limita a la capacidad de elevación y manejo de la automatización utilizada. Las piezas a máquina y las estructuras mayores que la capacidad de manejo de automatización (por ejemplo, >1 m y/o >100 kg) no pueden granallarse por láser mediante el enfoque de movimiento de pieza de trabajo convencional.

55 Los sistemas de suministro de haz flexible se basan a menudo en el uso de fibras ópticas. Sin embargo, incluso en longitudes de onda donde la transmisión de fibra de vidrio es normalmente alta, la energía de pulso muy alta y la alta potencia máxima usadas en el granallado por láser pueden dañar las fibras y volverlas ineficaces. Por ejemplo, un pulso de 25 J es 100 veces la energía de pulso máxima (250 mJ) que puede suministrarse a través de una fibra de múltiples modos de 1 mm. Para haces de una única frecuencia, tal como se usa en las aplicaciones de granallado por láser representativas, las fibras de vidrio tienen incluso umbrales de daño menores. La patente de Estados Unidos n.º 7.718.921, titulada SISTEMA DE SUMINISTRO DE HAZ ACTIVO CON SEGMENTO DE TRAYECTORIA ÓPTICA VARIABLE A TRAVÉS DE AIRE, de Dane et al. (publicada el 18 de mayo de 2006, como US 2006/0102602 A1) describe un sistema de suministro de haz flexible utilizado para granallado por láser en entornos industriales, donde la diana puede ser estacionaria mientras que los pulsos láser necesarios para el granallado por láser se suministran con precisión a la superficie.

El sistema de la patente '921 usa un espejo transmisor en un montaje cardánico que dirige el haz de salida por la trayectoria de aire libre hasta una herramienta de suministro de láser que comprende un conjunto óptico (denominado en el presente documento "aguijón") que se sostiene mediante un robot industrial. Un cardán receptor en el aguijón mantiene el haz láser alineado con el eje óptico del aguijón, permitiendo que el robot de proceso apunte y escanee el aguijón por la superficie de la pieza de trabajo, generando un patrón bien definido de lugares de granallado por láser. Este ha sido un sistema exitoso en funcionamiento, usado para procesar componentes tal como palas de ventilador de motor para aviación comercial, palas de turbina de vapor para generación de potencia, y grandes discos con palas para aeronaves. Sin embargo, existen un número de desventajas en su diseño, incluyendo por ejemplo:

1. La precisión de apuntado del aguijón depende de la precisión absoluta de los ejes del robot; particularmente los ejes en la muñeca del robot. Esto tiene como resultado a menudo errores en la colocación del patrón de lugar que deben corregirse manualmente en un proceso que requiere múltiples repeticiones y puede llevar horas, días e incluso semanas en algunos casos. Afortunadamente, una vez que el patrón se ha establecido, el movimiento del robot es muy consistente, normalmente haciendo que sea innecesario repetir este ejercicio de alineación siempre y cuando la pieza de trabajo y el robot permanezcan estacionarios.

2. El robot debe recolocar el aguijón en cada pulso de láser para apuntar a un nuevo lugar en la pieza de trabajo, haciendo que la frecuencia de repetición de pulsos (PRF) esté limitada mediante la velocidad de movimiento del robot. La idea de aplicar más de un pulso para cada posición del aguijón se menciona en la patente '921 en la columna 11, línea 48-columna 12, línea 12. Sin embargo, la eficacia del enfoque mencionado se limita mediante el pequeño intervalo de escaneo disponible, y no sería eficaz para superficies complejas.

3. No existe control de la relación de aspecto para corregir el alargamiento de lugar durante el granallado fuera del eje. Esto significa que una incidencia no normal del haz tiene como resultado una forma rectangular del lugar (en lugar de cuadrada) que puede tener una relación de aspecto tan alta como 3:1 cerca de un ángulo de incidencia de 70 grados (medido desde la superficie normal). Para pequeñas áreas de lugar esto puede tener como resultado una estrecha huella de haz. Ya que la eficacia del granallado es mejor para dimensiones de lugar más grandes que crean un frente de onda más plano para la onda dinámica inducida en el metal, la huella de haz estrecha reduce la eficacia del granallado.

4. El movimiento del robot activo en la proximidad cercana de una pieza de trabajo muy valiosa puede incrementar la posibilidad de una colisión del robot y daños en una pieza del cliente.

5. La distancia de separación entre la óptica final del aguijón y el plano de tratamiento necesita mantenerse tan corta como sea posible para minimizar la cantidad de movimiento del robot necesaria para golpear diferentes superficies no paralelas de la pieza de trabajo en una incidencia casi normal.

6. La calibración del diagnóstico del perfil de energía y haz construido en el aguijón es muy sensible a la despolarización del haz en la trayectoria de suministro del haz entre la salida del láser y el aguijón.

7. Existe un control de polarización limitado. En la patente '921, la polarización de haz estaba fija con respecto a la orientación del aguijón. Un rotador de cuarzo de 90° que puede moverse dentro y fuera del haz de salida mediante una fase neumática se usó en los sistemas láser, pero la polarización todavía no podía establecerse en un ángulo arbitrario con respecto a la pieza de trabajo. Esto es particularmente importante para el granallado fuera del eje donde los reflejos desde las superficies del flujo de agua de apisonado pueden tener como resultado una pérdida significativa de potencia que podría trasladarse a la onda dinámica de granallado.

8. Los divisores de haz diagnósticos en el aguijón son susceptibles a la generación de fantasmas ópticos débiles que pueden provocar señales espurias en las cámaras de alineación y el medidor de energía.

9. El aguijón en aplicaciones industriales usaba un diseño mecánico convencional con una placa de prueba de aluminio sólida y componentes ópticos sujetos con montajes estándar a la venta. Esto tiene como resultado un conjunto pesado que supera la capacidad de carga recomendada del robot de procesamiento que sujeta el aguijón.

10. Un cerramiento óptico sin sellar en el aguijón conduce a una contaminación frecuente de superficies ópticas. Esto incrementó la necesidad de una inspección rutinaria y limpieza de los componentes ópticos ya que el polvo y los residuos de las superficies ópticas pueden conducir a un daño catastrófico en el láser.

En una adaptación del sistema de la patente '921, este se ha usado para formar por granallado por láser paneles relativamente planos. El sistema de panel plano era una célula de procesamiento fija que escaneaba los pulsos de granallado por láser sobre áreas de proceso de hasta $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$ ($48 \times 48 \text{ pulg}^2$) a partir de una única posición del cardán receptor en el aguijón. Este sistema de panel plano usó un espejo de escaneo instalado en una montura cardánica motorizada para mover el lugar por el área de tratamiento. Usando una única posición cardánica surgen problemas debido al intervalo de ángulos de incidencia en el área de proceso ya que el haz escaneado sobre el área tiene 1,2 metros (4 pies) en un lado. De esta manera, para el proceso de formación de panel, el desafío a superar era cómo mantener los lugares correctamente ubicados, rotados, formados y dimensionados, independientemente de la ubicación en el panel.

Ya que el haz láser converge en su camino a la superficie de la pieza de trabajo, incrementar la distancia de propagación a medida que el haz se aleja del centro del panel provoca que se encoja. Los ángulos no normales de incidencia provocan que el haz se alargue en la superficie a lo largo del plano de incidencia. Finalmente, si el plano de incidencia en el cardán de escaneo no es ortogonal al haz cuadrado, esto tendrá como resultado la rotación del lugar en la superficie de la pieza de trabajo.

Para superar estas distorsiones, el sistema de panel plano usaba un telescopio de zum para ajustar el ángulo de

divergencia del haz y una lente de telescopio de inclinación para preajustar la relación de aspecto. Un rotador de campo se usó para rotar el perfil del haz en la diana para compensar los reflejos de espejo cardánicos fuera de plano. Esto permite que un patrón uniforme de lugares cuadrados se coloque con precisión en la pieza de trabajo, tal como se ilustra con respecto a un campo de proceso de ejemplo en referencia a las Figuras 1(a) a 1(e).

La Figura 1(a) muestra ubicaciones de lugar A a I que corresponden a diferentes ubicaciones en un campo, donde E es el lugar central de incidencia normal que es un cuadrado. Un haz láser de convergencia se dirige a un campo de tratamiento cuadrado de 1,22 m (48") desde una ubicación cardánica estacionaria a 1,68 m (66") de la superficie de trabajo. Los lugares de esquina, A, C, I y G están a 1,89 m (74,2") del cardán. Los lugares B, F, H y D en los lados están a 1,78 m (70,2") de la superficie de trabajo. Sin correcciones, la distancia de propagación incrementada y los ángulos fuera de lo normal lejos del centro producirían las formas de lugar y los tamaños mostrados en la Figura (b). Hacer rotar los lugares usando un rotador de campo con antelación al cardán, produce el patrón simétrico mostrado en la Figura 1(c). Al ajustar la divergencia de salida usando el telescopio de zum, las áreas de lugar pueden realizarse para tener un área igual tal como se muestra en la Figura 1(d). Finalmente, al inclinar un elemento de lente de zum, la divergencia relativa horizontal y vertical se controla para generar el patrón uniforme de lugares tal como se muestra en la Figura 1(e). El sistema de panel plano era adecuado para suministrar pulsos por un área de proceso grande y esencialmente plana, con un intervalo relativamente pequeño de ángulos de incidencia en el panel para los lugares en el patrón. Sin embargo, esto no aborda los problemas anteriormente mencionados para la implementación de un sistema versátil que puede usarse con geometrías de superficie complejas encontradas en los sistemas de granallado por láser industriales.

Es aconsejable proporcionar un sistema que proporcione suficiente flexibilidad para poder tratar grandes piezas a máquina y piezas a máquina "in situ" en instalaciones de clientes, como aeronaves o piezas de aeronaves en una estación de reparación de aviación o grandes piezas a máquina de perforación de petróleo en un campo de tuberías, y sistemas que superan uno o más de los problemas antes mencionados.

El documento US 4.908.493 describe una técnica para incrementar la eficacia y la calidad del procesamiento de material láser haciendo rotar el plano de polarización de un haz láser polarizado linealmente en relación con una pieza de trabajo del material que se está procesando simultáneamente y en sincronización con la dirección del haz láser sobre la pieza de trabajo para mantener el plano de polarización paralelo al plano de incidencia o la dirección de recorrido del haz en relación con la pieza de trabajo.

Sumario de la invención

Los aspectos particulares y preferentes de la presente invención se exponen en las reivindicaciones adjuntas independientes y dependientes.

Un sistema y método de suministro de haz se describen para hacer posible el suministro de energía láser de alta potencia con áreas de impacto precisamente controladas y polarización sobre una o más superficies diana en piezas a máquina, donde las superficies diana pueden o no descansar en un único plano y cada una de las cuales puede tener curvaturas únicas o compuestas (es decir, superficies no planas que tienen curvaturas en más de una dimensión). Por ejemplo, la energía láser puede suministrarse a un área de proceso que puede tener curvaturas compuestas en una superficie diana de la pieza de trabajo mediante un proceso que incluye colocar un conjunto óptico (denominado "agujón" en el presente documento) que tiene una óptica de recepción, óptica de formateo de haz y un escáner montado sobre el mismo, en una posición para recibir energía láser desde una fuente láser. Mientras que la posición del agujón permanece sin cambios, la energía láser se suministra a la óptica de recepción y se dirige usando un escáner hacia áreas de impacto que tienen formas nominales y ubicaciones en el área de proceso de acuerdo con un patrón. Para cada ubicación en el área de proceso, la tecnología de suministro de haz descrita en el presente documento permite el ajuste de dirección, divergencia, polarización, rotación de campo y relación de aspecto de la salida de energía láser desde el escáner, para controlar la forma de polarización y la ubicación de la energía láser en las respectivas áreas de impacto. Para procesos como el granallado por láser, la energía láser comprende una pluralidad de pulsos de láser que se distribuyen sobre una agrupación de áreas de impacto dispuestas adyacentes entre sí dentro de una tolerancia de proceso. Las formas nominales y las áreas de impacto para la pluralidad de pulsos de láser del área de proceso son uniformes y cuadradas o rectangulares. La tecnología de suministro de láser descrita en el presente documento permite el suministro de los pulsos de láser para que las áreas de impacto actuales se alineen dentro de tolerancias de proceso y mantengan la forma cuadrada o rectangular deseada.

La tecnología se describe para calibrar un controlador que controla los componentes ópticos en el agujón para dirigir la energía láser al área de proceso. Para una posición determinada del agujón, como resultado de la calibración, los parámetros calibrados para dirección, divergencia, polarización, rotación de campo y relación de aspecto se proporcionan para cada área de impacto en el patrón. El proceso de calibración puede incluir alinear un haz indicador con marcas de alineación en la pieza de trabajo usando una cámara montada en el agujón. Después se usan ajustes derivados de ese proceso de alineación para definir una geometría para la pieza de trabajo, y se traslada la geometría a los parámetros calibrados.

En una realización descrita en el presente documento, la fuente de la energía láser comprende una óptica de reflejo, tal como un espejo, que puede ajustarse para dirigir la energía láser a la óptica de recepción en el agujón. El

conjunto que incluye esta óptica y sus medios de ajuste se denominan transmisor óptico. En esta realización, la óptica de recepción comprende un espejo receptor que puede ajustarse en combinación con el transmisor óptico para reflejar energía láser en un segmento de trayectoria óptica con un componente de polarización controlable, un componente de relación de aspecto controlable, un componente de divergencia controlable y el escáner en el agujón.

Para realizaciones en las que la polarización del haz de salida puede ser importante, las áreas de impacto se caracterizan mediante un procesador que usa vectores normales de superficie nominal, y la polarización se controla haciendo rotar la polarización del haz en el agujón para que la energía láser tenga la polarización P para los vectores normales de superficie nominal para las áreas de impacto correspondientes.

La tecnología se describe como compatible con el suministro de energía láser en áreas de impacto en un patrón para una pieza de trabajo que tiene superficies que se caracterizan mediante vectores normales de superficie nominal inclinados en relación con la línea desde el escáner, en el que las inclinaciones de los vectores normales de superficie nominal para al menos dos áreas de impacto en el área de proceso a la que da servicio una única posición del agujón, se diferencian mediante hasta 60 grados, y en algunas realizaciones 90 grados o más.

Además, la tecnología se describe para detectar potencia de energía láser polarizada suministrada al agujón de una manera que utiliza divisores de haz independientes de la polarización.

Se describe un aparato para suministrar energía láser. El aparato incluye un agujón montado en un robot u otra montura usada para mantener o establecer la posición del agujón, donde el agujón incluye una óptica de recepción, óptica de formateo de haz y un escáner tal como se ha descrito antes. El aparato incluye un sistema láser adaptado para producir energía láser junto con un sistema de suministro de haz para dirigir energía láser desde el sistema láser a la óptica de recepción en el agujón. Un controlador de rotación en la trayectoria óptica entre el sistema láser en el escáner es controlable para ajustar el campo de rotación de la energía láser de un lugar a otro. Además, un sistema de control se incluye y se acopla al sistema láser, el robot, el agujón y el sistema de suministro de haz, y se programa para colocar el agujón en una posición para recibir energía láser desde el sistema láser por medio del sistema de suministro de haz, y mientras que la posición del agujón permanece sin cambios, para dirigir la energía láser usando el escáner a áreas de impacto que tienen formas nominales y ubicaciones en el área de proceso de acuerdo con un patrón. Para cada área de impacto en el patrón, el controlador puede establecer la dirección, divergencia, polarización, rotación y relación de aspecto de la salida de energía láser desde el escáner para controlar la polarización, forma y ubicación de la energía láser en las respectivas áreas de impacto.

Otros aspectos y ventajas del sistema de suministro de haz pueden verse al revisar los dibujos, la descripción detallada y las reivindicaciones que aparecen a continuación.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 ilustra distorsiones de lugar que surgen a partir del uso un espejo ráster para suministrar pulsos de láser a una superficie plana, y correcciones para las distorsiones.

La Figura 2 es un diagrama de un sistema de suministro de haz láser tal como se describe en el presente documento configurado para el granallado por láser de una pieza de trabajo.

La Figura 3 es un diagrama de óptica de entrada y un espejo de transmisión para sistemas de suministro de energía como los de la Figura 2.

La Figura 4 es un diagrama de un agujón montado en un robot, que incluye un espejo de recepción, óptica de formateo de haz y componentes de diagnóstico para su uso en cooperación con el sistema de la Figura 3.

La Figura 5 ilustra un telescopio de zum con una fase de traslado lineal para ajustar una lente de entrada, como la usada en el conjunto de la Figura 4.

Las Figuras 6A-6C incluyen imágenes de distorsión de lugar que surgen a partir del uso de una fase de traslado lineal para ajustar la divergencia de un haz en un telescopio de zum como el de la Figura 5.

La Figura 7 es un gráfico que muestra la reflectividad frente al ángulo de incidencia para componentes de polarización P y polarización S de un haz láser en la superficie de un material tal como un fluido de apisonado usado en un proceso de granallado por láser.

La Figura 8 ilustra una disposición de divisor de haz, conocida en los sistemas de la técnica anterior.

La Figura 9 ilustra un divisor de haz independiente de la polarización que puede usarse en un sistema como el de la Figura 4.

La Figura 10 es un gráfico de fracción reflejada frente a ángulo de polarización de entrada para un sistema como el de la Figura 9, con y sin el rotador de polarización.

La Figura 11 es un dibujo de una porción de una pieza de trabajo que tiene superficies compuestas, incluyendo una máscara de cobertura con marcas de alineación sobre la misma.

La Figura 12 ilustra patrones que comprenden agrupaciones de áreas de impacto rectangulares o cuadradas de pulsos de láser en las áreas de proceso de los lados posterior, de arista y delantero del resalte mostrado en el dibujo.

La Figura 13 es una imagen de una interfaz de usuario para un sistema informático usado para la calibración de la óptica de suministro de haz como las descritas en el presente documento.

La Figura 14 ilustra la geometría de un proceso para calibrar la óptica de suministro de haz para generar un patrón como el de la Figura 12 en una pieza de trabajo que tiene superficies compuestas.

La Figura 15 ilustra la relación espacial entre la posición de los componentes ópticos de un sistema de suministro de haz como el descrito en el presente documento, y las áreas de proceso en una pieza de trabajo, que puede usarse para producir parámetros calibrados para controlar los componentes ópticos.

La Figura 16 es un diagrama de flujo simplificado para un proceso de granallado por láser usando técnicas de suministro de haz tal como se describe en el presente documento.

La Figura 17 es un diagrama simplificado de un sistema alternativo, que incluye un espejo giratorio.

10 Descripción detallada

Una descripción detallada de realizaciones de la presente invención se proporciona en referencia a las Figuras 1-16.

Se describe un sistema de suministro de haz móvil que minimiza el movimiento del robot durante el granallado por láser. El sistema de haz móvil proporciona una herramienta que puede usarse por un amplio intervalo de procesos de producción, incluyendo pero sin limitarse a, retirada de revestimiento láser, tratamiento de calor por láser y granallado por láser.

Al usar un sistema de suministro de haz móvil como el representado mediante las realizaciones descritas en el presente documento, una porción significativa de un patrón de granallado por láser puede aplicarse por una pieza de trabajo que tiene superficies compuestas a partir de un única posición del agujijón/robot; correcciones del tamaño del lugar del láser, de la rotación del lugar, de la relación de aspecto y de la divergencia para colocar áreas de impacto cuadradas (o rectángulos de relación de aspecto baja) por un área de proceso en una superficie de tratamiento de una forma compleja conocida; la frecuencia de repetición del láser puede incrementarse sustituyendo el movimiento del robot para cada lugar del láser por ajustes ópticos de alta velocidad y un escaneo del haz de espejo cardánico; pueden incorporarse métodos de alineación de patrón precisos que usan el haz láser actual (indicador) y pueden completarse en minutos; la capacidad de manejar el agujijón a partir de una ubicación fija (o en una simple fase lineal) que puede en algunos casos eliminar la necesidad de un manipulador del robot; puede proporcionarse el control de polarización ajustable continuamente en la pieza de trabajo; la corrección de despolarización puede implementarse en el diagnóstico del agujijón, mejorando la calibración de energía y la formación de imágenes cerca del campo; el número de fantasmas ópticos en la detección del haz indicador y en los sistemas de medidor de energía puede reducirse; el peso total del conjunto de agujijón puede reducirse y la óptica de formateo de haz puede sellarse contra la contaminación exterior.

La Figura 2 muestra un esquema de un sistema de granallado por láser. Este no pretende ser un diseño a escala de un sistema actual sino que ilustra componentes básicos y su distribución. El sistema de la Figura 2 incluye un láser 100 en una configuración de oscilador maestro/amplificador de potencia, tal como se describe en la anterior patente '921, u otra fuente de energía láser, que proporciona pulsos de salida de única frecuencia y polarizados en sistemas preferentes. El láser 100 se monta en una mesa láser 101 estable. La salida desde la fuente de energía láser se aplica a la óptica de entrada 102 que puede incluir componentes para condicionar el haz para el suministro a través de un telescopio de retransmisión 103 a un espejo de transmisión 105A montado en un cardán de espejo de transmisión 105. Otros transmisores ópticos también pueden usarse. El espejo de transmisión 105A bajo control de precisión refleja el haz en un espejo de recepción 106A (u otra óptica) montado en un cardán de espejo de recepción 106 en el agujijón, que se hace funcionar de igual manera bajo control de precisión. El espejo de recepción 106A en el cardán de espejo de recepción 106 es parte de un agujijón 107 montado en el robot, que se coloca a su vez mediante el robot 108, que puede ser un robot de precisión que tiene por ejemplo 7 grados de control de posición de precisión. El agujijón 107 incluye componentes de diagnóstico y de formateo de haz en un alojamiento sellado a través del que el haz se dirige a un escáner, implementado en este ejemplo mediante una óptica de escáner 117A (tal como un espejo) montada en un cardán 117 controlado con precisión en el agujijón, para dirigir el haz a una ubicación diana en una superficie de una pieza de trabajo 109. En esta realización, la pieza de trabajo 109 puede ser parte de un gran artículo fabricado, tal como el ala de un avión u otra gran máquina, y puede incluir áreas de proceso con superficies compuestas. El robot 108 puede montarse en una paleta transportable con cojinetes de aire, por ejemplo, para colocarse dentro de un intervalo operativo de la pieza de trabajo. Como alternativa, las piezas a máquina pueden montarse en un sujetador de piezas rotativo, o colocarse de otra manera cerca del robot 108 para el procesamiento. Los agujijones 107 en realizaciones descritas en el presente documento incluyen óptica de ráster que es compatible con la dirección de los pulsos de láser sobre una agrupación de ubicaciones, mientras que el agujijón 107 permanece en una posición fija. La colocación del agujijón para la aplicación de los pulsos de láser hacia las dianas se facilita mediante el intervalo de direcciones de salida {00252930.DOC} que pueden lograrse. En algunas configuraciones, el agujijón configurado tal como se describe aquí puede montarse en una fase X-Y, con o sin mecanismos de movimiento vertical, en lugar de robots complejos con 7 grados de movimiento, soportando el movimiento del agujijón 107 sobre un área predeterminada. Otros sistemas de colocación de agujijón pueden implementarse, adecuados para una instalación particular, que actúan como monturas para el agujijón para mantener la coordinación de colocación precisa con la óptica de transmisor del sistema láser.

Un robot de suministro de agua 111 se coloca de igual manera cerca de la pieza de trabajo 109 e incluye un vaso 111A para el suministro de fluido de apisonado en la aplicación de granallado por láser. El robot 111 en las

realizaciones de la tecnología también puede controlar la colocación de una sonda táctil de metrología de medición coordinada (tal como en el estilo Renishaw) en caso deseado, para su uso durante operaciones de granallado por láser. El robot de suministro de agua 111 se usa para suministrar la capa de apisonado transparente a la superficie de la parte tratada. Un sistema alternativo integra un vaso de suministro de agua en el robot 108 junto con el agujijón 107 montado en el robot.

Un sistema de control en este ejemplo incluye ordenadores configurados como un controlador 112 para el robot 111, un controlador 113 para el robot 108 y un controlador 114 para coordinar el funcionamiento de los robots y componentes ajustables en el sistema de suministro de haz y en el láser 100, y otros componentes controlables se proporcionan con el sistema. El sistema de control puede implementarse usando uno o más procesadores controlados por programa, que tienen programas de control numéricos y otros programas para calibrar y colocar los robots, y para la calibración y el control de los componentes ópticos basados en modelos 3D de diseño asistido por ordenador CAD de las piezas a máquina y el espacio de colocación de los robots, etc.

La trayectoria óptica básica desde la óptica de entrada 102 a la pieza de trabajo diana puede entenderse en referencia a tres vueltas mayores en esta realización, todas controladas usando óptica en cardanes de alta velocidad y alta resolución. La trayectoria óptica incluye un segmento 120, entre el espejo de transmisión 105A y el espejo de recepción 106A, que es esencialmente recto y tiene una longitud variable a través del aire, y una dirección variable definida mediante la configuración del ángulo del cardán de espejo de transmisión. La longitud variable se controla mediante el robot 108 basándose en la colocación del agujijón 107. De igual manera, la dirección variable se ajusta usando los cardanes 105, 106 de acuerdo con la colocación del agujijón 107. En la realización ilustrada, el segmento 120 se extiende a través del aire libre, es decir, sin un cerramiento tal como un tubo. En otras realizaciones, un tubo telescópico u otro cerramiento podría proporcionarse siempre y cuando sea suficientemente ajustable. La trayectoria óptica también incluye un segundo segmento 121 desde la óptica de recepción 106A a la óptica de escáner 117A a través de los componentes diagnósticos y de formateo de haz en el alojamiento para el agujijón 107. La trayectoria óptica incluye un segmento final 122 desde la óptica de escáner 117A a la superficie diana. Un sensor de imagen 125, tal como una cámara, se monta adyacente a la óptica de escáner, y está dispuesto para proporcionar una imagen de la diana cerca de la ubicación del área de impacto a golpear mediante una configuración determinada de los componentes ópticos. El sensor 125 puede usarse para la calibración del sistema para superficies de diana compleja tal como se describe a continuación.

Una cámara de proceso puede implementarse, incluyendo una puerta de acceso para técnicos, una puerta de acceso para piezas que permite el acceso a un sujetador de piezas y un obturador para admitir la radiación láser. Una cámara de proceso permite la provisión de un entorno controlado para el funcionamiento del robot 108. La cámara de proceso puede montarse en una plataforma, tal como un tablón móvil o de cimentación, y el cardán de espejo de transmisión 105, el robot 108 con el agujijón 107 montado en el robot, el robot 111 y el sujetador de piezas pueden montarse sobre la misma en una relación espacial fija. El láser 100 y la óptica de entrada 102 se montan en fases separadas, que pueden acoplarse de cerca con la cámara de proceso. Los telescopios en la óptica de entrada 102 pueden configurarse para proporcionar cientos de pies de propagación del haz entre la mesa láser 101 y la cámara de proceso en caso necesario mediante limitaciones de espacio en el área inmediata de la cámara de proceso.

La Figura 4 ilustra la configuración básica del agujijón cardánico doble (DGS). Al igual que el sistema de haz móvil anterior, éste usa un cardán transmisor para suministrar el haz láser de alta energía por la trayectoria de aire libre hasta un cardán receptor en el agujijón que se sostiene mediante un robot de procesamiento. Un sistema de control de bucle cerrado usa un haz indicador de baja potencia y onda continua (CW) que se coalinea precisamente con el haz pulsado de alta energía para mantener una alineación precisa a través del agujijón. Tal como se muestra en la Figura 4, el DGS añade un segundo cardán a la salida del agujijón, permitiendo que el haz se escanee por una superficie de tratamiento desde una ubicación de agujijón fija. La óptica de formateo contenida en el agujijón corrige la divergencia del haz, la forma del haz y la polarización para lograr un patrón uniforme de los lugares cuadrados por la pieza de trabajo. También contenidos en el DGS se encuentran unos sensores diagnósticos para medir el perfil del haz y la energía del pulso de láser.

El robot de proceso que sujeta el DGS se monta en una paleta equipada con cojinetes de aire para permitir que se mueva fácilmente a diferentes ubicaciones en la célula de trabajo, según sea necesario. Tal como se ha mencionado antes, también puede usarse otra tecnología de montaje DGS.

La Figura 3 ilustra una distribución para óptica de entrada hasta el espejo de transmisión, etiquetado como M55 en la Figura 3, que se corresponde con el espejo de transmisión 105A en la Figura 2. La fuente láser 300 proporciona un haz de salida en la línea 301 que define un primer segmento de la trayectoria óptica. El haz de salida puede ser cuadrado en sección transversal y polarizado. El espejo M50 refleja el haz en la línea 302 que define un segundo segmento de la trayectoria óptica respecto a la óptica de alineación activa que comprende un láser de alineación AL50, una placa de media onda WP50, una lente L50, un polarizador P50, una lente L51 y una cámara C50. El haz que se propaga a través del polarizador P50 continúa hasta un tercer segmento de la trayectoria óptica a lo largo de la línea 303 a través de la placa de onda WP51 hasta la óptica de rotador de campo que comprende el espejo M51, el espejo M52 y el espejo M53. Desde el espejo M53, el haz según se ha rotado se propaga en un cuarto segmento

de la trayectoria óptica en la línea 304 hasta el espejo M54. El espejo M54 gira el haz a través de un telescopio de transporte de haz (también llamado telescopio de retransmisión) que comprende la lente L52 y la lente L53, en un quinto segmento de la trayectoria óptica a lo largo de la línea 305 hasta el espejo de transmisión M55 montado en un cardán. Las ventanas W50 y W51 definen la entrada y la salida de una cámara de vacío (no se muestra) para el telescopio, en el que el haz se lleva a través de un foco. El espejo de transmisión M55 gira el haz en un ángulo variable a lo largo de un sexto segmento de la trayectoria óptica en la línea 306, que se dirige al espejo de recepción en el agujijón montado en el robot tal como se ha descrito antes, a través de una longitud variable de aire.

El láser de alineación AL50 en una realización comprende un láser de onda continua (CW, es decir, no pulsado) para verificar la alineación correcta, para hacer posibles ajustes de realimentación en la alineación entre descargas de láser y para procesos de calibración descritos a continuación. La salida de este láser se denomina haz indicador. En una realización, el láser de alineación AL50 comprende un láser Nd:YLF bombeado por diodos que produce una potencia de salida relativamente baja (<500 mW). El láser de alineación AL50 tiene la misma longitud de onda o similar que la fuente láser 300 de granallado, o se configura de otra manera para que el reflejo y las propiedades de enfoque del haz de alineación a través de toda la óptica pueden usarse fiablemente para la alineación del haz de alta potencia.

La salida divergente del láser de alineación AL50 (<500 mW) se colima mediante la lente L50 y se combina con la trayectoria del haz de alta potencia en el divisor de haz de polarización P50. Usando la placa de media onda WP50, la polarización del láser de alineación se establece en la polarización S para que se refleje en el polarizador en la línea de haz 303. Una pequeña porción del haz de alta potencia transmitida en la polarización P se refleja en el polarizador P50, y una pequeña porción del haz de alineación se transmite a través del polarizador P50 a la cámara C50. La cámara de diagnóstico C50 detecta las colocaciones de los haces de alineación y de alta potencia, y proporciona una realimentación para lograr una coalineación precisa. La cámara se coloca en el foco de la lente L51. Cuando el campo lejano (punto focal) de la pequeña fuga del haz de alta potencia reflejado desde la superficie del polarizador P50 se superpone precisamente con el punto focal de una porción del haz de alineación que se transmite a través del polarizador P50, entonces se confirma la coalineación. La placa de onda WP50 puede rotar para permitir que se ajuste la fracción de la transmisión de haz de alineación a través del polarizador P50.

La rotación de la sección transversal del haz que es resultado de la trayectoria de haz 305 en la Figura 3, que no es paralela a la trayectoria de haz entre M56 y M80 en la Figura 4, se compensa en la óptica de rotador de campo. Por ejemplo, en un sistema de granallado por láser, una sección transversal de haz cuadrado, u otra forma rectangular es preferente. Dependiendo del ángulo relativo entre el plano que contiene los haces incidentes y reflejados en el espejo de transmisión M55 montado en el cardán y el plano que contiene los haces incidentes y reflejados en el espejo de recepción M56 montado en el cardán (el espejo M56 se muestra en la Figura 4), el haz cuadrado rotará con respecto a las coordenadas del agujijón montado en el robot. La óptica de rotador de campo hace rotar con antelación la sección transversal del haz para que la orientación del lugar deseada se suministre a la superficie diana. La óptica de rotador de campo consiste en tres espejos M51-M53 que se montan de manera rígida en una estructura común que puede rotar alrededor del eje del haz de entrada usando una fase rotativa controlada de manera remota. Ya que existe un número impar de reflejos (3), hacer rotar estos tres conjuntos de espejos provocará que el haz cuadrado rote a un ritmo de 2X, es decir, una rotación del conjunto de espejos de 45 grados provocará una rotación completa de 90 grados del haz. En el caso de un haz cuadrado, una rotación de $\pm 22,5$ grados del rotador de campo proporcionará todas las orientaciones de haz requeridas. Otras disposiciones ópticas pueden utilizarse para proporcionar rotación de campo. Ya que los elementos de rotación de campo son relativamente grandes, es preferente que se monten en la óptica de entrada en lugar de en el agujijón en el robot. Sin embargo, en otras realizaciones, los elementos de rotación de campo pueden colocarse en otras ubicaciones en la línea del haz.

Es aconsejable que la polarización del haz de entrada respecto al DGS sea de polarización P para minimizar las pérdidas ópticas desde los divisores de haz WS58 y WS68 en la Figura 4. El rotador de polarización WP51 en la Figura 3 se usa para ajustar el ángulo de polarización del haz, independiente del ángulo de rotación de campo para preservar la polarización P en WS58, independientemente de la orientación del haz cuadrado en ese punto en el sistema óptico.

El telescopio de transporte, formado a partir de las lentes L52 y L53, sirve para ampliar el haz cuadrado y para retransmitir una imagen óptica por la trayectoria de propagación libre hasta la cabeza de procesamiento que comprende el agujijón montado en el robot. A través de este telescopio, el haz se magnifica en una realización aproximadamente 1,4X respecto a una dimensión nominal de 23 mm cuadrados a 32,5 mm. Esto tiene tres funciones. La primera es que el área del haz se incrementa 2X en los espejos transmisor y receptor, disminuyendo el riesgo de daño óptico. La segunda función es que la distancia de la transmisión del telescopio se incrementa mediante la magnificación al cuadrado (es decir, 2X) haciendo que sea posible proporcionar una imagen real bien definida en el plano de tratamiento distante. Finalmente, la magnificación del haz incrementa el intervalo de Raleigh (definido como el doble del parámetro confocal) en 2X con una magnificación de 1,4 veces, mejorando las características de propagación de espacio libre del haz. Está tercera función es importante ya que el telescopio de retransmisión óptica y el telescopio de suministro de haz en la cabeza de procesamiento se han optimizado para una única distancia de propagación. Sin embargo, ya que la cabeza de procesamiento se hace maniobrar dentro de un

ángulo sólido de procesamiento de ± 45 grados, la distancia de propagación actual entre los cardanes puede variar hasta ± 1 m. Esta variación puede ser incluso mayor en el caso de la disposición para granallado de láser *in situ* de piezas grandes como se muestra en la Figura 2.

5 Los cardanes transmisor y receptor son de diseño y especificaciones similares en una realización del sistema. El motor para un sistema representativo en cada eje tiene una resolución de $25 \mu\text{rad}$ (5,2 arcosegundos), una repetibilidad de $50 \mu\text{rad}$ (10,3 arcosegundos) y una precisión absoluta de $100 \mu\text{rad}$ (20,6 arcosegundos). Estas especificaciones son para el haz reflejado actual; los valores para los ángulos de espejo son tanto como 2X menores, dependiendo de la orientación del espejo. Los espejos transmisor y receptor son de 10,16 cm (4") en diámetro en una realización representativa, y tienen un alto revestimiento de umbral de daños que refleja eficazmente el haz sobre un ángulo de intervalo de incidencia de 15-55 grados.

15 La Figura 4 muestra un esquema de los componentes ópticos y las trayectorias de haz dentro del DGS tal como se monta en una estructura de soporte 50, que a su vez se monta en un robot para una orientación precisa. Un haz láser entrante se refleja desde el espejo cardánico M56 receptor mostrado en la parte inferior de la figura. Una ventana protectora W57 en la entrada y una ventana protectora W39 en la salida del cerramiento DGS crean un entorno limpio y sellado para los componentes ópticos. El sistema de control siempre mantiene la polarización P para el haz entrante que tiene como resultado un reflejo del 0,6 % desde el primer divisor de haz WS58 sin revestir. El haz reflejado rota a una polarización S mediante un rotador de cuarzo WP59 de 90° , provocando un 8 % de reflejo desde el siguiente divisor de haz WS60 que se dirige a un medidor de energía calibrado EM61, que puede comprender un sensor piroeléctrico u otro tipo de sensor de potencia o energía. El haz que se transmite a través del divisor de medidor de energía WS60 se hace pasar a través de otro divisor de compensación WS62, que tiene una cuña óptica que cancela el ángulo de desviación, el desplazamiento del haz y la remodelación del haz desde el divisor de haz WS60 de medidor de energía. El haz se refleja entonces mediante otro divisor de haz WS63 en un telescopio diagnóstico, incluyendo las lentes L64 y L65, con el divisor de haz WS66 entre medias. El telescopio diagnóstico dirige una imagen del haz desde un plano de imagen aproximadamente en la rendija de salida del sistema láser, a la cámara P67 de perfil del haz, que registra un perfil del haz.

30 Después de pasar a través del divisor de haz de alta energía WS58, el haz principal golpea entonces el divisor de haz indicador WS68. El divisor WS68 tiene una cuña óptica que cancela el ángulo de desviación, el desplazamiento del haz y la remodelación del haz desde el divisor de haz de alta energía WS58. La primera superficie del divisor de haz indicador WS68 refleja $< 0,3$ % del haz pulsado de alta energía, pero refleja el 16 % del haz indicador que es de polarización S. El haz muestreado se dirige mediante otro divisor de haz WS69 a un telescopio diagnóstico que incluye lentes L70 y L71 con el divisor de haz WS73, y que está equipado con dos cámaras: la cámara de apuntado C74 de haz indicador en la trayectoria del haz reflejado en el divisor de haz WS73, y la cámara de centrado C84 de haz indicador en el foco de la lente de salida L71. La cámara de centrado C84 registra una imagen del haz indicador en la superficie del espejo cardánico M56 receptor y la cámara de apuntado mide la dirección de apuntado del haz mirando en la imagen el foco de la lente de entrada L70 del telescopio (el campo lejano). La información de estas dos cámaras C74 y C84 se usa para mantener la alineación del haz a través del agujón mediante el control activo de los cardanes transmisor y receptor. Un obturador S72 de alta velocidad construido en este telescopio se usa para proteger las cámaras durante cada pulso de láser de alta energía.

45 Después del divisor de haz indicador WS68, el haz de alta energía pasa a través de una placa de onda $\lambda/2$ WP75 controlada con precisión que se usa para hacer rotar el haz de polarización P en cualquier polarización necesaria para proporcionar la eficacia óptima para el granallado fuera del eje en la superficie de la pieza máquina. El siguiente componente, el par de lentes de Stokes SP76, se conforma de dos lentes cilíndricas de potencia igual y opuesta. Cuando las superficies curvadas de los cilindros se alinean de manera rotativa, se cancelan, sin provocar ningún cambio en el haz transmitido. Sin embargo, cuando una lente rota en relación con la otra, el haz se bifurca en un eje y converge en el otro. Ambas lentes pueden rotar como un par para orientar esta potencia anamórfica en una dirección arbitraria con respecto al haz saliente, permitiendo que la relación de aspecto del haz se corrija en la superficie de la pieza máquina.

55 Las últimas lentes en el DGS son lentes negativas y positivas, L77 y L78, que forman un telescopio de zum. La lente negativa L77 puede trasladarse a lo largo del eje de propagación óptico para variar la separación entre las lentes. Esto cambia el ángulo de divergencia del haz que sale del agujón cambiando eficazmente el tamaño del lugar en la diana. El componente activo final en el DGS es el espejo cardánico de ráster M80, que escanea el haz de salida por la superficie del componente que se está granallando por láser. Finalmente, una cámara de calibración C81 se monta en el conjunto, y está dispuesta para proporcionar una imagen de la pieza máquina en la ubicación del haz indicador, o haz de trabajo. La cámara de calibración C81 tiene su propia montura de paneo/inclinación y controles de zum/enfoque y está dispuesta para proporcionar una imagen de la pieza máquina en la ubicación del haz indicador, o haz de trabajo en los infrarrojos cercanos.

65 Los componentes ópticos ilustrados en la Figura 4 se montan en un conjunto, que puede denominarse agujón cardánico doble (DGS), que añade la capacidad de escaneo del haz y de formateo del haz incorporando óptica ajustable activamente. Los componentes de formateo del haz activo en el agujón incluyen el telescopio de zum L77/L79, lo que permite que la divergencia de salida del haz se ajuste activamente para cada lugar; un par de lentes

cilíndricas de potencia igual y opuesta (llamado par de Stokes SP76) que funcionan para proporcionar un gran intervalo de ajuste para el control de la relación de aspecto; y una placa rotativa de media onda ($\lambda/2$) WP75, u otro controlador de polarización, que permite que la polarización desde el agujijón rote a cualquier ángulo arbitrario.

- 5 Una de las preocupaciones con el diseño de doble agujijón es el peso. En comparación con los sistemas de haz móvil anteriores, la adición de un segundo cardán y los mecanismos impulsores motorizados para la placa de onda, el par de Stokes y el telescopio de zum añaden una cantidad significativa de masa adicional. Para contrarrestar esto, un compuesto de fibra de carbono se usó como el material estructural primario para la estructura de soporte 50.
- 10 Las correcciones en la forma del haz, que permiten que un patrón complejo de lugares se suministre a partir de una posición de espejo de escaneo fija, deben realizarse para cada pulso de láser individual. Los componentes ópticos activos en el conjunto deben moverse con precisión para hacer los ajustes dinámicos. Tal como se ha mencionado antes, el espejo cardánico M56 receptor se monta en un cardán que tiene un control preciso basándose en parámetros calibrados para el eje de acimut de cardán receptor y el eje de elevación de cardán receptor. El cardán receptor está bajo un control de bucle cerrado y mantiene el haz apuntado con precisión a través de la óptica en el
- 15 agujijón. La alineación del haz se verifica y se corrige (en caso necesario) en cada descarga. Una fase rotativa de precisión se usa para ajustar la placa de onda $\lambda/2$ WP75 (rotador de polarización) basándose en parámetros calibrados. Las dos lentes cilíndricas que conforman el par de Stokes se ajustan mediante fases rotativas de precisión independientes usadas para ajustar la relación de aspecto, también basándose en parámetros calibrados.
- 20 La lente de entrada L77 en el telescopio de zum se monta en una fase lineal de alta velocidad de 200 mm, que se usa para ajustar la divergencia del haz de salida del telescopio de zum para controlar el tamaño del lugar en la diana. Finalmente, el espejo cardánico de ráster M80 se monta en el cardán de ráster de salida que tiene un eje de acimut de espejo de escáner controlable con precisión y un eje de elevación de espejo de escáner para dirigir el haz láser a cada lugar en la superficie de la pieza máquina basándose en parámetros calibrados.

25

Tabla I – Descripciones representativas de componentes ópticos

n.º de artículo	Descripción
M56	Espejo cardánico de 10,16 cm (4") 35-55°
W57	Ventana protectora de 12,70 cm (5")
WS58	Divisor en cuña de 10,16x7,62 cm (4x3")
WS68	Divisor en cuña de 10,16x7,62 cm (4x3")
WP69	Placa de media onda de 7,62 cm (3")
SP76	(Primera lente) lente cilíndrica negativa de 7,62 cm (3")
SP76	(Segunda lente) lente cilíndrica positiva de 7,62 cm (3")
L77	Lente de zum negativo de 7,62 cm (3")
L78	Lente de zum positivo de 10,16 cm (4")
W79	Ventana protectora de 12,70 cm (5")
M80	Espejo cardánico de 10,16 cm (4") 15-42°
WP59	Rotador de cuarzo de 7,62 cm (3") 90°
EM61	Medidor de energía piroeléctrico
WS62	Divisor en cuña de 10,16x7,62 cm (4x3")
WS63	Divisor en cuña de 10,16x7,62 cm (4x3")
WS69	Divisor en cuña de 10,16x7,62 cm (4x3")
L64	(Primera lente) lente 1 de doblete diagnóstico de 7,62 cm (3")
L64	(Segunda lente) lente 2 de doblete diagnóstico de 7,62 cm (3")
S72	Obturador de alta velocidad
WS73	Divisor cuadrado de 3,81 cm (1,5")
C74	Cámara CCD
L71	Lente de colimación diagnóstica de 2,54 cm (1")
C84	Cámara digital
WS63	Divisor en cuña de 10,16x7,62 cm (4x3")
L64	(Primera lente) lente 1 de doblete diagnóstico de 7,62 cm (3")
L64	(Segunda lente) lente 2 de doblete diagnóstico de 7,62 cm (3")
WS66	Divisor cuadrado de 3,81 cm (1,5")
L65	Lente de colimación diagnóstica de 2,54 cm (1")
C67	Cámara digital
C81	Cámara digital

- 30 El sistema óptico DGS se diseñó para soportar tamaños de lugar cuadrado en el intervalo de 3-5 mm en el área de impacto, aunque es razonable esperar que un buen control de las formas del lugar también esté disponible en lugares incluso mayores. Para otras especificaciones del lugar, por supuesto, y para diferentes realizaciones del agujijón, podrían utilizarse diferentes componentes ópticos.

- 35 La Figura 5 muestra el sistema de telescopio de zum con el elemento de lente negativa L77 en tres puntos operativos diferentes (L77-a, L77-b y L77-c) para un lugar cuadrado de 3 mm en una diana con una incidencia

normal. 100 mm de recorrido en la lente negativa L77 entre los puntos L77-a y L77-c, pueden cambiar la divergencia del haz entre la lente negativa L77 y la lente positiva L78, para mover el punto de imagen de 3 mm de 42" a 62" respecto al espejo cardánico de ráster M80 final.

- 5 El plano de tratamiento de granallado por láser que usa la realización del telescopio de zum en este caso, puede ajustarse entre 48,5" a 62,5" (1230 a 1590 mm) para un lugar de 3 mm, con un plano de imagen nominal ubicado a 54" (1370 mm). Para un lugar de 5 mm, el intervalo de separación va desde 46,5" a 59,5" (1180 a 1510 mm).

10 Los intervalos de operación del telescopio de zum dependen del cambio de longitud de trayectoria disponible para la fase de traslado. En un ejemplo representativo, la fase lineal instalada en la lente negativa es capaz de un cambio de longitud de trayectoria total de 200 mm. Sin embargo, el funcionamiento más allá del ajuste de 100 mm puede tener como resultado una degradación de la forma del lugar respecto a un cuadrado ideal, caracterizado principalmente por niveles crecientes de distorsión de almohadilla. Las Figuras 6A a 6C muestran los resultados de los análisis de rastreo de rayo no secuenciales del sistema de formación de imágenes, ilustrando cambios en la calidad del lugar (Figura 6A- combado, Figura 6B - sin distorsión, Figura 6C - almohadilla) como una función de la posición de la lente de zum. Un límite de $\pm 4\%$ de distorsión de forma del lugar (de combado a almohadilla) es un objetivo de diseño adecuado. Sería posible mejorar el rendimiento de formación de imágenes del lugar cuadrado usando un diseño de lente más complejo, en particular, uno que incorpore elementos de movimiento adicionales. Sin embargo, el diseño exitoso de un sistema óptico para el uso con haces láser de alta potencia y alta energía es un desafío debido a los reflejos débiles que ocurren desde las superficies de lentes revestidas con antirreflejos. Esto hace reflejados, divergentes o convergentes, accidentales (denominados generalmente fantasmas) pueden llegar a enfocarse en otras piezas del tren óptico y provocar daños ópticos que a menudo se encuentran en una pieza completamente diferente del sistema de suministro de láser. El diseño óptimo debe ser lo suficientemente simple para gestionar y dirigir el gran número de primeros y segundos reflejos, evitando el fallo de otros componentes ópticos en el sistema. Por supuesto, las pérdidas de superficie adicionales también hacen descender la transmisión general del tren de haz, necesitando que el láser se haga funcionar a una mayor energía de salida para generar la misma energía en la diana. Una consideración de diseño final es que un sistema de formación de imágenes más complejo y mejor corregido requerirá normalmente tamaños de lugar en componentes de lente intermedios que sean significativamente menores que el tamaño del haz de entrada. Esto también debe evitarse para proporcionar protección contra el daño óptico a partir de las altas densidades de potencia del láser que estarían presentes.

35 La Figura 7 es un gráfico de reflectancia frente a ángulo de incidencia para un material como cuarzo o agua, en el que la línea continua muestra la reflectancia de un haz de polarización P y la línea discontinua muestra la reflectancia de un haz de polarización S. En el funcionamiento de granallado por láser, un fluido de apisonado tal como agua fluye como una película fina sobre la superficie de la pieza de trabajo. La reflectancia de los pulsos de láser desde el agua reduce la energía disponible para inducir la onda dinámica necesaria para el granallado por láser. Tal como se ha descrito antes, el sistema en este caso proporciona un formateo de haz activo, y se diseña para aplicar pulsos sobre piezas a máquina con superficies compuestas. Así, dentro de un área de proceso determinada, las áreas de impacto para lugares individuales pueden descansar en superficies con ángulos que varían 60 grados o más y, en algunos ejemplos, pueden variar tanto como 90 grados o más provocando variaciones significativas en el ángulo de incidencia para los pulsos dentro de una única área de proceso.

45 Ya que los pulsos de láser en el sistema son polarizados, puede verse que las variaciones en el ángulo de incidencia pueden provocar diferencias sustanciales en la reflectancia. Para el ejemplo del agua, un ángulo de incidencia de aproximadamente 30 grados provocaría diferencias sustanciales en la reflectancia de los haces de polarización S y polarización P. El rotador de polarización WP75 en el agujón permite la configuración de una polarización para cada lugar individualmente para alinear la polarización cerca de la polarización P para la superficie de impacto, que puede definirse determinando numéricamente un vector normal de superficie nominal para el área de impacto para cada pulso de láser, y configurando la polarización para coincidir con la polarización P para ese vector normal de superficie nominal. Estos valores de polarización pueden calibrarse usando modelado en 3D durante la fase de calibración tal como se describe a continuación.

55 Tal como se ha descrito antes, el agujón incluye un par de Stokes SP76, que comprende un conjunto de lentes de cilindro coincidentes, una positiva y la otra negativa. El par Stokes de lentes no tiene potencia óptica cuando sus ejes se alinean. Sin embargo, ya que rotan en direcciones opuestas, la potencia cilíndrica puede introducirse en el tren del haz. Un frente de onda cilíndrica positiva se introduce en un eje y una negativa en el otro, provocando que el haz en la diana se encoja en una dimensión y se expanda en la otra. En la mayoría de casos de granallado fuera del eje, el objetivo es que el lugar se encoja únicamente a lo largo de un eje para compensar un ángulo de incidencia distinto a cero. Por este motivo, la corrección también debe incluir un ajuste de la separación de la lente del telescopio de zum para reducir el tamaño general del lugar para que el eje más largo permanezca en una longitud constante.

65 El proceso de corrección de forma del lugar se visualiza más fácilmente para las correcciones que caen a lo largo de un eje paralelo a una dimensión del lugar (ortogonal). Sin embargo, la corrección anamórfica puede hacerse rotar en cualquier ángulo con respecto al haz láser cuadrado entrante, permitiendo que los lugares cuadrados se inclinen

sobre formas de superficie con curvaturas compuestas. El rotador de campo (M52-M53 en la Figura 3) se usa para proporcionar la rotación de campo necesaria para los lugares.

5 Existe generalmente la necesidad de controlar las características del haz tal como energía de pulso, duración del pulso y perfil del haz para aplicaciones que usan sistemas de láser de alta energía. Esto puede realizarse tomando una muestra débil del haz usando un divisor de haz o controlando la transmisión de bajo de nivel de un revestimiento de espejo de alta reflectividad. Los revestimientos ópticos para un divisor de haz pueden diseñarse para reflejar solo un pequeño porcentaje del haz de alta energía o para un espejo, para transmitir sólo un pequeño porcentaje. Ambos enfoques pueden ser problemáticos, sin embargo, si una muestra muy estable y calibrada es necesaria con el fin de controlar la energía o potencia en el haz principal. La reflectividad exacta de los revestimientos ópticos dieléctricos de alto umbral de daños pueden, a menudo, ser una función de condiciones ambientales tal como temperatura y humedad y pueden ser muy sensibles a los ángulos. Por ejemplo, un revestimiento de espejo de alta calidad puede tener una reflectividad del 99,5 %. Si, debido a condiciones ambientales, daños o incluso al calentamiento del haz láser de alta potencia, la reflectividad cae a un 99,4 %, todavía sería un espejo muy bueno. Sin embargo, si el sistema de control óptico depende del 0,5 % del haz transmitido para determinar la energía en el haz principal, entonces este cambio de 0,1 % provocará un error de calibración inaceptablemente grande del 20 %. Un argumento similar puede realizarse contra el uso de un haz reflejado desde un revestimiento antirreflejos (A/R).

20 Para evitar las dificultades de la transmisión o reflejo calibrado desde los revestimientos ópticos, el láser y los sistemas de suministro de haz usan solamente superficies ópticas sin revestir para muestrear el haz de alta potencia. La reflectividad de esta superficie se determina mediante el índice de refracción del sustrato óptico (vidrio) en la longitud de onda del láser, el ángulo de incidencia y la polarización del haz. Los primeros dos parámetros se controlan fácilmente y, para la salida del diseño láser, la polarización es muy estable. La Figura 8 muestra un divisor de haz que usa una cuña 351 de sílice fundido orientada con un ángulo de incidencia de 45 grados con un haz de polarización P. Para la cuña 351, la reflectividad solo es del 0,6 % desde cada superficie del divisor (llamada reflectividad Fresnel) para una transmisión total del 98,8 %. Normalmente, el divisor de haz se fabrica con una cuña de 0,5 a 1,0 grados que permite que el haz desde las superficies ópticas delantera y trasera se separe parcialmente y evite los efectos ópticos de interferencia que pueden cambiar la relación de muestreo. El primer reflejo de superficie en la línea 355 se usa para calibrar medidas de energía. La segunda superficie de la cuña 351 a veces recibe un revestimiento antirreflejos para reducir la pérdida de inserción total en el haz principal, aunque los revestimientos típicos A/R a menudo tienen reflectividades que no están muy por debajo del 0,6 % de la superficie sin revestir para este caso. Un componente reflejado que es el 0,6 % de un pulso de 15-20 J desde un sistema láser usado para el granallado por láser, todavía es demasiado energético para un medidor de energía piroeléctrico típico, por lo que la primera cuña 351 va seguida normalmente por una segunda cuña 350 para atenuar adicionalmente el haz muestreado, tal como se muestra en la Figura 8.

40 Aunque este método de divisor de haz sin revestir de la Figura 8 funciona para la salida bien polarizada del sistema láser, no funciona bien cuando se instala como un sistema de medición de energía en un agujón de haz móvil. El haz cuadrado desde el sistema de láser (y su polarización) deben rotar en diferentes orientaciones en la salida del láser para terminar con un lugar correctamente orientado en el agujón y en la superficie de la pieza de trabajo. Cuando un haz láser se refleja desde un espejo con un revestimiento óptico dieléctrico, la polarización queda totalmente sin cambios siempre y cuando la dirección de polarización sea puramente de polarización S o P, es decir, paralela o perpendicular al plano de incidencia. Sin embargo, si el haz tiene una polarización no ortogonal, pueden ocurrir pequeños errores de despolarización, cambiando ligeramente la polarización del haz degradando el contraste de polarización. Ya que un haz orientado arbitrariamente se refleja desde diversos espejos entre la salida del sistema láser y el agujón de haz móvil, estos errores de despolarización se acumulan. Aunque el error total no es suficiente para degradar el rendimiento de granallado por láser fuera del eje, esto puede provocar cambios significativos en reflectividad para un par de divisores de doble haz tal como se muestra en la Figura 8. Por ejemplo, un incremento de 2X (por ejemplo, el doble) en niveles de luz después de dos reflejos del divisor de haz resultaría a partir de un estado de despolarización que solo cambia la reflectividad de superficie en un 0,25 %. Esto es casi un cambio sin consecuencias en la energía y polarización (una rotación de unos cuantos grados) suministradas a la superficie diana, pero provoca un error de 2X en la energía medida.

55 Un sistema de divisor de haz que es insensible a los errores de polarización se muestra en la Figura 9 y se implementa en el agujón mostrado en la Figura 4. En el sistema de la Figura 9, dos divisores de haz 401, 400 sin revestir están dispuestos con un rotador 402 de 90 grados colocado entre los divisores. Como resultado, el haz de división en la trayectoria 405 se vuelve completamente insensible a los errores de polarización. En el ejemplo mostrado en la Figura 9, la cuña de divisor de haz 401 se coloca en la trayectoria 420 de un haz láser de alta energía. Una muestra del haz se refleja en la superficie de entrada de la cuña de divisor 401 en la trayectoria 404. La muestra en la trayectoria 404 incluirá componentes de dos estados de polarización ortogonales (es decir, polarización S y polarización P) de la energía láser en la trayectoria 420, cuyas magnitudes relativas dependen de la polarización de entrada tal como se ha analizado antes. Un rotador de cuarzo 402 hace rotar la polarización de ambos componentes del haz transmitido en la trayectoria 404 mediante un ángulo constante (90 grados en este caso), independientemente del estado de polarización del haz. Después de la rotación, una muestra del haz desde la línea 404 se refleja en la superficie de entrada de la cuña de divisor 400 en la trayectoria 405. Las dos cuñas de divisor de haz 401, 400 están dispuestas para lograr ángulos incidentes y coincidentes (por ejemplo, 45 grados) para

la trayectoria 420 y la trayectoria 404 de los haces respectivamente. Sin embargo, este diseño funcionará con cualquier otro ángulo de incidencia siempre y cuando los ángulos en cada uno de los dos divisores de haz sean iguales. La rotación de polarización y los ángulos incidentes y coincidentes provocan que la reflectividad de las superficies de los dos divisores de haz 401, 400 sea la reflectividad del producto de los dos estados de polarización ortogonales, que es una constante. Los errores de despolarización de la energía láser en la trayectoria 420 ahora no tendrán efecto en el porcentaje de energía del haz principal después de dos reflejos suministrados en la trayectoria 405, teniendo como resultado un haz diagnóstico independiente de la polarización.

La Figura 10 es un gráfico que demuestra esta independencia de la polarización de manera experimental. Una configuración de dos divisores de haz se estableció para estas medidas. En lugar de ángulos de incidencia 45 grados, tal como se muestra en la Figura 9, unos ángulos de 72 grados se eligieron para acentuar los errores de reflectividad inducidos por polarización. El rastro 450 muestra los puntos para la configuración sin el rotador de polarización, donde los puntos de diamante sólidos muestran valores medidos y la línea continua muestra los valores teóricos de la fracción reflejada sobre un escaneo de polarización completo de 360 grados, que fluctúa de manera significativa. Debe apreciarse la fuerte dependencia de la señal medida respecto a la polarización de entrada. El rastro 451 muestra el punto para la configuración después de insertar el rotador de cuarzo de 90 grados entre los divisores, donde los puntos de diamante abiertos muestran valores medidos y la línea discontinua muestra los valores radicales de la fracción reflejada sobre un escaneo de polarización completo de 360 grados. Incluso para los cambios de polarización muy dramáticos de esta demostración, la fracción muestreada tal como puede verse en el rastro 451 permanece constante.

Tal como se ha señalado en el anterior análisis de la cuña de divisor de haz, existe un haz reflejado generado desde ambas superficies de un divisor de haz y estas necesitan separarse. Tal como se muestra en la Figura 9, la mayoría de la energía láser en la trayectoria 420 no se refleja en la superficie de entrada de la cuña de divisor 401, sino que se difracta ligeramente a través del divisor y sale de la superficie de salida en la trayectoria 435. Sin embargo, en la superficie de salida, una porción del haz se refleja en la trayectoria 422. Para esta aplicación de un divisor de haz es importante que la porción del haz reflejado en la superficie de salida se separe de la porción del haz en la trayectoria 404 que se suministrará al componente diagnóstico. Esta separación se realiza normalmente en un divisor de haz como el de la Figura 8 introduciendo una cuña óptica entre la superficie delantera y trasera para que los dos haces puedan divergir entre sí. Esto puede verse en la Figura 8 mediante la referencia a un ángulo de cuña de 0,5 grados, y la ligera divergencia del haz reflejado desde la superficie de salida del divisor 301 en relación con la del haz reflejado en la superficie de entrada. El tamaño de esta cuña se mantiene normalmente pequeño para minimizar el rejuntamiento de refracción del haz transmitido y para evitar un cambio dimensional en el haz en el plano de incidencia óptica. Los dos haces pueden separarse con el fin de uso mediante equipo diagnóstico, permitiendo que se propaguen lo suficiente para que el ángulo entre ellos proporcione una separación completa o usando una detención de campo en el foco del telescopio de formación de imágenes. Ambos enfoques son difíciles de aplicar al agujijón del haz móvil, u otras aplicaciones de equipo de diagnóstico compacto para sistemas láser. En entornos de espacio limitado, como el agujijón montado en el robot descrito en el presente documento, no existe espacio suficiente en el alojamiento óptico para proporcionar suficiente divergencia de los haces hasta el punto de que el haz no deseado puede bloquearse. En sistemas en los que el haz de muestra se usa para procesos diagnósticos tal como rastreo óptico, una detención de campo en un telescopio de centrado/apuntado puede usarse para bloquear el haz secundario. Sin embargo, tal detención de campo evitaría la detección de haces fuera del eje durante el rastreo óptico.

En la configuración mostrada en la Figura 9, para suprimir los reflejos no deseados de divisor de haz de superficie trasera (denominados fantasmas), un ángulo de cuña suficientemente grande se usa en las realizaciones aquí descritas, de manera que los haces en las trayectorias 422, 423 reflejados desde la segunda superficie de las cuñas de divisor de haz se atrapan dentro del elemento óptico mediante la reflexión interna total. Esto requiere que el ángulo de incidencia óptica interna sea mayor que el ángulo crítico para la reflexión total, que para un sustrato de sílice fundido y la longitud de onda láser de 1053 nm, es 43,6 grados. Tal como se muestra en la Figura 9, para un ángulo de incidencia de 45 grados en la superficie externa, esto se logra de inmediato con un ángulo de 7,5 grados de cuña de divisor de haz. Tal como se muestra en la Figura 9, el número de haces muestreados después de dos divisores de haz se reduce de 4 haces en el caso convencional ilustrado en la Figura 8, a un único haz limpio en la línea 405 usando las cuñas de la Figura 9. La luz reflejada internamente rebota a través del interior del divisor y se dispersa por los bordes ópticamente afilados y ásperos del sustrato y se pierde. Los haces en las líneas 421 y 425 pueden bloquearse debido a sus grandes ángulos relativos a las muestras de haz deseadas.

Tal como se ha mencionado antes, una cuña de divisor de haz, como la cuña 401 y la cuña 400 en la Figura 9, provoca el fuerte rejuntamiento del haz transmitido y una dimensión del haz se reduce (rejuntamiento mediante 7,5 grados y reducción de anchura del 23 % para el caso ilustrado). Sin embargo, este efecto puede eliminarse completamente tal como se muestra en la Figura 9, colocando una segunda cuña de divisor de haz 403 en la línea de haz de salida, de dirección inversa a la primera. La energía láser en la trayectoria 435 es refractiva mediante la cuña 403 y sale en la trayectoria 430. Esto restaura la dirección de apuntado original para que las trayectorias 420 y 430 sean paralelas. Además, al colocar el divisor 403 a la distancia correcta respecto a la primera cuña de divisor 401, la desviación del haz puede cancelarse y la trayectoria de haz 420 y la trayectoria de haz 430 se alinean. Como resultado, el haz de alta potencia en la trayectoria 430 no cambia su dirección, desplazamiento ni anchura relativa al

haz en la trayectoria 420. La pérdida óptica total introducida mediante las 4 superficies sin revestir del conjunto de doble divisor de haz es únicamente el 1,8 % para la polarización P. Además, el agujijón de la Figura 4 usa la primera superficie de la segunda cuña de compensación 403 para dirigir una muestra en la trayectoria 424 del haz indicador de polarización S para el centrado y el apuntado de las cámaras C74, C84 tal como se muestra en la Figura 4.

Tal como se muestra en la Figura 4, los divisores de haz sin fantasmas se usan para recoger la muestra del haz desde el haz primario de alta energía, para dirigir una segunda muestra al medidor de energía calibrado y para reflejar haces en cada uno de los telescopios de formación de imágenes diagnósticas. En combinación, por tanto, se proporciona un medidor de energía independiente de la polarización. Además, también se proporciona un sistema diagnóstico independiente de la polarización.

El enfoque del agujijón cardánico doble proporciona la capacidad de lograr una colocación de patrón de lugar muy precisa en la pieza de trabajo usando el cardán ráster para escanear el haz láser sobre la superficie. Una óptica ajustable corrige la polarización, orientación de lugar, tamaño y relación de aspecto. Al usar el cardán ráster, el movimiento del robot de proceso entre cada descarga no es necesario, incrementando tanto la precisión de colocación del lugar como la exactitud total.

Para este trabajo, sin embargo, es necesario un buen método para alinear el patrón sobre la pieza de trabajo y producir parámetros calibrados para el control de pulso a pulso. Tal como se ha explicado antes, el objetivo era un enfoque que pudiera lograrse rápidamente, reduciendo el tiempo para ubicar el patrón de lugar en una nueva parte en minutos en lugar de en días o semanas.

La primera etapa en el proceso es diseñar el patrón deseado de lugares de granallado por láser, trabajando a partir de un modelo sólido de la pieza de trabajo en un sistema de diseño asistido por ordenador CAD.

Para una pieza de trabajo con superficies compuestas, como el componente de aeronave 510 mostrado en la Figura 11, las áreas de impacto para cada pulso de láser pueden tener ángulos de incidencia significativamente diferentes. La pieza de trabajo mostrada en la Figura 11 comprende un componente de aeronave fabricado con un lado de fondo 501 y una superficie exterior 502 en la que se une un resalte 510. El resalte tiene un lado inferior 503, un lado posterior 504 y un lado delantero 505. Una máscara de cubierta 511 que comprende un material tal como Mylar que tiene una alta estabilidad dimensional se configura para hacer coincidir las superficies de la pieza de trabajo, y para colocarse en la estructura con bordes que permiten que se coloque rápidamente, fácilmente y con precisión mediante un técnico. La máscara de cubierta 511 tiene conjuntos de marcas de alineación, tal como la marca 512 junto con dos marcas adicionales en el lado posterior y la marca 513 junto con dos marcas adicionales en el lado inferior de la estructura.

La Figura 12 muestra un ejemplo de formas nominales y ubicaciones en las áreas de proceso para tres patrones en el componente de la Figura 11, incluyendo un patrón inferior 553 en la superficie 503 del resalte, un patrón posterior 554 en la superficie 504 del resalte y un patrón delantero 555 en la superficie 505. Cada lugar tiene un área de impacto definida mediante un tamaño, la ubicación en 3 dimensiones de su centro, un vector rotativo que define la orientación del lugar en la superficie y un vector normal (basado en un vector normal de superficie nominal) que contiene información sobre la orientación local de la superficie en el espacio. Los lugares son de aproximadamente 4,5 mm cuadrados, alineados y adyacentes entre sí, dentro de una tolerancia de proceso, en una agrupación para cubrir el área de proceso.

El método para calibrar sistemas de suministro de haz a la pieza de trabajo depende del haz indicador infrarrojo de onda continua (CW) que se coalinea con el haz pulsado de alta potencia. Este puede ser el mismo haz que el usado para mantener el control de alineación de bucle cerrado de los cardanes transmisor y receptor para el sistema de haz móvil. En una realización, una máscara de cubierta 511 de superficie mylar estable dimensionalmente se forma para encajar en la pieza de trabajo, que puede aplicarse manualmente a la pieza de trabajo indexada para identificar fácilmente elementos geométricos (bordes, esquinas, orificios, etc.). La máscara tiene un conjunto de marcas de alineación tal como se muestra en la Figura 11 en cada área de patrón, que pueden correlacionarse con ubicaciones correspondientes en el modelo sólido en 3D de la diana, y usarse para la calibración del espacio del área de proceso. La filosofía para una realización de granallado por láser de las máscaras es proporcionar una alineación precisa ($<0,5$ mm, $0,020''$) del patrón de granallado por láser a los elementos más críticos, de alta tensión en la pieza de trabajo. En otros ejemplos, los elementos (por ejemplo, esquinas, bordes, orificios, etc.) de la propia pieza de trabajo pueden usarse como marcas de alineación para el proceso de calibración.

Como el ejemplo mostrado en la Figura 11, cada área en la máscara de alineación correspondiente a un área de proceso incorpora tres marcas de alineación usadas como dianas láser. La ubicación de cada una de las dianas se define con precisión en relación con los patrones de lugar previamente generados, tal como se muestra con fines heurísticos en la Figura 12. El procedimiento de calibración para un patrón consiste en alinear el haz indicador con cada una de las 3 marcas de alineación con una precisión de por ejemplo 0,1 mm, y registrar los ángulos de acimut y elevación para el cardán ráster M80 para cada ubicación, mientras que el cardán de entrada M56 permanece estacionario. Esto se logra usando un sensor 125 tal como un sistema de cámara controlada remotamente en el extremo ráster del agujijón, tal como se muestra en la Figura 2. Esto se corresponde también con la cámara C81 en

la Figura 4. Ya que el sensor 125 debe generar una imagen nítida del lugar de haz indicador infrarrojo así como de la diana iluminada, este puede equiparse con un filtro de bloqueo de luz visible. Esto permite que se enfoque con precisión en la longitud de onda de láser de 1053 nm usada para los procesos de alta energía, en la marca de alineación que se ilumina mediante una fuente de luz infrarroja, difusa y separada en 940 nm. Estas longitudes de onda están suficientemente cerca como para que el operador vea una imagen bien enfocada tanto del haz como de la marca de alineación.

La Figura 13 es una vista simplificada de una interfaz gráfica de consola de operador que incluye una imagen de pantalla del haz indicador alineado con una de las dianas láser, usada mediante un operador durante el proceso de calibración. El operador ve la iluminación apareciendo en la pieza de trabajo mientras que controla el cardán ráster para mover el lugar al punto de alineación. Como alternativa, un reconocimiento de patrón computerizado puede usarse para ubicar automáticamente cada diana sin intervención del operador. En cada punto de alineación, se registran los ángulos de acimut y elevación para el espejo cardánico de ráster M80. Una cobertura de papel puede aplicarse sobre la película mylar en la ubicación de cada diana láser para reducir la dispersión láser y la generación de motas mediante la película Mylar semitransparente, mejorando la imagen.

Para calibrar el espacio para el área de proceso, el proceso para ubicar cada una de las tres dianas láser se repite para dos ubicaciones de agujijón diferentes y permite que se construya una imagen estéreo y sintética de las marcas de alineación en la pieza de trabajo usando técnicas similares a las aplicadas en fotogrametría. Tal como puede verse en la Figura 14, desde una primera posición de agujijón 600, los ángulos de acimut y elevación para las líneas 610, 611, 612 se determinan, donde las líneas 610, 611, 612 se extienden desde el espejo cardánico de ráster M80 en la posición 600 a las marcas de alineación correspondientes, por ejemplo, la marca 512 en la pieza de trabajo. El agujijón se mueve entonces verticalmente o de otra manera a una segunda posición 601. Un preciso encaje numérico es resultado de ubicar las tres dianas de máscara a partir de dos posiciones diferentes de espejo ráster. En un ejemplo, el espejo ráster se movió 60 cm (23,6") a lo largo del eje vertical desde la primera posición 600 a la segunda posición 601. La posición superior representa el espejo en la posición de espejo ráster usada para el granallado por láser de alta energía. Desde la segunda posición 601, los ángulos de acimut y elevación para las líneas 620, 621, 622 se determinan, donde las líneas 620, 621, 622 se extienden desde el espejo cardánico de ráster M80 en la posición 601 a las marcas de alineación en la pieza máquina. Estos datos permiten que la superficie de la pieza de trabajo se coloque en el marco de referencia de coordenadas para el cardán ráster de agujijón, proporcionando información precisa sobre la distancia entre el espejo y la pieza de trabajo y su orientación en el espacio en tres dimensiones (3D). Ya que las ubicaciones de las marcas de alineación de máscara de alineación en relación con el patrón del lugar láser se conocen, cada lugar láser puede dimensionarse, moldearse y orientarse con precisión en la superficie de tratamiento mediante el sistema de control basándose en cada pulso.

La etapa final en el proceso de calibración es determinar el marco de coordenadas del área de proceso en la superficie diana relativo al marco de coordenadas del agujijón, y traducir la geometría en parámetros calibrados para dirección, divergencia, polarización, rotación y relación de aspecto para cada pulso en el patrón de pulsos. Esta transformación de coordenadas se aplica para convertir cada uno de los lugares láser (áreas de impacto) anteriormente definidos en el patrón en un archivo de proceso que contiene los parámetros calibrados para las posiciones de cada uno de los 12 posicionadores ópticos de servomotor para cada lugar aplicado. Cada posición de lugar ordenada se genera mediante las siguientes posiciones de servomotor:

1. Rotador de polarización láser
2. Rotador de campo láser (rotador de lugar cuadrado)
3. Eje de acimut cardánico transmisor
4. Eje de elevación cardánico transmisor
5. Eje de acimut cardánico receptor
6. Eje de elevación cardánico receptor
7. Rotador de polarización de agujijón
8. Lente de Stokes n.º 1
9. Lente de Stokes n.º 2
10. Fase de telescopio de zum de agujijón
11. Eje de acimut cardánico de ráster
12. Eje de elevación cardánico de ráster

La Figura 15 ilustra un patrón de lugar en relación con tres posiciones de diana de alineación (por ejemplo, para la marca de alineación 512) para el área de proceso posterior 650 en la pieza de trabajo de la Figura 12, tomada para el agujijón en la posición 600. Cada una de las tres áreas de proceso puede calibrarse por separado y granallarse desde diferentes posiciones de agujijón, o puede elegirse una posición de agujijón que puede aplicar múltiples patrones de lugar desde una única posición de agujijón. Los resultados de esta alineación producen un patrón de lugares que se enrolla por una curva en la pieza. Ya que el haz se suministró desde una única posición de agujijón para cada patrón, era necesario que el ángulo de incidencia cambiara desde 45 grados en un lado del patrón, por 0 grados (incidencia normal) en el centro de la curva, a -45 grados en el otro lado del patrón. A pesar de la geometría de la pieza, usando la tecnología descrita en el presente documento, los lugares láser pueden controlarse individualmente para permanecer cuadrados y correctamente dimensionados, orientados y colocados en la

superficie de la pieza de trabajo, con una polarización coincidente con el plano de polarización P para el vector normal de superficie nominal del área de impacto correspondiente.

La Figura 16 es un diagrama de flujo simplificado para un algoritmo ejecutado mediante un procesador para suministrar una pluralidad de pulsos de láser en patrones de áreas de impacto en áreas de proceso en la superficie de una pieza de trabajo. Un flujo de proceso simplificado comienza con el almacenamiento de un patrón o patrones en el sistema de control usado para el sistema de suministro de haz (700). A continuación, se coloca el robot que soporta el agujijón, o una pieza de trabajo se coloca adyacente al robot, o ambos se colocan, en posiciones relativas adecuadas para suministrar una secuencia de pulsos a la superficie de la pieza máquina (701). En una etapa posterior, que puede usarse para cada posición de agujijón que va a usarse para un conjunto de áreas de proceso, donde el conjunto puede tener uno o más miembros, el patrón ráster (i, j) define un patrón en un área de proceso sobre dos dimensiones que se calibra para cada lugar en el patrón por la superficie 3D (x, y, z) de la diana (702). Esta etapa de calibración tal como se muestra en el diagrama de flujo ocurre tras fijar la ubicación del robot o pieza de trabajo, estableciendo posiciones relativas de la pieza de trabajo y el robot, y puede realizarse una vez para todos los patrones que van a procesarse para las ubicaciones fijas del robot y la pieza de trabajo usando posiblemente más de una posición de agujijón, o como alternativa, puede realizarse una vez para cada posición de agujijón que va a usarse, para generar parámetros calibrados para los lugares en un conjunto de patrones para los que se usará la única ubicación de agujijón. Para una alineación precisa, el controlador se calibra para cada ubicación de agujijón fija que va a usarse para el escaneo, después de que la pieza de trabajo y el robot que soporta el agujijón se coloquen para el procesamiento. En alternativas, la etapa de calibración puede ejecutarse según sea necesario, basándose en el entorno en el que se aplica el proceso de láser.

Después, para cada área de proceso, el agujijón se coloca mediante el robot para el patrón actual, y los cardanes transmisor y receptor se establecen para que la energía láser pueda suministrarse a los componentes ópticos en el agujijón (703). Después, se ejecuta un proceso de escaneo para un patrón determinado en un área de proceso (704). En el proceso de escaneo, para cada lugar (i, j) en el área de proceso, los componentes ópticos en la óptica de formateo y suministro de haz se configuran para establecer la dirección, rotación de campo, divergencia, relación de aspecto y polarización para cada pulso de salida (704). Tras configurar los componentes ópticos usando parámetros calibrados para cada lugar, el pulso de láser se aplica, en coordinación con el fluido de apisonado en una aplicación de granallado por láser (705). El proceso determina si el último lugar en el patrón se ha suministrado (706). En caso contrario, entonces el siguiente lugar se define (707), y el procesador vuelve a esta etapa 702 (o como alternativa a la etapa 703 si los parámetros calibrados ya se han producido). Si el último lugar se ha suministrado en la etapa 706, entonces el procesador determina si el último patrón para el conjunto actual de patrones se ha procesado (708). En caso contrario, entonces el siguiente patrón se identifica mediante el procesador (709), y el procesador vuelve a la etapa 702 (donde puede esperar a la ejecución de la etapa 701 si el robot debe reubicarse para realizar el siguiente patrón o conjunto de patrones). Si el último patrón se ha procesado en la etapa 708, entonces el proceso termina (710). Debe apreciarse que el orden de las etapas representadas mediante el diagrama de flujo de la Figura 16 puede alterarse para adecuarse a un contexto determinado para el proceso.

La Figura 17 es un dibujo simplificado de un sistema de granallado por láser, como el de la Figura 2, con componentes similares con números de referencia similares, y algunos componentes no descritos de nuevo. Como en la Figura 2, el haz láser desde la línea 120 se refleja en el espejo 106A en un cardán receptor 106 en el DGS 107. El haz se dirige en la línea 121 a un espejo cardánico de ráster 117A en el cardán ráster 117. Una cámara de alineación 125 se configura para formar una imagen de una ubicación de diana a la que se dirige el haz. Una diana compleja 109 en este ejemplo incluye una superficie (no se muestra) que puede ser difícil o poco práctica de golpear usando el DGS 107. Para alcanzar esta superficie, un espejo giratorio 900 puede montarse cerca o en la pieza que tiene la superficie a granallar. El espejo giratorio, algunas veces denominado espejo de retransmisión, puede por ejemplo ser un espejo plano, de cinco pulgadas, que hace girar el haz en todas las longitudes de onda usadas (formación de imágenes de calibración, alineación, potencia) en la línea 122 alrededor de una esquina en una línea 901 respecto a la superficie de la diana compleja. La capacidad de escaneo del DGS hace que dirigir el haz, usando el proceso de calibración antes descrito, sea demasiado difícil para alcanzar superficies usando un espejo giratorio fijo. Cuando se realiza un granallado por láser de piezas complejas, por ejemplo, al colocar un espejo de retransmisión separado en una posición estacionaria, ya se soporte mediante la propia pieza de trabajo o mediante medios externos, pueden granallarse las áreas en la pieza que van a granallarse por láser sobre las que no existe una posible línea de visión directa entre el cardán de rasterización 117 y el área en cuestión. Usando el DGS, la calibración y el posterior granallado por láser pueden realizarse exactamente de la misma manera con y sin el espejo giratorio 900, sola mediante el espejo de retransmisión que reflejará una imagen infrarroja de la pieza para la calibración, el haz indicador, así como el haz de granallado de alta potencia. Existen casos en los que un haz podría serpentear alrededor de una esquina para esconder un lugar pero no podría encajar un agujijón completo. La Figura 17 muestra un robot de agua 111 de convención usado para suministrar la capa de apisonado del flujo sobre la superficie de trabajo durante el granallado por láser. A menudo, se dará el caso de que la incapacidad para establecer una línea de visión directa con la superficie de trabajo haga que sea difícil alcanzarla con una boquilla de agua controlada robóticamente. En este caso, las boquillas de agua fijas unidas directamente a la pieza de trabajo pueden usarse para proporcionar la capa de apisonado. Múltiples boquillas, bajo un control informático individual, pueden usarse para cubrir grandes áreas de granallado complejas.

Los usos representativos de la tecnología descrita incluyen granallar por láser pequeñas y grandes piezas a

5 máquina y estructuras, formación de granallado por láser, suministro de haz láser para otras modificaciones de superficie tales como tratamiento térmico, texturación, corte y soldadura. El sistema es adaptable para el suministro de haz para una aplicación de procesamiento de materiales de energía láser, incluyendo, pero sin limitarse a, la inclusión de formación de superplástico, pintura u otro tipo de retirada de revestimiento, ataque químico, grabado y marcado.

10 Aunque la presente invención se divulga mediante referencia a las realizaciones preferentes y ejemplos descritos antes, debe entenderse que estos ejemplos tienen un fin ilustrativo en lugar de limitativo. Se contempla que algunas modificaciones y combinaciones se les ocurrirán de inmediato a los expertos en la materia, modificaciones y combinaciones que entrarán dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato para suministrar energía láser a un área de proceso sobre una superficie diana de una pieza de trabajo (109), que comprende:

5 un conjunto óptico (107) montado en un sistema de posicionamiento (108), que incluye una óptica de recepción (106A), óptica de formateo de haz y un escáner (117A), incluyendo la óptica de formateo de haz un controlador de polarización, un controlador de divergencia y un controlador de relación de aspecto;
 un sistema láser (100) adaptado para producir energía láser;
 10 un sistema de suministro de haz (103, 105, 105A) para dirigir energía láser desde el sistema láser a la óptica de recepción en el conjunto óptico;
 un controlador de rotación en una trayectoria óptica entre el sistema láser y el escáner; y
 un sistema de control (112, 113, 114), acoplado al sistema láser, el conjunto óptico, el sistema de posicionamiento y el sistema de suministro de haz, que está programado para colocar el conjunto óptico en una posición para recibir
 15 energía láser desde el sistema láser por medio del sistema de suministro de haz y, mientras que la posición del conjunto óptico permanece inalterada, para dirigir la energía láser usando el escáner hacia áreas de impacto que tienen formas nominales y ubicaciones en el área de proceso de acuerdo con un patrón; y para cada área de impacto en el patrón, para establecer la dirección, divergencia, polarización, rotación y relación de aspecto de la salida de energía láser desde el escáner, para controlar la polarización, forma y ubicación en respectivas áreas de
 20 impacto en el área de proceso de la energía láser.

2. El aparato de la reivindicación 1, en el que la energía láser comprende una pluralidad de pulsos de láser, y el patrón comprende una agrupación de áreas de impacto para correspondientes pulsos de energía láser dispuestas adyacentes entre sí dentro de una tolerancia de proceso, y en el que las formas nominales de las áreas de impacto
 25 en el área de proceso son uniformes y rectangulares o cuadradas.

3. El aparato de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que incluye una cámara (125) en el conjunto óptico (107) configurable para enfocar en la superficie diana;
 una fuente de haz indicador dispuesta para iluminar un lugar en la superficie diana en un modo de calibración;
 30 una interfaz de usuario mediante la que el escáner puede controlarse en respuesta a una imagen de la superficie diana y el lugar de haz indicador, para colocar el lugar de haz indicador en un conjunto de lugares de alineación en la superficie diana y para guardar los parámetros de escáner; y
 un procesador para traducir los parámetros de escáner en parámetros calibrados para la óptica de formateo de haz y el escáner.
 35

4. El aparato de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que las áreas de impacto para la energía láser en el patrón están caracterizadas por vectores normales de superficie nominal, en el que el sistema de control (112, 113, 114) se programa para hacer rotar la polarización para que los pulsos tengan una polarización P para los vectores
 40 normales de superficie nominal para las áreas de impacto correspondientes.

5. El aparato de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el sistema es ajustable para dirigir la energía láser usando el escáner (117A) hacia áreas de impacto en el patrón, caracterizado por vectores normales de superficie nominal inclinados en relación con una línea desde el escáner, y en el que las inclinaciones de los vectores normales de superficie nominal de al menos dos áreas de impacto dentro del área de proceso se
 45 diferencian en 60 grados o más.

6. El aparato de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que el sistema está configurado para un área de proceso que tiene una curvatura compuesta.

7. Un método para suministrar energía láser a un área de proceso en una superficie diana de una pieza de trabajo (109) usando el aparato de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, comprendiendo el método:

colocar un conjunto óptico (107) que incluye una óptica de recepción (106A), óptica de formateo de haz y un escáner (117A), en una posición para recibir energía láser desde una fuente de láser (100); y
 55 dirigir energía láser a la óptica de recepción mientras que la posición del conjunto óptico permanece inalterada, y dirigir la energía láser usando el escáner hacia áreas de impacto que tienen formas nominales y ubicaciones en el área de proceso de acuerdo con un patrón; y
 para cada ubicación en el área de proceso, establecer la dirección, divergencia, polarización, rotación y relación de aspecto de la salida de energía láser desde el escáner, para controlar la polarización, forma y ubicación en
 60 respectivas áreas de impacto en el área de proceso para la energía láser.

8. El método de la reivindicación 7, en el que la energía láser comprende una pluralidad de pulsos de láser, y el patrón comprende una agrupación de áreas de impacto para correspondientes pulsos de energía láser dispuestas adyacentes entre sí dentro de una tolerancia de proceso, y en el que las formas nominales de las áreas de impacto
 65 para la pluralidad de pulsos de láser en el área de proceso son uniformes y rectangulares o cuadradas.

9. El método de la reivindicación 7 o la reivindicación 8, que incluye:

5 calibrar un controlador (108, 113) para la posición del conjunto óptico (107), que controla los componentes ópticos para dirigir la energía láser al área de proceso para la posición del conjunto óptico para proporcionar parámetros calibrados para dirección, divergencia, polarización, rotación y relación de aspecto para cada área de impacto en el patrón.

10. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, que incluye utilizar una cámara (125) montada en el conjunto óptico, un haz indicador y una pluralidad de marcas de alineación en la pieza de trabajo (109) para calibrar una geometría del área de proceso en la superficie diana en relación con la posición del conjunto óptico, y traducir la geometría a parámetros calibrados para dirección, divergencia, polarización, rotación y relación de aspecto para cada pulso en el patrón.

15 11. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, en el que la fuente de la pluralidad de pulsos comprende un espejo de transmisión (105A), que incluye:

ajustar el espejo de transmisión para dirigir la energía láser a la óptica de recepción (106A) en el conjunto óptico (107); y
20 en el que la óptica de recepción comprende un espejo de recepción, e incluye ajustar el espejo de recepción para reflejar la energía láser en un segmento de trayectoria óptica a través de un componente de polarización controlable, un componente de relación de aspecto controlable, un componente de divergencia controlable y una óptica de escaneo controlable en el conjunto óptico.

25 12. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 11, en el que las áreas de impacto para la energía láser en el patrón están caracterizadas por vectores normales de superficie nominal, en el que dicho control de polarización incluye hacer rotar la polarización, por lo que la energía láser tiene una polarización P para los vectores normales de superficie nominal para las áreas de impacto correspondientes.

30 13. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 12, en el que las áreas de impacto para la energía láser en el patrón están caracterizadas por vectores normales de superficie nominal inclinados en relación con una línea desde el escáner (117A), y en el que las inclinaciones de los vectores normales de superficie nominal de al menos dos áreas de impacto dentro del área de proceso se diferencian en 60 grados o más.

35 14. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 13, en el que las áreas de impacto para la energía láser en el patrón están caracterizadas por vectores normales de superficie normal inclinados en relación con una línea desde el escáner, y en el que las inclinaciones de los vectores normales de superficie nominal de al menos dos áreas de impacto dentro del área de proceso se diferencian en 90 grados o más.

40 15. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 14, adaptado para granallar por láser el área de proceso, que incluye:

hacer fluir un fluido de apisonado sobre el área de proceso;
dicha energía láser comprende una pluralidad de pulsos de láser polarizados;
45 para cada pulso de láser en la pluralidad de pulsos de láser, establecer la dirección, divergencia, polarización, rotación y relación de aspecto de la salida de pulsos de láser desde el escáner (117A), para controlar la polarización, forma y ubicación en respectivas áreas de impacto, en un patrón de pulsos en el área de proceso para los pulsos de láser correspondientes;

50 en el que el patrón de pulsos comprende una agrupación de áreas de impacto dispuestas adyacentes entre sí dentro de una tolerancia de proceso, y en el que las formas nominales de las áreas de impacto para la pluralidad de pulsos de láser en el área de proceso son uniformes y rectangulares o cuadradas; y
en el que las áreas de impacto para los pulsos de láser en el patrón de pulsos se caracterizan por vectores normales de superficie nominal, en el que dicho control de polarización incluye hacer rotar la polarización para que los pulsos tengan una polarización P para los vectores normales de superficie nominal para las áreas de impacto
55 correspondientes.

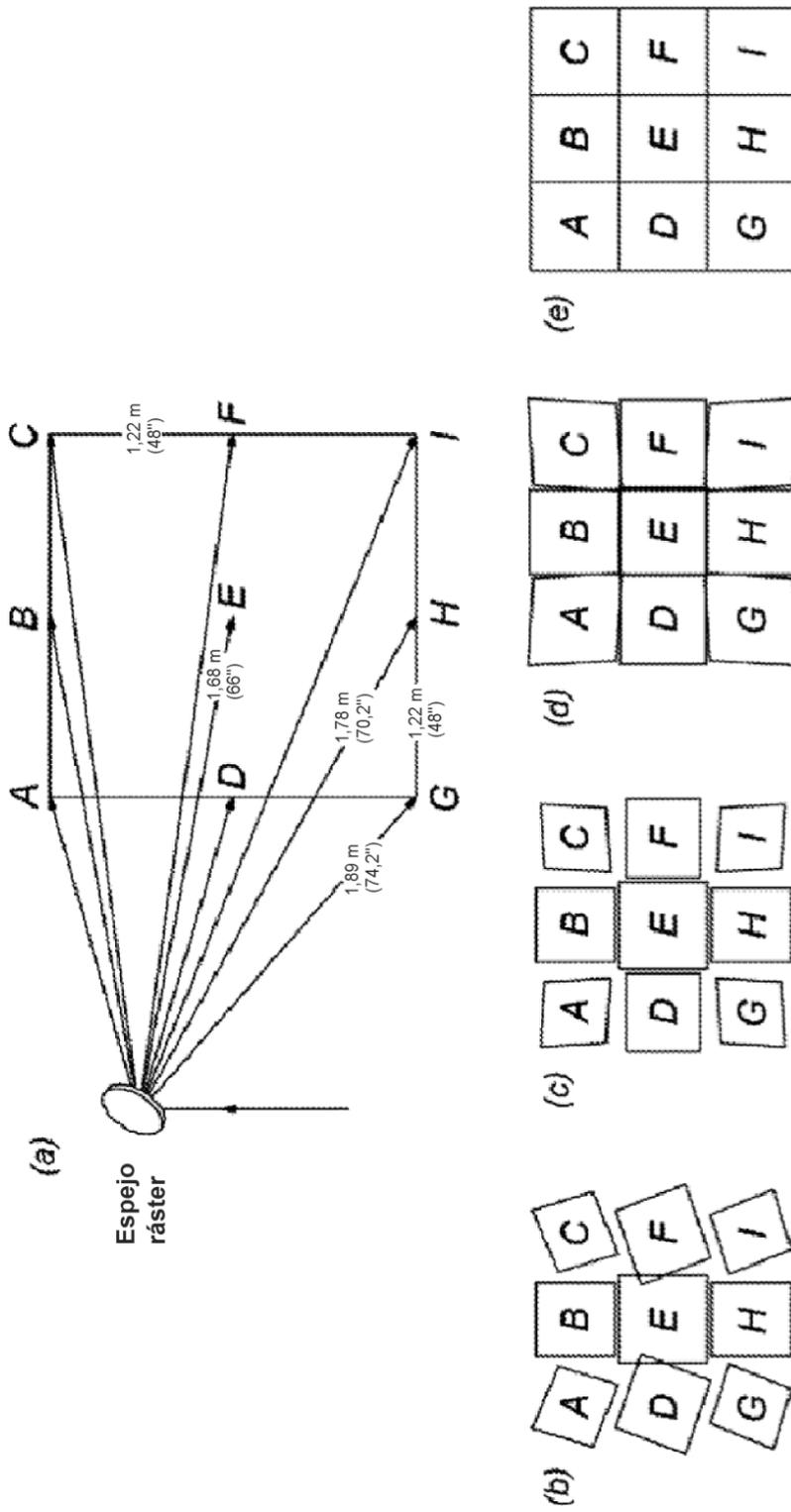


Fig. 1
TÉCNICA ANTERIOR

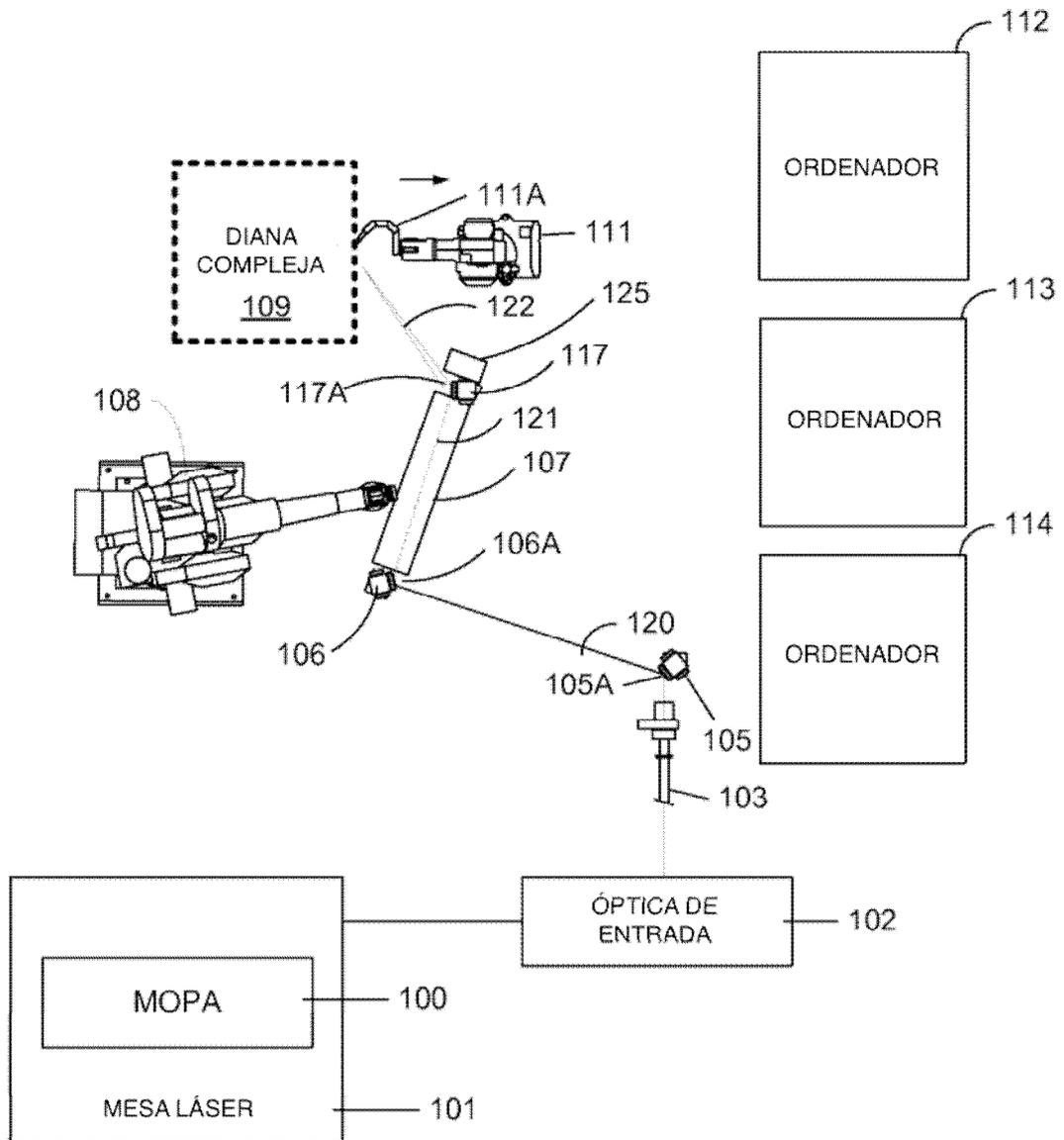


Fig. 2

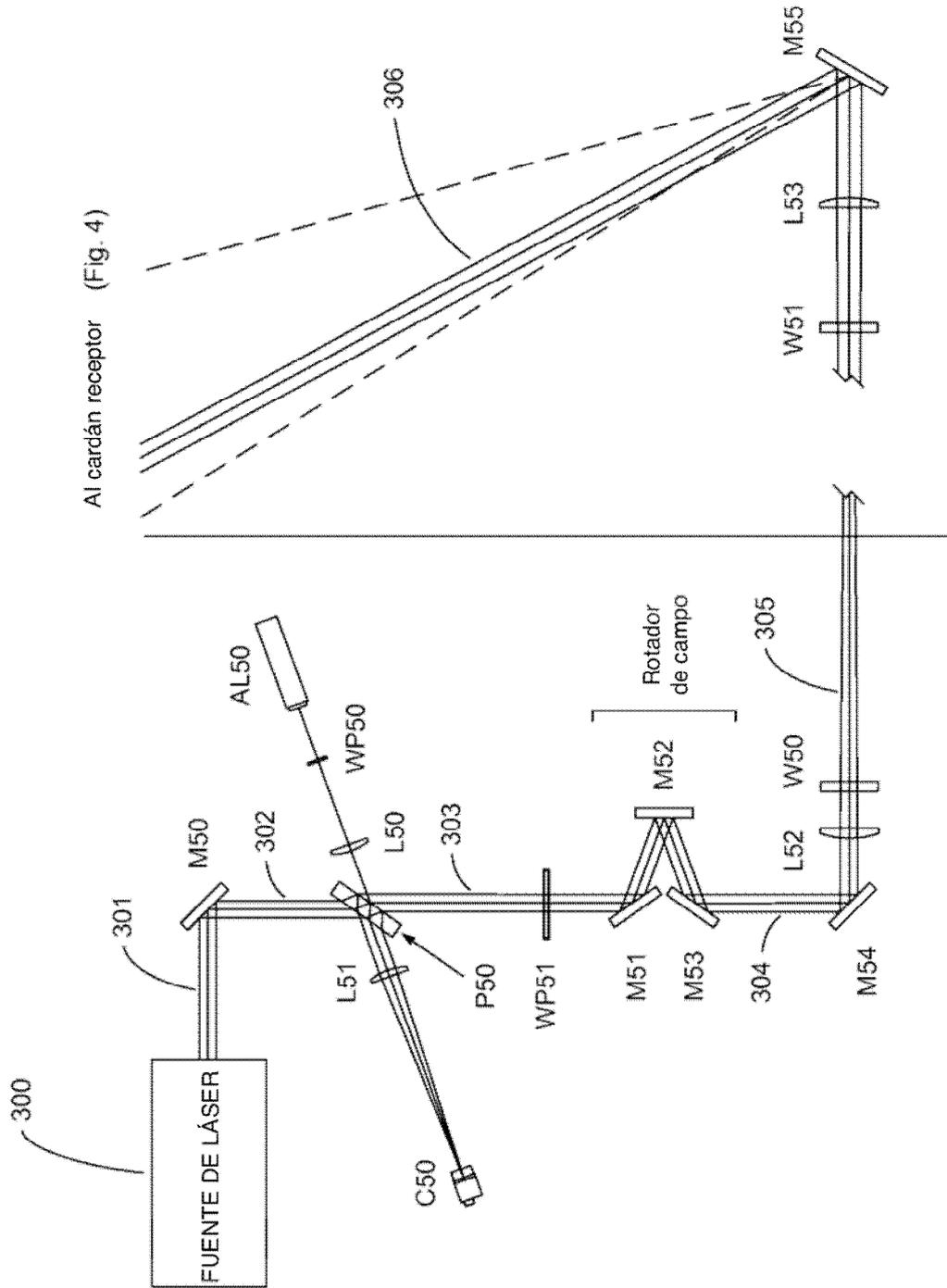
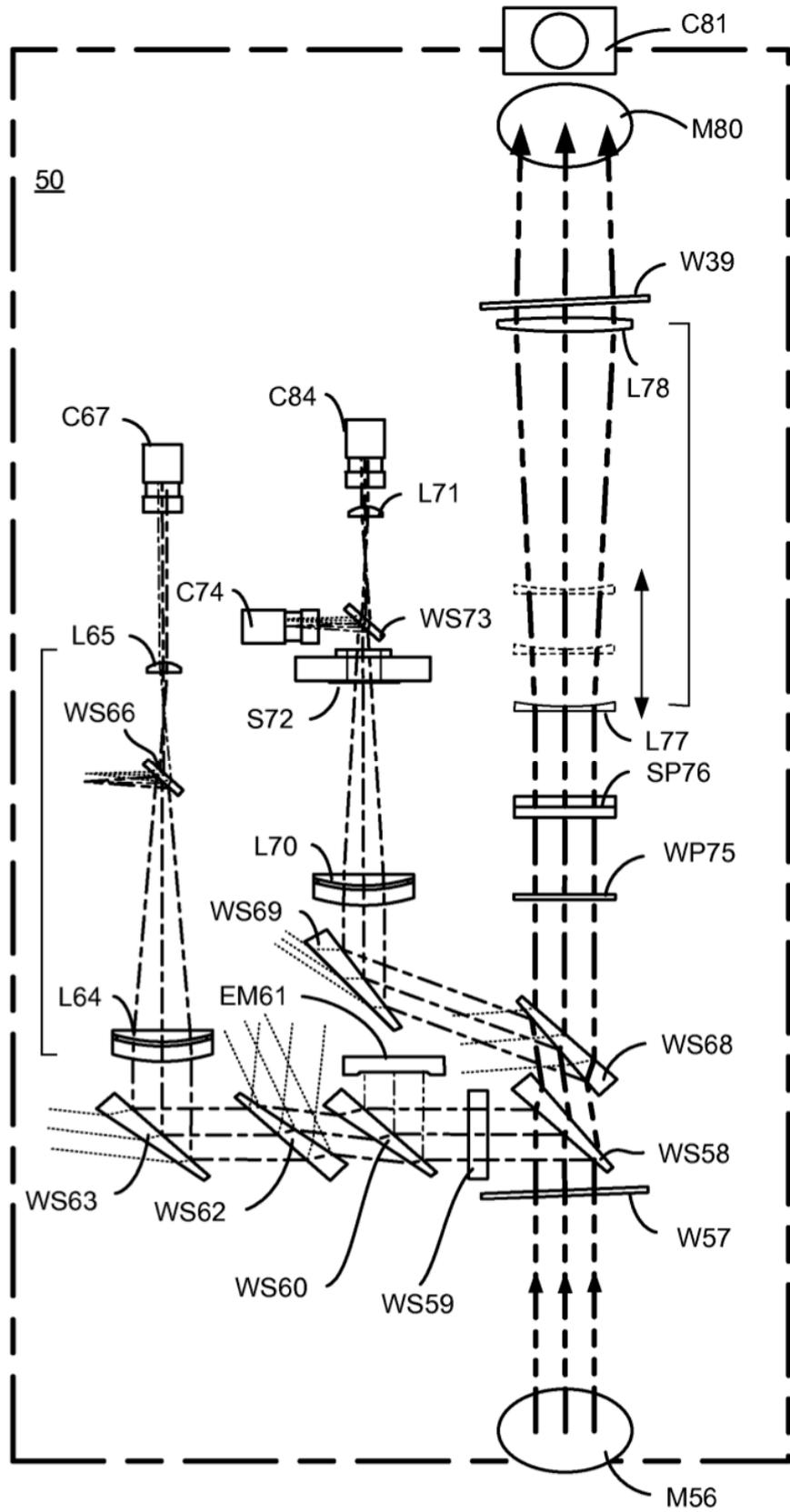


Fig. 3

Fig. 4



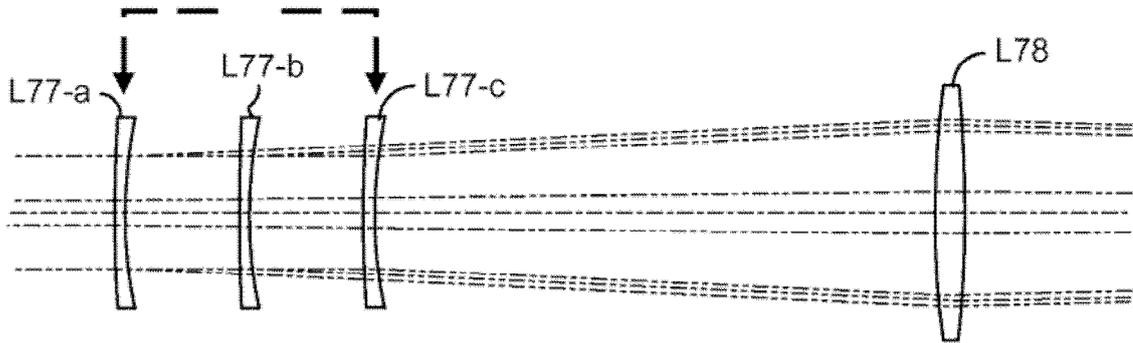
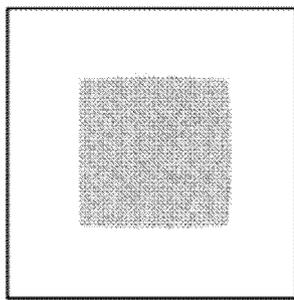
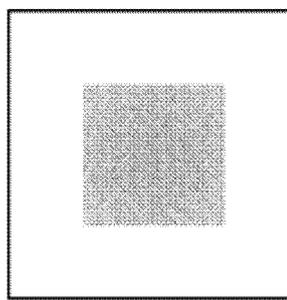


Fig. 5



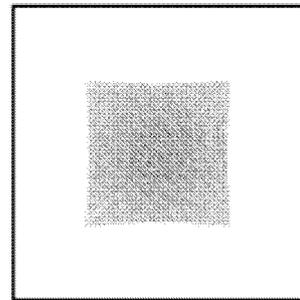
325 mm de separación
3,2 % de distorsión

Fig. 6A



275 mm de separación
~0 % de distorsión

Fig. 6B



225 mm de separación
-4,0 % de distorsión

Fig. 6C

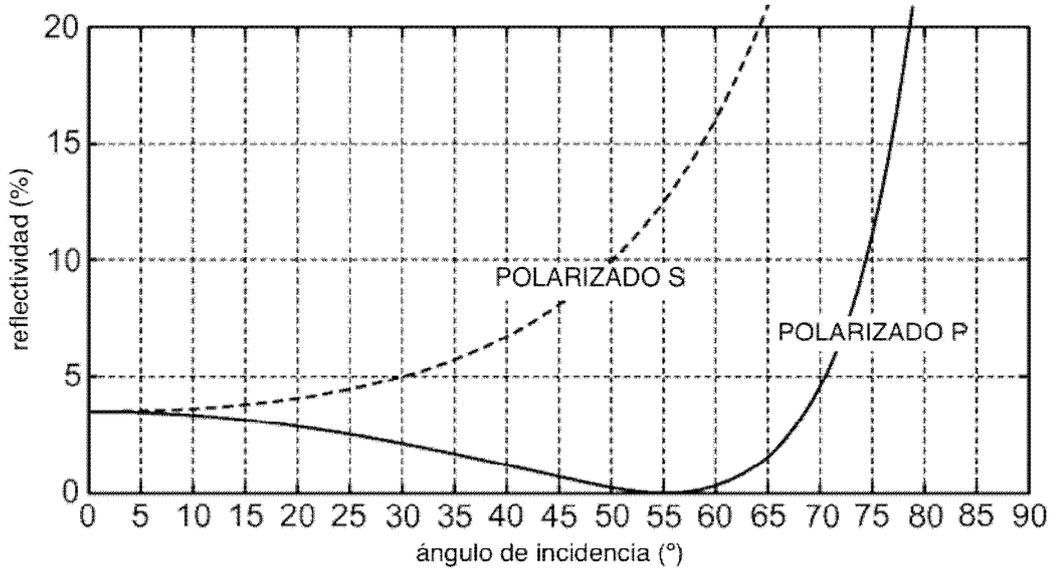
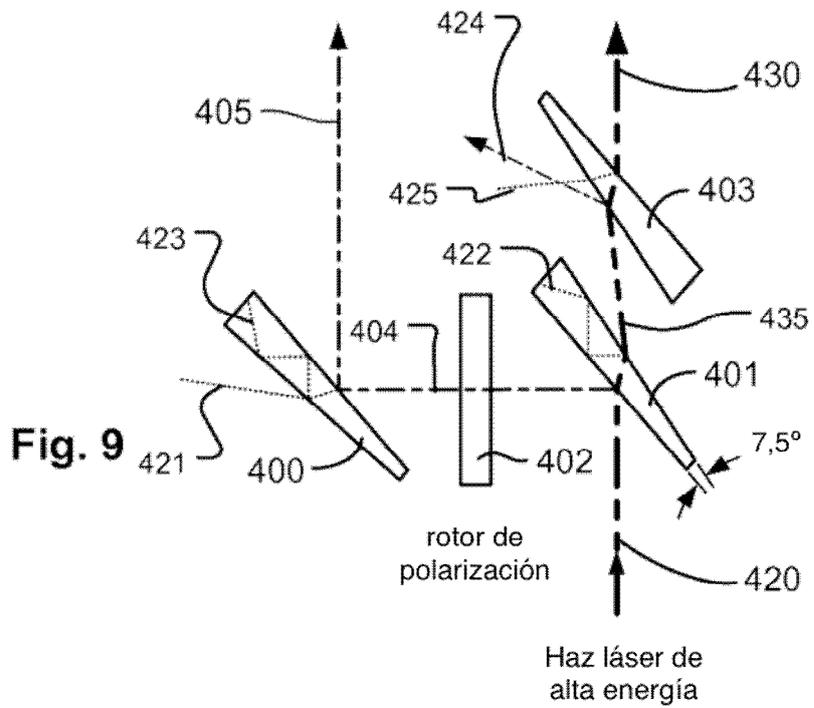
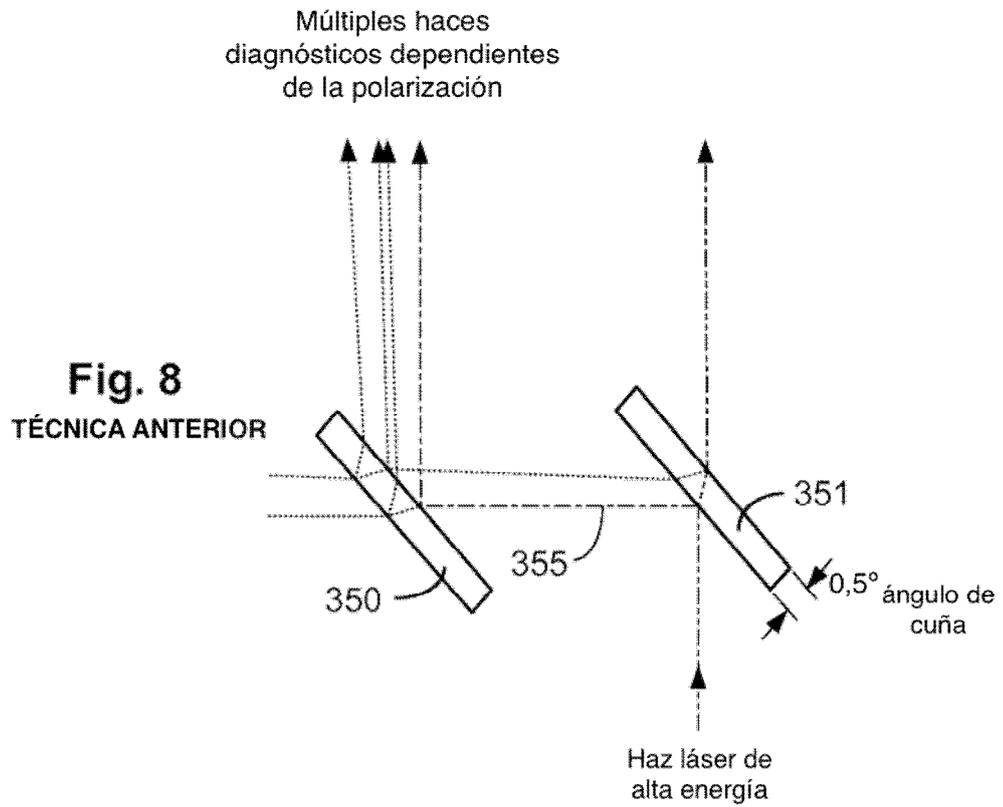


Fig. 7



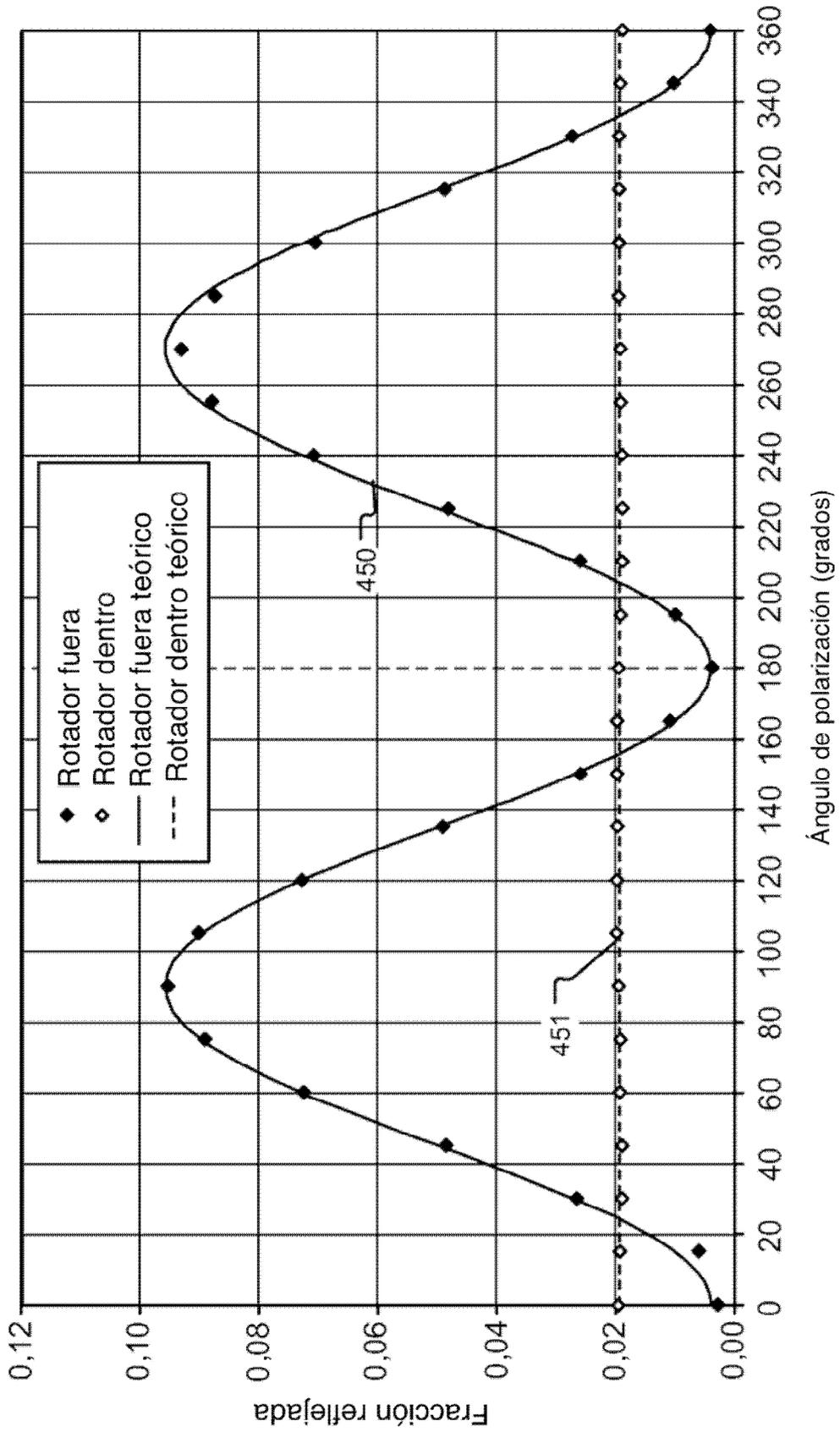


Fig. 10

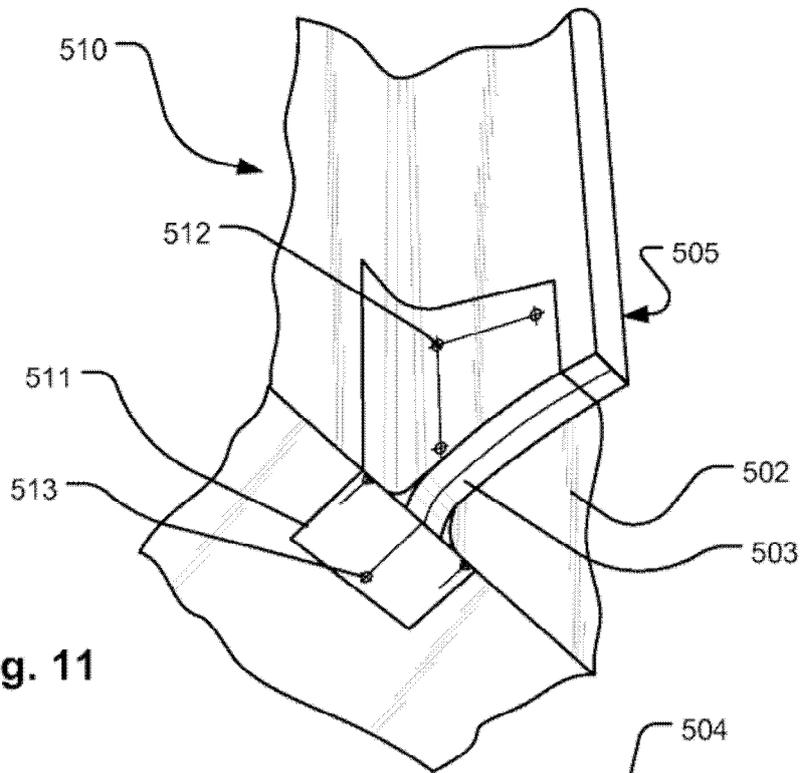


Fig. 11

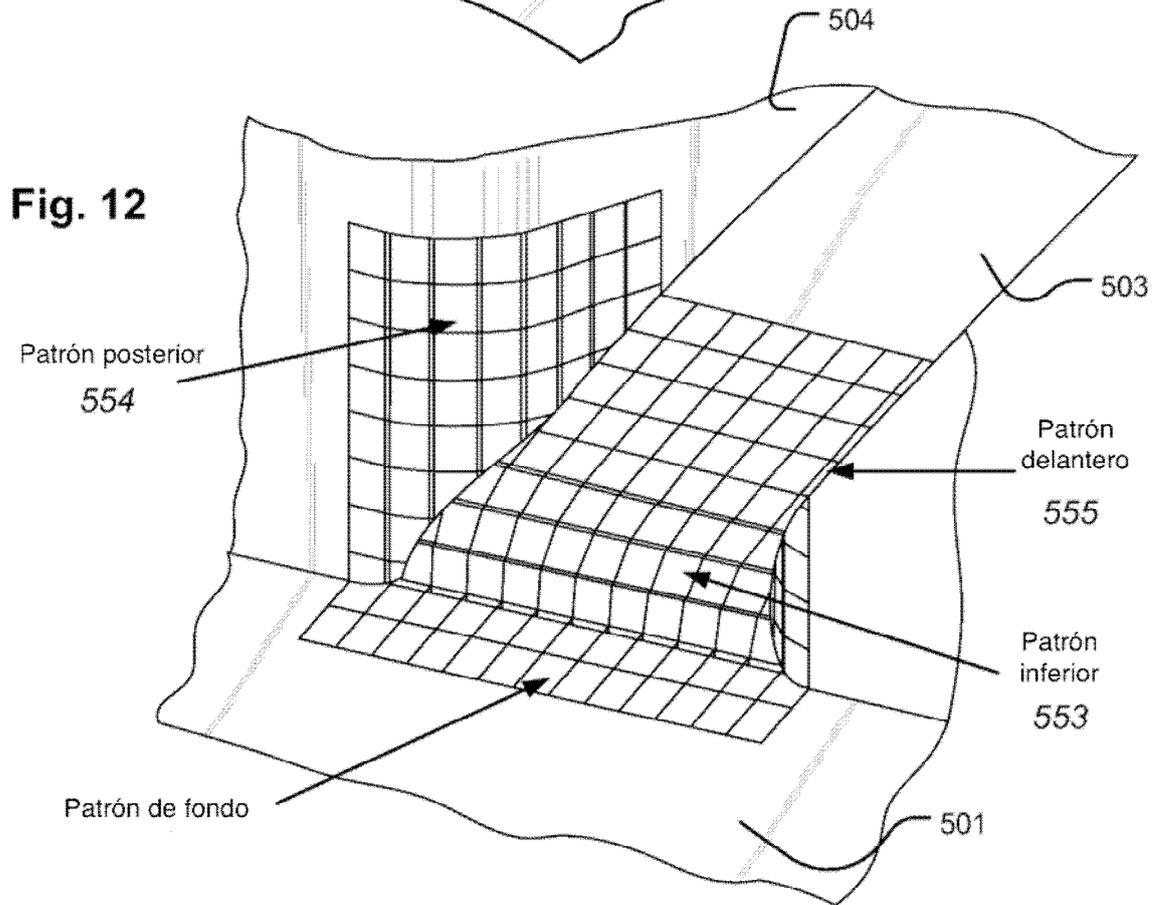


Fig. 12

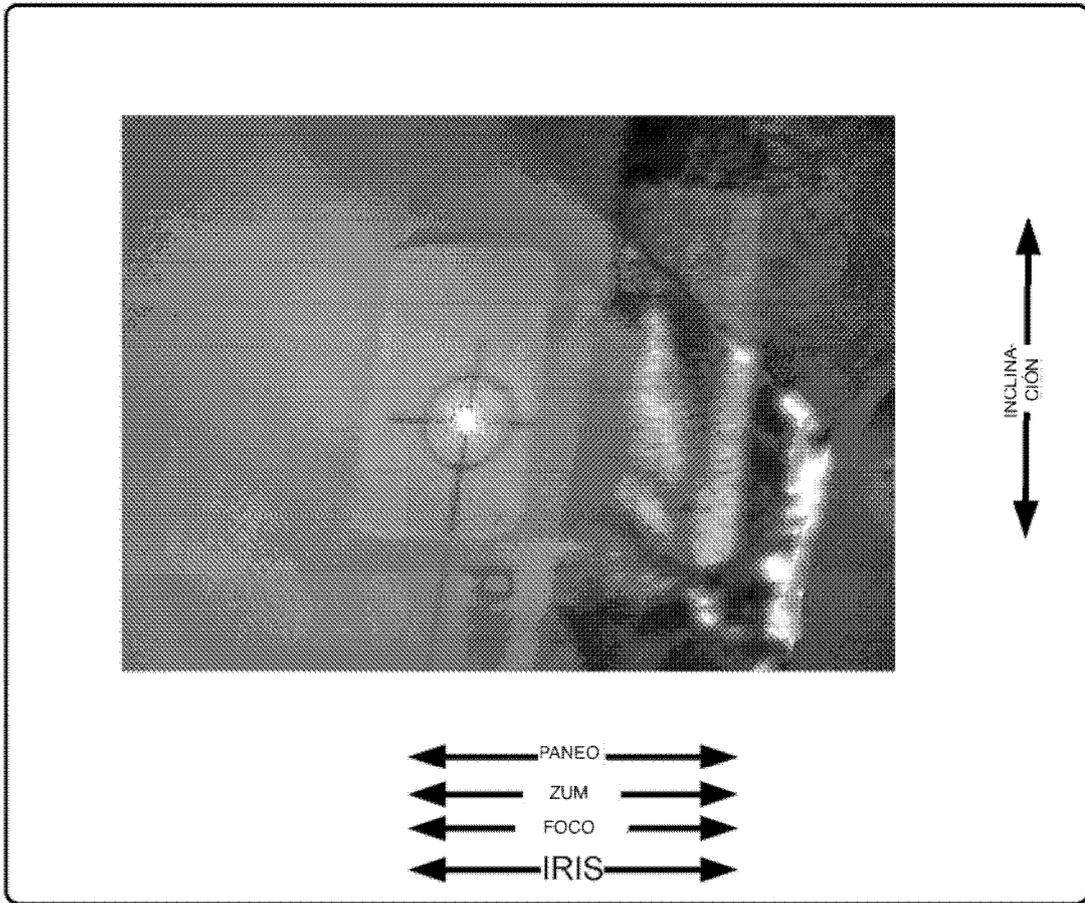


Fig. 13

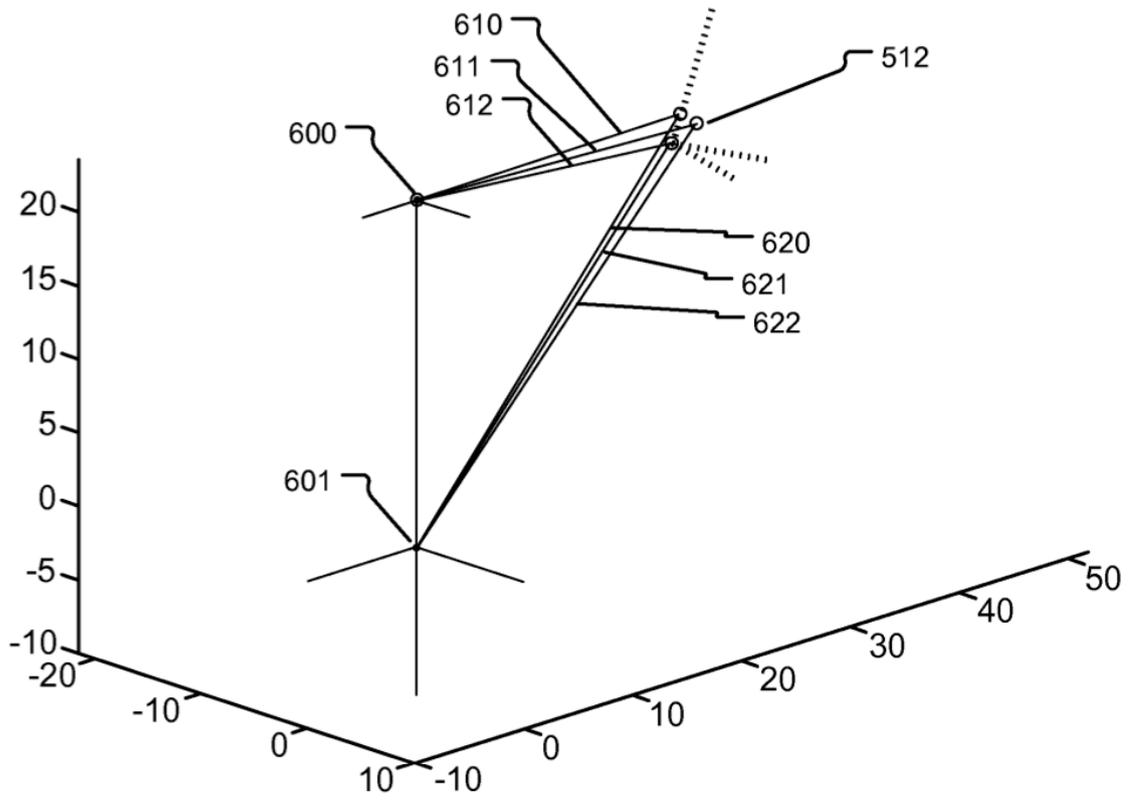


Fig. 14

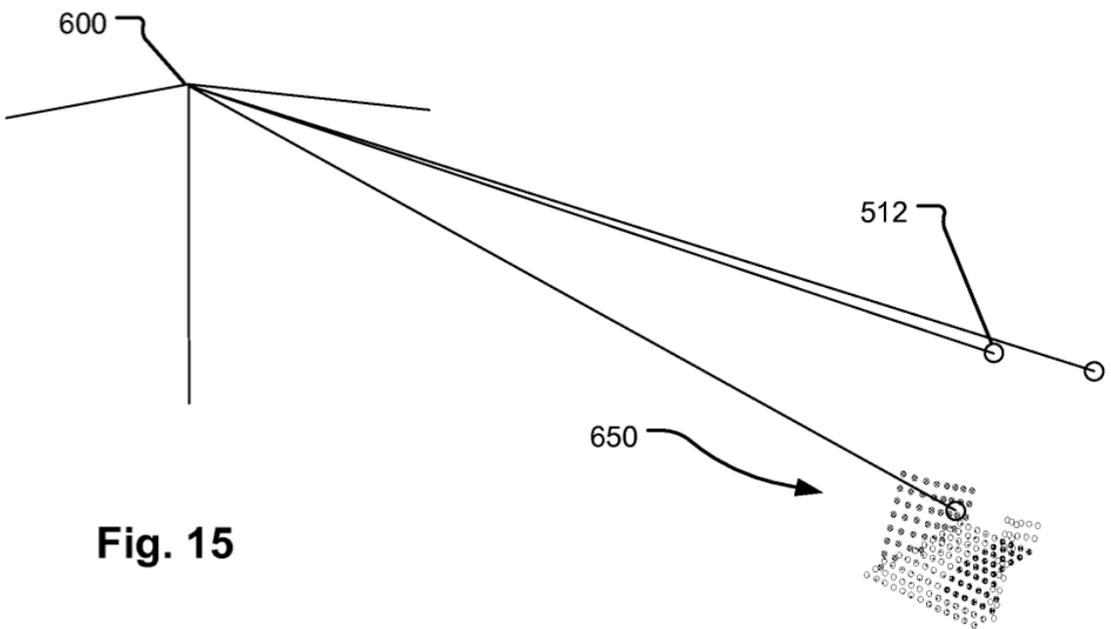


Fig. 15

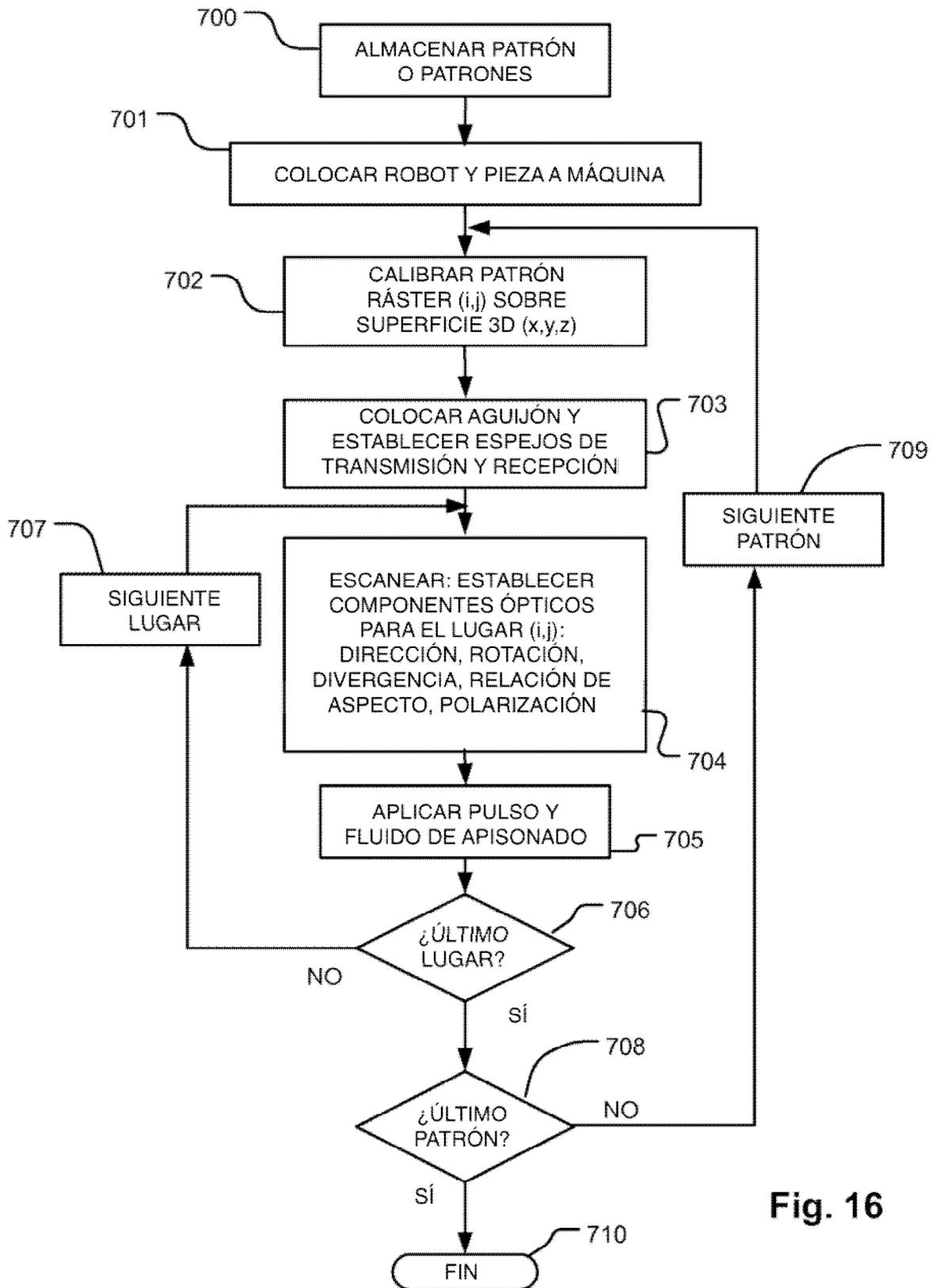


Fig. 16

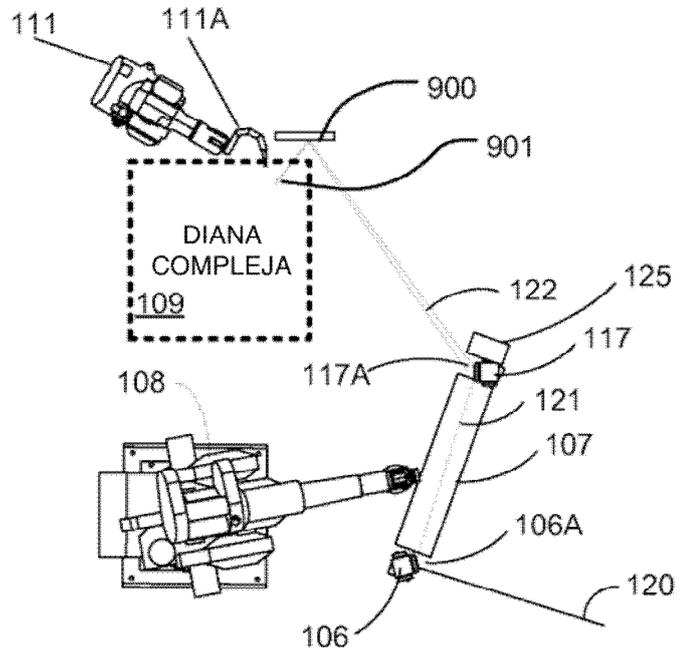


Fig. 17